

초기 이방성 SUS409L 박판재의 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정 적용에 관한 수치적 연구

박지우¹ · 구태완² · 강범수[#]

Numerical Simulation for a Multi-Stage Deep Drawing of Anisotropic SUS409L Sheet into a Rectangular Cup

J. W. Park, T. W. Ku, B. S. Kang

(Received February 5, 2013 / Revised April 2, 2013 / Accepted April 23, 2013)

Abstract

Recently, electric vehicles and hybrid cars are being promoted as alternatives to reduce automobile emissions. Generally, thin sheet materials such as aluminum alloy AA300X and cold-rolled steel sheet such as JIS-G-3141 are used for the container for the lithium-ion secondary batteries. In this study, a multi-stage deep drawing process is used to produce a rectangular cup from thin stainless steel sheet material, SUS409L, with an initial blank thickness of 0.4mm for the battery container application. Numerical simulations of the first through the fifth stages for the multi-stage deep drawing with thin SUS409L sheet were conducted using LS-Dyna3D Implicit/Explicit. Special consideration was given to the deformation characteristics due to the normal anisotropy of the sheet material. The numerical simulations were conducted with both isotropic properties and the anisotropic properties of the initial blank material. An unexpected forming failure, barreling in the bottom region of the deep drawn rectangular cup, was observed. This failure mode can be avoided by additional ironing thickness control during the process.

Key Words : Multi-Stage Deep Drawing, Anisotropy, Rectangular Cup, Finite Element Analysis

1. 서론

현재까지 가장 많이 사용되는 자동차는 가솔린 및 디젤을 연료로 하는 내연기관이 주로 적용되고 있으나, 화석 연료를 사용하는 자동차들은 탄화수소·탄소산화물·질소산화물 등을 배출하기 때문에 환경오염 및 지구온난화에 치명적인 영향을 미치고 있다. 환경적인 요인으로 인하여 전세계선진국 및 국제협력기구(미국, 유럽연합 등)들은 자동차의 배기가스 배출량을 감소시키기 위한 규제를 제정함과 동시에 엄격하게 적용하고 있는 추

세이다. 이러한 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 보다 친환경적인 동력원에 대한 필요성이 대두되고 있을 뿐만 아니라 에너지 수요 증대로 인한 화석연료의 고갈 문제가 예상되어 기존의 화석연료를 사용하는 자동차들의 근본적 문제점이 속속들이 발생하고 있다[1~3].

이와 같은 세계적인 추세에 따라 자동차의 배기가스 문제를 해결할 수 있는 대안으로 제시된 것이 바로 전기를 동력원으로 사용하는 전기자동차(EV, Electric vehicle) 및 하이브리드 자동차(Hybrid car)이다. 이러한 자동차들은 화석 연료를

1. 부산대학교 항공우주공학과
2. 부산대학교 설계기반미래성형기술센터
Corresponding author : Department of Aerospace Engineering, Pusan National University, E-mail: bskang@pusan.ac.kr

사용하지 않고 배터리를 통해 전기에너지를 얻는 특징을 가지고 있다. 특히, 배터리는 전기자동차의 핵심 구성요소이며, 실제로 과거 전기자동차에 대한 관심이 급증했으나, 배터리의 중량 및 충전 시간 등의 한계로 인해 자동차 시장에서 대부분 도태되었다[4]. 최근 환경오염문제가 대두되고, 배터리 기술의 발달로 인해 전기자동차가 다시 재조명 받고 있다. 일반적으로 이러한 전기자동차 및 하이브리드 자동차에는 대용량의 리튬-이온 2차 전지 혹은 니켈-수소 2차전지등이 사용되고 있으며, 특히 니켈-수소 2차전지의 경우 니켈 코팅된 양극재료와 음극재료, 알카리 전해질 및 이들을 감싸는 직사각 컵으로 구성된다[5~8].

알루미늄 합금 박판재(AA300X)는 성형성 및 가공성 그리고 경량성 등의 장점으로 인해 소형의 리튬-이온 2차 전지용 직사각 케이스 등에 주로 적용되고 있으며, 냉간압연박판재(Low carbon thin steel sheet)는 성형성 및 가공성 그리고 내부식성 등의 장점을 활용하여 하이브리드 자동차용 니켈-수소 2차 전지 각형 케이스로 적용된 사례가 있다. 그러나 전기자동차에 적용되기 위해서는 성형성과 가공성뿐만 아니라 경량성과 내부식성, 그리고 외부 충격에 대한 고안전성 확보 등이 고려되어야 한다.

이에 따라 본 연구에서는 알루미늄 합금재 혹은 냉간압연재보다 고강성의 특성을 가지면서 성형성과 고안전성을 확보할 수 있는 대체 소재로서 SUS409L 박판재에 대한 2차 전지용 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프트로잉 공정에 대한 연구를 수행하였다. SUS409L 박판재를 이용한 2차 전지용 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프트로잉 공정 해석에는 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 LS-DYNA 3D를 사용하였으며, 초기 블랭크의 두께가 0.4mm인 SUS409L 소재를 이용하였다. 또한, 최종 성형품은 높이 39.3mm, 폭 14.9mm 그리고 길이 85.9mm의 크기를 가지는 것으로 하여 이를 본 연구의 대상으로 하였다. 본 연구에서의 수치적 연구에 필요한 SUS409L 소재에 대한 재료물성을 조사하기 위해 단축 인장 시험을 수행하였으며, 박판 소재에 대한 이방성 특성 시험도 병행하였다. 또한, 유사한 크기를 가지는 직사각 컵에 대한 냉간압연박판재(SPCE) 적용 사례와의 비교를 위해 SUS409L 소재를 등방성(Isotropic)으로 가정한 경우와 실제 재료의 특성을 고려한 이방성(Anisotropic) 적용에 따른 비교 연구를 수행하였다.

