

碩士學位論文

박판 마그네슘 합금의
성형성에 관한 연구



濟州大學校 大學院

에너지융용시스템학부 기계공학전공

孫 漢 其

2009年 2月

박판 마그네슘 합금의 성형성에 관한 연구

指導教授 鄭 東 垣

孫 漢 基

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

孫漢其의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 김기석 
委 員 김성재 
委 員 정동원 

濟州大學校 大學院

2009年 2月

A Study on Formability of the Magnesium Alloy Sheet

Young-Ki Son

(Supervised by professor Dong-Won Jung)

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

Department of Mechanical Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2009. 2.

목 차

NOMENCLATURE	i
SUMMARY	ii
I. 서 론	1
1-1 연구의 개요	1
1-2 연구의 목적	4
II. 성형해석	6
2-1 성형해석 소프트웨어	6
2-2 성형해석 재료	8
III. 성형해석 결과 및 고찰(Cellular phone case)	10
3-1 휴대전화 케이스의 성형해석 결과(One-step method)	12
3-1-1 Formability 분석	12
3-1-2 Forming limit diagram 분석	17
3-1-3 Blank form 분석	19
3-2 휴대전화 케이스의 성형해석 결과(Incremental method)	22
3-2-1 Formability 분석	22
3-2-2 Thickness variation rate 분석	24
3-2-3 Forming limit diagram 분석	26
3-2-4 성형력 분석	27
3-2-5 Skid line 분석	28
3-2-6 Spring back 분석	30

3-3 시제품 제작	33
IV. 성형해석 결과 및 고찰(Digital camera case)	35
4-1 디지털 카메라 케이스의 성형해석 결과(One step method)	35
4-1-1 Formability 분석	36
4-1-2 Forming limit diagram 분석	40
4-1-3 Blank form 분석	42
4-2 디지털 카메라 케이스의 성형해석 결과(Incremental method)	44
4-2-1 Formability 분석	44
4-2-2 Thickness variation rate 분석	46
4-2-3 Forming limit diagram 분석	48
4-2-4 성형력 분석	50
4-2-5 Skid line 분석	51
4-2-6 Spring back 분석	52
V. 실제 산업 현장에의 적용	55
5-1 최적 프레스 장치 선정과 윤활유 도포 장치	55
5-2 금형제작	57
5-3 가열장치 및 열 제어 시스템	60
5-4 시제품 제작	62
VI. 결론	65
VII. 참고문헌	67

NOMENCLATURE

n : Work - hardening Exponent

E : Elastic modulus or Young's modulus [GPa]

YS : Yield Strength [N/mm^2]

TS : Tensile Strength [N/mm^2]

El : Elongation [%]

R : Anisotropy coefficient

FLD : Forming Limit Diagram

DE : Dynamic Explicit

SE : Static Explicit

SI : Static Implicit

FCC : Face-Centered Cubic lattice structure

BCC : Body-Centered Cubic lattice structure

HCP : Close Packed Hexagonal lattice structure

ν : Poisson's ratio

R : Anisotropy Coefficient

SUMMARY

Sheet metal forming method is to make various forms of products by using Sheet metal. In economical aspect, we can produce a large scale of product with low cost as the loose of raw material is considerably minor and required time to produce is rather short, and in a view of products, it has excellent intensity considering it's weight and the feature of surface is superior. Thus sheet metal forming method is widely applied in manufacturing vehicles, airplanes, and in electrical parts, etc.

Sheet metal forming method, however, consists of various and complicated process including drawing, bending, stretching and trimming, etc. using sheet metal. Therefore, during the forming, various types of problems like crack, wrinkling and spring back, etc. depend on the material's mechanical characteristic and forming condition. To make excellent quality products without these types of physical defects, a reasonable design for process is essential.

General methods to decide process variables is to do in an empirical way personally. But this method is very inefficient because it must get through lots of processes of trial and error. Due to the development of computer, recently, analysis of the forming process with numerical method became possible. In reality, computerized software for forming analysis is available and widely utilized in the industrial field.

The characteristic of magnesium alloy is the most light in utility metal, the effect of electromagnetic wave interception, excellent specific strength and absorptiveness of vibration. Although magnesium alloy with above characteristic is a subject matter which is suitable in world-wide tendency of

electrical component frame, sheet magnesium alloy is difficult to process. Therefore, forming analysis of sheet magnesium alloy and applying warm-working to process are indispensable. Among Finite Element Methods, the static implicit finite element method is applied effectively to analyze sheet magnesium alloy stamping process.

In the way of static implicit analysis, there are one-step analysis method and incremental analysis method. But in order to apply to the production process which is requiring considerably short lead time, the one-step analysis needs to be used in advance. One-step analysis is rather low in its' accuracy. But because the analysis time is so short, it has an advantage to find out the design and process variables in early stage to provide the direction of process.

Meanwhile, the incremental method guarantees the high accuracy through the process of sequential analysis. However, its processing time is significantly slow compared to the one-step method. Therefore, It is the most efficient to use both incremental method and one-step method in the industrial field.

In this study, it was focused on the crack, wrinkling and spring back on the stamping of magnesium alloy sheet by using the static implicit analysis. According to this study, the results of simulation will give engineers good informations to access the forming technique on sheet magnesium alloy. And its application is being increased especially in the production of electrical component case for using of the magnesium alloy.

I. 서론

1. 1 연구의 개요

박판 금속 성형법(sheet metal forming method)이란, 금속 판재를 이어붙임 없이 소성 변형을 통해서 다양하고 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 것으로 저렴한 소재, 제품의 높은 비강도, 대량 생산성 등의 큰 장점으로 인해서 현대 산업에 폭 넓게 적용되고 있는 분야이다. 타 가공 공정에 비해 제품의 경량화와 자원 절약을 통한 비용 절감 그리고 대량생산의 이점을 가지고 있는 박판 금속 성형법은 항공기 기체, 부품 및 자동차의 차체에서부터 가전제품의 케이스 및 주방용품 등에 이르기까지 광대한 산업분야에서 이용되어지고 있다. 그 외에도 박판 금속 성형법은 제품의 양호한 표면 가공 및 높은 정밀도와 부품으로서의 교환성이 뛰어나고 직접 완제품으로 쓸 수 있는 장점이 있다.[1~3]

박판 금속 성형은 드로잉(drawing), 굽힘(bending), 스트레칭(stretching) 및 트리밍(trimming)등의 다양하고 복합적인 공정으로 이루어져 있기 때문에 성형 시 소재의 기계적 성질에 따라 터짐(crack), 주름(wrinkling), 및 형상불량 등의 다양한 문제가 발생한다. 이러한 문제 발생으로 인한 금형의 수정 비용은 전체 금형 생산 비용의 30%에 달하며, 품질에 문제가 없는 제품을 성형하기 위해 수작업에 의한 금형수정을 반복하는 과정인 try-out 기간이 금형제작 기간의 약 50% 이상을 차지하고 있어 이는 산업현장에서 큰 손실로 나타나고 있다.[4~6]

전 세계적으로 마그네슘합금의 박판성형 기술에 관한 특허의 출원인은 대부분이 일본인으로, 현재 일본에서는 HITACHI 회사, MATSUSHITA 전기 등이 프레스 성형 기술을 적용한 마그네슘합금 휴대폰 케이스 및 노트북 케이스 등의 전자제품의 외장재를 상용화하는 단계에 있다. 하지만 프레스 성형 기술을 적용한 자동차 Hood/Door Inner Panel 등 자동차 부품을 상용화한 국가는 아직 없으며, 독일의 Volkswagen 및 Audi 등 일부 자동차메이커에서만 마그네슘합금 부

품을 시범 적용하는 단계이며, 아직까지 국내에서는 전무한 실정이다.[7]

마그네슘 합금은 실용금속 중 가장 가볍고 우수한 진동흡수성과 비강도, 방열성을 가지고 있으며 시간이나 온도에 대한 치수 안정도가 높다. 또한 재생산성이 뛰어나고 찍힘에 대해 강하며, 전자파 차폐성 등의 장점을 가지고 있다. 특히 전자파 차폐성에 대해서 언급하자면, 기본적으로 금속소재는 전자파 차폐성이 있는 것으로 알려져 있으며, 도전율이 좋은 금속일수록 전자기파 흡수 내지 차폐성이 뛰어나다. 현재의 전자파 방지 제품은 COPPER 및 CARBON의 합성 PAINT를 표면 처리하여 전자파 차폐용으로 사용하고 있으나 이는 환경 문제와 공정의 추가뿐만 아니라 밀도 효과가 떨어지기 때문에 전자파 차폐 효율이 매우 낮은 것으로 알려져 있다. 마그네슘 합금의 도전율은 상당히 높기 때문에 전자파 차폐 효과는 거의 완벽에 가까운 것으로 알려져 있으며 이는 과거부터 대두되어 온 전자파의 유해성과 최근 인체의 건강에 대해 관심이 고조되고 있는 점을 감안한다면 마그네슘 합금이 가지는 가장 큰 장점이라고 판단된다.

전 세계적으로 카메라, 휴대폰, 노트북 컴퓨터 등의 제품은 광학 및 반도체 기술의 진보에 힘입어 더 작고 가벼우며 다기능화로 발전하고 있는 추세이다. 현재는 대부분 전자제품의 케이스는 플라스틱 혹은 알루미늄으로 되어 있다. 하지만 알루미늄 합금 제품은 무게 감소에 한계가 있으며 플라스틱은 가벼우나 색상변질이나 파손에 대한 저항이 약하다. 게다가 플라스틱, 알루미늄의 경우 사출 혹은 다이캐스팅에 의하므로 2차 가공이 필요하며 전자파 차단 효과도 없다. 그렇기 때문에 전자파 흡수가 뛰어나며 실용금속 중 가장 가벼운 마그네슘 합금은 전자제품 케이스의 세계적 추세에 가장 적합한 소재이며 연구할 가치가 충분하다고 판단된다.

현재 마그네슘 합금을 가공하는 방법에는 다이캐스팅이 대표적이다. 그러나 박판 금속 성형법은 다이캐스팅에 비해 가공중의 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하고 제품 측면에서는 무게에 비해 강도가 높고 표면 특성이 우수한 장점이 있기 때문에 마그네슘 합금의 가공법은 박판 성형법으로 점차 변경될 것으로 예상된다.

하지만 앞서서도 언급했듯이, 금속 판재를 이용하여 다양한 형상의 제품을 만드는 박판 금속 성형법은 드로잉(drawing), 굽힘(bending), 스트레칭(stretching)

및 트리밍(trimming)등의 다양하고 복잡한 공정으로 이루어져 있어 성형시 소재의 기계적 성질 및 성형 조건에 따라 터짐(crack), 주름(wrinkling) 및 형상불량 문제들이 발생한다. 이점은 소성변형을 수반할 때 스프링백이 심한 박판 마그네슘 합금의 성질과도 맞물려서 그 가공에 어려움이 있다. 또한 마그네슘 합금은 상온에서 가공이 어렵기 때문에, 금속을 재결정온도 이하, 실온 이상으로 가열하여 성형하는 소성(塑性)가공 방법인 온간가공 방법을 사용함으로써 가공력을 적게 들게 하고, 치수정밀도와 품질이 높은 제품을 얻을 수 있도록 해야 한다.

Table 1은 휴대 전화 케이스를 다이캐스팅 방법과 박판 금속 성형법으로 생산했을 때, 생산성과 불량률, 두께, 후가공의 필요성, 원가 등을 비교한 것이다.

Table 1. Example of cellular phone

	Productivity	Defect rate	Thickness	Boss	Post working	Unit cost
Die casting	3 Units/Min	30~50%	Inapplicable below 1 mm	Available	Necessary	12000 KRW /Unit
Sheet metal forming	12 Units/Min	1%	Applicable to 0.3 mm	Unavailable	Unnecessary	7000 KRW /Unit

1. 2 연구의 목적

본 연구는 정적-내연적 소프트웨어인 Auto-Form을 사용하여 난 가공 소재인 마그네슘 합금판재를 휴대전화 케이스와 디지털 카메라 케이스의 형상으로 성형하는 것에 대해 Incremental방법과 One-step방법을 병행 수행하여 성형해석을 진행하고 실제 산업현장의 설계나 공법에 적용할 수 있는 유용한 정보의 획득과 실제 산업현장에 적용해 봄으로써 그 성형해석 결과의 타당성을 검증하고자 한다. 그 구체적인 방법으로는 상대적으로 성형 난이도가 낮은 휴대전화 케이스에 대해 성형해석과 시제품 제작을 통한 성형성 평가와 성형기술 확보를 마치고 상대적으로 성형 난이도가 높은 디지털 카메라 케이스에 대해서 성형해석 진행과 시제품 제작을 하고자 한다.

유한요소해석방법 중에 박판금속성형에 대표적으로 사용되는 Incremental방법의 성형해석은 성형공정의 스텝 크기를 매우 작게 하면서 해석해 가는 방법으로, 실제로 현장에서 이루어지고 있는 프레스 공정을 시뮬레이션으로 재현하여 프레스 할 때 발생하는 판재의 휨, 균열, 주름진 모습, 판재두께의 증감, 변형이력 등 중간경로를 모두 파악해 볼 수 있으며 여러 가지의 시계열 결과를 얻을 수 있는 매우 정확한 방법이다. 그러나 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있어 짧은 리드타임(lead time)을 요하는 설계공정에 적용하기에는 적합하지 못하다. 다시 말하자면, 유한요소 해석에 있어서 성형 해석은 제품과 공정 설계(product and process design) 동안에 반복적이고 상호작용적으로 수행되어 지는데, Incremental방법에 의한 성형해석은 그 계산시간의 과다로 인해서 생산 단계(production stage)의 문제조정과정(trouble shooting process)에서 그리 만족할만한 성과를 가져다주지 못했다.[8~10] 반면에 Incremental방법의 문제점을 개선하고자 개발된 One-step방법은 리버스(reverse)법에 의한 고속 해석이 가능하다. 최종적인 제품형상에 대해 작성한 메시를 평면으로 전개하고 그때의 결과를 최종 형상으로 역 매핑하여 해석결과를 출력하는 솔버(solver)이다. 다시 말해서 최종 제품의 형상으로부터 블랭크에 이르는 역순의 해석을 진행하며 한 단계만으로 직접 변형된다고 가정하여 중간과정을 무시하기 때문에 정확한 예측을 하

기는 어렵지만 성형해석 시간이 매우 짧은 장점이 있다. 또한 One-Step방법을 이용하여 역으로 제품의 초기단계, 즉 성형되기 이전의 초기블랭크의 형상을 예측할 수 있고 초기 블랭크를 결정하게 된다면 나중에 후가공(trimming)으로 드는 비용과 시간을 절약할 수 있으며, 재료의 유입이 원활하게 되어 편치의 하중이 적게 들고, 두께 분포가 균일한 양질의 제품을 얻을 수가 있다.[11~12]

즉, 실제 산업현장에서 성형해석을 통한 설계 및 공법방향을 정할 때, Incremental방법이나 One-step방법 중 어느 한가지의 선택만으로는 해석 시간과 정확도라는 두 가지 큰 목적을 달성하기는 쉽지 않다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 마그네슘 합금 판재에 대해서 성형해석을 진행하되 Incremental방법과 One-step방법, 이 두 가지 방법을 모두 사용했다. 그렇게 함으로써 실제 산업 현장에서는 정확도는 떨어지지만 One-step방법의 해석결과를 통해서 금형개발 초기 단계에서의 설계 및 공법방향을 제시해서 생산의 리드타임(lead time)을 줄이고, 차후에 정확도가 높은 Incremental방법의 해석결과를 통해서 try-out단계에서 금형수정 비용과 금형 수정 시간을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 아래 Table 2는 휴대전화 케이스에 대해서 One-step방법과 Incremental방법으로 성형 해석을 수행할 때, 해석에 걸리는 시간을 비교하여 나타낸 것이다.

Table 2. Example of cellular phone

	Cellular phone case	Comparison	Digital camera case	Comparison
One-step Analysis	42.8 sec	Approx. 58.9 times	91.7 sec	Approx. 62 times
Incremental Analysis	2520.6 sec (42 mins)		5683.7sec (1 h 34 mins)	

II. 성형 해석

2. 1 성형 해석 소프트웨어

단순한 박판 형태의 금속을 이용하여 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 프레스와 같은 소성기계를 비롯하여 다이(die), 펀치(punch), 그리고 블랭크홀더(blank holder)등의 장치가 필요하다. 박판성형가공 공정은 굽힘(bending), 인장성형(stretching), 딥드로잉(deep drawing), 전단(shearing), 또는 이들의 조합으로 이루어진다. 박판 성형 공정은 CAD에 의한 금형설계, CAM에 의한 금형가공, 트라이아웃(try-out), 금형의 검사에 이르기까지 computer system의 도움으로 금형생산의 효율화가 급속히 진행되고 있으며 또한, 최근에는 공작기계에서도 정밀도가 크게 향상되어 기계가공 측면에서 금형의 완성도가 대폭 향상되고 있다. 이렇게 현대 산업의 급속한 발전과 대량 생산화에도 불구하고, 현재까지도 금형 제작 산업현장에서는 제품도가 완성된 이후 펀치 프로파일과 다이 페이스를 얻기 위해 경험에 의한 데이터베이스를 이용하거나, 금형의 수정에 있어서 숙련된 엔지니어의 knowhow에 근거한 try and error방법에 의존하고 있는 경우가 많으며, 이는 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 체계적인 해석 방법을 도입하여 공정변수들의 영향을 명확히 규명함으로써 시행착오를 줄이고 보다 정확한 공정 설계를 하는 것이 필요하다.[13~14]

1970년대 이후 다양한 수치적 방법(numerical method)에 의한 금속성형공정의 해석이 시도되었는데 이들 중 유한요소법(Finite Element Method)이 다른 방법에 비해 효과적인 해석이 가능하며 다양하고 자세한 정보를 제공하고 있어 이에 대한 많은 연구가 진행된 결과 현재 세계적으로 LS-DYNA3D, PAM-STAMP, ABAQUS/Explicit, RADIOSS등과 같은 다양한 상용 프로그램이 개발되어 사용되고 있다. 유한요소법을 이용한 금속성형해석에는 다양한 방법이 사용되며 여기에는 해의 정밀도와 수렴성, 계산 시간면에서 서로 상반되는 관계를 지니고 있다.[15]

금속성형해석에는 크게 정적-내연적(static implicit) 방법과 동적-외연적(dynamic explicit) 방법이 있는데 정적-내연적 방법은 해의 정밀도가 높으나 비선형 문제일수록 수렴하지 못하는 경우가 있으며 많은 계산 시간이 소요된다. 반면 동적-외연적 방법은 항상 해를 이끌어 낼 수 있으나 내연적 방법에 비해 해의 정밀도가 떨어진다.[16]

일반적으로 박판성형공정은 준정적(quasi-static)과정으로써 공구나 재료의 관성효과는 무시할 수 있는데, 이를 시뮬레이션 하기 위해서 세 종류의 해석방법, 즉 위에서 언급한 정적-내연적(static implicit, SI), 동적-외연적(dynamic explicit, DE), 그리고 정적-외연적(static explicit, SE) 방법 등이 쓰이고 있는데, 본 연구에서는 준정적 조건에 가장 가까운 정적-내연적 방법의 상용 소프트웨어인 Auto-Form을 사용하였다. 내연적(implicit) 소프트웨어로써 스위스의 Kubit 교수가 개발한 Auto-Form 상용 소프트웨어는 유럽의 일부 자동차 회사에서 쓰이고 있는데, 내연적 방법임에도 불구하고 수렴성 문제가 극복되었고, 굽힘을 고려하는 박막요소와 정확한 해석을 위한 쉘요소, 적응자동요소생성(adaptive automatic mesh generation)기술을 첨가하여 상당히 정확히 단시간 내에 성형해석을 할 수 있는 장점을 가지고 있다.[17] Fig. 1은 Auto-Form의 Incremental방법에서 모델링 된 금형형상의 예를 나타내고 있는데, 위에서부터 다이, 바인더, 펀치의 형상이다.

