

# 정적-내연적 유한요소법을 이용한 Roof 판넬 해석에 관한 연구

정동원<sup>#</sup>, 안현길<sup>\*</sup>

## Study of Analyzing Roof Panel Using Static Implicit Finite Element Method

Dong Won Jung<sup>#</sup>, Hyun Gil Ahn<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

The static implicit finite element method is applied effectively to analyze total roof panel stamping processes, which include the forming stage. complicated and abnormal Large size roof 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 roof 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** : static implicit finite element method(정적-내연적 유한요소방법), auto-body panel stamping(차체 판넬 스탬핑), forming stage(성형단계), AutoForm(오토포)

### 1. 서론

박판성형 공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품 산업과 주방용품 산업 등에서 중요한 제조공정 중의 하나이며 박판성형은 드로잉, 스트레칭, 굽힘, 아이어닝 및 이들의 조합으로 구성된 복잡한 변형 모드를 포함하고 있을 뿐만 아니라, 재료 자체의

성형성(formability), 이방성(anisotropy)등의 기계적 성질이나, 두께의 불균일, 공구각부의 조합, 표면 및 윤할 상태, 성형속도 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 경제적인 해석방법이 요구되고 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해선 아직도 많은 노력이 필요하다. 해의 효율성과 강건성(efficiency and robustness)은 매우 중요한 요

<sup>\*)</sup> 접수일: 2004년 7월 27일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

<sup>#</sup> 교신저자: 제주대학교 기계공학과

E-mail jdwcheju@cheju.ac.kr Tel. (064) 754-3625

<sup>\*</sup> 제주대학교 기계공학과 대학원

인이다.<sup>1-4</sup>

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 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.<sup>5</sup> 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 프레스금형 성형해석 시스템인 Autoform 프로그램을 사용하여 전체 스탬핑공정을 복잡하고 어려운 대형 차체판넬을 유한요소해석 해 보았다.

## 2. 본론

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  $\theta^1$ 과  $\theta^2$ 축을 박판표면의 질점 좌표계(convected coordinates)를 나타내고,  $\theta^3$ 축은 박판표면에 법선방향으로 주어진다.  $G_{\alpha\beta}$ 와  $g_{\alpha\beta}$ 는 변형전과 변형 후 형상의 행렬텐서를 나타내

고,  $G^{\alpha\beta}$ 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.

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

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

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

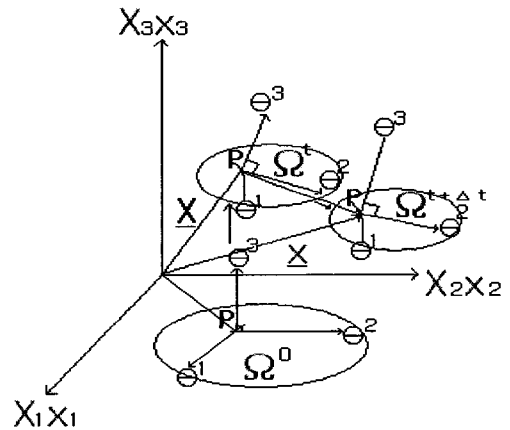


Fig. 1 Polar coordinates system of transformation process

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 질점좌표계를, 라틴 지수들은 직교 카티션 좌표계(rectangular cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 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 공변미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지언 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

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

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

$$\begin{aligned} &\int_{V^0} \Delta S^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV + \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} u^k_{,\alpha} \delta u^k_{,\beta} dV \\ &= \int_{S^0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (8)$$

(8)식의 자세한 유도과정은 Shim과 Yang<sup>6</sup>의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 라그랑지언 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<sup>6</sup>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<sup>7-8</sup>에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과

(9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

$$\begin{aligned} &\int_{V^0} L^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{\alpha\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} dV \\ &= \int_{S^0} t_1^{(t_0+\Delta t)} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (10)$$

2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 성분들은 질점 좌표계에서의 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  $\tau$ 는 Cauchy 응력텐서  $\sigma$ 와 같다고 놓을 수 있다.

### 3. 성형해석결과

위 수식화 된 결과에 따라 1에서 4차까지 나누어 3차원 성형해석을 수행 하였다.