다단 디프트로잉 공정에 있어서, 각 단계별 수치적 해석 결과에 대한 탄성회복을 고려하였다. 수치적 해석 및 연구 과정에서 다단 디프트로잉 공정이 적용된 중간성형품에 있어서 장변부 측벽에 배럴링(Barreling) 현상이 발생하는 것을 확인하였으며, 이를 해결하기 위해 직사각 컵의 측벽 두께 조절을 위해 적용되는 아이어닝(Ironing) 두께 조절을 통해 측벽부에 인위적인 인장변형을 유도하는 방안을 적용하였다. 이를 통해, SUS409L 박판재를 이용한 다단 디프트로잉 공정이 적용된 직사각 컵 성형이 가능함을 확인하였다

2. 이방성 이론

2.1 HILL의 이방성 모델

이방성 재료에 대하여 Hill 은 Von Mises 의 항복함수를 다음과 같이 응력에 대한 2 차형 항복함수(Hill's quadratic yield function 또는 Hill's 1948 yield criterion)를 제안하였다.[9,10]

$$F(\sigma_{ij}, k) = \frac{1}{2} E_{i,jkl} \sigma_{ij} \sigma_{kl} - \frac{\sigma^2}{3} \quad (1)$$

일반적으로 냉간 압연된 판재를 고찰하면 재료는 직교하는 3 개면에 대하여 대칭인 성질을 갖기 때문에 직교이방성 재료(Orthotropically anisotropic material)라고 불리고, 이때 대칭면의 교선인 3 개의 직교축을 직교이방성 주축(Principal axis of orthotropic anisotropy)이라고 한다.

이 경우 압연방향(Rolling direction, RD), 압연방향과 직각방향인 폭 방향(Width direction, WD) 그리고 판 두께 방향(Through-thickness direction, TD)을 각각 이방성 주 축과 일치시켜 x, y, z 좌표계로 취하면 Hill 의 2 차형 항복조건식은 다음과 같이 나타내진다.

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (2)$$

여기서 직교좌표축은 좌표계의 x, y, z 좌표이며, $f(\sigma_{ij})$ 은 소성 포텐셜(Plastic potential), $\bar{\sigma}^2$ 는 유효 응력 그리고 F, G, H, L, M, N 은 이방성 매개변수이다. 이방성 매개변수들은 재료의 물리적 특성에 의존하는 값들이다.

일반적으로 재료의 이방성은 소성 변형률비로 잘 알려진 랭크포드 값(Lankford value - R value)을

사용하여 나타낼 수 있다. 각 R 값은 $r_x = r_0$, $r_y = r_{90}$ 의 식이 성립하고 이를 이방성 매개변수로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{H}{G} = r_x, \quad \frac{H}{F} = r_y \quad \text{and} \quad \frac{N}{G} = (r_{45} + \frac{1}{2})(1 + \frac{r_x}{r_y}) \quad (3)$$

본 연구에서는 압연방향을 0° 로 두고 각 방향 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)의 시편을 채취하여 이방성 계수를 측정하였다.

2.2 BARLAT의 이방성 모델

본 연구에서는 아이어닝(Ironing) 효과를 고려하기 위하여 해석에 사용되어진 초기 블랭크를 육면체 요소로 정의하였다. 상용 해석 프로그램인 LS-DYNA 3D에서는 육면체 요소를 사용하여 이방성을 고려하기 위하여 Barlat의 이방성 모델 (Barlat 1991 model)[10]을 적용시켜야 한다. 이 모델은 Barlat 등이 1991년 제안한 모델로써 항복식 [9]은 다음과 같이 정의할 수 있고, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력을 나타내며, $S_i (i=1,2,3)$ 는 대칭 행렬 $S_{\alpha\beta}$ 의 주응력 값이다.

$$\Phi = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m = 2\bar{\sigma}^m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} S_{xx} &= [c(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) - b(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})]/3 \\ S_{yy} &= [a(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) - c(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})]/3 \\ S_{zz} &= [b(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) - a(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})]/3 \\ S_{yz} &= f\sigma_{yz} \\ S_{zx} &= g\sigma_{zx} \\ S_{xy} &= h\sigma_{xy} \end{aligned} \quad (5)$$

지수 m 은 재료 파라미터, a, b, c, f, g, h 는 이방성 재료상수로, 만일 재료가 등방성일 경우 $a=b=c=f=g=h=1$ 이 된다. 이 식에서 $m=1$ 일 경우 Tresca 항복식과 일치하고, $m=2$ or 4 일 경우 Von Mises 항복식과 동일한 값을 가진다. 본 연구에서는 압연방향을 0° 로 하여 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 세 방향의 이방성 계수를 측정하였고, 이를 Barlat 모델에 적용시키기 위하여 Hill 모델과 Barlat 모델 사이의 관계식을 찾아 해석을 수행하였다. Hill 모델과 Barlat 모델의 관계식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} &(G + H)\sigma_x^2 - 2H\sigma_x\sigma_y + (H + F)\sigma_y^2 + 2N\tau_{xy}^2 \\ &= \frac{1}{12}(4c^2 + 4b^2 + 4bc)\sigma_x^2 + \frac{1}{12}(4c^2 + 4a^2 + 4ac)\sigma_y^2 \\ &\quad - \frac{1}{12}(8c^2 + 4bc + 4ac - 4ab)\sigma_x\sigma_y + 3h^2\tau_{xy} \end{aligned} \quad (6)$$

위 식에 Hill의 이방성 매개변수를 대입하게 되면 Barlat의 이방성 재료상수를 계산할 수 있다.

3. 다단 디프드로잉 공정의 유한요소해석

3.1 성형 해석 조건

유한요소 해석을 위해 해석공정에 이용되는 재료의 물리적 특성을 구하기 위한 단축인장시험을 수행하였다. 사용한 소재는 0.4mm의 초기 소재 두께를 가지는 박판 SUS409L(Stainless steel)이며 이 소재는 탄성계수 208GPa, 포아송비 0.28, 밀도 7.80g/cc의 물성치를 가진다. 또한, 소재의 변형 거동은 인장 시험에서 획득한 데이터로부터 항복이전의 탄성영역은 제외시킨 후, 소성영역의 데이터만을 이용하여 n 승 가공경화모델을 통해 $\bar{\sigma} = 736.4\epsilon^{-0.23}$ 와 같은 식을 획득하였다. 단축인장시험을 통하여 초기 블랭크에서의 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 방향의 유효응력곡선 추출하여 Fig. 1에 도시하였다. 또한, 재료의 이방성을 알아보기 위하여 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 방향에서 이방성 시험을 통해 각 방향에서의 이방성계수 (Lankford's value, R-value)를 구해내었다. 각 방향의 이방성계수와 평균 이방성계수 그리고 소재의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

