

세탁조의 제작공정해석 및 공정개선에 관한 연구

임 중 연, 이 호 응*, 황 병 복**
인천과학아카데미 생산/자동화연구실
*동국대학교 공과대학 기계공학과
**인하대학교 공과대학 자동화공학과

A Study on the Process Sequence Design of a Tub for the Washing Machine Container

Joong-Yeon Lim, Ho Yong Lee*, Beong-Bok Hwang**
Inchon Academy of Science, Manufacturing/Automation Lab.
*Department of Mechanical Engineering, Dongguk University
**Department of Industrial Automation, Inha University

Abstract

Process sequence design in sheet metal forming process by the finite element method is investigated. The forming of sheet metal into a washing machine container is used to demonstrate the design of an improved process sequence which has fewer operations. The design procedure makes extensive use of the finite element method which has simulation capabilities of elastic-plastic modeling. A one-stage process to make an initial blank to the final product is simulated to obtain information on metal flow requirements. Loading simulation for a conventional method is also performed to evaluate the design criteria which are uniform thickness distribution around the finished part and maximum punch load within limit of available press capacity. The newly designed sequence has two forming operations and can achieve net-shape manufacturing, while the conventional process sequence has three forming operations. This specific case can be considered for application of the method and for development of the

sequence design methodology in general.

Key words : Washing Tub, Process Sequence Design, Elastic-Plastic FEM

1. 서 론

판재가공(sheet metal forming)을 통하여 유용한 형상을 만들어 내는 과정에는 대단히 넓은 범위의 지식이 필요하다^[1,2]. 일반적으로 판재가공에 의한 제품은 종류가 다양하고 응용범위가 넓으며 비강도(strength-to-weight ratio) 및 비강성(stiffness-to-weight ratio)이 높은 장점이 있어 프레스가공의 주종을 이루고 있다. 판재가공은 단순한 굽힘과 복잡한 2중 곡률을 갖는 면의 성형등 크기와 형상이 다양하다. Sachs^[3]는 이와 같이 많은 판재가공 방법에 대한 일반적인 원칙들을 정리하였다. 판재가공에서의 변형형태는 기본적으로 디프드로잉(deep drawing), 신장, 굽힘의 3 가지로 분류할 수 있으며 일반적으로 3 가지 변형형태가 동시에 발생하나 블랭크의 크기와 형상에 따라서 한 두 가지 변형형태가 우세하게 나타난다^[4].

판재성형 가공에서의 성형한계는 완성된 부품의 결함 여부로써 판단하게 되며 주로 발생하는 결함은 파단(fracture)과 주름(wrinkling)이다^[5]. 판재의 디프드로잉 작업시 드로잉한계는 블랭크직경과 펀치직경의 비(한계드로잉비) 또는 블랭크직경과 컵직경의 비(지름 감소율)로써 표현된다. 또한 플랜지 부위에서 주로 발생하는 주름의 형성은 디프드로잉 작업의 범위를 더욱 좁히게 되며 컵의 벽면 부위에 형성되는 퍼커링(puckering) 현상도 제약조건이 된다. 플랜지에서 주름이 잡히는 현상은 블랭크에 적절한 압착력을 가함으로써 방지할 수 있으며 퍼커링 현상은 다이코너의 곡률을 블랭크의 두께보다 상당히 크게 함으로써 줄일 수 있다. 특히 스탬핑(stamping) 작업에서 많이 나타나는 결함으로 펀치노즈 부위의 파단이 있는데 네킹현상이 발생하여 신장성형의 과정이 진행됨에 따라 소재가 파단된다. 따라서 신장성형에서는 소재의 국부적인 변형이 성형한계를 결정하며 일반적으로 네킹의 발생 부위는 펀치와 소재 사이의 마찰상태에 따라 달라진다. 굽힘성형시에는 소재의 두께방향으로 응력의 편차가 대단히 크다. 인장변형의 크기는 굽힘곡률과 굽힘 각에 따라 달라지며 인장을 받는 면에서 소재의 국부적인 두께감소로 인하여 파단이 일어난다.

마지막으로 판재성형에서는 스프링백(springback) 현상과 잔류응력(residual stress)을 고려하는 것이 대단히 중요하므로 성형공정의 해석에는 판재의 탄성 특성을 무시해서는 안된다. 이러한 판재성형의 한계들 때문에 여러 단계의 성형과정을 거쳐서 부품이 완성되는 경우가 많다. 지금까지 다단계 성형공정에서 최적의 공정순서를 정하는데는 주로 성형장비 전문가의 경험에 의존하였으며 종종 만족스럽지 못한 결과를 보여왔다. 최근들어 유한요소법을 이용하여 단조부품에 대한 예비성형체 설계와 공정설계에 관한 연구가 있었다^[6-9]. 또 Lange와 Du^[10]는 축대칭 부품들의 가공공정을 설계하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 완성된 부품의 형상에서 비교적 간단한 초기의 형상을 유추해 내는 것이다. 이것은 Knowledge-based 방식으로 고전적 의미의 컴퓨터 원용설계라 할 수 있다. 또 다른 공정설계의 예로서

Al-Sened^[11] 등은 헤드포밍공정을 유한요소법으로 해석하여 4개의 가공단계에 대한 최적의 형상과 치수를 구하였다. Kang^[12] 은 같은 공정을 유한요소법에 의한 후방추적기법을 이용하여 좌굴과 표면균열등이 없는 2단계의 성형공정을 제안하였다. 또 3차원의 복잡한 형상을 가진 가공물에 대한 예비성형체의 설계에서는 유한요소법을 이용한 전방 시뮬레이션 및 후방추적기법이 많이 사용되었다^[13-15]. 이와 같은 소성가공에서의 공정설계에 관한 연구는 주로 체적성형에 관한 것이었으나 본 논문에서는 세탁기 내조의 성형과정이^[16] 판재성형에서의 기본적인 문제들을 잘 설명해 주는 전형적인 문제로 보아 공정순서 설계를 시도하였다. 시뮬레이션의 도구로는 탄소성 문제를 해석할 수 있는 유한요소법 프로그램인 ABAQUS^[17]를 사용하였다. 경험에 의하여 얻어진 성형한계법칙^[18]에 따라 재료의 등방성과 선형적 탄성법칙을 포함한 기존의 탄소성 유한요소 이론에 의하여 해석하였다.

