

< 기술논문 >

차체 판넬 스탬핑 공정에서 One-step Form 해석방법을 이용한 금형개발에 관한 연구

정 동 원[†] · 황 재 신^{*}

(2004년 5월 14일 접수, 2004년 11월 25일 심사완료)

A Study of Developing Stamping Die by Using One-Step Form Method in Auto-Body Panel Stamping Process

Dong Won Jung and Jae Sin Hwang

Key Words: Finite Element Method(유한요소법), Auto-Body Panel Stamping(차체판넬 스탬핑), AUTOFORM(오토포), Die Design(금형설계)

Abstract

Finite element method is a very effective method to simulate the forming processes with good prediction of the deformation behaviour. For the finite element modeling of sheet metal forming the accurate die model is required. Among finite element method, the static-implicit finite element method is applied effectively to analyze real-size auto-body panel stamping processes, which include the forming stage. This study is about analyzing the stamping process problems by using AutoForm commercial software which used static-implicit method. According to this study, the results of simulation will give engineers good information to access the die design of optimization.

기호설명

- θ^1, θ^2 축 : 절점 좌표계(convected coordinates)
- θ^3 : 법선벡터
- $G_{\alpha\beta}, g_{\alpha\beta}$: 행렬텐서
- $G^{\alpha\beta}, g^{\alpha\beta}$: 역행렬
- e_α, e^α : 기본벡터와 그 역벡터
- ϵ : 라그랑지안 변형률 텐서(Lagrangian strain tensor)
- $L^{\alpha\beta\gamma\rho}$: 구성텐서성분

1. 서론

오늘날 박판 성형 공정해석에 컴퓨터를 이용한 해석 프로그램을 사용하는 것은 그리 낯설은 일은 아니다. 1970년대 이후로, 컴퓨터의 성능과 수치해석적인 기법들이 빠르게 발전되기 시작하면서 컴퓨터를 이용한 많은 해석 프로그램들이 개발되었고, 직접적으로 산업에 이용되기 시작하였다. 이러한 응용 프로그램들은 제품의 질 향상과 원가절감 그리고 새로운 제품의 빠른 도입을 가능케 하였다. 하지만 아무리 성형공정을 예측한다 하지만, 박판 공정은 복잡한 비선형 문제이기 때문에, 공정을 완전히 예측하기에는 무리가 있었다. 전통적인 증분 유한요소해석(Incremental FEA)이 잠재적인 성형문제들을 확인하는데 도움이 되긴 했지만, 이것 역시 계산시간이 오래 걸린다는 단점 때문에 짧은 기간을 갖는 설계공정에 적용하기에는 적합하지 못했다.⁽¹⁻⁵⁾ 이와 같은

[†] 책임저자, 회원, 제주대학교 기계공학과
E-mail : jdwcheju@cheju.ac.kr
TEL : (064)754-3625 FAX : (064)754-3886
^{*} 제주대학교 대학원 기계공학과

문제점을 개선하고자 개발되기 시작한 것이 소성 (Plasticity) 변형이론을 사용한 One-step 유한요소 해석(One-step FEA)이다.

One-step 유한요소해석이란, 초기 평판 블랭크에서 최종 형상까지 어떠한 중간 과정을 고려하지 않고 직접 변형된다고 가정하여 처리한 것이다. 즉, 중간 과정을 무시했기 때문에 정확한 예측을 한다는 점에서는 다소 어려운 점이 있지만 일반적으로 사용되고 있는 증분형 유한요소 프로그램과는 달리, One-step 유한요소법은 제품 설계 단계에서 필요로 하는 정보를 얻기 위해 사용되고 있다. One-step 유한요소법에 대한 연구로는 초기에 E. Chu,⁽⁶⁾ S. A. Majlessi⁽⁷⁾ 등이 형상 사상 기술을 이용하여 선대칭 딥드로잉 과정을 해석하기 위해 이 방법을 이용하였다. 그리고 최근에는 J. L. Batoz,⁽⁸⁾ S. D. Liu,⁽⁹⁻¹⁰⁾ K. Chung⁽¹¹⁾ 등에 의해서 여러 가지 성형조건을 고려할 수 있고, 비선형 변형에너지, 즉 굽힘-퍼짐과 드로우비드를 반영할 수 있는 좀 더 일반적인 One-step 접근이 제시되었으며 이들의 연구결과들은 현재 산업 현장에서 조금씩 응용되어 지고 있다.

