

마찰계수에 따른 차체판넬의 성형성에 관한 연구

안현길*, 고희훈*, 정동원

제주대학교 대학원* 제주대학교 기계에너지시스템공학부

요 약

본 연구에서는 마찰계수가 성형성에 미치는 영향과 현장적용의 문제점을 알아보았으며 AutoForm software를 사용하여 여러 마찰계수에 따라 판넬두께, 판넬주름, 성형한계곡선(FLD), 등의 유용한 데이터를 얻어내었다. 그 결과, 최적 마찰계수 예측에 따른 품질향상 및 최적설계가 가능해졌으며 제품 개발 기간의 단축과 성형해석 적용시 성형성, 주름, 굽힘자국, 성형력 등의 예측이 가능하여 마찰계수에 따른 성형성을 살펴볼 수 있었다.

주요어 : 마찰계수, 정적-내연적 유한요소방법, 성형한계곡선, 오토폼(AutoForm)

1. 서론

제조업의 제품 설계와 메뉴팩처링의 틀(Paradigm)이 변화함으로써 제품 개발 기간과 비용을 크게 단축, 절감시키며 이와 더불어 제품 품질과 유지, 보수 역량 향상에 대한 요구가 증대하고 있다. 이러한 요구는 수많은 비용과 설계 특색이 고정되기 전인 초기 설계 단계에서 중요하게 부각되고 있다. 마찰계수는 초기 설계 단계 중 차체판넬의 성형성에 많은 영향을 미친다. 그러나 현장적용의 어려움으로 인하여 이에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이에 유한요소법을 이용한 소프트웨어를 사용하여 판넬두께, 판넬주름, 성형한계곡선(FLD), 등의 유용한 데이터를 얻어내어 마찰계수가 차체판넬의 성형에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 한다.

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-DYNA3DPAM-STAMP, ABAQUS/Explicit, RADIOSS, 등의 외연적(Explicit) 소프트웨어들이 활발히 쓰여 지고 있는데, 이는 판재성형에 필수적으로, 존재하는 접촉문제를 비교적 수월히 해결하며, 대형, 복잡한 문제를 비교적 단시간 내에 풀 수 있기 때문이다. 유럽의 일부 자동차회사에서 쓰여 지는 것으로 스위스의 Kubli교수가 개발한 Autoform은 내연적 방법임에도 불구하고 굽힘을 고려하는 박막 요소와 적응자동요소생성(adaptive automatic mesh generation) 기술을 첨가하여 상당히 정확히 단시간 내에 해석할 수 있는 장점을 가지고 있다.[3] 적응자동요소 생성 기술은 판재

금형 같이 넓고 부분적으로 작은 흠이나 필렛 반경이 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 참가하는 것이 매우 바람직하다.

본 연구에서는 정적-내연적 유한요소방법을 이용한 Autoform 소프트웨어를 사용하여 마찰 계수에 따른 차체판넬의 성형성과 현장적용성에 대해 알아보고자 한다.

II. 이론해석

변형된 물체는 Fig.1.과 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 질점 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.

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

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

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

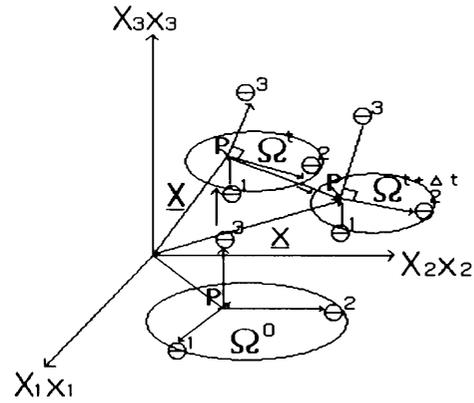


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터 u 는

$$u = u^\alpha E_\alpha = u_\alpha E^\alpha = u_i E^i \quad (4)$$

여기에서 $u = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이다. 그리스 지수들은 질점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular Cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 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.

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

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

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

대변형(large deformation)을 고려한 개정 라그랑지언 방정식(updated Lagrangian equation)은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{V_0} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} u_{,\alpha}^k \delta u_{,\beta}^k dV = \int_{S^*} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \quad (8)$$

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

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

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

$$\int_V L^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{\alpha\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} dV$$

$$= \int_{S^*} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \quad (10)$$

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.

