

# 유한요소법을 활용한 압력용기의 설계 및 성형해석에 관한 연구

한 규 택\*

## A Study on the Process Design and Deformation Analysis for Pressure Vessels by Finite Element Method

K. T. HAN\*

**Key words** : pressure vessel(압력용기), process design(공정설계), forming analysis(성형해석)  
multistage deep drawing(다단계 디프드로잉)

### Abstract

The investigation deals with the manufacturing process design and deformation analysis for seamless pressure vessels. Axisymmetric multistage deep drawing is a complex and important sheet metal forming process in the industry. In this study, the process design for large size cylindrical shells with various thickness is performed and a general guideline for forming process design of pressure vessels will be suggested. Thus in this paper, for the verification of the forming process design, the forming analysis of pressure vessels will be carried out by PAM-STAMP™, which is on the basis of finite element analysis. In this case, the formability of pressure vessels is evaluated using the results of computer simulation.

### 1. 서 론

박판성형에 의한 제품은 같은 강도의 다른 가공 공정에 의한 성형제품에 비해 경량이며 표면정밀도가 우수하고 직접 완제품으로 쓸 수 있는 장점이 있어서 자동차산업, 가전제품산업, 항공기산업 등 그 적용범위가 넓다. 그러나 대부분의 박판성

형물은 제조공정 중에 큰 소성변형을 수반하게 되어 파단, 형상불량 등의 가공결함이 발생하게 된다. 따라서 이러한 가공결함을 수반하지 않는 우수한 박판성형품을 얻기 위해서는 합리적인 가공공정의 설계가 필수적으로 요구되며, 이런 이유로서 박판성형품을 생산하는 산업체에서는 효율적이고 경제적인 제조공정을 선호하게 된다. 한편

\* 부경대학교 기계자동차공학부 (원고접수일 : 97년 12월)

종래에 박판을 요구되는 크기로 절단한 후, 용접에 의해 제품을 생산하던 압력용기의 제조공법을 디프 드로잉과 같은 드로잉공법에 의해서 제조하게 되면 제조공정이 단축되어 생산비용을 감소시킬 수 있게 된다. 그리고 현재 일반가정에서 많이 사용되는 압력용기는 비교적 대용량으로 원통셀 형상을 가지면서 안전에 필요한 형상치수와 내부의 용액을 정확히 유지시키고 대량생산이 가능하기 때문에 의료, 레저 및 각종 산업분야의 고압의 가스와 냉매의 저장용기로서도 널리 이용되고 있다. 그러나, 현재 국내에서 시판되고 있는 가정용 압력용기(내부용액:프로판가스,충전압력:약 7~8kg/cm<sup>2</sup>)들은 대체적으로 몇 부분의 두꺼운 박판 금속의 접합에 의해서 생산되기 때문에 용액을 제외한 압력용기만의 무게도 무거워서 취급하기가 쉽지 않으며, 사용환경에 따라서 접합부위가 부식이 잘 되어수명이 오래가지 못하고 취급시 안전에도 많은 위험이 예상되어 용도가 제한되어 있다.<sup>1)</sup> 또한 국내 승용차용으로 사용되는 압력용기(내부용액:부탄가스,충전압력:약 2kg/cm<sup>2</sup>)도 용접에 의해 제조된 것을 사용하기 때문에 가스누출 및 충돌시의 위험성을 배제할 수 없다. 게다가 용기의 무게를 제외한 가스용량만도 최저 30kg정도이므로 승용차의 경량화에도 제약이 되고 있는 실정이다. 따라서 경량이면서도 고강도인 소재를 사용하여 드로잉공법에 의해서 대용량의 압력용기를 제조할 수 있는 공정을 개발하는 것은 의미가 있다. 그러나 국내에서는 가정용 압력용기와 같이 대용량의 성형품을 드로잉공법에 의하여 생산한 사례는 거의 없다.<sup>2)</sup> 또한 외국에서도 용기의 밑면과 몸통부분을 따로 제작한 후 용접하여 붙인 경량소재의 압력용기가 개발되어 있으나 접합부가 없는 압력용기는 아직 개발된 적이 없다.

