

차체판넬 스탬핑공정을 위한 가상생산에 관한 연구

정 동 원*
(1999년 6월 17일 접수)

A Study on Virtual Manufacturing for Total Auto-Body Panel Stamping Processes

Dong-Won Jung

Key Words: Dynamic Explicit Finite Element Method(동적외연적 유한요소법), Static Implicit Finite Element Method(정적내연적 유한요소법), Auto-Body Panel Stamping(차체판넬 성형), Forming Stage(성형단계), Trimming Stage(트리밍 단계), Spring-Back Stage(스프링백 단계), Tailor Welded Blanks(접합판재)

Abstract

The dynamic explicit finite element method and the static implicit finite element method are applied effectively to analyze total auto-body panel stamping processes, which include the forming stage, the trimming stage and the spring-back stage.

The explicit time integration method has better merits in the forming stage including highly complicated three-dimensional contact conditions. On the contrary, the implicit time integration method is better for analyzing spring-back since the complicated contact conditions are removed and the computing time to get the final static state is short. In this work, brief descriptions of the formulation and the factor study are presented. Further, the simulated results for the total auto-body panel stamping processes are shown and discussed. The formability and the weld line movement in stamping with Tailor Welded Blanks were investigated through QTR-OTR-FRT.

재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구

1. 서론

박판성형 공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업 등에서 중요한 제조공정 중의 하나이다. 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라,

(편치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다.

그러나, 오늘날에는 컴퓨터의 비약적인 발전과 수치적 기법의 발달로 인하여 단순한 형상이나 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 정확하게 사전예측하는 것이 가능해졌다. 따라서 이에 대한 연구논문들이 많이 발표되었고 지금도 계속되고 있는 실정이다. 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 등의 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해

* 회원, 제주대학교 기계공학과

E-mail : jdwcjeju@cheju.cheju.ac.kr

TEL : (064)754-3626 FAX : (064)756-3886

석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 어떤 방법이 단순한 시뮬레이션에서 좋은 결과가 나왔다 하더라도 보다 더 복잡한 문제에까지 항상 만족할 만한 결과가 나타나지는 않는다. 결국 해의 효율성과 강건성(robustness)은 매우 중요한 요인이며, 이러한 문제는 비록 더 성능 좋은 컴퓨터가 사용된다 할지라도 그리 간단히 풀리지 않을 것이다.^(1,2)

수치적 방법으로서 최근에 유한 요소법(FEM)이 많이 적용되고 있는데 지난 10년간 박판 금속성형의 유한요소해석을 다루는 논문의 수는 굉장히 많이 보고되었다. 그 기간의 후반부쯤에 정적내연적 방법에서 동적외연적 방법으로 바뀌는 일종의 변화가 나타났었다. 학문과 산업 두 분야에서 외연적 방법쪽으로 빠르게 관심이 보여진 이유는 다음과 같다. 일반적인 박판 금속성형 과정은 고차원의 비선형 문제로 규정지을 수 있는데, 이것은 대상물의 기하학적 형상과 재질이 비선형일 뿐만 아니라 접촉 현상이 비선형이기 때문이다. 게다가 주름의 형성과 네킹 등이 전형적인 딥드로잉 과정 중에 나타나 비선형 효과를 더하기도 한다. 이러한 강한 비선형 효과들로 인해서 내연적 방법은 때론 수렴하지 못하는 경우가 일어나지만 반면에 외연적 적분방법을 사용하면 이러한 걱정은 없어진다. 다시 말해서 외연적 적분방법으로는 항상 해를 이끌어 낼 수 있다는 것이다. 그러나 의미있는 정확한 해를 얻기 위해서는 외연적 적분방법의 특성을 잘 파악하여 적절히 조심스럽게 사용하여야 한다.

내연적 시간 적분법은 축차(iteration)을 통하여 (n+1)번째 상태에서의 내력(internal force)과 외력(external)간의 힘평형(force balance)을 맞추는 방법이고, 외연적 시간 적분법은 축차가 전혀 필요없으며 대신 내력과 외력간의 불균형(force unbalance)에 의해 유발되는 (n)번째 상태에서 추진력(driving force)에 의해 (n+1)번째 상태를 구하는 방법이다. 내연적 시간 적분법은 해(solution)의 정밀도(accuracy)가 우수하나, 축차에 소요되는 계산시간(computing time)이 크고 강성행렬(stiffness matrix)을 꾸며야 하기 때문에 메모리 용량이 커야 하며, 무엇보다 접촉 조건(contact condition)이 매우 복잡한 3차원 문제에 있어서는 수렴(convergency)에 실패하는 경우가 많아 해 자

체를 얻을 수 없는 때가 있다. 이에 비해 외연적 시간 적분법은 시간 증분(time increment)을 안정 한계(stability limit)이하로 유지하면 축차에 의한 수렴없이 항상 해를 구할 수 있고, 강성행렬이 필요없어져 메모리 관리가 좋아질 뿐 아니라 여유분의 메모리를 활용하여 유한 요소수를 크게 늘려 잡을 수 있으며, 복잡한 형태의 접촉이 개재된 문제도 쉽게 해결된다. 또한 외연적 시간 적분법에서는 해의 안정성(stability)을 위해 시간 증분을 안정 한계(내연적 시간 적분법의 1/100 ~ 1/1000 정도)내로 유지해야 하기 때문에 전체 계산 스텝수는 매우 크게 되지만 계산 소요 시간에 있어서는 복잡한 3차원 형상 및 접촉의 경우 내연적 시간 적분법에 비해 오히려 작게 된다.

스프링백 현상이, 박판이 성형된 후 박판 내부의 응력이 탄성적으로 재분배(redistribution)되면서 생겨나는 현상인 만큼 탄성 변형율을 고려하는 탄소성 유한 요소법의 채택이 필수적이다. 또한 유한 요소 형태는 박판의 특징을 잘 반영할 수 있는 셸(shell) 요소가 적당하다. 시간 적분법으로는 성형공정 해석에는 외연적(explicit) 방법을, 스프링백 해석에는 내연적(implicit)방법을 채택하는 데, 이렇게 함으로써 계산 효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.⁽³⁾

본 논문에서는, 트리밍과 스프링백을 포함하는 전체 스탬핑공정을 복잡하고 어려운 대형차체판넬과 접합판재에 적용하여 유한요소 해석하였으며 현장적용의 가능성을 검토하여 보았다.

