

# One-step Forming 방법을 이용한 차체 판넬 성형해석에 관한 연구

정동원#, 황재신\*

## A Study of auto-body panel correction of forming analysis that use One-step Forming method

Dong Won Jung#, Jae Sin Hwang\*

### ABSTRACT

Thin plate correction of forming process that it is nowadays smile change of simple contact surface as it becomes possible that forecast dictionary numerically exactly to analyze comparative big comp displacement real industry spot problems between complicated and abnormal curved line shapes and thin plate and die more reliable and need many efforts yet economical analysis method is required and develops this efficient algorithm. This research analyzes correction of forming and examined possibility and validity of spot application using One-Step Finite Element Method. Its application is being increased especially in the automotive industrial area for the cost reduction, weight saving, and improvement of strength.

**Key Words** : Economical analysis method(경제적인 해석 방법), One-Step Finite Element Method(원-스텝 유한요소법)

### 1. 서론

오늘날에는 단순한 접촉면의 미소 변화가 있는 박판 성형 공정을 수치적으로 정확하게 사전 예측하는 것이 가능해졌다. 복잡하고 불규칙적인 곡선 형상들과 박판과 다이 사이의 비교적 큰 상대적인 변위가 실질적인 산업현장 문제들을 해석하기 위하여 보다 신뢰성 있고 경제적인 해석방법이 요구되고 있다. 이런 효율적인 알고리즘을 개발하기 위해

선 아직도 많은 노력이 필요하다.<sup>1-2</sup>

박판 금속성형과정을 해석함에 있어 외연적 동적 알고리즘은 종래의 내연적 정적 알고리즘에 비해서 몇 가지 중요한 이점들을 갖고 있다. 첫째, Newton-Raphson법과 같은 비선형 해석법이 필요 없다. 따라서 해의 계산시간은 문제의 크기에 따라 2차형적으로 증가하지 않고 외연적 동적 해석과정에서는 문제 크기에 따라 선형적으로 증가한다. 둘째, 대변형, 미끄러짐, 3차원 접촉 구속들은 외연적 방법에서 처리하는 것이 상대적으로 쉽다. 운동학

접수일: 2004년 3월 12일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

# 교신저자: 제주대학교 기계공학과

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

\* 제주대학교 기계공학과 대학원

적인 접촉 구속은 시행착오법과 같이 직접 외연적으로 처리되어질 수 있는 것이다.

이 같은 장점에도 불구하고 외연적 동적 방법의 가장 큰 단점은 정적문제에 동적 방법을 적용함에 따른 해의 정적 불안정을 일으킬 수 있다는 것이다.

구성 방정식의 형식에 따른 강소성 유한요소법과 탄소성 유한요소법의 두 가지 접근방식이 박판 금속의 대변형 현상을 해석하는데 쓰여졌다. 강소성 유한요소법에서 탄성 변형율은 무시되며, 계산과정동안 항복조건(yield condition)을 검사하지 않아도 되는데 이에 따라 계산시간을 크게 줄일 수가 있다. 이러한 장점들 때문에 강소성 유한요소법이 몇 가지 수치적인 결점들이 있음에도 불구하고 금속성형공정을 해석하는데 있어 유용하게 쓰이고 있다. 박판 금속성형에서 비록 탄성적으로 복구되는 변형율이 작더라도 그 변위량은 상대적으로 크다. 그 이유는 박판금속 두께의 크기가 다른 크기와 비교하여 훨씬 작기 때문이다. 효율에 영향을 미치는 재료 모델과 수치적 안정성은 해석 알고리즘의 중요한 부분을 차지한다. 강소성과 탄소성 모델들 모두 금속성형 응용에 활용되고 있다. 금속 성형에서 탄소성 관계를 처음으로 적용한 것은 Lee and Kobayashi<sup>3</sup>와 Wang and Budiansky<sup>4</sup>이 쓴 논문에서 찾을 수 있다. 탄소성 모델은 그 계산의 복잡성으로 인하여 강소성 모델보다 계산 시간적 측면에서 그 효율성이 낮다는 것은 잘 알려진 사실이다.

