

碩士學位論文

셀 요소를 이용한 주름 및
스프링-백 해석에 관한 연구



濟州大學校 大學院

機械工學科

高 亨 勳

2005年 12月

셀 요소를 이용한 주름 및
스프링-백 해석에 관한 연구

指導教授 鄭 東 垣

高 亨 勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



高亨勳의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2005年 12月

A study of forming analysis of wrinkling and
spring-back using shell element

Hyung-Hoon Ko

(Supervised by professor Dong-Won Jung)

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirement for the degree of Master of Engineering

Department of Mechanical Engineering
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

November 2005

목 차

NOMENCLATURE	ii
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
1. 1 연구개요	1
1. 2 연구 배경 및 연구 동향	4
1. 3 연구의 목적과 범위	7
II. 유한 요소 수식화	8
2. 1 정적-내연적 방법의 유한 요소법의 수식화	8
2. 2 박막 요소의 유한요소 수식화	12
2. 3 라이즈너-민들린(Resisner-Midilin) 관 이론	16
III. 성형해석결과	21
3. 1 프론트 펜더 성형 해석	21
3. 2 셸 요소를 적용한 스프링-백 성형 해석	31
3. 3 셸 요소를 적용한 스템핑 전체 공정 성형 해석	36
IV. 결론	44
V. 참고문헌	45

NOMENCLATURE

$G_{\alpha\beta}, g_{\alpha\beta} (G^{\alpha\beta}, g^{\alpha\beta})$: 변형 전/후 형상의 행렬텐서(역행렬)

$E_\alpha, e_\alpha (E^\alpha, e^\alpha)$: 변형 전/후 형상의 기본벡터(역행렬)

τ : Kirchhoff 응력텐서

H : 형상함수

R : 외부로부터 작용한 힘 벡터

β : 감속계수

Ω : 판의 전체 영역

Ω_0 : 중앙면

h : 판의 두께



$u_i (i = 1, 2, 3)$: x_i 방향에 대한 변위

θ : 면내의 회전

ϵ_p, ϵ_s : 면내/외 방향 변형도

D_p, D_s : 면 내외강도행렬

λ : Lamé 상수

μ : 전단 강성 계수

k_s : 전단 수정 계수

G_{ij} : 횡 전단 강도 행렬

E : 탄성 계수

ν : 프와송 비

\hat{D}_x : 휨 강도 행렬

SUMMARY

Sheet metal forming process consists of various and complex process of drawing, bending, stretching and trimming process, etc. Sheet metal forming process by the mechanical properties and forming condition the shape badness problem occurs such as wrinkling and crack. Correction expense of die by these defect occurrence is appearing as a big damage in industry. It is more than 30% of whole die expense. These damages are decreasing greatly as that preliminary correction of deformities analysis through computer simulation becomes available before die completion to the development of recently various finite element analysis software. Method of finite element analysis could be divided static-implicit method and dynamic-explicit method. An autoform uses in this study is the finite element analysis software which applies the static-implicit method. It still remains that problem such as spring-back is not solved perfectly yet one spring that the problem of sheet metal forming is solved by development and growth of various forming analysis software. Regarding the spring-back and bends overriding part to evaluate the result forming analysis from this study and it tried. Element that apply in analysis is shell element and membrane element. Also, it estimated prediction possibility of wrinkles and spring-back occurrences through comparison with analysis result and actuality mouldings that apply shell element. when the membrane element apply, the result of study is more accurate compared to shell element. When it apply shell element, spring-back and analysis result of flange process approximated to experiment result. But, it takes long time to interpretate the experiment then applying the membrane element. Therefore, simple drawing process applies membrane element, and spring-back and analysis of flange process are judged that it is most efficient that apply shell element.

I. 서론

1. 1 연구개요

박판 성형(sheet metal forming)이란, 금속 판재를 소재로 하여 소성변형을 통해 이어붙임 없이 필요한 형상으로 성형하는 것을 말한다. 박판 성형 공정은 타 가공 공정에 비해 제품의 경량화와 자원 절약을 통한 비용 절감 그리고 대량 생산의 이점을 가지고 있어 항공기 기체 부품 및 자동차의 차체에서부터 가전제품의 케이스 및 주방용품 등에 이르기 까지 다양한 산업 분야에서 이용 되고 있다. 박판 성형은 드로잉(drawing), 굽힘(bending), 스트레칭(stretching) 및 트림(trim) 등의 다양하고 복합적인 공정으로 이루어져 있어 성형 시 소재의 기계적 성질 및 성형조건 등에 따라 터짐(crack), 주름(wrinkling) 및 형상불량 등의 다양한 문제가 발생하며, 이로 인한 금형의 수정 비용은 전체 금형 생산 비용의 30% 이상을 차지할 정도로 실제 산업 현장에서는 큰 손실로 나타나고 있다. 박판 성형 시 발생하는 주름 및 터짐 등과 같은 문제의 해결은 과거에는 주로 축적된 경험에 근거한 시행착오 법에의 의존도가 높아 많은 시간과 경비가 소요되어 왔으나, 근래 들어 다양한 유한요소 소프트웨어의 개발과 발전으로 금형 완성 전에 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 사전 성형 해석이 가능해져 손실이 최소화 되고 있다.

일반적으로 소성 가공의 정량적 해석을 위해 적용 되는 방법으로는 초등 해석, 미끄럼 선장법(slip line field), 에너지법, 상계 해석법(upper bound method) 등의 해석적 방법과 유한 차분법(finite difference method) 및 유한 요소법(finite element method) 등과 같은 수치적 방법으로 분류할 수 있으며, 근래에는 상계 해석법이나 유한 요소법이 주를 이루어 적용되고 있다. 비선형 유한 요소법(nonlinear finite element

method)은 타 방법에 비해 적용범위가 넓고, 비교적 정확한 해석을 할 수 있다는 특징 때문에 대부분의 박판 성형 공정 해석에서 사용되고 있으며, 컴퓨터의 발달과 더불어 유한 요소법의 정확성과 효율성의 향상으로 인해 70년대 이후 형상이 복잡한 금속 성형 공정의 성형 해석은 유한 요소법에 많은 의존을 하고 있다. 유한 요소 해석은 수치적 기법에 따라 일반적으로 정적-내연적 방법과 동적-외연적 방법으로 분류할 수 있다.

정적-내연적 방법(static-implicit method)은 해의 정밀도는 높으나 비선형 문제에서 해를 도출해내지 못하는 경우가 발생하는 문제와 많은 계산 시간이 필요하다는 단점이 있으며, 동적-외연적 방법(dynamic-explicit method)은 항상 해를 도출한다는 장점이 있으나, 해의 정확도는 정적-내연적 방법에 비해 떨어진다. 내연적, 외연적 방법은 다시 적용 요소의 종류에 따라 박막(membrane), 셸(shell), 연속체(continuum) 요소로 나눌 수 있다.



굽힘과 판 두께 방향의 전단 응력을 무시하는 박막 요소는 박판 성형 공정이 굽힘 보다는 인장에 성형 의존도가 높아 널리 사용되고 있으나, 딥 드로잉(deep drawing)과 플랜지(flange) 공정과 같이 공정의 특징상 굽힘 효과를 무시 할 수 없는 공정에 있어서는 박막 해석법에 의한 해석 결과가 다소 부정확한 값이 도출될 가능성이 있다. 박막 요소에 있어 Wang과 Budiansky[1]는 평면-변형(plane-strain) 가정으로부터 수직 이방성 재료에 대한 박막 수식을 유도하였고 반구형 편치에 의한 스트레칭을 해석 하였다. Nakamachi[2] 등은 굽힘 효과를 고려하기 위해 금형의 주 곡률을 박판의 주 곡률로 사용하여 스트레칭과 딥 드로잉 해석을 하였다. H. B. Shim[3]은 원형 박판의 정수압 벌징과 사각형 박판의 반구형 편치에 의한 스트레칭을 해석하여 실험 결과와 잘 일치함을 보였고, 원형 컵의 딥 드로잉 해석을 하여 박막 해석은 굽힘 효과를 예측하지 못함을 보였고 좀더 복잡한 사각형 컵의 딥 드로잉 해석을 하여 박판의 변형 되는 형상을 정확히 예측하였으나 변형도 분포는 정확하게 예측하지 못했다. 셸

요소는 계산 시간이 박막 요소에 비해 많이 걸리며 소요되는 기억 용량이 크다는 단점이 있지만 굽힘 효과를 볼 수 있다는 장점이 있다. Onate와 Zienkiewicz[4]는 점소성 유동 이론을 이용하여 마찰과 이방성을 고려한 축대칭 스트레칭, 사각형 박판의 스트레칭을 해석하였다. Wang과 Tang[5]은 Total Lagrangian 수식을 이용하여 축대칭과 평면-변형 문제를 해석하였고 굽힘 효과를 고려하기 위해서는 쉘 요소를 써야 한다는 사실을 알았다. 연속체 요소는 실제로 두께 방향의 응력을 고려함으로써 두께 방향의 변형 및 응력을 가장 자연스럽게 표현 할 수 있는 방법으로 박막 요소와 쉘 요소에 의한 해석에서 블랭크 홀더(blank holder)의 접촉에 의한 압축력 등을 고려하지 못하는 반면 연속체 해석은 이러한 양면 접촉 문제 등을 정확하게 표현 할 수 있는 방법이다. 이러한 연속체 요소를 이용한 박판 금속 성형 공정 해석의 연구는 계산 시간의 방대함과 많은 기억 용량으로 인해 그리 많지 않은 편이다.[6-9]



1. 2 연구 배경 및 연구 동향

자동차 산업의 발전함에 따라 차체 부품 가공 기술 개발과 더불어 소재 강판의 변화 또한 요구되기 시작 하였다. 고장도 강판의 개발은 70년대 오일 쇼크(oil shock)와 함께 시작되었으며, 80년대에 들어서면서 차체 수명의 연장을 위해 다양한 표면 처리 강판이 개발되어 사용되어 지고 있다. 최근 자동차의 연비 규제 강화와 제조 원가 절감을 위한 고장력 강판의 채용이 증가하고 있으며 일체화 성형 기술의 개발 적용으로 인해 가공용 강판의 제조기술도 극한의 수준까지 요구되고 있다. 또한 성형 제품의 형상이 날로 복잡해지고 있어 성형 해석의 수준이 단순한 드로잉 공정의 성형 해석을 기초로 스프링-백 및 플랜지 부위에 대한 성형 해석까지 그 범위가 넓어지고 있다. Fig. 1은 일반용에서 초심 가공용까지 가공용 강판의 재질변화도로, 초심 가공용 강판으로 갈수록 항복 응력이 감소하면서 연신율이 증가하는 것을 확인 할 있으며, r값이 2.8 정도로 이러한 소재는 side body와 같은 대형 판넬을 일체화 성형하는데 적용 가능한 소재이다. Table 1은 차체 생산용 고장력 강판의 그레이드(grade)별 인장 강도 및 각종 타입과 용도이다[10][11].

