

碩士學位請求論文

미세패턴 금형개발에 관한 연구

濟州大學校 大學院

機械工學科



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金 炯 宗

2005年 7月

미세패턴 금형개발에 관한 연구

指導教授 鄭 東 垣, 崔 斗 善

金 炯 宗

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 7月

金炯宗의 工學 碩士學位 論文을 認准함



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

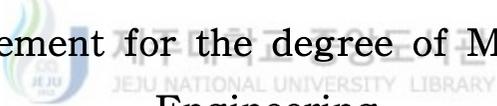
濟州大學校 大學院

2005年 7月

A Study on the Development of
Micro-Patterned Dies

Hyung-Jong Kim
(Supervised by professor
Dong-Won Jung, Doo-Sun Choi)

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

July 2005

목 차

NOMENCLATURE	i
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
1-1 연구의 개요	1
1-2 연구의 목적과 범위	2
II. 박관성형 이론	4
2-1 유한요소 수식화	4
2-2 성형한계곡선과 이방성	7
2-3 미세패턴 형상의 분류 및 특성	13
2-3-1 피라미드 구조 형상	13
2-3-2 직조금속망 형상	14
2-3-3 덩플 구조 형상	15
III. 박관 성형 공정 해석	16
3-1 내부 구조 형상과 배열의 정의	16
3-2 해석 모델 설계 및 해석결과	19
3-2-1 반경비 1일 때 성형해석결과	21
3-2-2 반경비 0.45일 때 성형해석결과	30
3-2-3 평탄면 형상 성형해석결과	39

IV. 미세패턴 금형제작 및 실험	44
4-1 미세패턴 금형설계 및 제작	44
4-1-1 프레스 금형설계 및 제작	44
4-1-2 롤 성형기 및 롤 금형 설계/제작	46
4-2 성형실험 및 결과	50
4-2-1 프레스 성형실험 및 결과	50
4-2-2 롤 성형실험 및 결과	54
V. 결론 및 고찰	57
VI. 참고문헌	59

NOMENCLATURE

- E : 탄성계수
 R : Lankford 수
 t_i : 외력(Surface traction)의 Cartesian 좌표계 성분
 τ^{ab} : Kirchhoff stress의 contravariant 성분
 S^{ab} : 2차 Piola-Kirchhoff 응력의 contravariant 성분
 B_L, B_N : Lagrangian strain의 선형부분과 비선형부분과 변위와의 관계 matrix
 E_α, E^α : 시간 t_0 에서의 covariant 베이스 벡터와 contravariant 베이스 벡터
 e_α, e^α : 시간 $t_0 + \Delta t$ 에서의 covariant 베이스 벡터와 contravariant 베이스 벡터
 G_{ab}, G^{ab} : 시간 t_0 에서의 covariant 메트릭 텐서와 contravariant 메트릭 텐서
 g_{ab}, g^{ab} : 시간 $t_0 + \Delta t$ 에서의 covariant 메트릭 텐서와 contravariant 메트릭 텐서
 u_i : 변위벡터의 Cartesian 좌표계 성분
 u_α, u^α : 변위벡터의 질점좌표계 성분
 $L^{a\beta\gamma\sigma}$: 응력의 Truesdell 변화율과 Lagrangian 변형도 응력과의 구성방정식 텐서
 ε : Lagrangian 변형도 텐서
 $\varepsilon_{ab}, \varepsilon^{ab}$: Lagrangian 변형도 텐서의 covariant와 contravariant 성분

- $e_{\alpha\beta}$: Lagrangian 변형도 텐서 $\varepsilon_{\alpha\beta}$ 의 선형부분
 $\eta_{\alpha\beta}$: Lagrangian 변형도 텐서 $\varepsilon_{\alpha\beta}$ 의 비선형부분
 θ^α : 국부질점좌표계 성분
 τ : Kirchhoff 응력텐서
 σ : Cauchy 응력 텐서
n : 가공경화 지수
R : 불균형 힘 벡터
r : 수직이방성 계수



SUMMARY

Sandwich structures, which are composed of thick core between two thin faces, are commonly used in many engineering applications because they are combined to high stiffness and strength with low weight.

Sheet metal forming is one of the most widely used process in manufacturing. Deformation mode of sheet metal, during forming process, is very complex.

Generally, dies are designed by experienced designers based on trial and error method. But this type of die design practice is very inefficient and time consuming.

In order to overcome the expensive trial and error practice, the simulation technique based on Finite Element Method(FEM) becomes popular to optimize die design and it is already regarded as an essential tool to develop a new product in some industries.

In this study, Elastic-Plastic finite element method was used in order to be introduced. Through the FLD analysis according to the pattern changes, we have confirmed the deformed shape and formability distribution.

Also, we have fabricated the dimple press mold according to the pattern changes, and obtained the dimple inner structure the forming experiments.

I. 서론

1. 1 연구의 개요

자동차, 항공, 선박, 가전, 건축 및 방위 산업 등 현대 사회의 핵심 기간산업은 제품의 대부분을 금속 판재를 이용하여 제품을 생산한다. 따라서 향상된 물성 특성을 갖춘 금속 판재를 이용함으로써 기존 제품의 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 이러한 관점에서, 현대 사회는 에너지 자원이 점차 고갈되어 가고 있고 소비자의 기호 수준이 향상되어 고성능의 제품을 요구하고 있으므로, 높은 에너지 효율성과 구조의 안정성 및 신뢰성을 동시에 만족시킬 수 있는 초경량, 고강도 재료 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 고속 운행과 강한 내충격성을 요구하는 자동차, 항공 및 방위 산업 분야에서는 초경량, 고강도 박판의 내부 구조물 개발이 절실히 요구되고 세계적으로 샌드위치 구조의 박판재 개발이 각광받고 있다.[1-3]

샌드위치 구조는 무게에 비해 뛰어난 굽힘강성과 강도 때문에 가벼우면서도 견고한 구조물에 많이 사용되는데, 대부분의 경우 샌드위치 구조는 상판, 하판, 중간 구조물로 구성되며, 이들은 구조적 형태를 유지하면서 서로 접합되어 있다. 이러한 구조물은 우수한 방음성과 단열성을 가지고, 무게에 비해 월등히 강도가 큰 장점이 있으나 제작 및 가공상의 어려움이 단점으로 지적된다.[4]

경량 구조 설계에 대한 수요가 증가함에 따라 많은 공학자들은 최신 설계 기법과 첨단 재료 개발에 박차를 가하고 있다. 이와 같은 연구개발 분야에 적합한 재료중의 하나로서 복합재료로 만든 샌드위치 구조물이 있는데 고응력, 저중량 특성으로 인해 많은 구조설계 분야에 응용되고 있다. 특히 최근 들어

이러한 재료들은 무게와 부피가 대단히 중요한 설계인자로 되는 항공기 구조물에 사용되고 있을 뿐 아니라 자동차 구조에서도 샌드위치 형태의 구조물이 채택되고 있어 그 응용 범위가 확산일로에 있다. 샌드위치 구조물은 얇은 두 외재(Face Sheet)와 내재(Core)로 접착된 구조물이며 내재는 보통 가볍고 전단에 강한 재료를 사용하는 반면 외재는 인장에 강한 재료가 사용된다. 따라서 샌드위치 구조는 높은 강도와 강성을 가지며 가벼운 중량을 지니게 된다.

1. 2 연구의 목적과 범위

박판성형 공정의 탄소성 유한요소 해석은 사용하는 유한요소의 종류에 따라 박막해석, 쉘 해석 및 연속체 해석 등의 크게 3가지의 범주로 나눌 수가 있다.[5]

박막해석법은 계산시간이 적다는 장점 때문에 여러 가지 박판성형 공정에서 가장 널리 사용되고 있는 방법이나 굽힘이 지배적인 공정에 적용하였을 경우에는 부정확한 정보를 제공할 가능성이 많다.[6] 연속체 해석법은 굽힘 효과를 고려할 수 있고, 수식화가 간단하다는 장점이 있으나 3차원 문제를 해석할 경우에는 계산에 소요되는 시간이 과도할 뿐만 아니라 계산기에 요구되는 기억용량이 매우 크게 요구되기 때문에 주로 축대칭이나 평면변형과 같은 2차원 문제에만 주로 적용되고 있다.[7] 그리고 쉘 해석법은 앞서의 연속체 해석과 박막 해석법의 타협적인 해석방법으로 간주될 수 있다. 즉 상대적으로 적은 계산 시간으로 굽힘의 효과까지 고려할 수 있으나 3차원 쉘의 경우 역학적인 거동을 다루기가 어려우며 계산시간 등의 관점 때문에 이 역시 2차원 문제에만 주로 사용되고 있다.[8]

본 연구는 내부구조재로 활용이 가능한 판재 형태의 미세패턴 딥플에 관한

형상 및 배열에 변화를 주어 4가지 형태의 형상을 설계하여 탄소성 유한요소 해석 프로그램인 Dynaform을 이용하여 성형 완료후의 형상을 예측하고 각각의 성형 과정에서의 두께 변화를 분석하여 성형 가능성을 예측하였다. 성형 해석 결과를 통한 미세패턴 덤플 프레스 금형을 설계 제작하였다. 제작된 금형을 통한 실험을 통해 해석을 통한 결과와 비교하였다. 또한 대량 생산에 유리한 롤 성형 시스템에 대한 필요에 의해 미세패턴 덤플 롤 금형을 설계 제작하였고 성형력과 토크 측정이 가능한 소형 롤 성형 시스템을 설계 제작하였다. 성형 시스템 제작시 상부 롤 금형의 위치조정이 가능하도록 제작하여 패턴 변화에 따른 성형 실험을 수행하여 프레스 성형 실험과 병행하여 연구를 수행하였다.



II. 박판성형 이론

2.1 유한요소 수식화

탄소성 유한요소법은 탄성해석으로부터 발전되어 왔고 60년대에 Marcal, Yamada, Zienkiewicz 등에 의해 미소 변형 이론에 입각하여 정식화 되었다.[9-11]

이 방법에 사용된 탄소성 재료에 대한 응력-변형률 매트릭스는 Hill에 의해 유도되었고, Yamada등에 의해 매트릭스 형태로 표현되었다.[12]

$G_{\alpha\beta}$ 와 $g_{\alpha\beta}$ 를 각각 변형전과 변형후의 메트릭 텐서, $G^{\alpha\beta}$ 와 $g^{\alpha\beta}$ 를 각각의 역을 나타낸다. 또한 변형전의 베이스벡터를 E_i 이의 역을 E^α 로 하고 변형후의 베이스벡터를 e_i 이의 역을 e^α 로 하면 다음의 식이 성립된다.

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

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

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

변형전의 상태에서의 변위 벡터 u 는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 $u^\alpha = G^{\alpha\beta} u_\beta$ 이고 그리스 첨자는 질점 좌표계의 성분임을 표시하고 라틴첨자는 직교 Cartesign 좌표계의 성분임을 나타낸다. 질점 좌표계에서의 Lagrangian 변형도 텐서 ϵ 는 다음의 식으로 표현된다.

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

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

여기서 ,(comma)는 변형전의 상태를 기준한 covariant 미분을 나타낸다. Lagrangian 변형도 텐서를 선형 부분과 비선형 부분으로 분리하면

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

여기서 $e_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha}), \eta_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}u^\gamma{}_{,\alpha} u_{\gamma,\beta}$

대변형을 고려한 updated Lagrangian 수식은 다음의 식으로 표현된다.

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

2nd Piola-Kirchhoff 응력증분과 Lagrangian 변형도와의 관계로 주어지는 구성방정식 텐서 $L^{\alpha\beta\gamma\rho}$ 에 대하여 응력증분 $\Delta S^{\alpha\beta}$ 는

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

식 (8) 및 식 (9)에 대한 자세한 유도 과정은 Shim과 Yang[13]의 논문의 부록에 나타나 있다. Hill의 이방성 소성이론을 만족하는 평면응력 탄소성 구성방정식은 다음과 같다.[14]

$$L^{a\beta\gamma\rho} = \frac{E(1+R)}{1+2R} \left\{ \frac{1}{2} (g^{\alpha\gamma} g^{\beta\rho} + g^{\alpha\rho} g^{\beta\gamma}) + R g^{a\beta} g^{\gamma\rho} \right\} \\ - \Gamma \frac{E^2 \tau^{a\beta} \tau^{\gamma\rho}}{\sigma^2 (E+h')} - \frac{1}{2} (g^{\alpha\gamma} \tau^{\beta\rho} + g^{\beta\gamma} \tau^{\alpha\rho} + g^{\alpha\rho} \tau^{\beta\gamma} + g^{\beta\rho} \tau^{\alpha\gamma}) \quad (10)$$

여기서 그리스 첨자는 1부터 2사이의 범위를 나타낸다.

식 (8)과 식 (9)을 결합하면 탄소성 재료에 대한 최종적인 updated Lagrangian 수식은 다음과 같이 얻어진다.

$$\int_{V^0} L^{a\beta\gamma\rho} e_{a\beta} \delta e_{\gamma\rho} dV + \int_{V^0} \tau^{a\beta} \frac{\partial u_i}{\partial \theta^\alpha} \frac{\partial \delta u_i}{\partial \theta^\beta} dV \\ = \int_{S_{t_0+\Delta t}^0} \delta u_i dS - \int_{V^0} \tau^{a\beta} \delta e_{a\beta} dV \quad (11)$$

질점좌표계에서의 2nd Piola-Kirchhoff 응력 텐서의 성분은 Kirchhoff 응력 텐서의 성분과 같아진다는 점을 이용하면 응력적분의 과정이 다른 좌표계를 택하였을 경우에 비하여 매우 간단해진다. 식(11)으로부터 변위가 구해지면 응력의 증분은 식 (9)를 이용하여 구할 수 있고 시간 $t_0 + \Delta t$ 에서의 응력의 성분은 다음의 식 (12) 및 식(13)을 이용하면 구할 수 있다.

$$(S^{a\beta})^{(t_0+\Delta t)} = (S^{a\beta})^{t_0} + \Delta S^{a\beta} \quad (12)$$

$$(\tau^{a\beta})^{(t_0+\Delta t)} = (S^{a\beta})^{(t_0+\Delta t)} \quad (13)$$

또한 재료를 비압축성이라고 가정하면 Kirchhoff 응력 텐서 τ 는 Cauchy 응력 텐서 σ 와 같아진다.