2. 외연적 시간 적분법의 수식화

2.1 운동 방정식

외력에 의해 행해진 일(W^{ext})과 내력, 관성력 및 점성력에 의한 일(W^{int})은 같아야 한다는 일평형(work balance)으로부터⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} & \int_V \delta U^T \varphi dV + \int_S \delta U^T \phi dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i \\ & = \int_V (\delta \epsilon^T \sigma + \delta u^T \rho \ddot{u} + \delta u^T k_d \dot{u}) dV \quad (1) \end{aligned}$$

이 성립된다. 여기서

$\delta u, \delta \epsilon$: 임의의 변위 및 변형률

Ψ : 체적력 (Body force)

Φ : 표면력 (Surface traction)

F_i : 집중 하중

ρ : 밀도

k_d : 점성 계수

u, \dot{u}, \ddot{u} : 변위, 속도, 가속도이다.

형상 함수(shape function) N 을 도입하면

$$u = Nd, \quad \dot{u} = N\dot{d}, \quad \ddot{u} = N\ddot{d} \quad (2)$$

이 되고 이를 식 (1)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적 힘평형 식(dynamic force balance equation)을 구할 수 있다.

$$M\ddot{d} + C\dot{d} + R^{int} = R^{ext} \quad (3)$$

여기서 M 과 C 는 각각 질량과 점성 행렬을 나타내며,

$$M = \int_V \rho N^T N dV$$

$$C = \int_V k_d N^T N dV \quad (4)$$

R^{int} 와 R^{ext} 는 각각 내력과 외력을 나타내는 벡터이다.

$$R^{int} = \int_V B^T \alpha dV$$

$$R^{ext} = \int_V N^T \Psi dV + \int_S N^T \Phi dS + \sum_{i=1}^n F_i \quad (5)$$

2.2 집중 질량 행렬

축차가 없는 외연적 시간 적분을 위해 M 행렬을 대각선 행렬 (diagonal matrix)로 만드는 것이 필수적이다. 이를 위해 식 (4) 대신 다음과 같은 집중 질량 M 행렬을 정의한다.

$$M = \sum_e m_e = \begin{cases} \frac{1}{n} \int_{V^e} \rho dV^e & : \text{대각 요소} \\ 0 & : \text{비대각 요소} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 n 은 한 요소의 절점수이다.

2.3 외연적 시간 적분법

계산의 편리를 위해 식 (3)에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분(explicit time integration) 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다.⁽⁵⁾

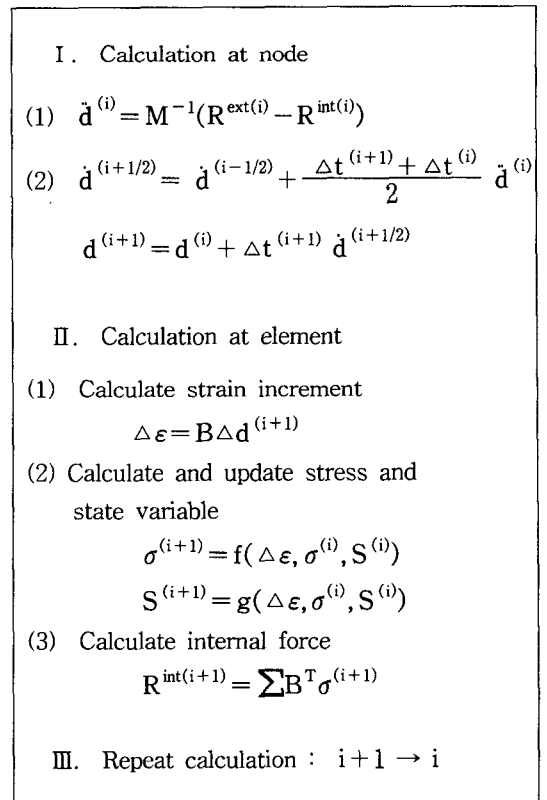


Fig. 1 Flow chart for the calculation of explicit time integration scheme

먼저 각 절점에서 구해진 외력과 내력의 차이와 그 질량으로 가속도를 구한 후 이를 중간 차분법 (central difference method)를 이용해 속도 및 변위를 구한다. 구해진 변위로부터 해당 요소의 변형률을 구할 수 있다. 이를 지배방정식에 대입하면 그 요소에서의 응력과 그와 관련한 상태 변수들을 구할 수 있다. 이로부터 다시 내력을 구할 수 있다. 외력은 이미 주어져 있으므로 다음 계산 스텝에 이를 반영하여 계속 반복 계산하게 된다.

이는 응력과(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다⁽⁶⁾. 즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

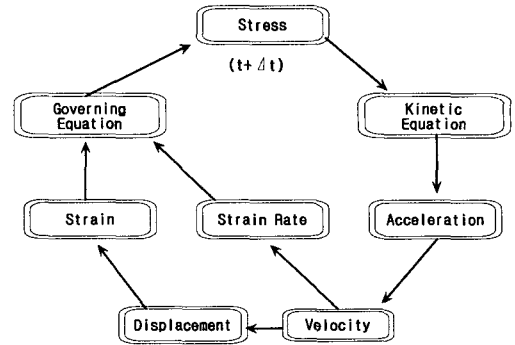


Fig. 2 Time integration cycle of the dynamic explicit time integration method

2.4 접촉 처리

외연적 시간 적분법의 장점을 살리기 위해 벌칙 함수법(penalty method)를 사용한다. 절점이 금형을 ρ만큼 파고들면 접촉력 f_s를 절점에 가해준다⁽⁷⁾.

$$f_s = -h k n \tag{7}$$

여기서 h는 침투량, n은 수직 벡터(normal vector), k는 강성 인수(stiffness factor)로서 다음과 같이 정의된다.

$$k = \alpha K A^2 / V$$

α : 척도 계수(scale factor)

K : 체적 탄성 계수

A : 요소 면적

V : 요소 부피

이의 모식도를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 (a)는 두개의 표면이 접촉하기 직전의 모습을 나타내고 있고, (b)는 두 개의 표면이 계산상으로 먼저 침투를 허용하는 모습을 나타내고 있다.

이는 벌칙 함수법의 특성이다. 침투를 허용한 후 그 침투량 h에 해당하는 f_s를 식 (7)과 같이 구하여 이를 양쪽 표면에 대칭적으로 가해주면 (c)와 같이 기하학적으로 맞는 접촉 상태를 가지게 된다.

