

# 금속판재의 성형한계 및 디프드로잉 성형성의 실험적 평가에 관한 연구

## A Study on the Experimental Evaluation of the Forming Limit and Deep-Drawability of Sheet Metals

임재규\*      이상호\*      김형중\*\*  
Rim, Jae-Kyu      Lee, Sang-Ho      Kim, Hyung-Jong

### Abstract

The mechanical properties including forming limit and deep-drawability of commercially-used sheet metals were experimentally estimated in this study. Uniaxial tensile test to obtain basic mechanical properties was carried out, followed by limiting dome height (LDH) test and forming limit diagram (FLD) test to quantitatively evaluate the sheet-formability. Deep drawing and reverse drawing tests were also performed to find out the critical values of the blank holding force and the gap between the die and the blank holder which enabled the deep drawing and reverse drawing of a successful cup without any wrinkle or fracture. The thickness of the cup wall along the rolling-, transverse- and 45° -directions was measured and compared with one another. And the punch force-stroke curve and the critical punch force expected from the theory coincided with the experimental result very well for mild steel while not for aluminium alloy.

키워드 : 성형한계, 디프드로잉 성형성, 한계돔높이 시험, 성형한계도, 역드로잉

Keywords : *forming limit, deep-drawability, limiting dome height test, forming limit diagram, reverse drawing*

### 1. 서론

판재의 성형성은 재료가 네킹이나 파단이 없이 원하는 형상으로 가공될 수 있는 능력, 또는 재료가 상대적으로 소성변형하기 쉬운 정도를 말한다. 판재의 성형 능력은 소재 자체의 탄성과 소성, 성형성, 이방성 등 기계적 성질뿐만 아니라 재료 두께의 불균일, 금형 각부의 조합, 표면상태 및 윤활, 성형속도 등에 복잡하게 관련되어 있으므로 정확한 예측은 매우 어려운 것으로 인식되고 있다. 성형성을 평가하기 위한 기술은 원형격자해석법(circle grid analysis; CGA)과 함께 성형한계선(forming limit curve; FLC)의 개념이 Keeler[1], Goodwin[2]에 의해 도입되면서

부터 본격적으로 발전하기 시작하였다. Hecker[3]는 성형한계선을 도출하기 위하여 원형격자를 인쇄한 시편에 반구형 펀치로 국부 네킹 또는 파단이 발생할 때까지 신장성형(stretch-forming)하여, 그 근방의 변형된 원으로부터 측정된 한계변형률을 주변형률-부변형률 좌표평면, 즉 성형한계도(forming limit diagram; FLD) 상에 표시하는 방법을 고안하였다. Raghavan 등[4]은 표준 성형한계선을 이용하여 재료 별로 축적된 데이터로부터 간단히 성형한계도를 도출하는 방법을 제안하였다. Ghosh[5]와 Ayres 등[6]에 의하여 재료의 신장과 어느 정도의 드로잉 변형을 포함하는 한계돔높이(limiting dome height; LDH) 시험법으로 발전되었다. 최근에는 변형률 측정과 성형한계도 작성을 정확하고 신속하게 처리할 수 있는 컴퓨터 비전 기술이 연구·개발되어 각종 판재성형 실험에 응용되기 시작하였다[7,8].

\*강원대학교 대학원 기계·메카트로닉스공학과 박사과정  
\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스공학부 부교수

본 연구에서는 판재 제품의 대표적 성형법인 디프드로잉 가공에 대하여, 공정변수 변화에 따른 각종 금속재료의 성형성을 평가하는 실험을 수행함으로써, 제품 개발 및 생산을 위한 금형설계·공정설계 과정에 응용할 수 있는 효과적이고 체계적인 실험법을 제시하고자 하였다. 우선, 한계돔높이 시험과 성형한계도 시험을 통하여 성형성을 평가하였으며, 디프드로잉 및 역드로잉(reverse drawing) 공정에서 소재에 파단이나 주름이 발생하지 않는 공정조건을 찾아 재료의 디프드로잉 성형 특성을 분석하기 위한 체계적인 반복실험을 수행하였다.

## 2. 실험 결과 및 고찰

### 2.1 실험 재료

상용되고 있는 여러 가지 금속판재의 기본적인 성형성을 평가하기 위하여 인장 시험, 한계돔높이 시험, 성형한계도 시험을 수행하였다. 또한, 디프드로잉-역드로잉 연속공정으로 원형 컵을 성공적으로 성형할 수 있는 임계조건을 구하기 위하여 반복 실험을 통한 성형성 분석을 실시하였다. 실험에 사용된 모든 재료의 종류와 제작 회사 및 초기 두께는 Table 1과 같다.