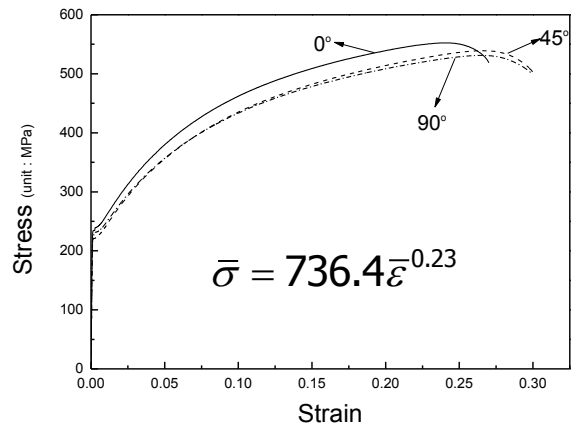


Fig. 1 Stress-Strain curve

Table 1 Material properties of the SUS409L

Material properties	values	
Young's modulus (GPa)	208.70	
Poisson's ratio	0.28	
Yield strength (MPa)	240.00	
Ultimate strength (MPa)	450.00	
Density (g/cc)	7.80	
Flow stress curve ($\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$)	K (MPa)	736.40
	n	0.23
Normal anisotropic coefficient	0°	2.17
	45°	1.59
	90°	2.93
	\bar{r}	2.07

Table 2 Anisotropic parameters of the SUS409L

	F	G	H	L	M	N
Hill	0.57	0.77	1.66	1.00	1.00	2.80
Barlat	1.08	1.23	1.87	1.00	1.00	1.37
	a	b	c	f	g	h

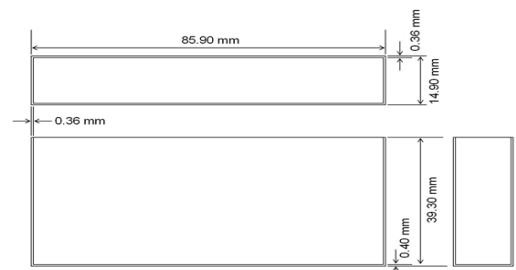
본 연구의 직사각 컵 다단 디프드로잉 성형에 관한 시뮬레이션을 위해 외연적 유한요소법을 기반으로 판재성형과 같은 공정 해석에 유리한 상용 유한요소해석프로그램인 LS-DYNA 3D를 사용하였다. 판재성형 해석은 dynamic explicit FEM을 사용하였다. 또한, 실제 공정을 고려하여 탄성회복공정(Spring-back analysis)을 수행하였으며 탄성회복해석은 static implicit FEM을 사용하였다. LS-DYNA 3D에서 재료의 이방성을 고려하기 위해서는 일반적으로 각 축 방향의 이방성계수(Lankford value)를 재료의 옵션으로 넣어주어 적용시킬 수 있다. 압연강판재의 경우, 판재의 두께가 매우 얇기 때문에 두께방향의 이방성계수를 측정하기가 어렵다. 따라서 평면이방성을 고려하여 판재면의 압연방향을 0°로 하여 0°, 45°, 90° 방향의 이방성계수를 측정하여 입력하거나, 평균 이방성계수를 계산하여 입력하는 방식이며 대부분의 재료 옵션이 평면이방성이 사용되지만, 이 방법은 두께가 없는 쉘(Shell)요소에만 적용이 가능하다.

본 연구에서는 아이어링 효과를 고려하기 위해 두께가 없는 쉘(Shell)요소가 아닌 8-절점육면체 요소를 적용시켰다. 따라서 이방성 효과를 고려하면서도 육면체 요소가 적용 가능한 재료특성 설정기능(Material option) 중 하나인 Barlat 모델을 사

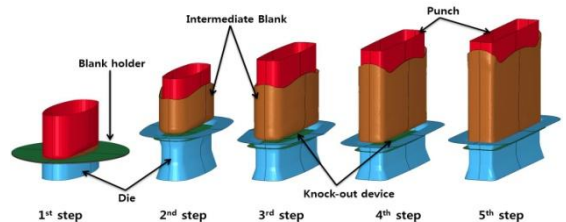
용하였다. 앞서 기술한대로 Barlat 모델은 6개의 이방성 재료상수를 가지는데, 이러한 이방성 재료상수들을 구하기 위해서는 Barlat 모델과 Hill 모델과의 관계식을 사용하여야 한다. 판재면의 0°, 45°, 90° 방향에서의 이방성계수 값을 알면 Hill 모델에서의 매개변수를 구할 수 있고, 구한 매개변수 값을 Barlat-Hill 관계식에 대입하여 Barlat 모델의 재료상수를 계산할 수 있다. 이 관계식은 간단한 수치해석기법을 통해 그 해를 찾을 수 있으며, 계산된 각 모델에서의 재료상수는 Table 2에 나타내었다.

3.2 유한 요소 모델

다단 디프드로잉 공정에 대한 유한요소해석 모델과 성형품의 최종치수를 Fig. 2에 나타내었다. 실제 성형 모델은 대칭인 형상을 이루고 있으므로 1/4 모델에 대해서만 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구에서의 다단 디프드로잉 공정은 초기 블랭크(Blank)와 펀치(Punch) 그리고 하부금형(Die)이 기본적인 요소가 되며, 첫 번째 공정에서는 소재의 과도한 유입을 방지하기 위하여 블랭크홀더(Blank holder)를 적용하였다. 첫 번째 공정을 제외한 나머지 공정에서는 성형된 중간 성형품의 바닥부 균일성을 위하여 녹-아웃(Knock-out) 장치라 불리는 카운터-펀치(Counter punch)가 사용되었다.



(a) Final dimension and configuration



(b) Finite element model for analysis

Fig. 2 Model of multi-stage deep drawing process

Table 3 Ironing Thickness

step	Major axis (mm)	Minor axis (mm)	
		Before modification	After modification
1st	0.40	0.40	0.40
2nd	0.36	0.38	0.38
3rd	0.36	0.37	0.36
4th	0.36	0.36	0.34
5th	0.36	0.36	0.32

초기블랭크는 8-절점을 가지는 육면체 요소로 정의되었으며, 초기블랭크를 제외한 나머지 펀치·블랭크홀더·다이·녹아웃 장치 등은 강체요소(Rigid body)로 정의하였다.