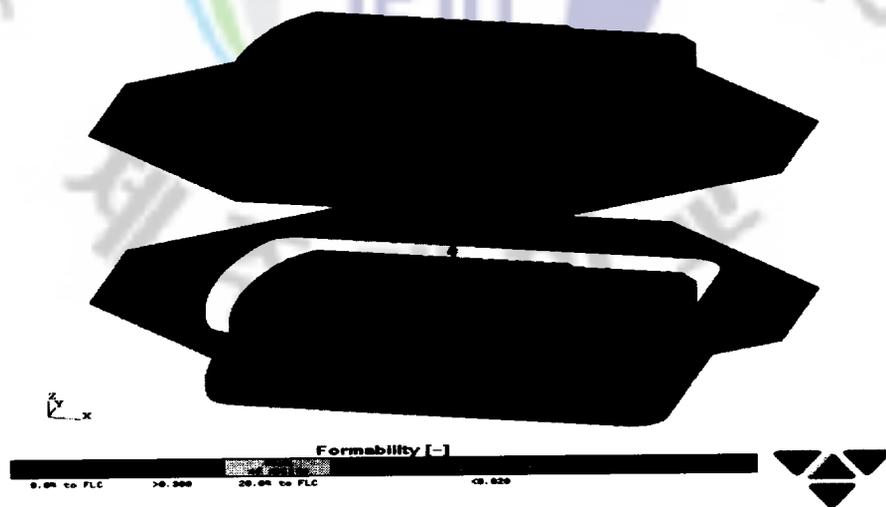


Fig. 1 Example of sheet metal forming process (Incremental method)

2. 2 성형해석 재료

소성변형은 슬립(slip)이라는 전위에 따른 일련의 과정으로 생각 할 수 있다. 즉 인접한 두 원자면의 전단 변위를 말하는 것인데, 응력을 받는 물질의 많은 영구 변형 즉 소성변형은 그 물질을 구성하고 있는 개개 결정들 안에서 슬립이 일어난 것이다. 금속에서 소성 변형의 일반적인 방법은 소위 슬립면 이라고 하는 특정한 결정면을 따라서 양쪽 결정이 서로 미끄러지게 하는 것인데, 응력이 임계치를 초과하게 되면 슬립이 일어난다. 요약하자면, 슬립은 전단응력이 가해져 한계치를 초과하게 되면서 슬립면을 따라 일어나는 원자 변위를 말한다.[18]

전위이동에 관련된 결정학적 면과 방향족의 조합을 슬립계(slip system)라고 한다. 조밀 육방격자구조(close packed hexagonal lattice structure; hcp) 금속에서 높은 원자 밀도를 갖는 유일한 면인 저면 (0001)상에서 $\langle 1120 \rangle$ 방향이 원자 밀도가 높은 방향이며, 예를 들어 Zn, Cd, Mg, Co에 있어서 슬립은 (0001)면 상에서 $\langle 1120 \rangle$ 방향으로 일어난다. 조밀육방격자구조는 단위격자 당 한 개의 저면과 3개의 $\langle 1120 \rangle$ 방향을 가지므로 3개의 슬립계가 존재한다. 이와 같이 슬립계가 적기 때문에 조밀 육방격자구조의 결정은 방위 의존성이 심하고 낮은 인성을 나타낸다.[18]

면심입방격자구조(face-centered cubic lattice structure; fcc)에서는 슬립면이 {111}, 슬립 방향은 $\langle 110 \rangle$ 방향이다. 면심입방격자구조는 단위격자 당 총 8개의 {111}면이 있으나, 마주보는 면은 서로 평행하므로 팔면체면은 4개이다. 각 {111}면은 3개의 $\langle 110 \rangle$ 방향을 포함하고 있다(역방향은 무시함). 그렇기 때문에, 면심입방격자구조는 12개의 슬립계를 갖는다.[18]

체심입방격자구조(body-centered cubic lattice structure; bcc)는 면심입방격자구조나 조밀육방격자구조처럼 조밀 구조가 아니다. 그렇기 때문에, 면심입방격자구조의 (111)면과 조밀육방격자구조의(0001)면과 같이 원자 밀도가 현저하게 큰 면이 없다. 체심입방격자구조의 금속에서 슬립은 {110},{112},{123}면에서 일어나지만, 슬립 방향은 항상 [111]방향이다. 그래서 가능한 총 슬립계는 48개나 되나,

슬립면이 면심입방격자구조와 같이 조밀하지 않으므로, 슬립을 일으키기 위해서는 보다 큰 전단 응력이 가해져야 한다.[18]

어떤 금속은 온도가 증가하면 상온의 슬립계 이외의 슬립계에서 슬립이 일어난다. 예를 들면, Al은 고온에서 {110}면에서 슬립이 일어나며, Mg은 225°C 이상에서 {1011}의 피라미드면에서 슬립이 주로 일어난다. 슬립면은 고온에서 변화하더라도 슬립방향은 변하지 않고 항상 일정하다.[18]

요약 하자면, 마그네슘의 결정구조는 조밀육방격자구조로 체심입방격자구조나 면심입방격자구조를 갖는 금속재료에 비해서 slip system이 적기 때문에 일반적으로 상온에서의 소성가공성은 매우 나쁘다. 하지만 온도가 증가하면 마그네슘의 slip system이 활성화되어 큰 소성변형을 나타내기 때문에, slip system이 활성화 되는 250~300°C 근방의 온도에서 가공하는 온간가공법이 일반적이다. 하지만 본 연구에서 사용된 성형해석 소프트웨어인 Auto-Form은 상온에서의 성형해석은 가능하지만 온간가공에 대한 성형해석을 지원하지 않기 때문에 기존의 연구 결과를 토대로 성형성이 가장 좋은 것으로 알려진 250°C에서의 마그네슘 합금의 재료 물성치를 얻어서 성형해석을 진행하였다.

재료는 마그네슘 합금 중에서 AZ31을 사용 하였다. 마그네슘합금에 첨가하는 여러 가지 원소 중에서 대표적으로 사용되고 있는 Al, Zn은 미량(약 3% 내외)첨가로도 강도 및 연성이 극대치를 보이는 전형적인 첨가원소이다. 알루미늄 첨가량이 9%인 합금은 강도가 우수하여 주조용으로 사용되고, 3%인 합금은 연성이 우수하여 전신용으로 사용되며, 6%인 합금은 그 중간적인 특성이 요구되는 용도로 사용되고 있는 것은 잘 알려져 있다. 특히 3%합금만이 압연 후 판재형상으로 가공되어 사용하고 있는 것은 이 합금조성 계에서만 응력 부식균열이 발생하지 않기 때문이다.[19]

III. 성형해석 결과 및 고찰(Cellular phone case)

앞에서 언급했듯이 One-step방법이나 Incremental방법 하나만으로는 해석 시간과 정확도를 동시에 만족시킬 수 없다. 그렇기 때문에 두 가지 방법을 병행하여 수행해야 하는데 우선 One-step방법의 해석을 선행해서 공정의 초기 단계에서 설계변수와 공법 방향을 제시해야 하며 금형의 수정과 try-out 단계에서는 시간과 비용을 줄이기 위해서 Incremental방법에 의한 정확한 성형해석 결과를 적용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 One-step법과 Incremental법에 의한 사전성형해석을 수행하고 성형성과 두께 변화율, 성형한계도 등의 분석을 통해서 실제 산업 현장에 유용한 정보를 제공함은 물론, One-step방법과 Incremental방법을 상호 비교해서 One-step방법의 해석결과 중에서 가장 정확도가 높은 해석결과를 찾고자 한다.

본 연구에서는 휴대전화 케이스와 디지털 카메라 케이스의 두 가지 형상에 대해서 성형해석을 하였으며 휴대전화 케이스는 phone으로, 디지털 카메라 케이스는 camera로 표시하였다. 재료는 마그네슘 합금 중 연성이 우수한 AZ31B를 사용하였으며 재료의 두께는 0.5mm, 마찰계수는 0.1로 하여 성형해석을 하였다.

Auto-Form은 상온에서의 성형과정을 해석하며 온간가공 상태의 성형해석이 불가능하기 때문에 성형성이 가장 좋다고 판단되는 250°C 온간상태에서의 재료 물성치를 사용하여 성형해석을 진행하였다. Table 3은 슬립계가 활성화되기 시작하는 200°C와 큰 소성변형이 나타나는 250°C, 그리고 300°C에서의 재료 물성치이며, Fig. 2는 성형해석에 사용된 250°C에서의 마그네슘 합금(AZ31B)의 재료 물성치를 material generator에 입력하고 있는 화면이다.

Table 3. Material properties

°C	Modulus of elasticity E(GPa)	Poisson's ratio ν	Work-hardening exponent n	Strength coefficient K(MPa)	Anisotropy coefficient		
					R(0)	R(45)	R(90)
200	22.7	0.35	0.168	232	1.469	2.134	1.224
250	20.9	0.34	0.131	150	1.053	1.732	1.682
300	14.9	0.34	0.098	111	0.898	1.171	0.891

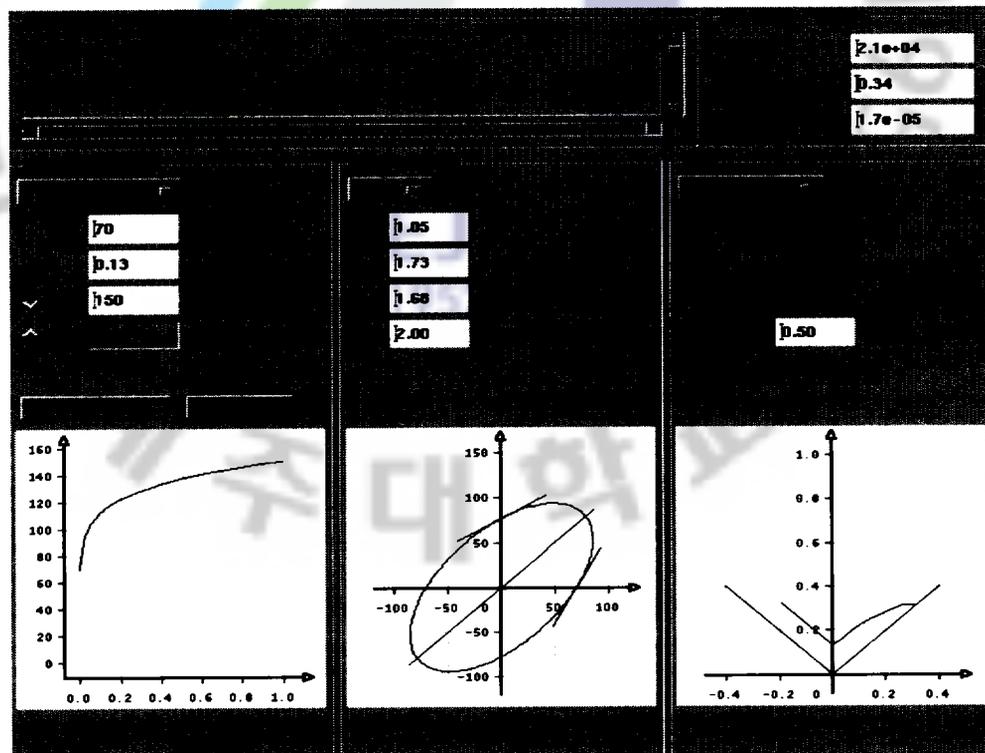


Fig. 2 Input of material properties (250° C)

3-1. 휴대전화 케이스의 성형해석 결과(One-step method)

실제 프레스 성형공정에서는 크게 다이, 바인더, 펀치의 장치에 의해서 성형이 진행된다. 하지만 One-Step방법은 바인더 혹은 블랭크 홀더의 개념이 없기 때문에 이와 상응하는 값(r)이 주어지는데 구속조건이 바인더 압력 대신에 사용이 된다. 구속을 주지 않은 free상태, 완전한 구속이 주어진 locked상태, 완전한 구속 상태를 1로 보고, 구속 상태 30%일 때의 $r0.3$, 45%일 때의 $r0.45$, 60%일 때의 $r0.6$, 75%일 때의 $r0.75$ 가 사용되었으며 One-step방법의 해석을 통해서 성형성 분석, 성형한계도 분석, 초기 블랭크 형상에 대해서 분석을 하였다.

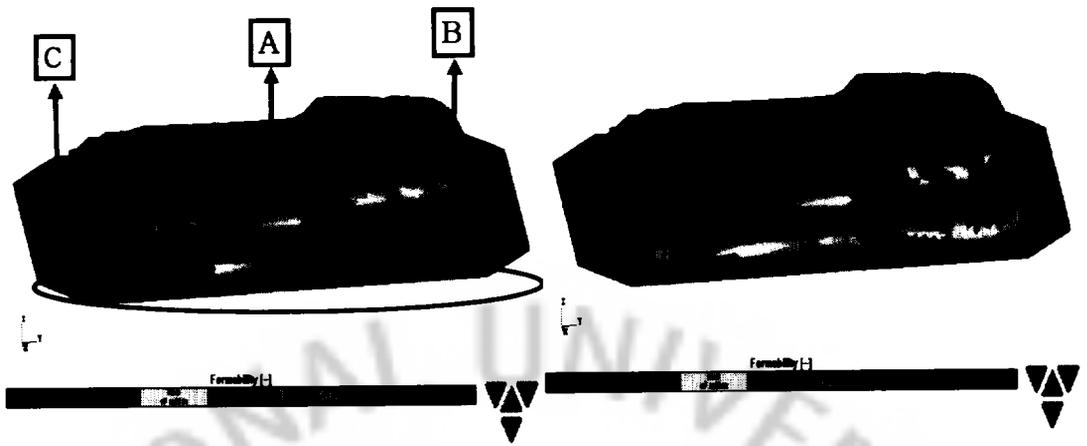
One-step방법의 성형성 분포와 성형한계도 분포의 결과에서 해석된 형상이나 다이어그램의 하단에 위치한 성형성 분포 표를 Table 4에 나타내었다.

Table 4. Formability distribution table

Spits	Risk of splits	Original Thickness
-------	----------------	--------------------

3-1-1. Formability 분석

formability분포는 왼쪽의 터짐에서부터 오른쪽의 주름까지의 구간을 색깔로 구분지어 놓음으로써 해석 형상의 성형성을 가시적으로 쉽게 확인할 수 있게 해주며 성형성을 보는 대표적인 방법이다.



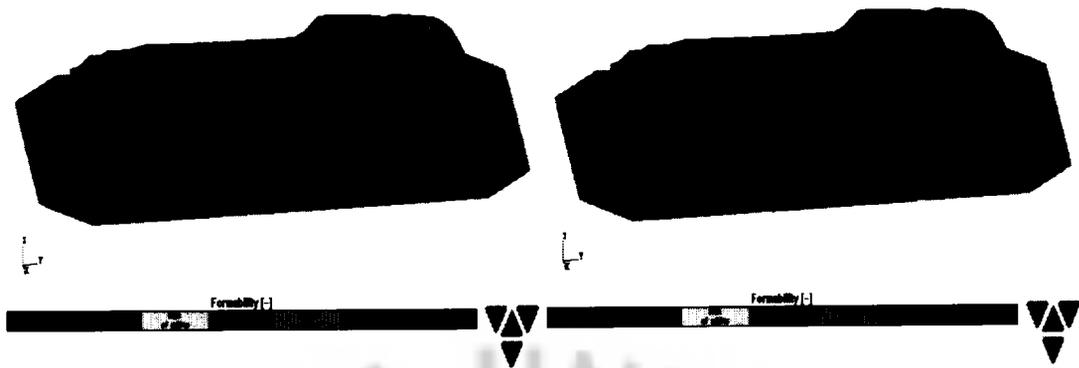
(a) Restraint conditions = free

(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45

(d) Restraint conditions = r0.6

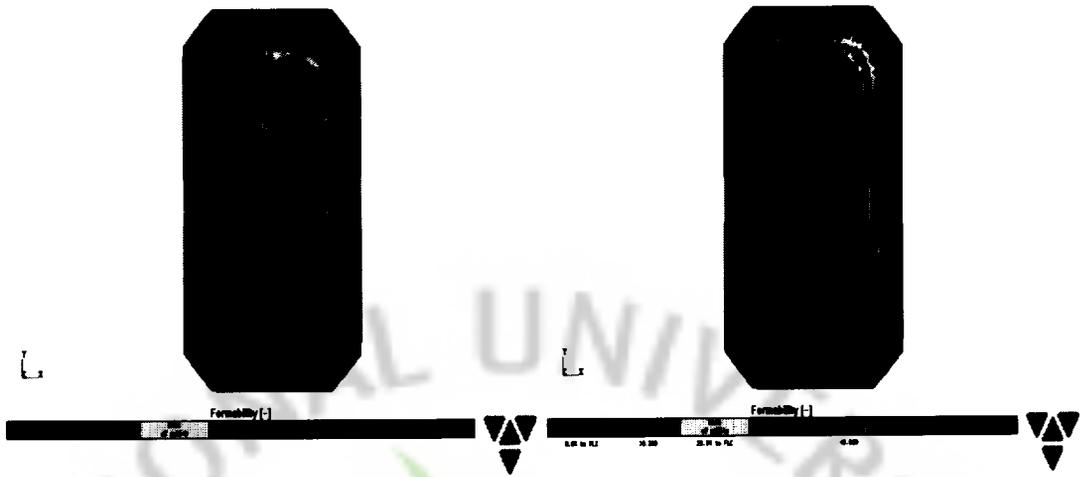


(e) Restraint conditions = r0.75

(f) Restraint conditions = locked

Fig. 3 Formability distribution (view-1)

Fig. 3의 (a)에서 보면 휴대전화 케이스의 형상을 세 부분으로 구분하였는데, 형상의 윗부분을 A, 스트레칭이 가장 크게 일어나는 형상의 측벽을 B, 형상의 가장자리의 플랜지 부분을 C로 구분하였다. Fig. 3에서 restraint conditions가 free일 때, 구속조건 없이 소재가 충분히 유입되고 있기 때문에 전체적으로 터짐은 전혀 보이지 않고 있으며 C부분에서는 주름의 발생이 예상된다. restraint conditions값이 증가할수록 B부분에서 터짐의 발생이 심화되면서 그 영역을 플랜지 부분까지 넓혀가고 있다. 반대로 restraint conditions값이 증가할수록 소재의 유입이 자유롭지 못하기 때문에 free일 때 발생했던 C부분에 주름의 발생이 감소되어 locked일 때는 완전히 보이지 않는다. 그리고 A부분은 restraint conditions값이 증가할수록 녹색으로 보이는 safe의 범위가 증가하여 성형성이 좋아지고 있음을 알 수 있다.



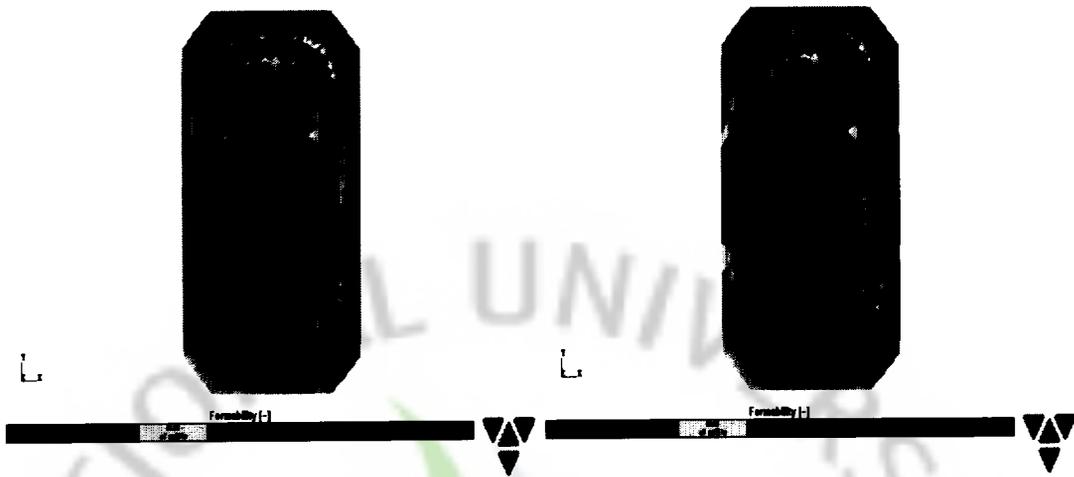
(a) Restraint conditions = free

(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45

(d) Restraint conditions = r0.6



(e) Restraint conditions = r0.75

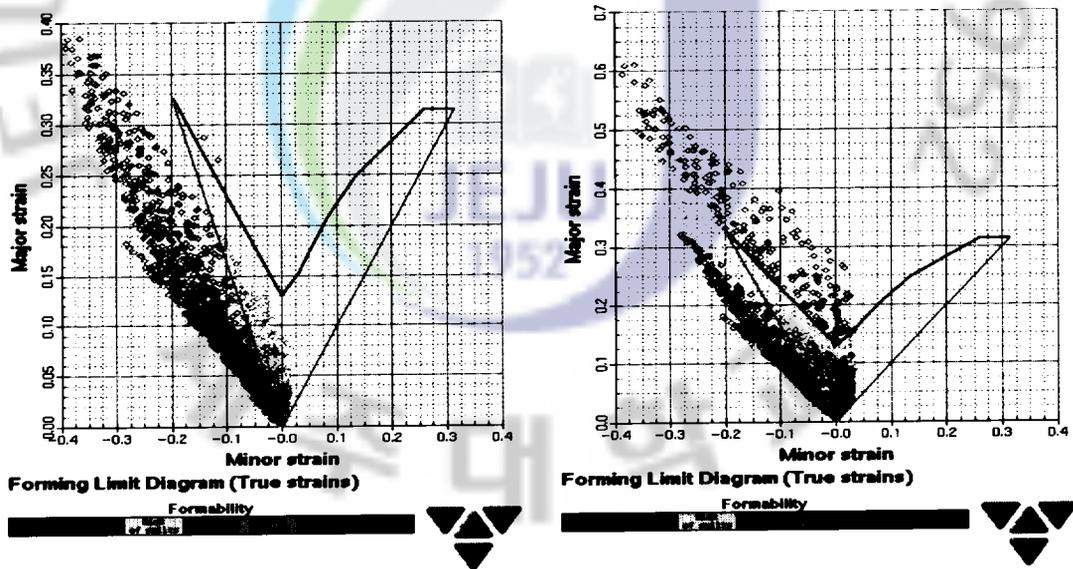
(f) Restraint conditions = locked

Fig. 4 Formability distribution (view-2)

Fig. 4는 Fig. 3에서 살펴본 것과 같은 성형성 분포의 결과를 다른 방향에서 살펴본 것이다. 마찬가지로 restraint conditions 값이 증가할수록 B부분을 중심으로 터짐의 발생이 심화되고 있으며 C부분에서의 주름의 감소, A부분에서 성형성이 좋아지고 있음을 관찰할 수 있다. 현재는 restraint conditions가 r0.3에서 r0.6이 가장 성형성이 좋다고 할 수 있지만 그 정확도 면에서 Incremental방법의 결과와 비교해 보면 더 신뢰성 있는 결론을 도출할 수 있다.