### 2.2 인장 시험

인장 시험에서는 성형성 시험에 사용된 금속판재의 진응력-진변형률 곡선 및 항복응력 Y, 강도계수 K, 변형경화지수 n과 이방성계수 R을 구하고자 하였다. 인장시험편은 압연방향으로부터 0°, 45°, 90° 방향으로 각 3장의 시편을 KS B 0801 13B호 규격으로 채취하였다. 만능시험기(universal testing machine; UTM)의 크로스헤드 속도는 20 mm/min으로 일정하게 유지하였으며, 용량 10 ton의 하중계(load cell)와 표점거리 50 mm의 신율계(extensometer)를 통하여 PC로 입력되는 하중-변위 데이터를 진응력-진변형

Table 1 List of the materials used

Material	Feature	Manufacturer (Country)	Thick. (mm)
Al 6016-T4	Aluminium alloy	Hoogovens (Netherlands)	1.15
DDQ	Mild steel (deep drawing quality)	Thyssen Krupp Stahl (Germany)	0.98
DP600 ZE	Dual phase steel	Thyssen Krupp Stahl (Germany)	1.02
SPC3	Mild steel	POSCO (Korea)	0.70
SHCP	High strength steel	POSCO (Korea)	1.40

률 곡선으로 변환한 다음 주요 물성치를 구하였다. Table 2~6은 각 재료의 주요 물성치를 정리한 표이다. 표에 표시된 종탄성계수(E)는 재료별로 통상적으로 쓰이고 있는 값을 인용한 것이며, 항복응력(Y)은 이 기울기를 변형률 축으로 0.2 %만큼 오프셋(offset)하여 진응력-진변형률 곡선과 만나는 점의 응력 값으로 표시한 내력(proof stress)을 나타낸다. 강도계수(K)와 변형경화지수(n)는 최소자승오차법(least-square error method)을 이용하여 진응력-진변형률 곡선을  $\sigma = K\epsilon^n$  형태로 곡선근사(curve fitting)한 결과이다. Y, K 및 n의 평균값은 같은 변형률에 해당하는 각 방향의 응력 값을 식 (1)과 같이 평균하여 곡선근사함으로써 구한 것이다.

$$\sigma_{avg} = \frac{\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}}{4} \quad (1)$$

Table 2 Material properties of Al 6016-T4

	E(GPa)	Y(MPa)	K(MPa)	n	R
0°	69	47.8	336	0.342	0.822
45°	69	88.2	345	0.267	0.357
90°	69	73.4	337	0.287	0.585
Average	69	73.9	341	0.289	0.530

Table 3 Material properties of DDQ

	E(GPa)	Y(MPa)	K(MPa)	n	R
0°	200	152	501	0.222	1.70
45°	200	163	490	0.204	1.17
90°	200	162	492	0.208	1.67
Average	200	157	494	0.211	1.43

Table 4 Material properties of DP600 ZE

	E(GPa)	Y(MPa)	K(MPa)	n	R
0°	200	307	965	0.206	0.65
45°	200	318	964	0.203	0.66
90°	200	319	1014	0.204	0.85
Average	200	309	989	0.208	0.71

Table 5 Material properties of SPC3

	E(GPa)	Y(MPa)	K(MPa)	n	R
0°	200	60.7	423	0.332	2.02
45°	200	91.6	454	0.284	1.56
90°	200	67.1	404	0.323	2.34
Average	200	75.4	434	0.306	1.87

Table 6 Material properties of SHCP

	E(GPa)	Y(MPa)	K(MPa)	n	R
0°	200	232	554	0.180	0.96
45°	200	228	550	0.173	0.78
90°	200	256	558	0.163	1.19
Average	200	235	553	0.172	0.92

이방성계수 R값은 연신을 15 %까지 인장한 후, 시편에 인쇄된 격자들의 변형된 길이와 폭을 20배율의 윤곽투영기로 측정하여 구한 것이며, 그 평균값은 식 (1)과 동일한 방법으로 계산하였다.

### 2.3 한계돔높이 시험

Fig. 1은 한계돔높이 시험에 사용된 금형 세트의 형상과 주요 치수를 나타냈으며, 이는 NUMISHEET '96[9] 벤치마크 모델에서 제시한 금형과 동일한 것이다. 시편은 Al 6016-T4, DDQ, DP600 ZE, SPC3 및 SHCP 판재로부터 길이(압연방향) 180 mm, 폭 100 mm의 규격으로 채취하였다. 단, SPC3 소재는 길이를 압연방향에 직각방향(90° 방향)으로도 채취하였다. 한계돔높이 실험은 용량 100 ton의 유압식 프레스에서 실시하였다. 펀치는 프레스의 크로스헤드에 고정되며, 블랭크홀더와 다이는 프레스 베드 위에 놓인 다이 프레임의 상판과 중간판에 각각 장착되는 구조로 되어있다. 블랭크홀더 지지력은 다이 프레임의 하판에 고정된 50 ton 유압 실린더로 가하였다. 알루미늄판은 10 ton, 강판은 20 ton의 블랭크홀더 지지력을 가하여 시편의 주위를 삼각형 단면의 클램핑 비드로 완전 구속하고, 윤활을 하지 않은 상태에서 펀치 이송속도를 1.3 mm/sec로 하여 국부 네킹이 일어날 때까지 성형하였다. 펀치 하중이 증가하다가 갑자기 감소하는 순간 네킹이 발생한 것으로 간주하여 시험을 종료하고, PC에 입력된 펀치 하중-변위 데이터로부터 한계돔높이를 결정하였다. 그 결과를 Table 7에 나타내었다. 한계돔높이, 즉 성형성은 SPC3, DDQ, SHCP, Al 6016-T4, DP600 ZE 순으로 좋은 것으로 나타났다. Fig. 2는 펀치 행정에 따른 펀치 하중의 변화를 나타낸 것이다. 각 곡선의 끝점에서 펀치 행정이 바로 Table 7의 한계돔높이를 나타낸다.

