

정적 내연적 방법을 이용한 CM-D-PLR판넬 해석에 관한 연구

정 동 원 · 안 현 길* · 고 형 훈*

제주대학교 기계에너지시스템공학부, *제주대학교 대학원

A Study of Analyzing CM-D-PLR Panel Using One-Step Theory

Dong-Won Jung, Hyun-Gil Ahn* and Hyung-Hoon KO*

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

The static implicit finite element method is applied effectively to analyze total panel stamping processes, which include the forming stage. Complicated and abnormal large size panel was analyzed by using commercial program called AutoForm. Analysis results examining possibility and validity of the AutoForm software and the factor study are presented. Further, the simulated results for the total 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

오늘날 박판 성형 공정해석에 컴퓨터를 이용한 해석 프로그램을 사용하는 것은 그리 낯선 일은 아니다. 1970년대 이후로, 컴퓨터의 성능과 수치해석적인 기법들이 빠르게 발전되기 시작하면서 컴퓨터를 이용한 많은 해석 프로그램들이 개발되었고, 직접적으로 산업에 이용되기 시작하였다. 이러한 응용 프로그램들은 제품의 질 향상과 원가절감 그리고 새로운 제품의 빠른 도입을 가능케 하였다. 하지만 아무리 성형 공정을 예측한다. 하지만, 박판 공정은 복잡한 비선형 문제이기 때문에, 공정을 완전히 예측하기에는 무리가 있었다. 전통적인 증분 유한요소해석(Incremental FEA)이 잠재적인 성형문제들을 확인하는데 도움이 되긴 했지만, 이것 역시 계산시간이 오래 걸린다는

단점 때문에 짧은 Lead을 갖는 설계공정에 적용하기에는 적합하지 못했다.[1-5]

이와 같은 문제점을 개선하고자 개발되기 시작한 것이 소성(Plasticity)변형이론을 사용한 One-step 유한요소해석(One-step FEA)이다.

One-step 유한요소해석이란, 초기 평판 블랭크에서 최종 형상까지 어떠한 중간 과정을 고려하지 않고 직접 변형된다고 가정하여 처리한 것이다. 즉, 중간 과정을 무시했기 때문에 정확한 예측을 한다는 점에서 다소 어려운 점이 있지만 일반적으로 사용되고 있는 증분형 유한요소 프로그램과는 달리, One-step 유한요소법은 제품 설계단계에 필요로 하는 정보를 얻기 위해 사용되고 있다. One-step 유한요소법에 대한 연구로는 초기에 E. Chu[6], S. A. Majlessi[7] 등이 형상 사상 기술을 이용하여 선대칭 딥드로잉 과정을 해석하기 위해 이 방법을 이용하였다. 그리고 최근에

는 J. L. Batoz[8], S. D. Liu[9-10], K. Chung[11] 등에 의해서 여러 가지 성형조건을 고려할 수 있고, 비선형 변형에너지, 즉 bending - unbending과 드로 우비드를 반영할 수 있는 좀 더 일반적인 One-step 접근이 제시되었으며, 이들의 연구결과들은 현재 산업 현장에서 조금씩 응용되어 지고 있다.

본 연구에서는 Autoform 프로그램을 사용하여 차체판넬에 이용되는 CM-D-PLR 판넬을 유한요소해석 하였으며 해석된 결과에 따른 문제점과 해결방안을 알아보았다.

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. 1.에서 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_a 와 그 역인 E^a 로 나타내었다. 마찬가지로, 변형된 물체에서의 기본 벡터들은 e_a 와 그 역인 e^a 로 표시하였다.

$$E_a = \frac{\partial X}{\partial \theta^a} \quad , \quad e_a = \frac{\partial x}{\partial \theta^a} \quad (1)$$

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

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

변형전의 형상에서 변위벡터 u 는

$$u = u^a E_a = u_a E^a = u_1 E^1 \quad (4)$$

여기에서 $u = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이다. 그리스 지수들은 절점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계

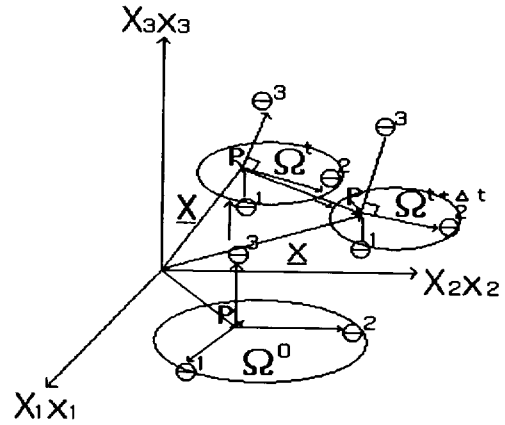


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process.