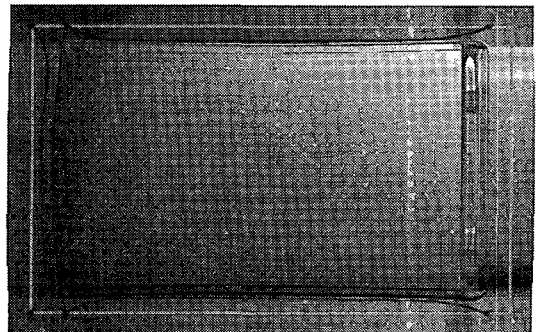
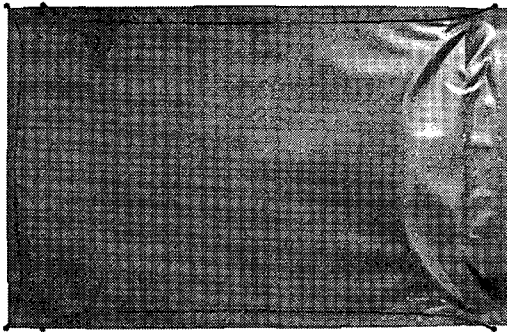
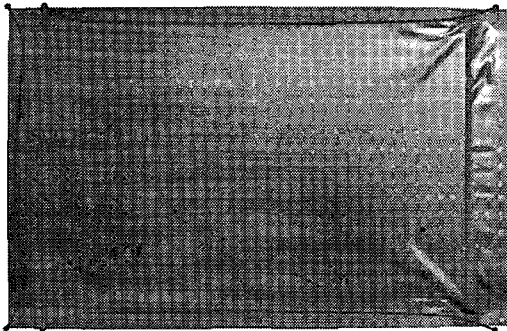


Fig. 2 Input condition(one-step)

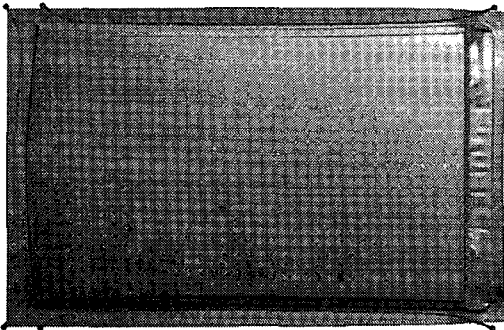
1차 성형해석에 사용되는 입력조건 Fig.2는 냉간 압연 및 강판에 사용되는 재료이며 두께 0.7t, Cushion 행정150mm, Cushion압력 130ton, 그리고 Draw Bead는 사각Bead(R3, H4)를 사용하여 성형해석결과를 알아보았다.



(a)Before lower post point 50mm



(b)Before lower post point 30mm



(c)The final results of lowest point

Fig. 3 Each punch stroke forming process(one-step)

Fig. 3 은 해석범위에서 성형해석을 행정별로 하사점50mm 전, 하사점30mm 전, 하사점 최종결과

로 성형해석 해 보았다. 그 결과 Binding과정에서 나타난 주름이 성형과정에서 계속 심화되었고, 특히 코너부위에서는 Overlap 등의 현상이 나타날 가능성이 크다.

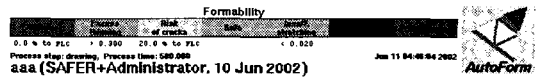
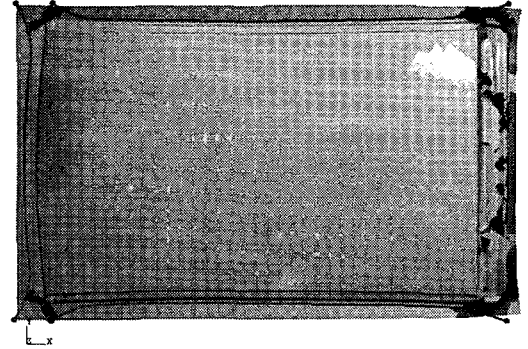


Fig. 4 Formability distribution(one-step)

Fig. 4 는 파단이 제품의 모서리 부위에서 발생하는 것을 보여주고 있으며, 현재 상태에서 가장 큰 문제점은 제품 내에 충분한 신율이 발생하지 않고 있는 점이다. 여기서 회색구간은 Stretching 이 필요한 구간임을 알 수 있다.

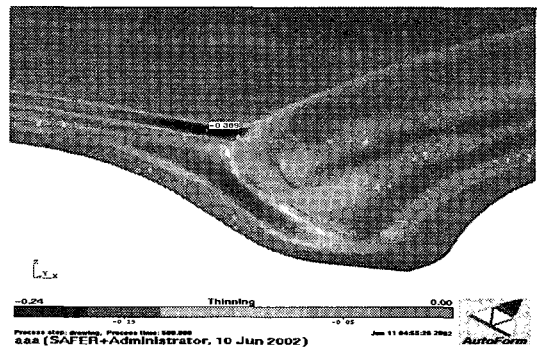


Fig. 5 The thickness reduction rate distribution (one-step)

Fig. 5 에서 파단은 각 코너부위에서 나타나고 있으며 소재유입을 증가 시킬수록 제품품질을 저하시킬 가능성이 있을 것으로 판단된다.