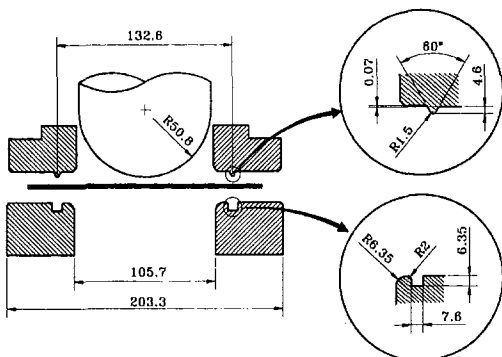


Fig. 1 Geometry and dimensions of the die set used for LDH and FLD tests

Table 7 Results of the limit dome height test

Material	LDH (mm)
Al 6016-T4	24.7
DDQ	31.3
DP600 ZE	24.0
SPC3 (0°)	33.2
SPC3 (90°)	37.4
SHCP	25.5

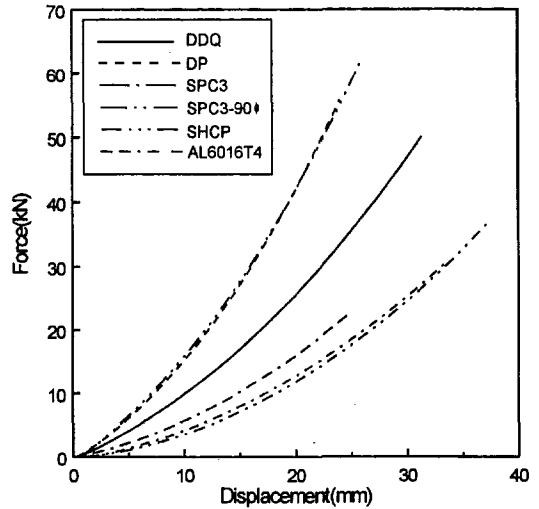


Fig. 2 Punch load-stroke curves in the LDH tests

### 2.4 성형한계도 시험

성형한계도 시험에서도 한계돔높이 시험에서와 같이 NUMISHEET '96 벤치마크 금형과 100 ton의 유압 프레스를 사용하였다. 시험에 사용한 재료는 Al 6016-T4, DDQ, SPC3, SHCP 등이며, Hecker[3]의 방법대로 압연방향으로 길이가 180 mm로 일정하게 하고 폭은 25, 50, 75, 100, 110, 120, 130, 140, 180 mm인 사각형으로 전단하여(폭 180 mm 시편은 2 장씩), 표면에 3×3 mm 정사각형 격자를 실크스크린 법으로 인쇄하였다. 또한, SPC3 재료는 시편의 길이 방향을 압연방향(0° 방향)과 그 직각방향(90° 방향)으로 취한, 두 세트의 시편을 사용하였다.

시험방법은 Al 6016-T4는 10 ton, DDQ, DP600 ZE, SPC3 및 SHCP 강재는 20 ton의 클램핑 하중을 가하여 소재가 유입되지 않도록 구속하였으며, 국부 네킹이 일어날 때까지 펀치에 하중을 가하여 신장 성형하였다. 180 mm 폭의 시편 1 개에 대해서만 우지를 바른 폴리우레탄 수지를 펀치와 소재 사이에 삽입하여 마찰을 극소화함으로써 등이축인장(equi-biaxial tension) 모드의 변형을 유도하였으며, 나머지

시편들은 모두 윤활하지 않은 건마찰(dry friction) 조건에서 실험하였다. Fig. 3은 성형된 시편들의 사진이다. 변형률 측정과 성형한계도 작성에는 스테레오 비전 기술을 이용한 '자동곡면정보분석시스템(ASIAS)'[8]을 사용하였다. 성형된 시편에서 네킹부 또는 파단부 주변의 격자들에 대하여 주변형률과 부변형률을 측정하고, '파단'과 '안전'을 판단하여 재료별로 성형한계도를 작성하였다. Fig. 4는 재료별로 얻은 성형한계선을 비교한 것이다.

