creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

博士學位論文

예열공정이 적용된 롤 포밍 공정에서 고장력강판의 스프링 백 영향 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科

金 東 弘

2016年 2月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

예열공정이 적용된 롤 포밍 공정에서 고장력강판의 스프링 백 영향 연구

指導敎授 鄭 東 垣

金 東 弘

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2015年 12月

金東弘의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	강 창 남	(印)
委 員	박 상 후	(印)
委 員	한 기 봉	(印)
委 員	정 지 현	(印)
委 員	정 동 원	(印)

濟州大學校 大學院

2015年 12月

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Study on Spring-back Effects of Pre-heat Treated High Tension Steel in Roll Forming Process

Dong-Hong Kim
(Supervised by professor Dong-Won Jung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Dotor of Engineering

2015. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Dong Won Jung, Prof. of Mechanical Engineering

.....

.....

.....

.....

2015. 12.
Date

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

목 차

SUMMARY ····· i
LIST OF FIGURES ····· iii
LIST OF TABLE ····· ix

Ⅰ. 서 론 ····· 1

1. 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
2. 연구 내용 및 범위 ····· 10

Ⅱ. 실험 방법 및 장치 ····· 12

1. 실험계획법 및 스프링 백 측정 방법 ····· 12
   1) 실험계획법 ····· 12
   2) 스프링 백 및 보우량 측정방법 ····· 15

2. 성형시트 물성치 및 온도 측정 방법 ····· 20
   1) 성형시트 기계적 물성치 ····· 20
   2) 성형시트 온도측정 방법 ····· 26

3. 롤 포밍 실험 ····· 29
   1) 롤 포밍 장치 ····· 29
   2) 롤 포밍 예열 장치 및 예열 토치 ····· 35
   3) FEM 시뮬레이션 ····· 40

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰 ····· 41

1. 상온에서의 주요변수에 따른 스프링 백 값 변화 ····· 41

2. 예열공정 변수에 따른 성형 시트 온도 변화 측정 ····· 47
   1) 가스토치 불꽃 특성 분석실험 ····· 48
   2) 성형시트의 열적 특성 분석 실험 ····· 53

3. 예열공정 적용 시 스프링 백량 변화 ····· 62
   1) 성형 시트 예열에 따른 스프링 백 영향에 대한 시뮬레이션 62

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

해석 검토 ·····
(1) 유한요소모델 설계 ····· 62
(2) 시뮬레이션 해석 결과 ····· 64
2) 부탄 가스토치 ····· 76
3) 플라즈마 토치 ····· 82

4. 금속 소재 성형시트의 스프링 백 값 영향 연구 ····· 88
1) 티타늄 합금 판재 ····· 89
2) 알루미늄 과 마그네슘합금 소재 판재 성형 ····· 94

5. 복잡한 단면을 가진 롤 포밍 공정에서의 스프링 백 현상 시뮬레이션 해석검토 ····· 96
1) 고장력 강관 FEM 시뮬레이션 해석 ····· 96
(1) 유한요소모델 설계 및 1차 해석 ····· 96
(2) 2차 시뮬레이션 해석 결과 ····· 99
2) 30-Pass 닫힘 단면 형상의 롤 포밍 해석 ····· 101

결 론 ····· 107

참고문헌 ····· 110

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

SUMMARY

In this study, roll forming process studied the new convergence process that combines the pre-heating process. The forming shape of the roll forming process is V-shape and materials of forming sheet are high tensile steel, aluminum alloy, magnesium alloy and titanium alloy. Roll forming process applied to the pre-heating process was used to the Taguchi's experimental method and forming sheet was pre-heated using a butane gas torch and a plasma gas torch.

Roll forming process experiment at room temperature used high tension steel (SPFH 590) and variables of the roll forming experiment are forming speed and roll gap. Forming speed has a small influence to spring-back phenomenon. But the roll gap affects a greater influence to her spring-back phenomenon more than forming speed. Temperature characteristics experiment of pre-heating devices unit was used for a butane gas torch and a plasma gas torch. The temperature of the flame of gas torch was measured using an infrared thermal imaging camera. The length of the flame was calculated by converting the temperature data from the infrared thermal imaging camera. After identifying the characteristics of the flame, distance between the pre-heating device and the forming sheet determined in accordance with the pre-heating device.

Roll forming process applied to the pre-heating process was evaluated for formability by the FEM simulation and roll forming experiment. Method of FEM simulation was thermal-structure interaction analysis applied to moving heat source that moved along the center line of the forming sheet. And spring-back analysis was performed static analysis using thermal-structure interaction analysis result. As a result, the spring-back value is measured at the measuring point of the forming sheet according to the various temperatures. Spring-back effect of the pre-heating temperature was characterized as not significant. The roll forming experiment was calculated SN ratio obtained by using the spring-back value. The main effect for SN ratios is derived by using the SN ratio.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

According to the analysis results of the formed sheet, spring-back effect of the pre-heating process was characterized as not significant. However, in ANOVA results, preheated forming sheet has been reduced to the buckling phenomenon. And forming the sheet is formed into a consistent cross-section shape, so product quality is determined to be improved.

The material of the metal sheet experiment is a titanium alloy, magnesium alloy and aluminum alloy. Experimental method of titanium alloys is equal to the high tension steel experiment. Titanium alloys were lower than the high strength steel formability. Experiment of an aluminum alloy and a magnesium alloy is applied to Taguchi experimentation. But experimental results of the alloy sheets were generated cracks. Because of the time for supplying thermal energy by gas torch is short.

FEM simulation of the roll forming process analyzes the close cross-section shape and the tube shape process. Analysis of the tube shape was obtained the spring-back value corresponding to the number of roll passes. Analysis of the close cross-section was analyzed formability according to the roll gap.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Part of various automobile using roll forming process ; (a) compact car (b) midsize vehicle (c) sport utility vehicle ····· 2

Fig. 2 Roll formed product in automobile part ····· 2

Fig. 3 Roll forming process ; (a) roll pass (b) installation Process ····· 3

Fig. 4 (a) Spring-back in section, (b) comparison of section shapes, (c) manufactured products ····· 6

Fig. 5 Flower pattern of upper member ; (a) type A, (b) type B ····· 6

Fig. 6 Block diagram of a design process of roll forming using CAD and CAE ····· 9

Fig. 7 Function relationship of SN ratio ····· 13

Fig. 8 Definition of the spring-back angle ····· 17

Fig. 9 Measuring point on the forming sheet ····· 18

Fig. 10 Digital protractor(Cemred, GR82302R) ····· 18

Fig. 11 Deviations from straightness ····· 19

Fig. 12 Definition of longitudinal bow value ····· 19

Fig. 13 Specimen for tensile test ····· 20

Fig. 14 True stress-true strain curve - HTS ····· 22

Fig. 15 True stress-true strain curve - Ti alloy ····· 22

Fig. 16 True stress-true strain curve - Al alloy ····· 23

Fig. 17 True stress-true strain curve - Mg alloy ····· 23

Fig. 18 Stress-strain curve at 50℃ - HTS ····· 24

Fig. 19 Stress-strain curve at 150℃ ····· 24

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 20 Stress-strain curve at 250℃ ····· 25
Fig. 21 Thermo-graphic camera; (a) FLUKE (Ti32), (b) FLIR (T400) ··· 27
Fig. 22 Temperature measurement system for torch flame ····· 27
Fig. 23 Temperature measurement system for forming sheet ····· 28
Fig. 24 Design drawing of roll forming machine - side view ····· 30
Fig. 25 Design drawing of roll forming machine - top view ····· 30
Fig. 26 Design drawing of roll forming machine - front view ····· 31
Fig. 27 Velocity test of roll forming machine ····· 31
Fig. 28 Roll forming machine (3-Pass) ····· 32
Fig. 29 Design drawing of roll dies about 3-Pass ····· 33
Fig. 30 Definition of the roll gap ····· 34
Fig. 31 Apparatus for pre-heating in roll forming machine ····· 36
Fig. 32 Torch apparatus for portable butane gas chamber ····· 37
Fig. 33 Plasma gas torch ····· 37
Fig. 34 Constitution of plasma torch ····· 38
Fig. 35 Inverter TIG arc welder ····· 38
Fig. 36 Pre-heating system for plasma torch ····· 39
Fig. 37 Roll forming process in FEM simulation ····· 40
Fig. 38 Spring-back value according to reference point(Gap : 0mm) ···· 42
Fig. 39 Spring-back value according to reference point(Gap : 1mm) ···· 43
Fig. 40 Spring-back value according to reference point(Gap : 2mm) ···· 43
Fig. 41 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 20) ····· 44

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 42 Spring back value according to reference point(Forming velocity : 40) ····· 44

Fig. 43 Spring back value according to reference point(Forming velocity : 60) ····· 45

Fig. 44 Spring back value according to reference point(Forming velocity : 80) ····· 45

Fig. 45 Spring back value according to reference point(Forming velocity : 100) ····· 46

Fig. 46 Distribution of flame temperature[unit: ℃]; (a) butane gas torch (b) plasma gas torch ····· 49

Fig. 47 Flame temperature Distribution of butane torch according to flame length ····· 50

Fig. 48 3D-IR image of flame of butane torch ····· 50

Fig. 49 Flame temperature Distribution of plasma torch according to flame length (Ar : 10 l/min, Power : 125A) ····· 51

Fig. 50 3D-IR image of flame of plasma torch (Ar : 10 l/min, Power : 125A) ····· 51

Fig. 51 Flame temperature Distribution of plasma torch according to flame length (Ar : 15 l/min, Power : 100A) ····· 52

Fig. 52 3D-IR image of flame of plasma torch (Ar : 15 l/min, Power : 100A) ····· 52

Fig. 53 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 30mm) ····· 55

Fig. 54 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 50mm) ····· 55

Fig. 55 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 70mm) ····· 56

Fig. 56 Temperature distribution on forming sheet using butane gas 56

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

torch (pre-heating distance : 90mm) ·····

Fig. 57 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 5mm) ····· 57

Fig. 58 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 10mm) ····· 57

Fig. 59 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 15mm) ····· 58

Fig. 60 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 20mm) ····· 58

Fig. 61 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heation distance : 25mm) ····· 59

Fig. 62 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 30mm) ····· 59

Fig. 63 Thermo-graphic image temperature distribution of forming sheet using butane gas torch(Distance : 3mm, Velocity : 20), (a) FLIR (T400), (b) FLUKE (Ti32) ····· 60

Fig. 64 3D-IR image of flame of forming sheet(butane torch) ····· 60

Fig. 65 Thermo-graphic image temperature distribution of forming sheet using plasma gas torch(Distance : 0.5mm, Velocity : 20), (a) FLIR (T400), (b) FLUKE (Ti32) ····· 61

Fig. 66 3D-IR image of flame of forming sheet(plasma gas torch) ····· 61

Fig. 67 The 3-Pass roll forming process ····· 63

Fig. 68 Shape and size of pre-heating sources. [Unit : mm] ····· 64

Fig. 69 Measuring point on the forming sheet ····· 65

Fig. 70 Layer definition of forming sheet ····· 65

Fig. 71 Temperaure distribution of forming sheet(500℃) ····· 66

Fig. 72 Cumulative distance of forming sheet according to pre-heating(1, 66

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4 layer, Point 2) ·····

Fig. 73 von-Mises stress according to 1, 4 layer; (a) Point 1, (b) Point 2, (c) Point 3 ····· 68

Fig. 74 Thermal stress according to measurement point; (a) 1 layer, (b) 4 layer ····· 69

Fig. 75 von-Mises stress of 2 layer according to measurement point ··· 70

Fig. 76 Thermal stress according to sheet layer at 2 point; (a) 1 layer, (b) 4 layer ····· 70

Fig. 77 Equipvalent strain according to 1, 4 layer; (a) Point 1, (b) Point 2, (c) Point 3 ····· 72

Fig. 78 Equipvalent strain of 2 layer according to measurement point ··· 73

Fig. 79 Thermal strain at 2 point; (a) 1 layer, (b) 4 layer ····· 73

Fig. 80 Thermal strain according to measurement point; (a) 1 layer, (b) 4 layer ····· 74

Fig. 81 Spring back value according to measurement point ····· 75

Fig. 82 SN ratio for experimental (butane gas torch) ····· 78

Fig. 83 Forming sheet according to orthogonal arrays (butane gas torch) ····· 79

Fig. 84 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (plasma gas torch) ····· 79

Fig. 85 SN ratio of bow value (butane gas torch) ····· 81

Fig. 86 Forming sheet according to orthogonal arrays (plasma gas torch) ····· 84

Fig. 87 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (plasma gas torch) ····· 84

Fig. 88 SN ratio for experimental (plasma gas torch) ····· 85

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 89 SN ratio of bow value (plasma gas torch) ····· 86
Fig. 90 SN ratio for experimental (Ti alloy) ····· 90
Fig. 91 Forming sheet according to orthogonal arrays (Ti alloy) ····· 91
Fig. 92 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (Ti alloy) ····· 91
Fig. 93 SN ratio of bow value (Ti alloy) ····· 93
Fig. 94 Fractured forming sheet(left : Al alloy, rignt : Mg alloy) ····· 95
Fig. 95 Crack growth in Al alloy sheet ····· 95
Fig. 96 Crack growth in Mg alloy sheet ····· 95
Fig. 97 Roll forming process of 12-Pass ····· 97
Fig. 98 Definition of gap distance in tube forming ····· 97
Fig. 99 Final cross-section in Pass-12 ····· 98
Fig. 100 von-Mises stress distribution in the tube ····· 98
Fig. 101 Roll forming process of 15 Pass ····· 99
Fig. 102 von-Mises stress in the tube ····· 100
Fig. 103 Compare with 12 Pass and 15 Pass - final cross-section ····· 100
Fig. 104 Roll forming process of 30 Pass ····· 102
Fig. 105 Deformation shape and von-Mises stress distribution according to step time - roll gap : 0.2mm ····· 103
Fig. 106 Deformation shape and von-Misess stress distribution according to step time - roll gap : 1.0 mm ····· 104
Fig. 107 Deformation shape and von-Mises stress distribution according to step time - roll gap : 2.0 mm ····· 105
Fig. 108 Final forming cross-section according to rolll gap ····· 106

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

LIST OF TABLES

Table 1. Orthogonal arrays of Taguchi $L^9(3^4)$ ····· 15

Table 2 Mechanical properties of forming sheets ····· 21

Table 3 Part names of roll forming machine ····· 32

Table 4 Range of experiment variable ····· 42

Table 5 Experiment condition of butane and plasma gas torch ····· 54

Table 6 Mechanical properties of POSTEN 60 at room temperature ···· 63

Table 7 Three factors and three levels (butane gas torch) ····· 77

Table 8 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (butane gas torch) ····· 77

Table 9 Factors effecting the spring back (butane gas torch) ····· 78

Table 10 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (butane gas torch) ····· 80

Table 11 Factors effecting the bow (butane gas torch) ····· 81

Table 12 Four factors and three levels (plasma gas torch) ····· 83

Table 13 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (plasma gas torch) ····· 83

Table 14 Factors effecting the spring back (plasma gas torch) ····· 85

Table 15 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (plasma gas torch) ····· 87

Table 16 Factors effecting the bow (plasma gas torch) ····· 87

Table 17 Three factors and three levels (Ti alloy) ····· 88

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 18 Factors effecting the spring back (Ti alloy) ····· 89

Table 19 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (Ti alloy) ····· 90

Table 20 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (Ti alloy) ····· 92

Table 21 Factors effecting the bow (Ti alloy) ····· 93

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 필요성

최근에는 높은 원자재 가격 상승과 소비자의 기호 수준이 향상되어, 제조 산업이 고급 기술(High-tech)화 되어 가고 있다. 점차 제조 산업 시장(Industrial market)에서는 고성능의 제품을 요구하고 있으며, 생산된 제품에 대하여 높은 에너지 효율성과 편리성 및 신뢰성 등 많은 기능적인 사항을 평가가 되고 있다. 이러한 산업 특성을 바탕으로, 특히 자동차 산업에서는 자동차의 연비 향상 및 안전성 확보를 위해 많은 연구를 수행하고 있으며, 최근에는 차체의 다른 재질을 적용함으로서 자동차의 연비향상 및 안정성 확보를 하려는 경향을 보인다 [1]. 기존 재질에서 대체 가능한 차제 재질은 고장력 강판(High tension steel sheet, HTS), 알루미늄 판재(Aluminum sheet) 및 고분자 소재(Polymer material) 등이 고려되고 있다 [2]. 위 소재 중 고장력 강판은 강한 강성으로 인하여 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 자동차의 많은 차체부품에 적용 및 생산되고 있으며, 고장력 강판을 사용하여 경량화가 및 고강도 제품 개발이 활발히 진행되고 있다 [3].

하지만 고장력 강판은 높은 항복강도와 낮은 연신율의 기계적인 특성으로 인하여, 일반 강판보다 판재 성형에 어려운 점이 많다. 기존에는 고장력 강판을 성형 시 프레스 가공법(Press forming)을 많이 사용하였다. 그러나 판재 성형성(Formability) 확보의 어려움 및 금형의 수명 단축 등으로 인한 단점으로, 이를 대처할 가공법으로 롤 포밍 공정(Roll forming process)으로 대체되고 있다 [4]. 판재 성형 공정중 하나인 롤 포밍 공정(Roll forming process)은 생산 시 적은 원자재 손실과 높은 에너지 효율성을 가지며, 초 경량화 및 고강도 제품을 만들기에 적합한 공정이다. 롤 포밍 공정은 프레스 공정과 다르게 Fig. 3과 같이 상, 하 또는 좌, 우로 쌍으로 이루어진 다수의 롤 금형을 활용하여, 점진적인 소성변형을 이용한 성형법이다. 그러므로 롤 포밍 공정은 높은 강성을 갖는 고강도 강판을 이용한 제품 성형에 유용한 성형공정이다 [5].

일반적으로 롤 포밍 공정은 형상이 일정하고 길이가 긴 제품을 대량으로 생산할 때 유용한 성형 방법으로, 최대 생산 속도는 185 m/min 까지 가능하지만, 롤 금형에 무리를 주지 않기 위해 일반적으로 30-55 m/min의 속도로 생산한다. 롤 포밍 공정은 롤 금형의 설치시나 완성된 제품 이송 시에만 인력이 필요하고, 그 외의 모든 공정은 자동화되었기 때문에 작업 인력을 대폭 줄일 수 있다. 또한 프레스 공정과 달리 롤 금형의 교체시간 및 롤 포밍 공정

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

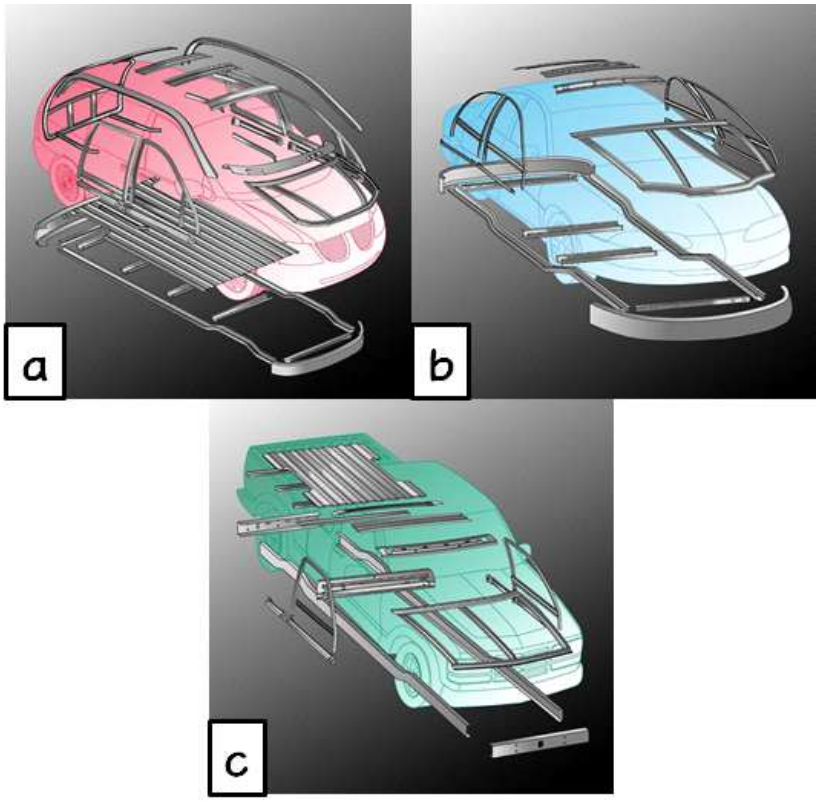


Fig. 1 Part of various automobile using roll forming process ; (a) compact car (b) midsize vehicle (c) sport utility vehicle

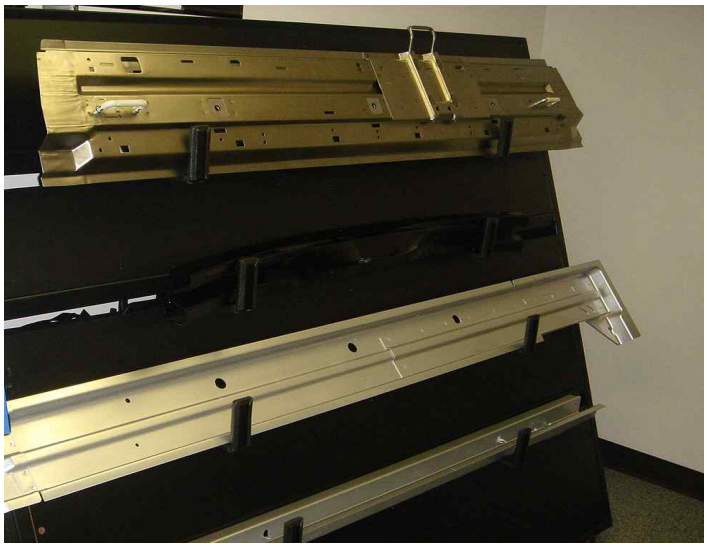


Fig. 2 Roll formed product in automobile part

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

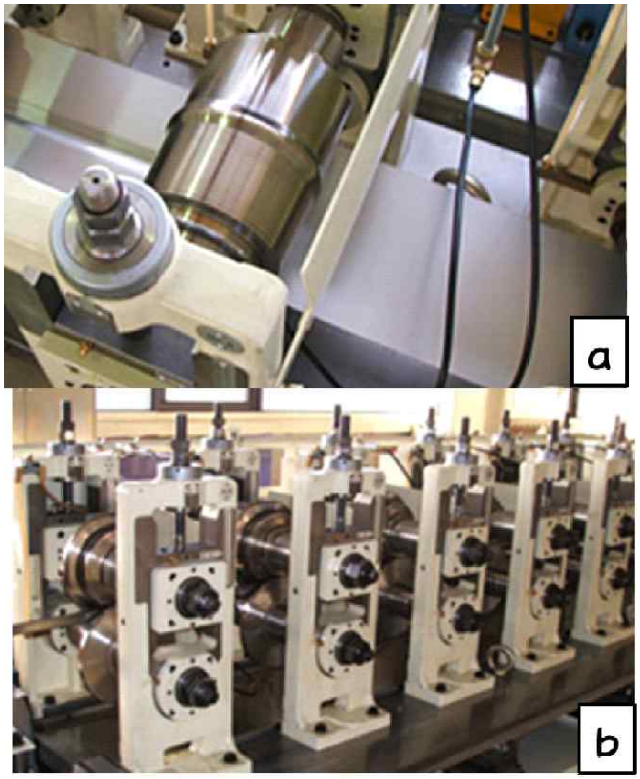


Fig. 3 Roll forming process ;
(a) roll pass (b) installation process

조건 변경을 위한 시간이 많이 소요되지 않는다. 소재를 공급하는 코일로부터 연속적인 생산이 가능하며 제품의 길이 조절이 쉬워서, 프레스 공법보다는 소량 다품종 생산에 유리하다.

경제적인 측면에서 롤 포밍 공정은 90% 이상의 소재 회수율로 80% 내외의 소재 회수율을 가지는 프레스 공정 보다 10% 정도 높은 재료비 절감의 효과가 있으며, 점진적인 성형으로 인하여 롤 금형 마모의 정도가 낮기 때문에, 유지보수비용이 적게 든다는 장점이 있다 [6]. 이러한 이유로 금형 수명 및 제품 정밀도는 다른 판재 성형 공정보다 높다. 또한 단면이 일정한 제품에 대하여 경제적으로 연속적인 생산이 가능하여, 최근 건축, 선박, 자동차부품 제조 기술에 확대 적용되고 있다 [7].

롤 포밍 공정을 이용한 제품 생산 시 고려할 공정 변수는 성형판재의 특성(Characteristic of forming sheet), 롤 금형간의 간격(Roll gap), 롤 패스(Roll pass)간의 거리(Horizontal distance to the previous roll stand), 롤 포밍 속도(Roll forming velocity), 스프링 백(Spring-back)등의 많은 변수를 고려해야 한다. 위의 많은 변수를 고려한 종합적인 분석으로 성형판재의 변형거

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

동을 분석하여 최적 성형이 가능하다. 그러므로 롤 포밍 공정을 통한 제품 생산 시 많은 공정 변수를 고려해야 된다.

하지만 국내 여러 중소기업에서는 위의 롤 포밍 공정 변수에 대한 체계적인 기술축척이 안되어, 이론적인 접근보다는 경험적 방법(Heuristic method) 또는 시행착오(Trial and error)로 제품 개발하는 경우가 많다. 이러한 이유로 중소기업에서는 건축 자재, 가구 부속품, 산업 설비용품 등 저부가가치의 제품을 주로 생산하고 있으며, 성형 판재의 낭비 및 제품 개발 기간이 많이 소비되어 고부가가치 제품생산 및 시장 경쟁력에 한계를 보이고 있다. 국내 롤 포밍 관련 중견기업들은 생산 제품 구조에 따라 10~20대 이상의 제조라인을 설치가 되어 있으며, 파이프(Seam pipe) 및 관(Tube)등 대량 생산이 가능한 제품들을 생산하고 있다. 자체 기술개발과 선진 외국기술 도입 등을 통하여 체계적인 생산 시스템 구축에 많은 연구개발이 시도되고 있다.

롤 포밍 공정을 개발을 위한 국내의 연구 현황은 2000년도 전후로 컴퓨터를 활용한 유한요소법(Finite Element Method, FEM)기법이 적용된 소프트웨어의 시뮬레이션 해석 기술 및 CAD(Computer-Aided Design)기술을 활용한 롤 포밍 공정 설계 기술이 도입되었다. 위의 기술을 바탕으로 롤 포밍 제품 성형과정을 시뮬레이션을 하여, 롤 포밍 공정 성형 시 발생 가능한 문제점을 예측을 하였다. FEM 시뮬레이션 해석(FEM simulation analysis)기법을 통하여 롤 포밍 제품 품질 향상 및 제품의 정밀도와 개발기간이 단축 등 제한조건들이 개선되었다. FEM 시뮬레이션 해석을 바탕으로 김영인 등 은 유한요소법을 이용한 롤 포밍 공정에서의 버클링 해석을 하였으며, 버클링 현상에 대하여 수치 해석 해와 실험값을 비교를 통하여 수치적 해의 정확성을 검증하였다 [8]. 김현종 등 은 롤 포밍 공정을 위한 박판 미세구조물 기초 연구를 수행하였고, 롤 포밍에 의한 U, V 형상을 갖는 내부구조물의 응력해석과 변형률 해석 그리고 반력(Tool force)에 대하여 해석하였다. 차후 연구로는 롤 금형 설계 및 제작과 롤 성형기 개발을 통한 롤 성형 시스템 구축을 하여 기초실험을 수행하였다 [9].

2005년도 전후에는 롤 포밍 공정설계를 바탕으로, 제품 개발에 대한 많은 연구가 진행되었다. 이홍국 등은 다단 슬라이드 레일 성능평가방법의 표준화에 관한 연구를 하였으며, 인출력 시험을 통해 초기 실험 결과 값으로 다단 슬라이드 레일에 적용할 하중을 선정하였다. FEM 상용 프로그램을 사용하여 다단 슬라이드 레일의 정적인 변형 특성을 파악하였고, 정적 유한요소 해석 결과를 바탕으로 내구성 시험을 통해 얻은 실험 결과 값과 비교 분석하여 다단 슬라이드 레일의 성능평가를 하였다 [10]. 정상화 등 은 언더레일 성형을 위한 롤포밍 공정 설계에 관한 연구를 수행하였으며, 강소성 유한요소법을 이용하여 상위멤버를 시뮬레이션 하였다. 제품에 대하여 가장 적합한 굽힘 부를 설계를 하였으며, 잔류 변형률을 예측

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

후 롤 포밍 공정에서 나타나는 캠버 및 보우현상을 예측하여 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그리고 또 다른 연구는 언더레일의 롤 포밍 공정 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였으며, Fig. 5와 같이 U-형상 단면 설계 시에 일반적인 단면형상(TYPE A)과 회전관성 모멘트를 최소화하기 위해 단면을 회전한 단면형상(TYPE B)에 대하여 실험값과 FEM 해석결과의 변형률 분포와 버클링현상을 비교하였다 [11, 12].

2010년도 전후에는 고성능의 롤 포밍 제품생산을 위한 연구가 많이 수행이 되었으며, 그 중에 가구 및 건축 등 많은 분야에서 사용되어지는 슬라이드 레일과 자동차 부품 생산에 관한 롤 포밍 공정의 많은 연구가 발표되었다. 김동규 등 은 자동차 부품인 고강도 차체 사이드 실(Side-sill) 부품 및 범퍼레일(Bumper-rail)을 롤 포밍 공정을 통한 제품 생산 기술 개발을 수행 하였으며, 성형 판재에 발생하는 스프링 백 해석을 통하여 제품의 치수 정밀도를 개선하였다. 또한 신 개념의 절단금형 시스템을 적용하여 절단공정 시 발생되는 스프링 백, 트위스트, 시제품 끝 단부 좌굴 현상을 연구 하였으며, 고강도 및 경량화 차체 부품 제작을 위한 롤 포밍 공정 기술을 확립하였다. 이후에 수행된 연구로 FEM 시뮬레이션 해석을 통한 롤 포밍 공정에서의 롤 패스 별 공정변수에 대한 결과 값을 미리 예측하여, 최적의 롤 포밍 공정을 설계하였다. 위 연구 데이터를 바탕으로 경제적인 롤 금형 설계방식을 제시하였다. 그리고 롤 포밍 성형 시 성형 시트에 발생되는 스프링 백 현상을 해석을 통하여 제품 치수 정밀도를 개선하였다. 롤 포밍 공정을 통하여 주로 생산되는 제품 중 하나인 슬라이드 레일 제품에 관한 많은 연구가 수행되었다 [13-15]. 이택성 등 은 스테인리스 시트로 성형된 슬라이드 레일의 정밀한 롤 포밍 성형을 위한 FEM 시뮬레이션 해석에 관한 연구를 하였으며, Fig. 4와 같이 플라워 패턴(Flower pattern) 설계를 활용한 FEM 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 개발된 롤 포밍 공정에 의해 생산된 제품과 FEM 시뮬레이션 해석을 비교하여, FEM 시뮬레이션의 유용성을 고찰하였다 [16]. 신동우 등 은 슬라이드 레일용 리테이너의 유동해석에 관하여, 슬라이드레일의 리테이너에 그리스가 쌓이게 되는 원인에 대하여 규명하였다. 그리고 슬라이드레일의 리테이너에 그리스 포켓을 생성하여 윤활 성능이 개선 및 오븐용에 사용되는 철재 리테이너의 유동해석 결과 윤활제가 비산될 가능성에 대하여 예측 하였다 [17].

국외에서의 연구는 1930년대에 코넬 대학의 Gerge Winter 교수가 롤 포밍 공정을 활용한 구조물용 제품 생산에 관한 연구를 시작으로, 16년 간 롤 포밍 공정에 대하여 체계적인 연구를 수행하였다. 위의 연구결과를 바탕으로 여러 나라에서 위 연구 데이터를 활용하여, 롤 포밍 공정에 관하여 본격적으로 연구가 진행되었다.

Jimma와 Ona는 비대칭 제품 형상에 대하여 롤 포밍 공정에서 캠버(Camber) 및 보우(Bow)와 같은 휨 변형을 최소화 하는 방법에 대해서 실험을 수행하였다. 이러한 제품 결함을 방

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

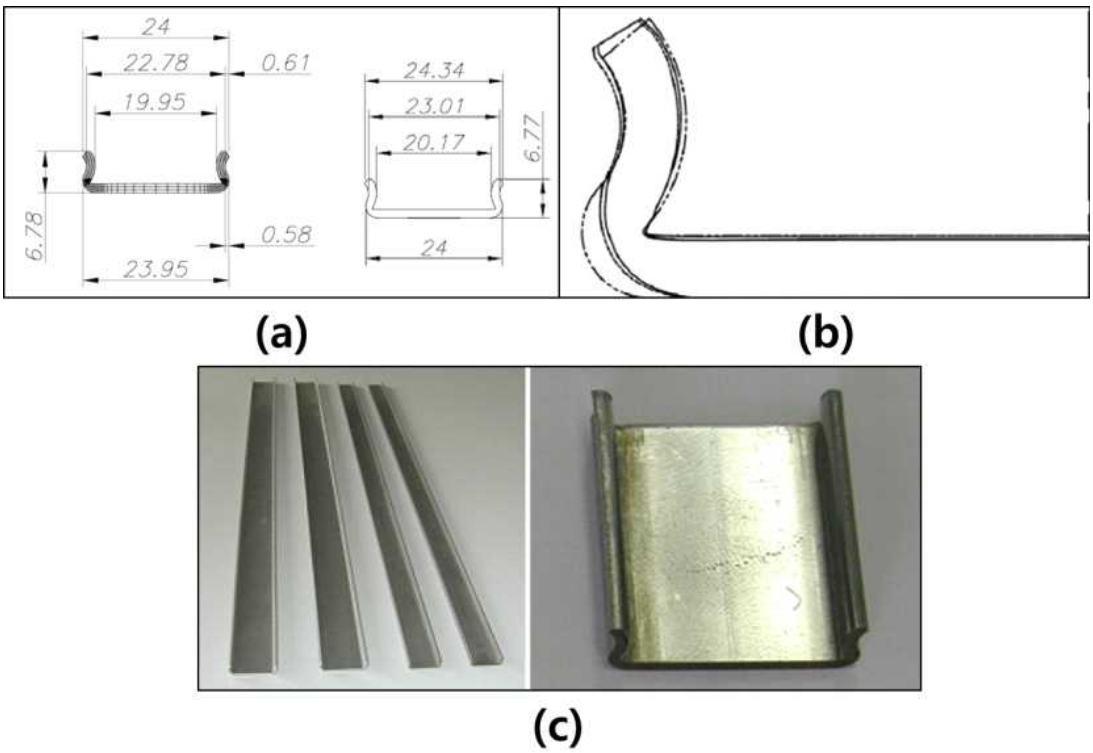


Fig. 4 (a) Spring back in section, (b) comparison of section shapes, (c) manufactured products

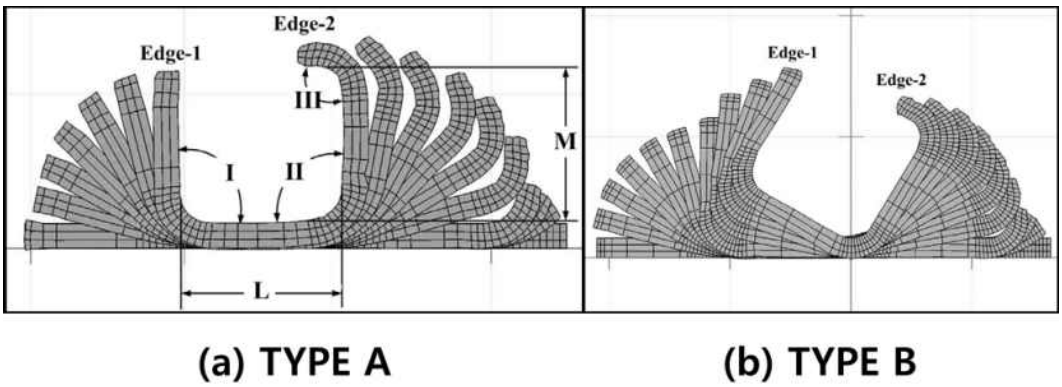


Fig. 5 Flower pattern of upper member ; (a) type A, (b) type B

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

지하기 위해, 롤 포밍 공정변수인 성형 판재의 굽힘 각과 롤 패스의 수에 관하여 롤 포밍 실험을 통한 경험식을 도출하였다 [18-20]. Battacharyya와 Panton 등 은 롤 포밍 실험을 통하여 성형시트의 변형구간을 분할하고 구간의 길이 및 굽힘 각에 대한 예측 식을 도출 후, 위 식을 활용하여 성형시트의 길이방향변형률(Longitudinal strain)값을 구하였다. Smith는 롤 포밍 공정에서의 성형시트의 반력에 의한 롤 금형 하중에 대하여 연구를 하였으며, 롤 하중을 통하여 성형시트의 성형성을 파악 후 최적의 롤 포밍 공정을 설계하였다. 이 연구에서는 성형 시트가 접히는 하중(Folding load)은 시트 두께, 굽힘 각(Bending angle), 성형 단면 형상(Shape of cross-section) 그리고 재질의 특성에 영향을 받는다는 것이며, 굽힘 하중(Bending force)은 성형 시트의 영 계수(Young's modulus), 롤 금형간 거리, 롤 금형의 직경등에 영향을 받는 것으로 연구가 되었다 [21-23].

동경대의 M.Kiuchi 교수 연구팀은 변형 구간에 있는 성형시트의 단면 형상을 매개변수(Parameter)로 고려하여, 에너지 소비를 최소화 할 수 있는 매개변수를 결정하는 방법 제안하였다. 성형 시트에 대한 길이방향 변형률 계산 및 롤 포밍 공정의 해석을 통하여 Fig. 6과 같은 최적화 알고리즘을 도출하였다 [24-25].

최근에는 국·내외적으로 가변 롤 포밍 공정(Flexible roll forming process)이 개발되고 있으며, 위의 기술을 바탕으로 강관 생산에 다양하게 시도 및 적용되고 있다. 기존 롤 포밍 공정에서는 일정한 단면 형상만 성형을 하였으나, 가변 롤 포밍 공정은 일정하지 않는 단면을 가진 형상의 제품의 성형이 가능하다. 가변 롤 포밍 공정은 상하 롤 금형과 사이드 롤 금형이 유동적으로 움직여서, 강관의 두께 조절 및 다양한 형상의 덕트 제품등 생산을 할 수 있으며, 현재까지 활발히 연구 및 개발이 되고 있다 [26-29].

위의 국·내외 연구의 동향을 참고하면 국외 연구는 주로 롤 포밍의 공정의 변수에 대한 기초 연구 및 기술 개발이 다수를 이루며, 국내에서는 기존 연구를 바탕으로 슬라이드 레일 및 자동차 차체 부품 등 롤 포밍 제품에 대한 롤 포밍 공정의 최적화 기술에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 위의 연구 결과들을 통하여 많은 연구가 수행이 되어, 최근 롤 포밍 공정이 적용되는 분야가 폭 넓게 적용이 되고 있다. 하지만 기술수준이 급격하게 높아지면서 복잡한 형상 및 짧은 납기가 요구가 되면서, 이론적인 최적화 연구와 산업체의 시행오차와 같은 경험적인 방법으로는 점점 한계점을 나타낼 것으로 예측이 된다. 또한 새로운 소재의 적용이 점차 중요한 이슈로 떠오르고 있으며, 고부가 가치 제품을 생산하기 위한 롤 포밍 공정을 개발은 현재까지 롤 포밍 설계기술, 롤 포밍 공정설계, 난성형성 소재에 대하여 스프링 백과 같은 제품 결함에 대한 새로운 연구개발이 필요한 실정이다 [30].

특히 롤 포밍 공정에서 가장 문제시 되는 제품 결함인 스프링 백은 이론적인 접근과 많은

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

경험 및 노하우 뿐 만 아니라 여러 번 시행착오가 필요하므로, 많은 시간과 비용이 소모가 된다. 스프링 백 현상에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있지만, 성형시트의 소재 및 단면 형상에 따라 스프링 백량이 달라지기 때문에 지속적인 연구가 이루어야 한다.

기존 롤 포밍 공정에 관한 연구에서는 롤 포밍 공정 설계, FEM 시뮬레이션을 통한 공정 해석, 새로운 단면 개발 등 롤 포밍 공정 범위 내에서만 수행 되었으나, 최근 급격히 높아지는 제품 품질에 따른 경쟁력을 갖추기에는 한계를 드러낼 것으로 예측된다. 롤 포밍 공정도 다른 성형공정과 같이 다른 기술을 융합한 새로운 공정으로 개발이 필요할 것으로 보이나, 타 기술을 융합한 롤 포밍 공정 개발은 거의 없는 것으로 조사되었다.

그러므로 앞으로 롤 포밍 공정의 최적 설계만으로는 생산하기 어려운 제품들이 증가 할 것으로 보이며, 이러한 한계점을 극복하기 위해 타 기술을 롤 포밍 공정에 적용한 융합기술의 도입이 될 것으로 예측된다.

위와 같은 예측이 되는 근거로는 기존 스탬핑(Stamping) 공정을 예를 들 수가 있다. 기존의 스탬핑 공정에도 롤 포밍 공정과 비슷하게 제품 성형의 한계점을 드러냈고, 이러한 한계점을 돌파하기 위해서 핫스탬핑(Hot stamping) 공법 등 새로운 성형공정이 개발 되었다. 롤 포밍 공정인 경우에도 타 공정을 융합하여 제품을 생산한 사례는 튜브 생산 공정이 있다 [6, 31]. 하지만 최종공정으로 용접기를 이용하여 연속적인 용접을 하여 거의 후처리 공정에 가까우며, 롤 포밍 성형 시 롤 포밍 성형 공정에 의한 제품 품질에 영향을 주지 않는다. 튜브 공정을 포함하여, 롤 포밍 성형 시 직접적으로 성형할 때 제품 성형성 향상을 위한 다른 공정을 적용한 사례가 거의 없는 것으로 조사되었다. 그러므로 롤 포밍 공정의 제품의 품질을 혁신적으로 향상시키기 위해, 롤 포밍 공정 변수를 이용한 제품 개발이 아닌 판재 성형할 때 타 공정 적용이 필요하다. 다른 공정을 적용할 때에는 롤 포밍 공정 제품에서 발생되는 스프링 백 등 제품 품질에 나쁜 영향을 미치는 결함요소들에 대하여 개선이 될 수 있는 공정 선택이 중요하다. 현재 롤 포밍 공정에 적용될 수 있는 공정은 스탬핑 공정과 같이 열을 이용한 공정이 적합할 것으로 판단되며, 롤 포밍 성형 시 적용이 가능한 공정이다. 롤 포밍 공정에 열을 이용하기 위해서는 성형 판재의 예열방식으로 적용되어야 한다. 판재의 예열효과는 성형 판재의 잔류응력을 감소 시켜주며, 잔류응력 감소로 인하여 스프링 백 현상도 감소가 될 것으로 기대 되기 때문이다.

판재 예열 방식으로는 가스 토치(Gas torch), 유도가열(Induction heating), 레이저 예열(Laser pre-heating) 방식 등 여러 가지 방법을 제시 될 수 있다. 유도가열 방식은 판재의 재질 및 두께에 따라 예열의 제약이 심하고, 레이저 예열은 좁은 예열범위 및 비싼 초기 시설비로 롤 포밍 공정 적용에 대한 어려움이 많다 [32-36]. 위 2가지 예열방식에 비해 가스토치 예열

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

방식은 불꽃 화염으로 인한 온도조절이 용이하며, 예열 범위도 조절이 가능하다. 또한 초기 시설비도 저렴하여 현실적으로 적용이 쉬운 공정이며, 성형 판재의 소재에 대한 제약이 없다 [37]. 그러므로 현 시점에서는 가스 토치의 적용이 적합할 것으로 판단되며, 가스토치를 이용한 예열공정으로 롤 포밍 공정에서 적용한 연구가 필요하다.

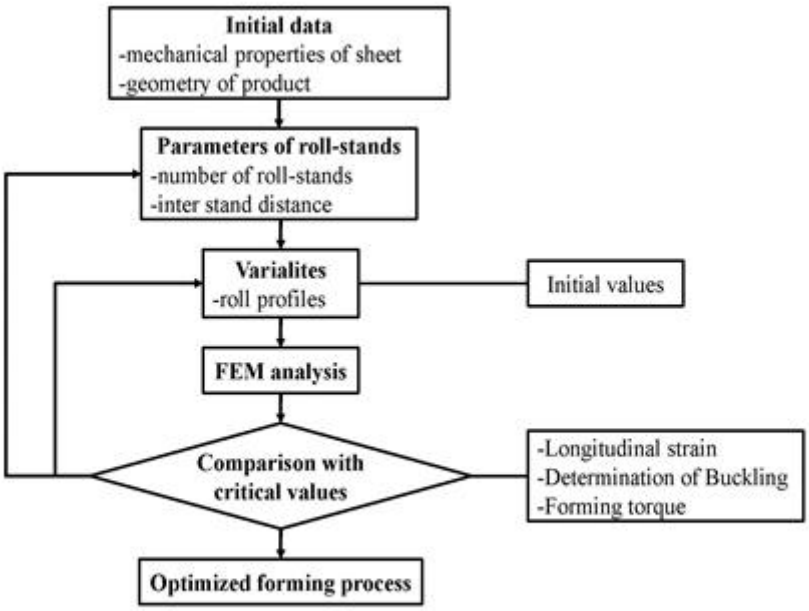


Fig. 6 Block diagram of a design process of roll forming using CAD and CAE

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 롤 포밍 공정에서 예열공정을 융합한 새로운 롤 포밍 공정에 대하여 연구하였다. 롤 포밍기에 의해 성형되는 형상은 V-형상이며, 성형 시트의 재질은 고장력 강판 및 롤 포밍 공정에 적용이 가능한 금속재질의 시트를 사용하였다. 롤 포밍 공정에 적용된 예열공정은 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치를 사용하여 성형시트를 예열하였다.

롤 포밍 공정에 예열 공정을 적용하기 전에 상온에 대한 롤 포밍 공정 변수에 대한 스프링 백의 영향을 파악하기 위해, 롤 포밍 공정 변수인 롤 갭과 롤 포밍 속도에 대하여 V-형상의 스프링 백 값을 측정하였다.

예열공정에 대한 변수를 파악하기 위해 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치에 불꽃의 길이 및 온도 분포를 열화상카메라를 사용하여 측정하였다. 또한 성형 시트에 예열에 대한 순수한 영향 분석을 위해, 일정한 속도로 이동하는 성형시트에 롤 포밍 성형을 하지 않는 상태에서 가스토치로 예열하여 성형 시트의 온도 분포를 측정하였다. 불꽃 온도와 시트의 열분포를 정확하게 파악하기 위해 열화상 카메라의 온도 데이터를 그래프 및 3D-IR이미지로 출력하여 온도분포를 분석하였다. 위의 상온 롤 포밍 공정과 예열공정의 열원에 대한 조사를 통하여 예열이 공정이 적용된 롤 포밍 공정에 대한 변수를 선정 및 검토하였다.

또한 예열 공정이 롤 포밍 공정에서 생산된 성형시트에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하기 위해, FEM 시뮬레이션을 수행하였다. 연성해석(Thermal-structure interaction analysis)을 수행하기 위해 해석하고자 하는 모델링을 최대한 단순화 했으며, 성형시트 위에 이동열원을 모사하여 실제 예열공정이 롤 포밍 공정에 적용됐을 때와 같도록 하였다.

