

〈論文〉

평면변형 장출실험기술의 개발

김영석* · 김기수*

(1992년 10월 10일 접수)

Development of Plane Strain Punch Stretching Test

Y.S. Kim and K.S. Kim

Key Words : Stamping Formability(스탬핑성형성), Sheet Material(판재), Plane Strain (평면 변형), Plane Strain Stretching Test (PSST, 평면변형 장출실험), Statistical Quality Assurance(통계적 품질보증), Limit Punch Height(한계펀치높이)

Abstract

A simple simulative test was developed to evaluate stamping formability in plane strain stretching mode. The stamping formability was evaluated by limit punch height(LPH) in plane strain punch stretching test(PSST) compared to limit dome height(LDH) in hemispherical punch stretching test. PSST shows stable plane strain condition and good reproducibility with minimum scatter. Moreover LPH-value in PSST well ranks the stamping formability of various material and correlates with press performance.

1. 서 론

일반적으로 스탬핑공정중에 복잡한 경계조건하에서 판재가 받는 변형은 기본적으로 장출변형, 드로잉변형, 굽힘변형과 장출플랜지변형 혹은 이들의 조합으로 나타나고, 이런 변형하에서 재료의 국부 변이나 파단과 관련한 두께감소를 야기하는 변형모드는 드로잉모드, 평면변형모드, 장출변형모드로 구분된다. 이들 변형모드는 금형과 강판의 접촉정도 및 각각의 표면특성에 의해 결정되고 표면의 부 변형률(ϵ_2)의 크기에 의해 표시된다. 하나의 실험에 의해 판재의 스탬핑성형성(stamping formability), 즉 재료가 스탬핑공정하에서 국부변이나 파단발생없이 성형될 수 있는 재료의 능력을 정확히 평가하는 것은 불가능하고 통상 이들 변형모드를 적절히 재현한 여러 실험방법들-Erichsen 컵

장출실험, Swift 컵드로잉실험, 180° 굽힘변형실험, 101.6mm 직경의 돔장출실험 등-이 재료물성과 성형성과의 상관관계를 규명하는데 널리 이용되고 있다.⁽¹⁾ 특히 플랜지부에서 재료의 유입이 없도록 고정비드를 원주방향에 설치하고 101.6mm 직경의 구형펀치를 이용한 돔장출실험에서 구한 재료의 한계변형률을 나타내는 성형한계선(Forming Limit Curve, 일명 Keeler-Goodwin band, FLC)⁽²⁾과 파단시 펀치높이를 나타내는 한계돔높이(Limit Dome Height, LDH)⁽³⁾는 원형 그리드해석(Circle Grid Analysis, CGA)와 함께 재료의 스탬핑 성형성우열과 스탬핑 공정에서 성형불량 원인분석에 널리 활용되고 있다.

한편 안정화된 스탬핑공정에서 발생하는 파단불량의 85% 이상 대부분은 부변형률이 $-10\% < \epsilon_2 < 20\%$ 인 평면변형모드($\epsilon_2=0$) 근처에서 발생하므로 재료의 평면변형하에서 장출성형성을 평가하는 것은 재료의 일반적인 스탬핑성형성을 평가하는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 평면변형하의 스탬핑성

*정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

형을 평가하기 위해 특수한 형태의 인장시편에 의한 평면변형인장실험에서 크랙주위의 한계변형률⁽⁴⁾과 사각시편의 폭을 변경한 돔장출실험을 통해 평면변형상태에서 파단시 최소 돔높이를 장출성형성의 평가척도로 이용하는 돔장출실험⁽³⁾이 최근 이용되고 있다. 그러나 전자의 경우 시편제작의 번거로움 및 자유변형에서의 성형성평가라는 제약조건을 갖고, 후자의 경우는 제한된 조건에서 스태мп핑설적과 잘 대응하고 있지만 평면변형상태에서의 한계돔높이인 LDH_0 값이 실험조건 - 펀치속도, 시편의 크기 및 표면윤활상태, 펀치 및 다이온도 등의 변화에 화에 매우 민감하고 재현성이 낮으며 특히 최근 차체부식에 대한 대책으로 많이 사용되고 있는 각종 도금강판의 경우에 특성값의 편차가 큰 단점으로 지적되고 있다.