본 연구에서는 박판이 성형된 후 박판 내부의 응력이 탄성적으로 재편(redistribution)되면서 생겨나는 스프링-백 현상인 만큼 탄성 변형율을 고려하는 탄소성 유한 요소법의 채택이 필수적이다. 유한 요소 형태는 박판의 특징을 잘 반영할 수 있는 셸(shell) 요소가 적당해야하며 시간 적분법으로는 성형공정 해석에는 외연적(explicit) 방법을, 스프링-백 해석에는 내연적(implicit) 방법을 채택하는데, 이렇게 함으로써 계산 효율을 극대화시킬 수 있기 때문이다.<sup>5</sup>

전체 스텝핑공정을 복잡하고 어려운 차체판별과 접합판재에 적용하여 유한요소해석 하였으며 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

## 2. 본론

### 2.1 탄소성 구성방정식

변형된 물체는 Fig. 1과 같이 3차원 공간에서 고려해 볼 수 있다. 단계적 과정으로 비정상상태 변형을 해석하는데 있어, 시간  $t_0$ 에서  $t_0 + \Delta t$ 까지 1스텝 동안의 변형을 고려하자. Fig. 1에서  $\theta^1$ 과  $\theta^2$  축을 박판표면의 절점 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.

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

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

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

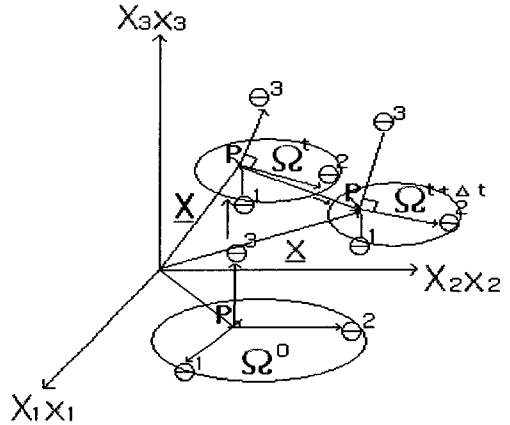


Fig. 1 Polar coordinates system of transformation process

변형전의 형상에서 변위벡터  $u$ 는

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

여기에서  $u = G^{\alpha\beta}u_{\beta}$ 이다. 그리스 문자들은 질점좌표계를, 라틴 문자들은 직교 카티션 좌표계 (rectangular Cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점 좌표계에서 라그랑지언 변형을 텐서(Lagrangian strain tensor)  $\epsilon$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_{\alpha\beta}E^{\alpha}E^{\beta} = \epsilon^{\alpha\beta}E_{\alpha}E_{\beta} \quad (5)$$

$$\epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (g_{\alpha\beta} - G_{\alpha\beta}) = \frac{1}{2} (u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha} + u_{,\alpha}^{\gamma}u_{\gamma,\beta}) \quad (6)$$

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

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

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

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

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

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

(8)식의 자세한 유도과정은 Shin과 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 Shin과 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.

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

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 해당하는 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

본 논문에서 제시된 방법을 이용하여 차체 판별 성형 시 발생하는 문제점들을 사진에 예측하여 보았다.

