

## 다단 벽두께 원통 쉘 성형 공정 설계에 관한 연구

A Study on the Forming Process Design of Cylindrical Multithickness Shell

신보성, 최두선(한국기계연구원), 김동진(부산대학교 대학원), 김병민(부산대학교),

한규택(부경대학교), 신영우(여수수산대학교)

B.S. Shin, D.S. Choi(KIMM), D.J. Kim(Graduate School, Pusan Univ.), B.M. Kim(Pusan Univ.),

K.T. Han(Pukyong Univ.), Y.W. Shin(Yosu National Fisheries Univ.)

### ABSTRACT

In this paper, we will discuss in making large size cylindrical shells with multithickness wall sections such as straight, stepped, tapered sides. These shells are constructed of type 6061 O temper aluminum starting with a blanking size of 877 mm plate. Its diameter to length ratio of 1 to 2.78 and a 36.7% wall reduction is achieved by our continuous deep drawing process. This process required no in-process annealing. But after cold working, these shells are performed heat treatment to T6 condition. These shells are used for the making of seamless LPG pressure vessels after the spinning process. This process is composed of deep drawing, reverse redrawing, drawing-ironing and several ironing processes. In the verification of forming process design, we used DEFORM code.

**Key words :** deep drawing(디프 드로잉), reverse redrawing(역재드로잉), drawing -ironing(드로잉-아이어닝)  
ironing(아이어닝), cylindrical multithickness shells(다단 벽두께 원통 쉘)

### 1. 서 론

압력 용기는 안전에 반드시 필요한 형상 치수와 내부의 용매를 정확히 보증한다면 대량 생산이 가능하기 때문에 가정, 의료, 래저, 방위 산업 및 각종 산업 분야의 고압의 가스와 냉매의 휴대용 저장 용기로써 더욱 널리 이용되어 질 수 있다. 그러나 현재 국내에서 시판되고 있는 가정용 LPG 용기들은 지금까지 거의 3 내지 4부분의 강재(steeel) 박판 조각의 용접에 의해서 생산되어졌기 있기 때문에 20Kg용 빈 LPG 용기의 경우 무게만 하더라도 약 22Kg 정도로 무거울 뿐만 아니라 용접 부위가 부식이 잘되어 수명이 오래가지 못하고 운반 취급 안전에도 항상 많은 위험이 잠재되어 휴대용 저장 용기의 활용도를 극히 제한하여 왔다.

따라서 본 연구에서는 최근 들어 이러한 단점을

을 보완할 수 있는 최선의 재료 지향적인 그리고 방법 지향적인 경량의 고강도 알루미늄 소재를 이용한 용접 부위가 없는(seamless) 일체형(one-piece) LPG 용기를 제작하는 데 필요한 다단 벽두께 원통 쉘 공정 설계 기술을 개발하고 이의 타당성은 유한 요소 해석으로 검증하였으며 실제 생산 라인에 적용한 사례를 위주로 설명하고자 한다.

### 2. 공정 설계

다단 디프 드로잉(multi-stage deep drawing)은 차후 스파킹 공정에 필요한 다단 벽두께 원통 쉘을 연속적인 공정으로 생산 가능하게 하며 이를 위하여 여기에서는 수평식 복동 유압 프레스를 사용하였다. 여기서 설명할 다단 디프 드로잉 공정은 원판형 알루미늄 소재를 캡 모양으로 1차 드로잉한 후 반대 방

향으로 2차 재드로잉(reverse redrawing)한 다음 3차 재드로잉-아이어닝(Drawing and Ironing ,D & I)과 함께 요구되는 두께와 길이에 따라 한번 또는 그 이상의 4차 아이어닝 공정의 추가로 비교적 깊고 얕으며 벽 두께가 일정하지 않고 다단 벽두께(multithickness)의 원통 쉘 용기를 만드는 공정을 일컫는 것으로서 가공 방법의 경제적 측면에서 다른 가공법에 비해 월등한 장점이 있다.[1-5,16] 그림 1은 이러한 다단 드로잉 공정에 의해 생산된 각종 원통 쉘의 형상을 보여주는 것으로써 바닥 부분, 몸체 부분 및 추후 스파닝(spinning)과 같은 후 가공을 받을 상부 부분으로 이루어져 있다.

