

평면변형장출실험을 이용한 스탬핑 성형성평가

A Plane Strain Punch Stretching Test for Evaluating Stamping Formability

김 영 석** 남 재 복
Y. S. Kim, J. B. Nam

ABSTRACT

Plane strain punch stretching test (PSST) was developed to evaluate stamping formability of sheet materials. In this test, the rectangular specimen of sheet material is uniformly stretched up to fracture by raising a specially designed punch to certainly assure plane strain stretching deformation along the longitudinal direction of the specimen. The stamping formability was evaluated by limit punch height(LPH) in plane strain punch stretching test compared to limit dome height(LDH) in hemispherical punch stretching test. LPH-value in PSST well ranks the stamping formability of various material and correlates with press performance. Moreover by using ultrasonic thickness gauge the plane strain intercept-limit plane strain(FLCo)-in forming limit curve can be accurately determined from thickness measurement around the fracture area. The FLCo derived from thickness measurement well correlates with the results from circle grid analysis for the deformed circle grid marked on the surface of the specimen.

주요기술용어 : plane strain punch stretching test(평면변형장출실험), stamping formability(스탬핑 성형성), limit punch height(한계편치높이), plane strain intercept(한계평면변형률), ultrasonic thickness gauge(초음파두께측정기)

1. 서 론

일반적으로 스탬핑공정중에 복잡한 경계조건 하에서 판재가 받는 변형은 기본적으로 장출변형, 드로잉변형, 급힘변형과 장출플렌지변형 혹은 이들의 조합으로 나타나고, 이런 변형하에서 재료의 국부넱이나 파단과 관련한 두께감소를

야기하는 변형모드는 드로잉모드, 평면변형모드, 장출변형모드로 구분된다. 이들 변형모드는 급형과 강판의 접촉정도 및 각각의 표면특성에 의해 결정되고 표면의 부변형률(ϵ_2)의 크기에 의해 표시된다. 하나의 실험에 의해 판재의 스탬핑성형성(stamping formability), 즉 재료가 스탬핑공정하에서 국부넱이나 판단발생없이 성형

* 산업과학기술연구소 용접연구센터
** 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

될 수 있는 재료의 변형능력을 정확히 평가하는 것은 불가능하고 통상 이들 변형모드를 적절히 재현한 여러 실험방법들-Erichsen 적장출실험, Swift 컵드로잉실험, 180°굽힘변형실험, 101.6 mm 직경의 둥장출실험 등이 재료물성과 성형성과의 상관관계를 규명하는데 널리 이용되고 있다.¹⁾ 특히 프랜지부에서 재료의 유입이 없도록 고정비드를 원주방향에 설치하고 101.6mm 직경의 돔형편치를 이용한 Hecker의 둥장출실험에서 구한 재료의 한계변형률을 나타내는 성형한계선 (Forming Limit Curve, FLC 일명 Keeler-Goodwin curve)²⁾과 파단시 편치높이를 나타내는 한계돔높이 (Limit Dome Height, LDH)³⁾는 원형그리드해석(Circle Grid Analysis, CGA)와 함께 재료의 스탬핑 성형성우열과 스탬핑공정에서 성형불량 원인분석 및 규명에 널리 활용되고 있다.

둥장출실험에서 구한 성형한계선은 원형그리드가 새겨진 사각시편의 폭과 윤활조건을 변경하여 드로잉모드와 스트레칭모드에서 가능한 모든 변형상태를 재현하고, 각 변형모드하에서 재료의 파단이나 국부neck에 견딜 수 있는 한계변형률을 주변형률과 부변형률의 2차원 좌표상에 나타낸 것이다. 이 FLC를 스탬핑공정에서의 변형률상태와 비교하여 재료의 성형난이도 및 성형불량 원인규명에 활용하고 있다. 한편 대코일마다 FLC를 정확히 도출하기 위해서는 많은 시간과 시편이 소요되고 시편의 파단주위의 변형률을 정확히 측정하여야 하기 때문에 변형된 원형그리드의 정밀 자동측정장치 등이 별도로 필요한 단점이 있다. 그러나 자동차용 강판의 경우는 재료 및 두께가 달라도 FLC는 거의 유사한 형태를 갖고 있으므로 대표적인 형상의 성형한계선(standard FLC)과 평면변형상태에서의 한계평면변형률(FLC₀)을 이용하여 각 강판의 FLC를 도출하는 방법이 이용되고 있다.⁴⁾ 즉 대표 FLC를 주변형률측으로 FLC₀까지 평행 이동하면 강판의 FLC가 얻어진다.