아이어닝(Ironing)을 고려하기 위해 장축과 단축의 측면부에 각각 아이어닝 공정을 적용하였고, 각 공정에서의 아이어닝 두께는 Table 3에 도시하였다. 소재간의 마찰을 고려하여 마찰계수는 0.1로 가정하였으며, 이전 단계의 응력분포 및 변형률을 그대로 유지한 채 다음 단계의 유한요소 성형 해석에 적용하였다. 한 단계가 끝난 후 다음단계로 넘어가는 과정 중 발생할 수 있는 탄성회복의 효과를 고려하여 매 단계 탄성회복 공정을 수행하였다. 또한, 해석 시간의 절감을 위하여 1/4 모델을 사용하였기 때문에 각 각의 축에 대하여 대칭조건(Symmetry condition)을 적용하였다.

3.3 유한 요소 해석 결과

3.3.1 등방성으로 가정한 해석

유한요소해석에 사용한 SUS409L 소재의 이방성을 고려하기 위해 등방성으로 가정한 수치적 해석을 먼저 수행하여 차이를 비교 분석하였다. 각 공정을 완료한 후에는 실제 공정을 고려하기 위해 탄성회복을 추가로 수행하였고, 탄성회복을 거친 후 다음 단계의 공정을 진행하였다. Fig. 3에 등방성으로 가정한 다단 디프드로잉공정에 있어서 제 1단계에서 제 5단계 까지의 유효응력 분포와 유효변형률 분포를 도시하였고, Fig. 4에 탄성회복공정의 유한요소해석 결과를 나타내었다.

제 1차 드로잉 공정은 평판형상인 원소재를 기본적인 타원형 형상으로 만들기 위한 공정이다. 이 공정에서는 펀치가 하향 이송됨에 따라 소재의 코너부분에서 소재의 유입이 과도하게 나타나

게 된다. 이러한 소재의 유입을 줄이기 위하여 블랭크홀더를 적용시키는 것이 바람직하다. 유효변형률 분포를 보면 장축과 단축이 만나는 코너부상단에서 국소적으로 약 1.460의 최대 유효변형률을 확인할 수 있는데, 이는 소재의 유입에 따른 압축력이 작용한 결과이다. 이 부위의 유효응력 값을 확인해보면 약 786MPa 정도의 큰 값으로 확인 되는데, 이는 소재가 얇아지는 현상이 아니라 두꺼워지는 현상(Thickening)에 따른 응력집중현상이므로 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단되었다. 또한 탄성회복 결과를 확인해 보면 전체적으로 평균 유효응력과 후 평균 유효변형률이 감소한 것을 확인할 수 있다. 펀치부분과 코너부가 맞닿는 부분에서의 두께는 얇아지는 현상이 나타났으며, 끝단으로 갈수록 점점 유입되는 소재의 양이 많아져 두께가 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다.

제 2차 드로잉 공정부터는 밀면을 평편하게 받쳐주기 위한 녹아웃 장치가 존재한다. 여기서 최대 유효변형률은 상부 소재가 유입되는 부분에서 약 0.497으로 확인할 수 있으며, 이는 제 1차 드로잉 공정에 비해 매우 미미한 값이다. 또한 펀치부분과 맞닿는 코너부에서의 두께가 국부적으로 얇아지는 경향을 보이고 있다. 3, 4, 5 공정 모두 녹아웃 장치가 존재하며 각 공정의 최대변형률은 약 0.629, 0.449, 0.542로 나타났으며 탄성회복 후 전체적인 응력수준이 감소함을 확인할 수 있다.

3.3.2 이방성을 적용한 해석

SUS409L은 이방성 재료이기 때문에 이방성을 고려하여 해석을 진행하였다. 이방성 실험을 통해 얻은 이방성계수 값을 Hill 모델과 Barlat 모델간의 관계식을 이용하여 Barlat 재료 상수를 구하였고, 이를 적용시켜 이방성 효과를 주었다. Fig. 5에 이방성이 적용된 제1단계에서 제5단계까지의 다단 디프드로잉 공정 유한요소 해석 결과를 도시하였으며, Fig. 6은 탄성회복공정 후의 유효응력 분포와 유효변형률 분포를 나타내었다.

제 1차 드로잉 공정에서의 유효변형률 분포를 살펴보면 소재의 코너 상단부분에서 약 0.861의 최대 유효변형률을 확인할 수 있는데 이는 등방성 해석과 마찬가지로 소재의 유입에 따른 압축력이 작용한 결과이다. 이 부분의 응력 값은 약 538MPa로 최대응력을 가진다. 전체적으로 등방성 해석에 비해서 유효응력과 유효변형률이 떨어진