따라서 본 연구에서는 압력용기의 가공특성을 분석하고, 외연적 박판성형해석용 유한요소해석 프로그램인 PAM-STAMP™에 의하여 다단계 디프드로잉 공정에서의 블랭크홀딩력, 마찰상태, 다이반경에 따른 두께분포와 변형상태 등의 성형해석을 한 후 압력용기의 성형성을 예측하여 드로잉공법에 의한 대용량의 압력용기를 제조하는 공정설계방안을 제시하고, 그 타당성을 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 공정설계

디프드로잉 공정은 유압식 프레스를 이용하여 원판형 블랭크를 다이구멍위에 올려놓고 펀치로 컵모양으로 드로잉하는 것인데, 다단계 디프드로잉(multistage deep drawing)공정은 다단계부터 원통셀의 생산을 가능하게 한다. 한편 다단계 디프드로잉 공정은 원판형 소재를 컵모양으로 1차 디프드로잉 한 후 반대방향으로 2차 역 재드로잉한 다음 3차 재드로잉-아이어닝과 함께, 요구되는 두께와 길이에 따라 한 번 또는 그 이상의 4차 아이어닝 공정의 추가로 비교적 깊고 얇으며 벽두께가 일정하지 않고 다단계벽두께의 원통셀 용기를 만드는 공정을 말하는 것으로 가공방법의 경제적측면에서 다른 가공법에 비해서 장점이 있으며, 이 때 소요되는 금형은 블랭크홀더, 1차 다이, 1차 펀치, 2차 다이, 드로잉-아이어닝 다이, 아이어닝 다이, 펀치1, 펀치2로 구성된다.<sup>3)</sup>

#### 2.1.1 블랭크 직경

블랭크의 직경은 보통 드로잉 전후의 블랭크 두께 및 표면적이 일정하다는 가정하에서 구하나, 이론적 계산의 블랭크 직경은 귀발생 및 재료의 신장 등에 따라 오차가 생기며 또한 블랭크력의 가감, 윤활유의 종류에 따라 변화가 있으므로 일반적으로는 이론치수를 산출하고 그 치수에 의하여 시작품을 반복 가공한 다음 정확한 직경을 결정하게 된다. 한편 평면이방성계수(planar anisotropy)는 귀발생에 영향을 주어 값이 클수록 귀의 산과 골의 차이가 심하게 되어 재료의 사용률을 저하시키고 귀의 끝부분이 칼날처럼 되어 금형을 손상시키는 원인이 된다.

#### 2.1.2 드로잉비와 한계 드로잉비

원통셀의 직경(d)에 대한 블랭크 직경(D)의 백분율을 드로잉비라 하며 드로잉비의 역수를 드로잉률이라 한다. 그리고 원통셀의 직경을 일정하게 유지하고, 블랭크의 직경을 증가시키면서 드로잉시험을 하면 파단과 주름이 발생하지 않는 최대의 블랭크직경을 구할 수 있으며 이 때의 드로잉비를

한계 드로잉비라 한다. 한편, Hill의 이방성이론을 이용하면 한계 드로잉비와 수직이방성계수  $\bar{R} = (R_0 + R_{90} + 2R_{45})/4$ 의 관계가 식(1)과 같이 유도된다.<sup>4)</sup>

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

여기서, 수직이방성계수 R값은 표준 인장시험에서 폭방향 대수변형률에 대한 두께방향의 대수변형률의 비로 정의되며, λ는 마찰과 굽힘의 영향을 고려한 계수이다. 식(1)에 의하면 R값이 증가할수록 한계 드로잉비가 증가하게 됨을 알 수 있다.

2.1.3 최대 편칭력과 블랭크 홀딩력

드로잉에서 소요되는 힘은 보통 반경방향의 순수 드로잉에 소요되는 힘, 다이 형상반경에서 굽힘에 소요되는 힘 및 블랭크 홀딩력에 기인하는 저항을 극복하기 위한 힘으로 나누어 지며, 여기서는 드로잉에 필요한 최대 편칭력을 식(2),(3)과 같은 경험식을 적용한다.<sup>5)</sup>

$$P_{max} = \pi d_{p1} t_0 \sigma_b H_1 \quad (2)$$

$$P_{min} = \pi d_{p2} t_0 \sigma_b H_2 \quad (3)$$

이때 상수  $H_1$  과  $H_2$ 는 보정계수이고,  $t_0$ 는 초기 판두께,  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$ 는 1차 드로잉 펀치지름, 재드로잉 펀치지름을 각각 나타내며,  $\sigma_b$ 는 인장강도를 나타낸다. 또한 블랭크홀딩력에 적용하는 경험식은 식(4)와 같다.

$$BHF = \pi(D^2 - d^2)/4 \times Pr \quad (4)$$

여기서,  $Pr = (\sigma_b + \sigma_y) / 200$  은 단위면적당의 블랭크홀딩 압력이다.

