

니켈-수소 2 차 전지용 고세장비의 직사각 컵에 대한 성형공정 설계 및 유한요소해석

구태완¹, 김화영², 송우진³, 강범수[#]

Process Design and Finite Element Analysis of Rectangular Cup used for Ni-MH Battery with High Aspect Ratio

T. W. Ku, H. Y. Kim, W. J. Song, B. S. Kang

(Received November 23, 2007)

Abstract

The shape of rectangular cup used for Ni-MH(Nickel-coated Metal Hydrogen) battery for hybrid car looks quite simple, but the forming process of extruding and setting up process design are highly difficult. Furthermore, there are few concrete reports on the rectangular deep drawn cup as part of hybrid vehicles till now. In this study, process design for rectangular cup in the multi-stage deep drawing process is carried out, and FE analysis is also preformed based on the result of the process design. From the simulation result, some unexpected problems such as earing, wrinkling and excessive thickness changes of the intermediate blank occurred. To overcome these failures, a series of modification for punch shape in the forming process design are completed and applied. Considering the modified punch shape in the multi-stage deep drawing process, additional FE analysis is also carried out and the simulation result is verified in view of the deformed shape, thickness change and effective strain distribution. The result of FE analysis with the improved process design confirmed not only reducing thinning of wall and possibilities of failure but also improving the quality of drawing product through the modification of punch shape.

Key Words : Process Design, Finite Element Analysis, Multi-Stage Deep Drawing, Rectangular Cross-Sectioned Cup

1. 서론

수송 기계 산업 분야에서의 기술 개발과 혁신은 운송 수단으로써의 자동차의 전세계적 상용화와 기술적 발전에 수많은 기여를 하고 있다. 그러나 현재까지 상용되고 있는 자동차에는 원천적으로 가솔린 혹은 디젤 연료를 사용하는 엔진을 장착하고 있어, 엔진 내부에서 연소된 가스의 대기 중으로의 산화탄소물(CO, CO₂), 탄화수소(HC), 질

소산화물(NO_x), 입자상의 매연 및 분진 등과 같은 배기 가스 배출로 인한 대기 오염 및 지구 온난화에 심각한 영향을 미치고 있다.

이와 함께 환경 보호에 대한 공공의 지속적인 관심 증가로 자동차 선진국 및 국제 기구들은 배기 가스 배출로 인한 대기 오염 등을 방지하기 위한 다각적인 노력을 기울이고 있다. 특히, 최근에는 지구 온난화와 오존층 파괴의 주 원인이 되고 있는 자동차 배기 가스에 대한 배출 규제가

1. 부산대학교 항공우주공학과

2. ㈜일광컨테크

3. 부산대학교 산학협력단

교신저자: 부산대학교 항공우주공학과,

E-mail: bskang@pusan.ac.kr

엄격해지고 있으며, 환경 친화적인 제품에 대한 소비자들의 수요가 급증하고 있어 배기 가스의 배출을 억제할 수 있는 기술의 필요성이 대두되고 있다[1~3].

이러한 자동차의 배기 가스 배출에 의한 각종 환경 문제를 해결하면서 동시에 자동차의 연료 효율을 획기적으로 증가시킬 수 있는 방안으로 제시된 것이 전기 자동차, 연료전지 자동차, 수소 자동차 및 하이브리드 자동차 등이다. 특히, 하이브리드 자동차는 가장 실용적인 대안으로 평가되고 있으며, 기존의 가솔린 혹은 디젤 엔진을 장착한 자동차의 장점과 니켈-수소(Ni-MH, Nickel-Coated Metal Hydrogen) 2차 전지 혹은 연료전지로부터 전력을 공급받아 모터를 구동시켜 저속에서의 자동차의 구동력을 발생시키는 장점을 접목시킨 형태이다. 물론 하이브리드 자동차에는 Fig. 1에서와 같이 모터를 구동시키기 위해서 필수적으로 대용량의 배터리를 차량 내부에 장착해야 한다는 공간적인 단점을 지니고 있다[4].

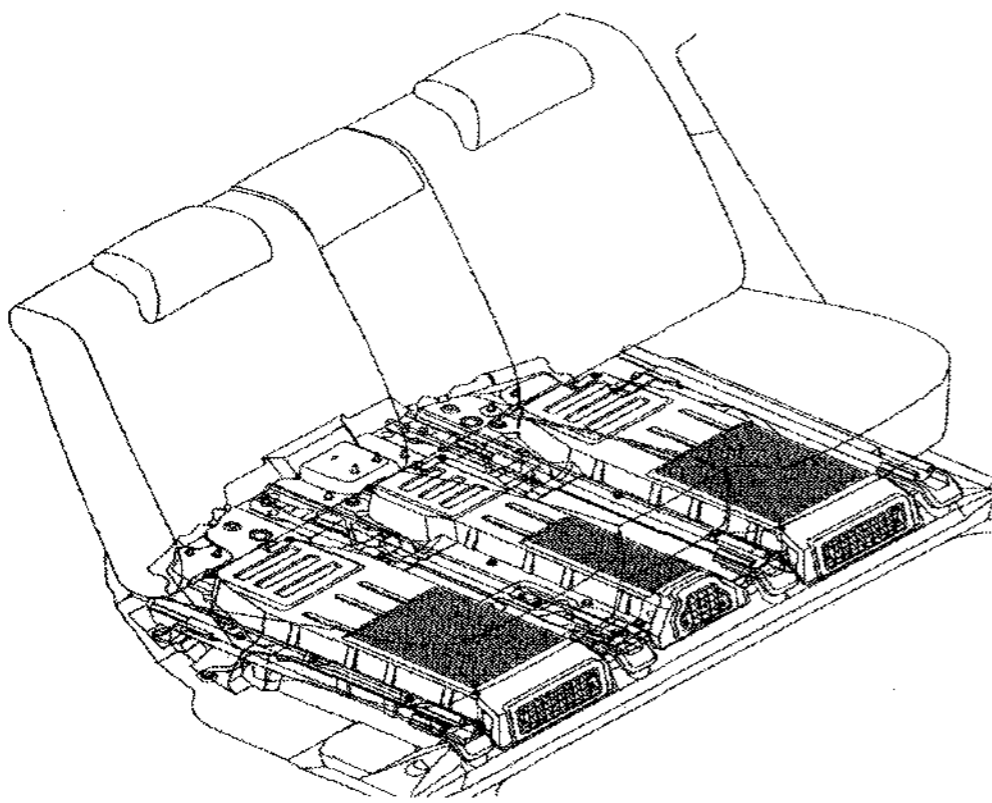


Fig. 1 Example of Ni-MH battery pack in Hybrid Car[4]

하이브리드 자동차용으로 사용되는 대용량 니켈-수소 2차 전지는 과방전 및 과충전에 잘 견디고 충전가능회수가 많다는 장점이 있으며, 니켈 코팅된 양극 재료와 수소흡장합금의 음극재료, 알칼리 전해질 및 이들을 감싸는 냉간압연 소재의 직사각 컵으로 구성된다. 이러한 하이브리드 자동차에는 통상적으로 두 개의 니켈-수소 2차 전지 패키지로 구성되며, 하나의 패키지에는 약 250여 개의 2차 전지가 사용되므로 자동차 1대당 약 500여개의 직사각 컵이 필요하게 된다.

현재까지 원통형, 타원형 혹은 정사각형 형태의 단면을 가지는 디프드로잉 컵(deep drawing cup)에 대한 공정 설계, 드로잉 비, 블랭크 설계, 재드로잉, 아이어닝 및 성형성 등의 다양한 연구가 수행되고 있다[5~12].

직사각 형상의 단면을 가지는 컵을 성형하기 위해서는 여러 번의 디프드로잉 공정을 거쳐야 하며, 이러한 직사각 컵을 성형하기 위한 다단 디프드로잉 공정에 대한 연구 활동은 미흡한 실정이다. 그러나, 최근에 알루미늄 합금 소재 또는 냉간압연강판(SPCC)을 이용한 리튬이온 2차 전지용 고세장비의 직사각 컵의 성형공정 설계, 금형 설계, 성형공정 해석 및 제작 등과 같은 연구가 시도되고 있다. 그 예로, 탄소성 유한요소법을 이용한 다단 디프드로잉 공정에 대한 해석[13], 유한요소 역해석 기법을 이용한 공정변수 설계[14], 다단 디프드로잉 성형 공정에서의 아이어닝 및 재드로잉 공정에 의한 성형품의 두께 변화에 관한 연구[15], 세장비가 큰 사각 컵의 성형공정에 대한 유한요소 해석[16], 다단 디프드로잉 공정에서의 초기 블랭크 설계 및 개선[17] 등과 같은 연구들이 진행되었다.

하이브리드 자동차의 니켈-수소 2차 전지(Ni-MH, Nickel-coated Metal Hydrogen)용 직사각 컵에 사용되는 소재는 부식 방지를 위해 니켈 박막 코팅된 두께 0.4mm의 냉간압연강판이며, 이의 성형공정은 드로잉과 재드로잉 그리고 소재의 두께 분포를 개선하는 아이어닝 공정이 주된 공정이다. 이러한 다단 디프드로잉 공정은 일반적인 원형 단면에 대한 디프드로잉 공정에 비해 더 복잡한 변화 형태를 보인다. 복잡한 변형 메커니즘은 최종 제품의 기계적 성질에 대한 예측이 쉽지 않게 하며, 최종 제품을 얻기 위한 다단 디프드로잉의 공정 설계 또한 용이하지 않다. 뿐만 아니라 생산성 향상 및 비용 절감 등을 위해서 트리밍 같은 여분의 공정을 최소화하고 연속적인 드로잉이 이루어질 수 있도록 공정을 설계해야 한다. 따라서 공정 설계에 있어서 이러한 요건들이 모두 고려되어야 한다.