#### 3.1 간단한 시제품 공정해석

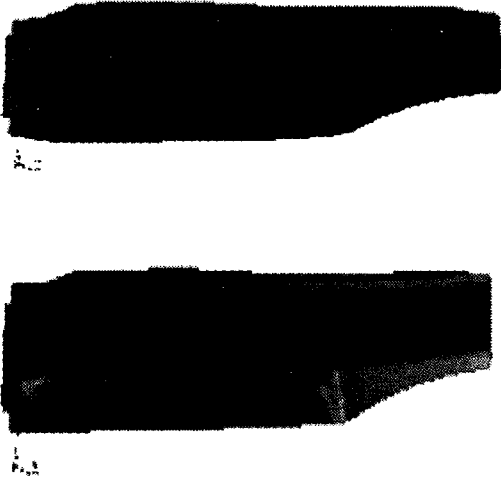


Fig. 2 Deformed shape

Fig. 2과 같이 차원을 2차원 평면으로 줄여서, 한 단계만으로 해석을 하기 때문에 중간 과정이 들어가지 않으므로 그만큼 시간을 줄일 수 있다. 또, 비선형 방정식들을 푸는데 있어 반복 계산이 감소되기 때문에 해석시간을 매우 단축시킬 수 있다. 그리고 One-step 유한요소법은 초기 블랭크의 형상을 예측하기 때문에 펀치 성형공정 후, 가해지는 후가공(trimming)이 수월해지며, 그에 들어가는 비용과 시간을 절약할 수 있다. 또한 수식이 제품형상을 근거로 하기 때문에 제품과 공정설계 이전에 제조가능성과 재료비용을 평가해 볼 수 있다.

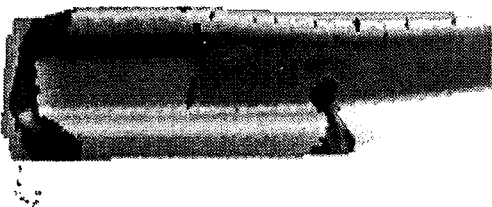


Fig. 3 Formability

반면에 초기형상과 최종형상만을 다루기 때문에 높은 비선형 변형경로가 존재 할 때는 정확성이 많이 감소된다는 점, 그리고 성형과정 중에 일어나

는 주름의 발생과 소멸 같은 중간 과정들이 무시된다는 문제점을 발견 할 수 있었다.

### 3.2 Panel DASH LHD 차체판넬 해석

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

Fig. 4 The first input condition

해석범위에서 성형해석을 스텝별로 초기 바인딩, 하사점 50mm전, 하사점 25mm전, 하사점 5mm전으로 4차로 성형하였다.

4차별로 성형결과를 통해 두께축소율과 주름경향을 통해 바인딩 시 발생한 굴곡은 성형완료시까지 남아 제품내부에 심각한 주름을 발생시키고 form'g 형상부 높이조정이 불가피하다는 점을 알 수 있다. 그리고 제품내부에 국부적인 크랙부위가 다수 나타나고 있으며 R값 조정 및 가형상 조정이 필요하다. 터널부 주름은 반드시 비드형상추가로서 해결이 가능 하다고 생각되며 현재 설계된 블랭크 사이즈는 작으며 최소 30mm 이상 늘릴 필요가 있다는 결론을 내렸다.

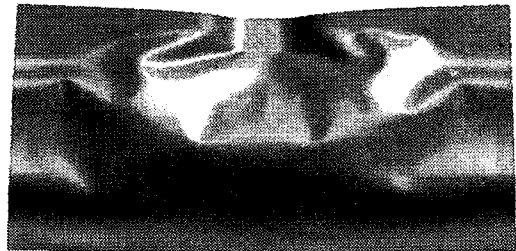
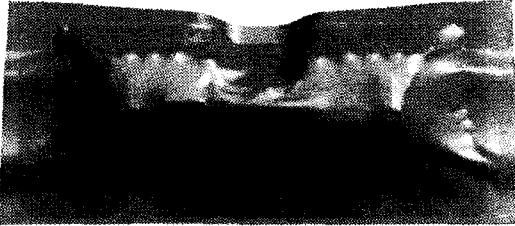


Fig. 5 Early binding result

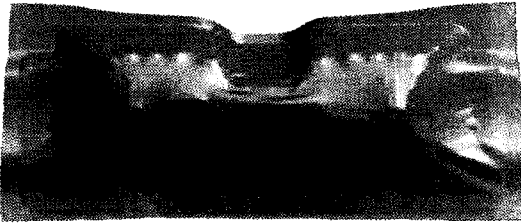
현재의 다이페이스조건 하에서는 바인딩 시 많은 주름이 발생하고 있으며, 이 주름이 성형 완료시 까지 계속 남아서 중앙부위로 몰린다는 것을 알 수 있다.