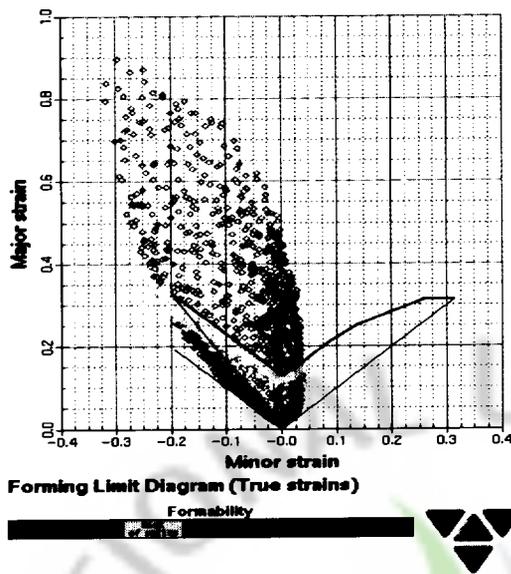
3-1-2. Forming limit diagram 분석

성형 한계도(forming limit diagram)란 판재의 주 및 부 변형률의 비를 변화시키면서 파단이 일어나는 한계 주 및 부 변형률을 측정하여 주 및 부 변형률을 평면상에 나타낸 것으로 성형한계 곡선의 상단부에 있으면 파단이 일어나고 그 하단부에 있으면 안전하다는 것을 의미한다. 성형 한계도는 새로운 박판 금속 성형 공정의 개발에 있어서 성형난이도의 평가도구로 널리 이용되고 있다. 즉, 주어진 재료에 대하여 설계 및 제작된 금형에서 try-out을 통하여 측정한 각 부분의 주 및 부 변형률을 성형 한계도 상에 표시하여 그것과 비교함으로써 성형의 가능성과 성형 난이성을 평가 할 수 있다. 즉, 성형 한계에 가까울수록 성형이 어렵다는 의미가 된다. 파단의 위험이 클 경우에는 금형 설계 및 작업 조건을 개선하고 그것으로도 해결이 불가능 할 때는 성형 단계를 나누어야 한다. 반면에 실제 성형 공정이 성형 한계보다 매우 낮은 경우에는 성형 단계를 줄이고 보다 낮은 등급의 재료를 사용하는 것이 바람직 할 것이다.[20]

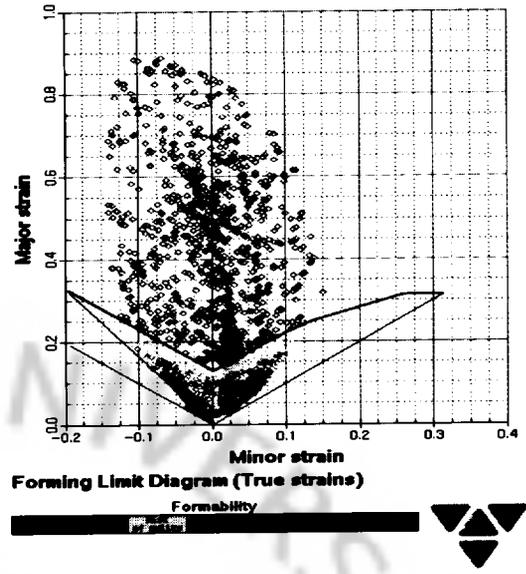


(a) Restraint conditions = free

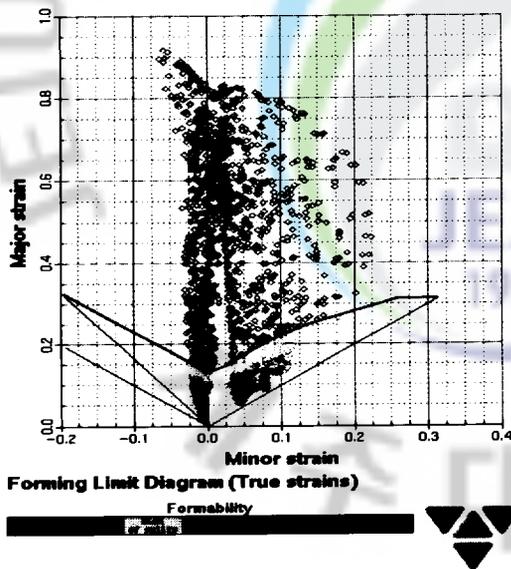
(b) Restraint conditions = r0.3



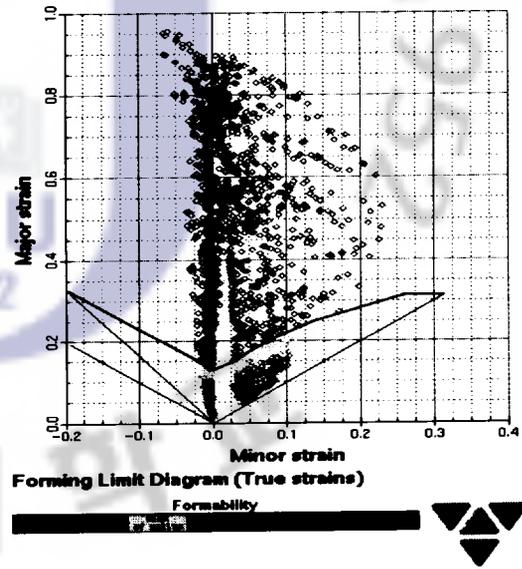
(c) Restraint conditions = $r=0.45$



(d) Restraint conditions = $r=0.6$



(e) Restraint conditions = $r=0.75$



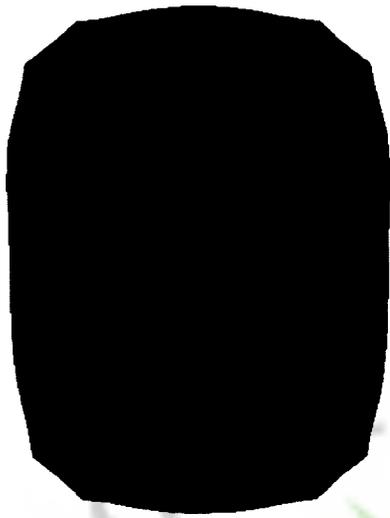
(f) Restraint conditions = locked

Fig. 5 Forming limit diagram

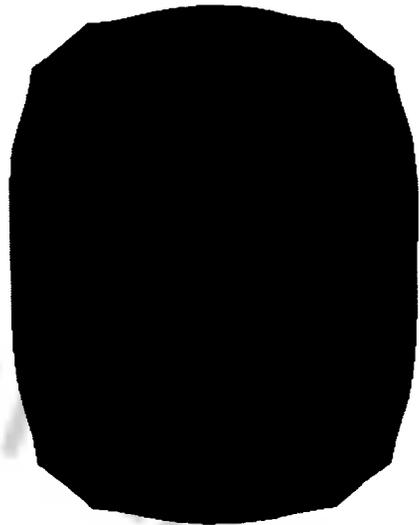
Fig. 5에서 보면 restraint conditions가 free일 때의 변형률이 성형한계 곡선의 하단부에 주로 위치하며 성형한계 곡선의 상단부에 위치한 터짐, 또는 터짐의 가능성이 좁은 범위에 분포하며 그 빈도도 조밀하지 못하다. restraint conditions값이 증가 할수록 보라색과 파란색으로 보이는 주름의 범위는 급격히 줄어들고, 점점 붉은색으로 보이는 터짐의 영역이 늘어나며 그 빈도 역시 조밀해 지고 있다. 다만 여기서 특이한 점은 restraint conditions값이 증가 할수록 붉은색으로 보이는 터짐의 범위는 줄어드는 대신에 그 조밀함이 심화되고 있다. 그 이유는 restraint conditions값이 증가 할수록 소재의 유입이 원활하지 않고 따라서 각 부분의 주 및 부 변형률의 비가 일정한 수치에 가까워지고 있기 때문으로 생각된다. 성형 한계도 분포는 앞에서 살펴본 성형성 분포와 인과 관계에 있으며 그 정확도 면에서도 마찬가지로 Incremental방법의 해석결과와 비교함으로써 가장 타당성 있는 restraint conditions가 선택될 수 있다.

3-1-3. Blank form 분석

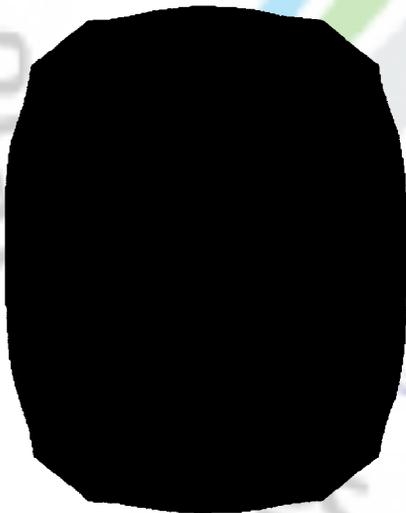
Auto-Form의 One-step해석은 리버스(reverse)법에 의한 고속해석이 가능하다. 그 원리로는 최종적인 제품 형상에 대해 작성한 메시지를 평면으로 전개하고 그때의 결과를 최종 형상으로 역 매핑하여 해석 결과를 도출한다. 그렇기 때문에 가공 전 최적의 초기 블랭크 형상을 예측할 수 있는데 Fig. 6은 각 restraint conditions에 따른 초기 블랭크 형상을 보여주고 있다.



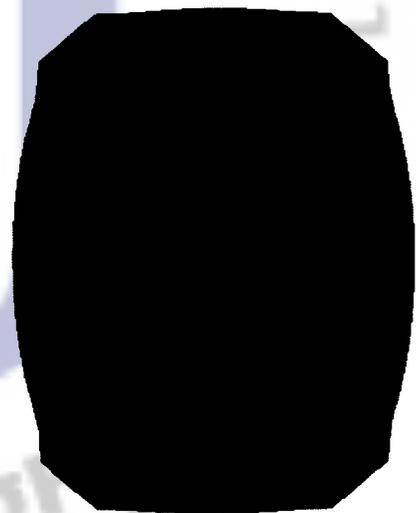
(a) Restraint conditions = free



(b) Restraint conditions = r0.3



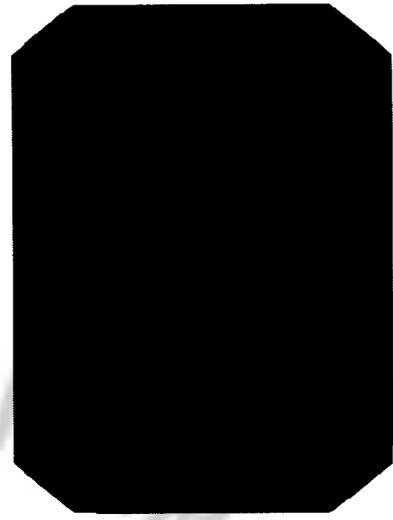
(c) Restraint conditions = r0.45



(d) Restraint conditions = r0.6



(e) Restraint conditions = r0.75



(f) Restraint conditions = locked

Fig. 6 Optimum blank form

Fig. 6에서 보면 restraint conditions값이 free일 때, 초기 블랭크 형상이 직선이 아닌 타원형에 가깝다. 하지만 restraint conditions값이 증가하면 블랭크의 전체 크기는 감소하면서 점차 제품의 형상과 비슷해지고 있는 경향이 있다. 다만 restraint conditions값이 locked가 되면 0.75값과 비교했을 때 블랭크의 형상은 그대로 유지되지만 그 크기가 다소 늘어나게 되는데, 소재의 유입이 완전히 자유롭지 못한 locked 상태는 터짐의 가능성이 높기 때문에 블랭크의 크기가 커졌다고 판단된다. 최적의 초기 블랭크 형상은 실제 제품의 양산 시 소재의 낭비를 최소로 줄여주고 그렇게 함으로써 생산비를 절감할 수 있는 방법을 산업현장에 제공하지만 최초의 압연된 판재를 최적 초기 블랭크 형상으로 2차 가공을 해야 하며 이는 생산 비용의 증가를 가져오는 단점도 있기 때문에 당장 산업 현장에 적용하기는 무리가 있으며 차후에 이 부분에 대한 심층적인 연구도 수행되어야 할 것이다.

3-2. 휴대전화 케이스의 성형해석 결과(Incremental method)

앞에서도 언급했듯이, Incremental방법은 성형해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있지만 성형해석 결과의 정확도는 One-step방법에 비해 아주 높다. Incremental 방법은 블랭크 시트의 균열, 주름 같은 형상 확인이나 판재의 두께가 증감된 모습을 시계열로 확인할 수 있다. 자체 중량의 휨, 홀드, 드로잉(drawing), 리스트 라이킹(restriking), 트리밍(trimming), 플랜징(flanging), 스프링 백(spring back) 등의 가공공정을 그대로 시뮬레이션 할 수 있다.

One-step방법의 해석 결과와는 다르게 Incremental방법의 해석결과는 금형의 상형이 상사점으로부터 하사점으로 이동함에 따른 해석의 결과를 시간의 순서에 따라 보여주고 있다. 아래의 해석결과에서 휴대전화 케이스는 전체 stroke가 50 mm 이다.

Table 5는 Incremental방법의 성형성 분석과 성형한계도 분석의 결과에서 해석된 형상이나 다이어그램의 하단에 위치한 성형성 분포 표를 나타낸 것이다.

Table 5. Formability distribution table

Spots		Complete Thickness
-------	--	--------------------

3-2-1. Formability 분석

Incremental방법에서 성형성 분포는 상형의 금형이 상사점에서 하사점으로 이동함에 따른 각 단계에서 형상의 성형성을 보여주고 있다. 전체 stroke 50mm에서 45mm와 드로잉 공정이 끝나고 금형에서 제품을 끄집어낸 후의 형상에 대해서 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다.

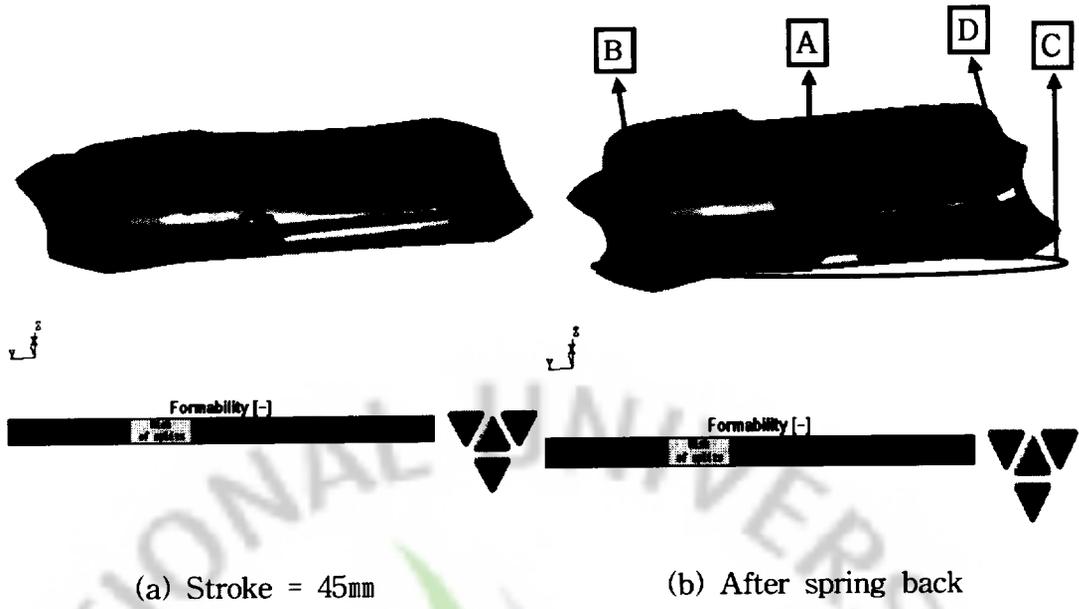


Fig. 7 Formability distribution (view-1)

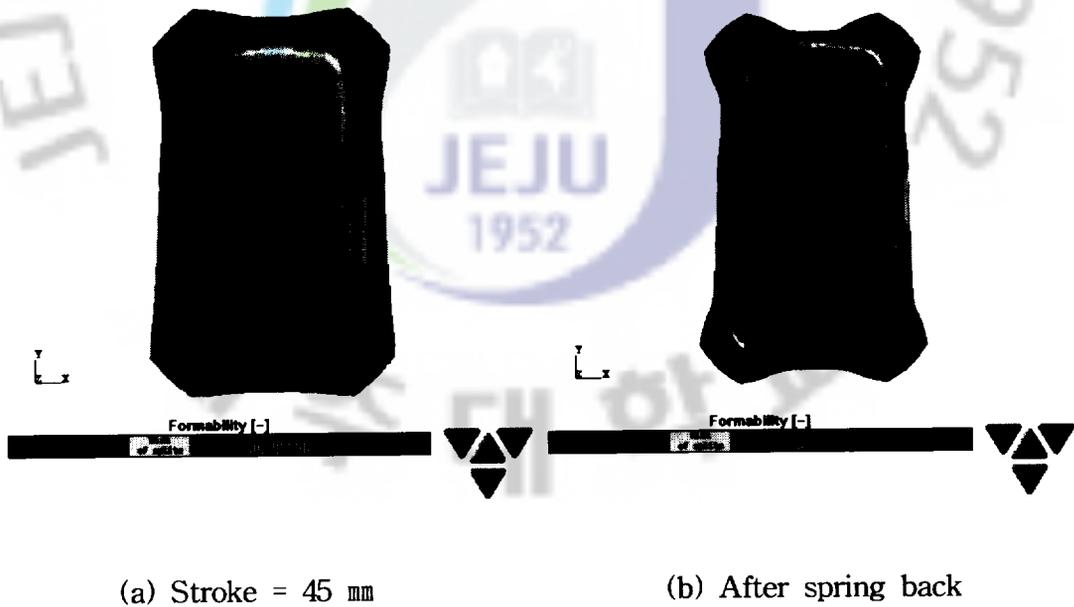


Fig. 8 Formability distribution (view-2)

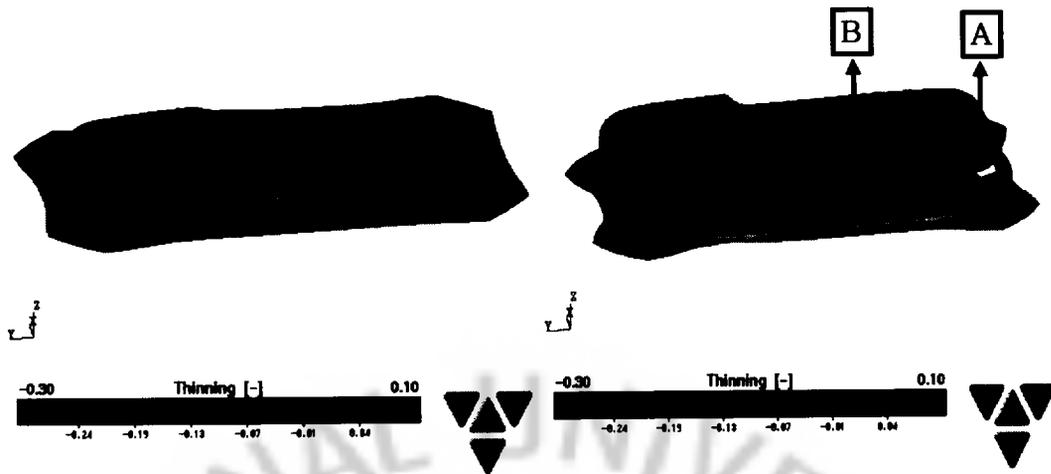
Fig. 7은 Incremental방법에 의한 성형성 분포를 Fig. 8은 Fig. 7과 같은 성형 해석의 결과를 다른 방향에서 살펴본 것인데, 형상의 윗부분을 A로, 스트레칭이 많이 일어나는 형상의 측벽을 B로, 형상의 가장자리의 플랜지 부분을 C로 구분하였다. Fig. 7에서 성형이 진행되는 동안의 제품의 형상, 드로잉 공정이 끝나고 금형에서 제품을 꺼낸 뒤에 형상인 spring back 후의 제품의 형상까지 살펴보면 (b)의 B부분에서는 넓은 범위는 아니지만 터짐의 가능성이 보이며 특히 D부분에는 과도한 터짐이 발생하여 구멍이 났다. 이럴 경우 소재의 유입을 증가시키기 위해서 윤활을 높이거나 다이 반지름 각을 크게 할 필요가 있다. 또한 C부분의 플랜지 부분에는 주름의 발생이 예상되고 있다. 다른 각도인 Fig. 8에서 보아도 모서리 부분에 터짐의 발생가능성과 실제 과도한 터짐, 그리고 플랜지 부분에 주름의 발생 가능성을 확인할 수 있다. 선행된 One-step방법에 의한 해석결과에서 restraint conditions가 r0.3에서 r0.6이 성형성이 가장 이상적이라고 판단하였는데 Incremental방법에 의한 해석결과, restraint conditions가 0.3일 때의 결과와 가장 비슷함을 알 수 있다.

3-2-2. Thickness variation rate 분석

두께 변화율 분포는 성형성을 살펴보는 하나의 방법으로써, 성형성 분포처럼 단순히 시각적으로 터짐과 주름, 안전이라는 영역으로 보는 것과는 다르게 두께가 변화하는 것을 수치와 색깔로 살펴볼 수 있다. 그렇기 때문에 성형성 분포보다 좀더 세부적인 정보들을 얻을 수 있다. Table 6은 두께 변화율 분석의 결과에서 해석된 형상의 하단에 위치한, 수치와 색깔로 나타낸 두께 변화율 표이다.