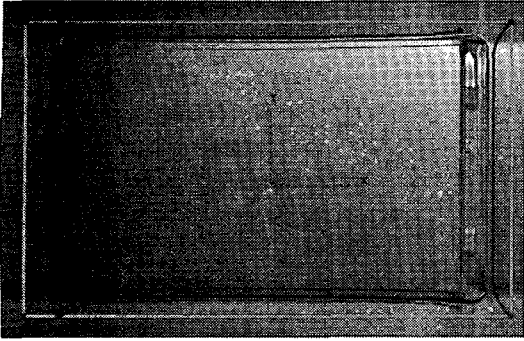
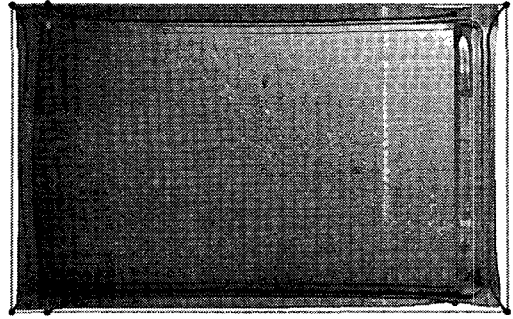


Fig. 6 Input condition(second-step)

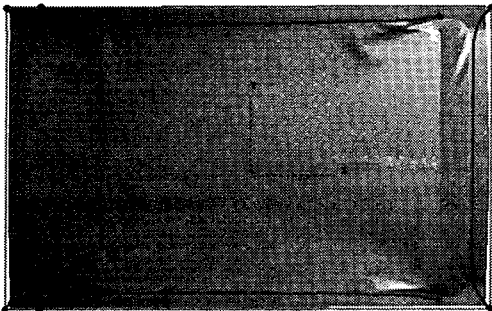
Fig. 6에서 2차 성형해석에 사용될 입력조건은 1차와 동일하며 1차 성형해석결과에서 나타난 단점을 보완하기 위해 Die Face 및 Bead 크기를 수정하여 2차 성형해석 결과를 알아보았다.



(c) The final results of lowest point

Fig. 7 Each punch stroke forming process(second-step)

Fig. 7 은 해석범위에서 성형해석을 1차와 마찬가지로 행정별 하사점50mm 전, 하사점30mm 전, 하사점 최종결과로 성형해석 하였으며, 그 결과로 Binding과정에서 1차 해석결과 보완 후 주름이 많이 완화됨을 볼 수 있다.



(a)Before lower post point 50mm

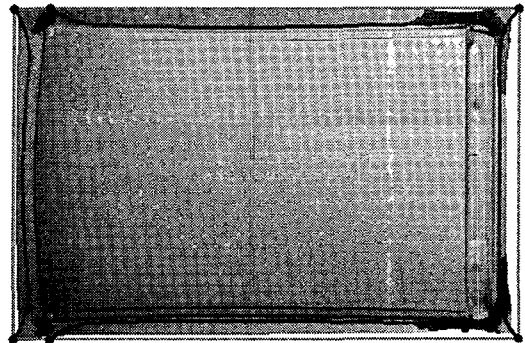
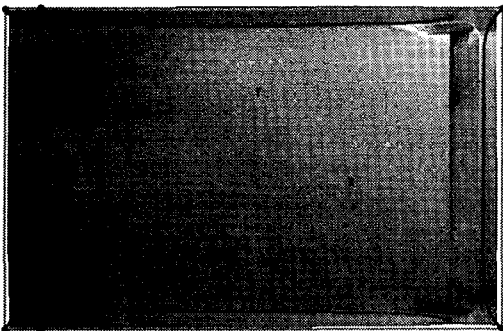


Fig. 8 Formability distribution(second-step)

Fig. 8 의 파단 발생은 제품의 모서리 부위에서 발생하고 있으며, 1차 해석결과에서 문제시 되었던 파단문제가 Die Face 및 Bead 크기 수정 후 녹색 구간에서 보는바와 같이 안정성을 가지게 되었다.



