

## One-Step 이론을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 1차 연구

정 동 원 · 안 현 길\*

제주대학교 기계에너지생산공학부, \*제주대학교 대학원

### First-Step Study of Analyzing Roof Panel Using One-Step Theory

Dong-Won Jung and Hyun-Gil Ahn\*

Faculty of Mechanical, Energy and Production Engineering,

Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

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

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

### 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 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 불

규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위 등의 실질적인 산업현장 부재들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 해의 효율성과 강건성(efficiency 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 있

는데, 이는 판재성형에 필수적으로 존재하는 집축문제를 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 같이 넓고 부분적으로 작은 홈이나 필렛반경이 존재하는 문제에 있어서, 적응자동요소 생성 기술이 없는 경우에는 처음에서부터 이들을 묘사하기 위하여 작은 격자들을 사용할 필요성이 있는데 이를 감소시켜 해석 시간의 상당한 단축을 가져오기 때문에 외연적 프로그램에도 첨가하는 것이 매우 바람직하다.

본 연구에서는 프레스금형 성형해석 시스템인 Autoform 프로그램을 사용하여 전체 스텝핑공정을 복잡하고 어려운 대형 차체판넬을 유한요소해석 하였으며 현장 적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

### 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  $\theta^1$  과  $\theta^2$  축을 박판표면의 절점 좌표계 (convected coordinates)를 나타내고,  $\theta^3$  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  $E_\alpha$  와 그 역인  $E^\alpha$  로 나타내었다. 마찬가지로, 변형된 물체에서의 기본 벡터들은  $e_\alpha$  와 그 역인  $e^\alpha$  로 표시하였다.

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

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

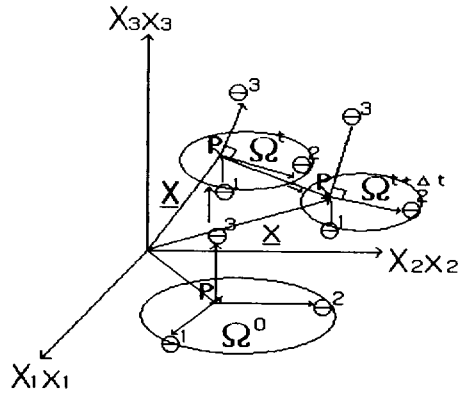


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process.

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

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)  $\epsilon$  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 공변 미분(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 라그랑지언

방정식(Updated Lagrangian equation)은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{V_0} \Delta S^{ab} \delta e_{ab} dV + \int_{V_0} \tau^{ab} u^k \delta u^k dV = \int_{S_0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \quad (8)$$

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

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

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  $L^{ab\gamma\rho}$ 은 기존의 논문[5,6]에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과 (9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개칭된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\int_{V_0} L^{ab\gamma\rho} e_{ab} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V_0} \tau^{ab} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^a} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^b} dV = \int_{S_0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \quad (10)$$

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.

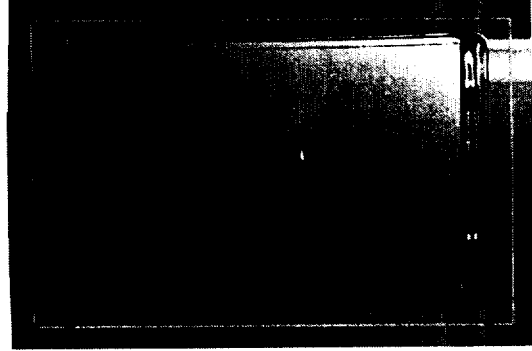
$$(S^{ab})^{(t_0+\Delta t)} = (S^{ab})^{t_0} + \Delta S^{ab} \quad (11)$$

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

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 Kirchhoff 응력텐서  $\tau$ 는 Cauchy 응력텐서  $\sigma$ 와 같다고 놓을 수 있다.

## 성형결과 해석

수식화된 결과에 따라 평면 변형 유한요소해석 프로그램을 작성하여 성형품의 각 단면들을 성형단계에 따라 3차원으로 해석하였다.