(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 공변 미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지안 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

성형결과 해석

위에서 수식화 된 결과에 따라 3차원 성형해석을 수행하였으며, 해석에 사용된 재료는 Fig. 2와 같다.

Parameter	Value
Cushion Height	200 mm
B/Holder Force	70 ton
Friction Coefficient	0.15
Material	SPCC
Thickness	0.8
Draw Bead	Weak Round Bead

Fig. 2. Input condition.

$$\int_{V''} \Delta S^{a\beta} \delta e_{a\beta} dV + \int_{V''} \tau^{a\beta} u^k \delta u^k_{,\beta} dV$$

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

(8)식의 자세한 유도과정은 Shin과 Yang [4]의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력중분과 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.

$$\int_{V''} L^{a\beta\gamma\rho} e_{a\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V''} \tau^{a\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^a} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^b} dV$$

$$= \int_{S_i} t_1^{(t, + \Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V''} \tau^{a\beta} \delta e_{a\beta} dV \quad (10)$$

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

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

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

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

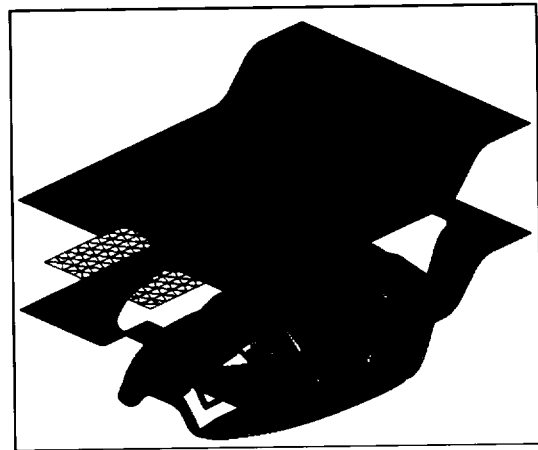
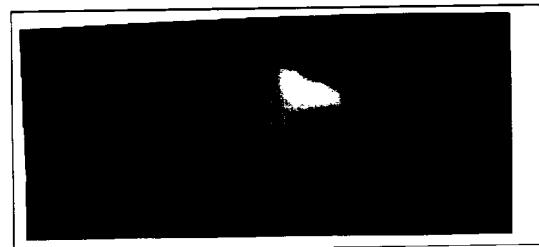


Fig. 3. Tool setting.

Fig. 3에서는 다이와 펀치사이에 판재를 첨가하여 한쪽 면만을 성형하기 위한 Tool setting과정을 보여 주고 있다.



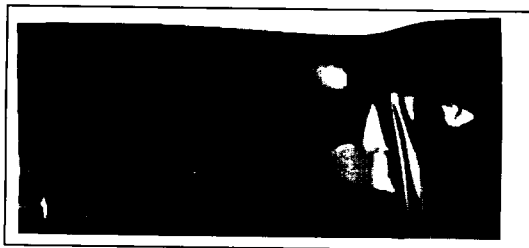
(a) Early binding result



(b) Before lower post point 150mm



(c) Before lower post point 100mm



(d) Before lower post point 60mm



(e) Before lower post point 10mm

Fig. 4. Each punch stroke forming process.

Fig. 4에서는 펀치행정(STROKE)별 성형과정을 초기Binding, 하사점 150 mm 전, 하사점 100 mm 전, 하사점 60 mm 전, 하사점 10 mm 전으로 성형해석 하였으며, 그 결과 (e)에서 볼 수 있듯이 하사점 10 mm전부터 파단이 발생하여 성형완료단계까지 해석을 진행시키지 못하였다.