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

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

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

III. 성형해석결과

위에서 수식화 된 결과에 따라 마찰계수에 따른 3차원 성형해석을 수행하였다.

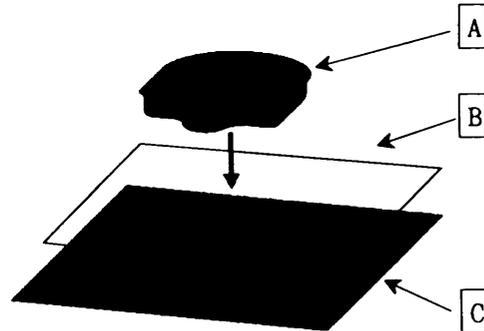


Fig. 2. Tool setting

Fig. 2 는 차체판넬의 성형성을 알아보기 위한 시뮬레이션으로서 A는 펀치형상, B는 블랭크, C는 금형형상을 나타내며 화살표의 방향으

로 성형하여 마찰계수에 따른 주름분포도와 두께분포, 성형한계곡선을 알아보았다.

coefficient

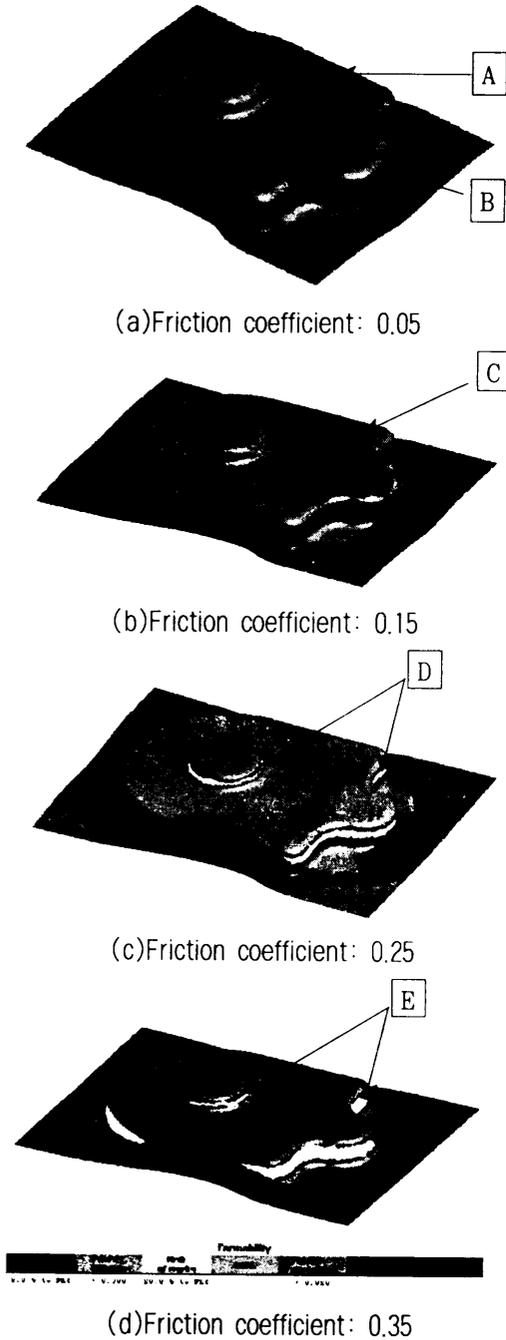


Fig. 3은 마찰계수 0.05부터 0.35까지의 과정에 따른 주름분포도를 보여주고 있다. 마찰계수 0.05는 A구간에서 주름가능성을 보여주고 있으며 B구간에서는 제품주위에 주름이 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 0.15는 대체적으로 제품의 주름분포도가 A구간과 같이 안정성을 가졌으며, 0.25와 0.35에서는 D와 E구간과 같이 모서리 부위에서 파단이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 결과로 인해 주름분포도에서 마찰계수 0.15가 가장 안정적인 것을 알 수 있다.