본 연구에서는 최근에 그 수요가 증가하고 있는 하이브리드 자동차의 니켈-수소 2차 전지 케이스용으로 사용되는 직사각 컵을 개발하고자 하였다. 특히, 총 여섯 단계로 이루어진 하이브리드 자동차용 니켈-수소 2차 전지의 직사각 컵 성형을 위한 성형공정 설계, 다단 디프드로잉 공정에

대한 유한요소해석 및 해석된 성형 결과를 바탕으로 직사각 컵의 변형 형상에 대한 공정 개선과 보정을 통한 유한요소 재해석을 수행하였다. 이러한 해석 결과를 근거로 각 공정에 있어서의 중간 성형품의 장축 및 단축 방향에 있어서의 두께 변화를 검토하였다.

2. 성형 공정 설계

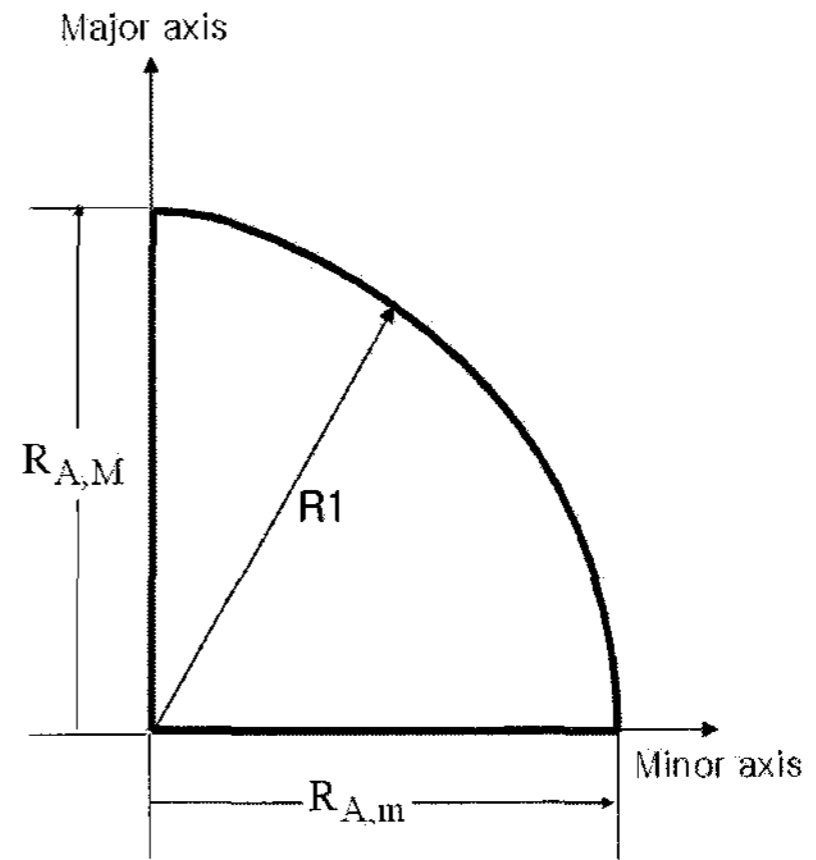
2.1 다단 디프드로잉

순송식 프레스(progressive press)를 이용한 다단 디프드로잉 공정에서의 직사각 컵 성형을 위한 공정 설계의 기본 방안은 Fig. 2 에서와 같이 원형 혹은 여러 개의 호(arc)로 구성된 타원형의 초기 블랭크를 이용하여 각각의 중간 공정(드로잉, 재드로잉 및 아이어닝 공정)이 진행됨에 따라 블랭크가 점차적으로 사각 단면을 가지게 되는 과정을 이용하는 것이다.

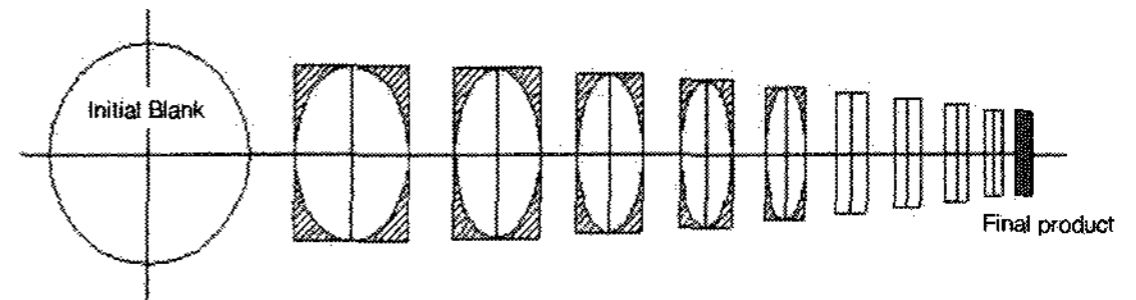
일반적으로 축대칭 원형 단면의 디프드로잉 컵의 공정 설계에서는 드로잉 비(drawing ratio)를 이용한 성형공정 설계를 수행하지만, 직사각 단면의 컵에 있어서는 이러한 드로잉 비를 직접적으로 적용하기에는 한계가 존재한다. 이에 본 연구에서는 편치 단면의 면적과 블랭크의 성형 단면의 면적을 고려하여, 이로부터 등가의 블랭크 직경(equivalent blank diameter)을 계산하고 그 결과를 드로잉 비(drawing ratio)에 이용하는 방법[18]을 사용하였다.

2.2 성형 공정 설계

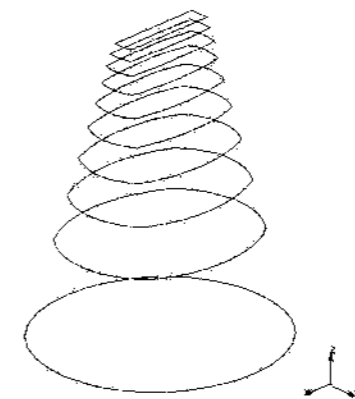
본 연구에서 적용된 하이브리드 자동차용 니켈-수소 2 차 전지 직사각 컵의 최종 성형 형상을 구현하기 위해서는 연속적으로 작업을 수행할 수 있도록 여러 개의 금형과 편치를 갖추어 성형하는 순송식 가공 공정(progressive press)을 이용한다. 다단 디프드로잉 성형 공정을 활용하게 되며, 블랭킹, 아이어닝, 드로잉 및 재드로잉 그리고 트리밍 등 4 가지의 공정이 주를 이루게 된다. 여기에서 블랭킹 공정에서는 원소재의 타원형 형태의 초기 블랭크 형상으로 가공하는 블랭킹과 동시에 1 차 드로잉 공정이 수행되며, 드로잉 및 재드로잉 공정에서는 타원형 단면의 중간 성형품을 단계적으로 직사각 형상으로 성형하는 공정이고, 아이어닝 공정은 성형 과정에서의 소재 두께 변화를 균일하게 하면서 최종 제품의 요구 두께를 만



(a) Initial blank composed with three arcs



(b) 2-dimensional process design



(c) 3-dimensional process design

Fig. 2 Example of initial blank and process design on multi-stage deep drawing in view of cross-sectional configuration

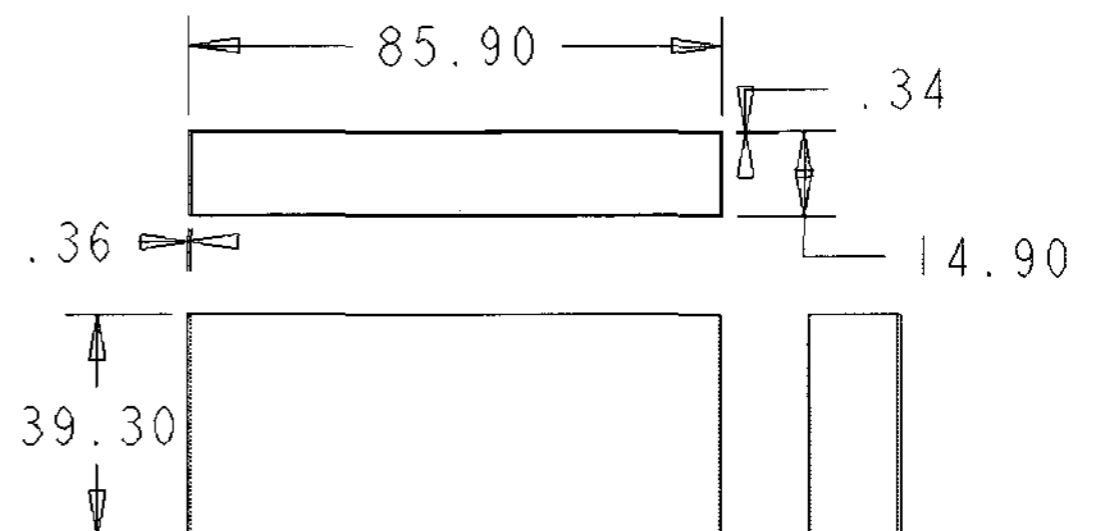


Fig. 3 Final dimension of Ni-MH rectangular cup (unit : mm)

