

접합판재의 성형해석에 관한 연구

정 동 원*

A Study on the Forming Analysis of Tailor Welded Blanks

Dong-Won Jung*

ABSTRACT

In this study, the forming behavior of Tailor Welded Blanks is analyzed by using the explicit finite element code PAM-STAMP and LS-DYNA3D. The dynamic explicit finite element method is applied effectively to analyze total auto-body panel stamping processes, which include the forming stage, the trimming stage and the springback stage consecutively. The formability and the weld line movement in stamping with Tailor Welded Blanks were investigated through cylindrical cup and QTR-OTR-FRT. Tailored Welded Blanks are defined as two or more separate pieces of sheet material having the same or dissimilar thickness and/or physical properties, joined together before forming. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

Key Words : Tailor welded blanks, Dynamic explicit finite element method,
Auto-body panel stamping, Formability

1. 서 론

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 하나

이다. 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구(펀치, 다이 및 블랭크 홀더 등의 집합체) 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 최근에 들어서 복잡한 박판부품들이 공정과 금형의 설계와 제작에서 수많은 시행착오를 피하여 공정과정을 적절히 설계하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 해석이

* 제주대학교 기계공학과, 산업기술연구소
Dept. of Mechanical Eng., Res. Inst. Ind. Tech.,
Cheju Nat'l Univ.

시도되고 있다. 다양한 접촉과 마찰조건들뿐 아니라 기하학적 비선형과 재료학적 비선형을 포함하는 어려운 문제들을 해결하기 위하여 신뢰할 만한 시뮬레이션 방법이 요구되어진다.

자동차의 차체 제조분야에서 부품수를 줄이면 제조비용을 줄일 수 있다는 개념을 도입하여 소재상의 제한을 극복하는 방법으로서 접합판재(Tailored Welded Blank)가 있다. 즉 예를 들어 내부판재(Door Inner Panel)의 경우 기존의 제조방법에서는 얇은 판재로 Door Inner부품을 성형한 후 차체에 문을 고정시키는 부분의 강도를 보강하기 위한 강도보강부품을 사용할 필요가 있다. 그러나 접합판재를 사용하면 부품을 성형하기전에 강도가 요구되는 부위를 미리 요구되는 강도만큼의 두꺼운 강판으로 용접하여 접합판재를 만든 후, 성형하므로써 강도보강부품이 필요 없게 된다. 그 결과 사용하는 금형수가 줄고, 용접에 사용되는 설비의 감소로 제조비용이 줄게 된다. 차체에 있어서 내부식성이 중요한 부위는 차체 하부이므로 접합판재를 설계할 때, 차체하부에 사용될 부분만을 도금강판을 사용하게되면 도금강판의 사용량을 줄일 수 있어서 차체제조비용이 줄어든다. 또한, 접합판재를 사용하므로써 부품수의 감소와 사용강판의 두께의 감소에 의한 경량화효과가 있다. 이와 같이 경제적, 기술적 중요도에도 불구하고 국내에서는 아직 TB용접(용접기포함)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.

접합판재(TWB)에 대한 적용사례를 살펴보면 일본의 토요다 자동차는 luxury모델에 사용되는 측면부재를 각기 다른 방식으로 표면 처리(방청성능 요구에 따라 아연 코팅의 양이 20~60g/m²)되고 두 가지의 두께(0.8mm, 1.0mm)로 이루어진 다섯 종류의 판재를 바깥 면이 매끄럽도록 단일 박판으로 용접하여 생산하고 섀시프의 보강재, 엔진 덮개의 내부 부품에도 이 방식을 적용하였다^{1),2)}. 이 적용예에서 얻은 효과는 보다 미려한 외관과, 높은 생산성 확보, 높은 치