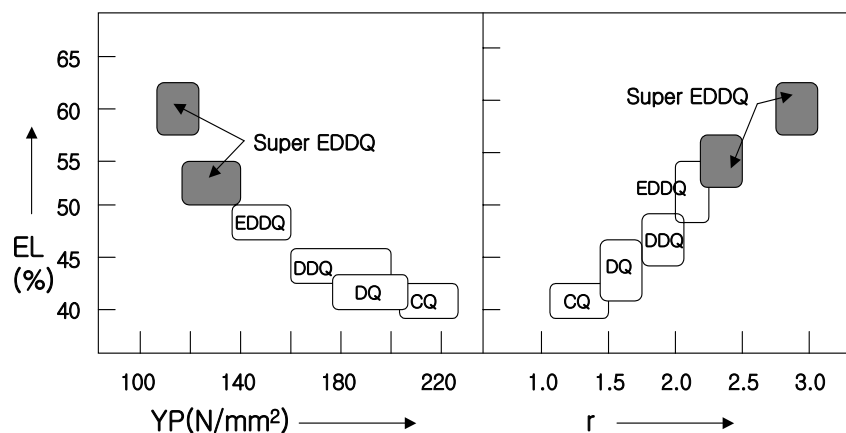


Fig. 1 Manufacturing for steel of quality of material change prediction

Table 1 A sort of high tensile steel

Grade	Tensile Strength (N/mm ²)	Posco Standards	Strength Method	Application
Commercial Quality	440 550	CHSP45C CHSP60C	Precipitation Strengthening	seat rail, member bumper
Drawing Quality	340 390 440	CHSP35R CHSP40R CHSP45R	P - Added Solid Solution Strengthening	inner panel
Deep Drawing Quality	340 390 440	CHSP35E CHSP40E CHSP45E	P - Added Solid Solution Strengthening	a class panel, DDQ part
Extra Deep Drawing Quality	340 390	CHSP35EB CHSP40EB	P - Added Solid Solution Strengthening	outer panel
Structural Quality	780 980	CHSP80TR CHSP100TR	Dual Phases	bumper, door stiffener

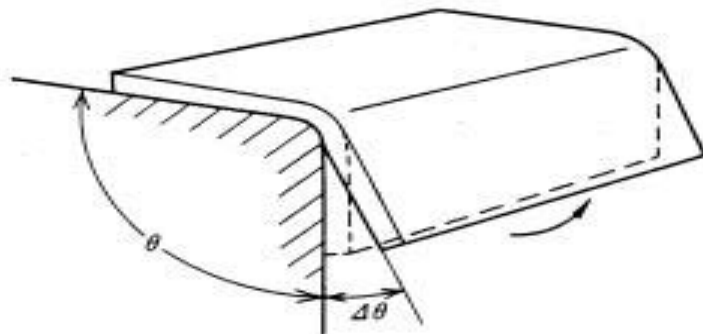


Fig. 2 Spring-back shape in general

Fig. 2는 굽힘 공정에서 발생하는 일반적인 스프링-백 형상으로 스프링-백에 의한 최종 형상 변형은 굽힘 부의 곡률 반경 및 굽힘 각도의 변화로 나타나게 되며 최종 제품의 형상 불량으로 이어지게 된다. 스프링-백의 크기는 재료의 항복 강도가 높은 경우와 동일한 항복 강도 하에서 탄성 계수가 작을수록 그리고 판재의 두께가 얇을수록 증가한다. 스프링-백에 대한 연구는 근래 들어 산업현장에서의 고장력 강판 사용 증가로 인해 제품의 치수 정밀도 문제가 부각 되면서 관심이 더욱 높아지고 있다. 박판성형에서의 스프링-백 특성에 관한 연구는 1940년대부터 현재까지 Mattiasson, F. Pourboghra, Kawaguchi 등 많은 학자들에 의해 수행 되어왔으나 정확한 해결 방법을 찾기는 힘든 상황이며 많은 대학 및 연구기관 그리고 산업현장에서 이에 대한 연구가 진행 되고 있다. Mattiasson[12]은 평면 변형을 드로 벤딩에서 동적 외연적 유한 요소법을 이용한 성형 해석 과정에서 발생하는 응력완화 현상이 탄성복원 해석 결과에 미치는 영향을 연구하였고, F. Pourboghra 등[13]은 평면 변형률 상태에서 모멘트와 곡률 관계를 사용하여 2차원 벤딩에서의 스프링-백을 예측하였고, Kawaguchi 등[14]은 유한 요소법에 의하여 외팔보에 대한 스프링-백과 잔류 응력을 계산하였다. Wagoner 등[15]은 박판 성형 공정에서의 정확한 응력해석이 스프링-백 해석 결과에 미치는 영향에 대해 연구하였으며, 또한 2차원 박막 요소를 이용한 성형해석 프로그램에 굽힘 효과를 묘사할 수 있는 알고리즘을 도입하여 그 모사결과와 실험치를 비교하는 연구를 수행하였고, Leu 등은 스프링-백에 대해 소성 변형률 ϵ 와 가공 경화 지수(n)가 미치는 영향을 고려하여 스프링-백 예측에 대한 연구를 수행했다. 국내의 경우 양동렬 등[16]은 스프링-백 현상을 유한 요소법으로 해석 시 스프링-백에 영향을 미치는 모델링 인자인 벌칙상수 및 블랭크의 요소크기, 곡률부의 요소 수와 편치 속도에 대해 평가하였으며, 이종문과 김현영[17]은 개발 중인 자동차 리어 사이드 프레임에 스프링-백 해석과 공정별 스프링-백 현상을 측정하여 설계에 적용하여 효과적인 금형 개발을 수행하였다.

1. 3 연구의 목적과 범위

박판 금속 성형 공정에 대한 유한 요소 해석은 박막, 셸, 연속체의 3가지 요소가 적용되며, 해석 방법 또한 다양하다. 각 요소 및 방법들은 각각의 장단점을 가지고 있으므로 효율적인 해석을 위해서는 해석 문제에 따른 적절한 해석 방법 및 적용 요소가 선정되어야 한다.

본 논문에서는 상용 소프트웨어인 Autoform을 사용하여 스프링-백 및 주름 발생 예측에 대해 셸과 박막 요소를 적용하여 성형 해석을 수행하고 그 결과와 실제 성형 제품과 비교 하였으며, 셸 요소를 이용한 스프링-백 해석 결과의 정량적 측정값과 실제 성형품의 스프링-백 측정값을 비교해 보았다. 소프트웨어의 선정 이유로는 하위 버전의 Autoform은 박막 요소를 사용하였으나 최근 셸 요소를 도입한 새로운 버전이 출시되어 한 소프트웨어를 사용하여 박막과 셸 요소를 동시에 적용해 볼 수 있으며, 박판 성형 해석의 정밀도가 높은 정적-내연적 방법을 사용하는 것 때문이다. 각 요소를 적용한 성형 해석 결과와 실험 결과와의 비교에는 프론트 펜더(front fender)에 대한 해석을 수행 하였으며, 스프링-백양을 측정 결과 비교에는 차량 판넬 중 카울 (Panel Cowl Top Outer) 성형시 발생하는 스프링-백양에 대한 정량적 해석을 수행하였다. 마지막 해석에서는 데켈(deckel)에 대한 스탬핑 전체 공정 해석을 수행 하였다.

II. 유한 요소 수식화

2. 1 정적-내연적 방법의 유한요소 수식화

본 연구에 적용된 상용 소프트웨어인 Autoform은 정적-내연적 방법을 사용하는 소프트웨어로서 이론적 수식화는 다음과 같다.[18]

변형된 물체는 Fig. 3과 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. 3에서 θ^1 과 θ^2 축을 박판표면의 접점 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 기본벡터(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.

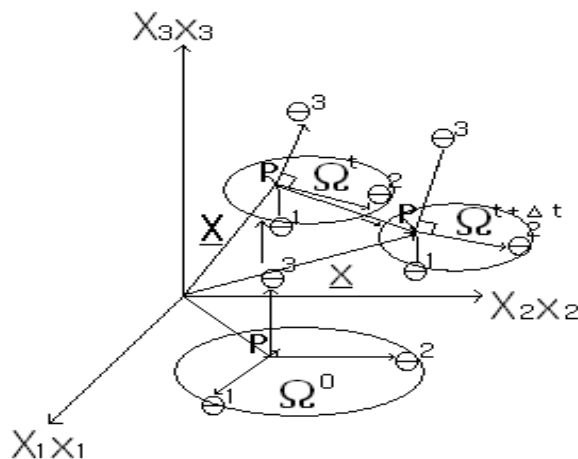


Fig. 3 Polar coordinates system of transformation process

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

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

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

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 좌표계(rectangular cartesian coordinates)를 나타낸다. 질점좌표계에서 Lagrangian 응력 텐서 ϵ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

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

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

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

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

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

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

대변형(large deformation)을 고려한 Updated Lagrangian 방정식은 아래식과 같이 나타낼 수 있다.

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

또한 구성방정식이 2차 Piola-Kirchhoff 응력증분과 Lagrangian 변형율과의 관계식으로 주어졌다면,

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

로 나타낼 수 있다.



위의 (8)과 (9)식을 결합하여 정리하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 Updated Lagrangian 방정식을 얻을 수가 있다.

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

2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 성분들은 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 사

용하여 구할 수 있다.

$$(S^{\alpha, \bar{j}})^{(t_0 + \Delta t)} = (S^{\alpha, \bar{j}})^{t_0} + \Delta S^{\alpha, \bar{j}} \quad (11)$$

$$(\tau^{\alpha, \bar{j}})^{(t_0 + \Delta t)} = (S^{\alpha, \bar{j}})^{(t_0 + \Delta t)} \quad (12)$$

또한 변형하는 물체가 금속일 경우 일반적으로 비압축성이라고 가정하여도 무방하므로 Kirchhoff 응력텐서 τ 는 Cauchy 응력텐서 σ 와 같다고 놓을 수 있다.