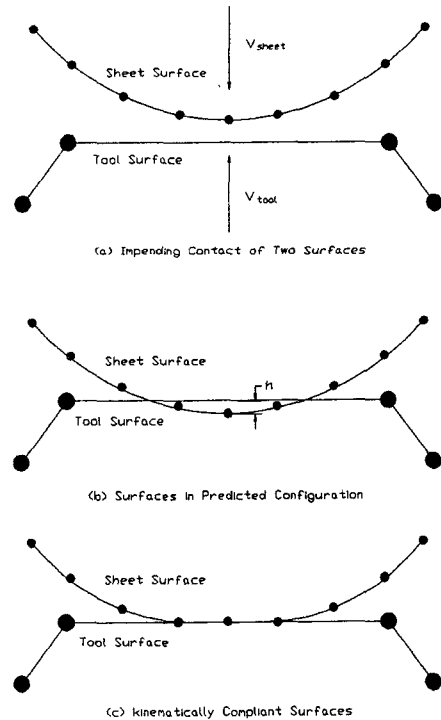


Fig. 3 Schematic description for the contact scheme

2.5 시간 증분의 안정 한계

외연적 시간 적분법에서는 축차가 없는 대신 해의 안정성을 보장하기 위한 임계 시간 증분 (critical time increment)이 존재하여 시간 증분이 이 값 이하일 것을 요구하고 있다. 점성이 없

을 경우 임계 시간 증분은,

$$\Delta t_c = L_s / C \quad (8)$$

L_s : 요소의 특성 길이(characteristic length)

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{: 응력 전파 속도}$$

E : 영계수(Young's modulus)

ρ : 밀도

가 된다.⁽⁸⁾

동적 외연적 시간적분법을 이용한 프로그램의 전체흐름도를 살펴보면 Fig. 4와 같다. 먼저 입력데이터로부터 재료물성치와 공정변수 등을 읽어 들이고 집중질량법을 이용하여 역행렬을 구하는데 소요되는 엄청난 계산시간을 피할 수 있다. 외력과 내력을 구하고 이로부터 가속도를 계산하여 금형과의 접촉여부를 판단하여 접촉마찰을 적절히 고려하고 이에 따라 가속도를 수정한다. Central Difference법을 적용하여 속도와 변위를 계산하고 최종 편치행정에 도달할 때까지 반복수행하고 결과를 출력한다.

3. 3차원 유한요소 해석 예

3.1 S-Rail Forming

NUMISHEET '96의 벤치마크(Benchmark)문제 중 하나인 S-Rail 성형을 탄소성 외연적 상용프로그래밍인 PAM-STAMP을 사용하여 성형공정과 스프링백 해석을 행하였다. S-Rail 성형에 쓰인 다이, 블랭크홀더, 펀치 및 판재의 기하학적 형상을 Fig. 5 에 나타내었다. 계산에 사용된 재질은 스프링백 현상을 관찰하기 위하여 스프링백 양이 비교적 많은 AL 6111-T4 재질을 사용하였으며 그 물성치는 아래와 같다.

Initial sheet thickness : 0.92 mm

stress-strain characteristics :

$$\bar{\sigma} = 488.0(\bar{\epsilon})^{0.232} \text{MPa}$$

Young's modulus : $E = 0.69 \times 105 \text{ Mpa}$

Lankford value for normal anisotropy : $r = 0.64$

Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

Blankholding force : 980 kN

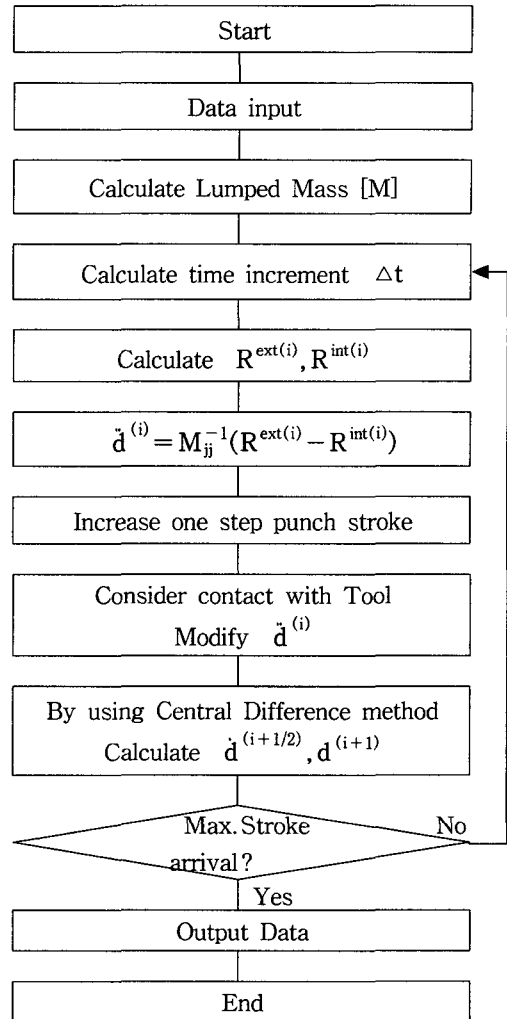


Fig. 4 flow chart of the calculation procedure of the dynamic explicit time integration method

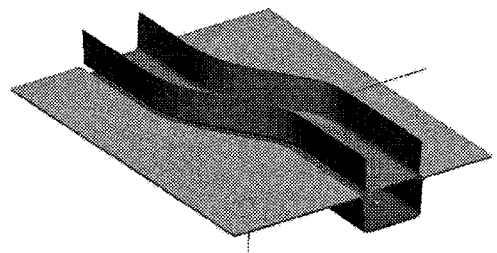


Fig. 5 Schematic view of the tool surfaces and blank in the case of S-rail

보통 펀치 속도가 재료 내의 응력 전파 속도 (금속의 경우 약 5,000 m/sec)의 1% 이내이면 안정된 준정적 해를 구할 수 있는 것으로 알려져 있다.^(9~11) 그래서 해의 정확성과 경제성을 동시에 고려하여 펀치속도를 10 m/sec로 하였다.

박판의 두께 방향으로 7개의 적분점을 둔 Belytschko-Tsay Shell 요소를 사용하였다. 성형 해석시 전체 계산 소요시간은 IBM RS/6000 43p-140에서 약 3.5 시간이었다.

Fig. 6에 최종 변형형상과 두께분포를 나타내고 있다. 최종변형형상을 Shading 하여 정밀히 관찰해 보면 펀치 머리부에 약간의 주름이 있는 것으로 관찰되었고 이것은 실험결과와도 잘 일치하는 것으로 판단되었다. Fig. 7에 최종 성형공정에서의 변형률분포를 보여주고 있다.