수 정밀도, 재료비의 감소, 생산품의 경량화, 그리고 무엇보다도 기존의 방식에서 20개의 스텝핑 다이가 필요하던 것이 단지 4개로 줄었다는 데 있다. GM사는 차체의 견고성을 확보하기 위하여 1992년 Cadillac Seville모델의 center pillar에 여러 두께의 조합으로 이루어진 접합 박판을 채택하였다. 기존에는 이 부분을 1.0mm의 강판으로 설계하고 윗부분에 따로 보강재를 스텝핑 생산하여 점용접으로 접합하는 방식으로 안전벨트 고정 부분을 강화하였다^{1),2)}. 이러한 방식에서는 판재들 각각에 대한 여러번의 스텝핑 공정이 필요하다는 것 이외도 판재들의 용접시 용접 자체의 문제와 정확하게 재료를 접합하는 것 또한 문제가 되었다. 그러나 새로운 방식인 레이저 용접을 이용한 방식에서는 1.8mm 두께의 보강재가 필요 없어 졌으며 이로 인해 여러 스텝핑 공정과 조립 과정을 생략할 수 있었다. 이렇게 여러 다이와 조립 과정을 생략함으로써 얻어지는 전체 생산비용의 감소는 대략 수십만 불에 이르렀으며 차체 한 대당 0.70kg의 경량화를 이루었다. 또한, 판재 제조업체인 medina사는 일반 판재와 더불어 접합 박판을 GM사에 납품하고 있는데 이 회사의 경우는 Newcor사로부터 메쉬시임 용접 시스템을 구입하여 접합 박판을 생산하고 있다^{1),2)}. 유럽의 많은 자동차 회사들은 레이저 용접과 메쉬시임 용접을 병용하여 몇 해 전부터 접합 박판을 사용해 왔고 그 예로는 Table 1에 있다^{1),2)}. 독일의 Duisberg에 있는 Thyssen 철강회사는 1980년대말부터 레이저 용접에 의한 접합 박판을 생산, Audi에 공급하기 시작하여 이후 또 하나의 레이저 용접 생산 라인과 두 개의 자동화된 메쉬시임용접 생산라인을 확장하였다. 10년 이상 접합 판재를 사용하고 있는 Volvo의 경우에는 차체에서 Soudronic사의 용접시스템을 사용하여 Volvo 850 turbo의 11가지 부품에 적용하고 있다^{1),2)}. 접합판재는 부분별로 재료와 두께가 다르므로 인한 비선형성 때문에 성형해석 하기가 무척 어려운 제품이다.

본연구에서는 동적외연적 유한요소법을 기본으로 한 상용 성형해석 소프트웨어인 PAM-STAMP와 LS-DYNA3D를 사용하여 접합판재의 성형공정을 해석하여 성형후 성형성평가, 변형형상, 용접선의 변화 등을 살펴보았다.

Table 1 The present Tailor Welded Blanks usage condition of European automotive companies

Maker (Applied parts number)	Applied parts	Welding method	Applied reasons	Remarks
Toyota (30)	Side Panel Outer Side Panel Inner Door Inner Front Side Member	L	Cost reduction. Light weight	During mass production
GM (14)	Side Panel Door Inner	L	"	"
BMW (4)	rear axle Support liftgate(1.8/0.7mm) Seat 3-piece unirail Rear Support	L/M	Light weight, Improve strength	Plan to mass production, During mass production
Audi (2)	Floor Panel	L	Broad width panel	
GM-Opel	Side Panel	L/M		Plan to mass production
Ford (2)	3 Piece unirail(2/3/1.5mm)	M	Cost reduction. Light weight, Improve strength	mass production since 1994
Mercedes Benz (2)	Truck Front End(of Cap) Rear Cross Member Door, A Column, C/Mbr	L/M	Broad width panel, Light weight, Improve strength	Thyssen's welding, Self forming after welding
Volvo 850 (11)	11 parts including rail, etc.	All M	Cost reduction, Light weight, Improve strength	mass production since 1979
Renault		L/M	"	Self-production and Out-production
Fiat	Door Reinforcement	M	Light weight, Improve strength	Self-production
VW,Golf (12)	Rail,C Column Reinforcement	M	Light weight, Improve strength	Thyssen

(L : Laser welding, M : Mash Seam welding)

II. 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)으로부터³⁾

$$\int_V \delta U^T \rho dV + \int_S \delta U^T \phi dS + \sum_{i=1}^n \delta U_i^T F_i = \int_V (\delta \epsilon^T \sigma + \delta u^T \rho \dot{u} + \delta u^T k_s \dot{u}) dV \quad (1)$$

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, 가속도

이다.

