

# 자동차 엔진풀리 성형 공정 설계에 관한 연구

## A Study on the Forming Process Design of Engine Pulleys for Automobiles

\*신보성, 최두선(한국기계연구원), 심국보, 송선호, 백재현((주)현대툴링시스템)  
\*B.S.Shin, D.S.Choi(KIMM), K.B.Shim, S.H.Song, J.H.Baek(HYTOOLS)

### ABSTRACT

In this paper, we will discuss in the forming process design of the making engine pulleys for automobiles. These pulleys are required to be made by precision deep drawing process because these are to be combined with bearings and engine timing belts. These pulleys are used of cold rolled steel plates starting with the initial blanking size of 115.2 mm and the initial thickness of 1.2 mm. Our deep drawing process is designed the continuous 5-steps process, that is, 1'st deep drawing, 2'nd reverse redrawing, 3'rd trimming, 4'th drawing-ironing and 5'th piercing. This process need no in-process annealing.

**Key words :** engine pulleys(엔진 풀리), deep drawing(디프 드로잉), reverse redrawing(역재드로잉), trimming(트리밍), drawing-ironing(드로잉-아이어닝), piercing(피어싱)

### 1. 서 론

박판 금속 성형(sheet metal forming)은 다른 성형 제품의 강도에 비해 경량이며 표면 정밀도가 우수하고 직접 완제품으로 쓸 수 있는 등의 장점이 있어서 자동차 산업, 항공기 산업, 전자 부품 산업 등 그 적용 범위가 넓어가고 있다. 또한 박판을 이용한 냉간 성형품을 생산하는 산업의 이윤은 이용되는 가공 방법의 경제성에 따라 대부분 결정된다.[1] 박판 금속 가공 기술의 선택에 있어서 재료와 사용되는 에너지의 절감이라는 실질적인 문제는 오랜 시간 동안 수많은 기계 제작 분야에서 재래의 기술들이 더욱 경제적인 기술에 의해 배제되는 결과를 이끌어 냈다. 자동차 엔진에 부착되어 있는 타이밍 벨트 풀리는 내부에 베어링이 장착된 부품으로서 엔진의 운전조건이 고속·고압인 경우가 많으므로 고속 회전에 의한 회전 불균형과 같은 과부하에 의해 풀리의 변형을 방지하기 위한 강성이 요구되기 때문에 엔진 풀리는 용접 이음매가 없는 다단드로잉 공정에 의한 정밀 성형 공정이 요구된다. 이를 제작하는 공정은 크게 원자재 용해 및 슬라브 주조, 열/냉간 압연에 의한 강재 박판 가공, 블랭킹, 다단드로잉 및 절단 가공 등의 조합으로 구성되어 있는데 이들 공정 중 다단드로잉 공정에 소요되는 최적

공정의 설계 및 금형 설계가 본 연구의 목적이다. 여기서 다단드로잉 공정이란 원판형 강재 소재를 컵 모양으로 1차드로잉한 후 반대 방향으로 2차역재드로잉(reverse redrawing)하고 요구되는 형상치수에 따라 트리밍(trimming), 드로잉-아이어닝(drawing-ironing, D&I) 그리고 피어싱(piercing) 공정의 추가로 이음매 없는 풀리를 만드는 공정으로 이루어진다.[2-5]

따라서 본 연구에서는 기계식 단동 프레스에 의한 다단 엔진 풀리의 연속적인 정밀 디프 드로잉(deep drawing) 공정과 이에 사용되는 금형의 설계 기준에 대하여 설명하고 실제 적용한 엔진 풀리의 개발 사례를 중심으로 기술한다.