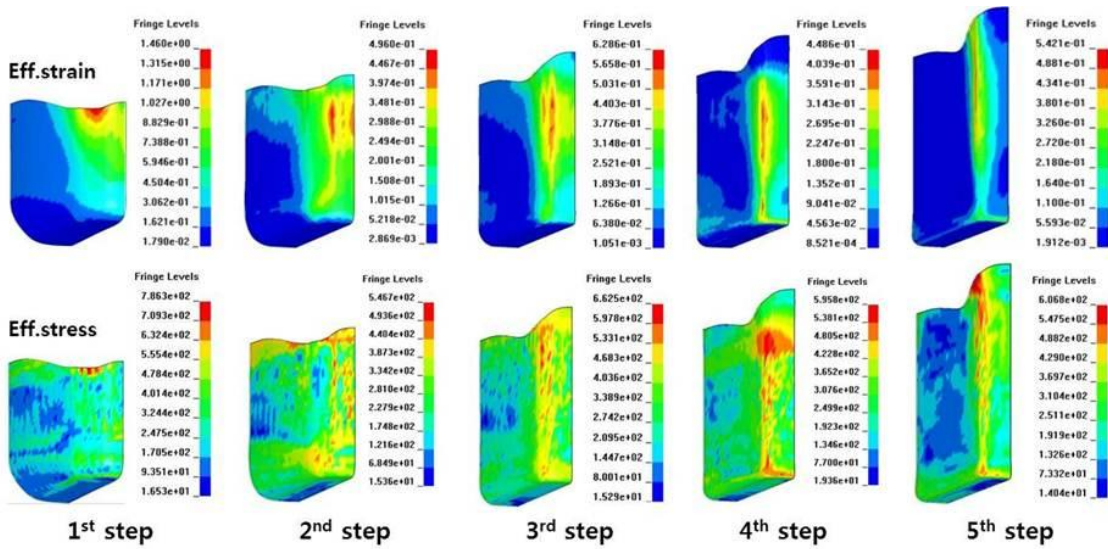


Fig. 3 Numerical simulation results of deep drawing as isotropic material

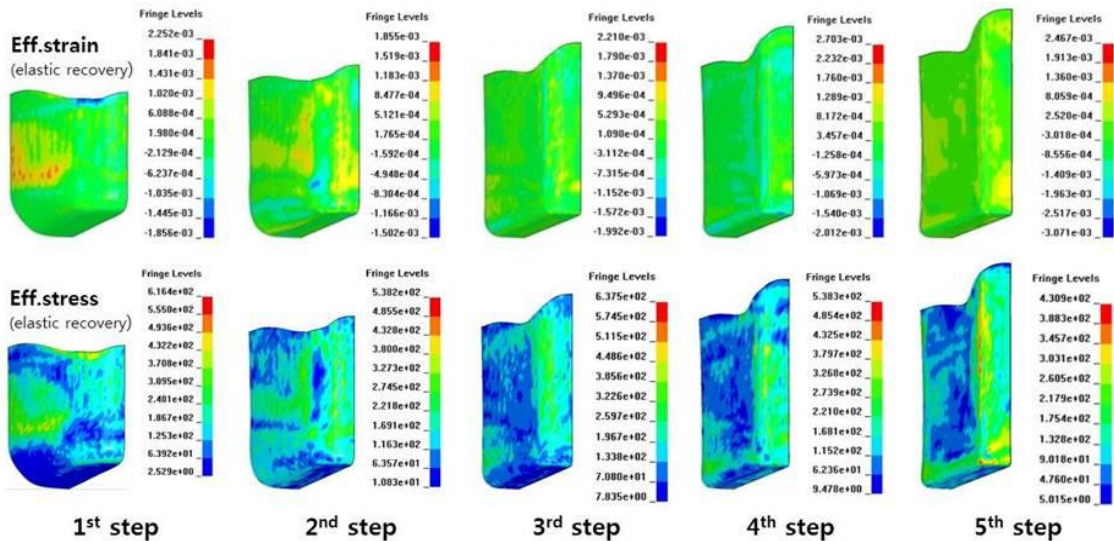


Fig. 4 Numerical simulation results of deep drawing as isotropic material (elastic recovery)

것을 확인할 수 있다. 두께 분포는 등방성 해석에 비하여 편치부의 두께 감소율이 적고 전체적으로 균일하게 나타났다. 또한 탄성회복 이후로 최대 유효응력 값이 약 538MPa에서 약 370MPa로 크게 감소한 것을 확인하였다. 2 공정부터 5 공정까지 최대 유효변형률은 약 0.356, 0.440, 0.348, 0.304로 나타났으며, 탄성회복 전후로 응력수준감소를 확인할 수 있다.

3.4 배럴링 현상에 따른 공정 개선

지금까지 수행된 결과 형상을 보면 제 3공정부터 작은 배럴링(barreling) 현상이 발생함을 알 수 있다. 배럴링 현상은 공정에서 가공하는 금형이나 다이가 모재표면과의 마찰에 의해 불룩한 형상을 가지게 되는 현상이다. 이러한 배럴링은 전지케이스의 불량률 야기할 수 있으므로 배럴링 현상 감소를 위하여 공정 개선을 시도하였다.