본 연구에서는 특수하게 제작된 펀치형상을 갖는 평면변형장출실험에 의한 스태мп핑성형성 평가기술 (RIST-PSST)^(5,6)의 개요에 대하여 논하고 돔장출실험결과와 비교하여 본 방법의 특징을 검토하였다.

2. 평면변형장출실험의 개요

Fig. 1a, 1b는 평면상태에서 재료의 파단을 잘 재현하는 평면변형장출실험의 개요를 나타낸다. 이 실험에서는 돔펀치장출실험에서와 같이 일정한 폭의 사각시편을 이용하여 시편의 원주방향 가장자리를 상하형 다이에 가공된 고정비드로 강하게 클램핑하여 (Fig. 1a) 다이내부로 재료의 유입을 방지하고 반 실린더형의 말안장형태로 가공된 펀치를 이용하여 장출성형하여 시편표면의 전면에 평면변형

을 유지하면서 재료의 파단시에 한계펀치 높이 (Limit Punch Height, LPH) 및 한계변형률에 의해 재료의 장출성형성을 평가한다. 따라서 한계펀치높이가 높은 판재는 스태мп핑성형성이 좋고 한계펀치높이가 낮은 것은 스태мп핑성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다.

이 실험에 사용하는 말안장형태 펀치의 반경은 35 mm, 길이가 70 mm이고 펀치코너반경은 5 mm로 하였다. 시편의 폭방향을 코일의 압연방향과 일치시킨 사각시편의 길이는 내경이 105.7 mm인 상하다이에 의해 고정비드부에서 완전히 클램핑 되도록 160 mm로 충분히 크게 하고 폭 W 은 펀치길이보다 일정량만큼 크게 하였다. 따라서 펀치상승에 따라 구속상태에 있지 않는 시편폭의 일부가 펀치를 감싸주는 ζ 자 형태로 변형함에 따라 ζ 자의 플렌지부에 의해서 시편의 폭방향변형이 기하학적으로 구속되어 폭방향으로 더이상 재료의 유입 (lateral drawing-in)이 억제되고 시편의 길이방향 변형만이 존재하게 되어 평면변형상태가 얻어진다 (Fig. 1b). 이 평면변형상태에서 시편의 장출을 계속하여 시편이 펀치와 시편의 접촉경계근처에서 파단될 때 한계펀치높이로 평면변형모드하에서 재료의 스태мп핑성형성을 평가한다. 본 실험에서는 돔장출실험에서와 같이 시편 폭을 변화시켜 평면변형이 얻어지는 폭을 결정한다. 즉 Fig. 2에 나타낸바와 같이 시편의 폭이 펀치의 길이보다 커질수록 ($W = 117$ mm, 126 mm) 폭방향으로 유입되는 양이 작아져 변형률상태는 부분형률이 음인 드로잉상태에서 부분형률이 영인 평면변형상태로 이동한다. 그러나 시편의 폭이 너무 커서 재료의 폭방향 유입이 없도록 고정비드에 의해 완전히 클램핑되는 경우는

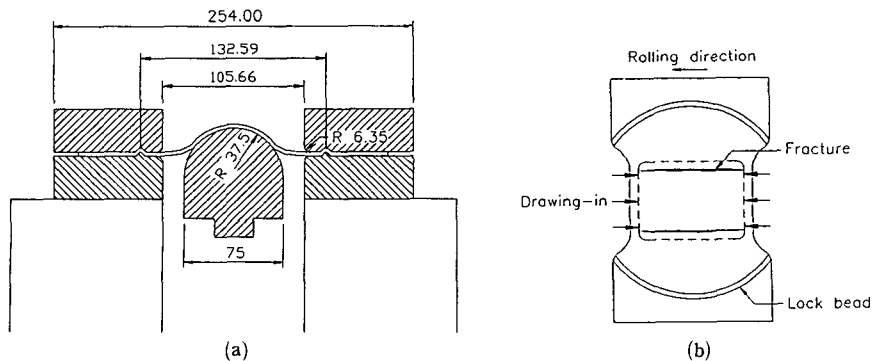


Fig. 1 Overview of plane strain punch stretching test (a) punch and die set (b) tested specimen