Table 6. Thickness lapse rate table

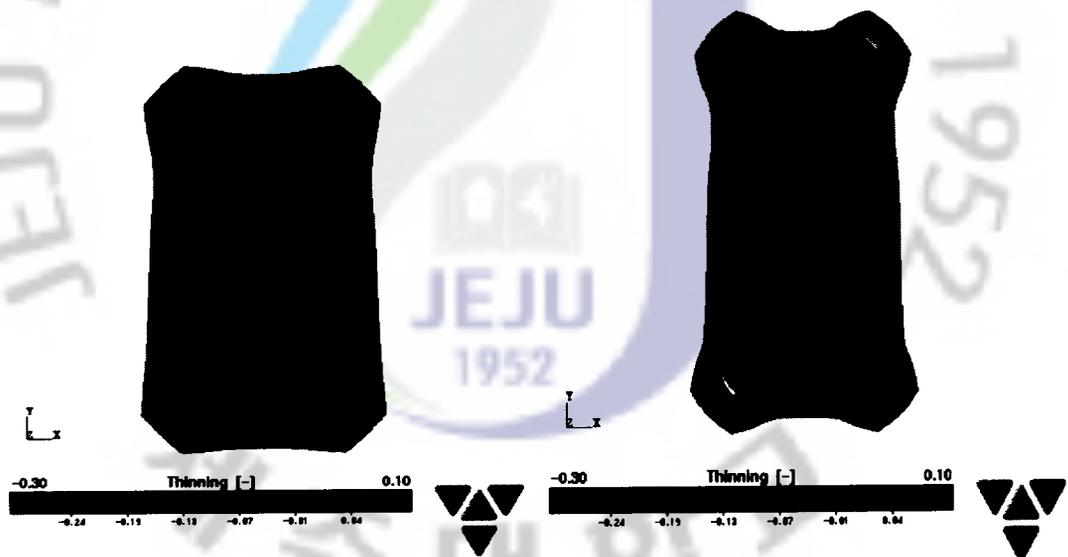




(a) Stroke = 45 mm

(b) After spring back

Fig. 9 Thickness lapse rate (view-1)



(c) Stroke = 45 mm

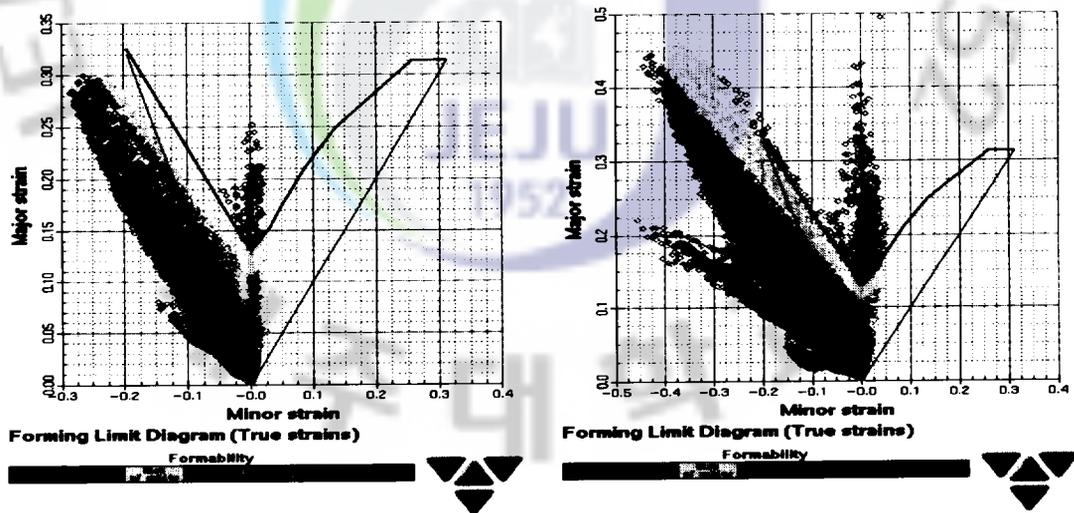
(d) After spring back

Fig. 10 Thickness variation rate (view-2)

두께 변화율은 앞에서 살펴본 formability 분포의 결과를 뒷받침 할 수 있으며 그렇기 때문에 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서보면 stroke가 증가 할수록 형상의 가장자리 플랜지 부분에서는 두께가 늘어나고 있기 때문에 주름의 가능성이 있다는 것을 알 수 있으며 형상의 모서리에 붉은색으로 보이는 부분은 두께가 얇아지고 있다, 특히 Fig. 9의 (b)에서 보면 A부분에서 과도한 터짐이 발생하여 구멍이 난 부분도 있음을 성형성 분포와 마찬가지로 알 수 있다.

좀더 세부적으로 보면 Fig. 9의 A부분은 두께감소가 블랭크 두께의 20%인 0.1 mm 넘어서 -0.13mm에서 -0.19mm에 분포해서 터짐이 발생한 점, 그리고 각 모서리 부분에 두께가 감소하고 있음이 수치와 색깔로써 잘 나타나 있다. 또한 Fig. 9의 (b)에서 보면 B부분에는 두께 변화율의 구간이 0.01-0.04에 존재하는 파란색이 지배적으로 보이기 때문에 두께의 변화가 거의 없으며 때문에 소재의 변형이 생기지 않아서 강성이 부족하다는 것을 예측할 수 있다. Fig. 10은 Fig. 9와 같은 해석의 결과를 다른 방향에서 보여주고 있다.

3-2-3. Forming limit diagram 분석



(a) Stroke = 45 mm

(b) After spring back

Fig. 11 Forming limit diagram

휴대전화 케이스의 성형해석의 forming limit diagram 분석에서는 One-step 방법과 Incremental 방법의 결과가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 다만 One-step 해석에서는 restraint conditions의 증가로 인해 터짐의 범위에 초점이 맞춰져 있기 때문에 터짐의 범위가 지배적으로 보이지만 Incremental 방법에 의한 성형해석 결과를 Fig. 11에서 보면 붉은색으로 보이는 터짐의 영역은 그 증가량이 미비하지만 분명히 성형한계 곡선 위에 존재하고 있으며 주름의 범위가 늘어나서 spring back 이후의 단계까지 증가함을 보이고 있다. One-step 방법과 Incremental 방법의 성형성 분포의 비교에서 One-step 방법의 restraint conditions가 r0.3일 때의 결과가 Incremental 방법의 결과와 가장 잘 일치한다고 판단하였는데, 마찬가지로 성형한계도 분포의 비교에서도 그 결과가 같음을 확인하였다. forming limit diagram 분석을 통해서 성형해석 형상의 성형성에서 터짐과 주름의 발생정도를 시각적으로 쉽게 확인할 수 있었다.

3-2-4. 성형력 분석

성형력 분석은 시간에 따른 성형력을 나타낸 것인데 휴대전화 케이스의 경우에는 전체 stroke가 50mm이고 Fig. 12에서 보면 가로축은 process time을 세로축은 forming force이다.

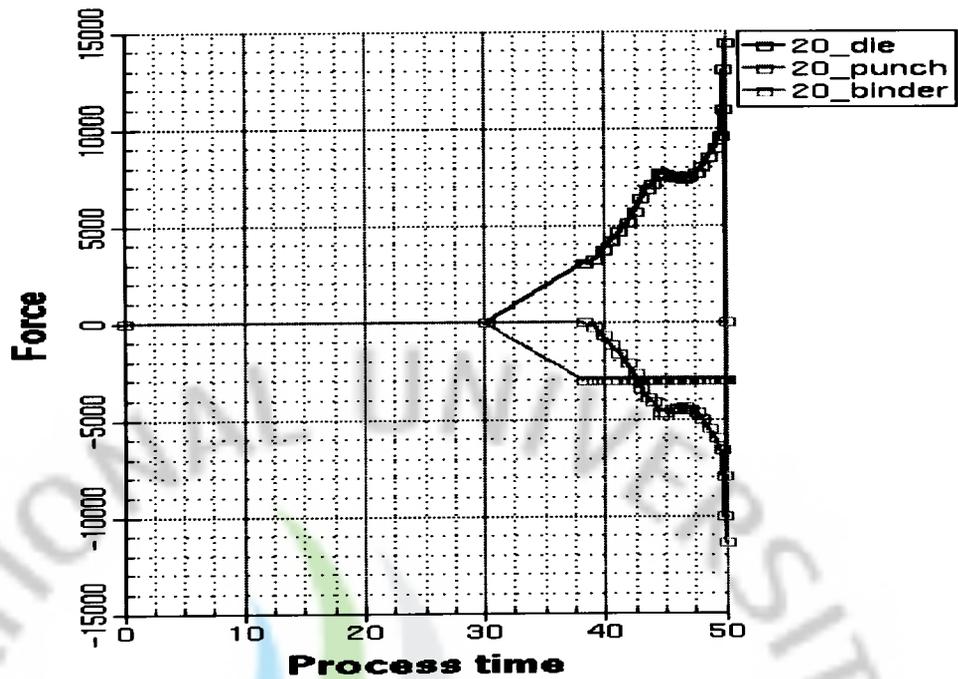
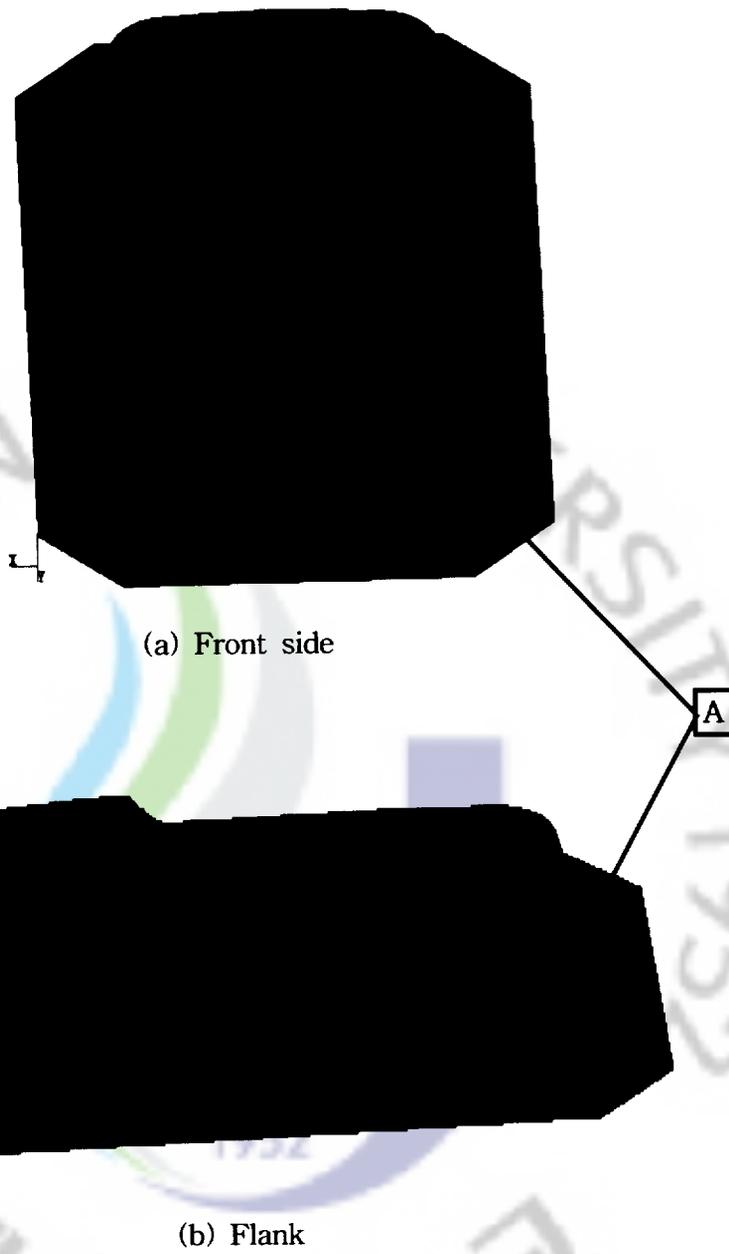


Fig. 12 Forming force

Fig. 12에서 알 수 있듯이 실제 산업 현장에서 본 연구를 적용하기 위해서는 최소 15 TON의 프레스 용량이 필요함을 알 수 있으며 그 외에도 펀치와 바인더가 받은 각 stroke에 대한 하중에 대해서도 알 수가 있다.

3-2-5. Skid line 분석

skid line이란 성형이 끝난 제품에 생길 수 있는 긁힘을 말하는 것인데 skid line 분석은 박판 금속 성형에서 아주 중요한 부분을 차지한다. 왜냐하면 박판 금속 성형법의 많은 장점들 가운데 하나로 성형이 끝나면 2차 가공이 필요 없이 거의 완제품에 가까운 형태가 된다는 것을 꼽을 수 있는데, 성형이 끝난 뒤에 skid line이 생기면 2차 가공이 요구되며 이는 생산비의 증가와 연결되기 때문이다. Fig. 13은 휴대전화 케이스를 가공할 때 생길 수 있는 skid line의 분포를 나타내고 있다.



(a) Front side

(b) Flank

Fig. 13 Skid line

Fig. 13에서 (a)의 정면과 (b)의 측면에 A로 표시한 제품의 측벽을 보게 되면 skid line이 발생하고 있다. 그렇기 때문에 실제 산업 현장에서는 펀치의 반지름의 각을 키우거나 블랭크를 다이에 투입하기 전에 윤활유를 고르게 도포할 수 있는 윤활장치가 필요하다.

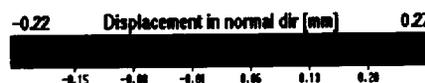
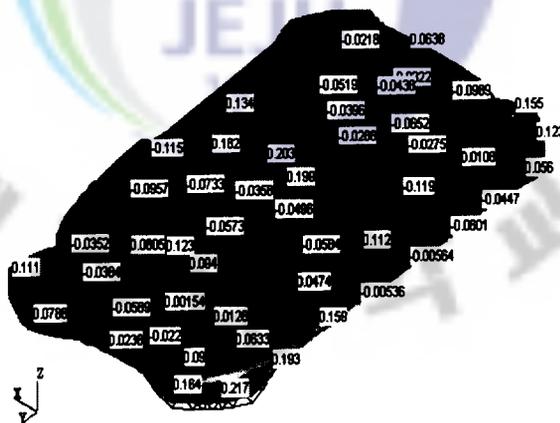
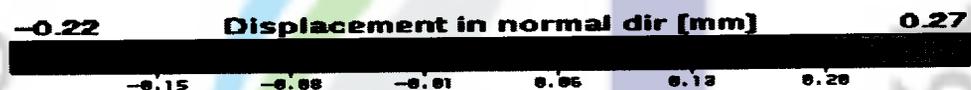
3-2-6. Spring back 분석

spring back이란 소재가 강제적으로 변형을 겪은 후에 하중이 제거 되면서 소재 내의 응력이 정적 평형 상태를 유지하기 위해서 탄성적으로 재편되면서 발생하는 현상을 말한다. 드로잉 된 벽면 부와 곡면이 큰 부분에서 주로 발생하며, 전형적으로는 바깥 젓힘 형태(back)로 발생하지만 조건에 따라서 안쪽 젓힘(go)도 발생한다.

Fig. 14는 spring back을 수치와 색깔로 나타내고 있으며 Fig. 15는 제품의 단면을 구간별로 나누어서 spring back의 형상을 나타내고 있는데 그 양이 육안으로 구분하기는 어렵기 때문에 5배 확대해서 보여주고 있다.

Table 7은 spring back 분석의 결과에서 해석된 형상의 하단에 위치한, spring back의 양을 수치와 색깔로 나타낸 표이다.

Table 7. Spring back distribution table



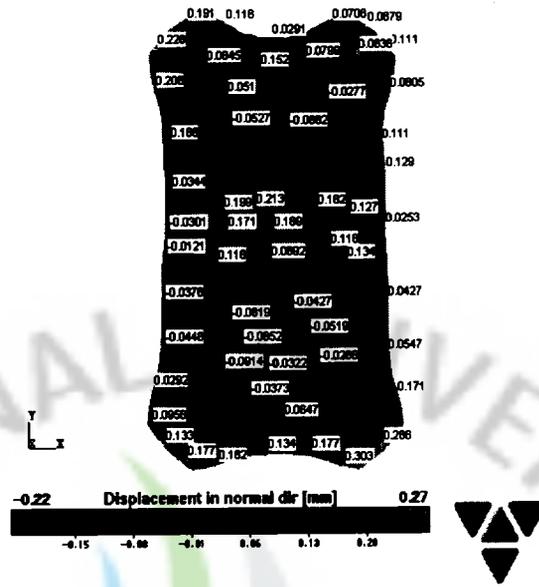


Fig. 14 Form comparison after spring back

실제 산업 현장에서 허용하는 spring back이나 휨에 대한 치수 정밀도가 ± 0.5 mm인 점을 감안했을 때, Fig. 14에서 보면 대부분의 치수가 ± 0.2 mm로 spring back의 발생이 미비함을 알 수 있다.

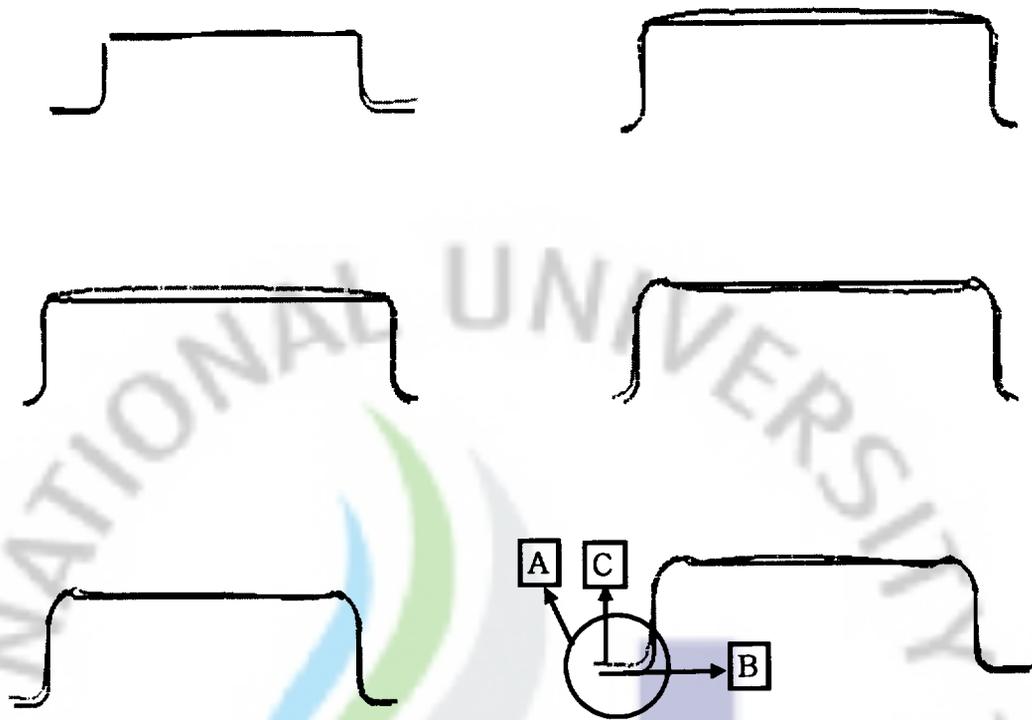
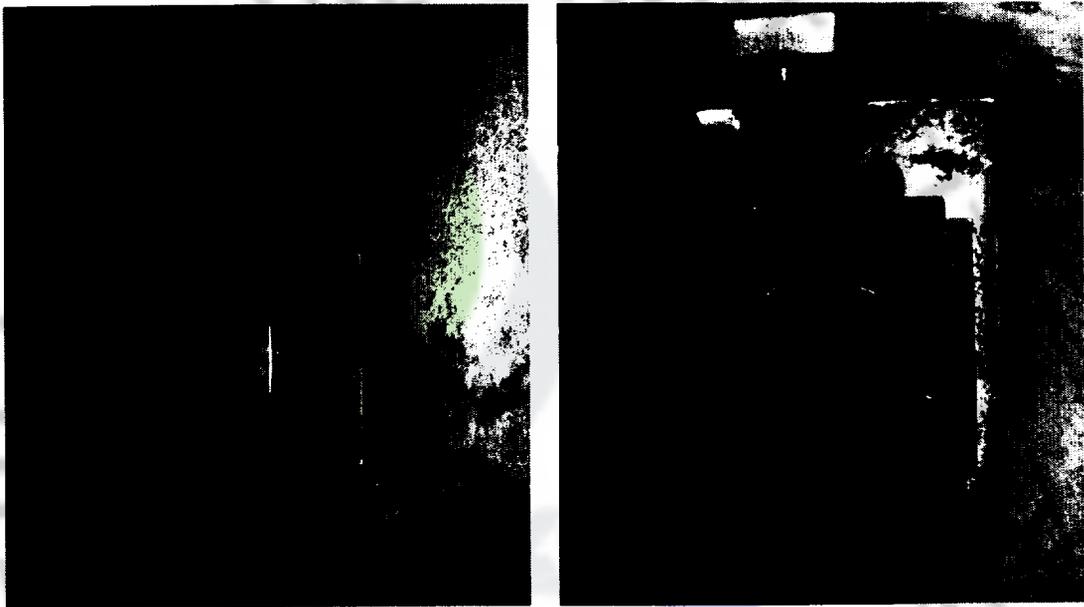


Fig. 15 Section comparison after spring back

Fig. 15의 spring back 단면 비교를 보면, 예를 들어 A로 표시한 부분에서 붉은색 선으로 보이는 B가 의도한 제품의 형상이며 C와 같이 노란색이나 파란색 선이 성형 후에 변형된 형상이다. 성형전과 후의 형상이 크게 다르지 않지만 성형 분석과 두께 변화율 분포에서 보았듯이 형상의 가장자리 플랜지 부분에서 주름 발생과 더불어 spring back이 발생할 것으로 예상된다. 앞에서 언급했듯이 단면에서 spring back의 발생이 육안으로 구분하기에는 어렵기 때문에 5배 확대해서 보여주고 있다.

3-3 시제품 제작

성형해석을 마치고 성형성과 skid line, 성형력, spring back 분석 등의 설계와 공법에 적용할 수 있는 유용한 정보를 토대로 시제품을 제작하여 성형 해석 결과의 타당성을 검증하였다.