2.1.4 역 재드로잉

역 재드로잉이란 1차 드로잉으로 얻은 원통셀을 그보다 작은 다이와 펀치를 이용하여 다시 드로잉하되 펀치의 방향이 반대로 작용함으로써, 같은 방향으로 굽힘이 계속되는 재드로잉 공정과 유사하나 제품의 안과 밖이 완전히 바뀌게 되고 요구되는 편칭력도 그만큼 줄어들게 되며, 또한 요구되는 금형내에서 복동 프레스의 구조를 이용하

여 한번 만에 성형품이 완성된다.<sup>4)</sup> Fig.1은 역 재드로잉공정의 개념도이다. 1차 드로잉용과 재드로잉용의 초기 두께에 대한 블랭크 직경의 수치는 Table1과 같다.<sup>6)</sup> 한편 1차 드로잉된 원통셀은 역드로잉펀치와 다이사이로 유입되어 상향드로잉이 진행되는데 이때는 1차 드로잉시 쿠션을 겸한 블랭크홀더의 작동이 중요하게 된다. 또한 이러한 공정은 드로잉 재료의 드로잉성이 우수해야 하며 복동 프레스의 행정길이가 보다 길어야 하는 단점들이 있다. 그러나 역드로잉공정이 1차 드로잉공정과 연결되어 연속적인 재드로잉이 이루어 질 때 요구되는 드로잉 효과가 나타난다.

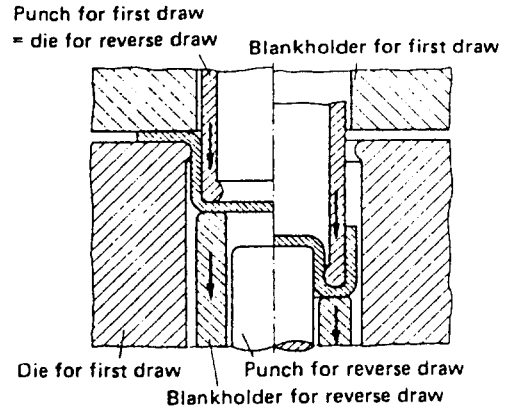


Fig.1 역 재드로잉공정의 개념도

Table 1 중간 소둔공정 없는 원통형 드로잉 제품의 최적 드로잉비

Number of draws	Relative sheet thickness $s/d, \times 10^{-2}$					
	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	1.72~1.82	1.67~1.72	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	1.22~1.25
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	1.16~1.18
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

2.1.5 드로잉-아이어닝

원하는 드로잉비로 성형하고 동시에 원하는 원통셀의 벽두께로 원통셀을 성형하는 공정으로서, 이 때는 드로잉의 램(ram)행정 안에서 아이어닝

이 동시에 진행되는데 Fig.2에서와 같이 다이의 높이가 적절하게 조정되어야만 드로잉이 끝난 후 이어서 아이어닝이 된다. 그러나 드로잉력은 디프 드로잉행정 끝으로 진행될수록 점차 감소하기 때문에 아이어닝은 드로잉이 끝나기 전에 수행된다.

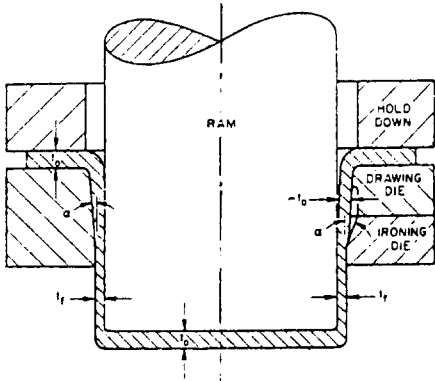


Fig.2 드로잉-아이어닝공정의 개념도

2.1.6 아이어닝

아이어닝은 다이와 펀치의 간격을 원통셀의 벽 두께보다 좁게 유지한 상태로 펀치로 밀어냄으로써 벽의 두께를 감소시키는 공정이다. 펀치부와 다이부의 마찰력 차이의 영향이 특히 중요하다. 이 때의 아이어닝비(Ironing Ratio, IR)는 초기 두께에 대한 두께변화율로 정의되며 식(5)와 같다.