(a)Early binding



(b)Before lower post point 50mm



(c)Before lower post point 25mm



(d)Before lower post point 5mm

Fig. 6 The first stroke different correction of forming process



0.24 Thinning 0.00

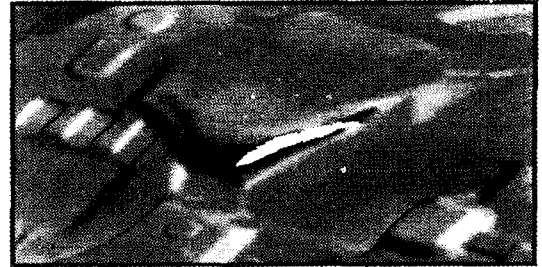


Fig. 7 The first correction of forming analysis result(Thickness reduction rate)

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

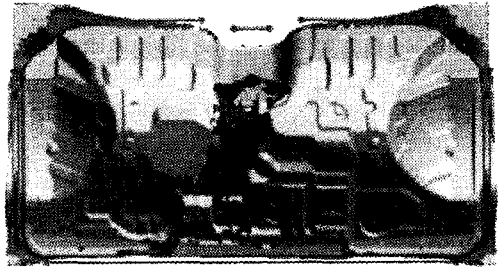
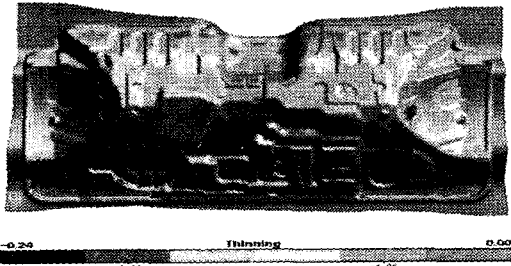


Fig. 8 The first correction of forming result(Wrinkles tendency)

바인딩 시 나타났던 주름이 성형완료 후에도 계속해서 제품내부에 남아 있으며(중앙의 진한부분 및 약간진한부분), 소재크기가 작아 하단부의 경우 과다유입이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

Material : RCNCD S /20(MS121-20)
Thickness : 1t
Cushion Stroke : 150mm
Cushion 압력 : 80 ton
Blank Size : 1700mm X 950mm
Draw Bead : 일반 Round Bead 좌우측 외곽은 약한 Round Bead

Fig. 9 The second input condition



(a) Thickness reduction rate



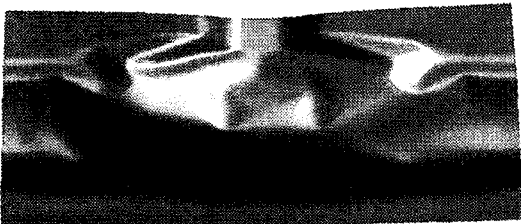
(b) Wrinkles tendency

Fig. 10 The second correction of forming result

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

Material : RCNCD S /20(MS121-20)  
 Thickness : 1t  
 Cushion Stroke : 150 mm  
 Cushion 압력 : 70 ton  
 Blank Size : 1700mm X 980mm  
 Draw Bead : 전체적으로 약한 Round Bead

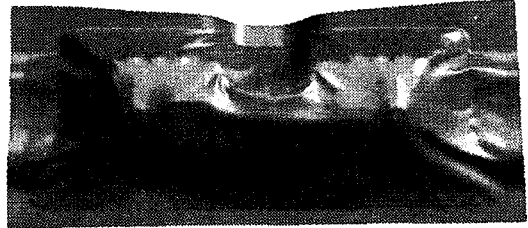
Fig. 11 The third input condition



(a) Early binding



(b) Before lower post point 50mm



(c) Before lower post point 25mm



(d) Before lower post point 5mm

Fig. 12 The third stroke different correction of forming process

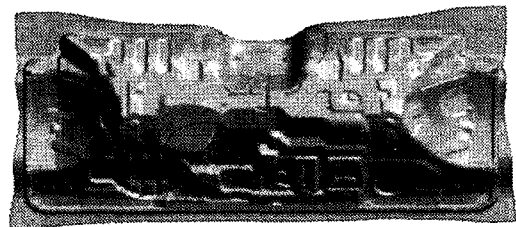


Fig. 13 The third correction of forming analysis result(Thickness reduction rate)

전체적으로 비드 힘을 줄여 소재유입을 늘려서 파단발생을 줄여 보고자 하였지만 여전히 심한 파단이 발생하고 있으며(하사점 15mm전) 제품 R 및 성형깊이 변경 등의 설계변경이 필요하다.