(a) Die part

(b) Punch part

Fig. 16 Mold shape

Fig. 16은 시제품 제작을 위한 금형의 형상인데 (a)는 상형의 금형인 다이이며, (b)는 하형 금형인 펀치인데, 휴대전화 케이스는 비교적 간단한 형상의 금형이기 때문에 한 단계의 공정으로 진행된다. 중간가공 위해서 마그네슘 박판을 엔지니어가 직접 로에서 가열하였으며, 윤활유도 직접 도포한 뒤에 성형공정을 진행하였다.

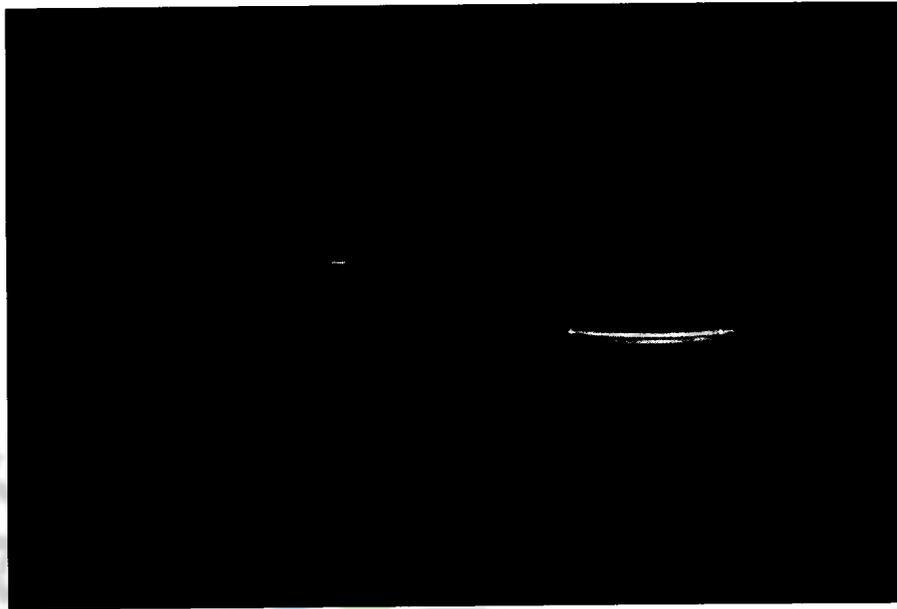


Fig. 17 Trial product

Fig. 17은 성형된 휴대전화 케이스의 형상인데 육안으로 보아도 제품의 터짐이나 주름의 형상불량은 발견되지 않았다. 마그네슘 박판으로 휴대전화 케이스를 개발해 봄으로써 마그네슘 합금 판재에 대한 성형성과 공법을 확보하고 시제품을 제작해 봄으로써 그 타당성을 검증할 수 있었다. 이러한 경험을 바탕으로 상대적으로 복잡하기 때문에 성형의 어려움이 예상되는 디지털 카메라 케이스에 대한 성형해석과 시제품제작을 수행하고자 한다.

IV. 성형해석 결과 및 고찰(Digital camera case)

실제 산업현장에서 제품을 개발하기 위해서는 개발할 제품의 소재나 형상에 대해서 그 이전에 데이터를 참고하게 되는데 마그네슘 합금과 같이 상온근방의 소성가공성의 문제로 인해서 공개된 방법이나 경험이 부족한 경우에는 과거에 수행했던 방법을 참고할 수 없는 문제가 발생한다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 마그네슘 합금으로 디지털 카메라 케이스의 성형성 분석과 시제품 제작에 앞서 상대적으로 간단한 형상의 휴대전화 케이스에 대해서 성형해석과 시제품 제작을 수행함으로써 성형성에 대한 사전 지식과 경험을 쌓을 수 있었다. 그러한 경험과 지식을 토대로 상대적으로 복잡한 형상의 디지털 카메라 케이스에 대해서 사전 성형 해석을 진행하고 시제품 제작을 통해서 해석결과의 타당성을 확인하고자 한다. 해석 방법은 휴대전화 케이스와 동일하게 One-step방법과 Incremental방법을 진행해서 초기 단계에서 설계와 공법의 방향을 정하고 금형수정 단계에서 시행착오를 줄이며 소재를 절감할 수 있는 방법을 찾아야 할 것이다.

4-1. 디지털 카메라 케이스의 성형해석 결과(One-step method)

아래 Table 8은 One-step방법의 성형성 분석, 성형한계도 분석의 결과에서 해석 형상이나 다이어그램의 하단에 위치한 성형성 분포 표를 나타내고 있다.

Table 8. Formability distribution table



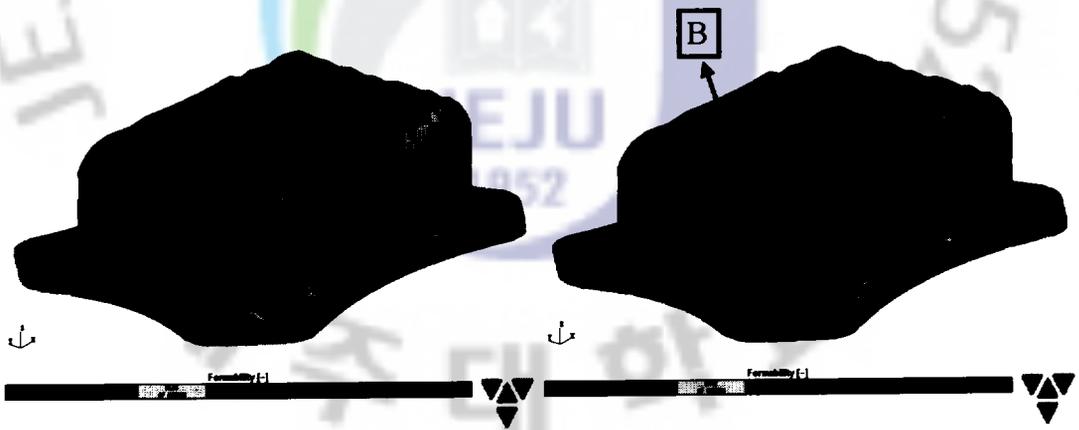
4-1-1. Formability 분석

디지털 카메라 케이스의 경우 휴대전화 케이스와 마찬가지로 restraint conditions에 따른 성형성 분포를 볼 수 있다. restraint conditions는 free, r0.3, r0.45, r0.6, r0.75, locked로 구분되어 있다.



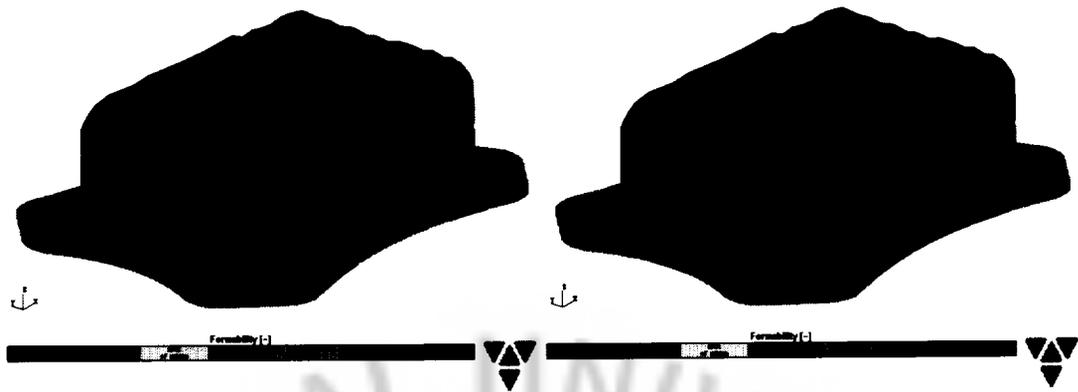
(a) Restraint conditions = free

(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45

(d) Restraint conditions = r0.6

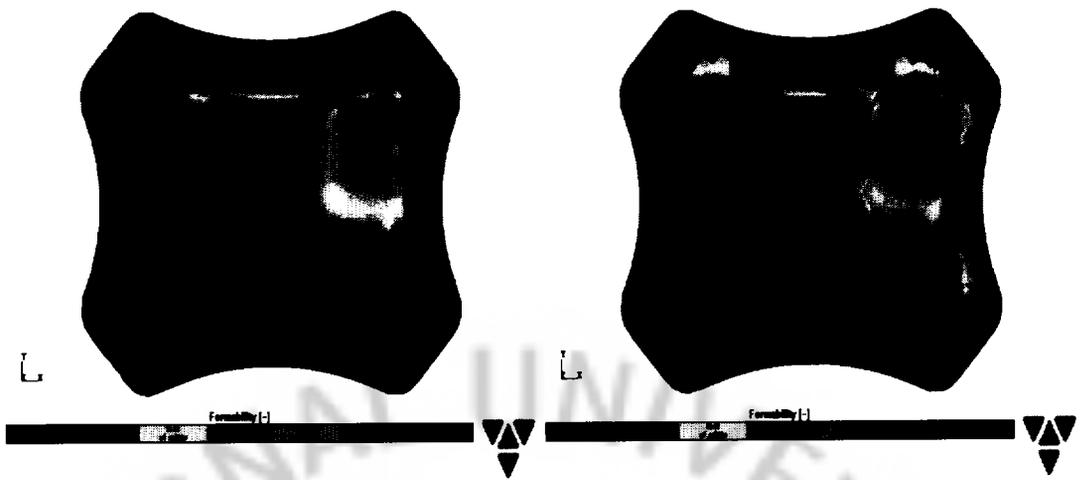


(e) Restraint conditions = r0.75

(f) Restraint conditions = locked

Fig. 18 Formability distribution (view-1)

One-step방법에서 휴대전화 케이스의 경우 restraint conditions가 free일 때, 소재의 유입이 원활하기 때문에 터짐은 전혀 보이지 않았다. 하지만 Fig. 18의 (a)를 보면 restraint conditions가 free임에도 불구하고 A부분에서 터짐의 가능성이 보이고 있다. 이는 디지털 카메라 케이스가 휴대전화에 비해서 복잡한 형상이기 때문으로 판단된다. 그렇기 때문에 이러한 형상자체의 문제는 설계 과정에서의 수정이 필요하다. 그리고 restraint conditions가 증가함에 따라 보라색으로 보이는 주름의 발생이 감소하며 붉은색으로 보이는 터짐의 가능성이 증가하는데, 특히 restraint conditions가 r0.6일 때부터 스트레칭이 크게 일어나는 B부분에서 터짐의 발생이 급격히 심화되어 locked까지 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. restraint conditions값에 따른 성형성 분포를 보았을 때, 휴대전화 케이스와 비슷하게 그 값이 r0.3이나 r0.45가 가장 좋은 성형성을 나타낸다. restraint conditions가 free일 때는 r0.3일 때보다 터짐의 가능성은 적지만 제품의 윗부분에서 소재가 충분히 늘어나지 않기 때문에 강성이 부족하며 때문에 성형성이 좋다고 판단하기는 어렵다.



(a) Restraint conditions = free

(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45

(d) Restraint conditions = r0.6



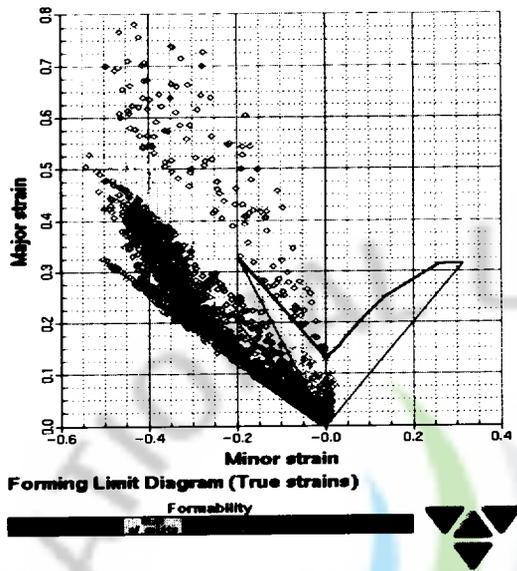
(e) Restraint conditions = r0.75

(f) Restraint conditions = locked

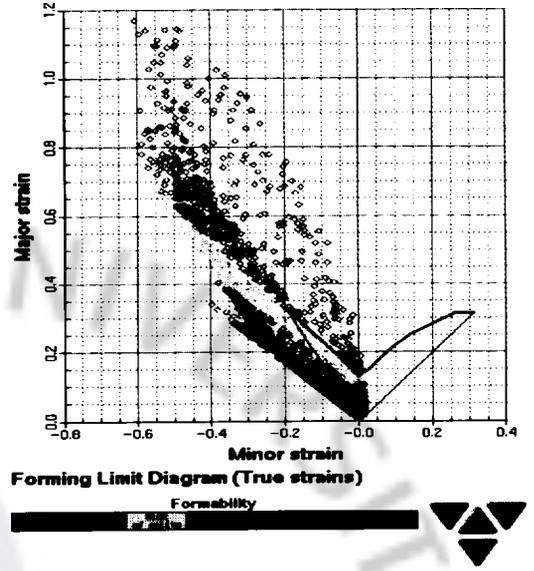
Fig. 19 Formability distribution (view-2)

Fig. 19는 One-step방법을 통한 휴대전화 케이스의 성형성 분포를 나타내고 있는데 Fig. 18과 다른 방향에서 본 것이다. 마찬가지로 restraint conditions가 증가할수록 주름의 감소하며 터짐의 발생이 지배적으로 관찰된다. 휴대전화 케이스의 성형해석에서도 보았듯이, One-step방법에 의한 해석결과는 Incremental방법에 의한 해석결과에 비해서 터짐이나 주름등에 대한 영역의 경계가 거의 직선에 가까운 형태를 이룬다. 그렇기 때문에 직관적으로 보더라도 One-step방법이 해석결과의 정확도가 Incremental방법보다 떨어진다고 판단할 수 있다.

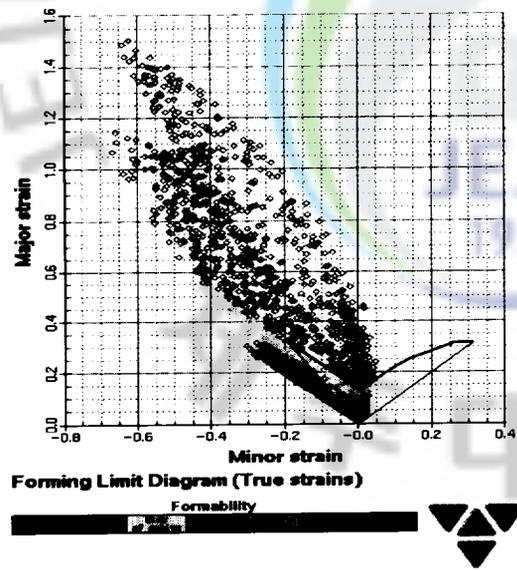
4-1-2. Forming limit diagram 분석



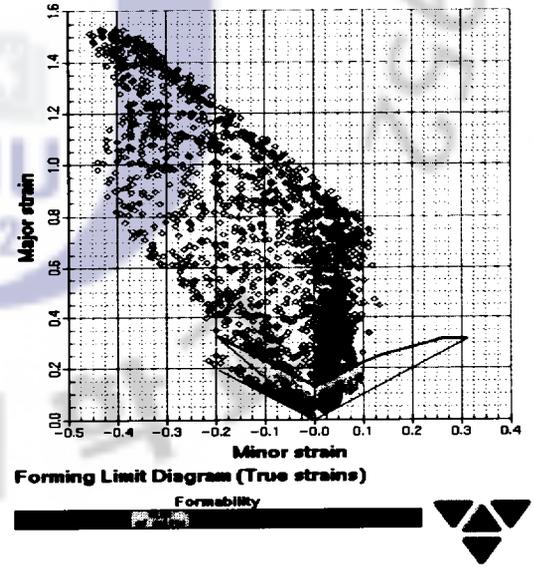
(a) Restraint conditions = free



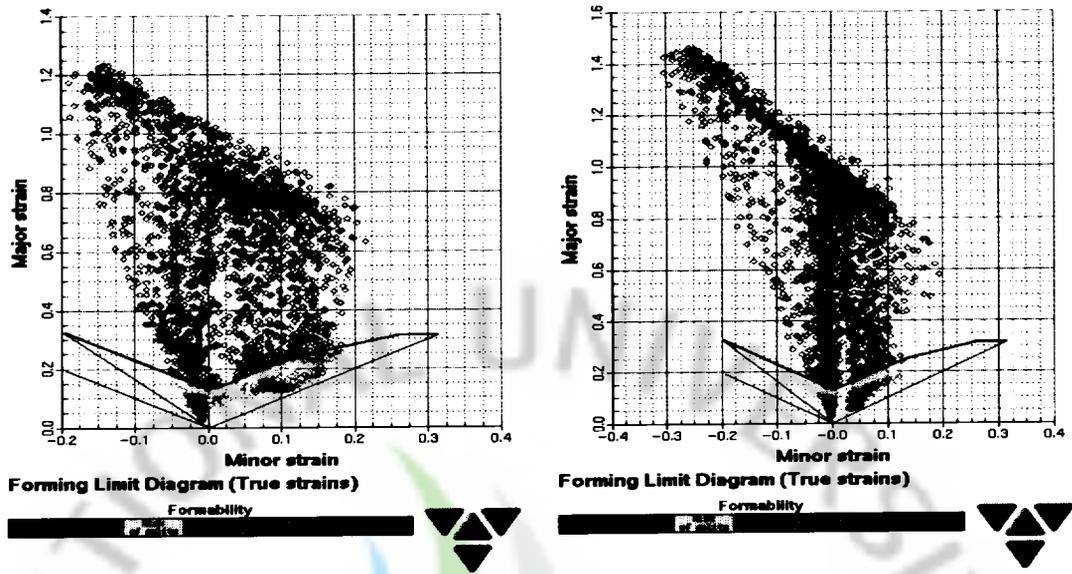
(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45



(d) Restraint conditions = r0.6



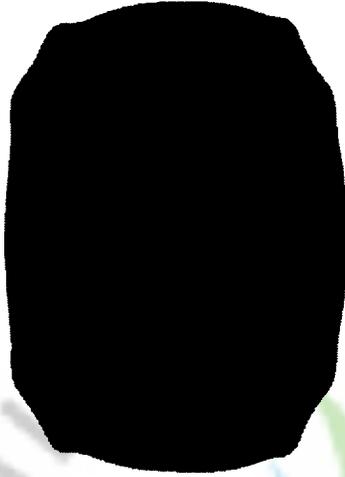
(e) Restraint conditions = $r=0.75$

(f) Restraint conditions = locked

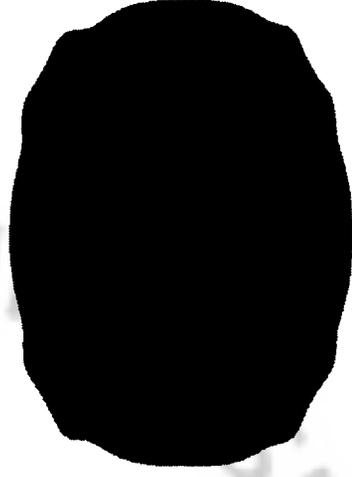
Fig. 20 Forming limit diagram

Fig. 20의 성형한계도 분석에서 성형성 분포와 마찬가지로 restraint conditions가 증가 할수록 붉은색으로 보이는 터짐의 영역은 급격히 늘어나고 있으며 주름의 영역은 restraint conditions값이 0.6 정도에서 줄어들기 시작하여 locked에서는 전혀 나타나지 않는다. 또한 터짐의 발생이 산발적 분포를 보이다가 restraint conditions의 증가로 인해 그 범위가 좁아지고 빈도가 조밀해져서 일정한 수치 (minor strain=0.0)에 가까워지고 있음이 관찰되었다.

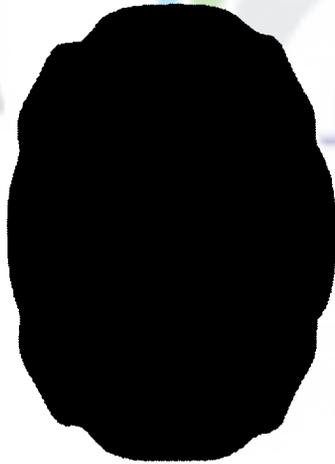
4-1-3. Blank form 분석



(a) Restraint conditions = free



(b) Restraint conditions = r0.3



(c) Restraint conditions = r0.45



(d) Restraint conditions = r0.6

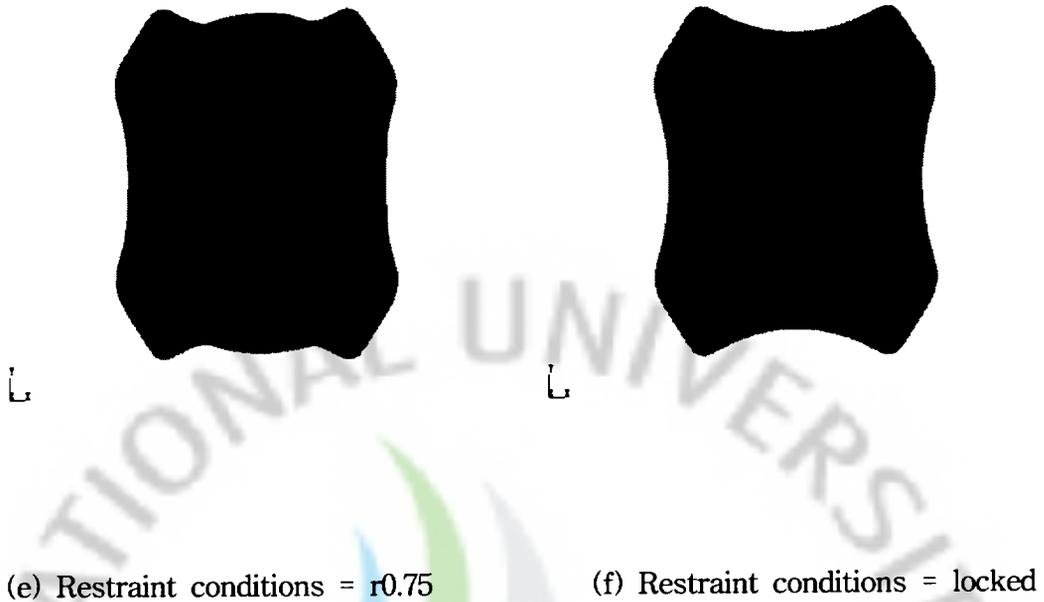


Fig. 21 Optimum blank form

Fig. 21의 최적의 초기 블랭크 형상 비교에서 보면 디지털 카메라 케이스가 휴대전화 케이스에 비해 상대적으로 복잡한 형상이기 때문에 restraint conditions에 따른 초기 블랭크의 형상이 확연히 달라지고 있다. restraint conditions가 증가할수록 초기 블랭크의 형상은 최종 제품의 플랜지 부분과 아주 흡사한 형태를 보이고 있으며, restraint conditions의 증가로 인한 소재의 유입이 억제되기 때문에 블랭크의 크기가 작아지고 있다. restraint conditions의 증가로 인해 소재의 터짐 구간이 증가하는 성형성 분포의 결과로 미루어 생각해보면, restraint conditions의 증가는 소재의 유입을 억제하고, 소재의 늘어남을 극대화시키기 때문에 최적의 초기 블랭크의 형상은 restraint conditions의 증가로 인해 점점 작아진다고 판단할 수 있다.