### 2. 공정 설계

엔진 풀리는 그림 1에서 보는 바와 같이 자동차 엔진에 부착되어 내부에 베어링이 장착된 부품으로서 엔진 성능에 매우 중요한 역할을 담당하기 때문에 정확한 치수를 갖는 정밀 성형 공정이 요구된다. 일반적으로 다단 디프 드로잉 공정은 주로 기계식/유압식 프레스를 이용하여 원판형 블랭크(blank)를 다이 구멍(die cavity)위에 올려

놓고 펀치로 뒹으로써 컵 모양으로 드로잉한다. 따라서 원소재의 두께가 성형 후에도 변화하지 않도록 하는 것이 디프드로잉 공정의 목적이나 플랜지부의 블랭킹 홀더력 (blank holding force, BHF)와 펀치부 및 다이부의 마찰력 차이에 의한 드로잉력으로 약간의 두께 감소와 증가현상이 수반된다. 여기서는 먼저 정밀 단단 드로잉 공정에 주요 설계인자 및 단위공정으로서 블랭크의 칫수, 드로잉 비와 한계 드로잉비 그리고 성형에 필요한 최대 펀치력, 블랭크 홀더력, 역재드로잉, 아이어닝 공정에 대하여 설명한다.

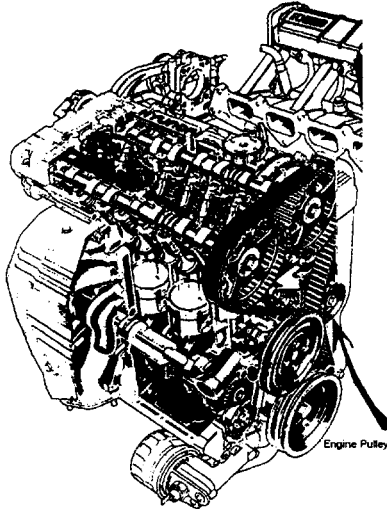


그림 1 자동차 엔진 풀리

## 2.1 블랭크 직경

성형하고자 하는 제품의 최종 형상으로부터 초기의 블랭크 직경을 계산하되 귀(ear) 발생과 트림(trim)에 필요한 여유를 고려하여 결정한다. 한편 압연 방향에 따라 변형율비(strain ratio) R값(일명 Lankford 계수)은 표준 인장 시험에서 폭 방향 자연 변형율에 대한 두께 방향의 자연 변형율의 비로 정의된다. 이때 평면 이방성계수(planar anisotropy)은 귀 발생에 영향을 주어 값이 클수록 귀의 산과 골의 차이가 심하게 되어 재료의 사용율을 저하시키고 귀의 끝부분이 칼날 처럼 되어 금형을 손상시키는 결함의 원인이 된다. 그림 2와 그림 3은 박판의 평면 이방성 계수와 귀 발생 현상을 보여준다. 기본적인 회전체 드로잉 형상에 대한 블랭크의 칫수가 표 1에서와 같이 계산되어진다. 즉 표에서 보는 바와 같이 드로잉 전의 블랭크 칫수(D)는 제품의 표면적(A)을 동일하게 둠으로써 다음식과 같이 개략적으로 계산된다.

$$D = \sqrt{4A/\pi} \quad (1)$$

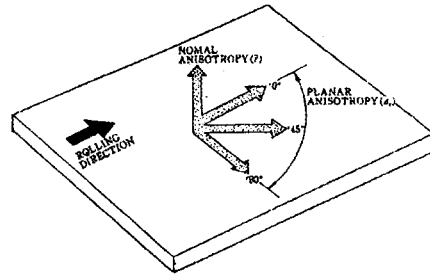


그림 2 압연방향과 이방성계수

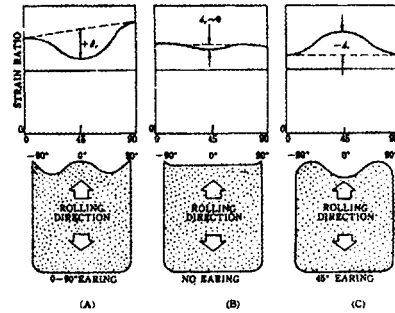


그림 3 이방성계수와 귀 발생

표 1 대표적인 회전체 드로잉제품의 블랭크 지름

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

## 2.2 드로잉 비와 한계 드로잉 비

원통 쉘의 직경(d)에 대한 블랭크 직경(D)의 백분율을 드로잉 비(Drawing Ratio, DR)라 하며 원통 쉘의 직경이 일정할때 블랭크의 직경을 증가시키면서 파단과 주름이 발생하지 않는 최대의 블랭크에 대한 드로잉 비를 한계 드로잉 비(Limit Drawing Ratio, LDR)라 한다. Whiteley는 Hill의 이방성 이론을 이용하여 한계 드로잉 비 비교수적 이방성 계수(normal anisotropy,  $\bar{r}$ )의 관계를 이론적으로 도출하였다.[6,7] 그 결과는 식(2)과 같다. 이때

$\eta$ 는 마찰 및 굽힘의 영향을 고려한 계수이다. 한편 드로잉 율은 드로잉 비의 역수로 정의되며 이는 각종 재질에 따라 경험적으로 정하여져있다.

