

# SP782-440재질을 사용한 REF SILL OTR-R/L 차체판넬 성형해석에 관한 연구

정 동 원\* · 황 재 신\*\*

## A Study of forming analysis of REF SILL OTR-R/L Auto-Body Panel by using SP782-440 material

Dong-Won Jung\* · Jae-Sin Hwang\*\*

### ABSTRACT

Finite element method is very effective method to simulate the forming processes with good prediction of the deformation behaviour. For the finite element modeling of sheet metal forming the accurate tool model is required. Due to the geometrical complexity of real-size part stamping tools it is hard to make FE model for real-size auto-body stamping parts. In this paper, it was focussed on the drawability factors on auto-body panel stamping by AUTOFORM with using tool planing alloy to reduce law price as well as high precision from Design Optimization of die. According to this study, the results of simulation will be a good information for engineers to access the Design Optimization of die.

**Key Words** : Finite element method, Auto-body panel stamping, Tool planing, Design optimization

### 1. 서 론

박판 금속성형은 금속 판재를 이용하여 다양하고, 비교적 복잡한 형상의 제품을 만드는 것으로서 저렴한 소재, 제품의 높은 비강도, 대량 생산성 등의 큰 장점으로 인해서 현대 산업에 폭 넓게 적용되어지고

있는 분야이다. 하지만 대부분의 박판 성형물은 제조 공정 중에 커다란 소성변형을 수반하게 되어 판재의 파단, 형상불량 등의 가공 결함이 발생하게 된다. 따라서 우수한 박판 성형물을 얻기 위해서는 합리적인 가공공정의 설계가 필수적이라 할 수 있다.[1-3]

Fig. 1과 같이 금형제작 과정은 차체부품의 최적설계를 위한 제품 솔루션을 한 후 현재제품상태에서 전개할 수 있는 최적의 공정계획, 제품물, 생산라인 LOAD'G조건, 성형성확보 방안 등을 제안한 다음 성형해석을 위한 제품 필렛팅, Die Modeling을 3차원 모델링한다. 다음으로 해석시스템을 직접 Operating 함으로써 실제 T/OUT 상황에서 발생하는 모든 변수

\* 제주대학교 기계·에너지·생산공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Mechanical, Energy & Production Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Techv.

\*\* 제주대학교 대학원  
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

들을 데이터 입력 시 고려하여 실제상황에 최대한 근접한 Virtual TRY-OUT을 구현할 수 있게 한 다음 초기공법계획에 성형해석시스템의 해석결과에 대한 기술적 대응방안을 사전에 반영함으로써 최적 DIE LAY-OUT을 완성한다.