효율적인 롤 포밍 실험을 하기 위해 다구찌 실험 계획법을 적용하였다. 각 실험의 조건에 따라 3수준 3인자($L_9 3^3$) 또는 3수준 4인자($L_9 3^4$)에 해당되는 직교배열표를 작성하여, 다구찌 기법의 실험에 따라 각 9개의 실험을 수행하였다. 롤 포밍 공정에서 시트 예열 할 때 열화상 카메라를 이용하여, 예열이 적용된 단수 뒷부분에 성형시트의 온도를 측정하였다. 스프링 백 값은 롤 금형의 설계에 따라 오버 밴딩 값이 나오기 때문에, 목적으로 한 굽힘 각도만큼 성형이 되어야 하므로 망목적 특성을 적용하였다. 롤 포밍 실험 후 측정된 스프링 백 값을 통하여 SN비를 계산을 하였으며, SN비의 분산 분석을 통하여 SN비의 주효과도 그래프를 도출하였다. SN비의 주효과 그래프를 통하여 해당 실험의 영향이 가장 큰 인자를 찾을 수 있었으며, 각 인자에 해당하는 수준의 SN비를 비교/분석을 통하여 최적 실험 조건을 도출할 수 있었다. 최적 조건을 가지고 최적화 검증 실험을 수행하였으며, 최적화된 변수로 나온 스프링 백 값으로 성형에 대한 영향을 분석하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

성형된 시트의 성형성을 판단하기 위해, 성형된 시트의 보우의 값을 측정하였다. 보우의 값 역시 다구찌 실험 계획법에 준하는 실험계획법으로 실험을 수행하였으며, 보우값 특성상 작으면 작을수록 긍정의 값이므로 망소특성을 적용하여 SN비를 도출 하였다. 보우 값 역시 SN비의 주효과도를 계산하여 최적 조건을 예측 할 수 있었다.

고장력강 시트를 사용하여 여러 가지 롤 패스 및 복잡한 단면형상을 가진 성형제품 성형하기 위해, 롤 포밍 공정에 대한 FEM 시뮬레이션을 수행하였다. 일반 관인 튜브를 다단의 롤 포밍으로 성형 했을 시 롤 단수의 변화에 따른 스프링 백 값 측정을 하였으며, 복잡한 형상인 닫힌 단면 형상에는 롤 갭에 따른 스프링 백 및 시트에 생기는 제품결함을 바탕으로 한 성형시트의 성형성을 평가하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅱ. 실험 방법 및 장치

1. 실험계획법 및 스프링 백 측정 방법

1-1. 실험계획법

실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 연구 및 개발을 위한 최종적인 결과물에 대하여 목표 값 및 실험인자의 특성을 파악하기 위한 목적을 가지며, 이를 분석하기 위해서는 가용될 수 있는 여러 가지 실험변수의 영향에 관하여 최소한의 실험으로 최적의 결과물을 도출하는 기법이다. 이러한 실험계획법에는 부분요인실험, 완전요인실험, 반응표면실험, 다구찌 실험법 등 여러 가지 실험법이 있으며, 실험의 목적에 맞는 실험계획법을 선정하여 정확한 결과 도출을 위한 실험을 수행하는 것이 중요하다.

실험계획법에서 실험 결과물에 영향 및 취급되는 요인을 인자(Factor)라고 하며, 인자에 대한 여러 가지 조건을 인자의 수준(Level)이라고 한다. 실험에 앞서 실험 인자 및 인자 수준을 결정하는 것은 매우 중요하며, 어떻게 결정하느냐에 따라서 결과물에 대한 신뢰도 및 정확도가 달라진다.

최근 연구에서는 실험계획법을 많이 적용을 하고 있으며, 특히 실험계획법 중 다구찌 실험법이 많이 쓰인다 [38-41]. 다구찌 실험법은 실험 목적을 추구하는 방법과 실험 방법을 합리적으로 평가 및 제시해주며, 제어 가능한 인자로 제어가 힘든 잡음 인자에 대하여 강건한 설계(Robust design)를 한다. 또한 다구찌 실험법은 직교배열표(Orthogonal arrays)를 사용하여 실험 인자의 수준에 같은 횟수로 구성하여, 적은 횟수의 실험결과로 큰 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 효율적인 실험을 수행하기 위해, 다구찌 실험계획법을 적용하였다. 본 연구는 롤 포밍 공정과 예열공정이 융합(Convergence)된 공정이다. 롤 포밍 공정에는 많은 공정변수를 가지고 있으며, 또한 예열공정에 대한 공정변수까지 적용하면 많은 실험 변수를 가진다. 많은 실험 변수에 대하여 정성/정량적인 인자들의 영향을 분석하기 위해서는 많은 실험 횟수를 필요로 하기 때문에 다구찌 실험법으로 실험 횟수를 최소화하며, 성형된 판재로부터 원하는 최종 단면형상을 얻고자 한다.

이러한 최종형상을 얻기를 위해서는 다구찌 실험법의 결과 값을 분석을 해야 하며, 다구찌 실험법의 대표적인 결과 값으로는 SN비(Signal to noise ratio)가 사용된다. SN비는 예전에 통신 분야에서 적용되는 개념이지만, 지금 현재로는 다구찌 실험법으로 인하여 여러 가지 분야에 적용이 되고 있다. SN비의 개념은 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 비율이다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

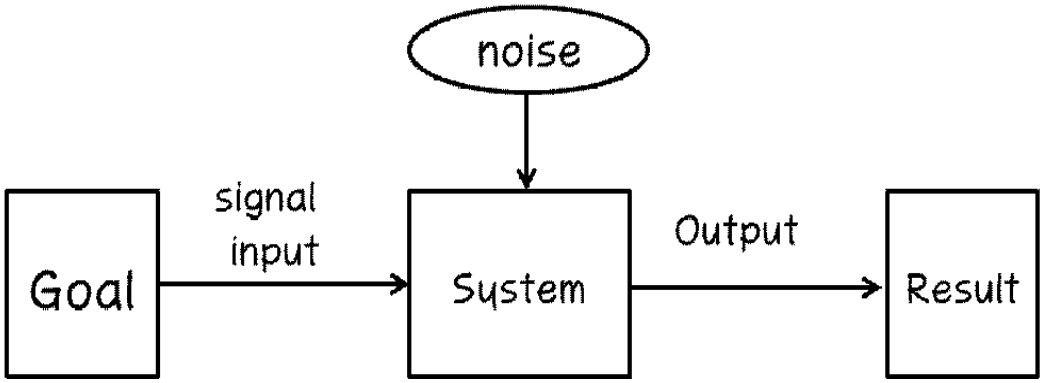


Fig. 7 Function relationship of SN ratio

신호입력은 목적이 산출물의 결과에 어느 정도 반영되는지에 대한 값이며, 잡음은 산출물의 결과에 어느 정도 나쁜 영향을 주는가에 대한 값이다. 즉 SN비는 Fig. 7과 같이 신호의 힘(Power of signal)과 잡음의 힘(Power of noise)이라고 정의 할 수 있다. 이러한 SN비는 클수록 신호의 힘이 크고 잡음의 힘이 작아지는 것을 의미하며, 잡음이 작을수록 강건한 결과를 도출 할 수 있다. 그러므로 SN값을 크게 하는 조건이 최적조건이 된다.

본 연구에서 사용된 롤 포밍 장치는 3개의 단(Pass)으로 구성이 되어있다. 연구 목표 단면인 V-형상의 최종 목표 굽힘 각은 90°이며, 여러 실험 조건에 대하여 최종 굽힘 각으로 나올 수 있는 최종 단면의 굽힘 각도는 80° ~ 100°사이로 성형된다. 이번 연구에서 목표로 하는 굽힘 각은 90°이며, 90°로 성형이 되는 최적의 성형조건을 도출을 하기 위해 다구찌 실험법을 사용하였다. 다구찌 실험법에는 실험의 특성치에 따라 목적함수가 정의가 되며, 특성치의 목적에 따라서 망소(Lower is best), 망대(High is best) 망목(Normal is best)특성으로 분류가 된다. 본 연구에서는 목표 성형 값인 90°에 만족하기 위해서 90° 굽힘 각을 가지는 최적 조건을 도출하는 특성이므로, 목표로 하는 값이 일정하며 그 목표 값보다 크거나 작어도 만족하는 특성을 가지는 망목특성 방식을 적용하였다.

다구찌 실험법은 품질을 합리적으로 평가하기 위해서 손실함수 개념을 사용하였다. 손실함수는 생산된 제품의 합격 및 불합격 여부로 판단하는 계수치의 2조 분류 또는 이원적 평가 방법이 불합리적인 방법이며, 이러한 이원적 평가 방법에 대한 보완할 수 있는 방법이다. 다구찌 실험법의 손실함수는 특성 값에 따라 망소, 망대, 망목으로 나누어지며, 손실함수의 식들은 2차 테일러 전개(Taylor series)로 표현된다. 적은 분산 값과 일정한 최적 값을 가지는 망목적 손실함수(L(y))의 식은 아래와 같이 정의 할 수 있다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$L(y) = k(y-m)^2 \quad (1)$$

여기서 k는 비례상수이며, y와 m은 함수의 특성 값과 목표 값(Target value)을 의미한다. 식 1은 테일러 전개에서 생략된 $(y-m)^3$ 값은 값의 크기가 작아서 $(y-m)^3$이하 전개된 값들은 생략할 수 있다. 비례상수 k는 기능한계(Δ_0)와 기능한계(A_0)에 대한 손실에 대한 값이며, 식 2와 같이 표현되므로 비례상수에 대한 식은 식 3으로 나타낼 수 있다. 그러므로 최종적인 망목적 특성에 대한 손실함수 L은 식 4로 유도 할 수 있다.

$$A_0 = k*(\Delta_0)^2 \quad (2)$$

$$k = A_0 / (\Delta_0)^2 \quad (3)$$

$$L = A_0 * (y-m)^2 / (\Delta_0)^2 \quad (4)$$

망목특성의 SN비는 여러 가지 계산식이 존재하고 있으며, 그 중에 표본의 분산 및 산술 평균을 고려한 식이 많이 쓰이고 있다. 표본의 분산을 고려한 식은 식 5로 나타낼 수 있으며, 산술 평균을 고려한 식은 식 6과 같다.

$$SN = 10 * \log_{10}(\bar{y}^2 / V) \quad (5)$$

$$\bar{y} = y / n \quad (6)$$

식 5에서 $\bar{y}^2$은 표본분산(σ^2)이며, V는 성능 특성치의 평균(μ^2)이다.

위에서 제시한 망목적 특성은 스프링 백 영향을 위해 적용되는 특성이다.

롤 포밍 제품의 성형성을 판단하는 대표적인 평가항목 중 보우(Bow)현상이 있다. 본 연구에서도 보우현상에 대하여 검토를 하였으며, 보우 값에 대하여 다구찌 실험법을 적용하였다. 보우 값의 특성상 특정한 목표 값을 정하는 것 보다 낮은 보우 값을 도출하여 최대한 성형된 시트의 상하방향으로 휨이 적은 제품을 생산하는 것이 목표이기 때문에, 다구찌 실험법에서는 망소특성으로 평가하는 것이 바람직하다.

다구찌 실험법에서의 망소특성에 대한 손실함수와 SN비는 아래의 식 7, 8로 나타낸다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$L(y) = k * y^2 \quad (7)$$

$$N \quad -10 * \log_0 \sum_{i=1}^{n} ((y_i)^2 / n) \quad (8)$$

다구찌 실험 계획법은 효율적이고 합리적인 결과를 도출하기 위해 일부 실시법(Fractional replication)인 직교배열표(Table of orthogonal arrays)를 사용한다. 직교배열표는 실험에 대한 인자 및 수준에 대하여 같은 횟수씩 적용이 되도록 고려가 되었으며, 적은 실험 횟수 많은 효과 및 영향을 합리적인 기준으로 판단할 수 있는 큰 장점을 가진다. 직교배열표를 기준으로 분산분석(ANOVA)이 수월하며, 많은 실험 변수를 적용이 가능하다.

본 연구에서는 최적의 조건을 도출하기 위해 Table 1과 같은 3수준계의 직교배열표를 적용하였다.

Table 1 Orthogonal arrays of Taguchi $L^9(3^4)$

No.	Variables				Experiment conditon
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1D_1$
2	1	2	2	2	$A_1B_2C_2D_2$
3	1	3	3	3	$A_1B_3C_3D_3$
4	2	1	2	3	$A_2B_1C_2D_3$
5	2	2	3	1	$A_2B_2C_3D_1$
6	2	3	1	2	$A_2B_3C_1D_2$
7	3	1	3	2	$A_3B_1C_3D_2$
8	3	2	1	3	$A_3B_2C_1D_3$
9	3	3	2	1	$A_3B_3C_2D_1$

1-2. 스프링 백 및 보우량 측정방법

롤 성형기를 통해 생산된 성형시트의 성형성을 판단하기 위해 스프링 백 값 및 보우 값을 측정하였다.

본 연구에서의 스프링 백 현상의 정의는 성형시트가 외부힘에 의해 굽힘력(Bending force)이 작용할 때, 성형시트가 변형에 저항하려는 물체 내부의 복원력에 의해 초기 목표의 변형량 값 보다 적게 굽혀지는 현상이다. 스프링 백에서의 복원력은 탄성력(Elastic force)에 의해

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

발생이 된다. 성형하는 시트인 경우 굽힘 안쪽에서는 압축력(Compressive force)이 발생하고, 굽힘 바깥쪽에서는 인장력(Tensile force)이 발생된다. 이러한 탄성력과 성형에 따른 소성력이 복합적인 관계로 스프링 백 값이 결정된다. 위의 현상으로 발생되는 스프링 백 값은 제품의 치수 정밀도에 많은 영향을 미치므로, 설계 시 사전에 고려해야 되는 항목이다.

스프링 백 측정 방법은 어떠한 제품을 생산하는지 또는 제품의 특성상 고려해야 되는 중요한 치수 특성에 따라 굽힘 각으로 평가하거나, 변위로 평가하기도 한다. 본 연구에서 최종 성형은 V-형상이며, 총 굽힘 각은 90°이다. V형상에 대한 스프링 백 측정 방법은 스탬핑 공정에서의 V-Bending 공정에서 측정하는 방식으로 적용하였다. 본 연구에서의 스프링 백 계산식은 식 9와 같으며, Θ_s는 성형된 시트의 각도이며, Θ_f는 최종 목표로 하는 단면의 성형 각도이다. 스프링 백 값 측정하는 방법은 Fig. 8과 같다 [42].

$$\triangle \ = \theta \ - \theta_f \tag{9}$$

롤 포밍 공정에서 생산된 제품의 특징은 연속적인 띠판 형식의 성형판재가 연속 성형되는 특징을 가진다. 그러므로 롤 포밍 공정에서 성형된 제품은 V-bending의 스탬핑 공정과 달리 측정 방법을 다른 관점으로 관찰해야 한다. 일반적으로 스탬핑 공정에서의 V-bending은 성형된 판재의 모든 위치에서 거의 일정한 스프링 백 값을 보이지만, 롤 포밍 공정에서의 V-bending은 성형 과정 중에 성형되는 길이 방향으로 좌굴과 같은 현상을 보이기 때문에 성형된 제품에 대한 모든 위치에서 스프링 백값이 일정하기 않다 [43]. 그러므로 롤 포밍 공정에서는 성형된 제품에 대하여 전 구간에서의 스프링 백 값을 도출하여 성형성을 파악하는 것이 타당하고 판단된다. 그러므로 본 연구에서는 성형된 제품에 대하여 10개의 일정한 간격으로 나누어서 스프링 백을 측정하였으며, Fig. 9와 같이 성형되는 순서로 번호를 할당하여 11개의 스프링 백 결과에 대하여 도출 하였다.

FEM 시뮬레이션 해석 결과에 대한 스프링 백 분석은 Fig. 9와 같이 각 측정 위치의 단면을 추출하였다. 추출된 이미지를 CAD 프로그램(CADian 2010)에서 정확한 스프링 백 값을 측정하였다. 롤 포밍 실험을 통하여 성형된 시트는 각 측정위치를 마크를 하고 Cemred 사의 전자각도기(모델명 : GR82302R)를 활용하여 스프링 백 값을 측정하였다.

롤 포밍 제품에서의 휨 현상은 길이방향으로 활처럼 휘거나 옆 방향으로 휘는 형상 및 비틀림이 생기는 3가지 결함 현상이 존재하는 것으로 Fig. 11처럼 정의가 된다 [2]. 길이방향으로 위 아래로 휘는 형상을 보우라고 하며, 옆 방향으로 휘는 형상을 캠버(Camber) 그리고 뒤틀리는 현상을 트위스트(Twist)라고 한다. 그 외 롤 포밍 제품 결함에는 플레어(Flare)와 스

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

프링 백 현상 등이 있다. 보우, 캠버, 트위스트는 롤 포밍 제품의 직진성(Straightening)을 평가하는 항목이며, 롤 성형기의 롤 패스(Roll pass)에 있는 롤 다이(Roll die)의 성형 압력이 불균일한지 판단할 수 있는 척도로 사용된다. 보우현상에는 크게 2가지 있다. 첫 번째로는 제품 단면을 기준으로 생기는 단면 보우(Cross bow)와 길이방향으로 생기는 보우(Longitudinal bow)이다. 본 연구에서는 V-형상의 단면을 가지므로 단면보우를 측정 불가하여 길이방향 보우만 측정하였다. 길이방향 보우 측정방법은 평평한 면에 제품을 놓고 보우 값이 가장 높은 곳에서 거리를 측정한다. 정상적인 보우는 제품의 중심부분이 가장 크므로, 본 연구에서는 Fig. 9에서의 6번 위치에서 최대 보우 값을 측정하였다. 정확한 최대 보우 측정을 위하여 HanDo 사의 두께 게이지(Thickness gauge)를 사용하였다. 두께 게이지는 30㎛부터 1mm까지 다양한 두께를 가진 철편으로 구성이 되어 허용오차 30㎛까지 정확한 보우량을 측정하였다. 측정 방법은 Fig. 12와 같이 측정지점 6번에 철편을 적층 방식으로 끼워서 보우량을 측정하였다.

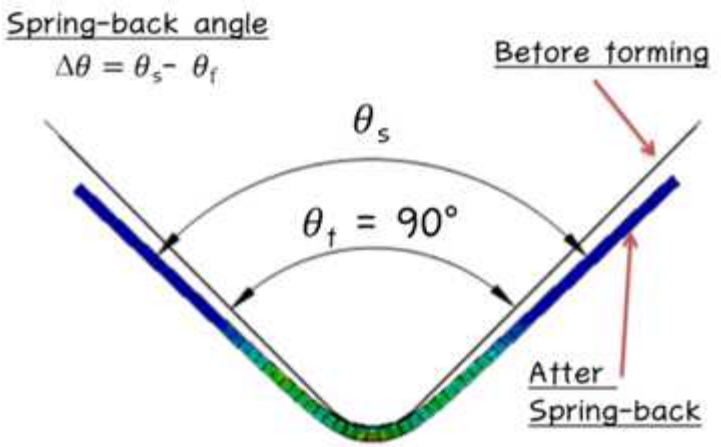


Fig. 8 Definition of the spring-back angle

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

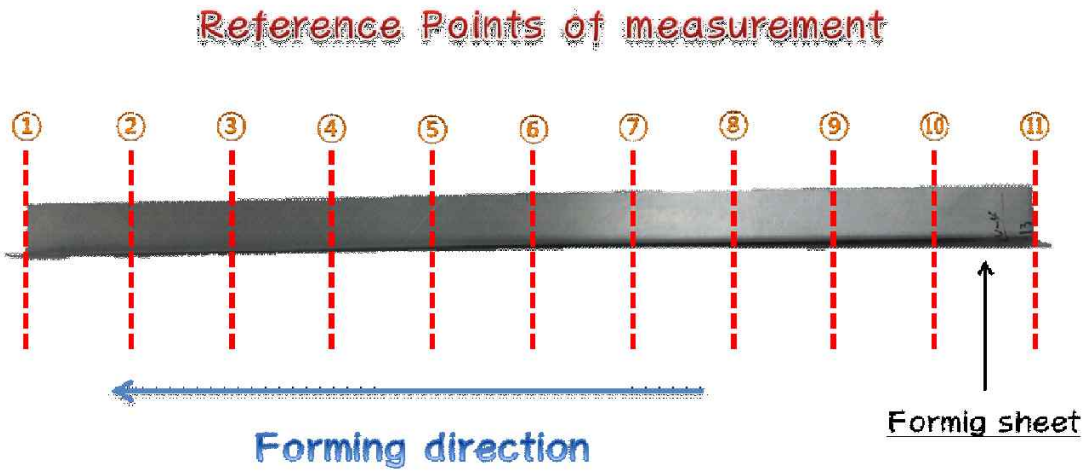


Fig. 9 Measuring point on the forming sheet

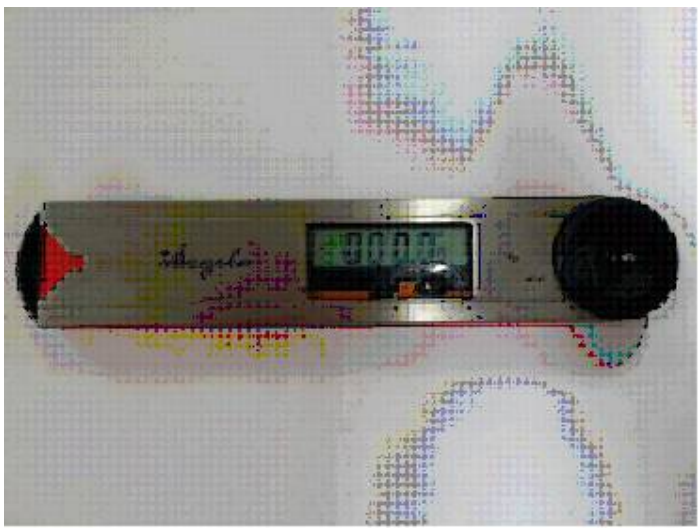


Fig. 10 Digital protractor(Cemred, GR82302R)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

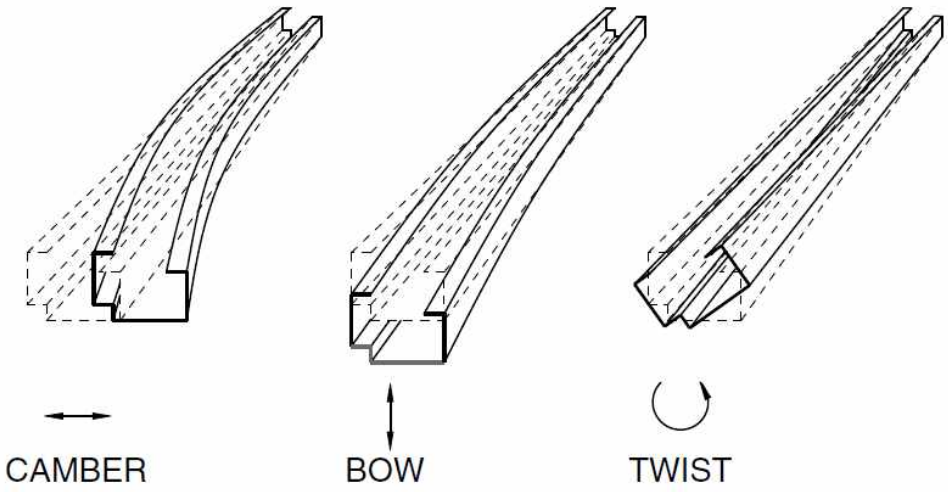


Fig. 11 Deviations from straightness

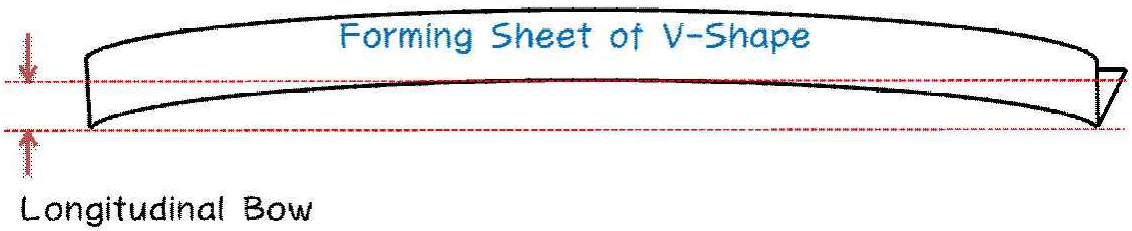


Fig. 12 Definition of longitudinal bow value

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 성형시트 물성치 및 온도 측정 방법

2-1. 성형시트 기계적 물성치

롤 포밍 성형에 적용한 소재는 고장력강(SPFH 590), 티타늄 합금(Ti-0.8%Ni-0.3%Mo),마그네슘 합금(AZ31B), 알루미늄(AA6061) 합금이다. 위의 4가지 소재에 대하여 기계적 물성치를 파악하기 위해 인장시험을 수행하였다. 인장시험은 금속 재료 인장 시험 방법 (KS B 0802)으로 수행 하였으며, 인장시험을 수행한 시편은 Fig. 13과 같다. 인장시험을 통하여 항복응력, 최대인장강도, 탄성계수, 연신율 값을 얻을 수가 있었으며, 각 소재에 대한 기계적 물성치는 Table 2와 같다. 인장시험을 통하여 도출된 변위-하중(Displacement-Load)의 데이터 열(Row data)를 바탕으로 각 소재에 대하여 진응력-진변형율 곡선(True stress- true strain curve)을 Fig. 14 ~ Fig. 17과 같이 변환하였다. 고장력 강에 대한 고온 인장시험은 ISO 6892-2 시험법으로 수행하였으며, 고온에 대한 기계적 물성치는 Table 2와 같다. 고온 인장시험에서 시험 온도는 50℃, 150℃, 250℃ 까지 3개의 온도에 대하여 시험을 하였으며, 각 온도에 따른 응력-변형률 곡선은 Fig. 18 ~ Fig. 20과 같다.

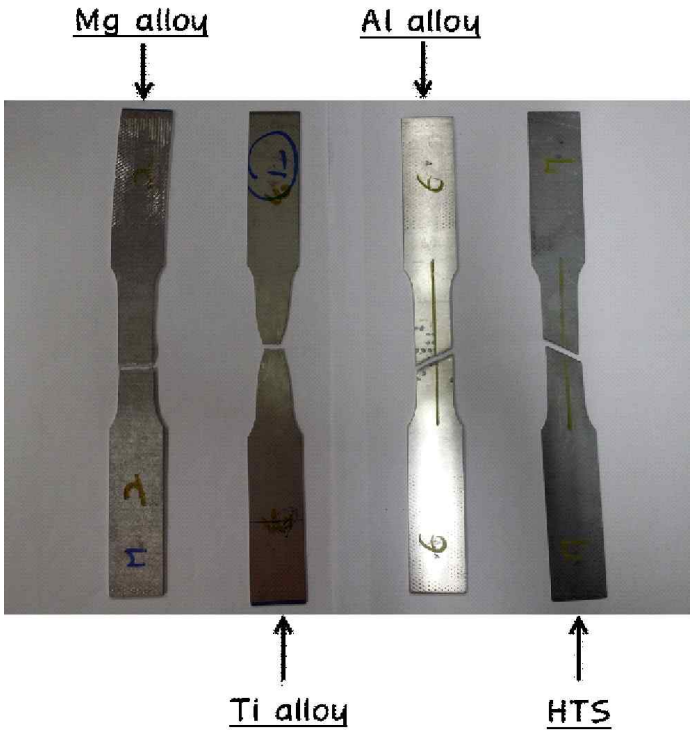


Fig. 13 Specimen for tensile test

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 2 Mechanical properties of forming sheets

Forming Sheet	High tensile steel				Ti alloy	Mg alloy	Al alloy
	Room Temp.	50 ℃	150 ℃	250 ℃			
Grade	SPFH 590				Ti-0.8% Ni-0.3% Mo	AZ31B	AA6061
Density [kg/m^3]	7860				4480	1770	2710
Ultimate tensile strength [MPa]	671	662	590	655	470	249	340
Yield strength [MPa]	448	389	361	391	406	136	271
Modulus of elasticity [GPa]	250	203	202	164	103	45	68.6
Poisson's ratio [-]	0.29				0.34	0.35	0.33
Elongation [%]	25	22.2	16.8	15.6	40	22	19
Thickness [mm]	0.78				1.48	2.31	2.00

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

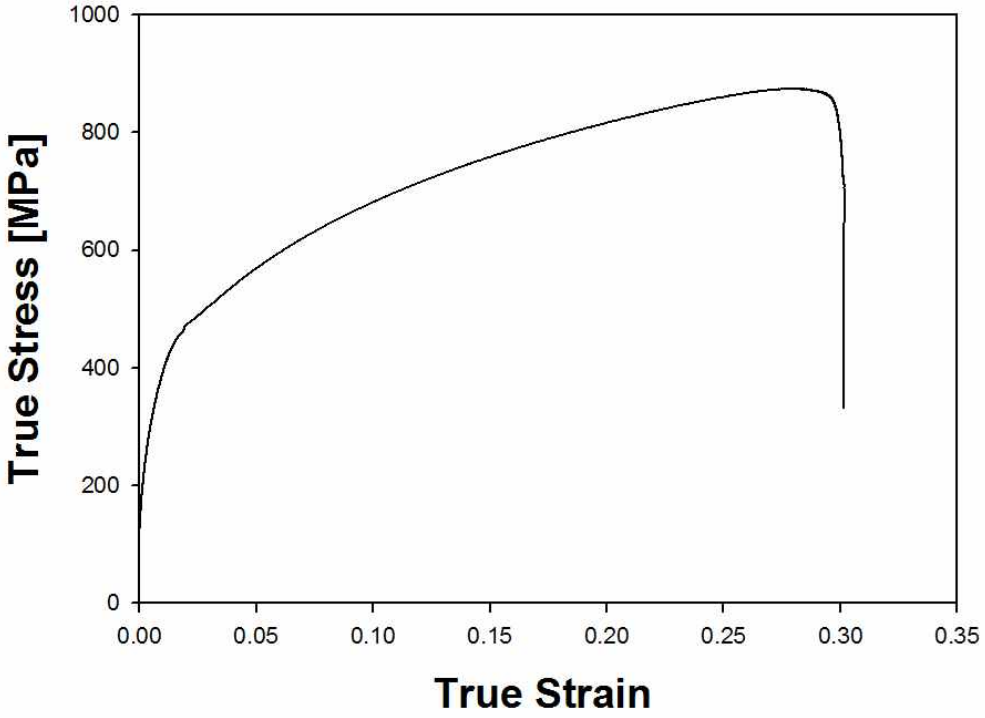


Fig. 14 True stress-true strain curve - HTS

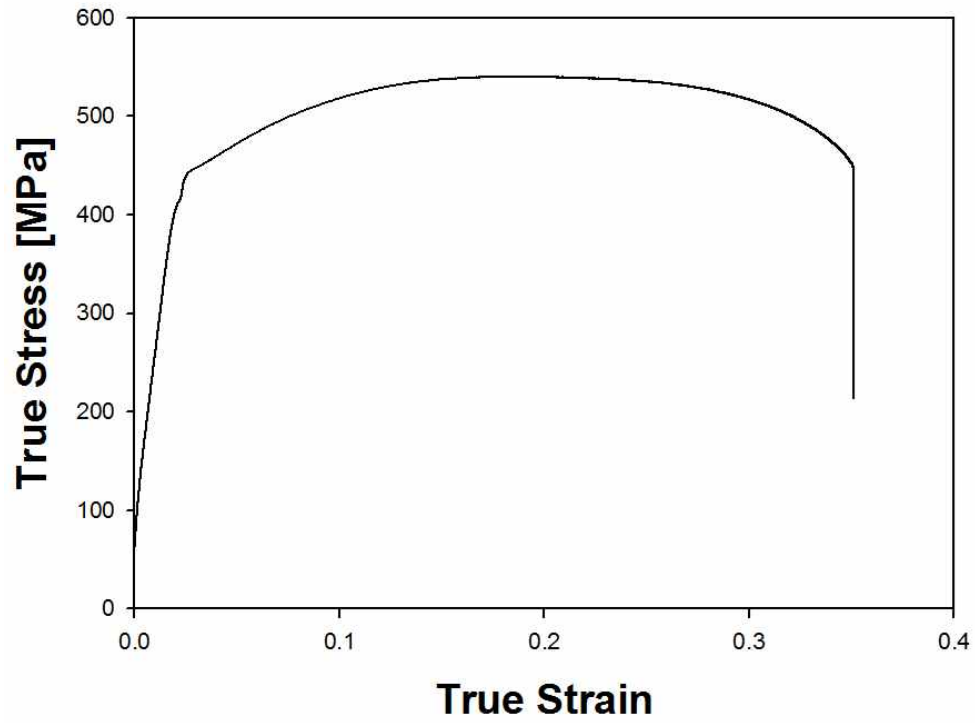


Fig. 15 True stress-true strain curve - Ti alloy

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

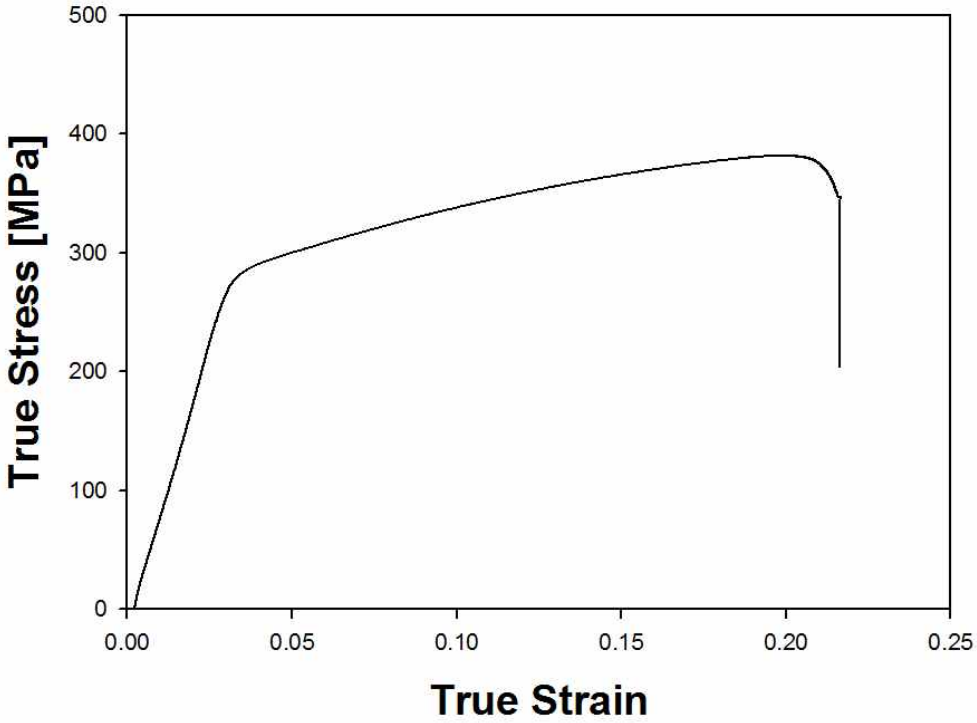


Fig. 16 True stress-true strain curve - Al alloy

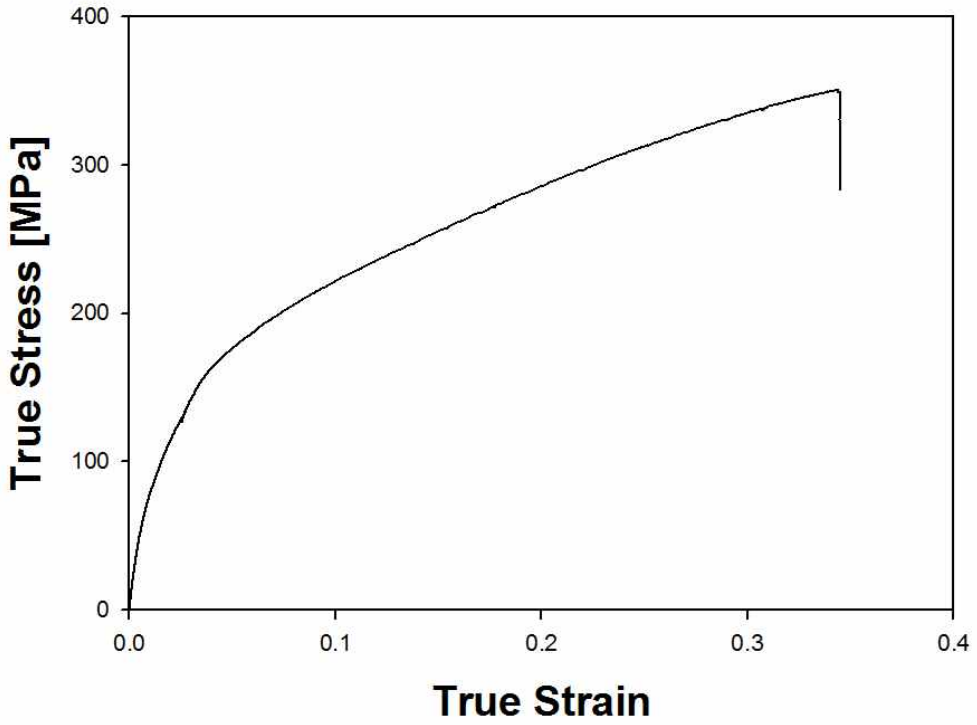


Fig. 17 True stress-true strain curve - Mg alloy

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

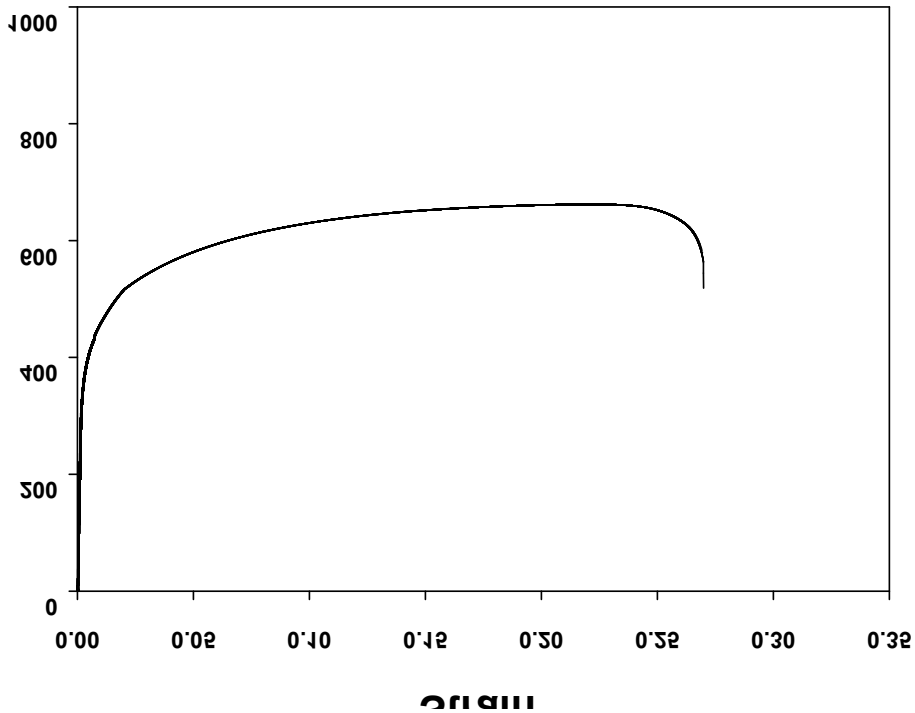


Fig. 18 Stress-strain curve at 50℃ - HTS

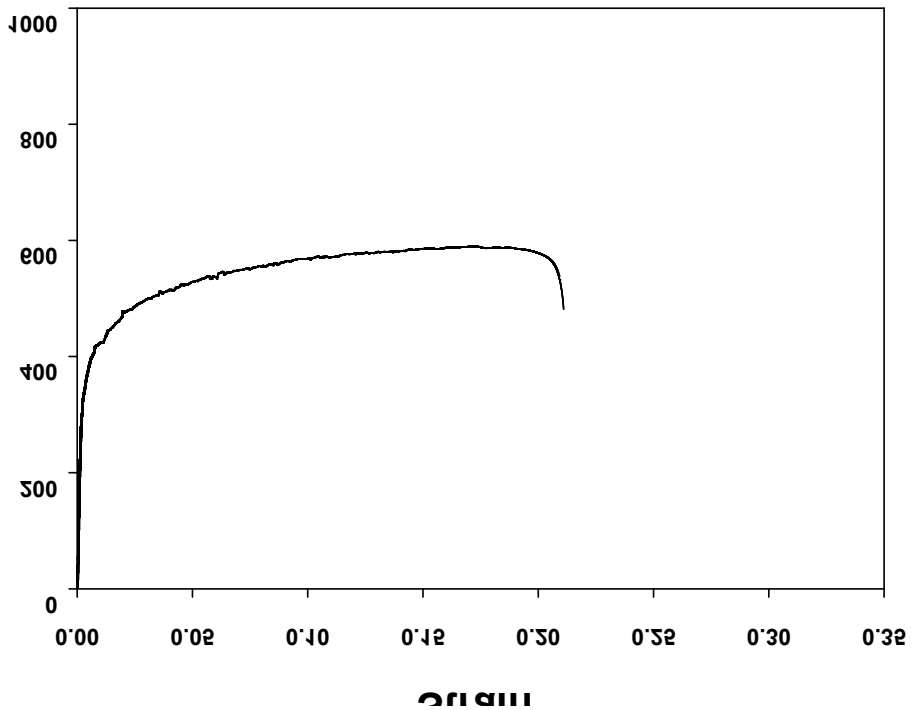


Fig. 19 Stress-strain curve at 150℃ - HTS

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

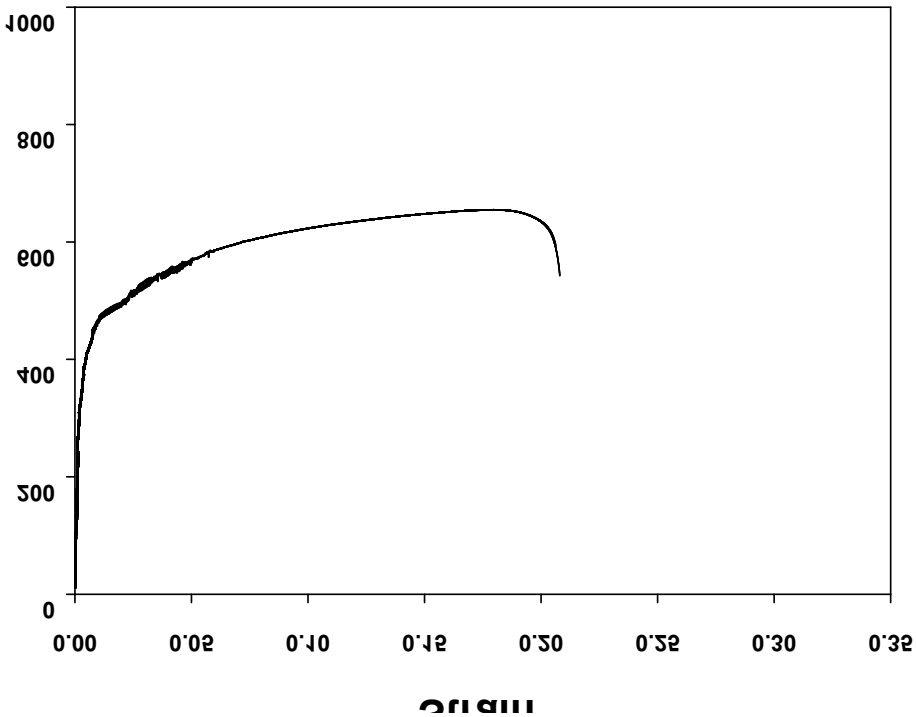


Fig. 20 Stress-strain curve at 250℃ - HTS

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2-2. 성형시트 온도측정 방법

롤 포밍 공정에 예열공정을 적용하기 위해서는 예열조건의 특성 분석이 필요하다. 예열공정의 열적인 특성과 직접적인 영향을 미치는 토치의 화염에 대하여 분석을 하기 위해 온도 측정 장치를 제작하였다.

우선적으로 토치의 화염 온도를 측정하기 위해 열화상 카메라(Thermo-graphic camera)를 사용하였으며, Fig. 21과 같이 FLIR사의 T400모델의 열화상 카메라와 FLUKE사의 Ti32모델 열화상 카메라까지 총 2개의 열화상 카메라를 사용하여 분석 하였다. Ti32 모델의 온도 측정 범위는 -20℃ ~ 600℃까지 측정이 가능하며, T400모델은 -20℃ ~ 120℃, 0℃ ~ 350℃, 200℃ ~ 1,200℃까지 3가지의 온도범위를 측정할 수 있다. 2 가지 열화상 카메라를 사용함으로서 측정된 온도의 보정을 할 수 있으며, 더욱 다양한 온도 범위 측정이 가능했다.

토치로부터 나오는 화염의 온도 분포를 분석하기 위해 Fig. 22와 같은 토치 화염 온도 측정 장치를 제작하였다. Fig. 22에서 왼쪽 사진은 부탄 가스토치를 장착을 했을 때이며, 오른쪽 사진은 플라즈마 가스토치를 장착 했을 때이다. 이 장치의 목적은 예열 가스량과 같은 토치 사용 조건에 따른 불꽃 화염 온도 분포 특성을 분석하는 것이다. 불꽃의 길이 측정을 위해 카메라와 화염 동일 거리에 있는 기준 길이바를 설치하여 불꽃의 길이를 측정하였다.