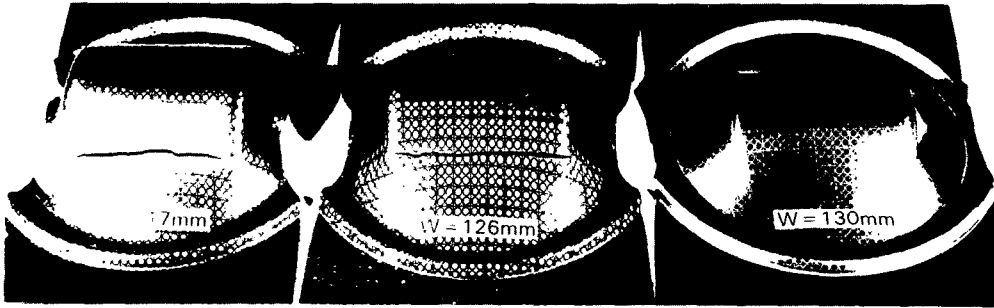


Fig. 2 Series of etched specimen with a varing width after testing

(W=130 mm) 재료가 장출변형모드에서 파단한계까지 변형하지 않고 펀치 코너반경부에서 조기에 파단이 일어나므로 본 방법에 있어서 양의 부 변형률을 갖는 변형모드는 존재하지 않는다고 생각할 수 있다.

3. 평면변형장출 실험결과

Table 1은 본 실험에 사용한 11종의 자동차용

냉연강판과 도금강판의 인장특성을 나타낸다. Fig. 3a, 3b는 본 실험에서 파단까지 장출성형한 후 광학그리드측정장치(optical grid analyzer, OGA)를 이용하여 사각시편의 길이방향으로 측정된 시편폭에 따른 주변형률과 부변형을 분포를 나타낸다. 시편의 폭이 넓어질수록 파단이 발생하는 최대 주변형률 위치는 펀치의 극점에 가까운 곳으로 이동한다. 한편 시편폭이 94 mm로 좁은 경우에는 폭방향 재료유입이 많아져 주변형률이 최대인

Table 1 Mechanical properties of tested materials

Material No.	t (mm)	YS (kg/mm ²)	TS (kg/mm ²)	EI (%)	R 15%	n 12-20%	Remarks
1	0.78	16.0	29.5	46.4	1.87	0.25	DDQ
2	0.88	22.7	32.8	41.0	1.36	0.21	CQ
3	0.82	17.2	28.7	45.2	1.84	0.23	EZF
4	0.78	17.8	29.8	42.0	1.43	0.22	EZN
5	0.75	20.9	36.2	38.8	1.43	0.23	HSLA
6	0.78	14.3	29.8	47.3	1.53	0.26	EDDQ
7	0.80	16.4	28.4	44.3	1.47	0.22	EZF
8	0.71	16.9	30.0	42.7	1.45	0.23	EZF
9	0.82	17.4	29.5	43.3	1.54	0.21	EZF
10	0.85	16.9	29.1	43.8	1.81	0.22	EZN
11	0.65	18.3	31.8	41.2	1.65	0.24	EZN

* Tensile specimen : ASTM E-8 standard, t : thickness,
 CO : Commercial quality, DDQ : Deep drawing quality,
 EDDQ : Extra deep drawing quality,
 EZF : Electro Zn-Fe alloy coated steel sheet,
 EZN : Electro Zn-Ni alloy coated steel sheet,
 HSLA : High strength low alloy steel sheet

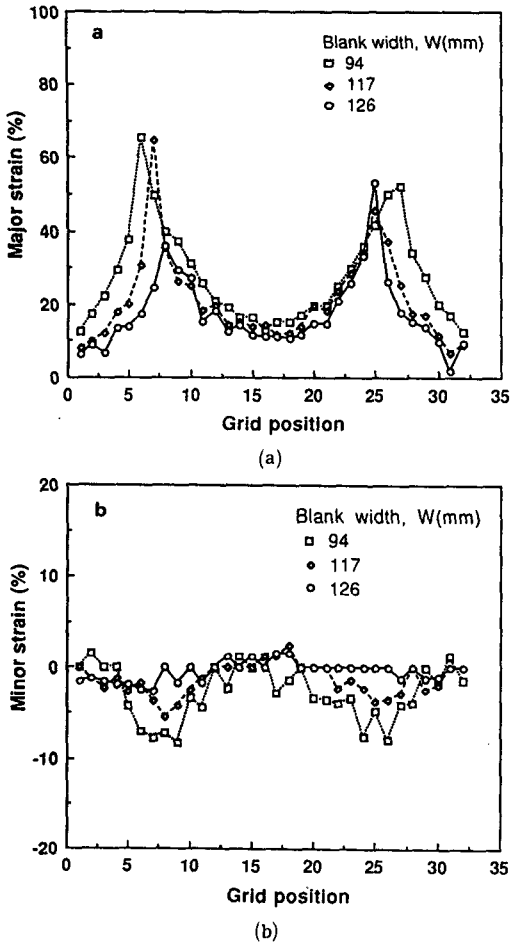


Fig. 3 Strain distributions along longitudinal direction according to blank width (a) major strain (b) minor strain