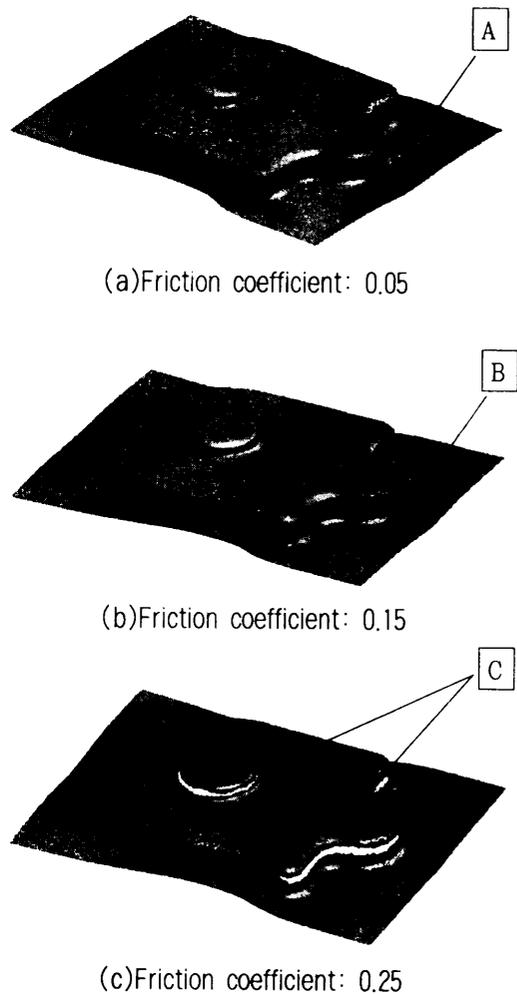


Fig. 3. Wrinkles distribution according to friction

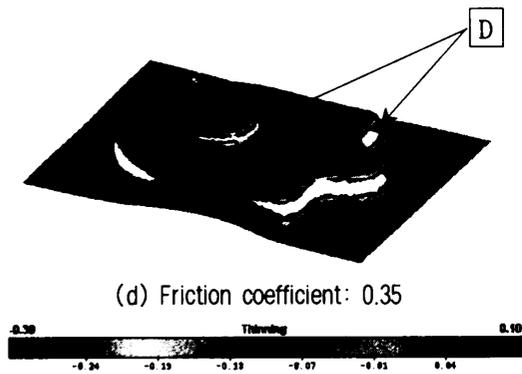


Fig.4. Thickness distribution according to friction coefficient

Fig. 4는 마찰계수 0.05부터 0.35까지의 과정에 따른 파단분포를 보여주고 있다. 마찰계수 0.05에서는 A구간과 같이 제품주위에 두께의 정도가 높게 나와 성형성이 좋지 못하며 0.15는 B구간에서 알 수 있듯이 0.05보다는 성형성이 좋으며 대체적으로 두께분포도가 적절한 것으로 보인다. 0.25와 0.35는 C와 D구간에서 파단이 일어남으로써 두께분포에서도 주름분포도와 마찬가지로 마찰계수 0.15일 때가 가장 안전성을 가지는 것을 알 수 있다.