## 2.5 디프드로잉 및 역드로잉 시험

### (1) 간극 제어 시험

디프드로잉 시험은 NUMISHEET '99[10] 벤치마크 문제인 '디프드로잉-역드로잉' 공정을 모델로 하였으며, Fig. 5에 금형의 형상과 치수를 나타내었다.

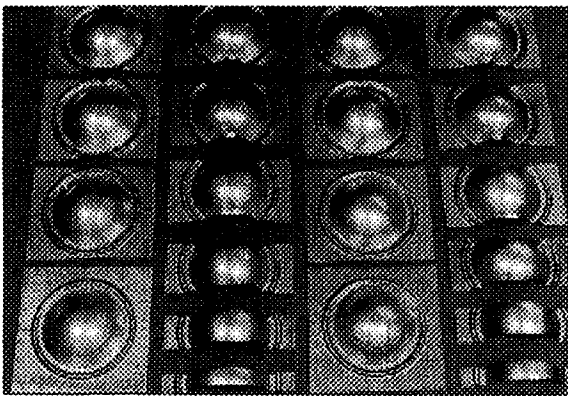


Fig. 3 Stretch-formed specimens with various widths

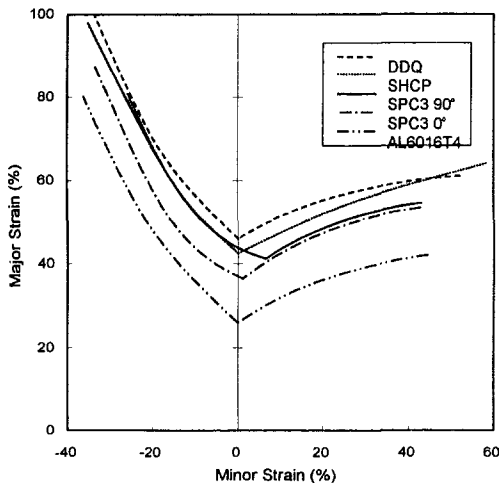
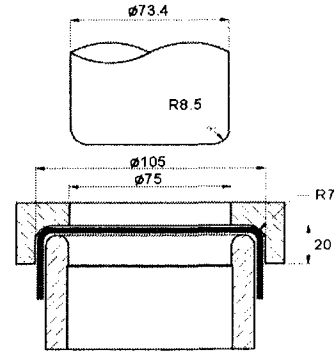
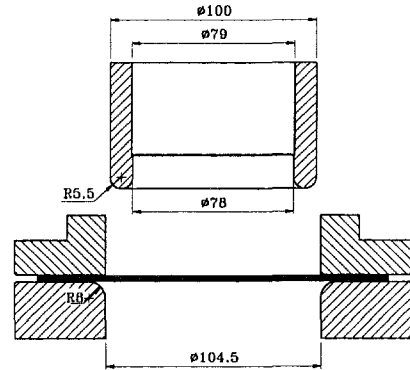


Fig. 4 Comparison of the FLC's for all materials



(b) Reverse drawing



(a) Deep drawing

Fig. 5 Geometry and main dimensions of the die set for the deep drawing and reverse drawing



Fig. 6 Photograph of the deep drawing and reverse drawing specimens

시험에 사용된 소재는 Al 6016-T4, DDQ 및 DP600 ZE이고, 이들 판재를 와이어커팅 방전가공기로 정밀하게 직경 170 mm의 원판으로 가공하고, 컵 두께 측정을 용이하게 하기 위하여 3×3 mm의 정사각형 격자를 소재 양면에 전해부식법으로 인쇄하였다. 성형 전 소재의 양면을 아세톤으로 세정한 후 2 g/m<sup>2</sup> 정도의 윤활제로 윤활하였다. 펀치 하향 속도는 본 장비의 최대속도인 1.3 mm/sec로 고정하였다. Fig. 6은 디프드로잉 및 역드로잉 공정으로 성형된 제품들의 사진이다.

블랭크홀더와 다이 면 사이의 소재 원판 바깥쪽에 철판을 삽입하여 성형 도중 이 간극이 일정하게 유지될 수 있도록 충분한 블랭크홀더 지지력을 가하였다. 두께 0.10 mm의 얇은 철판과 두께 0.015 mm의 알루미늄 포일을 적절히 사용하여 간극을 미세하게 변화시켜가면서 실험을 반복함으로써 주름이 생기지 않는 최대한의 간극을 찾았다. 제2공정 역드로잉 시험은 제1공정 디프드로잉 시험에서 주름이 생기지 않는 시편들에 대하여 같은 방법으로 실시하였다. 이렇게 구한 한계 간극의 크기를 Table 8에 정리하였다.