본 연구에서는 복잡하고 어려운 대형 차체 판넬의 개발에 효율성이 높고 사용이 쉬운 One-step Form방법을 적용하여 현장적용의 가능성과 타당성을 검토하여 보았다.

2. 본 론

2.1 탄소성 구성방정식

변형된 물체는 Fig. 1과 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 절점 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 \bar{e}_α 와 그 역인 \bar{e}^α 로 표시하였다.

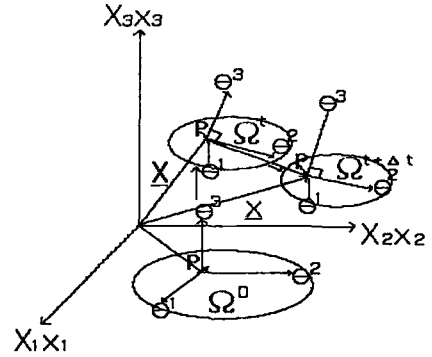


Fig. 1 Polar coordinates system of transformation process

$$\bar{E}_\alpha = \frac{\partial X}{\partial \theta^\alpha}, \quad \bar{e}_\alpha = \frac{\partial x}{\partial \theta^\alpha} \quad (1)$$

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

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

변형전의 형상에서 변위벡터 \bar{u} 는

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

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

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

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

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

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

식 (8)의 자세한 유도과정은 Shin과 Yang⁽¹²⁾의 논문 부록에 수록되어 있다. 또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 라그랑지언 변형율과의 관계식으로 주어졌다면,

$$\Delta S^{\alpha\beta} = I^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{\gamma\rho} \tag{9}$$

식 (9)에 관한 자세한 수식화도 Shin과 Yang⁽¹²⁾의 논문 부록에 수록되어 있고, Hill의 이방성 항복함수(anisotropic yield function)를 만족하는 정상 상태이고 일관성을 유지하는 구성텐서의 성분 $I^{\alpha\beta\gamma\rho}$ 은 기존의 논문^(13,14)에 잘 언급되어 있다. 위의 식 (8)과 (9)를 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 개정된 라그랑지언 방정식을 얻을 수가 있다.

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

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 식 (10)을 사용하여 계산되고 $t_0 + \Delta t$ 시간에 해당하는 응력성분은 식 (9)를 사용하여 구할 수 있다.

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

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

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 Kirchhoff 응력텐서 $\bar{\tau}$ 는 Cauchy 응력텐서 $\bar{\sigma}$ 와 같다고 놓을 수 있다.

이상상태를 진단하고, 선삭뿐만 아니라 다른 기계가공신포에의 적용가능성에 대한 가능성을 제시하고자 한다.

2.2 유한요소 역해석 수식화

역해석은 최종 형상에서 초기 형상으로 소성변형이 이루어지는 상태에 대한 해석으로, 최종 형상이 되기 위한 초기 형상을 계산한다. 먼저, 수식화에는 변형률식을 단지 좌표의 함수로 쉽게 표현할 수 있는 삼각형 막막 요소를 택한다. Fig. 2에서 초기상태의 삼각형 요소는 G_{2i}, G_{3i} 의 벡터로 표현되며 최종상태의 삼각형 요소는 g_{2i}, g_{3i} 의 벡터로 표현 할 수 있다. 여기서 첨자 2, 3은 삼각형 요소의 변을 의미하며, 첨자 i 는 좌표계의 성분을 나타낸다. 두 쌍의 벡터($G_{2i}, G_{3i}, g_{2i}, g_{3i}$)를 이용하여 변형구배 F 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = g_i \cdot G_i^{-1} = \frac{1}{\det \begin{bmatrix} g_{21} & g_{31} \\ g_{22} & g_{32} \\ g_{23} & g_{33} \end{bmatrix}} \cdot \begin{bmatrix} G_{32} & -G_{31} \\ -G_{22} & G_{21} \end{bmatrix} \tag{13}$$