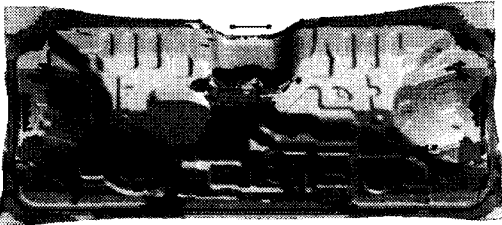
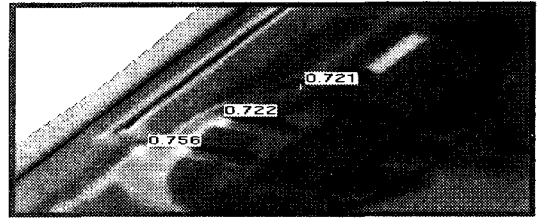
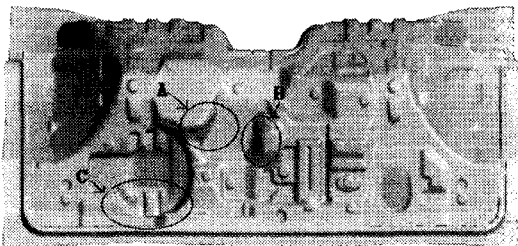


Fig. 14 The third correction of forming result (Wrinkles tendency)

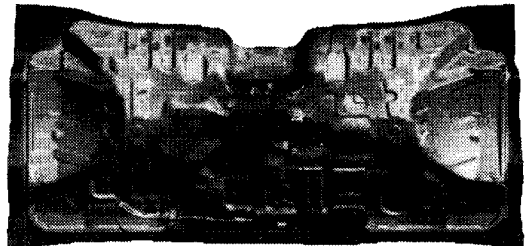
소재의 유입이 많아지면서 제품의 주름경향은 더욱 강해진다. 따라서 파단감소를 위한 소재 유입량을 늘리는 것은 바람직하지 못하다.



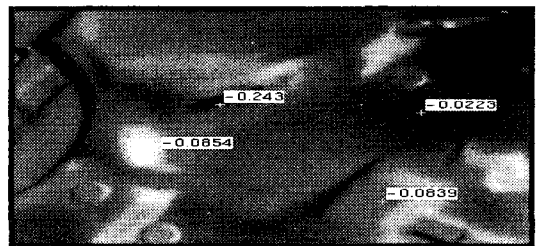
(c)C wealth detail

Fig. 15 The 4th correction of forming analysis result(Thickness reduction rate | )

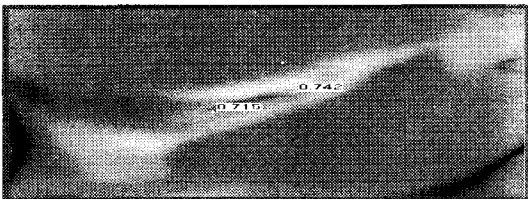
A, B부 파단이 발생하였지만 1, 2, 3차 때의 파단보다 양호함을 알 수 있다. 이에 대한 대책으로 A, B부 형상 높이가 약 5~10mm 내린다면 해소될 것으로 판단되며 C부 제품 R 및 가형상 깊이가 조정 등의 변경이 필요하다.



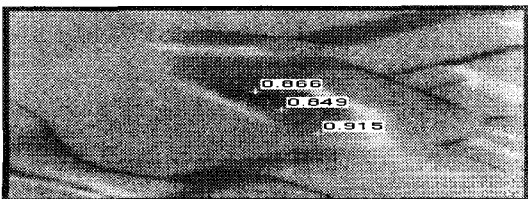
(a)A wealth detail



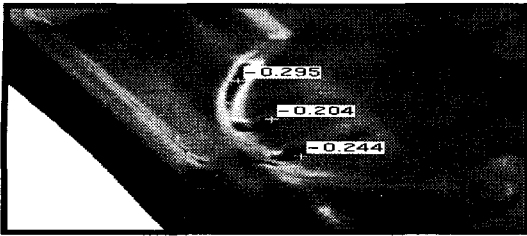
(b)B wealth detail



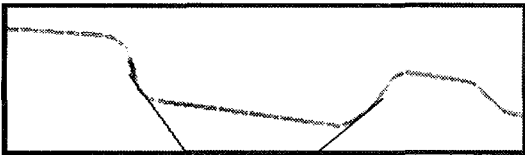
(a)A wealth detail



(b)B wealth detail



(c)C wealth detail



**CRACK**

(d)SET S-S

Fig. 16 The 4th correction of forming analysis result(Wrinkles tendency)