2. 2 박막 요소의 유한요소 수식화

본 연구에 적용된 박막 요소의 이론적 수식화는 다음과 같다.[19]

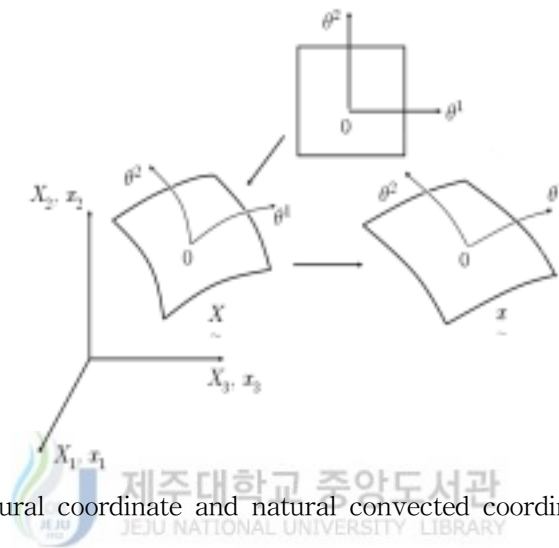


Fig. 4 Natural coordinate and natural convected coordinate system

Fig. 4에서 X_i 와 x_i 는 각각 시간 t_0 와 $t_0 + \Delta t$ 에서 위치벡터의 직교좌표 성분이고 u_i 는 Δt 동안의 이동 변위의 직교좌표계 성분이라 하면, 요소의 국부 좌표계는 질점 좌표계의 성질도 지니고 있으므로 요소의 국부 좌표계(θ^1, θ^2)를 그대로 질점 좌표계로 택하여 앞에서 유도된 수식을 그대로 사용하여도 무방하다. 국부 질점 좌표계에서 Lagrangian 변형도의 성분은 다음 식으로 주어진다.

$$\epsilon_{\alpha, \beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial \theta^\beta} + \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial \theta^\alpha} + \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} \right] \quad (13)$$

형상함수(shape function) H 를 사용하면 요소내의 위치의 변위는 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{Bmatrix} = H \cdot \tilde{X}$$

$$u = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = H \cdot \tilde{u} \quad (14)$$

여기서, \tilde{X} 와 \tilde{u} 는 각 절점의 좌표와 변위를 나타낸다. 또 Lagrangian 변형도의 선

형부분 성분은 다음 식으로 주어지게 된다.

$$e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial \theta^\beta} + \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\beta} \cdot \frac{\partial X_i}{\partial \theta^\alpha} \right] \quad (15)$$

위 식을 행렬식으로 나타내면 아래와 같다.

$$e = \begin{Bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ 2e_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{X}^T \cdot B_{L1} \cdot \tilde{u} \\ \tilde{X}^T \cdot B_{L2} \cdot \tilde{u} \\ \tilde{X}^T \cdot B_{L3} \cdot \tilde{u} \end{Bmatrix} = B_L \cdot \tilde{u} \quad (16)$$

여기서, B_{L1} , B_{L2} 와 B_{L3} 는 각각 다음과 같이 주어지고 이는 좌표 값에 무관하므로 모든 요소에 대하여 같은 값을 가진다.

$$B_{L1} = \frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \cdot \frac{\partial H}{\partial \theta^1}$$

$$B_{L2} = \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\partial H}{\partial \theta^2} \quad (17)$$

$$B_{L3} = \frac{\partial H^T}{\partial \theta^1} \cdot \frac{\partial H}{\partial \theta^2} + \frac{\partial H^T}{\partial \theta^2} \cdot \frac{\partial H}{\partial \theta^1}$$

Lagrangian 변형도의 비선형 부분을 행렬식으로 표현하면

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta^1} \\ \frac{\partial u}{\partial \theta^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{NL1} \cdot \tilde{u} \\ B_{NL2} \cdot \tilde{u} \end{pmatrix} = B_{NL} \cdot \tilde{u} \quad (18)$$

여기서,

$$B_{NL1} = \frac{\partial H}{\partial \theta^1}, \quad B_{NL2} = \frac{\partial H}{\partial \theta^2} \quad (19)$$

이다.

직교좌표계를 기준좌표계로 하였을 경우 변형도의 성분을 구하기 위해서는 국부 좌표계(local coordinate)에서 미분을 직교 좌표계에 서의 미분으로 변환시켜주는 과정이 반복계산(iteration)마다 필요하지만 여기서는 국부 질점 좌표계로써 변형을 묘사한 식 (17)과 식 (18)에 의해서 계산 시간을 많이 줄일 수 있다. Newton-Raphson 방법에 의해 탄소성 재료에 대한 최종적인 Updated Lagrangian 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{V^0} L^{\alpha\beta\gamma\rho} e_{\alpha\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \frac{\partial \delta u_i}{\partial \theta^\beta} dV \\ & = \int_{S_t} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{\alpha\beta} \delta e_{\alpha\beta} dV \end{aligned} \quad (20)$$

$$K \cdot \Delta u^{\sim(i)} = R - F^{(i-1)} \quad (21)$$

여기서,

$$K = \int_{V^0} B_L^T \cdot C \cdot B_L dV + \int_{V^0} B_{NL}^T \cdot \tau \cdot B_{NL} dV$$

$$F = \int_{V^0} B_L^T \cdot \tau dV \quad (22)$$

이고, $F^{(i-1)}$ 은 시간 $t_0 + \Delta t$ 일때 $(i-1)$ 번째 계산에서의 응력 발산(stress divergence) 항이고 R 은 시간 $t_0 + \Delta t$ 일때 외부로부터 작용한 힘 벡터이다.

$$u^{\sim(i)} = u^{\sim(i-1)} + \beta \Delta u^{\sim(i)} \quad (23)$$

여기서, β 는 해의 발산을 막기 위한 감속계수(deceleration coefficient)이다 ($0 < \beta \leq 1$). 식 (23)을 이용하여 아래의 조건을 만족시킬 때 까지 반복 계산 한다.

$$\frac{|\Delta u|}{|u|} \leq \delta \quad (24)$$

2. 3 라이즈너-민들린(Reissner-Mindlin) 판 이론

셸 요소는 표현 방법에 따라 다양하게 분류되며, Autoform에 적용된 mindlin 셸은 전단 응력 효과를 고려하기 위해 RM(reissner-mindlin) 가정을 도입 하였으며, 도입된 과정을 정리하면 다음과 같다.

판의 전체영역(Ω)은 중앙면을 기준으로 한 영역과 두께 방향의 영역으로 이루어져 있으며 다음과 같이 정의 할 수 있다.[20][21]

$$\Omega = \{(x_1, x_2, x_3) \in R^3 \mid (x_1, x_2) \in \Omega_0, x_3 \in [-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}]\} \quad (25)$$

여기서 Ω_0 는 중앙면($x_1 \otimes x_2$)을 나타내고 h 는 판의 두께를 나타낸다. Autoform에서는 영역 Ω 로 정의된 판에 작용하는 횡 전단변형의 효과를 고려하기 위해서 RM(reissner-mindlin) 가정을 도입하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 중앙 면에 수직인 법선은 변형 후에도 직선을 유지한다. 그러나 변형 후 중앙 면에 반드시 수직일 필요는 없다.
- 2) 중앙 면에 수직인 법선 방향의 응력은 0이라고 가정한다.
- 3) 처짐 값은 판의 두께에 비해서 작다

첫 번째 가정은 판이 C^0 연속성을 가지게 하는데 이를 도시하면 Fig. 5와 같다. 그리고 판의 변위 장은 다음과 같이 정의 된다.

$$u_1(x_1, x_2, x_3) = x_3 \theta_1(x_1, x_2)$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3) = x_3 \theta_2(x_1, x_2) \quad (26)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = w(x_1, x_2)$$

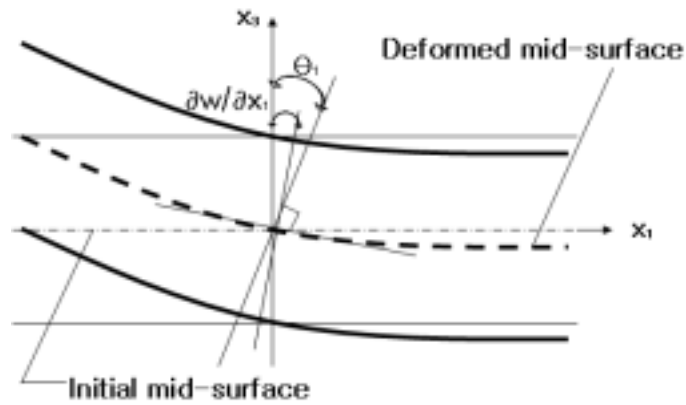


Fig. 5 Reissner-mindlin assumption
 제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 u_1, u_2, u_3 는 x_1, x_2, x_3 방향에 대한 변위이고, θ_1 와 θ_2 는 각각 $x_1 - x_3$ 면과 $x_2 - x_3$ 면내의 회전을 나타낸다. 판에 작용하는 변형도는 식(26)에서 정의한 변위장의 미분 값을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (27)$$

식 (27)에 정의된 변형도는 판의 경우 다음과 같이 다섯 가지 성분을 가진다.

$$\epsilon_1 = x_3 \frac{\partial \theta_1}{\partial x_1} = x_3 \theta_{1,1}$$

$$\epsilon_2 = x_3 \frac{\partial \theta_2}{\partial x_2} = x_3 \theta_{2,2}$$

$$\epsilon_{12} = x_3 \left(\frac{\partial \theta_1}{\partial x_2} + \frac{\partial \theta_2}{\partial x_1} \right) = x_3 x_{12} \quad (28)$$

$$\epsilon_{13} = \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = \theta_1 + \frac{\partial w}{\partial x_1}$$

$$\epsilon_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} = \theta_2 + \frac{\partial w}{\partial x_2}$$

위에서 정의된 변형도 성분은 면내 방향의 변형도 벡터 $\epsilon_p = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_{12}\}$ 와 면 바깥 방향의 변형도 벡터 $\epsilon_s = \{\epsilon_{13}, \epsilon_{23}\}$ 로 나누어 정리할 수 있으며, x 는 모멘트에 대한 변형(곡률)을 나타낸다. 판이 등방성 물질로 이루어져 있을 경우 판의 응력-변형도 관계는 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_p \\ \sigma_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_p & 0 \\ 0 & D_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_p \\ \epsilon_s \end{Bmatrix} \quad (29)$$


제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

여기서 $\sigma_p = \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}\}$ 와 $\sigma_s = \{\sigma_{13}, \sigma_{23}\}$ 는 각각 면내 방향의 응력벡터와 면외 방향의 응력벡터를 나타내며 이들에 관련된 강도행렬 D_p 와 D_s 는 다음과 같다.

$$D_p = \begin{bmatrix} \bar{\lambda} + 2 & \bar{\lambda} & 0 \\ \bar{\lambda} & \bar{\lambda} + 2u & 0 \\ 0 & 0 & u \end{bmatrix}$$

$$D_s = \begin{bmatrix} k_x u & 0 \\ 0 & k_s u \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 $\bar{\lambda}$ 는 일반 평면 응력 상태에 있는 물질의 Lamé 상수이고, μ 는 전단강성계

수, 그리고 κ_s 는 전단수정계수이다. 식 (31)에서 정의한 응력은 두께방향으로 적분하면 힘의 향으로 나타나며 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$M = \{M_1, M_2, M_{12}\}^T = \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{12}\}^T dx_3$$

$$Q = \{Q_{13}, Q_{23}\}^T = k_s \int_{-h/2}^{h/2} \{\sigma_{13}, \sigma_{23}\}^T dx_3 \quad (32)$$

식(32)를 행렬식으로 정리하면 다음과 같다.

$$M = \hat{D}_x, Q = G\epsilon_s \quad (33)$$

여기서 휨 강도행렬 \hat{D}_x 과 횡 전단 강도행렬 G 의 성분은 다음과 같다.

$$\hat{D} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \begin{vmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{vmatrix}$$

$$G = \frac{k_s Eh}{2(1+\nu)} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (34)$$

여기서 E 는 탄성계수, h 는 판의 두께 그리고 ν 는 프와송 비를 나타낸다. 본 연구에서는 전단수정계수 k_s 의 값으로 5/6을 사용하였다. 그리고 위에서 정의한 힘의 성분에 대한 부호 규약은 Fig. 6에 도시하였다.