2.2 성형한계곡선과 이방성

판재의 성형성은 기본적으로 딥 드로잉(deep drawing)성, 장출(stretching)성, 굽힘가공(bending)성 및 신장 플렌지(stretch flange)성으로 대별된다. 실제 가공에 있어서는 이들 성형모드가 복잡하게 조합되어 있어 소재의 성형한계는 그 가공의 주된 변형모드가 이들 중 어느 것에 해당하는지를 판별하여 평가하고 있다. 판재가 프레스 가공 시 받는 응력 상태는 복합응력상태가 대부분이기 때문에 이들 중 어느 한가지의 성질만으로 성형성을 정확히 나타내기는 곤란하다.

직접적인 모의성형성시험으로 swift 컵 시험, Erichsen 시험, Conical 컵 시험 등이 각각 드로잉모드, 스트레칭모드 및 복합성형모드에서의 소재의 성형 특성을 나타내기 위해 사용되고 있으나 재현성의 부족, 재료상수 및 공정변수들과의 관련성 희박 등의 이유로 광범위한 적용이 제한되고 있다. 따라서 재료의 실제 사용조건에 가장 유사한 방법으로 실험실적 시험을 실시하여 성형성을 평가할 필요성이 대두되었고 Keeler와 Goodwin에 의해 성형한계도(Forming Limit Diagram, FLD)의 개념이 도입된 이래로 원형 그리드 해석법

(Circle Grid Analysis)과 함께 판재의 성형성을 평가하는 가장 일반적인 방법으로 인식되게 되었다.

성형한계도란 판면의 주 및 부 변형률의 비를 변화시키면서 파단이 일어나는 한계 주 및 부 변형률을 측정하여 주 및 부 변형률 평면상에 도시한 것이다. Fig. 1은 성형한계도를 나타내고 있다. 이 성형한계도는 Fig. 2와 같이 일반적으로 끝이 둥근 편치에 의한 스트레칭(stretching)에 의해서 측정된다. 즉, 원형의 그릿드가 프린트 된 판재의 주위를 링 형상의 다이로 꼭 잡은 상태에서 반구형의 끝을 가진 편치로 파단이 일어날 때까지 눌러서 파단부 주위의 변형된 원 직, 타원의 장축과 단축의 길이를 측정함으로써 얻어진다. 판의 폭과 윤활조건을 변화시킴으로써 주 및 부 변형률의 비를 변화시킬 수 있다. 실제 성형공정에서 일어나는 변형률의 조합이 Fig. 1에서 성형한계 곡선의 상단부에 있으면 파단이 일어나고 그 하단부에 있으면 안전하다는 것을 의미한다.

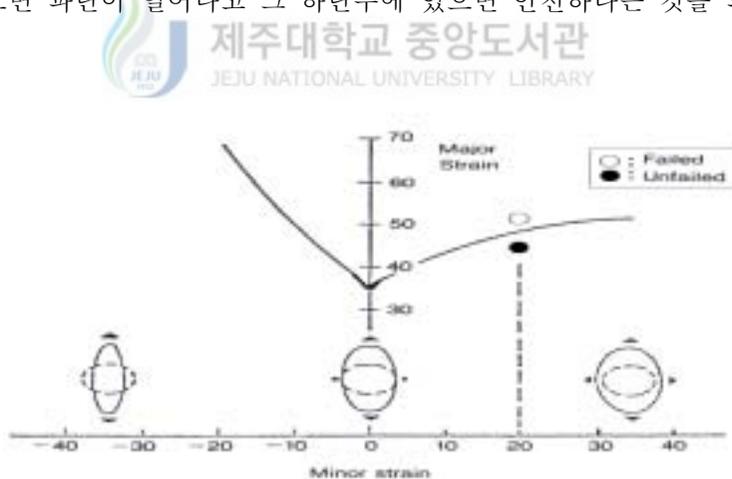


Fig. 1 Forming limit diagram(FLD)

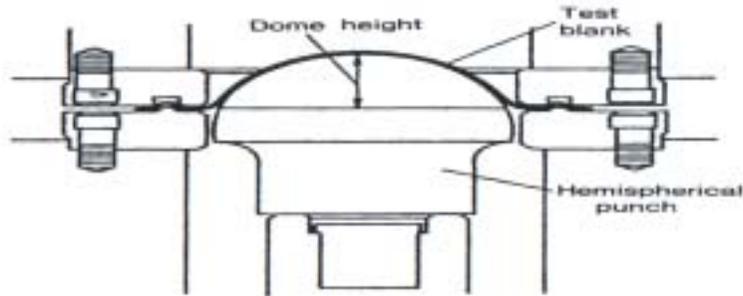


Fig. 2 Geometric description of the tooling for deep drawing

성형한계도의 한계변형률은 원형 그릿드의 직경, 소판에서 시편을 채취한 방향, 윤활조건, 판의 두께, 변형이력, 변형률 속도 등에 따라서 영향을 받는다. 그릿드 원의 직경이 작아질수록 성형 한계가 약간씩 높아지고 실제에 보다 가깝게 된다고 할 수 있다. 그러나 측정상의 오차는 점차 증가하게 된다. 재료의 이방성 때문에 소판에서 시편을 채취하는 방향에 따라서도 성형 한계에 있어서 다소의 차이가 나타나게 된다. 펀치-판재간의 윤활조건에 따라서 판단부 주위의 주-부 변형률비가 변함은 물론 성형 한계에 있어서도 다소의 차이가 나타난다. 즉, 윤활조건이 개선되면 성형 한계가 약간 높아진다. 판재의 두께가 두꺼워질수록 성형 한계가 높아지는 경향을 보인다. 변형이력 즉, 변형경로의 변화에 따른 영향은 보통의 시험 및 작업조건 범위에서는 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.[15-17]

성형한계도의 크기는 FLD_0 라고 부르는 평면변형시에 상응하는 값인 ϵ_1^* 값에 의하여 특징 지워진다. 이 값은 가공경화지수 n 과 변형속도지수 m 이 커질수록 증가한다. 원칙적으로 m 이 0이라면 평면변형네킹은 $\epsilon_1=n$ 일 때 시작되어야 한다. 그러나 실험적으로 얻어지는 FLD_0 는 항상 더 큰 값이 얻어진다. 여기에는 몇 가지 이유가 있다. 그 하나는 실험적으로 네킹이 관찰되기 전에

어느 정도의 네킹이 일어나기 때문이며, 그리고 변형속도 의존성이 있다면 네킹이 발견되기 전에 네킹부위 바깥에 재료가 계속하여 변형하기 때문이다. 또한 네킹부위 바로 옆 부분에서 네킹의 영향에 따른 변형률의 변화가 있어도 이 부위에 있는 격자원들은 안전한 원으로 취급함에 따라 실험적으로 FLD_0 가 더 크게 얻어질 수 있다. FLD 의 오른쪽 기울기는 저탄소강에 비하여 황동이나 오스테나이트 스테인레스강에서 보다 낮다. 이것은 이 금속들의 가공경화지수가 높은 것에 원인이 있다.

가끔 평면변형조건 ($e_2=0$)이 아니고 e_2 가 적은 양의 값을 가질 때 최소값의 성형한계가 얻어지는 경우가 있다. 이것은 펀치모양으로 판재가 굽힘변형하기 때문이라는 설명이 지배적이다. 만약 판재 중앙층에 평면변형 ($e_2=0$)이 작용한다면, 측정이 일어나는 판재 바깥표면에서는 e_2 가 인장일 것이다.

다른 실험결과에 의하면 성형한계도의 형태는 R값의 크기에 상관없음이 밝혀졌다. 거의 같은 강도를 갖는(따라서 n과 m 값이 거의 유사함) 저탄소강들에서 비록 R값의 차이가 크게 나더라도 거의 유사한 FLD 가 얻어졌다.

또한 실험적인 관찰에 의하면 판재의 두께가 증가하면 FLD 가 증가한다. Fig. 3은 강판으로 실험한 결과를 보여준다. 이것에 대해서는 몇 가지의 설명이 가능하다. 서로 두께가 다른 판재로 실험을 할 때에 두꺼운 판재에서 생겨나는 네킹은 보다 넓은 면적에 영향을 주지만 격자원들의 크기는 변하지 않는다. 그러므로 두꺼운 판재에서는 네킹 중심부에서 하나 또는 두 개 떨어진 원에서 네킹에 의한 영향이 크게 나타난다. 더욱이 금형 자체는 두꺼운 판재를 사용할 때도 변하지는 않지만 판재의 두께가 두꺼울수록 판재의 굽힘반경은 줄어든다. 그런데 바깥면과 중심선에서 측정되는 변형률의 차이도 커진다. 금형과 접촉하는 면에는 마찰이 작용하고 그 반대쪽 표면에서 측정을 하는 것도 이것에 영향을 주는 것이다.

$n \leq 0.21$ 일때 그림에선 다음 식과 같은 경향이 보여진다.

$$FLD_0 = \frac{n}{0.21} (23.3 + 359t)$$

여기서 n 은 가공경화지수이고 t 는 판재두께를 inch 단위로 표시한 것이다. (만약 판재두께를 mm로 표시하면 t 앞에 있는 상수가 14.1이 됨) Fig. 3에서 $n > 0.21$ 인 구역에서는 FLD_0 에 미치는 n 의 영향이 보여지지 않는다. 최근의 연구결과에 의하면 n 이 증가할수록 FLD_0 가 증가함도 보여졌다.

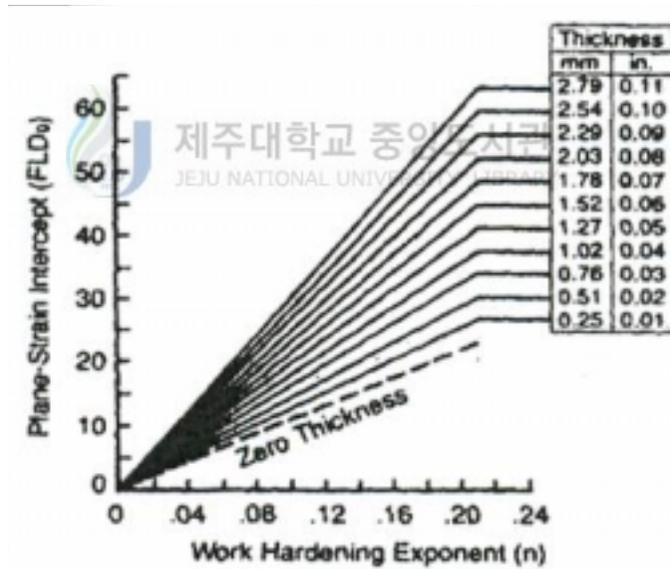


Fig. 3 Effect of thickness and strain hardening exponent on FLD_0

금속판재성형에서의 또 다른 중요한 인자는 판재의 이방성, 즉 방향성이다. 이방성은 판재의 열 및 기계적 가공이력에서 생기는데, 결정학적 이방성과 기

계적 섬유화가 있다. 이방성은 판재 면에만 나타나는 것이 아니고, 두께방향으로도 생길 수 있다. 이 때, 전자를 평면이방성, 후자를 수직이방성 또는 소성이방성이라고 한다. 금속판재의 수직이방성지수 r 이 크면 딥드로잉성이 향상된다. 그 이유는 정상적인 딥드로잉 공정에서는, 컵의 벽면에 길이방향으로 높은 인장응력이 걸림으로써 파단이 일어난다. 재료가 다이공동부로 움직이는 것을 관찰해 보면 재료는 폭이 줄어들면서 컵 벽면에서는 길이 방향으로 인장응력을 받아야한다. 두께에 대한 폭 방향 변형률의 비는 (14)식으로서 r 은 금속판재의 수직이방성이라고 한다. 수직 이방성이 크게 되면 길이 방향의 변형률이 크게 된다. 즉 같은 길이로 늘어난다고 가정하면, 수직 이방성이 크게 되면 보다 작은 인장응력이 생기고 파단을 지연시키므로 딥드로잉성이 향상된다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

$$r = \frac{w}{t} = \frac{\ln\left(\frac{W_0}{W_f}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t_f}\right)} \quad (14)$$

그리고 판재성형에서 성형한계도의 왼쪽영역에서 변형률을 조절하는 것이 좋은 이유는 Fig. 1을 보면 곡선의 위치가 높을수록 재료의 성형성이 좋다고 할 수 있다. 또한 그림에서 판재의 파단 시에 같은 부변형률의 크기, 예를 들어 20%로 압축된 경우(음의 부변형률)가 20%로 인장된 경우보다 큰 주변형률 값을 가지며, 이로부터 부변형률은 음의 값, 즉, 단축방향으로 수축을 일으키는 것이 성형성을 향상시킬 수 있는 방법임을 알 수 있다. 따라서 오른쪽보다는 왼쪽 영역에서 작업하는 것이 좋다고 하겠다. 수직이방성과 평면이방성을 구하는 법은 두 가지 방법이 있다.

첫 번째로는 $\bar{r} = (r_0 + 2r_{45} + r_{90}) / 4$ 으로 구하는 방법과 두 번째로 $\Delta r = (r_0 - 2r_{45} + r_{90}) / 2$ 으로 구하는 방법 두 가지가 있다. 전자에서의 첨자 0, 45, 90은 채취된 시편이 압연방향과 이루는 각도로서, 등방성 재료인 경우에는 \bar{r} 값이 1 이 되며, 후자에서는 압연방향에 대하여 0°, 90°방향의 평균 r값과 45°방향의 r값의 차를 나타낸다.[18]

2.3 미세패턴 형성의 분류 및 특성

2.3.1 피라미드 구조 형성

익스팬디드 메탈은 마름모꼴의 격자를 가지는 철망의 한 종류로 재료의 손실이 없고 대량생산되는 상용 철망이다. 이러한 익스팬디드 메탈을 Fig. 4와 같이 일정 각도로 크리핑(crimping)하면 손쉽게 피라미드 구조를 성형할 수 있음이 알려져 있다. 피라미드 구조의 특징은 3차원 공간에 의한 높은 상대밀도를 가진다.