$$IR = (t_0 - t_1) / t_0 \times 100 (\%) \tag{5}$$

2.1.7 마찰 및 윤활

공구와 피가공물간의 마찰은 박판성형에서 매우 중요한 인자이며, 일반적으로 드로잉공정에서 마찰계수를 낮추어 주면 드로잉성이 증가한다. 즉 드로잉에서는 소재와 금형접촉부의 마찰조건에 따라서 재료의 흐름과 변형률의 분포가 변화하게 된다. 또한 윤활제는 드로잉공정에서 공구와 피가공물간의 마찰을 감소시켜주고 공구를 냉각시켜 주는 역할을 한다. 그리고 마찰저항이 감소하면 공정진행에 필요한 펀칭력이 낮아지고 한계드로잉비가 높아지게 된다. 그러나 윤활조건이 좋아질수록 주름예방에 필요한 블랭크홀딩력은 증가되어야 한다.

2.2 다이설계

설계된 금형은 블랭크 홀더, 1차 다이, 1차 펀치 겸 2차 다이, 드로잉-아이어닝 다이, 아이어닝 다이, 펀치1, 펀치2로 구성되어 있다. 금형재료의 선정은 소재의 종류, 생산품의 갯수, 생산공정의 특성에 따라 달라지나 통상적으로 다음의 성질들이 요구된다. 즉, 내마모성, 내충격성, 인성이 커야 하며 열처리에 대한 변형이 적고 기계가공성과 비용이 저렴하여야 한다. 특히, 공구강 중 냉간합금용 공구강(STD11)은 내마모성과 담금질성이 좋고 열처리 변형이 적기 때문에 대부분의 금형재료로 사용된다. 그러나 가공성이 나쁘고 절삭 및 연삭에 약간의 난점이 있다. 통상적으로 선반가공후 경도를 부여하기 위하여 열처리하고 연마에 의해 매끈한 표면조도를 얻도록 한다. 특히 경도를 높이기 위해 담금질후 공냉 및 템퍼링한 후, 다이의 경우는 연마의 방향이 소재의 흐름방향과 일치하도록 하고 펀치의 경우는 마찰력을 증대시키기 위해 보통 깨끗이 연마하지 않도록 유의한다.

2.2.1 블랭크 홀더와 1차 다이

본 금형은 블랭크 홀더와 다이 역할을 한다. 즉 블랭크를 일정한 BHF로 유지하므로써 소재가 주름없이 다이 구멍으로 밀려 들어가게 한다. 블랭크 홀더의 크기는 블랭크 소재의 직경보다 커야 하며 또한 다이의 반경은 블랭크 크기와 두께의 영향을 받는다. 드로잉력을 줄이고 드로잉비를 증가시키기 위해서 큰 다이반경이 요구된다. 그러나 큰 다이반경은 플랜지와 블랭크 홀더의 접촉면적을 감소시켜 주름을 발생시킨다. 반대로 주름을 방지하기 위해서는 다이반경을 줄여야 한다. 통상 다이반경은 초기 블랭크 두께의 4~10배의 값을 갖도록 설계해야 한다.

2.2.2 1차 펀치 겸 2차 다이

1차 드로잉시에는 펀치의 역할을 하고 역 재드로잉시에는 다이 역할을 하므로써 블랭크를 원통셀로 성형한다. 이 때 1차 드로잉에서 내면이 역 재드로잉에서 외벽으로 뒤집어지게 된다. 특히 펀치 역할에서 다시 다이 역할로 변환되는 부분의 형상이 역 재드로잉 공정에 결정적인 영향을 미친

다. 따라서 이에 대한 형상은 역 재드로잉 공정에서 드로잉 불량을 방지하기 위해 매우 중요하다.

2.2.3 드로잉-아이어닝 다이

1차 드로잉 후 2차 역 재드로잉 공정을 통과한 중간 성형품은 3차 드로잉공정에서 약간의 아이어닝 공정을 동시에 거치게 된다. 이러한 공정은 드로잉성을 향상시키면서 동시에 약간의 벽두께 방향의 아이어닝 공정을 추가하므로써 원하는 원통셀의 최종 형상에 가깝게 성형한다. 이의 결과는 다음 공정에 영향을 미치기 때문에 아이어닝비의 배분은 중요한 요소가 된다.