일반적으로 안정화된 스탬핑공정에서 발생하는 파단불량의 85% 이상 대부분은 부변형률이 $-10\% < e_2 < 20\%$ 인 평면변형모드($e_2=0$) 근처에서 발생하므로 재료의 평면변형하에서 재료의

장출성형성을 평가하는 것은 재료의 스탬핑성형성을 평가하는 것으로 간주할 수 있다. 평면변형하에서 재료의 스탬핑성형성을 평가하기 위한 방법으로는 인장시편의 폭/길이 비를 크게 하고 평행부의 가장자리를 특수한 형태로 가공한 인장시편에 의한 평면변형 인장실험에서 크랙주위의 한계변형률^{5,6)}을 구하는 방법과 사각시편의 폭을 변경한 101.6mm 직경의 둥장출실험³⁾과 장출굽힘실험⁷⁾을 통해 평면변형상태에서 파단시 한계돔높이를 장출성형성의 평가척도로 이용하는 방법등이 있다. 그러나 평면변형인장실험의 경우 시편제작의 번거로움 및 시편과 금형의 접촉을 고려하지 않은 자유변형에서의 한계평면 변형률 측정에 의한 성형성평가라는 제약조건을 갖고, 둥장출실험의 경우는 측정이 용이한 한계돔높이에 의한 성형성평가라는 장점이 있고 또한 제한된 조건에서 스탬핑실적과 잘 대응하고 있지만 평면변형상태에서의 한계돔높이인 LDH₀값이 실험조건-편치속도, 시편의 크기 및 표면윤활상태, 편치 및 다이온도 등의 변화에 매우 민감하고 재현성이 낮으며⁸⁾ 특히 최근 차체부식에 대한 대책으로 많이 사용되고 있는 각종 도금강판의 경우에 한계돔높이에 대한 편차가 큰 단점이 지적되고 있다.⁹⁾

본 연구에서는 종래의 둥장출실험과 비교하여 재현성이 높으며 스탬핑실적과 그 결과가 잘 일치하는 평면변형 장출실험기술(RIST-PSST)¹⁰⁾을 소개하고 또한 동 기술에 초음파두께측정기(Ultrasonic Thickness Gauge, UTG)를 응용하여 판재의 한계평면변형률을 도출하는 방법에 대하여 논한다.

2. 평면변형장출실험의 개요

Fig.1a, 1b는 평면변형상태에서 재료의 파단을 잘 재현하는 평면변형장출실험의 개요를 나타낸다. 이 실험에서는 둥장출실험에서와 같이 일정한 폭의 사각시편을 이용하여 시편의 원주방향 가장자리를 상하형 다이에 가공된 고정비드로 강하게 클램핑하여 다이내부로 재료의 유입을 방지하고 반 실린더형의 말안장형태로 가공

된 펀치를 이용하여 장출성형하여 시편표면의 전면에 평면변형을 유지하면서 재료의 파단시에 한계펀치높이(Limit Punch Height, LPH) 또는 파단면 근처에서 측정된 한계평면변형률의 크기에 의해 재료의 성형성에 대한 우열을 평가한다. 따라서 동 실험에서 큰 특성값을 갖는 판재는 스템핑성형성이 좋고 특성값이 낮은 판재는 스템핑성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다.

이 실험에 사용하는 말안장형태 펀치의 반경은 35mm, 길이는 70mm이고 펀치 코너반경은 5mm로 하였다. 시편의 폭방향을 코일의 압연방향과 일치시킨 사각시편의 길이는 내경이 105.7mm인 상하다이에 설정된 원주방향의 고정비드에 의해 완전히 클램핑되도록 충분히 크게 하였고 폭 W은 펀치길이보다 일정량만큼 크게 하

였다. 따라서 펀치상승에 따라서 구속상태에 있지 않는 시편폭의 일부가 유입되어(lateral drawing-in) 점차 펀치를 감싸주는 ㄷ자 형태로 변형함에 따라 ㄷ자의 플렌지부에 의해서 시편의 폭방향변형이 기하학적으로 구속되어 더이상 재료의 폭방향 유입이 억제되고 시편에는 길이 방향으로 장출변형만이 존재하게 되어 평면변형 상태가 얻어진다.(Fig.1b) 이 평면변형 상태에서 시편의 장출을 계속하여 시편이 펀치와 시편의 접촉경계근처에서 파단될 때 한계펀치높이로 평면변형모드하에서 재료의 스템핑성형을 평가한다.

