

정적-내연적 유한요소법을 이용한 Cm-rp-str 판넬 해석에 관한 1차 연구

정 동 원* · 안 현 길** · 고 형 훈**

*제주대학교 기계·에너지·생산공학부, **제주대학교 대학원

요 약

정적-내연적 유한요소법은, 성형공정이 포함하는 전체의 Cm-rp-str 판넬 스템핑 공정 분석에 효과적으로 적용된다. 복잡하고 큰 사이즈의 Cm-rp-str 판넬은, 오토 폼이라고 불리는 상용의 프로그램을 사용해서 해석되었다. 오토 폼 소프트웨어의 기능성과 타당성을 시험하고 최적설계변수를 찾기 위한 해석결과들이 본 논문에서 제시되고 있다. 또한, 전체의 Cm-rp-str 판넬 스템핑 공정을 위한 성형해석된 결과들이 제시되고 논의되었다. 해석기술의 적용은 원가절감, 경량화 및 차량강도 개선 때문에 자동차 산업에서 특히 적용이 되어지고 있다.

주요어 : 정적-내연적 유한요소법, 차체판넬 스템핑, 성형단계, 오토폼

1. 서 론

박판 성형이 산업부문에서 차지하는 비중은 매우 크며 또한 많은 영향을 미치고 있다. 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 박판 성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료자체의 성형성(formability), 이방성(anisotropy) 등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구각부의 조합, 표면 및 윤활 상태, 성형 속도 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 정

제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 해의 효율성과 강건성(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 쓰여 지는 것으로 스위스의 Kubli 교수가 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] 적용자동요소 생성 기술은 판재금형 같이 넓고 부분적으로 작은 홈이나 필렛반경이 존재하는 문제에 있어서, 적용 자동요소 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 Autoform 프로그램을 사용하여 Cm-tp-str 판넬을 유한요소해석 하였으며 해석된 결과에 따른 문제점과 해결방안을 알아보았다.

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 질점 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.

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

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

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

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 문자들은 질점좌

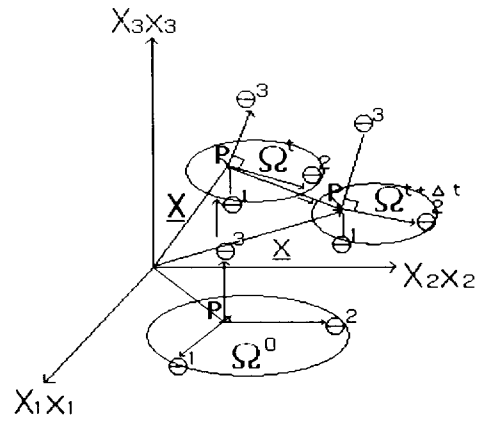


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process.

표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 라그랑지언 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.

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

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

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

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

$$\int_{V^t} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V^t} \tau^{\alpha\beta} u^k{}_{,\alpha} \delta u^k{}_{,\beta} dV$$

$$= \int_{S_i} t_1^{(t+J)} \delta u_i dS - \int_{V'} \tau^{ab} \delta e_{ab} dV \quad (8)$$

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

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

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 $L^{ab\gamma\rho}$ 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.

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

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.

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

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

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

III. 성형결과 해석

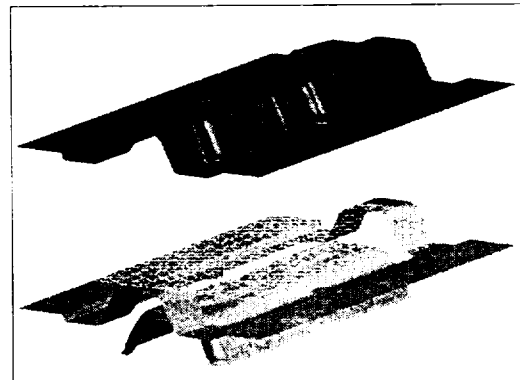
위에서 수식화 된 결과에 따라 3차원 성형해석을

수행하였다.