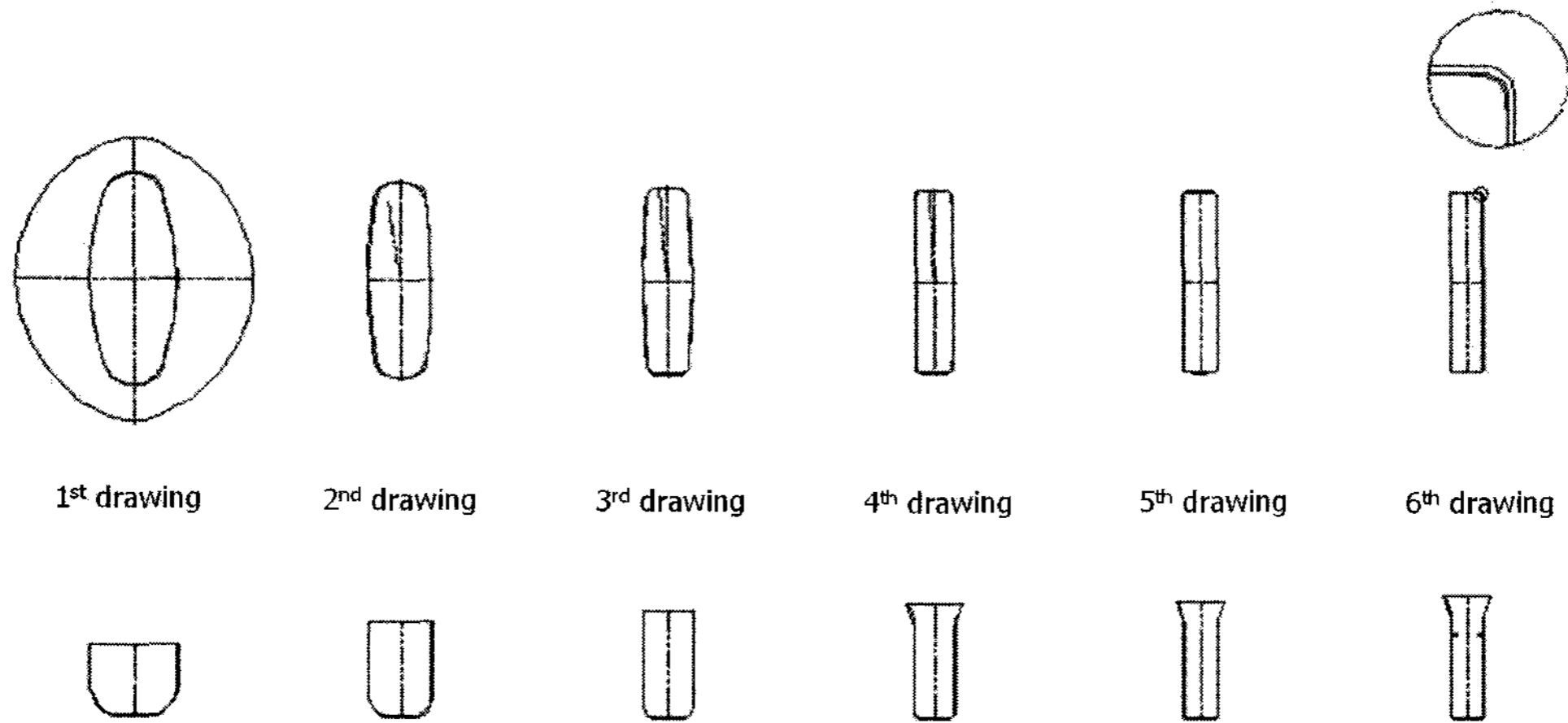


Fig. 4 Intermediate blank layout for multi-stage deep drawing process of rectangular cup

족시키기 위한 공정이다. 마지막으로, 트리밍 공정은 이전 단계에서 성형된 성형품의 플랜지부의 잉여 소재를 절단하여 최종 성형품으로 가공하는 공정이다.

본 연구에서의 다단 디프드로잉 성형 공정에 의한 직사각 컵의 성형 가공 시 가장 큰 특징은 교축 가공(biaxial forming)과 더불어 기저 성형(bottom forming)에 의해 최종 형상이 성형된다는 점이다. 교축 가공에 의해 공정 설계 등의 오차가 발생하게 되면 최종 부품에 표면 크랙 등이 유발되며, 이는 최종 성형품의 니켈-수소 2차 전지로의 조립 및 자동차 장착 후 운용 중에 발생 가능한 외부 충격에 의해 폭발 등의 위험성이 존재하기 때문에 매우 까다로운 성형공정을 내포하고 있다. 또한, 기저 성형은 성형 과정에 있어서 바닥부의 성형 불량을 방지하기 위해 펀치의 끝단 형상과 녹-아웃 장치(혹은 카운터 펀치)를 이용하여 바닥부를 편평하게 성형하는 방법을 의미한다.

본 연구의 대상인 니켈-수소 2차 전지용 직사각 컵의 최종 형상을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서와 같이 직사각 컵의 세장비(length/width)는 약 5.76이다.

Fig. 4는 본 연구에서의 직사각 컵을 성형하기 위해 설계된 다단 디프드로잉 공정의 공정 설계 결과로써 각 단계별 형상을 실제 도면 레이아웃(layout)을 바탕으로 나타내고 있다. 본 연구에서의 성형 공정은 총 여섯 단계로 이루어져 있으며 첫 번째 공정은 스트립(strip) 형태로 장입되

는 원소재를 여러 개의 호로 구성된 초기 블랭크로 가공하는 블랭킹 공정을 포함하는 드로잉 공정이며, 이를 제외하고는 각 공정이 모두 성형 공정에 아이어닝 공정을 포함하고 있다.

본 연구에서의 직사각 컵 다단 디프드로잉 공정에서는 원통형 다단 디프드로잉 공정과는 달리 재료의 유동 차이에 의해 한계 드로잉 감소율이 더 크게 작용할 수 있음이 예측 가능하며, 이를 성형 공정 설계 단계에서 반영하였다. 또한, 설계된 단면 형상을 드로잉 공정에 사용된 재질의 결합 발생 측면에서 살펴 볼 때, 현재 설계된 다단 디프드로잉 공정은 안전 계수가 아주 높게 고려되었다. 이를 다르게 표현하면 드로잉 비를 작게 설계하였다는 것을 의미하며, 이는 성형 공정 수의 증가, 플랜지 부의 귀(earing) 및 주름(wrinkling)의 과도한 발생의 원인이 될 수 있으며, 또한 이로 인해 이후 성형 과정에서 재료에 대한 손실이 클 것으로 예상되며, 블랭크 형상의 재설계가 필요한 경우도 발생 가능하다.

앞서 언급된 다단 디프드로잉 성형 공정 설계 결과를 바탕으로 장축(major axis) 및 단축(minor axis) 방향에 대한 각 단계에서의 단면 변화를 살펴보기 위해 Fig. 5와 같이 동일한 장축과 단축을 기준으로 각 공정별 정면도와 측면도를 도시하였다. Fig. 5에서의 각 단면은 Fig. 4에서의 공정 설계 결과로 부터 얻을 수 있었으며, 각각의 단면 형상들은 다단 디프드로잉 성형시 각 단계에서의 성형 펀치 및 하부 금형의 프로파일(profile)을 제공하게 된다.

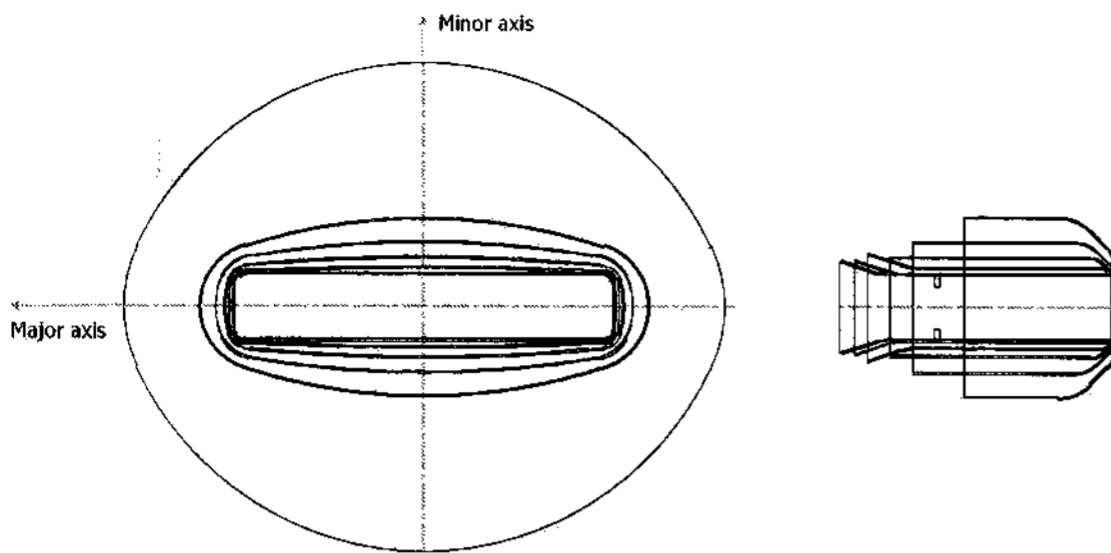


Fig. 5 Die profiles and deformation hysteresis of intermediate blank for rectangular cup

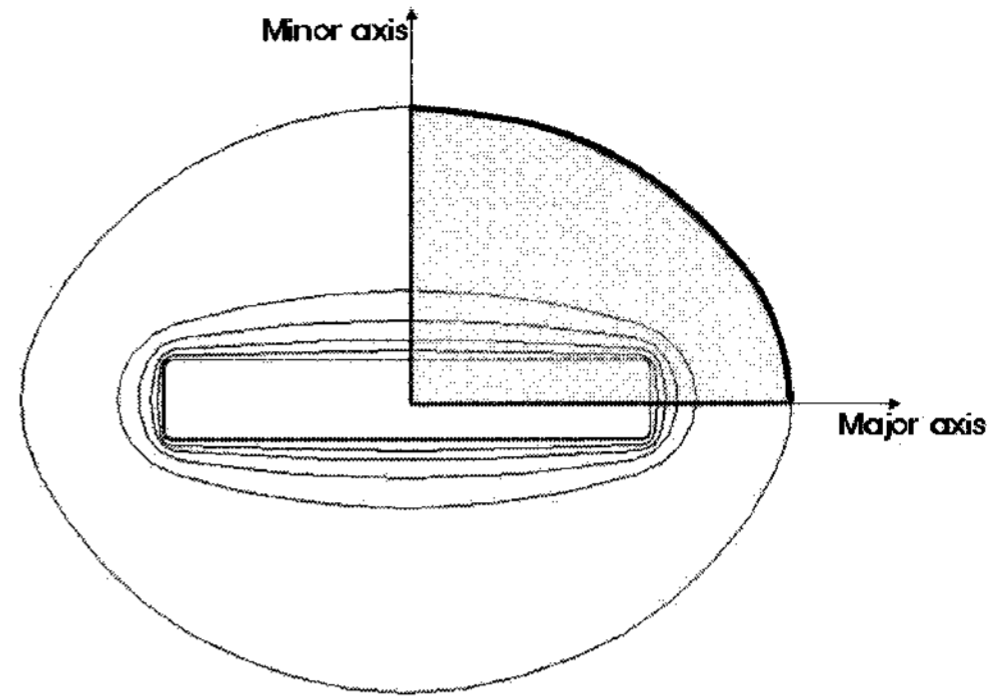


Fig. 6 Elliptic initial blank configuration

3. 다단 디프드로잉 공정의 유한요소해석

3.1 성형 해석 조건

본 연구에서는 다단 디프드로잉 공정으로 성형되는 니켈-수소 2 차 전지 직사각 컵의 유한요소 성형 해석을 수행하기 위해 외연적 유한요소 상용 코드인 LS-DYNA3D 를 이용하였다. 외연적 유한요소해석 기법은 중앙차분법(central difference method)을 이용하였으며, 또한 편치력을 천천히 작용시키거나 소재의 밀도를 가상적으로 감소시키는 등의 일련의 과정을 통해 해석시 발생가능한 동적 문제(dynamic effect)를 해결하는데 적용하였다[19~21].