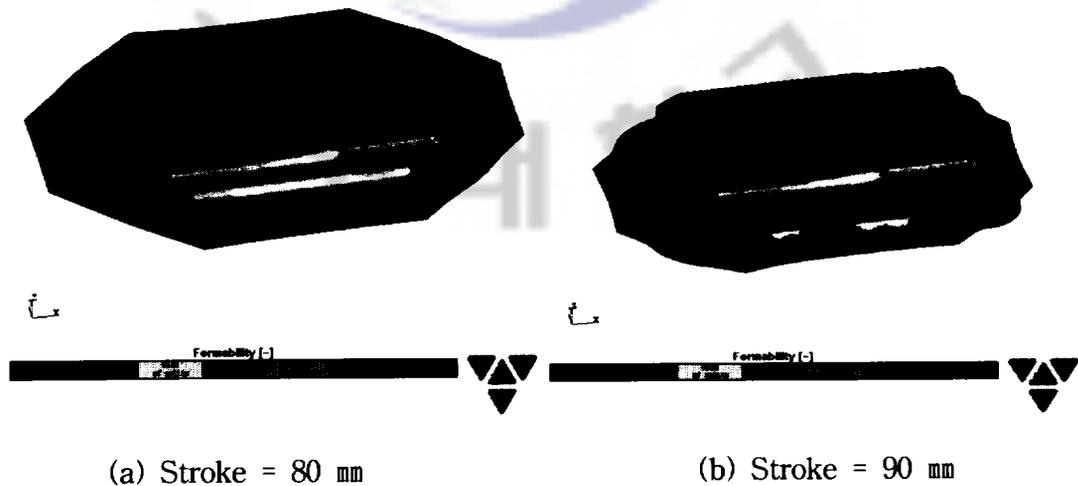
4-2. 디지털 카메라 케이스의 성형해석 결과(Incremental method)

앞에서도 언급했듯이 Incremental방법은 restraint conditions에 따른 최종 제품에 따른 해석의 결과를 보여주는 것이 아닌 stroke에 따른 해석의 진행 과정을 보여주고 있다. 디지털 카메라 케이스의 경우는 최종 stroke가 100mm이며, 금형에서 제품을 끄집어 낸 후의 과정인 spring back 후의 성형성에 대해서도 확인할 수 있다. Table 9는 Incremental방법에서 성형성 분석이나 성형한계도 분석의 결과에서 해석된 형상이나 다이어그램의 하단에 위치한 성형성 분포 표를 나타낸 것이다.

Table 9. Formability distribution table

Splice		Corner Thickness
--------	--	------------------

4-2-1. Formability 분석



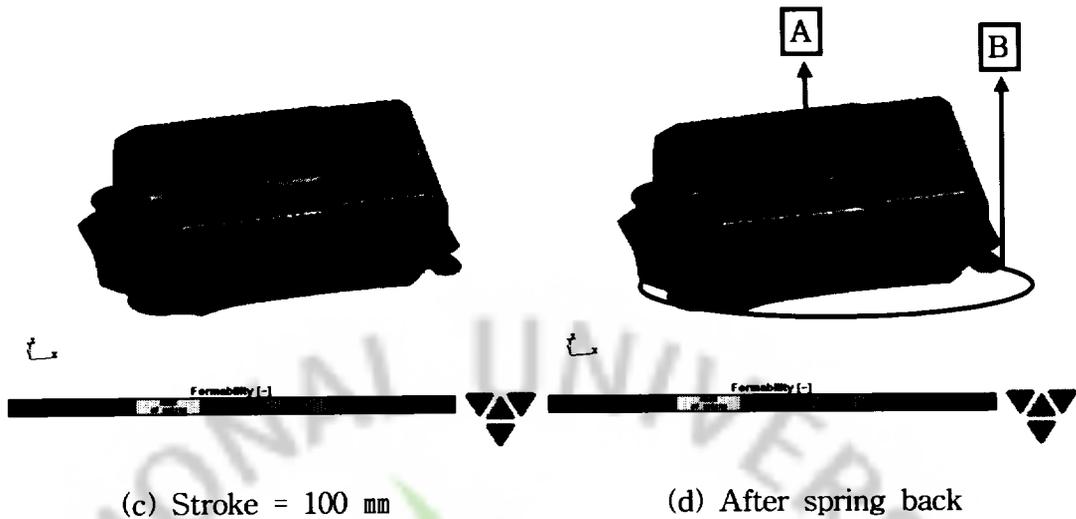


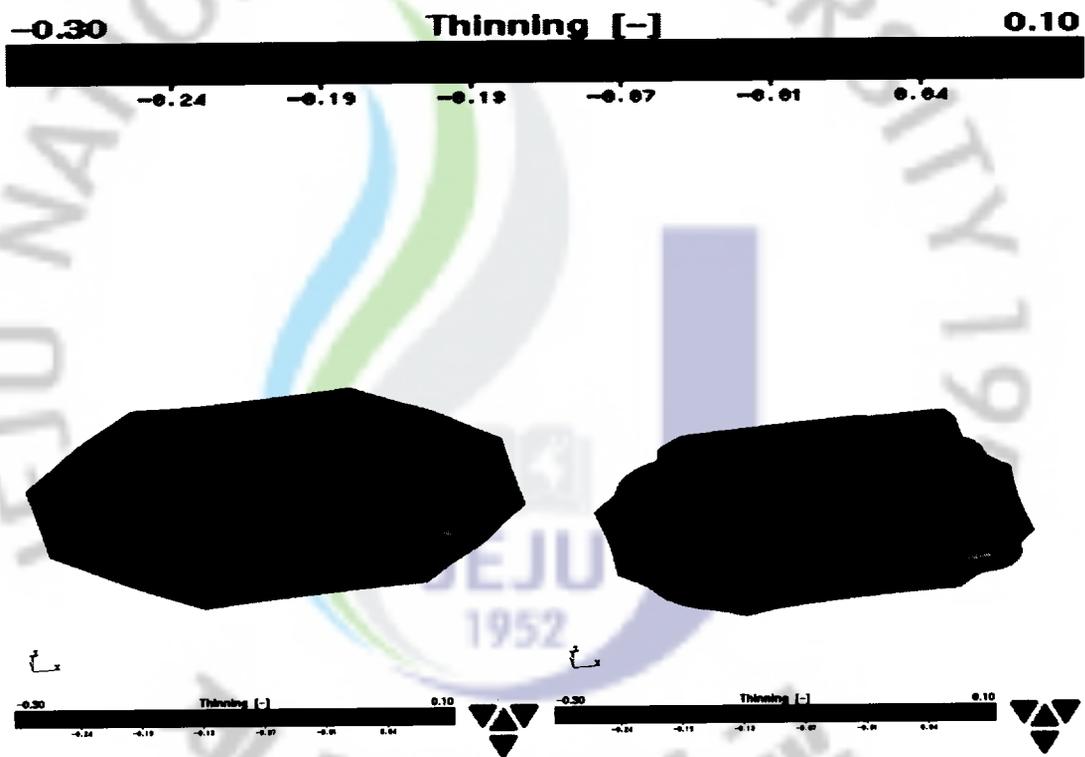
Fig. 22 Formability distribution

Fig. 22에서 보면 Incremental방법에 의한 성형해석 결과, 휴대전화 케이스와는 달리 터짐의 가능성이 산발적이고 국소적으로 발생하여 큰 문제로 나타나지 않았다. 가장 큰 문제점은 (d)의 A로 나타난 제품의 윗부분에 재료가 충분히 늘어나지 않아서 제품의 강성이 부족하다는 것과 B로 표시한 제품의 가장자리 플랜지 부분에는 주름의 가능성이 넓게 보이고 있다는 것이다. 하지만 주름이 심하게 발생될 것으로 예상되는 가장자리는 트리밍공정을 통해서 제거될 것이기 때문에 제품완성 단계에서는 큰 문제가 될 것이라 판단되지 않는다. 만약 이러한 주름 문제점을 보완해야만 하는 상황이라면 try-out 단계에서 바인더의 압력을 더 높이거나 소재의 구속을 증가시킬 수 있는 비드의 사용이 요구된다. 그리고 One-step방법의 해석결과에서 restraint conditions가 r0.3이나 r0.45가 성형성이 가장 이상적이라고 판단하였는데 Incremental방법에 의한 해석결과 restraint conditions가 0.3일 때의 결과와 가장 비슷함을 알 수 있다.

4-2-2. Thickness variation rate 분석

Table 10은 두께 변화율 분포에서 해석된 결과의 하단에 위치한, 색깔과 수치로 나타낸 두께 변화율 표이다. Fig. 23은 디지털 카메라 케이스에 대한 두께 변화율 분포의 해석 결과이다.

Table 10. Thickness lapse rate table



(a) Stroke = 80 mm

(b) Stroke = 90 mm

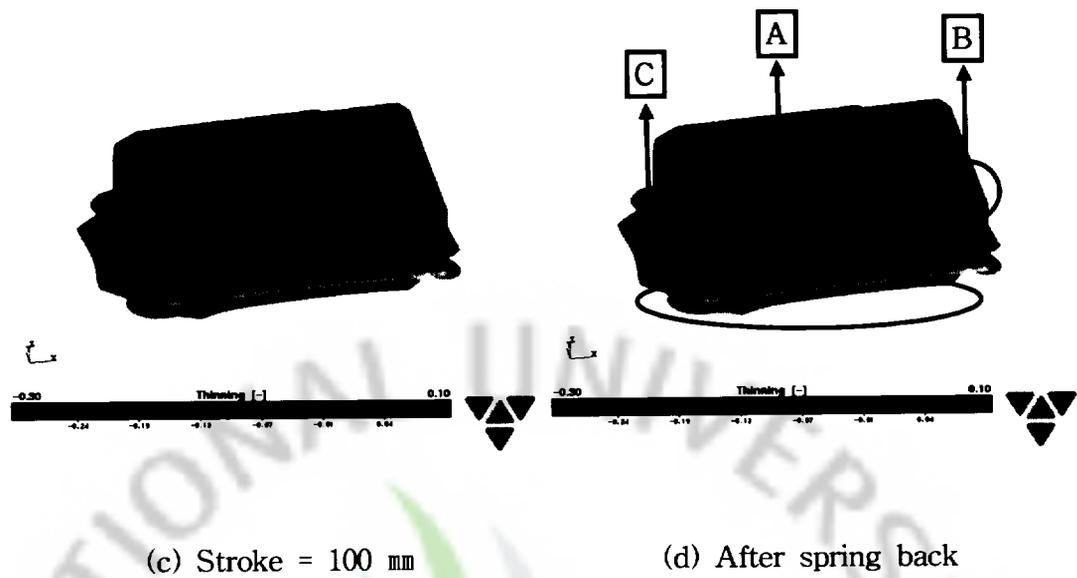
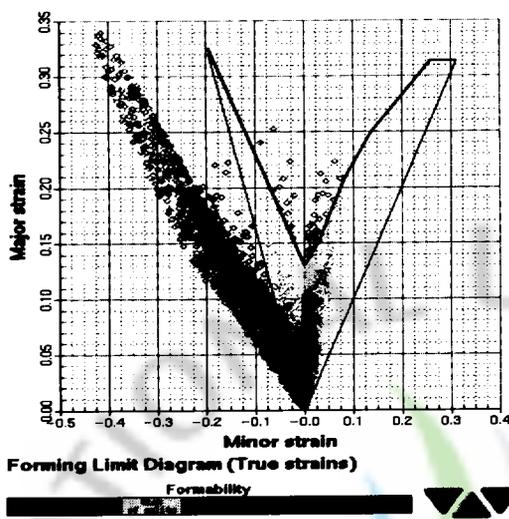


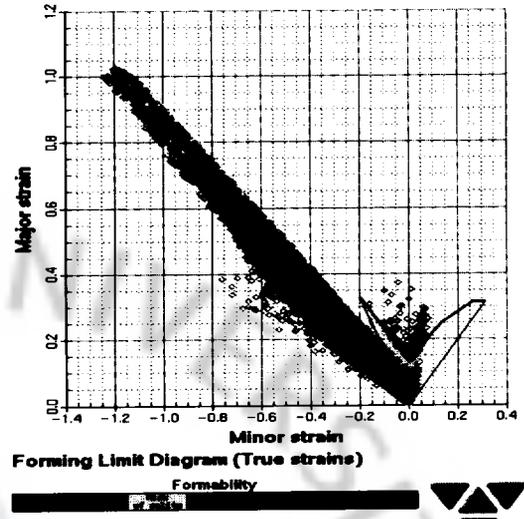
Fig. 23 Thickness variation rate

두께 변화율은 앞에서 살펴본 formability 분포의 결과를 뒷받침 할 수 있으며 그렇기 때문에 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 23의 (d)에서 보면 stroke가 증가 할수록 C로 표시된 소재의 가장자리 부분에서는 두께가 늘어나고 있기 때문에 주름의 가능성이 있다는 것을 예측할 수 있으며, B로 표시된 소재의 모서리에 붉은색으로 보이는 부분은 두께가 얇아지고 있기 때문에 터짐의 가능성이 있으며 테이블과의 비교를 통해서 그 크기가 -0.13mm 이하라는 점, 그리고 그 범위가 색깔로써 잘 나타나 있다. 좀더 세부적으로 보면 B로 표시된 모서리 부분에서 두께 감소율이 블랭크 두께의 약 20%를 넘지 않는 -0.7mm 에서 -0.13mm 이하에 분포하고 있음을 수치로 알 수 있다. 그리고 A로 표시된 제품의 윗부분에는 두께 변화율의 구간이 $0.01 \sim 0.04$ 에 존재하는 파란색이 지배적으로 보이기 때문에 두께의 변화가 거의 없으며 때문에 소재의 변형이 생기지 않아서 강성이 부족하다는 것을 예측할 수 있다.

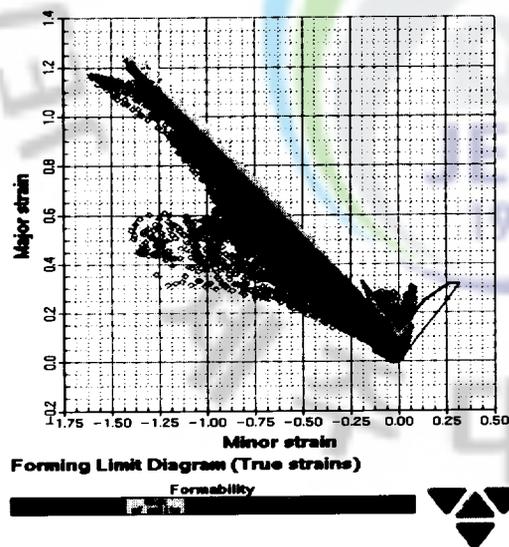
4-2-3. Forming limit diagram 분석



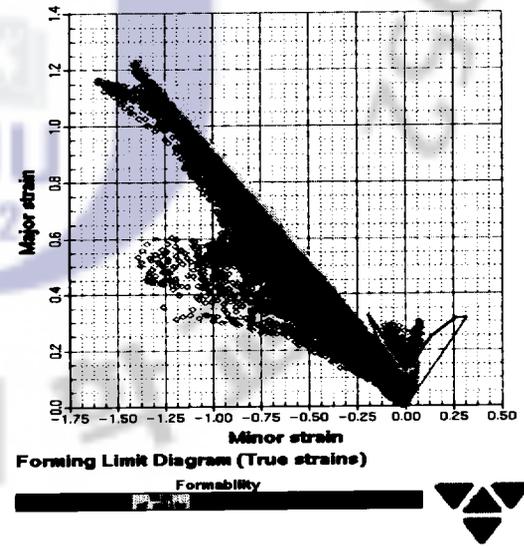
(a) Stroke = 80 mm



(b) Stroke = 90 mm



(c) Stroke = 100 mm



(d) After spring back

Fig. 24 Forming limit diagram

forming limit diagram 분석에서는 One-step 방법과 Incremental 방법의 결과가 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 앞서서도 언급했듯이 One-step 방법의 경우는 restraint conditions의 증가로 인해 소재의 유입이 억제되고 그렇기 때문에 터짐의 발생에 초점이 맞추어져 있지만 Incremental 방법으로 해석해본 결과, Fig. 24를 보면 성형이 진행될수록 붉은색으로 보이는 터짐의 영역은 그 증가량이 미비하지만 stroke가 90mm일 때, 주름의 범위가 급격하게 늘어나며 spring back 이후의 단계까지 점차 증가함을 보이고 있다. 실제 공정에서는 주름이 심하게 발생하는 모서리의 플랜지 부분은 트리밍 공정을 통해서 제거될 것이므로 큰 문제를 야기하지는 않을 것으로 예상된다. 만약 이러한 주름의 문제를 개선해야만 하는 상황이라면 try-out 단계나 금형 수정 단계에서 소재의 유입을 제어하기 위해서 바인더의 압력을 높이거나 비드의 사용이 요구된다.

4-2-4. 성형력 분석

Fig. 25를 보면 소재를 가공하기 위한 다이, 펀치, 바인더의 성형력을 나타내고 있는데 가로축은 process time을 세로축은 forming force를 나타내고 있다.

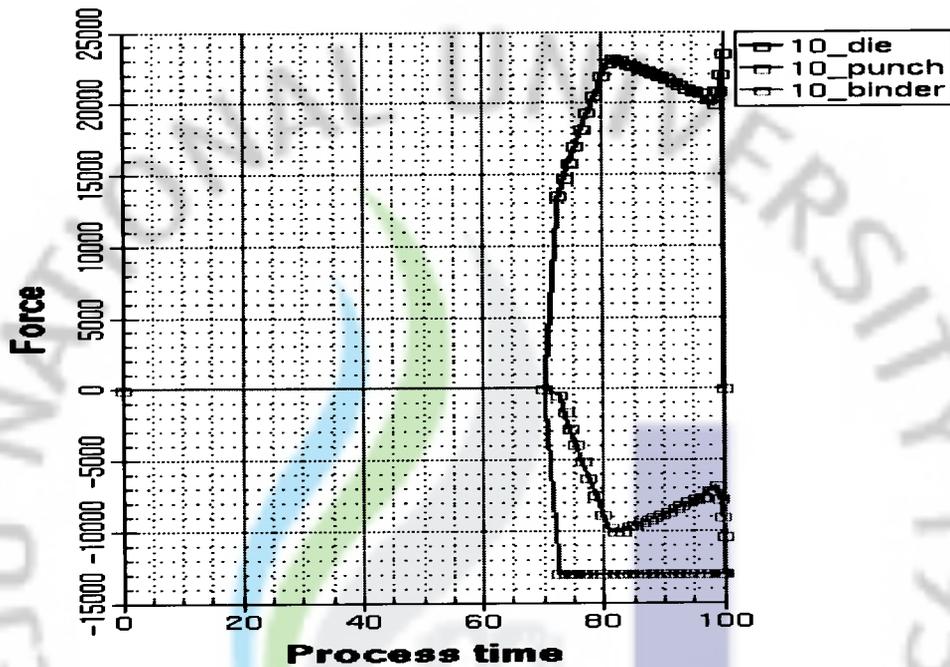
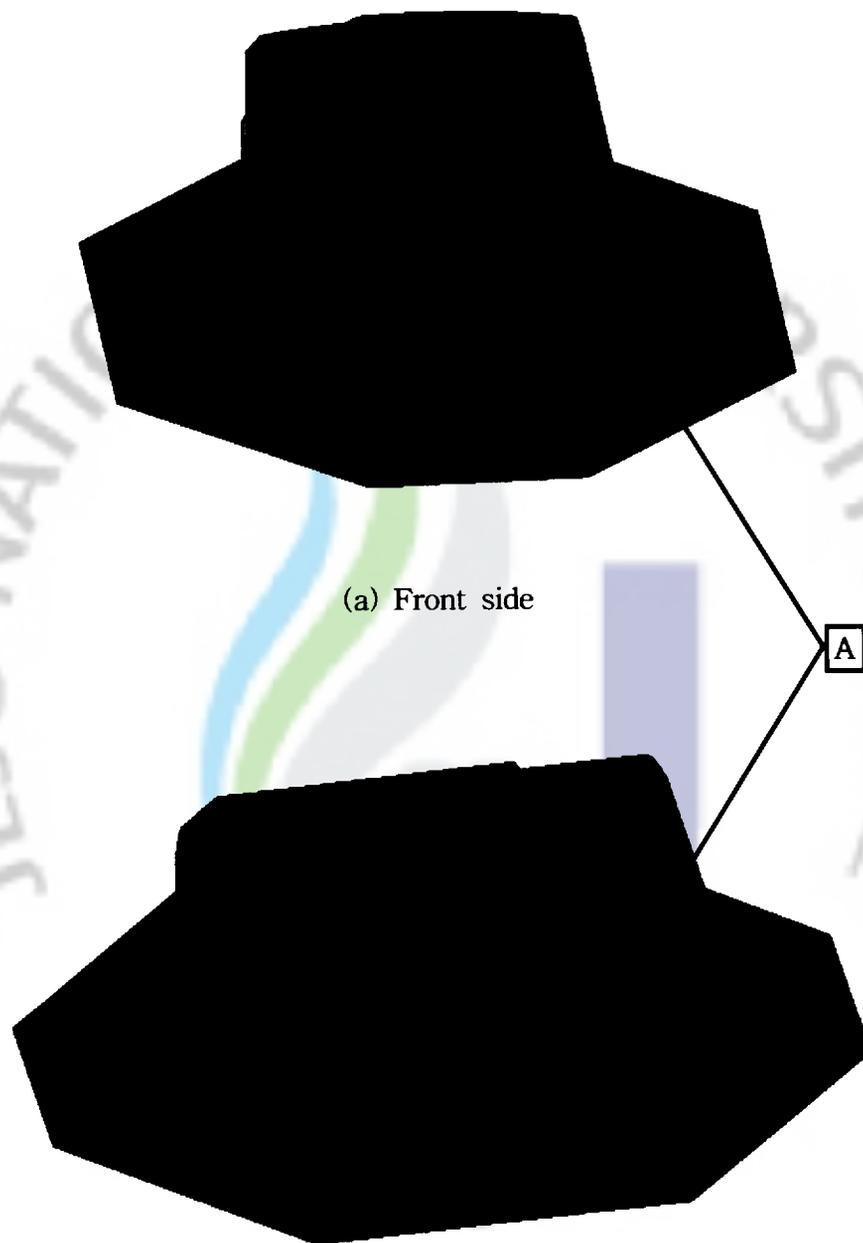


Fig. 25 Forming force

Fig. 25에서 보면 본 연구를 통해서 시제품을 제작하고 실제 산업 현장에서 적용하기 위해서는 최소 25 TON이 넘는 프레스 용량이 필요함을 알 수 있다. 그 외에도 성형이 진행됨에 따라 바인더와 펀치가 받는 하중에 대해서도 알 수 있다.