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

### 2.3 최대 펀치력과 블랭크 홀더력

플랜지(flange)에서 발생하는 주름(winkling)을 방지하기 위하여 블랭크 홀더를 사용한다. 또한 드로잉에 필요한 1차 드로잉력, 즉 최대 프레스력은 통상식(3)와 같은 경험식이 설계의 기준으로 사용된다.

$$P_{1max} = \pi * d_{p1} * t_0 * \sigma_B * K_1 \quad (3)$$

이때 상수  $K_1$ 는 표 2와 같이 드로잉율에 따라 정해지는 경험상수,  $t_0$ 는 초기 판두께  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$ 는 1차 드로잉 펀치 지름, 재드로잉 펀치 지름을 각각 나타낸다. 그리고

$\sigma_B$ 는 인장강도를 나타낸다. 그리고 블랭크 홀더력은 주어진 드로잉 비에서 적절한 영역의 값을 갖게 되는데 값이 너무 적으면 플랜지 주름이 발생하고 값이 너무 크면 파단이 일어난다. 이는 통상 시험 작업을 통하여 구해지는데 일반적인 기준은 식(4)을 적용한다. 여기서  $\sigma_Y$ 는 항복응력을 나타낸다

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

표 2 강판의  $K_1$  값 계수

鋼板 (S & C 15)의 係數  $K_1$ 의 表

t/D (%)	D/t	첫드로잉율의 드로잉율 $d_1/D$									
		0.45	0.40	0.50	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80
5.0	20	0.95	0.85	0.75	0.65	0.60	0.54	0.43	0.33	0.28	0.20
2.0	50	1.10	1.00	0.90	0.80	0.75	0.68	0.58	0.48	0.38	0.28
1.2	83		1.10	1.00	0.90	0.80	0.68	0.58	0.47	0.37	0.30
0.8	125			1.10	1.00	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40	0.33
0.5	200				1.10	1.00	0.82	0.67	0.54	0.43	0.36
0.3	500					1.10	0.90	0.75	0.60	0.50	0.40
0.1	1000						1.10	0.90	0.75	0.60	0.50

주: 펀치의 반지름  $r_0 = (4-6)t_0$ 으로 취한 경우는 취의 값보다 5% 증가시킴 것.

### 2.4 역 재드로잉

역 재드로잉이란 1차 드로잉으로 얻은 원통 쉘을 그보다 작은 다이와 펀치를 이용하여 다시 드로잉하되 펀치의 방향이 반대로 작용함으로써 같은 방향으로 굽힘이 계속되는 재드로잉 공정이다. 일반적인 재드로잉 공정과 유사하나 제품의 안과 밖이 완전히 바뀌게 되고 요구되는 펀치력도 그만큼 줄어들게 되며 또한 요구되는 금형 내에서 복동 프레스의 구조를 이용하여 한번 만에 성형품이 완성된다. 1차 드로잉 율과 재드로잉 율의 초기 두께에 대한 블랭크 직경의 수치가 표 4와 같다. 역 재드로잉은 박판이 180° 완전히 역드로

잉 다이를 따라 회전하기 때문에 주름이 발생하기 쉬우므로 블랭킹 홀더가 반드시 필요하다. 또한 드로잉 재료는 드로잉성이 우수해야 하며 복동 프레스의 행정(stroke) 길이가 보다 길어지는 구조적 단점들이 동반된다. 따라서 이러한 단점 때문에 역 드로잉 공정이 한때는 드로잉 공정에 아무런 장점도 없다는 주장이 제기되기도 했으며 지금도 대부분 그렇게들 알려져 왔다. 하지만 역드로잉 공정이 1차 드로잉 공정과 연계하여 연속적인 재드로잉이 이루어질 때 아주 유용한 드로잉 효과를 나타낸다. 표 3은 중간 소둔 공정 없는 경우에 초기두께와 블랭크 직경의 상대적인 비에 따른 원통형 드로잉 제품의 최적 드로잉비를 보여준다.[8]

표 3 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	1.72-1.82	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

\*Workpiece material—RS 14 (SAE 1008).  
Sources: Compiled from [8,9].