식 (33)에서 정의한 강도행렬은 자연좌표계에 준하는 형태로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

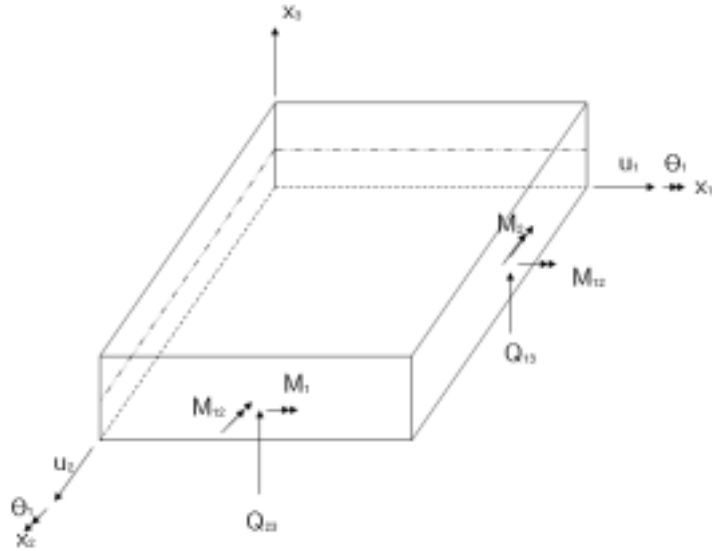


Fig. 6 Plate of sign agreement



$$\begin{Bmatrix} \tilde{Q}_{13} \\ \tilde{Q}_{23} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{G}_{11} & \tilde{G}_{12} \\ \tilde{G}_{21} & \tilde{G}_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\epsilon}_{13} \\ \tilde{\epsilon}_{23} \end{Bmatrix} \quad (34)$$

여기서 강도행렬의 성분 \tilde{G}_{ij} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{G}_{12} &= \frac{\partial \xi_1}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{k_s E h}{2(1 + \nu)} \\ \tilde{G}_{22} &= \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} \frac{k_s E h}{2(1 + \nu)} \end{aligned} \quad (35)$$

$$\tilde{G}_{21} = \tilde{G}_{12}$$

Ⅲ. 성형해석결과

3. 1 프론트 펜더 성형 해석

굽힘 부위에 대한 성형 해석 시 박막 요소에 비해 쉘 요소를 적용한 성형 해석 결과가 실제 성형 제품에 더욱 근접한 해석 결과를 수렴해 낼 수 있다는 기존 연구 결과에 대한 타당성 검증을 위해 박막 요소를 적용한 성형 해석 결과와 쉘 요소를 적용한 경우의 해석 결과를 실제 실험 결과물과 비교해 보았다. 성형 해석은 차체 판넬중 굽힘이 많은 프론트 펜더(front fender) 부위를 선정하였고 해석 결과 중에서 주름 경향에 대한 성형 해석 결과와 실제 성형품과의 비교를 하였으며 실험에 적용된 소재는 CHSP35R이다. 실험에 사용된 소재인 CHSP35R은 고장력 강판 중 인(P)이 첨가된 고용 경화강으로 가공성이 우수하여 자동차 판넬(center floor와 bracket) 등의 강도 보강을 위해 사용되고 있다. Table 2는 성형 해석 수행 정보이고, Table 3은 적용 소재의 물리적 특성 표이다.

Table 2 Simulation information

Op. No	Op. Name	CPU Time	No. of element	Remark
10	drawing	00:25:09	63,563	CHSP35R 0.7t B/H/F : 70 ton C/Stroke : 120mm
20	trimming	00:28:45	37,385	
30	flanging	04:10:00	75,565	
40	flanging	07:46:17	77,884	

Table 3 Material property

Young modules		2.1e+05
Poisson ration		0.30
Specific weight		7.8e-05
R-value	r ₀	1.14
	r ₄₅	0.82
	r ₉₀	1.70
Thickness		0.7mm

프론트 펜더(front fender)의 성형 해석은 드로잉(drawing), 트리밍(trimming), 플랜징(flanging)의 총 3단계의 성형 해석이 행하여 졌으며, Fig. 7은 프론트 펜더 성형을 위한 드로우 비드 및 트림 라인과 블랭크의 형상과 크기이다.

Fig. 8은 셸 요소를 적용한 드로잉 공정의 해석 결과로 두께 분포도(상부그림)에서 원으로 표시된 부위는 소재가 과다하게 얇아진 부분이며, 주름 분포도(하부그림)의 원으로 표시된 부위는 성형 완료 후 주름이 발생 및 발생 위험 구간이다.

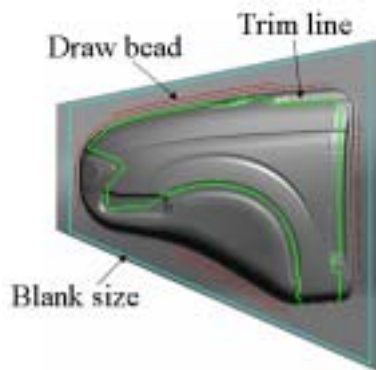


Fig. 7 Front fender forming for basic shape

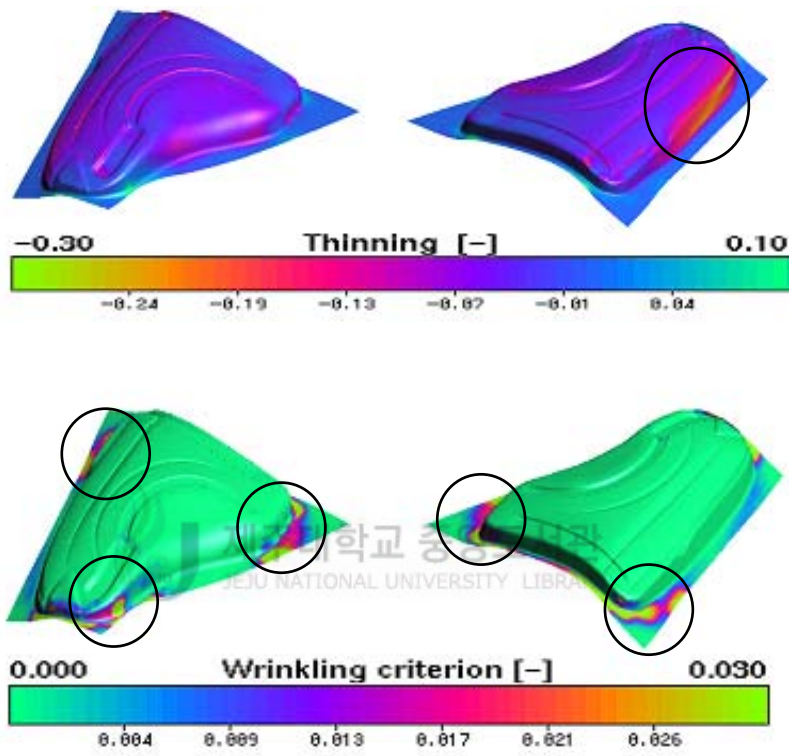


Fig. 8 Analysis result of whole panel



(a) Result of experiment



(b) Analysis result of membrane element



(c) Analysis result of shell element

Fig. 9 Flange process of front fender

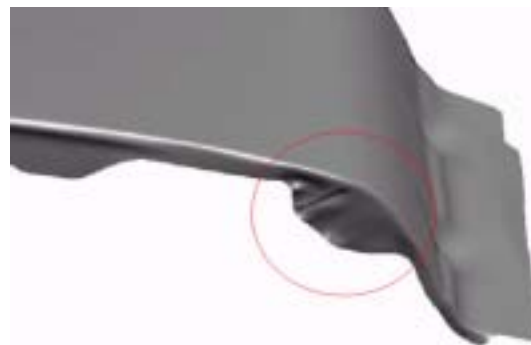
Fig. 9는 프론트 펜더 성형 부위 중 플랜지 공정 부위로서 원으로 표시된 부위의 주름이 셸 요소를 적용한 경우가 박막 요소를 적용한 경우에 비해 실제 실험 결과에 보다 근접한 주름 발생을 예측 하고 있다.



(a) Result of experiment



(b) Analysis result of membrane element



(c) Analysis result of shell element

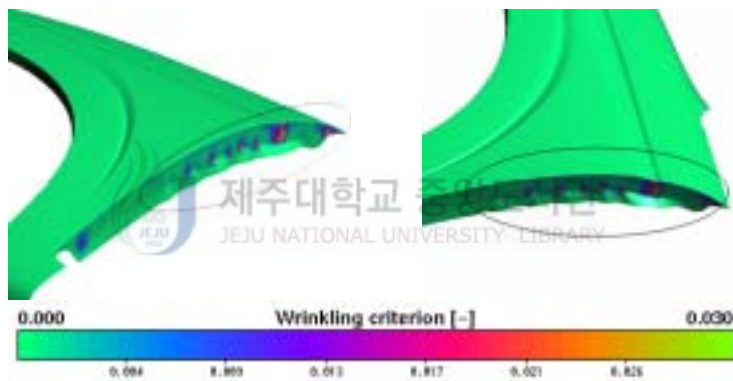
Fig. 10 Bending process of front fender

Fig. 10은 굽힘 공정 부위로서, 실제 성형품 그림의 원안에 발생한 주름을 볼 때, 박막 요소를 적용한 경우는 실제 성형품에 발생하고 있는 주름에 대한 예측이 없는 상태에서 단순히 성형 완료 후의 형상만이 해석 되었으나, 쉘 요소를 적용한 경우는 실제 성형품과는 다소 차이는 있으나 성형 시 주름이 발생하게 됨은 보여주고 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 결과물에서 볼 수 있듯이 박막 요소를 적용한 해석 결과물 보다 쉘 요소를 적용한 해석 결과가 주름 발생 및 발생 위험 지역에 대해 실제 성형 제품에 근접한 성형 해석 결과를 보여주고 있다. 특히 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 굽힘이 심한 부위의 성형 해석 결과 쉘 요소를 적용한 성형 해석에서는 박막 요소를 이용한 성형 해석에서 예측되기 힘들었던 주름의 변화까지도 상세히 예측할 수 있었다. 이 성형 해석 결과를 통해 쉘 요소를 이용한 경우 플랜징 및 굽힘 부위에 대해 쉘 요소를 적용한 성형 해석 결과가 박막 요소에 비해 보다 신뢰할 수 있는 성형 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이는 박막 요소는 굽힘 에너지와 판 두께 방향의 전단응력을 무시하고 해석을 수행 하는 데 반해 쉘 요소는 두께 정보를 그대로 적용함으로써 두께 방향의 전단응력과 굽힘 에너지의 적용이 가능하기 때문이다.