Fig. 7~12는 디프드로잉 및 역드로잉 시험에서 성형된 컵의 두께 분포를 측정된 결과를 도시한 것이다. 측정 방법은 성형된 컵을 0-180°, 45-225° 및 90-270° 방향으로 절개한 후, 1/100 mm 정도의 포인트 마이크로미터(point micrometer)와 높이측정기(height gage)를 사용하여 컵 바닥으로부터 7 mm 위 지점으로부터 높이를 따라 3 mm 간격으로 측정하였다. 재료에 관계없이 디프드로잉 공정에서는 컵 바닥으로부터 13 mm 정도, 역드로잉 공정에서는 20 mm 정도의 높이에서 최소 두께를 나타내고, 이후 높이가 높아짐에 따라 벽 두께도 점차 증가하고 있다. 또한, Al 6016-T4와 DDQ의 경우 Table 2와 3에 나타난 바와 같이 45° 방향의 R값이 0° 및 90° 방향보다 상당히 작으므로 성형된 컵의 높이가 낮아지는 귀발생(earring) 현상이 뚜렷이 나타나는데, 이로 인하여 두께 분포가 전반적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 DP600 ZE의 경우 R값의 방향에 따른 변화가 작아(Table 4), 귀발생이나 두께 분포의 차이가 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

Table 8 Limit gaps between the die and the blankholder enabling the drawing of cups without wrinkles

Material	Initial Thickness (mm)	Limit Gap (mm)	
		Deep drawing	Reverse drawing
Al 6016-T4	1.15	1.22	1.32
DDQ	0.98	1.03	1.54
DP600 ZE	1.02	1.05	1.08

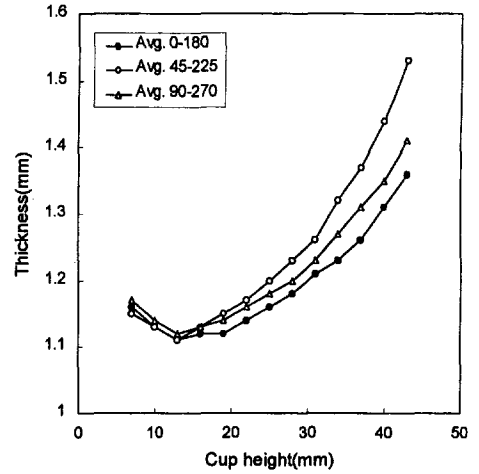


Fig. 7 Thickness of the cup wall after the deep drawing process (Al 6016-T4)

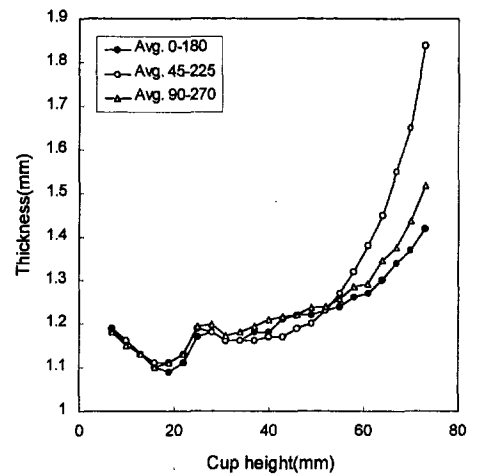


Fig. 8 Thickness of the cup wall after the reverse drawing process (Al 6016-T4)

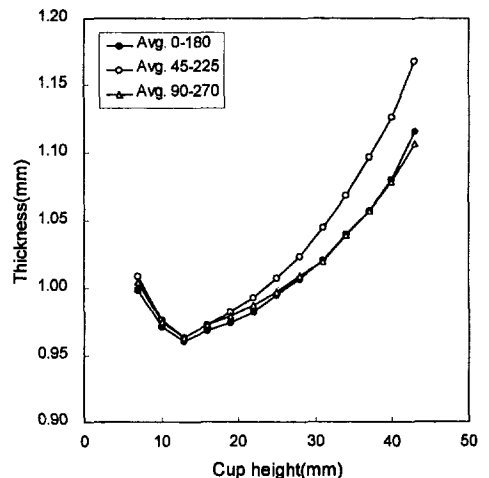


Fig. 9 Thickness of the cup wall after the deep drawing process (DDQ)

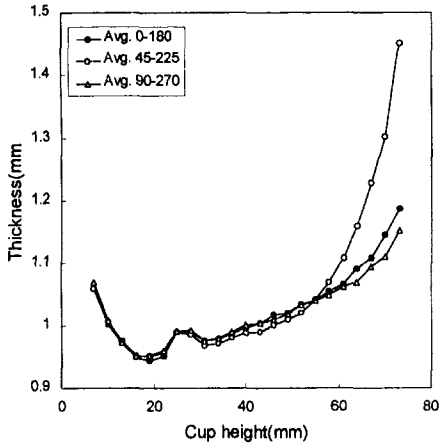


Fig. 10 Thickness of the cup wall after the reverse drawing process (DDQ)