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 (1)식에 대입하고 정리하면 다음과 같이 동적힘 평형식(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.

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

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

2.2. 외연적 시간 적분법 (explicit time integration method)

계산의 편리를 위해 식(3)에서 점성 행렬 C 를 무시한다. 그러면 외연적 시간 적분 절차는 절점에서와 요소에서의 계산을 번갈아 수행하는 형태가 된다. 이를 요약하여 Fig. 1에 나타내었다⁴⁾.

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 변형률

을 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.

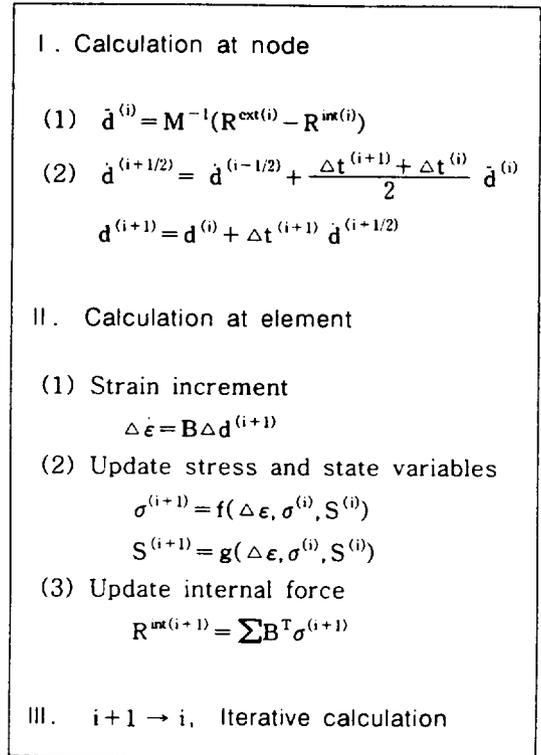


Fig. 1 Flow chart for the calculation of explicit time integration scheme

이는 응력과(stress wave)의 전달 과정과 동일한데 이를 도식적으로 나타내면 Fig. 2와 같다⁵⁾. 즉, 모든 계산은 변형률로부터 출발하여 응력을 계산해 나가는 방식이다.

III. 접합판재 성형해석 예

3.1. TWB Forming 해석예 : Cylindrical cup

탄소성 Explicit 프로그램인 PAM-STAMP을 사용하여 접합판재에 대한 성형(forming)과 스프링백

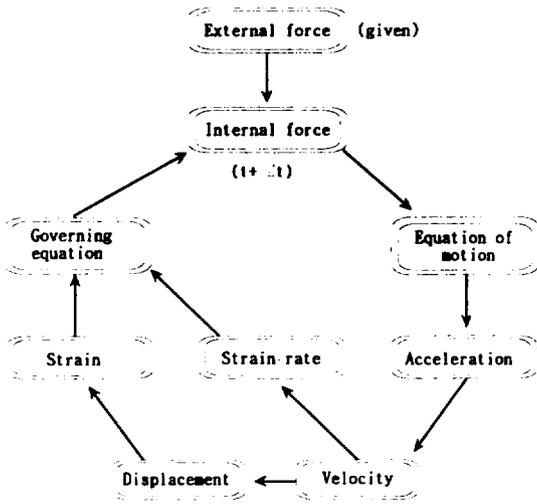


Fig. 2 Time integration cycle of the dynamic explicit time integration method

(spring-back) 해석을 행하였다. 성형에 쓰인 다이, 홀더, 펀치 및 판재의 기하학적 형상을 Fig. 3 에 나타내었다.