2.2.4 아이어닝 다이

이 다이에서 중요한 기하학적인 특성인자들로 는 다이 반각(semicone angle)과 랜드부 길이 (length of land)인데 아이어닝 공정에서 소재는 다이 입구부에서 압축되는 동시에 축응력에 의해 인장되며 다이 반각이 큰 경우에는 소재의 연신부분이 많아져 파단이 일어난다. 따라서 통상 다이 반각은 5° ~ 15°이며 랜드부 길이는 소재의 특성, 드로잉속도 및 윤활조건에 따라 경험적으로 선택한다.

2.2.5 펀치

펀치의 형상은 성형제품의 형상을 결정하며 드로잉시 블랭크 안쪽면에 마찰력을 증대시키는 역할을 한다. 펀치의 반경은 다이반경보다 크게 해야 하며 그렇지 않으면 펀치가 소재속으로 파고 들어간다. 통상 펀치형상의 반경은 초기 두께의 4 ~ 10배의 값을 갖는다. 그러나 펀치2의 형상은 디프드로잉-아이어닝 다이와의 간섭이 가능한한 일어나지 않는 형상을 갖도록 설계되어야 한다. 펀치와 소재사이의 흠착을 방지하기 위하여 펀치 선단에 공기구멍(air vent)을 설치한다. 또한 다단 드로잉공정후 접합이 없는 원통셀을 제작하기 위해서는 펀치의 후미부분이 일정한 경사를 갖는 단이 설계되어 결국 성형된 원통 셀이 다단의 벽두께를 갖도록 제작되어져 있다. 즉 원통셀의 상부측의 벽두께를 측면의 벽두께보다 두껍게 만들어야 한다. 따라서 아이어닝 공정이 완료된 후 최종 제품의 형상은 벽두께가 바닥부, 측면부 그리고

스피닝부가 각각 다르게 된다.

3. 박판성형해석

여기에서는 설계된 원통셀 용기의 다단 디프드로잉 공정을 외연적 박판성형해석용 유한요소해석코드를 사용하여 해석하고 그 타당성을 검증하였다. 전체 공정은 먼저 1차 디프드로잉 공정, 2차 역재드로잉, 그리고 3차 드로잉-아이어닝 공정과 4차 아이어닝 공정으로 이루어져 있다. 박판성형의 소재로 사용되는 박판금속은 냉간압연의 전가공 단계를 거치므로 소성변형중에 결정격자의 방향성 등의 원인으로 이방성이 존재하기 때문에 디프드로잉과 같은 박판성형공정의 해석에서는 원칙적으로 이러한 이방성을 고려해야만 한다. 그러나 소재가 열처리등을 통해서 이방성이 완화된 경우는 이방성을 무시할 수 있다. 본 해석에서도 이와 같은 소재를 사용해서 해석했으며 해석에 사용된 재료의 물성치는 아래와 같다.

Properties	Value
Density	2.37E-06(kg/mm <sup>3</sup> )
Young's modulus	70(GPa)
Poisson's ratio	0.34
Hardening coefficient	0.125(GPa)
Offset strain	0.0025
Hardening exponent	0.2

또한 본 연구에 사용된 박판소재는 절단여율을 고려하여  $D_0 = 877\text{mm}$ 로 하였으며, 두께가 6.0mm로서 후판이기 때문에 탄성회복의 효과가 무시가능하므로 블랭크홀더와 펀치사이의 벤딩을 고려할 수 있는 연속체요소를 사용한 강소성 유한요소법으로 디프드로잉 공정을 해석하였다. 첫번째 디프드로잉 공정에서는 펀치와 블랭크홀더를 강체로 가정하였고, 소재는 탄성변형을 무시한 강소성재료로 모델링하였다. 또한 플랜지부분에서 생기는 주름을 방지하기 위하여 블랭크홀딩력을 일정하게 유지시켰다. 2차 역드로잉 공정에서는 첫번째 공정에서의 펀치가 금형으로 사용되고, 새로운 역드로잉 펀치가 사용되며, 블랭크홀더의 상

판이 플랜지부의 역벤딩(unbending)을 구속하기 위하여 사용되었다. 3차 드로잉-아이어닝공정은 드로잉공정과 아이어닝공정이 동시에 이루어진다. 이 때 드로잉 편치는 원통셀의 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. Fig.3는 1차 드로잉공정에서 성형된 제품의 3차원 형상 및 벽두께분포를 나타내었다.