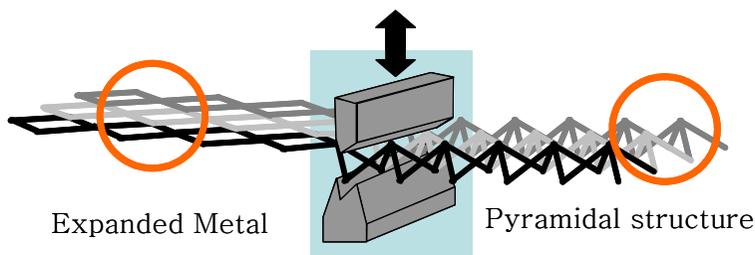


Fig. 4 Crimping process

3차원 피라미드 구조가 가지는 공간율의 정도를 파악하기 위해 상대밀도를

정의한다. 상대밀도란 내부구조재가 차지하는 정방형 공간을 동일재료가 차지할 때의 밀도에 대한 내부구조의 밀도 비를 의미한다. 피라미드 구조는 크립핑 각도에 따라 구조물의 높이가 변화하여 상대 밀도에 영향을 준다. 크립핑 각도를 θ 구조의 높이를 h 라 할 때 기하학적 계산으로 얻어진 피라미드 구조의 상대밀도는 다음과 같다.

$$\rho_r = \frac{\rho_{pyramid}}{\rho_{solid}} = \frac{4l_1ab}{l_2Bh} = \frac{8ab\sqrt{A^2+B^2}}{A^2B \cdot \sin\theta}$$

$$l_1 = \frac{1}{2}\sqrt{A^2+B^2}$$

$$l_2 = A \sin \frac{\theta}{2}$$

여기서 l_1 은 피라미드 구조의 대각선의 길이, l_2 는 밑면의 길이, h 는 구조의 전체 높이이다.

2.3.2 직조 금속망 형상(Woven metal)

피라미드 구조가 크립핑 공정을 통해 얻어지는 것과는 달리 직조금속은 그 자체를 내부구조재로 사용가능한 금속으로 Fig. 5에 직조금속망 구조를 나타내었다. 크립핑 공정이 없기 때문에 피라미드 구조에 비해 비교적 낮은 상대 밀도를 가진다. 그러나 직조 금속의 와이어는 제조 시 여러 단계의 신선(wire drawing) 과정을 거치기 때문에 재료가 가공경화 되어 강도가 매우 우수하다. 직조금속 역시 잘 알려진 범용재료로서 다양한 재료, 형상, 직조 형태를 가진다. 직조 금속망의 특징은 상대적으로 낮은 상대밀도를 가지고 기하학적 이방

성이 존재하고 와이어의 접합이 어렵다.

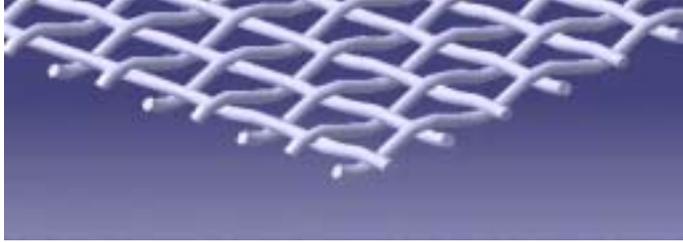


Fig. 5 Woven metal

2.3.3 딩플 구조 형상(dimple shape)

판재 형태의 딩플 형상을 Fig. 6에 나타내었다. 딩플 형상의 내부구조재는 금형제작을 통한 프레스 및 롤 성형에 의한 대량생산이 가능한 형태이다. 판재를 이용한 내부구조재의 제작을 통해 형상의 정밀도 향상 및 소재 손실 발생을 방지하고 용접을 통한 스킨 판재와의 접합성 또한 유리한 특성을 가진다.

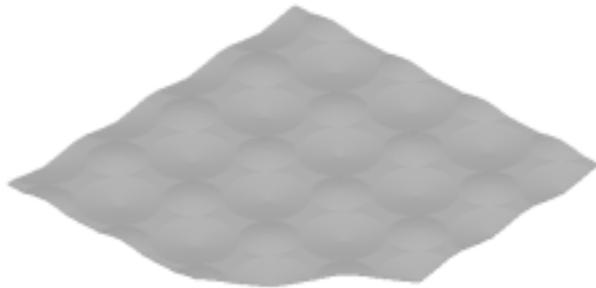
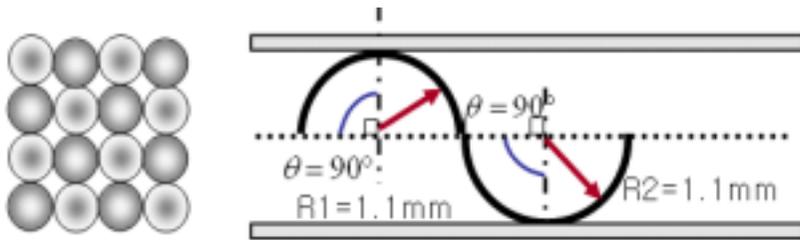


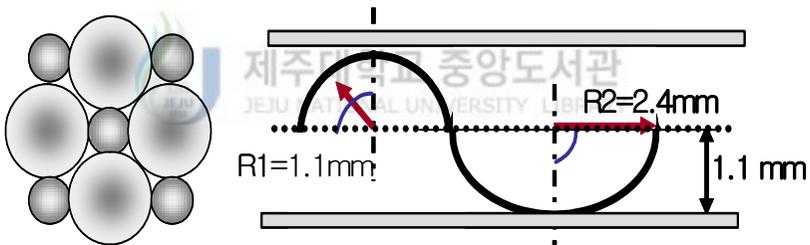
Fig. 6 Dimple shape

III. 박판 성형공정 해석

3.1 내부 구조 형상과 배열의 정의



(a) The same radius



(b) The different radius

Fig. 7 Shape of inner structure

Fig. 7(a)는 동일반경을 갖는 구조를 나타내었다. 엠보싱 형상과 딴플 형상 간의 반경비가 1인 것을 보여준다. 반경비가 1인 형상에 대해서는 펀치와 다이가 동일한 형상을 갖는 단순한 모델 형상을 나타낸다. Fig. 7(b)는 서로 다른 반경을 갖는 구조 형상으로 반경비 0.45일 때의 구조를 나타내었다.

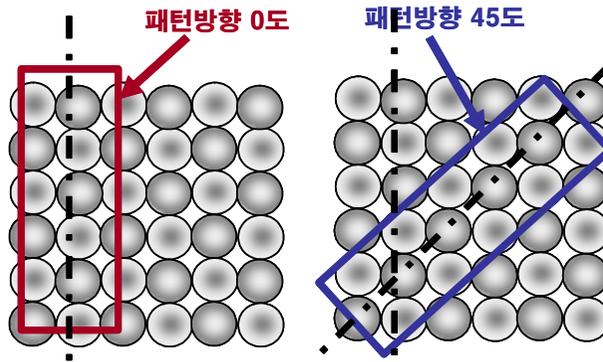


Fig. 8 Comparison of array

Fig. 8은 배열 각도에 따른 분류를 나타낸다. 배열 각도는 45도를 주기로 반복되고 90도인 경우는 0도인 경우와 동일하다.

Table. 1 Definition of pattern & array

정의	패턴 1	패턴 2	패턴 3	패턴 4
형상				

Table. 1은 형상 및 배열 변화에 따른 각각의 구조에 대한 정의를 나타내었

다. 반경비가 1이고 패턴방향이 0도인 경우를 패턴 1로 정의하였고 동일반경을 갖고 패턴방향이 45도인 경우를 패턴 2로 정의하였다. 패턴3은 반경비가 0.45이고 패턴방향이 0도인 경우이고 패턴4는 패턴3과 동일 반경비를 갖고 패턴방향이 45도인 경우로 정의하였다.

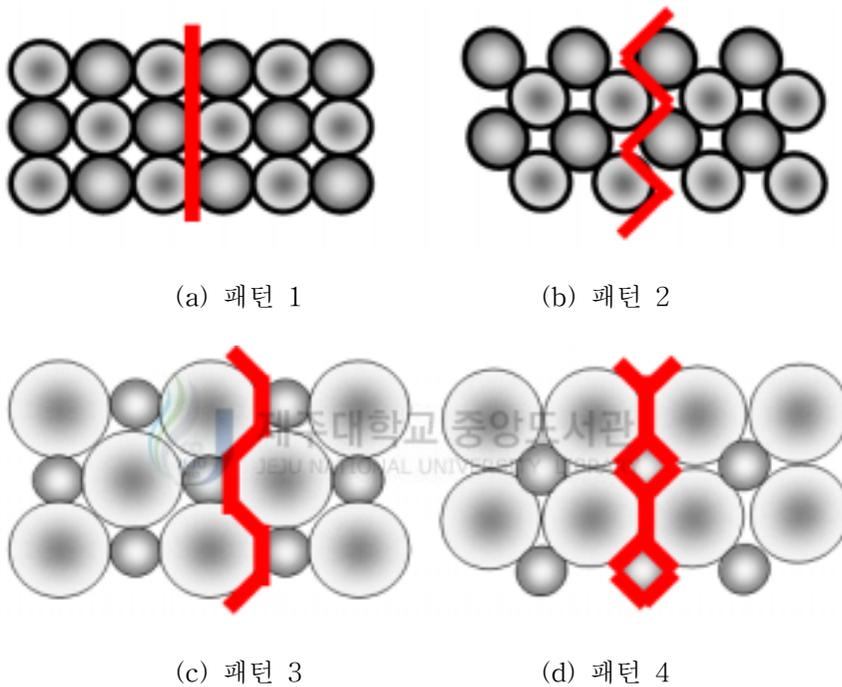


Fig. 9 Plastic hinge line

Fig. 9는 각각의 패턴에서 plastic hinge line 발생 형태를 비교 하였다. 패턴 1인 경우 plastic hinge line이 발생하여 굽힘하중에 대한 강도가 저하 될 것으로 보이지만 다른 패턴인 경우 plastic hinge line 발생이 억제되어 굽힘 하중에 대한 강도가 개선 될 것으로 예상된다. 이중 패턴 4인 경우가 가장 좋은 결과를 보일 것으로 예상된다.

3.2 해석모델 설계 및 해석결과

형상 및 배열 변화에 따라 정의된 형상을 갖고 프레스 성형해석모델을 설계하여 Fig. 10에 나타내었다. 본 장에서는 박판금속성형 해석에 유용한 Dynaform을 사용하였고 성형 해석 시 다이와 펀치는 강체로 가정하였으며 다이는 고정시키고 펀치의 z축 방향으로의 상하이동을 통해 성형 해석을 수행하였고 성형해석의 차수와 입력조건을 Table. 2에 나타내었다.

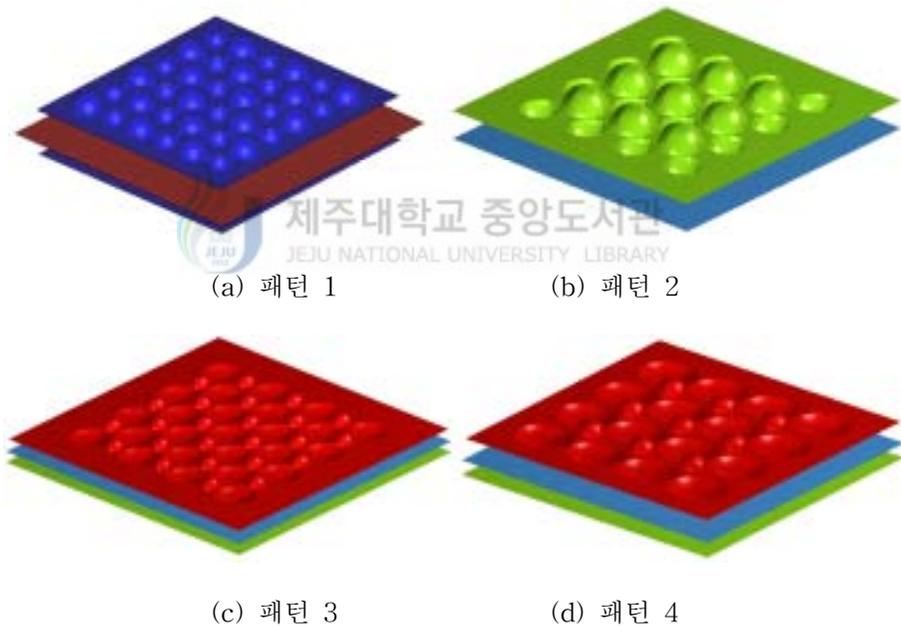


Fig. 10 Analysis model

Table. 2 Input condition

Analysis degree	Analysis model	Material	Thickness	Condition
1st	pattern 1	STS304	0.2t	10 KN
2nd	pattern 2	STS304	0.2t	10 KN
3rd	pattern 2	STS304	0.2t	50 mm/sec
4th	pattern 3	STS304	0.2t	50 mm/sec
5th	pattern 4	STS304	0.2t	10 KN
6th	pattern 4	STS304	0.2t	50 mm/sec

블랭크의 소재는 자동차, 항공 및 방위 산업 분야에서 많이 사용되는 STS304 소재를 사용하였으며 각각의 소재에 대한 기계적 성질을 Table. 3에 나타내었다.

Table. 3 Mechanical properties of STS304

	STS304
Mass Density(g/cc)	7.9
Tensile Strength(MPa)	520
Young's Modulus(GPa)	210
Poisson Ratio	0.3

3.2.1 반경비 1일 때 성형해석결과

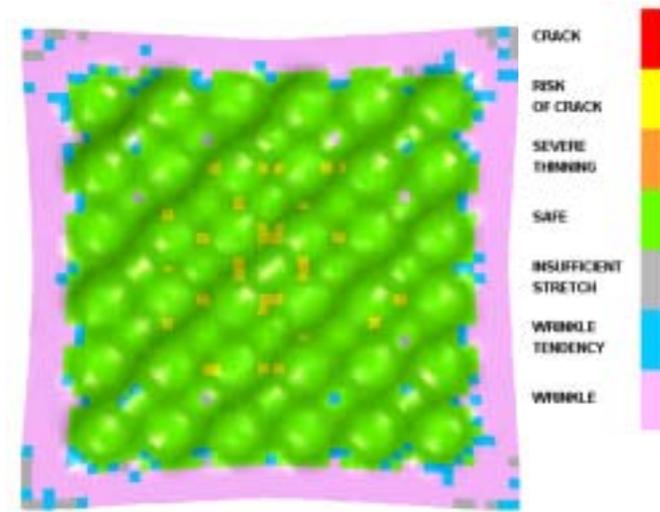


Fig. 11 Deformed shape and formability distribution

Fig. 11은 패턴 1인 경우에 펀치압력 10KN을 주었을 때 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포를 나타내었다. 블랭크의 외곽부분에 주름이 발생하고 오목하게 휘는 현상이 발생했다. 형상 외곽 부위에 균열발생의 위험이 보이고 있으나 전체적으로 안전한 성형이 될 것으로 예측된다.