<b>Material</b>	: SPCD
<b>Thickness</b>	: 0.7 t
<b>Cushion Stroke</b>	: 150 mm
<b>Cushion Pressure</b>	: 130 ton
<b>Blank Size</b>	: Plan Reference
<b>Draw Bead</b>	: Square Bead (R3, H4)

Fig. 2. Input condition.

Fig. 2는 본 연구에 사용될 재료와 Draw bead를 설치한 형상을 보여주고 있다.

Fig. 3에서 성형해석을 행정별로 초기 Binding, 하사점100mm전, 하사점50mm전, 하사점30mm전, 하사점5mm전으로 5차 성형해석 하였으며 그 결과 Binding과정에서 나타난 주름이 성형과정에서 계속 심화되고 있으며 특히 코너부위에서는 Overlap 등의 현상이 나타날 가능성이 크다.

Fig. 4는 파단 발생이 제품의 모서리 부위에서 발생하는 것을 나타내며 현 상태의 가장 큰 문제점은 제품 내에 충분한 신율이 발생하지 않고 있는 점이다. 여기서 회색구간은 Stretching이 필요한 구간이다.

Fig. 5는 제품의 신율 분포를 나타내는 것으로 중앙부위는 최대 1~2% 수준이며 양쪽 끝단으로 갈수록 Zero에 가까워진다. 특히, 오른쪽 부위는 Bead가 설치되지 않아 소재의 유입량이 커지면서 신율저하 현상이 두드러지게 나타나고 있으며 주름 경향도 강하다.



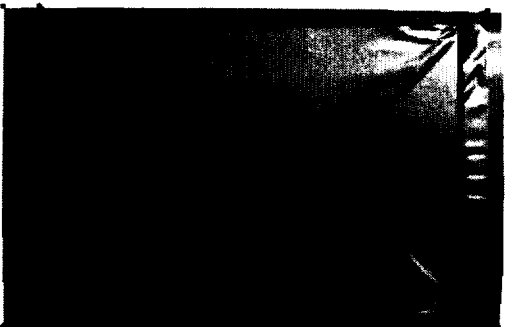
(a) Early binding result



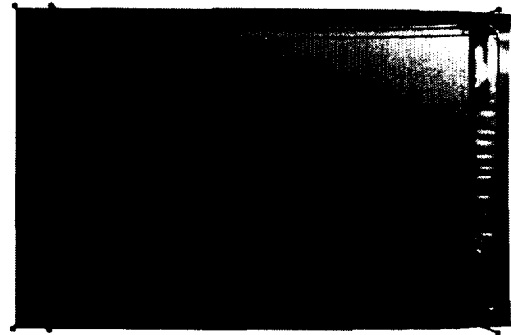
(b) Before lower post point 100mm



(c) Before lower post point 50mm



(d) Before lower post point 30mm



(e) Before lower post point 5mm

Fig. 3. Each punch stroke forming process.

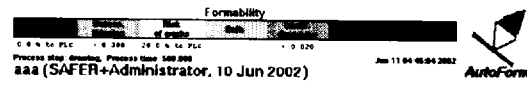


Fig. 4. Formability distribution.

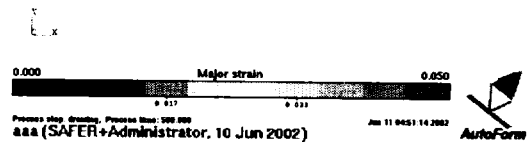
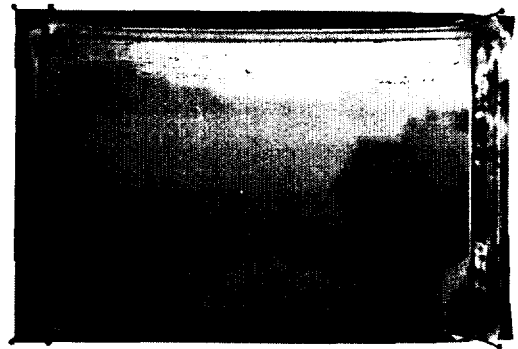


Fig. 5. Extension rate.