기존의 금형에서는 단축 방향의 측면부에 아이어닝 효과가 적용되어 있었다. 앞서 언급한 배럴링 현상의 경우 단면 부분을 당겨주는 인장력이

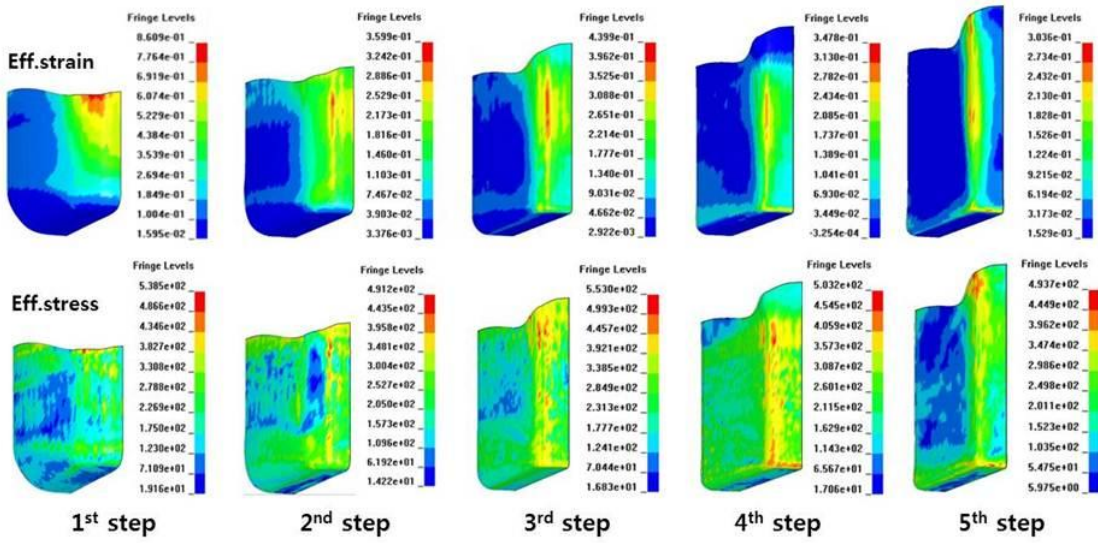


Fig. 5 Numerical simulation results of deep drawing as anisotropic material

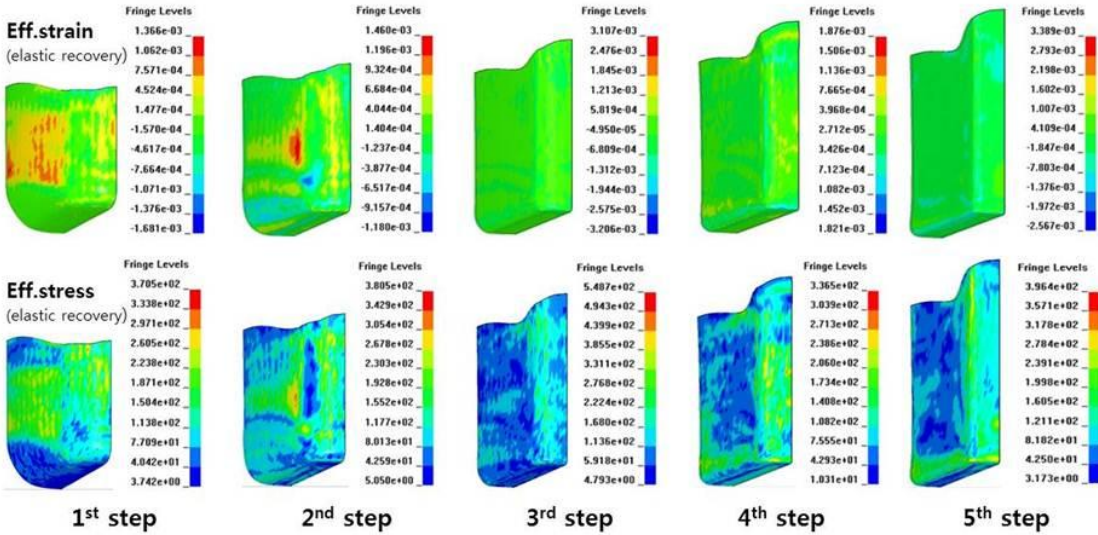


Fig. 6 Numerical simulation results of deep drawing as anisotropic material (elastic recovery)

부족하면 생길 수 있기 때문에 아이어닝 두께를 추가하여 단면을 밀어 올려주는 방법으로 배럴링 현상의 개선을 피하였다. 이러한 공정 개선은 아이어닝의 압착력을 유지하면서 펀치 이동 방향으로 인장력을 유도하여 배럴링 현상을 완화시킬 수 있다. 제 3공정부터 아이어닝을 추가로 더해주고, 기존 아이어닝 두께와 개선된 공정의 단축 방향의 아이어닝 두께는 Table 3에 비교하여 도시하였다. 따라서 수정된 두께에 따라 펀치의 모델

링을 바꾸어주었고, 개선된 모델링을 토대로 해석을 다시 수행하였다.

Fig. 7에 추가된 아이어닝을 적용시킨 3, 4, 5공정의 해석결과를 도시하였다. 개선된 제 3공정 해석의 결과는 최대 유효변형률 값은 약 0.431로 코너부 상단에 나타났고, 최대 유효응력 값은 약 539MPa로 앞선 해석과 마찬가지로 코너부 상단의 국소적인 부분에서 나타났다. 탄성회복 후의 최대 유효응력 값은 약 412MPa로 약 130MPa 정도 감

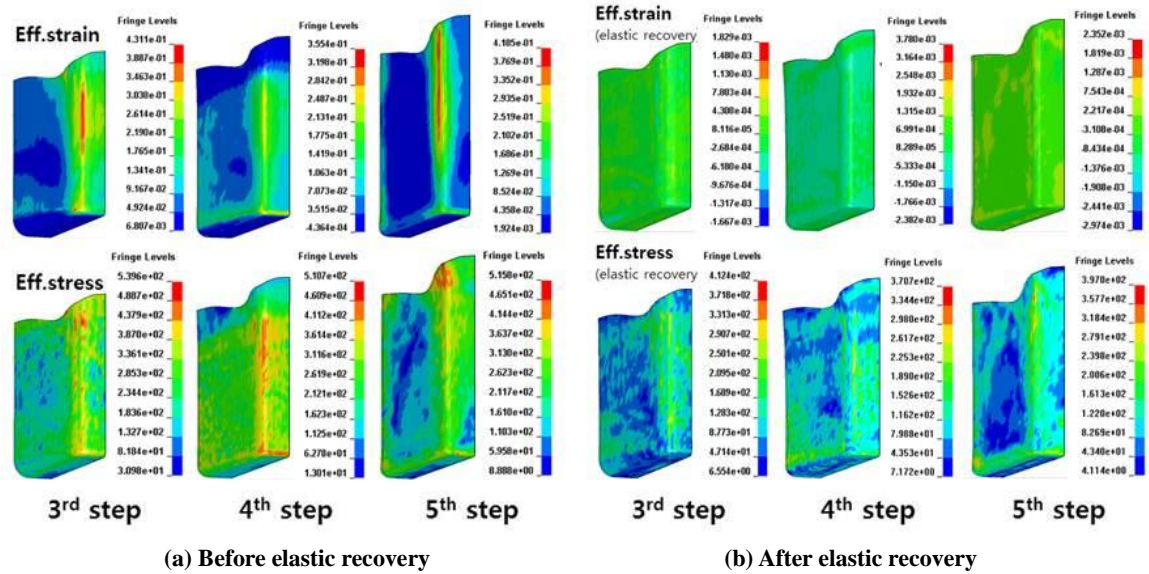


Fig. 7 Numerical simulation results of deep drawing as anisotropic material (modified process)

소한 값으로 계산되었다. 아이어닝을 추가하여 개선한 제 4공정의 경우 최대 유효변형률 값은 약 0.355의 변형률이 코너부 상단에 걸리는 것으로 나타났다. 탄성회복 이후 최대 유효응력 값은 약 370MPa로 나타났으며, 제 5공정 해석의 결과의 최대 유효변형률 값은 약 0.419, 최대 유효응력 값은 코너부 상단에서 약 515MPa로 계산되었다.