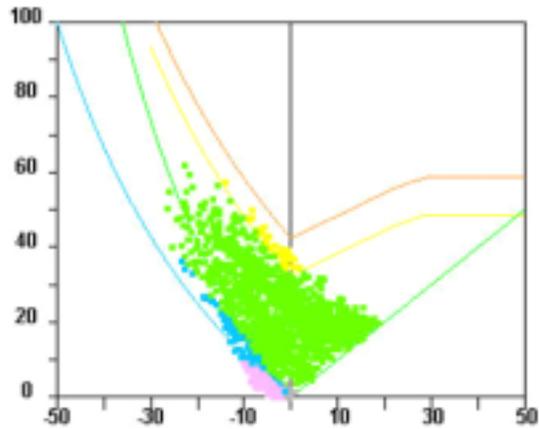


Fig. 12 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 12은 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과이다. 성형 완료 후의 시뮬레이션 분포 결과를 보면 외곽부분에 주름발생으로 인한 주름 발생 분포를 확인할 수 있고 약간의 균열 발생 위험 분포가 있지만 대부분 안전영역에 분포함을 알 수 있다.

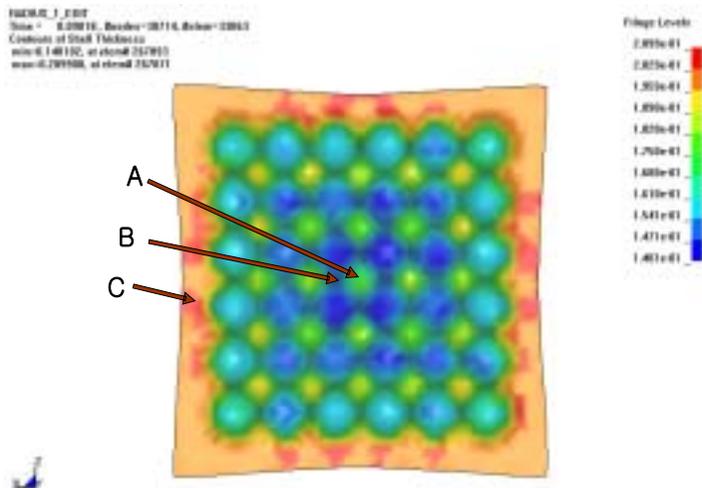


Fig. 13 Thickness distribution

Fig. 13은 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.209908 mm로 약 5.0%의 두께 증가를 나타내었고, 형상 주변에서 최소값 0.140102 mm로 약 30.0%의 두께 감소를 나타내었다. STS304의 연신율에 비추어 볼 때 성형 안전성은 양호하다고 판단된다.

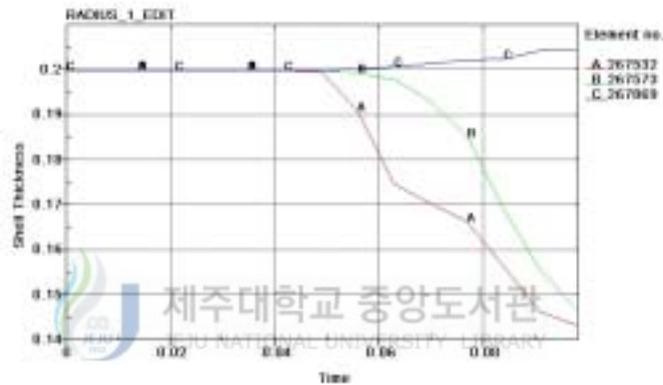


Fig. 14 Graph of thickness variation according to time

Fig. 14는 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 형상, 형상주변, 그리고 외곽 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 형상 A부분에서는 초기 성형시 전형적인 두께 감소를 보였고, 형상 주변 B 부분에서는 형상 A부분과 유사한 흐름에 두께 감소를 보여주어 A부분과 큰 차이가 없는 결과를 보여주었다. 외곽 C 부분에서는 성형시 서서히 두께 증가가 일어나서 초기 블랭크의 두께 보다 약간의 증가를 보였다.

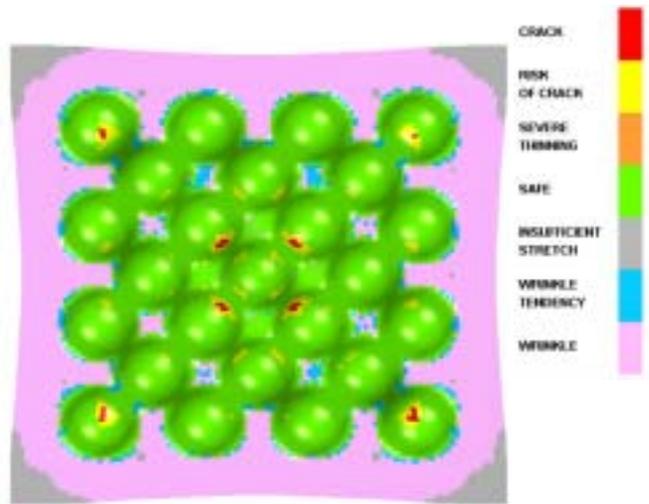


Fig. 15 Deformed shape and Formability distribution

Fig. 15는 패턴 2인 경우에 펀치압력 10kN을 주었을 때의 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들을 성형해석 결과로 나타내었다. 패턴 1의 결과와 유사한 블랭크의 외곽부분에 주름이 발생하고 오목하게 휘는 현상이 발생했다. 패턴 1의 결과에서는 형상 주변에서 균열 발생에 위험의 가능성이 보였지만 패턴 2인 경우에는 균열이 확실히 발생할 것으로 예측된다. 또한 패턴 2인 경우에는 패턴간의 여유 공간이 존재함으로 인해 패턴 1에 비해 많은 주름경향을 보여주었다.

Fig. 16은 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과를 나타내었다. 성형 완료 후의 시뮬레이션 결과에서 보았듯이 외곽부분에 주름 발생 및 주름 경향 분포를 나타내었고 균열 발생위험 및 중심부 형상에서의 균열 발생이 있었음을 분포로 보여주었다.

로 약 36.4%의 두께 감소를 나타내어 패턴 1의 결과 보다 약 6.4% 정도의 두께감소율을 더 보였다. 패턴 1의 결과와 패턴 2의 결과를 비교해 본 결과 단면 두께 변화가 30%인 경우는 균열 발생이 없었지만 36%인 경우 균열발생이 있는 것으로 보아 STS304소재의 균열 발생은 30%와 36% 사이 구간에서 발생할 것으로 보인다.

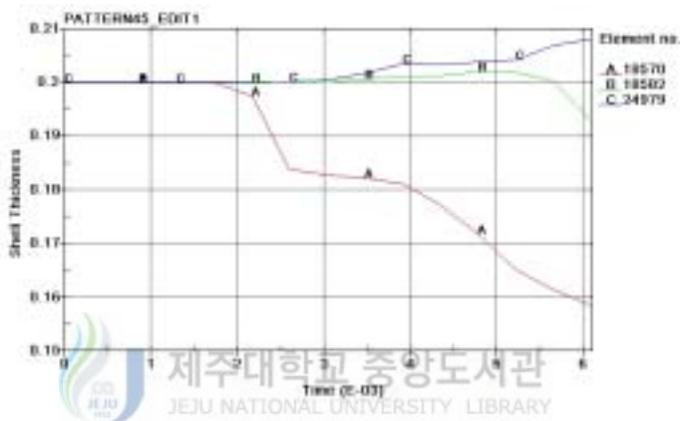


Fig. 18 Graph of thickness variation according to time

Fig. 18은 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 패턴 1의 경우에서와 동일한 부분을 선택하여 그래프에 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 형상 A부분은 패턴 1의 해석결과와 동일한 결과를 보여주었고 B부분은 두께변화가 초기에 약간 증가하다가 성형 완료 시점에서 약간의 두께 감소가 있었다. 여기서는 패턴 1과는 달리 직접적인 성형이 발생하는 부분이 아니며 성형이 발생하는 패턴간의 소성유동에 따라 약간의 두께 변화만이 발생하였다. 외곽 C부분 역시 패턴 1의 성형 해석 결과와 동일한 결과로 성형시 약간의 두께 증가를 보여주었다.

실제 성형 실험 방법에서 펀치압력을 주는 경우와 펀치속도를 주면서 하는

경우가 있다. 여기서는 펀치압력을 주었을 경우와 펀치속도를 조건으로 주었을 때 성형해석결과에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

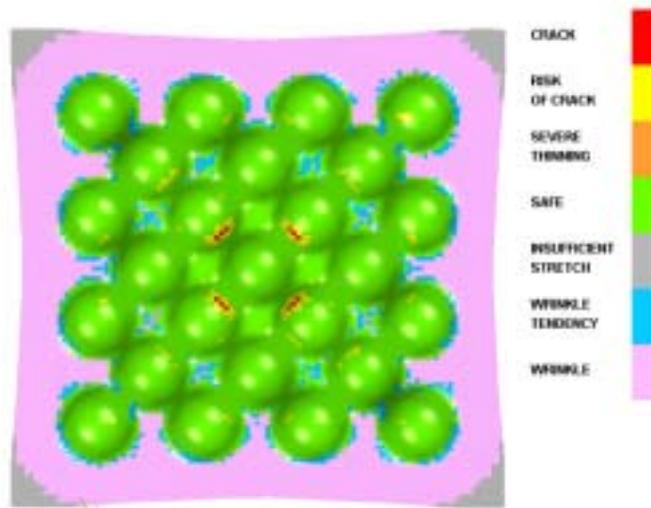


Fig. 19 Deformed shape and Formability distribution

Fig. 19는 패턴 2인 경우에 펀치속도 50 mm/sec로 성형 해석을 수행한 경우에 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포를 나타내었다. 펀치압력을 주었을 때의 해석결과에서는 펀치가 내려갈 거리를 정해주고 그 거리까지 펀치압력으로 해석을 수행하였지만 이번 성형해석에서는 펀치속도를 주어 해석을 수행하였다. 펀치압력을 주었을 경우에 해석 결과와 유사한 결과를 보여주었지만 균열 발생은 많이 줄어들었음을 확인 할 수 있었다.

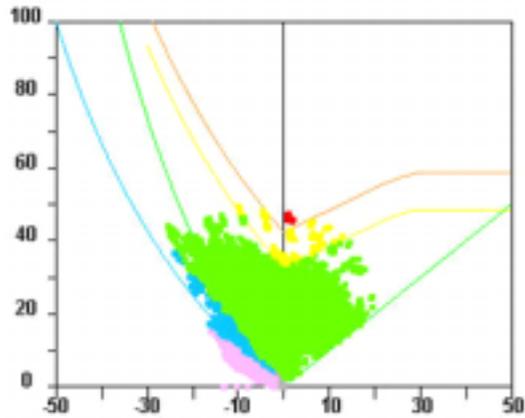


Fig. 20 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 20은 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과이다. 편치압력을 주었을 때의 성형해석 결과와 마찬가지로 외곽부분에 주름발생이 있었고 패턴간의 여유 공간의 존재로 인한 주름 경향이 있었다. 또한 형상에서의 균열 발생위험 및 중심부 형상에서의 약간의 균열 발생이 있었음을 보여주었다.

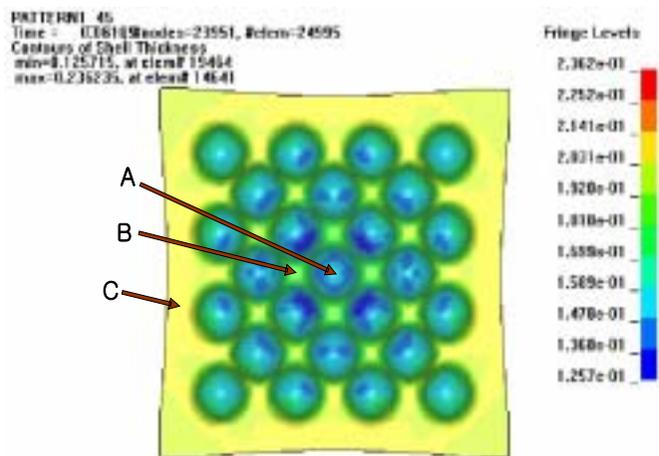


Fig. 21 Thickness distribution

Fig. 21은 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.236235 mm로 약 18.1%의 두께 증가를 나타내어 편치압력을 주었을 때의 성형 해석결과보다 약 10.0%의 두께 증가가 더 발생함을 보였고, 형상 주변에서 최소값 0.125715 mm로 약 37.1%의 두께 감소를 나타내어 2차 성형해석 모델보다 약 0.7%의 두께감소가 더 발생함을 보였다.

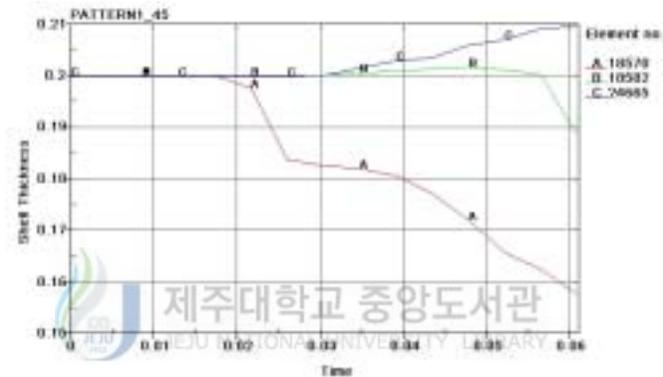


Fig. 22 Graph of thickness variation according to time

Fig. 22는 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 편치압력을 주었을 때의 성형해석결과에서와 동일한 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 형상 A부분과 C부분은 편치압력을 주었을 때의 성형해석 결과와 두께 변화 추이가 거의 동일하였고 B부분 큰 차이는 없었지만 약간의 두께 감소가 더 나타났다. 동일 모델에 대해 성형해석 조건에 변화만므로 비교해 보았지만 두께 변화 추이는 거의 유사하여 실제 성형시 편치압력 10KN인 경우와 편치속도 50mm/sec인 경우로 성형 실험을 수행하였을 경우 유사한 성형 결과를 보일

것으로 보인다.

3.2.2 반경비 0.45일 때 성형해석결과



Fig. 23 Deformed shape and Formability distribution

Fig. 23은 패턴 3인 경우에 펀치속도 50mm/sec를 주었을 때의 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포를 나타내었다. 패턴 3인 경우 역시 블랭크의 외곽부분에 주름이 발생 및 외곽부분에서 오목하게 휘는 현상이 발생했다. 작은 반경의 대각선 방향으로 균열발생 위험을 보이고 가로 및 세로 방향으로 주름 경향을 나타내었다. 성형 완료시 균열 발생은 없을 것으로 보이고 있으나 전체적으로 안전한 성형이 될 것으로 예측된다.