해석에 사용된 소재는 등방성 소재이며, 공정중에 발생하는 열에 대한 효과는 무시할 수 있다고 가정하였다. 본 연구에서와 같이 판재성형에서 보다 정확한 이론적·수치적 접근을 위해서는 이방성 특성에 대해서도 고려하는 것이 바람직한 접근 방법이지만, 추후 언급되는 실제 성형해석 결과에서와 같이 플랜지부에서 발생하는 귀(earing) 등의 영향이 그다지 크지 않으며, 또한 편치와 하부 금형의 소재 인입부에서의 적절한 경사각 설계를 통해 편치의 유입을 원활하게 할 수 있고, 제 6 단계 이후에 플랜지부가 1 차 트리밍 공정에 의해 제거되므로 수치적·해석적 접근을 용이하게 하기 위해 소재의 이방성 효과가 미약하다고 판단하여 소재를 등방성으로 가정하였다.

각 부분별 마찰 조건은 소재와 금형 그리고 편치 사이에 있어서 쿨롱 마찰계수 0.1 로 일정하게 적용하였다. 또한, 블랭크를 제외한 편치와 다이 및 블랭크 홀더 등은 4-절점 강체 셸(rigid shell) 요소로 정의하였으며, 블랭크는 성형 공정 과정에서의 소성 굽힘 변형과 아이어닝 효과를 고려하

기 위하여 8-절점 육면체 요소를 사용하였다. 그리고, 본 연구에서 사용된 소재는 두께 0.4mm, 밀도 $7.83 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$, 탄성계수 207GPa, 포아송 비 0.28 인 부식 방지를 위해 니켈 코팅 처리된 냉간 압연강(SPCC)이며, 이 때의 소재의 변형 거동은 인장 시험에서 획득한 데이터로부터 $\bar{\sigma} = 648\bar{\epsilon}^{0.22}$ MPa 과 같은 n 층 가공 경화 모델을 이용하였다.

마지막으로, 제 1 단계 디프드로잉 성형 해석에서는 소재를 잡아주는 기능을 하는 블랭크 홀더를 사용하였고, 이후부터는 블랭크 홀더 대신 바닥 부분의 두께를 일정하게 유지시키기 위한 지지 성형 방식으로써 녹-아웃 장치를 사용하였다.

3.2 유한요소 모델링

니켈-수소 2 차 전지용 직사각 컵 성형을 위한 초기 블랭크는 Fig. 6 과 같이 음영으로 처리된 부분이며 8-절점 육면체 요소를 사용하였으며, 해석상에 있어서 소성변형과 아이어닝 효과에 대한 고찰을 위해 두께 방향으로 2 층(layer)의 요소를 배치하였다. 육면체 요소는 유한요소 해석시 블랭크의 두께 방향 변형을 자세히 보여줄 뿐만 아니라, 그 증감 또한 정확히 계산할 수 있다. 또한 1 차 드로잉된 중간 성형품과 최종 드로잉 성형품과의 형상 차이가 크므로, 최종 성형품에 대한 보다 자세한 해석을 위해 초기 블랭크의 중심부 요소를 보다 세밀하게 구성하였다.

앞서 언급된 Fig. 4 와 Fig. 5 의 성형공정 설계 결과를 바탕으로 Fig. 7 과 같이 3 차원 유한요소 성형 해석 모델을 구성하였으며, 각 단계에서의 편치와 블랭크, 블랭크 홀더, 녹아웃 장치 그리고 다이를 묘사하고 있다. 또한, 다단 디프드로잉 성

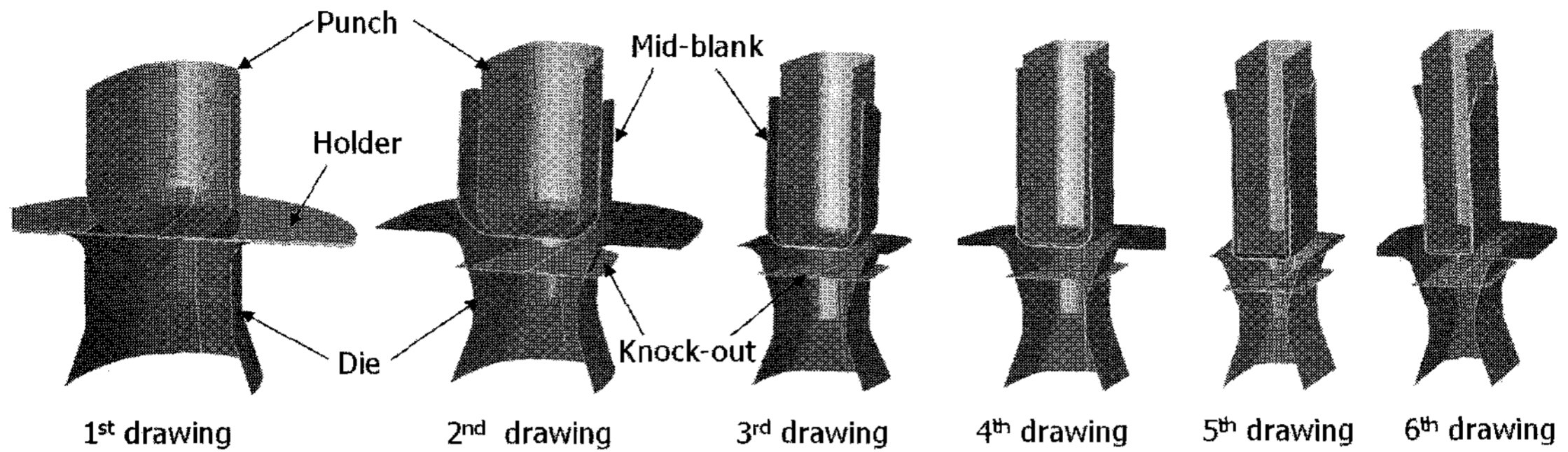


Fig. 7 3-dimensional finite element modeling for multi-stage deep drawing

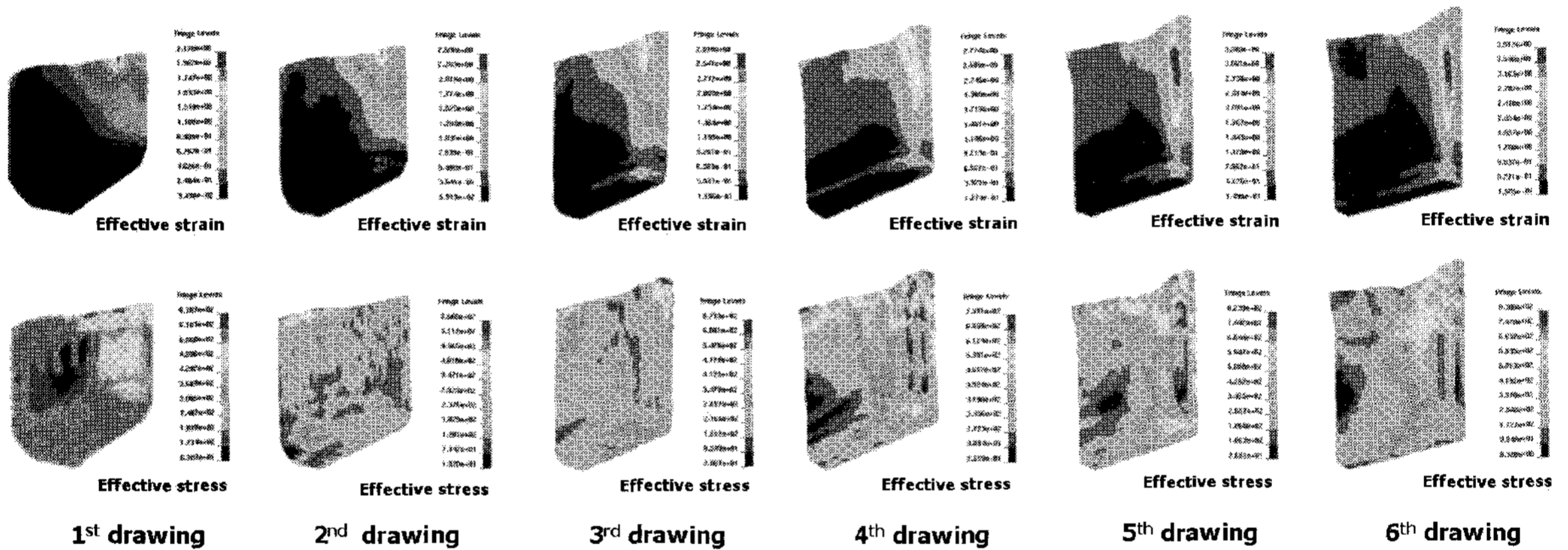


Fig. 8 Effective strain and stress distribution by FE analysis of multi-stage rectangular deep drawing process

형 해석에 있어서 금형 및 소재는 대칭 조건하에서 1/4 모델을 적용하였으며, 이전 단계의 응력분포 및 변형률을 그대로 유지한 채 다음 단계의 유한요소 성형 해석에 적용하였다.

3.3 유한요소해석 및 결과

Fig. 8 은 직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정에 있어서 제 1 단계에서 제 6 단계까지의 유한요소 성형 해석 결과를 보여주고 있다.