Fig. 23은 성형 시트 온도 측정 장치이며, 시트가 롤 포밍 성형속도와 동일하게 이동 시 시트에서의 온도 분포를 관찰하기 위해 제작된 장치이다. 이 장치는 시트의 열적 특성을 관찰하기 위해 부탄토치와 시트간 거리 조절 및 시트이동속도를 조절할 수 있게 제작하였다. 시트이동속도는 롤 포밍 성형과 동일한 조건으로 실험하기 위해, 롤 포밍 장치의 구동 모터와 연결하여 실제 실험과 동일한 속도로 이동하도록 하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

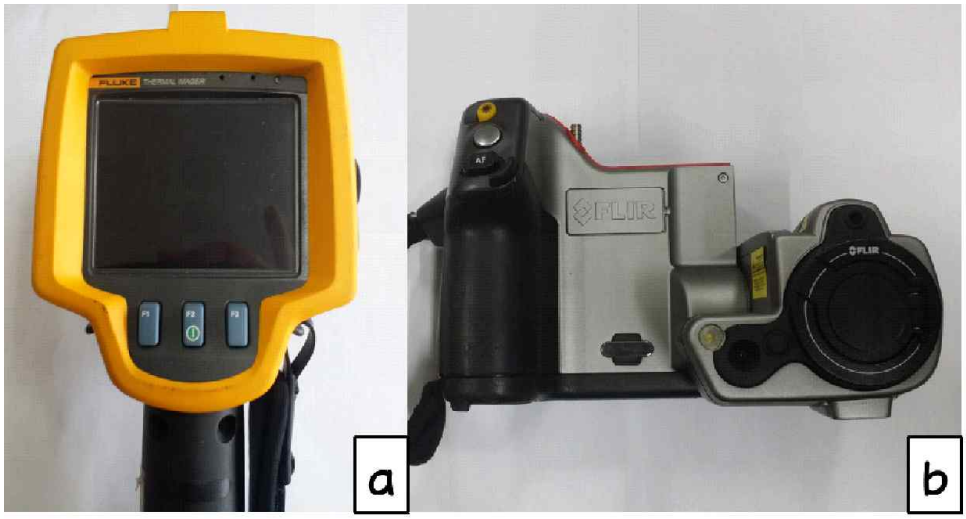


Fig. 21 Thermo-graphic camera; (a) FLUKE (Ti32), (b) FLIR (T400)

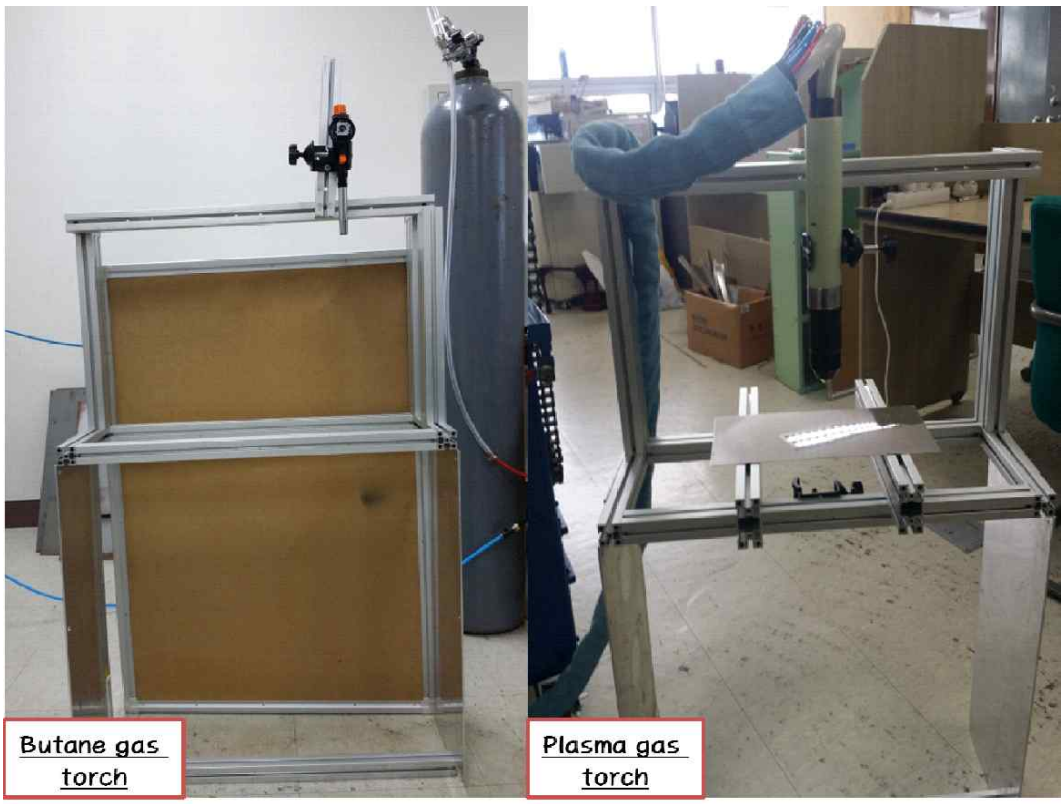


Fig. 22 Temperature measurement system for torch flame

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

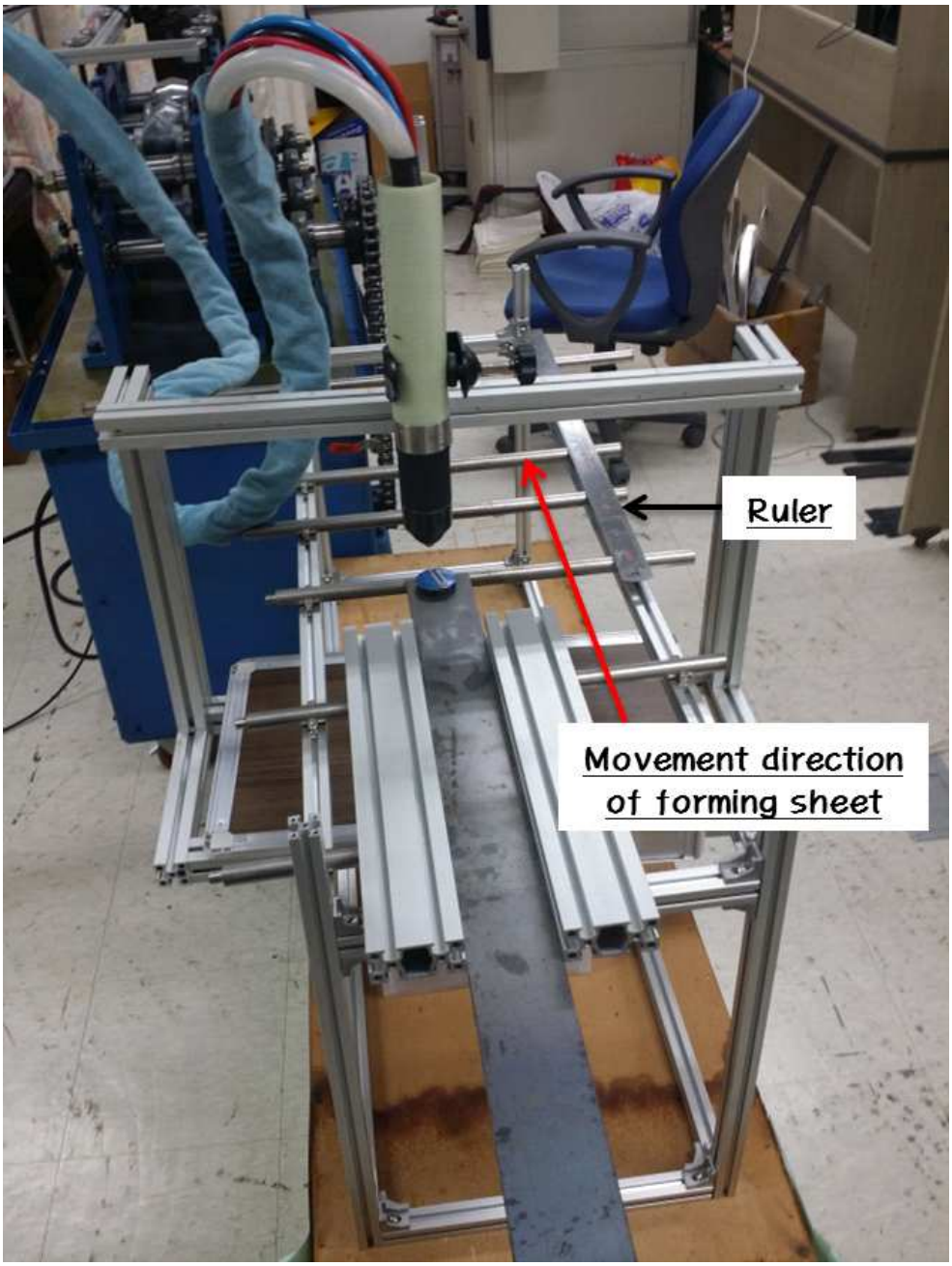


Fig. 23 Temperature measurement system for forming sheet

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 롤 포밍 실험

3-1. 롤 포밍 장치

본 연구에서 사용된 롤 포밍 장치는 아래의 Fig. 28과 같이 4-Pass로 이루어져 있다. 최종 굽힘 각 90°에서의 스프링 현상을 분석하기 위해, Pass-4의 롤 다이를 제거하고 Pass-1 ~ Pass-3까지 롤 다이를 설치하였다. Pass-1 ~ Pass-3까지의 롤 다이에 의한 성형각도는 각각 30°, 60°, 90° 이다. 롤 포밍 장치는 크게 상하 롤 다이, 롤 스탠트, 갭 조절 장치, 유압모터, 성형속도 컨트롤러로 이루어져 있다. 각 부분의 해당 사진은 Fig. 28과 같이 표기하였으며, 각 부품들의 이름은 Table 3과 같다. 유압모터는 1마력의 성능을 가지며, 속도 컨트롤러은 10 ~ 100 범위에서 조절이 가능하다.

속도 컨트롤에 적힌 레벨은 실제 속도를 의미하지 않으므로, 속도 컨트롤러의 속도 레벨에 따른 실제 속도 측정 실험을 수행하였다. 롤 포밍 성형속도는 20, 40, 60, 80, 100 수준에서 실험을 수행하였으며, 일정 거리를 기준으로 시간을 측정하여 각 3회씩 총 15번의 실험값을 구한 뒤 평균을 계산하였다. 5개의 속도 레벨에 따른 실제속도는 Fig. 27과 같으며, 실제 성형속도와 토치 화염 온도 측정 장치를 이용한 실험의 시트 이동 속도와 비교를 하였다. 실제 성형 속도와 시트의 예열분포에 따른 온도측정 실험과 시트의 이송속도는 거의 유사하기 때문에, 위의 시트 예열실험의 분포를 바탕으로 한 실제 예열공정이 적용된 롤 포밍 공정에서의 시트 온도 분포와 비교가 가능할 것으로 판단된다.

갭 조절 장치는 롤 스탠드 상부에서 볼트 형식으로 돌려서 갭을 조절할 수 있도록 되어 있다. 하부 롤 다이는 고정이 되어있으며, 상부 롤 다이는 갭 조절 장치에 의해 조절이 가능하게 되어있다. 시트 가이드는 롤 포밍 성형 시 성형 시트를 정확한 성형방향으로 성형 할 수 있도록 시트의 방향을 보정해준다. 갭 조절 장치를 사용하여 롤 갭을 조절하는데, 롤 갭을 산출하는 원리는 Fig. 30과 같다. 롤 갭(G)은 하부롤 선 위치로부터 평행하게 오프셋(Off-set)한 거리인 상부 롤 금형의 선 위치간의 평행한 거리(D)에서 시트의 두께(t) 만큼의 길이를 빼준 값이 롤 갭 거리의 정의가 된다.

롤 금형은 기존의 롤 금형과는 달리 상하 롤 금형의 굽힘 각이 다르다. 기존의 롤 금형은 상하 롤 굽힘 각이 같아 성형시트의 균일한 성형력을 주지만, 본 연구에서 사용된 롤 금형은 상부 롤 금형이 하부 롤 금형 보다 각도가 1° 더 크다. 이러한 롤 금형은 굽힘 부분에만 성형을 하여 오버 밴딩(over-bending)을 하기 위함이다. 이러한 공정은 대부분 고장력강 재질과 같은 강한 소재에 주로 적용된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

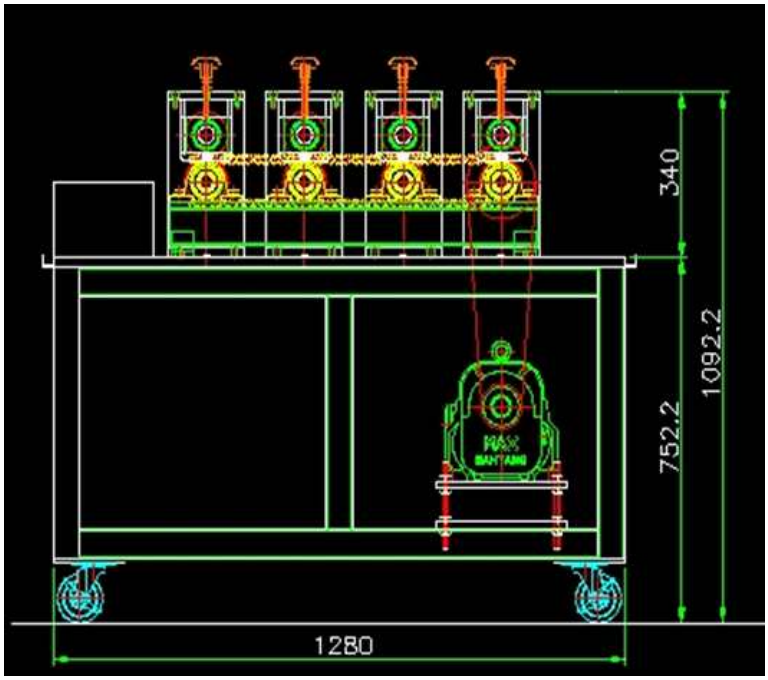


Fig. 24 Design drawing of roll forming machine - side view

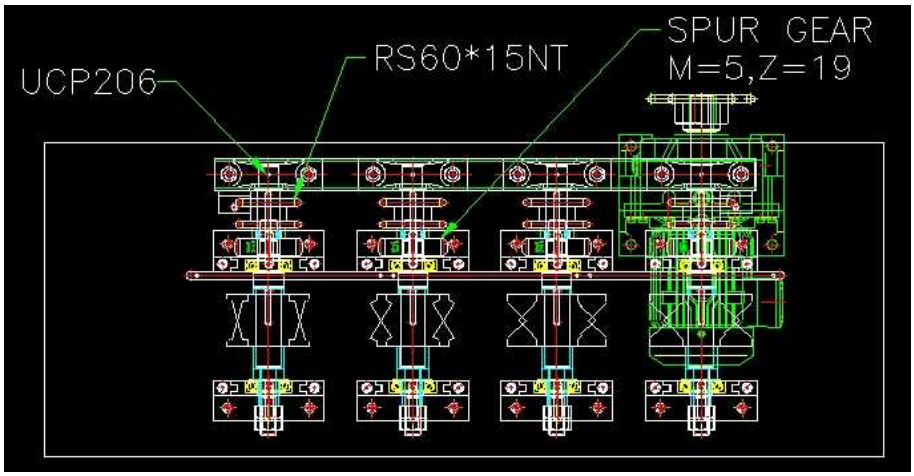


Fig. 25 Design drawing of roll forming machine - top view

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

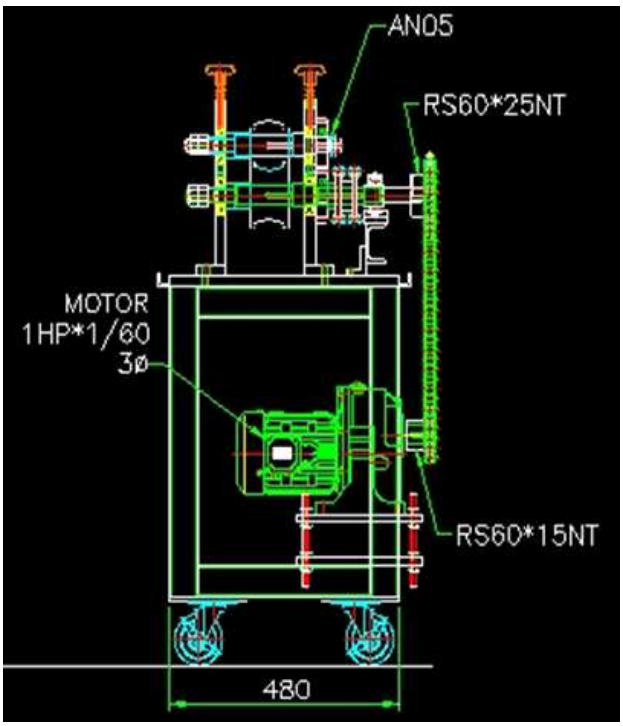


Fig. 26 Design drawing of roll forming machine - front view

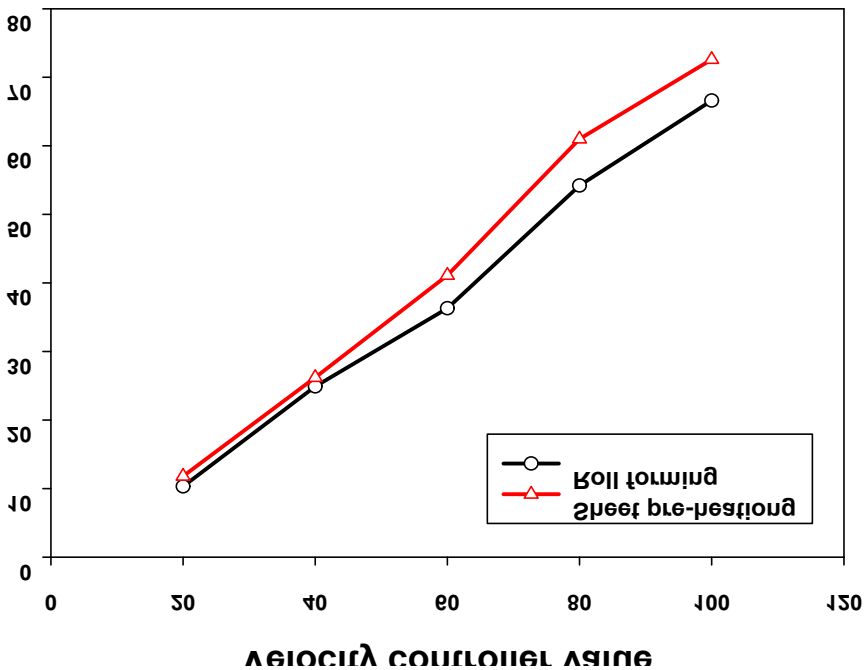


Fig. 27 Velocity test of roll forming machine

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

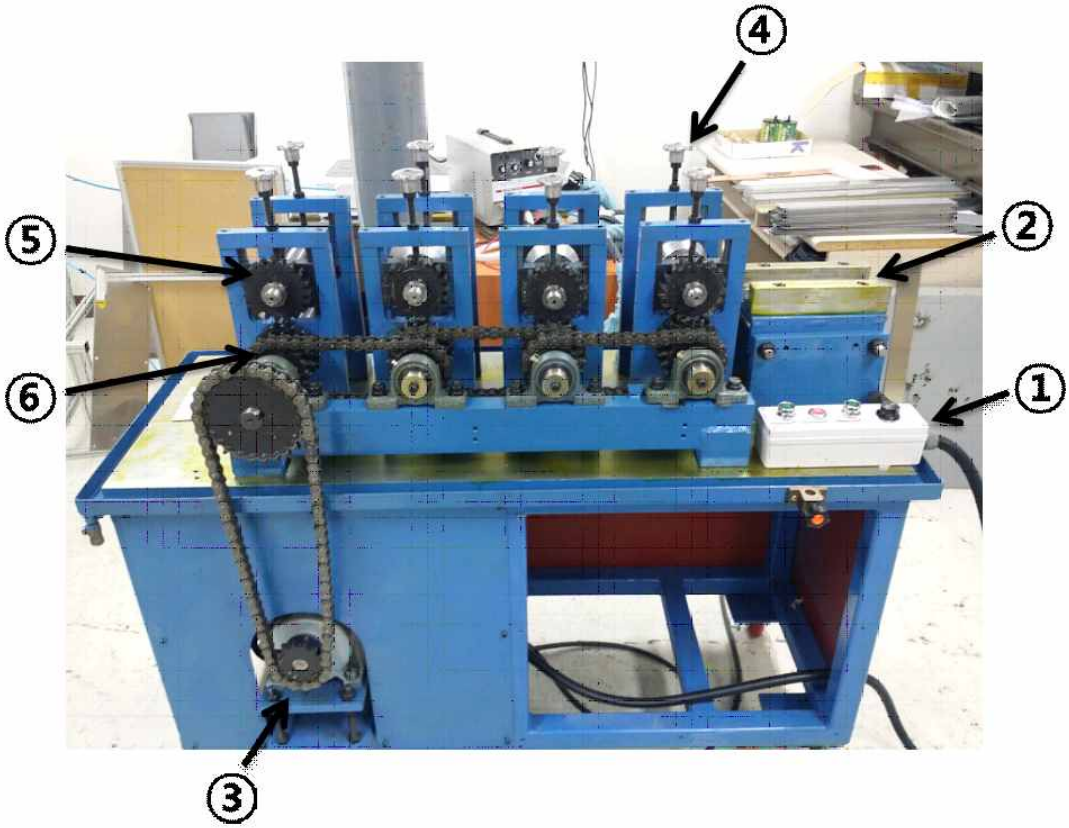


Fig. 28 Roll forming machine (3-Pass)

Table 3 Part names of roll forming machine

No.	Part name
①	velocity controller
②	forming sheet input guide
③	hydraulic motor
④	gap adjusting apparatus(include roll die stand)
⑤	top roll die
⑥	bottom roll die

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

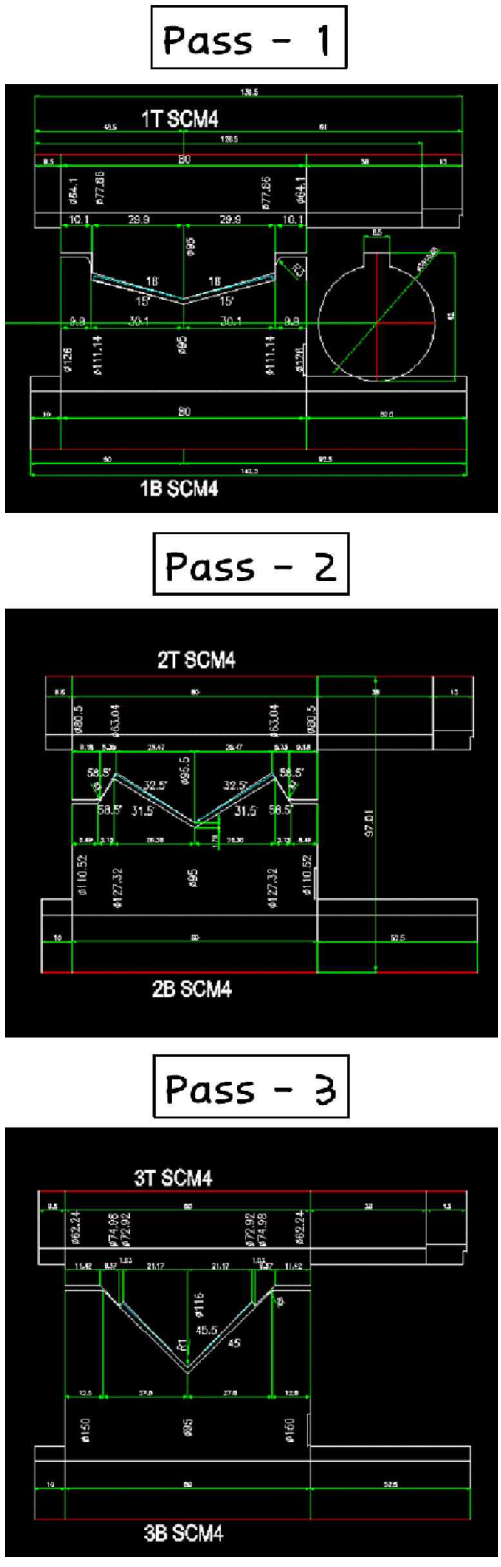


Fig. 29 Design drawing of roll dies about 3-Pass

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

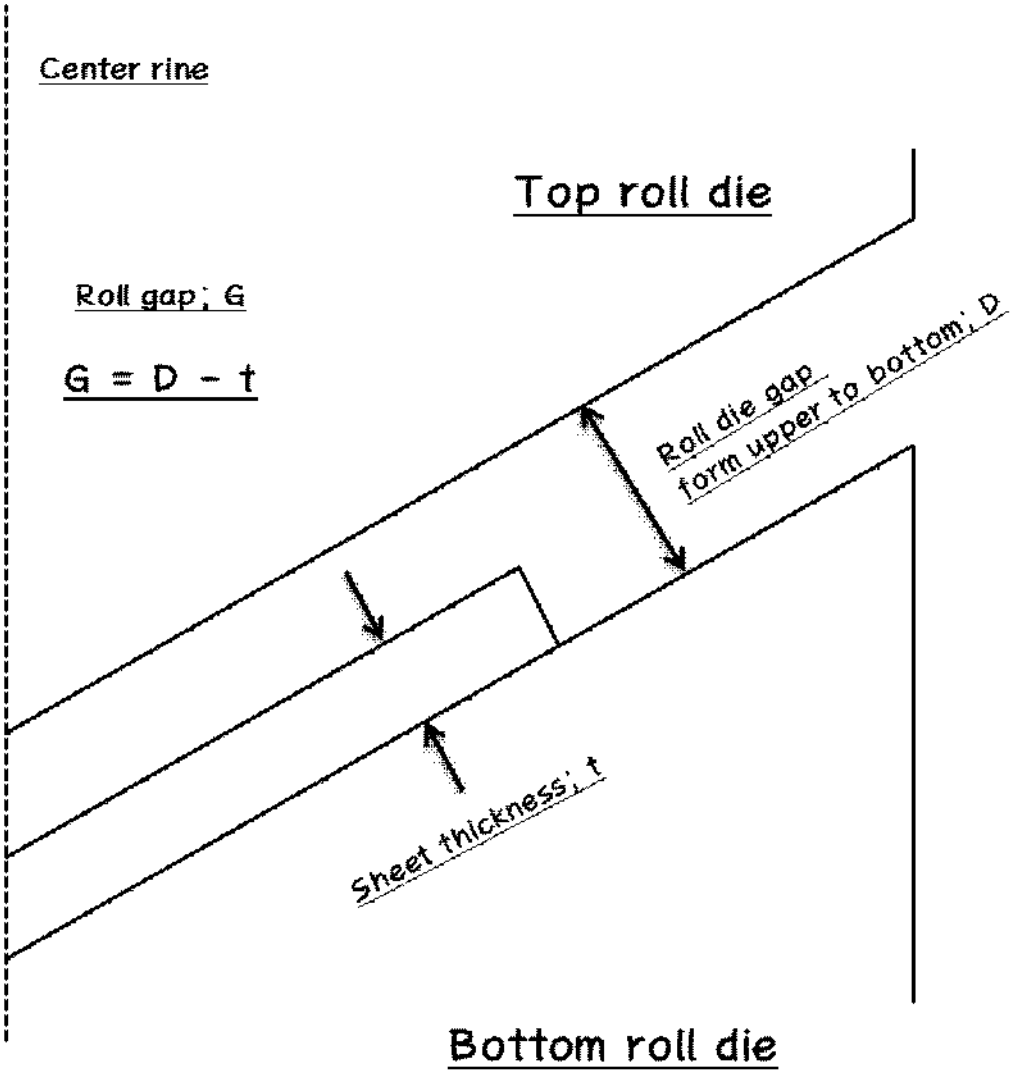


Fig. 30 Definition of the roll gap

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3-2. 롤 포밍 예열 장치 및 예열 토치

롤 포밍 장치에 예열공정을 적용하기 위해, 롤 포밍 장치에 알루미늄 프로파일을 사용한 거치대 형식의 예열장치를 제작하였다. 롤 포밍 예열장치는 Fig. 31과 같이 높이에 대한 눈금이 표시된 양쪽 지지대봉으로 높이 조절을 하여, 예열장치인 토치와 성형시트간 거리를 조절 할 수 있도록 제작되어있다. 롤 포밍 예열장치가 토치를 고정 할 수 있도록 상부 롤 금형 위쪽 프로파일에 클램프를 설치를 하였다.

성형시트 예열을 위해 부탄 가스토치(Torch apparatus for portable butane gas chamber)와 플라즈마 토치(Plasma torch, plasmatron)를 사용하였다.

부탄가스토치는 흔히 가정용으로 쓰이는 방식의 가스토치이며, Fig. 32의 KOVEA사의 KT-2904모델을 사용하였다. 이 부탄가스토치는 화염을 회전시켜 불꽃화염이 퍼지지 않고, 국부면적에 고온으로 예열이 가능하다. 부탄 가스토치는 가스량이 조절이 가능하나, 가스조절 장치가 정확하지 않다. 그러므로 본 연구에서 부탄가스 토치를 사용할 때에는 유량을 최대유량으로 실험하였다. 부탄 가스토치의 가스소비량은 120g/h로 다른 부탄 가스토치 보다 높은 가스소비량을 보이며, 소비되는 열량은 1,440 kcal가 된다.

플라즈마 토치는 비활성 기체를 높은 전기에너지를 주어, 고 에너지 기체상태인 플라즈마를 생성한다. 이러한 고온 플라즈마(thermal plasma)는 높은 에너지를 가지고 있어, 최고온도가 약 10,000～20,000 K에 달한다. 본 연구에서 사용된 플라즈마 토치는 소재 절단용으로 쓰이며, 주로 사용되는 비활성 가스에는 아르곤(Ar)가스가 주로 사용된다. Fig. 33은 플라즈마 토치이며, 태우기술 사의 ASS`Y-I 모델이다 [44]. 본 연구에서 사용된 플라즈마 토치는 수냉방식이며, 토치의 전원공급원이 용접기의 사용률에 따라 연속적인 예열이 가능하다. 플라즈마 토치의 전원인 용접기는 TIG 용접(Tungsten Inert Gas Welding)에 사용되는 PERFECT DAIDAI 사의 PT200 모델 용접기이다. 위 용접기는 정격출력전류 200 A이며, 후기가스가 조절이 가능하다. 플라즈마 토치와 용접기의 결선도는 Fig. 36과 같다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 31 Apparatus for pre-heating in roll forming machine

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 32 Torch apparatus for portable butane gas chamber

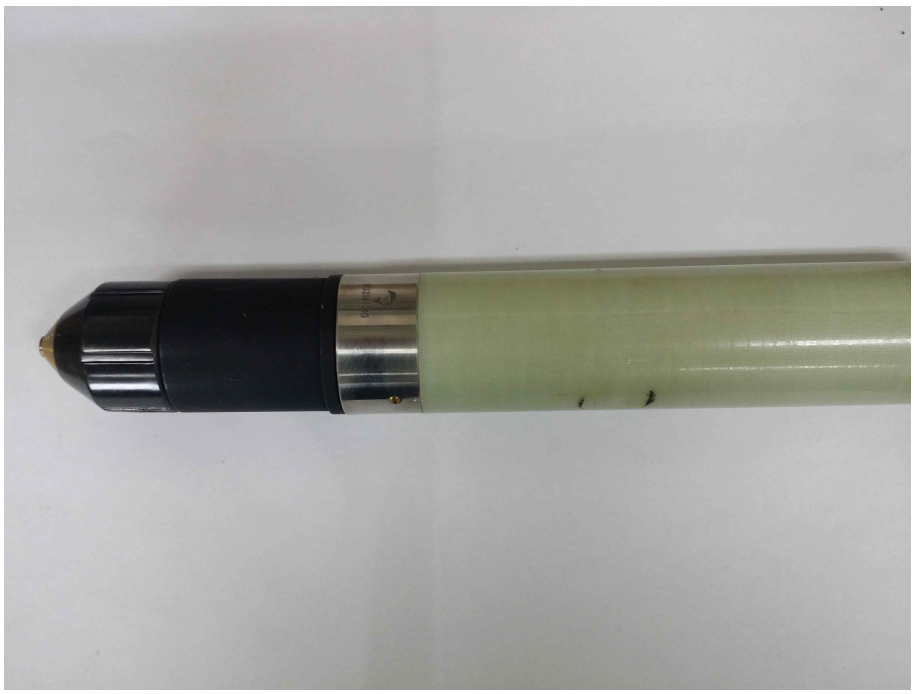


Fig. 33 Plasma gas torch

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

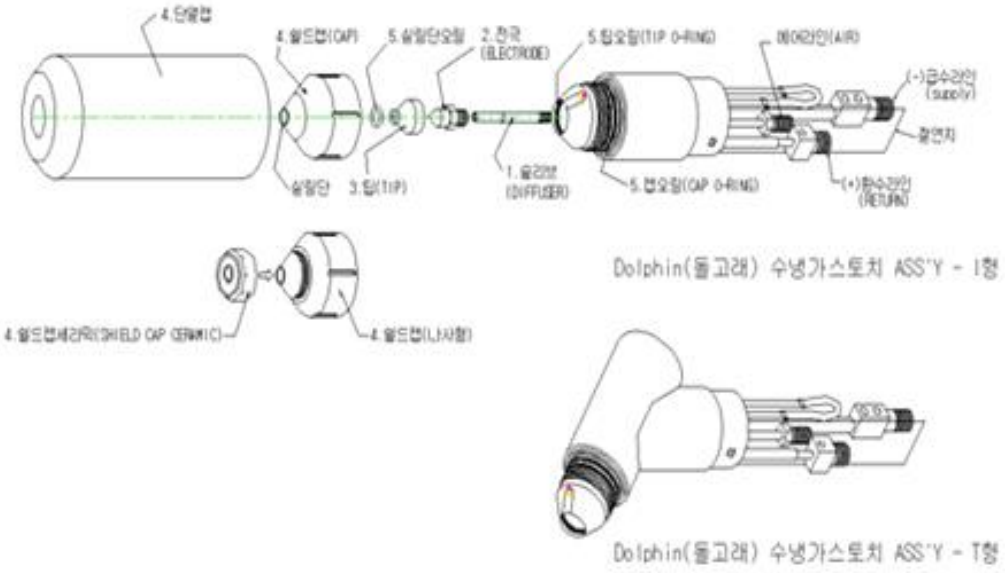


Fig. 34 Constitution of plasma torch

Fig. 35 Inverter TIG arc welder

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

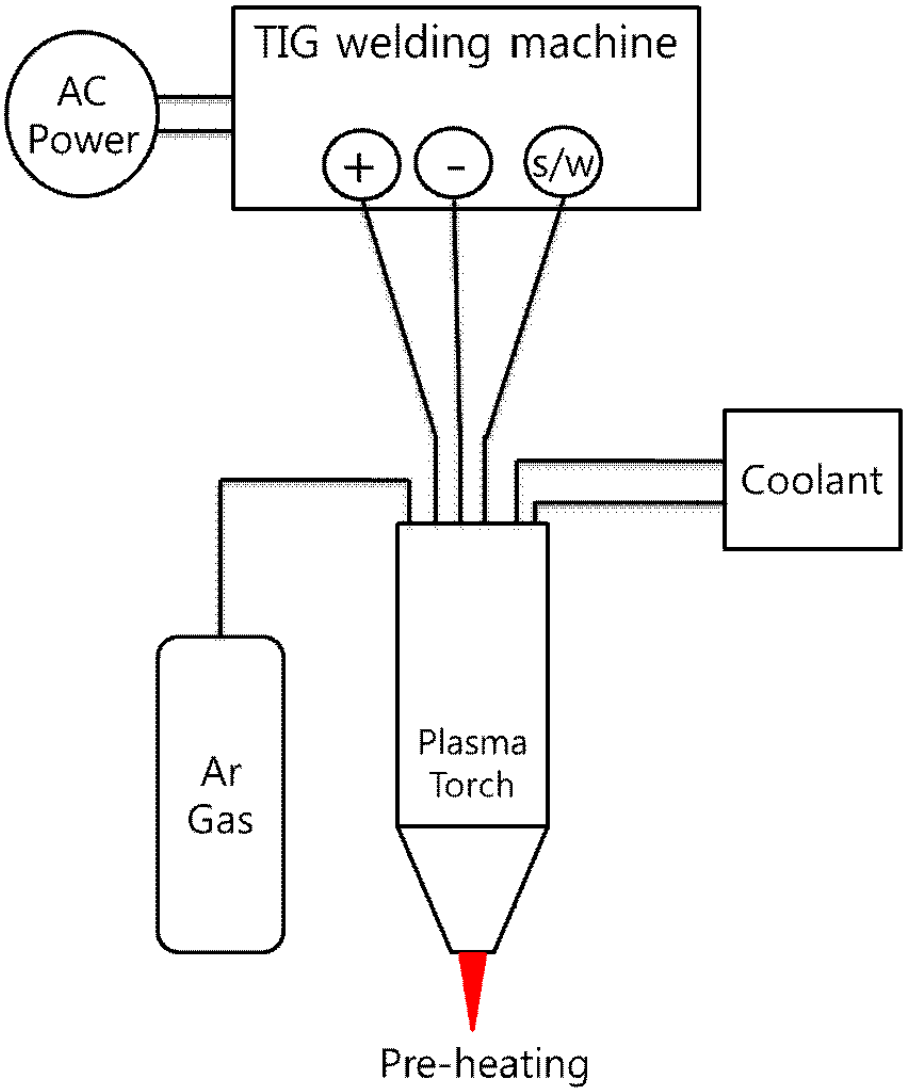


Fig. 36 Pre-heating system for plasma torch

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3-3. FEM 시뮬레이션

본 연구에서 ABAQUS 13.1 소프트웨어를 사용하여 포밍 성형의 FEM simulation을 수행하였다. 롤 포밍 성형기의 도면을 바탕으로 롤 다이를 모델링하였다. 각 롤 패스 중심 간 거리는 220mm로, 롤 성형기와 같은 위치 값으로 Fig. 37과 같이 롤 금형을 배치(assembly)하였다. 롤 금형은 성형하는 동안 형상에 대하여 변형이 없으므로 강체(rigid body)로 설계를 하였으며, 빠른 해석을 위해 Shell 타입으로 모델링 하였다. 성형시트는 solid 타입으로 실제 실험 성형 시트와 크기가 동일한 크기로 시트 길이, 폭, 두께가 각각 600mm, 60mm, 0.79mm로 모델링을 하였다. 성형시트가 성형방향으로 이동하기 때문에 롤 다이와 소재간의 마찰을 없다고 가정하였고, 성형 방향으로 이동할 수 있도록 시트에 경계조건을 부여하였다. 성형 시트의 굽힘 작용으로 인한 인장 과 압축현상을 분석하기 위해 3-layer로 설계를 하였으며, 굽힘 작용이 집중적으로 일어나는 부분인 Web부분에 정확한 스프링 백 값을 구하기 위해 메쉬(Mesh)를 집중 분할하였다. 성형시트에는 총 5,400개의 요소(hexahedral element, C3D8R)로 분할되었으며, 롤 금형은 7,212개의 요소(R3D4, quadrilateral element)로 분할되었다. 동적인 거동에 해석을 위해 Dynamic-explicit 기법을 시트를 성형하였고, 동적해석 결과를 활용하여 다시 정적해석을 하여 스프링 백 값을 구하였다.

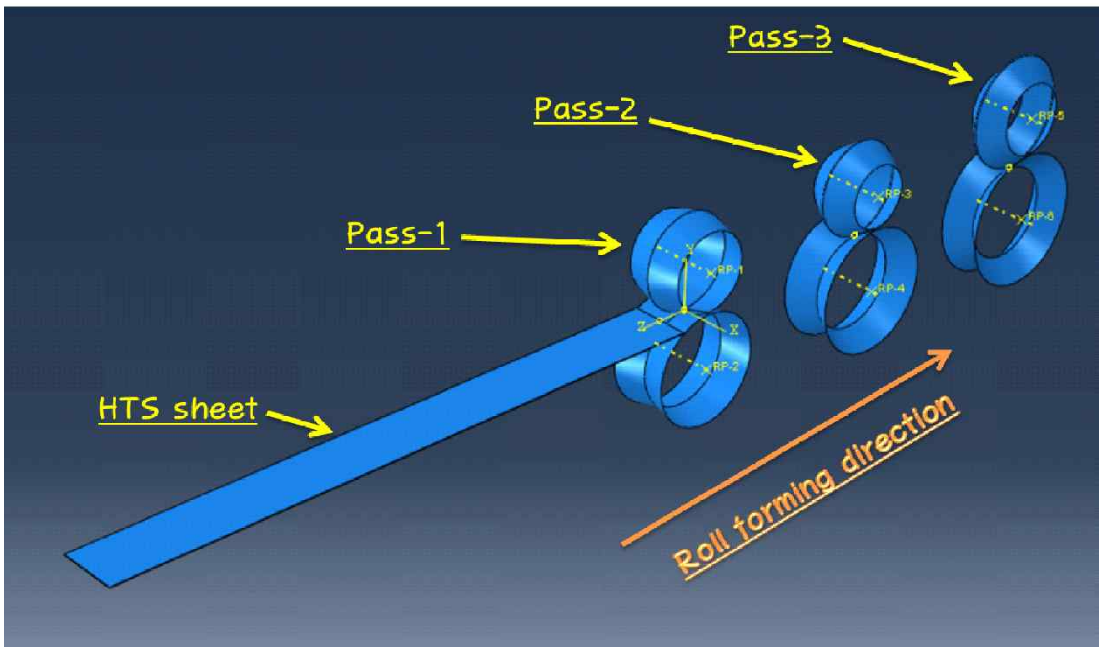


Fig. 37 Roll forming process in FEM simulation

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅲ. 실험 결과 및 고찰

1. 상온에서의 주요변수에 따른 스프링 백 량 변화

롤 포밍 공정에서의 공정 변수는 가변 롤, 롤 패스 수, 롤 성형속도, 롤 갭 조정, 롤 패스 간 거리, 플라워 패턴 설계 변경 등 많은 변수를 가지고 있다. 본 연구에서 사용된 롤 포밍기의 조절 가능한 롤 포밍 변수는 롤 갭과 성형속도이다. 그러므로 상온 롤 포밍 실험에서는 실험 변수로서 롤 포밍 성형 속도(Roll forming velocity)와 상하롤 간 갭(Roll Gap)으로 실험 변수로 설정하였다. 2개의 실험변수의 상호간 영향을 파악하기 위해 상온 실험에서 사용된 롤 포밍 변수의 범위는 Table 4와 같다. 2개의 변수에 대하여 영향을 파악하기 위해, 모든 변수에 대하여 15회 실험을 수행하였다.

실험변수 롤 갭이 고정된 값으로 하고 성형 속도에 대한 영향을 분석한 결과는 Fig. 38 ~Fig. 40과 같다. 같은 롤 갭에서 성형 시 성형속도에 따른 스프링 백 량 차이가 거의 없었다. 롤 갭이 0mm일 때는 전체적인 평균값이 목표한 최종 성형 값인 90°보다 낮게 측정이 되었으며, 갭이 1mm일 때는 평균 성형 각이 91°, 2mm일 때는 평균 성형각이 95°로 도출이 되었다. 롤 갭이 증가 할수록 속도에 따른 최종 성형 각 차이는 없었지만 전체적인 평균 성형 값들이 증가하는 것을 확인 하였다. 또한 롤 갭이 적을수록 성형각도의 차이가 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 성형 각 차이가 없다는 것은 제품이 균일하게 생산된다는 것을 의미하며, 롤 갭이 2mm일 때는 시트의 측정 위치에 따라 성형 각이 차이가 증가하는 것으로 보아 갭이 증가할수록 성형시트의 버클링 현상이 증가한다고 판단할 수 있다.

성형 속도를 고정된 값으로 하고 롤 갭에 대한 영향을 분석한 결과는 Fig. 41 ~ Fig. 45와 같다. 위의 그래프의 가장 큰 특징은 롤 갭 마다 평균 성형각 차이가 크게 나왔으며, 롤 갭에 따른 평균 성형각 차이는 거의 일정한 간격으로 차이를 보였다.

