

One-Step 이론을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 4차 연구

정 동 원*, 안 현 길**

*제주대학교 기계·에너지·생산공학부, **제주대학교 대학원

요 약

정적외연적 유한요소법은 성형공정이 포함하는 전체의 루프 판넬 스탬핑 공정 분석에 효과적으로 적용된다. 복잡하고 큰 사이즈의 루프 판넬은 오토 폼이라고 불리는 상용의 프로그램을 사용해서 해석되었다. 오토폼 소프트웨어의 가능성과 타당성을 시험하고 최적설계변수를 찾기 위한 해석결과들이 본 논문에서 제시되고 있다. 또한, 전체의 루프 판넬 스탬핑 공정을 위한 성형해석된 결과들이 제시되고 논의되었다. 해석기술의 적용은 원가절감, 경량화 및 차량강도 개선 때문에 자동차 산업에서 특히 적용이 되어 지고 있다.

1. 서 론

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해졌다. 복잡하고 불규칙적인 곡선형상 들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다.

박판성형 공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 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, 공구각부의 조합, 표면 및 윤활 상태, 성형속도 등이 변형에 영향을 미치기 때문에 그 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어려우므로 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판

과 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(accuracy and robustness)은 매우 중요한 요인이다.[1,2]

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.[3] 적응자동요소 생성 기술은 판재금형 같

이 넓고 부분적으로 작은 흠이나 필렛반경이 존재하는 문제에 있어서, 적응자동요소 생성 기술이 없는 경우에는 처음에서부터 이들을 묘사하기 위하여 작은 격자들을 사용할 필요성이 있는데 이를 감소시켜 해석시간의 상당한 단축을 가져오기 때문에 외연적 프로그램에도 첨가하는 것이 매우 바람직하다.

본 연구에서는 프레스금형 성형해석 시스템인 Autoform 프로그램을 사용하여 3차 해석결과[9]에서 나타난 Binding 과정 중 주름이 계속 심화되는 문제점을 본 연구에서는 Die Face변경 및 Bead를 수정하여 문제점을 보완해 보고자 한다.

II. 본 론

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 변형전과 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.

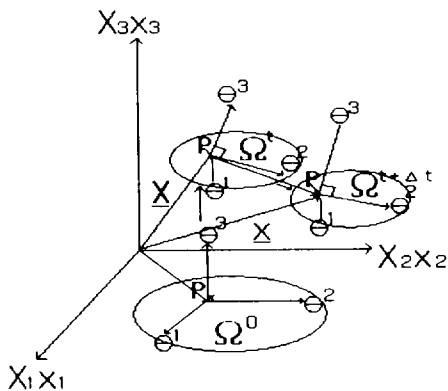


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process.

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

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

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

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. 라그랑지안 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 라그랑지안 방정식(updated lagrangian equation)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{V^t} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V^t} \tau^{\alpha\beta} u^k{}_{,\alpha} \delta u^k{}_{,\beta} dV \\ = \int_{S_t} t_1^{(i,+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^t} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (8)$$

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

$$\Delta S^{a\beta} = L^{a\beta\gamma\rho} e_{\gamma\rho} \quad (9)$$

식(9)에 관한 자세한 수식화도 Shin과 Yang[4]의 논문 부록에 수록되어 있고, Hill의 이방성 항복함수(anisotropic yield function)를 만족하는 정상상태이고 일관성을 유지하는 구성텐서의 성분 $L^{a\beta\gamma\rho}$ 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.

$$\int_{V^0} L^{a\beta\gamma\rho} e_{a\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V^0} \tau^{a\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^a} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^b} dV = \int_{S_t^*} t_1^{(t_0 + \Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{a\beta} \delta e_{a\beta} dV \quad (10)$$

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.

