

정적-내연적 유한요소법을 이용한 Tray 판넬 해석에 관한 연구

정동원[#], 안현길^{*}

A Study on the Tray Panel Analysis Using Static Implicit Finite Element Method

Dong-Won Jung[#], Hyun-Gil Ahn^{*}

ABSTRACT

The static implicit finite element method is applied effectively to analyze total tray panel stamping processes, which include the forming stage. Complicated and abnormal large size tray 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 tray 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 : Element Method(정적-내연적 유한요소방법), Tray Panel Stamping(트라이 판넬 스탬핑), Forming Stage(성형단계), AutoForm(오토폼)

1. 서 론

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

재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방용품산업 등에서 사용되는 중요한 제조공정 중의 하나이다. 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 미친다. 따라서 물리적 현상을 정량적으로 파악하기는 매우 어렵다. 그러므로 복잡하고 불규칙적인 곡선형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위

교신저자 : 제주대학교 기계·에너지·생산공학부

E-mail : jdwcjeju@cheju.ac.kr

* 제주대학교 대학원 기계공학과

등의 실질적인 제조상의 문제점들을 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 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 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 해석시간의 상당한 단축을 가져오기 때문에 외연적 프로그램에도 첨가하는 것이 매우 바람직하다.

본 연구에서는 Autoform 프로그램을 사용하여 Tray 판넬을 유한요소해석 하였으며, 1차, 2차적 성형해석에 따른 그 결과와 보완점을 알아보았다.

2. 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. 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 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.

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

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

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

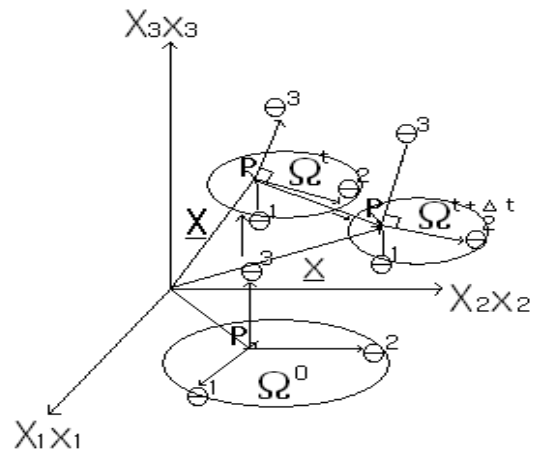


Fig. 1 Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터 u 는

$$u = u^\alpha E_\alpha = u_\alpha E^\alpha = u_1 E^1 \quad (4)$$

여기에서 $u = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이다. 그리스 지수들은 질점 좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계 (rectangular Cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 라그랑지안 변형을 텐서(Lagrangian strain tensor) ε 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\alpha\beta} E^\alpha E^\beta = \varepsilon^{\alpha\beta} E_\alpha E_\beta \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} (g_{\alpha\beta} - G_{\alpha\beta}) \\ &= \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{\gamma,\alpha} u_{\gamma,\beta}) \\ &= \frac{1}{2} (u_{\alpha\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{\gamma,\alpha} u_{\gamma,\beta}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 콤마는 변형되지 않은 행렬에 관하여 공변미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지언 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = e_{\alpha\beta} + n_{\alpha\beta} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } e_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha}), \\ n_{\alpha\beta} &= \frac{1}{2} u_{\gamma,\alpha} u_{\gamma,\beta} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} &\int_{V_0} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} u^k{}_{,\alpha} \delta u^k{}_{,\beta} dV \\ &= \int_{S_1^i} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (8)$$

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

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

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 $L^{\alpha\beta\gamma\delta}$ 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.

$$\begin{aligned} &\int_{V_0} L^{\alpha\beta\gamma\delta} e_{\alpha\beta} \delta e_{\gamma\delta} dV + \\ &\int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \Theta^\alpha} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \Theta^\beta} dV \\ &= \int_{S_1^i} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V_0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (10)$$

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 응력 텐서 τ 는 Cauchy 응력 텐서 σ 와 같다고 놓을 수 있다.

3. 성형결과 해석

위에서 수식화 된 결과에 따라 Table 1과 같은 조건으로 3차원 성형해석을 수행하였다.