평면변형장출실험에서는 동장출실험에서와 같이 시편 폭을 변화시켜 평면변형이 얻어지는 폭을 결정한다. 즉 Fig.2에 나타낸바와 같이 시편의 폭이 펀치의 길이보다 커질수록 폭방향으

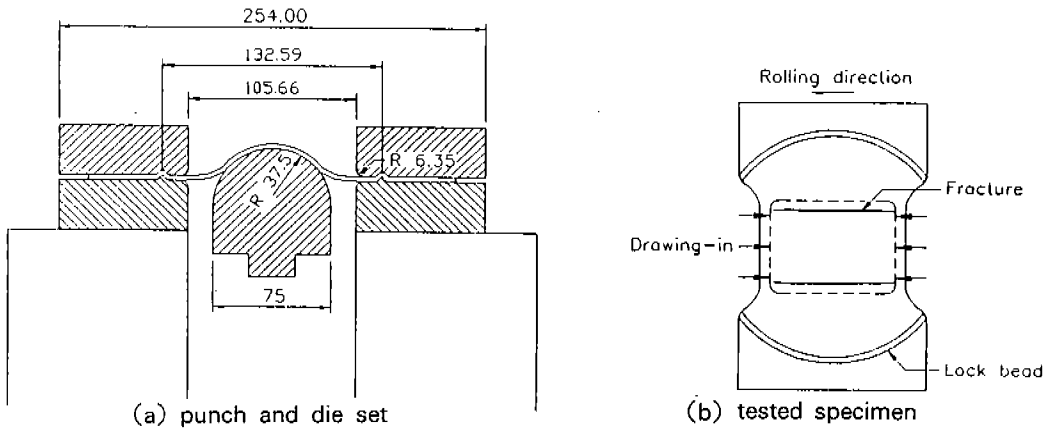


Fig.1 Overview of plane strain punch stretching test

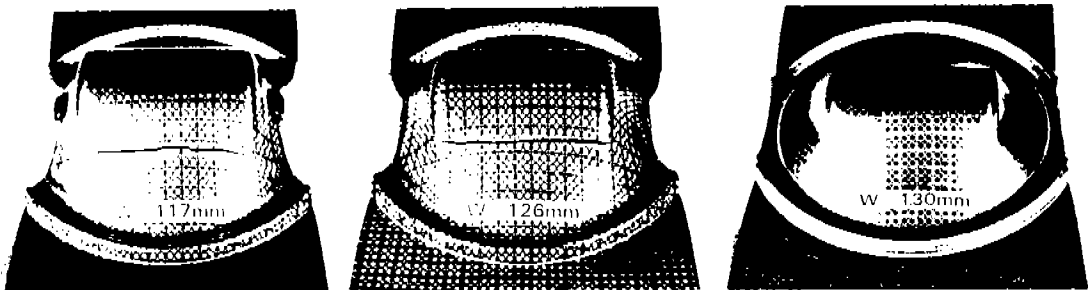


Fig.2 Series of etched specimens with a varying width after testing

로 유입되는 양이 작아져 변형률상태는 부변형률이 음인 드로잉상태($W=117\text{mm}$)에서 부변형률이 영인 평면변형상태($W=126\text{mm}$)로 이동한다. 그러나 시편의 폭이 너무 커서 시편 폭의 일부가 고정비드에 의해 완전히 클램핑되는 경우는 ($W=130\text{mm}$) 재료의 폭방향 유입이 전혀 일어나지 않아 재료가 장출변형모드에서 파단한계까지 변형하지 않고 펀치 코너반경부에서 국부굽힘변형에 의해 조기에 파단이 일어나므로 본 방법에 있어서 양의 부 변형률을 갖는 변형모드는 존재하지 않는다고 생각할 수 있다. 또한 평면변형장출실험에서는 Fig.2에서 알 수 있듯이 단축인장실험에서와는 달리 항상 시편의 길이 방향에 직각방향으로 파단이 발생하고 파단면이 항상 평면상태를 유지하는 특징이 있다.