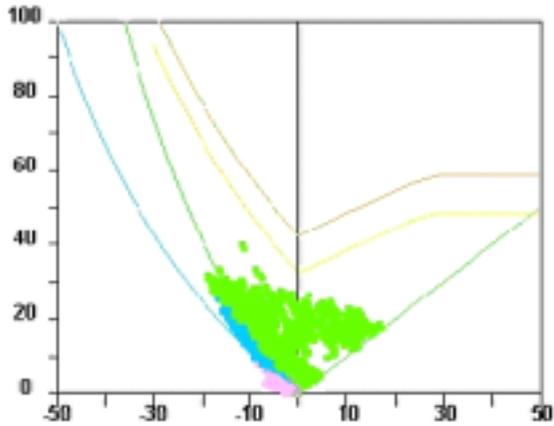


Fig. 24 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 24는 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과이다. 성형 완료 후 시뮬레이션 결과분포를 보면 외곽부분에 주름발생으로 인한 주름 분포를 나타내었고 가로 및 세로 방향으로의 약간의 주름 경향 분포를 나타내었다. 대부분 안전영역에 분포하고 균열발생은 없을 것으로 예측된다.

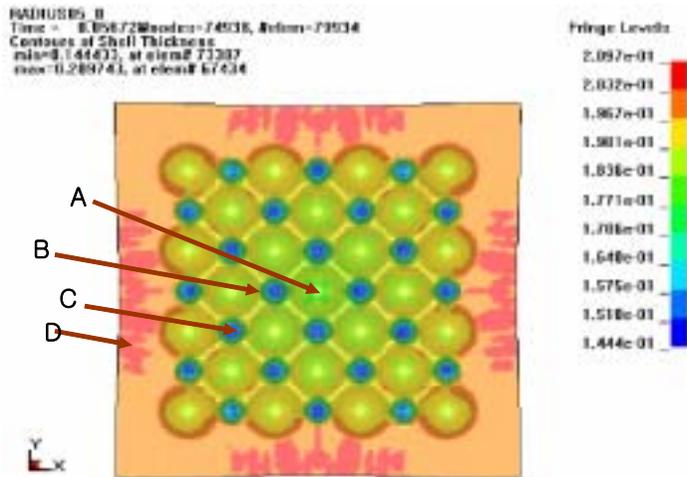


Fig. 25 Thickness distribution

Fig. 25는 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.209743 mm로 약 4.9%의 두께 증가를 나타내었고, 작은 반경 형상 주변에서 최소값 0.1444433 mm로 약 27.8%의 두께 감소를 나타내었다.

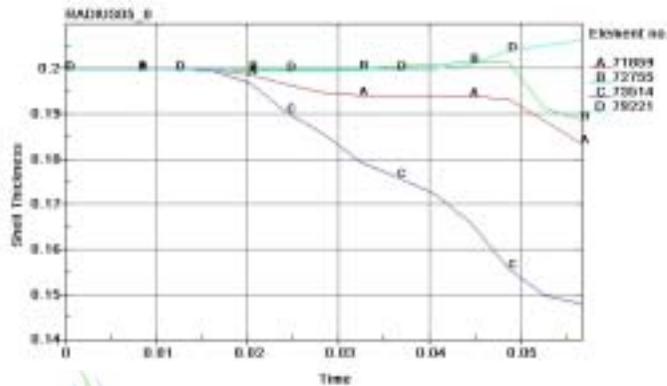


Fig. 26 Graph of thickness variation according to time

Fig. 26은 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 작은 반경형상과 큰 반경형상, 형상주변, 그리고 외곽 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 작은 반경형상 C부분에서는 성형시작 시점부터 일정하게 두께 감소를 보여 두께 변화에 최소값과 큰 차이가 없었고 큰 반경 형상 A에서는 성형 초기에 약간의 두께 감소를 보인 후 잠시 두께 변화가 없다가 성형 완료 시점에서 약간의 두께 감소를 더 나타내었다. 형상 주변 B 부분에서는 약간의 두께 증가를 보이다 성형 완료 시점에서 약간의 두께 감소를 보였지만 큰 반경 형상에서의 두께 변화 보다는 적게 나타났다. 외곽 D부분에서는 초기에 두께 변화가 거의 없다가 성형 완료 시점에서 약간의 두께 증가를 보여 반경비 1인 경우에 성형 해

석 결과와 동일한 두께 변화 추이를 나타내었다.

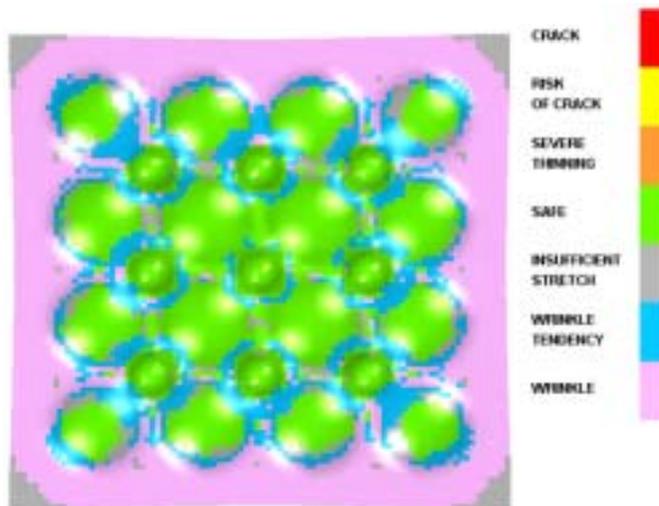


Fig. 27 Deformed shape and Formability distribution

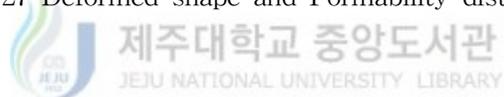


Fig. 27은 패턴 4인 경우에 펀치압력 10KN을 주었을 때의 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포를 나타내었다. 패턴 3인 경우는 가로 및 세로 방향으로의 블랭크의 외곽부분에 주름이 발생하였지만 패턴 4인 경우에는 사선방향으로 주름발생 경향을 보였다. 또한 외곽부분에서 오목하게 휘는 현상이 발생했다. 패턴 3인 경우와 달리 패턴 4인 경우에는 균열 발생은 없을 것으로 예측된다.

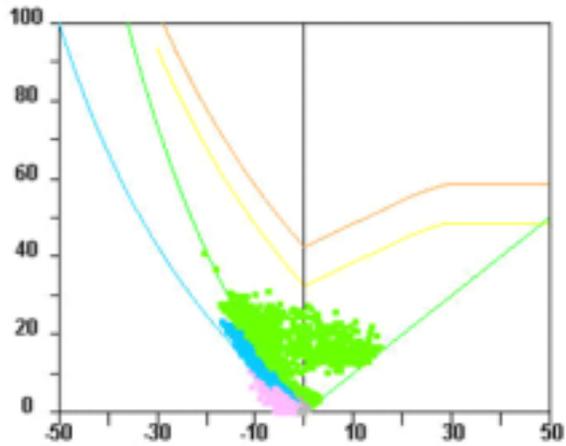


Fig. 28 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 28은 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과이다. 성형 후 시뮬레이션 결과를 분포로 나타낸 결과를 보면 외곽부분 및 형상 주위에서 발생된 주름 분포 및 주름 경향 분포를 나타내었고 대부분 안전영역에 분포하고 균열발생은 없을 것으로 예측된다.

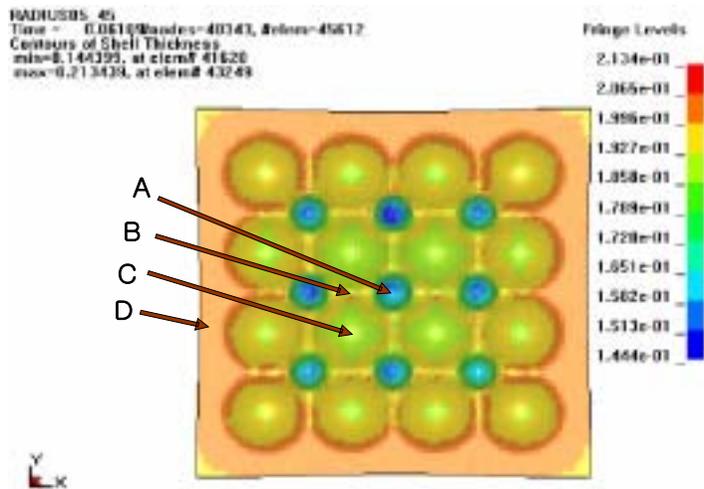


Fig. 29 Thickness distribution

Fig. 29는 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.213439 mm로 약 6.7%의 두께 증가를 나타내었고, 작은 반경 형상 주변에서 최소값 0.144399 mm로 약 27.8%의 두께 감소를 나타내었다. 패턴 3인 경우에서의 성형 해석결과와 비교하여 블랭크의 외곽부분에서의 주름 발생으로 인한 두께 증가 최대값은 1.8% 정도가 감소하였고 작은 반경 형상부분에서의 두께 변화 최소값은 동일한 값을 나타내었다.

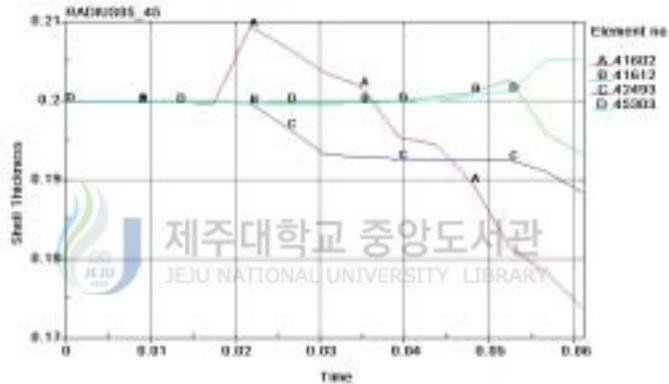


Fig. 30 Graph of thickness variation according to time

Fig. 30은 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 작은 반경형상과 큰 반경형상, 형상주변, 그리고 외곽 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 작은 반경형상 A부분에서는 초기 성형시 두께의 증가를 보이다 급격한 두께 감소를 나타내어 최소 두께값을 보였다. 형상 주변 B 부분에서는 패턴 2와 패턴 3인 경우와 동일한 형태의 두께 변화 추이를 나타내었다. 큰 반경 형상 C부분에서는 초기에 선형적인 감소를 보이다 잠시 두께 변화가 없다가 성형 완료 시점에서

약간의 두께 감소를 보였다. 외곽 D부분에서는 초기에 두께 변화가 거의 없다가 성형 완료 시점 근처에서 약간의 두께 증가를 보였다.

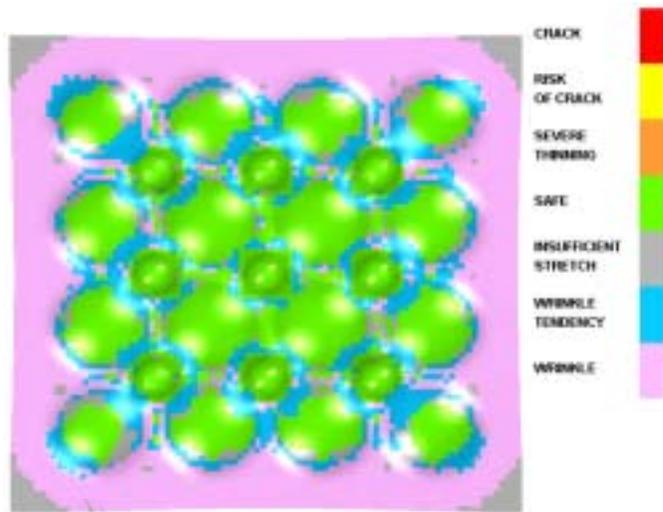


Fig. 31 Deformed shape and Formability distribution

Fig. 31은 패턴 4인 경우에 펀치속도 50mm/sec를 주었을 때의 내부구조체의 성형 완료후의 변형된 형상들을 성형해석 결과로 나타내었다. 여기서는 동일 패턴에서 성형조건을 변화시켰을 때 성형 완료 후의 변형된 형상들을 비교해 보았다. 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포 결과를 보면 거의 유사한 성형성 분포를 나타내어 성형 해석시 펀치압력 10KN인 경우와 펀치속도 50mm/sec인 경우에 성형해석에서는 유사한 실험결과를 얻을 것으로 예상된다.

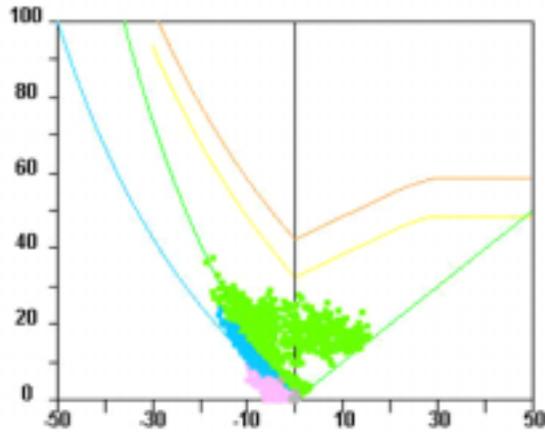


Fig. 32 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 32는 성형 해석 결과의 요소별 분포를 성형한계곡선에 나타낸 결과이다. 성형 시뮬레이션에서 보았듯이 외곽부분에 주름발생이 있었고 패턴간의 여유 공간의 존재로 인한 주름 경향이 있었다. 또한 균열 발생위험 및 중심부 형상에서의 균열 발생이 있었음을 보여준다.

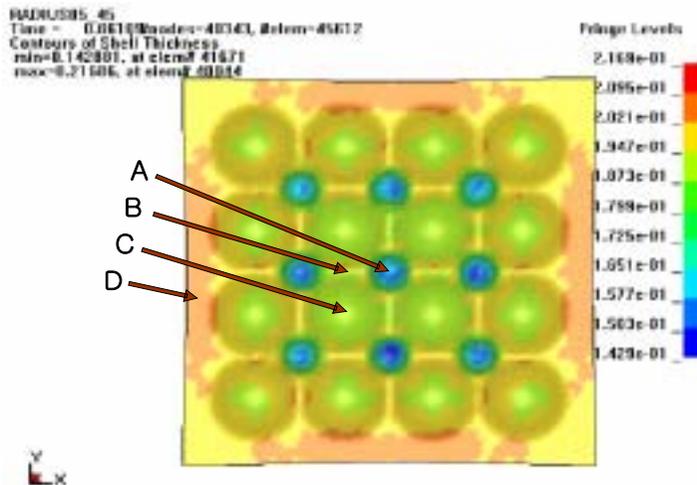


Fig. 33 Thickness distribution

Fig. 33은 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.21686 mm로 약 8.4%의 두께 증가를 나타내어 패턴 3인 경우에 결과보다 약 3.5%의 두께 증가를 더 보였고 동일모델에서 펀치압력을 준 경우에서의 성형해석 결과보다 약 1.7%의 두께 증가를 나타내었다. 작은 반경 형상 주변에서 최소값 0.142881 mm로 약 28.6%의 두께 감소를 나타내어 패턴 3인 경우와 패턴 4에서 펀치압력을 주었을 때의 성형해석 결과보다 0.8%의 두께감소율의 증가를 나타내었다.