### 2.5 드로잉-아이어닝

원하는 드로잉비를 실현하고 동시에 원하는 벽두께로 성형하는 공정으로서 최대 드로잉비를 3.5 이상을 얻을 수 있는 장점이 있다.[9] 즉 드로잉 1번의 램(ram) 행정 안에서 아이어닝이 동시에 수행된다. 다이 금형의 높이를 적절하게 조절하여 디프 드로잉된 후 곧바로 아이어닝된다. 그러나 드로잉력은 디프 드로잉 행정 끝으로 진행될수록 점차 감소하기 때문에 아이어닝은 드로잉이 끝나기 전에 수행된다. 따라서 전체 램 행정은 짧아진다. 이때 아이어닝은 다이와 펀치의 간격을 원통 쉘의 벽두께보다 좁게 유지한 상태로 펀치로 밀어냄으로써 벽의 두께를 감소시키는 공정으로 펀치부와 다이 부의 마찰력 차이의 영향이 특히 중요하다.

## 3. 적용 사례

그림 4는 엔진 폴리 형상의 최종 도면이다. 그림에서와 같이 베어링과 엔진 타이밍 벨트가 결합되기 때문에 주어진 형상치수는 정밀하게 성형되어야 한다. 따라서 엔진 폴리는 5개의 공정으로 나누어져 연속적으로 작업 공정이 이루어진다. 여기서는 1차 드로잉, 2차 역재드로잉, 4차 드로잉-아이어닝 공정만 설명한다.

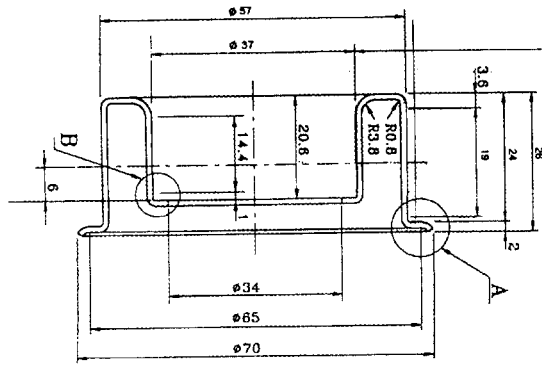


그림 4 엔진 풀리의 형상도면

### 3.1 1차 드로잉

초기 블랭크 직경은 앞서 설명한 식(1)과 같이 최종 성형 형태의 표면적을 계산하여 결정한다. 트리밍 여유와 피어싱을 고려하여 115.2 mm로 구해졌다. 이때 초기 두께는 1.2 mm이며 재질은 냉간 압연 강판 재료로서 KS규격 KSD3512이다. 주어진 물성치는 항복응력, 인장강도 각각 19.2 (Kg/mm<sup>2</sup>), 31.2 (Kg/mm<sup>2</sup>)과 같다. 따라서 성형에 필요한 최대 프레스력은 식(3)에 의해 계산된다.

$$P_{1max} = \pi * d_p * t_0 * \sigma_B * K_1$$

$$= \pi \times (57.6) \times (1.2) \times (31.2) \times (1.1) / 1000$$

$$= 7.45 \text{ (톤)}$$

또한 초기두께와 블랭크의 비를 고려하여 드로잉 비를 표 3를 참조하여 산출한 뒤 블랭크 홀더력은 식(4)를 이용하여 계산한다. 즉 블랭크 홀더력은 다음과 같다.