3. 평면변형장출실험에 의한 스탬핑 성형성평가

Table 1은 본 실험에 사용한 자동차용 냉연강

판, 304계 스테인레스강판 과 5000계열의 알루미늄 판재의 인장특성 및 CGA에 의한 한계평면변형률 측정결과를 나타낸다. Fig.3a, 3b는 평면변형장출실험에서 파단까지 장출성형한 후 광학그리드측정장치(Optical Grid Analyzer, OGA)를 이용하여 사각시편의 길이방향으로 측정된 시편폭에 따른 주변형률과 부변형률 분포를 나타낸다. 시편의 폭이 넓어질수록 파단이 발생하는 최대 주변형률 위치는 그리드 위치의 중앙에 해당하는 펀치의 극점에 가까운 곳으로 이동한다. 한편 시편폭이 94mm로 좁은 경우에는 폭방향 재료유입이 많아져 최대 주변형률 위치에서 음의 부 변형률이 -8% 정도로 상당한 값을 갖는 반면 시편폭이 126mm의 경우에는 시편의 전면에 걸쳐 부변형률이 거의 영인 상태가 되어 평면변형상태에 있음을 알 수 있다.

평면변형장출실험의 경우에는 Fig.1에서와 같이 펀치의 기하학적인 구속조건에 의해 평면변형을 유도하고 있어서 도금강판과 같이 표면마찰상태가 냉연강판의 경우와 크게 상이한 경우

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%	FLCo (%)	Remarks
1	0.69	20.0	37.0	37.8	1.51	0.22	35.0	CHSP35E
2	0.71	16.3	29.6	48.1	1.88	0.24	43.0	DDQ
3	0.74	22.0	37.4	38.2	1.76	0.21	32.0	CHSP35E
4	0.78	17.0	30.1	46.2	1.86	0.23	42.0	DDQ
5	0.86	16.3	28.4	47.7	2.08	0.24	44.0	EDDQ
6	0.89	16.8	30.4	44.6	1.84	0.23	41.0	CQ
7	0.88	21.1	32.5	40.5	1.68	0.20	40/0	CQ
8	0.88	22.0	38.2	36.2	1.36	0.22	31.0	CHSP38E
9	0.98	23.0	36.4	34.9	1.44	0.19	33.0	CHSP35R
10	0.97	16.6	28.9	47.3	2.02	0.22	43.0	DQ
11	1.57	23.2	40.2	38.6	1.17	0.19	41.0	CHSP40R
12	0.53	28.2	65.0	55.3	0.97	0.51	39.0	SUS-304
13	0.99	14.0	29.6	28.3	0.79	0.30	28.0	AI-5000

* Tensile specimen : ASTM E-8 standard, CQ : Commercial quality,

DQ : Drawing qualitym DDQ : Deep drawing quality, EDDQ : Extra DDQ.

