

프레스 가공성 평가를 위한 반타원체 펀치 장출 시험

이승열* · 김영탁**

(1998년 7월 1일 접수)

Hemi-spheroidal Punch Stretching Test for Evaluating Press Formability

S. Y. Lee and Y. T. Keum

Abstract

Hemi-spheroidal punch stretching test was developed to evaluate the press formability of sheet materials. In the plane strain stretching tests, our specially designed hemi-spheroidal head punch, hemi-cylindrical head punch(RIST type) and hemi-spherical head punch were used. In the experiment, the circular sheet blanks with parallel edge sides are uniformly stretched up to fracture by raising these punches to assure plane strain stretching deformation along the longitudinal direction of the specimens. The press formability was evaluated by limit punch height(LPH) and minor strain measurement around the fracture area. Compared with the hemi-spherical punch and the hemi-cylindrical one, our hemi-spheroidal punch was more useful in the experimental reproduction and reliance for press formability test.

Key Words : Press Formability, Hemi-spheroidal Punch, Plane Strain Stretching Test

1. 서론

일반적으로 프레스 가공중에 판재가 받는 변형은 단축인장, 드로우잉, 장출, 장출플렌지 및 굽힘, 또는 이들의 조합형태로 표현되고, 이러한 변형하에서 재료의 국부네펠이나 파단과 관련한 두께 감소를 유발하는 변형모드는 단축인장, 드로우잉, 평면변형 및 장출변형 모드로 대별된다. 이들 변형모드는 금형과 판재의 접촉정도 및 각각의 표면특성에 의해 결정되고 표면의 부변형률(ϵ_2)의 크기에 의해 구분된다.

판재가 프레스 가공공정하에서 국부네펠이나 파단의 발생

없이 성형될 수 있는 재료의 변형능력으로 평가되는 프레스 가공성은 상기의 변형모드들을 적절히 재현시키는 에릭슨, 컵드로우잉, 굽힘 및 돔장출 시험 등의 다양한 방법에 의해 측정된 시험치와 재료물성과의 상관관계를 도출함으로써 얻어지며 지금까지 널리 이용되고 있다. 특히, 반구돔(돔형) 펀치를 이용한 돔장출 시험에서 구한 판재의 변형한계를 나타내는 성형한계도와 파단시 펀치높이를 나타내는 한계돔높이(Limit Dome Height, LDH)는 해당 판재에 관한 프레스 가공성의 우열과 불량원인 분석 및 규명에 널리 이용되고 있다. 프레스 가공공정에서 발생하는 파단불량의 85%~90% 이상은 부변형률이 $-0.1 < \epsilon_2 <$

* 동부제강(주) 기술연구소

** 한양대학교, CPRC, 기계공학부

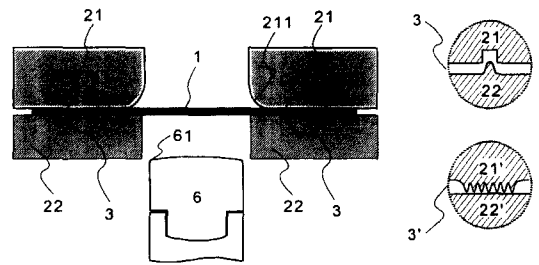
0.2인 평면변형모드($\epsilon_2 = 0$) 근처에서 발생하는 것으로 알려져 있고, 평면변형상태에서 판재의 성형한계를 나타내는 평면변형 장출성형성이 프레스 가공성을 평가함에 있어서 다른 시험방법보다 재현성이 높고 대표성이 있는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 한편, 반실린더두 편치에 의한 평면변형 장출 성형성에 대한 몇몇 연구가 근래 시도되어 프레스 가공성 시험에서 파단시 편치높이로 표현되는 한계 편치높이(Limit Punch Height, LPH)를 평가하고 있으며, 시험의 재현성이 우수하여 현장적용의 단계에 이르렀다^(2,3) 또한, 최근에는 돔형과 실린더형의 중간형태로 편치의 기하학적 형상을 최적화하려는 연구가 시도되어 가공성 평가에 있어서 개선된 성능을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾

본 연구에서는 기존의 돔장출 시험이나 반실린더두 편치에 의한 평면변형 장출시험에 비하여 시험치의 재현성 및 신뢰성이 우수한 프레스 가공성 평가법을 개발할 목적으로 양측면이 절단되고 라운딩된 반타원체두 편치가 특별히 고안되고 제작되었다. 개발된 반타원체두 편치와 기존의 반구두 및 반실린더두 편치에 의한 프레스 가공성의 평가능력을 비교하기 위해 이들 편치들과 9종류의 냉연강판을 대상으로 실시된 평면변형 장출시험에서 측정된 한계편치높이와 파단부위의 부변형률(ϵ_2)의 결과로부터 시험의 건전성과 유용성이 평가되었다.

2. 장치의 개요 및 시험법

본 연구는 자동차, 가전, 금속용기 및 일반산업기에 사용되는 박판재의 프레스 가공성을 평가하기 위한 장치, 평가방법 및 간편한 성형한계도(Forming Limit Diagram, FLD) 작성방법에 관한 것으로, 좀더 상세히는 박판재의 프레스 가공공정에서 발생하는 결함인 국부neck(localized neck) 및 파단중의 대부분을 차지하는 평면변형 모드하에서 성형한계를 나타내는 장출 성형성을 평가하는 것으로 기존의 방법보다 재현성과 정확도가 우수한 평면변형 장출 성형성을 평가하는 장치, 평가방법 및 간편한 성형한계도 작성방법에 관한 것이다.

개발된 시험법은 기존의 돔장출 시험이나 평면변형 장출시험(RIST형)과 유사하지만, 기존의 시험법이 각각 반구두 편치와 반실린더두 편치를 사용하는데 반하여 폭방향으로의 양측면이 절단된 반타원체두 편치를 사용하는 평면변형 장출성 평가방법 및 그 장치임을 특징으로 하고 있다.



1 : blank sheet, 21 : upper die, 211 : die radius, 22 : blankholder
3 : single bead, 3' : multiple bead, 6 : punch, 61 : punch radius

Fig. 1 Tooling Geometry for hemi-spheroidal punch stretching test

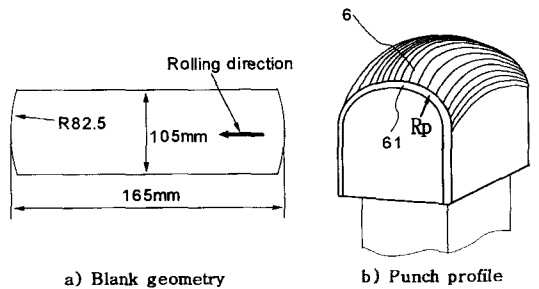


Fig. 2 Blank geometry and punch profile shape for hemi-spheroidal punch stretching test

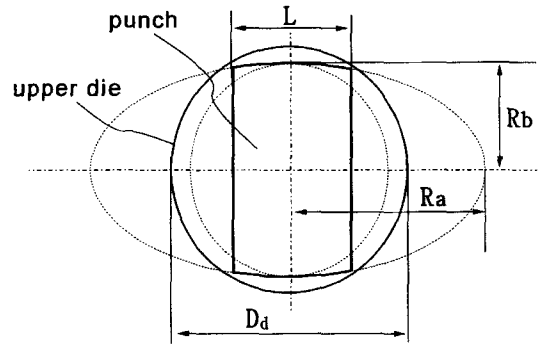
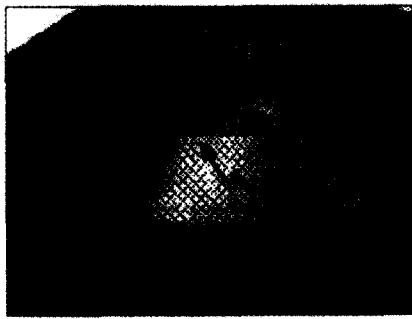
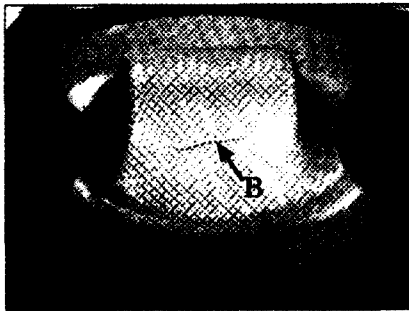