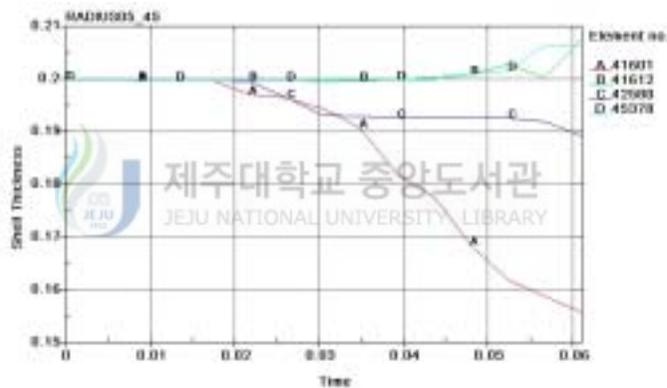


Fig. 34 Graph of thickness variation according to time

Fig. 34는 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 패턴 4에서 펀치압력을 주었을 때의 성형해석 결과에서와 동일한 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 작은 반경 형상 A부분에서는 초기 성형시 거의 일정한 비율로의 두께 감소를 나타내면서 최소 두께값을 보였다. 형상 주변 B 부분에서는 두께 변화가 거의 없다 성형완료 시점에서 약간의 두께 증가와 감소를 하다가 최종 성형 완료

순간 약간의 두께 증가를 보였다. 큰 반경 형상 C부분에서는 초기에 약간의 두께 감소를 보이다 어느 시점 이후부터 거의 일정한 두께를 유지하다 성형 완료 시점에서 약간의 두께 감소를 보였지만 대체적으로 두께 변화는 작은 형상 부분에 비하면 미소하였다. 블랭크의 외곽 D부분에서는 초기에 두께 변화가 거의 없다가 성형 완료 시점 근처에서 약간의 두께 증가를 보였다.

3.2.3 평탄면 형상 성형해석결과

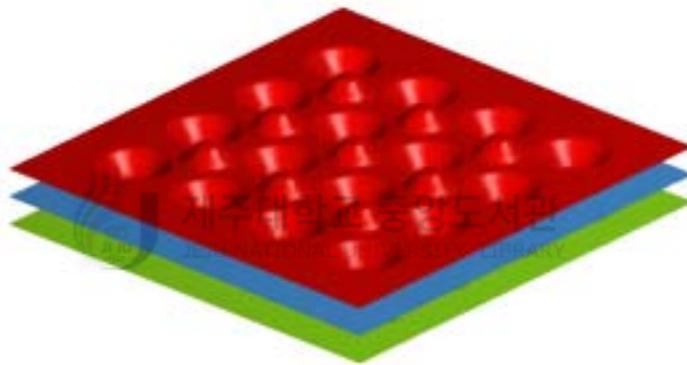


Fig. 35 Analysis model

형상과 배열 변화에 따른 반구 형태의 미세패턴 덤플 형상을 갖는 프레스 성형 해석 결과를 바탕으로 내부구조재로 활용하는데 유리한 패턴 4에 대한 형상에 대해 샌드위치 구조재로서 집합이 용이한 구조로 평탄면이 존재하는 형상을 설계하여 Fig. 35에 나타내었다. 박판금속성형 해석에 유용한 Dynaform을 사용하였고 성형 해석 시 다이와 펀치는 강체로 가정하였으며 다이는 고정시키고 펀치의 z축 방향으로의 상하이동을 통해 성형 해석을 수행하였고 해석에 사용된 소재는 STS304 0.2t를 사용하였고 z축 방향으로 펀치

속도 50mm/sec의 속도로 성형해석을 수행하여 패턴 4인 경우와 비교 분석하였다.

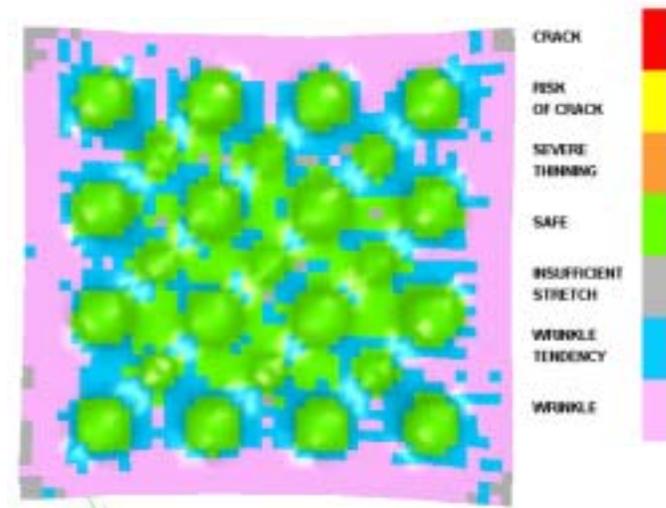


Fig. 36 Deformed shape and Formability distribution

Fig. 36은 50 mm/sec의 펀치속도를 주었을 때의 내부구조재의 성형 완료후의 변형된 형상들을 성형해석 결과로 나타내었다. 패턴 4에 대한 성형 완료후의 변형된 형상들과 성형성 분포를 비교해 보면 대체로 유사한 형태의 변형을 보여주었고 반구 형태인 경우의 해석결과 보다 많은 주름발생 경향을 나타내었다.

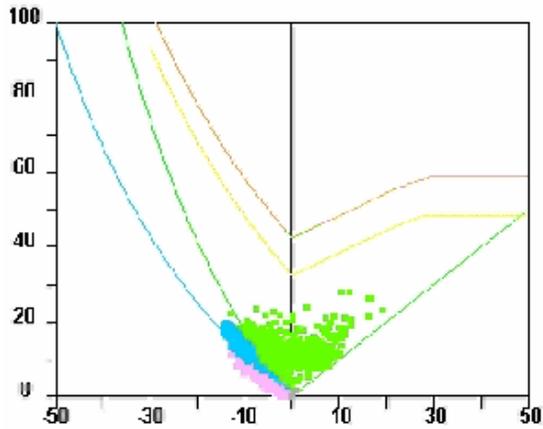


Fig. 37 Forming limit diagram distribution chart

Fig. 37은 FLD 해석은 성형한계곡선을 통해 블랭크의 균열 및 주름 경향을 판단하고 성형 후 상태를 예측할 수 있다. 성형한계곡선 역시 반구 형태와 비교하여 거의 유사한 분포를 보여주었다.

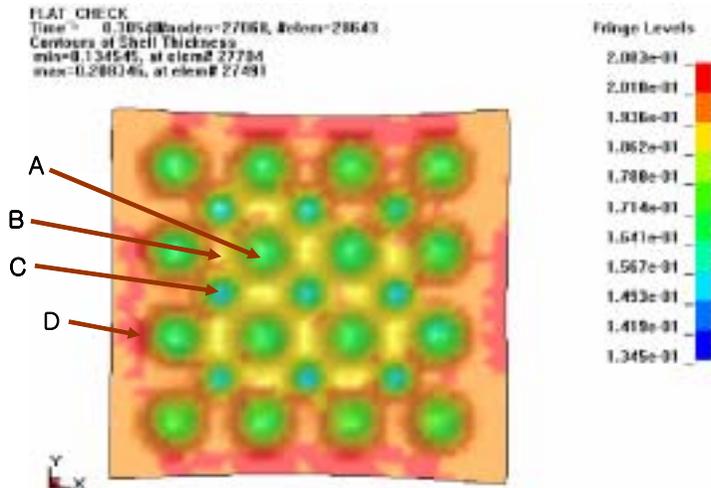


Fig. 38 Thickness distribution

Fig. 38은 내부구조재의 성형 완료후의 블랭크의 두께 변화에 대한 결과를 나타내었다. 두께 변화에 대한 값을 확인 해 본 결과 외곽 부분에서 최대값 0.208346 mm로 약 4.2%의 두께 증가를 나타내었고, 형상 주변에서 최소값 0.134545 mm로 약 32.7%의 두께 감소를 나타내었다. 반구 형태에서의 성형 해석결과와 비교해 보면 블랭크 외곽부분에서 약 4.2%의 두께 감소가 발생하였고 작은 반경 형상부분에서 발생된 두께 변화 최소값은 약 4.1% 정도 더 발생하여 반구 형상에 평탄면을 주었을 경우 두께 변화가 더 발생함을 알 수 있었다.

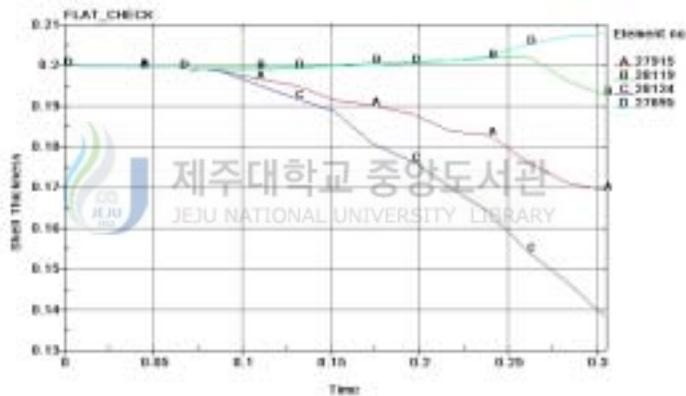


Fig. 39 Graph of thickness variation according to time

Fig. 39 내부구조재의 시간에 따른 블랭크의 두께 변화에 대한 결과에서 반구 형태 에서와 동일한 부분을 선택하여 그래프에서 시간에 따른 성형 과정에서의 두께 변화 추이를 나타내었다. 작은 반경 형상 C부분에서는 초기 성형시 거의 일정한 비율로의 두께 감소를 나타내면서 최소 두께값을 보였다. 이는 반구 형태의 성형해석결과와 일치함을 알 수 있었다. 형상 주변 B 부분에서는

두께 변화가 거의 없다 성형완료 시점에서 약간의 두께 증가를 보이다 감소를 하여 최초 블랭크의 두께보다 약간의 감소를 나타내었다. 큰 반경 형상 A부분에서는 작은 반경 형상과 마찬가지로 성형시 일정한 비율로 두께 감소를 나타냈지만 작은 반경 형상보다는 적은 두께 감소를 나타내었다. 블랭크의 외곽 D부분에서는 초기에 두께 변화가 거의 없다가 성형 완료 시점 근처에서 약간의 두께 증가를 보였다.

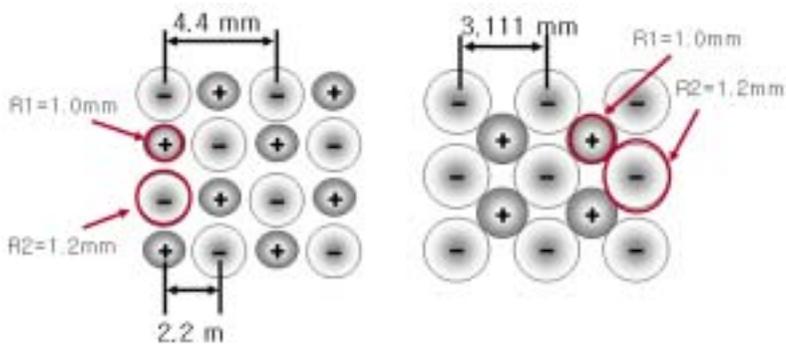


IV. 미세패턴 금형제작 및 실험

4.1 미세패턴 금형설계 및 제작

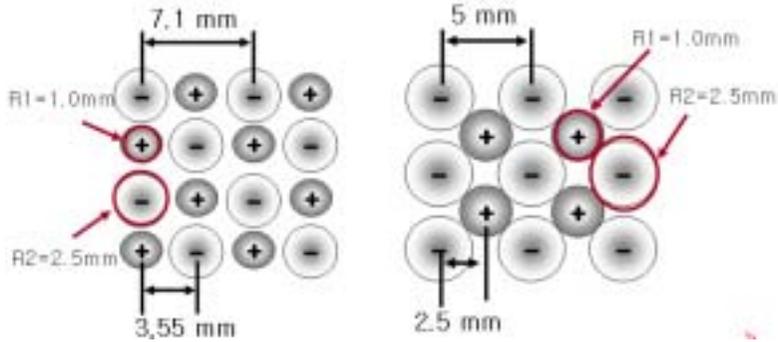
4.1.1 프레스 금형설계 및 제작

박판 성형을 통해 미세 패턴 내부구조물을 얻기 위해 필요한 금형 제작을 위한 형상 설계를 Fig. 39에 나타내었다. 패턴 1과 패턴 2는 상하부 금형 패턴이 동일 반경을 갖는 구조이면서 패턴의 방향만 45도 변경된 형상을 나타내었다. 패턴 1의 피치는 4.4mm로 설계되었고 패턴 2의 피치는 3.111mm로 설계되었다. 패턴 3과 패턴 4는 상부 금형 패턴과 하부 금형 패턴간의 반경비가 0.45인 경우에 구조이면서 패턴의 방향만 45도로 변경된 형상을 나타내었다. 패턴 3의 피치는 7.1mm로 설계되었고 패턴 4의 피치는 5mm로 설계되었다. 각각의 모델에 대한 형상설계를 Fig. 40에 나타내었다.