CHSP : Cold-rolled high strength steel plate,

SUS : Stainless steel, AI : Aluminum plate

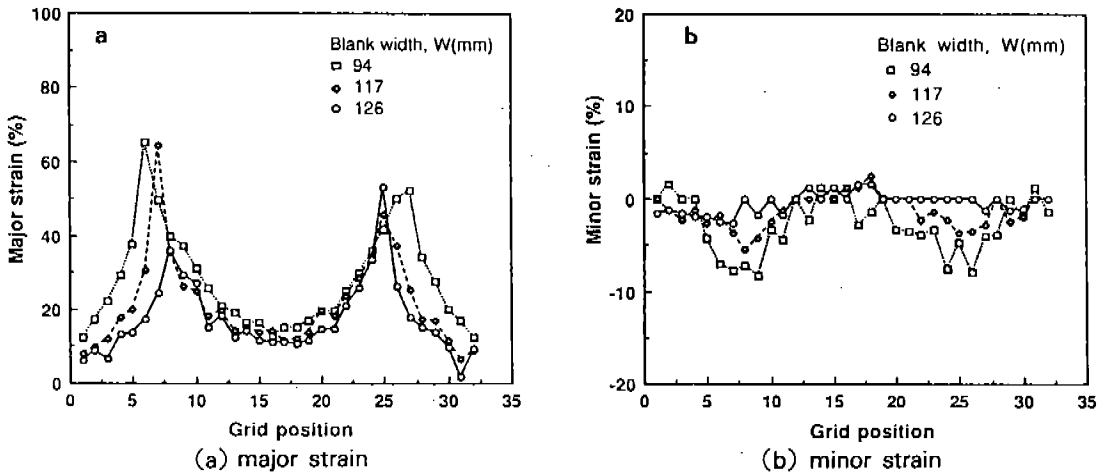


Fig.3 Strain distributions along longitudinal direction according to blank width

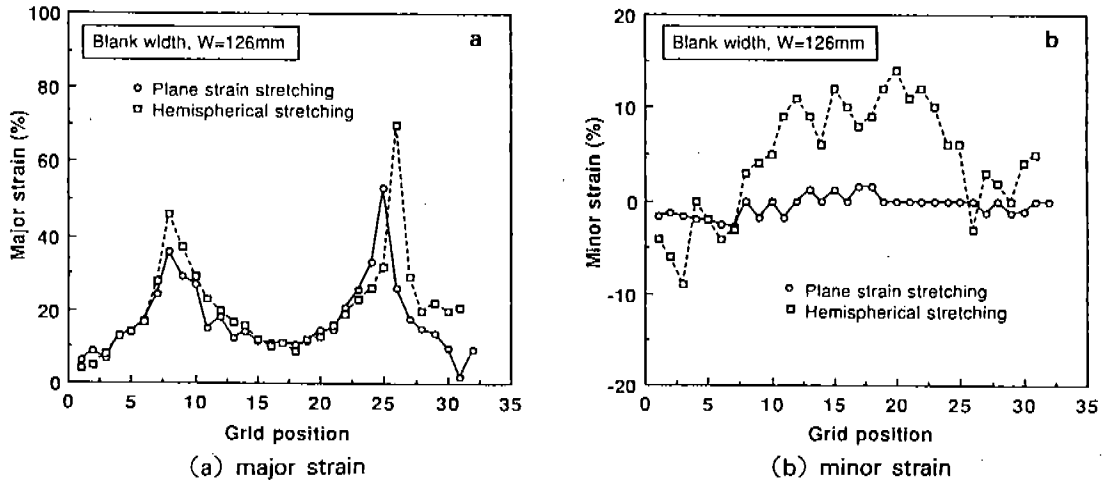


Fig.4 Comparison of strain distributions between plane strain punch stretching test and hemispherical punch stretching test

에도 시편의 폭이 126mm에서 평면변형이 확보된다. 따라서 평면변형장출실험에서는 자동차용 강판의 종류에 관계없이 폭이 126mm인 경우에 평면변형상태가 확보되고 있고 파단시의 한계 펀치높이로 재료의 스팀핑성형성을 평가할 수 있는 장점이 있다. 한편 본 실험에서 갖는 펀치의 기하학적 조건과 시편의 크기는 스테인레스강판의 스팀핑 성형성평가에도 그대로 적용가능하다. 그러나 알루미늄판재의 경우에는 인장특성에서 알 수 있듯이 균일연신후에 국부넉 발생없이 바로 파단되기 때문에¹¹⁾ 펀치 코너반경

부에서 과도한 국부굽힘변형에 의해 조기에 파단이 발생하고 있다. 따라서 알루미늄 판재의 성형성평가를 위해서는 펀치 코너반경부의 곡률반경을 보다 크게하거나 시편의 폭을 126mm 이하로 할 필요가 있다.

Fig.4a, 4b는 폭이 126mm인 사각시편을 각각 평면변형장출실험과 둥장출실험하여 OGA를 이용하여 시편의 길이방향으로 측정된 주변형률 및 부변형률 분포를 나타낸다. 주변형률 분포는 두 실험의 경우에 큰 차이가 없으나 부변형률의 경우에는 서로 상이한 결과를 나타내고 있다. 즉

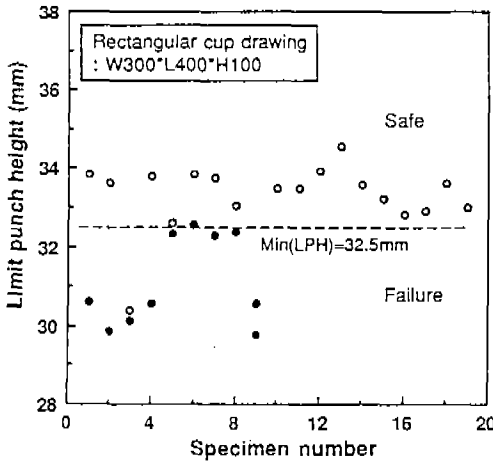


Fig.5 Correlation of LPH value to press performance for a large size rectangular cup drawing

평면변형장출실험의 경우는 시편의 전면에 걸쳐 평면변형상태가 확보되고 있으나 돛장출실험의 경우에는 최대 주변형을 위치에서만 평면변형이 이루어지고 있고 그리드위치의 중앙인 펀치의 극점으로 갈수록 양의 주변형률이 최대 13%까지 증가하여 시편이 완전한 평면변형상태에 있다고 볼 수 없다.