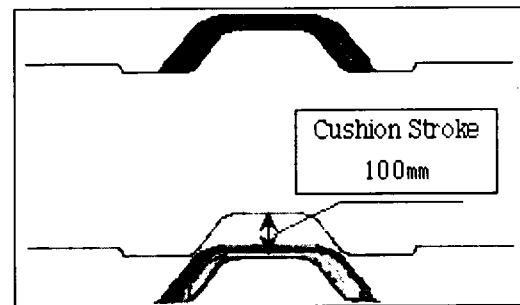
Cushion Height	: 100mm
B/Holder Force	: 70 ton
Friction Coefficient	: 0.15
Material	: SPRC35E
Thickness	: 0.8
Draw Bead	: Round Bead

Fig. 2. Input condition.

1차 성형해석에 사용되는 입력조건 Fig. 2는 자동차 차체에 사용되는 재료 Sprc35e이며 쿠션높이 100mm, 쿠션압력 130ton, 그리고 드로우 비드는 원형비드를 사용하여 성형해석 하였다.



(a) Tool setting



(b) Cushion Stroke 100mm

Fig. 3. Tool setting.

Fig. 3은 입력조건에 따라 툴 세팅 과정을 보여주고 있으며, 쿠션행정 100mm점에서의 상태를 나타내고 있다.

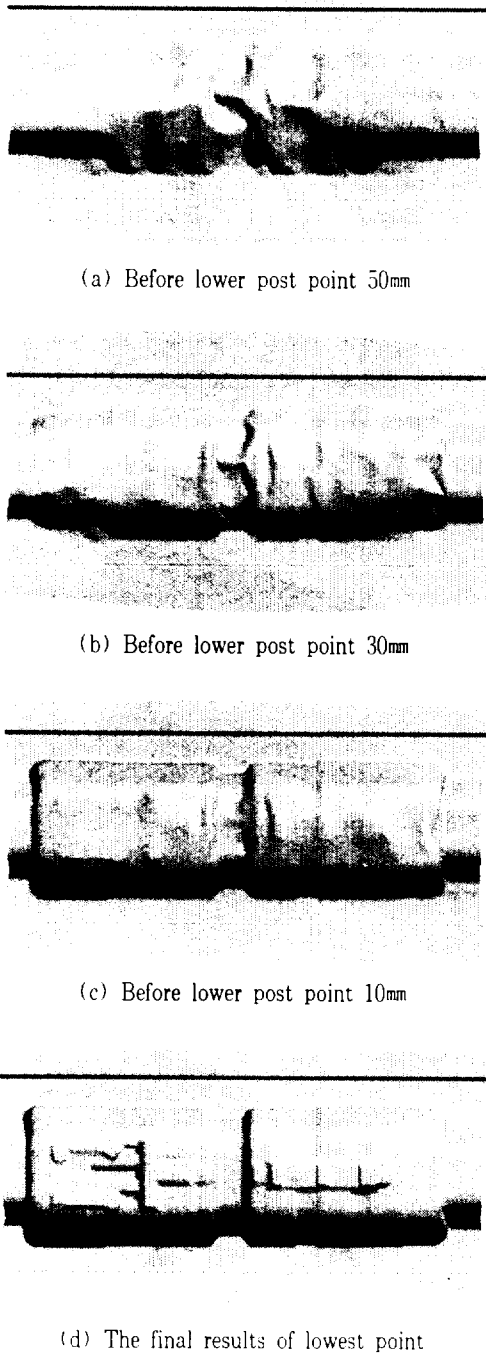


Fig. 4. Each punch stroke forming process.

Fig. 4에서는 펀치행정(STROKE)별 성형과정을 하사점 50mm 전, 하사점 30mm 전, 하사점 10mm 전,

성형완료단계로 4차 성형해석 하였다.