Fig. 6에서는 파단이 각 코너부위에서 나타나고 현상에서는 제품R의 변경이나 Over Draw의 적용 외에는 현재 대안을 찾지 못하였으며, 소재유입을 증가시킬수록 제품품질은 저하된다.

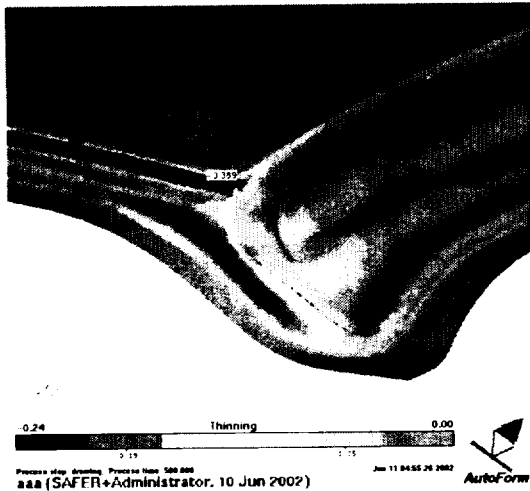


Fig. 6. The thickness reduction rate distribution.

Fig. 7은 Draw Bead를 추가하여 기존의 결과에 대해 보안을 시도하는 것을 보여주고 있다.

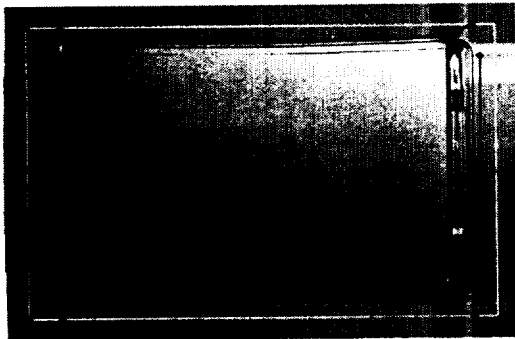


Fig. 7. Draw bead addition.

Fig. 8에서 Bead의 추가로 소재 유입량이 제어되면서 성형과정의 주름발생은 상대적으로 좋으나 여전히 주름 문제는 심각한 것을 알 수가 있다.

Fig. 9는 Draw Bead 추가로 전반적인 제품의 Stretching 상태가 양호한 것을 볼 수 있다.

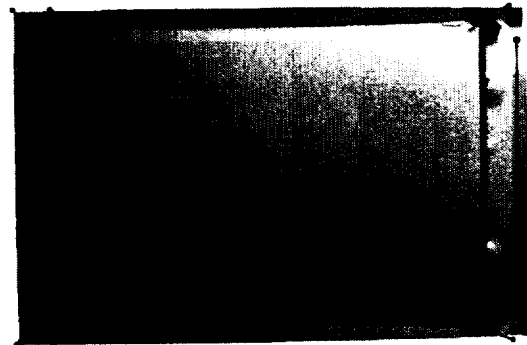
Fig. 10은 Binding과정에서 나타난 주름이 성형과정에서 계속 심화되고 있으며 특히 코너부위에서 Overlap

등의 현상이 나타날 가능성을 보여주고 있다. A부 대책 안으로는 Draw Bead를 축소시키고 각 Bead 및 원형 Bead를 적용시킨다.

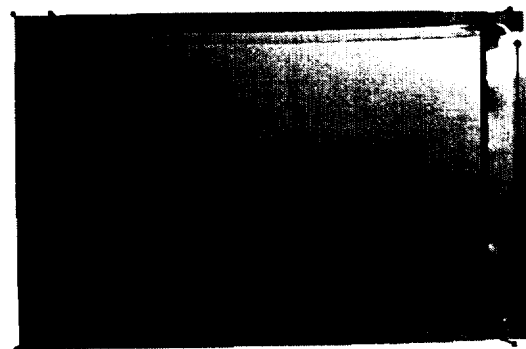
Fig. 11에서 파단은 각 코너부위에서 나타나며 현상에서는 소재유입을 증가시킬 경우 제품품질저하 때문에 제품R의 변경이나 Over Draw의 적용 외에는



(a) Before lower post point30mm



(b) Before lower post point20mm



(c) Before lower post point10mm

Fig. 8. Each punch stroke forming process draw bead after added.