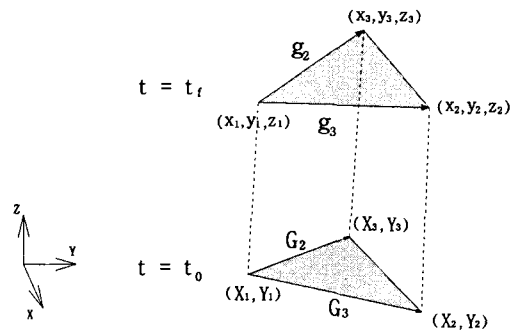


Fig. 2 Kinematics of triangular membrane element between the initial state and final state

Cauchy-Green 텐서 C 을 변형구배 F 에 의해서 식 (14)와 같이 표현한다. 이로부터 주신장량 λ_1 , λ_2 와 식 (15) 대수변형률 ϵ_i 을 식 (16)과 같이 유도한다.

$$[C] = [F]^T \cdot [F] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{(C_{11}+C_{22})}{2} + \left[\frac{(C_{11}-C_{22})}{2}\right]^2 + C_{12}^2} \\ \sqrt{\frac{(C_{11}+C_{22})}{2} - \left[\frac{(C_{11}-C_{22})}{2}\right]^2 + C_{12}^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_1 - C_{11}}{C_{12}}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \{\epsilon_i, (X \text{ or } X)\} &= \begin{bmatrix} \epsilon_{XX} \\ \epsilon_{XY} \\ \epsilon_{YY} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \ln \lambda_1 \cos^2 \theta + \ln \lambda_2 \sin^2 \theta \\ \ln \lambda_1 \sin^2 \theta + \ln \lambda_2 \cos^2 \theta \\ \ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서, Hill의 신헌복 이론을 나타내면, 식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= D_1 \left[\left| \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 \right|^{\frac{M}{M-1}} + \right. \\ &\quad \left. D_2 \left| \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 \right|^{\frac{M}{M-1}} \right]^{\frac{M-1}{M}} \end{aligned} \quad (17)$$

$D_1 = (1 + 2r)^{\frac{1}{M}}$, $D_2 = (1 + 2r)^{-\frac{1}{M-1}}$ 이며, M 은 Hill의 신헌복 이론식에서 항복면을 묘사하는 지수이다. Cauchy-Green 텐서의 주 값은 주 변형률의 양으로 나타낼 수 있기 때문에 $\dot{\epsilon}_1 = \ln \dot{\lambda}_1$, $\dot{\epsilon}_2 = \ln \dot{\lambda}_2$ 로 표현이 가능하다. 따라서 식 (17)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= D_1 \left[\left| \dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \right|^{\frac{M}{M-1}} + \right. \\ &\quad \left. + D_2 \left| \ln\left(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2}\right) \right|^{\frac{M}{M-1}} \right]^{\frac{M-1}{M}} \end{aligned} \quad (18)$$

이때, Chung⁽¹⁵⁾이 제안한 최소일의 경로를 이용하여 유효 변형률을 구하고, 식 (17)을 대입하면,

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} &= \int_0^{t_f} \epsilon dt \\ &= D_1 \left[\left| \dot{\lambda}_1 + \dot{\lambda}_2 \right|^{\frac{M}{M-1}} + \right. \\ &\quad \left. D_2 \left| \ln\left(\frac{\dot{\lambda}_1}{\dot{\lambda}_2}\right) \right|^{\frac{M}{M-1}} \right]^{\frac{M-1}{M}} \end{aligned} \quad (19)$$

과 같다. 여기서 얻은 유효 변형률을 이용하여 유효응력을 정의한다.