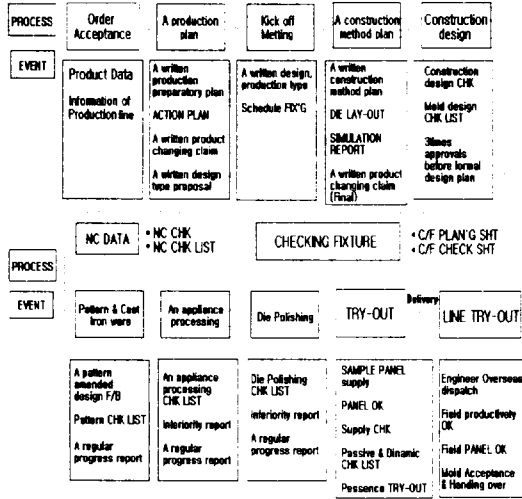


Fig. 1. Metallic mould manufacture process

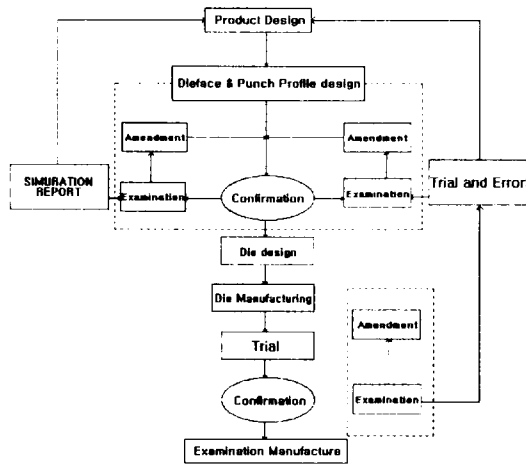


Fig. 2. Flow chart for die manufacturing

금형제작 과정과 마찬가지로 차체 판넬의 설계 제작 과정을 Fig. 2에서 살펴보면, 제품도가 완성된 후

에 펀치 프로파일과 다이 페이스를 얻기 위해서는 경험에 의한 데이터베이스를 이용하는 방법과 성형 시뮬레이션을 이용하는 두 가지 방법이 있다. 그러나 현재로서는 경험에 의한 설계가 지배적이며, 향후에는 성형 시뮬레이션으로 점차 변경 될 것으로 예상된다. 이러한 두 방법은 모두 수정과 검토 반복 작업이 이루어진다. 따라서 레이아웃의 변경에 따라, 금형 설계의 변경이 신속히 이루어져야한다.[4-9]

본 논문에서는 실제 산업현장에서 사용되는 차체판넬 스텝핑 공정의 유한 요소 해석에 있어서 중요한 과정의 하나인 금형형상의 모델링과 관련하여 최적의 공법을 적용하여 성형 해석하였다. 해석결과로부터 본 공법의 정확성과 실제 산업현장에서의 적용가능성 및 타당성을 검토하고자 한다.

## II. 본 론

### 2.1. 탄소성 구성방정식

변형된 물체는 Fig. 3과 같이 3차원 공간에서 고려해 볼 수 있다. 단계적 과정(step-by-step procedure)으로 비정상상태 변형을 해석하는데 있어, 시간  $t_0$ 에서  $t_0 + \Delta t$ 까지 1 스텝 동안의 변형을 고려하자. Fig. 3에서  $\theta^1$ 과  $\theta^2$ 축을 박판표면의 절점 좌표계(convected coordinates)를 나타내고,  $\theta^3$ 축은 박판표면에 법선방향으로 주어진다.  $G_{\alpha\beta}$ 와  $g_{\alpha\beta}$ 는 변형전과 변형 후 형상의 행렬텐서를 나타내고,  $G^{\alpha\beta}$ 와  $g^{\alpha\beta}$ 는 각각의 역행렬을 나타낸다. 변형전의 형상에서 기본 벡터(base vector)들은  $E_\alpha$ 와 그 역인  $E^\alpha$ 로 나타내었다. 마찬가지로, 변형된 물체에서의 기본 벡터들은  $e_\alpha$ 와 그 역인  $e^\alpha$ 로 표시하였다.

$$E_\alpha = \frac{\partial X}{\partial \theta^\alpha} \quad , \quad e_\alpha = \frac{\partial x}{\partial \theta^\alpha} \quad (1)$$

$$G_{\alpha\beta} = E_\alpha \cdot E_\beta \quad , \quad g^{\alpha\beta} = e_\alpha \cdot e_\beta \quad (2)$$

$$E^{\alpha\beta} = G^{\alpha\beta} E_\beta \quad , \quad e^\alpha = g^{\alpha\beta} e_\beta \quad (3)$$

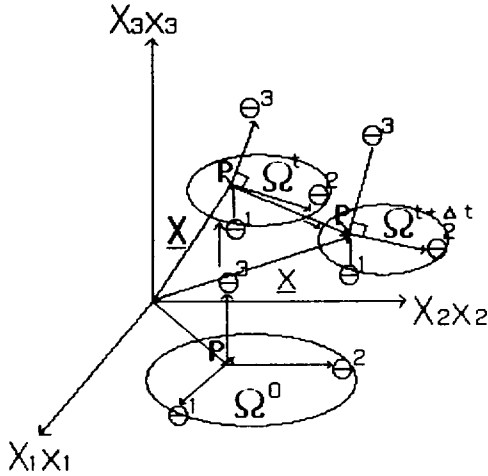


Fig. 3. Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터  $u$ 는

$$u = u^a E_a = u_a E^a = u_i E^i \quad (4)$$

여기에서  $u = G^{ab} u_b$ 이다. 그리스 지수들은 질점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular Cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 라그랑지언 변형율 텐서(Lagrangian strain tensor)  $\epsilon$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{ab} E^a E^b = \epsilon^{ab} E_a E_b \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{ab} &= \frac{1}{2} (g_{ab} - G_{ab}) \\ &= \frac{1}{2} (u_{a,b} + u_{b,a} + u^{\gamma}_{,\alpha} u_{\gamma,\beta}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 콤마는 변형되지 않은 행렬에 관하여 공변 미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지언 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{a\beta} = e_{a\beta} + \eta_{a\beta} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } e_{a\beta} = \frac{1}{2} (u_{a,\beta} + u_{\beta,a}),$$