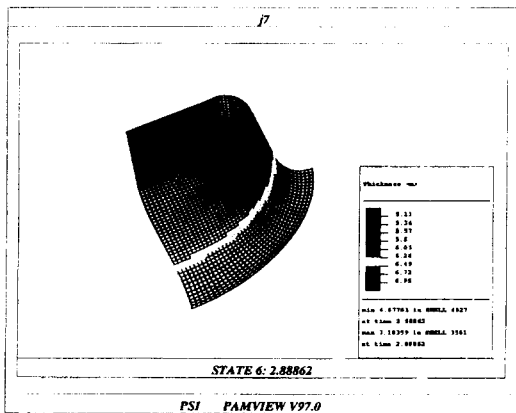


Fig.3 1차 드로잉공정의 형상 및 벽두께분포

한편 마지막 아이어닝 공정으로 성형된 소재의 유효변형률 및 벽두께분포(Fig.4)를 보면 편치바닥부의 유효변형률 값은 이전 단계의 재드로잉 공정보다 약간 더 가공경화를 받았음을 예측하게 해준다. 벽 부분의 유효변형률 값은 0.8062에서 2.1257로 앞의 재드로잉 공정보다 약간 더 변형을 받았음을 나타내는데, 이것으로 아이어닝 공정동안 가공경화의 정도는 앞의 재드로잉 공정에 비해 작음을 알 수 있다. 벽두께의 분포를 보면 용기의 편치바닥부는 5.3640mm에서 5.3067mm로 두께의 변화가 생겼으며, 압력용기의 벽 윗부분의 두께는 5.2934mm에서 5.4507mm로 분포하였다. 또한 소재의 높이부분은 3.8009mm에서 3.9645mm의 두께로 최종제품의 두께에 근접한 영역이 나타났

다. 이는 두번의 아이어닝으로 인해 소재의 최소 두께영역이 생겼음을 의미한다. 성형하중은 편치 행정 4200mm에서 최대하중이 작용하였고, 편치 행정이 진행됨에 따라 소재가 편치와 2공정의 아이어닝 금형사이를 빠져나오기 때문에 전체 하중이 서서히 감소하였다(Fig.5). 아이어닝 공정에서는 소재의 가공경화가 작고 소재두께가 한계두께인 3.8mm이상인 영역으로 나타나기 때문에 아이어닝 공정의 설계가 타당함을 알 수 있다.

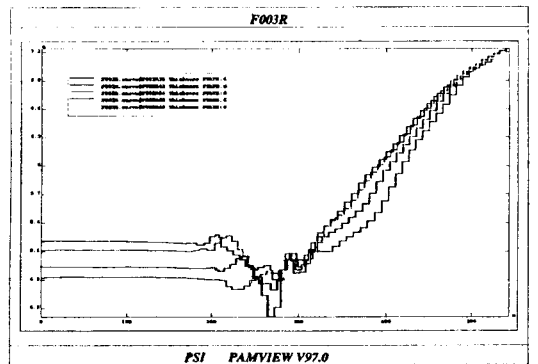


Fig.5 최종 아이어닝공정의 유효변형률과 벽두께분포

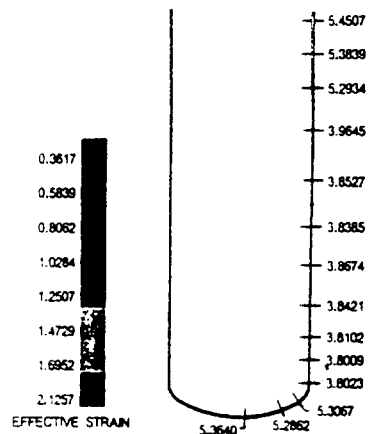


Fig.6 최종 아이어닝공정의 편치행정과 하중관계

#### 4. 해석결과 및 고찰

사용된 소재의 인장시험에 의한 재료의 물성치는 다음과 같다. 즉, 연신률은 0.25, 항복강도는

5.5kg/mm<sup>2</sup>, 인장강도는 12.5kg/mm<sup>2</sup>, 가공경화지수는 0.2이다.<sup>7)</sup> 따라서 공정설계 및 유한요소해석에 사용된 재료의 구성방정식인 응력-변형을 관계식은 다음과 같다.

