

# PANEL DASH LHD 차체판넬 스탬핑공정 해석에 관한 연구

정 동 원\* · 황 재 신\*\*

## A Study on Analysis of PANEL DASH LHD Auto-Body Panel Stamping Processes

Dong-Won Jung\* · Jae-Sin Hwang\*\*

### ABSTRACT

The static implicit finite element method and the dynamic explicit finite element method are applied effectively to analyze total auto-body panel stamping processes, which include the forming stage. Analyzed complicated and abnormal Large size auto-body panel using common use program called AutoForm. Analysis results examining possibility and validity of spot application that is useful of finite element law refer. In this work, brief descriptions of the formulation and the factor study are presented. Further, the simulated results for the total auto-body 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

### 1. 서 론

박판성형 공정은 가공 중에 소재의 손실이 적고 가공시간이 짧아 낮은 가격으로 대량생산이 가능하며, 무게에 비해 강도가 높고 표면특성이 우수한 장점이 있으므로 자동차산업, 항공산업, 전자부품산업과 주방

용품산업 등에서 중요한 제조공정 중의 하나이며 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 윤활상태, 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

\* 제주대학교 기계·에너지·생산공학부  
Faculty of Mechanical, Energy and Production Eng., Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 대학원  
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

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 유한요소해석방법, 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 쓰여지는 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.[3] 적응자동요소 생성 기술은 판재성형 같이 넓고 부분적으로 작은 홈이나 필렛반경이 존재하는 문제에 있어서, 적응자동요소 생성 기술이 없는 경우에는 처음부터 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 스텝핑공정을 복잡하고 어려운 대형 차체판넬을 유한요소해석 하였으며 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

## II. 본 론

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 나타내고,  $G^{\alpha\beta}$ 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.

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

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

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

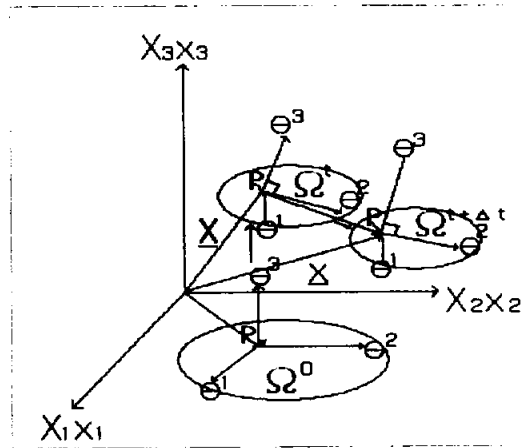


Fig. 1. Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터  $u$ 는

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

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)  $\epsilon$ 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 콤팩트는 변형되지 않은 행렬에 관하여 공변 미분(covariant differentiation)을 나타낸다. 라그랑지언 응력텐서를 선형부와 비선형부로 나누면, 아래의 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

대 변형(large deformation)을 고려한 개정 라그랑지언 방정식(Updated Lagrangian equation)은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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  $L^{\alpha\beta\gamma\rho}$ 은 기존의 논문[5,6]에 잘 언급되어 있다. 위의 (8)과 (9)식

을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

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

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. 변위중분(displacement increment)들의 근사값은 (10)식을 사용하여 계산되고  $t_0 + \Delta t$ 시간에 상응하는 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  $\tau$ 는 Cauchy 응력텐서  $\sigma$ 와 같다고 놓을 수 있다.

### III. 성형결과 해석

Autoform 유한요소해석 프로그램을 사용하여 성형품의 각 단면들을 Incremental로 해석하였다. 해석에 사용된 재료는 다음과 같다.



MODEL : PANEL DASH LHD  
 Material : RCNCD S/20(MS121-20)  
 Thickness Stroke : 1t  
 Cushion : 150mm  
 Cushion Pressure : 80 ton  
 Blank Size : 1700mm X 920mm  
 Draw Bead : General Round Bead NB

Fig. 2. The first input condition

해석범위에서 성형해석을 STROKE별로 초기 BINDING, 하사점 50mm전, 하사점 25mm전, 하사점 5mm전으로 4차로 성형해석하였다.

4차별로 성형결과를 통해 두께축소율과 주름경향을 통해 Binding시 발생한 굴곡은 성형완료시까지 남아 제품내부에 심각한 주름을 발생시키고 FORM'G 형상부 높이조정이 불가피하다는 점을 알 수 있었다. 그리고 제품내부에 국부적인 Crack 부위가 다수 나타나고 있으며 R값 조정 및 가형상 조정이 필요하다. 터널부 주름은 반드시 BEAD 형상추가로서 해결이 가능하다고 생각되며 현재 설계된 Blank Size은 작으며 최소 30mm 이상 늘릴 필요가 있다는 결론을 내렸다.