(a) 패턴 1

(b) 패턴 2



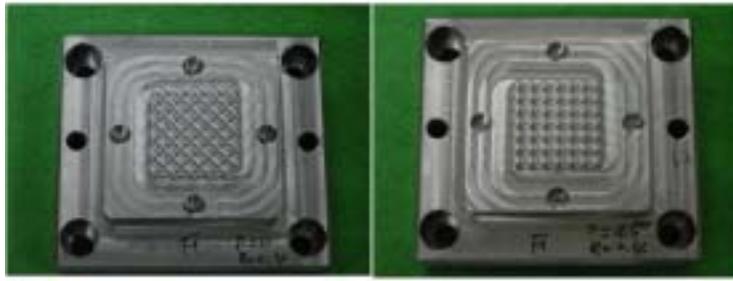
(c) 패턴 3 (d) 패턴 4

Fig. 40 Drawing of dimple shear

형상 및 패턴 변화에 따른 형상 설계를 바탕으로 금형제작을 하였다. 프레스 성형에 있어 금형의 소재로는 금형강(SKD11)을 사용하지만 본 실험에서는 프리하든강(HPM1)을 사용하였다. 금형강을 사용하는 것보다 열처리 및 그 외의 공정을 줄여 납기의 단축 및 비용의 감소를 얻을 수 있었다. 프리하든강은 특수용해에 의해 편흔의 원인인 내부결함을 방지함과 동시에 경도가 HRC40인 고경도강으로써 미세패턴 금형의 보다 정밀한 형상가공과 성형 시 필요조건인 피삭성, 고경도를 모두 갖춘 금형재료이다. Fig. 41은 제작된 딤플 프레스 금형의 모습을 나타내었다.



(a) 패턴 1 (b) 패턴 2



(c) 패턴 3

(d) 패턴 4

Fig. 41 Drawing of press mold with dimple

각각의 금형의 크기는 40×40mm 이상으로 제작되었고, 엠보싱 형상의 크기는 1.0mm 이고 댄플 형상의 크기는 1.2 mm로 제작되었다.

4.1.2 롤 성형기 및 롤 금형 설계/제작

박판 내부구조물 제작 방법으로 프레스 성형방법 이외에 롤 성형을 통한 방법이 있다. 프레스 성형을 통해서도 대면적 내부구조물을 제작하는데 어려움이 있다. 이러한 문제점 해결이 가능한 롤 성형 공정을 통해서도 대면적 형상에 대한 성형이 가능하고 대량생산 측면에서도 유리한 성형 방법이다. 이러한 롤성형 공정에 대한 연구의 필요로 인해 롤 성형 시스템을 제작하였다. 롤 성형 시스템을 제작하기 위해 먼저 롤을 구동할 구동부와 회전 및 토크 측정부를 구성하여 Fig. 42에 롤 성형 시스템을 설계하여 나타내었다.

Machine size : 1687.5×500×768 mm

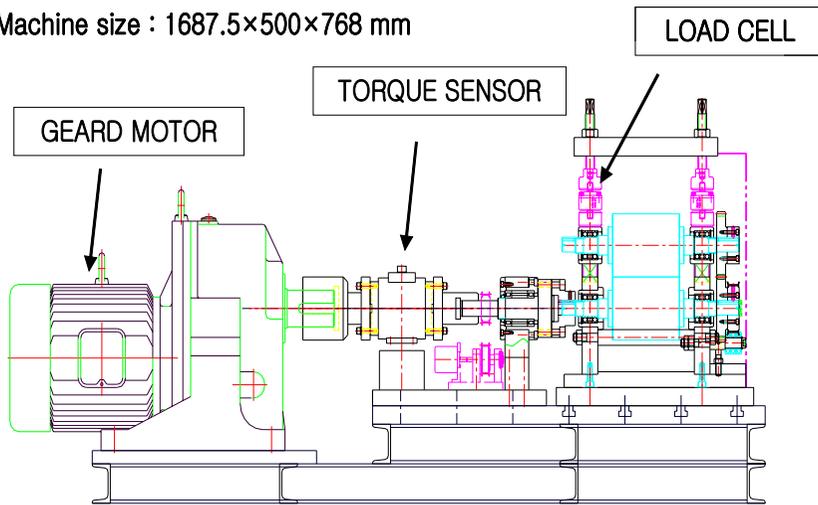


Fig. 42 Drawing of roll forming machine

Fig. 43은 성형기에 부착된 토크센서 및 로드센서를 나타낸다. 소성가공 이론에 의해 200kgf-m까지 측정이 가능한 토크센서(YDFF-200KM)와 3 tonf까지 측정이 가능한 로드 센서(YM13-3T)를 선택하여 부착했다. 롤 성형 시스템 설계에 의해 제작된 롤 성형 시스템을 Fig. 44에 나타내었다.

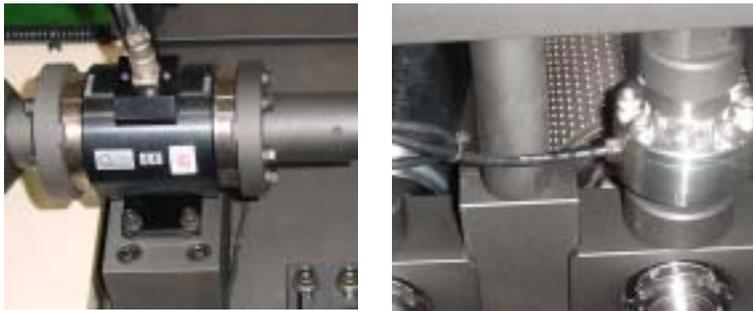


Fig. 43 Torque and Load sensor

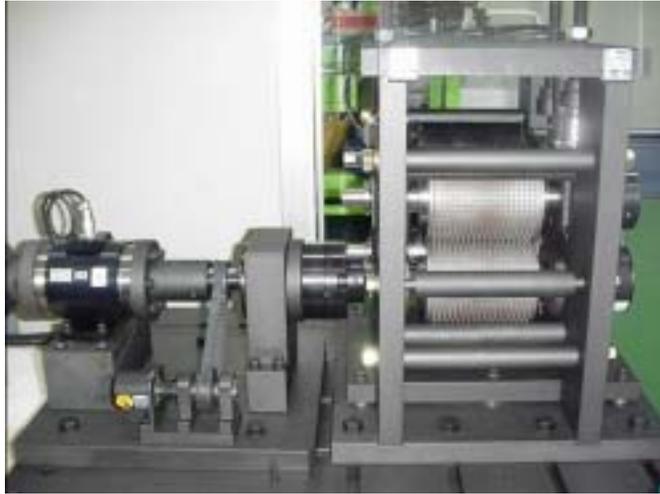


Fig. 44 Roll forming system

Fig. 45는 딩플 형상을 갖는 롤 금형 도면이다. 롤의 크기는 $\varnothing 120 \times 150 \text{mm}$ 이고, 딩플 형상의 크기는 $\varnothing 3 \text{mm}$ 이고 패턴간의 피치는 6.8mm 로 상부 금형과 하부 금형 한세트 로 설계되었다.

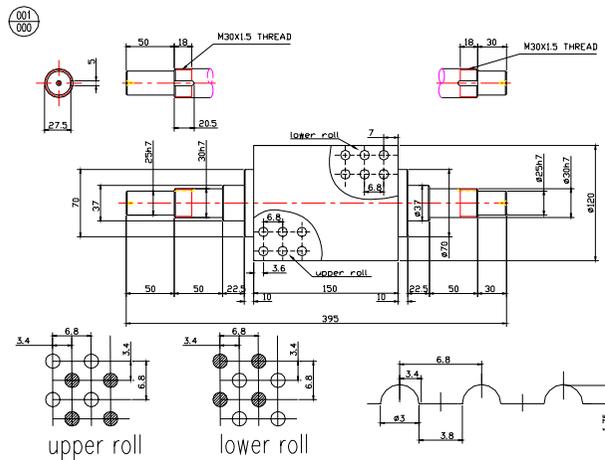


Fig. 45 Drawing of roll mold shape with dimple

설계된 도면을 통해 일반 금형강(SKD11)을 이용하여 황삭을 한 후 열처리 (예열 : 840℃, 본열 : 1030 ℃)를 하여 금형의 경도(Hrc 55-57)를 향상시켰고 딥플 형상으로 가공된 리머로 마무리 작업을 하여 금형을 제작하여 Fig. 46에 나타내었다.



Fig. 46 Drawing of roll mold with dimple

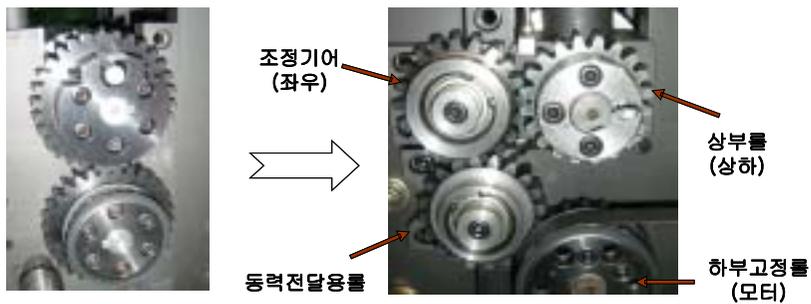


Fig. 47 Gear formation

제작된 물성형 시스템에 롤 금형을 조립하여 기초 성형실험을 수행한 결과 여러 문제점이 발생하였다. 최초 제작시 상, 하부 롤의 unbalance 문제가 발생하여 미성형 패턴 발생 및 롤 금형 손상이 있었고 고정두께만을 고려한 구동

장치 제작으로 소재 두께가 0.5mm 미만인 경우 제대로 된 실험을 수행할 수 없었다. 또한 소재 가이드 장치 미장착으로 인해 소재의 성형 후 패턴형상의 불균일이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Fig. 47에서와 같은 구동 장치의 개선을 통해 상부롤의 상하 이동이 가능하여 박판의 소재에 대한 성형이 가능하도록 하였다. 또한 양쪽에 다이얼게이지를 부착하여 금형간 평행상태 확인 및 소재 두께 조절시 상부롤과 하부롤의 위치 파악이 가능하였다. 그리고 가이드 장치 설치를 통해 소재 폭에 따른 조정이 가능하고 균일한 패턴 성형이 가능한 구조로 보완되었다.

4.2 성형실험 및 결과

4.2.1 프레스 성형실험 및 결과



Fig. 48 Universal Test Machine(UTM)

박관 성형을 위해 UTM(Universal Test Machine)을 이용하여 성형 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 UTM기를 Fig. 48에 나타내었고 프레스 용량은 150kN이고 기기의 구체적인 사양을 Table 4에 나타내었다.

Table. 4 Input condition

Capacity	150 kN
Load Range	0.1 N to 150 kN
Position measurement accuracy	$\pm 0.1\text{mm}$ or $\pm 0.15\%$ of displacement
Crosshead speed range	0.05 to 500mm/min
Crosshead speed accuracy	$\pm 0.2\%$ over 100mm
Return Speed	500mm/min
Machine stiffness	140 kN/mm

실험에 사용된 소재는 STS304 0.2t를 사용하였고 펀치의 속도 변화를 통한 성형실험을 수행하였다. 최초 성형실험시 펀치속도를 2mm/min을 주었고 2차 성형 실험시 10mm/min의 속도로 성형 실험을 하였다. 성형 실험 결과 속도 변화에 대해서는 단지 성형시간의 차이만 있었을 뿐 성형 결과에는 별다른 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 성형해석 결과와 비교해 보면 소성변형에 의한 소재의 유동에 의해 소재 외곽부분이 안쪽으로 들어가면서 주름 발생이 있음을 보였다. 이는 해석을 통해 미리 예측이 가능하였다. Fig. 49에 성형해석 결과와 실제 성형 결과를 비교하여 나타내었다.

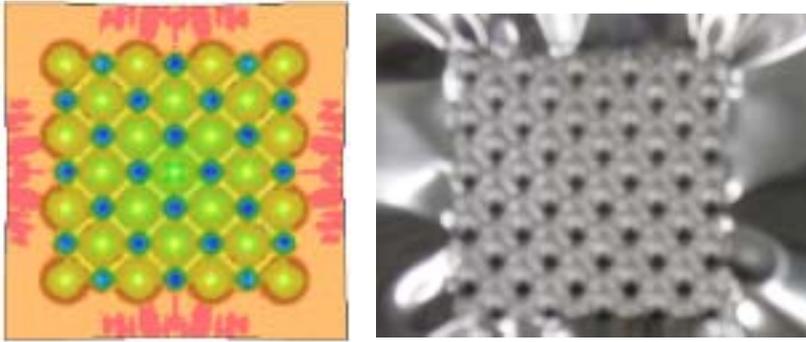
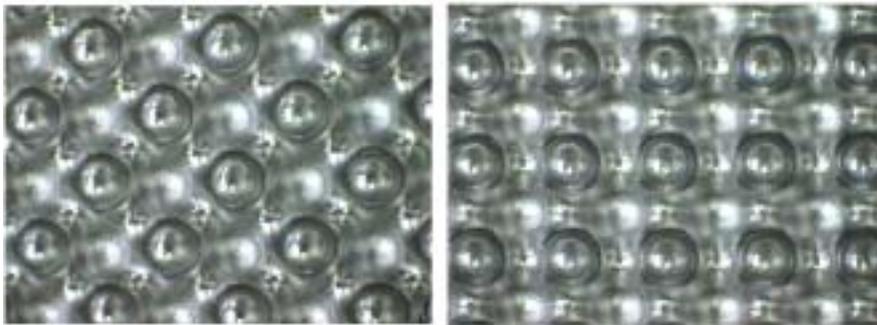


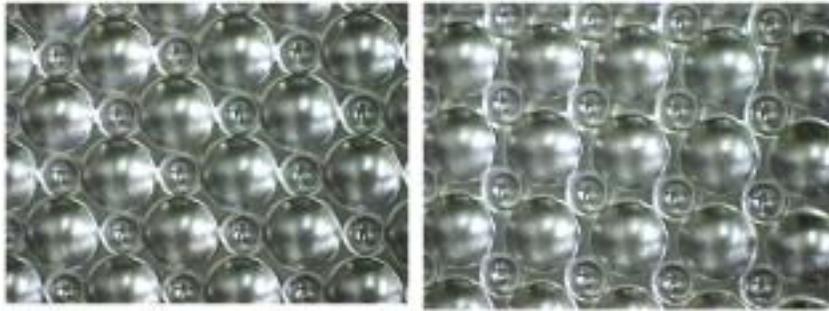
Fig. 49 Compare of analysis and forming result

또한 각각의 경우 균열발생에 대한 결과를 비교해보면 해석상으로 반경비 1인 경우 균열 발생 및 위험을 나타내었고 실제 성형에서 형상 주위에서 균열을 나타낸 경우와 그렇지 않은 경우가 발생하였다. 이는 동일 소재임에도 소재의 이방성에 따른 결과로 예측이 되었고 실제 성형시 소재에 약간의 윤활제를 뿌려주고 성형 실험을 한 결과 균열 발생은 없었다.