다음은 쉘 요소를 적용한 성형 해석 결과 중 불량 발생 부위 및 불량 발생 위험 부위를 실제 성형 제품과 비교를 통해 신뢰성을 평가해 보았다.



(a) Result of experiment



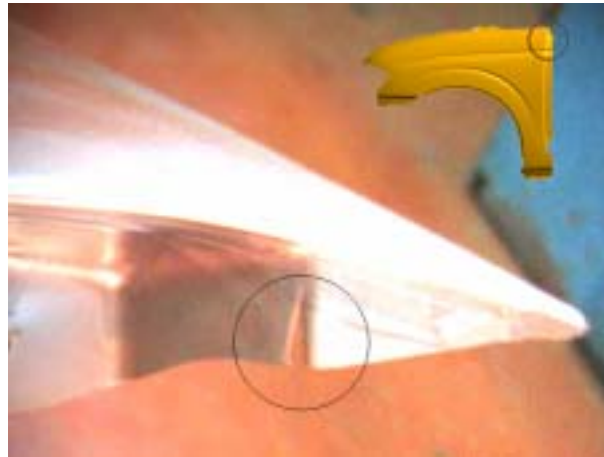
(b) Result of forming analysis

Fig. 11 Wrinkle tendency distribution after flange process

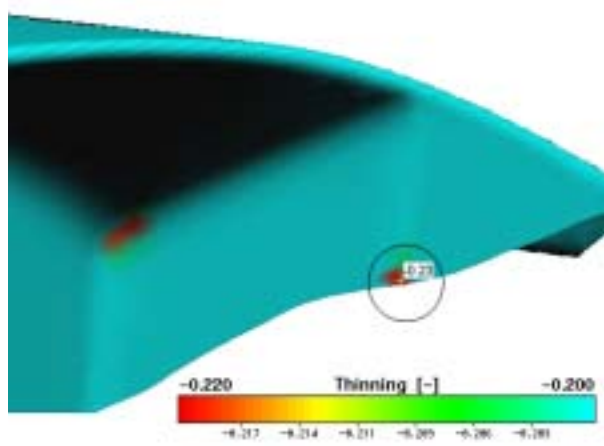
Fig. 11은 프론트 펜더 성형 공정 중 플렌지 공정 부위에 발생하는 주름에 대한 셸 요소를 적용한 성형 해석 결과 그림으로, 실제 성형된 제품의 플렌지 측벽 부위에 발생한 주름들이 셸 요소를 이용한 성형 해석 결과에서도 비교적 정확하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 12는 프론트 펜더 성형 공정 중 제품에 발생한 터짐 부위의 성형 해석 결과이다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이, 성형 해석 결과 측벽 부위에 터짐이 예측되고 있으

며, 실제 실험에서도 예측된 부위에서 정확히 터짐이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

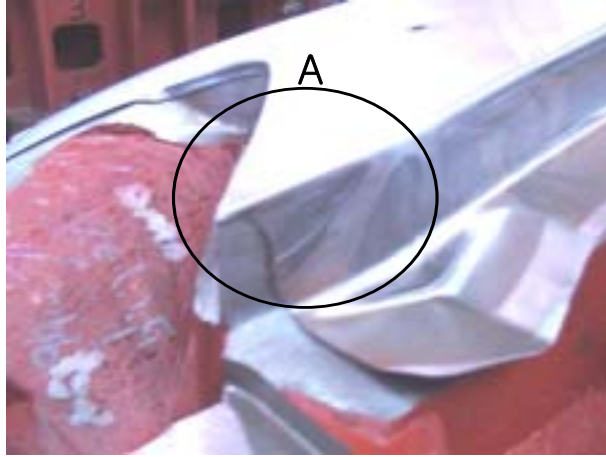


(a) Result of experiment

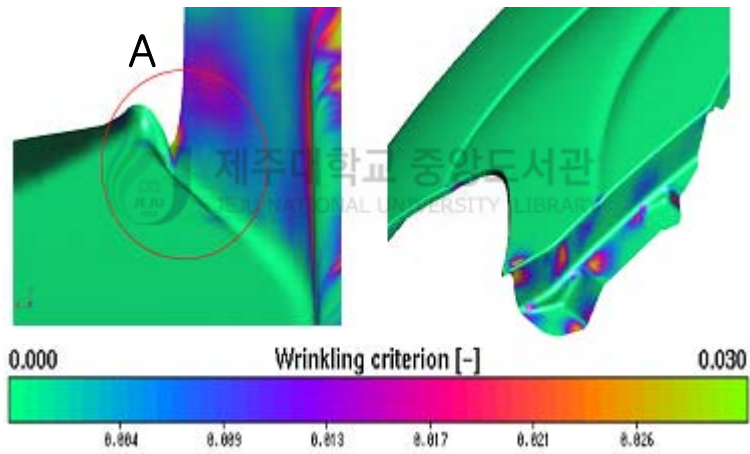


(b) Result of forming analysis

Fig. 12 Occurring crack after flange process



(a) Result of experiment



(b) Result of forming analysis



(c) Section view A

Fig. 13 A sakure phenomenon of analysis result

Fig. 13에서 (a)는 실제 실험한 결과이고 (b)는 성형해석 결과, (c)는 A부위의 단면도이다. 굽힘 발생시 바로 굽혀지지 않고 굽힘 저항으로 인해 블록 튀어나오면서 굽혀지는 현상인 사쿠레 현상이 쉘 요소를 사용한 해석 결과에서 잘 예측되어지고 있다. 기존의 박막 요소를 사용한 해석에서는 굽힘에 대한 정확한 예측이 힘들었으나, 쉘 요소를 적용한 성형 해석 실험에서는 실험 결과와 거의 유사한 해석 결과를 얻을 수 있었다.

프론트 펜더 성형 해석에서는 상용 소프트웨어인 Autoform을 이용해 쉘 요소와 박막 요소를 적용한 성형 해석을 각각 수행 하였으며, 각 해석 결과를 실제 성형 제품과 비교하였다. 그 결과 쉘 요소를 적용한 해석 결과가 실제 실험 결과 나타난 불량 부위에 비교적 정확하게 일치하고 있어, 쉘 요소를 적용한 성형 해석이 굽힘이 지배적인 공정에 대한 성형 해석에 적합함을 알 수 있다.



3. 2 셸 요소를 적용한 스프링-백 성형 해석

굽힘에 대한 해석에는 박막 요소보다 셸 요소의 적용이 적합하다는 프론트 펜더 성형 해석 결과를 토대로 카울(panel cowl top outer)에 대해 셸 요소를 적용하여 성형 해석을 수행 하였으며, 성형 해석 결과 측정된 스프링-백 발생량과 실제 실험에서 발생한 스프링 백 발생량을 비교해 보았다. 2차 실험은 드로잉, 트리밍, 플랜지, 피어싱 등 총 5단계의 공정에 대해 성형 해석 수행 후 최종적으로 스프링-백에 대한 해석을 수행 하였다.

Table 4는 수행한 성형 해석에 관한 정보이며, Fig. 14는 각 공정별 제품 형상이다.

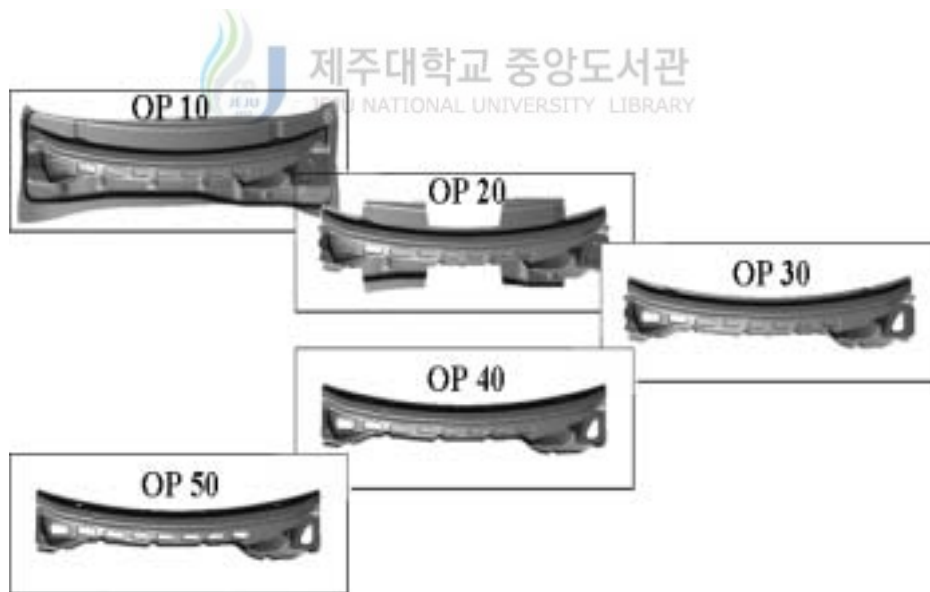


Fig. 14 Forming process

Table 4 Simulation information

Op. No.	Op. name	CPU time	No. of element	Remark
10	draw	01:20:03	116,792	Draw : BE-M Flanging : Shell SPCE 0.8t B.H.F : 60 ton C/Stroke : 120mm
20	trim & pie	01:26:35	98,376	
30	cut/c-cut/c-pie	01:29:30	82,749	
40	up/dn flange	08:59:26	98,664	
50	c-pie	09:04:21	102,958	

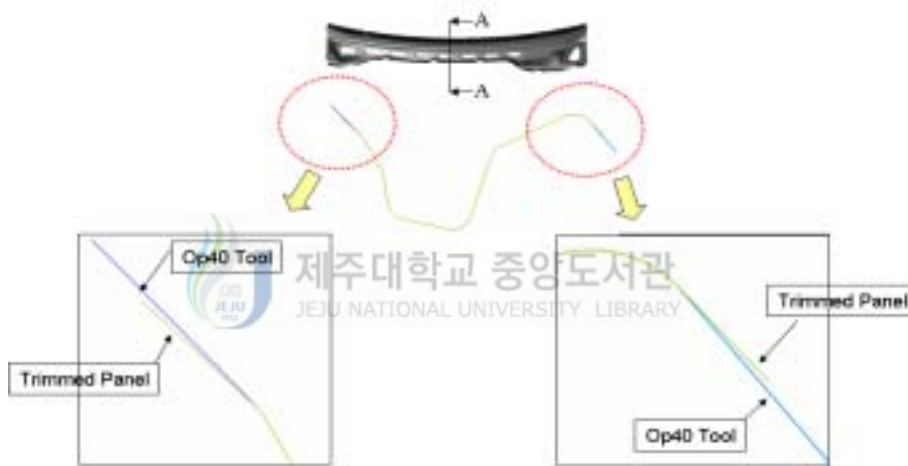


Fig. 15 UP/DN flange - section A-A & trim panel and trimming tool



Fig. 16 Position for Pilot pin and clamping

Fig. 15는 up/down flange에 대한 틀 세팅 상태 및 상세도로, 트림 작업후 플랜징 공정 수행을 위한 소재의 세팅 상태와 플랜지 틀의 위치에 대한 그림이다. Fig. 16은 스프링-백 해석 수행을 위해 소프트웨어 상에서의 클램핑 및 파일럿 핀의 위치를 선정한 그림으로 원형으로 표시된 부위는 클램핑 포인트이며 사각형으로 표시된 부위는 파일럿 핀의 위치이다.