제 1 단계 디프드로잉 공정은 스트립(strip) 형태의 원소재로부터 블랭킹과 벽의 두께 변화가 없는 싱킹(sinking) 작업으로 수행되며, 블랭킹 펀치가 드로잉 작업에서 스트리퍼(stripper)와 같은 역할을 하게 된다. 이러한 공정으로 성형된 블랭크의 변형률은 최대 약 2.176 로 장축(major axis)과 단축(minor axis)이 만나는 코너부 상단의 특정 부위에서 국소적으로 크게 나타나지만, 성형 공정이 지속되면서 향후 트리밍 공정에 의해 제거될 부

분이므로 중요하게 고려하지 않았다. 평균적으로 분포하는 변형률을 살펴보면 약 0.248 으로 나타났다으며, 바닥면과 단축 방향에서의 측벽에서는 두께 변화가 거의 나타나지 않음을 알 수 있었다.

제 2 단계 디프드로잉 이후의 공정에서는 장축 방향과 단축 방향 측벽의 아이어닝(Ironing)을 동반한 드로잉 공정이 수행되게 된다. 또한 제 4 단계 공정부터는 이후 공정에서 최종 제품을 성형하기 위한 블랭크의 체적을 확보하고, 다이 마찰력의 증대 등 불량률을 야기할 수 있는 여유량을 절단하기 위해 플랜지(Flange)를 남기게 된다.

제 2 단계 디프드로잉 성형 해석결과로 최대 변형률이 약 2.508 로 제 1 단계에서의 결과와 유사하게 장축(major axis)과 단축(minor axis)이 만나는 코너부 상단의 특정 부위에서 국부적으로 크게 나타나지만, 성형 공정이 지속되면서 향후 트리밍 공정에 의해 제거될 부분이므로 중요하게 고려하지 않았다. 평균적으로 분포하는 변형률을 살펴보

면 약 0.304 로 나타났으며, 제 2 단계에서도 바닥면과 단축 방향에서의 측벽에서는 두께 변화가 거의 나타나지 않음을 알 수 있으며, 아이어닝 효과가 아직까지는 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.

제 3 단계에서는 최대 변형률은 약 2.810, 평균 변형률은 약 0.388 로 나타났으며, 제 4 단계에서는 최대 변형률 약 2.774, 평균 변형률 약 0.524 정도로 계산되었다. 제 3 단계에서는 장축과 단축이 만나는 코너부 하단에 국소적으로 두께 변화가 발생함을 알 수 있었고, 제 4 단계에서는 코너부 하단뿐만 아니라, 장축 방향과 단축 방향 모두 코너부 및 각 방향에서의 측벽 코너부에서도 두께 변화가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 제 3 단계에서부터 아이어닝 효과가 서서히 나타남을 알 수 있다.

제 5 단계와 제 6 단계에서의 최대 변형률은 각각 약 3.305 와 약 3.717 로 나타났으며, 동시에 평균 변형률은 약 0.634 와 약 0.715 로 나타났다. 제 5 단계와 제 6 단계에서는 점진적으로 최종 성형품으로의 형상을 갖추어가는 과정이지만, Fig. 8 에 도시되어있는 바와 같이 제 4 단계에서부터 제 6 단계까지 디프드로잉이 수행된 중간 성형품의 장변부(단축 방향의 측벽부)를 따라 플랜지의 주름이 발생하였음을 확인할 수 있다. 이에 따라 플랜지부에는 많은 양의 주름이 발생하기 때문에 이러한 필요 없는 주름부를 제거하기 위하여 트리밍 공정이 제 6 단계 이후에 부가적으로 수행되어야 한다.

Fig. 9 에는 1 차 설계된 성형 공정에 대해서 장축과 단축 방향에 대한 두께 분포를 나타내었다. 장축 방향의 두께 분포를 살펴보면 첫 번째 드로잉에서는 일반적인 드로잉 현상인 중심에서 끝단으로 갈수록 두께가 두꺼워지는 현상을 보이고 있다. 두 번째 드로잉 이후부터 아이어닝 효과에 의한 비교적 균일한 두께 분포가 장축 드로잉 컵 벽면에서 나타나고 있으며, 장축의 드로잉 컵 코너에서 두께 변화가 급격하게 발생함을 확인할 수 있다. 이는 디프드로잉에 있어서 많이 보고되고 있는 취약 부분으로 코너부의 두께 변화를 완화하는 것도 공정 설계에 있어서 공정 변수로 사용될 수 있다. 이후 기술하게 될 유한요소 재해석에서는 이러한 코너부의 두께 변화를 완화하는데 초점을 두어 수정한 도면을 바탕으로 수행되었다. 단축 방향의 두께 분포는 대체로 균일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

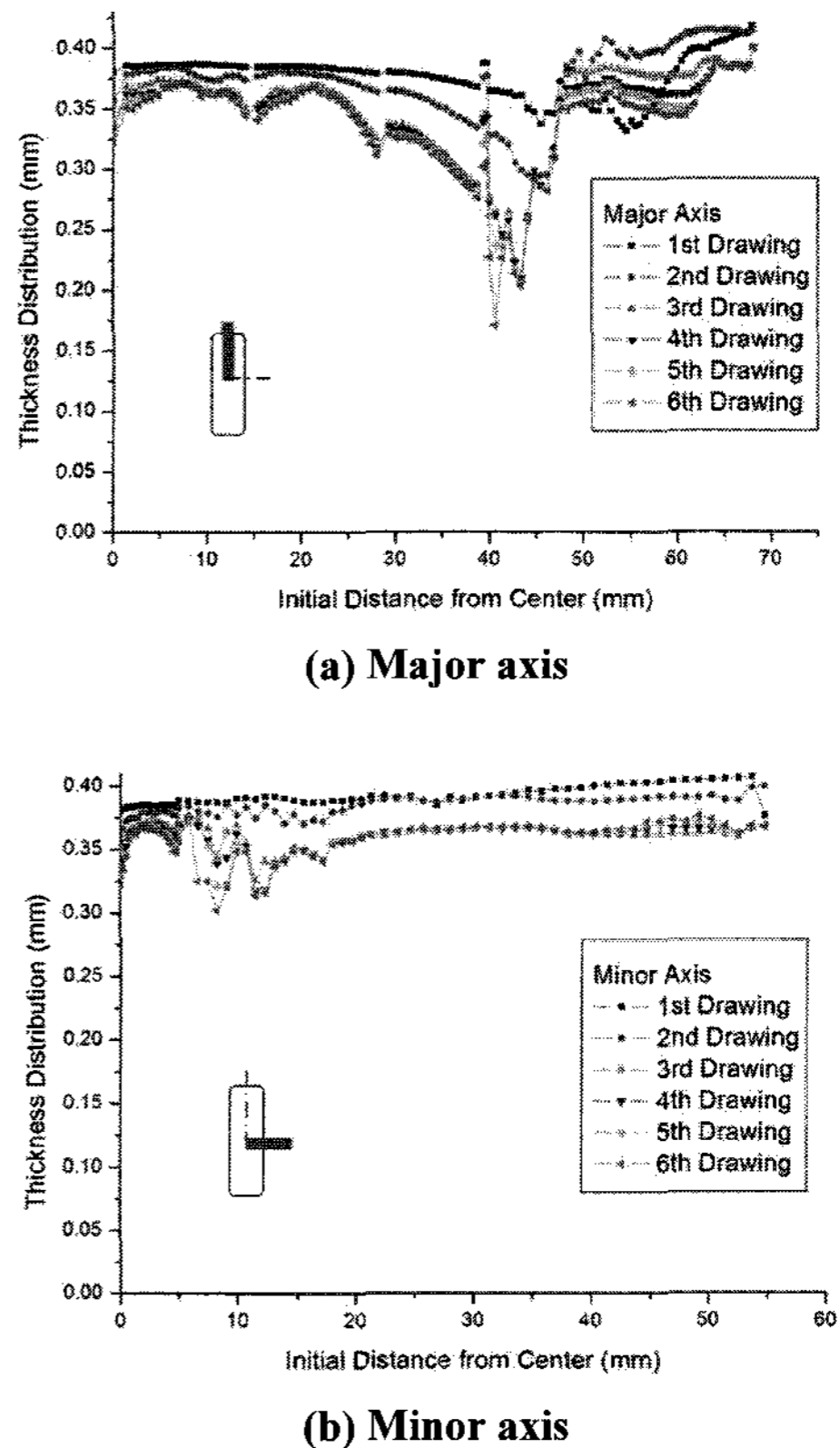


Fig. 9 Thickness distribution of intermediate blank at each deep drawing stage

3.4 성형 공정 개선과 유한요소 재해석

앞서 언급된 2.2 절에서 성형공정 설계 결과를 바탕으로 한 3.3 절의 유한요소해석 결과로부터 장축과 단축, 그리고 코너부에서의 두께 변화가 크게 발생함을 알 수 있었고, 특히 장축 방향에서의 두께 변화가 두드러짐을 파악할 수 있었다. 이에 따라 본 절에서는 장축 방향 모서리부의 소재 두께 변화를 줄이기 위한 접근을 시도하였다. 본 성형 공정의 개선에서는 3.3 절에서의 기본적인 유한요소해석 조건은 모두 동일하게 설정하였으며, 단지 각 단계에서의 펀치 형상만을 수정하는 방법으로 성형 공정을 개선하고자 하였다.