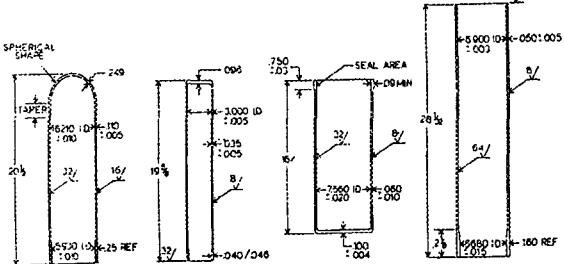


그림 1 다단 드로잉 공정으로 생산된 여러 가지 형태의 용기 형상

## 2.1 블랭크 직경

성형하고자 하는 제품의 최종 형상으로부터 초기의 블랭크 직경을 계산하되 귀(ear) 발생 여유를 고려하여 결정하며 이는 드로잉 시험을 통하여 귀 발생율을 구할 수 있다. 기본적인 드로잉 형상에 대한 블랭크의 치수가 표 1에서와 같이 계산되어진다.

표 1 회전체 드로잉 제품의 블랭크 지름

Workpiece shape	Blank diameter $D$
	$\sqrt{d_1^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4h_1^2 + 2f(d_1 + d_2)}$
	$\sqrt{d_1^2 + 4(h_1^2 + d_1h_2 + f/2(d_1 + d_2))}$
	$\sqrt{d_1^2 + 2s(d_1 + d_2)}$

## 2.2 드로잉 비(drawing ratio)와 한계 드로잉 비(limit drawing ratio, LDR)

원통 쉘의 직경( $d$ )에 대한 블랭크 직경( $D$ )의 백분율을 드로잉 비라 하며 원통 쉘의 직경이 일정할 때 블랭크의 직경을 증가시키면서 파단과 주름이 발생하지 않는 최대의 블랭크에 대한 드로잉 비를 한계 드로잉 비라 한다. Whiteley는 Hill의 이방성 이론을 이용하여 한계 드로잉 비과 수직 이방성 계수(normal anisotropy)  $\bar{R} (= (R_0 + R_{90} + 2R_{45}) / 4)$ 의 관계를 이론적으로 도출하였다.[5,6] 그 결과는 식(1)과 같다.

$$\ln\left(\frac{D}{d}\right) = \eta \sqrt{\frac{1 + \bar{R}}{2}} \quad (1)$$

여기서 변형율비(strain ratio)  $R_{\text{L}}$ (일명 Lankford 계수)은 표준 인장 시험에서 폭 방향 자연 변형율에 대한 두께 방향의 자연 변형율의 비로 정의되며 이는 압연 방향에 따라 변한다. 또한  $\eta$ 는 마찰 및 굽힘의 영향을 고려한 계수이다. 식에서 알 수 있듯이  $\bar{R}_{\text{L}}$ 이 증가할수록 한계 드로잉 비가 증가함을 알 수 있다. 드로잉 율은 드로잉 비의 역수로 정의된다.

## 2.3 최대 편치력과 블랭크 홀더력

플랜지(flange)에서 발생하는 주름(winkling)을 방지하기 위하여 블랭크홀더를 사용한다. 또한 드로잉에 필요한 최대프레스력은 통상 식(2), (3)과 같은 경험식이 설계의 기준으로 사용된다.[4]

$$P_{\max} = \pi d_{p1} t_0 \sigma_B K_1 \quad (2)$$

$$P_{\max} = \pi d_{p2} t_0 \sigma_B K_2 \quad (3)$$

이때 상수  $K_1$ 과  $K_2$ 는 경험에 의해 결정되는 상수이고  $t_0$ 는 초기 판 두께,  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$ 는 1차 드로잉 편치지름, 재드로잉 편치지름을 각각 나타낸다. 그리고 블랭크 홀더력(Blank Holder Force .BHF)은 통상 실험을 통하여 구하는데 일반적인 기준은 식(4)을 적용한다.

$$BHF = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{\sigma_Y + \sigma_B}{200} \quad (4)$$

## 2.4 역 재드로잉

역 재드로잉이란 1차 드로잉으로 얻은 원통 쉘을 그보다 작은 다이와 편치를 이용하여 다시 드로잉하되 편치의 방향이 반대로 작용함으로써 같은 방향으로 굽힘이 계속되는 재드로잉 공정이다. 일반적인 재드로잉 공정과 유사하나 제품의 안과 밖이 완