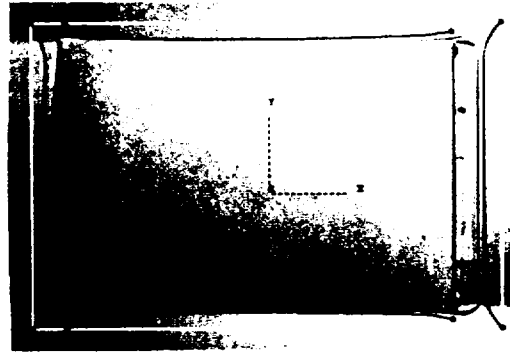
$$(S^{a\beta})^{(t_0 + \Delta t)} = (S^{a\beta})^{t_0} + \Delta S^{a\beta} \quad (11)$$

$$(\tau^{a\beta})^{(t_0 + \Delta t)} = (S^{a\beta})^{(t_0 + \Delta t)} \quad (12)$$

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

III. 성형결과 해석

위에서 수식화 된 결과에 따라 3차원 성형해석을 수행하였다. 해석에 사용된 재료는 다음과 같다.



Material	: SPCD
Thickness	: 0.7 t
Cushion Stroke	: 150 mm
Cushion 압력	: 130 ton
Blank Size	: 도면 참조
Draw Bead	: 사각 Bead (R3, H4)

Fig. 2. Input condition.

펀치행정(STROKE)별 성형과정에서 하사점 100mm 전, 하사점50mm전, 하사점30mm전, 하사점 최종결과로 4차 성형해석 하였다.



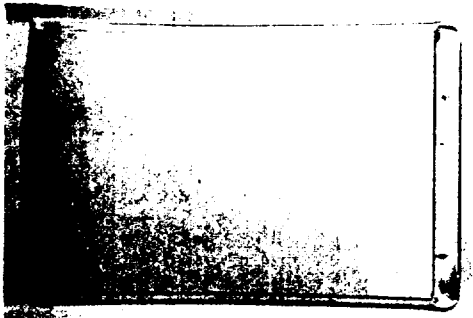
Before lower post point 100mm



Before lower post point 50mm



Before lower post point 30mm



The final results of lowest point

Fig. 3. Each punch stroke forming process.

Binding과정에서 Die Face 보안 후 3차 해석결과 [9] 보다 주름이 많이 제거됨을 볼 수 있었다.

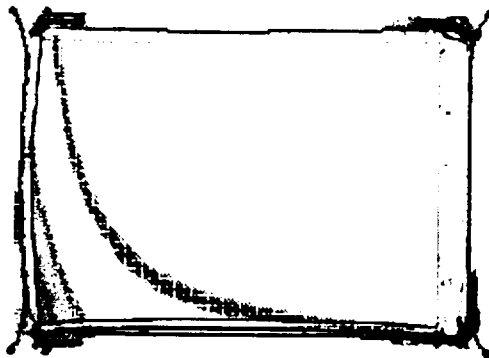


Fig. 4. Formability distribution.

파단 발생은 제품의 모서리 부위에서 발생하고

있으며 Die Face변경 및, Bead 수정 후 3차 해석 결과[9] 보다 Safe함을 볼 수 있었다. 회색구간은 Stretching 이 필요한 구간이다.

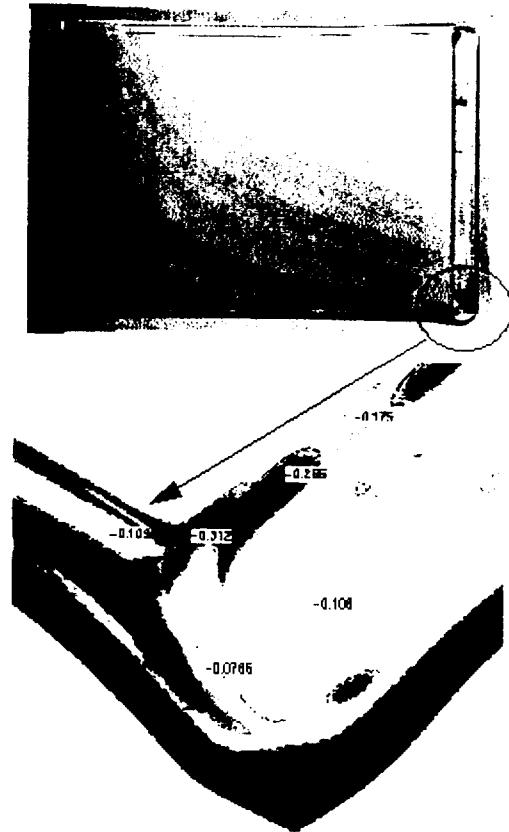


Fig. 5. The thickness reduction rate distribution.