즉, Fig. 10 에서 보여지는 바와 같이 Fig. 7 에서의 블랭크, 블랭크 홀더, 하부 금형 및 녹-아웃 장치는 모두 동일하다. 본 연구에서의 펀치 형상 수정을 통한 성형 공정 개선은 소재와 접촉하는 펀치의 형상을 장축 방향의 모서리 곡률 반경을 크게하여 장축 방향의 아이어닝 기준 두께를 늘이는 방법으로 수행하였다. 본 절에서는 앞서 3.3 절

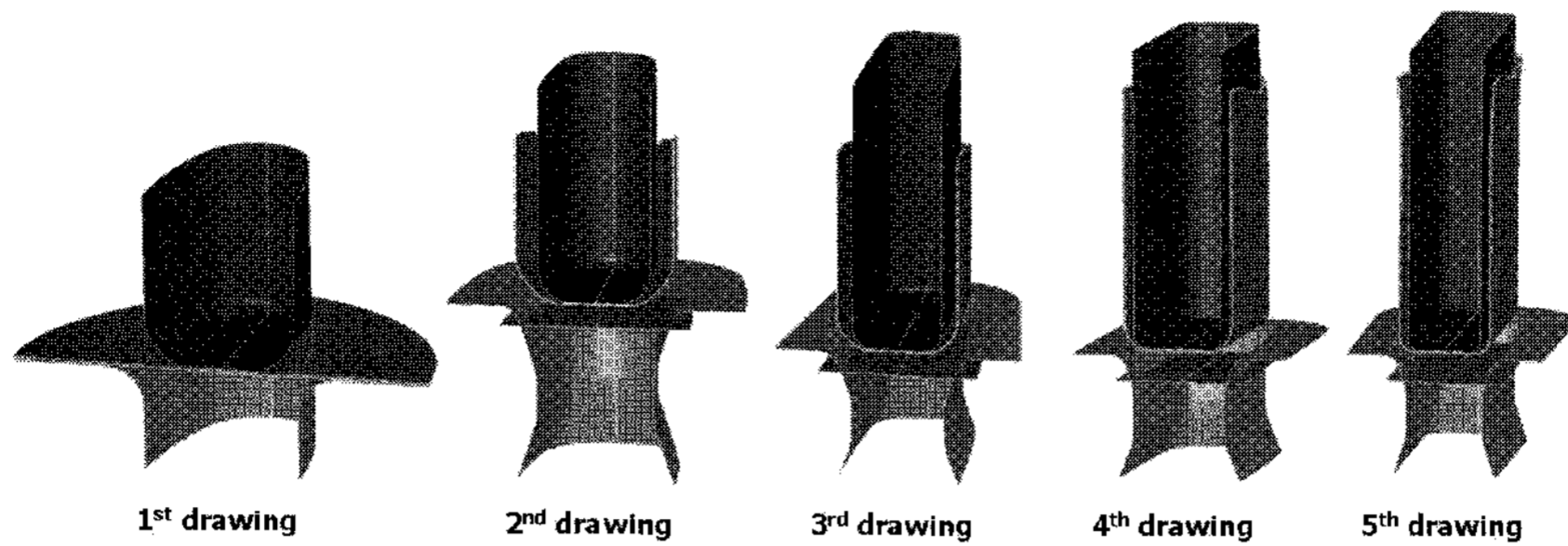


Fig.10 3-dimensional finite element modeling with modified punch

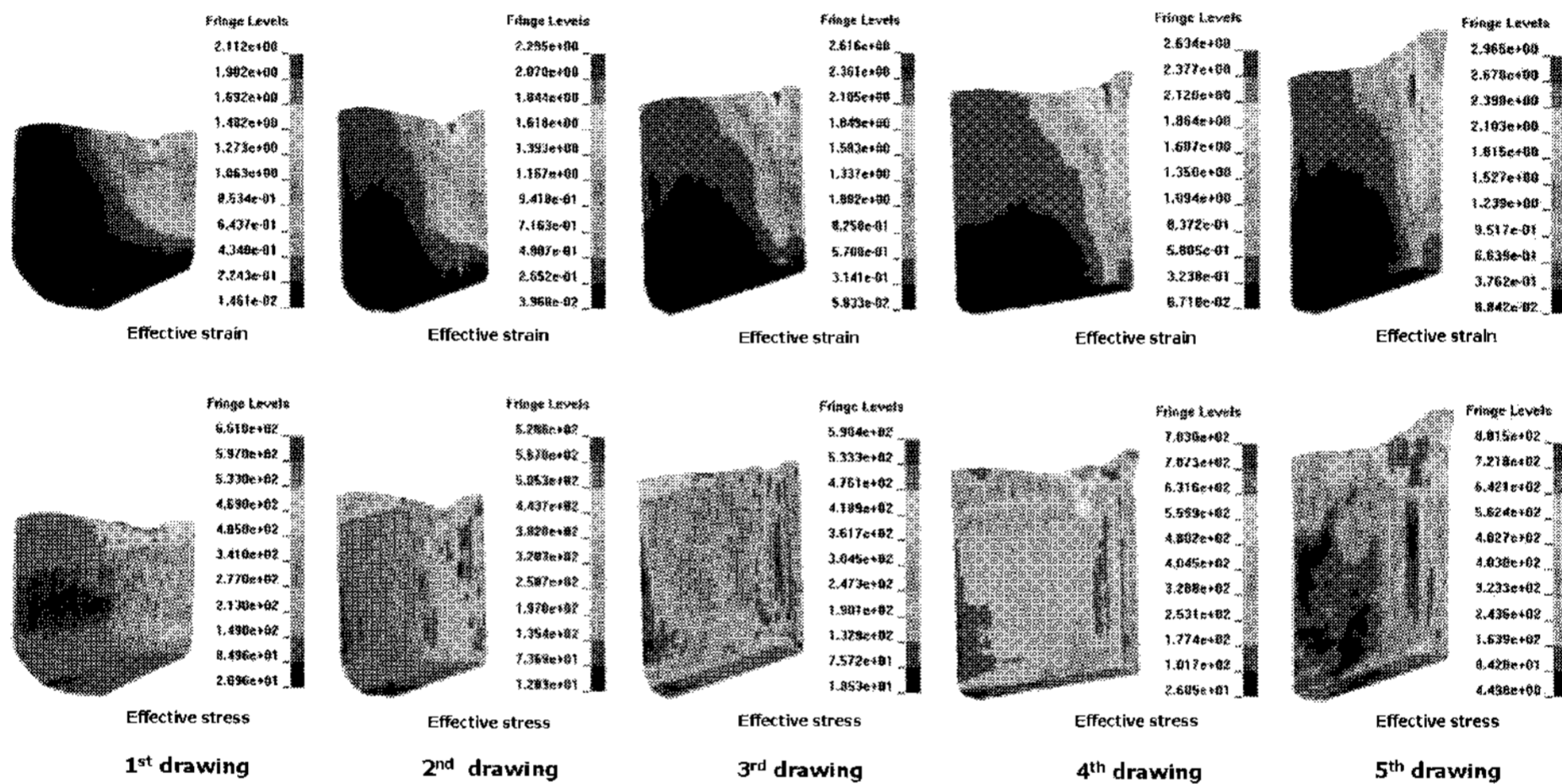


Fig.11 Effective strain and stress distribution by FE analysis with modified punch

에서의 해석 결과로부터 제 6 단계의 디프드로잉 공정은 제 5 단계와 유사한 변형 거동을 보이므로, Fig. 10 에서와 같이 제 6 단계를 제외한 제 1 단계에서부터 제 5 단계까지의 3 차원 유한요소 재해석을 위한 성형 해석 모델을 구성하였다.

펀치의 형상이 수정됨에 따라 제 2 단계 이후 장축 방향과 단축 방향 측벽의 아이어닝을 동반한 디프드로잉 작업이 이루어졌던 이전의 유한요소해석에 비해 본 절에서의 유한요소 재해석에 있어서 제 2 단계에서는 단축 방향의 아이어닝과 드로잉이 수행되고, 제 3 단계 이후부터 장축 방향과 단축 방향 모두 아이어닝과 디프드로잉 작업이 동시에 수행되게 성형 공정을 개선하였고, 이에 따라 제 3 단계 및 제 4 단계 다단 디프드로잉 공정에서 이전의 유한요소해석에 비해 장축 방향 아이어닝 기준 두께가 두꺼워진 상태로 유한요소해석이 진행되게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 본 절에서의 해석 공정 수는 5

공정이며, Fig. 11 은 앞의 3.3 절에서의 유한요소 해석 결과로부터 장축과 단축 방향에서의 두께 변화를 완화시키기 위해 펀치 수정 및 개선 결과를 이용하여 유한요소 재해석을 수행한 결과이다.

Fig. 11 의 제 1 단계 디프드로잉 공정에 대한 유한요소 재해석 결과, 최대 변형률과 평균 변형률이 다소 낮게 나타남을 확인할 수 있다. Table 1 에서는 이전의 유한요소 해석과 재해석 결과를 최대 변형률과 평균 변형률 값에 대해서 비교한 결과이다.

또한, 펀치 형상 수정 및 개선을 통한 유한요소 재해석 결과로 플랜지부의 주름 발생이 다소 완화되었음을 알 수 있었다. 유한요소 재해석에서 제 1 단계부터 제 5 단계까지의 평균적인 변형률 분포를 살펴보면, 이전의 해석 결과와 비교해서 두께 변화의 정도가 상당히 감소되었음을 확인할 수 있었다.