천히 바뀌게 되고 요구되는 편치력도 그만큼 줄어들게 된다. 또한 요구되는 금형 내에서 복동 프레스의 구조를 이용하여 한번 만에 성형품이 완성된다.[7] 1차 드로잉 윤과 개 드로잉 윤의 초기 두께에 대한 블랭크 직경의 수치가 표 2와 같다. 그림 2는 역재드로잉은 박판이  $180^{\circ}$  완전히 역드로잉 다이를 따라 회전하기 때문에 주름이 발생하기 쉬우므로 블랭킹 훌더가 반드시 필요하다. 또한 이러한 공정은 드로잉 재료의 드로잉성이 우수해야 하며 복동 프레스의 행정(stroke) 길이가 보다 길어야 하는 단점이 있다. 그래서 이러한 역 드로잉 공정이 한때는 드로잉 공정에 아무런 장점도 없다는 주장이 제기되기도 했으며 지금도 대부분 그렇게를 알려져 왔다. 하지만 역드로잉 공정이 1차 드로잉 공정과 연계하여 연속적인 재드로잉이 이루어 질 때 본 연구에서와 같이 아주 유용한 드로잉 효과를 나타낸다.

표 2 중간 소둔 공정 없는 원통형 드로잉 제품의 최적 드로잉비

Number of draws	Relative sheet thickness $t_0/d_0 \times 10^{-4}$					
	1.5-2.0	1.0-1.5	0.6-1.0	0.3-0.6	0.15-0.3	0.08-0.15
1	2.00-2.08	1.87-2.00	1.82-1.87	1.79-1.82	1.67-1.79	1.59-1.67
2	1.33-1.37	1.32-1.33	1.28-1.32	1.26-1.28	1.25-1.26	1.22-1.23
3	1.28-1.32	1.26-1.28	1.25-1.26	1.23-1.25	1.22-1.23	1.19-1.22
4	1.25-1.28	1.23-1.25	1.22-1.23	1.20-1.22	1.18-1.20	1.18-1.18
5	1.22-1.25	1.19-1.22	1.18-1.19	1.16-1.18	1.15-1.16	1.14-1.15

\*Workpiece material-RS14 (SAE 1006).

Source: Compiled from [20,9].

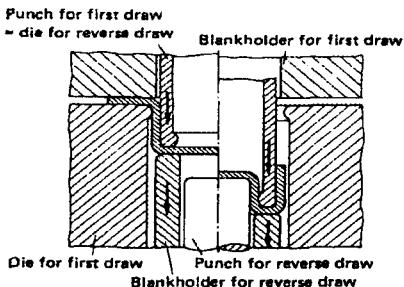


그림 2 역재드로잉 공정의 개략도

## 2.5 드로잉-아이어닝(Drawing and Ironing ,D & I)

원하는 드로잉비를 실현하고 동시에 원하는 원통쉘의 벽두께로 원통쉘을 성형하는 공정으로서 최

대 드로잉비를 3.5 이상을 얻을 수 있는 장점이 있다.[8] 즉 드로잉 1번의 램(ram) 행정 안에서 아이어닝이 동시에 수행된다. 그림 3에서와 같이 디아이 금형의 높이를 적절하게 조절하여 디프 드로잉 된 후 곧바로 아이어닝된다. 그러나 드로잉력은 디프 드로잉 행정 끝으로 진행 될수록 점차 감소하기 때문에 아이어닝은 드로잉이 끝나기 전에 수행된다. 따라서 전체 램 행정은 짧아진다.