$$\eta_{a\beta} = \frac{1}{2} \tau_{,\alpha} u_{\gamma,\beta}$$

대변형(large deformation)을 고려한 개정 라그랑지언 방정식은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{V^0} \Delta S^{ab} \delta e_{ab} dV + \int_{V^t} \tau^{ab} u^k_{,\alpha} \delta u^k_{,\beta} dV \\ &= \int_{S^t} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식의 자세한 유도과정은 Shin과 Yang [10]의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 라그랑지언 변형율과의 관계식으로 주어졌다면,

$$\Delta S^{ab} = L^{ab\gamma\rho} e_{\gamma\rho} \quad (9)$$

식(9)에 관한 자세한 수식화도 Shin과 Yang의 논문[10] 부록에 수록되어 있고, Hill의 이방성 항복함수(anisotropic yield function)를 만족하는 정상상태이고 일관성을 유지하는 구성텐서의 성분  $L^{ab\gamma\rho}$ 은 기존의 논문[11-12]에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과 (9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\begin{aligned} & \int_{V^0} L^{ab\gamma\rho} e_{ab} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V^0} \tau^{ab} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^a} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^b} dV \\ &= \int_{S^t} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \end{aligned} \quad (10)$$

2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 성분들은 질점좌표계에서의 Kirchhoff 응력텐서 성분과 같으므로 응력 적분과정은 질점좌표계로 변형을 묘사하였을 경우가 다른 좌표계와 비교해 볼 때 매우 간단함을 알 수 있다. 변위증분들의 근사값은 (10)식을 사용하여 계산되고  $t_0 + \Delta t$ 시간에 상당하는 응력성분은 (9)식을 사용하여 구할 수 있다.

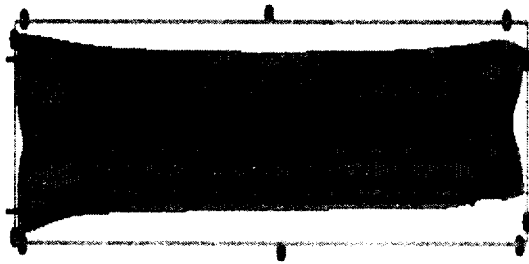
$$(S^{ab})^{(t_i + \Delta t)} = (S^{ab})^{t_i} + \Delta S^{ab} \quad (11)$$

$$(\tau^{ab})^{(t_i + \Delta t)} = (S^{ab})^{(t_i + \Delta t)} \quad (12)$$

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 응력텐서 Kirchhoff  $\tau$ 는 응력텐서 Cauchy  $\sigma$ 와 같다고 놓을 수 있다.

### III. 성형해석 결과

#### 3.1. SP790-590성형해석



Model = QW  
 P/Name= REF SILL OTR-R/L  
 Application = AutoForm(B/H+DR)  
 Material = SP780-590  
 Thickness = 1.6  
 Binder Pressure = 90 TON  
 Drawing Pressure = 1060 TON  
 Blank Size : 1995mm X 390mm

Fig. 4. The first input condition

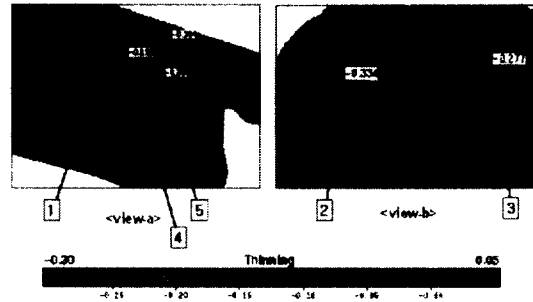
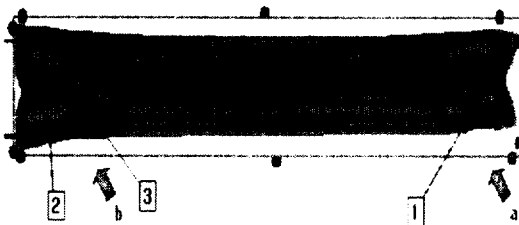


Fig. 5. Thickness reduction

Fig. 5를 보면 두께감소로 인한 부적합한 곳은 3부분이 있다. 3부분을 상세하게 나타낸 결과 <view-a> 부분 <1>부분에서는 두께감소는 50%이상이며 하사점 60mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. <4>부분에서는 두께감소는 29.3%이상이며 하사점 55mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. 추가적으로 <5>부분에서는 두께감소는 30.9%이상이며 하사점 1mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. <view-b>에서 <2>부분에서는 두께감소는 33.4%이상이며 하사점 1mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. <3>부분에서는 두께감소는 27.7%이상이며 하사점 0.5mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다.