위치에서 음의 부 변형률이 -8% 정도로 상당한 값을 갖는 반면 시편폭이 126 mm의 경우에는 시편의 전면에서 걸쳐 부 변형률이 거의 영인 상태가 되어 평면변형상태에 있음을 알 수 있다.

본 방법의 경우에는 펀치의 기하학적인 구속조건에 의해 평면변형을 유도하고 있어서 도금강판과 같이 표면파찰상태가 냉연강판의 경우와 크게 상이한 경우에도 시편의 폭이 126 mm에서 평면변형이 확보되는 장점이 있다. 따라서 평면변형장출 실험에서는 시편의 종류에 관계없이 시편의 폭이 126 mm인 경우에 평면변형상태가 확보되고 있고 파단시의 한계펀치높이로 재료의 스탬핑성형성을 평가한다.

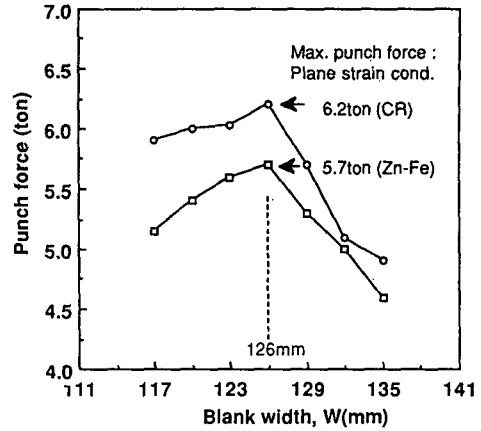


Fig. 4 Effect of blank width on maximum punch force

한편 본 실험에서 갖는 펀치의 기하학적 조건과 시편의 크기는 스텐레스판재의 스탬핑성형성 평가에도 그대로 적용가능하다. 그러나 알루미늄판재의 경우에는 인장특성에서 알 수 있듯이 국일연신후에 국부적 발생없이 파단에 이르기때문에 시편폭이 126 mm의 경우에도 Fig. 2의 우측시편과 같이 펀치 코너반경부에서 조기에 파단이 발생하고 있어서 알루미늄 판재의 성형성평가를 위해서는 펀치 코너 반경부의 곡률반경을 크게하거나 시편의 폭을 126 mm보다 작게 할 필요가 있다.

Fig. 4는 시편의 폭에 따른 판단시의 펀치하중을 나타낸다. 시편폭이 126 mm이 될때까지 펀치하중은 서서히 증가하고 이후는 급격히 떨어지는 특징을 보인다. 이는 시편폭이 126 mm보다 적은 경우에는 폭방향 재료유입이 수반되는 단축인장변형모드에 가까워 이 경우 재료의 유효응력(σ_y)이 평면변형의 경우($1.15\sigma_y$)보다 작기때문이고 또한 폭이 126 mm 보다 큰 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 재료가 충분한 장출성형없이 런치 코너반경부에서 조기에 파단이 발생하기 때문이다.

Fig. 5a, 5b는 평면변형장출실험과 등장출실험에서 각각 평면변형상태를 유지하는 폭이 126 mm의 경우에 시편의 길이방향으로 측정된 주변형률 및 부 변형률분포를 나타낸다. 주 변형률분포는 두 실험의 경우에 큰 차이가 없으나 부 변형률의 경우에는 서로 상이한 결과를 나타내고 있다. 즉 평면변형장출실험의 경우는 시편의 전면에서 걸쳐 평면변형상태가 확보되고 있으나 등장출실험의 경우에는 주