Fig. 3 Definition of tooling geometry for hemi-spheroidal punch stretching test

Fig. 1은 개발된 시험장치의 개략도를 나타낸 것이고, Fig. 2는 본 시험에 사용된 시편의 형상과 편치의 윤곽도를 나타낸 것이며, Fig. 3은 장치의 기하학적 구성을 보여주는 그림이다.



a) Hemi-spherical punch



b) Hemi-cylindrical punch



c) Hemi-spheroidal punch

Fig. 4 Formed sheet shape in the punch stretching operation

개발된 시험방법 및 그 장치를 상기의 Fig. 1과 Fig. 2를 참고로 상세히 설명하면 다음과 같다. 평가하려는 판재는 그림에서 보는 바와 같이 길이(직경)가 고정비드(3 또는 3')의 평균직경보다 길고 폭이 펀치폭보다 크며 고정비드(3 또는 3') 평균직경보다 작은 양측면이 평행하게 절단된 원형 시편(1)으로 가공된다. 이 시편(1)을 고정비드(3 또는 3')가 설정되어 있는 상부다이(21)와 하부다이(22) 사이에 넣고 상부다이(21) 내부로 재료의 유입이 없도록 시편(1)의 원주방향 가장자리를 고정비드(3 또는

3')로 강하게 클램핑하고, 폭방향으로 양측면이 절단된 반타원체두 펀치(6)를 사용하여 시편(1)이 파단될 때까지 장출성형을 행하고 파단될 때의 한계펀치높이와 파단부위의 한계변형률로 평면변형상태에서의 프레스 가공성을 평가한다.

폭방향의 양측면이 절단된 반타원체두 펀치(6)가 상승하면서 장출성형될 때 펀치두 부위 시편의 변형양상을 보면 폭방향으로는 기하학적 구속조건에 의해 변형이 거의 발생하지 않고 길이방향으로만 늘어나는 형태를 갖는다. 펀치(6)가 계속 진행되면서 시편(1)이 변형한계에 이르면 Fig. 4 (c)의 C와 같이 펀치(6)와 시편(1)의 접촉경계 부위지만 펀치극점으로 약간 이동된 지점에서 항상 균일한 파단이 펀치의 폭방향으로 발생한다. 이와 같은 균일한 파단발생은 비접촉 부위에서 발생하는 불균일한 파단보다 한계펀치높이 및 한계변형률의 정확도와 재현성을 향상시키는 요인으로 작용된다. 본 시험에 있어서 프레스 가공성의 평가는 시편이 파단될 때의 펀치높이인 한계펀치높이(LPH)와 파단부위의 변형률인 평면변형 한계변형률(FLD₀)로 결정되며, 이들 값이 클수록 판재의 프레스 가공성이 우수하고 낮을 수록 프레스 가공성이 열위에 있다.

개발된 반타원체두 펀치의 기하학적 구성은 Fig. 3을 참조하여 다음과 같은 수식을 만족하는 형상으로 정의된다. 여기서, L은 펀치폭, Ra는 길이방향의 펀치반경, Rb는 폭방향의 펀치반경, Rp는 펀치 라운드부(61)의 곡률반경, Rdb는 고정비드의 반경, Dd는 상부다이의 내경, t는 시험 가능한 시편두께의 최대값이다.

$$Ra^2 + \left(1 - \frac{Ra^2}{Rb^2}\right) \left(\frac{L}{2}\right)^2 \leq \frac{(Dd - t)^2}{4} \quad (1)$$

$$Ra \leq Rb \leq 10Ra \quad (2)$$

$$Rp = (0.04 \sim 0.16)Ra \quad (3)$$

상기의 수식을 설명하면, 식 (1)은 펀치의 대각선 길이가 다이내경보다 작아야 된다는 조건이고, 식 (2)는 반타원체두의 정의로 Rb = Ra = L일 때는 반구두가 되고 Rb = ∞일 때는 반실린더두가 되는 조건이며, 식 (3)은 펀치폭 양단부의 라운드 곡률을 정의하는 것으로 Rp < 0.04Ra이면 성형시 라운드부에서 파단발생의 우려가 있고 Rp > 0.16Ra이면 성형시 펀치폭 방향으로 재료의 유입이 심하여 2축 장출성을 나타내므로 펀치두 부위에서 평면변형상태를 얻기 곤란하다. 본 연구에 있어서 시편의 형상은 길이(직경)가 고정비드 직경보다 크고, 폭이 고정