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n \quad (20)$$

위의 식들과 같이 정의된 유효변형률과 유효응력을 이용하여 변형된 내부 소성변형일을 계산 할 수 있다. 마지막으로, 구한 소성일의 극값을 취하여 식 (22)과 같이 초기 블랭크의 형상을 찾는다.⁽¹⁶⁾

$$W = \int_{V_0} \bar{\sigma} \cdot \bar{\epsilon} dV_0 \quad (21)$$

$$\frac{dW}{dX_i} = 0 \quad \text{for } i = 1, 2 \quad (22)$$

3. 성형해석결과

본 논문에서 제시된 방법을 이용하여 차체 판넬 성형시 발생하는 문제점들을 사전에 예측하여 보았다.



Fig. 3



Fig. 3

Fig. 3 A simple prototype deformed shape

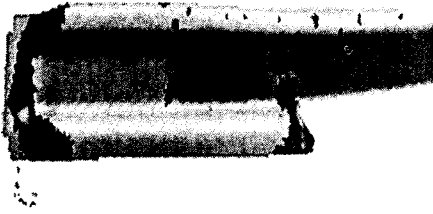


Fig. 4 A simple prototype Formability

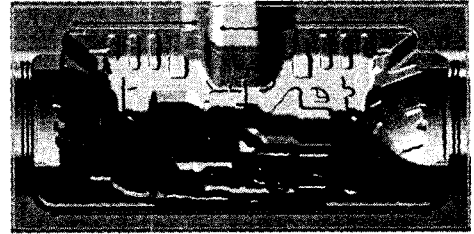
3.1 간단한 시제품 공정해석

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

반면에 Fig. 3, Fig. 4와 같이 초기형상과 최종형상만을 다루기 때문에 높은 비선형 변형경로가 존재 할 때는 정확성이 많이 감소된다는 점, 그리고 성형과정 중에 일어나는 주름의 발생과 소멸 같은 중간 과정들이 무시된다는 문제점들을 발견할 수 있었다.

3.2 PANEL DASH LHD 차체판넬 스템핑공정 해석

첫 번째 입력조건은 Fig. 5와 같으며 해석범위에서 성형해석을 STROKE별로 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 파단부위가 다수 나타나고 있으며 R값 조정 및 가형상 조정이 필요함을 해석결과로부터 예상할 수 있다. 터널부 주름은 반드시 BEAD 형상추가로서 해결이 가능 하다고 생각되며 현재 설계된 Blank Size는 작으며 최소 30mm 이상 늘릴 필요가 있다는 결론을 내렸다.



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. 5 The first input condition

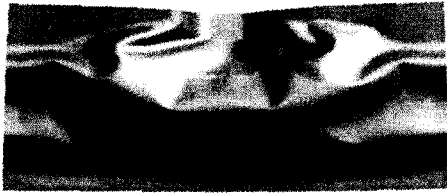


Fig. 6 Early binding result

Fig. 6, Fig. 7과 같이 현재의 다이-페이스조건 하에서는 바인딩 시 많은 주름이 발생하고 있으며, 이 주름이 성형 완료시까지 계속 남아서 중앙부위로 몰린다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8과 같이 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.

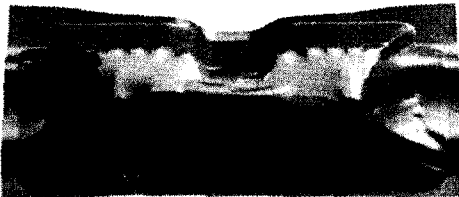
Fig. 9와 같이 바인딩시 나타났던 주름이 성형 완료 후에도 계속해서 제품내부에 남아 있으며 (청색 및 보라색 부위), 소재크기가 작아 하단부의 경우 과다유입이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.



