

Single Action Press에 의한 대형 차체 판넬 성형공정 해석

정 동 원*, 고 형 훈**

*제주대학교 기계에너지생산공학부, **제주대학교 대학원

요 약

가공소재의 손실이 적고, 가공시간이 짧으며 가격과 강도면에서 우수한 특성을 지닌 박판 성형공정의 복잡하고 불규칙한 곡선 형상들과 실제 산업현장에서 발생하는 문제들의 해결을 위하여 신뢰할 수 있고 보다 경제적인 해결방법이 요구되고 있다. 이번 연구에서는 현장에서 발생하는 성형품의 문제점 파악과 해결점 모색을 위해 정적-내연적 방법의 3차원 성형해석 소프트웨어를 이용하여 Single Action Press 공정에 대해 해석해 보았다. 연구결과, 성형과정의 시뮬레이션을 통해 파단의 발생지역과 그 원인을 미리 파악하여 문제 해결 방안을 모색할 수 있었으며, 이를 현장에 직접 적용함으로써 보다 빠르고 경제적으로 성형품 제작이 가능해 질 수 있다고 예상되어진다.

주요어 : 정적-내연적 유한요소법, 단동 프레스, 오토폼

1. 서 론

박판성형 공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차 산업, 항공산업, 전자부품 산업과 주방용품 산업 등에서 중요한 제조공정 중의 하나이며 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 각부의 조합, 표면 및 윤활상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어려우므로 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 등의 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 해의 효율성과 강건성(robustness)은 매우 중요한 요인이다.¹⁻⁴

일반적으로 박판성형 공정은 준정적(quasi-static) 과정으로서 공구나 재료의 관성효과는 무시할 수 있는데, 이를 시뮬레이션 하기 위해서 세 가지 종류의 정적-내연적(static implicit, SI), 정적-외연적(static explicit, SE) 그리고 동적-외연적(dynamic explicit, DE) 방법 등이 쓰인다. 세계적으로, LS-DYNA3D, PAM-STAMP, ABAQUS/Explicit, RADIOSS 등의 외연적(explicit) 소프트웨어들이 활발히 쓰여지고 있는데, 이는 판재성형에 필수적으로 존재하는 접촉문제를 비교적 수월히 해결하며, 대형, 복잡한 문제를 비교적 단시간 내에 풀 수 있기 때문이다. 내연적(implicit) 소프트웨어로서 유럽의 일부 자동차회사에서 쓰여지는 것으로 스위스의 Kubli교수가 개발한 Autoform이 있는데 내연적 방법임에도 불구하고 굽힘을 고려하는 박막요소와 적응자동요소생성(adaptive automatic mesh generation) 기술을 첨가하여 상당히 정확히 단시간 내에 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다.⁵ 적응자동요소 생성 기술은 판재금형 같이 넓고 부분적으로 작은 홈이나 필렛반경이 존재하는 문제에 있어서, 적응자동요소 생성 기술이 없는 경우에는 처음에서부터 이들을 묘사하기 위하여 작은 격자들을 사용할 필요

성이 있는데 이를 감소시켜 해석시간의 상당한 단축을 가져오기 때문에 외연적 프로그램에도 첨가하는 것이 매우 바람직하다.

압력 프레스 방식엔 단동램을 가압기구에 채용하고 있기 때문에 램 및 가동반은 상승만 유압으로서 작동하는 단동 프레스(single action press)와 복동램 또는 단동 램에 사이드 실린더를 병용하는 가압기구를 채용하여, 램 및 가동 반의 상승만이 아니라 하강에도 유압을 걸 수 있는 복동 프레스(double action press)가 있다. 이중 단동식은 슬라이드가 하나인 일반 가공용으로 만들어진 프레스로써 산업현장에서 가장 많이 사용 프레스이다. 단동 프레스는 생산속도가 매우 늦지만 가속도의 조절, 가압력의 조절, 일정한 가압력의 지속 등을 용이하게 행할 수 있으며 기계의 부하 발생시에 절대로 가부하가 발생하지 않는다는 장점을 가지고 있는 방식이다.

본 연구에서는 프레스금형 성형해석 시스템인 Autoform 프로그램을 사용하여 단동 프레스(Single Action Press)에 의한 대형 판넬의 스탬핑 공정에서의 성형상태를 유한요소 해석 해 보았다.