2. 탄소성 유한요소해석

소성가공 문제에 유한요소법을 적용할 때는 지배적인 변형형태에 따라 탄소성 유한요소법(elastic-plastic finite element method)과 강소성 유한요소법(rigid-plastic finite element method)으로 구별하여 적용한다. 일반적으로 박판의 성형에서와 같이 굽힘에 의한 변형이 지배적인 가공에서는 탄성변형을 무시할 수가 없으며 변형 후에 스프링백과 잔류응력등을 알아보기 위해서는 탄소성 유한요소법을 사용한다^[19-21]. 하지만 대부분의 소성가공에서는 탄성변형의 양이 소성변형에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다^[22,23]. 본 연구에서는 세탁조의 성형과정이 박판의 디프드로잉과 굽힘이 주된 작업공정이기 때문에 탄소성 유한요소법을 해석에 이용하였다.

2.1 탄소성 유한요소법의 지배방정식

탄소성 유한요소법에서는 일반적으로 다음과 같은 지배방정식들이 사용된다^[24,25].

(i) 평형방정식 :

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

(ii) 항복식, $f(\sigma_{ij}) = C$:

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} \right)^{1/2} \quad (2)$$

(iii) 구성방정식 :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\dot{\sigma}'_{ij}}{2G} + \frac{1-2\nu}{E} \delta_{ij} \dot{\sigma}_{kk} + \frac{3}{2} \frac{\bar{\epsilon}^p}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} = \dot{\epsilon}^e_{ij} + \dot{\epsilon}^p_{ij} \quad (3)$$

(iv) 적합방정식 :

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (v_{ij} + v_{ji}) \quad (4)$$

(v) 유동응력식 :

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}^p) \quad (5)$$

여기서 $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률로서 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\varepsilon}^p = (\bar{\varepsilon}^p)(\Delta t) = \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} (\Delta t) \quad (6)$$

(vi) 경계조건 :

$$\begin{aligned} v_i &= \bar{v}_i && \text{on } S_u, \\ \sigma_{ij} n_j &= \bar{t}_i && \text{on } S_f, \\ S &= S_u + S_f \end{aligned} \quad (7)$$

일반적으로 6개의 응력요소와 3개의 속도요소등 총 9개의 미지수가 있으며 지배방정식으로는 3개의 평형식과 1개의 항복식 그리고 5개의 독립적인 응력-변형률식이 사용된다.

2.2 약형(weak form)과 이산화(discretization)

탄소성재료의 변형에 대한 경계값 문제는 변형율속도에 대한 평형방정식^[25]을 사용하며 약형으로 풀면 다음과 같다.

$$\int_V \dot{\sigma}_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 변수를 이산화하여 수치적분이 가능한 형태로 정리하면,

$$\left[\int_V B^T D D_{ep} B dV \right] \hat{v} - \int_{S_f} N^T t dS = 0 \quad (9)$$

과 같이 되고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Phi(\hat{v}) = F(\hat{v}) \hat{v} - h(\hat{v}) = 0 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)에서의 B , D , D_{ep} , N^T , F , h 등은 문헌^[26-28]에 잘 정리되어 있다. 연립방정식 (10)은 비선형으로서 일반적으로 직접반복법과 Newton-Raphson 반복법^[29]에 의해서 푼다.

3. 해석방법 및 결과 고찰

세탁기용 내조는 두께가 0.048 inch인 냉간 압연된 드로잉용 AISI 1010 강재의 블

랭크를 사용하여 직경 21 inch의 컵 형상으로 제작된다. Fig. 1과 같이 기존의 생산 방법은 3 단계의 제작공정으로 이루어져 있다. 이와 같은 생산방법은 500 tonf 능력의 기계프레스(링크프레스)를 사용하여 시간당 130개를 생산하며 윤활제로는 세 공정 모두 건조된 비누가루가 사용된다. 기존의 생산방식에서 첫 번째 공정은 엠보싱(embossing)작업이며 두 번째 공정에서는 주로 드로잉과 굽힘 작업이 이루어지고 다이쿠션(die cushion)도 사용된다. 마지막 세 번째 공정은 최종 제품의 치수를 맞추기 위한 재드로잉 작업이 수행된다. 세 번째 공정 이후 세탁조는 바닥 중앙부위의 피어싱과 벽면 상단 부의 트리밍 작업을 거쳐 완성품이 된다. 세탁조는 사용 중에 비교적 고속 회전운동을 하기 때문에 정확한 치수공차로 편심에 의한 굽힘 모멘트를 방지하여야 한다.

본 논문의 해석목적은 기존의 프레스능력 한도 내에서 완성품이 어떤 결함도 없이 기존의 3단계 생산방법 보다 간단한 방법으로 부품을 생산할 수 있도록 제작공정의 수를 줄이기 위한 것이다. 공정순서 설계의 첫 단계로 설계정보 또는 판단자료를 얻기 위하여 기존의 3단계 공정에 의한 생산방법을 유한요소법에 의하여 시뮬레이션을 한다. 보다 개선된 제작공정은 기존 방식의 시뮬레이션을 통하여 얻어진 설계자료를 근거로 적절한 펀치형상을 설계함으로써 완료된다.