도출된 그래프를 전체적으로 검토해보면, 처음 성형되는 측정위치 1과 마지막으로 성형되는 측정위치 11를 비교하면 평균 성형 값에서 많이 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 측정위치 1에서는 초기에 롤 다이와 접촉 시 발생하는 시트의 응력으로 인하여 시트 안쪽면으로 변형이 많이 생겼으며, 측정위치 11에서는 최종 패스인 Pass-3에서 성형시트가 롤 금형으로부터 구속이 풀릴 때 시트 내 응력분포가 다른 측정 위치와 다르기 때문이라고 판단된다. 목표 성형각인 90°에 만족하기 위해 롤 갭은 약 0.6mm로 설정하고, 제품의 버클링을 고려한다면 속도 40수준에서 성형이 되어야 한다고 판단한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 4 Range of experiment variable

Experiment variable	Range of parameters
Roll gap [mm]	0, 1, 2
Velocity controller value	20, 40, 60, 80, 100

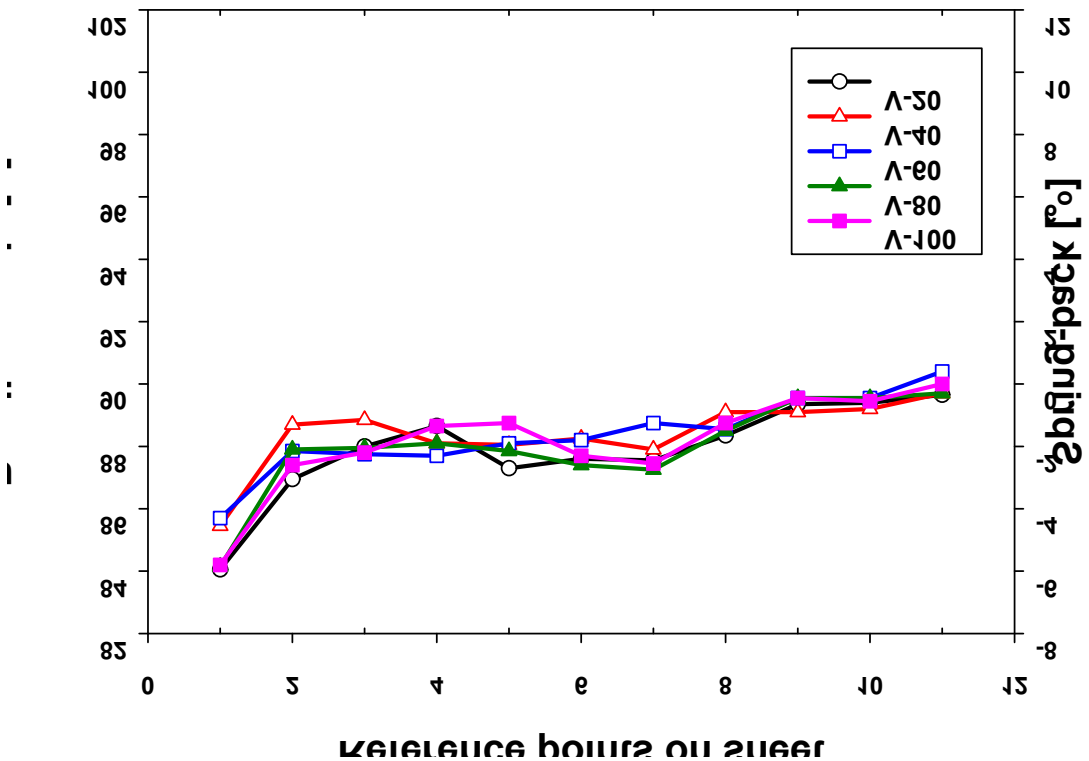


Fig. 38 Spring-back value according to reference point(Gap : 0mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

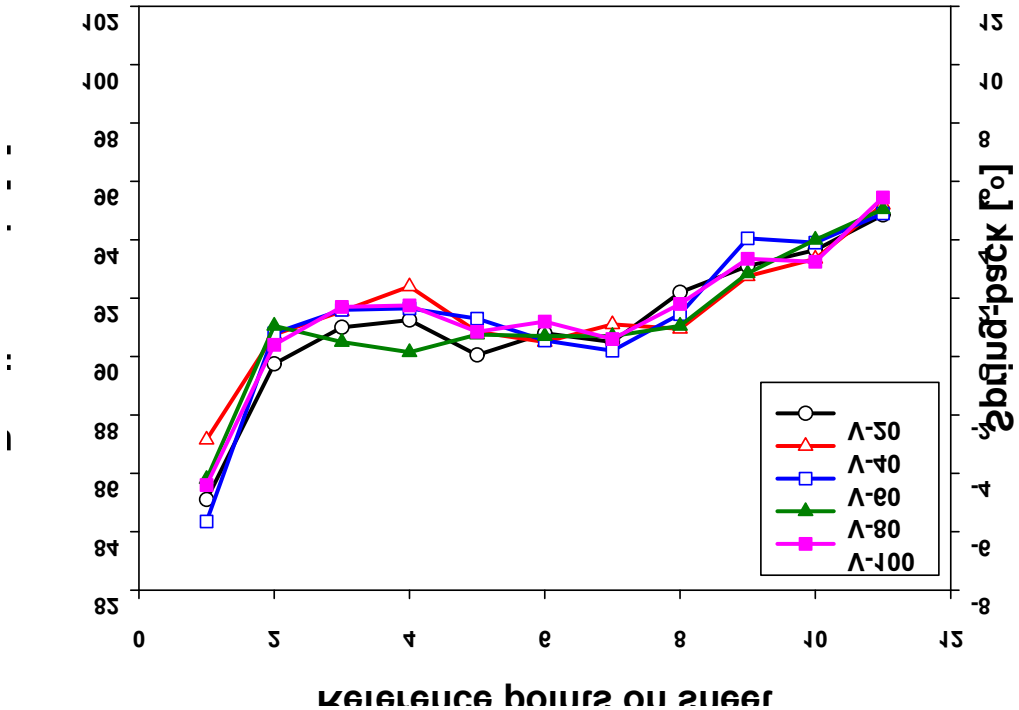


Fig. 39 Spring-back value according to reference point(Gap : 1mm)

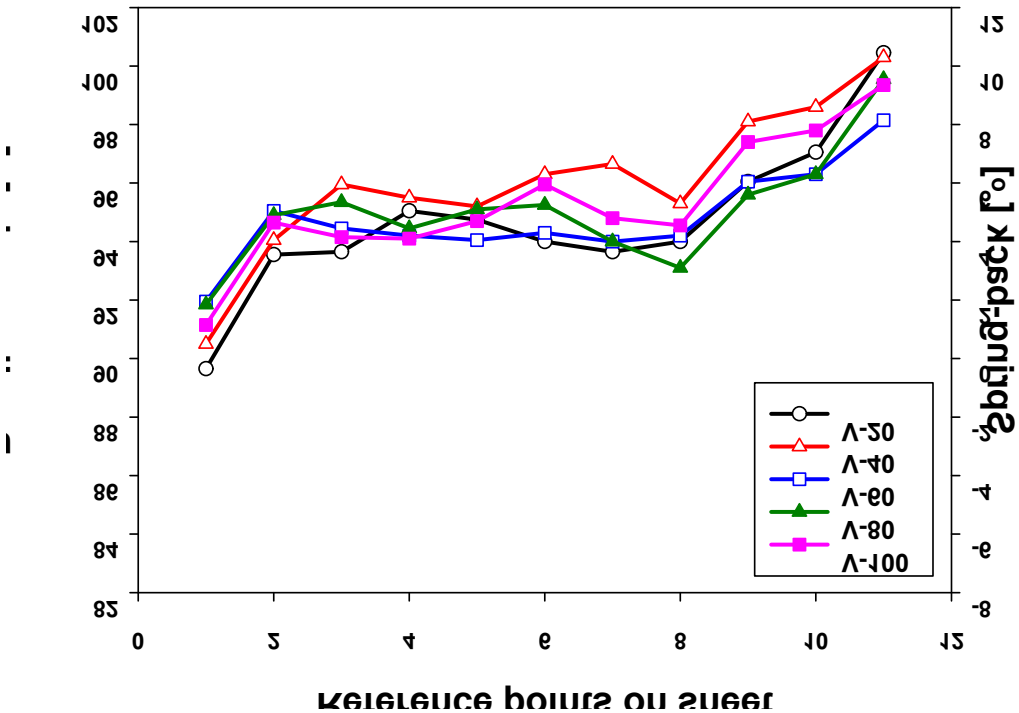


Fig. 40 Spring-back value according to reference point(Gap : 2mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

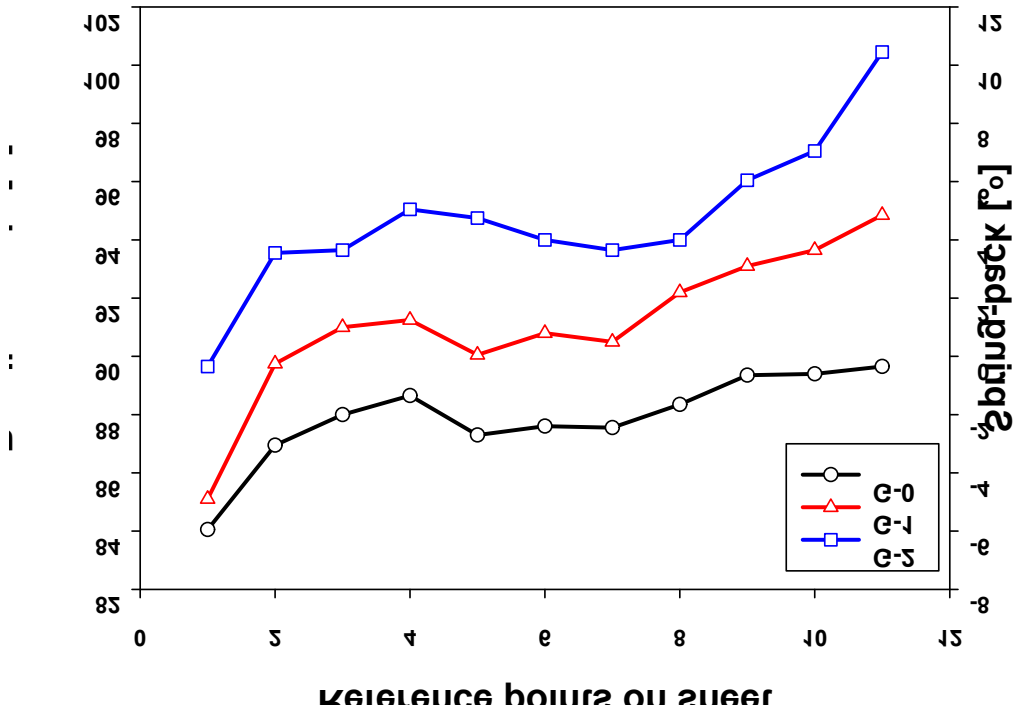


Fig. 41 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 20)

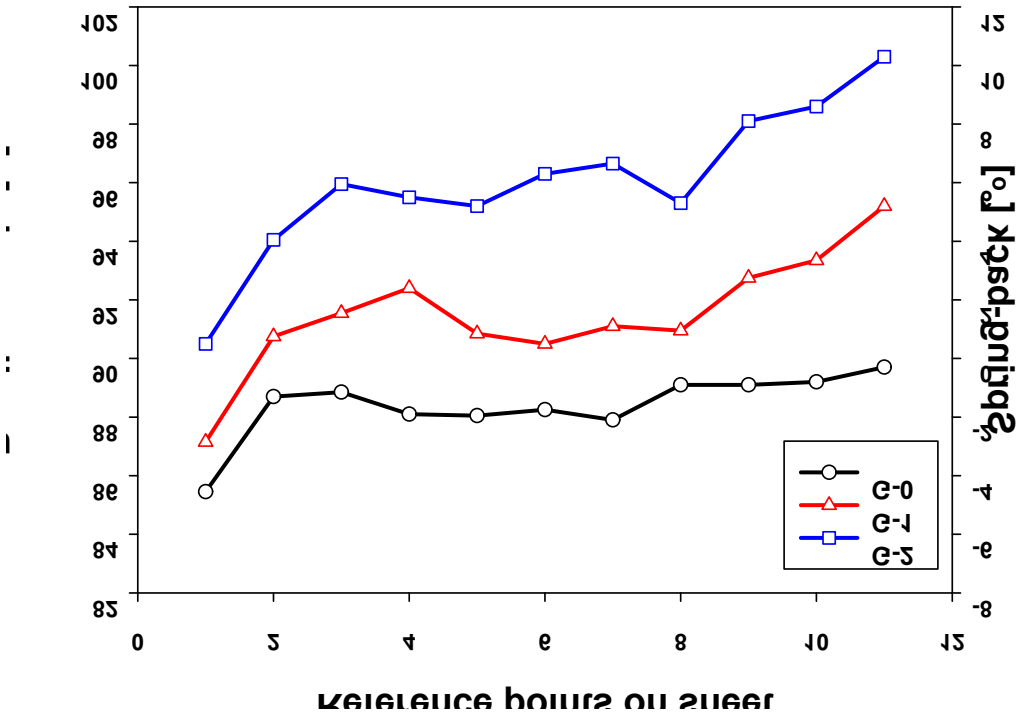


Fig. 42 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 40)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

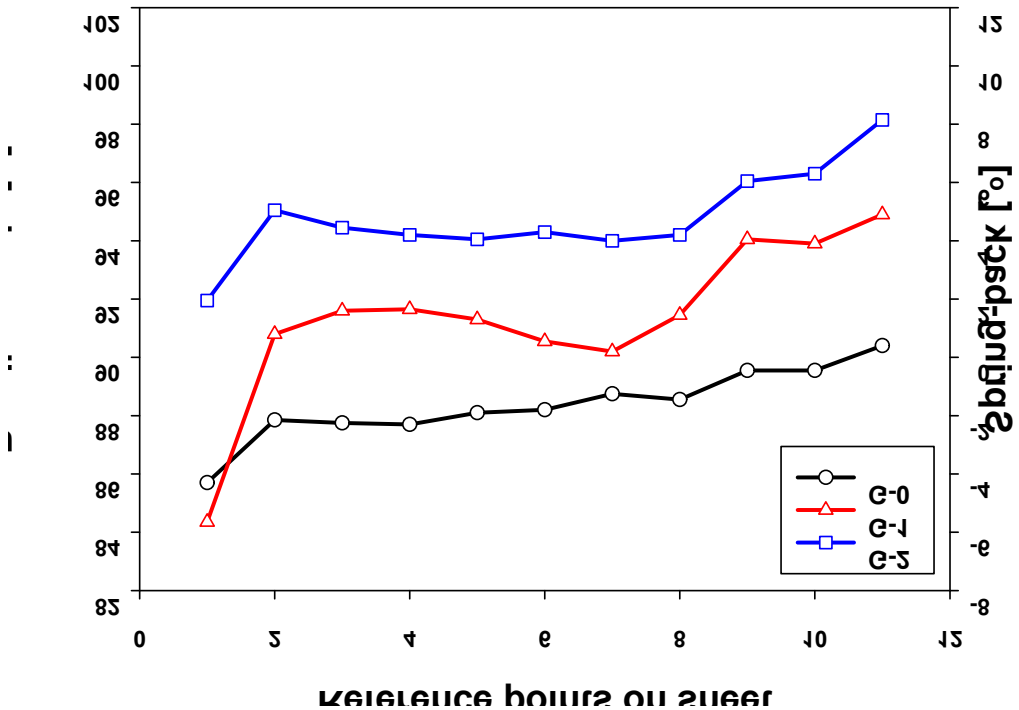


Fig. 43 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 60)

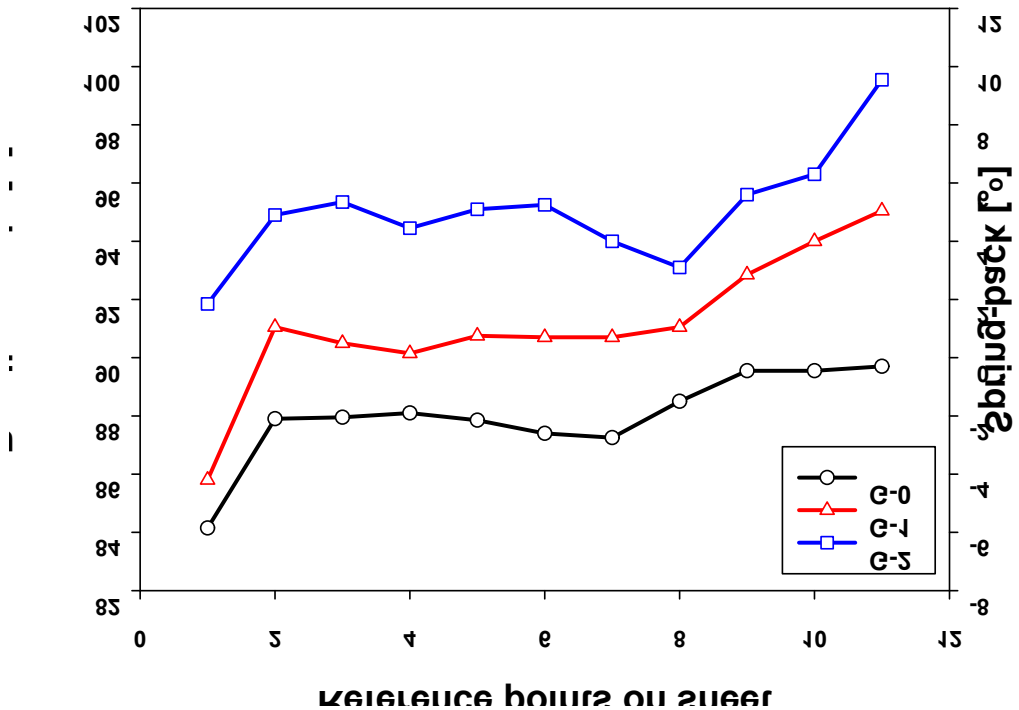


Fig. 44 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 80)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

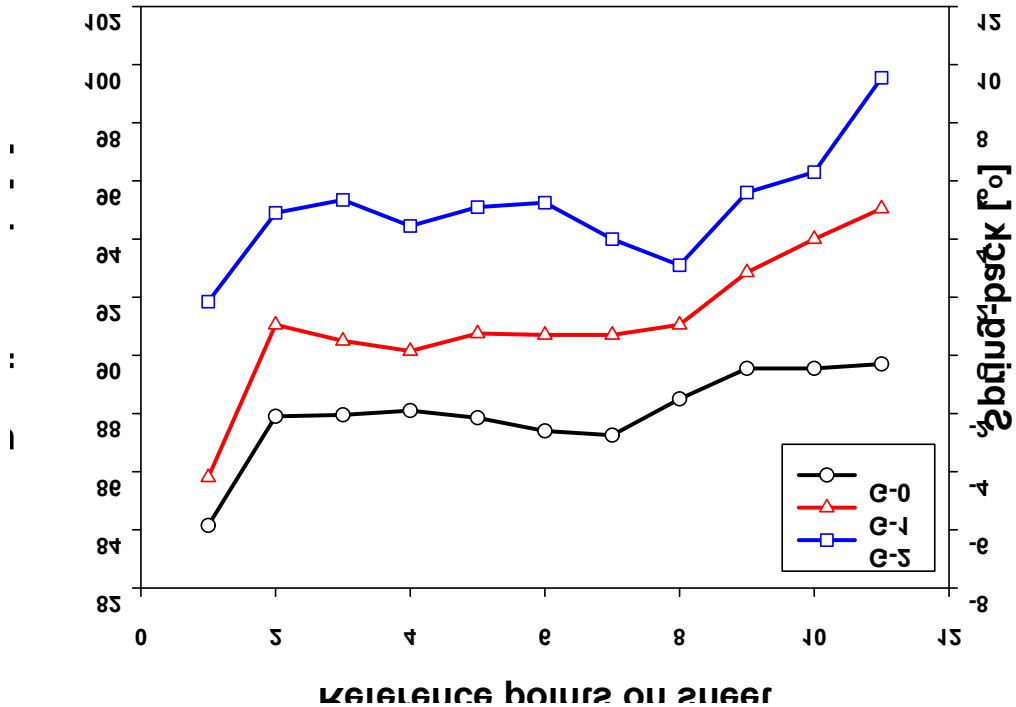


Fig. 45 Spring-back value according to reference point(Forming velocity : 100)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2. 예열공정 변수에 따른 성형 시트 온도 변화 측정

성형시트를 예열하는 방법에는 고주파 유도가열(High-frequency induction heating), 레이저 예열(Laser preheating), 로 예열(Heating furnace)등 여러 가지 방법이 제시된다.

고주파 유도가열인 경우 급속적인 예열 및 전기적인 에너지를 사용한 정확한 온도조절이 가능하여 롤 포밍 공정에 적합하지만, 값비싼 초기 시설 투자비 및 원하는 벤딩부의 국부가열이 힘들고 소재에 따라 예열이 안 되는 경우가 있다. 레이저 예열은 정밀한 국부가열, 높은 빔 에너지에 의한 빠른 온도상승 그리고 소재의 부식 등의 데미지가 적다는 장점을 가진다. 하지만 레이저 가공은 국부 가열 면적이 매우 좁으며 비싼 초기 시설 투자비를 요구한다. 로 예열인 경우 원하는 온도까지의 온도상승 시간, 성형 시트의 출입구의 공간에 의한 열에너지 손실율이 크며, 롤 포밍 공정과 같은 연속적인 공정에는 온도 유지를 위해서 로의 크기도 길어져야 하는 등 롤 포밍 공정에 적용하는 예열공정으로서 많은 단점을 가진다.

본 연구에서 적용하는 토치 예열은 국부가열도 가능하며, 낮은 초기 시설 투자비를 가진다. 또한 가스토치에 사용하는 예열가스의 종류, 예열가스의 량 및 적용 공정 상황에 따라 유동적인 온도 조절이 용이하고, 롤 포밍 공정과 같은 연속적인 공정에 적용이 가능하다.

이러한 이유로 본 연구에서는 몇 가지의 예열방식 중 가스토치를 롤 포밍 공정으로 적용하였으며, 가스토치 중에서도 부탄가스를 예열가스로 사용하는 부탄가스 토치와 비활성 기체인 아르곤 가스를 예열가스로 사용하는 플라즈마 토치 2가지에 대하여 롤 포밍 공정에 적용하였다.

롤 포밍 공정에 가스토치 예열공정을 적용하기 위해서는 예열장치인 가스 토치에 의한 불꽃화염의 분석이 필요하다. 성형 시트가 가스 토치에 의한 온도 영향을 알아보기 위해, 기본적으로 각 토치의 불꽃화염의 온도 분포 분석이 필요하며, 또한 롤 포밍 공정 적용하기 전 성형시트의 이동 시 예열을 했을 때 시트의 온도의 분포가 필요하다.

롤 포밍 공정에 예열 공정을 적용하는 것을 고려하여, 가스 토치의 온도 예열 실험은 롤 포밍 성형 속도와 토치와 성형 시트 간 거리 2가지에 대하여 실험변수로 설정하고 예열 실험을 수행하였다. 가스 토치의 불꽃화염은 토치 화염 온도 측정 장치(Fig. 22)에서 순수 가스 불꽃의 온도만 측정하였고, 성형 시트 예열 실험에는 성형 시트 온도 측정 장치(Fig. 23)에서 성형시트 온도를 측정하였다.

실험 시 온도 측정은 적외선 열화상 카메라를 사용하여 온도를 측정하였으며, 적외선 열화상 카메라의 이미지 파일에 담긴 온도 데이터를 기반으로 온도 값을 측정하였다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2-1. 가스토치 불꽃 특성 분석실험

본 실험에서는 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치의 불꽃 화염을 분석하여, 롤 포밍 공저에서 시트를 예열할 때 적합한 가스 토치와 성형시트간의 거리를 도출하기 위해 불꽃 화염의 온도분포를 분석하였다.

부탄가스 온도를 측정 할 때 최대 유량으로 실험을 하였고, 실제 롤 포밍 장치에 설치하는 것처럼 위에서 아랫방향으로 불꽃을 점화하였다. 실험 결과 부탄가스의 가장 높은 온도를 보이는 속불꽃의 온도는 Fig. 46.a와 같이 120.8℃로 측정이 되었으며, 불꽃길이의 측정기준이 60℃라고 했을 경우 총 불꽃의 길이는 147mm로 측정되었다. 부탄가스 토치에서 실제 부탄가스의 불꽃의 최대온도는 약 1,500℃이지만 [45], 적외선 열화상 카메라는 불꽃 표면에서의 적외선으로 온도를 측정하기 때문에 실제보다 약 10배 적게나왔다. 하지만 적외선 카메라로 불꽃의 형상의 길이를 측정할 수 있었으며, 불꽃 길이에 대한 온도 분포를 확인할 수 있었다. 부탄가스의 불꽃의 온도는 부탄가스토치의 불꽃 중심선 기준에서의 온도분포는 Fig. 47과 같으며, 20 ~ 50mm까지 열화상 카메라에서 최대 온도 범위인 약 115℃ 정도를 유지하다가 불꽃 길이 50mm 이상에는 온도가 감소가 되는 것을 확인 하였다. 부탄가스의 불꽃의 최대 너비는 약 15mm로 측정이 되었으며, 불꽃길이 약 100mm부터는 불꽃이 퍼지는 현상을 보이고 있다. 불꽃이 퍼지는 이유는 부탄 연소과정 중 발생되어지는 기화상태인 뜨거운 수증기의 온도 때문에 열화상 카메라에서 불꽃이 퍼지는 현상으로 보이는 것으로 판단되다.

플라즈마 가스토치의 불꽃온도 실험 시 아르곤 가스 유량 10 l/min, TIG 용접기 전류 100A를 인가하여 플라즈마 불꽃 온도를 측정하였다. 플라즈마 불꽃의 특징은 불꽃길이가 짧고 불꽃온도가 높은 것이 특징이다. 최대 플라즈마 불꽃 온도는 약 750℃로 측정이 되었으며, 열화상 카메라의 초점 및 플라즈마 불꽃 상태에 따라 최대 1,100℃까지 온도가 측정 되었다. 플라즈마 가스토치의 실제 불꽃온도는 약 10,000℃이지만 [46], 부탄 가스토치와 같은 이유로 온도가 낮게 측정된 것으로 판단된다. 플라즈마의 불꽃의 경우 불꽃길이에 따른 불꽃 온도의 감소가 급격하게 낮아 졌으며, 플라즈마 불꽃 길이 측정 기준이 90℃일 때 플라즈마 불꽃의 길이는 5mm ~ 7.5mm로 관찰되었다. Fig. 49는 일정 전류 인가 시 아르곤 가스 유량 변화에 따른 플라즈마 온도 분포를 보여주며, 100A를 인가 시 유량이 증가 할수록 불꽃 길이는 증가하는 경향을 보였다. 아르곤가스 유량 10 l/min일 때와 15 l/min일 때 플라즈마 불꽃길이 및 온도분포가 거의 유사한 것으로 측정 되었다. Fig. 51에서는 일정한 아르곤 가스량에서의 여러 가지 전류를 인가 했을 때의 플라즈마 불꽃온도 분포 및 길이를 보여주고 있다. 10 l/min 기준으로 전류 50A ~ 125A까지 분석한 결과 전류가 증가할수록 플라즈마

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

불꽃 온도 및 길이가 길어지는 것을 확인 할 수 있었다. 50A와 75A는 비슷한 결과를 보이고 있으며, 100A와 125A는 유사한 결과를 보이고 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 플라즈마 토치 인 경우 같은 아르곤 가스량 및 전류를 쓴다고 하면, 전류는 100A, 아르곤가스 유량은 10 l/min의 조건으로 사용하는 것이 효율이 높을 것으로 판단된다.

부탄가스 토치의 불꽃과 플라즈마 토치의 불꽃 온도에 대한 3D-IR image는 Fig. 48, Fig. 50, Fig. 52와 같으며, 3D 이미지를 통하여 보다 쉬운 온도 분포를 확인 할 수 있다.

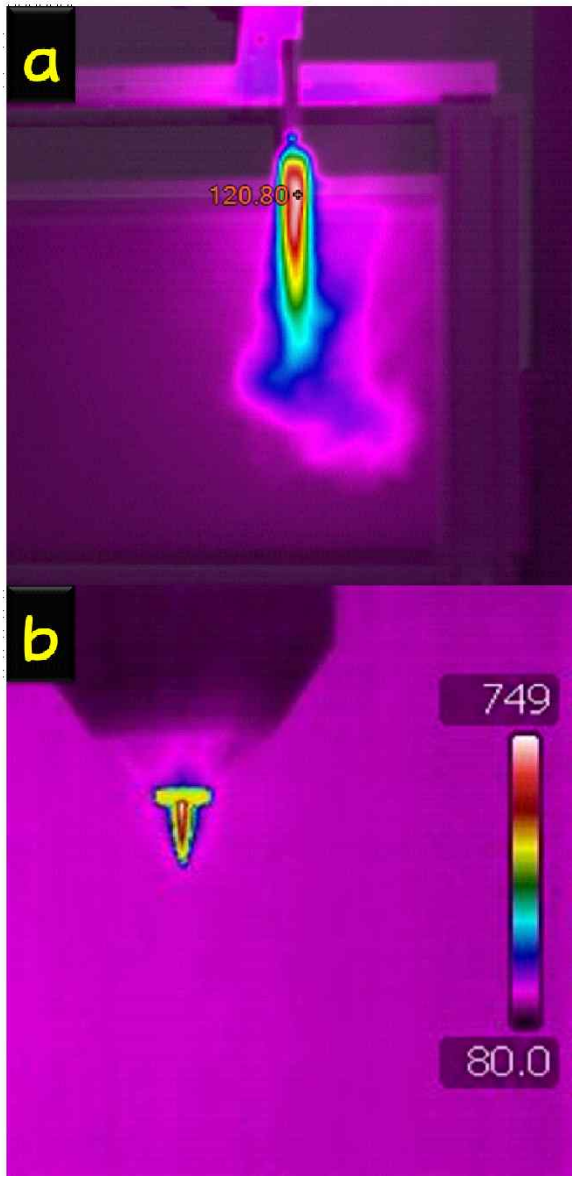


Fig. 46 Distribution of flame temperature[unit: ℃];
(a) butane gas torch (b) plasma gas torch

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

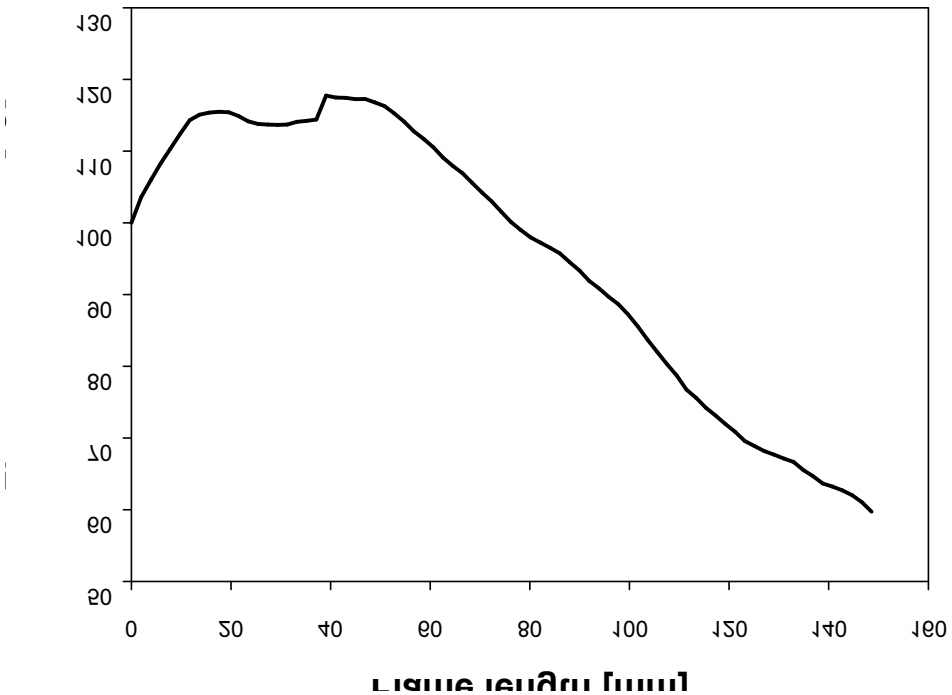


Fig. 47 Flame temperature Distribution of butane torch according to flame length

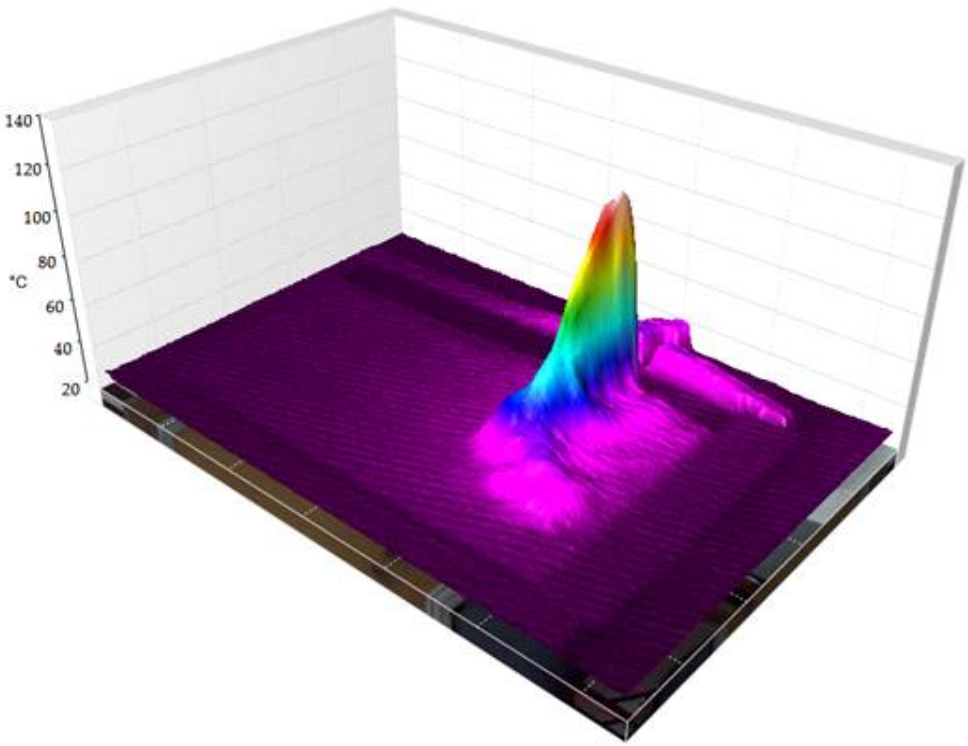


Fig. 48 3D-IR image of flame of butane torch

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

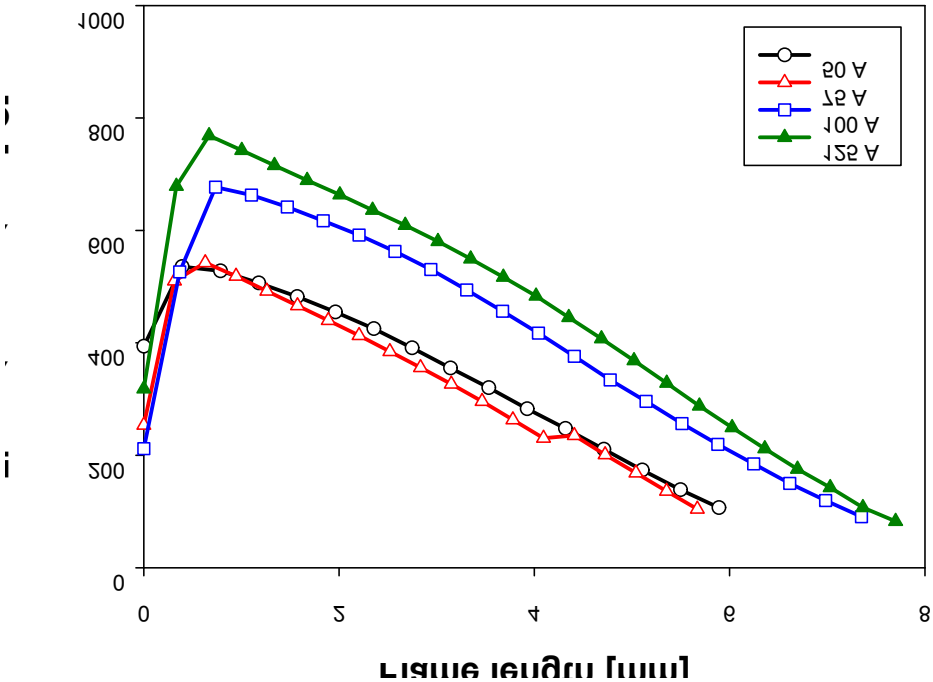


Fig. 49 Flame temperature Distribution of plasma torch according to flame length (Ar : 10 l/min, Power : 125A)

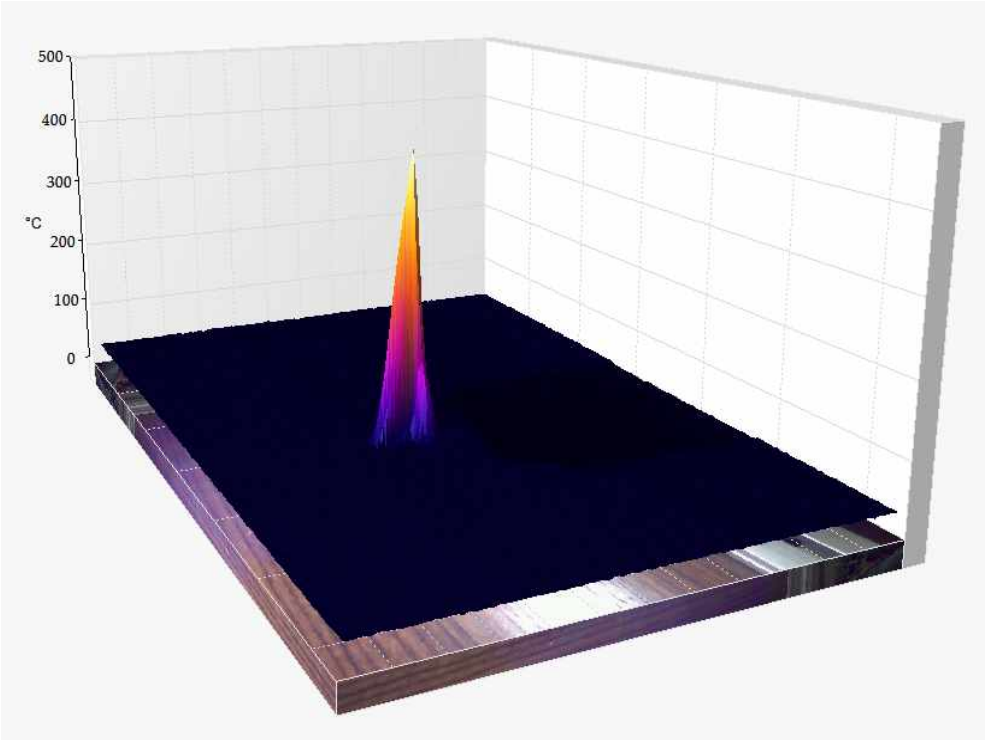


Fig. 50 3D-IR image of flame of plasma torch (Ar : 10 l/min, Power : 125A)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

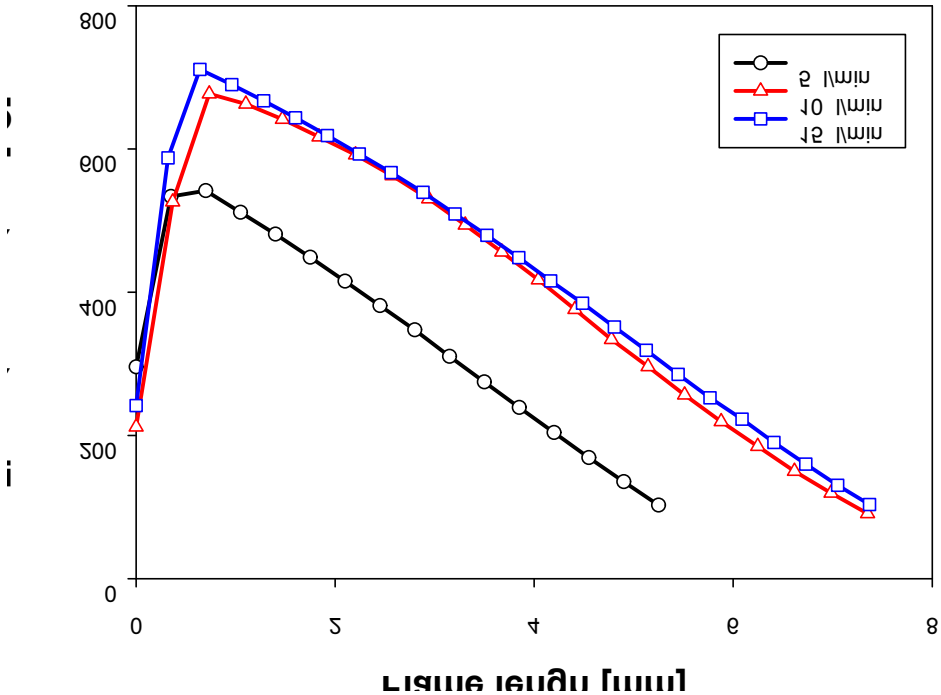


Fig 51 Flame temperature Distribution of plasma torch according to flame length (Ar : 15 l/min, Power : 100A)

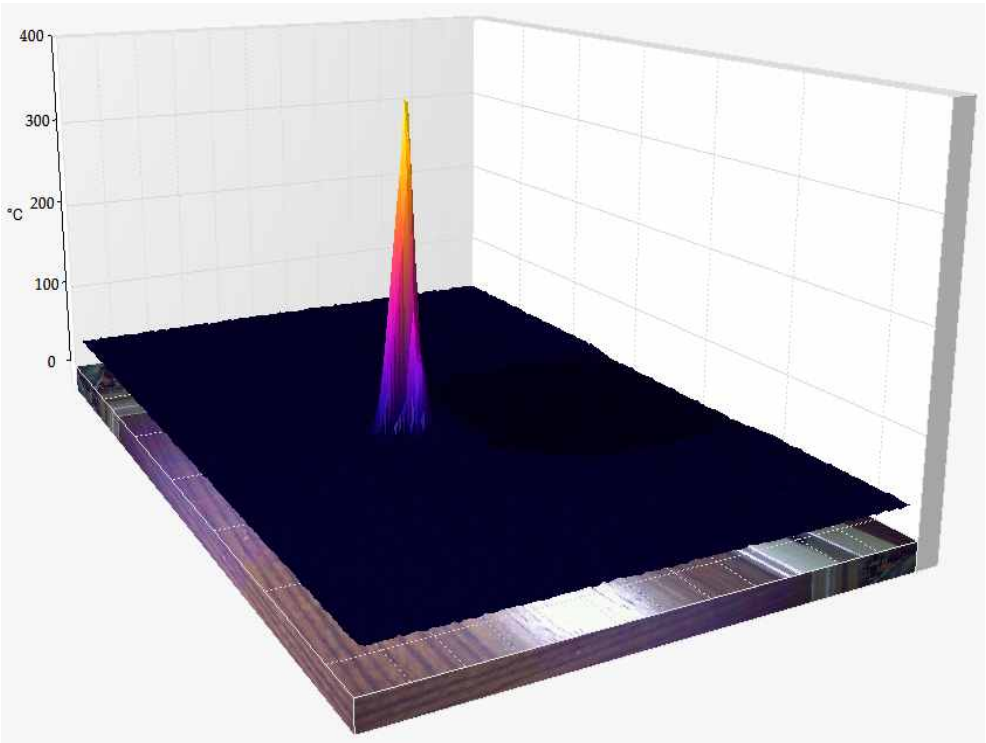


Fig. 52 3D-IR image of flame of plasma torch (Ar : 15 l/min, Power : 100A)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2-2. 성형시트의 열적 특성 분석 실험

성형 시트의 가스토치에 의한 열적인 특성 분석 실험을 성형 시트 온도 측정장치에서 수행하였다. 예열실험에 사용된 판재는 스테인리스 스틸(Stainless steel)를 사용하였으며, 정성적 분석을 통한 가스토치의 열적 특성을 분석하고자 하였다.

성형시트의 열적 특성 분석 실험에서 성형 시트 이송할 때 롤 포밍기의 유압모터와 연결하여, 거의 유사한 시트 이송속도로 실험을 수행하였다. 실제 롤 포밍 성형속도와 비교한 그래프는 Fig. 27와 같다. 가스토치와 성형시트간 거리는 가스토치 불꽃 특성 분석실험을 통하여 변수의 범위를 결정 하였다. 결정된 가스토치와 성형시트간 거리와 본 실험에 대한 실험변수는 Table 5와 같다.

Fig. 53 ~ Fig. 56까지는 성형시트와 부탄 가스토치 간 일정한 거리에서의 시트 이송속도에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 일정한 시트와 부탄 가스토치간 거리에서는 속도컨트롤러 레벨이 20일 때 약 120℃~180℃의 높은 온도분포를 보여주고 있으며, 속도컨트롤러 레벨이 40과 60일 때에는 80℃ ~ 120℃의 온도분포로 나타나고 있다. 그리고 속도컨트롤러 레벨이 80과 100의 온도분포 범위가 40℃~80℃로 측정 되었다. 속도 컨트롤러 레벨이 80과 100에서는 토치에 의한 예열효과가 적은 것으로 분석이 된다.

Fig. 57 ~ Fig. 62까지는 일정한 시트와 플라즈마 가스토치간 거리와 시트 이송속도에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 플라즈마 가스토치의 경우는 속도컨트롤러 레벨이 20일 때와 그 나머지 속도 레벨과의 온도차가 많이 발생 했으며, 온도 유지하는 되는 거리도 부탄토치보다 짧고 낮은 온도에서 예열됨을 확인 하였다.

Fig. 53 ~ Fig. 62까지 전체적인 그래프를 검토를 하면, 부탄 가스토치가 플라즈마 가스토치보다 높은 온도 예열효과를 보이고 있으며, 성형시트가 가스토치에 의해 예열된 후 100mm지점 까지는 시트 내 열전달 및 주변의 공기에 의해 냉각이 되는 것으로 판단된다. 또한 그래프 값들이 실험 변수에 의해 일정한 온도 분포가 도출 안 된 이유는 유압모터의 초기 속도와 안정화된 속도차이로 인해, 가스 불꽃이 시트를 예열하는 시간이 같지 않아 오차가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 63 ~ Fig.66은 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치에서 가장 높은 온도분포의 조건에서의 시트의 열화상이미지와 3D-IR 사진이다. 부탄 가스토치를 사용 시에는 온도 분포가 넓은 것을 확인 할 수 있었으며, 플라즈마 토치는 좁은 면적의 국부가열을 하는 것을 확인 할 수 있다. 부탄 가스토치의 불꽃이 플라즈마 불꽃보다 직경이 넓긴 하지만, 부탄 가스토치에서 발생되는 불꽃이 성형시트에 의해 퍼짐현상을 보이면서 시트의 전체적인 예열이 되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 5 Experiment condition of butane and plasma gas torch

Gas torch	Exp. parameter	Parameter range
Butan gas torch	Flow rate [l/min]	0.83
	Sheet/Torch distance [mm]	30, 50, 70, 90
	Forming speed [-]	20, 40, 60, 80, 100
Plasma gas torch	Flow rate [l/min]	10
	Sheet/Torch distance [mm]	5, 10, 15, 20, 25, 30
	Forming speed [-]	20, 40, 60, 80, 100

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

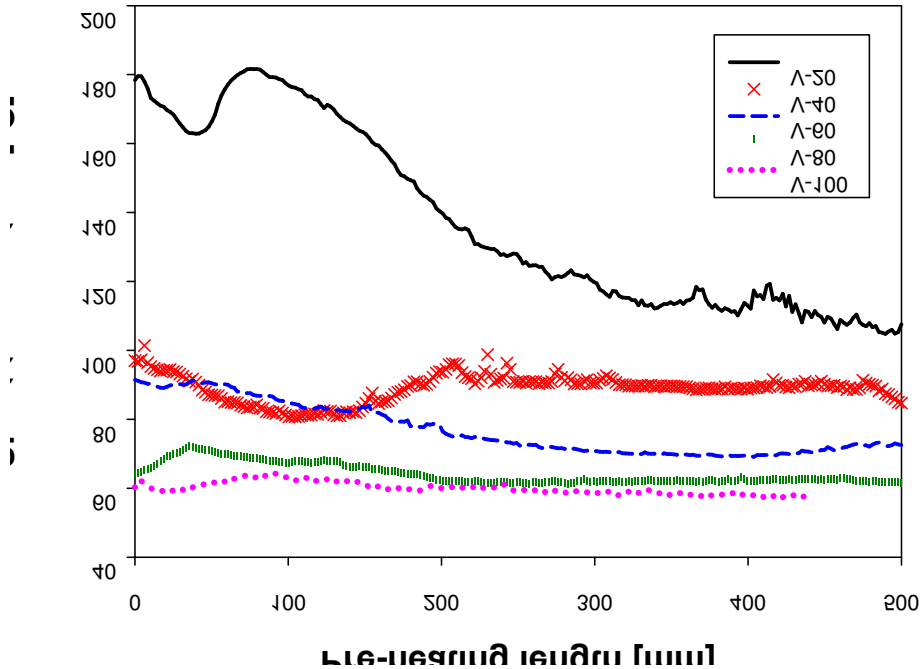


Fig. 53 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 30mm)

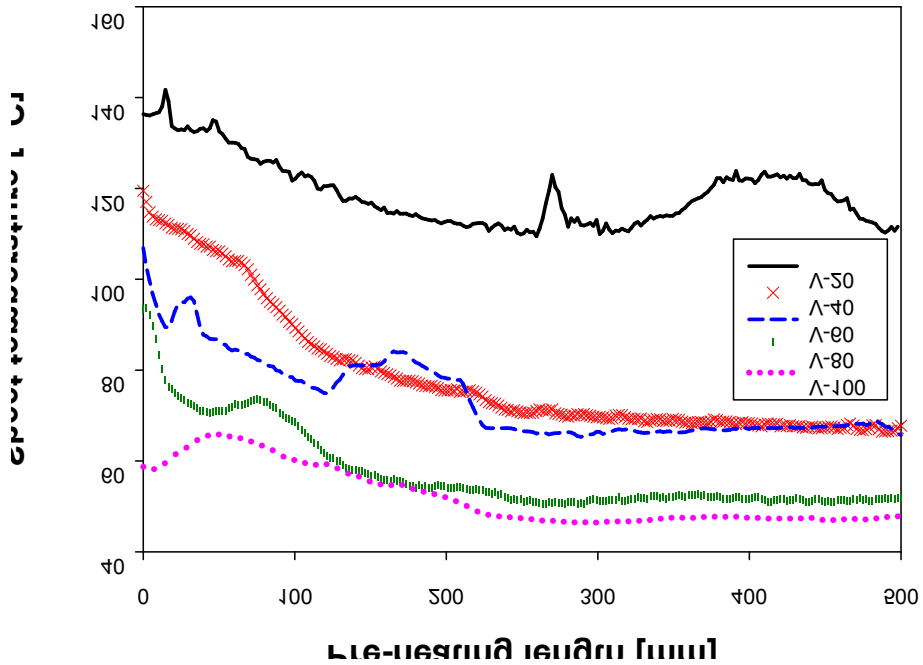


Fig. 54 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 50mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

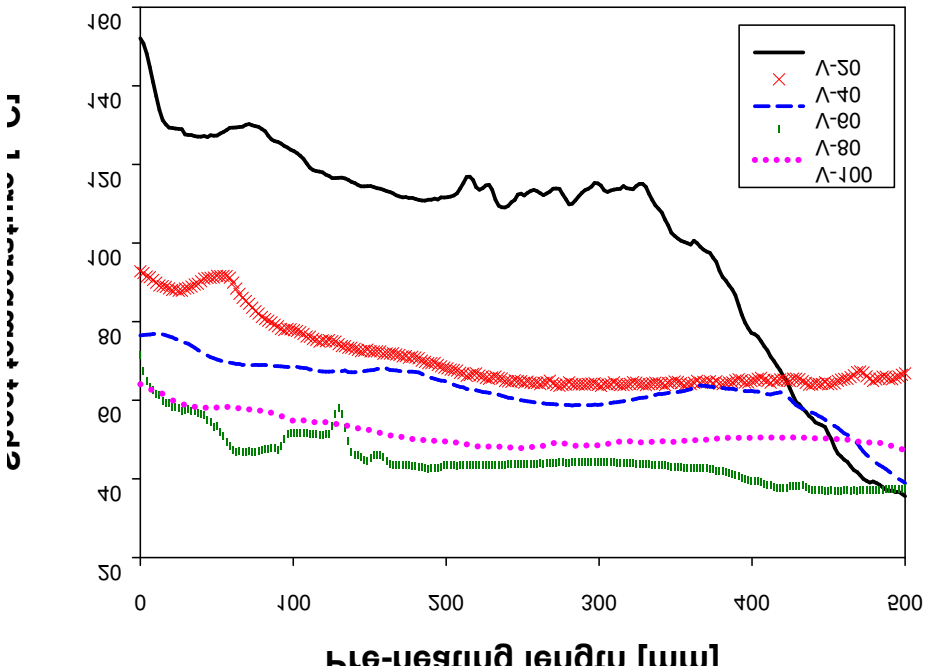


Fig. 55 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 70mm)