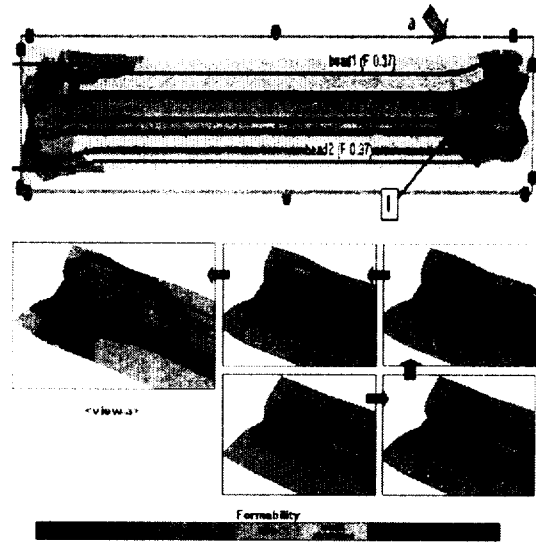


Fig. 6. Wrinkling

주름이 발생하는 부분은 1부분이다. 주름은 하사점 3mm에서부터 생긴다.

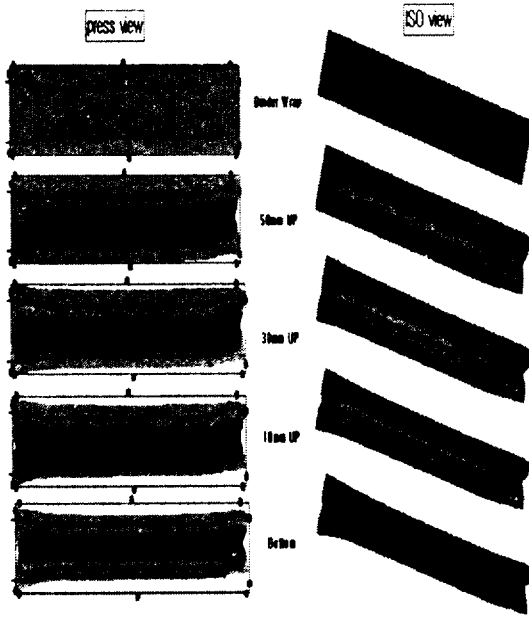


Fig. 7. Step picture(press view)

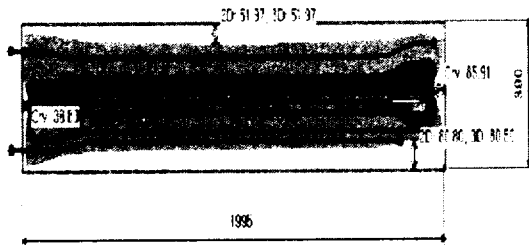
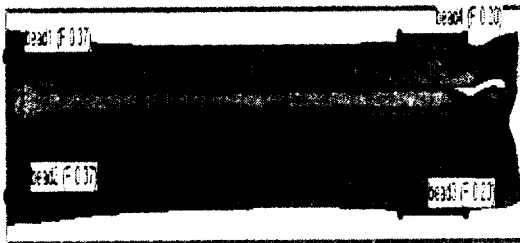


Fig. 8. Blank size & Metal flow

본 결과는 초기단계에서 성형해석을 한 결과이다. 즉, 재질이 정해지지 않은 상태에서 가해석한 결과이다.

### 3.2. SP782-440 1.8t 성형해석



Model = QW  
 P/Name= REF SILL OTR-R/L  
 Application = AutoForm(B/H+DR)  
 Material = SP782-440  
 Thickness = 1.8  
 Binder Pressure = 70 TON  
 Drawing Pressure = 1000 TON  
 Blank Size : 1970mm X 350mm

Fig. 9. The second input condition

최소한의 실험을 통해 최적설계를 하기 위해 재질이 정해지지 않은 가해석한 결과를 통하여 재질을 정하고 두께의 변화를 통한 성형해석 한 결과이다.