3.1 해석조건 및 설계기준

모든 작업공정에서 굽힘과 신장에 의한 변형이 발생하므로 굽힘에 의한 변형형태와 신장에 의한 두께의 변화를 정확히 계산하는 것이 중요하다. 블랭크, 펀치, 다이, 블랭크홀더 그리고 다이쿠션 사이의 마찰등 접촉조건은 이들 사이에 간섭현상을 발생시켜 부품제작의 중요한 변수가 된다. 펀치, 다이, 블랭크홀더와 다이쿠션은 강체로서 모델링되었고 각각의 강체와 블랭크 사이에는 접촉요소(interface element)가 적용되어 접촉 및 마찰 거동을 모델링하였다. 다이 접촉면의 모델링은 절점들이 다이 내부로 침투해 들어가려는 현상(overclosure)을 방지하도록 하였으며, 또한 강체의 표면과 접촉하는 절점들에 대해서는 각각의 절점에서 강체와의 상대적 미끄러짐(relative slip)이 계산되도록 하였다. 이러한 운동학적 측정은 라그랑지 승수(Lagrange multiplier) 기법과 더불어 접촉과 마찰에 대한 표면간섭이론(surface interaction theory)에 의하여 해석되었다.

블랭크홀더는 전 공정에서 일정한 접촉하중이 작용하도록 하였고 다이쿠션은 펀치와 다이 사이의 간격이 항상 일정하게 유지되게 모델링되었다^[30]. 블랭크가 강체 사이에 놓일 수 있는 위치는 두 가지가 있는데, 하나는 펀치와 다이쿠션 사이이고 또 하나는 다이와 블랭크홀더 사이이다. 이러한 이유 때문에 접촉요소에는 두겹으로 겹쳐진 절점이 사용되며 이러한 절점들의 자유도는 같은 위치의 블랭크 표면상의 절점의 자유도와 같다. 이러한 상황에서 4절점 사각형 요소와 축약적분(reduced integration)이 해석에 사용되었다. 박막의 영향과 두께변화는 이러한 요소들에 의하여 잘 해석될 수 있다. 본 논문에서 블랭크는 160 개의 요소들로 구성된다. 주어진 재료의 소성변형특성은 아래의 식으로 표현된다.

$$\bar{\sigma} = K (\bar{\epsilon}^p)^n \quad (11)$$

여기서 강도계수 K 는 248 ksi이고 가공경화지수 n 은 0.265이며 탄성계수는 30,000 ksi 그리고 포와송비는 0.3으로 등방성(isotropy) 이론이 적용된다^[31]. 마찰은 쿨롱마찰(Coulomb friction)을 사용하고 최대 마찰응력의 크기를 제한하였다. 접촉면이 미끄러지는 현상과 전단력이 마찰한계값 보다 작을 때 발생하는 점착현상을 고려하여 표면에서는 혼합된 모델이 적용된다. 각각의 접촉면에서의 윤활상태를 고려하여 블랭크와 펀치 그리고 다이쿠션 사이의 마찰계수는 0.2로, 블랭크와 다이 그리고 블랭크홀더 사이의 마찰계수는 0.1로 가정한다. 기존 방법의 첫 번째 공정(엠보싱)에서 5 ksi의 압력이 블랭크홀더에 의해 가해지고 나머지 공정에서는 주름이 잡히는 것을 방지하기 위하여 10 ksi의 압력이 블랭크홀더를 통해서 소재에 가해진다. 형상의 대칭성 때문에 시뮬레이션에서는 블랭크의 오른쪽 반만 해석에 사용된다.

블랭크의 초기형상에서 판재의 면에 2축응력이 작용하지 않으면 면에 수직인 방향으로 특이상태(singular)가 된다. 시뮬레이션을 시작할 때 이런 어려움을 피하기 위하여 10 psi의 아주 작은 2축 인장응력을 블랭크에 가한다. 시뮬레이션의 마지막 단계에서 펀치와 다이를 블랭크에서 분리시켜 부품의 형상에 영향을 미치는 스프링백의 크기도 알아본다. 제작공정이 주로 드로잉과 신장에 의한 변형이기 때문에 소재의 파단과 국부적인 두께감소 현상이 발생할 수 있다. 또 다른 중요한 결함으로는 불안정성(instability) 때문에 발생하는 주름이다. 이러한 주름잡힘 현상은 드로잉작업 시 플랜지 부위에서 면에 평행한 압축응력 때문이다^[32]. 최근의 연구에서 이러한 주름의 형성을 유한요소법으로 해석하였는데 블랭크홀더의 압력이 일정한 크기 이상이면 주름현상이 일어나지 않는 것을 보였다^[33].

이와 같은 내용을 토대로 다음과 같은 설계기준을 정하였다. 첫째, 드로잉된 부품의 국부적인 두께감소가 없어야 한다. 둘째, 최대 펀치력은 프레스 하중능력보다 작아야 한다. 셋째, 스프링백의 크기를 고려한다.

3.2 단공정 작업의 해석

앞절에 설명된 설계기준들이 드로잉비 및 장비의 구성과 어떤 관계인가를 개략적으로 알아보기 위하여 초기의 블랭크에서 최종 부품을 단 한번의 공정에 의해 완성하는 단공정 작업을 Fig. 2와 같이 시뮬레이션 하였다. 완성품의 재원으로 부터 초기 브랭크치수를 구하는 공식^[34,35]을 사용하여 41 inch 직경의 블랭크를 시뮬레이션에 적용하였다. 단공정 작업에서의 드로잉 비는 1.97이며 Fig. 3에 보이는 것처럼 펀치 노즈와 펀치코너 부근에서 국부적인 두께감소가 일어난다. 이런 결함은 완성된 부품을 만들기 위해서는 단 공정으로는 제작이 불가능하다는 것을 보여준다.