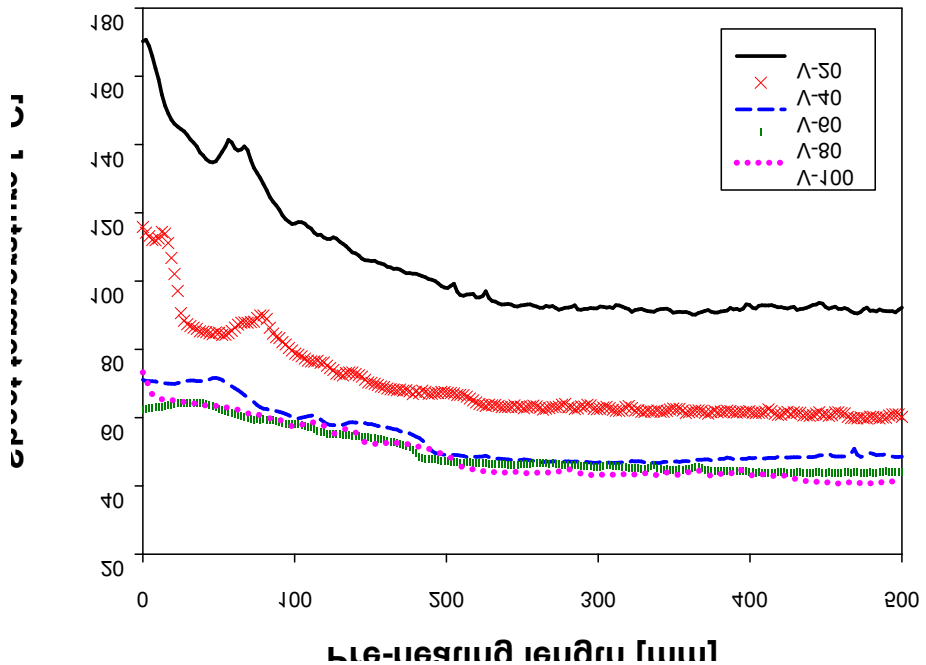


Fig. 56 Temperature distribution on forming sheet using butane gas torch (pre-heating distance : 90mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

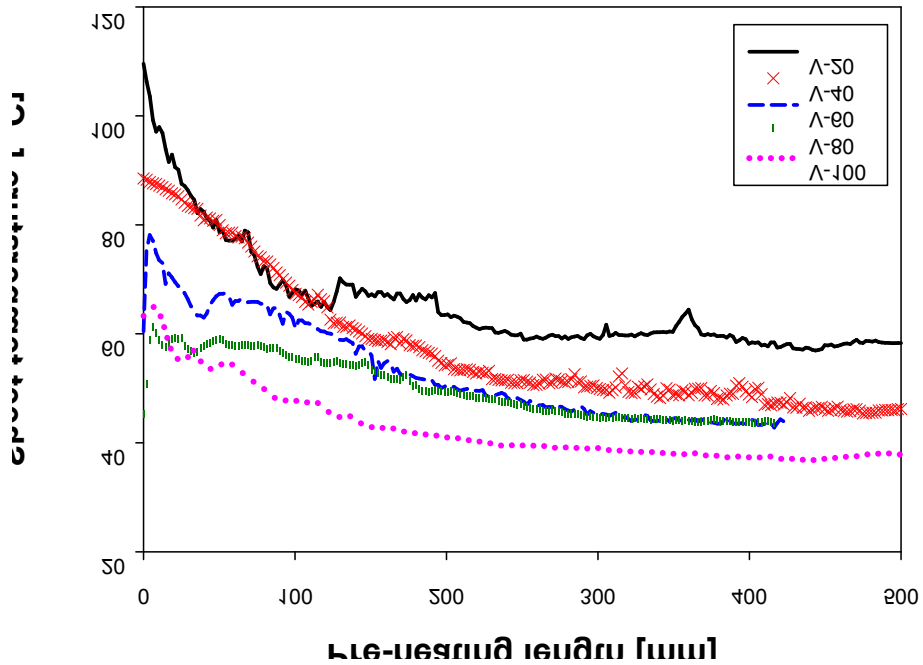


Fig. 57 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 5mm)

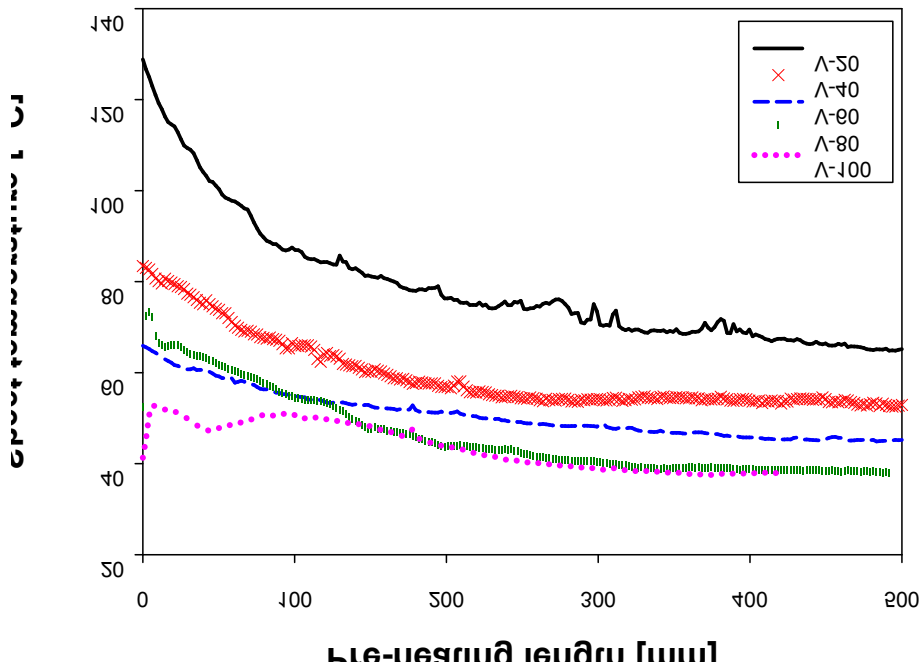


Fig. 58 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 10mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

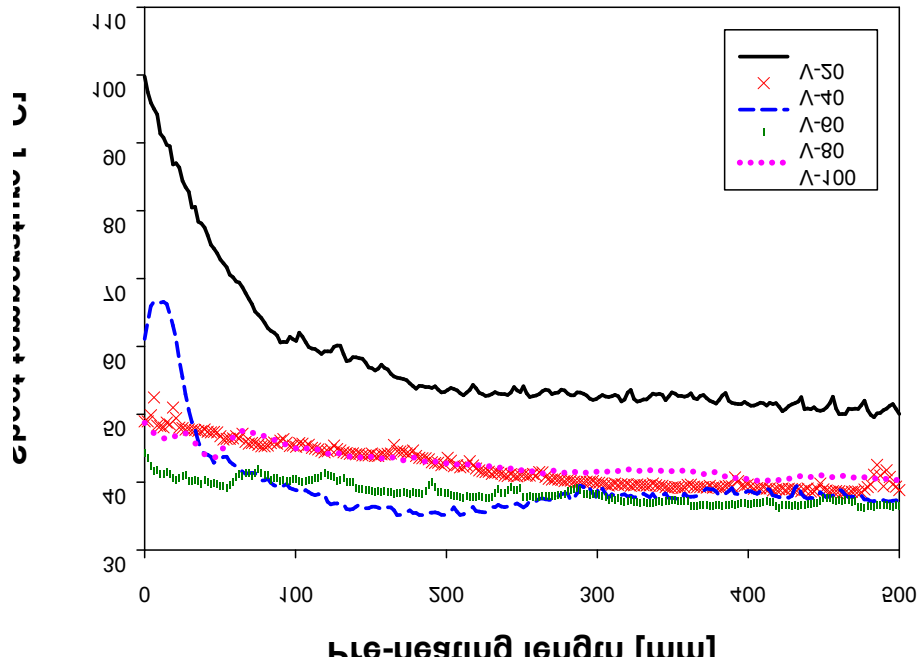


Fig. 59 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 15mm)

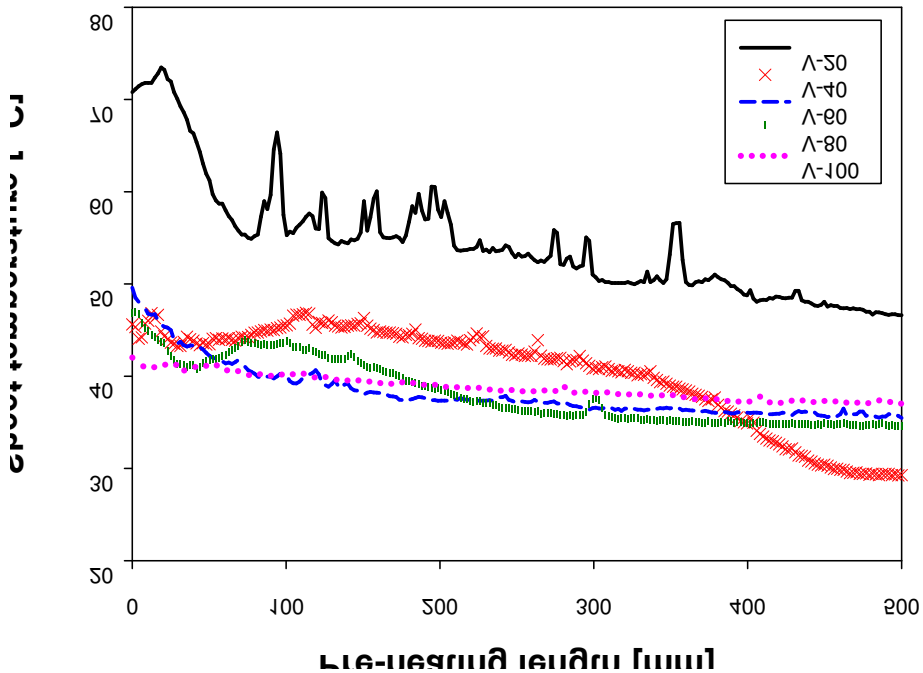


Fig. 60 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 20mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

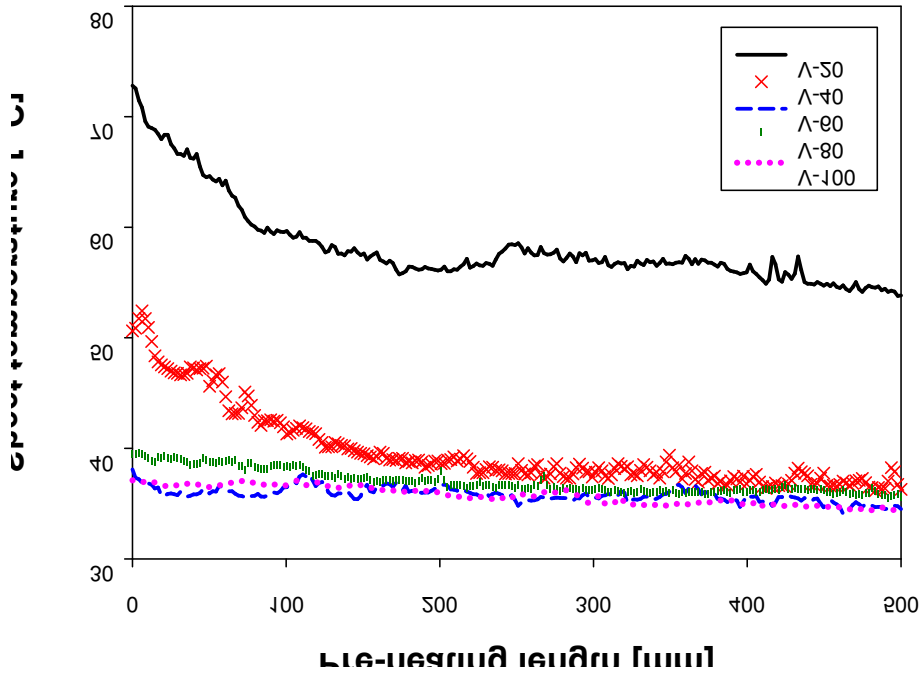


Fig. 61 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 25mm)

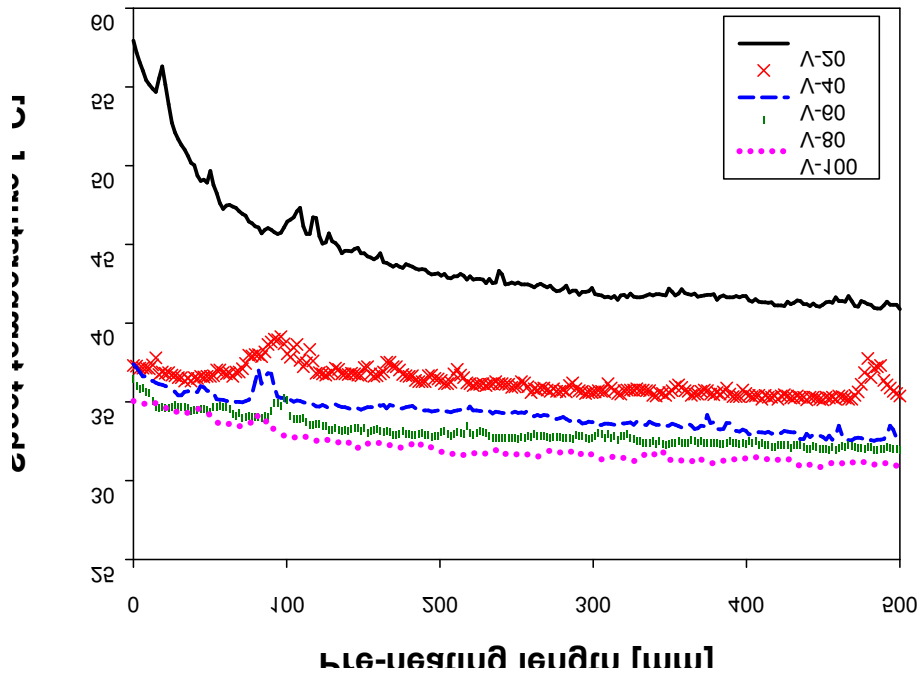


Fig. 62 Temperature distribution on forming sheet using plasma gas torch (pre-heating distance : 30mm)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

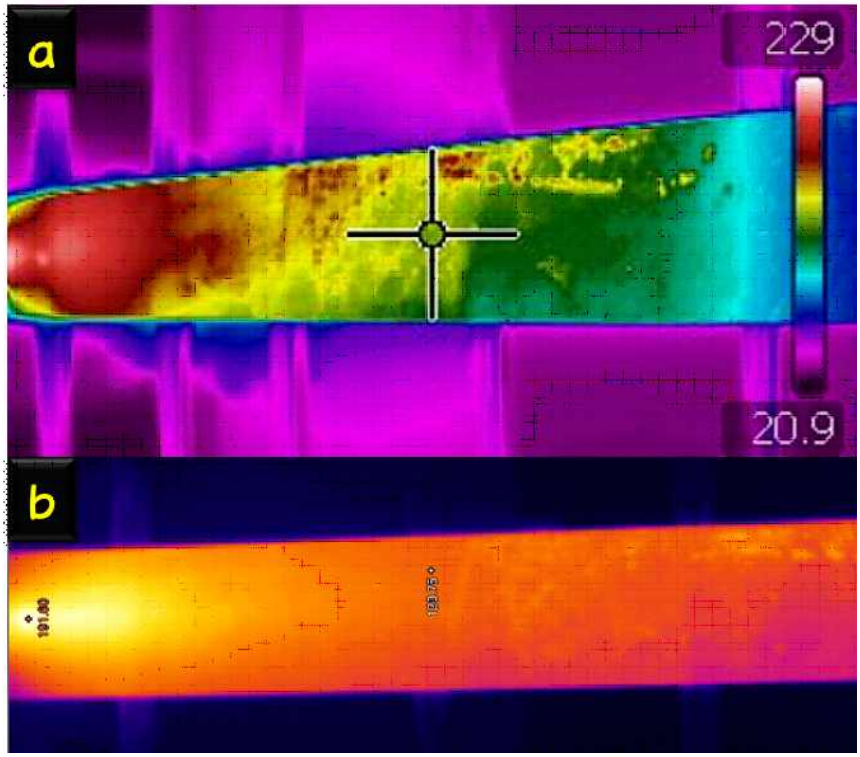


Fig. 63 Thermo-graphic image temperature distribution of forming sheet using butane gas torch(Distance : 3mm, Velocity : 20), (a) FLIR (T400), (b) FLUKE (Ti32)

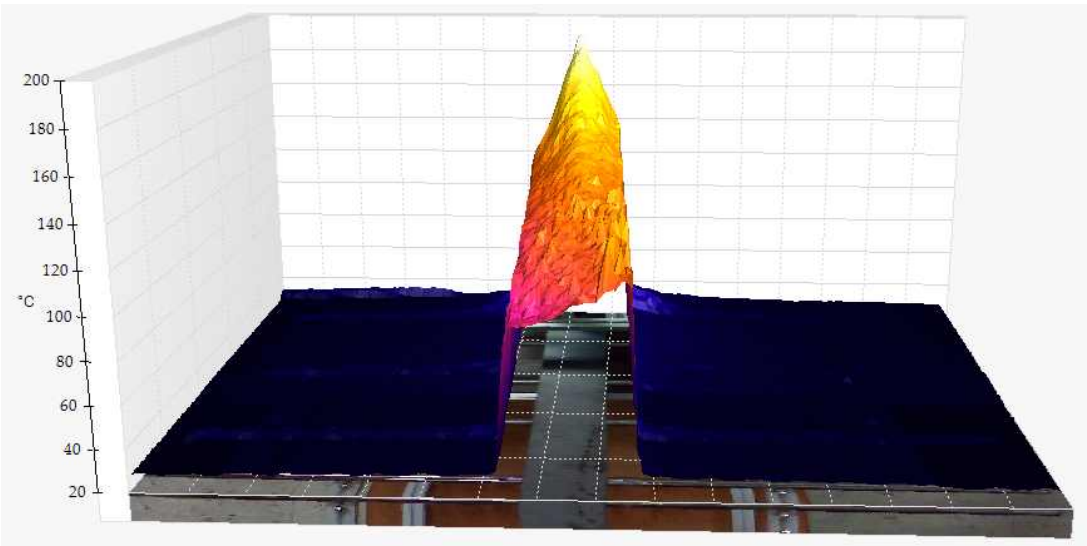


Fig. 64 3D-IR image of flame of forming sheet(butane torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

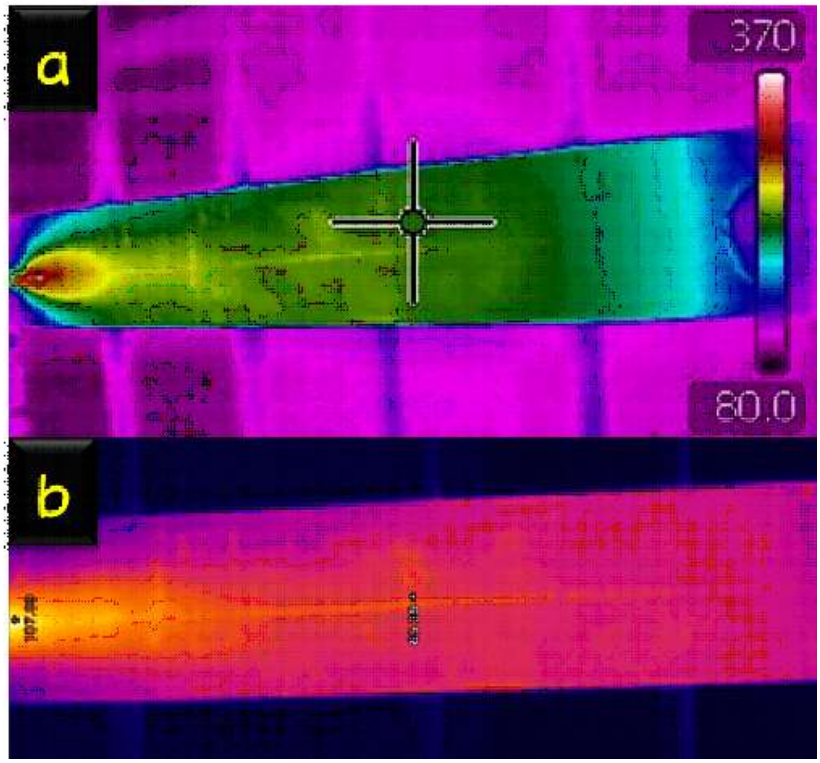


Fig. 65 Thermo-graphic image temperature distribution of forming sheet using plasma gas torch(Distance : 0.5mm, Velocity : 20), (a) FLIR (T400), (b) FLUKE (Ti32)

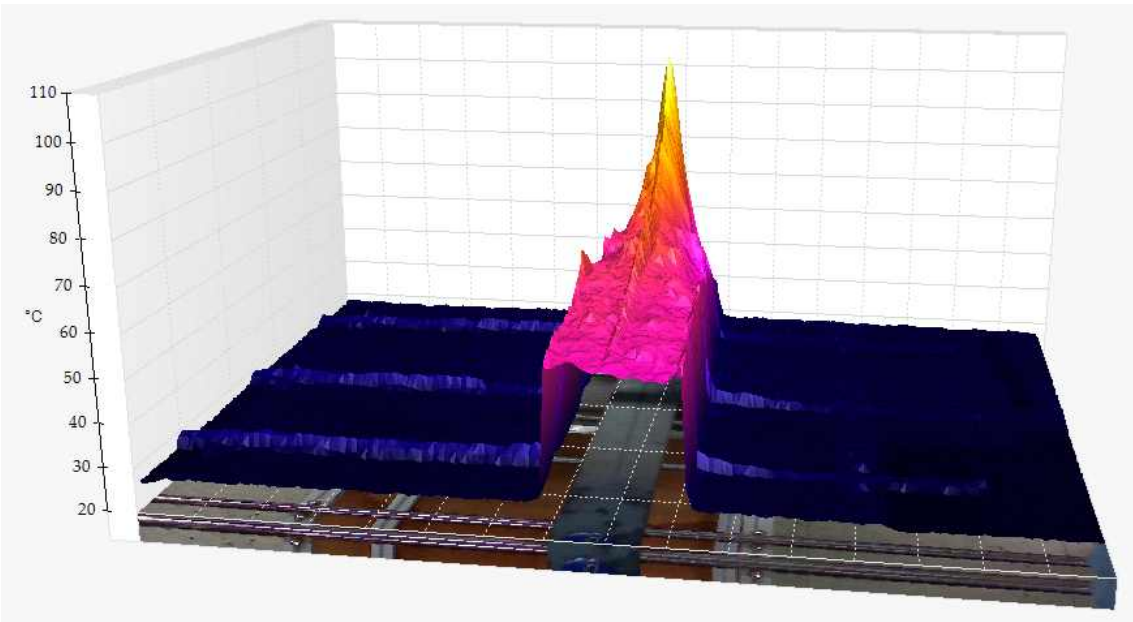


Fig. 66 3D-IR image of flame of forming sheet(plasma gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3. 예열공정 적용 시 스프링 백량 변화

3-1. 성형 시트 예열에 따른 스프링 백 영향에 대한 시뮬레이션 해석 검토

3-1-1. 유한요소모델 설계

본 장에서는 가스토치 예열공정이 롤 포밍 공정에 적용 됐을 때, FEM 시뮬레이션 해석 결과로서 상온 롤 포밍 공정과 예열공정이 적용된 롤 포밍 공정으로 부터 성형된 판재에 대하여 스프링 백 영향을 분석하는 것이 FEM 시뮬레이션 해석 목표이다.

FEM 시뮬레이션 해석을 위한 롤 포밍 모델은 위에서 제시한 3-Pass 롤 포밍 공정과 같으며, Pass-1부터 Pass-3까지 동일하게 30°씩 점진적인 성형을 한다. 하지만 위에서 수행한 상온 롤 포밍 공정의 해석 모델로 예열공정이 적용된 롤 포밍 공정을 FEM 시뮬레이션을 수행하기에는 많은 해석시간을 필요로 한다. FEM 시뮬레이션을 보다 효율적인 해석을 수행하기 위해 해석 모델을 수정하였다.

본 챕터에서 시뮬레이션 해석 하고자 하는 롤 포밍 공정 모델 및 구성은 Fig. 67과 같다. 길이방향으로 롤 금형 중심 간 거리는 105mm이며, 총 성형 거리는 550mm이다. 성형 시트의 가공속도는 200mm/s이다. 상부 롤 금형과 하부 롤 금형의 지름은 각각 50mm, 10mm이며, 롤 금형의 R값은 과도한 변형이 안 생기도록 0.5mm로 적용하였다. 성형시트는 FEM 시뮬레이션 해석에 가장 큰 영향을 미치는 요소이며, 본 해석에서는 효율적인 해석을 하기 위해 성형시트의 사이즈를 수정하였다. 성형시트 성형 시트의 너비 및 길이 크기는 각각 80mm, 150mm이며, 두께는 1mm이다.

롤 포밍 공정에서 사용된 성형 소재는 고장력강이며, 성형시트의 제품명은 POSTEN 60이다. POSTEN 60은 롤 포밍 성형에 사용된 SPFH 590재질의 고장력강과 기계적 물성치가 유사하고, 고온에 대한 열적 물성치 연구된 바가 있어 POSTEN 60 소재의 고장력 강판을 사용하여 FEM 시뮬레이션을 하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 기존 연구에서 POSTEN60에 대한 고온 인장 시험을 수행한 연구가 진행 되었으며, 고온인장특성 및 잔류응력특징에 대하여 분석을 하였다. 본 FEM 시뮬레이션 해석에서는 POSTEN60 물성치를 적용하였으며, POSTEN60의 물성치는 Table 6과 같다 [47-49].

롤 포밍 공정에 예열공정을 적용하기 위해 연성해석을 하였으며, 도출된 시트형상을 추출하여 정적해석을 통해 스프링 백 량을 도출하였다. 롤 금형과 성형 시트간의 마찰을 없다고 가정하였고, 판재가 성형 방향으로 이동할 수이 있도록 경계조건을 부여하였다. 소재의 예열 방식은 예열공정이 적용된 롤 포밍 공정과 같도록 하였다. 가스토치의 가열 형상 및 크기는 Fig. 68과 같다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

적용된 예열온도는 상온, 100, 200, 300, 400 그리고 500까지 총 6가지 온도를 적용하였다.

롤포밍 공정시 예열위치는 Fig. 64에서 표시된 빨간 점이며, 성형판재가 굽힘력이 작용 전, 1패스 앞부분에 예열이 된다. 예열형상은 센터라인 중심에서 이동하는 이동열원이며, 판재는 성형 전 에만 예열된다. 예열 후 판재의 정확한 온도분포를 분석하기 위한 필름계수는 0.28 $W/m^2 \cdot K$이며, 외기온도는 25도이다. 열 방출으로 인한 성형판재 열손실을 고려하였다. 열전달계수는 0.47 W/mm·℃이다.

성형 시트는 솔리드모델이며, 정확한 굽힘 거동을 위해 판재 중심부에 메쉬를 집중시켰다. 롤 다이는 강체이며, 빠른 해석을 위해 쉘 타입으로 모델링 하였다. 성형된 스프링 백 계산 방법은 위에서 언급한 Fig. 8과 같으며, 정적(static) 해석을 통하여 최종적인 스프링 백 량을 구하였다.

Table 6 Mechanical properties of POSTEN 60 at room temperature

Young`s modulus [GPa]	215
Yield strength [MPa]	532
Ultimate tensile strength [MPa]	625
Ductility [%]	20
Poisson`s ratio [-]	0.3

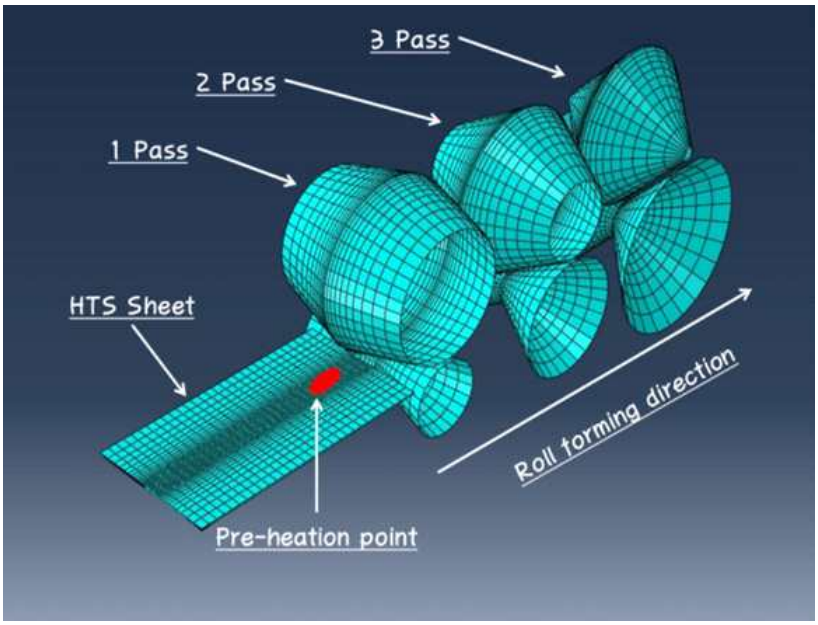


Fig. 67 The 3-Pass roll forming process

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

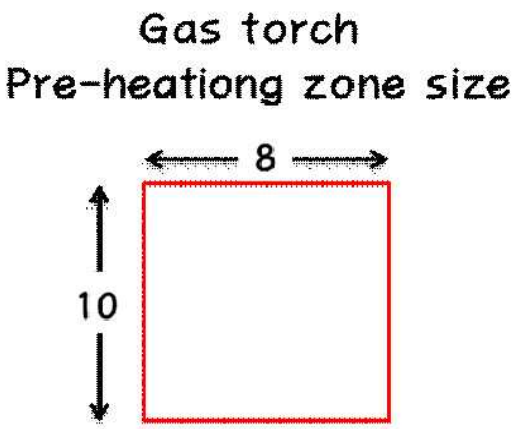


Fig. 68 Shape and size of pre-heating sources
[Unit : mm]

3-1-2. 시뮬레이션 해석 결과

FEM 시뮬레이션 해석은 실제 롤 포밍 공정과 같이 Un-coiler처럼 지속적인 해석은 불가능하다. 그래서 최소한 성형 길이로 최적화 해석을 하는 것이 유리하며, 2개의 롤 패스의 상호작용이 적용 될 수 있도록 성형시트의 길이를 150mm로 설계하였다. 성형된 롤 포밍 공정을 효율적으로 분석을 하기 위해, Fig. 69와 같이 성형된 판재를 Point 1, Point 2, Point 3로 나누어서 해석결과 값을 측정하였다. Fig. 69와 같이 최소길이를 가지는 판재는 Point 1, Point 3 사이에 응력분포에 의해 상호작용하므로, 굽힘 결과 값이 다르기 때문에 위와 같은 측정 포인트 위치를 선정하였다.

성형판재는 굽힘 가공 시 인장과 압축이 동시에 일어난다. 인장과 압축의 특성을 파악을 위해 센터라인에서 두께 방향으로 Fig. 70과 같이 층으로 나누어서 분석을 하였다. 판재는 굽힘 가공 시 인장과 압축이 동시에 일어나며, 인장과 압축의 특성 파악을 위해 두께 방향으로 4개의 층으로 나누어서 분석을 하였다.

Fig. 71은 롤 패스에 따른 Point 2의 각 LAYER의 온도 값이며, 성형시트 예열에 따른 각 layer의 온도 값을 보여주고 있다. 패스 2에서 온도가 가열 할 때의 500도까지 상승하다가 예열이 끝난 후 지속적으로 온도가 감소되었다. 최종 성형 후 예열온도는 약 300도까지 감소하였다. 직접적으로 예열이 되는 1-layer에는 순간적으로 최고온도에 도달하다가 예열이 끝나면 바로 다른 layer의 온도로 수렴을 한다. 얇은 성형시트의 두께와 박판은 예열 후 온도 손실이 크기 때문에 각 layer의 온도 수렴성이 높았다.

Fig. 72는 성형시트의 너비방향의 온도분포를 보여주고 있다. Lee외 1은 누적거리에 대한

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

개념을 제시하였으며, 본 논문에도 판재의 너비 방향에 대하여 누적거리 개념을 사용하였다[16]. 누적 거리는 성형판재의 중심선부터 떨어진 거리이며, +값은 성형판재의 오른쪽 방향이며, -는 왼쪽 방향을 의미한다. Fig. 69는 성형 후 Point 2에서 온도측정을 하였으며, 성형판재의 센터라인(cumulative distance:0)부터 10mm까지 열영향부라고 할 수 있다. 굽힘부와 열영향부의 범위가 거의 일치하며, 스프링 백량에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

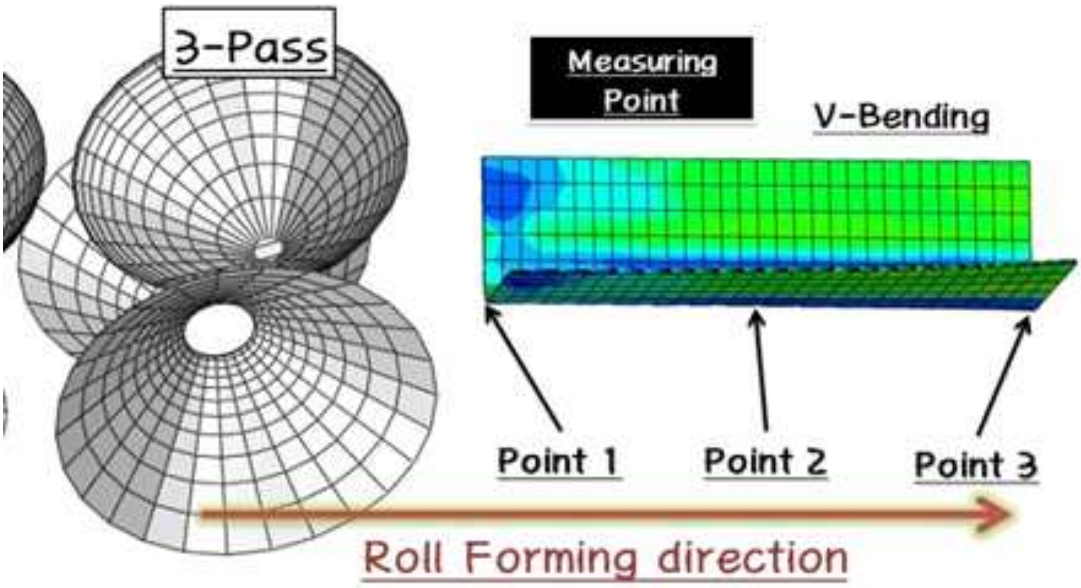


Fig. 69 Measuring point on the forming sheet

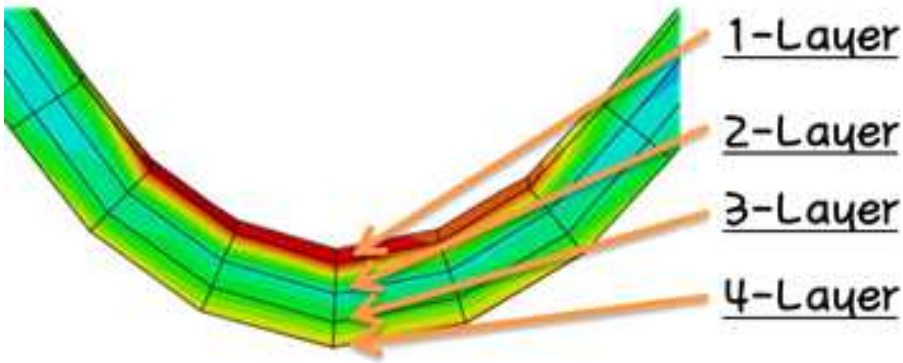


Fig. 70 Layer definition of forming sheet

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

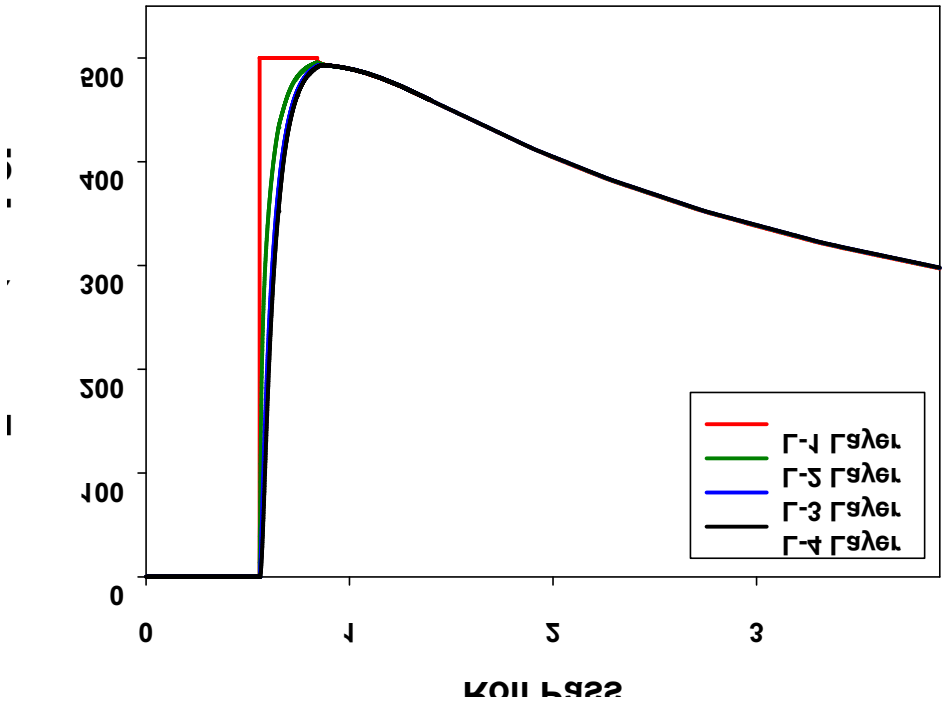


Fig. 71 Temperature distribution of forming sheet(500℃)

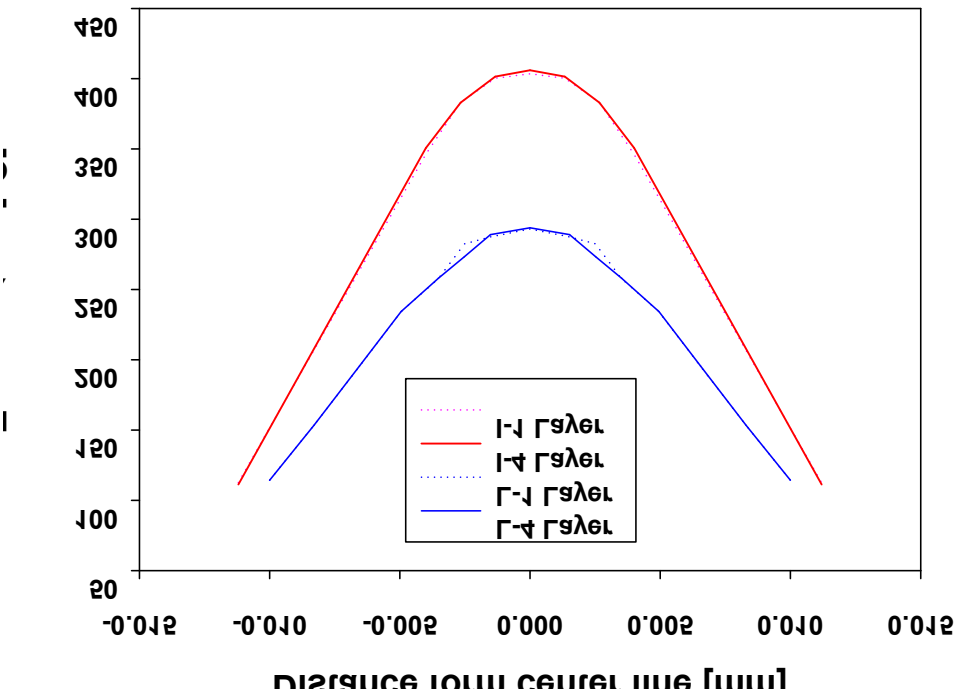


Fig. 72 Cumulative distance of forming sheet according to pre-heating(1, 4 layer, Point 2)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 73은 롤 패스에 따른 각 측정 포인트의 1,4 layer에서의 von-Mises 응력을 보여주고 있다. 포인트 1 부터 포인트 3까지 von-Mises 응력이 점차 증가하는 경향을 보이고 있으며, 압축거동을 보이는 1 layer가 인장거동을 보이는 4 layer보다 높은 응력 값을 보이고 있다. 1 layer와4 layer의 그래프의 경향은 유사하며, 최초 굽힘력을 받는 포인트3은 두 개의 layer에서 반미세스 응력 값 차이를 보이고 있다. 성형 후 최종적인 von-Mises 응력 값은 각 측정 포인트마다 200~300MPa의 유사한 응력결과가 도출이 되었다.

Fig. 74는 2 layer에서의 측정 포인트에 따른 von-Mises 응력을 비교하기 위한 그래프 이다. 최초 굽힘력이 작용하는 3포인트에서는 높은 응력 값이 도출이 되었고, 마지막에 굽힘력이 작용하는 Ponit 1에서는 가장 낮은 응력 값이 도출 되었다. 또한 Fig. 70과 비교하면 2 layer는 1,4 layer보다 높은 응력 값을 보이며, 2 layer 각 측정 포인트에 따른 최종적인 응력 값은 400~600MPa 사이로 도출이 되었다. 이는 1,4layer의 응력 값 보다 약 2배가 높은 수치이며, 이러한 현상의 이유는 인장과 압축의 혼재가 되어 고장력강의 내부에서 시뮬레이션 해석에서 너비방향으로 슬립현상을 보여 국부적인 최대 응력 값이 도출되었기 때문이라고 예측된다.

Fig. 75는 각 패스에 따른 열응력 값을 나타낸다. 온도에 따른 열응력을 관찰하기 측정포인트 2에서 1,4layer에 대한 결과 값을 Fig. 75(a),(b)에 나타냈다. 위의 결과는 Fig. 73(b)와는 다른 응력 경향을 보이고 있으며, Fig 75는 초기 열응력을 인하여 롤 포밍 초반과 후반의 열응력 값이 차이가 크지 않다. 하지만 Fig. 73(b)는 1,4 layer의 응력차이는 없지만 Fig. 72에서는 1,4layer의 응력차이를 보인다. 이는 예열을 함으로써 후반부에 응력이 높아진 것으로 판단된다. 상대적으로 예열에 직접적인 영향을 받는 1layer는 최종응력이 200~250MPa이며, 1layer에서 간접적인 열영향을 받는 4layer에는 380~400MPa의 열응력 값이 도출되었다.

Fig. 76은 최종 성형된 고장력 강판에서의 각 온도에 따른 측정 포인트의 1,4 layer의 열응력을 보여주고 있다. Point 3이 낮은 열응력 도포를 보인다. Fig. 76의 그래프의 경향은 일정하게 도출이 안되어 있다. 하지만 크게 3부분으로 나누면, 100도, 200~400도, 500도로 분류할 수 있으며, 100도부터 200~400도까지는 증가하고 200~400까지는 다시 감소하는 경향을 파악 할 수 있다. 이렇게 결과 값이 나오는 이유는 본 해석에서 사용한 고장력강의 물성치의 영향이 크다. 본 FEM시뮬레이션에서는 기존에 연구에 참고로 해석이 수행되었다. 적용된 고장력강 재질인 POSTEN60은 200도까지 완만하게 인장강도가 저하되다가 온도가 올라가면 청열취성으로 인해 인장강도가 증가하기 시작하여 300도 부근에서 최대치가 된 후 600도까지 완만하게 감소하였다. 청열취성이란 일반 강재질에서 250도 부근에서 인장강도와 경도가 커지며, 연신이 적어지고 취성이 커지는 특성을 말한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

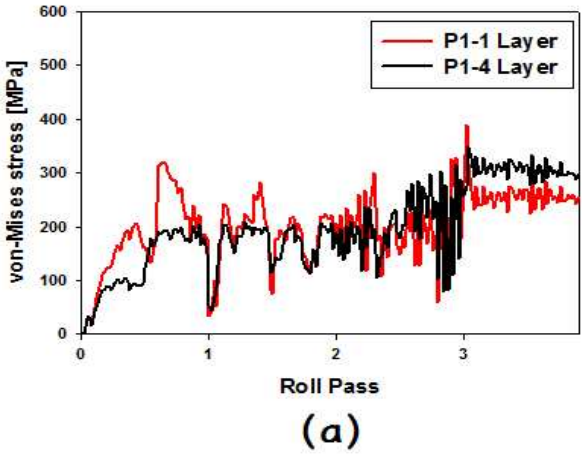
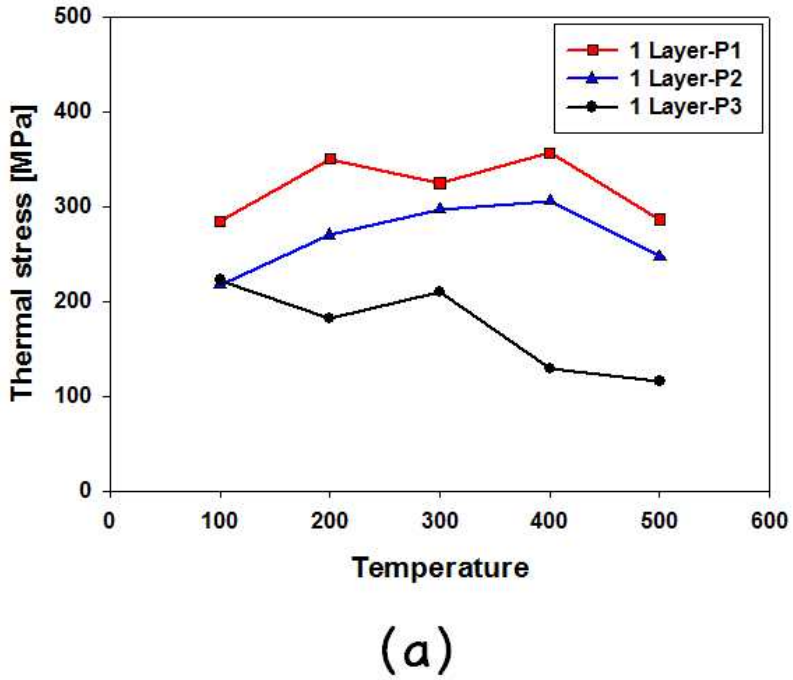
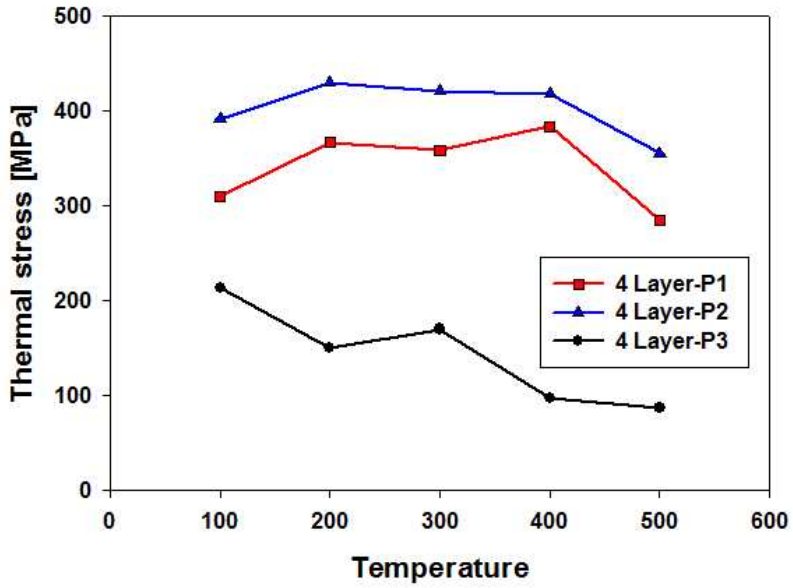


Fig. 73 von-Mises stress according to 1, 4 layer; (a) Point 1, (b) Point 2, (c) Point 3

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a)



(b)

Fig. 74 Thermal stress according to measurement point;
(a) 1 layer, (b) 4 layer

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

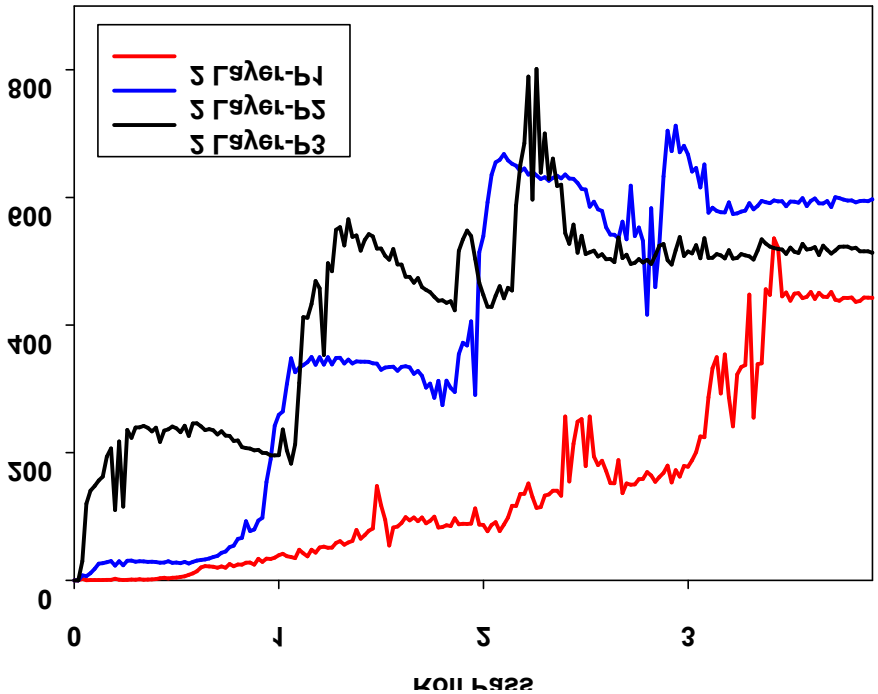


Fig. 75 von-Mises stress of 2 layer according to measurement point

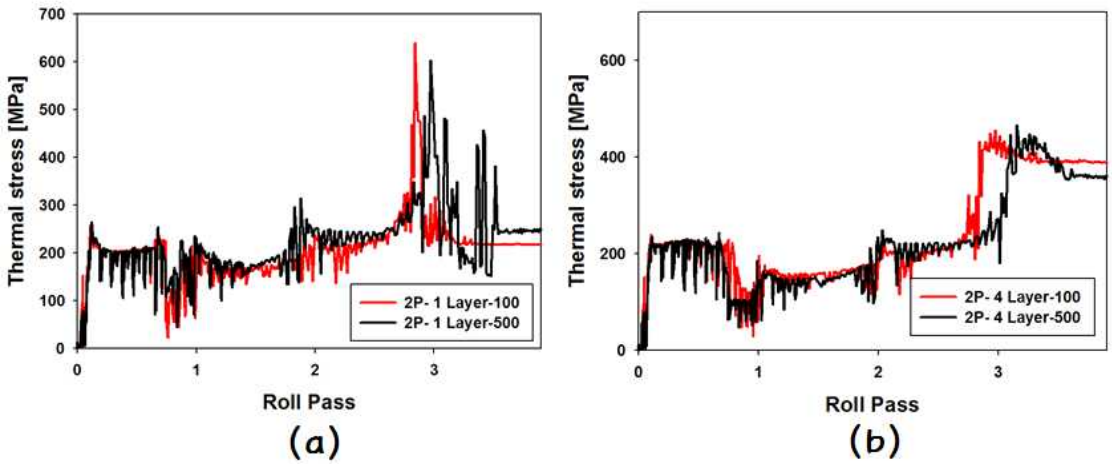


Fig. 76 Thermal stress according to sheet layer at 2 point; (a) 1 layer, (b) 4 layer

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

청열 취성을 나타내는 온도는 하중 속도의 대소에 따라 영향을 받는 것이며, 인장 시험에 나타나는 것은 약 250℃이다. 본 연구에서도 이러한 청열 취성의 특성을 바탕으로 본 재질의 항복강도는 감소의 경향이 인장강도랑 비슷하며 600℃이후에 급격하게 증가하는 것으로 연구가 되었다. 또한 탄성계수의 값도 400℃까지 완만하게 저하되다가 이후 급격히 감소되는 것으로 연구가 되었다. 본 연구에서도 정확한 해석을 위해 위의 특성을 적용하였으며, 이러한 특성으로 인하여 200~400℃ 사이의 결과가 도출이 되었다.