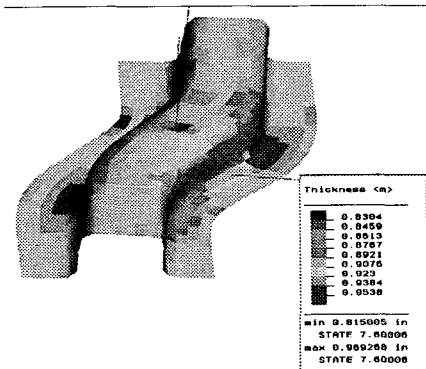


Fig. 6 Thickness distribution and deformed configuration at the final punch stroke in the case of S-rail

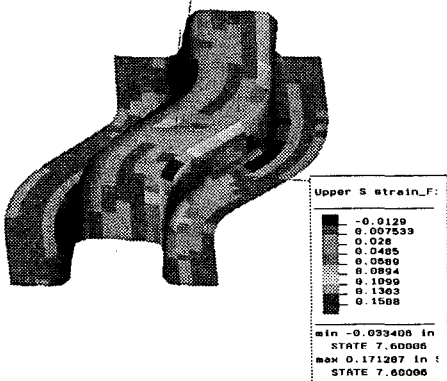
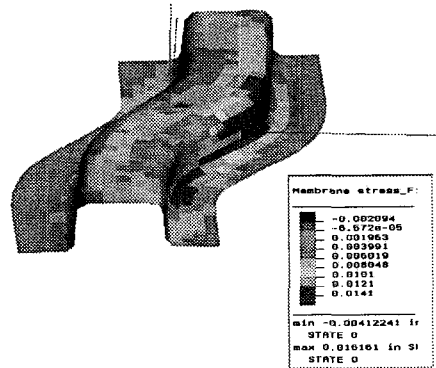
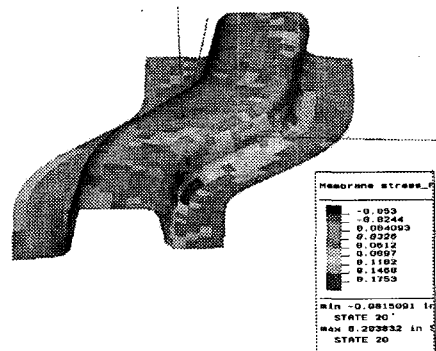


Fig. 7 Effective plastic strain distribution on the outer layer of S-rail

성형 후의 결과 데이터를 추출하여 탄소성 내연적 프로그램에 입력한 후 스프링백 해석을 하였다. Fig. 8에 스프링백 전후의 변형 형상과 잔류응력 분포를 보여 주고 있다. 자세히 비교해 보면 플랜지 부위가 스프링백 후에 약간 벌어져 있는 것을 관찰해 볼 수 있다. 또한, 스프링백 전후의 잔류응력 분포를 보기 위해 스프링백 전후의 응력분포를 Fig. 8에 역시 나타내었다. 성형 직후에는 응력의 분포가 넓고 그 값이 컸으나, 스프링백 후 몇 군데를 제외하고는 내부 응력이 거의 해소되었음을 알 수 있다. 계산시간을 경제적으로 줄이면서도 정밀한 해석이 가능하도록 하기 위하여 Adaptive Remeshing 기법을 사용하여 가능성을 타진하여 보았으며 Remeshing이 성형과정 중에 곡률이 심한 부분부터 이루어지는 과정을 Fig. 9에서 보여주고 있다.



(a) Before springback



(b) After springback

Fig. 8 Effective stress distributions on the outer layer of S-rail :

(a) Before springback (b) After springback

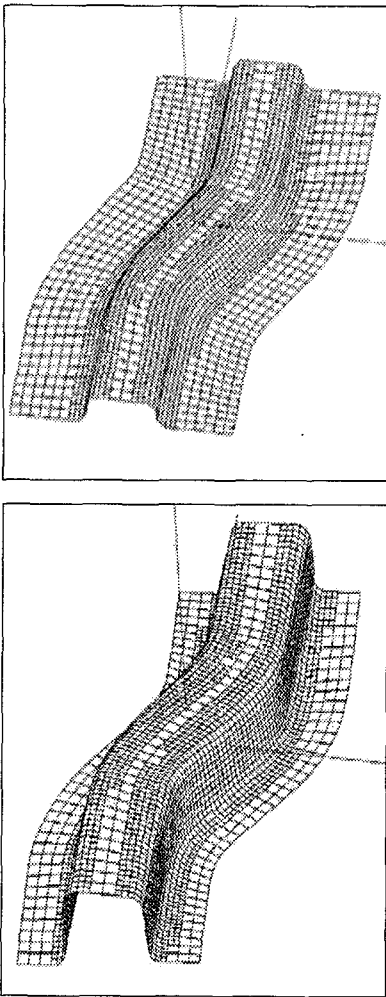


Fig. 9 Deformed mesh configuration of intermediate forming by applying Adaptive-remeshing method

3.2 Fuel - Tank Forming

연료 탱크는 금형면이 제품의 중간부에 강성을 주기 위해 엠보싱(embossing)을 포함하고 있고, 접촉 및 마찰에 있어 비선형성이 크기 때문에 성형해석 하기가 무척 어려운 제품이다. 내연적 방법으로는 엠보싱을 포함하는 복잡한 형상 때문에 수렴된 결과값을 얻을 수 없다.^(9,11) 탄소성 외연적 상용프로그램인 PAM-STAMP을 사용하여 성형공정, 트리밍공정과 스프링백해석을 행하여 전체공정을 해석할 수 있는 가능성을 보였다.

해석에 사용된 금형은 CATIA CAD/CAM 시스템으로부터 묘사되었다.

Fig. 10은 펀치를 마지막으로 가한 후 변형된 실험 형상을 보여주고 있다. 실제품은 그 중간부에 강성을 주기 위해서 엠보싱된 보강재와 드로우 비드를 포함하지만, 성형해석에서는 엠보싱만 고려하고 드로우 비드는 무시하여 단순화 시킨다. 성형에 쓰인 다이, 홀더, 펀치 및 판재의 기하학적 형상을 Fig. 11에 나타내었다.

동적 외연적 해석을 위해서 박판의 두께 방향으로 7개의 적분점을 둔 Belytschko-Tsay Shell 요소를 사용하였으며, 블랭크의 초기 직사각형 형상은 1020 mm × 700 mm 이었다.

해석에 사용된 재료 및 공정변수는 아래와 같다.