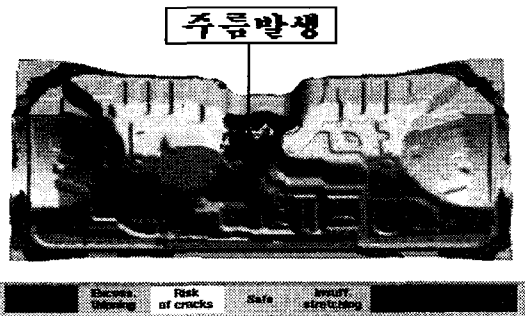


Fig. 17 The 4th correction of forming analysis result(thickness reduction rate II)

파단해소를 위한 소재 유입을 늘이면 제품의 주름경향은 더욱 강해진다. 따라서 파단 감소를 위한 소재유입량은 늘리는 것은 바람직하지 못하다. 주름해소를 위해서는 중앙터널부 비드가 추가해야만 한다.

#### 4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 One-step 유한요소방법을 이용하여 간단한 시제품과 대형 차체판넬을 성형 해석하여 사전에 결함을 제안하였으며 다음은 그에 대한 결론 및 고찰을 얻었다.

1. 파단방지를 위하여 단순히 소재 유입만 늘리면 제품 형상부분에서 주름이 발생하는 또 다른 문제를 야기 할 수 있으므로 파단이 심하게 발생할 경우에는 제품 형상을 맞추거나 비드 등의 폼을 추가하거나 가형상 길이조정 등의 방법을 성형해석방법을 이용하여 적절히 시도해 볼 수 있다.

2. 복잡한 스템핑 과정에서는 전체판넬 중에 비교적 많은 부분들이 소성적으로 변형되지 않기 때문에 복잡한 알고리즘과 긴 계산시간에도 불구하고 보다 정밀한 해석과 탄성복원 해석을 위하여 탄성효과를 포함한 탄소성 수식화로 해석하였다.

3. 내연적 및 외연적 해석인 경우 해석결과의 정확성에도 불구하고 과도한 계산시간과 수렴성 등의 문제로 대형 3차원 문제에는 적용하기가 쉽지 않으나 One-step forming 해석인 경우는 수렴성을 극복할 수 있고 대형 3차원 문제에도 계산시간이 그다지 길지 않아 실제 대형 차체 판넬 스템핑 공정 해석에 적절히 적용 가능하다.

4. One-step forming 유한요소 해석방법은 정밀도 면에서 한계가 있으나 매우 복잡하고 불규칙적인 다이 형상들의 스템핑 공정해석에도 잘 적용되어 효율적이며 다양한 결과들을 제공할 수 있다.

#### 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 processes," J. Materials Processing Technology, Vol. 50, pp.39-53, 1995.
2. Jung, D. W., Yang, D. Y., "Step-wise combined implicit/explicit finite element simulation of autobody stamping processes," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 13, No.12, pp.86-98, 1996.
3. Lee, C. H. and Kobayashi, S., "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol.95. pp 865-873, 1973.



4. Yoon, J. W., Kim, J. B. and Chung, K. , " Elastic-Plastic Implicit Finite Element Method Considering Planar Anisotropy for Complicated Sheet Metal Forming Processes, " J. KSTP, 1997.
5. 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.
6. 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.
7. Mattiason, K., "Numerical Simulation of Stretching Processes," SIMOP-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart, 170-213, 1985.
8. Wang, N.M. and Budiansky, B., "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method," Journal of Applied Mechanics, Vol. 45, pp.73-82, March 1978.