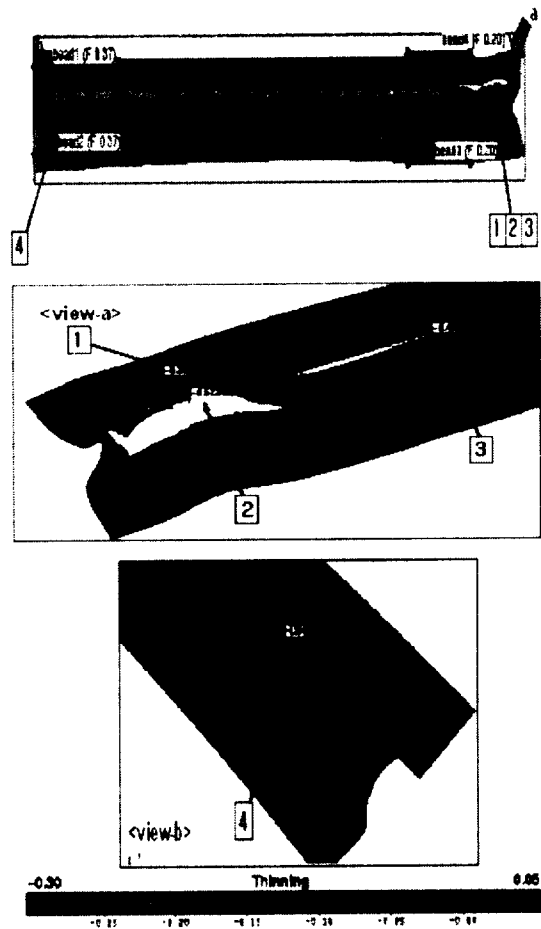


Fig. 10. Thickness reduction

Fig. 10을 보면 두께감소로 인한 부적합한 곳은 4부분이 있다. 4부분을 상세하게 나타낸 결과 <view-a>부분 <1>부분에서는 두께감소는 36.2% 이상이며 하사점 81mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. <2>부분에서는 두께감소는 50% 이상이며 하사점 81mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. 추가적으로 <3>부분에서도 마찬가지로 두께감소가 50% 이상이며 하사점 2mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다.

<view-b>에서 <4>부분에서는 두께감소는 35.4% 이상이며 하사점 1mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다.

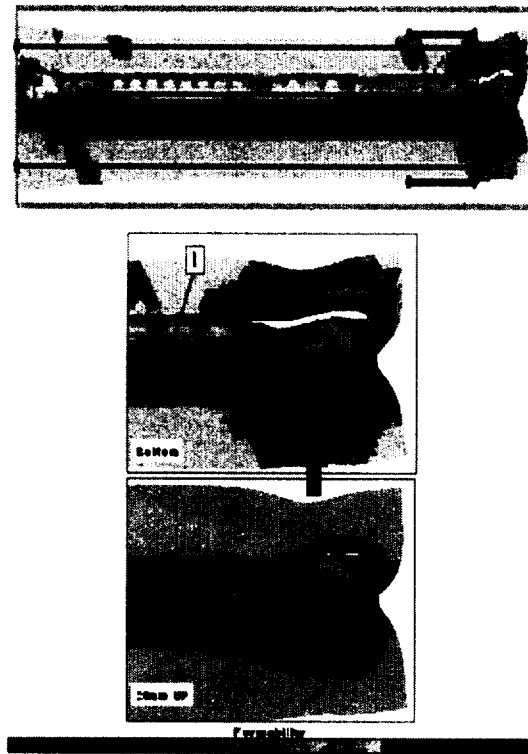


Fig. 11. Wrinkling

주름이 발생하는 부분은 1부분이다. 주름은 하사점 20mm에서부터 생기며 Fig. 10에서 보는 바와 같이 파단으로 인한 주름이 심해지고 있다.