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

한편, 귀발생과 절단에 대한 여유(42.89mm)를 고려하고 체적계산에 의하면 블랭크 직경 D<sub>0</sub>=877.0mm이고, 초기 블랭크 두께는 t<sub>0</sub>=6.0mm로 구해진다. Table1에 의하면 t<sub>0</sub>/D<sub>0</sub>의 값이 6/877 = 0.68(%)이므로 1차 드로잉률과 역 재드로잉률이 각각 α<sub>1</sub>=0.573, α<sub>2</sub>=0.76 및 α<sub>3</sub>=0.792로 계산된다. 그리고 각 공정의 펀치 및 다이의 직경은, 첫번째 드로잉의 펀치직경이 502.6mm, 2차 펀치직경이 382.0mm, 3차 펀치직경은 302.5mm로 계산된다. 이 때 α<sub>total</sub>=α<sub>1</sub> \* α<sub>2</sub> \* α<sub>3</sub> 로서 총드로잉률이다. 이는 일반적으로 성형중간의 플립공정이 없이는 성형하기가 어려운 공정이지만 역 재드로잉 및 드로잉-아이어닝 공정의 조합으로 성형이 가능하게 된다. 먼저 최대 펀칭력은 식(2)에 의하여 112.5톤이 필요하며 블랭크홀더력은 식(4)에 따라서 36.5톤으로 대략 최대 펀칭력의 1/3정도로 계산된다. 이러한 값은 유한요소해석에 의한 최대 펀칭력 86톤에 비하면 다소 높은 값에 해당하고 실제 측정에 의한 최대 펀칭력 75톤, 실제 블랭크 홀딩력 27톤보다 높음을 알 수 있다. 그리고 실제 대량생산에 필요한 자동화된 유압식 복동프레스 생산공정에서는 윤활공정과 생산속도에 따라서 차이가 있으나 최대 프레스력은 150톤정도 소요된다. 또한 아이어닝비는 식(5)에 의해 24%임을 알 수 있다. 따라서 한 번의 아이어닝공정만으로는 얻기 힘든 값이다. 따라서 요구되는 아이어닝비를 만족시키면서 펀치행정을 줄일 수 있는 다단 아이어닝공정으로 설계함이 타당함을 알 수 있다. 한편 압력용기의 다단 디프드로잉 공정을 유한요소법으로 검증한 결과는 다음과 같다. 첫번째 디프드로잉 공정에서는 벽이 매우 얇아지는 부분이 없어서 공정상의 큰 문제는 없고 가공경화의 정도도 양호한 것으로 판단된다. Fig.6~8은 마찰계수가 0.03~0.10일 때 다이반경에 따른 두께변화를 나타내었는데, 경험식에 의한 다이반경 범위(5t~

10t)내에서는 두께변화의 분포가 실제 공정과 큰 차이를 보이지 않았으나 한계값인 R30근방에서는 마찰계수의 변화에 따라 상당한 변화를 보였

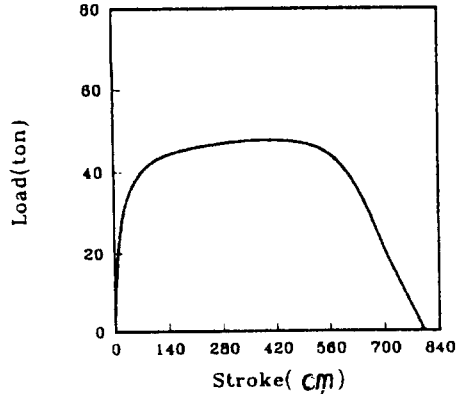


Fig.6 다이반경에 따른 두께변화(μ=0.03)

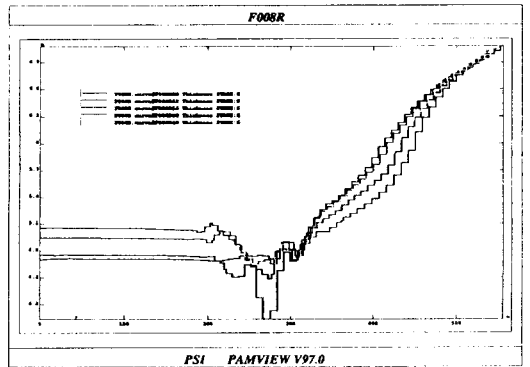


Fig.7 다이반경에 따른 두께변화(μ=0.08)