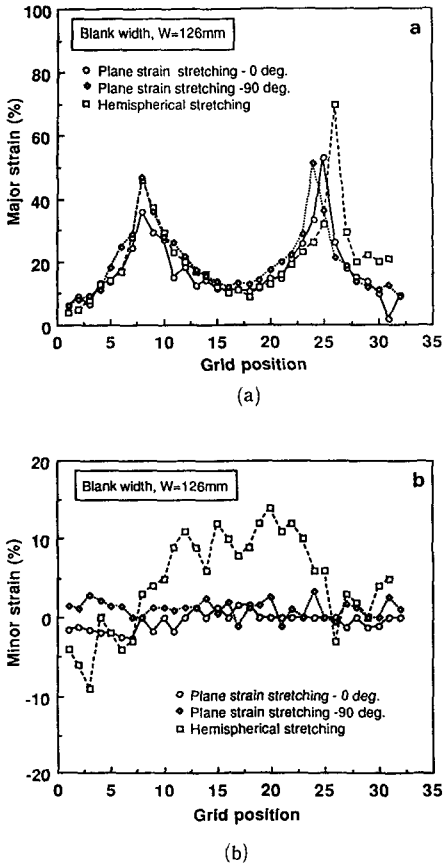


Fig. 5 Comparison of strain distribution between plane strain punch stretching test and hemispherical punch stretching test (a) major strain (b) minor strain

변형률이 최대인 위치에서만 평면변형이 이루어지고 있고 펀치의 극점으로 갈수록 양의 부변형률이 최대 13% 까지 증가한다. 한편 그림에 나타낸 바와 같이 냉간압연된 판재에서 시편의 채취방향에 따른 변형률분포의 영향은 거의 없고 또한 실제 한계펀치높이, LPH는 시편 1의 경우에 압연방향(0° 방향)에서 34.23 mm, 압연방향과 직각방향(90° 방향)에서 33.93 mm로 큰 차이는 보이지 않아 본 평면변형장출실험의 경우에 시편채취방향에 따른 특성값의 차이는 무시가능함을 알 수 있다.

Fig. 6은 시편 전면의 변형률분포를 자동차용강판의 대표적인 성형한계선으로 알려진 Keeler-Goodwin 선도^(7,8)에 나타난 것이다. 변형률분포는 부변형률(E_2)이 거의 영인 평면변형상태에 있음을 알 수 있다. 따라서 평면변형장출실험의 경우가 평

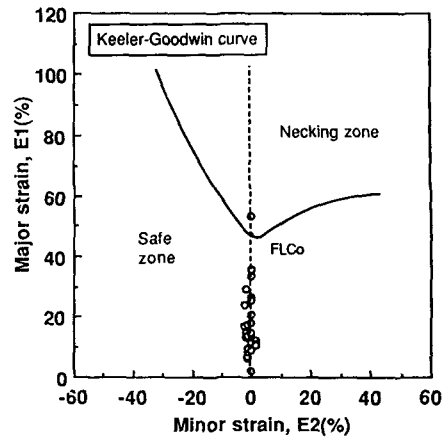


Fig. 6 Comparison of strain distribution and Keeler-Goodwin curve^(7,8)

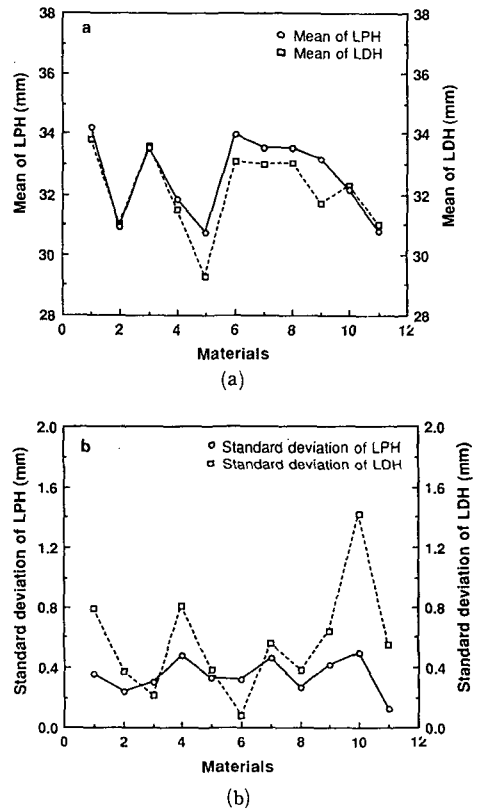


Fig. 7 Comparison of (a) mean value and (b) standard deviation between plane strain punch stretching test and hemispherical punch stretching test

면변형모두하에서 판재의 스템핑성형성을 평가하는데 보다 유익한 수단임을 알 수 있다.