4. 해석 결과 고찰

4.1 이방성 특성에 따른 두께 분포

해석된 결과에서 장축방향 측벽부와 단축방향 측벽부의 두께를 측정하여 Fig. 8에 도시하였다. 먼저 등방성으로 가정 한 해석결과의 두께와 이방성으로 적용한 해석결과의 두께를 비교하여 나타

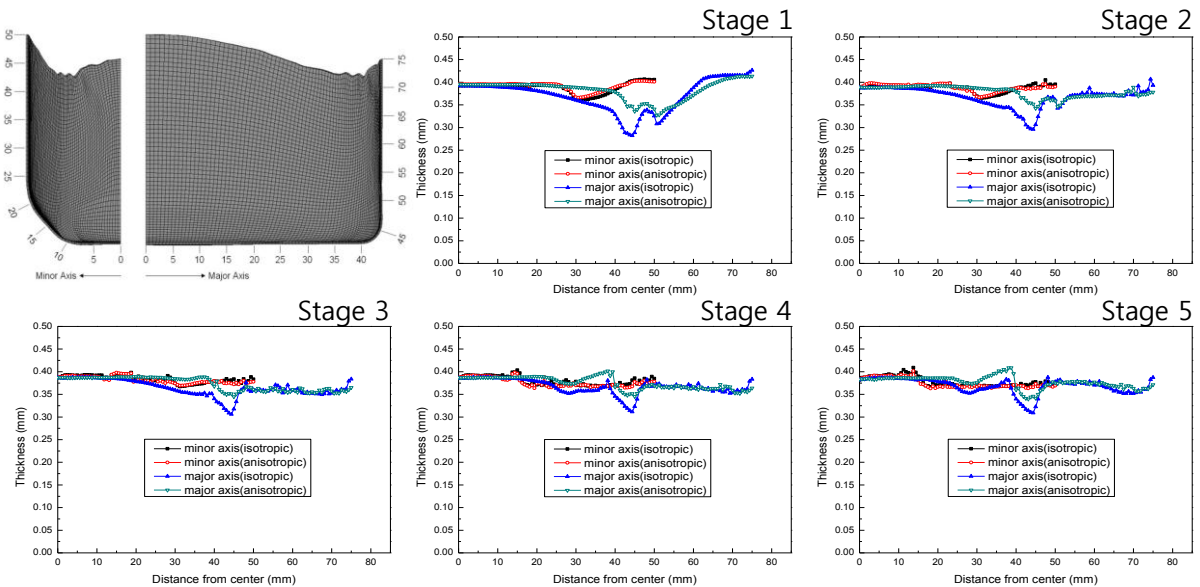


Fig. 8 Thickness distribution

내었다. 등방성의 경우 첫 번째 공정에서부터 편차와 맞닿는 부분에서의 두께가 얇아지면서 두께 변화가 큰 경향을 보인다. 그에 비해 이방성의 경우 두께가 얇아지는 경향은 같지만, 등방성에 비해 두께변화 폭이 작고 균일한 분포를 나타내고 있다. 또한 첫 번째 공정은 코너부 상단 부분에서 소재의 유입에 의해 두께가 두꺼워지기 때문에 장-단축방향의 측벽부 모두 초기두께보다 두꺼워지는 것을 파악할 수 있다. 두 번째 공정부터는 아이어닝 공정이 추가되었기 때문에, 두께분포에서 아이어닝의 효과를 확인할 수 있다. 또한 단축방향의 경우 두께분포가 등방성과 이방성 해석의 차이가 그렇게 크지 않은 반면에 장축방향 측벽부는 이방성에 비해 등방성 해석 결과의 두께분포가 균일하지 않고 두께변화폭이 큰 경향을 확인할 수 있다. 따라서 등방성 해석보다 이방성 해석의 결과가 두께분포가 더 균일하다는 결론을 얻을 수 있다.

4.2 금형 개선 결과

아이어닝을 추가한 개선 모델과 기존 모델의 배럴링 부분의 형상을 Fig. 9에 비교하여 도시하였다. 또한, 개선 공정에서 단축 방향으로 아이어닝의 추가로 인하여 단축방향 측벽부의 두께가 감소하였으며, 이에 대한 두께분포를 개선 전과 후를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9 에서 개선 후 공정이 개선 전 공정보다 배럴링 현상이 감소한 것을 가시적으로도 확인할 수 있다. 확실한 비교를 위해 실제 배럴링이 일어난 부분의 좌표를 추출하여 Fig. 11에 도시하였다. 개선 전 공정에서의 최대배럴링 깊이는 약 0.45mm로 나타났으며, 배럴링이 시작되는 점의 위치는 밀면을 기준으로 하여 약 18.60mm 떨어진 곳을 그래프를

통하여 확인할 수 있다. 개선된 공정에서의 배럴링을 확인해보면, 개선 후 공정에서의 최대배럴링 깊이는 약 0.22mm로 나타났으며, 배럴링이 시작되는 점의 위치는 밀면을 기준으로 하여 약 11.05mm 떨어져 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 배럴링의 총 면적 및 배럴링의 깊이가 크게 줄어든 것을 파악할 수 있다. 최대배럴링 깊이는 개선 전후를 비교하여 볼 때 약 51.1% 줄어들었으며, 배럴링이 시작되는 점의 위치는 개선 전에 비하여 개선 후 약 40.6% 가량 낮아졌다. 여기서 해석모델의 정중앙에서의 배럴링 면적을 배럴링 시작점과 배럴링 깊이만을 이용하여 단순화시켜 계산하면 배럴링 면적감소율은 약 70.0%로 나타났다. 즉, 개선공정을 통하여 배럴링 면적의 크기가 약 70% 정도 감소하였다는 것을 의미한다.