2. 본론

변형된 물체는 Fig. 1과 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. 1에서 θ^1 과 θ^2 축을 박판표면의 절점 좌표계(convected coordinates)를 나타내고, θ^3 축은 박판표면에 법선방향으로 주어진다. $G_{\alpha\beta}$ 와 $g_{\alpha\beta}$ 는 변형 전과 변형 후 형상의 행렬텐서를 나타내고, $G^{\alpha\beta}$ 와 $g^{\alpha\beta}$ 는 각각의 역행렬을 나타낸다. 변형전의 형상에서 기본 벡터(base vector)들은 E_α 와 그 역인 E^α 로 나타내었다. 마찬가지로, 변형된 물체에서의 기본 벡터들은 e_α 와 그 역인 e^α 로 표시하였다.

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

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

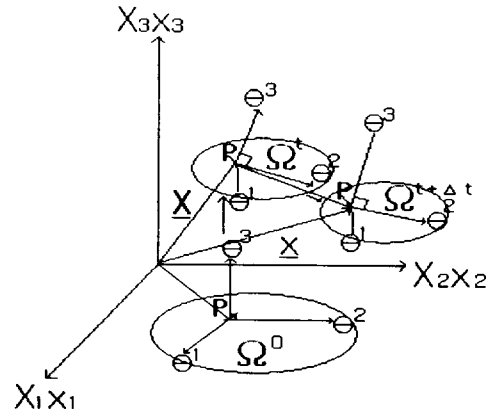


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process.

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

변형전의 형상에서 변위벡터 u 는

$$u = u^\alpha E_\alpha = u_\alpha E^\alpha = u_1 E^1 \quad (4)$$

여기에서 $u = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이다. 그리스 지수들은 절점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular cartesian coordinates)를 나타낸다. 절점좌표계에서 라그랑지안 변형을 텐서(lagrangian strain tensor) ϵ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{\alpha\beta} E^\alpha E^\beta = \epsilon^{\alpha\beta} E_\alpha E_\beta \quad (5)$$

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

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

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

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

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

대변형(large deformation)을 고려한 개정 라그랑지언 방정식(updated lagrangian equation)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{V'} \Delta S^{ab} \delta e_{ab} dV + \int_{V'} \tau^{ab} u^k_{,a} \delta u^k_{,b} dV = \int_{S'} t_1^{(t_0 + \Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V'} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \quad (8)$$

(8)식의 자세한 유도과정은 Shim과 Yang [4]의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 라그랑지언 변형율과의 관계식으로 주어졌다면.

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

식(9)에 관한 자세한 수식화도 Shim과 Yang[4]의 논문 부록에 수록되어 있고, Hill의 이방성 항복함수(anisotropic yield function)를 만족하는 정상상태이고 일관성을 유지하는 구성텐서의 성분 $L^{ab\gamma\mu}$ 은 기존의 논문[5,6]에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과 (9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\int_{V'} L^{ab\gamma\mu} e_{ab} \delta e_{\gamma\mu} dV + \int_{V'} \tau^{ab} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^a} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^b} dV = \int_{S'} t_1^{(t_0 + \Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V'} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \quad (10)$$

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. 변위증분(displacement increment)들의 근사값은 (10)식을 사용하여 계산되고 $t_0 + \Delta t$ 시간에 상당하는 응력성분은 (9)식을 사용하여 구할 수 있다.

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

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

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 Kirchhoff 응력텐서 τ 는 Cauchy 응력텐서 σ 와 같다고 놓을 수 있다.

3. 성형결과 해석

위에서 수식화 된 결과에 따라 3차원 성형해석을 수행하였다.

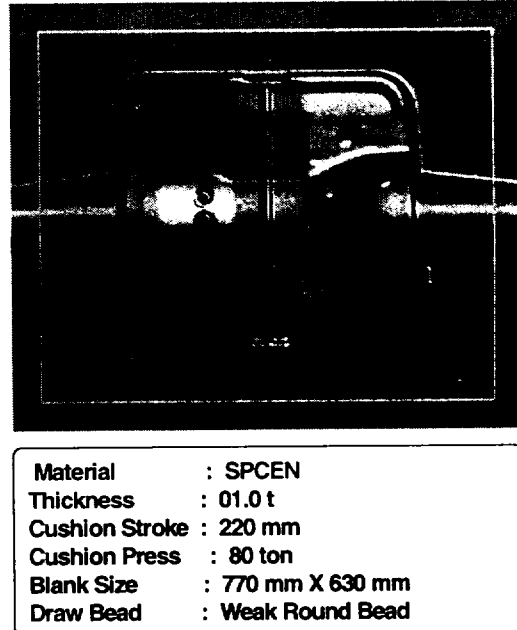


Fig. 2. Input condition(one-step).