Initial sheet thickness : 0.8 mm

stress-strain characteristics :

$$\bar{\sigma} = 526.0 (0.0074 + \bar{\epsilon})^{0.239} \text{ MPa}$$

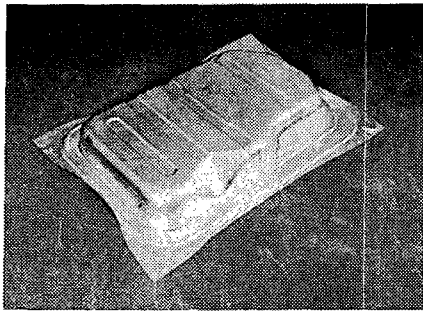
Young's modulus : E = 2 × 105 Mpa

Lankford value for normal anisotropy : r = 1.79

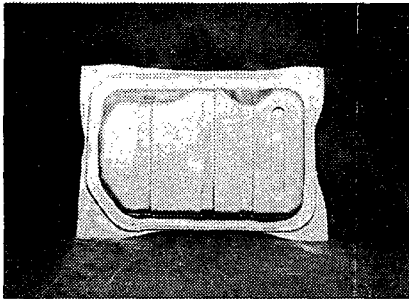
Coulomb coefficient of friction : μ = 0.1

Blankholding force : 890 kN

외연적 해석에서 수치적인 테스트를 거쳐 결정된 10m/s의 펀치속도를 사용하였는데, 이 값은 해의 정확성과 경제성을 동시에 고려한 경제속도이다.⁽¹²⁾ Fig. 12에서는 최종 펀치행정에서, 동적 외연적 해석에 의한 변형형상과 두께 변형을 분포를 보여주고 있다. 동적 외연적 해석을 사용하여 Fig. 10의 실제 실험형상에서 보여지는 것과 같이 급격한 기울기와 날카로운 모퉁이를 이루고 있는 판넬의 가장 취약한 부분을 잘 예측할 수 있다. Fig. 13에서 최종 성형공정에서의 변형을 분포를 보여주고 있다. Fig. 14에서는 트리밍 후의 형상을 보여주고 있으며, Fig. 15는 트리밍 후의 스프링백 해석결과를 보여주고 있는데 약간의 잔류응력들이 제품외곽쪽에 분포하고 있음을 알 수 있다. 동적 외연적 해석의 성형해석 소요 시간은 IBM RS/6000 43p-140에서 약 4시간이 소요되었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 동적 외연적 탄소성 해석법은 어렵고 복잡한 3차원 차체 판넬의 전체 스탬핑공정 문제에 성공적으로 적용되어짐을 알 수 있다.



(a) view-1



(b) view-2

Fig. 10 Photographs of experimental specimen by fuel tank stamping

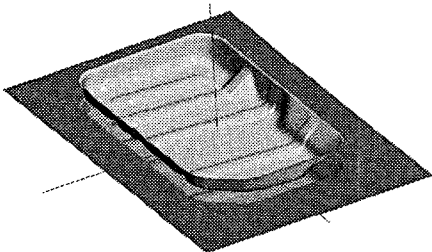


Fig. 11 Schematic view of the tool surfaces in case of fuel tank

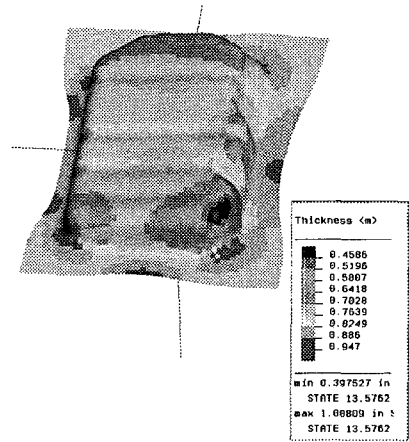


Fig. 12 Thickness distribution and deformed configuration at the final punch stroke in case of fuel tank

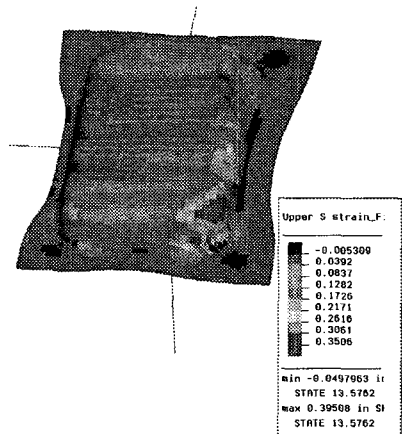


Fig. 13 Effective plastic strain distribution on the outer layer of fuel tank

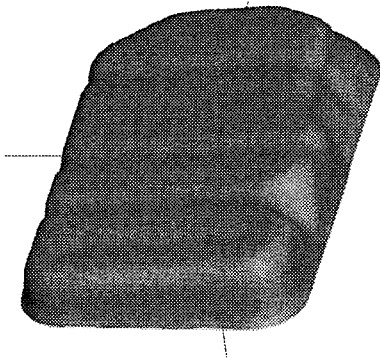


Fig. 14 Schematic view of fuel tank after trimming

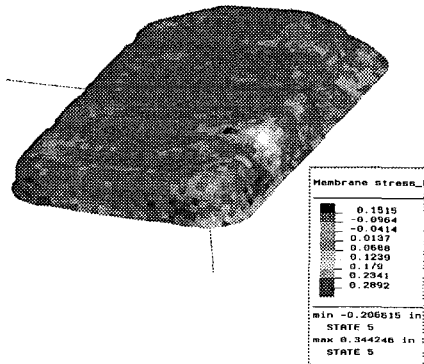


Fig. 15 Effective stress distributions on the outer layer of fuel tank after springback

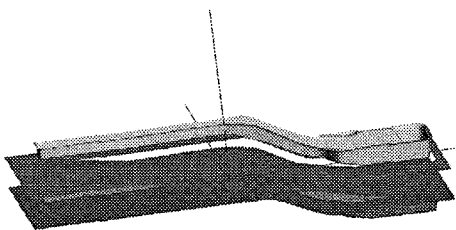


Fig. 16 Schematic view of the tool surfaces and Blank in case of member

3.3 Member Forming

멤버류는 전체 차체형상을 정밀히 유지해야 되므로 스프링백 후에도 뒤틀림 없이 기하학적 정밀도가 요구되는 아주 중요한 대형 차체판넬로 비선형성이 대단히 크기 때문에 성형해석 하기가 무척 어려운 제품이다. 탄소성 외연적 상용프로그램인 PAM-STAMP을 사용하여 성형공정을 해석하였으며 탄소성 내연적 프로그램을 이용하여 스프링백 해석을 행하였다. 해석에 사용된 금형은 CATIA CAD/CAM 시스템으로부터 묘사되었다. 성형에 쓰인 다이, 블랭크홀더, 펀치 및 판계의 기하학적 형상을 Fig. 16 에 나타내었다.