Fig. 17은 성형 해석을 통한 스프링-백 량 측정 결과와 실제 실험을 통한 스프링-백 량 측정결과를 각 측정 포인트별로 표시한 그림으로서 ①은 스프링-백 측정 포인트이며, ②는 실제 성형품에서의 스프링-백 측정 결과, ③은 성형 해석 결과 측정된 스프링-백의 양이다. 측정은 flange up 부위에 대해서는 13곳을 flange down 부위에 대해서는 19곳을 측정하였다. 양의 값은 스프링-백, 음의 값은 역 스프링-백으로 측정된 것으로서 최대오차는 1.30mm로 나타나고 있어 굉장히 높은 정확도를 보이고 있다.

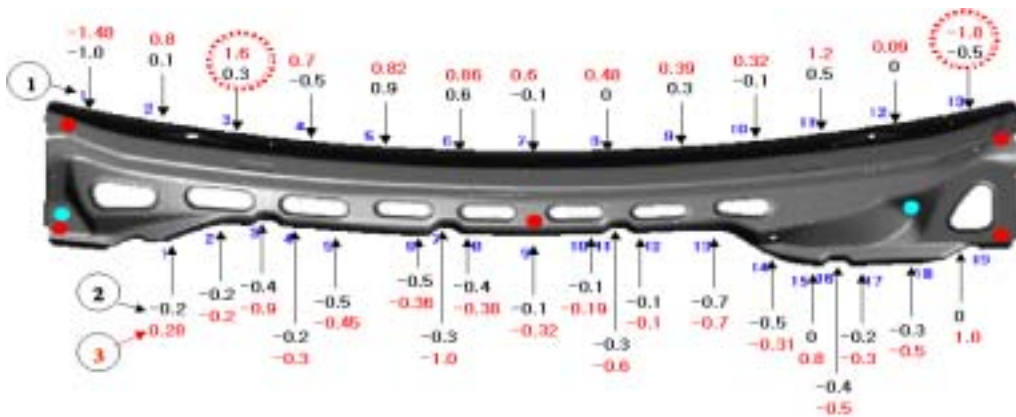
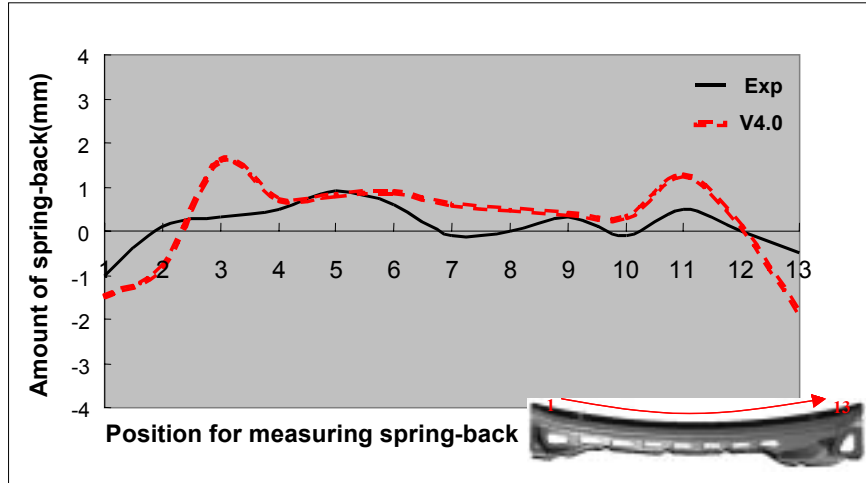
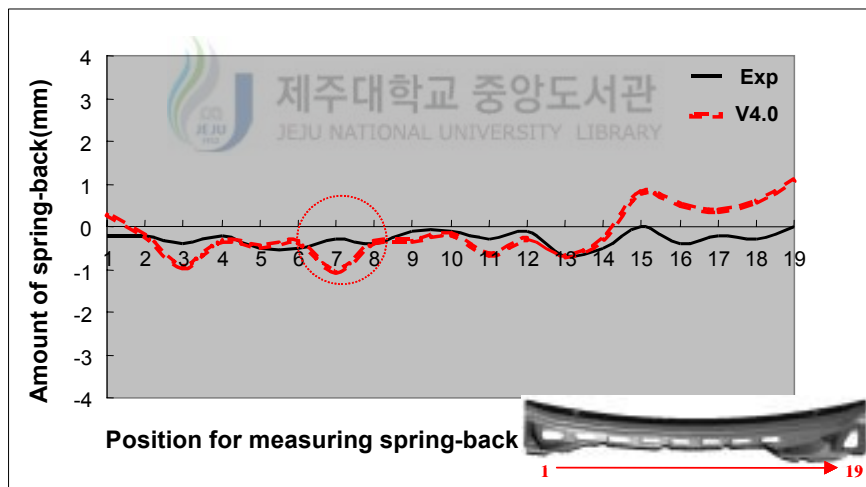


Fig. 17 Comparison of spring-back between experimental and simulation



(a) Measuring spring-back after flange up



(a) Measuring spring-back after flange down

Fig. 18 Amount spring-back after flange up/down process

Fig. 18은 Flange up/down 부위에서의 스프링-백 발생량 추세선도로 실선은 실험 결과 값, 점선은 성형 해석 결과 값으로 실제 실험과 성형 해석 결과의 값이 일치하고 있지는 않으나, 그 발생 추세선의 형태가 유사한 형상을 하고 있는 것을 확인 할

수 있다. 이는 실제 현장에서 스프링 백 발생의 추세를 파악 하는데 큰 역할을 할 수 있다고 판단된다.

카울의 플랜지 공정 후 발생한 스프링-백에 대한 성형 해석에서는 쉘 요소를 적용한 유한 요소 해석 결과와 실제 실험에서의 측정 결과를 비교를 하였으며, 해석 결과와 실험 결과 최대 오차 1.30mm의 좋은 결과를 보였으며, 이를 통해 사전 성형 해석을 통한 스프링-백 예측이 가능함을 검증 할 수 있었다. 또한 조립 불량 위험 수위에 있는 스프링-백 발생 구간의 예측이 가능해져 스프링-백에 대한 대안 마련이 설계 단계에서 가능해 질수 있다고 판단되어지며, 이는 현장에서의 제품 생산 시간 및 비용 단축과 불량 억제의 효과를 가져 올 수 있을 것이라 판단된다.



3. 3 셸 요소를 적용한 스템핑 전체 공정 성형 해석

스프링-백 해석 실험의 평가에서는 성형 해석과 실제 실험을 통해 각 포인트에 대한 스프링-백 발생량을 측정하여 비교하였으며, 이번 성형 해석에서는 셸 요소를 적용하여 스템핑 전체 공정에 대한 성형 해석을 수행하였다.

Table 5. Material property

name	SPCC	
young modules	2.1e+05	
specific weight	7.8e-05	
poisson rate	0.30	
thickness	0.95mm	
R-value	R ₀	1.87
	R ₄₅	1.30
	R ₉₀	2.14

Table 5는 이번 해석에 적용된 소재의 물적 특성 표로, 소재는 SPCC이며, R(이방성 계수)값이 0, 45, 90에서 각각 1.87, 1.30, 2.14인 이방성 소재로 적용 두께는 0.95mm 이다.

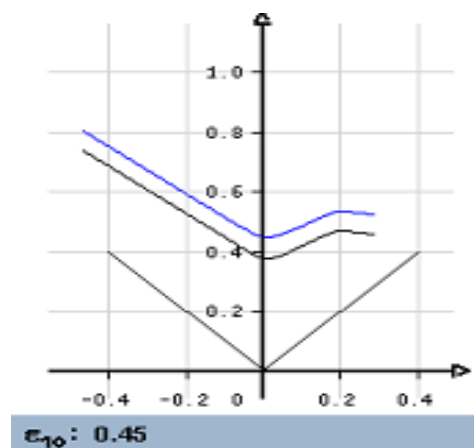


Fig. 19 FLC(forming limit curve)

Fig. 19는 적용된 소재의 성형 한계 곡선(forming limits curve)이다. 박판 성형 중 재료에 넥킹(necking) 및 파괴(crack)가 발생하게 될 때 그 부분을 새롭게 설계 하거나 성형방법을 바꾸어 변형율의 상태가 재료의 성형 한계를 넘지 않도록 주의하는 것이 좋다. 성형 한계 곡선은 실험을 통해 결정되며, 제품 성형 시 성형 조건 변경 및 방법 개선에 기초 자료로 사용되는 곡선이다.

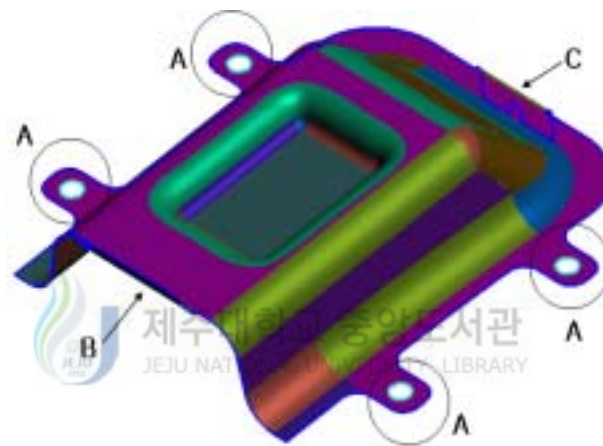


Fig. 20 Final shape of deckel

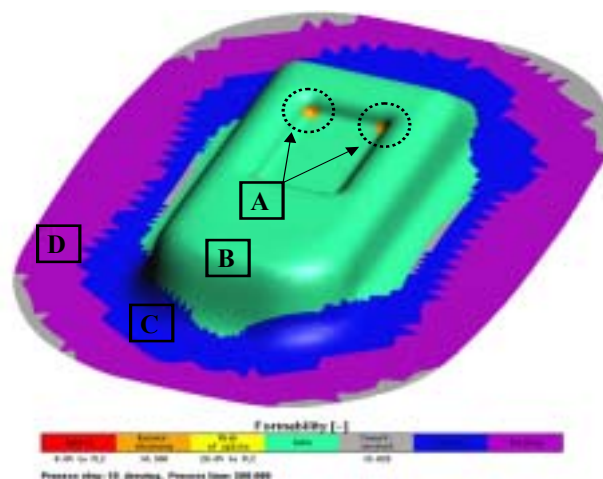


Fig. 21 Wrinkle tendency and crack after drawing process

Fig. 20은 이번 성형 해석에서 최종 적으로 완성 시킬 제품 형상으로서 최종 형상을 통해 성형 해석 혹은 실제 제품 생산에서 필요한 공정을 구상해 볼 수 있다. 본 실험에서는 전체적인 형상을 성형하기 위한 드로잉 공정과 A부위의 피어싱 공정, 소재의 불필요한 부위를 잘라내는 트림 그리고 B와 C 부위의 플랜지 공정이 필요하다.

