

碩士學位論文

One-Step 유한요소법의  
현장적용가능성에 관한 연구



濟州大學校 大學院

機械工學科

安 鉉 吉

2005年 12月

# One-Step 유한요소법의 현장적용가능성에 관한 연구

指導教授 鄭東垣

安鉉吉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 12月



安鉉吉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印


濟州大學校 大學院

2005年 12月

A Study on the Possibility of Spot Application for  
One-Step Finite Element Method

Hyun-Gil Ahn

(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

November 2005

# 목 차

NOMENCLATURE .....	ii
SUMMARY .....	iii
I. 서 론 .....	1
1. 1 연구의 개요 .....	1
1. 2 연구의 목적 .....	4
II. One-Step 성형 이론 및 One-Step 해석소프트웨어 개발 .....	7
2. 1 블랭크 선정을 위한 초기 추측값 .....	7
2. 2 이론적 수식화 .....	8
2. 3 수치해석 결과 .....	12
III. Auto-Form을 사용한 성형해석 결과 .....	16
3. 1 WHL_HSE_INR_PRT 차체판넬 성형해석 .....	16
3. 1. 1 One-Step & Incremental 성형해석 결과 비교의 고찰 .....	21
3. 2 CM_RF_CTR_PLR 차체판넬 성형해석 .....	21
3. 2. 1 One-Step & Incremental 성형해석 결과 비교의 고찰 .....	26
3. 3 B_Pillar 차체판넬 성형해석 .....	26
3. 3. 1 One-Step & Incremental 성형해석 결과 비교의 고찰 .....	31
3. 4 Tailgate 차체판넬 성형해석 .....	31
3. 4. 1 One-Step & Incremental 성형해석 결과 비교의 고찰 .....	36
IV. 결론 .....	37
V. 참고문헌 .....	38

# NOMENCLATURE

- $F$  : 변형구배(deformation tensor)
- $C$  : Cauchy-green
- $X_i$  : 초기 형상에서의 절점 좌표(nodal coordinate in the initial state)
- $r$  : 수직 이방성 계수(normal anisotropy)
- $n$  : 가공 경화 지수(strain hardening exponent)
- $M$  : Hill의 신 항복이론 지수(index used in Hill's new yield criterion)
- $K$  : 접선 강성 계수(tangential stiffness)
- $\dot{\bar{\epsilon}}$  : 유효 변형률 속도(effective strain rate)
- $\bar{\epsilon}$  : 유효 변형률(effective strain)
- $\epsilon_i$  : 대수 변형률(logarithmic strain)
- det : Determinant

# SUMMARY

Sheet Metal Forming Manufacturing Process is a process of producing the final product of complex geometry by plastic manufacturing of sheet metal and has several applications so that it can be used in automotive, aerospace, electric and electronic industry. Among finite element methods, incremental finite element method which is the most used in sheet metal forming is an analysis method of reducing step size of forming process and is also accurate method to see all medium path of deformation history. However it is difficult to use and takes many times to analysis. To improve the problems of these incremental finite element method, one-step finite element method using plastic deformation theory is developed. This method solves the problems assuming only one step deforms directly from initial blank to final shape. Even though it has a problem to predict of accurate solution because of omitting medium process, One-step method has an advantage of time saving. And in design step, trial and error can be reduced by obtaining necessary information in fast time applying one-step finite element method. Also after predicting initial blank, it can reduce the time and cost of trimming. In this study One-step method having several features in initial manufacturing design stage is compared with incremental method and the result of this analysis is discussed.

# I. 서 론

## 1. 1 연구의 개요

박판 금속 성형(sheet metal forming)가공은 박판을 소성 가공하여 복잡한 기하학적 형상의 최종 제품을 생산하는 공정으로 자동차 산업, 항공기 산업, 전기 및 전자 산업 등 그 응용이 매우 다양하다. 또한 타 가공 공정에 비하여 최종 제품이 경량이고, 낮은 제조 원가와 양호한 표면 가공 및 높은 정밀도 등 생산성이 높으며, 부품으로서의 호환성이 뛰어나다. 단순한 판재를 이용하여 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 프레스와 같은 소성 기계를 비롯하여 다이(die), 펀치(punch), 그리고 블랭크홀더(blank holder) 장치 등이 필요하다. 박판성형가공 공정은 굽힘(bending), 인장 성형(stretching), 딥드로잉(deep drawing), 전단(shearing), 또는 이들의 조합으로 성형가공되며, Fig. 1과 같이 제품도가 완성된 이후 펀치 프로파일과 다이 페이스를 얻기 위해 경험에 의한 데이터베이스를 이용하는 방법과 성형 시뮬레이션을 이용하는 두 가지 방법이 사용되고 있다. 박판 성형 공정은 CAD에 의한 금형설계, CAM에 의한 금형가공, 트라이아웃(try-out), 금형의 검사에 이기까지 computer system의 도움으로 금형생산의 효율화가 급속히 진행되고 있으며 또한, 공작기계에서도 정밀도가 크게 향상되어 최근에는 기계가공 시점에서 금형의 완성도가 대폭 향상되고 있다.

그러나 프레스 성형기술은 기존의 경험을 바탕으로 한 성형 knowhow가 CAD와 조합되기 때문에 각 제품마다 최적설계를 할 수가 없으며, 따라서 실제의 성형단계, 특히 드로잉단계에서 균열, 주름등의 불량이 자주 발생되고 있다. 이 때문에 품질상 문제가 없는 제품을 성형하기 위해 try-out단계에서 수작업에 의한 금형수정을 반복함으로써 try-out기간이 금형제작 기간의 약 50%이상을 차지하고 있다. 따라서

try-out시의 금형수정시간을 단축시키는 것이 금형제작 시 큰 과제가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하고 고품질의 프레스가공품을 양산할 수 있는 고정밀, 고품질의 금형을 짧은 기간 내에 준비하기 위해서는 그 동안의 경험에 의존하던 생산기술의 연장선상에서 생각하는 것은 곤란하다. 1970년대 이후 다음과 같은 문제를 해결하기 위하여 수치적 방법(numerical method)인 유한요소법(finite element method)에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근 ABAQUS, LS-dyna3d, PAM-STAMP, AUTO-FORM등과 같은 다양한 상용 프로그램이 개발되었다. Fig. 2는 차체판넬의 가상 성형공정을 위한 다이, 펀치, 블랭크, 블랭크 홀더가 사용된 tool setting 상태를 보여주고 있다. 유한요소해석을 이용하여 미리 수행된 가상 성형공정은 금형개발비, 개발투자비를 절감시킬 수 있으며 제품을 직접 성형하지 않고도 사전에 제품의 변형률 분포라든지, 잔류응력, 성형성 평가 등을 알아볼 수가 있다. 박판 성형공정이 대변형을 수반한 비선형 문제인 만큼, 아직도 공정을 완전하게 예측하기에는 무리가 있지만, 직접 산업현장에 이용될 수 있을 정도의 유용한 정보는 유한요소법을 이용하여 예측이 가능해졌다.[1-5]



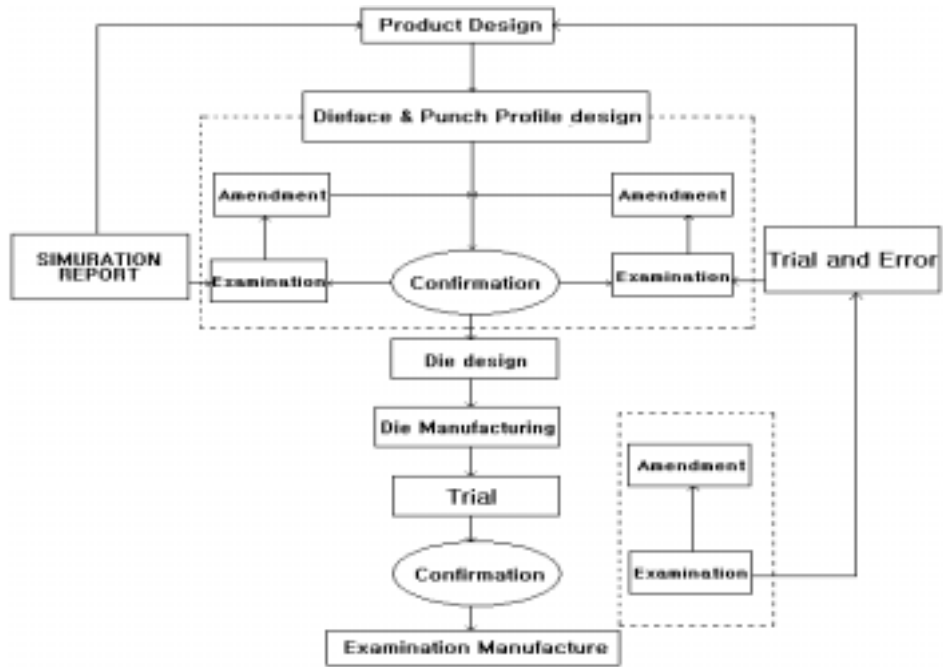


Fig. 1 Flow chart for die manufacturing

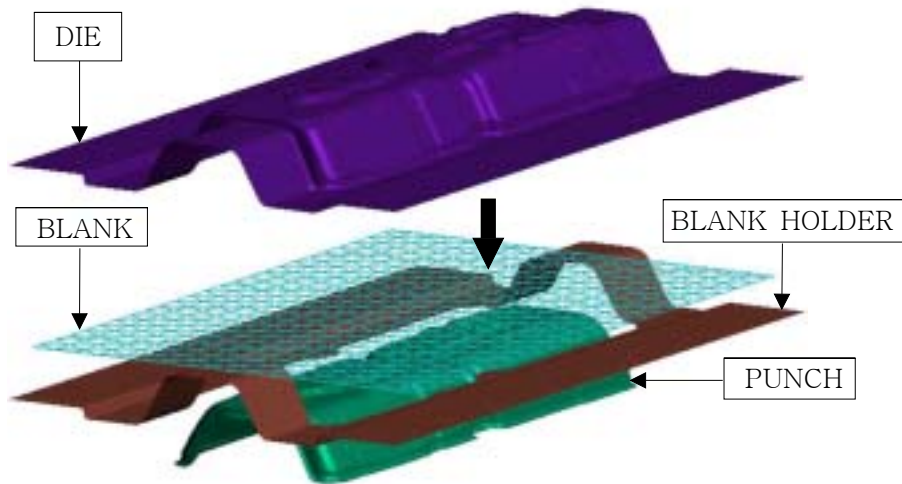


Fig. 2 Example of sheet metal forming process

## 1. 2 연구의 목적

여러 유한요소해석 방법 중에 박판금속성형에 대표적으로 사용되는 증분 유한요소 방법(Incremental FEM)은 성형공정의 스텝 크기를 매우 작게 하면서 해석해 가는 방법으로써 변형이력 등 중간경로를 모두 파악해 볼 수 있는 매우 정확한 방법이다. 그러나 사용하기가 어렵고 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있어 짧은 리드타임(lead time)을 요하는 설계공정에 적용하기에는 적합치 못하다. 다시 말하자면, 유한요소 해석에 있어서 성형가능 해석은 제품과 공정설계(product and process design) 동안에 반복적이고 상호작용적으로 수행되어지는데, 전통적인 증분 해석은 그 사용의 어려움과 계산시간의 과다로 인해서 생산단계(production stage)에서 문제조정 과정(trouble shooting process)에 그리 만족할 만한 성과를 가져다주지 못했다. Fig. 3은 제품설계단계의 cost pyramid를 보여주고 있으며 초기제품설계단계에서 최종단계로 진행함에 따라 try-and-error에 의한 시간과 비용의 증가상태를 보여주고 있다. 이러한 상황은 실제현장에 실제로 목격되어지고 있으며 설계 공정에서의 시간과 비용을 줄이기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

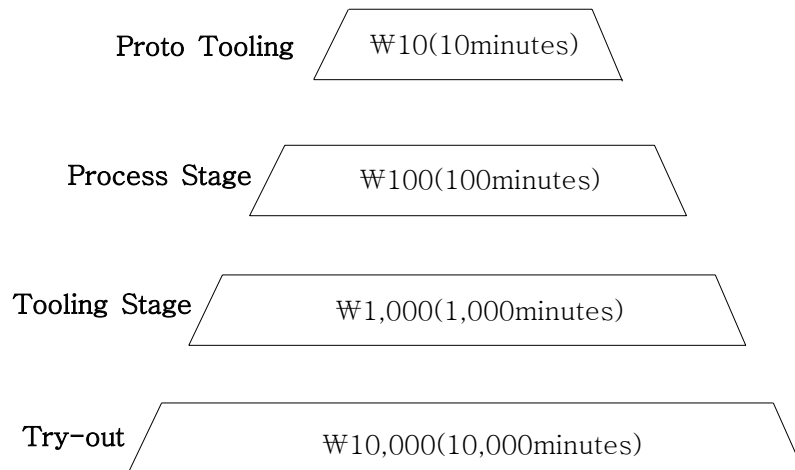


Fig. 3 Cost pyramid

증분유한요소법의 문제점을 개선하고자 개발된 것이 소성 변형이론을 사용한 One-Step 유한요소법으로써 이 방법은 초기 블랭크에서 최종형상까지 단, 한 단계만으로 직접 변형된다고 가정하여 처리한 것이다. 중간과정을 무시했기 때문에 정확한 예측을 하기에는 문제가 있지만, 성형해석시간이 매우 빠른 장점을 가지고 있다. Fig. 4는 One-Step유한요소법을 이용한 성형해석과정을 보여주고 있다. Fig. 5에서는 제품 설계 단계에서 One-Step 유한요소법이 적용되는 것을 나타내며 이러한 방법은 빠른 시간 안에 필요로 하는 정보를 얻음으로써 try-and-error를 줄일 수가 있다.

One-Step 유한요소법에 대한 연구로는 초기에 E. Chu[6], S. A. Majlessi[7] 등이 형상 사상 기술을 이용하여 선대칭 딥 드로잉 과정을 해석하기 위해 이 방법을 이용하였고 최근에는 J. L. Batoz[8], S. D. Liu[9-10], K. Chung[11]등에 의해서 여러 가지 성형조건을 고려할 수 있게 되었다. 또한 One-Step 해석 방법을 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 펀치의 하중이 적게 들고, 두께 분포가 균일한 양질의 제품을 얻을 수가 있다. 이러한 초기공정 설계 단계에서 여러 특징을 가지는 One-Step해석방법에 대해 정확한 해를 구할 수 있는 증분해석방법을 비교 또는 적용 시켜봄으로써 실제 현장에 적용 시 기존방법보다 어떠한 상승효과를 가져오는지 본 연구에서 그 결과를 알아보려고 한다.

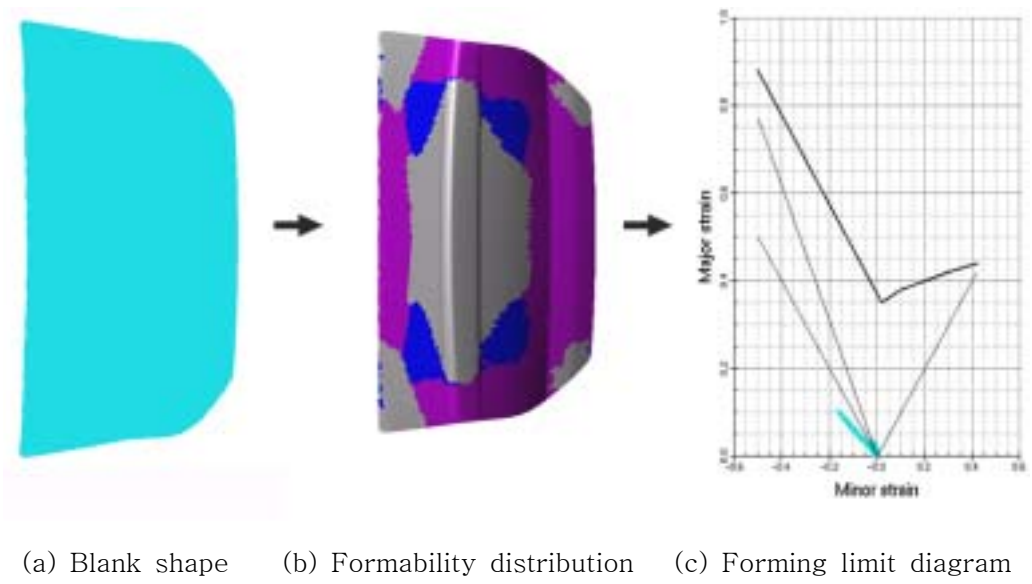


Fig. 4 One-step FEM process

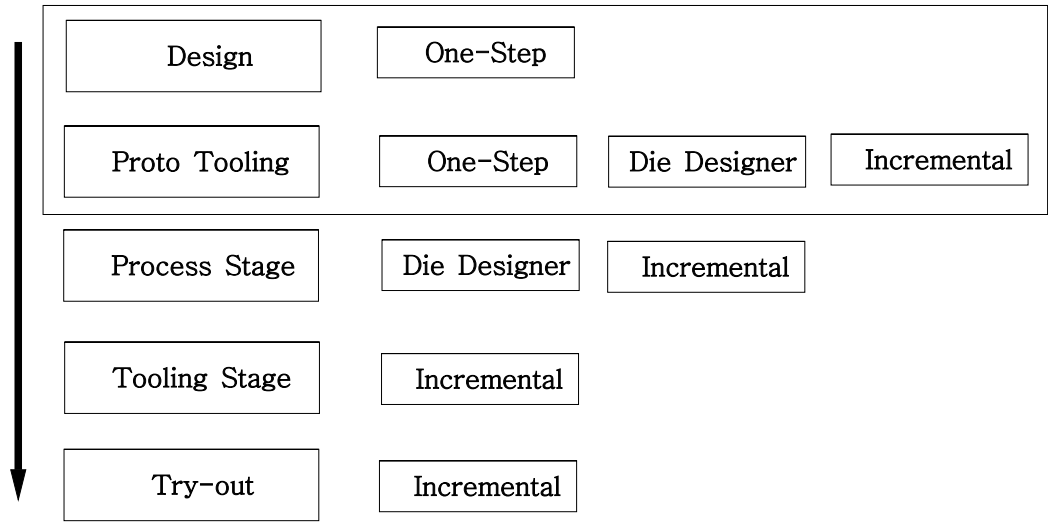


Fig. 5 The application Module of one-step FEM process

## II. One-Step 성형 이론 및 One-Step 해석소프트웨어 개발

### 2. 1 블랭크 선정을 위한 초기 추측값

초기 블랭크의 형상이 최종형상과 큰 차이를 가지고 있고, One-Step 역해석이 비선형 해석이기 때문에 초기 블랭크의 형상을 계산하기 위해서는 먼저, 블랭크 형상에 관한 초기 추정값이 필요하다. 초기 추정값을 구하는 방법은 다양한 방법이 가능하다. 주어진 문제의 형태에 따라 적절한 방법을 선택하면 되는데, 여러 가지 경우를 조합하여 추정값을 구할 수도 있다.

먼저, 가장 쉽게 구할 수 있는 Fig. 6 에서의 연직투사법(z-projection)[12]을 이용할 수 있다. 이 방법은 최종형상 위의 모든 절점에 대해서 높이를 제로(zero)로 주어 평면에 투영하는 것이다. 벽면이 거의 수직인 경우는 형상 위에 있는 절점들이 서로 겹치게 되므로 전체적인 요소의 크기와 형태에 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 벽면이 수직하지 않고 경사가 완만하며, 곡면이 많은 경우에 주로 이용되고 있다.

또 다른 방법으로는 'geometric mapping method'라 불리는 기하학적 사상법[13]이 있다. 이 방법은 최종형상의 면적을 동일하게 평면으로 펼치는 방법으로, 벽면이 수직이든 아니든 구애를 받지 않는다. 이를 이용하여 구한 사각형 컵의 블랭크 형상을 Fig. 7 에 나타내었다. 사각형 컵은 X 및 Y 축에 대하여 대칭이므로 전체형상의 1/4 부분만을 대상으로 계산하였다. 이 외에도 현장에서 계산에 의한 설계방법[14]이나 최종형상을 탄성적으로 평면에 펼쳐서 변형률을 고려해 주는 선형 역사상법 등 다양한 초기 추정방법들이 있다.

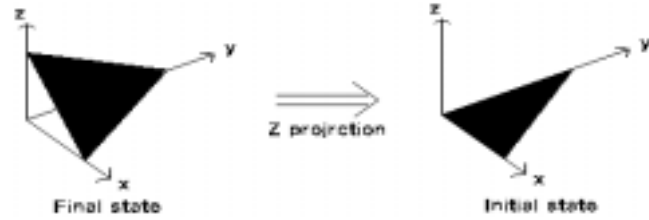


Fig. 6 Transformation of element from the final state to the initial state

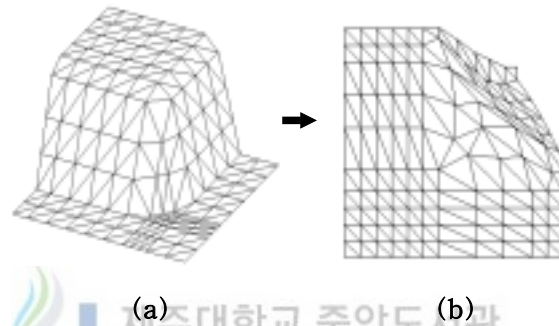


Fig. 7 The blank shape of a square cup using the geometric mapping method

(a)schematic view of the square cup (b)calculated initial blank shape

## 2. 2 이론적 수식화


초기 블랭크 설계를 위해 사용한 프로그램은 선형 삼각형 박막요소를 이용한 한 스텝(one-step) 강소성 유한요소법을 이용하였다. 여기서 기본적으로 고려된 사항으로는 우선, 변형 경로를 고려하지 않고 초기형상과 결정된 최종형상만을 고려하였다. 그리고 포텐셜 에너지가 최소화 되는 상태로 초기형상에서 최종형상으로 변형한다고 가정을 하고 초기 블랭크의 형상을 계산하였다. 이론적인 배경으로는 1979년 Hill의 이방성 이론[14]과 Hencky의 전변형률 이론을 이용하여 재료의 거동을 나

타내었다. 그리고 본 해석에서는 마찰과 비드력 등은 고려하지 못했다.

수식화에는 변형률식을 단지 좌표의 함수로 쉽게 표현할 수 있는 삼각형 박막요소를 택하였는데, Fig. 8 에서처럼 초기상태의 삼각형 요소는  $G_{2i}, G_{3i}$ 의 벡터로 표현되며 최종상태의 삼각형 요소는  $g_{2i}, g_{3i}$ 의 벡터로 표현할 수 있다. 여기서 첨자 2, 3은 삼각형 요소의 변을 의미하며, 첨자  $i$ 는 좌표계의 성분을 나타낸다. 두 쌍의 벡터 ( $G_{2i}, G_{3i}, g_{2i}, g_{3i}$ )를 이용하여 변형구배  $F$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= g_i \cdot G_i^{-1} \\ &= \frac{1}{\det} \begin{bmatrix} g_{21} & g_{31} \\ g_{22} & g_{32} \\ g_{23} & g_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_{32} & -G_{31} \\ -G_{22} & G_{21} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.1)$$

여기서,  $\det = G_{21}G_{32} - G_{31}G_{22}$  이고, 두 벡터는



$$\begin{aligned} [G_i] &= [G_{21} \ G_{22} \ G_{31} \ G_{32}]^T \\ &= [X_3 - X_1 \quad Y_3 - Y_1 \quad X_2 - X_1 \quad Y_2 - Y_1]^T \\ [g_i] &= [g_{21} \ g_{22} \ g_{23} \ g_{31} \ g_{32} \ g_{33}] \\ &= [x_3 - x_1 \quad y_3 - y_1 \quad z_3 - z_1 \quad x_2 - x_1 \quad y_2 - y_1 \quad z_2 - z_1]^T \text{ 이다.} \end{aligned}$$

Cauchy-Green 텐서  $C$ 는 변형구배  $F$ 에 의해서 식 (2.2)와 같이 표현되고, 이로부터 주신장량  $\lambda_1, \lambda_2$ 를 구하는 식 (2.3) 및 대수변형률  $\epsilon_i$ 를 구하는 식 (2.4)를 아래와 같이 유도한다.

$$[C] = [F]^T \cdot [F] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(C_1+C_2)}{2} + \left[\left(\frac{C_1-C_2}{2}\right)^2 + C_3^2\right]^{\frac{1}{2}}} \\ \sqrt{\frac{(C_1+C_2)}{2} - \left[\left(\frac{C_1-C_2}{2}\right)^2 + C_3^2\right]^{\frac{1}{2}}} \\ \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_1 - C_1}{C_3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[\varepsilon_i \text{ (x or X)}] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 \cos^2 \theta + \ln \lambda_2 \sin^2 \theta \\ \ln \lambda_1 \sin^2 \theta + \ln \lambda_2 \cos^2 \theta \\ \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

여기서, Hill의 신항복 이론을 나타내면, 식 (2.5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = D_1 [ |\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2|^{\frac{M-1}{M}} + D_2 |\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2|^{\frac{M-1}{M}} ]^{\frac{M-1}{M}} \quad (2.5)$$

$D_1 = \frac{1}{2} [2(1+r)]^{\frac{1}{M}}$ ,  $D_2 = (1+2r)^{-\frac{1}{M-1}}$  이며, M은 Hill의 신항복 이론식에 서 항복면을 묘사하는 지수이다. Cauchy-Green 텐서의 주 값은 주 변형률의 양으로 나타낼 수 있기 때문에  $\dot{\varepsilon}_1 = \ln \dot{\lambda}_1$ ,  $\dot{\varepsilon}_2 = \ln \dot{\lambda}_2$ 로 표현이 가능하다. 따라서 식 (2.5)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\dot{\varepsilon} = D_1 [ |\ln(\dot{\lambda}_1 \cdot \dot{\lambda}_2)|^{\frac{M-1}{M}} + D_2 \left| \ln\left(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2}\right) \right|^{\frac{M-1}{M}} ]^{\frac{M-1}{M}} \quad (2.6)$$

이때, Chung[15]이 제안한 최소일의 경로를 이용하여 유효 변형률을 구하고, 식 (2.5)를 대입하면,



$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon} &= \int_0^{t_f} \dot{\varepsilon} dt \\ &= D_1 [ |\ln(\lambda_1 \cdot \lambda_2)|^{\frac{M}{M-1}} + D_2 |\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})|^{\frac{M}{M-1}} ]^{\frac{M-1}{M}} \quad (2.7)\end{aligned}$$

여기서 얻은 유효 변형률을 이용하여 유효응력을 정의한다.

$$\bar{\sigma} = K (\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n \quad (2.8)$$

이상과 같이 정의된 유효 변형률과 유효응력을 이용하여 변형된 내부 소성변형일을 식 (2.9)와 같이 계산할 수 있다. 마지막으로, 구한 소성일의 극값을 취하여 식 (2.10)과 같이 초기 블랭크의 형상을 찾는다.[16]

$$W = \int_{V_0} \bar{\sigma} \cdot \bar{\varepsilon} dV_0 \quad (2.9)$$

$$\frac{dW}{dX_i} = 0 \quad \text{for } i=1, 2 \quad (2.10)$$

여기서,  $X_i$ 는 초기 형상에서의 모든 절점 좌표이다.

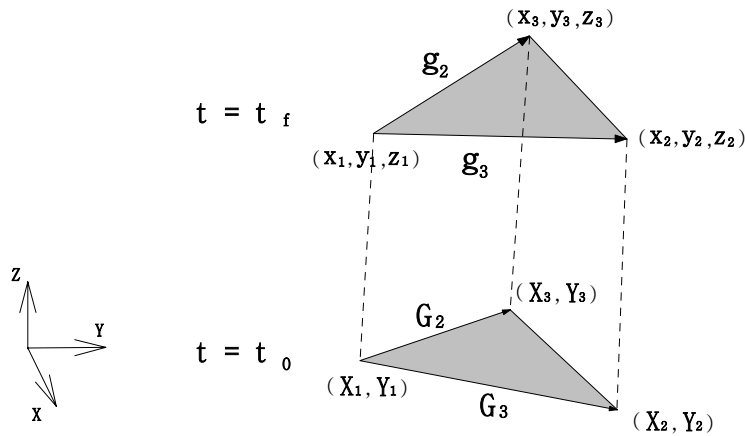


Fig. 8 Kinematics of triangular membrane elements between the initial state and the final state

## 2. 3 수치해석 결과

앞에서 유도된 수식으로부터 삼각형 박막요소를 사용한 유한요소 프로그램이 구성되었고 그에 대한 흐름도를 Fig. 9에 도시하였다[17]. 그리고 본 이론에 의해 개발된 프로그램의 타당성을 검증해 보기 위하여 상용프로그램과 비교분석해 보았다.

먼저, Fig. 10에 보이는 바와 같이 높이가 60mm, 플랜지의 폭이 20mm인 사각형 컵 모양에 대해서 초기 블랭크의 형상을 계산해 보았다. 재료는 자동차 차체용 냉연강판의 경우를 적용하였으며, 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 사각형 컵은 X 및 Y축에 대칭형상이기 때문에 전체 형상의 1/4만을 대상으로 해석하였다.

계산에 이용된 초기 추측값은 연직투사법으로 구하였고, Fig. 11은 그 형상을 나타낸 것이다. 이 초기형상을 가지고 프로그램을 수행한 결과, 계산된 초기 블랭크의 형상은 Fig. 12와 같이 나타났다.

Fig. 13은 상용 소프트웨어인 Auto-Form 프로그램의 초기 블랭크 형상이며, Fig. 12와 비교해 보았을 때, 그림으로부터 X, Y좌표의 플랜지 모서리부위에 약간의 차이가 발생하는 것이 보이지만, 전체적인 형상으로 볼 때 개발된 프로그램이 블랭크의 초기 형상을 예측하는데 만족할 만한 결과를 가져다주는 것으로 판단된다.

하지만 보다 정확히 증분유한요소법과 비교, 평가하기 위해 상용소프트웨어인 Auto-Form을 선정하여 실제 차체판넬들을 성형해석 및 비교, 평가하였고 개발된 One-Step 해석소프트웨어는 초기 블랭크 형상의 예측가능성과 One-Step의 원리를 구현해 보는 것으로 의의를 두고자 한다.

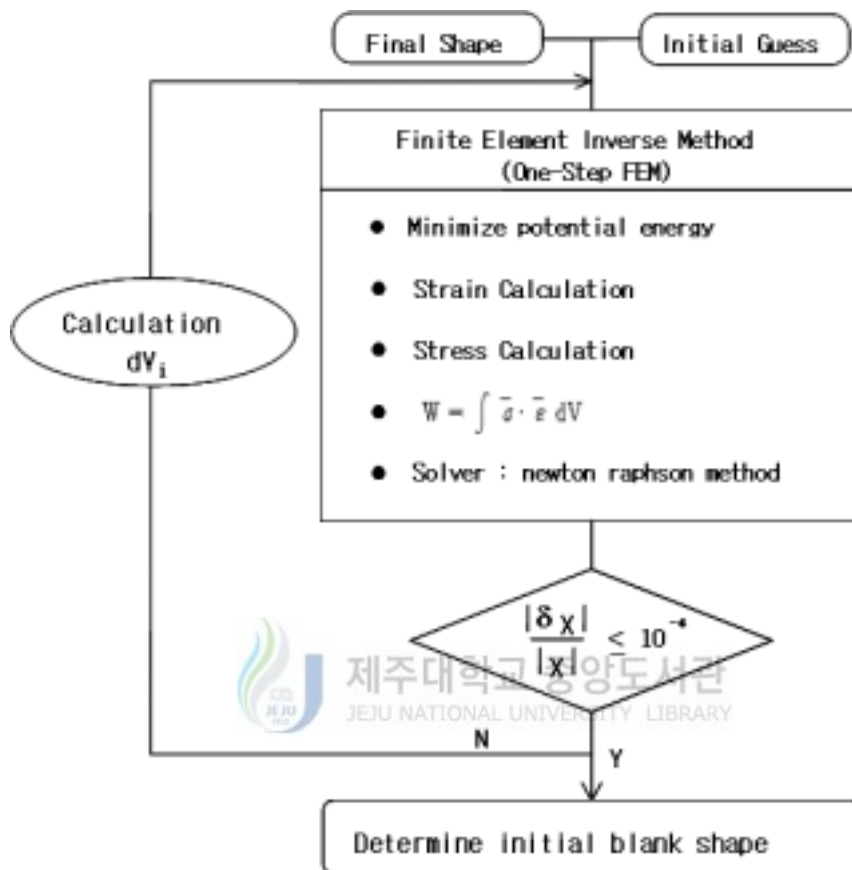


Fig. 9 Flow chart for initial blank design tool

Table 1 Material property (square cup)

Initial material thickness	n-value	r-value	number of nodes	number of element
0.8mm	0.185	1.87	121	200

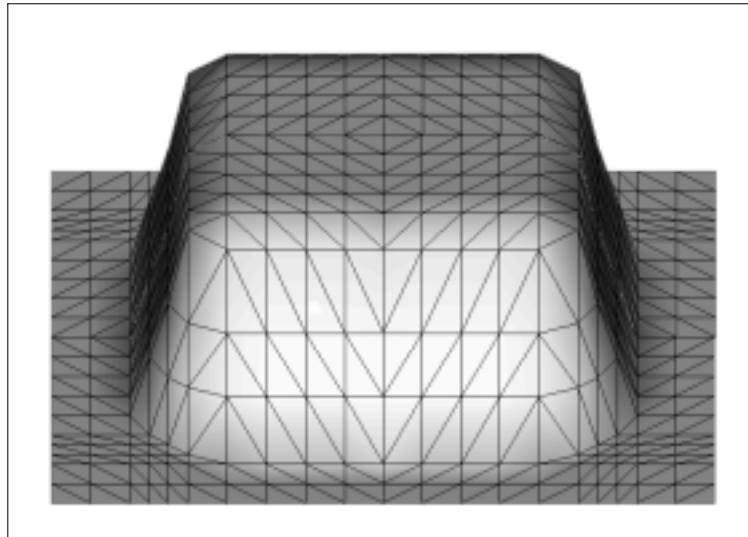


Fig. 10 Schematic view of the square cup

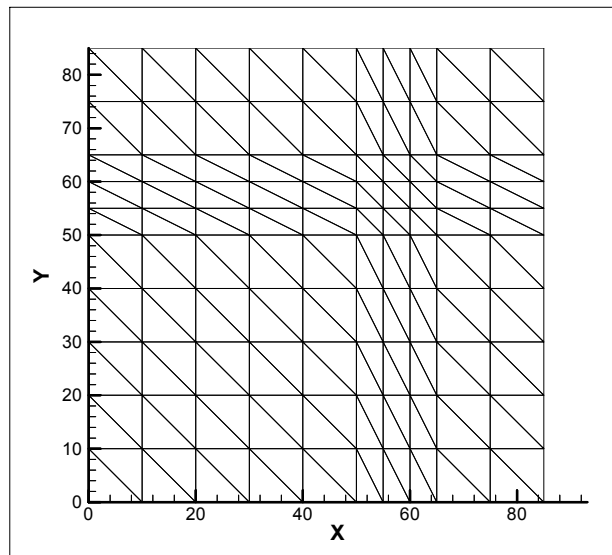


Fig. 11 Initial guess of the square cup(z-projection)

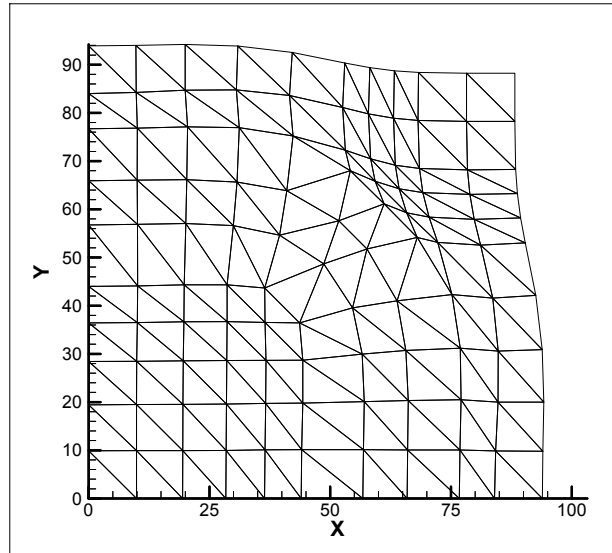


Fig. 12 Calculated initial blank shape

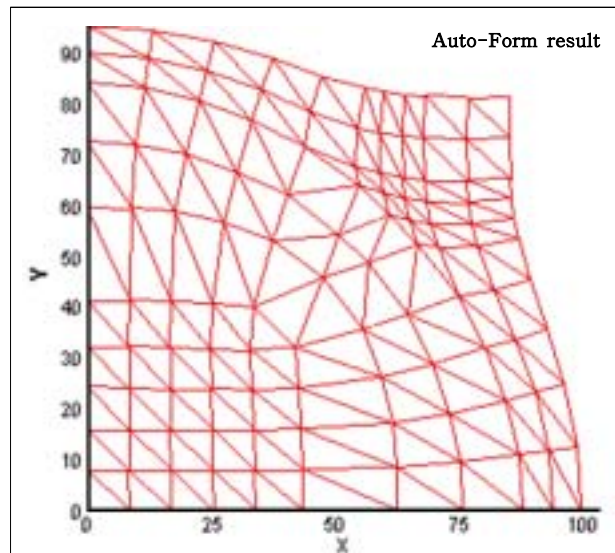


Fig. 13 Initial blank shape (auto-form)

### Ⅲ. Auto-Form을 사용한 성형해석 결과

One-Step 방법은 초기공정설계에 사용되기 때문에 빠른 시간 안에 판넬 형상의 성형성 분포를 파악하는 것이 중요하며, 산업현장에 적용하기 위해서는 Incremental 방법의 성형해석결과와 비슷한 해석결과가 요구된다. 하지만 One-Step 방법은 해석시간은 빠르나 정확한 해를 나타내지 못하는 문제를 가지고 있다. 따라서 Incremental 해석결과의 파단과, 주름이 나타나는 구간과 비교해 봄으로써 어느 정도의 정확도를 One-Step 방법에서 나타내는지 알아보려고 한다.

성형해석에는 박판 금속 성형에 대표적인 차체판넬 형상을 사용하였으며 정확한 분석을 위해 여러 형상의 판넬과 입력조건, 재료물성치를 달리하여 성형성분포를 나타내 보았다.



#### 3. 1 WHL\_HSE\_INR\_PRT 차체판넬 성형해석

BLANK SIZE 100mm\*100mm의 작고 비교적 간단한 형상의 차체판넬 WHL\_HSE\_INR\_PRT를 Incremental 방법과 One-Step 방법을 이용하여 성형해석결과를 알아보았다.

Incremental 해석방법에는 입력조건과 틀세팅 과정이 필요하다. 입력조건은 Table. 2와 같이 주어졌으며 재료 물성치는 Fig. 14와 같다 Fig. 15는 바인더, 다이, 펀치, 블랭크로 이루어진 틀세팅 과정을 보여주고 있다. 이러한 초기과정이 완료되면 Fig. 16에서와 같이 입력된 Cushion height 40mm부터 다이에 의해 블랭크가 성형이 진행되면서 최종적으로 성형된 형상을 살펴볼 수 있다.

One-Step 해석방법에서 재료물성치와 두께는 Incremental 해석방법과 같으나 입력

조건과 틀세팅은 One-Step의 원리에 의해 달라진다. One-Step 해석방법은 바인더 압력의 개념이 없기 때문에 이와 상응하는 입력값이 주어지는데 외곽구속조건이 바인더 압력과 드로우비드 대신에 사용이 된다. 해석에 사용된 외곽구속조건은 구속을 주지 않은 free상태, 완전한 구속이 주어진 lock상태, 구속 상태 30%일 때의 r0.3, 60%일 때의 r0.6이 사용되었으며, 초기블랭크형상에서 나타난 파단, 주름경향 등을 최종형상에 투영시켜 성형분포도를 Fig. 17에서와 같이 나타내었다.

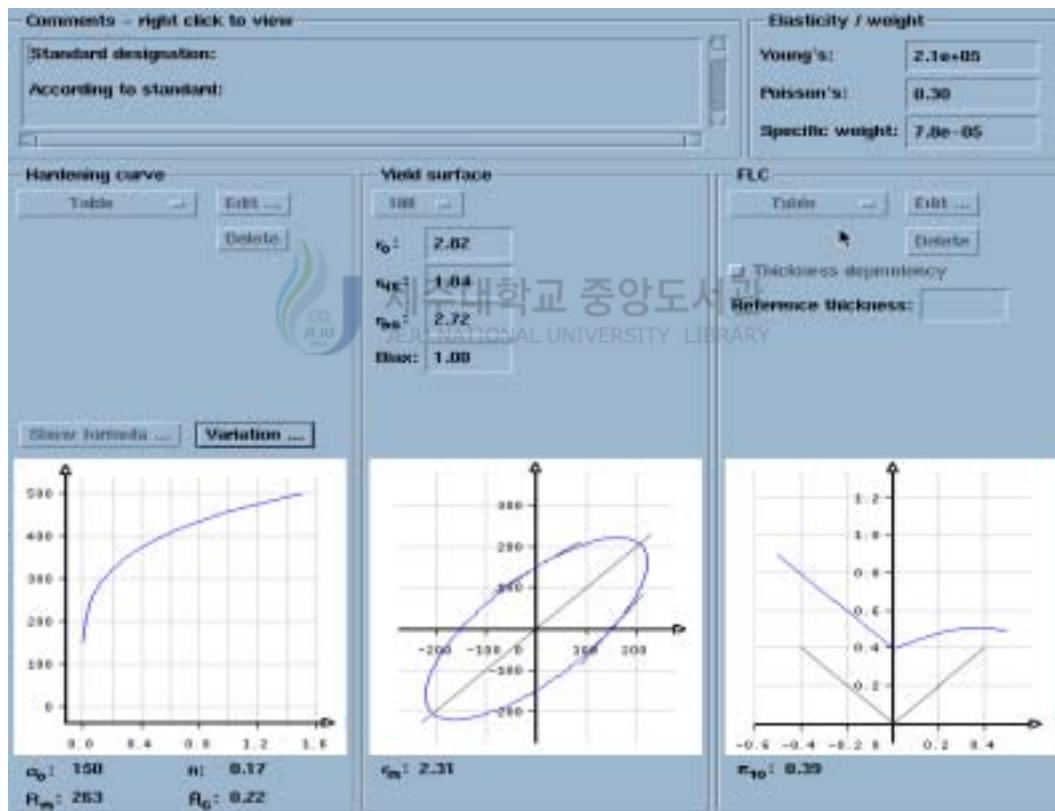


Fig. 14 Material properties (incremental)

Table 2 Input condition (incremental)

material	Initial material thickness	Binder pressure	Bead	CushionHeight
SPCEN	0.8mm	7 ton	round bead	40mm

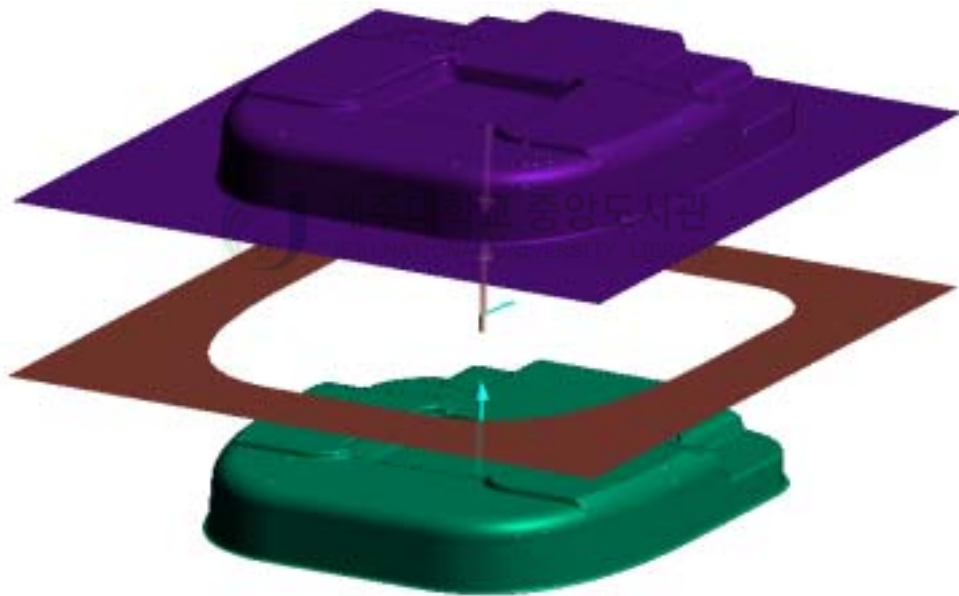
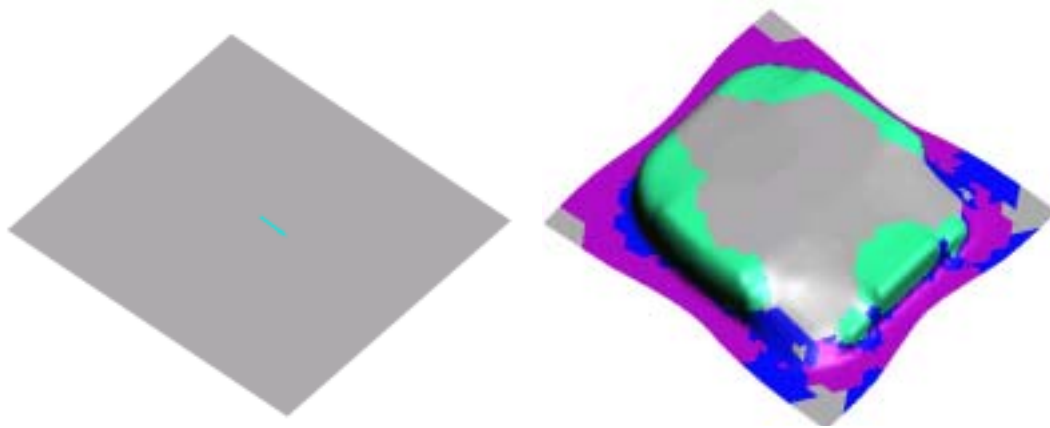


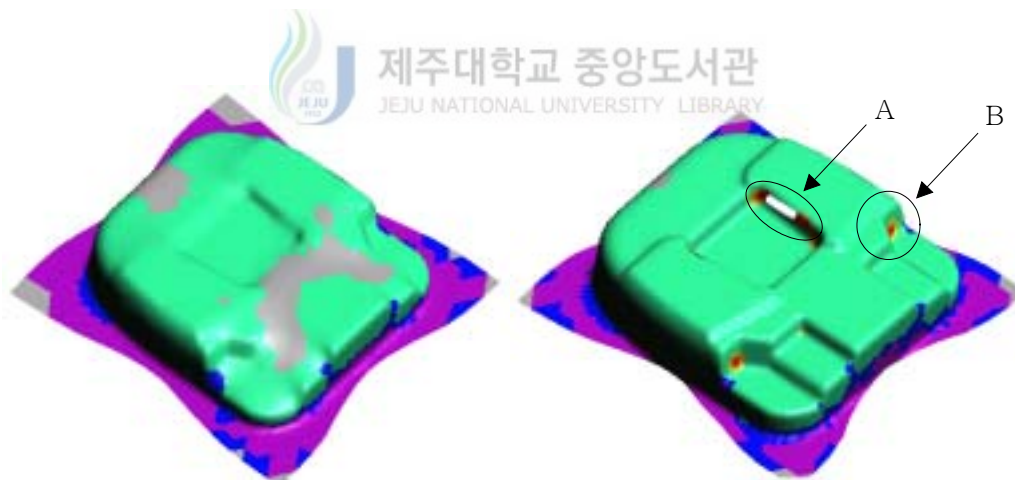
Fig. 15 Tool setting





(a) Early binding result

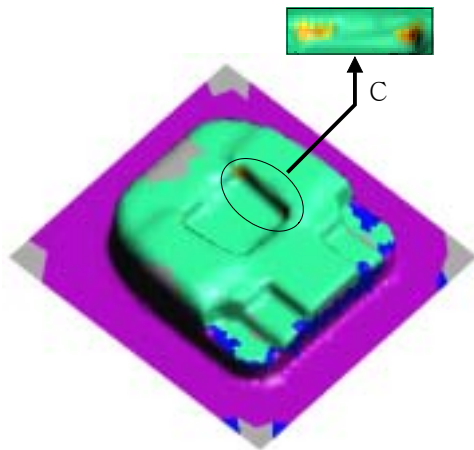
(b) Cushion height 40mm



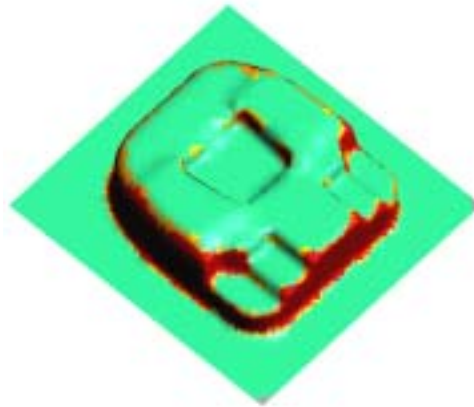
(c) Cushion height 20mm

(d) Cushion height 0mm

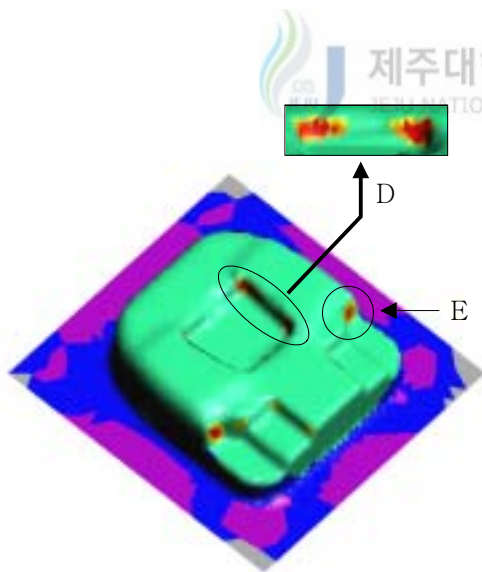
Fig. 16 Formability distribution (incremental)



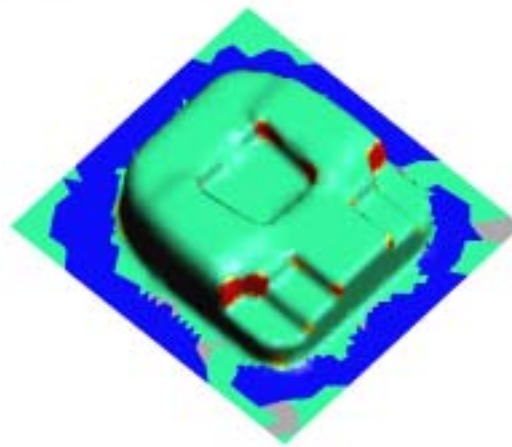
(a) Edge restraint conditions free



(b) Edge restraint conditions locked



(c) Edge restraint conditions r0.3



(d) Edge restraint conditions r0.6

Fig. 17 Formability distribution (one-step)

### 3. 1. 1 Incremental & One-Step 성형해석 결과비교의 고찰

Incremental 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 720.8 sec(약 12분) 소요되었다. Fig. 16의 Cushion height 40mm에 따른 성형해석결과를 살펴보면 드로잉에 의해 외곽은 주름이 발생하지만 전체적으로 안정성을 보인다. 하지만 라운드가 적은 구간에는 파단경향이 나타나는 것을 B구간에서 알 수 있으며 형상의 중심구간에서 깊이에 의해 A구간과 같이 파단경향과 터짐 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 파단현상은 A구간의 깊이를 줄이거나 라운드의 수정이 요구된다.

One-Step 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 13.5 sec 소요되었으며 Fig. 17의 외곽구속조건에 따른 해석결과를 살펴보면 외곽구속조건free부분에서 C구간과 같이 중심구간의 깊은 부위에 파단경향이 나타났다. 구속조건free상태는 구속조건 없이 소재유입이 되기 때문에 파단의 발생은 형상자체의 문제점가지고 있는 것을 나타내며 디자인작업에서 수정이 필요한 것을 알 수 있다. 구속조건 locked는 완전한 구속에 의해 파단경향이 전체적으로 분포하고 있으며, locked에서 주름이 발생할 경우에는 역시 형상에 문제를 가지는 것을 나타낸다. r0.3은 Incremental 해석결과와 가장 비슷한 성형결과를 나타내며 D와 E구간의 파단경향은 Incremental 해석의 파단경향과 거의 흡사한 위치를 나타내주고 있다. r0.6은 r0.3보다 구속조건의 증가로 인해 심화된 파단경향을 보여준다. 다음과 같은 결과로 볼 때 외곽구속조건 free상태와 r0.3일 때 파단과 주름에 대한 문제점을 자세히 살펴 볼 수가 있었으며 WHL\_HSE\_INR\_PRT판넬과 같은 단순형상은 실제 산업현장의 시뮬레이션공정에서 One-Step방법의 적용이 가능하다는 것을 판단할 수 있었다.

### 3. 2 CM\_RF\_CTR\_PLR 차체판넬 성형해석

차체판넬CM\_RF\_CTR\_PLR은 BLANK SIZE 600mm\*300mm며 여러 굴곡을 가지는

형상으로써 Incremental 방법과 One-Step 방법으로 성형해석 하여 그 결과를 알아보았다.

Incremental 방법에서 재료 물성치는 Fig. 18, 입력조건은 Table. 3과 같으며 Fig. 19는 틀세팅 과정을 보여주고 있다. Cushion height는 50mm를 주어 Fig. 20에서와 같이 성형결과를 나타내었다.

One-Step 방법의 재료 물성치와 두께조건은 Incremental방법과 같으며 외곽구속 조건 free, lock. r0.3, r0.6에 따른 성형분포도를 Fig. 21에 나타내었다.

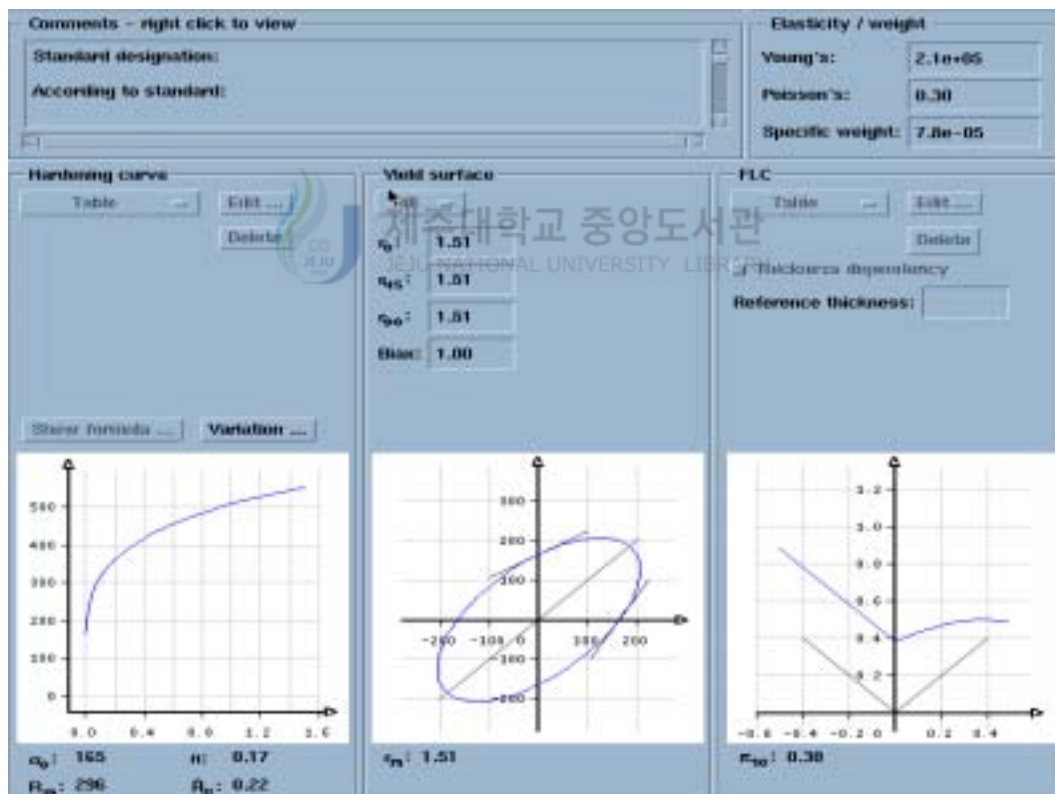


Fig. 18 Material properties (incremental)

Table 3 Input condition (incremental)

material	Initial material thickness	Binder pressure	Bead	CushionHeight
SPCC	0.8mm	30 ton	not used	50mm

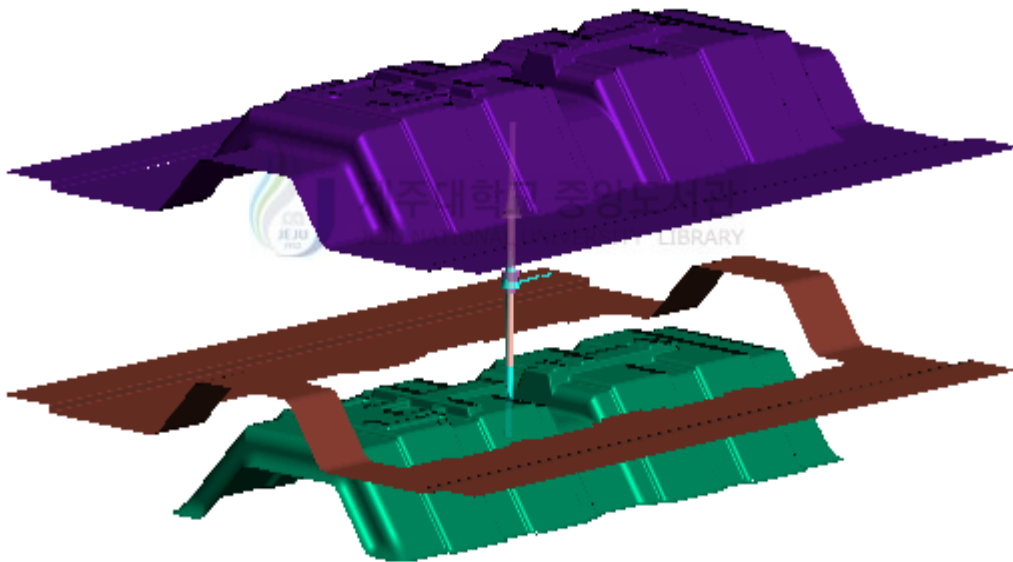
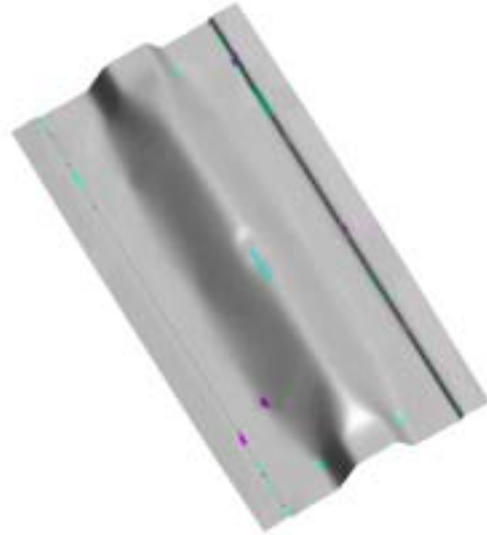


Fig. 19 Tool setting

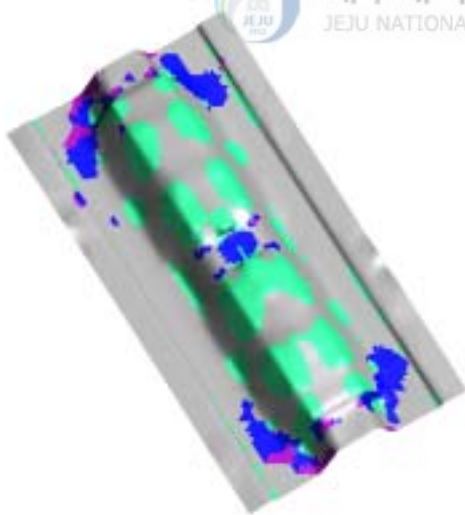


(a) Early binding result

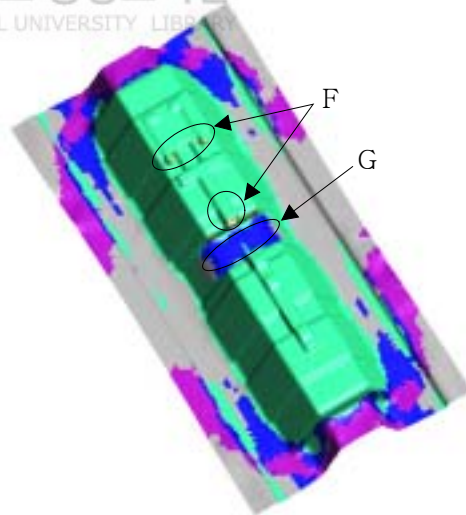


(b) Cushion height 40mm


 제주대학교 중앙도서관  
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

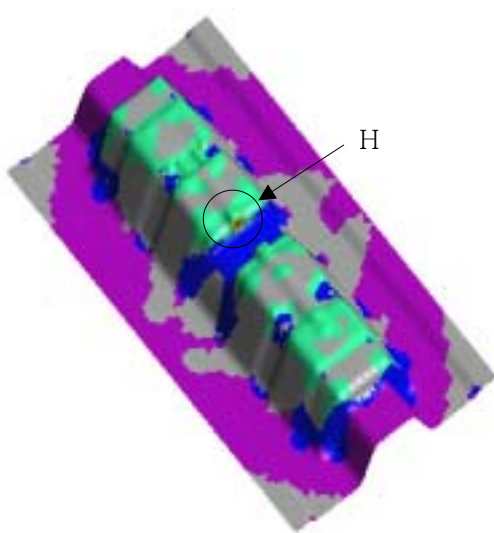


(c) Cushion height 10mm

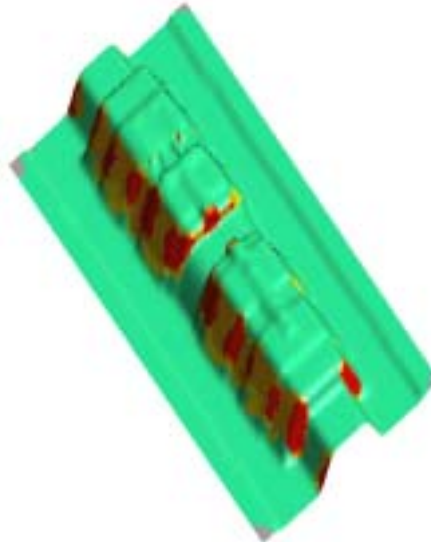


(d) Cushion height 0mm

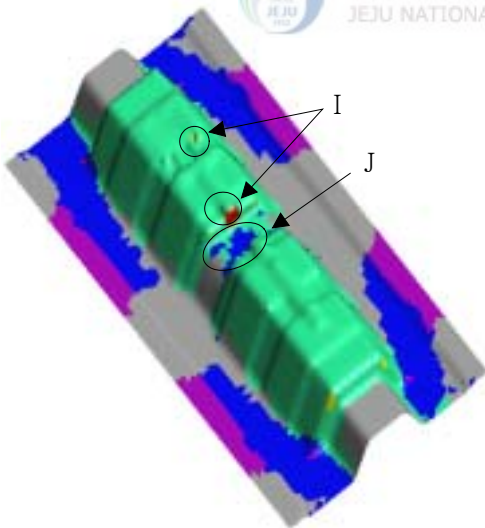
Fig. 20 Formability distribution (incremental)



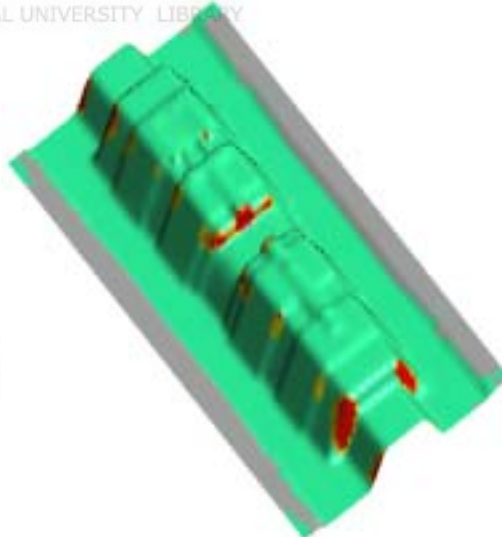
(a) Edge restraint conditions free



(b) Edge restraint conditions locked



(c) Edge restraint conditions r0.3



(d) Edge restraint conditions r0.6

Fig. 21 Formability distribution (one-step)



### 3. 2. 1 Incremental & One-Step 성형해석 결과비교의 고찰

Incremental 방법에서 실제현장적용 비용절감을 위하여 드로우비드를 사용하지 않고 다이 외곽자체에 비드역할을 할 수 있는 형상을 만들어 성형해석 해보았으며 계산시간은 PC-Pentium/ 1.5GHz에서 2520.6 sec(약 42분) 소요되었다. Fig. 20의 Cushion height50mm에 따른 성형결과를 살펴보면 외곽은 주름과 주름경향이 분포하고 있으며 G구간과 같이 제품중심부위도 주름경향이 발생하고 있다. 파단은 라운드가 적은 부위인 F구간에 파단경향과 터짐 현상이 발생하였다. 외곽의 주름문제는 트리밍 공정으로 제거되지만 G구간의 주름 문제는 비드 또는 바인더압력의 변화가 필요할 것으로 보이며 파단의 경우는 라운드의 확대 또는 다이페이스 변경이 요구된다.

One-Step 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 약 42.8 sec소요되었다. Fig. 21의 외곽구속조건에 따른 해석결과를 살펴보면 외곽구속조건free부분에서 H구간과 같이 판단경향이 나타나고 r0.3의 I구간에서 파단과 파단경향 그리고 J구간에서 주름이 발생하였다. 이러한 결과로 볼 때 free상태의 파단은 디자인 재수정이 요구되며 r0.3의 주름과 파단의 위치는 Incremental 해석방법의 결과와 거의 흡사한 위치를 나타냄으로써 제품 설계 단계에서 주름과 파단의 문제점을 살펴보고 디자인설계단계에서 수정하여 기존의 Incremental FEM만을 사용할 때 보다 매우 경제적이고 효율적으로 해석 및 설계업무를 수행할 수 있으리라 판단할 수 있었다.

### 3. 3 B\_PILLAR 차체판넬 성형해석

차체판넬 WHL\_HSE\_INR\_PRT보다는 복잡한 형상으로 BLANK SIZE 250mm\*600mm이며 형상에 따른 소재손실을 줄이기 위해 디자인된 초기 플랭크 형상이 사용되었다.

Incremental 방법에서 재료물성치는 Fig. 22, 입력조건은 Table. 4와 같다 Fig. 23은



틀세팅 과정을 보여주고 있으며 Cushion height 80mm를 주어 Fig. 24에서와 같이 성형해석결과를 나타내었다.

One-Step 방법의 재료의 물성치와 두께조건은 Incremental 해석방법과 같으며 외곽구속조건, free, lock. r0.3, r0.6을 주어 성형성 분포도를 Fig. 25에 나타내었다.

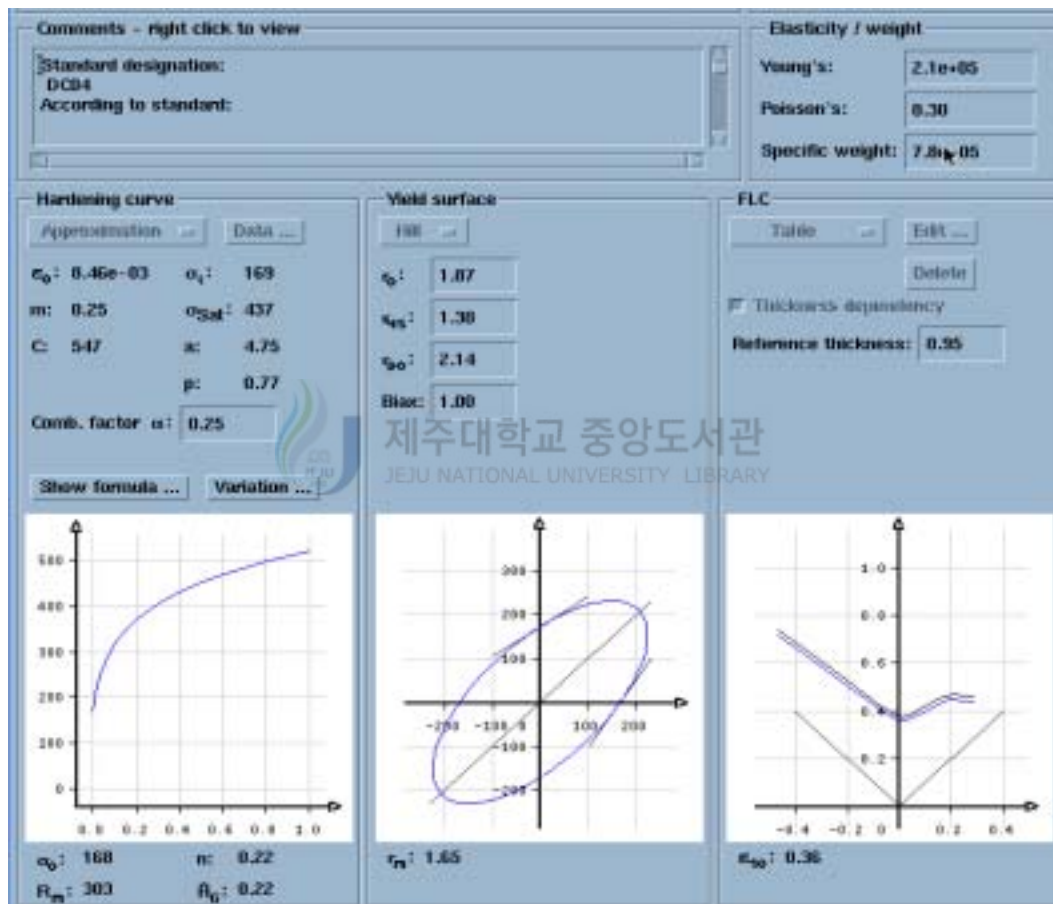


Fig. 22 Material properties (incremental)

Table 4 Input condition (incremental)

material	Initial material thickness	Binder pressure	Bead	CushionHeight
DC04	0.8mm	35 ton	round bead	50mm

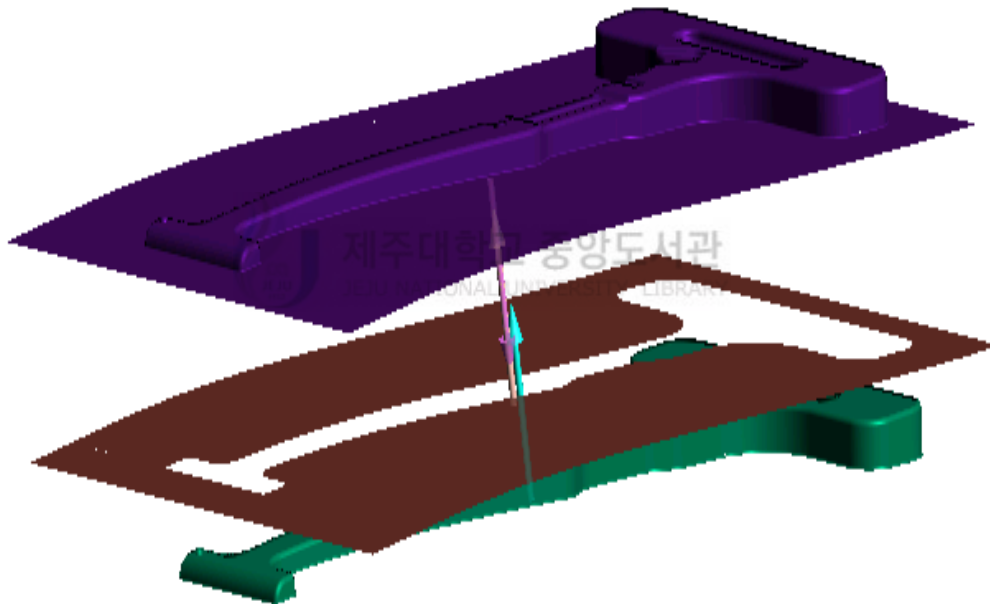
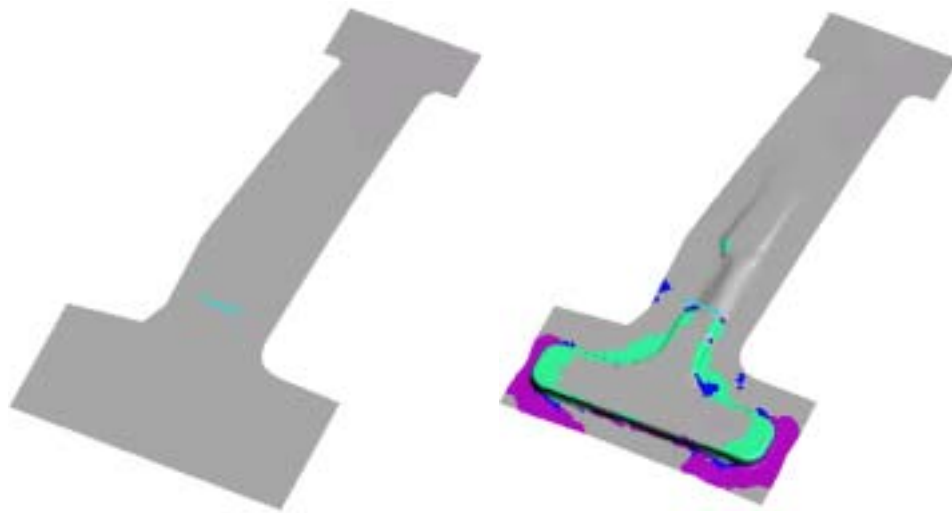


Fig. 23 Tool setting



(a) Early binding result

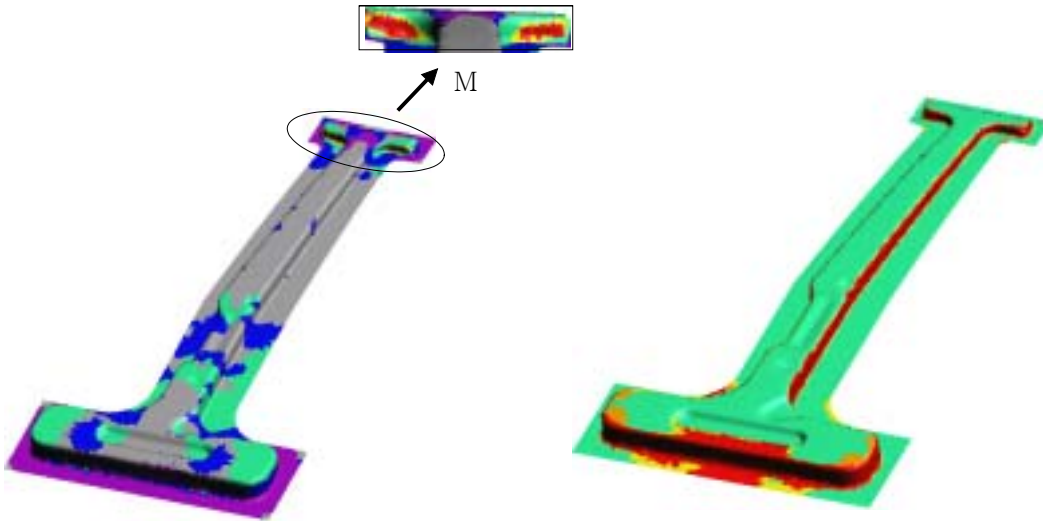
(b) Cushion height 30mm



(c) Cushion height 10mm

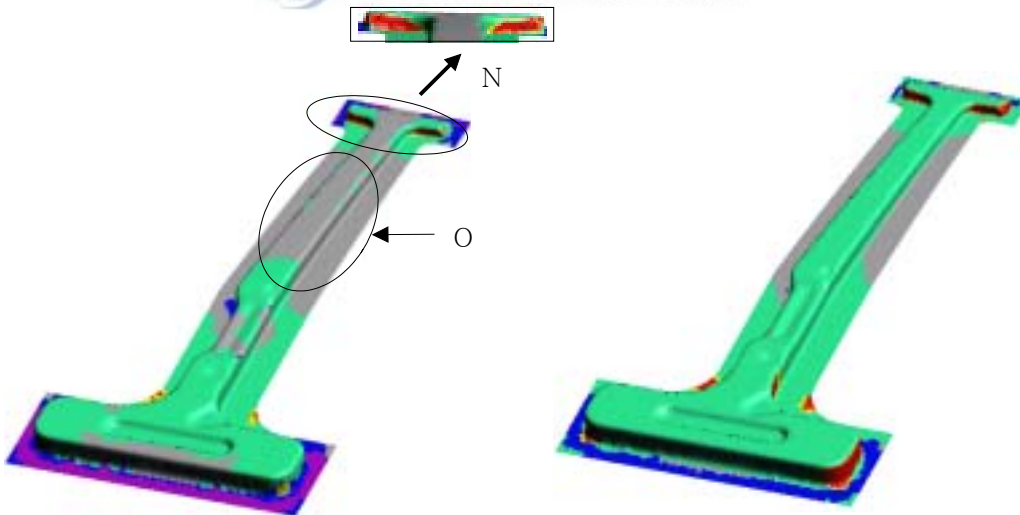
(d) Cushion height 0mm

Fig. 24 Formability distribution (incremental)



(a) Edge restraint conditions free

(b) Edge restraint conditions locked



(c) Edge restraint conditions r0.3

(d) Edge restraint conditions r0.6

Fig. 25 Formability distribution (one-step)

### 3. 3. 1 Incremental & One-Step 성형해석 결과비교의 고찰

Incremental 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 3240.9 sec(약 54분) 소요되었다. Fig. 10의 Cushion height50mm에 따른 성형결과를 살펴보면 상단의 T자형태의 형상에서 수직이면서 적은 라운드 형상에 의해 K구간과 같이 터짐 현상이 발생하였으며 L구간에서는 불규칙적인 소재유입 증가로 인해 스트레칭이 요구되는 구간이 나타났다. 이러한 문제점을 완화시키기 위해서는 터짐 형상에는 소재유입이 잘 될 수 있도록 원만한 곡선의 면과 라운드 증가가 요구되며 스트레칭이 필요한 구간에는 소재의 유입을 억제하기 위해 기존의 비드보다 소재의 구속을 증가 시킬 수 있는 비드의 사용이 요구된다.

One-Step 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 49.8 sec 소요되었다. Fig. 11의 외곽구속조건 따른 해석결과를 살펴보면 구속조건free부분에서 원활한 소재 유입에 의해 주름과 주름경향구간, 스트레칭이 필요한 구간이 나타났으며 M구간과 같이 파단발생으로 인한 판넬 형상의 재수정이 요구되었다. 구속조건 r0.3에서의 해석결과와 Incremental 방법의 해석결과를 비교결과 K구간과 N구간의 파단과 터짐 형상이 나타나는 위치가 일치하며 스트레칭이 필요한 L구간의 O구간의 위치에서도 같은 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 다음과 같은 T자 형태의 형상에서도 One-Step방법이 적용가능 할 것으로 보인다.

### 3. 4 Tailgate 차체판넬 성형해석

마지막으로 사용된 차체판넬 Tailgate는 BLANK SIZE 1200mm\*100mm로 대형 판넬이며 차체판넬 중에서도 복잡한 곡면을 가지는 형상이다.

Incremental 방법에서 재료물성치는 Fig. 26, 입력조건은 Table. 5와 같으며 Fig. 27

은 틀세팅 과정을 보여주고 있다. Cushion height는 120mm를 주어 Fig. 28에서와 같이 성형결과를 나타내었다.

One-Step 방법의 재료의 물성치와 두께조건은 Incremental 해석방법과 같으며 외곽구속조건 free, lock. r0.3, r0.6에 따른 성형분포도를 Fig. 29에서 알 수 있다.

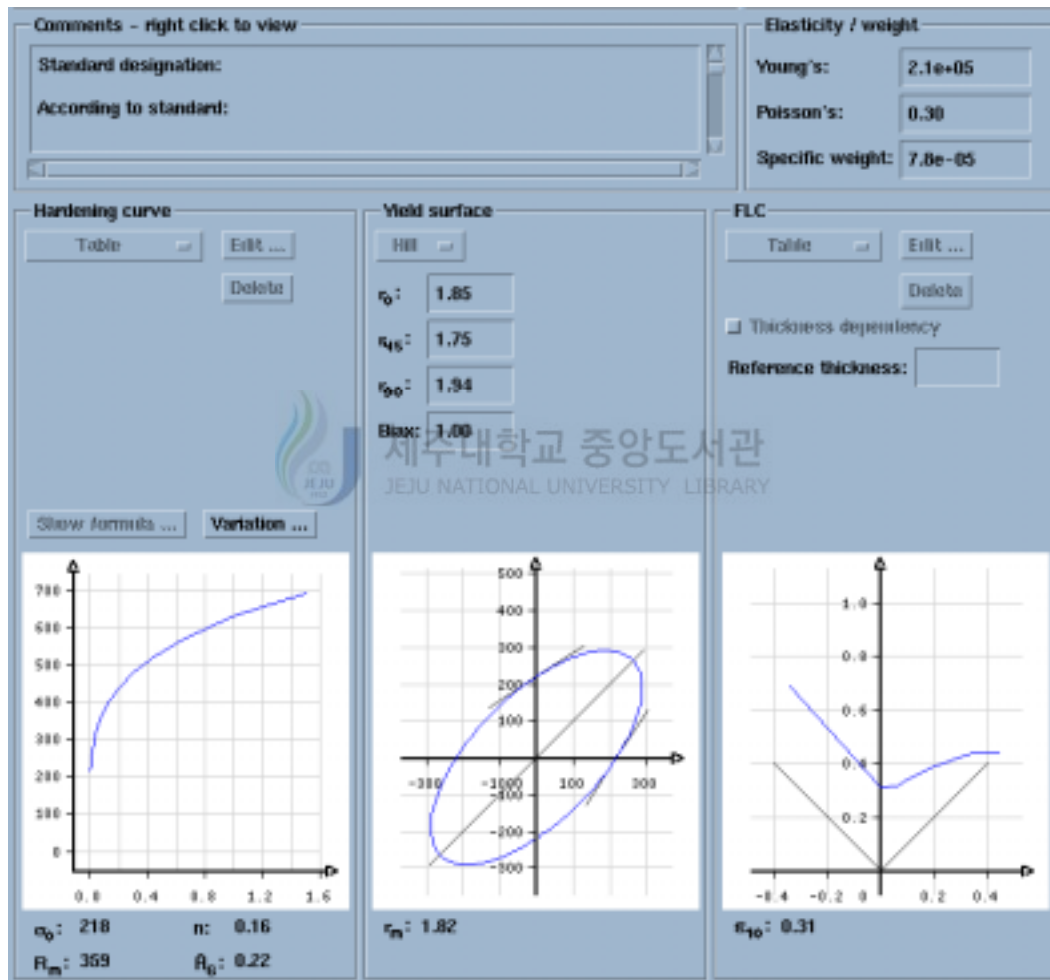


Fig. 26 Material properties (incremental)

Table 5 Input condition (incremental)

material	Initial material thickness	Binder pressure	Bead	CushionHeight
APFC340	0.8mm	40 ton	round bead	120mm

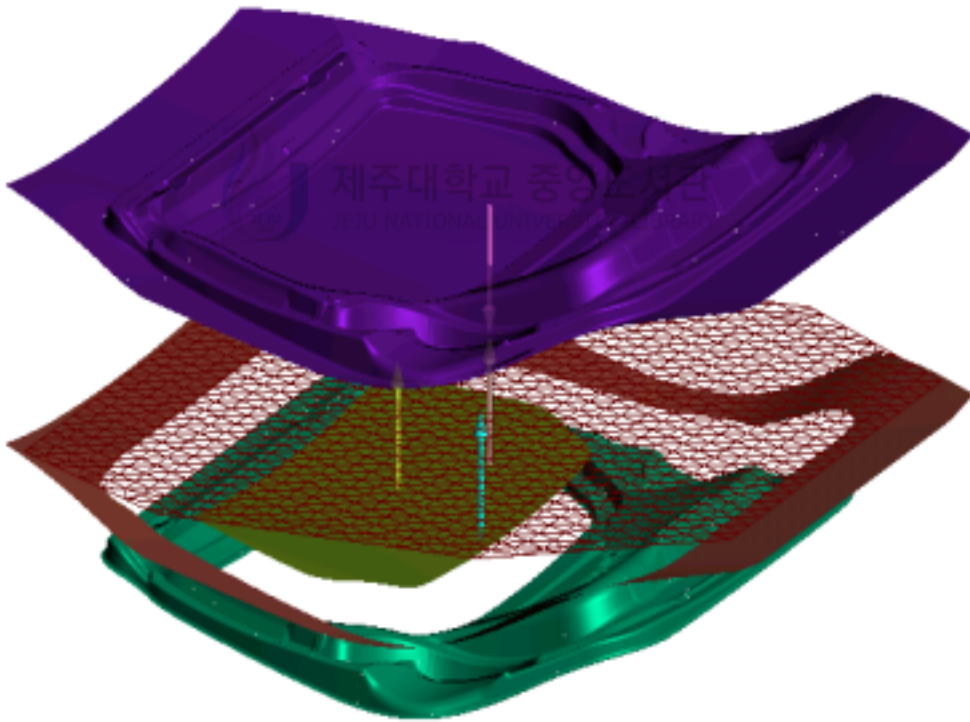


Fig. 27 Tool setting

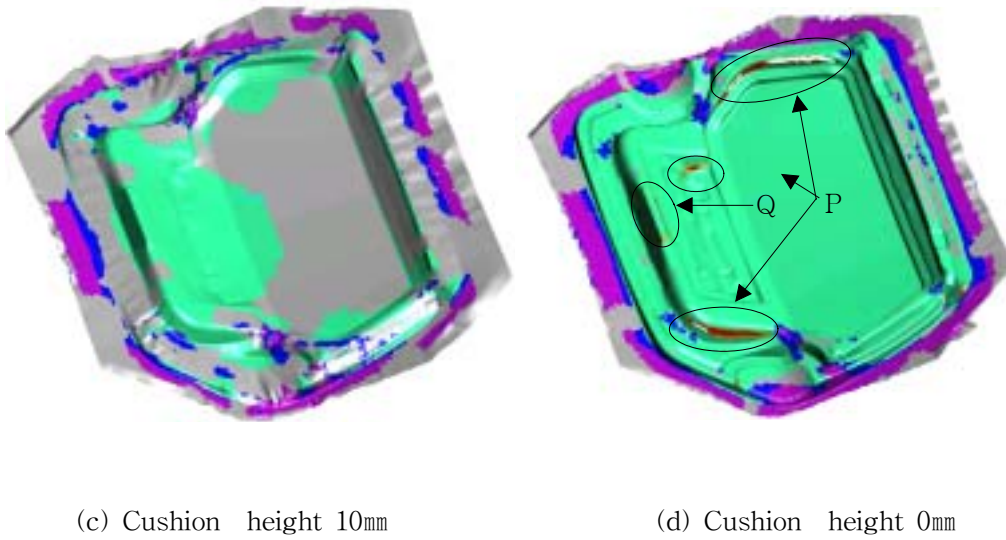
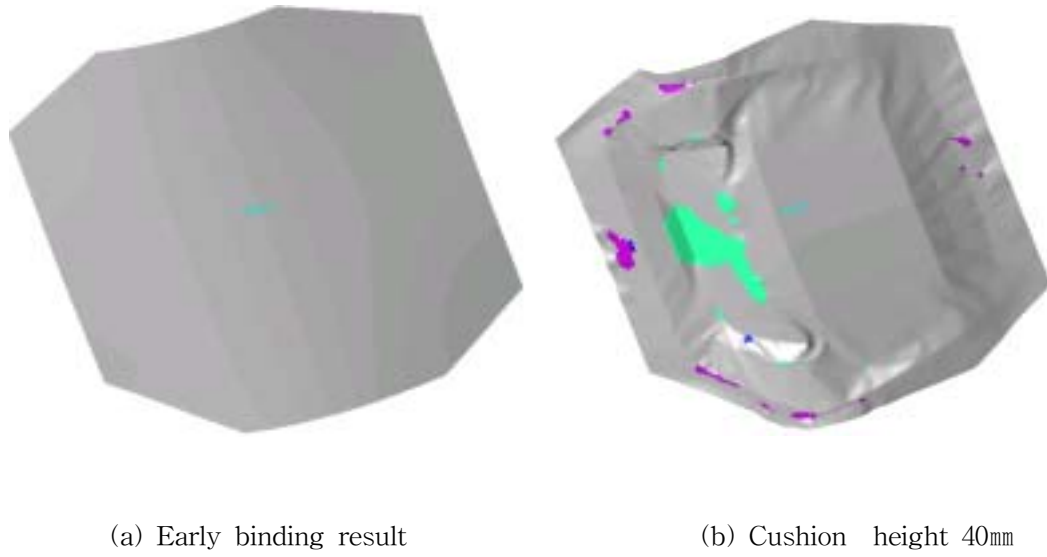
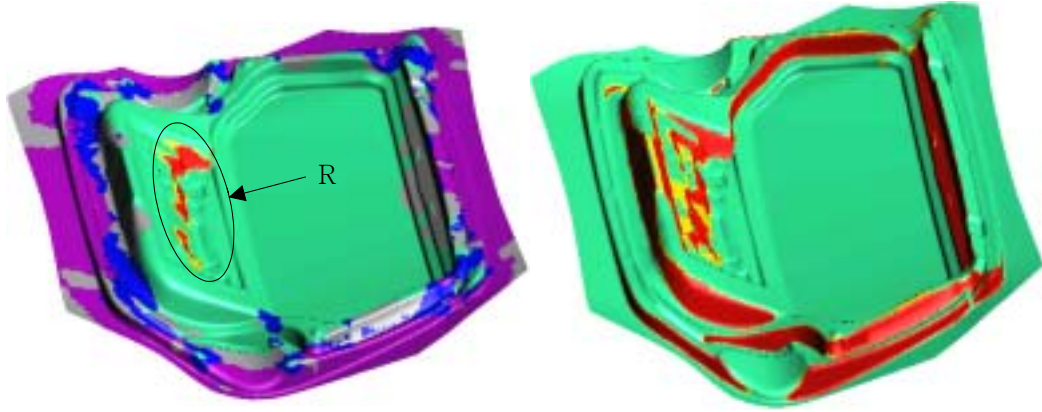


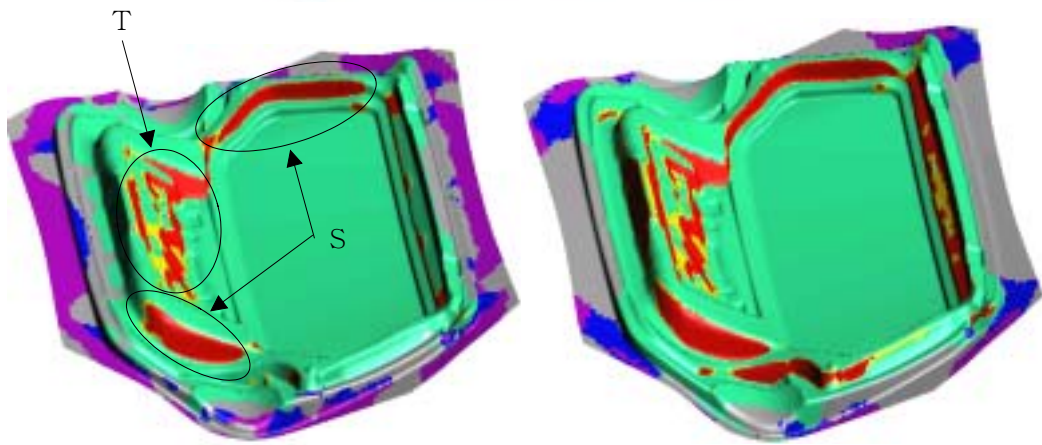
Fig. 28 Formability distribution (incremental)





(a) Edge restraint conditions free

(b) Edge restraint conditions locked



(c) Edge restraint conditions r0.3

(d) Edge restraint conditions r0.6

Fig. 29 Formability distribution (one-step)

### 3. 4. 1 Incremental & One-Step 성형해석 결과비교의 고찰

Incremental 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 5683.7 sec(약 1시간 35분) 소요되었다. fig. 10의 Cushion height120mm에 따른 성형결과를 살펴보면 외곽에는 주름이 발생하며 내부에서는 안정성과, 파단경향을 보였다. 대체적으로 곡면의 경사가 심한 부분에서 파단이 발생했으며 P구간에서 터짐 현상과 Q구간에서 파단경향을 보였다. 복잡한 형상에 의하여 부분적인 주름과 파단 등의 많은 문제점이 발생했으며 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 바인더압력, 비드적용, 형상의 재수정 등의 상호보완적인 작업이 요구된다.

One-Step 방법에서 계산시간은 PC-Pentium/1.5 GHz에서 91.7 sec(약 1분 32초)소요되었다. Fig .11의 외곽구속조건에 따른 해석결과를 살펴보면 외곽구속조건free에서 R구간과 같이 파단경향을 보였고 r0.3에서는 R구간의 파단이 심화된 T구간과 새로운 파단분포를 보이는 S구간이 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 외곽구속조건free에서 파단이 발생한 R구간은 Incremental 해석결과와 다른 결과를 보이고 있었으며 외곽구속조건 r0.3에서도 S구간과 P구간이 비슷한 파단경향으로 보이지만 전체적으로 주름경향과 파단경향은 일치하지 않은 결과를 보였다. 따라서 복잡하고 대형의 차체판넬 형상에는 One-Step 방법을 사용 하였을 때 해석결과의 정확도가 떨어짐을 알 수 있었다.

## IV. 결론

본 연구에서는 최종형상에서 초기블랭크 형상으로 역해석하는 one-step 유한요소 방법이 실제현장의 실용화가 가능한지 검증해보기 위하여 Incremental 유한요소법의 성형해석결과와 비교분석해 보았다. 그의 타당성을 살펴보기 위하여 실제 차체판넬 형상들에 적용하여 보았으며 이로부터 다음과 같은 결과들을 확인할 수 있었다.

1. One-Step FEM을 사용하여 차체판넬 형상을 해석해 본 결과, 성형 후의 제품에 대한 두께, 응력, 변형률분포 등을 가시적으로 쉽게 파악할 수 있었으며 초기 블랭크 형상을 예측함으로써 후가공에 의한 재료손실과 작업 시간의 절감을 예상할 수 있었다.
2. One-Step FEM은 Incremental FEM에 비해 60배 이상 빠른 계산시간을 보였으며 이러한 특징은 시행착오를 많이 거치는 초기 제품설계 과정에서 매우 유용하게 적용될 것으로 보인다.
3. 차체판넬형상을 Incremental FEM과 One-Step FEM으로 성형해석하여 비교해본 결과,  
작은 크기이며 단순한 형상에서는 주름과 파단의 위치가 정확히 일치하는 것을 볼 수 있었으며 비교적 복잡한 형상에서도 비슷한 결과를 나타내었다.
4. 복잡하고 큰 형상에서는 주름과 파단의 간략한 위치를 One-Step FEM에서 알 수 있었지만 해석결과의 정확도가 떨어져 정확한 위치를 나타내지 못하였다. 따라서 산업현장에 적용하기에는 적합하지 않은 것을 알 수 있었다.

## V. 참고문헌

- [1] Jun, S. K., Jung, D. W., "On the parallel implementation of a static/explicit FEM program for sheet metal forming", Proceedings of kspe, Korean Society of Precision Engineering, pp625-628, 1997.
- [2] Kim, J. P., Keum, Y. T., Lee, J. M., "A study on the FEM/GEM for sectional analysis of deep drawing panels", Proceedings of kspe, Korean Society of Precision Engineering, pp212-217, 1994.
- [3] Jung, D. W., Yoo, D. J. & Yang, D. Y., "A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes", Engineering Computations, Vol.12, pp.707-722, 1995.
- [4] S, D. Liu., M. Karima, "A One Step Finite Element Approach for Product Design of Sheet Metal Stampings", Proceedings of NUMIFORM 92. pp.497-502, 1992.
- [5] 정동원, 이상제 "One-Step FEM을 이용한 초기 블랭크 형상 결정에 관한 연구", 한국해양공학회, 제13권 제3( I )호, PP.21-28, 1999.
- [6] E. Chu, "New horizons in CAD of sheet metal stamping", Ph. D. thesis, McMaster University, 1983.
- [7] S, A. Majlessi., D, Lee., "Further development of sheet metal forming analysis method", ASME Journal of Engineering Industry. 09 : pp330-337, 1987.
- [8] Y. Q. Guo, J. L. Batoz, J. M. Detraux and P. Duroux, "Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts", International Journal of Numerical Engineering, Vol. 30, pp. 1385-1401, 1990.

- [9] S, D. Li., A. Assempoor, “Development of Fast\_3D-A design-oriented one step FEM in sheet metal forming”, Proceedings of Complas’IV, pp.1515-1526, 1995.
- [10] S, D. Liu., M. Karima, “A one step finite element approach for product design of sheet metal stamping” Proceedings of NUMIFORM’92, pp. 497-502, 1992.
- [11] K, Chung., O. Richmond, “Sheet forming process design based on ideal forming theory”, Proceedings of NUMIFORM’92, pp.455-460, 1992.
- [12] 박상후, “이상적 성형이론과 변형경로 반복법을 이용한 최적 블랭크 설계에 관한 구”, 한국과학기술원 석사학위논문, pp.9-20, 1996.
- [13] R. Sowerby, J, L. Duncan., E. Chu, “The Modeling of Sheet Metal Stamping”, International Journal of Mechanical Science, Vol. 28, No. 7, pp. 415-430, 1986.
- [14] K. Lange, Hand Book of Metal Forming, pp.20.48-20.49, 1985.
- [15] K, Chung., O. Richmond, “A deformation theory of plasticity based on minimum work paths”, International Journal of Plasticity, Vol. 9, pp.907-920, 1993.
- [16] 이충호, 허훈, “박판금속 성형공정에서의 블랭크 설계 및 변형률 예측”, 대한기계학회 춘계 학술 대회 논문( I ), pp451-456, 1995.
- [17] R. Hill, “Theoretical Plasticity of Textured Aggregates”, Mathematical Proceedings of Cambridge Philadelphia Society, Vol. 85, pp.179-191, 1979.

## 감사의 글

2년이란 짧지만 긴 석사기간을 본 논문과 함께 마감하면서 여러 많은 분들과 감사에 말씀드립니다. 많이 부족한 저를 석사기간동안 좋은 가르침을 주시고 바른길로 인도해 주신 정동원 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘신 연구 활동에도 불구하고, 논문에 많은 관심을 가지시고 조언과 심사를 맡아주신 김귀식 교수님, 박운철 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리고, 졸업연구에 필요한 자료를 제공해주신 (주)Dieart의 여러 관계자분들께도 감사의 말씀 전합니다.

어려울 때 마다 성의 있는 학문적 조언을 아낌없이 주신 형훈이형과 창성이형, 그리고 항상 많은 힘이 되주었던 재신이.. 실험실 생활함에 있어서 즐거움과 어려움을 함께한 실험실 식구들에게 모두 감사드리고 행운이 늘 함께하길 바랍니다.

대학시절동안, 언제나 따뜻한 마음으로 항상 맞이해 주시는 박은숙 선생님과 일본에서 고생하는 준성이, 사회인으로써 노력중인 진욱이, 그리고 귀여운 후배 동희.. 언제나 좋은 일만 가득하길 바랍니다.

99년도에 제주에 내려와 7년의 기간동안 정말 좋은 분들을 만나 여러 경험과 뜻 깊은 대학시절을 보낼 수 있었습니다. 그분들 모두에게 감사드립니다.

마지막으로 언제나 강하고 따뜻하게 저를 이끌어주시는 어머니와 우리 착하고 사랑스러운 동생 진수에게 진정으로 감사의 마음을 전하며 이 논문을 바칩니다.