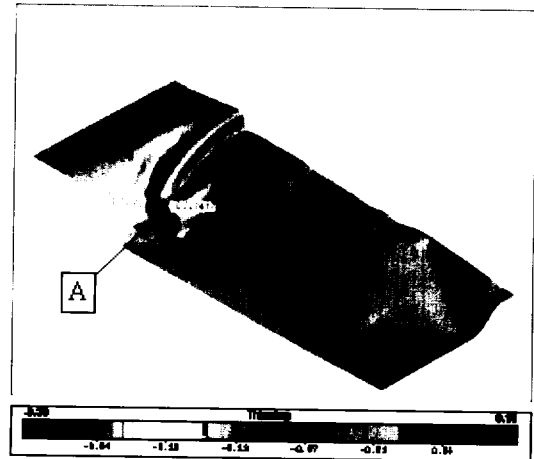


Fig. 5. The thickness reduction rate distribution(First Crack origination).

Fig. 5에서 A구간은 두께감소율이 20%를 넘는 구간으로 파단 발생지역임을 보여주고 있다.

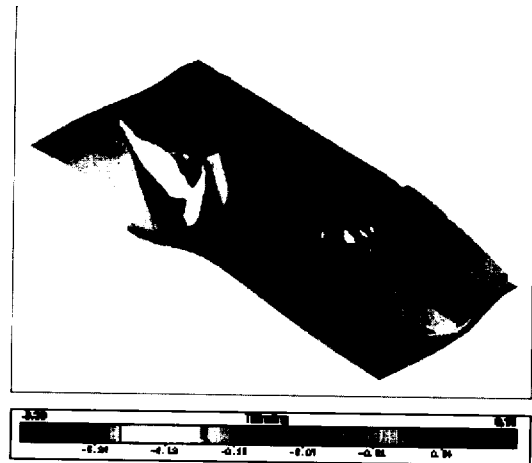


Fig. 6. The thickness reduction rate distribution.

Fig. 6은 하사점 약 1 mm전의 성형상태를 나타내고 있는데 파단이 심하게 나타남으로 인해 성형완료해석이 불가능하며 제품R의 변경 또는 Over Draw의 적용이 필요할 것으로 보인다.

결 론

본 연구에서 CM-D-PLR 판넬을 유한요소해석 하

여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

성형과정 하사점 10mm전부터 파단이 발생하였고 하사점 약 1mm전의 성형상태에서는 파단이 심하게 나타남으로 인해 성형완료해석이 불가능하였다. 이에 대해 소재유입을 감소시키거나 재폼R의 변경 또는 Over Draw의 적용시켜 파단을 완화시킬 대책이 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

- 정동원 · 양동열. 1996. 차체 스텝핑공정을 위한 스텝 형식의 내연적/외연적 결합 유한요소해석. 한국정밀공학회, 13(12): 86-98.
- 정동원 · 이상재. 1999. 기하학적 방법을 이용한 초기 박판형상 추정. 한국해양공학, 13(3-1): 12-20.
- 정동원 · 이상재. 1999. One-Step FEM을 이용한 초기 블랭크 형상 결정에 관한 연구. 한국해양공학회, 13(3-1): 21-28.
- M. Kawka and A. Makenouchi. 1993. Shell element formulation of sheet stamping. Proc. NUMISHEET '93, pp. 91-107.
- J. L. Duncan, R. Sowerby and E. Chu. 1985. The development of sheet metal modelling, in Computer Modelling of Sheet Metal Forming Process. edited by N. M. Wang and S. C. Tang, pp. 1-11.
- E. Chu. 1983. New Horizons in CAD of Sheet metal stamping. Ph. D. thesis, McMaster University.
- S. A. Majlessi and D. Lee. 1987. Further development of sheet metal forming analysis method. ASME J. Eng. Ind. 09 : pp. 330-337.
- Y. Q. Guo, J. L. Batoz, J. M. Detraux and P. Duroux. 1990. Finite element procedures for strain estimations of sheet metal forming parts. Intl. J. Numer. Meth. Eng., 30: 1515-1526.
- S. D. Liu and A. Assempoor. 1995. Development of Fast_3D-A design-oriented one step FEM in sheet metal forming. Proc. Complas'IV, pp. 1515-1526.
- S. D. Liu and M. Karima. 1992. A one step finite element approach for product design of sheet metal stampings Proc. NUMIFORM'92, pp. 497-502.
- K. Chung and O. Richmond. 1992. Sheet forming process design based on ideal forming theory. Proc. NUMIFORM'92, pp. 455-460.
- 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., 32: 49-64.
- N. M. Wang., S. C. Tang. 1988. Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations. Int. J. for Num. Mech. in Engng., 25: 253-367.
- K. Mattiaso. 1985. Numerical Simulation of Stretching Processes. SIMOP-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart.