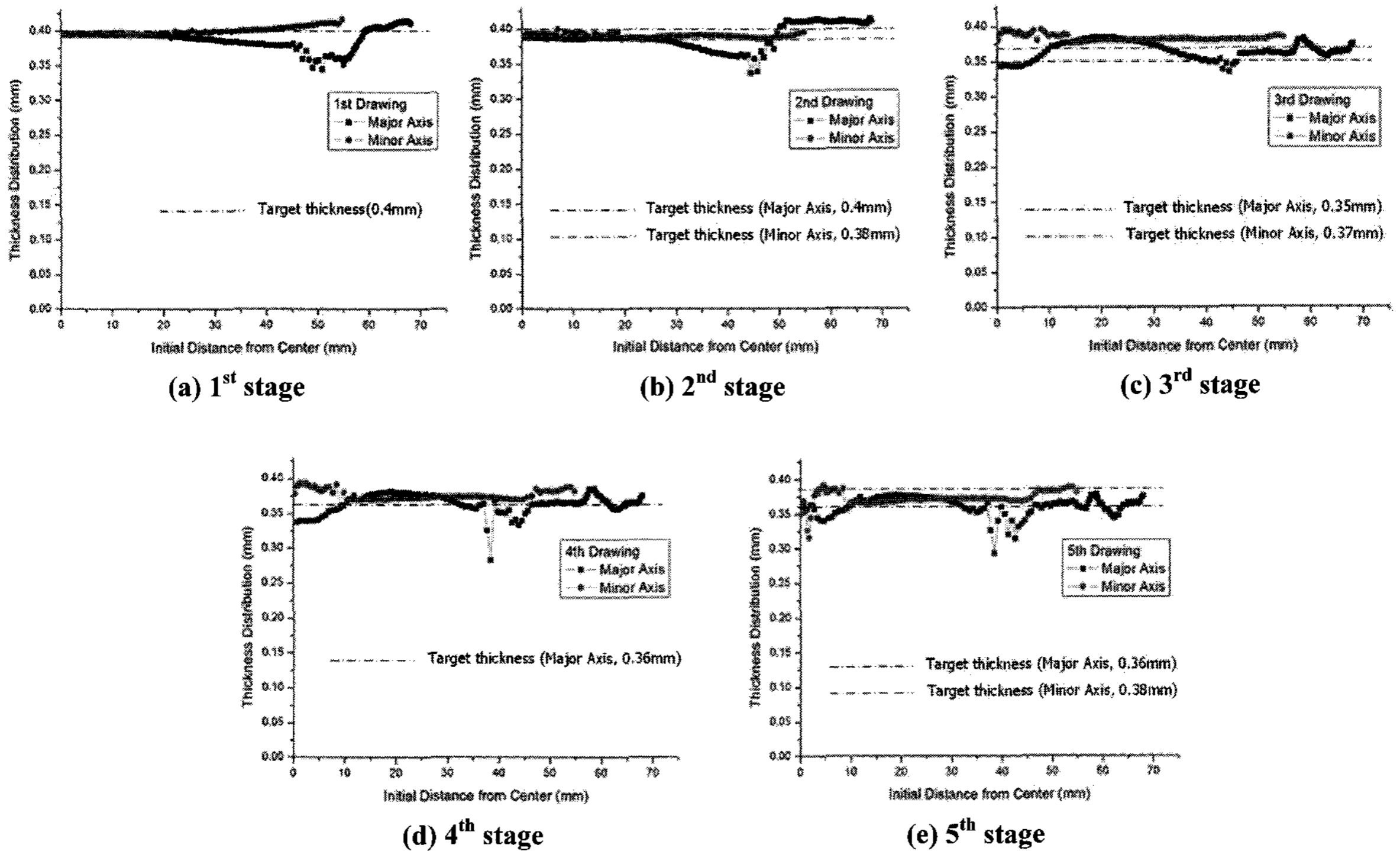


Fig.12 Thickness distribution of intermediate blank at each deep drawing stage with modified punch

Table 1 Comparison of effective strain between before and after modification of punch shape

Effective strain		Before	After
1 st drawing	Max.	2.176	2.112
	Avg.	0.248	0.223
2 nd drawing	Max.	2.508	2.295
	Avg.	0.304	0.265
3 rd drawing	Max.	2.810	2.616
	Avg.	0.388	0.314
4 th drawing	Max.	2.774	2.634
	Avg.	0.524	0.323
5 th drawing	Max.	3.305	2.966
	Avg.	0.634	0.376
6 th drawing	Max.	3.317	-
	Avg.	0.715	-

성형 공정 개선에 있어서 펀치 형상의 수정을 통한 중간 성형품의 두께 분포를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12에서와 같이 장축의 디프드로잉 직사각 컵 코너 부근의 두께 감소가 두드러지게 나타나고 있음이 관찰되었으나, Fig. 9에서의 각 단계별 두께 변화보다 펀치 형상의 수정으로 인해 두께 감소현상이 현저히 줄어들었음을 확인할 수 있다.

직사각 컵 성형을 위한 다단 디프드로잉 공정에 있어서 장축과 단축이 서로 교차하는 코너부

에서의 두께 변화도 중요한 요소이다. 본 연구에서는 이러한 코너부에서의 두께 변화를 살펴보기 위해 Fig. 13에서와 같이 제 1 단계에서부터 제 5 단계까지의 각 단계에서의 장축과 단축이 교차하는 코너부위에 대한 두께 변화를 살펴보았다.

Fig. 13에서와 같이 다단 디프드로잉 성형 공정이 진행되면서, 장축과 단축의 디프드로잉과 아이어닝 공정에 의해 코너부위로 소재가 이동하는 경향을 보이게 되며, 이에 따라 코너부에서의 두께가 증가하는 경향을 가진다는 것을 알 수 있었다. 제 1 단계 블랭킹 및 디프드로잉 공정에서는 코너부 하단에서 상단으로 갈수록 블랭크의 두께가 서서히 증가함을 알 수 있고, 이는 Fig. 12(a)에서 알 수 있듯이 단축 방향의 측벽부(즉, 장변부를 말함) 두께가 감소되면서 소재가 코너부로 이동함을 의미한다. 또한 제 2 단계에서는 디프드로잉과 아이어닝에 의해 서서히 소재의 두께가 목표 두께로 감소해야 하지만 아이어닝의 효과가 그다지 크지 않음을 나타내고 있으며, 장축 및 단축 방향에서의 두께 변화에 따른 코너부의 두께 증가가 두드러지게 나타나고 있다. 제 3 단계와 제 4 단계에서는 본격적으로 코너부에서의 아이

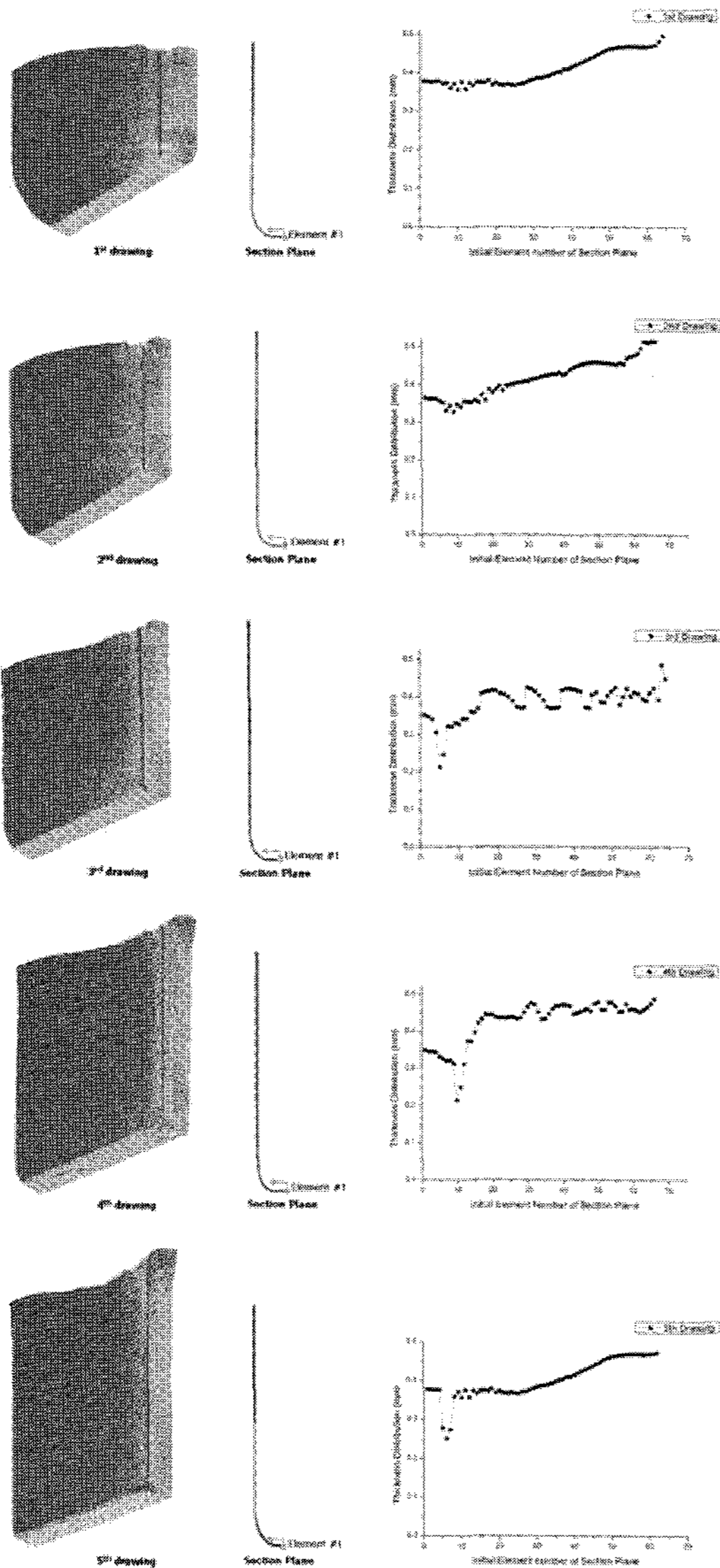


Fig.13 Thickness distribution of corner region in each intermediate blank with modified punch

어닝 효과가 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 제 5 단계에서는 코너부에서의 두께가 다시 증가하는 경향을 보이지만, 이후의 과정에서 트리밍 공정에 의해 두꺼워진 플랜지부가 제거될 것이기 때문에 중요하게 고려되지 않았다.

3.5 펀치 형상 수정 전·후의 블랭크 두께 분포 비교

앞서 3.3 절에서 언급한 다단 디프드로잉 성형

공정에서의 유한요소해석 결과와 3.4 절에서 제시된 중간 블랭크의 과도한 두께 변화의 완화를 위한 성형 공정 개선 및 유한요소 재해석 결과를 비교하기 위해 Fig. 14 에서와 같이 제 1 단계에서부터 제 5 단계까지의 장축 방향으로의 두께 분포를 비교하였다. 이러한 두께 비교는 본 연구에서의 직사각 컵은 세장비가 약 5.76 으로 큰 편이고, 이 직사각 컵은 다단 디프드로잉 공정에 있어서 장축 방향에서의 두께 변화가 두드러지게 나타나므로 이 부분에 대해서 중점적으로 관찰하기 위함이다.