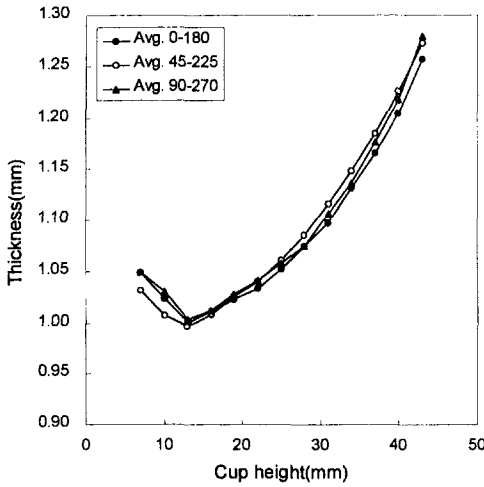


Fig. 11 Thickness of the cup wall after the deep drawing process (DP600 ZE)

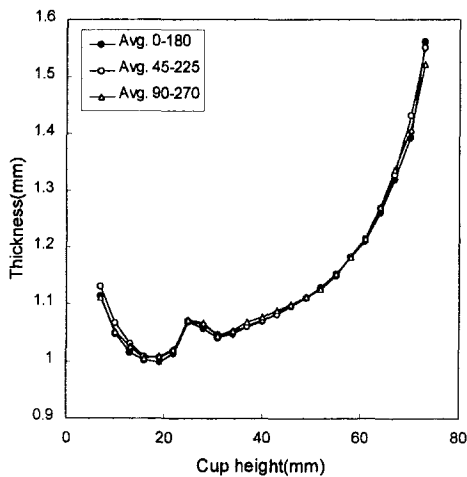


Fig. 12 Thickness of the cup wall after the reverse drawing process (DP600 ZE)

(2) 블랭크홀더 지지력 제어

시험에 사용된 재료는 Al 6016-T4와 SPC3이다. 디프드로잉 공정 중에 블랭크홀더 지지력을 일정하게 유지할 때 파단이 일어나지 않는 최대한계 지지력과 주름이 생기지 않는 최소한계 지지력을 반복 실험으로 구하였다. 그 결과는 Table 9와 같다. 단, 알루미늄의 경우 주름한계를 찾아내는데 실패하여 결과를 얻지 못하였다. SPC3 강의 항복응력이 알루미늄보다 약간 더 크고, 변형경화지수도 더 큰 점을 감안하면 파단한계 시험 결과(Al 17 ton : SPC3 19 ton)가 합리적인 수준인 것으로 판단된다.

파단한계와 주름한계 사이의 블랭크홀더 지지력을 가하면 성공적인 디프드로잉을 수행할 수 있다. 이들 한계값 외에 알루미늄의 경우 10 ton과 13 ton, SPC3 강의 경우 10 ton과 14 ton의 블랭크홀더 지지력을 일정하게 가할 때, 펀치변위에 따른 펀치하중의 변화를 관찰하였다. 펀치하중은 소재의 드로잉에 필요한 힘과 블랭크홀더 지지력에 의한 마찰력을 극복하는데 필요한 힘, 그리고 소재의 반복적인 굽힘과 펴짐에 필요한 힘 등이 복합적으로 작용하여 나타난다. 따라서 블랭크홀더 지지력이 커지면 펀치하중도 커지게 되며, 일반적으로 펀치하중 곡선은 디프드로잉 공정이 시작되면서부터 증가하다가 소재의 가장자리가 다이 속으로 빨려 들어가면서 점차 감소하는, 종 모양의 변화를 나타내게 된다. Fig. 13과 14는 몇 가지 크기의 블랭크홀더 지지력에 대한 펀치하중 곡선의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 표시된 곡선은 식 (2)를 사용하여 이론적으로 예측한 펀치하중 변화 곡선으로[11], 14 ton 이하의 작은 블랭크홀더 지지력을 가한 SPC3 소재의 경우를 제외하고 실험 결과보다 전반적으로 다소 크게 평가되어 있음을 알 수 있다.

$$F = 2\pi r_1 t_0 \cdot \sigma_{rd} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

그러나 실험 오차도 무시할 수 없는 점을 감안하면, 특히 반복적인 실험을 통하여 파단한계나 주름한계를 구하기가 어려운 경우에 근사적인 펀치하중을 예측하는데 충분히 적용할 수 있는 것으로 생각된다.