Table 1 Input Condition

Material	PNL RR P/TRAY
Thickness	0.65t
Cushion Stroke	60mm
Cushion Pressure	80ton
Blank Size	1320mm×780mm
Draw Bead	Weak Round Bead

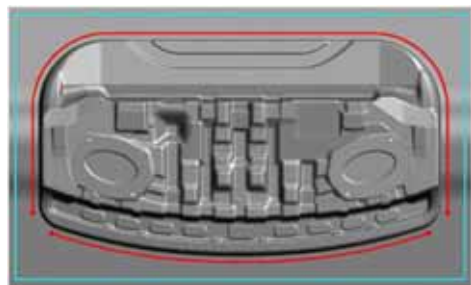


Fig. 2 Input condition

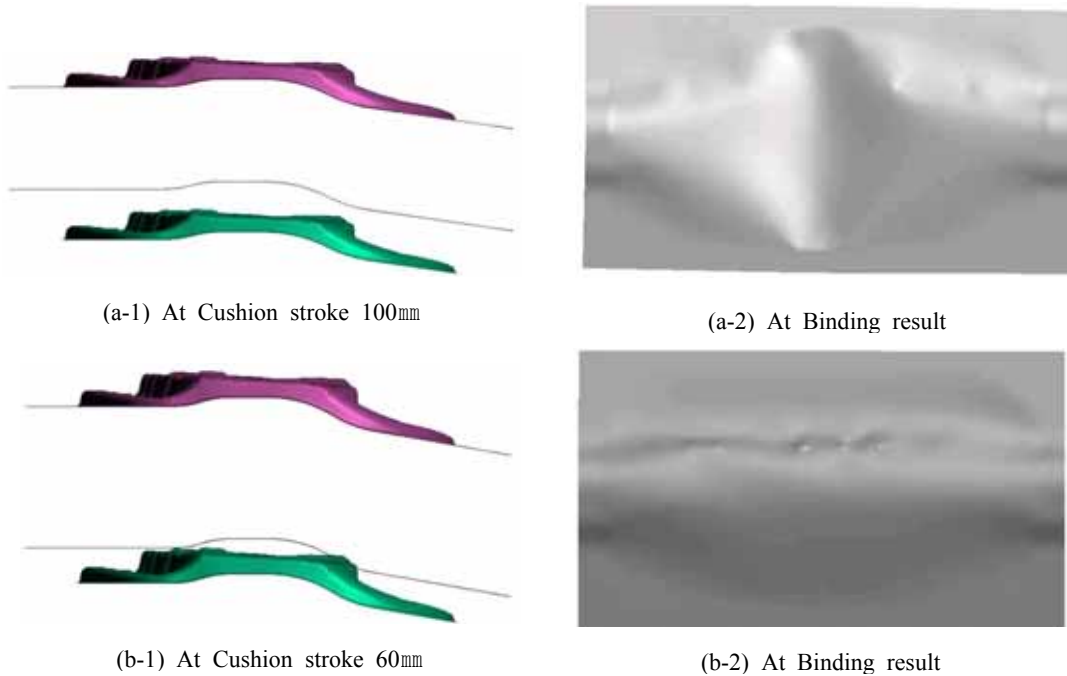


Fig. 3 Tool setting punch stroke

Fig. 2는 금형사출에 사용되는 PNL RR/TRAY 재료를 이용한 성형해석 형상과 형상의 주위에 draw bead를 추가한 모습을 보여주고 있다.

Fig. 3은 틀셋팅 과정 중, (a-1), (a-2)는 쿠션행정 100mm, (b-1), (b-2)는 쿠션행정 60mm에서 형상과 바인딩 결과를 보여주고 있다. 네 그림에서 알 수 있듯이 쿠션행정 60mm에서의 바인딩 결과가 쿠션행정 100mm보다 우수한 상태임을 알 수 있다.

Fig. 4에서 쿠션행정이 늘어날수록 소재가 자중에 의해 펀치쪽으로 처지는 현상을 볼 수 있는데 자중량이 많아져서 binding 상태가 좋지 못함을 알 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해서는 쿠션행정을 줄여 소재의 자중처짐 현상을 완화 시켜주는 것이 성형에 유리하다.