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

$$= \pi \times (115.2^2 - 57.6^2) \times (19.2 + 31.2) / 4 / 200 / 1000$$

$$= 1.97 \text{ (톤)}$$

이 값으로 BHF는 대략 최대 펀치력의 1/3 내지 1/4 정도 소요됨을 알 수 있다. 경우에 따라서는 BHF 대신에 초기 판두께에 적절한 클리어런스를 부여하여 드로잉 진행과 함께 두께가 두꺼워지는 효과를 이용하여 블랭크를 잡아주는 방법을 사용하기도 한다. 왜냐하면 사용되는 프레스기계의 구조상 BHF에 필요한 구조는 복잡하며 빠른 생산 속도를 요구하는 라인에는 적합하지 않기 때문이다. 이러한 클리어런스를 블랭킹 홀더력 대신 사용하는 방법도 별 무리가 없으나 다만 전 공정인 블랭킹 공정에서 발생한 쇠가시(bur)가 블랭크 홀더부위에서 일정하지 않는 상태로 놓이게 되므로 이로 인한 불량에 예상된다. 즉 쇠가시를 완전히 없애는 공정을 도입하거나 이를 진행방향으로 자연히 소거

시키는 형태의 금형 형상 수정이 요구된다. 한편 판의 초기 두께에 대한 블랭크의 직경비가 1.0%이므로 표 3를 참조함으로써 드로잉 비는 대략 0.50이다. 즉 직경 115.2 mm로 1차 드로잉이 가능한 비율로서는 57.6 mm로 성형하여도 별 무리가 없다. 그림 5는 1차 드로잉 성형 단면을 보여준다.

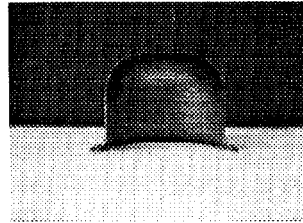


그림 5 엔진 풀리의 1차 드로잉 후의 성형 형상

### 3.2 2차 역재드로잉

첫번째 드로잉의 후공정으로 성형품의 안팎이 바뀌는 공정으로 다음 공정은 물론 마지막 최종 성형품의 치수와 형상에 지대한 영향을 끼치는 중요한 공정이다. 특히 엔진 풀리의 수명과도 직결되는 부위가 이 공정으로 성형되기 때문에 정밀 드로잉에 매우 신중을 기해야 한다. 먼저 역드로잉 공정현상을 분석하면 1차 드로잉 공정 시 생성된 펀치 저부가 떠있는 상태에서 2차 재역드로잉 공정이 시작될 경우 굽힘과 팽을 받는 부분이 자유단 상태에서 하부 펀치부로 이동하게 되고 이때 잔류응력은 벽 외측에는 인장, 내측에는 압축을 받게 되어 결국 주름을 발생시킨다. 이러한 불량은 차후의 다음 공정과 조합되어 여러 가지 형태의 치수불량을 야기시키는 원인이 된다. 따라서 자유단 변형에 저항을 부가하는 방법으로 유압을 채워 성형을 유도하는 것으로서 이는 응력 집중으로 인한 주름을 전체 성형부로 분산시키고 성형 두께를 보다 균일하게 할 수 있다. 이때 부가되는 유압은 블랭크 홀더력을 참고하여 계산되며 금형과 제품간의 흠착을 방지하는 공기구멍(air vent)를 이용하는 것이 바람직하다. 그림 6은 2차 역재드로잉 공정후의 성형형상을 보여준다.

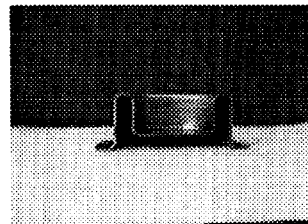


그림 6 엔진 풀리의 2차 역재드로잉 후의 성형 형상

### 3.3 4차 드로잉-아이어닝

형상치수, 내경, 외경치수 및 각 코너부의 반경 등의

치수를 최종 결정하는 공정으로 벽두께를 정밀 성형하는 공정이다. 엔진 폴리 운전 특성상 코너부의 형상이 정밀 가공되어야 하나 두께가 얇아지는 불량 발생이 쉬우므로 이러한 불량은 드로잉-아이어닝 공정 및 금형 형상을 최적 설계하여 원인을 제거하여야 한다. 그림 7은 엔진폴리의 4차 드로잉-아이어닝 공정 후의 성형 형상이다. 2차 역재드로잉 공정에서 성형된 부위가 드로잉-아이어닝공정에서 정밀 성형되어지도록 요구하고 있다. 이때 코너부는 두께가 강제로 매우 얇아지는 현상이 발생되며 이로 인하여 폴리의 수명에 결정적인 불량이 된다. 실제로 많은 제품이 실차에 장착되어 운행될 때 이 부위가 파괴되는 클레임이 발생되고 있다. 따라서 금형 형상을 수정하여 아이어닝 효과를 이용하여 강제로 코너부가 얇아지는 현상을 방지하도록 하였다.