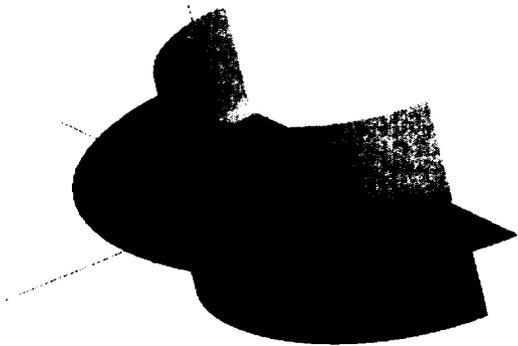


Fig. 3 Schematic view of the tool surfaces and Tailor Welded Blank in case of cylindrical cup

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

<두께가 얇은 부분의 재료변수>

Initial sheet thickness : 0.335 mm
 stress-strain characteristics :
 $\bar{\sigma} = 513.0 (0.0033 + \bar{\epsilon})^{0.258}$ MPa
 Young's modulus : $E = 2 \times 10^5$ Mpa
 Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

<두께가 두꺼운 부분의 재료변수>

Initial sheet thickness : 0.67 mm
 stress-strain characteristics :
 $\bar{\sigma} = 580.0 (0.0039 + \bar{\epsilon})^{0.248}$ MPa
 Young's modulus : $E = 2 \times 10^5$ Mpa
 Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

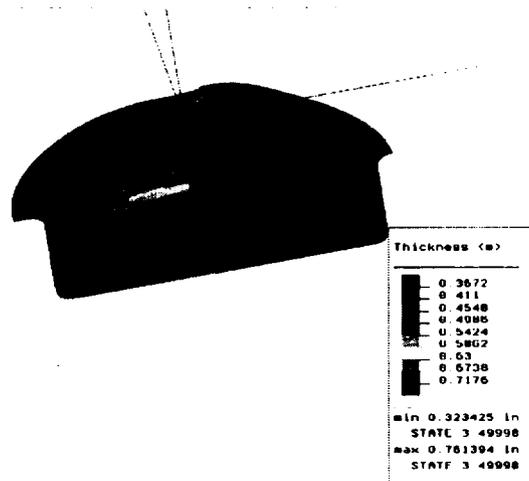


Fig. 4 Thickness strain distribution and deformed configuration at the final punch stroke in case of flat blank holder

외연적 해석에서 수치적인 테스트를 거쳐 결정된 10m/s의 펀치속도를 사용하였다. Fig. 4, 5에서는 최종 펀치행정에서, 판재두께 차이를 고려하여 금형에 단차를 주지 않은 경우와 준 경우에 대한 변형형상과 두께 변형율 분포를 보여주고 있다. 금형에 단차를 준 경우가 용접선을 기준으로 두꺼운 부분과 얇은 부분의 급격한 차이를 줄여주고 있음을 알 수 있

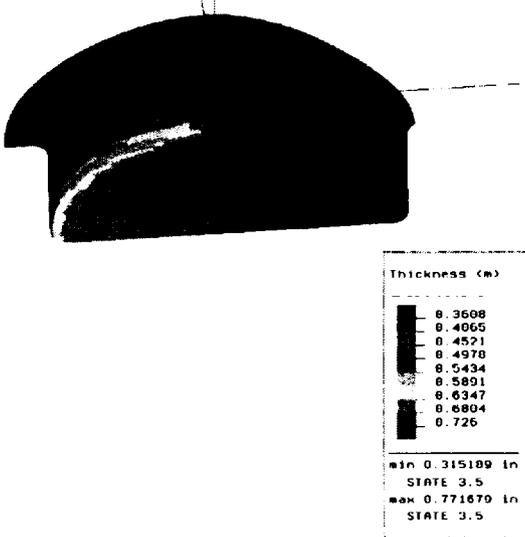


Fig. 5 Thickness strain distribution and deformed configuration at the final punch stroke in case of step blank holder