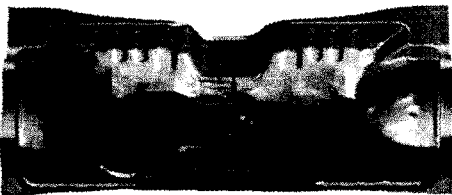
Early binding



Before lower post point 50mm



Before lower post point 25mm



Before lower post point 5mm

Fig. 7 The first stroke different correction of forming process

두 번째 입력조건은 Fig. 10과 같으며 소재를 30mm 늘려 성형한 결과 제품내부의 주름경향은 조금 완화 되었으나 여전히 제품 중앙부에 주름이 남아 있으며 Fig. 11과 같이 제품 내부의 파단 경향은 1차시도 때와 거의 동일하다.

세 번째 입력조건은 Fig. 12와 같으며, Fig. 13, 14의 결과에서 알 수 있듯이 전체적으로 비드력을 줄여 소재유입을 늘려서 파단발생을 줄여 보려고 하였지만 여전히 심한 파단이 발생하고 있으며(하사점 15mm전) 제품 R 및 성형 깊이 변경 등의 설계변경이 필요하다고 해석결과로부터 판단된다.



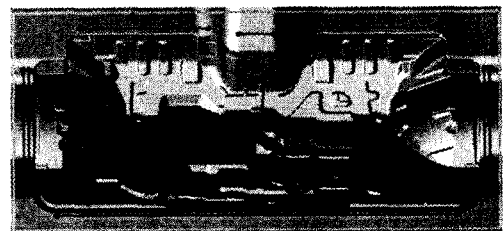
0.00 100.00 Thinning



Fig. 8 The first correction of forming analysis result(thickness reduction rate)



Fig. 9 The first correction of forming result(Wrinkles tendency)



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 Bead으로 변경

Fig. 10 The second input condition

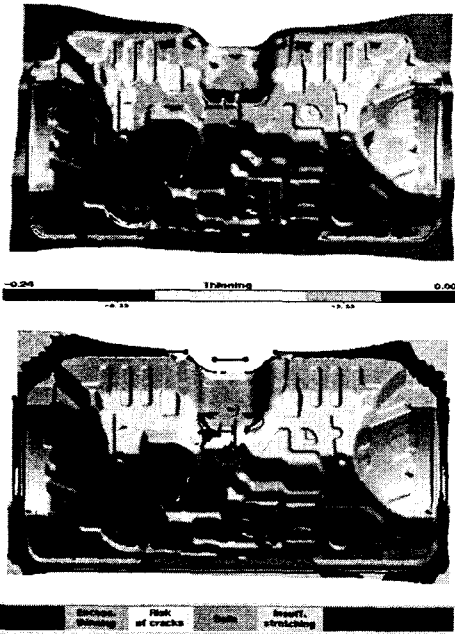


Fig. 11 The second correction of forming result

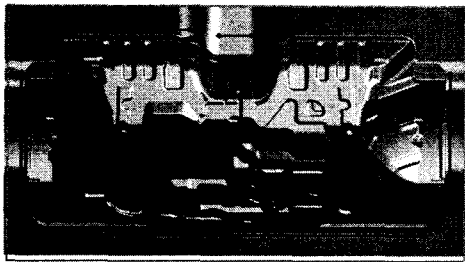


Fig. 12 The third input condition

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. 15와 같이 소재의 유입이 많아지면서 제품의 주름경향은 더욱 강해진다. 따라서 파단 감소를 위한 소재 유입량을 늘리는 것은 바람직하지 못함을 알 수 있다.