동적 외연적 해석을 위해서 박판의 두께 방향으로 7개의 적분점을 둔 Belytschko-Tsay Shell요소를 사용하였으며, 해석에 사용된 재료 및 공정 변수는 아래와 같다.

Initial sheet thickness : 1.0 mm

stress-strain characteristics :

$$\bar{\sigma} = 546.1 (0.0083 + \bar{\epsilon})^{0.271} \text{ MPa}$$

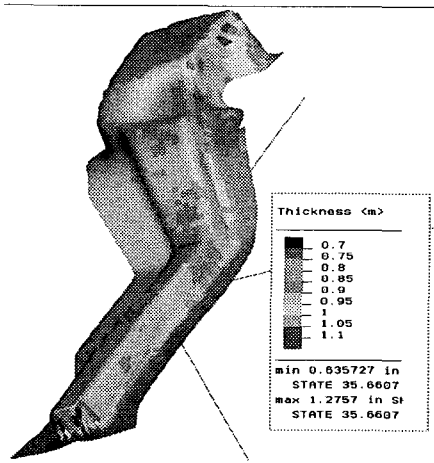
Young's modulus : $E = 2 \times 105 \text{ Mpa}$

Lankford value for normal anisotropy : $r = 1.92$

Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

Blankholding force : 1000 kN

외연적 해석에서 수치적인 테스트를 거쳐 결정된 10m/s의 펀치속도를 사용하였는데, 이 값은 해의 정확성과 경제성을 동시에 고려한 경제적 속도이다.⁽¹²⁾ Fig. 17에서는 최종 펀치행정에서, 동적 외연적 해석에 의한 변형형상과 두께 변형을 분포를 보여주고 있다. Fig. 18에서 최종 성형공정에서의 변형률 분포를 보여주고 있다. Fig. 19에서는 스프링백 해석결과를 보여주고 있는데 약간의 잔류응력들이 펀치 윗부분과 옆면쪽에 분포하고 있고 특히 맨 아래 부분의 펀치 벽면쪽에 아주 큰 잔류응력이 분포되어 있음을 알 수 있어 금형설계시 아주 좋은 정보들을 제공하고 있다. 동적 외연적 해석의 성형해석 소요시간은 IBM RS/6000 43p-140에서 약 6.5 시간이 소요되었다.



(a) view-1

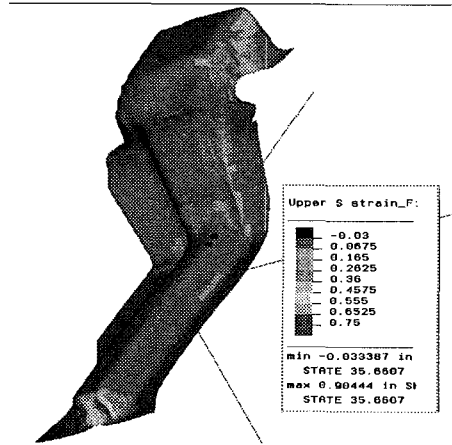
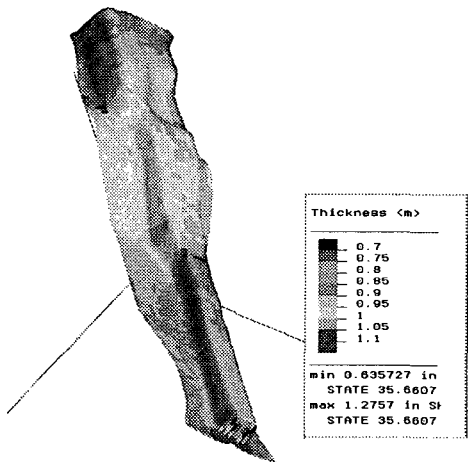


Fig. 18 Effective plastic strain distribution on the outer layer of member



(b) view-2

Fig. 17 Thickness distribution and deformed configuration at the final punch stroke in case of member

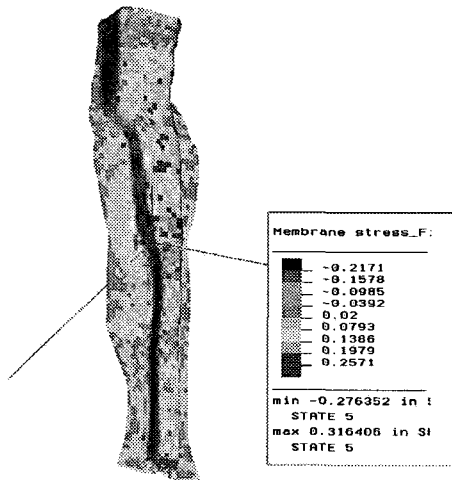


Fig. 19 Effective stress distributions on the outer layer of member after springback

3.4 접합판재(Tailor Welded Blanks) 성형해석

예: QTR-OTR-FRT

자동차의 차체 제조분야에서 부품수를 줄이면 제조비용을 줄일 수 있다는 개념을 도입하여 소재상의 제한을 극복하는 방법으로서 접합판재(Tailored Welded Blank)가 있다.

QTR-OTR-FRT의 접합판넬인 경우 부품을 성형하기 전에 강도가 요구되는 부위를 미리 요구되는 강도만큼의 두꺼운 강판으로 메쉬시임 용접하여 접합판재를 만든 후, 성형함으로써 강도보강 부품이 필요없게 된다. 그 결과 사용하는 금형수가 줄고, 용접에 사용되는 설비의 감소로 제조비용이 줄게된다. 또한, 접합판재를 사용함으로써 부품수의 감소와 사용강판의 두께의 감소에 의한 경량화효과가 있다. 이와 같이 경제적, 기술적 중요도에도 불구하고 국내에서는 아직 TB 용접(용접기 포함)에 대한 기본기술 및 TB재 성형기술, TB재 적용에 대한 부품설계기술 등 접합판재의 기술개발이 미흡한 실정이다. 따라서 향후 국내의 자동차업계가 선진국 자동차업계와 경쟁하기 위해서 TB를 차체에 적용하기 위한 기술개발이 절실하게 필요하고, TB기술개발로 기술격차를 줄이고 가격경쟁에서도 우위를 점하게 될 것이다^(13, 14). 접합판재는 부분별로 재료와 두께가 다르므로 인한 비선형성 때문에 성형해석하기가 무척 어려우므로 성형공정인 경우 내연적 방법으로는 수렴된 결과값을 얻을 수 없다. 따라서 탄소성 동적 외연적 성형해석 프로그램인 DYNA3D를 사용하여 성형공정을 해석하였으며, 탄소성 정적 내연적 프로그램인 NIKE3D를 사용하여 트리밍공정과 스프링백 해석을 행하여 효율성과 정확성을 높였다. 본 예제에서 PAM-STAMP외에 DYNA3D와 NIKE3D를 채택한 이유는 상용소프트웨어간의 장단점들을 파악하여 박판해석 기술의 보다 빠른 발전과 응용을 도모하여 널리 보급하기 위함이다. 해석에 사용된 금형은 CATIA CAD/CAM 시스템으로부터 묘사되었다. 성형에 쓰인 다이, 블랭크홀더, 펀치 및 판재의 기하학적 형상을 Fig. 20에 나타내고 있으며 초기 해석시작전 금형들의 배치상황을 Fig. 21에 보여주고 있다. 동적 외연적 해석을 위해서 박판의 두께 방향으로 7개의 적분점을 둔 Belytschko-Tsay Shell요소를 사용하였다.