Fig. 4 Gravity sink material inflow

Fig. 5에서는 펀치행정별 성형과정을 초기 binding, 하사점50mm 전, 하사점30mm 전, 하사점10mm 전, 성형 완료단계로 각각 성형해석 하였으며 이에 대한 결과는 Fig6과 Fig7에서 살펴볼 수 있다.

Fig. 6은 A구간에서 두께감소율이 20%를 넘는 구간으로 파단 발생지역임을 보여주고 있으며 설계된 소재 크기가 작아 윗부분에서 재료가 bead를 넘어 들어오고 있다. 또한 bead힘이 약한 상태임에도 불구하고 제품 내부에 다수의 파단 구간이 보인다.

Fig. 7에서 B구간은 draw bead의 테두리 부분에 재료유입이 증가함으로써 전반적으로 스트레칭의 불량으로 주름의 경향이 많음을 보여주고 있다. 이러한 문제점을 해소하기 위해서는 소재를 늘리고 유입량을 줄일 필요가 있다.

1차 성형해석에서의 문제점을 보완하기 위해서 table2와 같이 폭을 800mm, cushion 압력을 100ton으로 늘리고 round bead를 적용시켜 2차 성형해석 해 보았다.

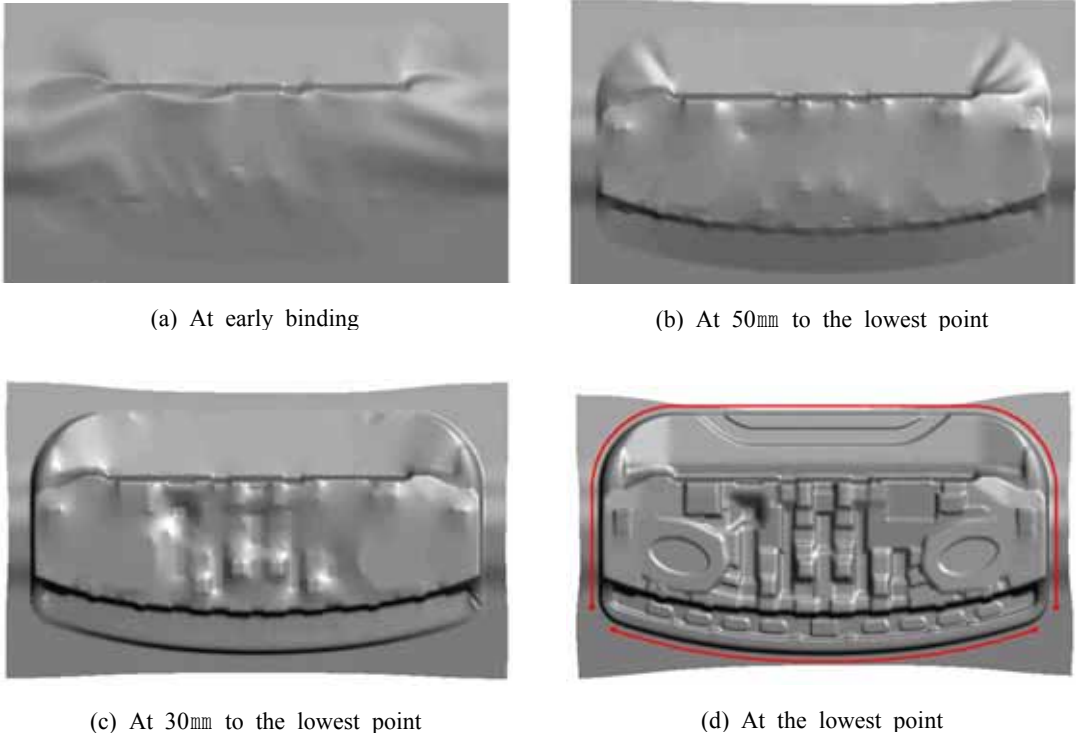


Fig. 5 The forming process at eac

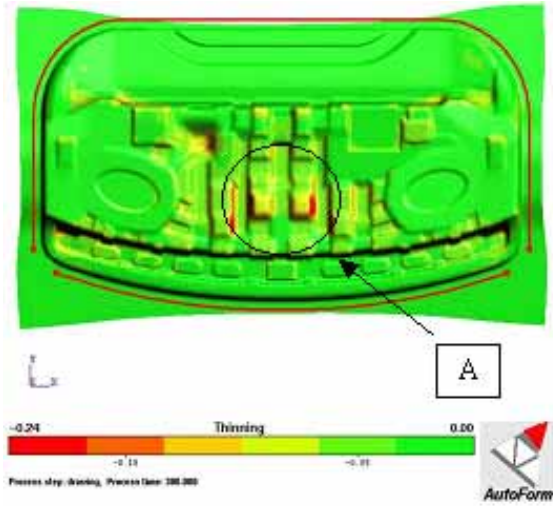