(b)Before lower post point 30mm

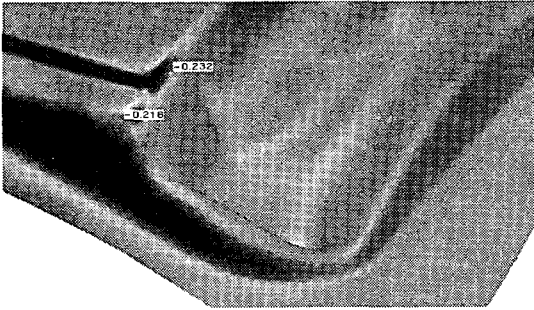
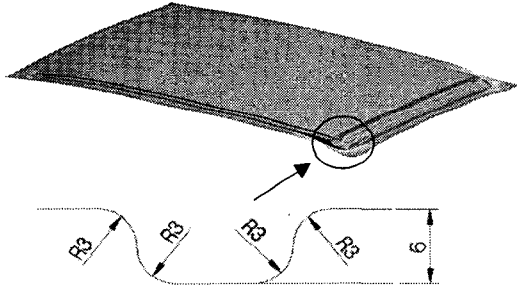
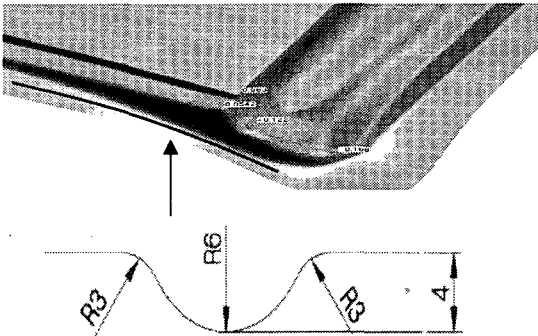


Fig. 9 The thickness reduction rate distribution (second-step)

Fig. 9 에서 파단은 각 코너부위에서 나타나고 있으며 1차 결과보다 약 16% 정도 좋아졌지만 소재 유입을 증가 시킬 경우 제품품질을 저하시킬 가능성이 있다.



(a)Bead quadrangle application



(b)Bead height amendment

Fig. 10 The thickness reduction rate distribution (third-step)

3차 해석에서는 Fig.10(a)에서 보는 것과 같이 사각Bead를 적용시키고 높이를 수정한 결과 1, 2차 해석결과, 각 코너에서 발생되었던 파단이 완화됨을 볼 수 있다.

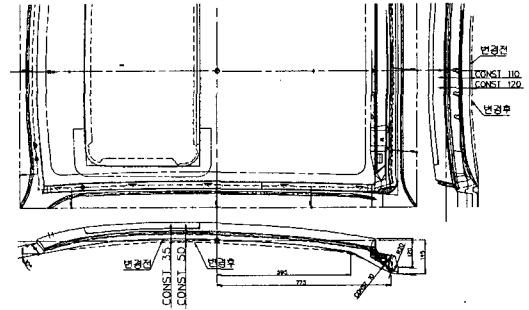
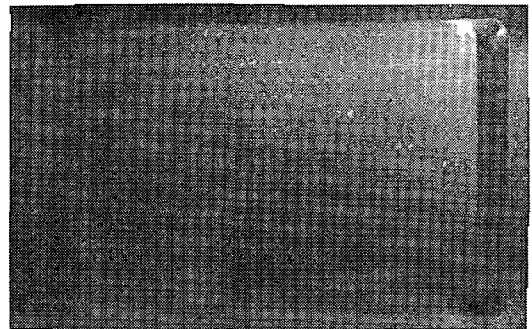
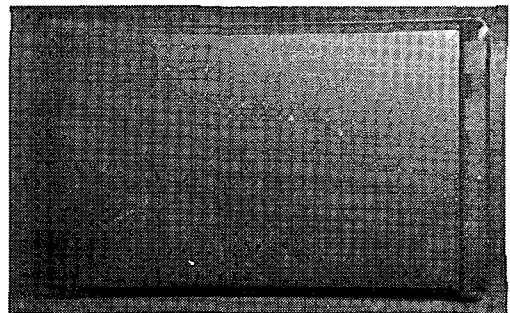


Fig. 11 Die Face change(fourth-step)

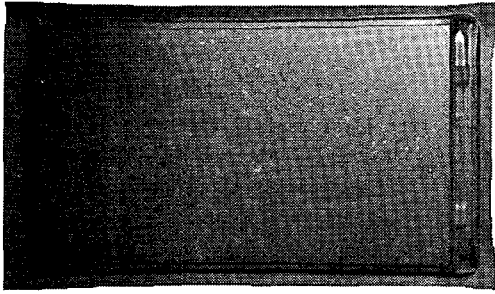
Fig. 11은 4차 성형해석에 사용될 입력조건을 나타내고 있으며 Draw Die Face의 변경을 FRT CTR부 15mm와 SIDE CTR부 10mm를 Down시킨 후 그 결과를 알아보았다.