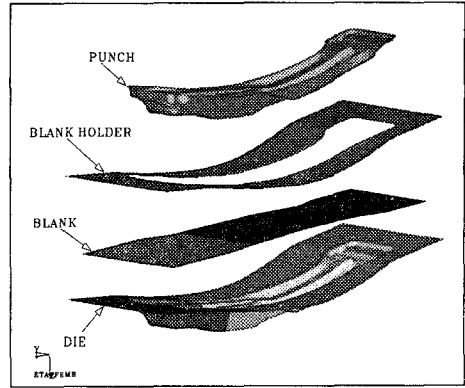


Fig. 20 Schematic view of the tool surfaces and Tailor Welded Blank

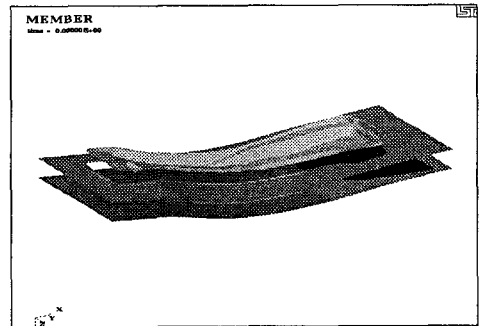


Fig. 21 Initial tools shape

해석에 사용된 재료 및 공정변수는 아래와 같다.

<두께가 얇은 부분의 재료변수>

Initial sheet thickness : 1.6 mm

stress-strain characteristics :

$$\bar{\sigma} = 513.0 (0.0033 + \bar{\epsilon})^{0.258} \text{ MPa}$$

Young's modulus : E = 2 × 105 MPa

Coulomb coefficient of friction : μ = 0.1

<두께가 두꺼운 부분의 재료변수>

Initial sheet thickness : 2.0 mm

stress-strain characteristics :

$$\bar{\sigma} = 580.0 (0.0039 + \bar{\epsilon})^{0.248} \text{ MPa}$$

Young's modulus : E = 2 × 105 MPa

Coulomb coefficient of friction : μ = 0.1

동적 외연적 해석에서 수치적인 테스트를 거쳐 결정된 10m/s의 펀치속도를 사용하였는데, 이 값은 해의 정확성과 경제성을 동시에 고려한 경제적 속도이다.⁽¹²⁾ Fig. 22에서는 초기 블랭크형상과 접합판넬에서의 두께를 보여주고 있다. Fig. 23에서는 동적 외연적 해석에 의한 최종 블랭크형상과 접합판넬에서의 두께분포를 보여주고 있다. 동적 외연적 해석을 사용하여 급격한 기울기와 날카로운 모퉁이를 이루고 있는 판넬의 가장 취약한 부분을 잘 예측할 수 있다. Fig. 24에서는 최종펀치행정에서의 유효응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 25에서는 얇은 부분과 두꺼운 부분의 FLD 곡선상에서 변형상태를 보여주고 있어 금형설계에 사전예측자료로 유용함을 보여주고 있다. Fig. 26에서는 트리밍 공정후의 판넬형상을 보여주고 있고 Fig. 27에서는 스프링백후의 총 변형량을 보여주고 있다. Fig. 28에

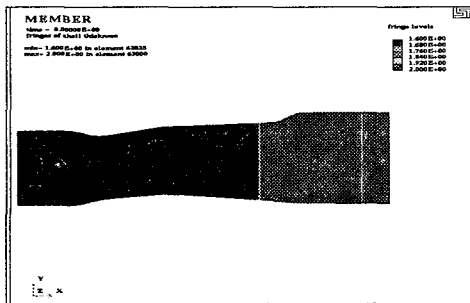


Fig. 22 Initial blank shape and thickness distribution

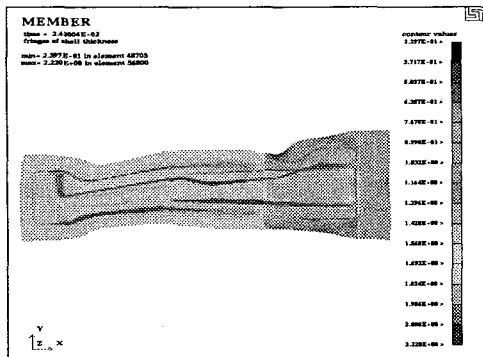


Fig. 23 Thickness strain distribution and deformed configuration at the final punch stroke

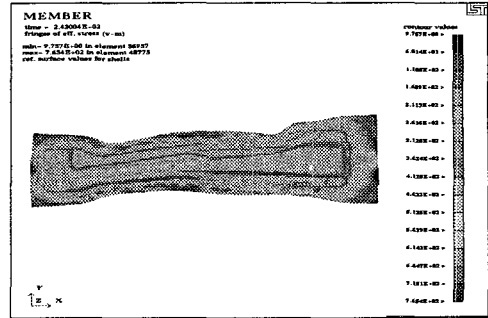
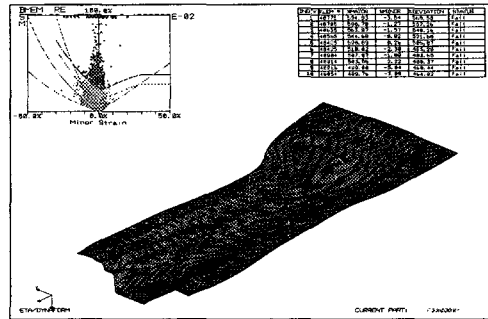
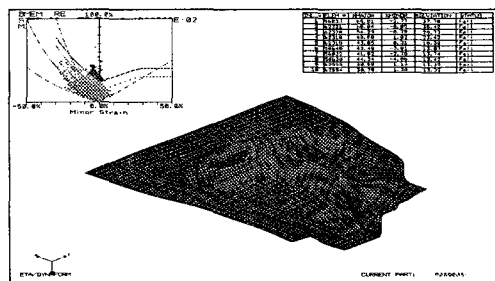