Fig. 6 The of thickness reduction rate distribution

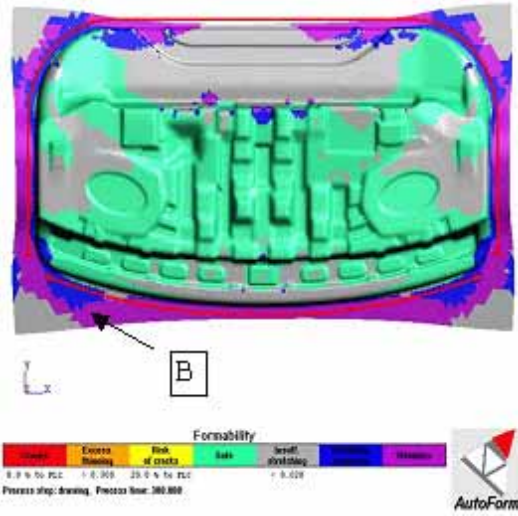


Fig. 7 Wrinkles tendency distribution

Table 2 Input condition

Material	PNL RR P/TRAY
Thickness	0.65t
Cushion Stroke	60mm
Cushion pressure	100ton
Blank Size	1320mm×800mm (Breadth 20mm Lengthen)
Draw Bead	Usual Round Bead

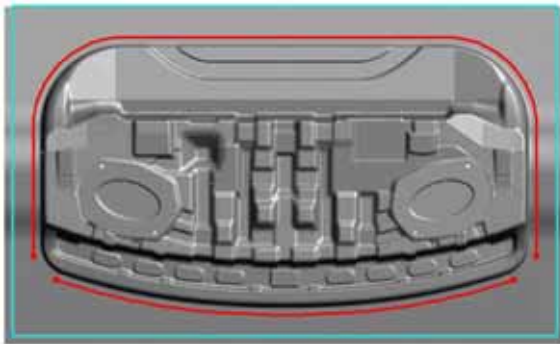


Fig. 8 Input condition

Fig. 9는 입력조건이 1차 성형해석보다 강화되면서 제품내부에 C구간 같이 파단 발생지역이 늘어나고 있음을 보여주고 있다.

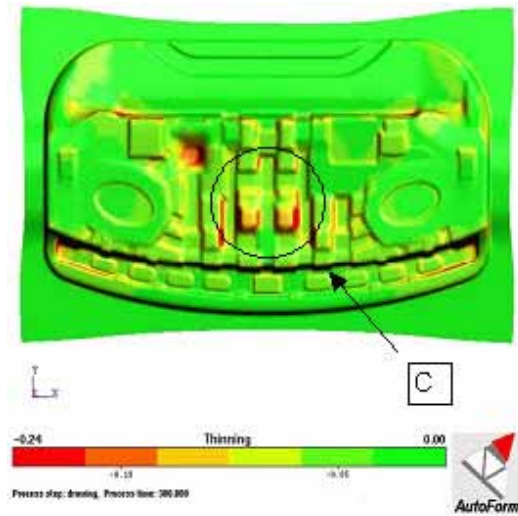


Fig. 9 The thickness reduction rate distribution

Fig. 10 은 현재의 조건하에서 하사점 약 30mm전부터 D부분의 모서리부위에 파단이 발생하는 것을 알 수 있다.