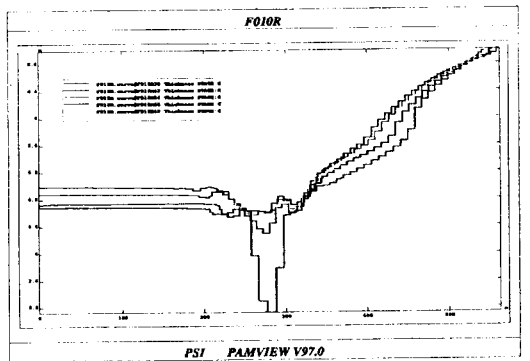


Fig.8 다이반경에 따른 두께변화(μ=0.10)

다. 또한 마찰계수가 0.05이상에서는 다이반경부위에서의 두께의 변화가 제품에 영향을 줄 정도로 크게 나타났다.

한편 2차 역 재드로잉 공정에서는 펀치의 곡률부와 직선부사이에서의 두께가 다른 부분보다 얇아졌지만 소재의 한계두께보다는 두껍기 때문에 큰 문제는 없는 것으로 생각되며, 가공경화의 정도도 양호한 것으로 판단된다. 또한 3차 드로잉-아이어닝 공정에서는 펀치의 곡률부와 제품높이의 반정도 길이부분에서는 두께가 제품의 한계두께보다 두껍게 나타났다. 특히 펀치의 곡률부와 직선부사이에서는 두께가 주위 소재보다 두께가 얇아졌지만 드로잉-아이어닝공정을 수행하였을 때 제품생산에는 문제가 없을 것으로 생각된다. 또한 마지막 아이어닝공정에서는 소재의 가공경화는 작지만 소재의 두께가 한계두께이하인 영역이 나타나지 않기 때문에 아이어닝 공정의 설계가 타당함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 압력용기의 다단계 디프드로잉 제조공정을 외연적 유한요소법을 사용하는 상용 해석코드를 이용하여 드로잉공정에서의 블랭크홀딩력, 마찰상태, 다이반경 등의 공정변수에 대한 두께분포와 변형상태를 분석하여 성형성을 예측 하므로써, 압력용기의 다단계 디프드로잉 공정설계에 대한 타당성을 고찰하였는데, 그 결과 다이 반경은 경험식의 범위내에서는 두께변화의 분포에 별 영향이 없는 것으로 나타났으나 마찰상태에 따라서는 두께의 분포가 성형품에 영향을 미칠 정

도로 나타났으며, 이것은 실제 공정에서의 윤활유의 선택의 중요성 및 타당성을 입증하는 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구 결과에 의한 다단계 드로잉공정설계 및 해석에 대한 자료는 앞으로 이와 유사한 다양한 형태의 압력용기를 생산하는 공정의 기본설계자료로 이용될 뿐만 아니라, 접합공정이 없는 원통셀을 제조하는 공정에도 응용될 수 있을 것으로 생각한다. 또한 성형해석과정에서 얻어지는 소재의 변형과정의 시뮬레이션 결과는 최종 제품의 성형된 모습과 두께분포의 예측을 가능하게 하므로, 압력용기와 같은 후판인 원통셀 형태의 제품개발시에 상용해석코드를 사용하여 성형성을 예측하면서 공정설계를 한다면 제조과정의 시간과 비용 등 경제적인 면에서 큰 효과가 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- 1) 한규택 외, "다단 벽두께 원통셀 성형공정설계에 관한 연구", '96년도 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.943 948,1996
- 2) 최원집 외, "2피스 캔 몸체가공용 틀셋 설계 제작", 한국소성가공학회, pp.269 277,1988
- 3) 김영탁 외, "Study on the Design Improvement of Axisymmetric, Multistage Deep awing Dies", HANPAM, pp.261 268,1996
- 4) Lange, "Handbook of Metal Forming Processes", John Wiley & Sons Inc., pp.527-579,1983
- 5) 전기찬, "박판금속의 성형(이론과 실제)", 반도 출판사, pp.134 149,1993
- 6) 손양언, "금형설계", 기전연구사, pp.268 343, 1987
- 7) "알루미늄 핸드북", 사단법인 경금속협회, pp.34,1990