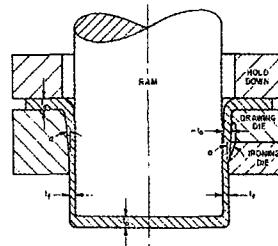


그림 3 드로잉-아이어닝 공정의 개략도

## 2.6 아이어닝

아이어닝은 다이와 편치의 간격을 원통 쉘의 벽두께보다 좀 더 유지한 상태로 편치로 밀어냄으로써 벽의 두께를 감소시키는 공정이다. 편치부와 다이 부의 마찰력 차이의 영향이 특히 중요하다. 그림 4는 대표적인 아이어닝 공정을 보여준다.[8] 이때 아이어닝비(Ironing Ratio, IR)는 식(5)와 같다.

$$IR = (t_0 - t_f) / t_0 \times 100 (\%) \quad (5)$$

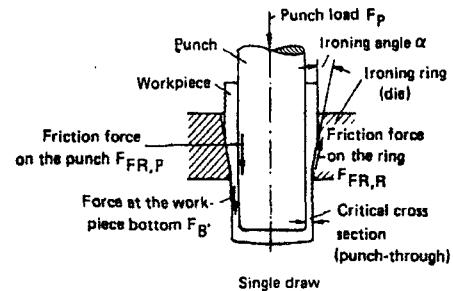


그림 4 아이어닝 공정의 개략도

## 3. 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)

여기에서는 설계된 원통 쉘 용기의 단단 디프 드로잉 공정을 상용 유한 요소 해석 코드인 DEFORM을 사용하여 검증하였다. 전체 공정은 먼저 1차 디프 드로잉 공정, 2차 역재드로잉, 그리고 3차 드로잉-아이

어느 공정과 4차 아이어닝 공정으로 이루어져 있다.

박판 소성가공의 소재로 사용되는 박판 금속은 냉간 압연(cold rolling)의 전가공 단계를 거치므로 소성 변형 중에 결정 격자의 방향성 등의 원인으로 상당한 이방성(anisotropy)이 존재하기 때문에 디프 드로잉과 같은 박판 성형 공정의 해석에서는 이러한 이방성을 고려해야 한다. 그러나 압력 용기의 재료로 사용되는 알루미늄 6061은 0처리를 하여 이방성의 효과가 거의 없다. 그리고 원 소재는 절단 여유를 고려한  $\phi 877$ , 두께가 6.0t로서 상당한 후판이기 때문에 탄성 회복(spring back)의 효과가 거의 없기 때문에 블랭크 홀더와 편치 사이의 벤딩을 고려할 수 있는 연속체 요소를 사용한 강소성 유한 요소법으로 디프 드로잉 공정을 해석하였다.

1차 디프 드로잉 공정에서 편치와 블랭크 홀더는 강체로 가정하였고 소재는 탄성 변형을 무시한 강소성 재료로 모델링하였다. 그리고 플랜지 부분에서 생기는 주름을 방지하기 위하여 블랭크 홀더력을 36.5톤으로 일정하게 유지하였다. 2차 역드로잉 공정에서는 첫 번째 공정에서의 편치가 금형으로 사용되고, 새로운 역드로잉 편치가 사용되며, 블랭크 홀더의 상판이 플랜지부의 역벤딩(unbending)을 구속하기 위하여 사용되었다. 3차 드로잉-아이어닝 공정은 앞서 설명한 바와 같이 드로잉 공정과 아이어닝 공정이 동시에 이루어진다. 이때 드로잉 편치는 원통 셀의 최종 형상에 적합하도록 다단의 단을 가지고 있다. 앞의 공정과 마찬가지로 편치와 재드로잉 금형은 강체로 모델링하였다. 끝으로 4차 아이어닝 공정은 앞의 재드로잉 편치와 아이어닝 금형을 사용하였다. 앞의 공정과 마찬가지로 편치와 아이어닝 금형은 강체로 모델링하였다. 그림 5(a)에 아이어닝 공정으로 성형된 제품의 3차원 형상을 나타내었다. 소재의 유효 변형율 분포를 보면 편치 바닥부의 유효 변형율은 0.3617에서 0.5839로 앞의 재드로잉 공정보다 약간 더 가공 경화를 받았음을 알 수 있다. 벽 부분의 유효 변형율 값은 0.8062에서 2.1257로 앞의 재드로잉 공정보다 약간 더 변형을 받았다. 이것으로 아이어닝 공정 동안 가공 경화 정도는 앞의 재드로잉 공정에 비해 작음을 알 수 있다. 벽 두께의 분포를 보면 편치 바닥부는 5.3640mm에서 5.3067mm로 두께의 변화가 생겼으며, 벽 부분의 두께는 5.2934mm에서 5.4507mm로 분포하였다(그림 5(b)). 소재의 높이 부분