Table 9 Critical blankholding forces for successful deep drawing

Material	Wrinkling limit (ton)	Fracture limit (ton)
Al 6016-T4	-	17
SPC3	6	19

Fig. 15와 16은 파단한계의 블랭크홀더 지지력(AI 17 ton, SPC3 19 ton)과 파단이 발생하는 블랭크홀더 지지력(AI 18 ton, SPC3 20 ton)에 대한 편치하중 곡선을 다음과 같은 이론적인 파단한계 편치하중 식[11]과 비교한 것이다.

$$F_{\max} = 2\pi r_1 t_0 K m_2^{(1+n)} \left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (3)$$

SPC3 강외의 경우는 블랭크홀더 지지력이 19 ton일 때 최대 편치하중이 7.7 ton 정도로서 이론식으로 구한 파단한계 편치하중 7.5 ton과 상당히 잘 일치하였으나, 알루미늄의 경우는 1.2 ton 정도의 차이를 보였다. 이는 이론식 자체의 근원적인 문제 외에도, 알루미늄 소재가 강 소재보다 연신율과 성형성이 낮아 공정조건의 미세한 차이에 대하여 매우 민감한 결과를 나타내므로 실험오차의 요인이 큰 점에도 원인이 있는 것으로 추정된다.

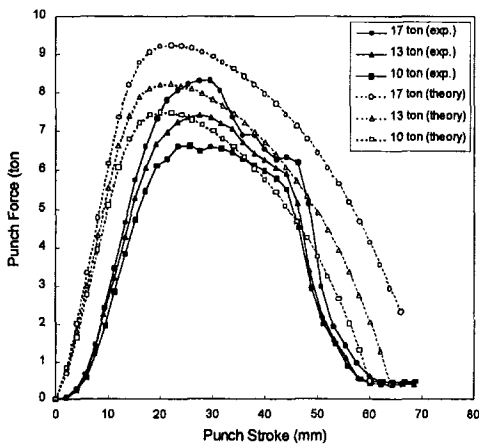


Fig. 13 Comparison of the experimental punch force-stroke curves with theoretical curves (AI 6016-T4)

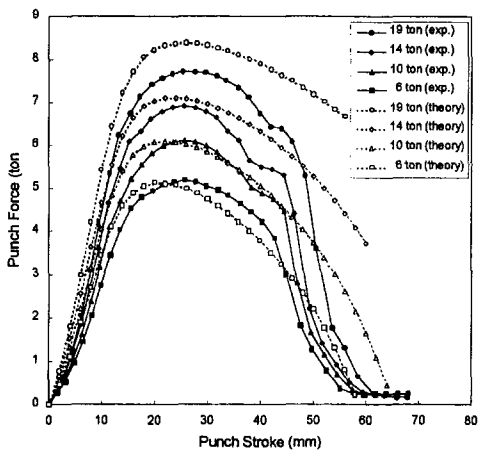


Fig. 14 Comparison of the experimental punch force-stroke curves with theoretical curves (SPC3)

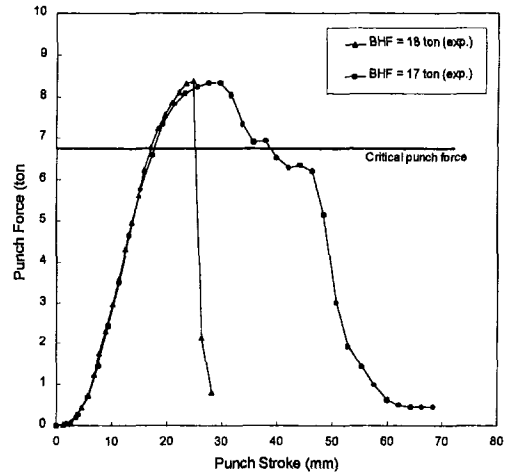


Fig. 15 Comparison of expected critical punch force with experimental result (AI 6016-T4)

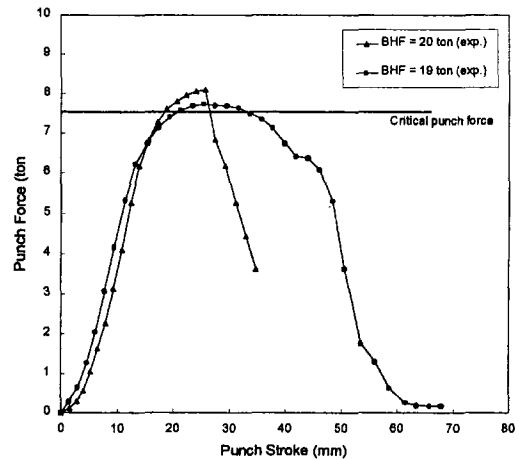


Fig. 16 Comparison of expected critical punch force with experimental result (SPC3)

### 3. 결론

- (1) 각 소재판으로부터 KS B 0801 13B호 규격의 인장시편을 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향으로 채취하고 인장시험을 수행하였다. 컴퓨터로 입력된 데이터로부터 진응력-진변형률 곡선을 구하고, 이를 바탕으로 성형성 평가의 기초자료가 되는 재료의 기계적인 특성들 즉, 종탄성계수(E), 항복강도(Y), 강도계수(K), 가공경화지수(n), 이방성계수(R) 등을 구하였다.
- (2) 180×100 mm의 표준시편을 채취하여 101.6 mm 직경의 편치로 신장성형하면서, 파단이 일어날

때까지의 편치 변위 즉, 한계돔높이(LDH)를 얻었다. DP600 ZE, SHCP 등 고강도 강판이나 알루미늄의 한계돔높이는 25 mm 내외였으나, DDQ, SPC3 등 디프드로잉용 연강의 경우는 모두 30 mm 이상으로 나타나 성형성이 더 좋은 것으로 확인되었다.