Early binding



Before lower post point 50mm

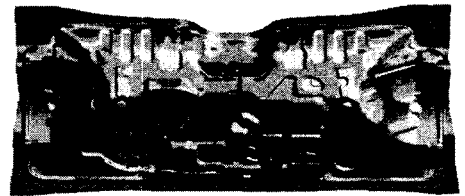


Before lower post point 25mm



Before lower post point 5mm

Fig. 13 The third stroke different correction of forming process



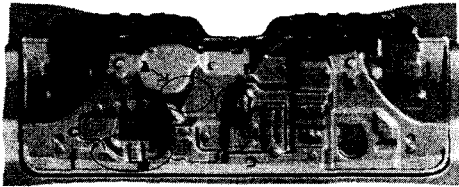
Thinning



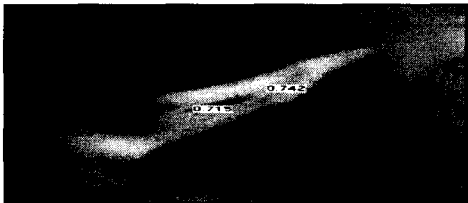
Fig. 14 The third correction of forming analysis result(thickness reduction rate)



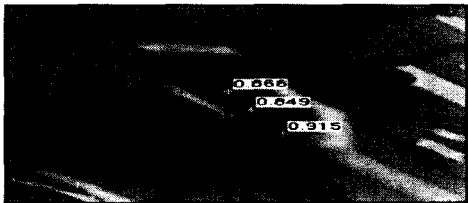
Fig. 15 The third correction of forming result(Wrinkles tendency)



A wealth detail



B wealth detail



C wealth detail

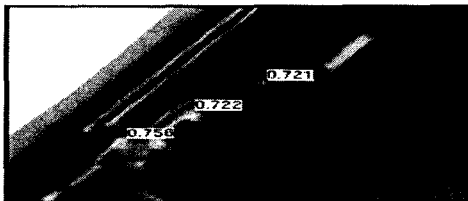
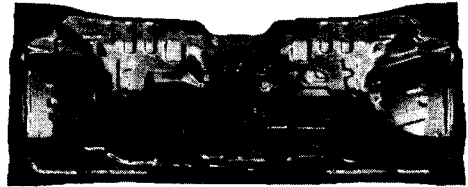
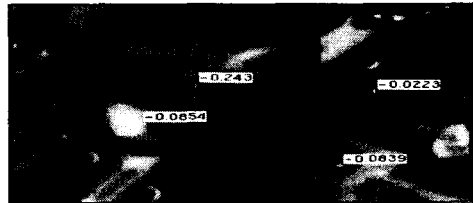


Fig. 16 The 4th correction of forming analysis result(thickness reduction rate I)

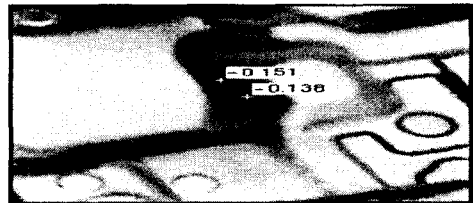
Fig. 16에서와 같이 A, B부 파단이 발생하였지만 1, 2, 3차 때의 파단보다 양호함을 알 수 있다. Fig. 17에서와 같이 이에 대한 대책으로 A, B부 형상 높이의 약 5~10mm를 낮춘다면 해소될 것



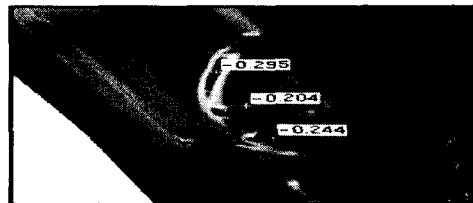
A wealth detail



B wealth detail



C wealth detail



SET S-S



CRACK

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

으로 판단되며 C부 제품 R 및 가형상 깊이 조정 등의 변경이 필요하다.