3.3 기존 3 단계 공정에 대한 해석

Fig. 1의 공정순서는 기존의 3단계 공정에 의한 제작방법이다. 이러한 제작공정은 프레스장비 전문가들이 최대 하중값 이내에서 결함없이 완성품이 제작될 수 있도록 공정을 설계한 것이다. Fig. 4는 기존의 공정에서 첫 번째 작업인 엠보싱이다. 엠보싱 공정에서 엠보싱된 부분의 두께변화는 매우 중요하여 다음 작업공정에 큰 영향을 미친다. 시뮬레이션 도중에 격자(요소)들이 다이내부로 침투하는 것을 방지하기 위하여 펀치코너 부근에는 매우 미세한 격자들로 요소망을 구성하였다. Fig. 5에서 나타

난 바와 같이 엠보싱 공정의 펀치 행정은 0.5 inch이며 두께감소가 가장 심한 곳의 두께는 0.0403 inch 이고 최대 펀치하중은 15 tonf이다.

두번째 작업공정인 드로잉의 성형과정이 Fig. 6에 나와있다. Fig. 6에 나와있는 드로잉의 성형과정을 살펴보면 드로잉과 굽힘이 동시에 일어남을 알 수 있으며 드로잉비는 1.96이다. 두 번째 공정에서의 펀치 직경은 20.90 inch이며 펀치노즈 반경은 1.75 inch, 다이곡률은 0.25 inch, 펀치와 다이 사이의 간극은 0.053 inch이고 드로잉 깊이는 3 inch이다. Fig. 7에 나타난 해석 결과에서 두께 분포를 보면 드로잉된 부품의 펀치코너 부근에서 국부적인 두께감소에 의한 작은 결함이 나타나며 이것은 원소재인 블랭크의 중심에서 약 8 inch 떨어진 부위에서 발생한다. 그림의 행정-하중선도에서 나타난 바와 같이 펀치력은 전 행정에 거쳐 점진적으로 증가하고 행정의 마지막 단계에서 최대 펀치하중은 130 tonf이다.

기존 성형방법의 마지막 작업공정은 드로잉비가 1.003인 재드로잉이다. 마지막 공정은 드로잉비가 아주 작기 때문에 불필요한 공정으로 간주되기 쉬우나 제 2단계 공정이 드로잉과 굽힘의 복합성형 공정이기 때문에 펀치노즈 부위의 소재에서 심한 신장을 피하여 완성된 부품을 만들기 위해서는 세번째 공정인 재드로잉이 필요하다. 재드로잉 공정은 Fig. 8에 나타나 있으며 펀치직경은 20.83 inch이고 펀치노즈반경은 2.0 inch이다. 다이곡률은 0.25 inch이고 펀치와 다이 사이의 간극은 0.083 inch이며 드로잉 깊이는 14 inch이다. 제 3단계 공정의 시뮬레이션 결과로써 Fig. 9에 나타난 두께분포를 보면 두께감소가 가장 심한 곳은 중심부로서 성형후의 두께는 0.029 inch이고 최대 펀치하중은 134 tonf이다. 행정-하중선도에서는 펀치가 내려감에 따라 하중이 감소하는 것을 볼 수 있으며 이러한 경향은 두번째 공정의 행정-하중선도와는 반대되는 경향이다.

기존의 가공방법을 시뮬레이션한 결과에서 관찰할 수 있는 것은 Fig. 7에 나타난 것처럼 드로잉 하중의 최대값은 제 2 단계 공정의 드로잉 깊이에 의해 결정되며 또한 작은 드로잉 자국(drawing mark)이 Fig. 9와 같이 완성품에서도 나타남을 알 수 있다. 이는 드로잉 작업시 발생한 결함은 재드로잉 작업등 부차적인 공정으로도 제거되지 않는다는 사실과도 잘 부합된다. 완성된 가공품에서 두께가 가장 얇은 곳은 0.0294 inch이고 최대 펀치하중은 134 tonf이다. 기존의 방법으로 가공한 가공품의 벽면에서의 스프링백은 약 0.08 deg.이며 무시할 수 있을 만큼 작다.

3.4 최적 공정의 설계

최적의 공정을 설계하는 과정에서 고려해야 하는 점은 작업공정의 수가 기존의 방법 보다 적어야 하며 완성품에서 결함이 없어야 한다는 점이다. 단공정 작업과 기존 3단계 제작방식의 시뮬레이션을 통해 다음의 세 가지를 관찰하였다. 첫째, 가공품의 중심부와 곡률진 부분은 두께가 많이 얇아지며 둘째, 단공정 작업으로는 완성품을 가공하는 것이 불가능하고 셋째, 스프링백의 영향은 거의 무시할 수 있다는 것이다. 대부분의 판재 가공품들의 대체적인 형상은 거의 첫번째 드로잉 공정에서 만들어지며 첫번째 작업 후의 성형의 양은 그리 크지 않다. 따라서 첫번째 작업공정 이후에는 비신장성형을 주로 하여 마지막 형상을 가공하는 것이 두께방향의 변형을 방지하

는 좋은 방법이라 하겠다. 국부적인 변형을 감소시키고 비교적 고른 두께분포를 갖는 완성품을 얻기 위해서는 반구형의 펀치를 사용하는 것이 바람직하다^[36].

따라서 첫공정에서 Fig. 10과 같이 직경 24.828 inch의 반구형 펀치를 사용하여 드로잉 작업을 시도하였다. 시뮬레이션의 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 반구형 펀치의 사용으로 비교적 고른 두께분포를 얻었으며, 또한 최소 두께는 0.0346 inch로 나타났다. 드로잉 비는 1.65이며 최대 펀치하중은 70 tonf로써 기존의 방식에 의한 드로잉 및 재드로잉 공정에 비하여 상당히 작게 나타났다.

두번째 공정은 Fig. 12에 나타난 바와 같이 재드로잉과 함께 완성품의 형상을 얻기 위한 단조작업이 이루어진다. 드로잉 비는 1.18이며 최소두께는 0.033 inch이다. Fig. 13에 나타난 성형후의 두께변화를 살펴보면 중앙부의 두께는 기존 방식과는 달리 두꺼워졌으며 이는 바닥면의 소재가 안쪽으로 유동했기 때문이다. 최대하중은 그림 13에 나타난 행정-하중선도에 보이는 것처럼 360 tonf로써 이는 기존 프레스장비의 하중능력(500 tonf) 이내의 값이다.