Fig. 77은 롤 패스에 따른 등가응력을 보여주고 있다. 위의 결과의 해석결과는 각 측정위치에 따른 1,4 layer의 결과이다. 최초 먼저 굽힘력이 작용하는 Point 3에서의 응력이 가장 높게 도출이 되었다. 측정 Point 1,2에서 1,4 layer의 변형률 값은 거의 일치를 하지만 Point 3에서는 1,4 layer의 변형률 값이 큰 차이를 보이고 있으며, 인장 거동을 보이는 4 layer에서 0.233의 변형률 값을 보였다.

Fig. 78은 롤 패스에 따른 2 layer에서의 3개의 측정 포인트의 응력 값을 보여주고 있다. 각각의 측정 포인트는 롤 패스를 지날 때 마다 급격한 변형률 증가를 보여 주고 있으며, 1,4 layer 보다는 높은 변형률 값으로 도출되는 것을 확인 하였다. 이러한 경향은 응력분석과 유사하게 나오며 시트의 표면에 해당하는 1,4 layer 보다는 내부에도 굽힘력 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

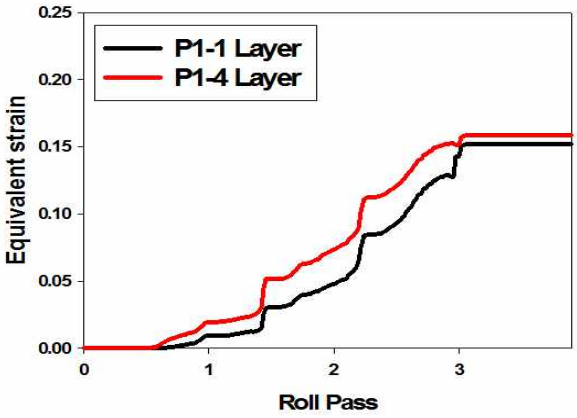
Fig. 80은 온도에 따른 열응력 값을 보여주고 있으며, Point 2 1,4 layer에서 100도 500도에 대한 열 변형률에 대하여 비교를 하였다. 최종적으로는 500℃ 일 때 열응력이 높은 것으로 도출이 되었으며, 상온일 때 조건인 Fig. 79(b)와 비교하면 약 0.5 크기의 변형률이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 Fig. 79처럼 각 롤 패스를 지날 때 마다 뚜렷한 증가경향을 보이지 않으며, 패스 3를 지날 때만 뚜렷하게 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다.

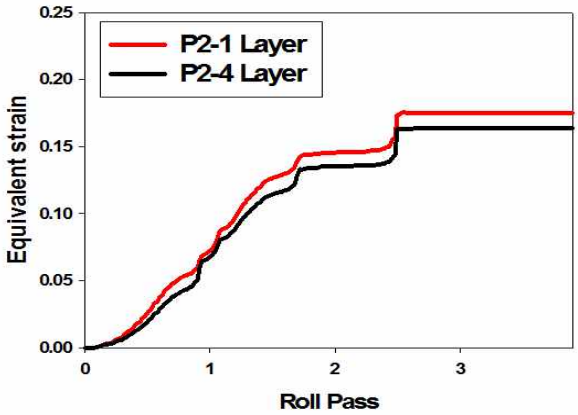
Fig. 80은 온도에 따른 열응력 값을 보여주고 있으며, 2 Point 1,4 layer에서 100℃, 500℃에 대한 열 변형률에 대하여 비교를 하였다. 최종적으로는 500℃ 일 때 열응력이 높은 것으로 도출이 되었으며, 상온일 때 조건인 Fig. 78(b)와 비교하면 약 0.5 크기의 변형률이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

또한 Fig. 79처럼 각 롤 패스를 지날 때 마다 뚜렷한 증가경향을 보이지 않으며, 3패스를 지날 때만 뚜렷하게 증가하는 경향을 확인 할 수 있었다.

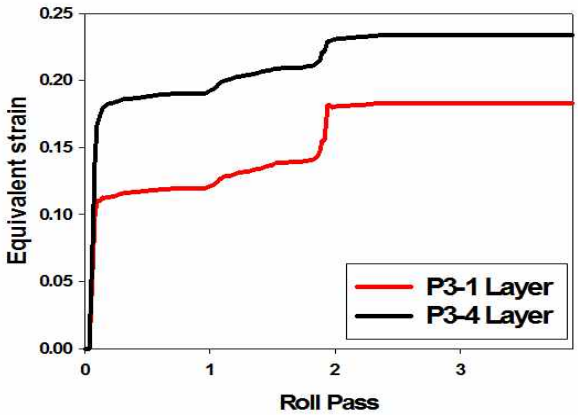
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a)



(b)



(c)

Fig. 77 Equipvalent strain according to 1, 4 layer;
(a) Point 1, (b) Point 2, (c) Point 3

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

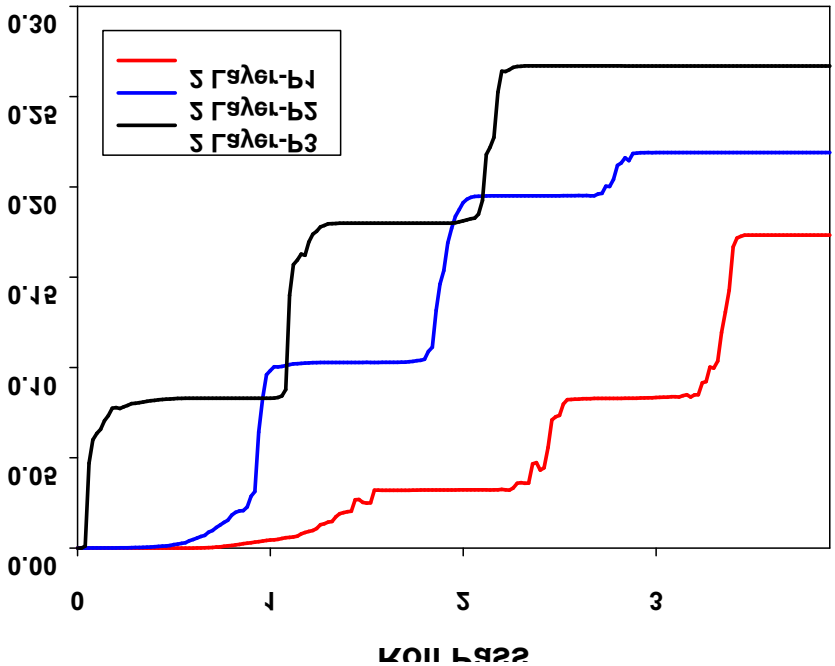


Fig. 78 Equivalent strain of 2 layer according to measurement point

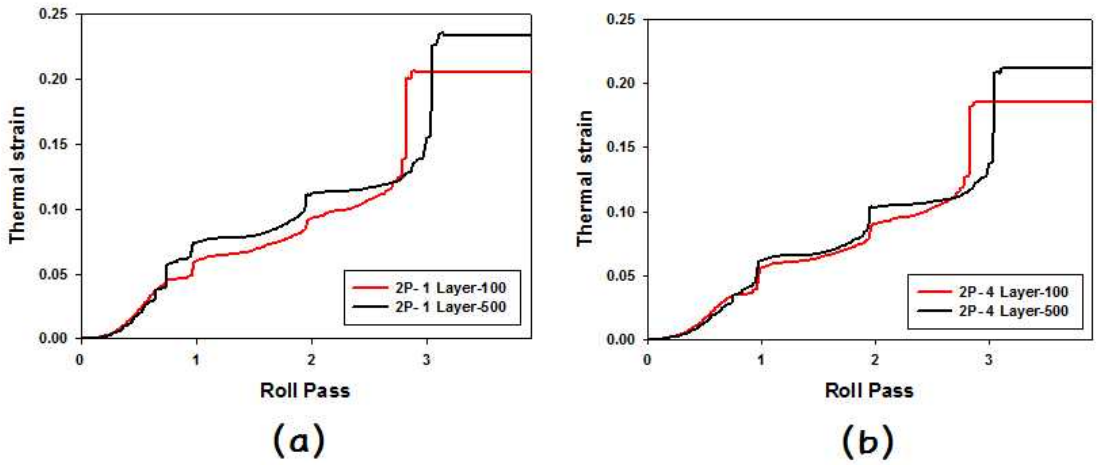
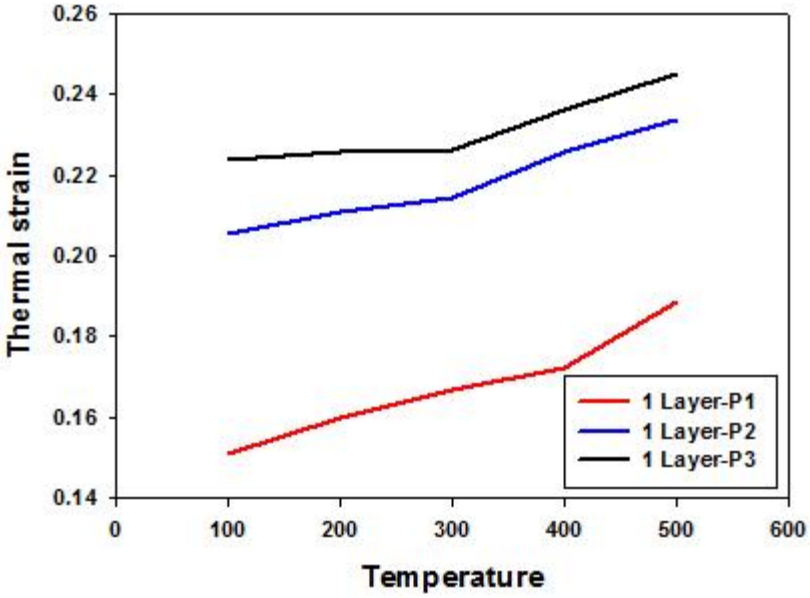
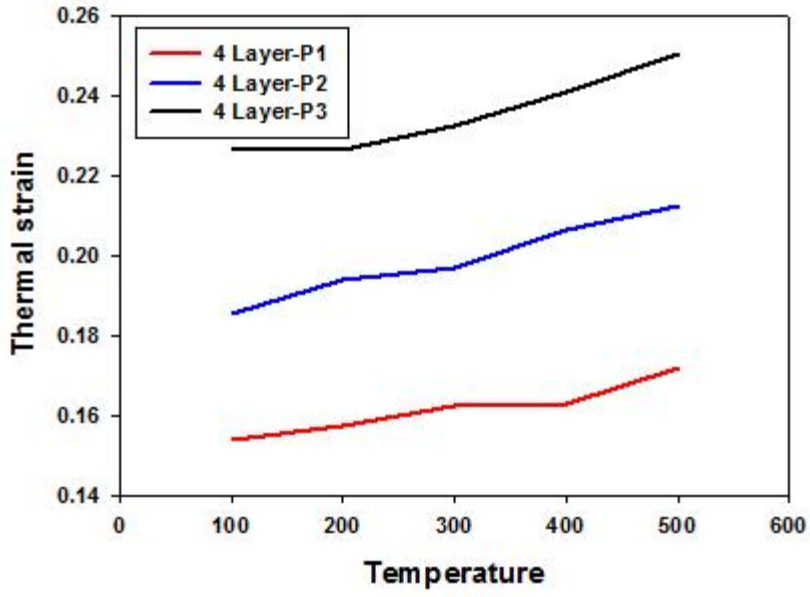


Fig. 79 Thermal strain at 2 point; (a) 1 layer, (b) 4 layer

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



(a)



(b)

Fig. 80 Thermal strain according to measurement point;
(a) 1 layer, (b) 4 layer

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

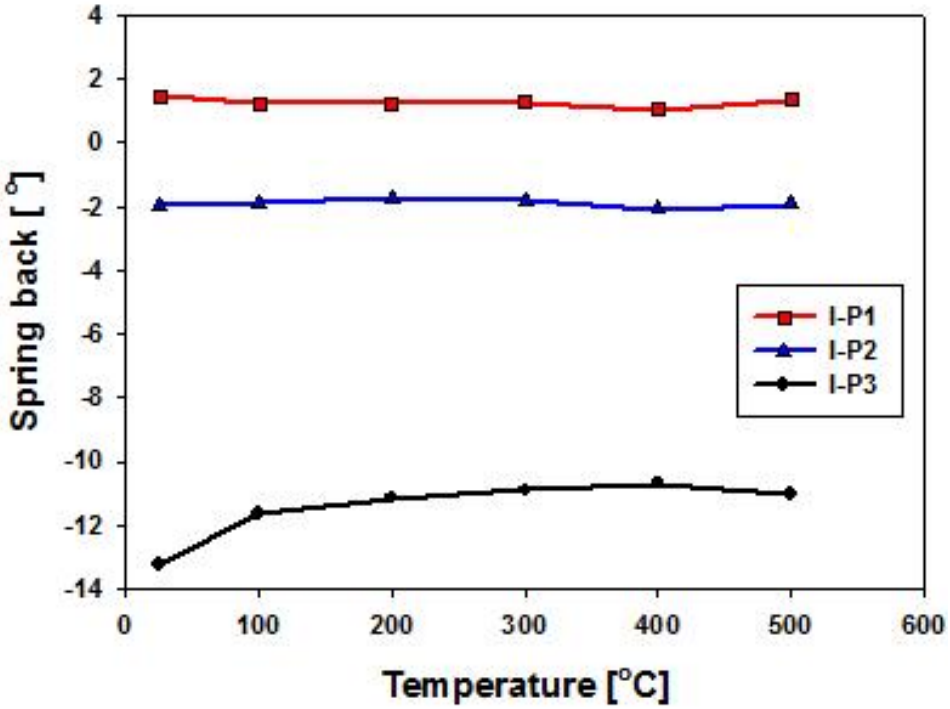


Fig. 81 Spring-back value according to measurement point

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3-2. 부탄 가스토치

위에서 수행한 상온 롤 포밍 공정의 실험은 상온에서의 성형시트의 성형성 파악 및 롤 포밍 공정 변수의 특성을 파악하고자 하였다. 상온 롤 포밍 공정의 실험 결과를 바탕으로 예열 공정이 적용된 롤 포밍 공정의 변수인 성형속도와 롤 갭의 변수의 범위를 결정하였다. 실험으로부터 측정된 가스토치의 불꽃 온도분포 측정과 성형시트의 이송에 따른 시트의 온도 분포 측정 결과를 바탕으로 부탄가스 토치와 성형시트간 거리 변수의 범위를 결정하였다. 위의 실험 분석을 바탕으로 결정된 부탄 가스토치의 예열조건 및 실험조건은 Table 7과 같다. Table 7에 제시된 실험 변수들은 효율적인 실험을 진행하기 위해 다구찌 실험법을 적용하기 위해 선정된 인자와 인자 레벨이다. 인자 A에는 성형속도, 인자 B에는 예열거리, 인자 C는 예열 위치로 정의 하였다. Table 7를 바탕으로 Table 8과 같이 9번의 실험수에 해당되는 3인자 3수준에 해당되는 직교좌표계($L_9 3^3$)를 적용하였다.

롤 포밍 실험 변수인 롤 갭인 경우는 상온 롤 포밍 실험 시 롤 갭 1mm일 때 스프링 백 현상 및 성형성이 높기 때문에, 실험 변수 롤 갭은 1mm로 고정하였다.

Fig. 83은 9번 실험에 대한 성형된 시트이며, 성형된 시트를 디지털 각도기를 사용하여 스프링 백량을 측정하였다. 측정된 스프링 백량은 Table 8에 나타냈으며, 측정된 스프링 백량으로 부터 SN비 값을 도출하였다. 도출된 SN비 값을 근거로 SN비의 주효과도 그래프는 Fig. 82와 같다. Fig. 82로부터 성형속도(66.6 mm/s), 예열거리(60 mm), 예열방식(Pass-3)에 대한 최적 조건을 도출하였다. 그리고 실험 결과값에 가장 영향을 많이 영향을 미치는 변수는 SN비의 최소값과 최대값이 가장 큰 변수이며, 부탄 가스토치를 예열 공정에서는 롤 성형속도 변수가 가장 영향을 주는 인자로 도출 되었다. Table 8에 제시된 스프링 백량 기준으로 목표로 하는 시트 굽힘각인 90°에 가장 근접한 실험은 5번 실험으로 스프링 백 값은 0.06°로 도출이 되었으며, 가장 큰 스프링 백 값을 가지는 실험은 1.63°의 스프링 백 값을 가지는 6번 실험이다. 5번 실험의 변수는 A2B2C3 이며, SN비의 주효과도를 바탕으로 도출된 최적 조건은 A3B2C3로 도출이 되었다.

도출된 최적조건으로 롤 포밍 성형된 시트는 Fig. 84에서 오른쪽 시트이다. 측정된 스프링 백 값은 0.24°이며 9개의 실험에 2번째로 낮은 스프링 백 값을 도출 할 수 있었다. 최적 조건의 스프링 백 결과보다 5번의 실험결과가 더 좋은 것으로 나오나, 시트의 스프링 백 측정 위치로 얻은 11개의 스프링 백 값의 분산분석을 하면, 최적 조건의 결과가 버클링 현상이 5번보다 적은 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과가 도출된 이유는 다구찌 실험법의 망목적 특성에서의 분산 분석으로 인한 데이터의 분산 정도가 고려되었기 때문이라고 판단한다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 7 Three factors and three levels (butane gas torch)

Control factors	Des.	Lev. 1	Lev. 2	Lev. 3
Forming speed [-]	A	20 (10.3 mm/s)	40 (24.9 mm/s)	100 (66.6 mm/s)
Distance of pre-heating [mm]	B	30	60	90
Pre-heating type [-]	C	Pass-1	Pass-2	Pass-3

Table 8 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (butane gas torch)

Exp. No.	A	B	C	D	Forming angle at reference point		SN ratios
					4 - 8	1 - 11	
1	1	1	1	-	91.8	91.3	48.6
2	1	2	2	-	89.7	90.2	49.2
3	1	3	3	-	88.7	89.1	50.2
4	2	1	2	-	90.1	91.2	41.4
5	2	2	3	-	89.9	90.2	54.1
6	2	3	1	-	88.4	89.5	41.3
7	3	1	3	-	90.8	90.8	82.2
8	3	2	1	-	90.5	90.6	70.1
9	3	3	2	-	90.4	91	45.5

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 9 Factors effecting the spring back (butane gas torch)

Level	Forming speed [-]	Distance of pre-heating [mm]	Pre-heating type [-]
1	49.34	57.40	53.35
2	45.63	57.82	45.38
3	65.93	45.67	62.16
Delta	20.30	12.16	16.78
Rank	1	3	2

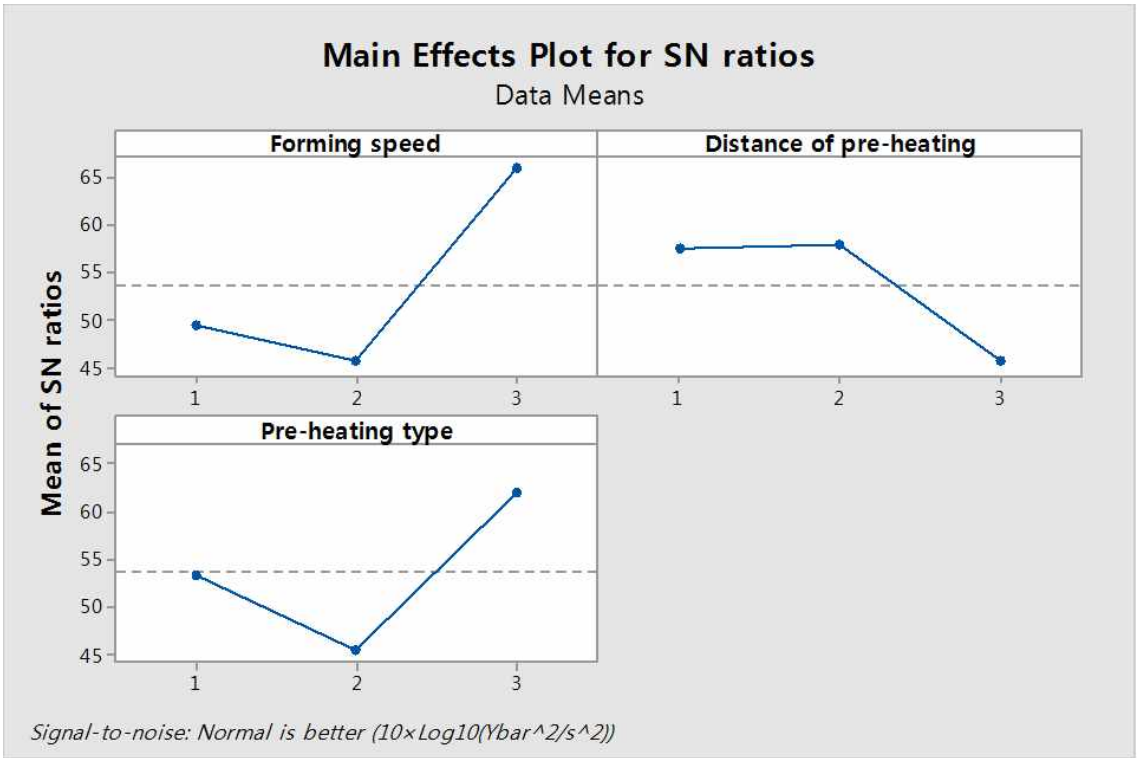


Fig. 82 SN ratio for experimental (butane gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

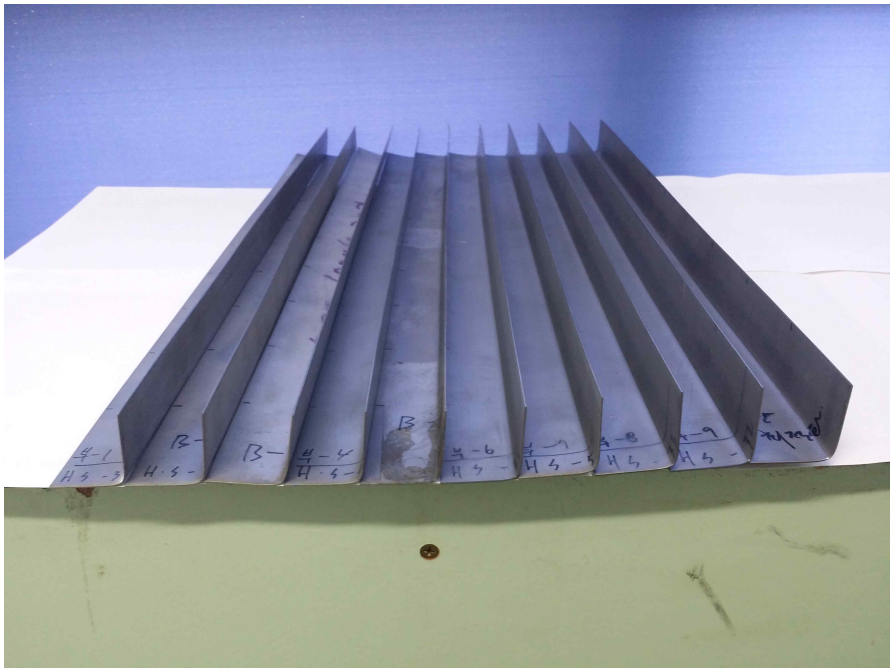


Fig. 83 Forming sheet according to orthogonal arrays (butane gas torch)

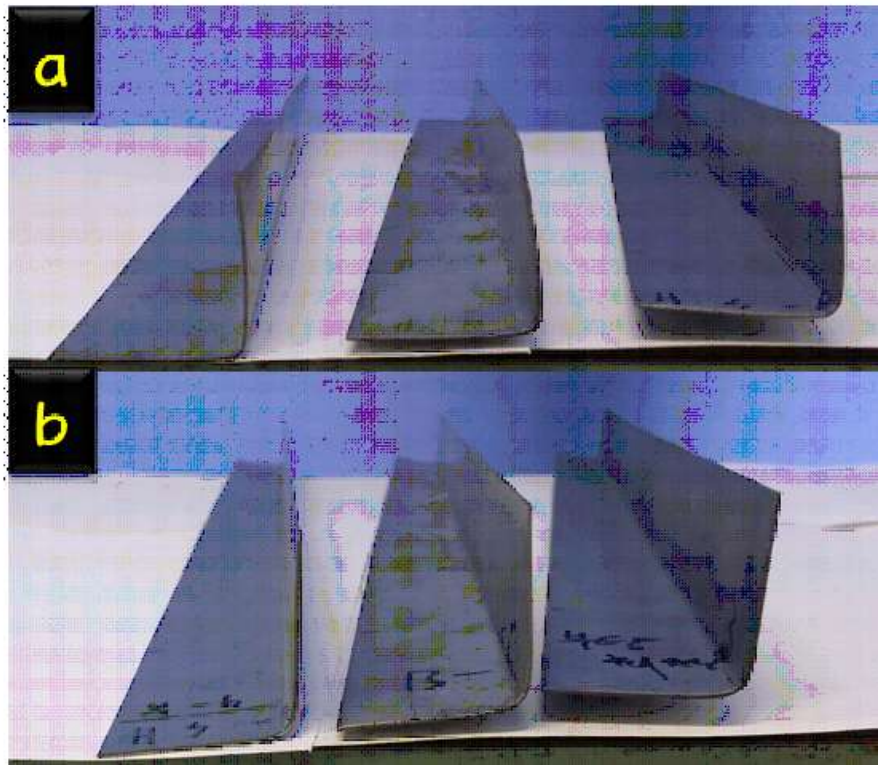


Fig. 84 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (plasma gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부탄 가스토치 예열 공정을 적용한 롤 포밍 공정에서 다구찌 실험법으로 9번의 실험을 수행하였다. 위의 실험으로 나온 결과를 가지고 또 다른 성형성을 판단하기 위해, 시트의 위아래 방향으로 휘는 현상인 보우 값을 측정하였다. 성형시트의 보우 값은 성형 시 작을수록 좋은 값이므로, 다구찌 실험법의 망소특성을 적용하여 SN비를 계산하였다.

기존에 성형된 시트를 가지고 두께 게이지를 사용하여, 보우 값을 측정하였다. 측정된 보우 값은 Table 10과 같으며, 측정된 보우 값 기준으로 SN비도 도출하였다.

SN비의 주효과도 그래프인 Fig. 85를 참고하면, 부탄 가스토치 예열공정와 같이 성형속도와 보우 값에 영향을 많이 준다는 것을 알 수 있다. SN비의 주효과도에 대한 값은 Table 11에 명시 되어 있으며, 실험에 대한 인자 및 인자의 효과에 대하여 나타낸다.

SN비 주효과도를 근거로 보우를 최소화 할 수 있는 최적조건으로 A1B3C3 실험조건을 도출 하였다.

Table 10 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (butane gas torch)

Exp. No.	A	B	C	D	Bow value	SN ratios
1	1	1	1	-	107	-40.59
2	1	2	2	-	142	-43.05
3	1	3	3	-	108	-40.67
4	2	1	2	-	86	-38.69
5	2	2	3	-	62	-35.85
6	2	3	1	-	73	-37.27
7	3	1	3	-	51	-34.15
8	3	2	1	-	62	-35.85
9	3	3	2	-	58	-35.27

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

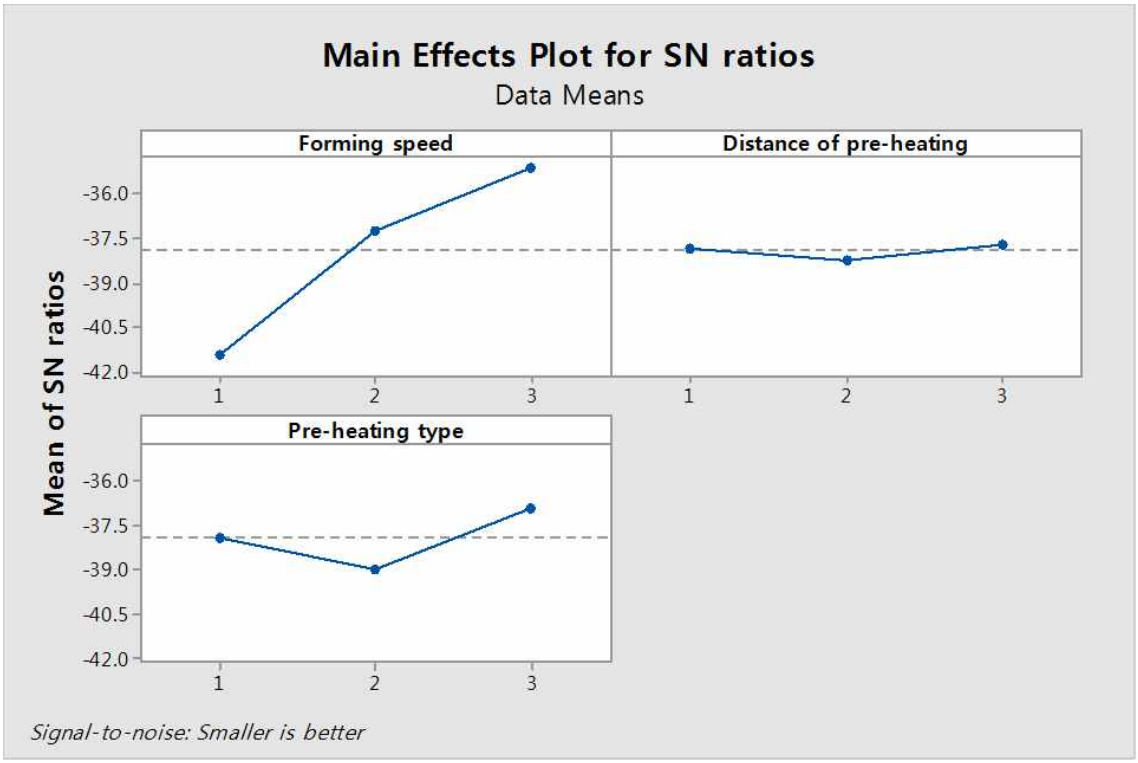


Fig. 85 SN ratio of bow value (butane gas torch)

Table 11 Factors effecting the bow (butane gas torch)

Level	Forming speed [-]	Distance of pre-heating [mm]	Pre-heating type [-]
1	-41.43	-37.81	-37.90
2	-37.27	-38.25	-39.00
3	-35.09	-37.73	-36.89
Delta	6.34	0.51	2.11
Rank	1	3	2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

3-3. 플라즈마 토치

플라즈마 가스토치를 적용한 롤 포밍 실험의 변수에 대한 선정은 부탄 가스토치 실험에 대한 선정 기준과 동일하다. 하지만 플라즈마 가스토치 인 경우 가스토치의 온도에 영향을 주는 인자는 TIG 용접기의 출력 전류이며, 이는 플라즈마 불꽃 온도 분포 실험 시 확인 할 수 있었다. 그러므로 플라즈마 가스토치를 적용한 롤 포밍 공정에서는 부탄 가스토치의 경우와 달리 플라즈마 가스토치에 인가되는 출력 전류의 인자를 다구찌 실험 계획법에 추가하였다. 그래서 플라즈마 가스토치 실험에서는 4인자 3수준계에 해당되는 Table 13과 같은 직교좌표계($L_9 3^4$)를 적용하였다. 4인자 3수준계의 인자와 수준은 Table 12에 나타냈다.

그 외 고정변수인 롤 갭은 부탄 가스토치 실험과 동일한 1mm를 적용하였다.

다구찌 실험 계획법에 준하여 롤 포밍 성형 실험을 수행하였으며, 실험 결과 성형된 시트는 Fig. 86과 같다. 성형된 시트에 대한 스프링 백 값은 Table 13과 같으며, 측정된 스프링 백 값으로 SN비 값도 도출하였다. 도출된 SN비 값으로 주효과를 분석한 그래프는 Fig. 88이며, SN비의 주효과도의 결과를 바탕으로 플라즈마 토치를 이용한 실험에서 가장 큰 영향을 미치는 인자는 플라즈마 가스토치와 시트간 거리인 것으로 분석되었다. 또한 SN비의 주효과도 결과를 바탕으로 스프링 백 값이 낮은 최적의 공정 조건은 A2B3C1D2에 해당되는 성형속도(24.9mm/sec), 예열거리(20mm), 예열방식(Pass-1), 인가전류(75A)의 조건을 찾을 수가 있었다.

다구찌 실험 계획법으로 도출된 최적 조건에 대하여 검증하기 위해 최적조건에 해당하는 롤 포밍 성형 실험을 수행하였다. 실험 결과 성형된 시트는 Fig. 87의 오른쪽이 있는 시트이며, 스프링 백 값이 0.56°로 측정이 되었다. 최적 조건에 측정된 스프링 백 값은 다구찌 실험 계획법의 9개의 실험 중 4번째로 높은 결과를 보이고 있다.

9개의 실험 중 가장 낮은 스프링 백 값을 가지는 실험은 3번 실험이며, 가장 높은 스프링 백 값을 가지는 실험은 6번 실험이다. 플라즈마 가스토치 예열공정에 대하여 다구찌 실험계획법을 적용을 하였고, 최적 조건을 도출하였지만 다구찌 실험 계획법의 9개의 실험 조건일 때의 결과 보다 스프링 백 값이 가장 낮은 스프링 백 값은 도출 되지 않았다. 하지만 부탄 가스토치 공정과 같이 성형 시트의 11개의 측정 지점에의 스프링 백 값에 대한 분산을 분석하면, 최적화 공정일 때가 시트의 휨 현상 없이 일정한 단면으로 성형되는 것을 확인 할 수 있었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 12 Four factors and three levels (plasma gas torch)

Control factors	Des.	Lev. 1	Lev. 2	Lev. 3
Forming speed [-]	A	20 (10.3 mm/s)	40 (24.9 mm/s)	100 (66.6 mm/s)
Distance of pre-heating [mm]	B	30	60	90
Pre-heating type [-]	C	Pass-1	Pass-2	Pass-3
Power [A]	D	50	75	100

Table 13 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (plasma gas torch)

Exp. No.	A	B	C	D	Forming angle at reference point		SN ratios
					4 - 8	1 - 11	
1	1	1	1	1	90.60	90.35	54.2
2	1	2	2	2	91.13	91.06	65.3
3	1	3	3	3	89.95	90.14	56.5
4	2	1	2	3	91.30	90.93	50.8
5	2	2	3	1	89.86	90.16	52.6
6	2	3	1	2	88.62	88.64	75.9
7	3	1	3	2	90.55	90.88	51.8
8	3	2	1	3	90.84	91.18	51.6
9	3	3	2	1	90.78	90.65	59.9

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

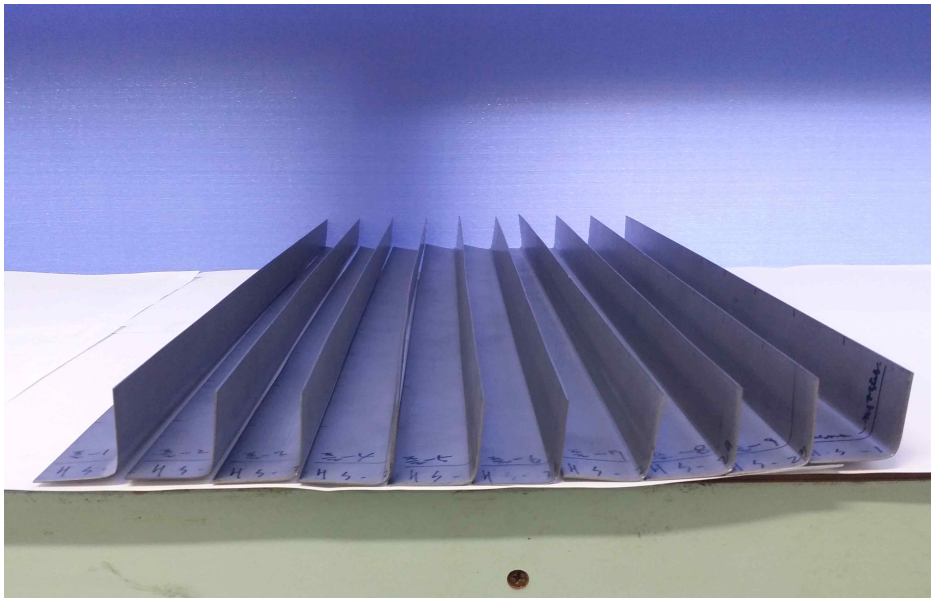


Fig. 86 Forming sheet according to orthogonal arrays (plasma gas torch)

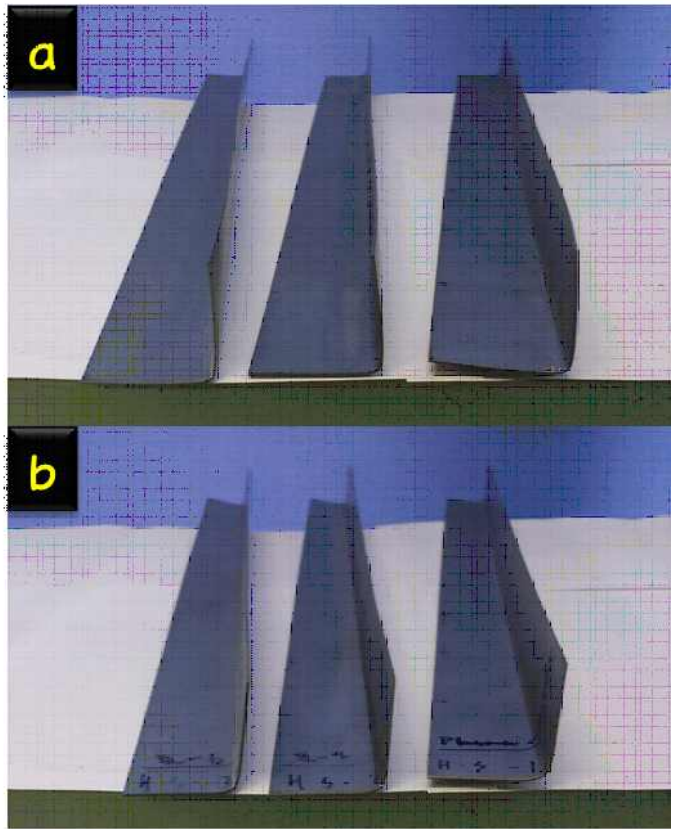


Fig. 87 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (plasma gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 14 Factors effecting the spring back (plasma gas torch)

Level	Forming speed [-]	Distance of pre-heating [mm]	Pre-heating type [-]	Power [A]
1	58.67	52.27	60.56	55.54
2	59.78	56.47	58.67	64.34
3	54.41	64.12	53.62	52.97
Delta	5.36	11.85	6.94	11.37
Rank	4	1	3	2

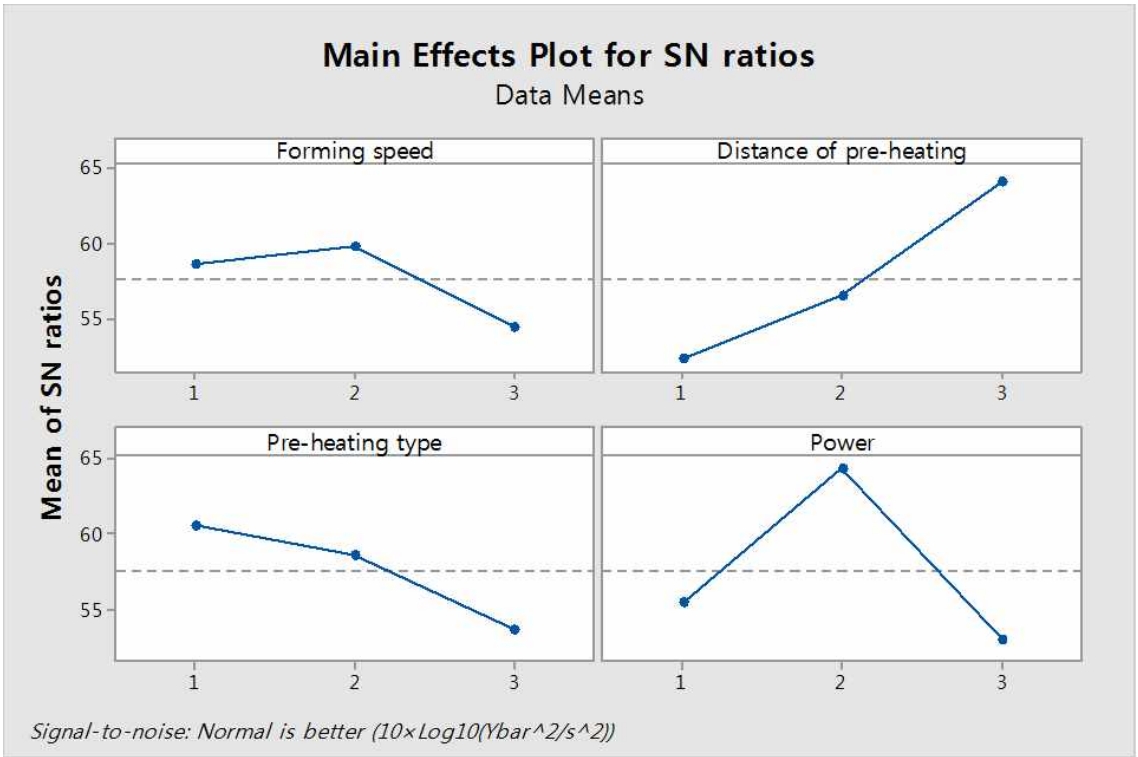


Fig. 88 SN ratio for experimental (plasma gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

부탄 가스토치 예열 실험과 동일하게 플라즈마 예열 실험으로부터 성형된 시트를 활용하여 9개 실험의 성형 시트를 보우 값을 구하였다. 성형 시트의 보우 현상의 특징을 고려하여 부탄 가스토치 예열공정과 마찬가지로 다구찌 실험법의 망소적 특성을 고려하였다. 측정된 보우 값은 Table 15와 같으며, 측정된 보우 값을 근거로 부탄 가스토치 예열 공정과 같이 SN비를 구하였다. 9개의 SN비 값으로 SN비의 주효과도를 도출 하였으며, 도출된 SN비의 주효과도의 그래프는 Fig. 86과 같다. SN비의 주효과도 그래프를 참고하면 보우 현상에 영향을 주는 인자로는 예열방식이며, 플라즈마 가스토치에 인가되는 전류 인자가 보우에 가장 낮은 영향을 미친다는 것을 확인 할 수 있다. 아래의 SN비의 주효과도를 바탕으로 보우에 대한 최적조건은 인자인 성형속도(66.6mm/sec), 예열거리(20mm), 예열방식(Pass-3), 인가전류(75A)로 도출되었다.