비드 반경의 1.82~1.96배인 양측면이 평행하게 절단된 원형이다. 폭이 고정비드 반경의 1.82배 이하일 때는 드로우잉 모드를 나타내고 1.96배 이상일 때는 펀치폭 방향의 측면이 거의 고정되어 2축 장출성을 나타내므로 펀치 두 부위에서 평면변형상태를 얻기 곤란하다.

한편, 본 연구의 반타원체두 펀치에 의한 장출시험에서는 평면변형 성형한계(FLD₀) 값이 기존시험에 의한 성형한계도(FLD)상의 평면변형 성형한계보다 재현성과 정확도가 높다는 장점 때문에 비교적 정도 높고 간편한 성형한계도 작성이 가능하다. 본 방법은 기존의 반구두 펀치에 의한 장출시험으로 부터 주로 생산 또는 가공되는 판재의 강종 및 두께별 성형한계도를 작성하여 데이터베이스를 구축하여 두고, 차후에는 시편을 본 연구의 장치 및 방법을 적용하여 평면변형 성형한계만 구한 후, 데이터베이스로 부터 시험소재와 가장 유사한 강종 및 두께의 성형한계도를 선택하여, 이 곡선을 주변형을 방향으로 평행이동 하면서 성형한계도상의 평면변형 성형한계와 본 연구의 방법으로 측정된 평면변형 성형한계를 일치시키면 새로운 성형한계도가 작성된다. 새로운 성형한계도 작성법은 기존의 시험방법보다 1/5~1/10 정도의 소요시간만으로 산업현장에서 유용한 성형한계도를 제공할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

본 연구에서 개발된 프레스 성형성 평가장치와 기존의 반구두 펀치에 의한 동장출 성형성 평가장치 및 반실린더두 펀치에 의한 평면변형 장출성 평가장치(RIST형)의 축소형을 이용하여 평면변형 장출시험을 행한 다음, 파단발생 부위의 부변형률을 측정하고 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 본 시험에서 사용된 시편은 두께가 1.0mm인 자동차용 고장력 강판(SPF35)으로 동장출 시험에서 평면변형상태를 얻을 수 있도록 폭이 105mm이고 라운드부의 직경이 165mm인 형상으로 절단한 후 한 변이 2mm인 정사각 그리드로 예칭한 것을 사용하였으며, 상부다이는 내경이 84.92mm, 다이의 코너반경이 6.35mm, 다중비드의 평균직경이 110mm인 것을 사용하였다. 본 시험에서는 5종류의 펀치를 사용하였으며, 그 형상은 다음과 같다.

- (1) 반실린더두(A형) : 길이방향 곡률반경 28 mm, 폭방향 곡률반경 ∞, 폭 56 mm, 코너반경 5 mm
- (2) 반실린더두(B형) : 길이방향 곡률반경 28 mm, 폭방

- 향 곡률반경 ∞, 폭 40 mm, 코너반경 5 mm
- (3) 반타원체두(C형) : 길이방향 곡률반경 37.5 mm, 폭방향 곡률반경 75 mm, 폭 40 mm, 코너반경 2 mm
- (4) 반타원체두(D형) : 길이방향 곡률반경 37.5 mm, 폭방향 곡률반경 55 mm, 폭 40 mm, 코너반경 2 mm
- (5) 반구두 펀치 : 길이방향 곡률반경 37.5mm, 폭방향 곡률반경 37.5 mm, 폭 75 mm