4. 결 론

단공정과 기존의 3단계 제작공정에 대한 시뮬레이션을 하여 새로운 공정설계를 하는데 유용한 설계자료들을 얻었으며 이를 토대로 하여 새로운 제작공정을 제시하였다. 제안된 새로운 제작공정은 기존의 방법이 3단계 작업공정을 포함하고 있는 것과는 달리 2단계의 작업공정으로 구성되어 있으며 가공품에서 어떤 결함도 예측되지 않았다. 예상되는 펀치하중은 각각의 작업공정에서 작업능력 이내에 있는 것으로 확인되었다. 새로운 제작방법에서 제 1단계 공정은 균일한 신장을 얻기 위하여 반구형 펀치가 사용된 드로잉 공정이고, 제 2단계 공정은 완성품의 형상을 고려하여 재드로잉과 단조가 복합된 공정이다. 새로운 제작공정을 위한 펀치의 설계에서 중요한 점은 펀치모양이 부품의 두께분포에 커다란 영향을 준다는 점이다. 새로운 제작공정은 균일한 벽두께와 기존설비의 하중능력을 고려하는 설계기준으로 볼 때 만족스러운 것이다. 본 연구에서 유한요소법을 이용하여 얻어진 결과들은 많은 판재성형공정에 응용할 수 있어 판재성형 산업체의 생산성 향상에 이바지 할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

1. J. L. Duncan and R. Sowerby, "Review of Development in the Forming of Sheet Metal," Proc. 2nd Int. Conf. Tech. Plasticity, Stuttgart, p. 615, 1987.
2. D. Schmoeckel and E. Bohm, "State of Development in the Forming of Sheet Metal," Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 1179-1184, 1987.
3. G. Sachs, Principles and Methods of Sheet Metal Fabricating, Reinhold, New York, 1951.
4. K. Yoshida, "Classification and Systemization of Sheet Metal Press-forming

- Process," Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research, Vol. 53, No. 1514, p. 126, 1959.
5. W. Johnson and A. G. Mamalis, "Aspects of the Plasticity Mechanics of Some Sheet Metal Forming Processes," Hellenic Steel Publications, Thessaloniki, Greece, 1978.
 6. S.K. Biswas and W.A. Knight, "Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies," Proc. 15th Int. MTDR Conf., p.135, 1974.
 7. N. Akgerman and T. Altan, "Recent Developments in Computer-Aided Design of Firing Processes," SME Technical Paper, No. 72-110, April, 1972.
 8. G.B. Yu and T.A. Dean, "A practical computer-aided approach to mould design for axisymmetric forging die cavities," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 25, p.1, 1985.
 9. 김현영, 김중재, 김낙수, "단조하중감소를 위한 열간 형단조 해석," 대한기계학회 논문집, 제17권, 제12호, pp. 2970 - 2981, 1993.
 10. K. Lange and G. Du, "A formal approach to designing forming sequences for cold forging," Proceedings of NAMRC, p.17, 1989.
 11. A.A.K. Al-Sened, P. Hartley, C.E.N. Sturges and G.W. Rowe, "Finite element analysis of a five stage cold heading process," J. Mech. Working Tech., Vol. 14, p.225, 1987.
 12. B.S. Kang, "Process sequence design in a heading process," J. Materials Processing Technology, Vol. 27, p.213, 1991.
 13. B.S. Kang, N.S. Kim and S. Kobayashi, "Computer-aided preform design in forging of an airfoil section blade," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 30, No. 1, p.43, 1990.
 14. N.S. Kim and S. Kobayashi, "Preform design in H-shaped cross sectional axisymmetric forging by the finite element method," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 30, p.243, 1990
 15. B.S. Kang and S. Kobayashi, "Preform design in ring rolling by the three dimensional finite element method," Int. J. Mach. Tools and Manufacture, Vol. 31, p.139, 1991.
 16. Metals Handbook, Forming, American Society for Metals, 8th ed., Vol. 4, p.179, 1969.
 17. ABAQUS : User's Examples and Theory Manuals, Hibbit, Karalsson and Sorenson Inc., 1988.
 18. N. Rebelo, J. C. Nagtegaal and H. D. Hibbit, "Finite Element Analysis of the Sheet Forming Processes," Int. J. Num. Met. Eng., vol. 30, pp. 1739-1758, 1990.
 19. K. Lange, M. Herrmann, P. Keck and M. Wilhelm, "Application of an elasto-plastic finite element code to the simulation of metal forming processes," J. Material Processing Technology, Vol. 27, p.239, 1991.