Fig. 3. Early Binding result

Fig. 3. 볼 때 현재의 Die Face 조건 하에서는 Binding시 많은 주름이 발생하고 있으며, 이 주름이 성형 완료시 까지 계속 남아서 중앙부위로 몰린다는 것을 알 수 있다.



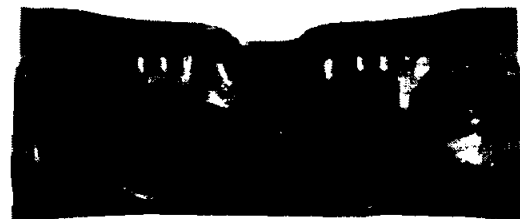
Early binding



Before lower post point 50mm



Before lower post point 25mm



Before lower post point 5mm

Fig. 4. The first stroke different correction of deformities process

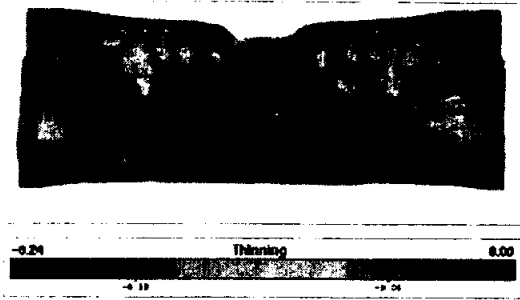


Fig. 5. The first correction of deformities analysis result (the thickness reduction rate)



적색구간은 두께축소율이 20%를 넘는 구간으로 Crack 발생지역이며 전반적으로 국부적인 Crack 발생이 많다는 것을 알 수 있다. 제품 내에 심각한 Crack이 발생하고 있으며(원형부위) 하사점 약 25mm 전에 발생한다는 것을 알 수 있다.

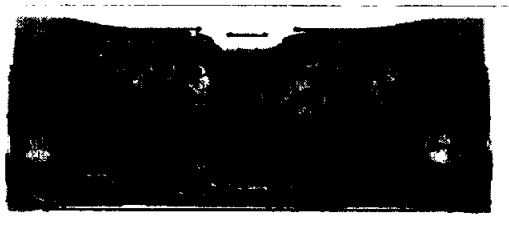
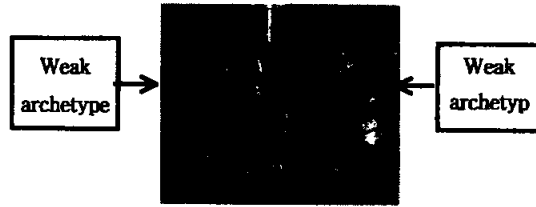


Fig. 6. The first correction of deformities result (wrinkles tendency)

Binding시 나타났던 주름이 성형완료 후에도 계속해서 제품내부에 남아 있으며(청색 및 보라색 부위), 소재크기가 작아 하단부의 경우 과다유입이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.



Material : RCNCD S /20(MS121-20)  
 Thickness : 1t  
 Cushion Stroke : 150mm  
 Cushion Pressure : 80 ton  
 Blank Size : 1700mm X 950mm  
 Draw Bead : Round Bead that General Round Bead, right and left outer wall is weak

Fig. 7. The second input condition

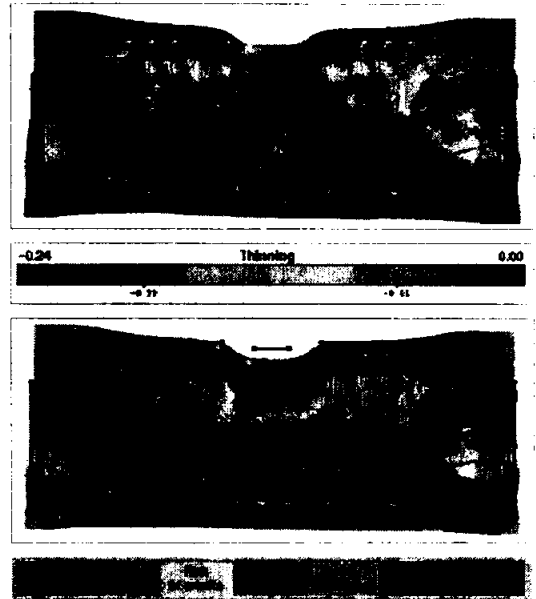


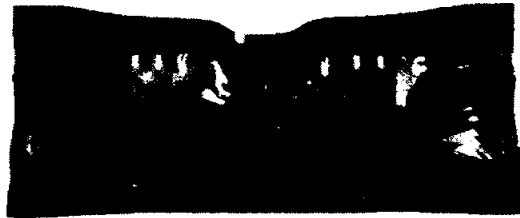
Fig. 8. The second correction of deformities result

소재를 30mm 늘려 성형한 결과 제품내부의 주름경향은 조금 완화 되었으나 여전히 제품 중앙부에 주름이 남아 있으며 제품 내부의 Crack경향은 1차 때와 거의 동일하다.