에 3.8009mm에서 3.9645mm의 두께로 제품 두께인 최소의 영역이 나타났다. 이는 두 공정의 아이어닝으로 인해 소재의 최소 두께 영역이 생겼다. 성형 하중은 편치 행정 4200mm에서 최대 하중인 48ton이 작용하였고, 편치 행정이 진행됨에 따라 소재가 편치와 2 공정의 아이어닝 금형 사이를 빠져 나오기 때문에 전체 하중이 서서히 감소하였다(그림 5(c)). 아이어닝 공정에서는 소재의 가공 경화가 작고 소재 두께가 한계 두께인 3.8mm 이상인 영역으로 나타나기 때문에 아이어닝 공정의 설계가 적합하다.

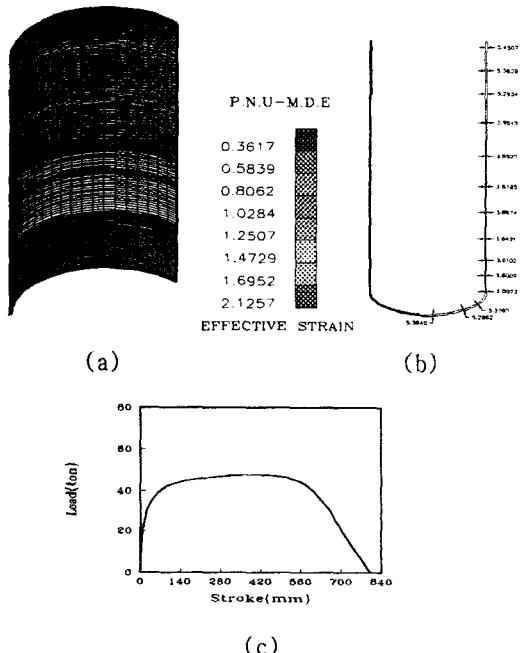


그림 5 4차 아이어닝 (a)성형된 제품 형상  
(b)응력과 두께 분포 (c)변위와 하중

#### 4. 적용 사례

먼저 표준 시편의 인장 시험에 의한 재료의 물성치는 다음과 같다. 즉 재질은 알루미늄 6061(0), 연신율은 25 %, 항복 강도는  $5.5 \text{ Kg}_f/\text{mm}^2$ , 인장 강도는  $12.5 \text{ Kg}_f/\text{mm}^2$ , 가공 경화 지수는 0.20이다.[9] 따라서 공정 설계 및 유한요소해석에 사용된 재료는 알루미늄 6061로서 재료의 응력-변형율 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 206.65 \bar{\varepsilon}^{0.2} (\text{N/mm}^2) \quad (6)$$

또한 그림 6와 같이 다단의 벽 두께를 갖는 원

통 셀의 최종 형상이 요구될 때 블랭크의 첫수는 앞서 설명한 표 1을 참조함으로써 계산된다. 따라서 귀걸생 및 절단에 대한 여유(42.89 mm)를 고려하고 체적 계산에 의하면 블랭크 직경  $D_0 = 877.0 \text{ mm}$ 이고 초기 블랭크 두께는  $t_0 = 6.0 \text{ mm}$ 로 구해진다. 표 2에 의하면  $t_0 / D_0$ 의 값이  $6/877 = 0.68\%$ 이므로 1차 드로잉 비와 역 재드로잉 비가 각각  $\beta_1 = 0.573$ ,  $\beta_2 = 0.76$  및  $\beta_3 = 0.792$ 로 설계되어진다. 그리고 각 공정의 편치 및 다이의 직경은 1차 편치 직경 502.6 mm, 2차 편치 직경 382.0 mm, 3차 편치 직경 302.5 mm으로 계산된다. 이때  $\beta_{total} = \beta_1 * \beta_2 * \beta_3$ 는 총 드로잉율로서 0.345이다. 이는 일반적으로 중간 풀럼 공정 추가 없이 성형 할 수 있는 한계치 0.35을 초과하는 값으로서 사실상 얻기 어려운 공정이지만 여기서 제안한 다단 디프 드로잉 공정은 역 재드로잉 및 드로잉-아이어닝 공정의 조합으로 이를 실현하여 보여준다. 먼저 최대 편치력은 식(2)에 의하여 112.5(톤)이 필요하며 블랭크 홀더력은 식(4)에 따라서 36.5(톤)으로 대략 최대 편치력의 1/3정도로 계산되어진다. 이러한 값은 유한 요소 해석에 의한 최대 편치력 86톤에 비하면 다소 높은 값에 해당하고 실제 측정에 의한 최대 프레스력 75톤, 실제 블랭킹 홀더력 27톤 보다 높음을 알 수 있다. 실제 대량 생산에 필요한 유압식 자동화된 복동 프레스 생산 공정에서는 윤활 공정과 생산 속도에 따라 차이가 있으나 최대 편치력은 150 톤 정도 소요되었다. 또한 아이어닝 비는 식(5)에 의해 24.0(%)임을 알 수 있다. 따라서 한번의 아이어닝 공정만으로는 얻기 힘든 값이다. 따라서 요구되는 아이어닝율을 만족하면서 편치 행정을 줄일 수 있는 다단 아이어닝(multi-stage ironing) 공정으로 설계되었다.