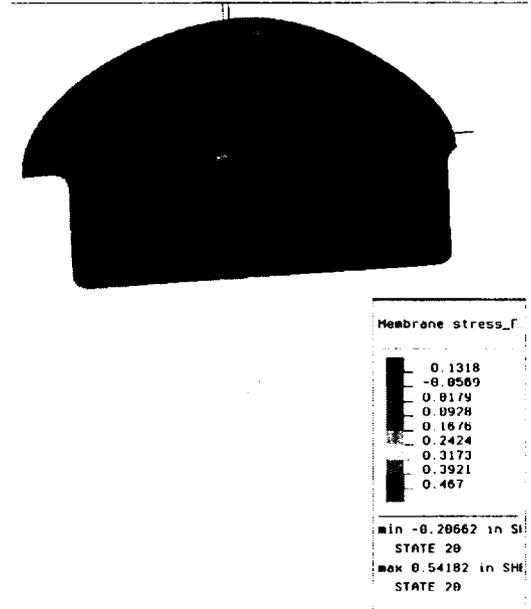


Fig. 7 Effective stress distribution after spring-back in case of step blank holder

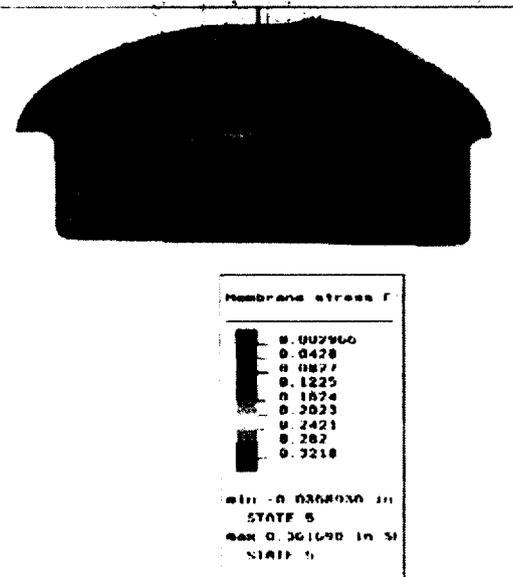


Fig. 6 Effective stress distribution after spring-back in case of flat blank holder

다. Fig. 6, 7에서는 스프링백 해석결과를 보여주고 있는데, 금형에 단차를 준 경우가 잔류응력들이 줄일 수 있음을 알 수 있고 금형설계시 아주 좋은 정보들을 제공할 수 있음을 알 수 있다.

3.2. TWB Forming 해석 예 : QTR-OTR-FRT

QTR-OTR-FRT의 접합판넬은 강성을 주어 전체 차체형상을 정밀히 유지해야 되므로 스프링백후에도 기하학적 정밀도가 요구되고 접촉 및 마찰에 있어 고차의 비선형성이 크기 때문에 성형해석 하기가 무척 어려운 대형 차체판넬 제품이다. 성형공정인 경우 내연적 방법으로는 복잡한 형상 때문에 수렴된 결과 값을 얻을 수 없다. 탄소성 동적(explicit) 성형해석 프로그램인 DYNA3D을 사용하여 성형공정을 해석하였으며, 탄소성 정적(implicit) 프로그램인 NIKE3D을 사용하여 트리밍공정과 스프링백 해석을 행하여 효율성과 정확성을 높였다. 해석에 사용된 금형은 CATIA CAD/CAM 시스템으로부터 묘사되었다. 성형에 쓰인 다이, 홀더, 펀치 및 판재의 기하학적 형상