Fig. 14 에서와 같이 펀치 형상 수정 및 개선을 통한 성형 공정 개선 전·후의 두께 변화에 있어서 성형공정 개선 후의 유한요소 재해석 결과로 각 단계에서의 두께 변화의 정도가 감소함을 알 수 있었다. 즉, 제 1 단계에서는 개선 전·후의 중간 성형품의 두께 변화 경향이 유사하게 나타나고 있지만, 제 2 단계 이후 공정 개선 후 장축 방향으로의 아이어닝 기준 두께의 증가로 인한 보다 개선된 아이어닝 효과가 나타나고 있음을 관찰할 수 있었다. 결론적으로 말하면, 각 단계에서의 펀치 형상을 수정함에 의해 개선된 성형 공정 설계 방안은, 펀치 형상 수정 및 개선 전과 비교해서 장축과 단축 방향 모두에 있어서 각 단계별 두께 분포 및 두께 변화의 정도가 상대적으로 안정적으로 개선되었다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 해석결과 고찰 및 결론

본 연구는 하이브리드 자동차용 2 차 전지 직사각 컵의 다단 디프드로잉 공정에 대한 유한요소 해석을 통하여 성형 공정 및 공정 설계에 따른 중간 성형품의 두께 변화 측면에서의 성형성을 관찰하였다. 성형성을 판단하는데 있어서 가장 중점이 되는 사항은 직사각 컵의 두께 분포이며, 장축 방향과 단축방향에 대한 두께 분포에 대한 고찰을 통하여 연구가 수행되었다. 처음 설계된 공정에서는 단축 방향으로의 두께 분포는 거의 일정한 양상을 나타내었으나, 장축 방향의 두께 분포에서는 공정이 진행될수록 코너부의 두께가 얇아져 초기 두께의 최대 40% 수준까지 감소하는 경향을 나타내어 중간 성형품 및 최종 성형품의 파단 발생의 가능성이 있었다. 따라서 코너부의 두께 감소를 보완하기 위하여 장축 방향의 모서리 코너 반경을 증가시켜, 장축 방향으로의 아

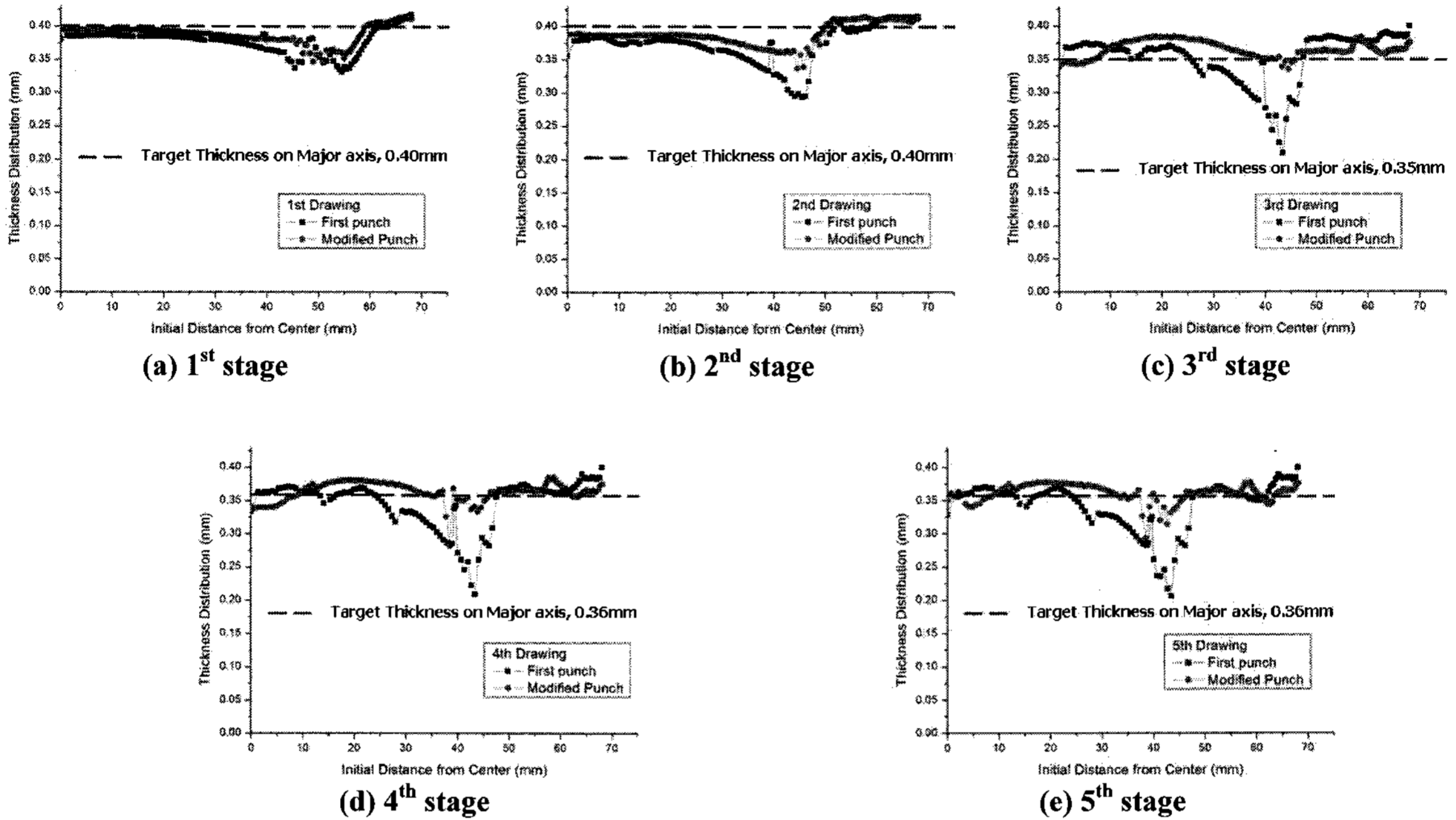


Fig.14 Comparison of thickness distribution of intermediate blank according to major axis at each deep

이어닝 기준 두께를 늘리는 방법을 공정 설계 및 성형공정의 개선방안으로 채택하였다. 이에 따라 펀치를 수정하여 유한요소 재해석을 수행한 결과 장축 방향의 코너부에서 여전히 두께 감소가 높게 나타났지만 초기 설계된 형상에 비해 두께 감소율이 현저히 줄어들었음을 관찰할 수 있었다.

본 연구에서의 유한요소해석 결과를 바탕으로 실제 생산에 필요한 금형의 설계 및 제작, 그리고 직사각 컵의 시제작이 이루어질 계획이며, 이는 위의 유한요소해석 결과와 비교될 것이다. 또한, 다단 디프드로잉 공정에서의 유한요소해석 결과 등을 이용하여 성형한계선도를 이용한 성형성 평가도 추가적으로 수행될 것이다.

후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과이며, 아울러 2 단계 BK21 사업 및 국가핵심연구센터사업 (R15-2006-022-02002-0)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. S. Benson, N. D. Whitehouse, 1979, Internal combustion engines, Oxford, Pergamon Press.
- [2] A. Dubreuil, F. Foucher, 2007, HCCI combustion: effect of NO in EGR, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2789~2886.
- [3] C. A. Idcheria, L. M. Pickett, 2007, Effect of EGR on diesel premixed-burn equivalence ratio, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2931~2938.
- [4] A. Kimura, I. Ando, K. Itagaki, 2005, Development of hybrid system for SUV, SAE International, No. 2005-01-0273.
- [5] S. B. Park, Y. Choi, B. M. Kim, J. C. Choi, B. H. Kim, 1996, A study on the computer-aided design system of axisymmetric deep drawing process(I), Transactions of Materials Processing, Vol. 5, No. 1, pp. 27~36.
- [6] W. J. Chung, J. H. Kim, J. G. Ryu, 2003, New design of cylindrical cup drawing by forming, analysis, Transactions of Materials Processing, Vol. 12, No. 7, pp. 647~653.

- [7] V. Pegada, Y. Chun, S. Santhanam, 2002, An algorithm for determining the optimal blank shape for the deep drawing of aluminum cups, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 743~750.
- [8] D. H. Park, W. R. Bae, S. B. Park, S. S. Kang, 2000, A study on the influence of blank shape in elliptical deep drawing process, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 469~477.
- [9] J. K. Chung, W. S. Cho, T. S. Lee, 2004, Combined process of ironing and redrawing in progressive drawing, *Journal of the KSME, Part A*, Vol. 28, No. 5, pp. 654~661.
- [10] S. Yoshihara, H. Nishimura, H. Yamamoto, K. Manabe, 2003, Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, pp. 609~613.
- [11] F. K. Chen, T. B. Huang, C. K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 1553~1559.
- [12] M. Gavas, M. Izciler, 2007, Effect of Blank holder gap on deep drawing of square cups, *Materials & Design*, Vol. 28, pp. 1641~1646.
- [13] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, 2001, Analysis of rectangular cup drawing process with large aspect ratio using multi-stage finite element inverse analysis, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 5, pp. 389~395.
- [14] S. H. Kim, S. H. Kim, H. Huh, 2002, Tool design in a multi-stage drawing and ironing process of a rectangular cup with a large aspect ratio using finite element analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 863~875.
- [15] H. J. Kim, T. W. Ku, B. S. Kang, 2001, FE analysis and die design of the multi-stage rectangular deep drawing process with the large aspect ratio, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 10, No. 6, pp. 456~464.
- [16] T. W. Ku, B. K. Ha, W. J. Song, B. S. Kang, S. M. Hwang, 2002, Finite element analysis of multi-stage deep drawing process for high precision rectangular case with extreme aspect ratio, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 128~134.
- [17] T. W. Ku, C. S. Park, B. S. Kang, 2004, A study on initial blank design and modification for rectangular case forming with extreme aspect ratio, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 13, No. 5, pp. 307~318.
- [18] T. W. Ku, H. Y. Ryu, J. K. Lee, B. S. Kang, 2007, Numerical and experimental approach for rectangular cup of Li-Ion battery container with extreme aspect ratio, *Key Engineering Materials*, Vol.340-341, pp. 689~694.
- [19] LS-DYNA Theoretical Manual, 1998, Livermore Software Technology Coporation, Livermore, CA, USA, June.
- [20] S. Kobayashi, S. I. Oh, T. Altan, 1989, *Metal forming and the finite element method*, Oxford University Press, NY, USA.
- [21] D. P. Flanagan, T. Belytschko, 1981, A uniform strain hexahedron and quadrilateral with orthogonal gourglass control, *International Journal of Numerical Method in Engineering*, Vol. 17, pp. 679~706.