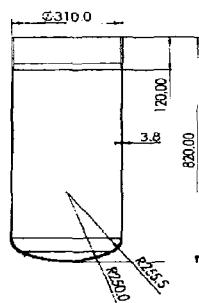


그림 6 다단 드로잉 제품 형상

그리고 압력 용기의 다단 디프 드로잉 공정을 유한 요소법으로 검증한 결과는 다음과 같다. 먼저 첫 번째 디프 드로잉 공정에서는 벽이 매우 얇아지는 부분(thinning)은 없어서 공정상의 큰 문제는 없고 가공 경화의 정도도 양호한 것으로 판단된다. 그리고 2차 역재드로잉 공정에서는 편치의 곡률부와 직선부 사이에서 두께가 5.4837mm로서 주위 소재보다 두께가 얇아졌지만 소재의 한계 두께인 3.8mm보다는 두껍기 때문에 큰 문제는 없는 것으로 생각되며, 가공 경화의 정도도 양호한 것으로 판단된다. 또한 3차 드로잉-아이어닝 공정에서는 편치의 곡률부와 제품 높이의 반길이 사이에서는 두께가 5.2861mm에서 5.4123mm로 제품의 한계 두께인 3.8mm보다는 두껍다. 특히 편치의 곡률부와 직선부 사이에서는 두께가 주위 소재보다 두께가 매우 얇아졌지만 드로잉-아이어닝 공정을 수행하였을 때 제품 생산에는 문제가 없었다. 마지막 4차 다단 아이어닝 공정에서는 소재의 가공 경화는 작지만 소재의 두께가 한계 두께인 3.8mm이하인 영역이 나타나기 않기 때문에 아이어닝 공정의 설계가 적합하다. 그럼 7,8은 다단 디프 드로잉 제품의 연속 생산 라인과 중간 및 최종 성형된 LPG 용기(스피닝 공정 포함) 형상을 보여준다.