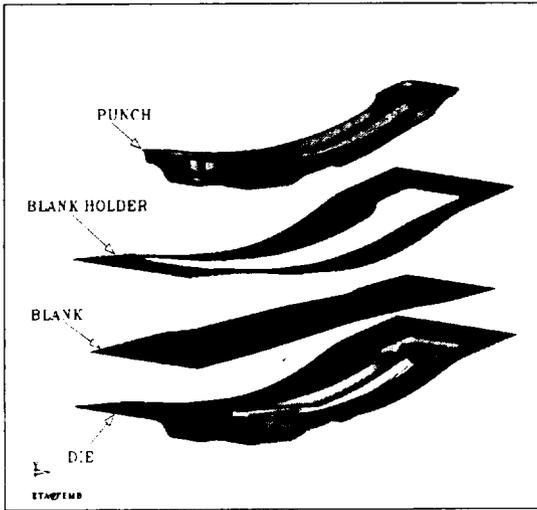


Fig. 8 Schematic view of the tool surfaces and Tailor Welded Blank in case of QTR-OTR-FRT

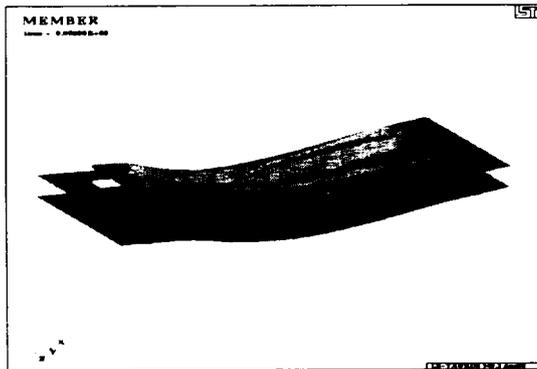


Fig. 9 Initial tools shape

을 Fig. 8에 나타내고 있으며 초기 해석시작전 금형들의 배치상황을 Fig. 9에 보여주고 있다. 동적 외연적 해석을 위해서 박판의 두께 방향으로 7개의 적분점을 둔 Belytschko - Tsay Shell요소를 사용하였다.

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 : $E = 2 \times 10^5$ Mpa

Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

<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 : $E = 2 \times 10^5$ Mpa

Coulomb coefficient of friction : $\mu = 0.1$

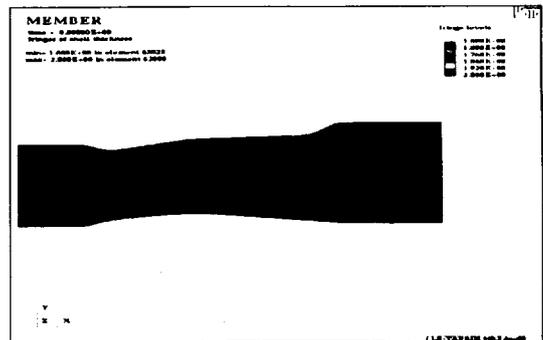


Fig. 10 Initial blank shape and thickness distribution

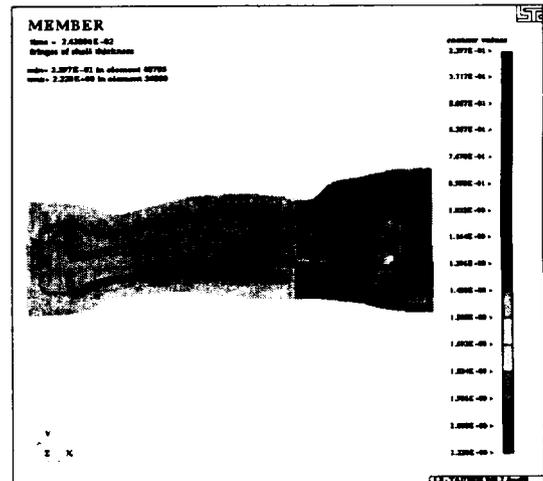


Fig. 11 Thickness strain distribution and deformed configuration at the final punch stroke in case of QTR-OTR-FRT