Fig. 5에서 보는 바와 같이 반타원체두 펀치를 사용한 시험결과가 다른 것들보다 전반적으로 양호한 평면변형상태를 나타낼 뿐만 아니라 평면변형 성형한계가 동장출시험에서 측정된 성형한계도상의 평면변형 성형한계에 가장 근접하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 본 발명의 실험장치 및 평가방법의 정확도를 보여주는 것이며, 재현성 측면에서도 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 반실린더두 펀치에 의한 성형시험에서 한계변형률의 편차가 큰 것은 Fig. 4 (b)의 B에서 보는 바와 같이 펀치와 소재간의 접촉영역에서 약간 벗어난 비접촉영역에서 파단하는 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다. 다른 8종류의 냉연강판을 대상으로 한 시험에서도 상기와 유사한 경향을 나타내었다.⁽⁵⁻⁶⁾

반타원체두의 펀치(C형)를 사용하여 실시된 평면변형 프레스 성형시험에서 측정된 한계펀치높이(LPH)를

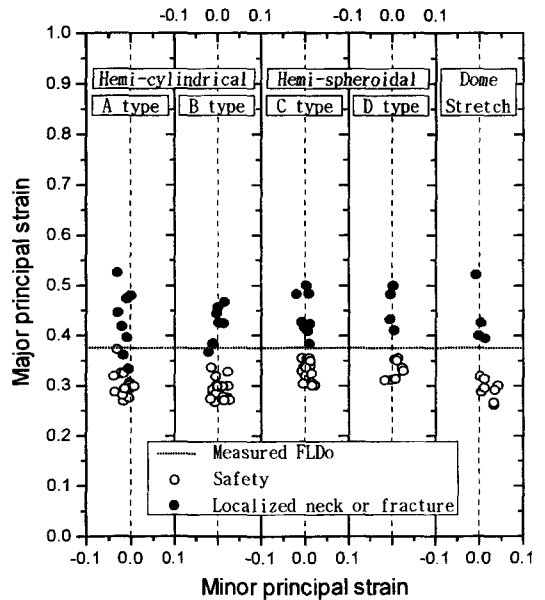


Fig. 5 Comparison of minor principal strains for punch stretching test

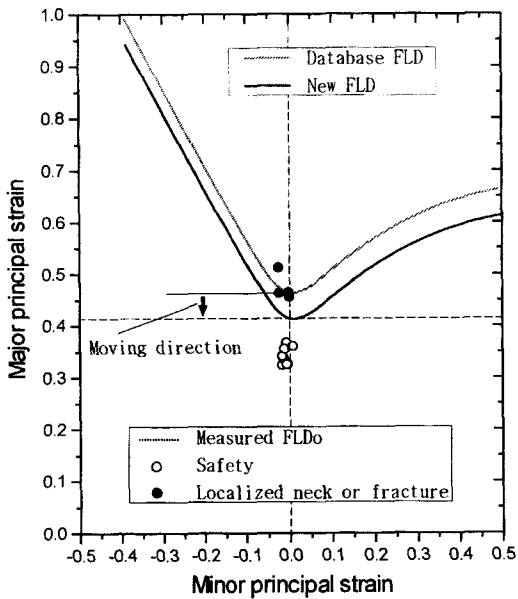


Fig. 6 Simple technique for drawing FLD diagram

Table 1에 나타내었다. 시험편은 강종 및 두께가 다른 9 종류의 냉연강판을 사용하였고, 예칭되지 않은 상태의 것으로 준비되었다. 표에서 보는 바와 같이 측정된 한계펀치 높이로부터 프레스 가공성의 우열을 판단할 수 있는 재질 평가가 가능하다는 것을 알 수 있다. 여기서, 한계펀치높이가 클수록 프레스 가공성이 우수하고 작을수록 열위에 있는 판재이다.