Fig. 21은 드로잉 공정에 대한 성형 해석 결과이다. B부위는 제품의 두께 및 성형 상태가 안정적인 부위로서 제품의 형상이 나타나는 부위가 드로잉 공정 시 불량 없이 성형이 될 수 있음을 보여주고 있다. 중심부 오목한 부위의 모서리 부위(A부위)는 차후 터짐으로 나타날 위험이 있음을 보여주고 있으며, C와 D부위는 주름 발생 위험 부위 및 주름 발생 부위이다.

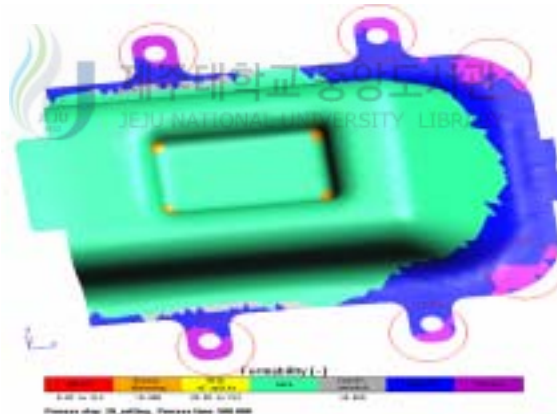


Fig. 22 Wrinkle tendency and crack after Trim & piercing process

Fig. 22는 전체 공정 중 트림 공정과 피어싱 공정에 대한 성형 해석 결과이다. 트림 공정 이후에도 원으로 표시한 부위에 소재가 과다 유입되어 주름으로 발생할 위험이 나타나고 있어 성형 조건의 수정이나 금형 및 소재 형상 및 크기의 변경이 필요함을 예상해 볼 수 있다.

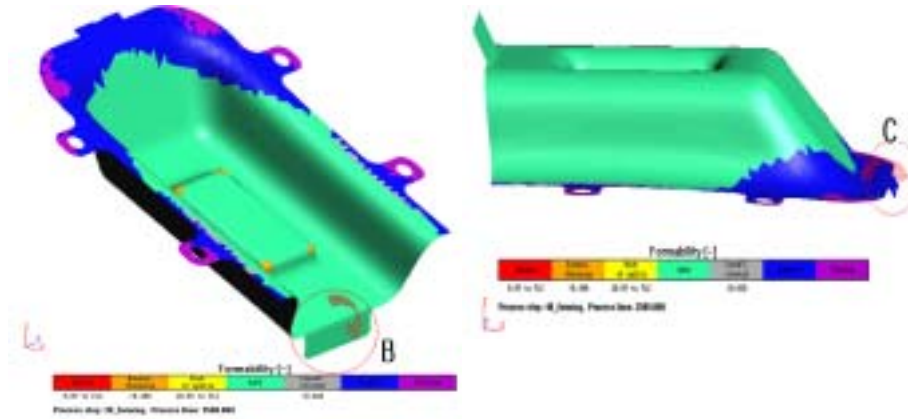


Fig. 23 Wrinkle tendency and crack after flanging process

Fig. 23은 fig. 20의 B와 C부위의 플랜지 공정에 대한 해석 결과이다. C부위는 드로잉과 트리밍 작업 후에도 소재의 인장 부족 등의 원인으로 차후 주름으로 발전할 가능성이 있었던 부위였으며, 플랜징 작업 후 주름으로 발생 하지는 않아 제품 생산에 큰 문제는 발생 하지 않을 수 있으나, 금형 상태 및 성형 조건 등의 조정을 통해 소재 유입을 좀더 원활하게 해줄 필요성이 있는 부위로 판단된다. Fig. 23의 B부위는 90°에 가깝게 수직으로 굽힘 작업을 수행 한 부분으로, 해석 결과 굽힘 부위에 주름 및 파단의 위험이 보이지 않아 본 공정이 실제 제품 생산을 위한 수정 작업을 거치지 않아도 됨을 알 수 있다.

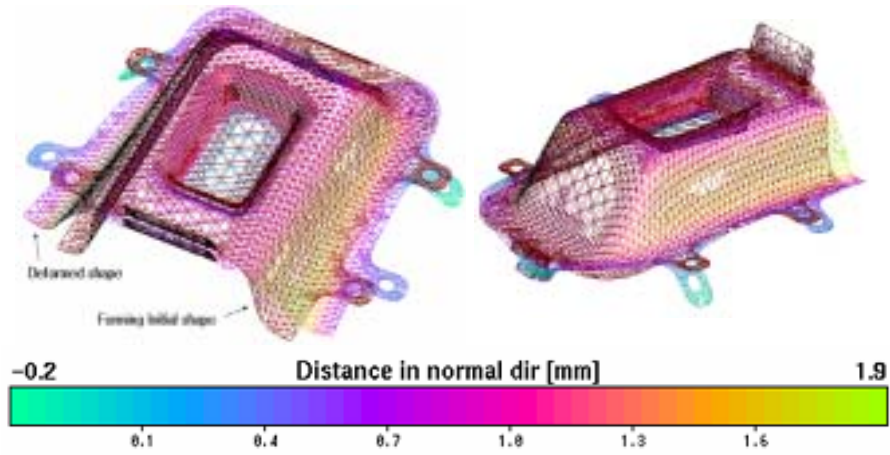


Fig. 24 Deformed for spring-back(30:1 ratio)

Fig. 24는 스프링-백에 의해 형상이 변형된 모습을 메쉬(mesh) 형태로 보여주고 있다. 스프링-백 발생에 의한 형상 변화를 좀더 상세히 알아볼 수 있도록 하기 위하여 30배로 확대한 형상으로 스프링-백에 의한 형상 변형에 의해 제품이 완성 후 조립 불량 문제가 발생 할 있다는 것을 그림에서 예측할 수 있다.

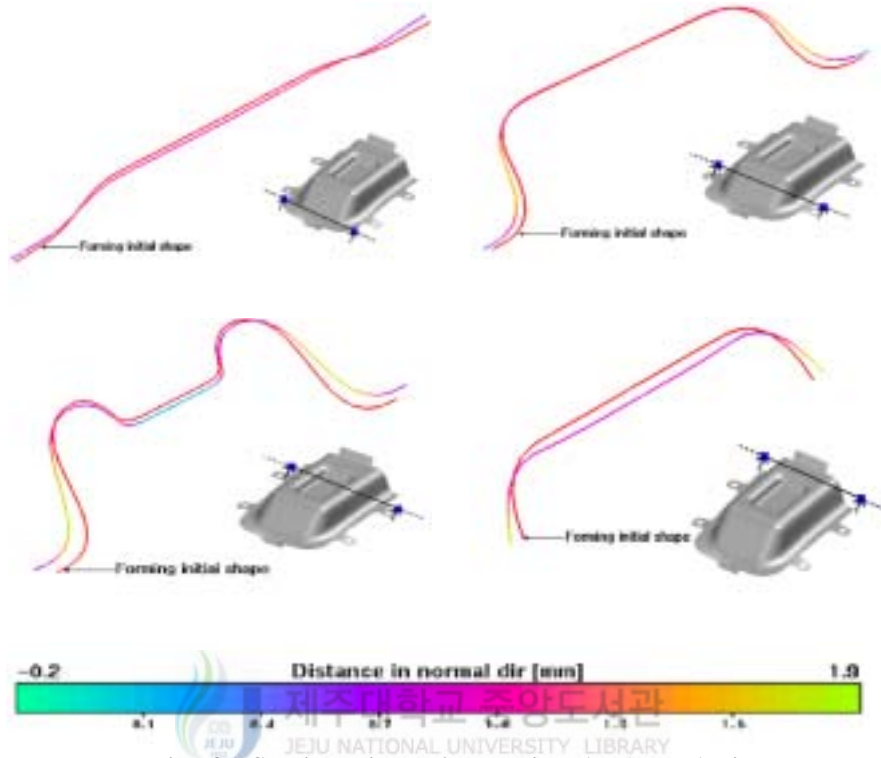
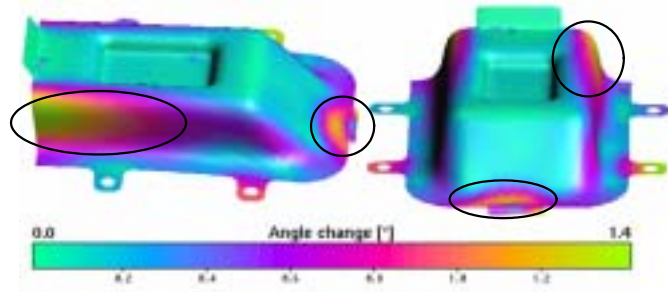


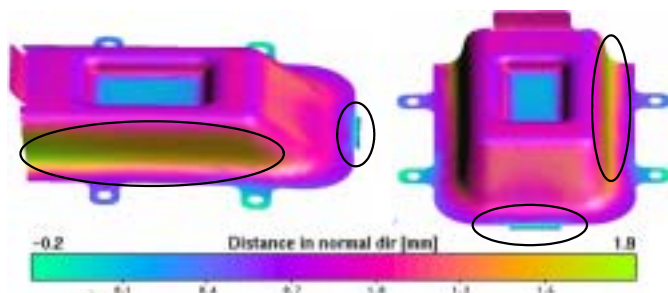
Fig. 25 Section view after spring-back analysis

Fig. 25는 스프링-백으로 인한 각 구역별 변형 상태의 단면도이다. 그림에서 화살표로 표시한 단면이 성형 완료 후 금형에서 이탈되기 전 형상이고, 다른 한 단면이 금형으로부터 제품이 이탈 된 후 스프링-백이 발생한 형상이다. 각 단면의 스프링-백량을 그래픽으로 나타냄으로서 굽힘 각 변경 등과 같은 과도한 스프링-백으로 인한 불량 발생 및 스프링-백에 대한 대안을 마련해 볼 수 있다.

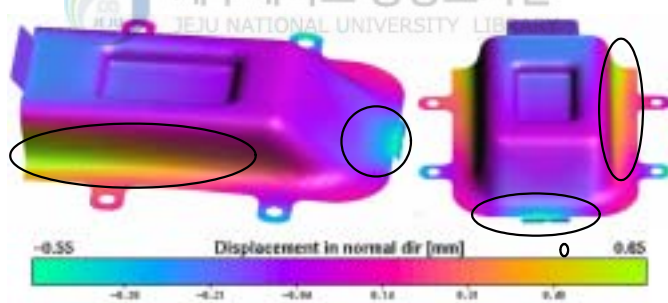
Fig. 26은 스프링 백으로 인한 각도 변화와 변형률 변화 및 법선 방향으로의 거리와 위치 변화에 대한 성형 해석 결과이다. 원안의 구역은 스프링-백 및 역 스프링-백의 양이 과도하게 발생한 곳으로 측벽의 굽힘 부위에서 스프링-백이 과도하게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이 해석 결과를 통해 측벽 부위의 스프링-백 해결을 위한 굽힘 각도 변경 등의 불량 해소를 위한 해결책 마련이 필요함을 알 수 있다.