Fig. 24 Effective stress distribution at the final punch stroke



(a) Thin Part



(b) Thick Part

Fig. 25 Deformation state interpreted by FLD-curve

서는 스프링백 전후의 잔류응력을 보여주고 있는데 스프링백 후에 잔류응력이 급격히 감소하였음을 보여주고 있다. 동적 외연적 해석의 성형해석 소요 시간은 IBM RS/6000 43p-140에서 약

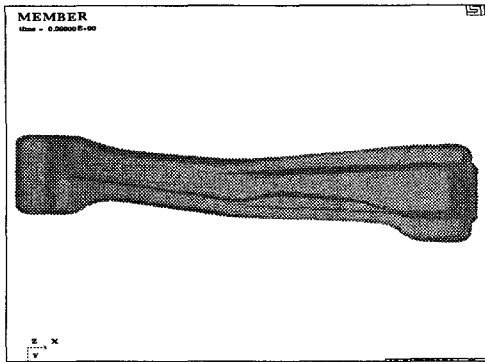
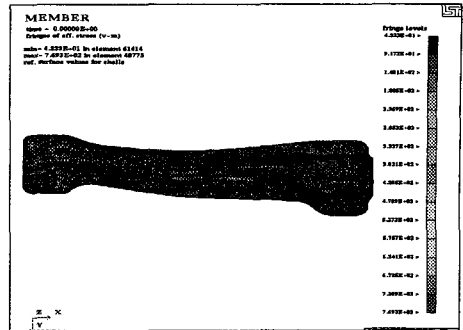


Fig. 26 Schematic view of Tailor Welded Blank after trimming



(a) Effective stress before spring-back

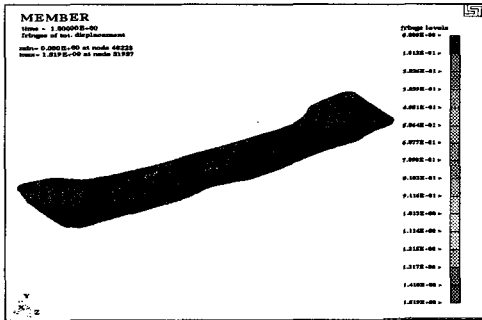
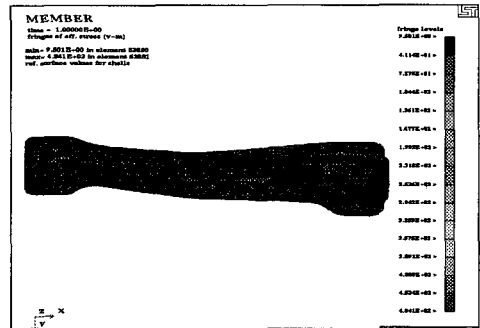


Fig. 27 Schematic view of total displacement distribution after spring-back



(b) Effective stress after spring-back

Fig. 28 Difference of effective stress after spring-back

4 시간이 소요되었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 DYNA3D와 NIKE3D를 사용한 성형공정과 트리밍공정, 스프링백 해석이 어렵고 복잡한 대형 접합판재의 전체 스탬핑공정 문제에 성공적으로 적용되어짐을 알 수 있다.

4. 결론

(1) 상용소프트웨어인 PAM-STAMP와 LS-DYNA3D를 사용하여 차체판넬의 3차 원 스탬핑공정해석을 하였으며, 성형공정과 아울러 트리밍공정과 스프링백 해석을 동시에 병행하여 현업의 전체 공정에 도움이 되는 해석을 수행하였다.

(2) 어렵고 복잡한 비선형성이 아주 높은 대형 차체판넬을 해석하여 현업적용 가능성을 타진하여 보았으며 성형공정해석은 외연적 해석방법으로 하였고 스프링백 해석은 내연적 해석방법으로 수행하여 효율성과 정확도를 높였다.

(3) 접합판재 개발에 성형해석기법을 도입하여 그 효용성을 타진하여 보았다. LS-DYNA3D와 NIKE3D를 사용하여 접합판재의 전체 스탬핑공정을 해석하여 성형후 성형성평가, 변형형상 및 용접선의 변화 등을 살펴보았다.

(4) 경제적인 해석과 보다 정밀한 성형해석을 동시에 만족시키기 위한 Adaptive -remeshing 방법을 적용하여 가능성과 타당성을 검증하여 보았다.

참고문헌

- (1) Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., 1995, "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.
- (2) Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., 1995, "A Dynamic Explicit/Rigid-Plastic Finite Element Formulation and Its Application to Sheet Metal Forming Processes," *Engineering Computations*, Vol. 12, pp. 707~722.
- (3) 이상욱, 윤정환, 양동열, 1996, "외연적 시간 적분법을 이용한 박판 성형 및 내연적 스프링백 해석," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 647~652.
- (4) Wang, N. M. and Budiansky, B., 1978, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 73~82.
- (5) "An Introduction to ABAQUS/Explicit," 1991, Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
- (6) Moss, W. C., 1984, "On the Computational Significance of the Strain Space Formulation of Plasticity Theory," *Int. J. Num. Met. Engr.*, Vol. 20, pp. 1703~1709.
- (7) Hallquist, J. O., 1983, "Theoretical Manual for DYNA3D," Lawrence Livermore Laboratory.
- (8) Meyers, M. A., Ravichandran, G., 1989, "Lectures on Dynamic Behavior of Materials," University of California, San Diago.
- (9) 정동원, 1995, "외연적 시간 적분법을 이용한 박판성형공정의 강소성 유한요소해석," 박사학위 논문, 한국과학기술원.
- (10) Belytschko, T., Lin, J. L., Tsay, C., 1984, "Explicit Algorithms for the nonlinear dynamics of shells," *Com. Met. App. Mech. Engr.*, Vol. 42, pp. 225~251.
- (11) 안동규, 정동원, 양동열, 이장희, 1995, "강소성 외연적 유한요소법을 이용한 자동차 박판제품의 성형공정에 대한 단면해석," 자동차공학회 제3권, 제3호, pp. 19~28.
- (12) Jung, D. W., 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(4), pp. 479~490.
- (13) 백승준, 구분영, 금영탁, 강수영, 이호기, 1997, "합체 박판(Tailored Blank) 성형 기술의 개발 현황과 전망," 자동차공학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 3~10.
- (14) 이건상, 1997, "자동차 생산공정에서의 레이저 응용," 자동차공학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 47~60.