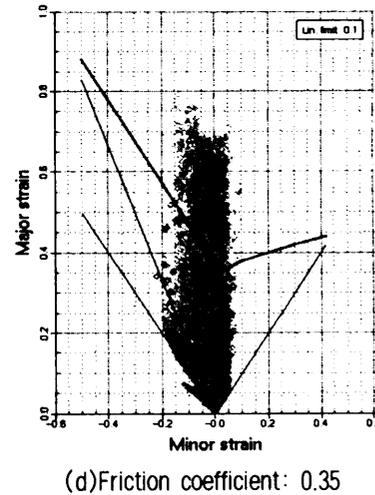
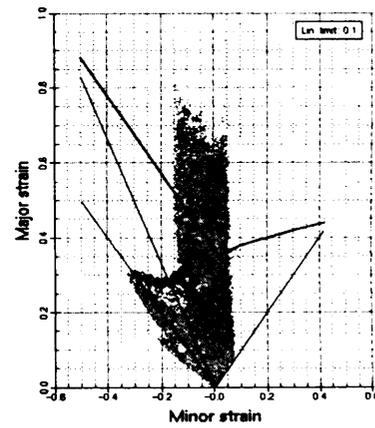
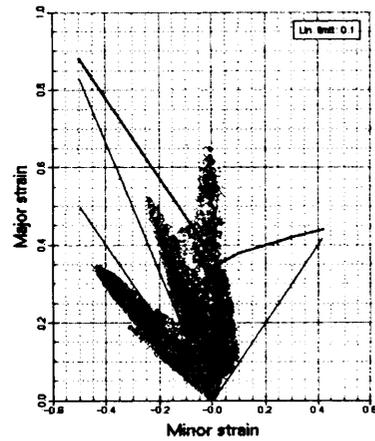
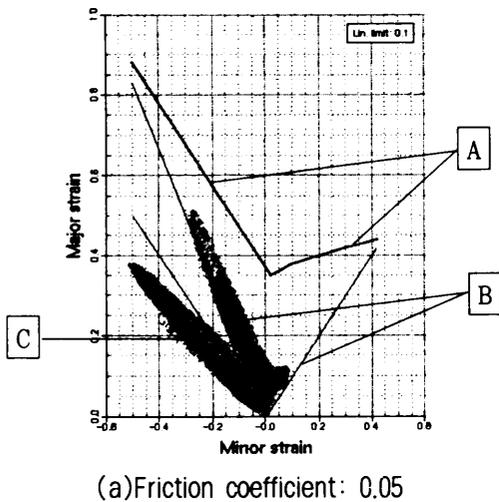


Fig. 5. forming limit diagram according to friction coefficient

Fig. 5는 주름분포와 파단분포에 대한 여러 마찰계수의 성형한계곡선을 보여주고 있다. 마찰계수 0.05에서 A는 파단구간, B는 안전성구간, C는 주름구간을 나타내며 마찰계수 0.15에서 0.35까지의 구간도 이와 같다.

마찰계수에 따른 성형한계곡선의 결과로 0.05에서는 파단부분은 없지만 주름구간에 많은 분포도를 보이고 있으며 0.15에서는 파단구간과 주름구간에 다소의 분포를 보이지만 안정성구간으로 많이 분포되는 것을 볼 수 있다 또한 0.25와 0.35에서는 파단구간의 집중현상으로 인해 파단이 일어났음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구에서는 마찰계수 0.05부터 0.35까지의 상태에서 차체 판넬의 성형성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았으며, 이로 인한 현장적용성에 대해 알아보았다. 그 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

1. 마찰계수 0.05에서는 마찰력이 미비하여 성형성이 잘 이루어지지 않았으며 0.15일 때는 적절한 주름성과 안전성, 약간의 판단경향을 보여주었고 0.25와 0.35에서는 마찰력의 높음으로 인하여 성형한계곡선에서 알 수 있듯이 파단구간의 집중현상으로 인해 파단이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 결과로 인해 마찰계수 0.15일 때 가장 안정적인 성형성을 보여줌을 알 수 있었다.
2. 현재 위와 같은 미세한 마찰계수의 결과를 현장에서 정확히 적용하기는 어렵지만 마찰계수에 따른 주름성과 파단성의 결과를 알아봄으로써 공법개발이나 성형성에 보다 나은 방법으로 나아갈 수 있을 것이다. 또한 마찰계수에

따른 정확한 현장적용을 위해서 앞으로도 마찰계수에 대한 연구가 필요할 것이다.

V. 참고문헌

1. D. Y. Yang, D. W. Jung, I. S. Song, D. J. Yoo and J. H. Lee, Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming process, J. of Materials Processing Technology, vol. 50, pp39-53, 1995
2. D. W. Jung, D. J. Yoo and D. Y. Yang, A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, Engineering Computations, Vol.12, pp.707-722, 1995
3. 이재석, 가상실험기술, 충북대학교 건설기술연구소, pp.4-5, 1999
4. H. B. Shim, D. Y. Yang, 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, 1990
5. N. M. Wang, S. C. Tang, Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations, Int. J. for Num. Mech. in Engng., Vol.25, pp.253-367, 1988
6. K. Mattiason, Numerical Simulation of Stretching Processes, Int. workshop, Stuttgart, pp.170-213, 1985