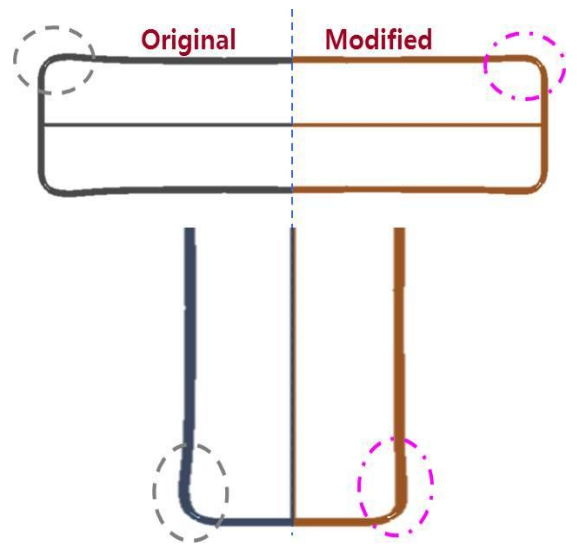


Fig. 9 Shape comparison of modified model

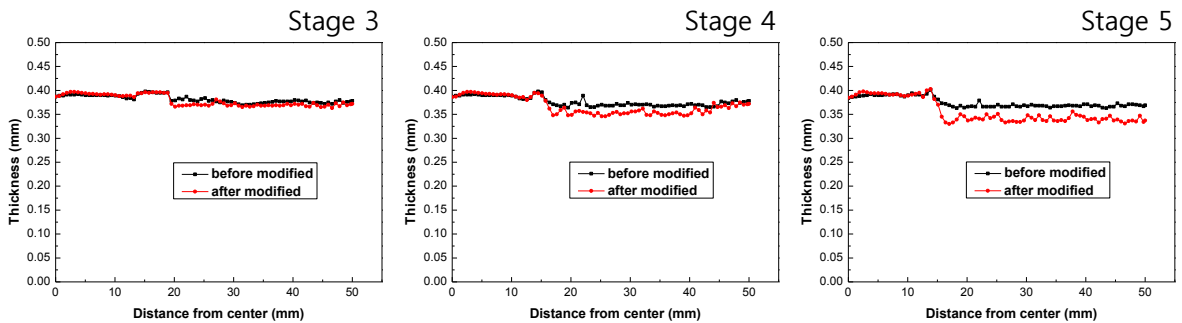


Fig.10 Comparison of thickness distribution as modified process

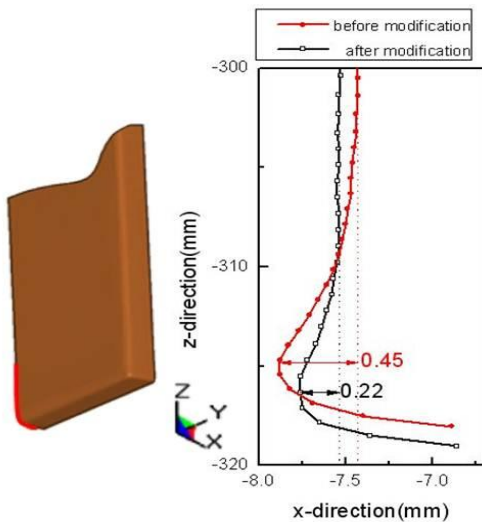


Fig.11 Distribution of barreling zone

5. 결론

본 연구에서는 SUS409L 재료를 전기자동차용 2차 직사각 전지 케이스에 사용하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 기존에 연구된 냉간압연강판(SPCE)이나 알루미늄 합금에 비하여 SUS409L 재료는 이방성의 정도가 크기 때문에 재료의 이방성을 고려하여 해석을 수행하였다. 또한 이방성의 특성에 기인하는 재료 변형 특성을 분석하기 위하여 등방성으로 가정한 수치적 연구를 수행하여 변형 형상, 유효응력 및 유효변형률 분포를 확인하여 비교하였으며, 탄성회복 효과를 고려하여 연구를 수행하였다. 또한, 성형품의 단축방향 측변부와 장축방향 측변부에서의 두께를 측정하여 비교-분석하여 등방성에 비해 이방성 재료의 두께 폭 변화량이 상대적으로 미미함을 확인하였다. 해석적 연구 도중 배럴링 현상이 발생하였고, 이를 개선하기 위해 기존 공정에 아이어닝을 추가하였다. 개선된 공정을 기존 공정과의 비교를 통하여 배럴링 면적이 약 70% 감소한 것을 확인하였다. 이러한 해석적 연구 결과는 추후 실험적 연구와의 상호비교를 통하여 해당 재료의 실용화에 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다. 또한, 본 연구는 2012년도 지식경제부와 한국에너지기술평

가원(KETEP)의 에너지인력양성사업의 일부 지원을 받아 수행되었습니다(No. 20124030200020).

REFERENCES

- [1] R. S. Benson, N. D. Whitehouse, 1979, Internal Combustion Engines, Pergamon Press, Oxford.
- [2] A. Dubreuil, F. Foucher, 2007, HCCI combustion effect of NO in EGR, Proc. Combust. Inst., Vol. 31, No. 2, pp. 2879~2886.
- [3] C. A. Idcheria, L. M. Pickett, 2007, Effect of EGR on Diesels Premixed-burn Equivalence Ratio, Proc. Combust. Inst., Vol. 31, No. 2, pp. 2931~2938.
- [4] A. Kimura, I. Ando, K. Itagaki, 2005, Development of Hybrid System for SUV, SAE Int., No. 2005-01-0273.
- [5] T. W. Ku, H. W. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2008, Process Design and Finite Element Analysis of Rectangular Cup used for Ni-MH Battery with High Aspect Ratio, Trans. Mater. Process., Vol. 17, No. 3, pp. 170~181.
- [6] B. S. Kang, W. J. Song, T. W. Ku, 2010, Study on Process Parameters and Its Analytic Application for Nonaxisymmetric Rectangular Cup of Multistage Deep Drawing Process using Low Carbon Thin Steel Sheet, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 49, No. 9-12, pp. 925~940.
- [7] T. W. Ku, J. W. Park, S. C. Heo, B. S. Kang, 2010, Experimental Study on Non-Axisymmetric Rectangular Cup using Multi-Stage Deep Drawing Process, Trans. Mater. Process, Vol. 19, No. 4, pp. 253~262.
- [8] B. S. Kang, T. W. Ku, 2011, Experimental Study on Multi-stage Deep Drawing for Rectangular Cup with High Aspect Ratio, Int. J. Adv. Manuf. Technol, Vol. 53, No. 1-4, pp. 131~143.
- [9] Y. S. Kim, 2003, Engineering Plasticity, Sigmagraph, Seoul, pp. 371~410.
- [10] J. H. Yoon, D. Y. Yang, 1990, A Three-dimensional Rigid-plastic Finite Element Analysis of Bevel Gear Forging by using a Remeshing Technique, Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, No. 4, pp. 277~291.
- [11] F. Barlat, D. J. Lege, J. C. Brem, 1991, A Six-component Yield Function for Anisotropic Materials, Int. J. Plast., Vol. 7, No. 7, pp. 693~712.