Fig.5는 28개의 코일로부터 채취한 자동차용 냉연강판 및 표면처리강판에 대해 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이와 1000톤 복동식 유압프레스를 활용한 610mm×530mm 크기의 대형 사각컵 스태мп핑결과와의 관계를 나타낸다. 한계펀치높이가 32.5mm이하인 판재에서는 스태мп핑결과 사각컵의 코너부 부위에서 파단이 발생하였고 그 이상의 값을 갖는 판재에서는 안전하게 성형이 이루어졌다. 따라서 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이는 스태мп핑결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 이 실험이 실제 자동차판넬을 대상으로 한 스태мп핑실험은 아니지만 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이는 자동차판넬의 스태мп핑성형여부의 사전 예측 및 재료의 성형성우열을 가리는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 실험기술은 자동차용 판재제조업체에 있어서 제조소

재에 대해 스태мп핑성형성에 관한 통계적 품질보증(statistical quality assurance)수단으로 활용가능하다.

4. 평면변형장출실험에 의한 한계평면변형률(FLCo) 도출

평면변형장출실험에서는 사각시편의 폭이 126mm인 경우에 시편의 길이방향으로 전면에 걸쳐 주변형률이 영인 평면변형상태가 얻어지고 있고 소성변형중에 체적변화는 없으므로 파단면 주위의 주 변형률 ϵ_1 은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 &= 0 & (1) \\ \epsilon_1 &= -\epsilon_3 (\epsilon_2 = 0) \\ \epsilon_1 &= \exp(\epsilon_1) - 1 \end{aligned}$$

여기서 첨자 1, 2, 3은 각각 길이, 폭 두께방향을 나타내고 한편 ϵ 과 e 는 각각 대수변형률과 공학 변형률을 나타낸다.

한계평면변형률 e_1 은 실험전 시편에 원형그리드를 새겨놓고 장출성형후 파단면 주위의 변형률들을 OGA를 활용하여 측정함으로써 구할 수 있으나 본 연구에서는 시편에 원형그리드를 새기지 않고 파단면 근방의 시편두께 t 를 정밀 측정하여 다음식에 의해 한계평면변형률을 구하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \ln(t/t_0) & (2) \\ e_1 &= \exp(-\ln(t/t_0)) - 1 \\ &= \text{FLCo} \end{aligned}$$

여기서 t_0 는 변형전의 시편의 두께이다.

파단면의 두께측정에는 마이크로메타 또는 초음파와 X-선에 의한 측정방법이 이용될 수 있으나 현실적으로 초음파를 이용한 두께측정이 가장 효과적이다. 이 방법은 측정하려는 물체에 원형단면의 접촉침을 접촉시켜 초음파음향에너지를 방사하여 빔의 물체를 관통하여 뒷면에서 반사되어 되돌아오는 시간을 계측하여 물체의

두께를 비파괴적으로 정밀측정하는 방법이다. 본 연구에서는 Krautkramer Branson사의 모델 CL-304를 이용하여 파단면 주위의 시편두께를 0.001 mm까지 정밀 측정하였다. 본 모델의 경우에 접촉침은 직경이 4.76mm인 원형단면을 갖고 있어서 두께를 정밀측정하기 위해서는 측정면이 평면을 유지하여야 하고 곡면을 갖는 경우에는 정밀측정이 곤란하다. 그러나 평면변형장출실험의 경우는 파단면 주위의 시편형상은 항상 평면을 유지하고 있어 초음파두께측정기를 이용한 정밀한 두께측정이 용이하다. 두께측정은 가능한한 파단면 근처에서 이루어져야 하고 또한 국부변 및 파단발생에 의한 두께감소에 따른 측정곤란 및 측정오차의 영향을 배제하기 위해서 Fig.6에서와 같이 접촉침의 가장자리를 파단면의 경계에 일치시켜서 측정한다. 그러면 평균

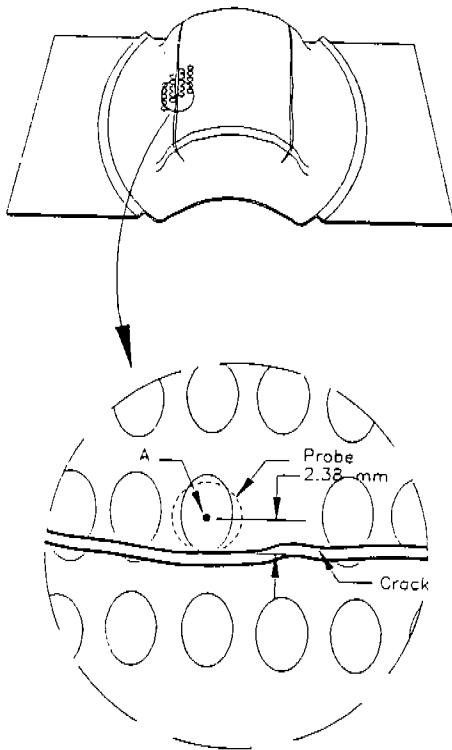


Fig.6 Schematic view on measuring the thickness of the specimen near fracture boundary

적으로 파단면에서 약 2.38mm 떨어진 접촉침의 중심 A위치에서 두께가 측정되고 있으므로 식 2에 의해 계산한 주변형률, 즉 한계평면변형률은 거리상으로 파단면에 접하고 있는 원형그리드에 대해 OGA를 이용하여 측정 한계평면변형률과 같다고 생각할 수 있다.