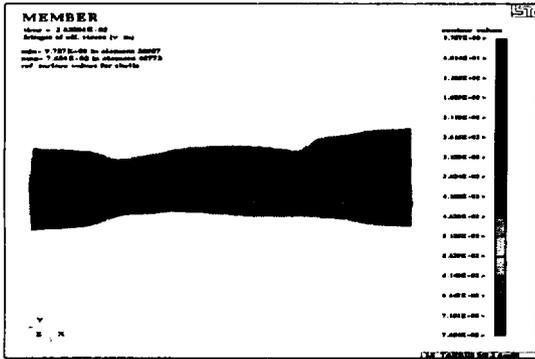
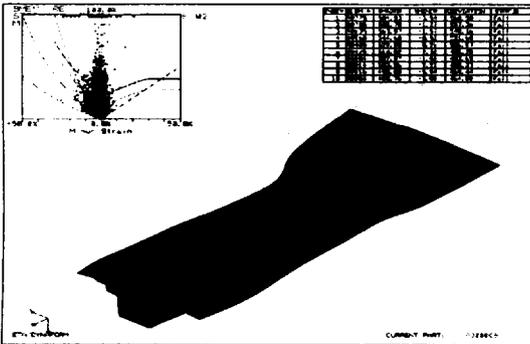
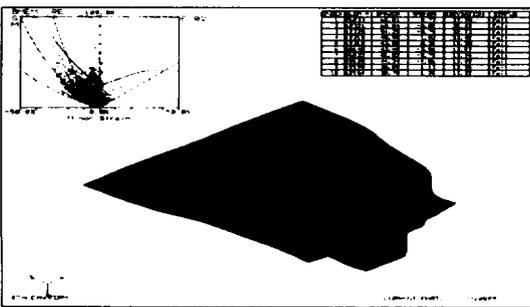


Fig. 12 Effective stress distribution at the final punch stroke



(a) Thin Part



(b) Thick Part

Fig. 13 Deformation state interpreted by FLD-curve

외연적 해석에서 수치적인 테스트를 거쳐 결정된 10m/s의 펀치속도를 사용하였는데, 이 값은 해의 정확성과 경제성을 동시에 고려한 경제적 속도이다.

Fig. 10에서는 초기 블랭크형상과 접합판넬에서의 두께를 보여주고 있다. Fig. 11에서는 동적 외연적 해석에 의한 최종 블랭크형상과 접합판넬에서의 두께 분포를 보여주고 있다. 동적 외연적 해석을 사용하여 급격한 기울기와 날카로운 모퉁이를 이루고 있는 판넬의 가장 취약한 부분을 잘 예측할 수 있다. Fig. 12에서는 최종펀치행정에서의 유효응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 13에서는 얇은 부분과 두꺼운 부분의 FLD 곡선상에서 변형상태를 보여주고 있어 금형설계에 사전예측자료로 유용함을 보여주고 있다. Fig. 14에서는 트리밍 공정후의 패널형상을 보여주고 있고 Fig. 15에서는 스프링백 후의 총 변형량을 보여주고 있다. Fig. 16에서는 스프링백 전과 후의