Material : RCNCD S /20(MS121-20)  
 Thickness : 1t  
 Cushion Stroke : 150 mm  
 Cushion Pressure : 70 ton  
 Blank Size : 1700mm X 980mm  
 Draw Bead : On the whole weak Round Bead

Fig. 9. The third input condition



Before lower post point 5mm

Fig. 10. The third stroke different correction of deformities process

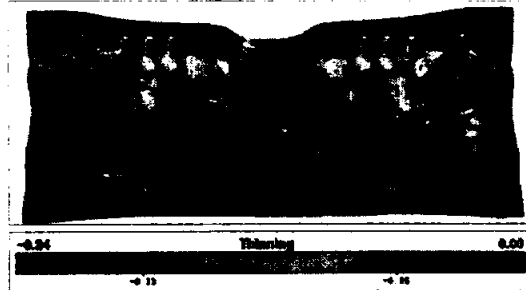
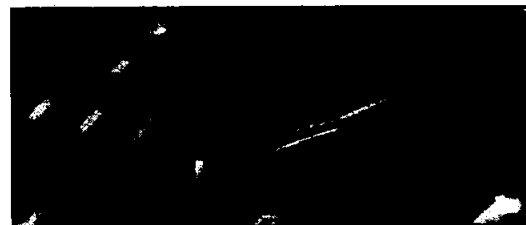


Fig. 11. The third correction of deformities analysis result(the thickness reduction rate)



Early binding

Before lower post point 50mm



전체적으로 Bead Force를 줄여 소재유입을 늘려서 Crack발생을 줄여 보고자 하였지만 여전히 심한 Crack이 발생하고 있으며(하사점 15mm전) 제품 R 및 성형깊이 변경등의 설계변경이 필요하다.



Before lower post point 25mm



Fig. 12. The third correction of deformities result (wrinkles tendency)

소재의 유입이 많아지면서 제품의 주름경향은 더욱 강해진다. 따라서 Crack 감소를 위한 소재 유입량을 늘리는 것은 바람직하지 못하다.

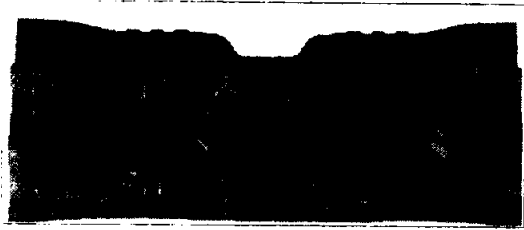
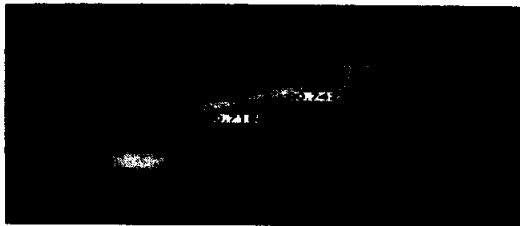
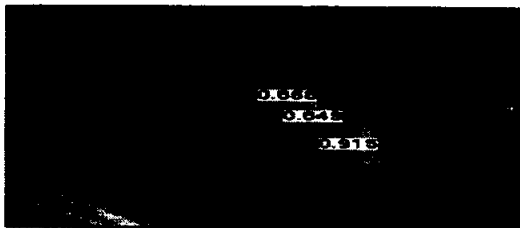


Fig. 13. The 4th correction of deformities analysis result (the thickness reduction rate 1)

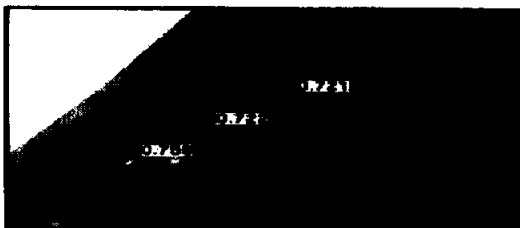
**A wealth details**



**B wealth details**



**C wealth details**



A, B부 Crack이 발생하였지만 1, 2, 3차 때의 Crack보다 양호함을 알 수 있다. 이에 대한 대책으로 A, B부 형상 높이 약 5~10mm Down한다면 해소될 것으로 판단되며 C부 제품 R 및 가형상 깊이 조정 등의 변경이 필요하다.

