

(論 文)

인장특성이 자동차용강판의 평면변형장출성에 미치는 영향

김영석* · 박기철* · 김선원**

(1992년 12월 15일 접수)

The Effects of Tensile Properties on Plane Strain Stretchability of Automotive Steel Sheets

Youngsuk Kim, Keecheol Park and Sunwon Kim

Key Words : Plane Strain Punch Stretching Test(평면변형장출실험), Limiting Punch Height(한계펀치높이), Plane Strain Stretchability(평면변형장출성), Tensile Property(인장특성)

Abstract

Plane strain punch stretching test(PSST) was performed for various automotive steel sheets. To clarify the effect of tensile properties on plane strain stretchability, the limiting punch height(LPH) values were obtained in plane strain punch stretching test and related to the tensile properties of the materials. The results show that the total elongation E_l and work hardening exponent n compared to other parameters obtained from tensile test well correlate with the LPH value. In comparison with the Erichsen test and LDH test the PSST can be statistically used as an alternative in assessing the stamping formability of automotive steel sheets with the advantages of good reproducibility and easy testing method.

1. 서 론

일반적으로 스탬핑공정중에 복잡한 경계조건하에서 판재가 받는 변형은 기본적으로 장출변형, 드로잉변형, 굽힘변형과 신장플렌지변형 혹은 이들의 조합으로 나타나고, 이런 변형하에서 재료의 국부벽이나 파단과 관련한 두께감소를 야기하는 변형모드는 드로잉모드, 평면변형모드, 장출변형모드로 구분된다. 이들 변형모드는 금형과 강판의 접촉정도 및 각각의 표면특성에 의해 결정되고 표면의 부변형률(e_2)의 크기에 의해 표시된다. 하나의 실험에 의해 판재의 스탬핑성형성(stamping formability), 즉 재료가 스탬핑공정하에서 국부벽이나 파단

발생없이 성형될 수 있는 재료의 변형능력을 정확히 평가하는 것은 불가능하고 통상 이들 변형모드를 적절히 재현한 여러 실험방법들-Erichsen 컵장출실험, Fukui 컵드로잉실험, Swift 컵드로잉실험, 101.6 mm 직경의 돔장출실험 등-이 종래부터 재료물성과 성형성과의 상관관계를 규명하는데 자주 이용되고 있다.⁽¹⁾ 이들 모사실험중에서 특히 플렌지부에서 재료의 유입이 없도록 고정비드를 원주방향에 설치하고 101.6 mm(4in) 직경의 돔형펀치를 이용한 Hecker의 돔장출실험⁽²⁾에서 구한 재료의 한계변형률을 나타내는 성형한계선(Forming Limit Curve, FLC 일명 Keeler-Goodwin curve)^(3,4)은 원형그리드해석(Circle Grid Analysis, CGA)와 함께 재료의 스탬핑 성형성 우열평가와 스탬핑공정에서 성형불량 원인분석에 널리 활용되고 있다.

*정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터

**포항제철주식회사 제품기술부

이 성형한계선은 실험전에 미리 원형그리드가 새겨진 사각시편을 101.6 mm 직경의 돔형펀치를 이용하여 장출실험 시편의 폭과 윤활조건을 변경하여 스탬핑공정중에 발생가능한 모든 변형상태-드로잉 모드에서 평면변형모드까지 그리고 평면변형모드에서 스트레칭모드까지-를 재현하고, 각 변형모드에서 재료의 파단이 국부벽에 견딜 수 있는 한계변형률을 측정하여 주변형률과 부변형률의 2차원 좌표상에 나타낸 것이다. 이 FLC는 금형 트라이아웃공정 및 스탬핑공정에서의 변형률상태와 비교하여 재료의 성형난이도 및 성형불량 원인규명에 유용하게 활용되고 있다.⁽⁵⁾ 그러나 돔장출실험에 의해 성형한계선을 도출한데는 원형그리드해석기(optical grid analyzer, OGA)와 같은 정밀측정장비와 많은 수고가 필요하고 또한 자동차용 강판의 대부분은 Keeler-Goodwin 밴드내에 존재하고 있어서 코일의 성형성 우열을 정량적으로 확실히 판정하기가 곤란한 점이 있다.⁽⁶⁾ 한편 판재의 전반적인 성형성은 FLC에 의해 나타내지는 국부벽 발생에 대한 재료의 한계변형능력과 금형과의 접촉면에서 재료가 얼마만큼 균일변형하여 변형집중을 억제할 수 있는가에 따라 결정된다. 따라서 FLC만으로 실제 스탬핑공정에서의 재료의 스탬핑 성형성을 정확히 평가하였다고는 볼 수 없고, 재료의 한계변형능력과 금형접촉면에서의 균일변형능력에 의한 영향을 동시에 고려할 수 있는 기존의 간단한 장출실험방법으로 Erichsen 컵장출실험 및 Fukui 컵드로잉실험 등이 있으나 이들 실험들은 어느 것이나 모두 반경방향으로의 재료의 드로잉은 피할 수 없으며 결과적으로 장출-드로잉변형에 의해 반복실험에서 재현성(reproducibility)이 떨어지고 또한 작은 펀치직경을 사용하므로써 상당한 굽힘변형을 수반하여 두께의존성을 크게하는 단점이 지적되고 있다.⁽⁷⁾