(a) 패턴 1

(b) 패턴 2



(c) 패턴 3

(d) 패턴 4

Fig. 50 Dimple shape of inner structure

Fig. 50은 프레스 성형 실험을 통해 얻어진 미세패턴 내부구조체의 형상을 나타내었다. 패턴1의 형상은 $\varnothing 2\text{mm}$ 이고 피치는 4.4mm 를 나타내었다. 패턴 2의 형상은 패턴 1과 동일하고 피치는 3.111 mm를 나타내었다. 패턴 3의 형상은 큰 반경 형상이 5mm이고 작은 반경 형상이 2mm 이고 피치는 7.1 mm 이고 패턴 4의 형상은 패턴 3과 동일하고 피치는 5 mm 이다. 이는 설계된 데이터와 동일한 값을 나타내었다.



Fig. 51 Embossing shape of inner structure

Fig. 51은 프레스 성형 실험을 통해 대면적 형상을 갖는 내부구조물을 얻는 과정을 나타내었다. 금형에 핀을 설치하고 소재에 구멍을 뚫어 여러번 반복

성형을 통해 Fig. 52와 같은 대면적 형상을 갖는 내부구조물을 얻을 수 있었다. 제작된 구조재는 패턴 1의 경우에 대해 나타내었고 크기는 120×120 mm 이다.

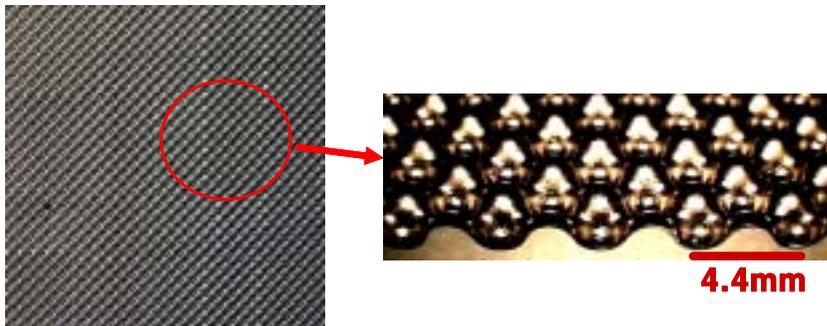


Fig. 52 Dimple shape of inner structure

4.2.2 롤 성형실험 및 결과

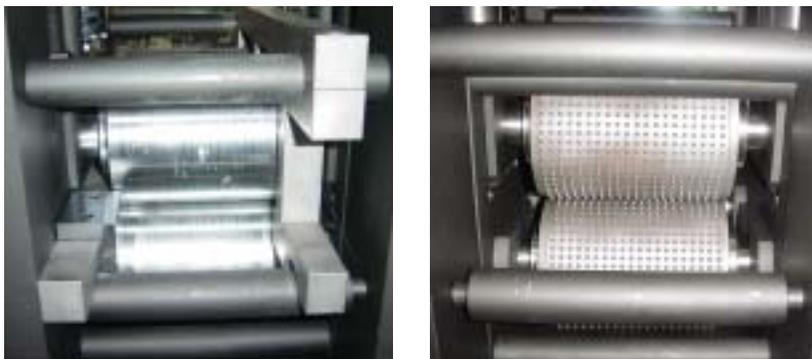
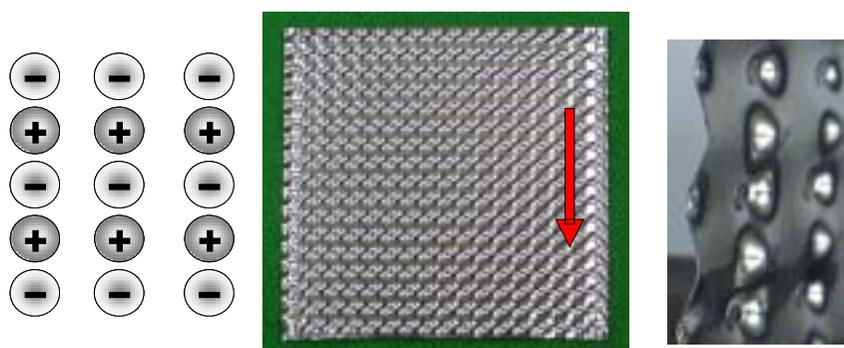


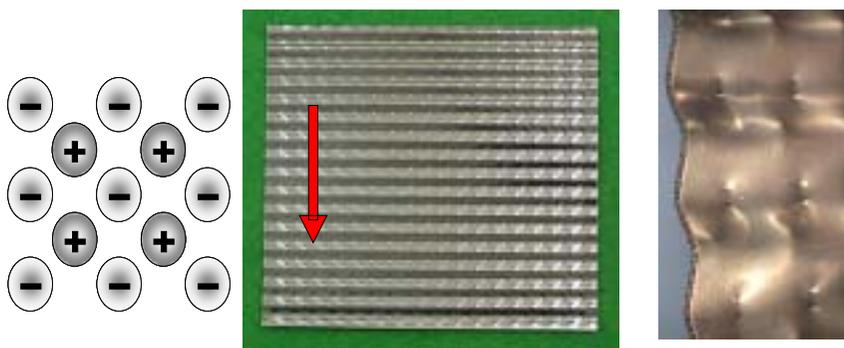
Fig. 53 Experimental set-up

Fig. 53은 롤 성형 시스템에서 롤 성형에 직접 관여되는 롤 구동부에 입구

부와 출구부에 모습을 나타낸다. 입구부에 설치된 가이드 장치를 통해 소재의 폭에 맞게 가이드 장치의 이동이 가능하도록 제작되었다. 또한 상부 롤의 위치 조정이 가능한 구조로 설계가 되어 패턴의 위치 조정을 통한 실험이 가능하여 성형 실험시 여러 패턴의 변화를 주어 최적 성형 조건을 찾을 수 있다.



(a) Pattern 0°



(b) Pattern 45°

Fig. 54 Dimple shape for pattern variation

Fig. 54에 (a)와 (b)는 상부금형과 하부금형의 패턴이 일직선상에 위치하였을 때와 대각선상에 위치했을 때의 성형 결과를 보여준다. 패턴이 일직선상에

위치했을 때에는 성형 후의 모습이 균일하고 주름 발생이 적었지만 패턴이 대각선상에 위치했을 때의 모습을 보면 패턴 생성이 불량하고 굽힘가공 형태의 모습을 보여준다. 정상적인 덤플 패턴 생성을 위해서는 덤플패턴의 높이를 높이거나 패턴간의 피치를 줄이면 양호한 결과가 나올 것으로 예상된다.



IV 결론 및 고찰

본 연구에서는 박판 내부구조재 제작을 위해 최적의 금형 제작을 위 제반적 조건을 얻기 위해 여러 형상과 배열 변화에 따른 성형 해석을 수행하였고 이를 바탕으로 실제 금형을 제작 및 실험을 통해 성형 시제품을 얻었다. 또한 미세패턴 롤 금형 및 롤 성형 시스템을 제작하였고 성형 실험을 통해 프레스를 통한 성형 실험과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 동일 반경에 의한 딥플 프레스 금형 제작시 plastic hinge line이 발생하여 내부구조재의 강성이 나빠진다. 이러한 현상의 대책으로 형상 및 배열 방향에 변화를 통한 반경비 0.45인 경우 형상 설계를 통해 plastic hinge line 발생을 억제하여 굽힘하중에 대한 강도 및 강성의 개선이 예상된다.
2. 최초 성형 해석 모델 설계시 패턴간의 여유 공간이 없이 설계를 하여 내부구조재의 강성 및 강도를 개선하였고 반경비 1인 경우 성형 완료 후의 변형된 모습을 보면 균열발생 및 균열발생의 위험을 보였다. 반경비 0.45인 경우 균열 발생은 없을 것으로 보이며 패턴 사이에 주름 발생은 보이지만 대체로 성형은 안전영역에 분포함을 알 수 있었다.
3. 지금까지 성형해석 한 결과들을 바탕으로 금형을 제작하여 실제로 성형 시제품을 제작해 봄으로써 성형해석의 타당성과 적합성을 검증하였다.

4. 프레스 성형을 통해서는 대면적에 대한 내부구조재를 얻는데 불리함이 있었다. 이러한 문제점을 보완하고자 롤 성형을 통한 덤플 내부구조재 제작을 위해 덤플 롤 금형 및 롤 성형 시스템을 제작하여 성형 시제품을 제작하였다.

본 연구에서는 내부구조재로서 강도 및 강성이 우수하면서 성형성에 유리한 구조에 대한 연구를 통해 판재 형태에 프레스 및 롤 성형에 의한 대량생산에 유리한 덤플 프레스 금형 및 롤 금형 제작이 절실하다는 것을 통해 형상 및 배열의 변화를 통한 덤플 형상에 대한 성형해석을 수행하여 프레스 금형을 제작하여 덤플 내부구조재를 얻었다. 더 나아가서 ISB판넬에 대한 굽힘 시험 및 강성/파단 특성 평가에 대한 연구가 필요하다.



VII. 참고문헌

- [1] R.R. Arnold, P.W. Whitton, "Stress and deformation studies for sandwich rolling hard metals", Proc. Inst. Mech. Eng. 173 pp. 241-256, 1959,
- [2] A.A. Afonja, D.H. Sansome, "A theoretical analysis of the sandwich rolling process", Int. J. Mech, Sci.15 pp. 1-14, 1973.
- [3] M. Denchiyuu, "Sandwich rolling analysis and experiments", in : Proceeding of the S-54 Spring Conference, Jpn. Soc. Technol. Plast. pp. 557-560, 1984.
- [4] 한근조, 안찬우, 안성찬, 홍도관, 한동섭 "좌굴을 고려한 샌드위치형 판 구조물의 모드해석", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 702-705, 2001.
- [5] H.B. Shim "Elastic-plastic Finite Element Analysis of Deep Drawing Processes by using Membrane and Shell Elements", J. Manufac. Sci. Eng., Trans. ASME, vol. 119, 1997
- [6] F.J. Arlinghaus, W.H. Frey and T.B. Stoughton "Finite element modelling of a stretch-formed part", AIME, pp 51-64, 1985.
- [7] B.S. Anderson "A numerical study of the deep drawing processes", Numerical Methods in Industrial Forming Processes Prineridge Press, Swansea, pp 709-721
- [8] N.M. Wang and S.C. Tang "Analysis of bending effects in sheet forming operations", Int. J. for Num. Math. in Eng., vol 25, pp 253-267
- [9] P.V. Marcal, I.P. King, "Elastic-plastic Analysis of Two-dimensional

- Stress Systems by the Finite Element Method”, *Int. J. Mech. Sci* 9, 143, 1967.
- [10] Y. Yamada, N. Yoshimura and T. Sakurai, “Plastic stress-Strain Matrix and its Application for the Solution of elastic-plastic Problems by the finite element method”, *Int. J. Mech. Sci* 10, 343, 1968.
- [11] O.C. Zienkiewicz, S. Valliappan and I. P. King, “Elasto-plastic Solutions of engineering problems, Initial stress finite element approach”, *Int. J. Num. Mech, Eng* 1, 75, 1969.
- [12] R. Hill, *The mathematical Theory of plasticity*, Oxford University Press
- [13] H.B. Shim, D.Y. Yang “An elastic-plastic finite element analysis on hydrostatic bulging of rectangular diaphragms by using layered degenerated shell elements”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol 32, pp 49-64
- [14] K. Mattiason “Numerical simulation of stretching processes”, *Proc. of the 1, Int. Workshop, Stuttgart*, pp 170-213
- [15] Ghosh. A. K., Hecker. S. S., “*Metal. Trans.*”, Vol. 6, No. 1065, 1975.
- [16] Lange K., “*Handbook of metal Forming*”, McG-Hill, Vol. 14, No. 18, pp. 11-18, 1985
- [17] Hasek. V., Lange. K., “*Wirtech. Z. Ind., Fertig.*”, Vol. 70, 1980
- [18] 전기찬, “박관금속의 성형”, 반도출판사, pp. 179-204, 1993

감사의 글

많은 꿈과 희망을 안고 입학한지가 엇그제 같은데 벌써 졸업을 앞두고 본 논문을 완성하게 되었습니다. 감사의 글을 쓰며 논문을 마감하면서 여러 고마운 분들에게 감사하는 마음을 전하고자 합니다.

아직 많이 부족한 저에게 귀한 가르침과 아낌없는 지도와 격려를 해주신 정동원 교수님, 바쁘신 와중에도 논문심사를 통해 좀 더 나은 논문이 되도록 세심한 검토와 조언을 주신 김귀식 교수님, 또한 학부 4년과 대학원 과정에 있어서 전문지식과 삶의 지혜를 가르쳐 주신 권기린 교수님, 허종철 교수님, 현명택 교수님, 조경호 교수님, 임종환 교수님, 최경현 교수님, 강철웅 교수님, 박운철 교수님, 김상재 교수님께도 감사의 마음 전합니다.

그리고 바쁘신 와중에도 불구하고 부족함이 많은 저를 더 성장할 수 있는 기회를 만들어 주신 한국기계연구원의 최두선 박사님과 제태진 박사님께 감사드립니다. 또 제가 어려움 없이 일할 수 있고, 학업에 전념할 수 있도록 도와주신 나노공정장비연구센터의 모든 박사님께 감사드립니다.

함께 연구소에서 근무하면서 논문 쓴다고 많이 도움을 준 성민이와 병현이 같이 과제를 수행하며 고생 많았던 재현이, 힘들 때마다 웃음을 주고 기쁨을 주었던 갑수형, 운영이형, 성곤이형, 상진이형, 태훈이, 창완이, 미정씨, 보미씨 그리고 굶은일도 마다않고 적극적으로 도와준 창희에게 고마운 마음 전합니다.

또한, 연구소 생활을 하는데 있어 좋은 모범이 되어 주었고 선배님으로서 든든한 버팀목이 되어주신 양훈이형, 명철이형, 병수형, 은철이형 에게도 고마운 마음을 전합니다.

마지막으로 집을 떠나 있는 저를 걱정해주시고 무한한 사랑과 희생으로
저를 보살펴주신 할머니와 부모님, 그리고 언제나 진심어린 격려와 도움을
준 형님과 형수님, 그리고 늘 든든한 지원자가 되어주시는 누님과 예쁜 조
카 아영이와 군학이, 그리고 논문 쓰는 동안 옆에서 많은 힘과 격려가 되어
주었던 사랑하는 아름이에게 정말로 고마운 마음을 전합니다.

2005년 7월

김 형 중 드림