개발된 프레스 가공성 평가장치를 이용하여 신속하고 간편하게 성형한계도(FLD)를 작성하는 방법을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서, 선정된 소재는 일반용 냉연강판(SPCC)이다. 좀더 상세히 설명하면 다음과 같다. 기존의 둥장출성형에 의한 성형한계 시험방법으로 산업현장에서 생산 또는 사용되는 판재의 두께 및 강종별 성형한계도를 작성하여 성형한계 작성용 프로그램의 데이터베이스에 저장해 두고, 시험할 판재와 강종 및 두께가 가장 근접한 성형한계도를 데이터베이스로부터 선택한 후, 본 연구의 장

치에서 측정된 평면변형 성형한계와 선택된 곡선상의 평면변형 성형한계가 일치하도록 수직축으로 선택된 성형한계도를 평행이동시키므로써 신속하고 간편하게 작성된다. 이 방법으로 작성되는 성형한계도는 기존의 방법보다 1/5 ~ 1/10 정도의 소요시간만으로 작성이 가능하며, 비슷한 강종 및 두께를 갖는 판재의 성형한계도의 형상이 일반적으로 매우 유사한 것으로 입증되어 있고, 본 시험법에 의한 평면변형 성형한계는 재현성 및 정확도가 아주 높기 때문에, 새로운 성형한계도 작성방법은 간편할 뿐만 아니라 비교적 정도 높은 성형한계도를 신속하게 얻을 수 있으므로 생산현장에서 적용이 용이하다는 장점이 있다.

4. 결론

본 연구에서 프레스 가공성을 평가할 목적으로 반타원체 두 펀치에 의한 평면변형 장출 시험법을 개발하였으며, 도출된 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 개발된 시험법은 펀치폭 방향의 기하학적 구속조건에 의해 파단부위에 매우 균일한 평면변형상태가 유지되고, 판재와 접촉되는 펀치두부의 전체영역에서도 비교적 양호한 평면변형상태를 얻을 수 있기 때문에 시험결과와의 재현성이 우수하다.

(2) 개발된 장치의 프레스 가공성 평가방법으로 얻은 한계펀치높이는 판재의 재질이나 표면특성의 차이가 어느 정도 있어도 평면변형을 얻을 수 있는 시편폭이 거의 일정하다. 따라서, 시편의 블랭킹과 성형작업을 하나의 복합공정으로 수행할 수 있으므로 시험시간이 아주 짧고 사용이 간편하여 생산현장에서 인장시험을 하는데 소요되는 시간 미만으로 신속하게 프레스 가공성의 우열을 평가할 수 있다.

(3) 본 연구에 의한 성형한계도 작성방법도 기존의 방법과 정도측면에서 큰 차이가 없으면서 기존보다 1/5~1/10 정도의 소요시간만으로 간편하게 성형한계도를 얻을 수 있기 때문에 산업현장에서 유용하게 사용될 수 있다.

Table 1 Comparison of limit punch heights for cold rolled steel sheets

강 종 (두께)	SPCC (0.5t)	SPCC (1.0t)	SPCC (2.3t)	SPCD (0.6t)	SPCD (2.3t)	SPCEN (0.7t)	SPCEN (1.2t)	SPFC (1.0t)	TMBP (0.35t)
LPH(mm)	30.55	31.65	33.90	32.45	33.53	32.45	33.40	28.45	25.47

참고문헌

- (1) Ayres, R. A., Brazir, W. G. and Sajewski, V. F., "Evaluating the GMR Limiting Dome Height Test As a New Measure of Press Formability Near Plane Strain", J. of Applied Metalworking, Vol.1-1, No.1, pp.73~82.
- (2) 김영석, 남재복, 1993, "평면변형 장출실험을 이용한 스탬핑 성형성 평가" 자동차공학회지, 제15권, 제2호, pp.121~129.
- (3) 김영석, 김정철, 최원집, 장래웅, 김기수, 유문현, 1994, "평면변형 장출성형성 평가장치 및 그 방법", 특허공고번호 94-9403.
- (4) Kim, S. Y., Ha, D. H., 1998, "Enhancement of Tool Geometry for a Plane Strain Punch Stretching Test", Metals and Materials, Vol.4, No.4, pp.961~967.
- (5) 이승열, 1997, "냉연강판의 성형한계 평가기술 개발", 동부제강연구보고서.
- (6) 이승열, 김영석, 오상진, 주재현, 이대우, 1997, "프레스 가공성 평가방법 및 그 장치", 특허공개번호 97-73943.