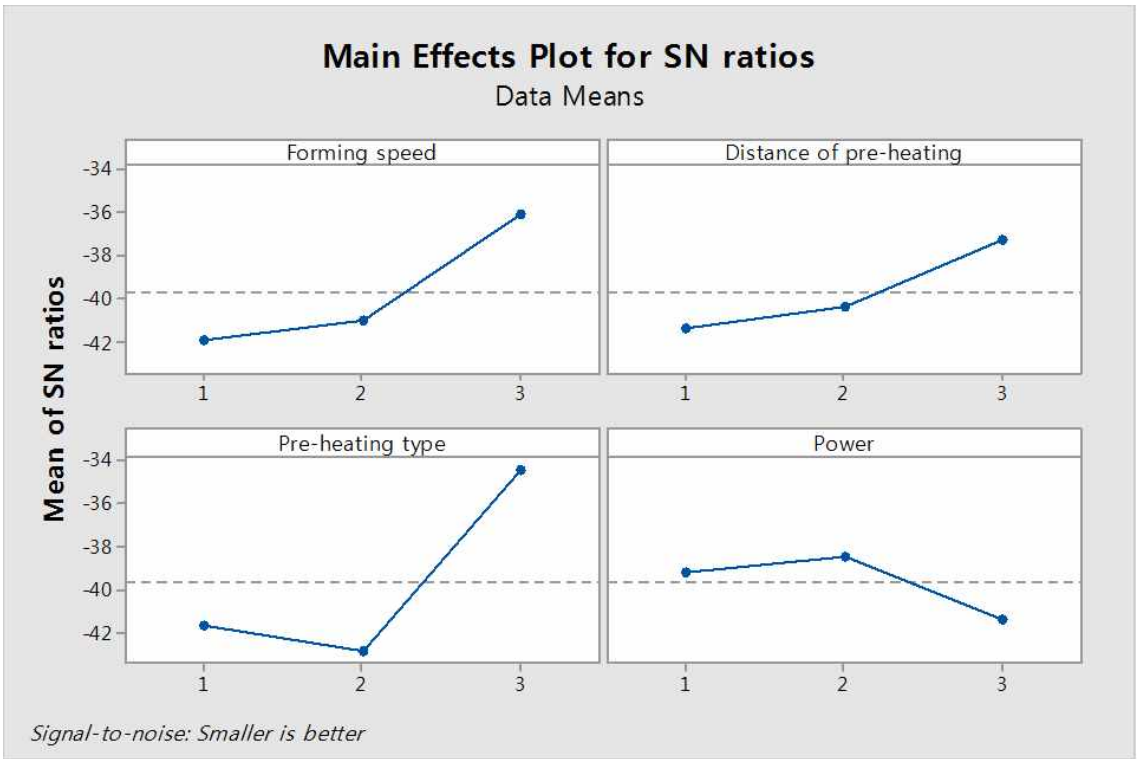


Fig. 89 SN ratio of bow value (plasma gas torch)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 15 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (plasma gas torch)

Exp. No.	A	B	C	D	Bow value	SN ratios
1	1	1	1	1	180	-45.11
2	1	2	2	2	170	-44.61
3	1	3	3	3	63	-35.99
4	2	1	2	3	240	-47.60
5	2	2	3	1	63	-35.99
6	2	3	1	2	93	-39.37
7	3	1	3	2	37	-31.36
8	3	2	1	3	107	-40.59
9	3	3	2	1	66	-36.39

Table 16 Factors effecting the bow (plasma gas torch)

Level	Forming speed [-]	Distance of pre-heating [mm]	Pre-heating type [-]	Power [A]
1	-41.90	-41.36	-41.69	-39.16
2	-40.99	-40.39	-42.87	-38.45
3	-36.11	-37.25	-34.45	-41.39
Delta	5.79	4.11	8.42	2.95
Rank	2	3	1	4

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4. 금속 소재 성형시트의 스프링 백 값 영향 연구

롤 포밍 공정을 통하여 생산된 제품은 다양하며, 항공, 가전제품, 자동차 분야 등 많은 분야에서 제품 및 부품으로써 생산이 되고 있다 [50, 51]. 적용되는 분야에 따라서 다양한 재질이 사용이 될 수 있으나, 현재까지 다른 소재에 대한 롤 포밍 공정에 적용한 사례는 많지 않다. 그 이유는 해당 재질에 대한 성형력이 낮기 때문으로 예측된다.

본 연구에서는 항공분야에서 많이 쓰이는 티타늄 재질의 판재와 가전제품에 쓰이는 알루미늄 판재 그리고 최근 자동차 산업에 사용되고 있는 마그네슘 합금소재에 대하여 예열 공정이 적용된 롤 포밍 공정에 적용하였다.

본 챕터의 실험은 가스토치 예열 공정과 동일한 다구찌 실험법을 적용 하였으며, 3인자 3수준에 해당되는 직교배열표($L_9 3^3$)로 실험을 설계하였다. 실험에 적용된 3개의 인자는 성형속도, 롤 갭, 예열방식을 적용하였다. 성형속도는 롤 포밍의 기본적인 공정 변수이므로 실험인자로 선정하였으며, 롤 갭은 롤 포밍 공정에서 금속소재의 낮은 성형성으로 인하여 롤 갭에 대한 영향을 분석하고자 한다. 마지막으로 고려된 인자인 예열방식은 기존 예열공정에서의 롤 패스 위치에 따른 예열 방식이 아닌 예열 방법으로 접근 하였다. 금속 재료에 대하여 롤 포밍 성형 시 위에서 수행한 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치 중 어느 것이 더 효과적인지를 판단하기 위해서다.

본 챕터에서 성형할 시트의 소재는 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, 티타늄 합금 3가지에 대하여 실험을 수행하였다. 본 실험에서 적용된 인자와 인자의 수준은 Table 17과 같다.

Table 17 Three factors and three levels (Ti alloy)

Control factors	Des.	Lev. 1	Lev. 2	Lev. 3
Forming speed [-]	A	20 (10.3 mm/s)	40 (24.9 mm/s)	100 (66.6 mm/s)
Roll gap [mm]	B	30	60	90
Pre-heating type [-]	C	Non	Butane gas torch	Plasma gas torch

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4-1. 티타늄 합금 판재

티타늄 합금 소재에 대하여 고장력강 예열 시험과 동일한 방법으로 실험을 수행하였다. 9개의 실험을 수행한 성형 시트는 Fig. 91과 같다. 성형된 티타늄 합금에 대한 스프링 백 값은 Table 19와 같으며, 측정된 스프링 백 값 기준으로 SN비를 계산하였다. 계산된 SN비를 활용하여 Fig. 90과 같은 SN비의 주효과도 그래프를 도출하였다. 도출된 주효과도 그래프를 참고로 하여 Table 18에 각 인자별 영향 수준을 나타내고 있으며, 티타늄 합금에서는 롤 성형 속도가 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다.

SN비의 주효과를 바탕으로 성형속도(10.3mm/sec), 롤 갭(1mm), 예열 방식(부탄 가스토치)에 따른 최적조건을 확인 하였다. 도출된 최적조건에 따라 티타늄 합금에 대하여 롤 포밍 성형을 하였으며, 최적 조건에서 성형된 시트는 Fig. 92에서 오른쪽 시트이다.

Fig. 90은 Table 19의 스프링 백 값 평균을 사용하여 9개의 실험 값 중 가장 낮은 스프링 백을 가지는 성형 시트와 가장 높은 스프링 백 값을 가지는 성형시트 그리고 SN비의 주효과도의 결과로 도출된 최적 조건에서의 성형된 시트를 보여주고 있다. 왼쪽부터 가장 높은 스프링 백 값을 가지는 9번 실험의 성형 시트이고, 가운데에 위치한 성형 시트는 가장 낮은 스프링 백 값을 가지는 5번 실험에 대한 성형시트이다. 그리고 오른쪽에 있는 성형시트가 최적 조건에서 롤 포밍 성형된 시트이다. 성형된 최적 조건일 때 성형된 티타늄 합금의 스프링 백 값은 2.2°로 9개의 실험 중에 4번 째논 낮은 스프링 백 값을 보였다. 9개의 실험 중 가장 낮은 스프링 백 값을 보이는 실험은 5번 실험이며, 가장 높은 스프링 백 값을 가지는 실험은 9번 실험으로 각각 0.16°와 7.23°로 측정 되었다.

본 실험에서도 고장력강 소재의 실험과 유사한 결과를 보이고 있다. 스프링 백 값에서는 가장 낮은 값으로 도출은 안 되지만, 성형 시트의 11개 측정 위치에서 측정된 스프링 백 값들의 편차가 다른 조건 보다 작다는 것으로 나타났다.

Table 18 Factors effecting the spring back (Ti alloy)

Level	Forming speed [-]	Roll gap [mm]	Pre-heating type [-]
1	49.34	57.40	53.35
2	45.63	57.82	45.38
3	65.93	45.67	62.16
Delta	20.30	12.16	16.78
Rank	1	3	2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Table 19 Orthogonal arrays and SN ratio of spring back results (Ti alloy)

Exp. No.	A	B	C	D	Forming angle at reference point		SN ratios
					4 - 8	1 - 11	
1	1	1	1	-	91.8	91.3	48.6
2	1	2	2	-	89.7	90.2	49.2
3	1	3	3	-	88.7	89.1	50.2
4	2	1	2	-	90.1	91.2	41.4
5	2	2	3	-	89.9	90.2	54.1
6	2	3	1	-	88.4	89.5	41.3
7	3	1	3	-	90.8	90.8	82.2
8	3	2	1	-	90.5	90.6	70.1
9	3	3	2	-	90.4	91	45.5

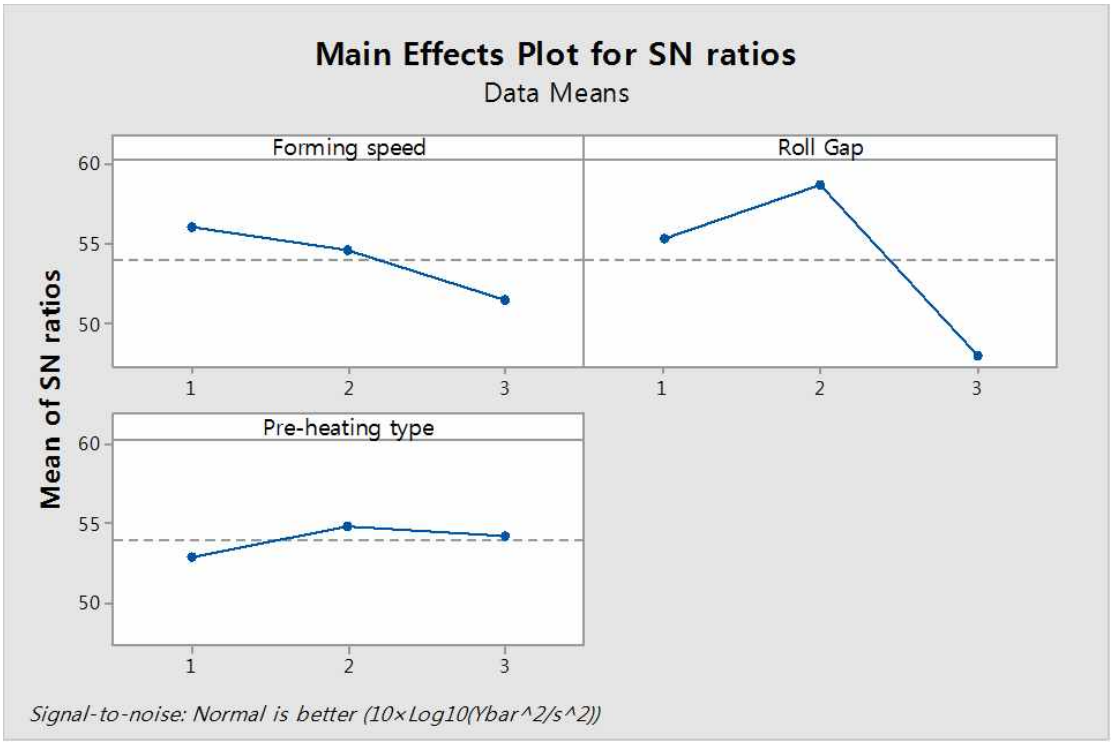


Fig. 90 SN ratio for experimental (Ti alloy)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

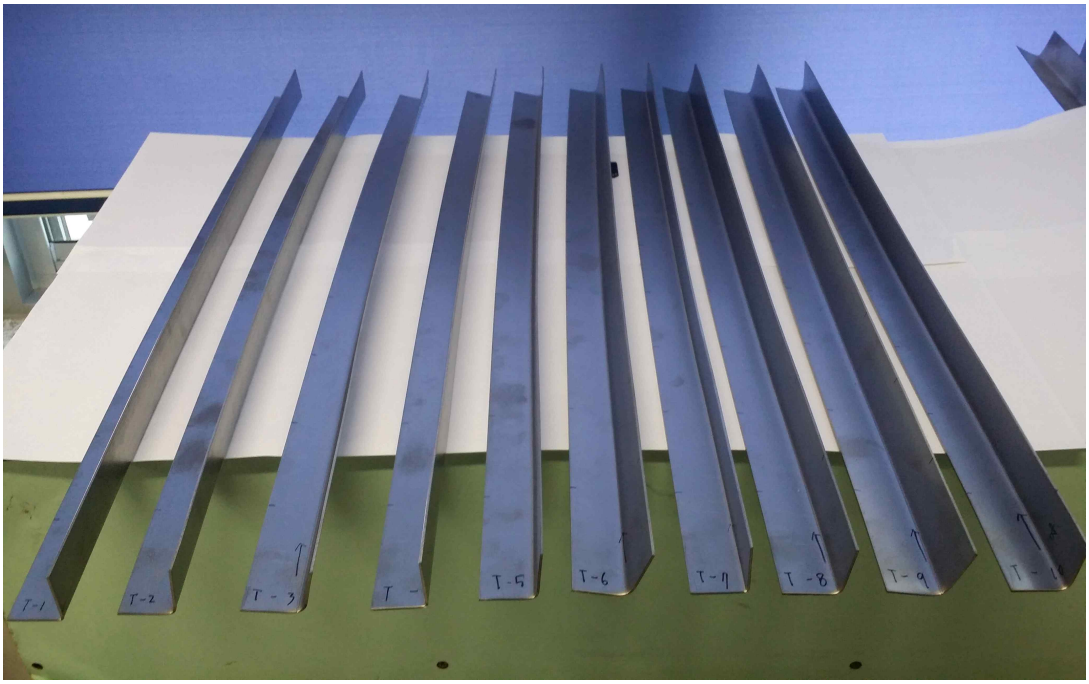


Fig. 91 Forming sheet according to orthogonal arrays (Ti alloy)

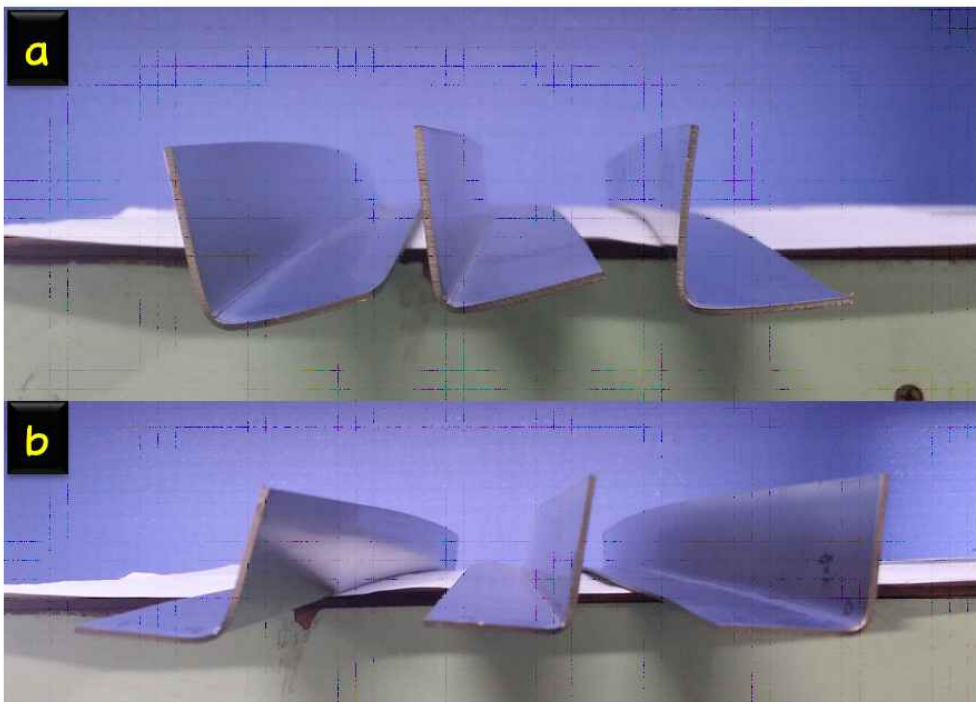


Fig. 92 Compare optimal condition with best and worst condition in orthogonal arrays (Ti alloy)

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

위의 예열공정 실험과 마찬가지로, 성형된 티타늄 합금 시트로부터 보우 값을 측정하였다. 티타늄 합금의 보우 값은 Table 20와 같으며, 고장력강 소재보다 보우 현상이 심하게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. SN비의 주효과도를 바탕으로 최적 조건을 도출 하였으며, 롤 성형속도는 66.6 mm/s, 롤 갭은 0mm, 예열 방식은 부탄 가스토치 예열과 플라즈마 가스토치 예열 방식이 예열공정 적용 안 했을 때가 최적조건이다.

Table 21의 인자의 영향을 보면, 롤 갭이 성형 결과에 많은 영향을 주는 것으로 나타났으며, 9개의 실험 중에 롤 갭이 2mm일 때 보우 값이 매우 높은 것을 확인 할 수 있다. 보우 현상이 가장 낮게 측정된 실험조건은 1번이며, 가장 높게 측정된 실험은 3번 실험 이다.

티타늄 스프링 백 분석을 위한 실험에서 최적 조건에서는 보우 값이 905mm로 측정되어, 3번째로 많은 보우 값을 보여주고 있다.

위의 롤 포밍 실험 조건을 제외하고 성형시트에 보우가 발생하는 원인으로 롤 포밍 머신 롤 금형이다. 총 3개의 패스로 이루어진 롤 포밍기은 하부 롤이 구동 롤이고, 상부 롤 이 아이들 롤(Idle roll die)와 구동 롤로 이루어져 있다. 본 실험에서 사용된 롤 포밍기는 롤 갭을 조절 할 때에 상부롤이 상하로 이동하며, 상부롤과 연결되어 있는 구동기어는 하부 기어와 맞물려 회전하도록 설계가 되었다. 롤 갭이 증가할 때 일정 높이에서 Pass-1의 상부 롤은 구동 롤이며, Pass-2의 상부 롤은 반 구동롤, Pass-3의 상부 롤은 아이들 롤이다. 이러한 상부 롤 들이 일정하지가 않아 하부 롤의 회전할 때의 접촉력으로 인하여 보우 현상이 더욱 심화되는 것으로 예측된다.

Table 20 Orthogonal arrays and SN ratio of bow results (Ti alloy)

Exp. No.	A	B	C	D	Bow value [mm]	SN ratios
1	1	1	1	-	375	-40.59
2	1	2	2	-	975	-43.05
3	1	3	3	-	920	-40.67
4	2	1	2	-	560	-38.69
5	2	2	3	-	595	-35.85
6	2	3	1	-	690	-37.27
7	3	1	3	-	480	-34.15
8	3	2	1	-	485	-35.85
9	3	3	2	-	810	-35.27

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

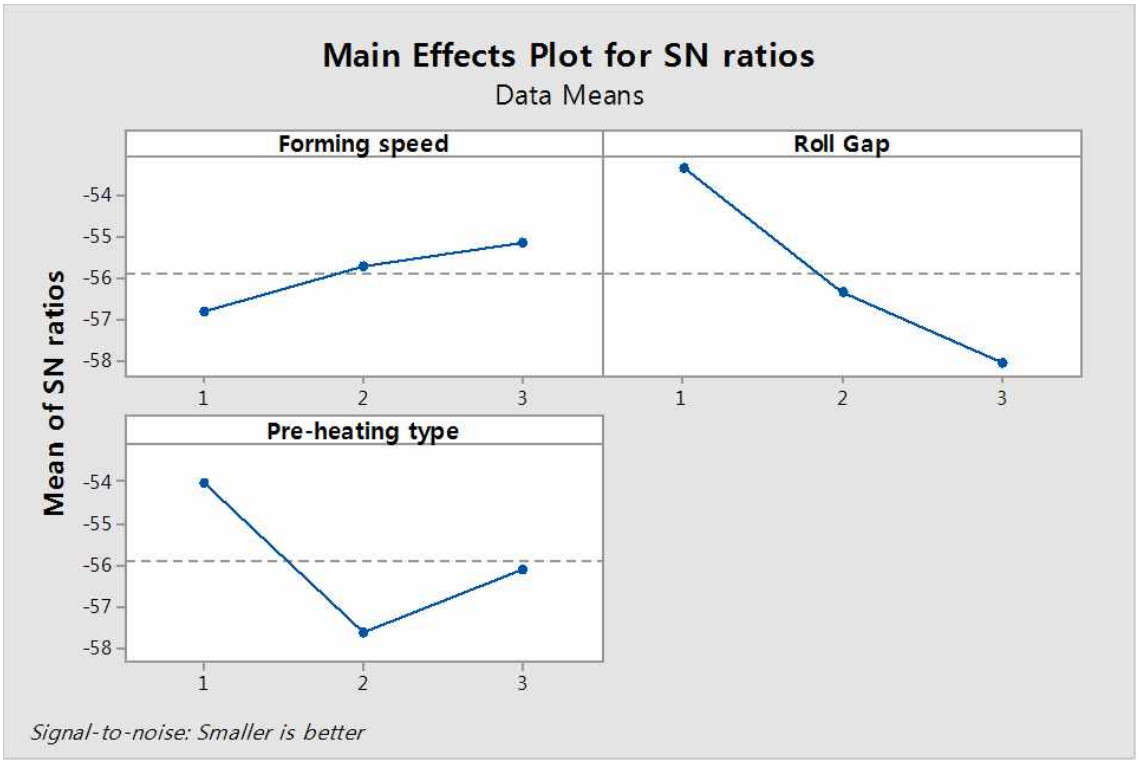


Fig. 93 SN ratio of bow value (Ti alloy)

Table 21 Factors effecting the bow (Ti alloy)

Level	Forming speed [-]	Roll gap [mm]	Pre-heating type [-]
1	-56.85	-53.36	-53.99
2	-55.74	-56.33	-57.64
3	-55.17	-58.07	-56.13
Delta	1.68	4.72	3.65
Rank	3	1	2

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

4-2. 알루미늄 과 마그네슘합금 소재 판재 성형

알루미늄 합금 시트와 마그네슘 합금 시트에 대하여 롤 포밍 성형 실험을 하였다. 실험 방법은 티타늄 합금 성형과 동일한 조건에서 성형을 하였다. 위의 2가지 소재에 대하여 롤 포밍 성형한 시트를 관찰하면, Fig. 94와 같이 갈라짐 현상을 보였다. 알루미늄 합금은 9개의 실험 중 롤 갭이 1mm이하 인 경우 전부 갈라짐 현상을 보였으며, 롤 갭이 2mm일 경우에는 갈라짐 현상이 많이 감소하지만, 성형 시트의 인장 면에서는 크랙이 발생하며, 과도한 변형력이 발생하여 시트 중심이 롤 금형 중심에서 벗어나 시트의 굽힘부가 아닌 곳에 억지로 굽힘 가공이 되었다.

마그네슘 합금인 경우 9개의 실험에 대해 전부 갈라짐 현상을 보여 롤 포밍 성형이 불가능 하였다.

기존 연구에서는 알루미늄 및 마그네슘 합금의 예열에 대한 효과에 대한 연구에서, 예열 에너지에 따라 판재 성형력이 향상되었다 [52-56]. 기존 연구를 근거로 롤 포밍 성형 속도로 인한 예열 효과가 미약한 것으로 판단하여, Pass-1 앞에서 예열시간을 증가하여 성형을 수행하였다. 예열 시간은 30초 동안 시트의 앞부분을 위 연구에서 온도에 대한 효과가 큰 부탄가스토치를 사용하여 시트 앞부분을 가열한 후 성형을 하였다. 알루미늄 합금과 마그네슘 합금 동일한 조건에서 성형을 하였으며, 성형에 대한 시트 형상은 Fig. 95와 Fig. 96과 같다.

Fig. 95의 알루미늄 합금은 예열 효과가 큰 성형 시트의 앞부분의 인장면을 보면 크랙 현상이 안 보이나, 점차 시트의 뒷부분에서 크랙이 발생하였다.

Fig. 96의 마그네슘 합금은 성형 시트의 앞부분의 인장 면에 크랙이 없으나 시트의 예열 범위를 벗어나면 급격한 크랙이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 현상을 시트의 온도와 함께 분석이 되어야 하지만, 본 연구에서 사용된 온도 측정 장비인 열화상 카메라로 2개의 소재에 대한 열 분포 측정이 불가능하였다.

하지만 2개의 소재에 대한 예열 방식을 개선하면, 상온에서 가공이 어려운 2개의 소재에 대하여 롤 포밍 성형이 가능할 것으로 판단된다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

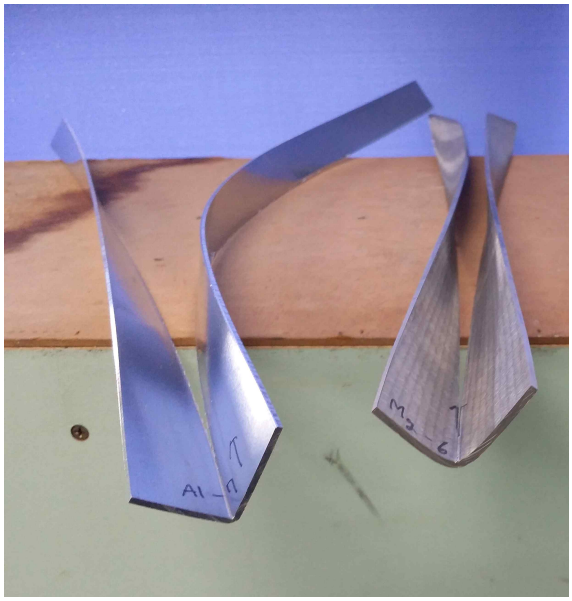


Fig. 94 Fractured forming sheet(left : Al alloy, rignt : Mg alloy)

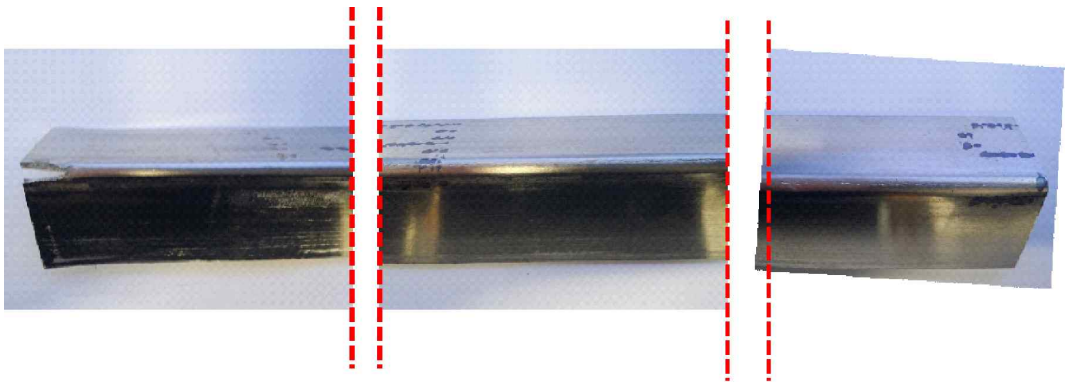


Fig. 95 Crack growth in Al alloy sheet

Fig. 96 Crack growth in Mg alloy sheet

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5. 복잡한 단면을 가진 롤 포밍 공정에서의 스프링 백 현상 시뮬레이션 해석 검토

5-1. 고장력 강관 FEM 시뮬레이션 해석

일반 강관 제조 시 여러 롤 패스로 구성된 롤 포밍 공정에서 생산이 된다. 여러 롤 패스를 거쳐 점진적으로 성형되는 강관은 최종적으로 용접으로 접합을 한다. 강관 제조 시 롤 포밍 공정에서 최대한 용접할 때 스프링 백 현상으로 용접 후 잔류응력이 발생 안하도록 최대한 용접으로 접합하는 이음매에 대하여 최대한 굽힘 가공을 해주어야한다.

본 시뮬레이션에서는 최근에 자동차 분야에 초 고장력 강관이 적용이 되는 등, 앞으로 고장력 강관의 적용분야가 다양할 것으로 예상된다 [6, 31]. 본 해석에는 롤 패스의 수에 따른 고장력강 재질의 강관의 영향을 분석하기위해, 12 Pass와 15 Pass로 구성된 롤 포밍 해석을 수행하고자 한다.

5-1-1. 유한요소모델 설계 및 1차 해석

고장력 강관 성형을 위한 롤 포밍 공정의 패스의 수를 총 12단으로 모델링을 하였으며, 각 파트에 대하여 어셈블리 된 형상은 Fig. 97과 같다. 성형시트의 중심부분인 웹(Web) 부분에서 인장이 가장 많이 발생할 것으로 예상되며, 웹에서 발생한 응력으로 인하여 스프링 백이 크게 발생할 것으로 판단된다. 그러므로 Pass-1의 롤 금형에서 역곡률를 주어 스프링 백이 적게 발생하도록 모델링을 하였다.

고장력 강관의 재질은 위의 실험에 사용된 SPFH 590소재를 적용하였다. 고장력 강판의 너비, 길이, 두께는 각각 154mm, 1,000mm, 1.7mm이다. 성형 시트와 롤 다이 사이에 마찰 계수를 0.2로 설정 하였다. 롤 다이는 쉘 요소로 된 강체로 설정하였으며, 성형시트는 솔리드 모델로 적용하였다. 성형 시트에는 솔리드 요소(C3D8R) 5,580개로 구성이 되어있으며, Fig. 97과 같이 롤 다이에는 쉘 요소(R3D4) 64,572개로 분할을 하였다. 동적·외연적(Dynamic, explict mothod) 해석을 수행하였으며, Fig. 100은 성형 후 von-Mises응력에 대한 결과이다. 튜브의 최대응력은 549MPa이며, 성형 시트의 앞 부분위치에 있는 가장자리에서 최대응력이 발생하였다. 롤 다이에 의한 최종 단면형상은 Fig. 99와 같이 완전한 원 모양이며, 최종 성형시 롤 금형의 구속이 풀렸을 때 스프링 백이 생겨 다시 Fig. 98과 같이 벌어졌다. 이때 다시 벌어진 길이를 Fig. 98과 같이 Gap distance로 정의하고, 이 값을 스프링 백 값으로 측정하였다. 12 Pass의 최종적인 스프링 백 값은 19.7mm이다. 성형시트가 Pass-1부터 Pass-12까지 성형하면 전 구간이 약 430MPa ~ 500MPa로 균일하게 응력이 적용이 되었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

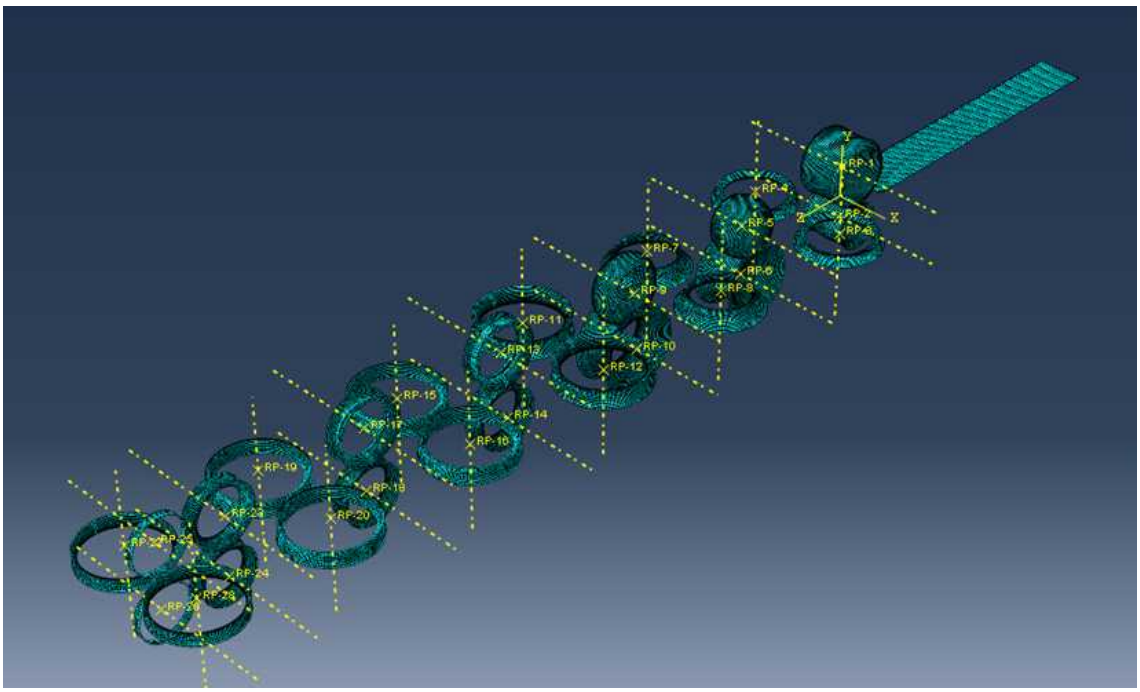


Fig. 97 Roll forming process of 12-Pass

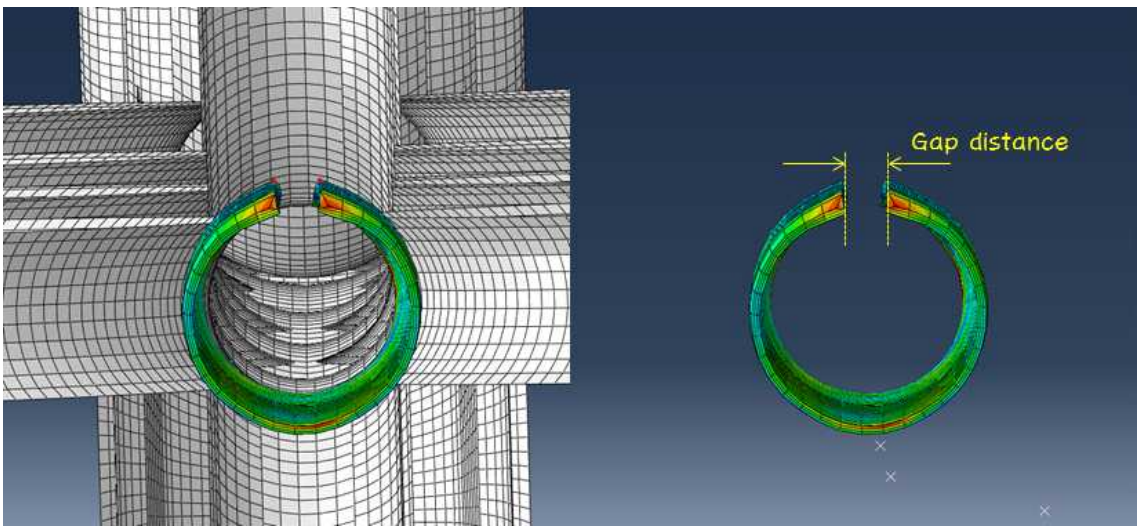


Fig. 98 Definition of gap distance in tube forming

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

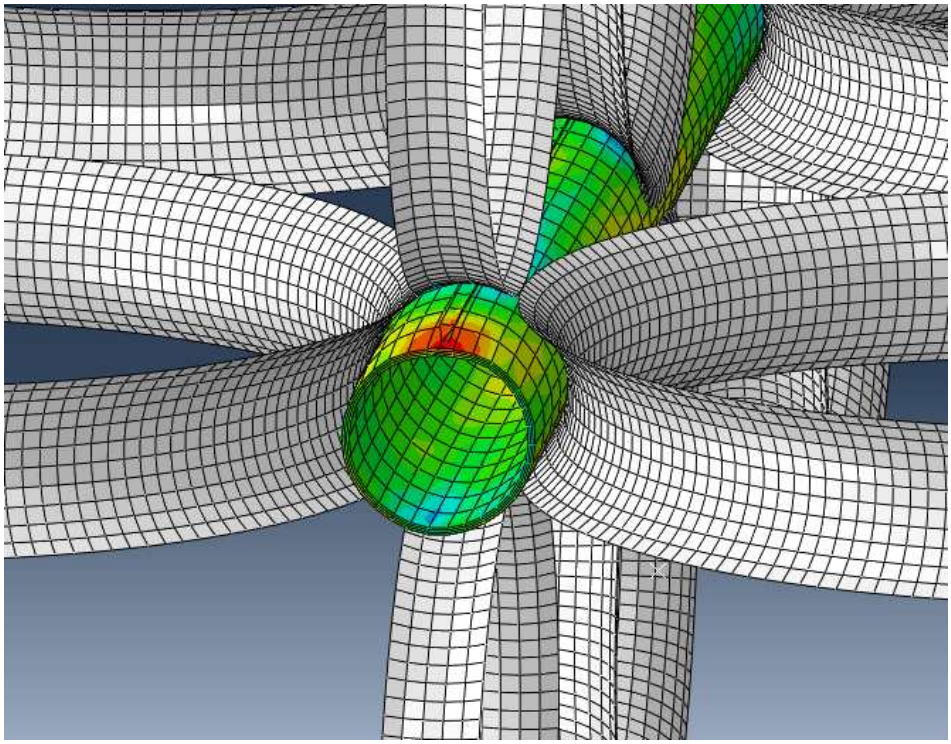


Fig. 99 Final cross-section in Pass-12

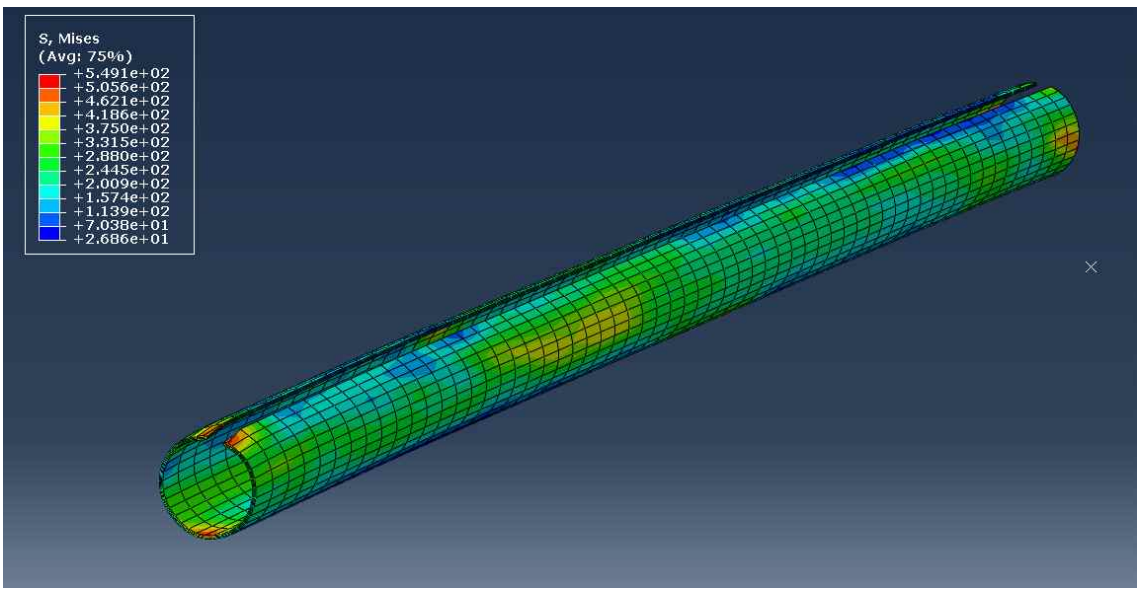


Fig. 100 von-Mises stress distribution in the tube

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5-1-2. 2차 시뮬레이션 해석 결과

1차 해석 때의 12 Pass 롤 패스에서 15 Pass 롤 패스 다시 설계하여 모델링 하였다. 추가된 롤 패스는 Fig. 101의 롤 포밍 공정에서 Pass-10, Pass-12, Pass-13이다. 롤 패스를 추가한 것을 제외 하고는 기존 12 Pass 롤 포밍 공정과 해석조건은 동일하다.

시뮬레이션 해석 결과 측정된 Gap distance는 3.67mm로 기존의 12 Pass 롤 포밍 공정보다 스프링 백 값이 약 16mm이 줄어든 것으로 결과가 도출 되었다. 하지만 Fig. 103에서 12 Pass와 15 Pass의 최종 성형된 단면을 비교한 결과, 12 Pass는 일정한 원 모양으로 완벽한 성형 단면으로 나온 것으로 판단이 되나, 15 Pass는 12 Pass보다 약간 길쭉한 타원 형상으로 된 것으로 성형된 것으로 판단된다. 스프링 백 값은 줄어들었으나, 성형성을 검토르 한다면 12 Pass가 괜찮은 것으로 판단된다. 15 Pass는 롤 패스를 추가 했음에도 불구하고 성형성이 더 안 좋아 졌으며, 위 결과를 바탕으로 15 Pass에서 추가한 Pass-10, 12, 13에서 롤 금형의 재설계가 필요한 것으로 판단된다.

12 Pass와 15 Pass의 스프링 백 및 성형성을 검토 하였다. 튜브의 용접과정에서 용접 열로 인하여 추가적인 변형이 일어난다고 가정하면, 오히려 성형성이 좋은 12 Pass의 롤 포밍 공정이 더 좋은 품질의 튜브가 생산 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 시뮬레이션 해석 결과 롤 포밍의 공정은 단수의 증가로 스프링 백 감소 및 성형성이 향상되는 것으로 알려져 있으나, 그 이전에 합리적인 롤 플라워 설계가 먼저 수행이 필요하다고 판단된다.

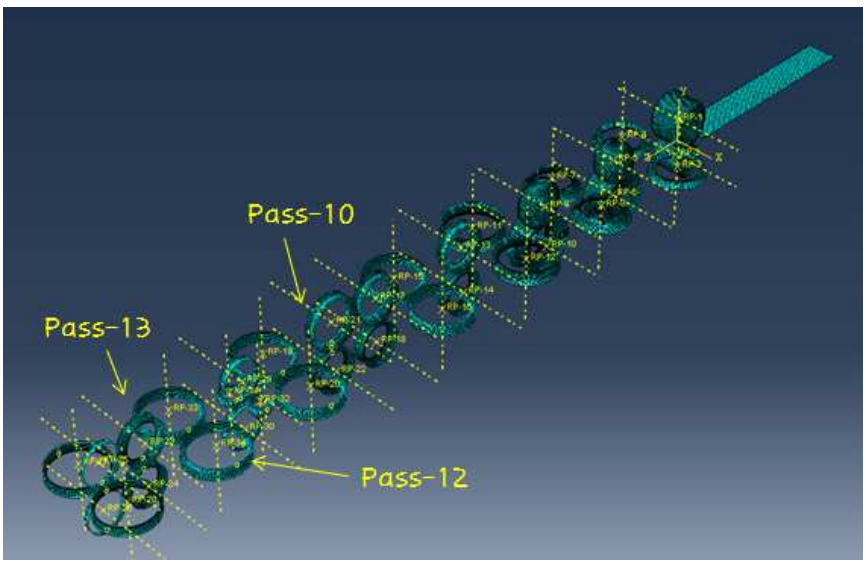


Fig. 101 Roll forming process of 15 Pass

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

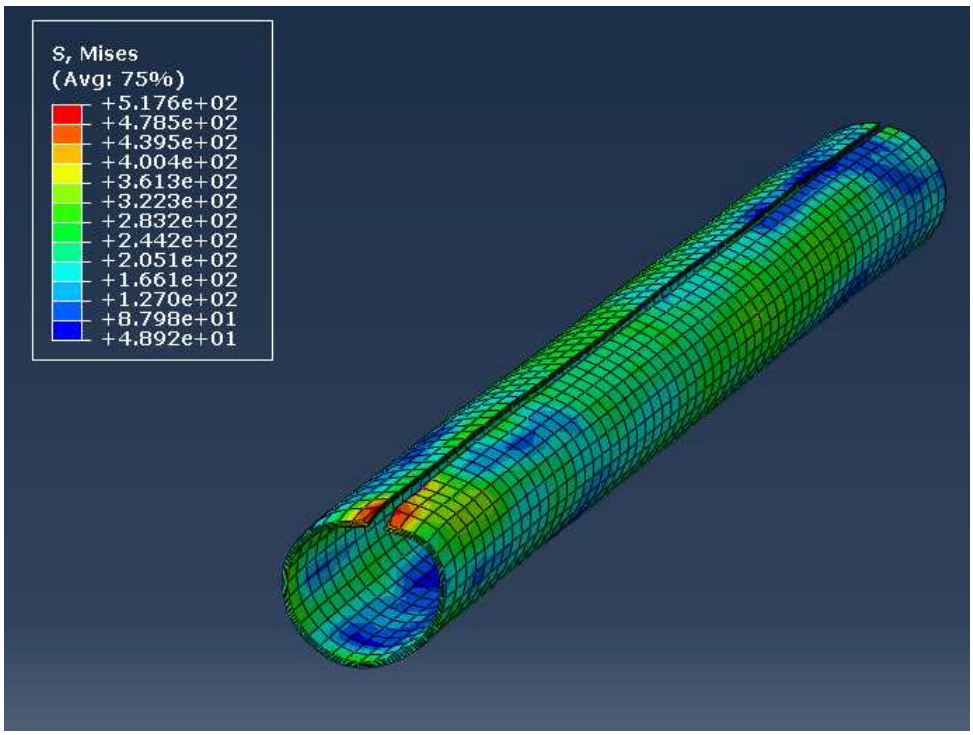


Fig. 102 von-Mises stress in the tube

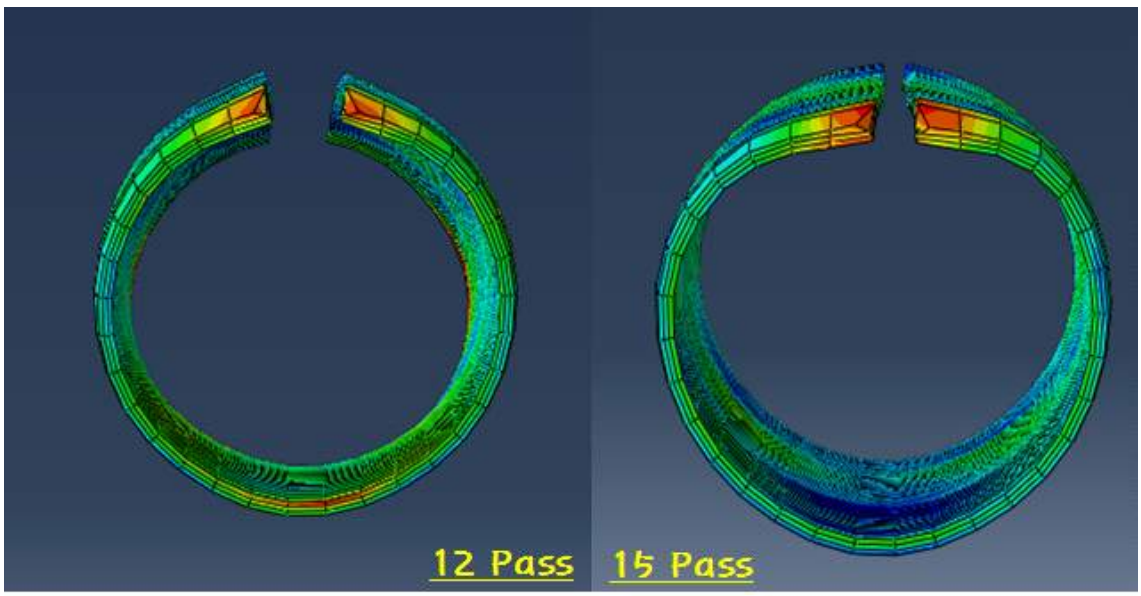


Fig. 103 Compare with 12 Pass and 15 Pass - final cross-section

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

5-2. 30-Pass 닫힘 단면 형상의 롤 포밍 해석

닫힌 단면의 롤 포밍 공정은 총 30 Pass로 구성된 롤 포밍 공정이며, Fig. 104와 같다. 본 해석은 많은 롤 패스와 복잡한 형상의 해석이므로 롤 금형의 수정이 매우 어렵고, 형상 자체가 비대칭 형상으로 성형 중간에 많은 문제를 발생 시킬 가능성이 크다. 만약 30개의 롤 패스 중에 Pass-5를 수정하게 되면 Pass-5이후 롤 금형을 다 수정을 해야 하는 과정이 필요하기 때문이다. 그러므로 본 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 위와 같은 문제에 대한 대안점을 제시하고자 한다.