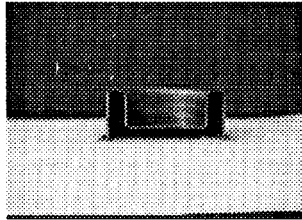


그림 7 엔진폴리의 4차 D&I 공정 후의 성형 형상

#### 4. 결 론

이상과 같이 본 연구에서는 자동차 엔진의 타이밍 벨트와 축 베어링이 부착되는 엔진 폴리의 최종 형상도면으로부터 성형에 필요한 설계 기준과 이를 바탕으로 5개의 연속적인 공정을 설계하였다. 즉 1차 드로잉, 2차 역재드로잉, 3차 트리밍, 4차 드로잉-아이어닝, 5차 피어싱의 공정이 설계되었다. 그러나 각 공정이 자동화 및 무인화가 이루어져 있지 않은 관계로 공정 진행 및 관리상 정밀 드로잉 성형에 영향을 미치는 여러 가지 불량이 발생될 소지가 많다. 특히 내경 코너부 크랙(crack) 발생, 내경 진원도 불량, 외경부 터짐 불량, 전장길이 치수불량, 플랜지부 형상불량, 찍힘 및 굽힘 불량, 내경깊이 치수불량, 내경 굽힘 발생 및 플랜지부 크랙 발생등과 같은 불량은 어느 한 공정에 의한 불량도 있지만 대부분은 여러 공정에 걸쳐 복합적으로 발생하는 경우가 많다. 따라서 이에 대한 대책 또한 근본적인 원인 규명보다는 작업자의 숙련도와 작업 환경(프레스기계, 금형 표준화)에 의존하는 경향이 많다. 이러한 원인은 공정별 불량의 원인을 분석 한 다음 전체적인 불량을 소거하는 작업 또한 이들 공정과 금형의 형상이 일체화 또는 복합 금형 타입으로의 전환이 필요하다. 즉 1차 드로잉과 2차 역재드로잉을 합하여 하나의 복합 공정/금형으로 수행하고 치수 불량의 대부분이 발생하는 4차 드로잉-아이어닝공

정은 두 개의 공정으로 나누어 진행하는 것이 보다 바람직하다고 판단된다. 끝으로 본 연구의 결과를 적극 활용하여 일체식 유압 복동 프레스 또는 복합 공정의 금형 설계 기술로의 전환 그리고 보다 심도 있는 기초 연구를 위한 사용되는 재료의 압연이력 및 재질의 조성 과 같은 재료 물성에 대한 연구에 대한 연구가 향후 계속 필요하다고 하겠다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 신보성, 최두선, 김동진, 김병민, 한규택, 신영우, "다단 벽두께 원통웰 성형 공정 설계에 관한 연구", 한국정밀 공학회 추계학술대회 논문집, pp. 943-948, 1996
- [2] 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
- [3] 양동렬, 허훈, 김용환, "박판 성형 기술의 진보", 한국소성가공학회, pp.11-23, 1994
- [4] 박승언 외, "프레스 가공 데이터 북", 기전연구사, pp.187-228, 1993
- [5] 전기찬, "박판 금속의 성형", 반도출판사, pp.117-124, 1993
- [6] R.Hill, "Mathematical theory of Plasticity", Oxford Univ. Press, pp.297, 1950
- [7] R.L.Whiteley, Trans.ASM, 52, pp.154, 1960
- [8] Lange, "Handbook of Metal Forming", Mc Graw-Hill Co., pp.20.27-20.28, 1985
- [9] B.Avitzur, "Handbook of Metal Forming Processes", John Wiley & Sons Inc., pp.527-579, 1983