Fig.7은 사각시편의 길이방향으로 시편전면에

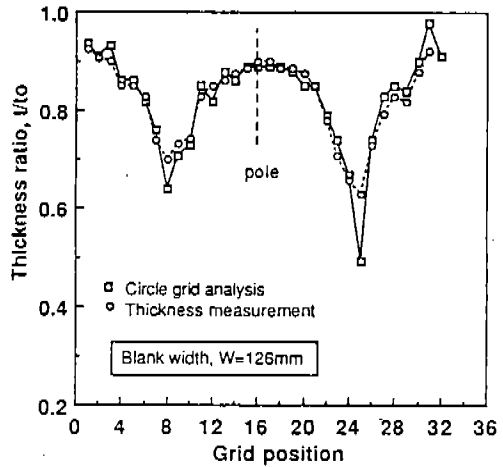


Fig.7 Comparison of calculated thickness reduction ratios, t/t_0 between thickness measurement and strain measurement

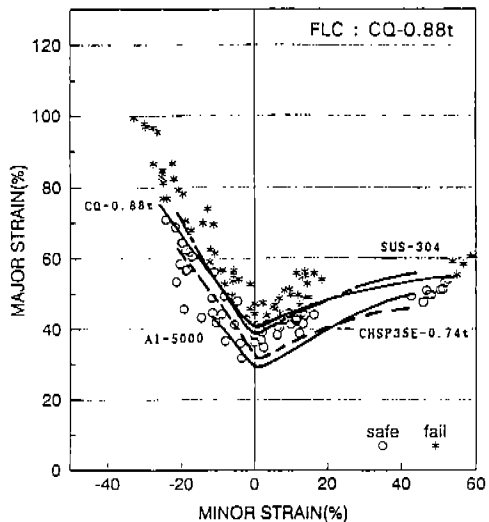


Fig.8 Forming limit curves measured from OGA for various materials

결처서 초음파두께측정기에 의한 두께 측정결과와 OGA에 의한 변형률 측정결과로부터 계산한 두께감소율분포를 나타낸다. 두께측정에 의해 계산된 두께감소율분포는 변형률 측정결과로부터 환산된 두께감소율 분포와 거의 일치하고 있어서 평면변형장출실험 시편의 파단면

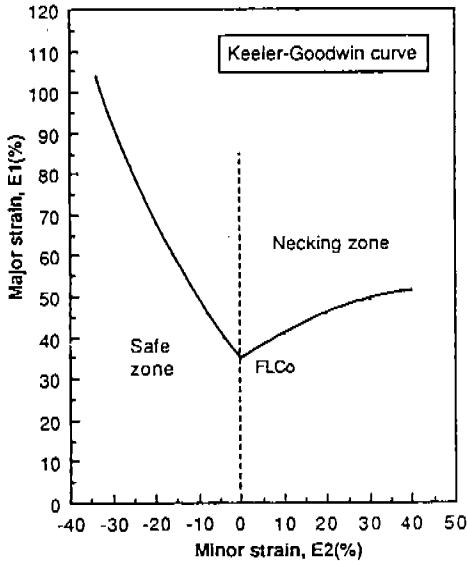


Fig.9 Keeler-Goodwin curve as a standard forming limit curve

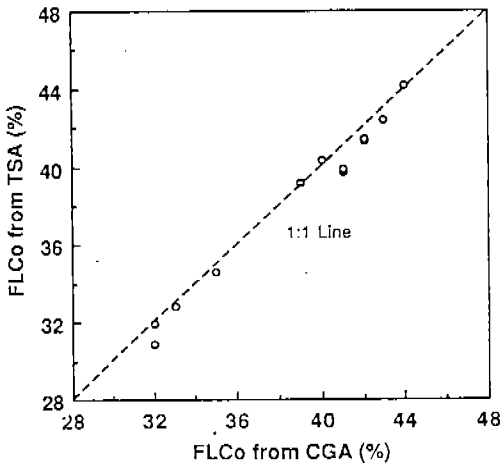


Fig.10 Comparison of limit plane strain, FLC0, between measurement from OGA and calculation from thickness measurement

주위에 대한 정밀한 두께측정에 의해 평면변형에서의 한계평면변형률에 대한 예측이 충분히 가능함을 알 수 있다.