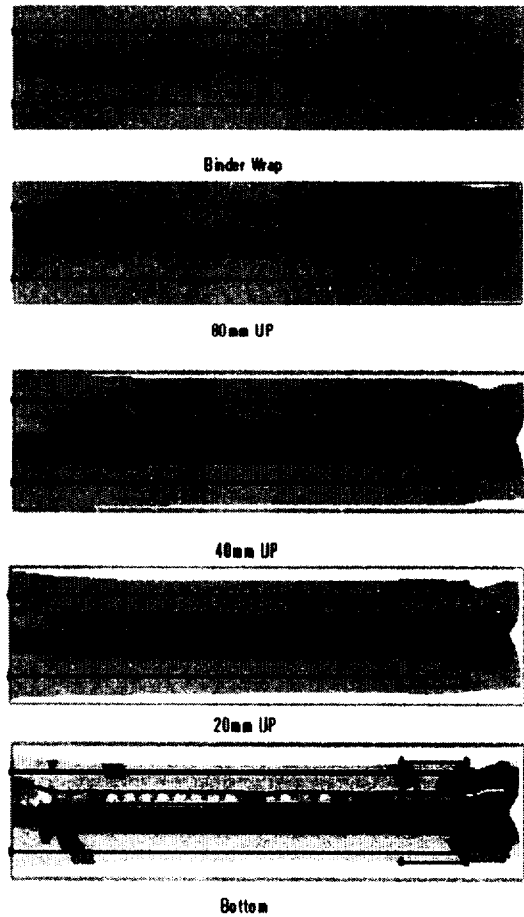


Fig. 12. Step picture (press view)

펀치행정에 따른 판넬의 성형 과정을 나타낸 결과로부터 알 수 있듯이 파단과 주름의 문제가 심각하다.