Fig. 2에서 보는 바와 같이 성형해석에 사용된 재료는 spccn이며 두께는 1.0t, 쿠션 스트로크는 220mm, 쿠션압력은 80ton이며, 블랭크 사이즈(Blank size)는 770mm x 630mm이고, 드로우비드(Draw Bead)는 약한 라운드 비드(Weak Round Bead)이다.

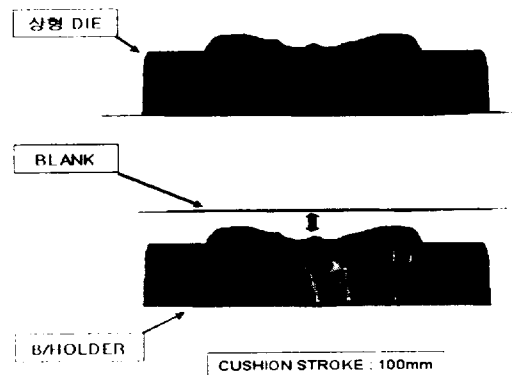


Fig. 3. Tool Setting.

Fig. 3에서의 해석방법은 Single Action Press 이며 Tool setting 과정 중 쿠션스트로크 100mm점에서의 바인딩(binding) 상태를 보여주고 있다. 쿠션 스트로크는 Blank와 B/Holder 거리를 말하며 Fig. 3에서 화살표로 표시되어 있다.

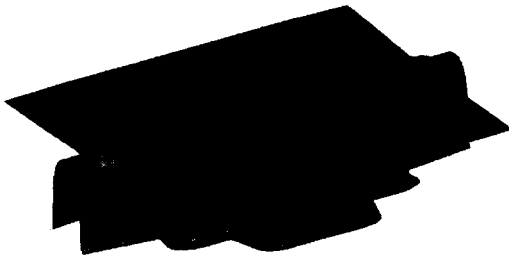
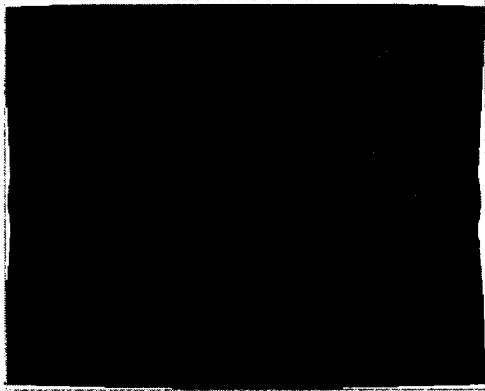


Fig. 4. Forming analysis Result (Binding result).

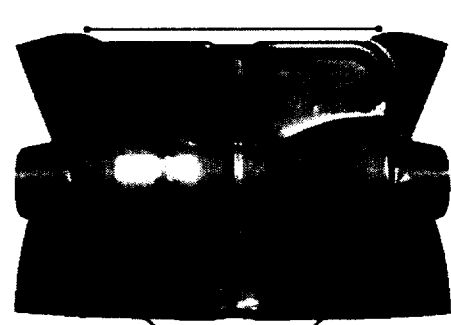
Fig. 5에서는 수식화된 결과에 따라 펀치행정 (STROKE)별 성형과정을 초기 바인딩, 하사점20mm 전, 하사점5mm 전, 성형완료단계로 1차에서 4차로까지 나누어 3차원 성형해석을 수행하였다.



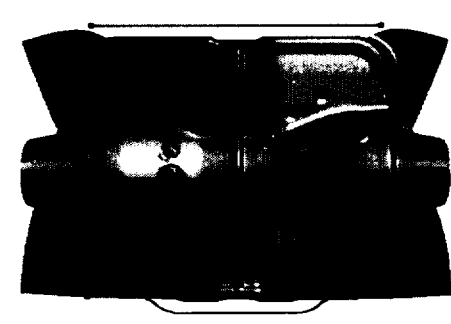
(a) Before lower post point 100mm



(b) Before lower post point 20mm



(c) Before lower post point 5mm



(d) Formation end status

Fig. 5. Stroke another forming process.

Fig. 6-A의 A 구간은 두께감소율이 20%를 넘는 구간으로 파단 발생지역이다. 즉, 전반적으로 국부적인 이 많이 발생 됐다. 설계된 소재 세로 크기가 작아 윗부분에서 재료가 비드블 넘어 들어오는 반면 소재 가로 크기가 커 파단 발생이 예상된다.

Fig. 6-B의 B 구간은 최종성형 결과 파단가능성이 있는 구역이다.