(a)Before lower post point 50mm



(b)Before lower post point 30mm



(c)The final results of lowest point

Fig. 12 Each punch stroke forming process (third-step)

4차성형해석의 입력조건을 가지는 Fig.11을 행정별로 하사점50mm 전, 하사점30mm 전, 하사점 최종결과로 성형해석 한 결과, Binding과정에서 Die Face 보안 후 3차 해석결과 보다 주름이 완화됨을 Fig.12에서 확인할 수 있다.

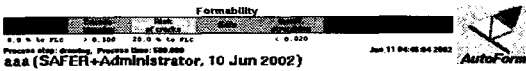
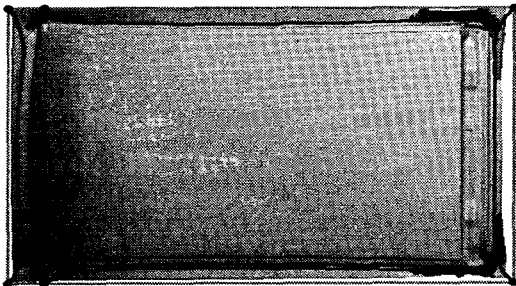


Fig. 13 Formability distribution(fourth-step)

Fig. 13 은 파단이 제품의 모서리 부위에서 발생하는 것을 볼 수 있으며, Die Face변경 및 Bead 수정 후 3차 해석결과 보다 안전성을 가졌다.

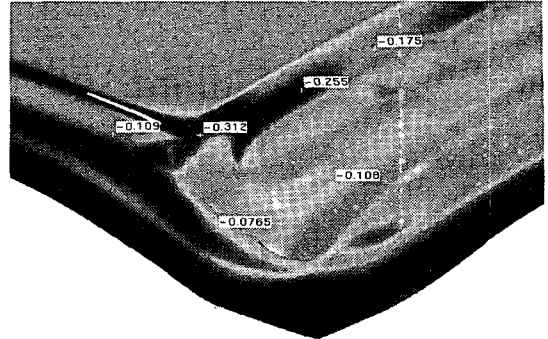


Fig. 14 The thickness reduction rate distribution (fourth-step)

Fig. 14 에서 파단은 각 코너부위에서 나타나고 있으며, 1차에서 3까지의 해석결과보다 파단이 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 소재유입을 증가 시킬 경우 제품품질은 저하된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 대형 차체판넬 스탬핑 공정을 성형해석 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

파단 해소를 위해 소재 유입을 늘이면 제품의 주름경향은 더욱 강해졌으며, Die Face 변경 및 Bead 를 축소시킨 결과 Binding과정에서의 주름이 완화되었다. 또한 사각Bead의 적용과 높이를 수정한 결과, 파단이 각 코너에서 현저히 떨어짐을 알 수 있었고 FRT CTR부 15mm와 SIDE CTR부 10mm를 Down 사킨 Die Face에서는 주름이 많이 제거되었지만 파단은 이와 반대로 많이 발생하였다.

종합적으로 성형해석결과를 볼 때 파단 해소를 위한 소재 유입을 늘이면 제품의 주름경향은 더욱 강해지므로 파단 감소를 위한 소재유입량을 늘리는 것은 바람직하지 못하며 주름해소를 위해서는 제품 R의 변경이나 Over Draw의 적용 외에는 현재 대안을 찾을 수 없다는 것을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Jun, S. K., Jung, D. W., "On the parallel implementation of a static/explicit FEM program for sheet metal forming," Proc. of kspe, Korean Society of Precision Engineering, pp.625-628, 1997.
2. Kim, J. P., Keum, Y. T., Lee, J. M., "A study on the FEM/GEM for sectional analysis of deep drawing panels," Proc. of kspe, Korean Society of Precision Engineering, pp.212-217, 1994.
3. 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. Materials Processing Technology, Vol. 50, pp. 39-53, 1995.
4. 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.
5. Lee, J. S., "Virtual experimental technology," Chunbuk national university, construction technology institution, pp.4-5, 1999.
6. Shim, H. B., 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.
7. Wang, N. M., Tang, S. C., "Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations," Int. J. for Num. Mech. in Engng., Vol.25, pp.253-367, 1988.
8. Mattiason, K., "Numerical Simulation of Stretching Processes," SIMO P-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, pp.170-213, 1985.