20. M.J. Saran, "Comparison of elastic-plastic and rigid-plastic implicit FEM simulations in sheet forming applications," *J. materials Processing Technology*, Vol. 27, p.279, 1991.
21. J.H. Cheng and N. Kikuchi, "An analysis of metal forming processes using large deformation elastic plastic formulations," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 49, p.71, 1985.
22. C.H. Lee and S. Kobayashi, "New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method," *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, Vol. 95, p.865, 1973.
23. S. Kobayashi and J.H. Kim, "Deformation analysis of axisymmetric sheet metal forming processes by the rigid-plastic finite element method," *Mechanics of Sheet Metal Forming*, edited by Koistinen and Wang, Plenum, New York, p.341, 1978.
24. J.Y. Lim, *Process Sequence Design in Metal Forming by the Finite Element Method*, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1993.
25. F.K. Chen, *Application of the Finite Element Method to the Plastic Deformation Analysis of Perforated Sheet Metals and the Process Simulation of Shape Rolling*, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1989.
26. N.S. Kim, *Computer-Aided Preform Design in Metal Forming by the Finite Element Method*, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1989.
27. R.L. Taylor, CE 233A Class Note, University of California, Berkeley, Fall, 1988.
28. D.R.J. Owen and E. Hinton, *Finite Element in Plasticity : Theory and Practice*, Pineridge Press Ltd., Swansea, UK, 1980.
29. Zienkiewicz and Taylor, *The Finite Element Method*, McGraw Hill, 4th ed., Vol. 2, 1989.
30. S. Thiruvardchelvan and W. G. Lewis, "Deep Drawing with Blankholder Force Approximately Proportional to the Punch Force," *Trans. ASME*, Vol. 112, pp. 278-285, August, 1990.
31. *Source Book on Industrial Alloy and Engineering Data*, American Society for Metals, Vol. 4, 1978.
32. M. G. El-Sebaie and P. B. Mellor, "Plastic Instability Conditions in the Deep Drawing of a Circular Blank of Sheet Metal," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 14, pp.535-556, 1972.
33. K. W. Neale and P. Tugcu, "A Numerical Analysis of Wrinkle Formation Tendencies in Sheet Metals," *Int. J. Num. Met. Eng.*, vol. 30, pp. 1595-1608, 1990.
34. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, Society of Manufacturing Engineer, 3rd ed., 1983.
35. *Die Design Handbook*, American Society of Tool and Manufacturing

Engineers, N.Y., McGraw-Hill, 1955.

36. 황병복, 이호용, “유한요소법을 이용한 disk-brake piston의 공정설계,” 한국소성가공학회, 제3권, 제2호, p. 178, 1994.

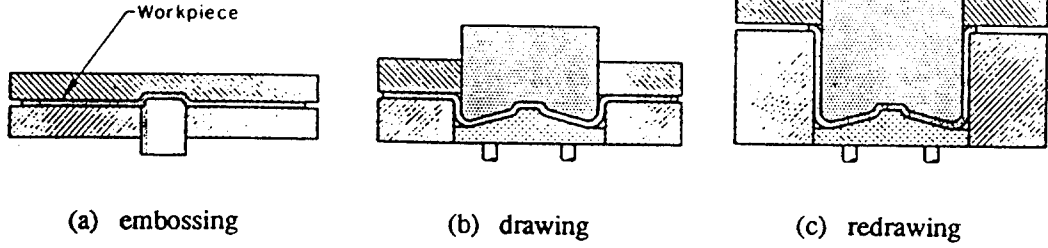


Fig. 1 The three operations in the production of washing machine tub and the final configuration

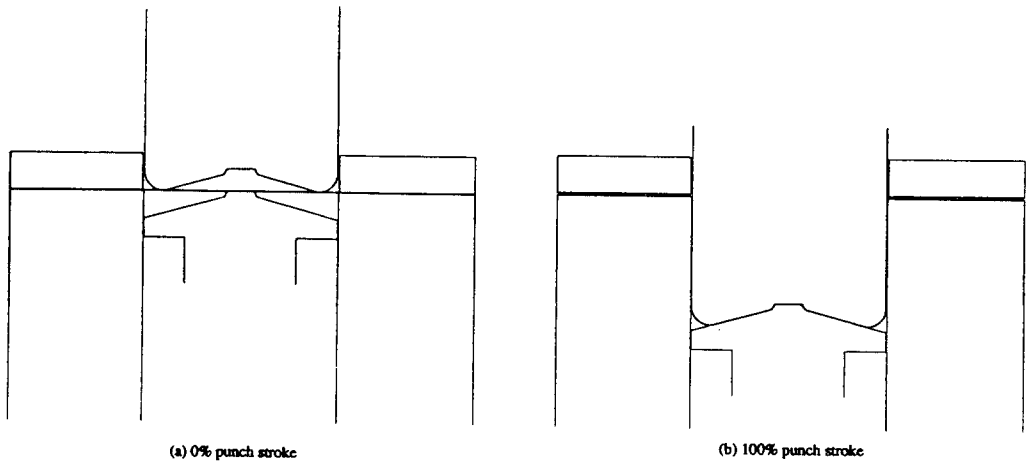


Fig. 2 Deformation pattern of a single forming operation

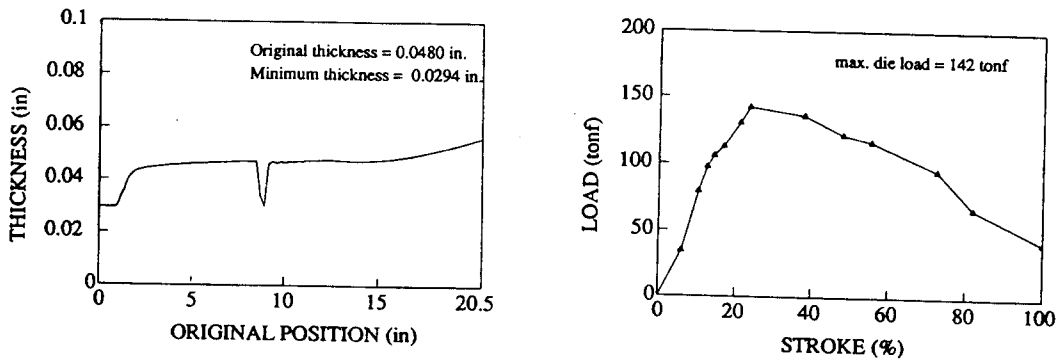
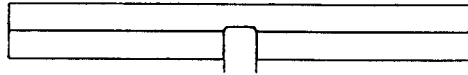


Fig. 3 Thickness distribution and punch stroke-load curve for the single forming operation