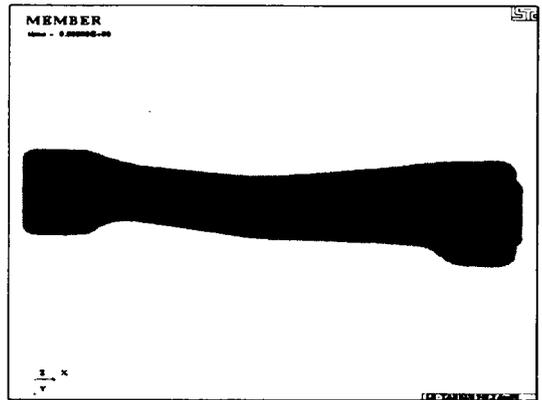


Fig. 14 Schematic view of Tailor Welded Blank after trimming

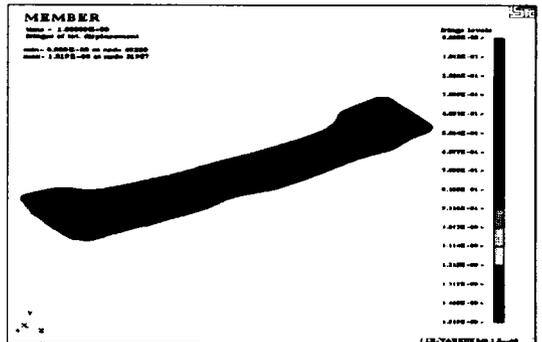


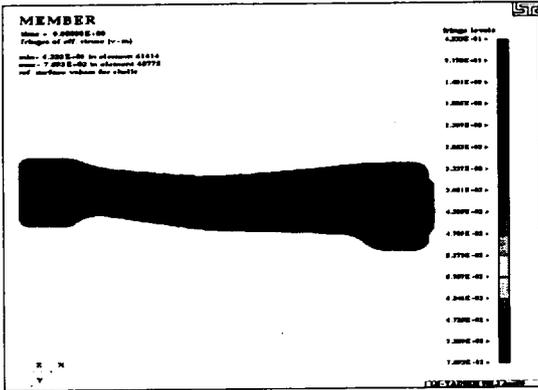
Fig. 15 Schematic view of total displacement distribution after spring-back

IV. 결 론

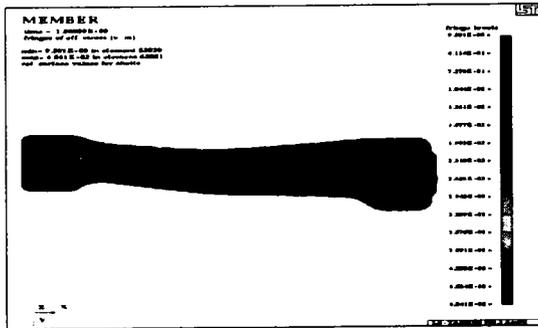
본 연구에서는 접합판재 개발에 성형해석기법을 도입하여 그 효용성을 타진하여 보았다. 상용소프트웨어인 PAM-STAMP와 DYNA3D를 사용하여 3차원 스탬핑 해석을 하였으며, Forming과 아울러 Trimming, Spring-back 해석을 동시에 병행하여 현업에서 전 공정에 도움이 되는 해석을 수행하였다. 복잡하고 어려운 대형차체판넬을 해석하여 현업적용 가능성을 타진하여 보았으며 스프링백 해석은 내연적 해석방법으로 수행하여 정확도와 효율성을 높였다. 접합판재 성형공정에서 접합판재의 두께차이를 고려한 단차가 있는 블랭크홀더를 사용한 경우가 단차가 없는 블랭크홀더를 사용한 경우보다 최종변형형상이 더 타당하고 성형성이 우수하며 스프링백후 잔류응력 분포가 작고 균일하여 더 적절한 방법임을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) 백승준, 구본영, 금영탁, 강수영, 이호기, 1997, 합체 박판(Tailored Blank) 성형 기술의 개발 현황과 전망, 자동차공학회지, Vol.19, No.1, pp. 3-10.
- 2) 이권상, 1997, 자동차 생산공정에서의 레이저 응용, 자동차공학회지, Vol.19, No.1, pp. 47-60.
- 3) 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.
- 4) Hibbit, 1991, An Introduction to ABAQUS/Explicit, Karlsson & Sorensen Inc.
- 5) 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.



(a) Effective stress before spring-back



(b) Effective stress after spring-back

Fig. 16 Difference of effective stress after spring-back at BHF 12ton

잔류응력을 보여주고 있는데 스프링백 후에 잔류응력이 급격히 감소하였음을 보여주고 있다. 동적 외연적 해석의 성형해석 소요 시간은 IBM RS/6000 43p-140에서 약 4 시간이 소요되었다. 이상에서 살펴본 바와 같이 DYNA3D와 NIKE3D를 사용한 성형공정과 트리밍공정, 스프링백 해석이 어렵고 복잡한 대형 3차원 차체 패넬의 전체 스탬핑공정 문제에 성공적으로 적용되어짐을 알 수 있다.