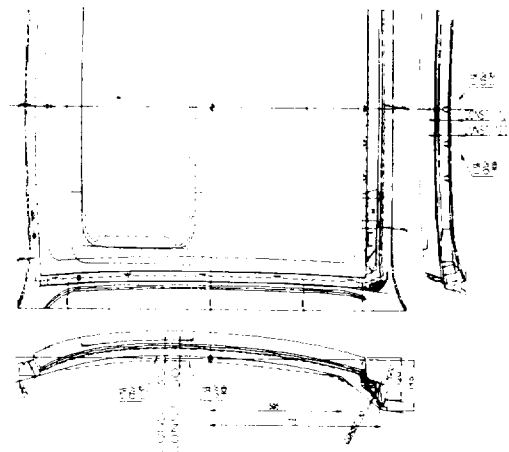


Fig. 6. Die Face change.

파단은 각 코너부위에서 나타나고 1, 2, 3차 해석결과[7.8.9]보다 파단이 많이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 소재유입을 증가 시킬 경우 제품 품질을 저하 시킨다.

Draw Die Face의 변경을 FRT CTR부 15mm와 SIDE CTR부 10mm를 Down시킨 결과, 이러한 방법으로는 op10 주물형상 부족으로 die height 높이 조정이 불가피하다는 걸 알 수 있었다.

IV. 결론

본 연구에서는 프레스금형 성형해석 상용프로그램인 Autoform을 사용하여 차체판넬 3차 성형해석[9]의 문제점을 보완해 보았다. 그 보완점으로 Die Face 변경 및 Bead크기를 축소시켜 본 결과 Binding과정에서 3차 해석결과[9]보다 주름이 제거되었지만 파단은 1, 2, 3차 해석결과[7.8.9]보다 많이 발생하는 것을 볼 수 있었으며, Draw Die Face의 변경에서 op10 주물형상 부족으로 die height 높이 조정이 불가피하다는 점과 소재유입을 증가시킬 경우 제품 품질을 저하 시킨다는 걸 알 수 있었다.

참고문헌

- 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 process. *J. Materials Processing Technology*, Vol. 50, pp.39-53.
- 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.
- 이재석, 1999. 가상실험기술. 충북대학교 건설기술 연구소, pp.4-5.
- Shim, H. B., Yang, D. Y., 1990. An Elastic-Plastic Finite Element Analysis on Hydrostatic Bulging of Rectangular Diaphragms by using Layered Degenerated Shell Element. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, pp.49-64.
- Wang, N. M., Tang, S. C., 1988. Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations. *Int. J. for Num. Mech. in Engng.*, Vol. 25, pp.253-367.
- Mattiason, K., 1985. Numerical Simulation of Stretching Processes. SIMO P-I. Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, pp.170-213.
- 정동원, 안현길, 2004. "One-Step 이론을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 1차 연구(First-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-Step Theory)". 한국정밀공학회 심사증.
- 정동원, 안현길, 2004. "One-Step 이론을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 2차 연구(Second-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-Step Theory)". 한국정밀공학회 심사증.
- 정동원, 안현길, 2004. "One-Step 이론을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 3차 연구(Third-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-Step Theory)". 한국정밀공학회 심사증.

fourth-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-Step Theory

Dong-Won Jung*, hyun-gil Ahn**

**Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering, Res. Inst. of Adv.
Cheju National University, Jeju-Do. 690-756 Korea*

***Graduate School, Cheju National University, Jeju-Do. 690-756. Korea*

Abstract. The static implicit finite element method and the dynamic explicit finite element method are applied effectively to analyze total auto-body panel stamping processes, which include the forming stage. Analyzed complicated and abnormal Large size auto-body panel using common use program called AutoForm. Analysis results examining possibility and validity 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. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

Key Words : Dynamic explicit finite element method, static implicit finite element method, auto-body panel stamping forming stage, AutoForm