(a) 0% punch stroke



(b) 100% punch stroke



(c) deformed shape

Fig. 4 Deformation pattern of an embossing operation for the conventional method

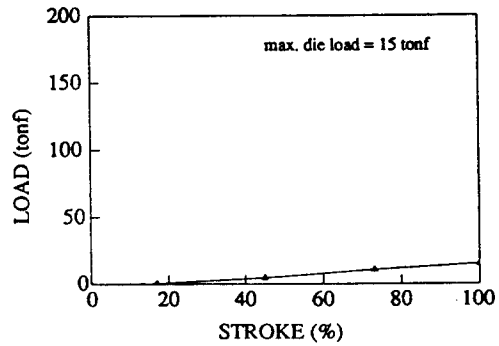
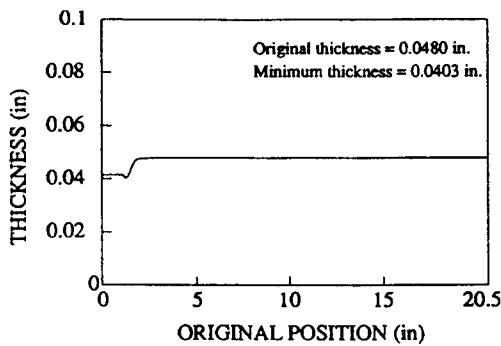
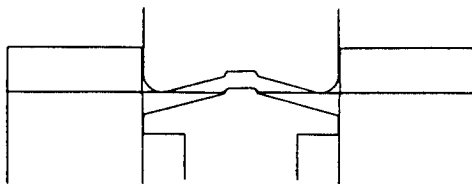
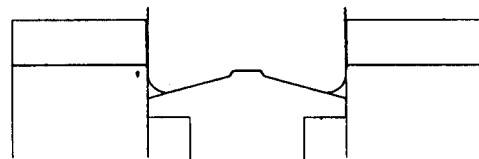


Fig. 5 Thickness distribution and punch stroke-load curve for embossing operation



(a) 0% punch stroke



(b) 100% punch stroke

Fig. 6 Deformation pattern of a drawing operation for the conventional method

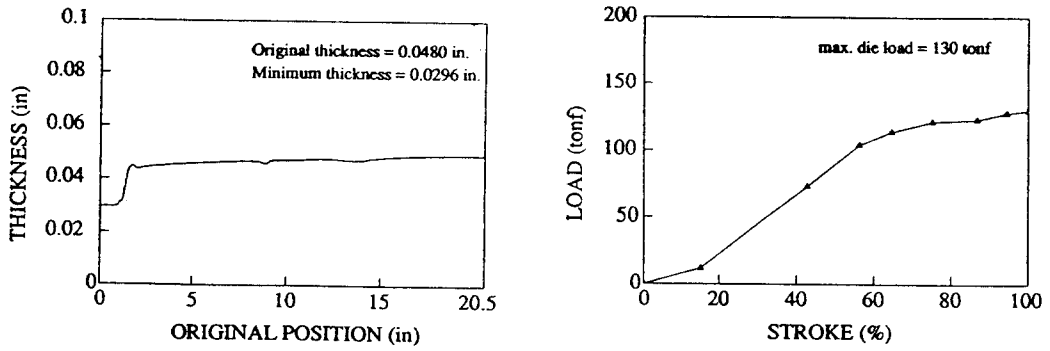


Fig. 7 Thickness distribution and punch stroke-load curve for a drawing operation

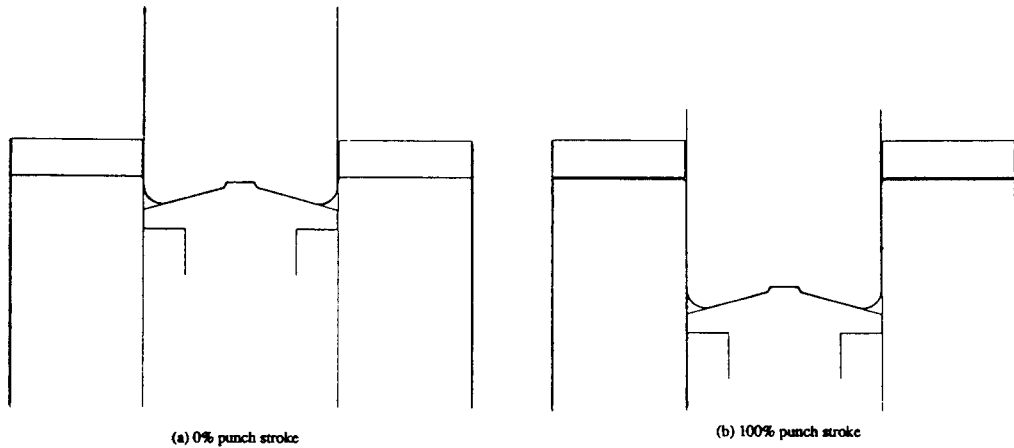


Fig. 8 Deformation pattern of a redrawing operation for the conventional method

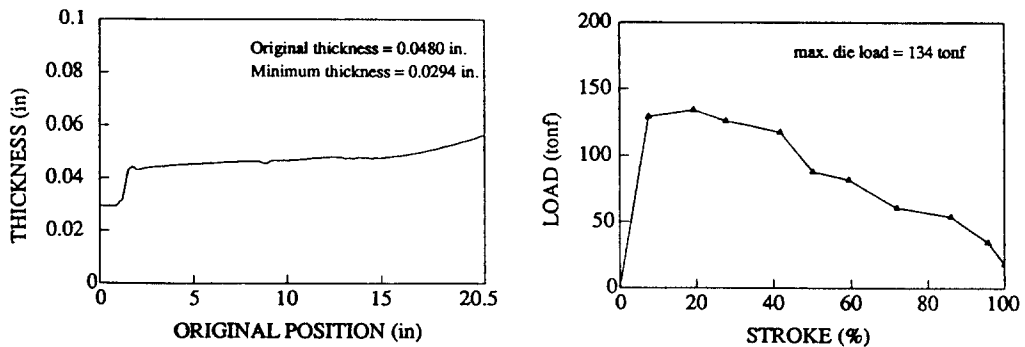


Fig. 9 Thickness distribution and punch stroke-load curve for a redrawing operation