본 챕터의 시뮬레이션 해석에서는 많은 롤 패스의 수와 복잡한 형상을 빠르게 해석을 하기 위해 롤 금형과 성형시트를 쉘 타입으로 모델링 하였다. 성형시트의 너비, 길이, 두께는 각각 360mm, 1,000mm, 1mm이다. 성형시트의 물성치는 본 논문에 다루었던 SPFH 590소재를 적용하였으며, 본 최종 성형 단면을 고려하여 시트의 너비방향의 양끝부분에 메쉬를 집중하여 정확한 벤딩 각을 도출하고자 하였다. 전체 롤 패스 간 거리는 500mm이며, 그 외 경계조건, 성형시트와 롤 금형의 접촉조건 등은 위에 다루었던 15 Pass 튜브 롤 포밍 공정과 동일한 조건을 적용하였다.

상온 V-벤딩 롤 포밍 공정의 데이터를 참고로 하여, 롤 갭 0.2mm, 1.0mm, 2.0mm씩 해석 변수로 하여 시뮬레이션 해석 결과를 도출하였다.

Fig. 105 ~ Fig. 107은 각 시뮬레이션 해석 변수인 롤 갭에 따른 시트의 성형 형상과 von-Mises 응력의 분포를 보여주고 있다. 동적 시뮬레이션 해석에 적용된 step time은 5s이며, 5s을 1s씩 등분한 성형 형상을 분류하여 시간에 따른 성형과정을 확인 하였다. 시뮬레이션 해석결과를 일정한 해석시간에 따라 분류한 이유는 성형 시트 성형 시 문제가 되는 롤 패스를 찾기 위해서이다. 그리고 또한 von-Mises 응력 분포를 검토를 하여 응력이 집중되는 롤 패스 알 수 있으며, 전체적인 성형과정을 분석함으로써 롤 포밍 성형에 대하여 발생할 수 있는 문제점을 미리 예측을 할 수 있기 때문이다. 본 시뮬레이션 해석인 경우 해석 시간이 매우 길기 때문에 해석 중간 검토를 하여 새로운 해석 조건으로 바로 해석을 수행 할 수 있어 전체적인 해석시간을 감소시킬 수 있다. Fig. 105에는 해석 시간 4s에 우측에 많은 690MPa의 높은 응력이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 106과 Fig. 107은 해석 시간 1s~2s 사이에 성형시트의 가장 자리 부분이 오버 밴딩이 되어서, 그 이후 시뮬레이션 해석을 수행한다고 해도 최종 단면에 대한 품질을 보장 할 수 없는 상태가 된다.

Fig. 108은 롤 갭에 따른 최종 성형 단면을 보여준다. 롤 갭이 0.2mm 일 때 앞 단면 형상에서 조금 벌어진 것을 제외하면 성형성이 높으며, 갭이 1.0mm일 때는 우측 성형시트의 가장자리가 과도한 벤딩이 되어있다. 과도한 벤딩을 인하여 우측 단면형상이 성형성이 떨어졌

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

다. 롤 갭 2.0mm 인 경우 우측 가장자리가 절단되어 있으며, 이는 가공 시 상하롤 안쪽으로 벤딩이 되어 굽혀져야 하는데 다소 높은 갭으로 인하여 상하롤 옆으로 빠져나와 상하롤 다이 사이에 시트가 끼어서 절단이 되었다.

본 시뮬레이션 해석을 통하여 롤 금형 디자인 수정 없이 롤 갭에 따른 닫힌 단면 해석 결과를 도출하였다. 롤 갭에 따라 성형 결과는 다르며, 롤 갭이 0.1mm 또는 0.5mm 일 때 0.2mm의 성형 결과보다 더 좋게 나올 수 도 있다. 또는 성형하는 과정에 응력이 집중되는 부분이 발생하거나 성형에 문제가 되는 롤 패스가 발견되면, 롤 금형을 바꾸지 않아도 롤 갭을 조절하는 것만으로 해결 할 수도 있을 것으로 예측이 된다.

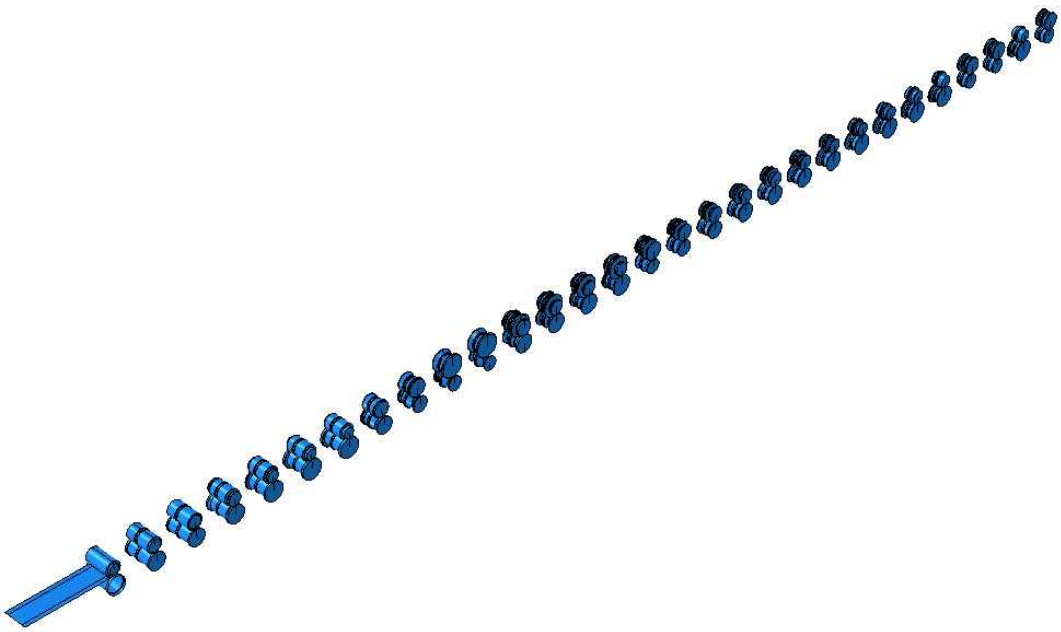


Fig. 104 Roll forming process of 30 Pass

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

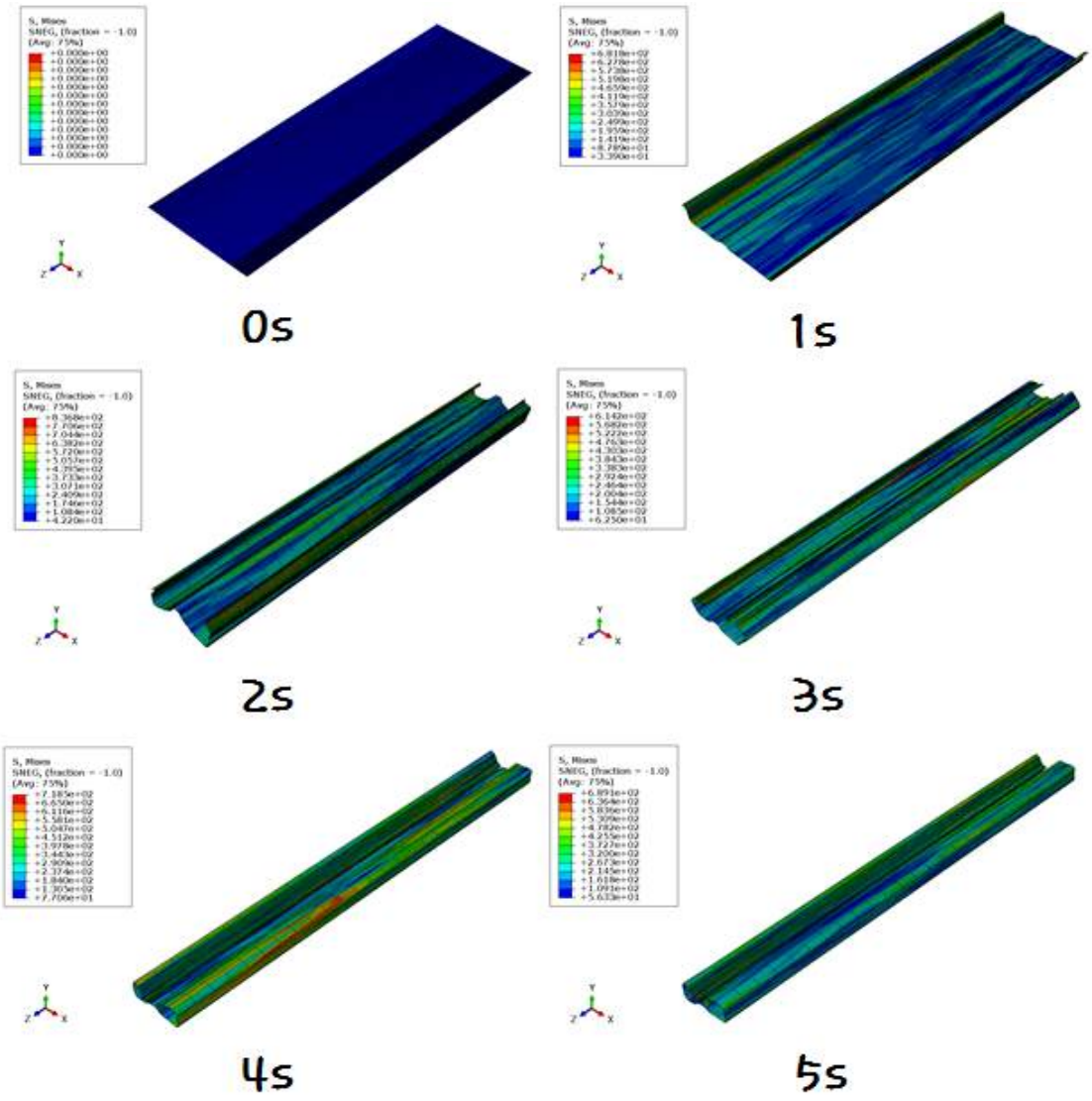


Fig. 105 Deformation shape and von-Mises stress distribution according to step time - roll gap : 0.2mm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

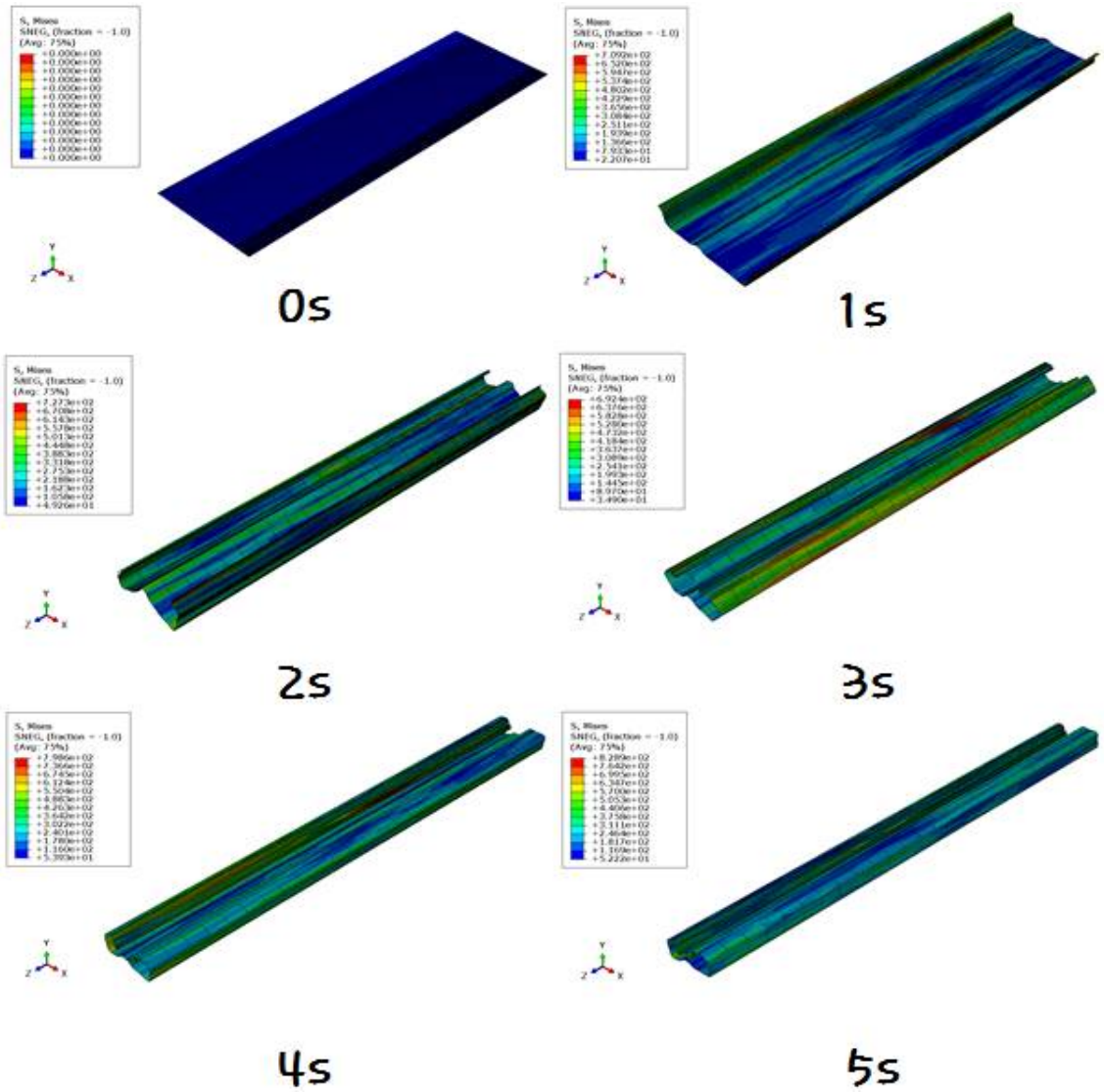


Fig. 106 Deformation shape and von-Misess stress distribution according to step time - roll gap : 1.0 mm

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

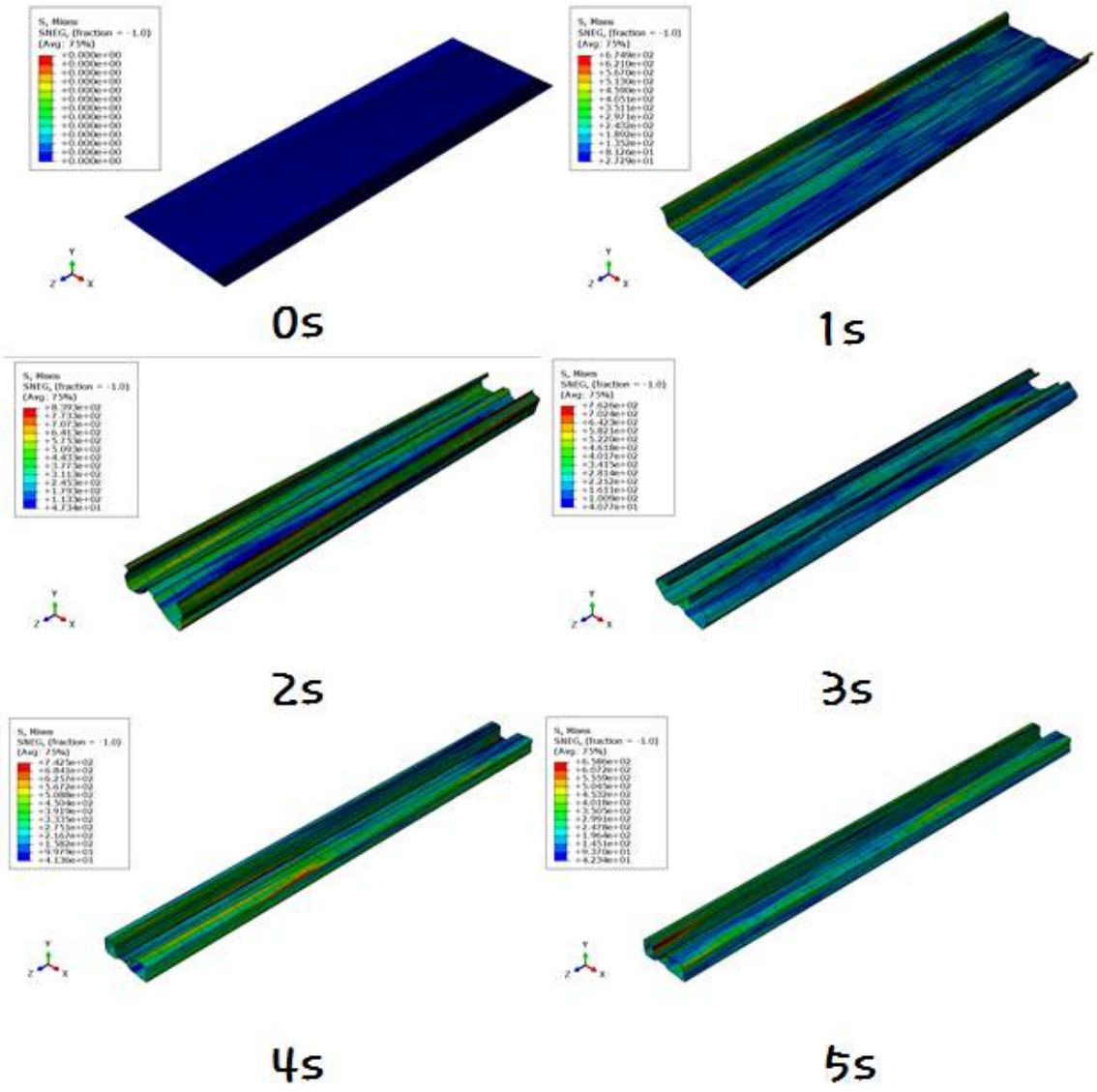
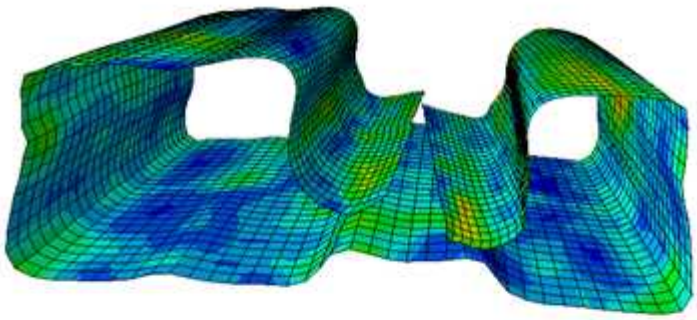
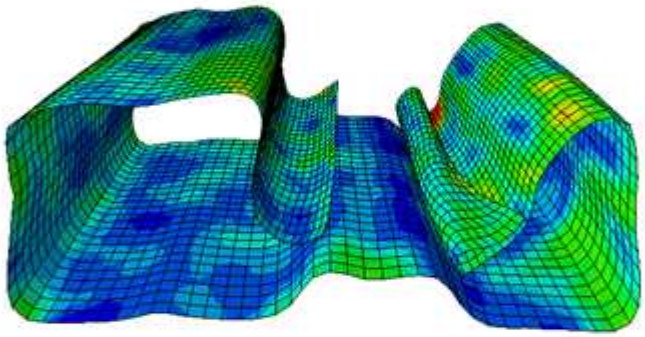


Fig. 107 Deformation shape and von-Mises stress distribution according to step time - roll gap : 2.0 mm

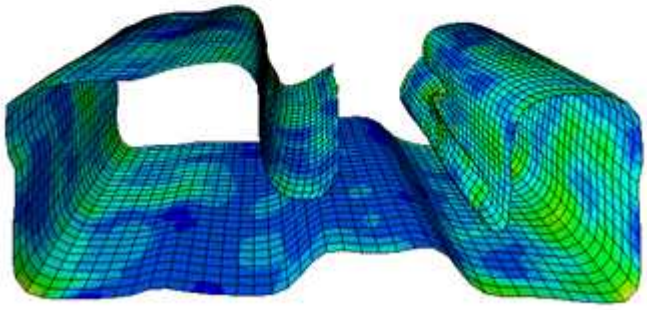
제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY



Gap – 0.2 mm



Gap – 1.0 mm



Gap –2.0 mm

Fig. 108 Final forming cross-section according to rolll gap

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ⅳ.결론

본 연구에서는 기존 롤 포밍 공정에서 예열공정을 융합한 공정을 제시하였으며, 롤 포밍 실험 및 FEM 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 최종 성형 단면은 90°로 성형된 V-형상을 목표로 고장력 강판을 성형 하였으며, 상온 롤 포밍 공정을 통하여 롤 포밍 공정의 변수의 특성을 분석하였다. 가스토치 예열 공정이 적용된 고온에서의 롤 포밍 공정은 다구찌 실험 계획법을 적용하여 실험을 수행하였으며, 성형된 시트의 스프링 백량 및 보우량의 결과를 바탕으로 최적 조건을 도출하였다. 위의 실험 방법과 동일하게 금속 합금 판재 시트를 적용했을 때의 성형성을 분석하였다. 복잡한 형상을 가진 롤 포밍 공정은 FEM 시뮬레이션 해석을 통하여 롤 포밍 공정 변수에 따른 스프링 백 및 성형성 분석을 하였다.

위의 롤 포밍 실험 및 FEM 시뮬레이션 해석으로 도출된 결론은 아래와 같다.

1. 상온 롤 포밍 실험에서는 고장력강 재질인 SPFH 590 시트를 성형하였으며, 롤 포밍 장치에 변수로서 조절이 가능한 롤 포밍 성형속도와 롤 갭의 조건의 변수 범위를 설정하였다. 롤 포밍 성형속도의 변수는 10.3mm/s, 24.9mm/s, 36.3mm/s, 54.2mm/s, 66.6mm/s 이며, 롤 갭의 변수는 0mm, 1.0mm, 2.0mm로 설정하여 실험을 수행 하였다. 같은 롤 갭에서의 롤 포밍 성형속도의 스프링 백 값의 영향이 거의 없으며, 같은 롤 포밍 성형속도에서 롤 갭에 변수에 따라 스프링 백 값이 많은 차이를 보였다. 롤 갭이 0mm일 때에는 오버 밴딩이 되어 최종 성형각도가 90° 이하로 나타났으며, 롤 갭이 1mm인 경우 90° 전후로 성형각도로 나왔으며, 롤 갭이 2mm 일 때는 스프링 백 값이 약 4° 전후로 나타나는 것으로 분석되었다. 롤 갭이 0mm 일 때 오버밴딩 되는 이유는 상부 롤 금형의 V-형상의 각도가 하부 롤 보다 크기 때문에 성형 시트 웹에 상부 롤 금형의 R-값에 해당하는 면적에 대한 큰 집중 하중이 적용이 되었기 때문이라 판단된다.

2. 롤 포밍 공정에 예열공정을 적용하기 전에 예열 장치의 온도 특성을 실험을 수행하였다. 사용된 예열장치는 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치를 사용하였으며, 온도 측정장비로는 적외선 열화상 카메라를 사용하였다. 열화상 카메라는 토치의 불꽃의 온도에 대하여 부정확한 온도 값으로 측정되었다. 하지만 가스토치의 불꽃화염 크기 및 온도분포를 확인할 수 있어서, 예열공정을 적용하기 위한 적합한 실험 변수를 선정하기 위한 데이터

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

로 활용하였다. 부탄 가스토치에서 나오는 불꽃화염은 불꽃 길이가 길고 너비가 넓으며, 열화상 카메라 측정된 불꽃의 최대온도는 평균 120℃로 측정 되었다. 플라즈마 가스토치의 불꽃화염은 화염길이가 평균 6mm정도로 매우 짧지만, 플라즈마 화염 중심온도는 평균 750℃에서 최대 1,100℃까지 측정되었다. 플라즈마 가스토치의 화염은 플라즈마 발생 가스인 아르곤와 플라즈마 가스토치에 출력전류를 공급해주는 TIG 용접기의 전류에 따라 불꽃의 특성을 분석하였다. 열화상 카메라의 3D-IR 그래프를 이용하여 성형시트의 온도 분포를 산출하였으며, 열화상 카메라의 온도 데이터를 거리로 환산하여 정확한 불꽃 화염의 길이도 계산하였다. 이러한 불꽃의 특성을 파악하여 각 예열 장치에 따라 성형시트와 가스토치 간의 적합한 거리를 결정하였고, 적합한 거리를 실험 변수로 하여 성형시트에만 예열 했을 경우 성형 속도 변수에 따른 성형시트의 온도 분포를 측정하였다.

3. 예열공정이 적용된 롤 포밍 성형 실험에 앞서 FEM 시뮬레이션을 수행하여 고장력강 소재인 POSTEN 60 성형시트가 열에너지에 의해 발생되는 열응력 값을 도출하였고, 100℃에서 500℃사이의 온도를 성형시트에 이동열원으로 적용하여 실제 롤 포밍 공정과 유사한 해석을 하였다. 열 응력 및 열 변형율에 대하여 성형시트를 두께 방향으로 3-layer로 나누어서 인장과 압축응력의 거동을 확인하였다. 그 결과 온도 변수에 따른 성형시트의 측정 포인트에서의 스프링 백 값을 구했으며, 예열온도에 따른 스프링 백 영향은 크지 않은 것으로 분석 되었다.

4. 부탄 가스토치와 플라즈마 가스토치를 예열장치로 하여 롤 포밍 장치에 설치하여, 성형시트를 예열 하였다. 효율적인 실험을 위해 다구찌 실험법을 적용하였으며, 상온 롤 포밍 실험에서 오버밴딩과 스프링 백 현상이 동시에 발생하므로 망목특성을 고려한 다구찌 실험법을 설계하였다. 3수준 3인자 또는 3수준 4인자 직교배열표를 작성한 후 해당되는 실험을 수행 하였다. 실험에서 도출된 스프링 백 값을 이용하여 SN비를 구하였고, SN비로 SN비의 주효과도를 구하여, 결과 값에 많은 영향을 미치는 실험변수와 각 SN비의 수준을 고려하여 최적조건을 도출하였다. 부탄 가스토치를 예열장치로 사용 했을 때에는 성형속도가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 플라즈마 가스토치인 경우는 성형시트와 예열장치간의 거리인 예열거리가 가장 큰 영향을 주는 인자로 도출이 되었다. 성형된 시트에 대하여 성형성을 평가하기 위해 롤 포밍 제품의 결함 현상인 보우에 대하여 추가적으로 측정하였으며, 보우에 대한 값으로 다구찌 실험법의 망소특성으로 예열공정과 같은 방식으로 분석하여, 보우값을 줄이기 위한 최적조건을 도출하였다. 성형 시편 11개의측정 포인트를

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

분석을 한 결과 성형시트에 예열 했을 때, 스프링 백 값에는 크게 영향을 안 미치는 것으로 도출되었다. 하지만 분산 분석 결과에서는 예열된 성형시트의 버클링 현상을 감소되었으며, 일정한 단면 형상으로 성형이 되어 제품 품질을 향상이 되는 것으로 분석되었다.

5. 금속 판재에 대하여 롤 포밍 성형을 하였다. 적용된 소재는 티타늄 합금, 마그네슘 합금 그리고 알루미늄 합금을 성형시트로 사용하였다. 티타늄 합금은 예열 공정과 같은 방식으로 다구찌 실험법을 적용하였으며, 가장 영향이 큰 인자로는 성형속도로 나타났다. 티타늄 합금도 보우에 대한 다구찌 실험법을 적용하여 망소특성에서의 보우 값이 낮게 나오는 최적조건을 예측하였다. 알루미늄 합금과 마그네슘 합금은 다구찌 실험법을 적용하였으나, 가스토치가 짧은 시간에 공급하는 열적에너지가 적어 크랙 발생 및 갈라짐 현상을 보여 다구찌 실험법을 적용이 불가능 하였다. 그래서 30s 동안 부탄 가스토치로 충분히 예열을 하여, 갈라지는 조건에서 성형을 시도를 하였으며, 알루미늄 시트와 마그네슘 시트는 크랙이 발생하긴 하였지만 롤 포밍 성형이 되었다. 위 2개의 소재는 롤 포밍 공정 성형할 때에는 본 연구의 예열방식이 아닌 다른 예열 방법을 적용하면 롤 포밍 장치에 성형할 때 성형성이 크게 높아 질 것으로 예측된다.

6. SPFH 590 소재의 기계적 물성치를 이용하여 복잡한 단면형상을 가지는 롤 포밍 공정을 FEM 시뮬레이션으로 해석을 수행하였다. 일반 강관 튜브를 만드는 롤 포밍 공정에서는 12-Pass와 15-Pass 롤 패스를 가지는 롤 포밍 공정에 대한 튜브의 스프링 백 값을 비교하였다. 15-Pass의 롤 포밍 공정은 12-Pass 롤 포밍 공정 보다 16mm 적은 스프링 백 값이 도출이 되었지만, 오히려 12-Pass보다 성형성이 낮은 것으로 확인되었다. 30-Pass의 닫힌 단면 형상의 롤 포밍 공정에서는 롤 갭을 변수로 시뮬레이션 해석을 수행하였다. Step time 5s에서 각 1s에 해당되는 성형 결과를 도출하여, 성형과정에서 생기는 문제점을 파악 할 수 있었으며, 롤 갭 0.2mm일 때 가장 좋은 성형성을 보여주었다.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

참고문헌

1. Kim. J. K., 1988, Present Status and Properties of Light - Weight Materials in Automobile, ***Journal of the KSAE***, Vol. 10, No. 4, pp. 29-38.

2. Wick, C., 1992, tool and manufacturing engineers handbook, 4th edn, Vol. 6, Chapter 8, Society of Manufacturing Engineers.

3. (재)부산테크노파크 전략산업기획단, 2010, 부산지역 자동차부품산업 기술로드맵 최종보고서, pp. 97.

4. Kim, K. Y., Jang, S. G., Jung, H. S., Oh, K. S., Yun,J. J. and Park, C. D., 2011, The Development of High Strength Steel Car in Sill Side by Roll Forming Process, ***The KSAE of Annual Spring Conference***, pp. 29-34.

5. Bae, W. R., Shim, B. K., Jo, Y. and Jung, C. S., 2010, Development of the Roll Forming for High Strength Long Rail, ***The KSPE of Annual Spring Conference***, pp. 1151-1152.

6. Son, H. J., Kim, S. Y., Oh, B. S. and Kim, K. S., 2012, Development of Vehicle Door Side Impact Beam with High Tensile Steel using Roll Forming Process, ***Journal of The KSMPE***, Vol. 11, No. 6, pp. 82-87.

7. Jung, D. W., Kim, D. H. and B. C. Kim, 2012, A Study on Development of Automotive Panel of Bumper Reinforcement with High Strength Steel using Roll Forming Process, ***Journal of the KSPE***, Vol. 29, No. 8, pp. 840-844.

8. Kim, Y. I., Kim, J. H., Jeoung, Y. C. and Kim. N. S., 2003, Buckling Analysis of Rall Forming Process using Finite element method, ***Transactions of the KSME - A***, Vol. 27, No. 9, pp. 1451-1456.

9. Kim, H. J., Jung, D. W., Choi, D. S., Jae, T. J. and Park, J. H., 2004, A study on basis of metal inner structure by roll forming machine, ***KSPE of Annual Autumn Conference***, pp. 114-117.

10. Lee, H. G., Yoo, S. M., Lee, W. R., Lee, D. K., Ro, D. H. and Park, H. S., 2005, A Study on Standard of Performance Evelution for Multi Ball Bearing Slide Rail, ***KSMTE of of Annual Autumn Conference***, pp. 343-348.

11. Jeong, S. H. and Lee, S. H., 2007, Design of Roll Forming Process for Under Rail

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Forming, ***KSMTE of Annual Autumn Conference***, pp. 107-112.

12. Jeong, S. H., Lee, S. H., Kim, G. H., Kim, J. S. and Kim, J. T., 2008, A Study on Roll Forming Simulation of Under Rail, ***Journal of the KSMTE***, Vol. 17, No. 3, pp. 78-85.

13. Kim, D. K., Sohn, S. M., Lee, K. H. and Lee, M. Y., 2008, Development of Manufacturing Technology for SILL SIDE with Roll Forming Process, ***KSTP of Annual Spring Conference***, pp. 357-360.

14. Kim, D. K., Park, S. E., Cho, K. R., Lee, K. H., Kim, K. H. and Lee, M. Y., 2009, Development of Manufacturing Technology for Center Floor Cross Member with Roll Forming Process, ***KSTP of Annual Autumn Conference***, pp. 297-300.

15. Kim, D. K., Kim, Y. S., Lee, K. H.. and Lee, M. Y., 2007, The Study of Manufacturing Technology for Automotive Body with Roll Forming Process, ***KSME of Annual Spring Conference***, 41-45.

16. Lee, T. S. and Kim, G. W., 2009, Finite Element Analysis for Precision Roll Forming Process of Stainless Slide Rail, ***Journal of the KSPE***, Vol. 26, No. 8, pp. 96-103.

17. Shin, D. W., Yoon, Y. S., Shim, B. K. and Ko, T. J., 2009, The Flow Analysis of Retainer of Slide Rail, ***KSPE of Annual Autumn Conference***, pp. 455-456.

18. Jimma, T. and Ona, H., 1980, Optimum roll pass schedules on the cold roll forming process of symmetrical channels, ***Proc. 21st Int. M.T.D.R. Conf.***, pp. 63-67.

19. Ona, H., Jimma, T. and Fukoya, N., 1983, Experiments into the cold roll forming of straight asymmetrical channels, ***J. Mech. Working Technol.***, Vol. 8, pp. 273-278.

20. Ona, H., Jimma, T., and Kozono, H., A computer-aided system for cold roll forming, ***Advanced Technology of Plasticity***, Vol. 1, pp. 508-514.

21. Bhattacharyya, D. and Panton, S. M., 1989, Research and computer-aided design in cold roll forming, ***Academic Publishers-Pergamon***, Vol. 2, pp. 464-470.

22. Bhattacharyya, D., Smith, P. D., Yee, C. H., and Collins, I. F., 1984, The prediction ofdeformation length in cold roll forming, ***J. Mech. Working Technol.***, Vol. 9, pp. 181-191.

23. J. Fewtrell, 1990, An experimental analysis of operating conditions in cold roll forming, Ph. D Thesis, University of Aston in Birmingham.

24. Kiuchi, M., 1973, Analytical study on cold roll forming process, ***Report of the Inst. of***

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Ind. Sci., Univ. of Tokyo, Vol 23, pp. 1~23.

25. Kiuchi, M. and Koudobashi, T., 1984, Automated design system of optimum roll profiles for cold roll forming, ***Proc. 3rd Int. Conf. on Rotary Metal Working Process***, Kyoto, pp. 423~427.

26. Jung, J. H., Kang, S. J., Park, S. E., Lee, G. H., Yun, T. S. and Lee, M. Y., 2012, Design and Application for 1㎬ class special cross section Carbody part with Flexible Roll Forming Process, ***KSTP of Annual Spring Conference***, pp. 142-144.

27. Jung, J. H., Park, S. E., Lee, G. H. and Lee, M. Y., 2012, A Development of Car body part with Flexible Roll Forming Process, ***KSTP of Annual Autumn Conference***, pp. 28-28.

28. Kim, K. H. and Yoon, M. C., 2015, Development of a Roll-Forming Process of Linearly Variable Symmetric Hat-type Cross-section, ***Journal of The KSMPE***, Vol. 14, No. 4, pp. 118-125.

29. Zhang, Y., Jung, D. W., Yu, H., Kim, D. H. and Yoon,D. H., 2015, A Study for Flexible Roll Forming Process, ***KSPE of Annual Spring Conference***, pp. 107-108.

30. Lim, J. D., Choi, C. H. and Hon, S. H., 2014, Trends of Material Application to the Automotive Body, ***Journal of the KSAE***, Vol.36, No. 3, pp. 14-21.

31. Yun, J. J., Park, D. H. and Kim, K. Y., 2012, Roll Forming and Laser Welding Properties of 1180MPa Class High Strength Steel Sheets, The ***KSMTE of Annual Spring Conference***, pp. 9-9.

32. S. K. Hong, S. H. Lee, Y. M. Heo and J. J. Kang: 'Induction Heating Apparatus for Rapid Heating of Flat-Type Metallic Mold in Hot Embossing', ***Transactions of Materials Processing***, 2007, 16, 4, 282-287.

33. Lee, H. C., Kim, D. H. and Kim, B. M., 2002, Estimation of Die Life Considering Initial Billet Temperature Deviation in Hot Forging Precess, ***KSTP of Annual Autumn Conference***, pp. 255-258.

34. Park, J. H., Kim, J. W., Kim, K. C. and Jun, J. H., 2008, Effects of Heating Conditions in the Straightening of Sheet Metal Distortion, ***Journal of The KWJS***, Vol. 26, No. 4, pp.79-84.

35. Park, J. H., Kim, J. W., Kim, K. Chul. and Jun, J. H., 2008, Effects of Heating Conditions in the Straightening of Sheet Metal Distortion, ***The KWJS of Annual Spring Conference***, Vol. 49, pp.87-87.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

36. Kim, J. H., Choi, J. Y. and Lee, C. M., 2011, Thermal Analysis for Laser Assisted Turning of Square Bar using Laser Heat Source Projection Method, ***Journal of the KSPE***, Vol.28, No.12, pp.1353-1358.

37. Bae, S. h. and Lee, J. S., 2012, A Study on the Heat Flux Model of Plate Forming by Gas Torch, ***The Society of Naval Architects of korea of Annual Spring Conference***, pp. 1493-1496.

38. Kim, K. T. and Kim, Y. S., 2012, Optimization for Thermal spray Process by Taguchi Method, ***Journal of the KSPSE***, Vol. 16, No. 2, pp. 54-59.

39. Liu, J. W., Jin, J., Ko, T. J. and Baek D. K., 2013, Study of Optimal Machining Conditions of Ultrasonic Machining By Taguchi's Method, ***Transactions of the KSME - A***, Vol. 37, No. 2, pp. 213-218.

40. Cho, C. Y. and Ryu, S. H., 2014, Analysis of Cutting Edge Geometry Effect on Surface Roughness in Ball-end Milling Using the Taguchi Method, ***Journal of the KSMTE***, Vol. 23, No. 6, pp.569-575

41. Jang, W. G., 2013, Optimal Design of the Front Upright of Formula Race Car Using Taguchi's Orthogonal Array, ***Journal of the KSMTE***, Vol. 22, No. 1, pp. 112-118.

42. Kim, D. H., Yoon, D. H., Yu, Hao and Jung, D. W., 2014, Study on Spring-back Effect with Various Temperature of Magnesium Alloy in Roll Forming Process, ***Advanced Materials Research***, Vol. 1016, pp. 75-79.

43. Uemori, T., Okada, T., Yoshida, F., 1998, Simulation of springback in V-bending process by elasto-plastic finite element method with consideration of Bauschinger effect, ***Metals and Materials***, Vol. 4, No. 3, pp. 311-314.

44. PLASMA TAEWOO, URL: http://www.twpla.com

45. 박종우, 2014, 정밀 용접공학, 일진사, pp99-109.

46. 엄환섭, 2008, 전자파에 의한 고온 열 플라즈마, 물리학과 첨단기술 9월호, pp. 37-42.

47. Chang, K. H., Lee , C. H. and Shin, Y. E., 2004, A Study on the High Temperature Tensile Property and the Characteristics of Residual Stress in Welds of High Strength Steels, ***Journal of The KWJS***, Vol. 22, No. 4. pp. 50-58.

48. Chang, K. H., Jung, G. C., Stiemer, S. and Loewen, N., 2013, Dynamic Hysteretic Characteristics of High-Strength Steels (POSTEN60, POSTEN80) and Application of a

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

Dynamic Hysteresis Model to FE Analysis, ***Journal of Materials in Civil Engineering***, Vol. 25, No. 10, pp. 1549–1557.

49. Chang, K. H. and Lee, C. H., 2006, Characteristics of High Temperature Tensile Properties and Residual Stresses in Weldments of High Strength Steels, ***Materials Transactions***, Vol. 47, No. 2, pp. 348-354.

50. Jung, W. J., Park M. H., Choi J. K., Nam K. S., Shang Z., Lee J. H. and Lee S. S., 2014, Design of Roll Forming Machine for Fail Safe Chord Forming Process, ***Journal of The KSMPE***, Vol. 13, No. 4, pp.44-49.

51. Choi J. K., Lee, D. W., Park M. H., Nam K. S., Shang Z. and Lee S. S., 2014, Develop of Roll Forming Machine for Fail Safe Chord Forming Process, ***KSME of Annual Spring Conference***, pp.413-418.

52. Suh, C. M., Hor, K. H., Kim, H. M. and Suh, M. S., 2013, Variation of Material Characteristics of a Hot-formed AZ31 Magnesium Alloy, ***Transactions of the KSME - A***, Vol. 37, No. 7, pp. 913-919.

53. Kim, H. K. and Kim, K. D., 2006, Effect of Die Shape and Temperature on the Deep Drawability of AZ31 sheet, ***KSPE of Annual Autumn Conference***, pp. 27-28.

54. Nguyen, D. T., Jung, D. W., Kim, D. H., Kim, B. C. and Kim, Y. S., 2011, Modified Hardening Behavior to Predict V-Bending Spring-back of AZ31 Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperatures, ***KSPE of Annual Spring Conference***, pp. 9-10.

55. Esat, V., Haluk D. and Mustafa I. G., 2002, Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets, ***Materials & design***, Vol. 23, No. 2, pp. 223-229.

56. Yilamu, K., Hino, R., Hamasaki, H. and Yoshida, F., 2010, Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet, ***Journal of Materials Processing Technology***, Vol. 210 No.2, pp.272-278.

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

감사의 글

설레는 마음으로 박사과정을 시작한지가 엊그제 같은데 벌써 졸업을 앞두게 되었습니다. 지난 박사과정 때를 회고하면 나의 인생에 있어서 많은 일들이 있었고, 중요한 반환점이 되었습니다. 예전에 알지 못한 저 자신의 부족함을 발견할 수 있는 시간 이였으며, 이 의미 있는 시간으로 인해 더 많은 것을 배우고 느낄 수가 있었습니다. 의미 있는 시간동안은 저에게 쉽지 않은 여정 이였고, 나의 여정이 흔들리지 않도록 도와주신 분들에게 이 글을 통하여 감사의 마음 전하고자 합니다.

타 학과에서 온 저에게 따뜻하게 맞아주신 정동원 교수님에게 감사드립니다. 저에게 항상 할 수 있다는 자신감을 심어주었고, 열정적으로 연구에 매진하는 모습을 통해 많은 것을 배웠습니다. 연구 활동 동안에 많은 조언 및 기회를 주시고, 물심양면으로 저를 지원해주신 것에 대하여 다시 감사드립니다.

저에게 진심어린 조언과 저의 미래를 걱정해주시는 강창남 교수님, 정지현 교수님, 저의 졸업논문에 아낌없는 조언을 해주기 위해 먼 길에 오신 박상후 교수님, 한기봉 교수님 바쁜 일정에 졸업논문 심사를 해주셔서 감사드립니다. 만날 때 마다 항상 웃는 얼굴로 맞아주시는 현명택 교수님 감사합니다. 교수님의 배려가 저에게 박사과정 동안 큰 힘이 되었습니다. 쉽지 않았던 기계공학 이론에 대하여 열정적으로 가르침을 주신 권기린 교수님, 김귀식 교수님, 허종철 교수님, 박윤철 교수님에게도 감사드립니다.

저의 석사과정 지도교수님이자 박사과정을 할 수 있도록 큰 기틀을 잡아주신 목영선 교수님께 항상 감사합니다. 석사 과정 때 교수님의 많은 가르침이 저의 연구 활동의 밑거름이 되어, 지금의 결실을 맺을 수 있었습니다. 존경하고 저의 석사과정 지도교수님이 되어준 것에 다시 감사드립니다. 화공과 갈 때마다 반갑게 맞아주시고, 학부와 석사과정 때 가르침을 주신 현영진 교수님, 이상백 교수님, 이호원 교수님, 김민찬 교수님에게도 감사드립니다.

저의 얘기를 들어주시고 저를 편안하게 맞아주시는 김원진 교수님 감사합니다. 교수님이 있어서 제 마음이 많이 가벼워지고, 힘을 낼 수 있었습니다.

힘든 박사과정에도 불구하고 제가 도움을 청하면 자신의 일처럼 도와주고 저의 고민도 자신의 고민처럼 같이 걱정해준 조진오 박사님, 항상 나의 부족한 점을 일깨워주고 언제든지 찾아가도 반갑게 맞아주시는 나의 진정한 멘토 장두일 박사님, 진심어린 조언해주시고 저에게 대선배이신 김승건 박사님, 타 학과에서 온 저를 외롭지 않게 관심 가져주시고 제가 버

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

틸 수 있도록 항상 옆에서 지지해주시는 김용환 박사님께 감사드립니다.

길지도 짧지도 않은 연구실 생활하면서 연구 공감대를 같이 형성해준 봉천이형, Nguyen Duc-Toan, 양학진 박사님에게 감사드리며, 실험실 생활을 활기차고 즐겁게 해주고 나를 잘 따라주었던 든든한 후배 경원이, 태형이, 준섭이, 윤석아 고맙다. 그리고 항상 실험실 막내 생활을 못 벗어나던 대환아. 석사과정 동안 고생했고 같이 학업을 마무리 할 수 있어서 좋았고 많이 챙겨주지 못해서 미안해. 학부와 석사과정 때 옆에서 같이 연구를 도와주고 공유해준 지환이형, 호철이형, 은진이, 란영에게 감사함을 느낍니다.

석사와 박사과정 7년간 항상 바쁘다고 만나주지도 않아도 이해하고, 옆에서 지켜봐주던 일학, 건우, 광재, 용범아 고맙다.

학생이란 신분임에도 불구하고 항상 저를 믿어주시고 과분한 사랑을 주시는 저의 백종철 장인어른, 김명숙 장모님에게 미안하면서 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 과분한 사랑에 대하여 제가 보답할 수 있게 최선을 다하도록 하겠습니다. 다시 감사드립니다. 그리고 처가식구에게도 감사드립니다.

저와 저희 가족의 안위를 항상 걱정해주시는 고영률 삼춘을 포함한 친척과 친지 어르신들에게 감사드립니다.

제가 박사과정을 편안하게 할 수 있도록 저의 가족을 걱정하고 돌봐주었던 누나, 힘들 때마다 나의 마음에 안식처가 되어주고 무엇보다 제가 잘 되기만을 바라는 김형필 아버님과 강종순 어머님에게 감사드립니다. 항상 옆에 있어 주셔서 행복하고 고맙습니다.

마지막으로 오랜 연예생활부터 인연이 되어, 나를 사랑해주고 부족한 나를 믿고 멀리서 와서 고생하고 있는 나의 아내 수경아. 있어 주어야 할 때 있어 주지를 못하고 해줘야 할 때 해주지 못해서 항상 미안하고, 나를 믿고 여기 까지 온 것에 대해 고맙다. 그리고 나의 전부를 줘도 안 아까운 지후, 준우 건강하게 커줘서 고맙다.

2015년

크리스마스 이브의 생일날 새벽

연구실에서

제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY