

자동차 패널 성형 공정의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구

이종문* · 김종원* · 안병직* · 김영탁**

(1996년 6월 27일 접수)

A Study on the Three-Dimensional Finite Element Analysis of Forming Processes of an Automotive Panel

J.M.Lee, J.W.Kim, B.J.Ahn and Y.T.Keum

Abstract

Three-Dimensional finite element analysis is performed using PAM-STAMP for design evaluation of automotive back door inner panel die. Gravity process by blank own weight, binder-wrap process, and drawing process in the forming operations are sequentially simulated with Virtual Manufacturing Method. The most valuable result in this research is that 3-D FEM analysis can be applied to the design evaluation of draw dies in the die try-out, though effects of mesh size and drawbead resistance force on the numerical accuracy are too much sensitive. For the intensive application to draw-die design and try-out, the experimental knowhows about the forming variables such as friction coefficient punch velocity, drawbead force, etc are necessary.

Key Words : Virtual Manufacturing Method, Binder Wrap, Draw Die Evaluation

1. 서 론

최근 컴퓨터 소프트웨어의 발전은 자동차 관련 분야에 서 활발한 연구가 시도되어 산업 발전에 크게 이바지하고 있다. 최초 자동차 설계 부터 금형 제작에 이르기 까지 다양한 시도 가운데 금형제작에서 컴퓨터 응용을 살펴보면, CATIA에서 작성된 wireframe 모델데이터로 부터 면(surface)데이터를 생성하고 가공용 NC 데이터가 작성되어 금형이 생산된다. 또한 금형의 구조강도 평가를 위해 구조해석이 이루어지고, 패널의 성형성평가를 위하여 성형해석이 이루어진다. 이 일련의 과정을 컴퓨터에 의한 "가상생산기법(virtual manufacturing method)"이라고

한다. 지금까지는 숙련된 엔지니어에 의해 금형이 설계되고, 숙련된 작업자에 의해 많은 시간을 소비하는 시행착오법(trial & error method)로 실금형이 완성되었다. 그러나 가상생산기법에서는 컴퓨터에서 실제 성형공정을 시뮬레이션하여 제품의 성형성 및 변형거동을 가시화된 결과로써 검증 할 수 있다. 따라서 가상생산법에 의해 중요한 성형 공정변수인 홀딩력과 패널의크기등을 조절하는 시행착오가 가능하다. 유한요소법에 의한 패널 성형해석의 경우, 단순형상에 대해서는 내연적(implicit) 시간적분법을 이용한 준정적(quasi-static)해석이 효과적이거나 복잡한 형상에서는 수렴성 문제와 과도한 계산시간 때문에 비효율적이다. 최근에 외연적(explicit) 시간적분법을 이용한

* 기아모텍
** 한양대학교

동해석이 Volvo/Contral Data Project에서 성공적으로 패널 성형문제가 적용되어⁽¹⁾ 실 3차원 패널의 성형해석은 외연적 프로그램이 더 효율적임을 입증하였다.⁽²⁾ 본 논문에서는 외연적 시간적분법을 이용한 패널 대변형해석 전용 프로그램 PAM STAMP를 활용, Back Door 내부패널을 대상으로 자중평가, 바인더랩해석, 3차원 드로우잉 해석을 하고 실제품과 비교하여 해석정도를 점검한 사례를 소개하고자 한다.

2. 시뮬레이션

해석 S/W의 신뢰도 평가와 Simulation중에 불구합의 발생여부를 미리 확인하기 위해 현장에서 제작중인 패널로서 비교적 성형이 까다롭지 않은 Back Door 내부패널을 선정하였다. Fig. 1은 Back Door 내부패널의 CATIA 모델(1/2모델)을 나타낸다.

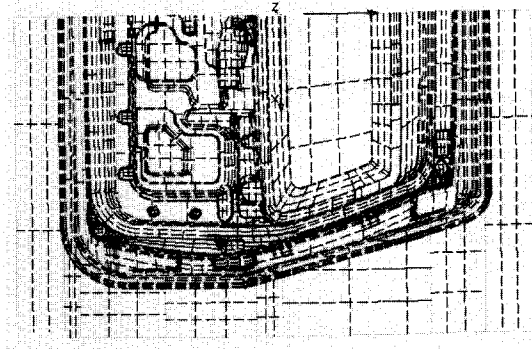


Fig. 1 CATIA CAD model(half)

2.1 해석 과정

제품형상과 금형 형상(다이페이스, 프로파일, 여육등)을 CATIA에서 CAD data로 받아, 유한요소 모델링 하기전에, IGES(Initial Graphics Exchange Specification)변환을 하고 유한요소 모델러 인 FEMB로 Free Mesh(크기:10 mm)를 생성한 다음 Hyper-Mesh에서 생성된 일부 요소를 수정한 후 수정된 유한요소모델을 기초로 패널, 상형, 펀치, 블랭크 홀더등 모델을 작성하였다.(Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5 참조) 작성된 패널과 금형의 유한요소 모델을 PAM Generis로 넘겨 경계조건 및 공정변수 값을 입력하고 PAM Solver에서 처짐평가와 바인더랩 해석을 한 후 드로우잉 해석을 하였다.

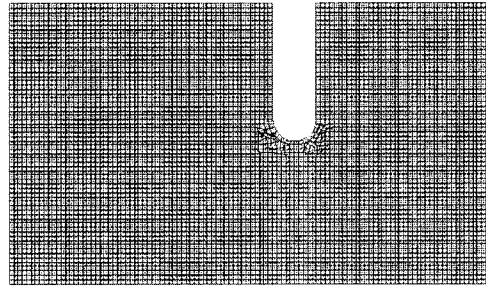


Fig. 2 FE model for panel

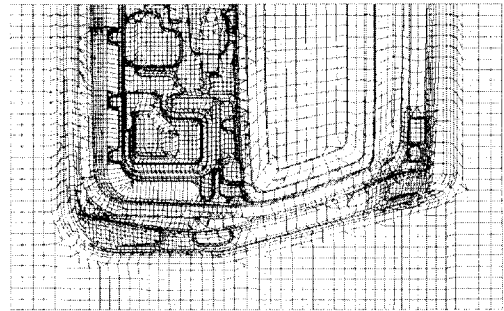


Fig. 3 FE model for upper die

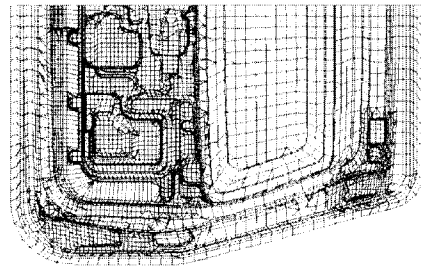


Fig. 4 FE model for upper punch

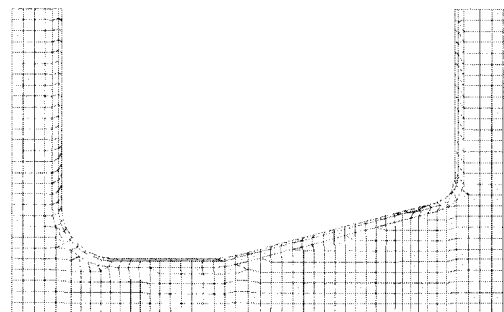


Fig. 5 FE model for blank holder

2.2 해석모델

Fig. 6은 해석을 위한 패널과 금형의 유한요소 모델배치를 나타내고 있으며, 대칭조건을 이용하여 1/2만을 모델링하였다. 펀치(punch), 다이(die), 블랭크 홀더(blank holder)는 강제조건을 주었으며, 패널(panel)은 셸요소를 사용하였다. Table 1은 해석에서 사용된 패널의 기계적 물성치이며 Table 2, Table 3은 해석에서 사용된 모델의 크기와 부가된 경계조건 및 초기조건을 나타낸 것이다.

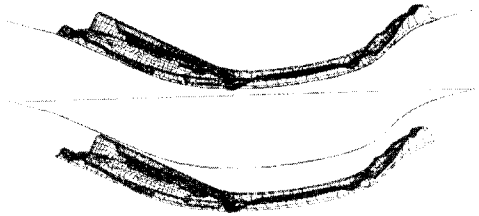


Fig. 6 Configuration of tooling geometry

Table 1 Mechanical properties of blank sheet

properties	value
Thickness	0.7mm
Density	7.8E-06kg/mm ³
Young Modulus	210GPa
Yield Stress	0.14GPa
Poisson's ratio	0.3

Table 2 FE model characteristics

dies mesh	die	punch	holder	blank	total
node	5724	5449	716	7045	18933
element	6151	6066	635	6839	19691

Table 3 Boundary condition and initial condition

Analy.	Boundary Condition	Initial Condition
gravi-ty	Blank Holder: all fixed Blank: sym(y-dir fixed)	Gravity: Z-dir 0.00981GPa
binder-wrap	Blank Holder: all fixed Die: Uz free Blank: sym(y-dir fixed)	Die Velocity: Z-dir 10m/sec
draw-ing	Punch: all fixed Die, B/H: Uz free Blank: sym(y-dir Fixed)	Die Velocity: Z-dir 10m/sec Friction Coef.: 0.08 Holding Pressure : 0.00078GPa

2.3 해석

블랭크는 크고 두께가 얇은 재료이기 때문에 블랭크 홀더 위에 얹어졌을 때 자중에 의해서 처짐이 발생한다. 이때의 처짐량은 금형의 형상에 따라서 다이페이스의 가장 저면 또는 펀치에 닿을 정도로 크양이기 때문에 바인더랩 초기에 불량률 유발할 수 있다. Fig. 7은 스텝핑 해석의 첫번째 단계인 처짐평가 이후의 해석결과이다. 두번째 해석단계인 바인더랩에서 중요한 사항은 상형이 비드를 성형시킬 때 실제로 성형된 블랭크 모양을 예측하는 것과 초기상태에서 발생된 주름이 서로 꼬여 만들어지는 절곡부를 예측하는 것이다. Fig. 8은 바인더랩 해석 이후의 블랭

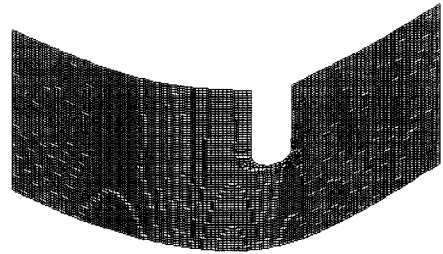


Fig. 7 Blank shape deflected by gravity

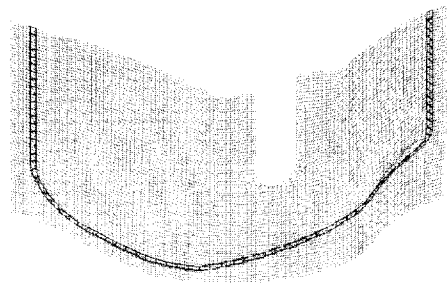


Fig. 8 Binder-wrap shape

크 형상이다. 본 해석에서는 블랭크 모양에 특별한 문제를 보이지 않았고 절곡 발생이 예측되는 부위는 없었다. 처짐과 바인더랩의 경우 한번의 해석으로 실제와 비슷한 결과를 보였다. 다음에는 바인더랩 해석의 결과를 가지고 성형 깊이에 따라 전체해석 시간을 설정한 후 각 시간 스텝에 따라서 드로우잉 해석을 하였다. 3차원 해석에서는 패널이 드로우잉, 스트레칭, 벤딩등의 보다 복잡한 성형공정들의 조합에 의해 해석이 수행되어지며, 최적의 성형형상을 얻을 때 까지 조건을 수정해 가며 반복적으로 수행하게 된다. 이때 최적의 성형형상을 만드는 해석조건을 최적 성형

조건이라 하며, 본 해석에서는 초기 설계도면에 준하여 Try결과를 비교한 후 공정변수들, 즉 마찰계수(μ), 비드 저항력(f_b), 성형속도(V), 그리고 쿠션압(BHP)을 수정해 가며 금형의 최적 성형조건을 찾았다. 이 중에서 블랭크홀딩력은 실제 성형시 적용되는 쿠션력을 블랭크홀더 면적으로 나누어 홀딩압력으로 나타낸다.

- 쿠션실린더 압력 : 2.2 Kgf/cm²
- 홀딩력 : 80Ton(다이아그램에의한)
- 블랭크홀더 면적 : 1.1 m²
- 블랭크홀딩 압력 : 0.00072GPa

성형속도는 계산시간을 줄이기 위해서 관성의 효과가 크지 않는 범위 내에서 최대한 크게 할 수 있는데 전체적인 시간 증분의 크기는 모든 요소에 대해 각각의 시간증분 크기를 계산한 후 다음과 같은 식에 의해 결정한다.

$$\Delta t_{n+1} = \alpha_{\min} \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \} \quad (1)$$

위의 식에서 N은 총 요소수이며 Δt_i 는 i요소에 대한 시간증분의 크기를 나타낸다. α 는 안정성을 위한 Scale Factor로서 통상 0.9이하의 값을 선택한다. 따라서 외연적방법에 의한 해석에서는 시간증분의 크기 Δt 는 수치적 안정성을 위하여 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = L_{cr} / C_d \quad (2)$$

여기서 L_{cr} 은 최소요소 크기이며, C_d 는 재료내의 음속이다. 자동차의 차체로 사용되는 연강의 경우 C_d 는 약 5000m/sec 이므로 L_{cr} 이 10 mm이면 위의식으로 부터 Δt_{cr} 은 2×10^{-6} 초가 되며 10초의 성형시간을 해석하기 위해서는 적어도 5×10^6 의 시간증분이 필요하게 되어 엄청난 계산시간을 필요로 하게 된다. 따라서 계산시간을 줄이기 위해서 성형속도를 크게 하는 것은 실제보다 높은 속도를 사용함으로써 해석에 걸리는 시간을 단축시켜 전체 계산시간을 줄이기 위한 것이다. 따라서 관성효과를 충분히 작게 하면서 계산시간을 최소로 하는 최대 펀치 속도를 선정하는 것이 매우 중요하다. 또한 스텝핑 해석에서 중요한 것이 패널과 금형의 접촉문제이다. 접촉문제는 접촉하는 경계에 주어지는 접촉구속 조건으로 다룰 수 있다. PAM STAMP에서의 Master Slave Contact Algorithm은 slave node와 master surface로서 정의한다. time step의 진행과 함께 접촉하는 master surface와 slave node

는 "Penalty" Algorithm에 의해 slave node가 master surface를 침범하지 않도록 한다. Explicit code에 의해 stamping 해석을 행할 경우 high frequency vibration이 발생한다. 이런 현상은 펀치와 다이가 거의 밀착되었을 때 해를 구하기 어렵게 한다. 또 실제의 재료는 근본적으로 감쇄계수를 가지므로 해석에서도 감쇄를 고려할 필요가 있다. PAM STAMP에서는 두가지 종류의 감쇄를 적용할 수 있다(stiffness proportional damping & mass proportional damping). 해석 초기에 slave node가 master node를 침범하면 어느 일정한 값(감쇄계수)을 입력으로 하여 surface normal 방향 xi로 contact penalty에 의해 밀어내는데 이때의 힘을 spring과 같이 생각하고 slave node의 mass를 m_i damping계수를 c_i 라 할 때 stiffness proportional damping을 적용한 운동방정식은 다음과 같이 생각할 수 있다.

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i = 0 \quad (3)$$

$$\text{또는 } \ddot{x}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{x}_i + \omega_i^2 x_i = 0 \quad (4)$$

$$\text{위 식에서 } \omega_i = \sqrt{\frac{k_i}{m_i}}$$

$$\xi_i = \frac{c_i}{2} \sqrt{\frac{1}{k_i m_i}} = \frac{c_i}{c_i, c_{mi}} \quad (5)$$

PAM STAMP에서는 ξ_i 를 입력하게 되어있다.(0.1값이 적당함) 이때 감쇄력은 slave node와 master node 사이의 spring force에 직접 더해진다. 이런 현상은 펀치와 다이가 거의 밀착되었을때 해를 구하기 어렵게 한다. mass proportional damping은 해석시 Z방향으로 운동하는 블랭크홀더의 low frequency 강제운동을 억제하기 위해 도입된 것인데 stiffness proportional damping에서와 마찬가지로 slave node의 운동 방정식을 생각하면

$$m_i \ddot{x}_i + c_i \dot{x}_i + k_i x_i = 0 \quad (6)$$

$$\text{또는 } \ddot{x}_i + q \dot{x}_i + \frac{k_i}{m_i} x_i = 0 \quad (7)$$

$$\text{위 식에서 } q = \frac{c_i}{m_i} \quad (8)$$

PAM STAMP에서는 q의 값을 입력시키게 되어있다. 이때 mass damping force는 stiffness proportional

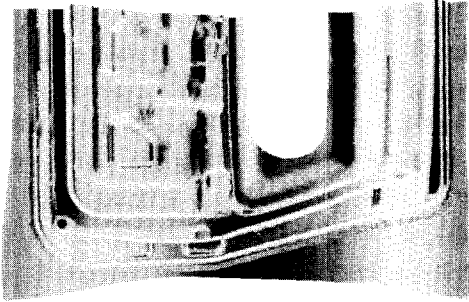


Fig. 9 Draw panel when $P_b=0.0025\text{GPa}$

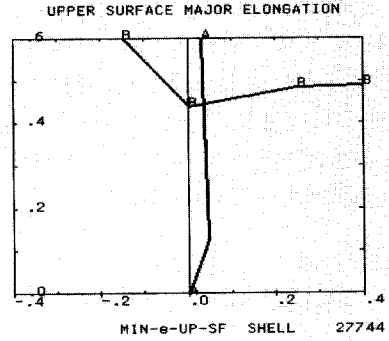


Fig. 11 Strain curve at a point when $P_b=0.0025\text{GPa}$

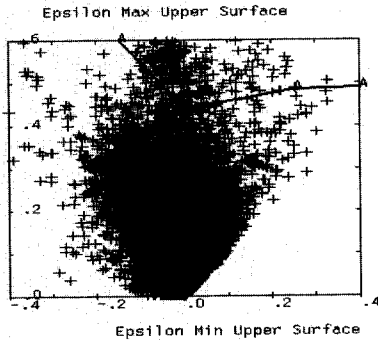


Fig.10 Strain distribution on FLD curve when $P_b=0.0025\text{GPa}$

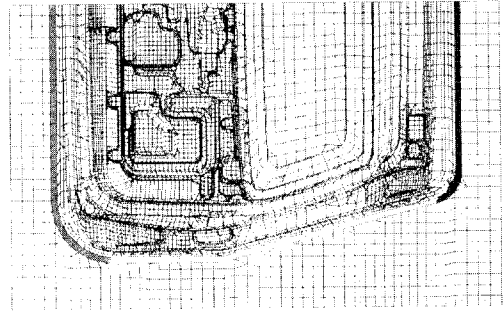


Fig. 12 Application of 3 kinds of draw beads to FE model

damping에서 오는 달리 slave node와 master node에 각각 주어진다. 따라서 q 값은 critical damping에 따라

$$q_{crit} = 2\xi_{i,crit}\omega_i = 2\omega_i = \frac{4\pi}{T_i} \quad (9)$$

의 값을 쓰는 것이 좋으며 이때 진동주기 T_i 는 감쇄가 없는 경우에 대한 해석결과중 가장 낮은 진동 주기를 선택하면 된다. 해석때 비드력 0.0025 GPa을 전 비드면에 적용했을때 패널유입량이 적었고(Fig. 9 참조) 이때 많은 형상부위에서 최초 소재두께 0.7 mm가 0.31 mm로 되었기 때문에 패널이 터진것으로 생각할 수 있다. Fig.10은 성형 완료후의 변형률 분포를 FLD(Forming Limit Diagram)에서 나타난 것이다. 실제 패널성형에서 극단적으로 판단되는 부분이 FLD curve상에서도 예측되었다. Fig. 11의 strain curve로부터 판단예측 부위가 성형이 진행됨에 따라 판단이 될 것이라는 것을 알 수 있다. Table 4는 공정 변수값을 세 분석한 입력 데이터이며, 비드력은 비드 성형의 특성상 세부분으로 분리하였고(Fig.

Table 4 Forming variables used in 3 analyses

variables	Blank Holding Pressure(GPa)	Friction
first	0.0009	0.1
second	0.0006	0.06
third	0.00072	0.08

12 참조) 각각의 조건에 대한 해석결과는 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 이 세조건으로 성형한 결과는 세번째 조건일 때 유입형태와 유입량에 있어 현장 try패널과 가장 근접한 결과를 나타내었다. 그리고 두께감소량을 알아보기 위하여 실패널의 두께를 초음파 두께측정기로 측정하였다. Fig. 16은 두께를 측정하기 위한 단면A-A, 단면 B-B를 표시한 것이다. Table 5, 와 Table 6은 단면A-A, 단면B-B에서 두께를 측정된 결과와 해석된 결

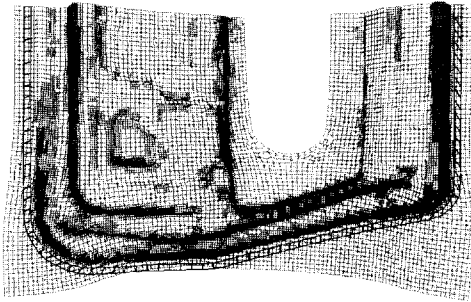


Fig. 13 First analysis results

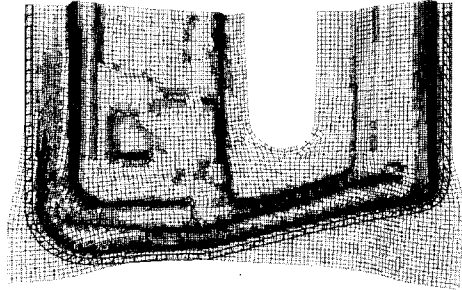


Fig. 15 Third analysis results

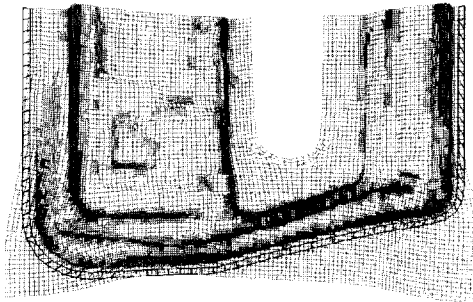


Fig. 14 Second analysis results

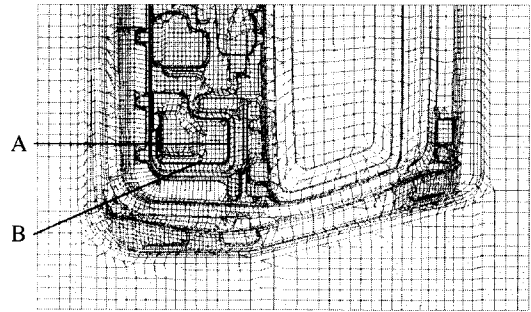


Fig. 16 Section to compare thickness between analysis result and measurement

과치를 나타내었다. 측정위치는 두께측정기의 측정이 어려운 형상부는 피하고 측정 가능한 곳을 선택하여 측정하였다. Fig. 17과 Fig. 18은 2개의 단면(단면A-A, 단면B-B)을 실측정치와 해석치를 비교한것이다. 두께변화가 거의 일치하고 있다. 유입의 형태도 측정된 결과와 해석된 결과가 거의 일치하였다. 따라서 마찰계수와 드로우비드력, 블랭크 홀더력등 공정변수값을 조절하여 해석한 결과 아주 극단적인 형상부 즉 형상 "R" 부위의 몇부분만이 0.53 mm로서 파단의 가능성이 나타났을 뿐 나머지부위

에서는 패널 임계신율을 30%(0.49 mm)로 보았을때 전체적으로 무리없는 성형조건이라고 볼 수 있었다. 실제 박판성형공정은 준정적 공정이기 때문에 운동에너지는 무시할 만큼 작아야 한다. 권치속도를 10 m/sec로 하였을 경우 운동에너지와 내부에너지의 분포를 Fig. 19에 나타내었다. 성형속도를 검증하는 또 다른 방법으로서 프레스 운동 방향의 접촉력의 총합으로 볼 때 약간의 관성은 작용

Table 5 Thickness along Section A-A

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
distance	0	45	115	155	195	225	255	310	330	360	430
measu.	0.668	0.665	0.658	0.634	0.615	0.613	0.609	0.657	0.660	0.659	0.661
analysis	0.690	0.664	0.660	0.635	0.617	0.618	0.6080	0.657	0.660	0.659	0.662

Table 6 Thickness along Section B-B

No	1	2	3	4	5	6	7
distance	0	140	200	265	300	375	425
measu.	0.705	0.685	0.683	0.625	0.640	0.593	0.612
analysis	0.702	0.684	0.684	0.622	0.638	0.591	0.612

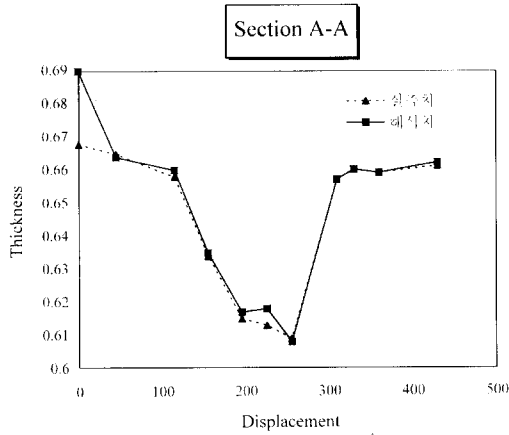


Fig. 17 Thickness distribution along Section A-A

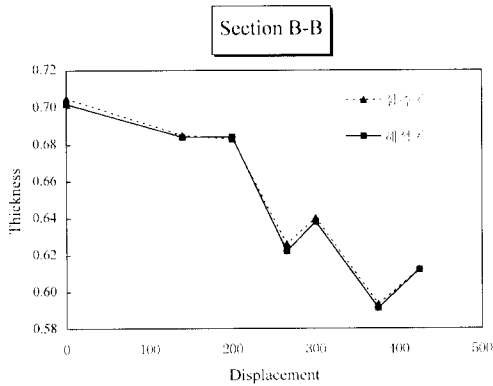


Fig. 18 Thickness distribution along Section B-B

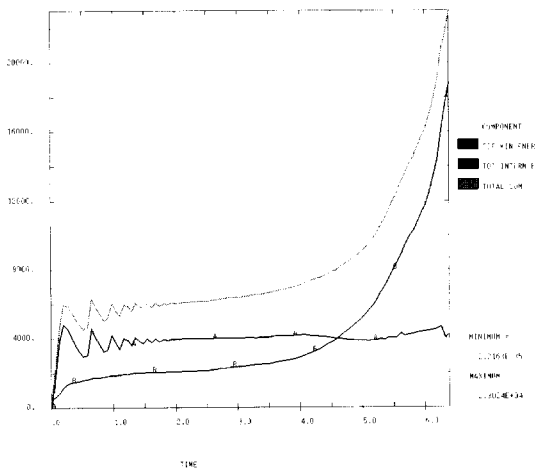


Fig. 19 Energy distribution

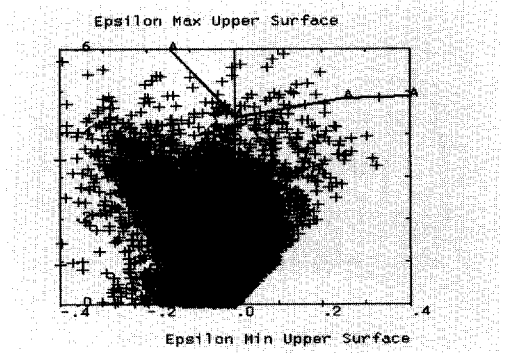


Fig. 20 Strain distribution on FLD curve when third analysis

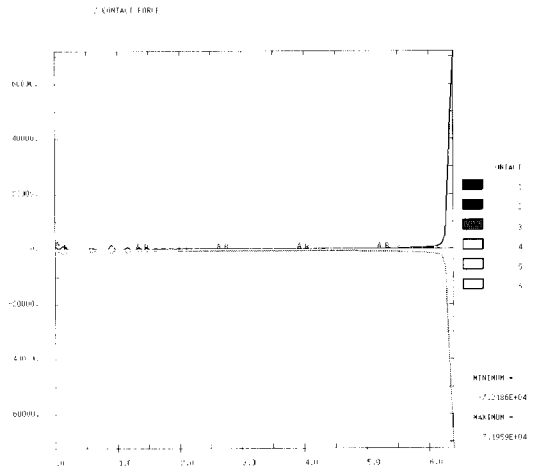


Fig. 21 Contact force in the Z-direction

하지만 전체의 접촉으로 보면 큰 진동의 효과가 나타나지 않아 전체적으로 좋은 해석 결과로 볼 수 있다. Fig. 20은 변형을 분포를 FLD Curve에 나타낸 것이다. Fig. 21은 성형방향의 접촉력을 나타내고 있다. Fig. 22는 해석된 결과를 view별로 나타내었고, Fig. 23은 실 try 성형결과를 나타낸 것이다. 해석결과와 실 try의 성형결과를 비교해 보면 거의 유사함을 알 수 있다.

4. 결론

Back Door 내부패널을 PAM-STAMP를 사용하여 3차원 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

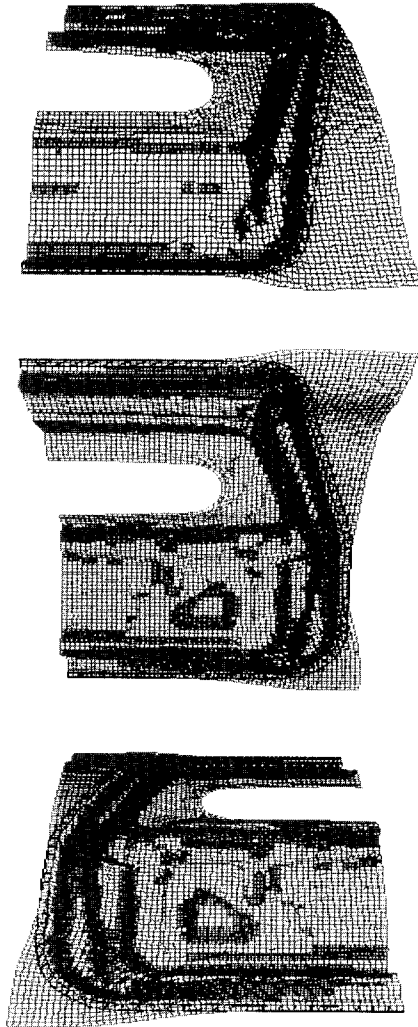


Fig. 22 Views of computer trial panel

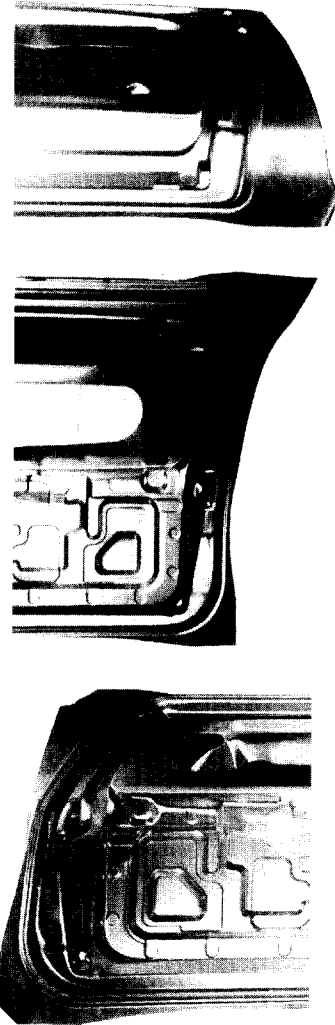


Fig. 23 Views of real try-out panel

(1) 전체적인 해석의 결과는 유입량에 있어서 실제품과 상당히 유사하게 나타났다.

(2) 해석의 신뢰도를 높이기 위해서 몇가지 보완해야 할 사항을 열거하면 다음과 같다.

- 모델 및 유한요소의 크기

해석시간과 결과값의 File 크기 때문에 유한요소의 크기를 10 mm로 했다.

따라서 R5이하의 형상표현에는 문제가 있다. 이것을 보완하기 위해서는 특정부분 요소의 크기를 조절하는 등 형상표현의 정확도를 높일 수 있도록 해야한다.

- 비드효과의 규명

초기 설계된 비드와 실 금형의 비드에 많은 차이가 있기 때문에 비드의 각 형태별 D/B가 구축되어야 한다.

(3) 여러 패널의 반복적인 해석을 통해 해석 노하우가 축적되면 금형제작 이전에 정도있는 성형된 모양과 변형률 분포를 예측할 수 있어 많은 시행착오를 줄일 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) A.Honecker and K.Mattiasson "Finite Element

- Procedures for 3D Sheet Forming” NUMIFORM89(1989), pp.457~463.
- (2) N.Rebel, J.C Nagtegaal. L.M Taylor and R.Passman “Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods in the Simulation of Metal Forming Process” NUMIFORM92(1992), pp.99~108.
 - (3) 김현영,김중재, “Explicit Code을 이용한 차체 stamping 공정해석”, KSAE’ 93 춘계학술대회논문집, (1993), pp.290~297.
 - (4) PAM-STAMP STATION User’ s manual.
 - (5) Sheet Metal Forming with ABAQUS, ABAQUS Manual..
 - (6) 박관금속의 성형. 전기찬(생기연/기아자동차)
 - (7) 성형한계도 manual, 강건재연구부/산업과학 연구소 (RIST).
 - (8) Development of the 3D Dimensional Sheet Forming Analysis System, 서해공업,금영탁/한양대, SERI/KIST
 - (9) 이종문,김종원,안병직, “스탬핑 금형의 설계해석에 관한 연구”, 서해기보, (1996), pp.1~14.
 - (10) 금영탁,이승열,안덕찬 “자동차판넬 스탬핑공정의 3차원 유한요소 시뮬레이션” KSAE논문집, 3권4호, (1995), pp.48~58.