Fig.8는 각각 동장출실험에서 OGA를 이용하여 구한 자동차용 냉연강판 2종, 304계스테인레스강판 및 5000계열의 알루미늄 판재에 대한 성형한계도를 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 재료별 성형한계선의 레벨은 다르나 그 형태에서는 큰 차이를 보이지 않고 있으므로, 대표적인 형상의 FLC를 선택하여 대표 FLC를 주 변형률 측으로 FLC0의 값 까지 평행이동하면 각 재료의 성형한계도를 근사적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 여기서 대표 FLC로는 Fig.9의 Keeler-Goodwin curve⁴⁾를 이용하였다.

Fig.10은 초음파두께측정기를 이용한 두께측정에 의해 계산된 FLC0와 OGA에 의해 측정된 FLC0의 비교를 나타낸다. 두께측정으로 부터 구한 FLC0는 OGA에 의해 측정된 FLC0와 거의 $\pm 1\%$ 오차범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 평면변형장출실험된 시편에 대한 파단면 주위의 두께 정밀측정에 의한 FLC0의 도출은 시편에 그리드를 새기는 작업 및 변형 그리드의 정밀측정을 위한 장비를 필요로 하지 않아 스태핑공정에서 재료의 성형한계선을 도출하는데 쉽게 이용할 수 있는 장점이 있다. 이 FLC0값은 3차원 스태핑공정을 이상화한 2차원 단면에 대한 유한요소해석시에^{12,13)} 필요한 재료의 성형한계에 대한 데이터로 유익하게 활용될 수 있다.

5. 결 론

평면변형하에서 판재의 장출성형성을 평가할 수 있는 평면변형장출실험기술을 개발하여 자동차용 판재들에 대하여 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평면변형장출실험에서는 시편의 파단시 한계편치높이를 이용하여 스태핑성형성을 통계적으로 평가할 수 있고 그 결과는 스태핑실적과 잘 일치하고 있다.
- 2) 또한 초음파두께측정기를 이용하여 파단면

근방의 두께를 정밀 측정하면 재료의 한계 평면변형률을 정확하게 예측할 수 있다.

- 3) 따라서 본 기술은 스탬핑공장 및 판재제조업체에서 스탬핑용 소재에 대한 스탬핑성형성 우열의 평가 및 스탬핑성형 불량 원인 규명에 쉽게 활용가능함을 알 수 있다.

후 기

본 연구의 실험을 담당한 김정철씨와 시편을 제공하여 주신 포항제철소 냉연부 담당자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영석, 박기철, "판재성형성평가 및 응용기술", 산기연 워크숍자료, pp.68-99, 1992.
2. S.P.Keeler, "Simple technique for determining forming limit curve", Sheet Metal Industries, Vol.52, pp.671-676, 1975.
3. 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 Metalworking, Vol.1-1, pp.73-82, 1979.
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. H.Sang and Y.Nishikawa, "A plane strain tensile apparatus", J.Metals, Feb., pp.30-33, 1983.
6. R.H.Wagoner and N.M.Wang, "An experimental and analytical investigation of in-plane deformation of 2036-T4 aluminum", Int.J. Mech.Sci., Vol.21, pp.255-264, 1979.
7. M.Y.Demer, "The stretch-bend forming of sheet metals", J.Appl.Metal.Work., Vol.2-1, pp. 3-10, 1981.
8. N.Izworski and A.Graf, "Obtaining LDH stability", SAE paper No.910512, pp.41-45, 1991.
9. 김영석, 김기수, "스탬핑 성형성 평가기술개발", 대한기계학회 논문집 투고, 1992.
10. 김영석, 김정철 외, "평면변형 장출성형성 평가기술", 특허출원, 1992.
11. 김영석, "알루미늄 판재의 성형기술의 현황과 과제", 대한기계학회지, Vol.32-7, pp.620-631, 1992.
12. 김영탁, N.M.Wang, "단면성형해석에 의한 자동차 내부판넬의 설계", 자동차공학회지, Vol.12-6, pp.48-59, 1990.
13. 유동진, 이정우, 전기찬, "차체판넬 프레스 성형공정의 평면변형해석", 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp.275-278, 1989.