4-2-5. Skid line 분석



(a) Front side

A

(b) Flank

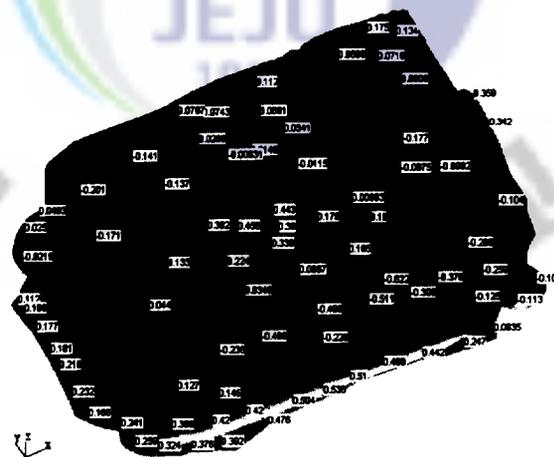
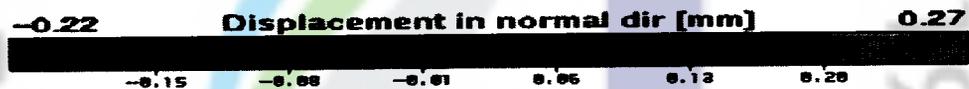
Fig. 26 Skid line

Fig. 26의 (a)와 (b)를 보면 A로 표시된 제품의 측벽 부분에 skid line의 발생이 예상된다. 성형 후 제품에 생길 수 있는 skid line은 휴대전화 케이스와 디지털 카메라 케이스에서 동일하게 발생한다. 그 이유는 프레스 성형의 경우 제품의 측벽은 다이나 펀치의 하강에 의해 가장 많은 신장과 접촉 일어나기 때문으로 판단된다. 휴대전화 케이스와 마찬가지로 skid line을 미연에 방지하기 위해서는 펀치의 반지름 각을 높이거나 윤활을 키우는 방안을 강구해야 한다.

4-2-6. Spring back 분석

Table 11은 spring back분석에서 해석된 결과의 하단에 위치한, spring back의 양을 치수와 색깔로 나타낸 표이다.

Table 11. Spring back distribution table



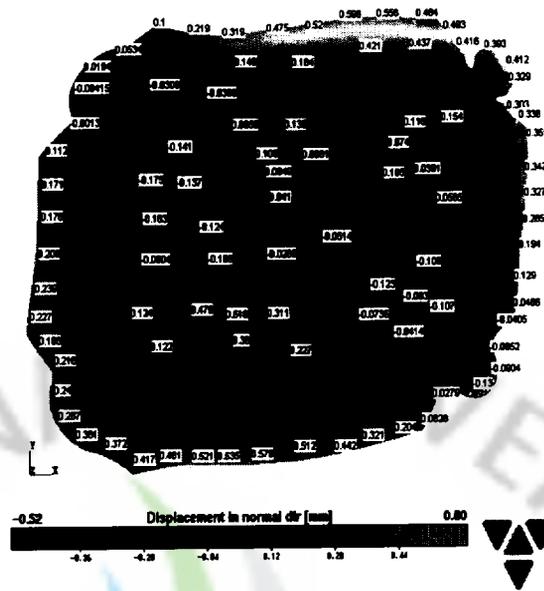


Fig. 27 Form comparison after spring back

앞에서도 언급했듯이 실제 산업 현장에서 인정하는 spring back이나 휨에 대한 치수 정밀도가 $\pm 0.5\text{mm}$ 인 점을 감안했을 때, Fig. 27의 (a)와 (b)에서 보면 치수가 $\pm 0.1\text{mm}$ 에서 $\pm 0.4\text{mm}$ 까지 다양하게 분포하고 있으며, 주름발생의 심화가 예상되는 제품의 플랜지 부분에서는 그 치수가 $+0.5\text{mm}$ 이상 되는 부분도 보이고 있다.

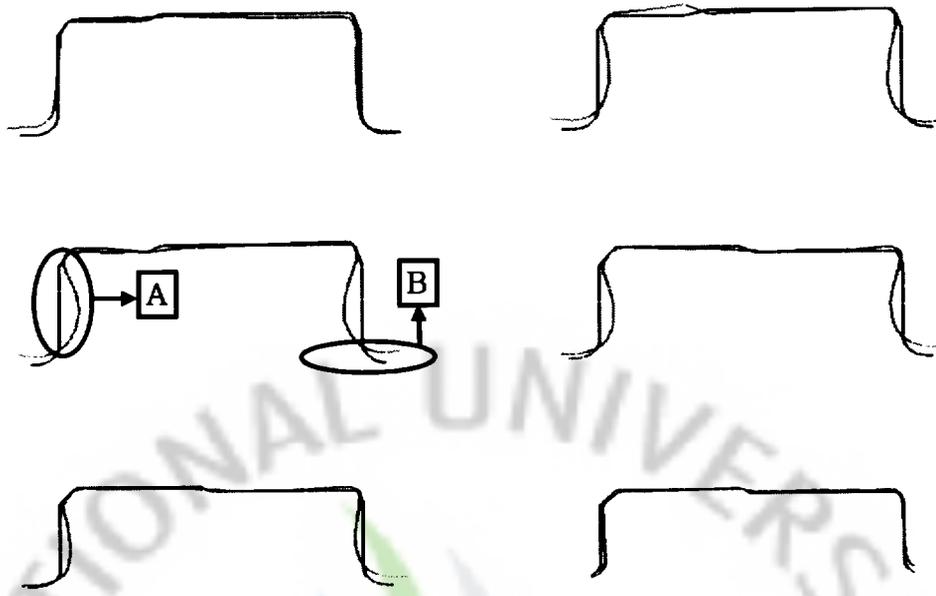


Fig. 28 Section comparison after spring back

휴대전화 케이스와 같이 비교적 단순한 형상에서는 spring back이 큰 문제를 야기하지 않을 것으로 예상되었지만 Fig. 28의 디지털 카메라 케이스의 경우는 원래 의도한 제품의 형상과 성형후의 제품의 형상 간에 상당한 차이가 있으며 spring back의 발생이 육안으로 구분하기 어렵기 때문에 5배 확대해서 보여주고 있다. 특히 A로 표시된 형상의 측벽에서 휨 현상의 발생, B로 표시된 제품 가장자리 부분에서 주름으로 인한 휨이 두드러지게 나타나고 있다. spring back을 줄이기 위해서는 블랭크의 홀딩력을 증가시키거나 다이의 어깨반지름을 증가시켜야 하며 실제 try-out 단계에서 spring back이 큰 문제를 야기한다면 판재의 두께와 클리어런스의 비를 조절하는 등의 방안을 강구해야 한다.

V. 실제 산업 현장에의 적용

One-step방법과 Incremental방법에 의한 성형해석을 마치고 디지털 카메라 케이스의 시제품을 제작해 봄으로써 그 해석결과의 타당성을 검증하고자 한다.

휴대전화 케이스의 경우 별도의 온간가공을 위한 장치와 윤활장치가 마련되지 않았기 때문에 엔지니어가 마그네슘 합금 판재에 대한 가열과 윤활을 직접 수행하였으나 디지털 카메라 케이스의 경우는 자동 윤활유 도포 장치와 가열장치를 개발하여 공정에 적용하였다.

5-1 최적 프레스 장치 선정과 윤활유 도포장치



Fig. 29 60 TON velocity variable oil pressure press

일반적인 AZ31이나 AZ61과 같이 소성가공용으로 사용되는 마그네슘 합금에서 변형저항에 미치는 가공속도의 영향에 관한 경우, 가공속도가 느릴 때 250°C 부근에서 급격한 변형저항의 감소 현상이 생기기 때문에 박판 금속 성형법으로 마그네슘 합금을 가공하기 위해서는 금형의 하강 속도를 제어할 수 있는 프레스가 필요하다.[19] 또한 본 연구에서는 온간가공법을 적용하기 위해서 블랭크와 열선이 내장된 금형의 접촉을 통해서 블랭크에 열을 가하는 방식을 채택하였다. 그러기 위해서는 블랭크가 가열될 때까지 금형과 블랭크가 충분히 접촉할 수 있도록 금형의 하강 속도를 제어할 수 있는 프레스의 선정은 필수적이다. 본 연구를 적용하여 시제품을 제작하기 위해서 정밀도가 높고 미세 제어가 가능하며 금형의 하강 속도를 제어할 수 있는 60 TON 속도 가변 유압프레스를 선정하였다. Fig. 29는 선정된 프레스의 사진이다.

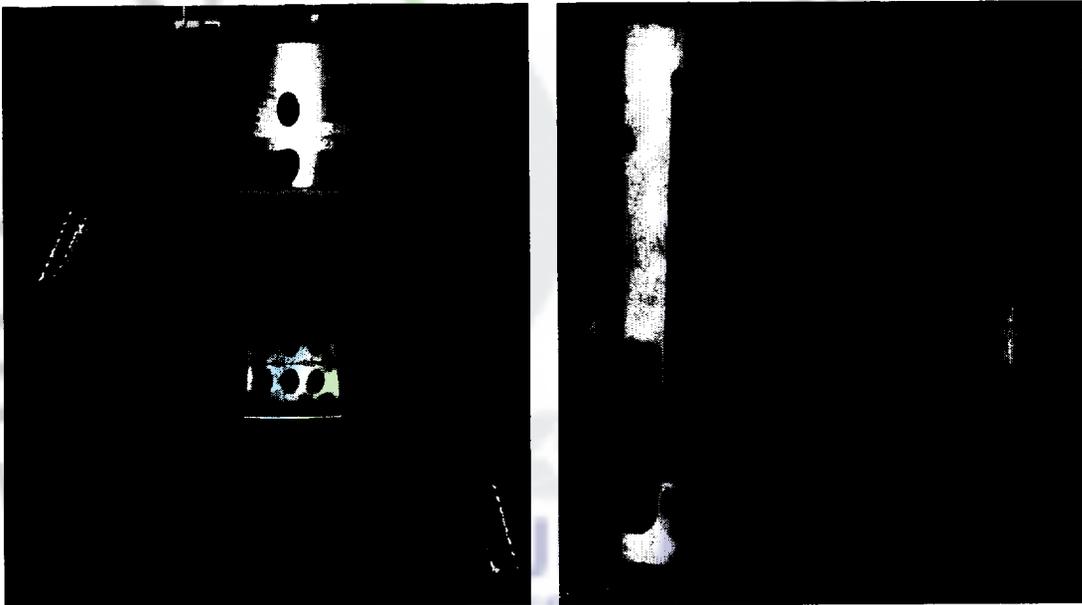


Fig. 30 Automatic lubricating oil application equipment

제품에 생길 수 있는 skid line을 미연에 방지하고 원활한 성형을 위해 금형에 블랭크가 투입되기 전에 윤활유를 고르게 도포할 수 있는 장치가 필요하다. Fig. 30은 자동으로 윤활유를 도포하고 건조하는 장치로써 공정의 첫 번째 단계에 위치시켰다.

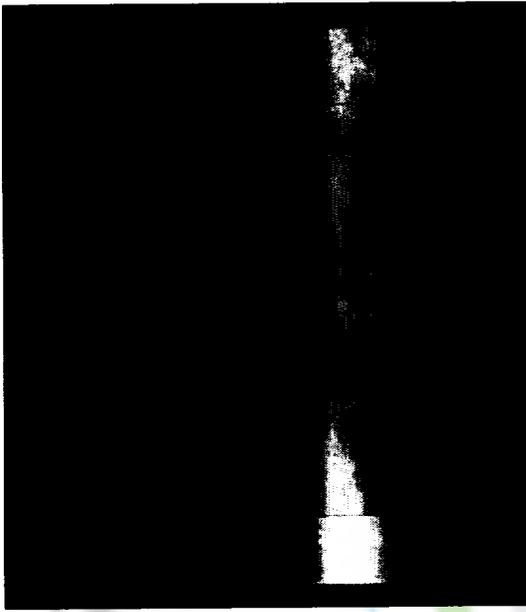
5-2 금형제작

시제품을 제작하기 위해서 금형을 제작하였는데 휴대폰 케이스에 비해서 복잡한 형상이기 때문에 총 7단계의 공정으로 이루어져 있다. 제 1공정은 소재로부터 정해진 형상을 절단해내는, 즉 압연판재를 블랭크로 사용할 수 있게 하는 블랭킹(blanking)공정으로 Fig. 31에는 생략하였다.

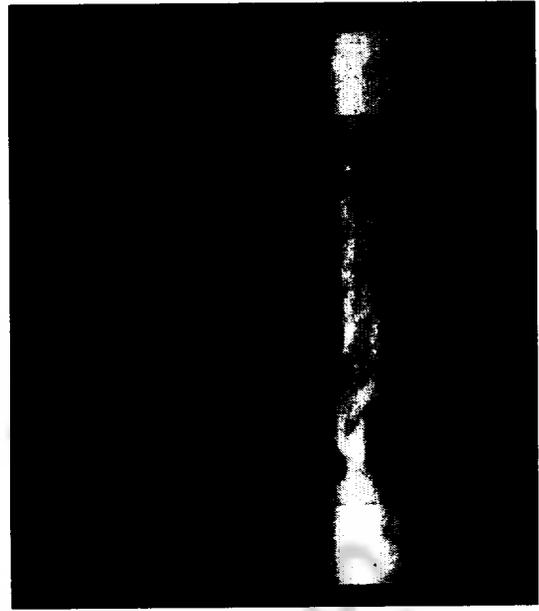


(a) 2/7 process (die part)

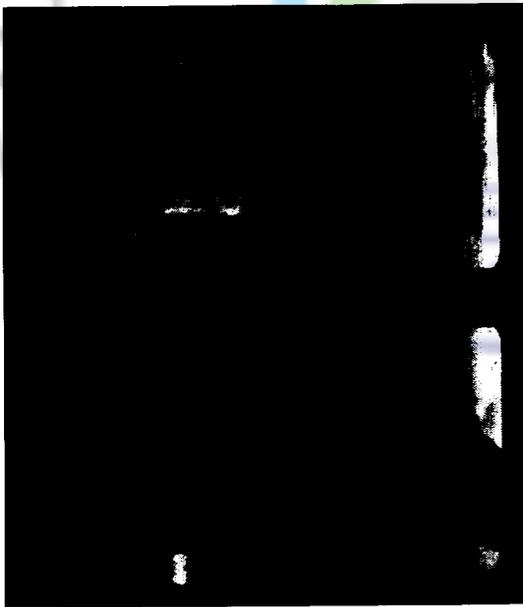
(b) 2/7 process (punch part)



(c) 3/7 process (die part)



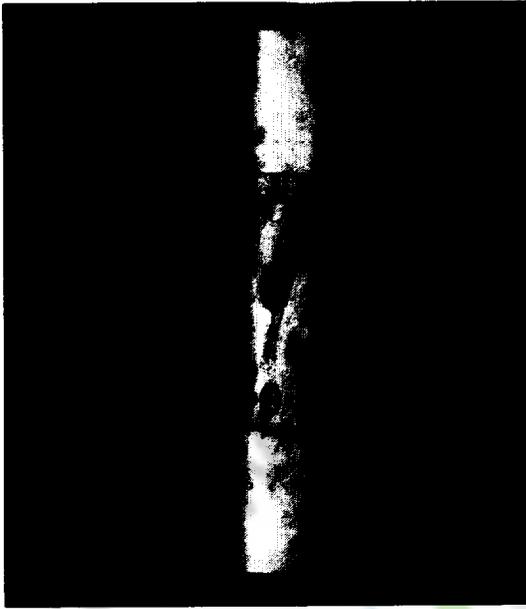
(d) 3/7 process (punch part)



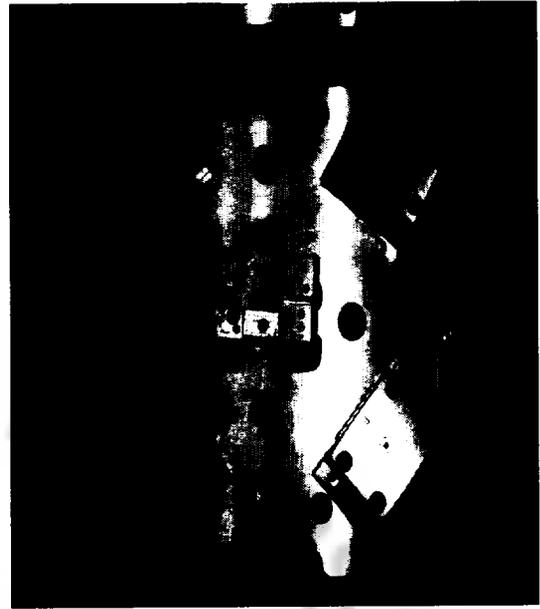
(e) 4/7 process (die part)



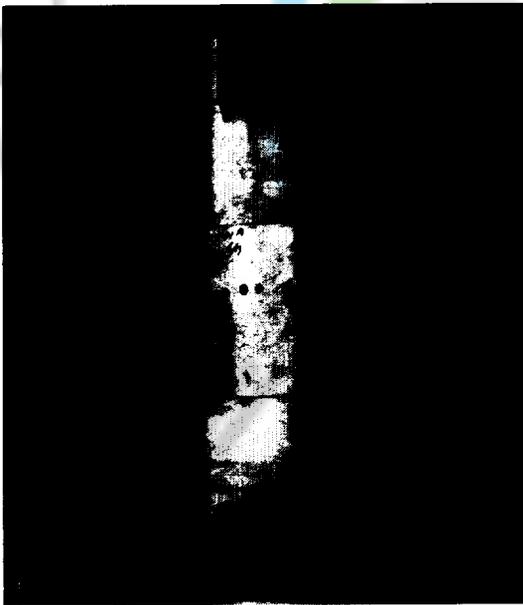
(f) 4/7 process (punch part)



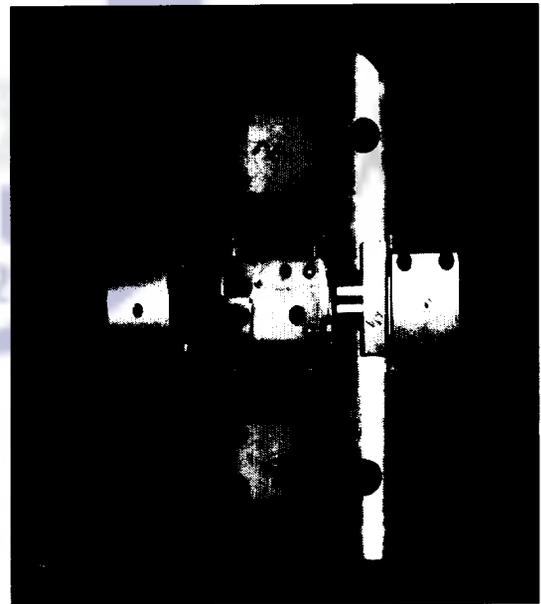
(g) 5/7 process (die part)



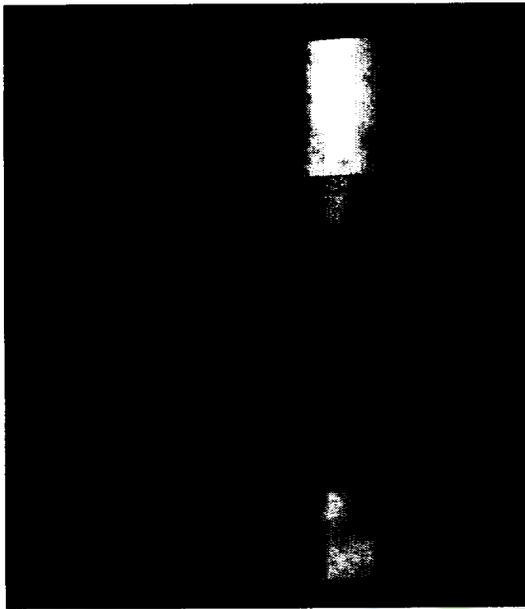
(h) 5/7 process (punch part)



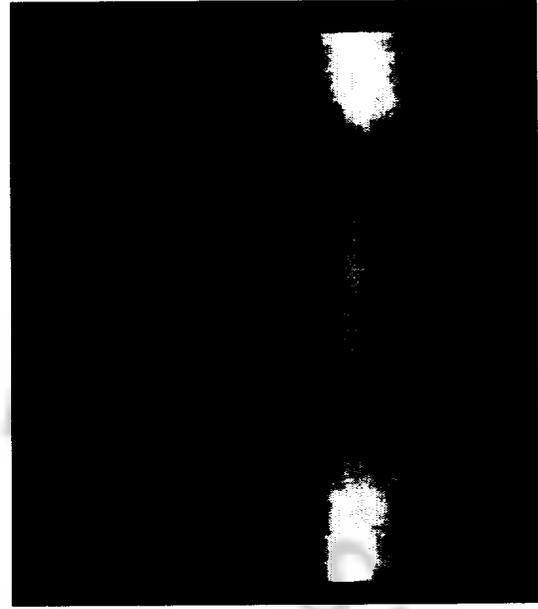
(i) 6/7 process (die part)



(j) 6/7 process (punch part)



(k) 7/7 process (die part)



(l) 7/7 process (punch part)

Fig. 31 Mold shape

Fig. 31에서 제 2공정은 평판 블랭크를 다이 속으로 유입시켜 펀치모양으로 성형하는 드로잉(drawing)공정, 제 3공정은 불규칙한 가장자리 부위를 절단하는 트리밍(trimming), 제 4공정은 제품의 깊이를 증가시키는 재드로잉(redawing)공정이다. 제 5공정과 제 6공정은 트리밍 공정과 유사한 사이드 커팅 공정이며 제 7공정은 구멍을 뚫어내는 피어싱(piercing)공정이다.