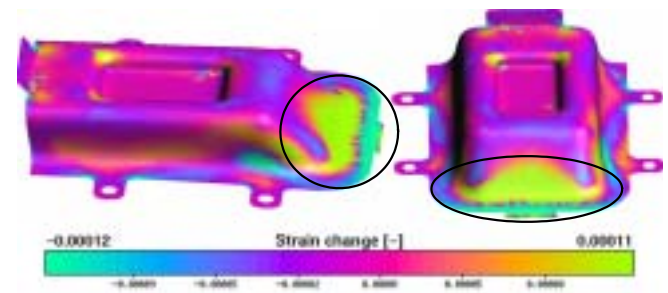
(a) Angle change



(b) Distance change of normal direction



(c) Displacement change of normal direction



(d) Spring-back strain changefig.

Fig. 26 Deformed shape during spring-back

스탬핑 전체 공정에 대한 성형 해석에서는 스프링-백 해석에서 쉘 요소를 적용한 해석 결과의 신뢰도를 바탕으로 하여 실제 산업 현장에서의 적용의 가능성 평가를 위해 성형 해석을 수행 하였으며, 드로잉 공정 및 트리밍 공정에 대한 성형 해석 결과를 통해 불량 발생 부위를 사전 예측해 볼 수 있었고, 발생 문제의 해결을 위해 블랭크 사이즈 및 성형 조건의 수정에 대해 고려해 볼 수 있었다. 또한 스프링-백의 사전 성형 해석을 통해 각도, 법선 방향의 거리와 위치, 변형률의 변화에 미치는 스프링-백의 영향을 살펴보고 조립 불량으로 이어질 수 있는 부위의 예측을 해볼 수 있었다. 이를 산업 현장에 적용함으로써 제품 생산 기간의 단축과 설계 완성 단계에서의 신뢰도를 높일 수 있을 것이라 생각된다.



IV. 결론

본 연구에서는 박판 성형 공정에서 발생 하는 문제 중 최근 많은 관심 분야로 나타나고 있는 스프링-백 및 주름 발생에 대해 성형 해석을 수행 하였다. 본 연구를 통해 스프링-백 및 굽힘 공정에서 발생하는 주름에 대한 성형 해석에 셸 요소를 적용함으로써 경험적 방법에 의존하던 과거에 비해 빠르고 정확한 문제 해결 방안을 제시 할 수 있다고 판단되었다. 하지만, 셸 요소의 경우 박막 요소를 적요한 성형 해석에 비해 많은 해석 시간이 요구되므로 드로잉 공정과 같은 단순 인장 공정의 성형 해석에서는 박막 요소를 그대로 적용하되, 스프링-백과 플랜지 공정 및 굽힘 부위에 발생하는 주름 발생 문제에 대한 성형 해석에는 셸 요소를 적용한 성형 해석을 수행 하는 것이 생산성 향상을 가져올 수 있다고 판단된다. 본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 굽힘이 지배적인 공정에 대해 셸 요소 또는 박막 요소를 적용한 경우의 각각의 성형 해석 결과를 실제 성형 제품과 비교한 결과 셸 요소를 적용한 경우가 성형 제품에 보다 근접한 해석 결과가 도출 되었다.
2. 플랜지 부위에 대한 성형 해석 결과 중 스프링-백 발생량 측정 결과를 실제 성형 제품의 스프링-백 발생량 측정 결과와 비교하였다. 그 결과 성형 해석 결과와 실제 실험 결과의 스프링-백 발생량이 유사하게 나타나 셸 요소를 적용한 스프링-백 성형 해석 결과가 실제 산업현장에 적용 가능 하다는 결론을 내릴 수 있었다.
3. 프론트 펜더 성형 해석과 카울 성형에서 발생 하는 스프링-백 성형 해석 결과를 토대로 스템핑 전체 공정에 대해 성형 해석을 수행 하였으며, 다 공정의 성형 해석 결과를 통해 각 공정에서 발생 하는 주름 및 터짐 문제에 대해 사전 예측 해 볼 수 있었다.

V. 참고문헌

- [1] N. M. Wang and B. Budiansky, "Analysis of sheet metal stamping by a finite element method", J. Appl. Mech. Trans. ASME, Vol. 45, pp. 73-82, 1978.
- [2] E. Nakamachi, "Finite element modeling of the punch press forming of thin elastic-plastic plates", Proc. NUMIFORM'86, pp.333-339, 1986.
- [3] H. B. Shim, "An elastic-plastic finite element formulation of single- and multi-layered degenerated shells with application to metal forming", Ph. D. Thesis, KAIST, 1989.
- [4] E. Onate and O. C. Zienkiewica, "A viscous shell formulation for the analysis of thin sheet metal forming", Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, pp. 305-335, 1983.
- [5] N. M. Wang and S. C. Tang, "Analysis of bending effects in sheet forming operations", Proc. NUMIFORM'86, pp. 71-76, 1986.
- [6] 정동원, 양경부, "박막/셸 혼합요소를 이용한 박판성형 해석과 박막/셸 판별 조건에 관한 연구", 한국해양공학회, 제 12권, 제 2호, pp. 57-64, 1998.
- [7] 정동원, 양경부, "박막/셸 혼합 요소의 판별조건과 강소성/탄소성 유한요소해석 적용에 관한 연구", 한국 해양공학회, 제 13권, 제 2호, pp. 1-10, 1999.
- [8] W. Y. Yang, S. Y. Lee, Y. T. Keum, J. Y. Hwang, C. S. Yoon, C. S. Shin and W. S. Cho, "Spring-back Control in the Forming Processes for High-Strength Steel Sheets", Transactions of Material Processing, Vol. 12, No. 8, pp. 718-723, 2003.
- [9] 고희훈, 안현길, 이찬호, 강동규, 설남기, 이광식, 정동원, "셸 요소를 이용한 박판성형공정의 불량 예측 평가", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문 요약집, pp. 143,

2005.

- [10] [http:// www.steel-n.com/esales/general/kr/catalog/cold_rolled](http://www.steel-n.com/esales/general/kr/catalog/cold_rolled)
- [11] J. H. Cho, "Quality Property of Cold Rolled Steel for Automotive Application", Transactions of Material Processing, pp. 55-62, 1996.
- [12] K. Mattiasson, A. Strange, P. Thilderkvist and A. Samuelsson, "Spring-back in sheet metal forming", NUMIFORM'95, pp. 115-124, 1995.
- [13] F. Pourboghrat and E. Chu, "Prediction of spring-back and side-wall curl in 2-D draw bending", Journal of Materials Processing Technology50, pp. 361-374, 1995.
- [14] T. Kawaguchi, S. Imatani and K. Yamaguchi, "An elasto-viscoplastic finite element analysis of sheet metal vending process", J. JSTP, Vol. 35, pp. 125-130, 1994.
- [15] N. He and R. H. Wagoner, "Springback simulation in sheet metal forming", NUMISHEET'96, pp. 308-315, 1996.
- [16] 양동렬, 이상욱, 윤정환, 유동진, "박판성형에서의 스프링백 해석과 산업적 응용", 한국소성가공학회지, 제 8권, 제 1호, pp. 1119-1128, 1990.
- [17] 이종문, 이용익, 신용승, 김현영, "리어사이드 프레임의 금형설계를 위한 성형해석과 트라이 아웃", 한국소성가공학회 '98 추계학술대회 논문집, pp. 17-21, 1998.
- [18] D. W. Jung and H. G. Ahn, "study of analyzing roof panel using static implicit finite element method", Korea society of precision engineering, Vol. 22, pp. 78-85, 2005.
- [19] 정상보, "선택적 membrane / shell 요소를 이용한 2차원 스트레칭 공정의 탄소성 유한요소해석,"한국과학기술원", 1991.
- [20] E. Reissner, "The effect of transverse shear deformation on the bending of

elastic plate”, ASME J. Appl. Mech., Vol. 12, pp. 69-76, 1945.

[21] 이상진, “명시적인 동적 시간이력해석을 위한 사절점 가변형도 평판요소”, 한국전산구조공학회 논문집, 제 14권, 제3호, pp. 349-359, 2001.

[22] S. S. Han, “Sheet Metal Forming Analysis with a Modified Membrane Finite Element Formulation Considering Bending Effect”, A thesis submitted to the faculty of the Korea advanced institute of science and technology of doctor of philosophy in the department of precision engineering and mechatronics, 1993.



감사의 글

짧은 기간의 석사 과정을 마지막 학위 논문과 함께 마무리 하려 합니다. 아직은 좀더 배우고 경험하며 얻고 싶은 것이 많기에 석사 과정의 끝이 아쉽기만 합니다. 조금은 늦게 시작한 석사 생활 동안 부족한 것도 많았지만 좀더 많은 것을 얻어 갈 수 있도록 그리고 이후의 진로에 대한 계획을 세워나갈 수 있도록 많은 도움을 주신 정동원 교수님과 논문 심사를 통해 석사 기간 중 마지막 논문인 학위 논문의 질을 한 단계 높일 수 있도록 격려와 조언을 아끼지 않으신 김귀식 교수님과 박운철 교수님께 지면을 통해 깊은 감사의 말을 남깁니다. 또한 대학 학사 생활의 4년과 석사 생활 2년간 학업에 전념할 수 있도록 이끌어 주신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님, 조경호 교수님, 임종환 교수님, 최경현 교수님, 강철웅 교수님, 김상재 교수님께도 감사의 뜻을 전합니다. 또한 대학원 생활의 시작에서 졸업까지 컴퓨터원용정형가공 실험실에서 많은 도움을 주고, 어렵게 얻은 자신의 지식을 아낌없이 건네주었던 현길, 졸업 후 학과 사무실에서 바쁜 조교 업무 속에서도 많은 관심과 도움을 준 이승훈 선배님과 먼저 졸업한 대학동기 세웅과, 경조에게도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 인생은 끝없는 배움의 연속이라 하지만, 무엇인가를 배우는데 있어 가장 좋은 시기가 있다고 생각합니다. 제 2년간의 석사생활이 그렇지 않았나 합니다. 남들 보다 조금 늦게 시작하긴 했지만 여러 교수님들과 선배, 동기, 후배들의 도움과 관심으로 짧은 기간 속에서도 많은 것을 배워가고 많은 것을 얻어갑니다. 아마 제 인생에 있어 제주대학교 기계공학과 대학원에서의 2년간의 석사 생활은 정말 큰 의미로 남을 것이며, 이후 제 진로 선택에 있어서도 큰 힘으로 작용 할 것입니다. 저에게 이토록 기쁜 배움의 기회를 갖도록 해준 기계공학과에 깊은 감사의 뜻을 남기며, 감사의 글을 마치고자 합니다.

마지막으로 언제나 곁에서 믿어주고 기다려주신 부모님과 누님들과 항상 옆에서 제 편이 되어주고 힘이 되어준 형과 매형에게 깊은 고마움을 전합니다.

2005년 12월 고흥훈