Fig. 18과 같이 판단해소를 위한 소재 유입을 늘이면 제품의 주름경향은 더욱 강해진다. 따라

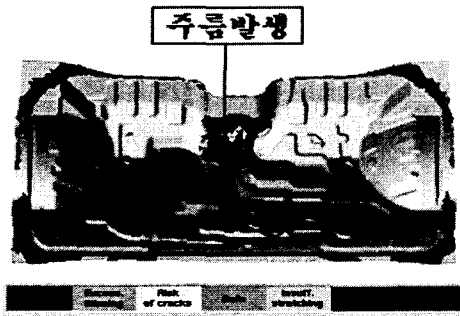


Fig. 18 The 4th correction of forming analysis result(Wrinkles tendency)

서 파단감소를 위한 소재유입량은 늘리는 것은 바람직하지 못하다. 해석결과로부터 주름해소를 위해서는 중앙터널부 비드가 추가되어야만 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

지금까지 재료와 형상, 성형조건에서 비선형성을 다루기 위해 많은 해석기술들이 개발되어 왔고, 아직도 연구가 진행 중에 있다. 그 중에서 One-step 유한요소법은 제품, 공정, 금형 설계와 생산 공정 중에 발생하는 문제점을 예측하기 위한 방법으로 널리 이용되고 있으며, 본 논문에서는 그에 대한 실제 현장에서의 실용성과 가능성에 관해서 예를 들어 설명하였다. 이로부터 다음과 같은 결과들을 확인 할 수 있었다.

(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 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 해석결과와 정확성에도 불구하고 과도한 계산시간과 수렴성 등의 문제로 대형 3차원 문제에는 적용하기가 쉽

지 않으나 one-step form 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 form 해석방법에 의한 빠른 계산시간은 시행착오를 많이 거치는 제품 설계 과정에서 다양하고 유용하게 적용될 수 있을 것으로 보인다.

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) Ahn, D. G., Jung, D. W., Yang, D. Y. and Jung, W. J., 1996, "Rigid-Plastic Explicit Finite Element Formulation for Two-Dimensional Analysis of Sheet Metal Forming Processes," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 20. No. 1, pp. 88~99.
- (4) Jung, D. W., 2000, "A Study on Virtual Manufacturing for Total Auto-Body Panel Stamping Processes," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 24 No. 6, pp. 1499~1512.
- (5) Jung, D. W. and Lee, S. J., 2000, "The Effect of the Draw-Bead Shape on the Sheet Metal Forming Process," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers (A)*, Vol. 24 No. 6, pp. 1624~1632.
- (6) Chu, E., 1983, "New Horizons in CAD of Sheet Metal Stampings," *Ph. D. thesis, McMaster University*.
- (7) Majlessi, S. A. and Lee, D., 1987, "Further development of Sheet Metal Forming Analysis Method," *ASME J. Eng. Ind. 09* : pp. 330~337.
- (8) Guo, Y. Q., Batoz, J. L., Detraux, J. M. and

- Duroux, P., 1990, "Finite Element Procedures for Strain Estimations of Sheet Metal Forming Parts," *Intl. j. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 30, pp. 1385~1401.
- (9) Liu, S. D. and Assempoor, A., 1995, "Development of Fast_3D-A Design-Oriented One Step Fem in Sheet Metal Forming," *Proc. Complas' IV*, pp. 1515~1526.
- (10) Liu, S. D. and Karima, M., 1992, "A One Step Finite Element Approach for Product Design of Sheet Metal Stampings," *Proc. NUMIFORM'92*, pp. 497~502.
- (11) Chung, K. and Richmond, O., 1992, "Sheet Forming Process Design Based on Ideal Forming Theory," *Proc. NUMIFORM'92*, pp. 455~460.
- (12) 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.
- (13) Mattiason, K., 1985, "Numerical Simulation of Stretching Processes," *SIMOP-I, Editor Lange. K., Proc. of the 1. Int. Workshop, Stuttgart*, pp. 170~213.
- (14) Wang, N. M. and Budiansky, B., 1978, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite Element Method," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 45, pp. 73~82.
- (15) Chung, K. and Richmond, O., 1993, "A Deformation Theory of Plasticity Based on Minimum Work Paths," *Int. J. Plasticity*, Vol. 9, pp. 907~920.
- (16) Lee, C. H. and Huh, H., 1995, "Blank Design and Strain Prediction in Sheet Metal Forming Process," *Proc. KSME, Spring Conference*, pp. 451~456.