(3) 여러 가지 변형 모드를 얻기 위하여 길이는 180 mm로 일정하고, 폭은 25, 50, 75, 100, 110, 120, 130, 140 및 180 mm로 다양한 시편들을 준비하고 표면에 3×3 mm의 정사각형 격자를 인쇄한 후 성형한계도 시험을 실시하였다. 자동곡면정보분석시스템을 이용하여 주변형률과 부변형률을 측정하고 '파단'과 '안전'을 판단하여 각 재료에 대한 성형한계도를 작성·비교하였다. DDQ, SHCP, SPC3, Al 6016-T4의 순으로 성형성이 좋은 것으로 나타났다.

(4) 재료에 관계없이 디프드로잉 공정에서 컵바닥으로부터 13 mm 정도, 역드로잉 공정에서는 20 mm 정도의 높이에서 최소 두께를 나타내고, 이후 높이에 따라 벽 두께도 점점 두꺼워지는 것으로 나타났다. 또한, Al 6016-T4와 DDQ의 경우 45° 방향의 R값이 다른 방향에 비하여 상당히 작아 두께 분포가 전반적으로 크게 나타났으나, DP600 ZE의 경우에는 이러한 평면이방성이 거의 없어, 귀발생이나 두께 분포의 차이가 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

(5) 디프드로잉 공정에서 블랭크홀더 지지력을 일정하게 유지할 때 파단이 일어나지 않는 최대한계 지지력과 주름이 생기지 않는 최소한계 지지력을 반복 실험을 통하여 구하였다. 파단한계 편치하중을 예측하는 이론식은 강 재료의 경우 실험 결과와 잘 일치하였으나, 알루미늄 소재의 경우는 공정조건에 대한 민감성 때문에 약간의 차이를 나타냈다. 또한, 편치 변위에 따른 편치 하중의 변화를 예측하는 이론식을 실험값과 비교한 결과, 여러 가지 오차요인을 감안할 때 실제적으로 응용할 수 있을 만큼 정확한 예측치를 주는 것으로 판단된다.

(6) 이상의 여러 가지 실험에서 얻은 결과들은 금속 판재의 성형성 평가 및 예측에 필요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- [1] S. P. Keeler, "Determination of Forming Limits in Automotive Stampings", *SAE Paper*, No. 650535, 1965
- [2] G. M. Goodwin, "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming problems in the Press Shop", *SAE Paper*, No. 680093, 1968
- [3] S. S. Hecker, "Simple Technique for Determining Forming Limited Curve", *Sheet Metal Industries*, Vol. 52, pp. 671-676, 1975
- [4] K. S. Raghavan, R. C. Van Kuren and H. Darlington, "Recent Progress in the Development of Forming Limit Curves for Automotive Sheet Steels," *SAE Paper*, No. 920437, pp. 87-104, 1992
- [5] A. K. Ghosh, "The Effect of Lateral Drawing on Stretch Formability", *Metal Engineering Quarterly*, Vol. 15-7, pp. 53-64, 1975
- [6] R. A. Ayres, et al., "Evaluating the GMR Limiting Dome Height Test as a New Measure of Press Formability Near Plane Strain", *J. of Applied Metal Working*, Vol. 1-1. pp. 73-82, 1979
- [7] J. H. Vogel and D. Lee, "An Automated Two-View Method for Determining Strain Distributions on Deformed Surfaces", *J. of Materials Shaping Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 205-216, 1989
- [8] 한상준, 김영수, 김형종, 오수익, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발", *한국소성가공학회 논문집*, 제7권 제6호, pp. 575-585, 1998
- [9] J. K. Lee, G. L. Kinzel and R. H. Wagoner (Ed.), *Proceedings of the 3rd International Conference NUMISHEET '96*, Dearborn, MI, USA, Sep. 1996, pp. 428-443, 1996
- [10] J. C. Gelin, et al. (Ed.), *Proceedings of the 4th International Conference NUMISHEET '99*, Besançon, France, Sep. 1999
- [11] 김영식, 임성언, 손현성, 한수식, "블랭크 홀더력 제어에 의한 스탬핑 가공성 향상 기술", *한국소성가공학회지*, 제8권 제3호, pp. 269-275, 1999