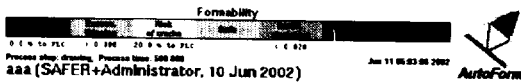
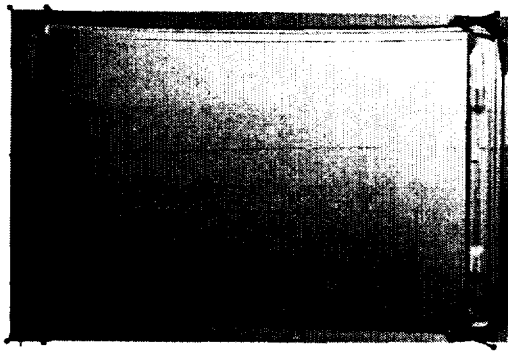


Fig. 9. Draw bead addition result.



Before lower post point 40mm

Fig. 10. Quality assurance plan.

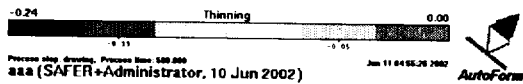
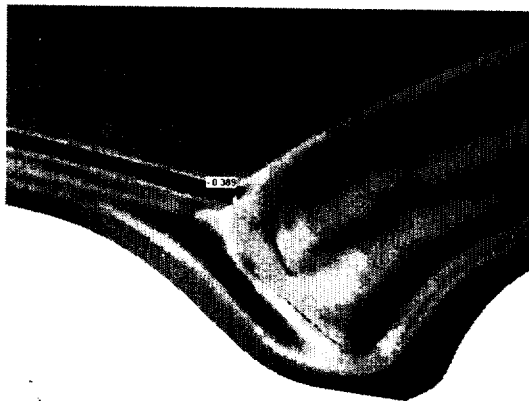


Fig. 11. Forming completion condition.

현재 대안을 찾지 못하고 있다. 대책 안으로는 각 Bead 및 원형Bead 적용시키고 모서리부R 확대 적용시킨다.

## 결론

본 연구에서는 프레스 금형 성형해석 상용프로그램인 Autoform을 사용하여 대형 차체판넬 스탬핑공정을 해석하고 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다. 차체판넬을 성형해석한 결과 파단 해소를 위한 소재 유입을 늘이면 제품의 주름경향은 더욱 강해지므로 파단 감소를 위한 소재유입량은 늘리는 것은 바람직하지 못하다는 점과 주름해소를 위해서는 제품 R의 변경이나 Over Draw의 적용 외에는 현재 대안을 찾을 수 없다는 것을 알 수 있었다.

유한요소방법은 기하학적인 형상, 하중 및 경계조건들에 제한이 없으며 여러 가지 복합재료로 이루어진 연속체에도 적용이 가능하고 물성치 및 거동의 비선형도 적용 가능하며 응력해석, 좌굴, 진동, 열, 유동해석 등 공학의 모든 분야에서 활용이 가능하다는 점을 볼 때 대형 차체판넬 해석이나 금형설계에서 정확하고 효율적인 다양한 결과를 제공할 것으로 보여진다.

## 참고문헌

- 이재석. 1999. 가상실험기술. 충북대학교 건설기술 연구소, pp. 4-5.
- Jung, D. W., Yoo, D. J. and D. Y. Yang. 1995. A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes. Engineering Computations, 12: 707-722.
- Mattiason, K. 1985. Numerical Simulation of Stretching Processes. SIMO P-I. Editor Lange, K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, pp. 170-213.
- Shim, H. B. and 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. Sci., 32: 49-64.

Wang, N. M. and S. C. Tang. 1988. Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations. Int. J. for Num. Mech. in Eng., 25: 253-367.

Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. 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, 50: 39-53.