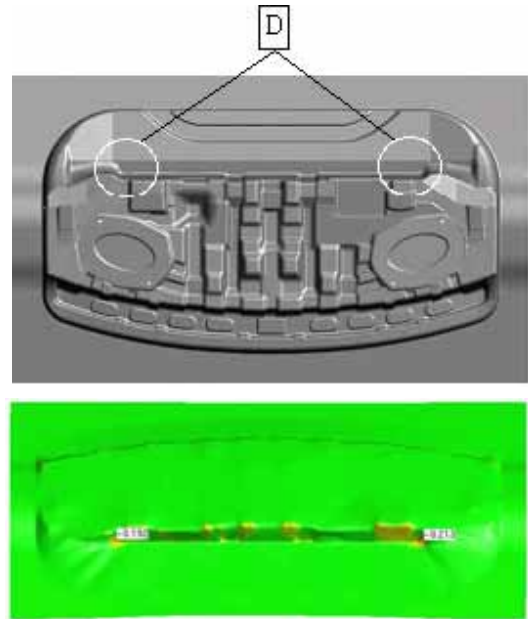


Fig. 10 First crack origination position

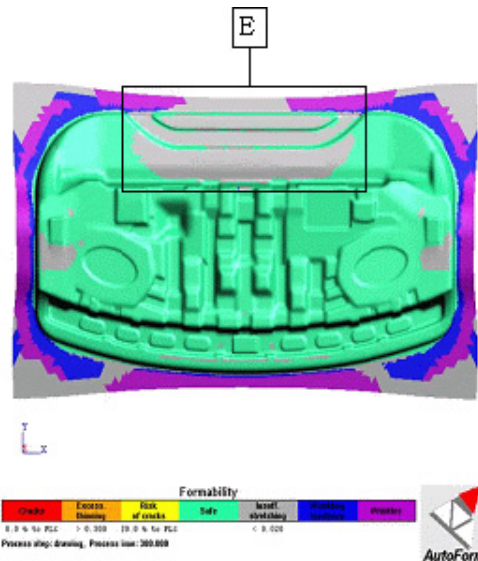


Fig. 11 Wrinkles tendency distribution

Fig. 11에서는 소재유입이 억제되었지만 E구간과 같이 여전히 충분한 스트레칭이 발생하지 못함을 알 수 있으며, 이러한 현상은 성형 깊이가 불충분으로 인한 문제점으로 판단된다. 또한 제품내부의 주름발생 가능성은 작으나 현재와 같은 panel을 얻기 위해서는 제품내부의 파단에 대한 대책이 선행 되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서 1차, 2차적으로 Tray판넬을 유한요소 해석 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1차 성형해석결과에서는 쿠션행정을 증가시킬수록 소재가 자중에 의해 펀치 쪽으로 처지는 현상을 보였고, 설계된 소재의 폭이 작아 bead를 넘어 들어왔으며 bead힘이 약한 상태임에도 불구하고 제품내부에 다수의 파단 구간을 나타냈다. 또한 재료의 유입이 많아지면서 전반적으로 스트레칭 상태가 불량하며 제품내부에 주름 영역이 보여 졌다.
- 2차 성형해석결과에서는 입력 조건이 강화되면서 제품내부에 파단 발생구간이 늘어나 형상에 대한 제품R 확대 등의 작업이 필요하였으며, 소재유입은 억제되었지만 여전히 상단부는 충분한 스트레칭이 발생하지 못하였다. 또한 제품내부의 주름발생 가능성은 작으나 현재와 같은 panel을 얻기 위해서는 제품내부의 파단에 대한 대책이 선행 되어야 할 것으로 보여 진다.

참고문헌

1. Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., "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. Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., "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 건설기술 연구소, pp.4-5, 1999.
4. Shim, H. B. and Yang, D. Y., "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. Wang, N. M. and Tang, S. C., "Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations," Int. J. for Num. Mech. in Engng., Vol. 25, pp. 253- 367, 1988
6. Mattiason, K., "Numerical Simulation of Stretching Processes," Int. workshop, Stuttgart, pp. 170-213, 1985.