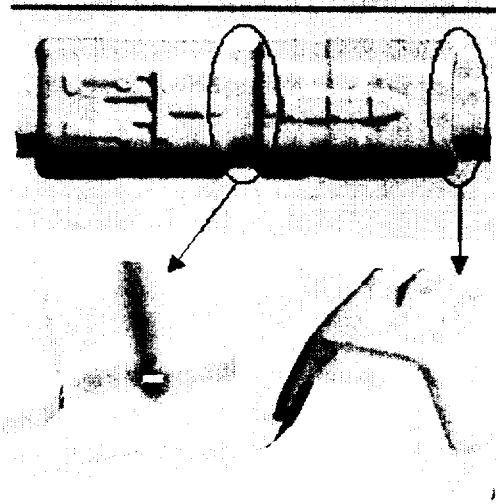


Fig. 5. The thickness reduction rate distribution.

Fig. 5는 펀치 행정별 성형완료 후 파단이 각 코너부위에서 나타나는 결과를 보여주고 있으며 현 상태에서는 제품R의 변경이나 Over Draw의 적용이 필요 할 것으로 보인다. 또한 소재유입을 증가시킬수록 제품품질은 저하된다.

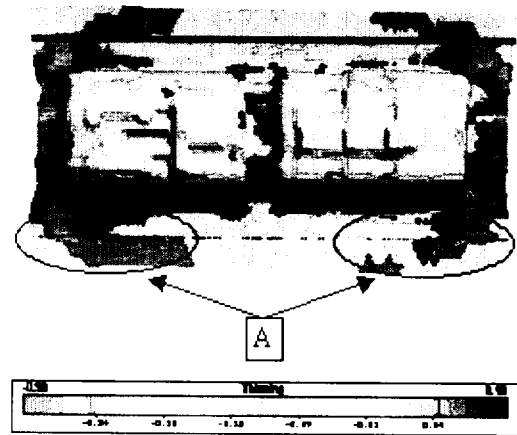


Fig. 6. Wrinkles tendency distribution.

Fig. 6은 성형해석결과 후, 주름분포도를 보여주고 있으며 특히 A구간과 같이 재료의 테두리부분에 주름이 집중적으로 분포된 것을 볼 수 있다.

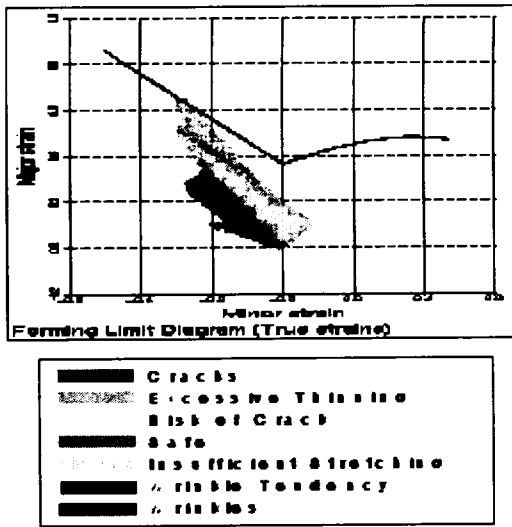


Fig. 7. Formability limit diagram.

재료의 성형한계곡선을 나타낸 결과, 변형률의 조합이 성형한계곡선의 하단부에 위치함으로써 재료의 성형완료 후, 안전성을 가지는 것을 알 수 있으며 파단의 위험성은 가지고 있지만 파단발생은 일어나지 않은 것을 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

N. 결론

본 연구에서 cm-rp-str 판넬을 유한요소해석 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 입력조건에 따라 재료를 성형해석 한 결과, 파단이 각 코너부위에서 나타나는 것을 볼 수 있었으며 현 상태에서는 제품R의 변경이나 Over Draw의 적용이 필요함을 알 수 있었다.
2. 재료의 주름분포도에서 주름이 재료의 테두리 부분에 집중적으로 분포됨으로 인해 쿠션행정의 높이변경이 필요할 것으로 보인다.

3. 재료의 성형한계곡선결과에서는 변형률의 조합이 성형한계곡선의 하단부에 위치함으로써 성형 결과 후, 재료의 안전성을 가지는 것을 알 수 있었으며 파단의 위험성은 가지고 있지만 파단발생은 일어나지 않은 것을 확인할 수 있었다.

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. Mattiason., 1985. Numerical Simulation of Stretching Processes. SIMOP-I. Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop. Stuttgart, pp.170-213.