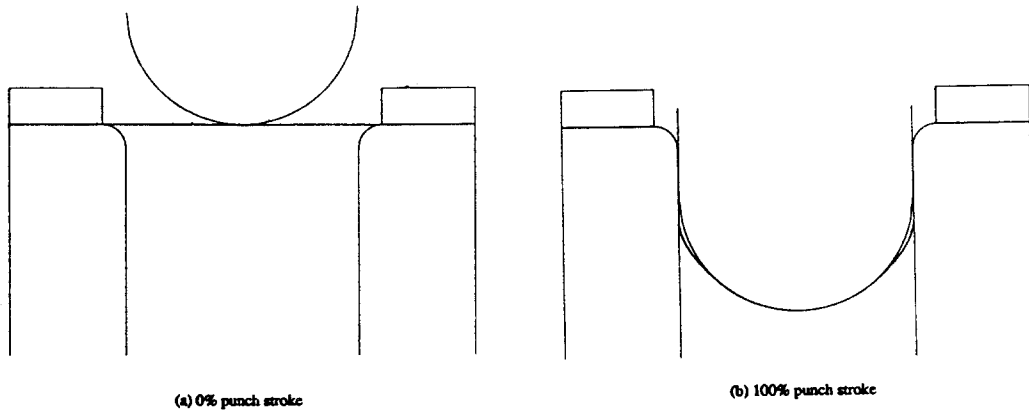


Fig. 10 Deformation pattern of a drawing operation using hemispherical punch for the new process sequence

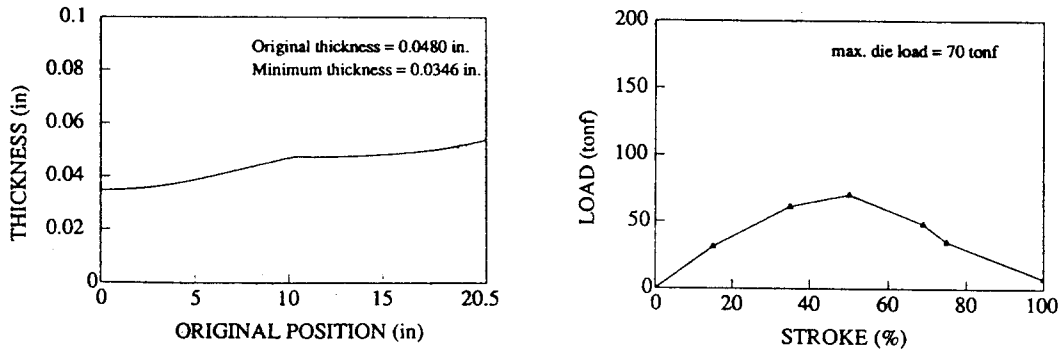


Fig. 11 Thickness distribution and punch stroke-load curve for the 1st drawing operation

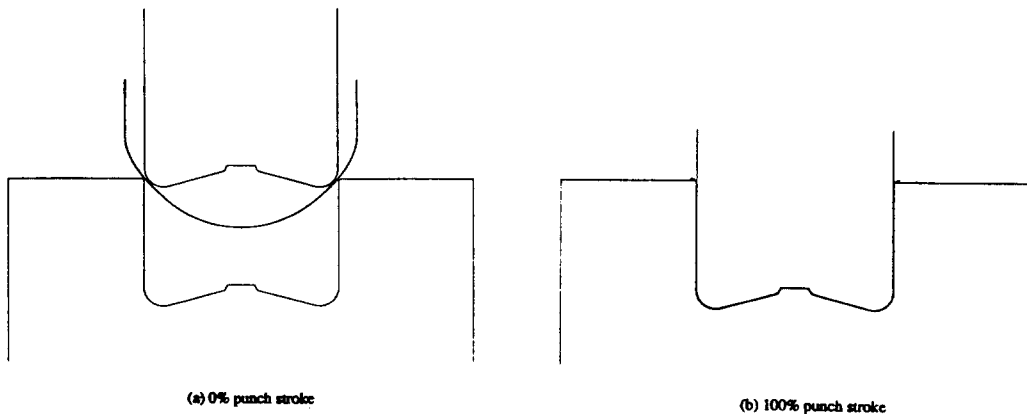


Fig. 12 Deformation pattern of the 2nd redrawing and forging operations for the new process sequence

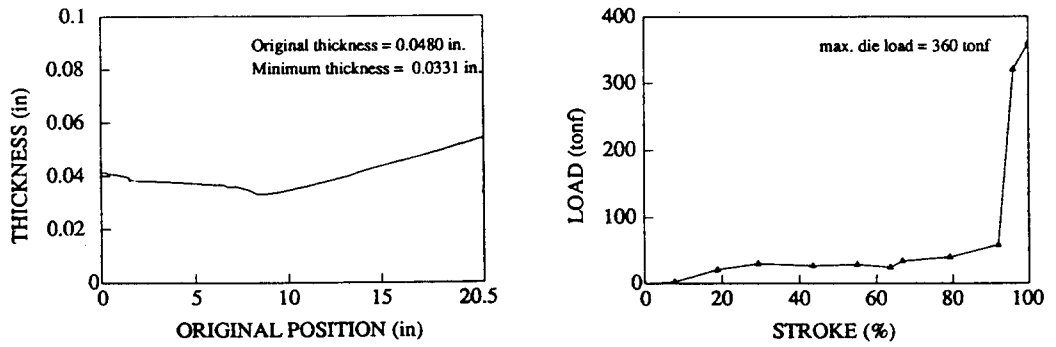


Fig. 13 Thickness distribution and punch stroke-load curve for the 2nd operation