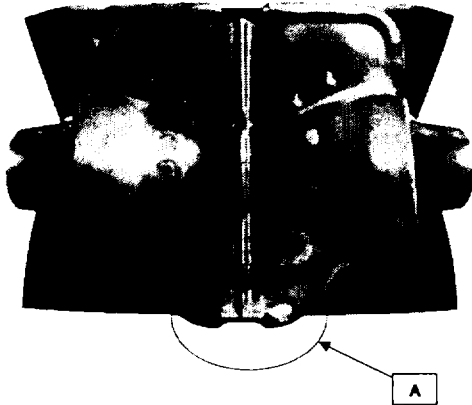


Fig. 6-A. Formation analysis result
(Thickness reduction rate I)

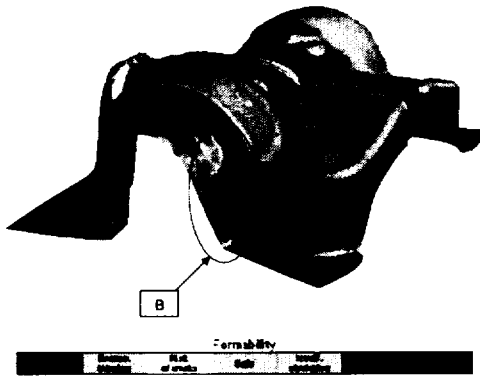


Fig. 6-B. Formation analysis result.
(Thickness reduction rate II)

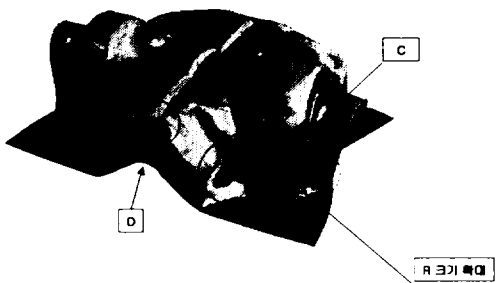


Fig. 6-C. Formation analysis result.
(Thickness reduction rate III)

Fig. 6-C의 C와 D 구간은 파단 가능성이 있는 구

역으로, 파단발생에 대한 대책으로 C구간 TR/LINR 근접 부분까지 R크기 확대(현 L/OUT상 가능)하거나 D구간 가형상 삭제의 방법이 있다.



Fig. 7. Formation analysis result.
(Wrinkles tendency)

Fig. 7의 E구간에는 재료의 유입이 많아지면서 전반적으로 스트레칭(Stretching) 상태가 불량하며 제품내부에 주름 영역이 나타나고 있다.

제품의 스트레칭(Stretching)을 강화하면서 주름을 없애기 위해 중앙부 형상(ECR)을 추가하여 줄일 필요가 있다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서 판넬 스탬핑 공정을 성형 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었으며.

1. 성형 결과 두께 감소율에서 볼 수 있듯이 감소율 20%이상의 파단 발생 지역(A)이 국부적으로 다량 발생 하였다.

2. 설계된 소재의 세로방향 크기가 작은 경우 상부에서 재료가 bead를 넘어 들어오는 반면 가로측은 크기가 커 파단 발생이 예상됐다.

3. 파단의 대책으로 성결 결과 그림의 A부를 TR/LINR 근접 부분까지 R크기를 확대하여야 하며, B부위의 경우는 삭제를 하여야 한다.

4. Fig. 7의 E구간 재료의 유입이 많아지면서 전반적으로 인장(Stretching) 상태가 불량하여 제품 내부에 주름영역이 발생하는데 제품의 인장을 강화하면서 주름을 없애기 위해 중앙부 형상(ECR)을 추가하여야 한다.

이를 토대로 박판 성형 공정과정에서 발생하는 다수의 문제들을 소프트웨어적 해석을 통해 해결해 볼 수 있게 되었으며, 이를 산업현장에 적용 함으로서 시간과 비용의 절감에 도움을 줄 수 있게 되었다.

참고 문헌

- D. Y. Yang., D. W. Jung., I. S. Song., D. J. Yoo. and J. H. Lee., 1995. Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming process. *J. Materials Processing Technology*, vol. 50, pp.39-53.
- 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, pp.707-722.
- 이재석, 1999. 가상실험기술, 충북대학교 건설기술 연구소, pp.4-5.
- H. B. Shim., 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.
- N. M. Wang., S. C. Tang., 1988. Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations. *Int. J. for Num. Mech. in Engng.*, vol.25, pp.253-367.
- K. Mattiaso., 1985. Numerical Simulation of Stretching Processes. SIMOP-I. Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop. Stuttgart, pp.170-213.