Fig. 7a, 7b는 평면변형장출실험과 돔장출실험에서 5회의 반복성형에서 파단시의 평균펀치높이와 표준편차를 나타낸 것이다. 평균펀치높이의 경우는 두 실험의 경우에 큰 차이를 보이고 있지않으나 표준편차의 경우는 상당한 차이를 보인다. 이는 평면변형장출실험의 경우는 말안장형태에 펀치의 기하학적 구속에 의해 시편의 폭방향변형이 구속되므로 폭방향으로 펀치와 시편의 상대슬립이 거의 없는 반면 시편의 길이 방향으로는 상대슬립이 존재하여 마찰이 시편의 길이방향만으로 균일하게 작용하는 것에 기인한다고 생각된다. 반면 돔장출실험의 경우는 극점을 중심으로 시편의 폭방향과 길이방향 상대슬립이 존재하고 시편의 표면불균일에 의해 양방향 마찰이 시편마다 불균일하게 작용하기 때문으로 생각된다.

Fig. 8은 28개 코일로 부터 채취한 냉연강판 및 표면처리강판에 대해 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이와 1000톤 복동식유압프레스를 활용한 610 mm×530 mm 크기의 대형 사각컵 스템핑결과와의 관계를 나타낸다. 한계펀치높이가 32.5 mm 이하인 판재에서는 스템핑결과 사각컵의 코너벽 부위에서 파단이 발생하였고 그 이상의 값을 갖는 판재에서는 안전하게 성형이 이루어졌다. 따라서 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이는 스템핑실적과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 이 실험이 실제 자동차판넬을 대상으로 한 스템핑실험은 아니지만 평면변형장출실험에 의한 한계펀치 높이는

자동차판넬의 스템핑성형여부의 사전 예측 및 재료의 성형성우열을 가리는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 실험기술은 자동차용 판재제조업체에 있어서 제조소재에 대해 스템핑성형에 관한 통계적 품질보증(statistical quality assurance)수단으로 충분히 활용가능하다.

4. 결 론

평면변형하에서 판재의 장출성형성을 평가할 수 있는 평면변형장출실험기술을 개발하였다. 본 실험에서는 한계펀치높이를 이용하여 스템핑성형성을 평가하고 그 결과는 스템핑실적과 잘 일치하고 있다. 본 실험방법은 종래의 돔장출실험보다 평면변형을 확실하게 확보할 수 있고 또한 실험편차가 적으며 재현성이 좋은 특징이 있다. 따라서 본 실험기술은 스템핑공장 및 판재제조업체에서 스템핑용 소재에 대한 통계적 품질평가 수단으로 활용가능하다

참고문헌

- (1) 김영석, 박기철, 199, 판재성형성평가 및 응용 기술, 산기연 워크숍자료, p. 68~99.
- (2) Hecker, S.S.1973, Simple technique for determining forming limit curve, Sheet Metal Industries, Vol.52, p. 671~676.
- (3) Ayres R.A. et al., 1979, Evaluating the GMR limiting dome height test as a new measure of press formability near plane strain, J. of Applied Metalworking, Vol.1, p. 73~82.
- (4) Sang H. and Nishikawa, Y. 1983, A plane strain tensile apparatus, J. Metals, Bol.35, No.2, p. 30~33.
- (5) 김영석, 김정철, 1992, 평면변형 장출성형성 평가기술, 특허출원
- (6) 김영석, 박기철, 남재복, 1992, "평면변형장출 실험을 이용한 스템핑성형성평가," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, p. 396~400.
- (7) Keeler, S.P. 1965, "Determination of forming limits in automotive stampings," SAE parer, No. 650535.
- (8) Goodwin, G.M. 1968, "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop," SAE paper, No. 680095.

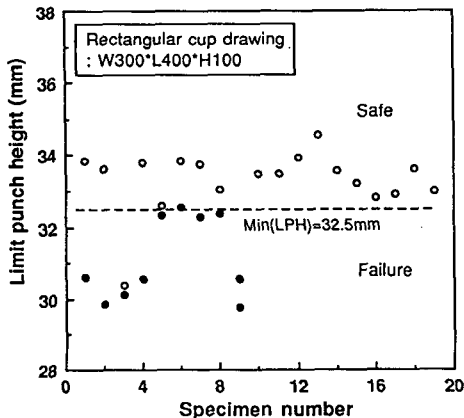


Fig. 8 Correlation of LPH value to press performance of a large size rectangular cup drawing