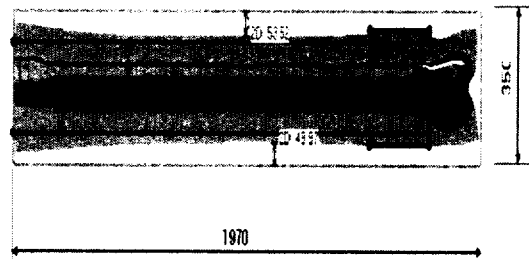


Fig. 13. Blank size & Metal flow

### 3.3. SP782-440 2.0t 성형해석

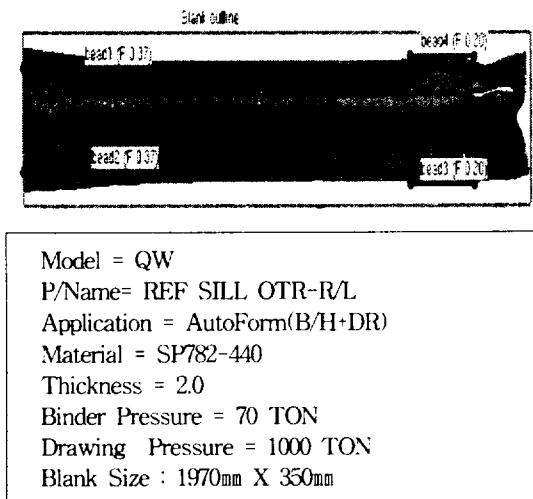


Fig. 14. The third input condition

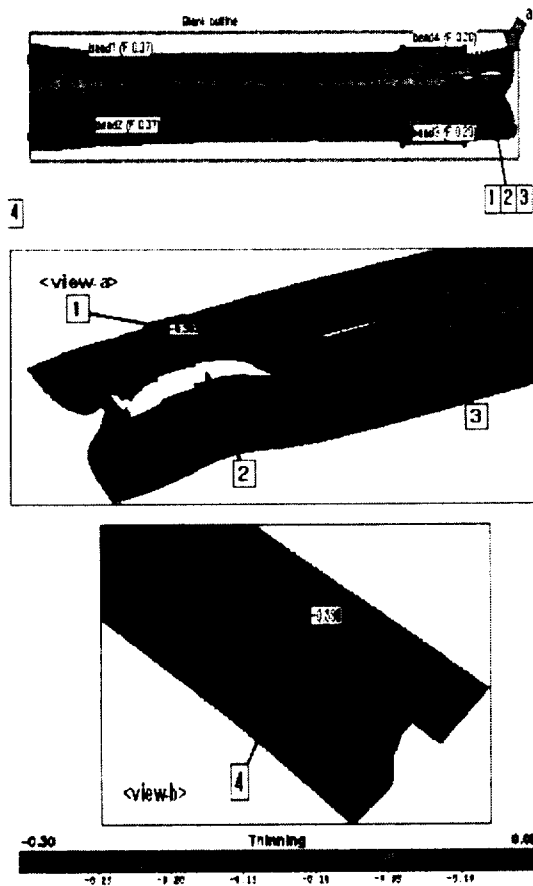


Fig. 15. Thickness reduction

Fig. 15를 보면 SP782-440 1.8t와 마찬가지로 두께 감소로 인한 부적합한 곳은 4부분이 있다. 4부분을 상세하게 나타낸 결과 <view-a>부분 <1>부분에서는 두께감소는 35.8%이상이며 하사점 78mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. <2>부분에서는 두께감소는 50%이상이며 하사점 55mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다. 추가적으로 <3>부분에서도 마찬가지로 두께감소가 50%이상이며 하사점 2mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다.

<view-b>에서 <4>부분에서는 두께감소는 39.8% 이상이며 하사점 1mm에서 파단(25%)이 일어나기 시작한다.

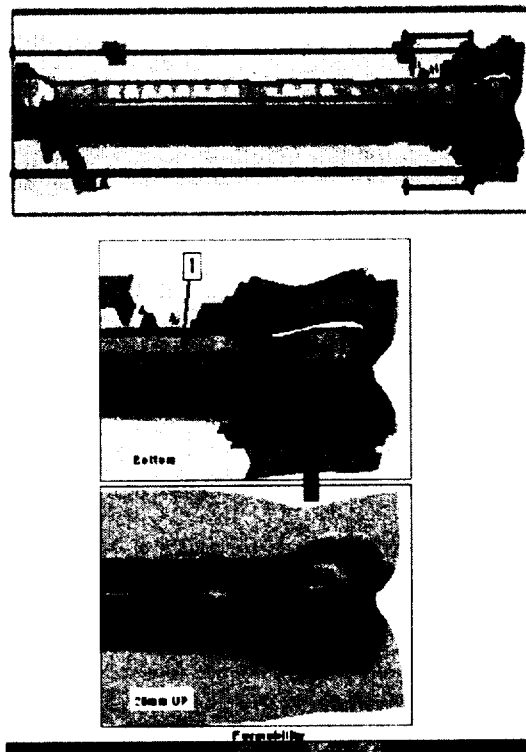


Fig. 16. Wrinkling

주름이 발생하는 부분은 1부분이다. 주름은 하사점 20mm에서부터 생기며 여전히 파단과 주름의 문제는 생긴다. 재질의 변경이 바람직할 것으로 짐작된다.

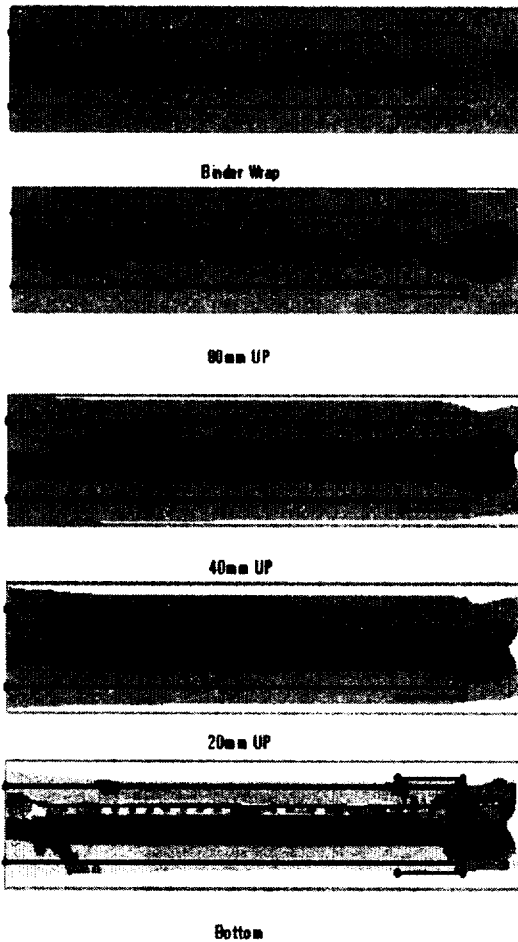


Fig. 17. Step picture(press view)

재질의 두께를 1.8t에서 2.0t로 조정된 것이 파단과 주름의 문제는 조금 나아졌지만 여전히 심각하다.