5-3 가열장치 및 열 제어 시스템

블랭크를 250°C 부근까지 가열하기 위해서는 다이나 혹은 다리와 블랭크 홀더에 열선이나 히터를 내장하여 다리의 혹은 다리와 블랭크 홀더의 블랭크에 대한 접촉으로 이루어진다. 그 이유는 소재가 박판의 형태이기 때문에 금형에 투입되

기 전에 박판에 열을 가해도 열 발산이 용이하기 때문에 온도의 유지가 쉽지 않다. 그렇기 때문에 본 연구를 통해서 시제품을 제작하기 위해서 금형의 상형과 하형에 열선을 내장하여 판재와의 접촉으로 인해 마그네슘 합금 블랭크의 온도를 250°C까지 상승시키는 장치를 제작하였다. Fig. 32는 개발된 열선을 내장한 금형을 Fig. 33은 온도를 제어하는 컨트롤러의 모습이다.

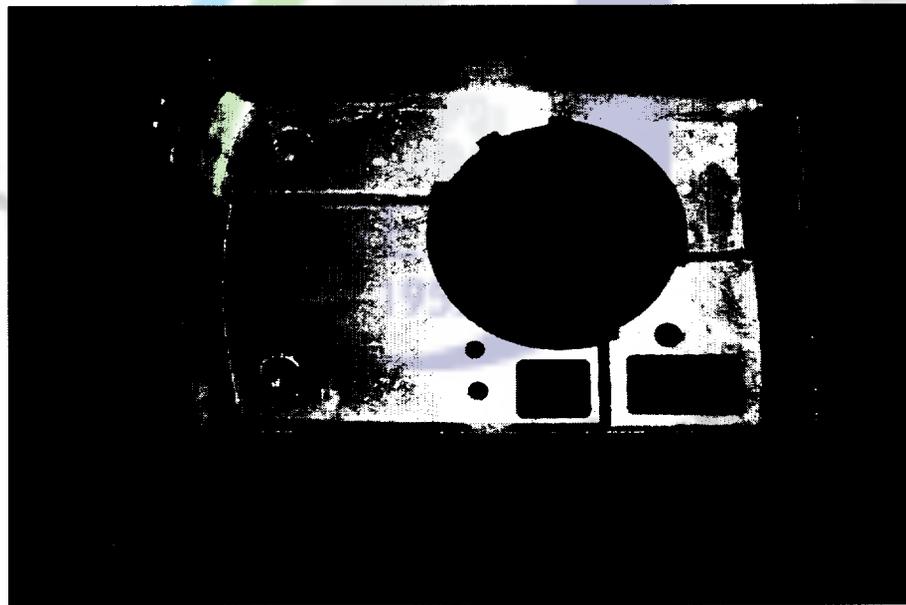
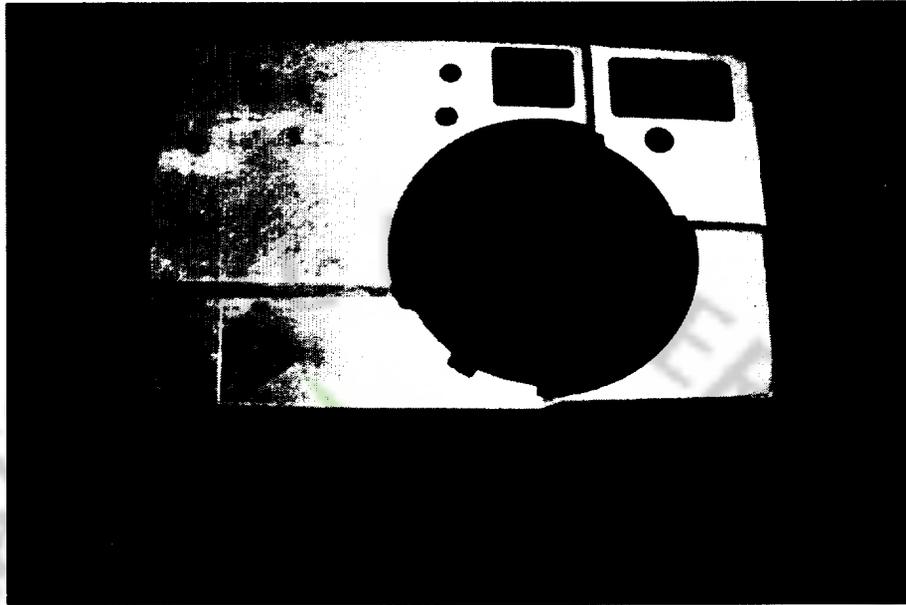


Fig. 32 Heating equipment



Fig. 33 Controller of the heating equipment

5-4 시제품 제작



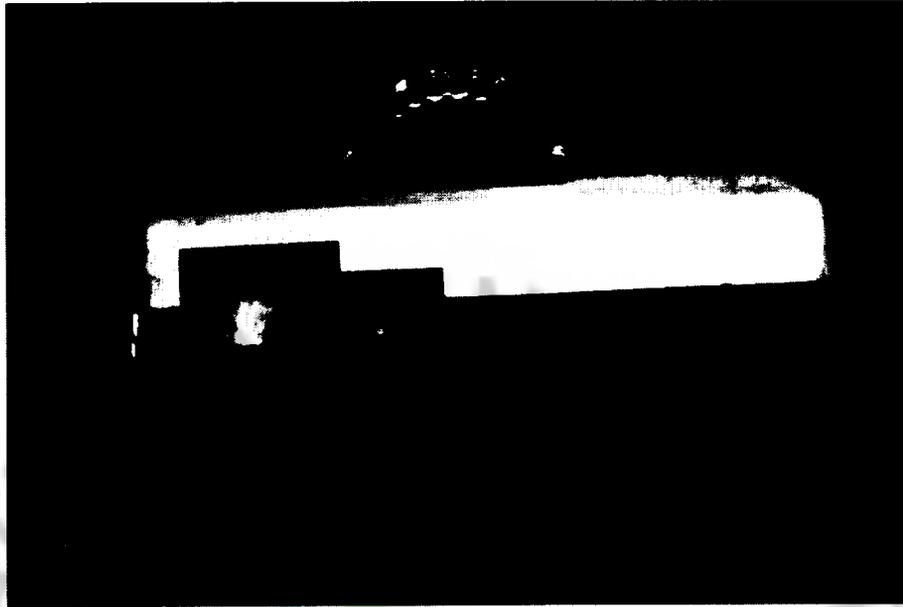


Fig. 34 Trial product (camera)

Fig. 34에서 우선 육안으로 보았을 때, 시제품의 모서리 부분에 티짐은 발견되지 않았으며 제품의 측벽 아래에 주름이 발생될 것으로 예상된 가장자리 부분은 트리밍공정을 통해 제거되었기 때문에 주름의 문제도 확인되지 않으며 전체적으로 양호한 성형상태를 보인다.

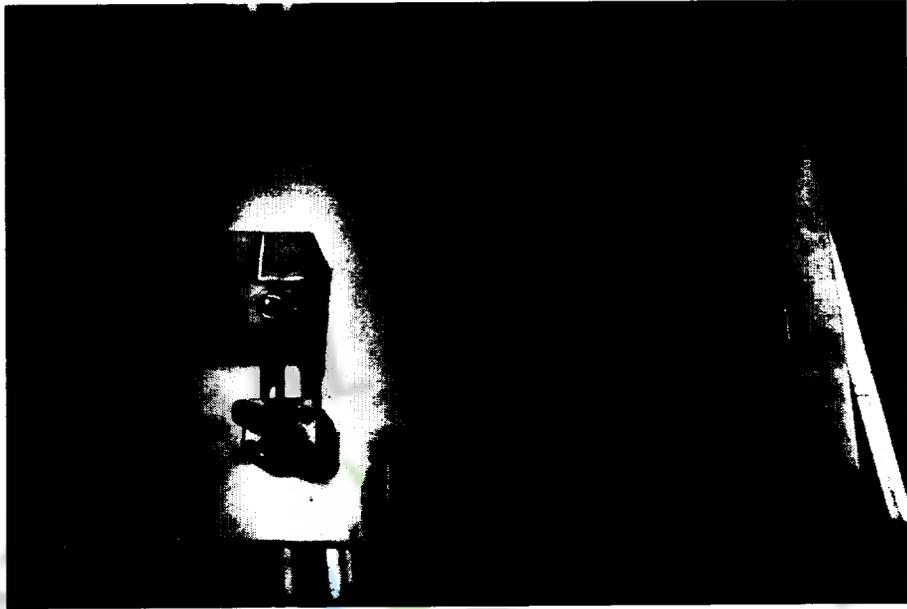


Fig. 35 Measurement gage

Fig. 35는 시제품의 치수를 측정하기 위한 측정게이지로써, 시제품의 전체적인 치수는 측정게이지를 통해서 형상을 고정하고 게이지의 밑 부분에서 최종 시제품의 치수를 측정하여 문제가 없음을 파악하였다. 다만 spring back과 제품의 윗부분의 강성부족에 대한 측정은 수행하지 못하였다.

VI. 결론

본 연구는 꿈의 소재로 각광받고 있지만 그 가공의 어려움으로 널리 활용되지 못하고 있는 마그네슘 합금을 박판 금속 성형법으로 가공함에 있어서 사전 성형해석을 수행하고 시제품을 제작하여 해석결과의 타당성을 검증하며 실제 산업 현장의 설계나 공법에 적용할 수 있는 유용한 정보를 제공하고자 한다.

또한 성형난이도가 높은 제품을 바로 개발하기 보다는 성형난이도가 낮은 휴대전화 케이스에 대해서 성형해석을 진행하고 시제품개발을 통해서 성형성과 성형기술을 확보한 뒤에 성형난이도가 높은 디지털 카메라 케이스에 대해서 성형해석을 하고 시제품을 제작해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. One-step방법과 Incremental방법에 의한 성형해석을 해 본 결과, 성형 후의 제품에 대한 터짐과 주름의 구간, 두께변화, 성형한계도 등의 성형성을 가지적으로 쉽게 파악할 수 있었고, 초기 단계에서 제품 설계와 공법의 방향을 파악하고 금형수정 단계에서의 시행착오 횟수, 재료손실 및 개발시간의 절감이 가능했다.
2. One-step방법에 의한 해석 결과, 성형성분석에서 restraint conditions값이 증가할수록 터짐의 가능성이 증가하고, 반면에 주름의 가능성이 줄었으며 성형한계도 분석이 이를 뒷받침하고 있다. 이는 restraint conditions값의 증가로 인해 소재의 유입이 억제되었기 때문이고 정확도가 높은 Incremental방법의 결과와 비교했을 때, restraint conditions가 0.3일 때 Incremental방법의 결과와 가장 잘 일치한다.
3. 성형력 분석을 통해서 프레스 용량(각 최소 15 TON, 25 TON)을 결정할 수 있었고, skid line분석을 통해서 윤활장치의 설정이나 다이 반지름각의 증감 등의 정보를 설계와 공법에 적용시킬 수 있었다.

4. Incremental 해석 결과, 터짐의 가능성은 미비하나 외곽 플랜지(flange) 부위에서 주름의 발생이 예상되었고 실제 후공정인 트리밍(trimming)공정을 통해 제거될 것이기 때문에 문제가 없는 것으로 판단되며 시제품의 제작과 측정을 통해서 그 타당성을 검증하였다.

본 연구는 많은 장점에도 불구하고 상온 근방에서의 성형성이 나쁘기 때문에 널리 활용되지 못하고 있는 박판 마그네슘 합금에 대한 성형성을 성형해석 결과를 적용한 시제품의 제작을 통해서 알아보았다. 제작된 시제품의 형상이 육안으로 보아도 양호하였는데 그 이유는 사전 성형해석 결과가 설계와 공법에 반영되었기 때문이며 휴대전화 케이스와 디지털 카메라 케이스의 비교에서도 알 수 있듯이 성형해석에 사용된 형상이 자동차차체같이 크고 많은 곡면이 포함된 복잡한 형상이 아니라 상대적으로 작고 단순한 형상이기 때문이라 판단된다. 본 연구에서는 Incremental 방법에 의한 해석 결과로부터 예측된 제품 윗부분의 강성부족에 대한 실제 측정, Spring back 분석의 결과와 시제품의 각 부분의 실제 치수 측정을 통한 비교가 포함되지 않았다. 향후에 여건이 된다면 시제품의 각 부분에 대해서 강성과 spring back의 측정을 하여 성형해석 결과와 비교 분석을 할 예정이다. 그렇게 해서 얻어진 경험과 기술을 토대로 크고 복잡한 제품형상에 대해서도 적용할 수 있는 박판 마그네슘의 설계 및 공법, 기술을 개발하고자 한다.

Ⅶ. 참고문헌

- [1] 정동원, 양동열, “딥드로잉에서 박판두께를 고려한 블랭크홀딩력을 가하는 개선된 방법”, 자동차공학회 춘계학술대회 논문집, pp.89-96, 1995.
- [2] Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., “Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit / explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes”, J. Materials Processing Technology, vol.50, pp.39-53, 1995.
- [3] Jung, D. W. and Lee, S. J., “The determination of initial blank shape by using the one-step Finite Element Method and experimental verification”, Journal of Materials Engineering and Performance, vol.9, No.2, pp.183-192, April 2000.
- [4] Jung, D. W., “Static-Explicit Finite Element Method and its Application to Draw bead Process with Spring-back”, J. Materials Processing Technology, vol.128, pp.292-301, August 2002.
- [5] Jung, D.W. and Lee, S.J., “Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Processes by Using One-Step Finite Element Approach”, AFDM'99 International conference, Pusan, Korea, pp.523~528, September 1999.
- [6] 정동원, 송인섭, 양동열, 이장희, “유한요소법을 이용한 박판성형의 단면해석과 자동차 금형설계에의 응용”, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.380-383, 1992.
- [7] 조경철, “친환경 고기능 마그네슘 성형공정 및 부품제조기술 특허동향”, ‘국가연구개발 특허기술동향조사 사업’ 친환경 고기능 마그네슘 합금 성형공정 및 부품제조기술 분야의 연구기획시 특허동향조사 최종보고서’, 특허청, 2006년 4월.
- [8] 정동원, 고대림, “성형해석을 이용한 프론트 필라의 성형 공법 개발에 관한

- 연구”, 대한기계학회논문집, A권, 제32권, 제10호, pp.890-896, 2008년.
- [9] Hyung-Hoon Ko, Dong-Won Jung, Hyun-Gil Ahn, Chan-Ho Lee, Byung-II Ahn, Won-Sub Moon, “A Study of Tool Planning for Forming Analysis in REF SILL OTR-R/L Auto-Body Panel Stamping Process”, Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol.23, NO.3, March 2006.
- [10] 황재신, 정동원, 안병일, 문원섭, 박영근, “REF SILL OTR-R/L 차체판넬 스탬핑 공정에서 성형해석을 통한 공법개발에 관한 연구”, 한국소성가공학회 2004년 추계학술대회 논문집, pp.138-141, 수안보상록호텔, 2004년 10월.
- [11] 정동원, 이상제, 김귀식, “스탬핑 공정에 대한 One-Step Forming 유한요소 해석(One-Step Forming Finite Element Analysis on a Stamping Process)”, 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp.119-124, 1998.
- [12] Dong-Won Jung, Hyung-Hoon Ko, “A Study of formability according to Tailored Blank”, Bulletin of the Marine and Environmental Research Institute, Vol.29, No.1, June 2005.
- [13] 정동원, 양형일, 이승훈, “딥 드로잉 공정에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구”, 한국동력기계공학회지, 제7권, 제2호, pp.61-65, 2003년 5월.
- [14] 안현길, 고희훈, 이찬호, 안병일, 문원섭, 정동원, “One-Step Forming을 이용한 박판성형 해석에 관한 연구”, 한국소성가공학회 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp.419-422, 경상대학교, 2005년 5월.
- [15] Jung, D. W. and Yang, D. Y., “Step-wise combined implicit-explicit finite-element simulation of autobody stamping processes”, J. Materials Processing Technology, vol.83, pp.245-260, November, 1998.
- [16] Kyoung-Boo Yang. “Rigid-plastic Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process using Membrane, Shell and Continuum Elements”, master’s thesis, Cheju national university, Korea, 2000, 6.
- [17] Dong-Won Jung, Hyun-Gil Ahn, “Second-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-step Theory”, Journal of Research Institute of Advanced Technology Cheju National University, Vol.15, No.1, 2004.

- [18] G. E. Dieter, "금속 강도학", 사이텍미디어(회중당), pp.12-13, 1997. 02. 25.
- [19] H. G. Joeng, S. Choi, K. H. Na, "Plastic Forming Technologies of Magnesium Alloy", Transactions of Materials Processing, Vol.14, No.8, 20 05.
- [20] 全基濼, "박판금속의 성형-이론과 실제", 半島出版社, pp.179-204, 1993.
- [21] 김영석, "소성역학", 시그마프레스, pp.1-28, 2003. 03. 10.



감사의 글

아직도 많이 부족하지만 이 작은 학위논문 한편으로 짧았던 2년간의 석사과정을 마치려 합니다. 2년간 최선을 다했다고 감히 말할 수 없으며 이 작은 논문 한편이 대학원 생활의 전부를 대표할 수도 없지만 그간의 결실을 여러분들께 보여드릴 수 있음에 저는 행복합니다. 지난 2년간을 되돌아보면 일상의 소소한 기억마저도 지금의 저에게는 큰 의미로 다가오며 그 시간 속에서 제가 조금 더 성숙할 수 있었다고 생각합니다. 그동안 함께했던 많은 분들께 이렇게 감사의 마음을 전합니다.

이 논문이 완성되기까지 부족한 저에게 논문 지도와 더불어 학문적 지식을 가르쳐 주시고 이끌어 주신 정동원 지도교수님께 감사를 드립니다. 연구 활동으로 바쁘신 와중에도 논문을 심사해 주시고 조언을 해 주신 김귀식 교수님, 김상재 교수님께도 깊이 감사를 드립니다. 그리고 자주 뵙진 못했지만 저를 위해 사소한 것에도 관심을 가져주신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 언제나 밝은 미소로 저를 맞아주신 현명택 교수님, 박윤철 교수님 정말 감사합니다.

낮선 제주도에서 낯선 전공으로 공부함에 있어서 함께 했던 선·후배님들 특히 대학원에 같이 입학하여 수업도 듣고, 생활했던 동기 오현석, 김명근, 김현석, 고건혁, 고동관에게 감사의 마음을 전하며, 헤어짐이 있으면 또 다시 만남이 있기에 다시 만날 그날까지 항상 건강하고 원하는 일들을 이루시기 바랍니다.

월곡·화곡에서 직장생활을 하고 있는 신재성, 정의학, 만학도로서 공부하는 김도훈, 대학원 생활을 신경써준 조정우에게 고맙다는 말을 전합니다. 그 외에도 하나하나 친구들의 이름을 부르며 고마운 마음을 전하고 싶지만 이해해 주길 바라며, 다들 자신의 위치에서 최선을 다하는 모습으로 서로에게 귀감이 되었으면 좋겠습니다.

2년간 제 곁에서 항상 힘이 되어준 강혜림에게도 고마운 마음과 미안함, 그리고 사랑을 전합니다.

동생 영민, 영준에게 고맙다는 말과 자신의 위치에서 최선을 다하길 당부하며 끝으로 제가 가장 존경하고 사랑하는 부모님께 이 논문을 바칩니다. 항상 두 분이 건강하시길 바라며, 박사과정에서는 지금보다 가일층 노력하여 그 은혜에 보답하겠습니다.