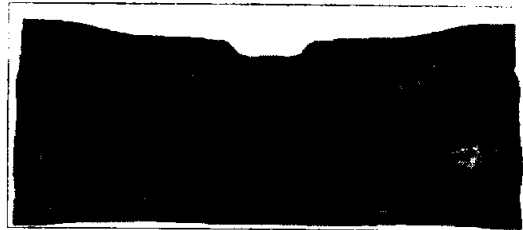
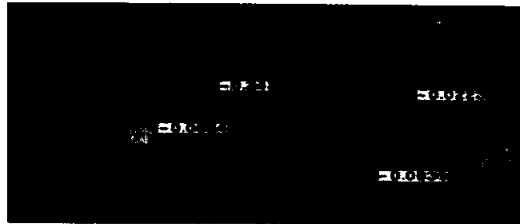
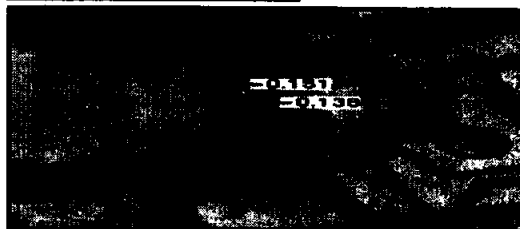


Fig. 14. The 4th correction of deformities analysis result (the thickness reduction rate 2)

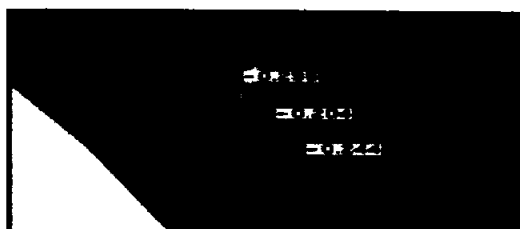
**A wealth details**



**B wealth details**



**C wealth details**



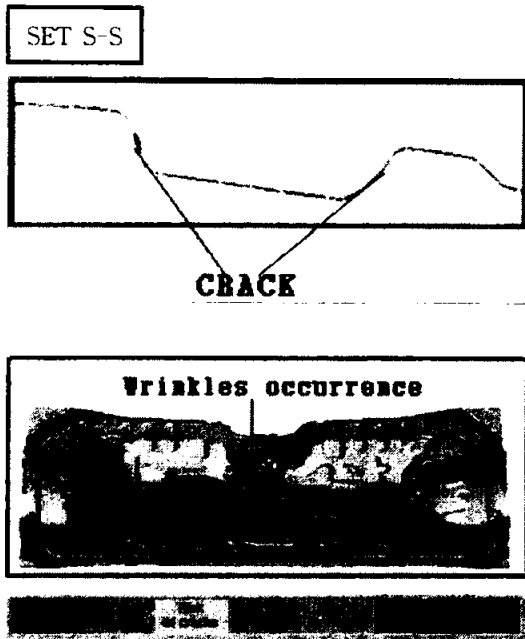


Fig. 15. The 4th correction of deformities analysis result(wrinkles tendency)

#### IV. 결 론

본 연구에서는 프레스금형 성형해석 상용프로그램인 Autoform을 사용하여 대형 차체판넬 스템핑공정을 해석하고 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

PANEL DASH LHD 차체판넬을 성형해석한 결과 Crack 해소를 위한 소재 유입을 늘이면 제품의 주름 경향은 더욱 강해지므로 Crack 감소를 위한 소재유입량은 늘리는 것은 바람직하지 못하다는 점과 주름 해소를 위해서는 중앙터널부 Bead가 추가해야 한다는 점을 예측할 수 있었다.

유한요소방법은 기하학적인 형상, 하중 및 경계조건 등에 제한이 없으며 여러 가지 복합재료로 이루어진 연속체에도 적용이 가능하고 물성치 및 거동의 비선형도 적용 가능하며 응력해석, 좌굴, 진동, 열, 유동해석 등 공학의 모든 분야에서 활용이 가능하다는 점을 볼 때 대형 차체판넬 해석이나 금형설계에서 정확하고 효율적인 다양한 결과를 제공할 것으로 보여진다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 제주대학교발전기금 청봉학술연구기금의 지원에 의해서 연구되었음.

#### 참고문헌

1. Yang, D. Y., Jung, D. W., Song, I. S., Yoo, D. J. and Lee, J. H., 1995, Comparative investigation into implicit, explicit and iterative implicit/explicit schemes for the simulation of sheet-metal forming processes, *J. Materials Processing Technology*, vol.50, pp.39-53
2. Jung, D. W., Yoo, D. J. and Yang, D. Y., 1995, A dynamic explicit/rigid-plastic finite element formulation and its application to sheet metal forming processes, *Engineering Computations*, vol.12, pp.707-722
3. 이재석, 1999, 가상실험기술, 충북대학교 건설기술연구소, pp.4-5
4. Shim, H. B. and Yang, D. Y., 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
5. Wang, N. M. and Tang, S. C., 1988, Analysis of Bending Effects in Sheet Forming Operations, *Int. J. for Num. Mech. in Engng.*, vol.25, pp. 253-367
6. Mattiason, K., 1985, Numerical Simulation of Stretching Processes, SIMO P-I, Editor Lange. K., *Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart*, pp.170-213