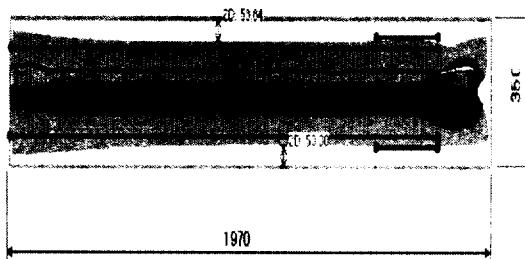


Fig. 18. Blank size & Metal flow

#### IV. 결 론

본 연구에서는 실제 산업현장에서 사용되어지는 차체 판넬 스탬핑 공정에서의 금형최적설계를 위한 두께감소율과 주름경향을 해석 한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수가 있다.

1. 성형성을 개선하기 위해 같은 재질에 두께를 변경하였지만 그 부분의 파단과 주름이 조금 완화는 되었지만 여전히 문제가 되었다.
2. 파단과 주름 때문에 두께를 변경하였지만 파단과 주름부분은 현재의 재질인 SP782-440에 안진한 성형성을 갖지 못한 결과를 보였다.
3. 위의 성형 해석결과들로부터 초기 시도 재질인 SP783-590에 대한 결과가 SP782-440인 재질과 비교하여 좋지 않은 결과가 나타나서 새로운 재질로의 변경이 불가피함을 알 수 있다.
4. 원활한 금형제작을 위해서는 각 제작공정의 고유기술과 더불어 적시에 적절한 업무를 투입시킬 수 있는 Project 관리기술이 뒷받침 되어야 하며 각 Project 고유의 Action Plan을 기획, 이에 준한 업무를 추진함으로써 제작기간 중 발생할 수 있는 모든 종류의 리스크를 최소화하기 위한 해석공법의 개발이 절실하다.

#### 참고문헌

- 1) 정효상, 이성수, 2002, 자동차 프레스 금형 자동 설계지원시스템, 한국정밀공학회 vol.19, no.8, pp. 194-202.
- 2) 정동원, 안동규, 양동열, 이장희, 1995, 강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석, 자동차공학회 vol.3권 no.3, pp. 19-28.
- 3) 정동원, 2001, 평형해법을 이용한 트렁크 리드의 단면해석과 3차원 형상합성, 한국해양공학회 vol.15, no.2, pp. 66-71.
- 4) D. W. Jung, D. J. Yoo and D. Y. Yang, 1995, A dynamic explicit/rigid-plastic finite element



- formulation and its application to sheet metal forming processes, *Engineering Computations*, vol.12, 707-722.
- 5) D. W. Jung, I. S. Song and D. Y. Yang, 1995, An improved method for application of blank holding force considering sheet thickness in deep drawing simulation of planar anisotropic sheet, *J. Materials Processing Technology*, vol. 52, 472-488.
  - 6) D. W. Jung, D. J. Yoo and D. Y. Yang, 1995, A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, *Engineering Computations*, vol.12, 707-722.
  - 7) H. S. Lee, D. W. Jung, J. H. Jung and S. Y. Im, 1994, Finite element analysis of lateral buckling for beam structures, *Computers & Structures*, vol.53, 1357-1371.
  - 8) D. W. Jung and D. Y. Yang, 1998, Step-wise combined implicit-explicit finite-element simulation of auto-body stamping processes, *J. Materials Processing Technology*, vol.83, 245-260.
  - 9) D. W. Jung, 1998, Study of dynamic explicit analysis in sheet metal forming processes using faster punch velocity and mass scaling scheme, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol.7, no.4, 479-490.
  - 10) H. B. Shin and D. Y. Yang, 1990, An Elastic-Plastic Finite Element Analysis on Hydrostatic Bulging of Rectangular Diaphragms by using Layered Degenerated Shell Element, *Int. J. Mech. SDI*, Vol. 32, pp. 49-64.
  - 11) N. M. Wang and S. C. Tang, 1988, Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations, *Int. J. for Num. Mech. in Engng.*, vol. 25, pp. 253-367.
  - 12) K. Mattiason, 1985, Numerical Simulation of Stretching Processes, SIMOP-I, Editor Lange, K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart,

170-213.