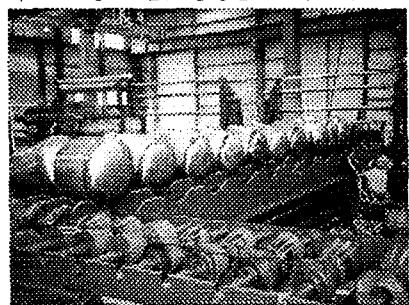


그림 7 다단 디프 드로잉 제품의 연속 생산 라인

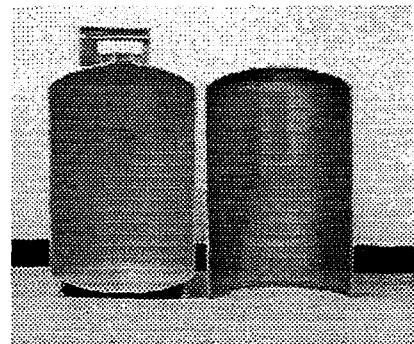


그림 8 중간 및 최종 성형된 LPG 용기 형상

## 5. 결 론

이상과 같이 본 연구에서는 후 공정으로 스피닝 공정이 요구되는 다단 벽 두께를 갖는 원통 쉘의 다단 디프 드로잉 공정 설계에 필요한 여러 가지 기준에 대하여 논의하였으며 또한 설계된 공정을 유한요소 해석으로 검증하고 실제 공정에 적용하여 가정용 LPG용기 원통 쉘을 생산하는 사례를 설명하였다. 실제 제작되어진 금형은 현재 가정용 LPG용기 생산 라인에 설치되어 대량 생산 방식의 보완 및 대일 수출 협의 중이다. 특히 다량의 기준 강재 LPG용기가 보급되어 있어서 안전도 측면에서 우수한 용접부 없는 초경량 고강도 알루미늄 일체형 LPG용기(용기 무게: 9Kg)의 대체 수요는 앞으로 엄청나다고 판단된다. 또한 이러한 다단 드로잉 공정은 차후 이와 유사한 여러 가지 형태의 원통 쉘을 생산하는 공정의 기본 설계 자료로 이용될 뿐만 아니라 다른 여러 형태(가정용 LPG 13 Kg, 50 Kg 용기)의 일체형 원통 쉘을 연속적으로 생산하는 공정에도 응용될 수 있다. 그리고 여기에서 언급하지 않았던 윤활제의 설계, 최적 드로잉 속도 설정, 드로잉 결합 및 대책, 재료 물성, 금형 및 유압 프레스의 유지 보수 분야의 연구도 제품을 대량 생산하는 단계에서 매우 중요하기 때문에 현장에 기반을 둔 실험에 의한 수정 및 최적 설계에 관한 연구가 추후 계속 명행되어야 한다고 사료된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 최원집, 남재복, 김영석, "2 피스 캔(two-piece can) 몸체 가공용 툴 셋(tool set) 설계 제작", 한국 소성 가공 학회, pp. 269-277, 1988
- (2) 양동렬, 허훈, 김용환, "박판 성형 기술의 진보", 한국 소성가공 학회, pp. 11-23, 1994
- (3) 박승언 외, "프레스 가공 데이터 북", 기전 연구사, pp. 187-228, 1993
- (4) 전기찬, "박판 금속의 성형(이론과 실제)", 반도 출판사, pp. 117-124, 1993
- (5) R.Hill, "Mathematical theory of Plasticity", Oxford Univ. Press, pp. 297, 1950
- (6) R.L.Whiteley, Trans. ASM, 52, pp. 154, 1960
- (7) Lange, "Handbook of Metal Forming", McGraw-Hill Co., pp. 20.27-20.28, 1985
- (8) B.Avitzur, "Handbook of Metal Forming Processes", John Wiley & Sons Inc., pp. 527-579, 1983
- (9) "알루미늄 핸드북", 사단법인 경금속 협회, pp. 34, 1990
- (10) Lee,C.H. and Kobayashi, S., "Rigid-Plastic Analysis of Bore Expanding with Anisotropy Sheet Metals by the Matrix Method", Proc. 15th Int. Mach.Tool Des. Res. Conf. pp. 561-569, 1974
- (11) Gotoh,M. and Ishise,F., "A Finite Element Analysis of Rigid-Plastic Deformation of the Flange in a Deep Drawing Process Based in a Fourth-Degree Yield Function", Int. J. Mech. Sci. Vol. 20, pp. 423-435, 1978
- (12) Kobayashi,S. and Kim,J.H., "Deformation Analysis of Axisymmetric Sheet Metal Forming Processes by Rigid-Plastic Finite Element Method", Mechanics of Sheet Metal Forming, Edited by Koistinen, D.O. et. al., Plenum Press, pp. 341-365
- (13) Toh,C.H. "Process Modeling of Sheet Metal Forming of General Shapes by the Finite Element Method Based on Large Strain Formulation", Ph.D. Thesis, U.C. Berkeley, 1985
- (14) Park,J.J., Oh,S.I and Altan, T., "Analysis of Axisymmetric Sheet Forming Processes by Rigid-Viscoplastic Finite Element Method", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 109, pp. 347-354, 1987
- (15) Germain,Y., Chung,K. and Wagoner,R.H., "A Rigid-Viscoplastic Finite Element Program for Sheet Metal Forming Analysis", Int. J. Mech. Sci. Vol 31, No. 1, 1-24, 1989
- (16) 이우철외, "실무 프레스 금형", 홍익제, pp. 301