이들 결점을 극복하기 위하여 Hecker⁽⁸⁾는 새로운 장출실험방법으로 정사각형시편의 전체원주를 고정비드로 강하게 클램핑하여 재료의 반경방향 드로잉을 억제하고 무윤활상태에서 상대적으로 큰 직경(50, 75, 100 mm)의 돔형펀치를 사용하여 시편이 파단될때까지 장출성형(full dome test)하여 파단시 돔의 최대높이 h^* 로 재료의 장출성형성을 평가하는 방법을 제안하였다. Ghosh⁽⁹⁾는 장출과 어느 정도의 드로잉변형을 포함하는 돔장출실험을 통하여 파단시 돔의 최대높이인 한계돔높이(limiting

dome height, LDH)로 재료의 스탬핑성형성을 평가하였다. 즉 사각시편의 폭, W , 을 117 mm~138 mm 사이에서 3 mm의 일정간격으로 변화시켜 돔펀치의 장출에 따라 재료의 폭방향 드로잉을 허용하여 평면변형모드 좌우 양쪽의 변형모드, 즉 드로잉모드와 스트레칭모드를 재현하면서 각각의 변형경로에서 파단시의 한계돔높이를 측정하여 파단면 주위의 부 변형률 혹은 시편폭의 함수 즉 LDH곡선으로 나타내었다. 이 방법은 스탬핑 판넬의 파단 위험부위에서 부 변형률을 측정하여 돔장출실험에서 동일한 부변형률을 주는 시편의 폭을 결정하여 그 폭에서 입하소재에 대한 주기적인 한계돔높이평가로 통계적 스탬핑성형성에 대한 평가에 이용되고 있다.

한편 Ayres⁽¹⁰⁾는 돔장출실험을 이용하여 보다 간단하게 장출성형성을 평가하는 시험법을 도입하였다. 여기서 그는 스탬핑 성형불량의 약 85%~90%가 부변형률이 $-0.1 < \epsilon_2 < 0.2$ 범위인 평면변형모드 근처에서 발생한다는 것에 주목하여 LDH 곡선에서 평면변형모드에 대응하는 폭에서 통상 한계돔높이가 가장 낮은 값을 갖으므로 이 값을 최소 한계돔높이(minimum of limiting dome height, LDH_{min} 또는 LDH_o)로 정의하여 스탬핑 성형성 평가척도로 사용하였다. 이 방법에 의하면 돔높이가 높을수록 파단발생 위험판넬의 스탬핑에 사용될 강판의 성형성이 양호하다고 할 수 있다. 이와같이 스탬핑 성형성평가척도로 한점의 값, LDH_o을 사용하는 것은 판넬에 대한 원형그리드 해석을 수행할 필요가 없고 시험 시편에 대한 예칭작업이 불필요하고 또한 시편수가 줄어드는 장점이 있다.

돔장출실험을 통하여 Hecker는 재료의 인장특성이 LDH_o에 미치는 영향을 논하여 저탄소강의 경우에 LDH_o는 Hollomon식으로 나타내지는 가공경화지수 n 과 밀접한 상관관계를 갖음을 보였다. 반면 자동차몸체 성형용 알루미늄 합금판재의 경우에는 가공경화지수 n 보다 전연신률 EI 이 좋은 상관성을 갖음을 보였다. 이 이유로서 Wagoner는 알루미늄 합금판재의 경우에 단축인장에서 가공경화특성은 Hollomon식으로 정의하기 곤란하고 Voce 형태의 포화-응력 구성식(saturation-stress constitutive equation)으로 표시하는 것이 타당함을 보였다.⁽¹¹⁾

LDH_o 값은 제한된 조건에서 스탬핑실적과 잘 일치하고 있고 재료별로 스탬핑성형성 우열을 충분히

히 구별해주는 장점이 있어 이 방법은 현재 북미를 중심으로 스템핑라인에 투입되는 소재에 대한 적정 성여부의 평가와 스템핑공정 및 자동차용 강판 제조공정에 대한 통계적 품질관리에 활용되고 있다. 그러나 LDH는 각종 공정변수의 영향을 받는 시스템 특성값으로 LDH값은 실험조건-금형 및 시편의 표면조건, 시편의 버어상태, 클램핑력, 경계(마찰)조건, 성형온도와 펀치속도조건등-의 변화에 따라 상당히 산포된 결과를 내내고 있다.^(12,13)

Kim^(13,14)은 Ayres의 등장출실험과 비교하여 재현성이 높고 안정적으로 스템핑형성을 평가할 수 있는 평면변형장출실험(plane strain punch stretching test, RIST-PSST)방법을 개발하여 스템핑실적과 그 결과가 잘 일치함을 보였다. 본 연구에서는 자동차용강판의 인장특성이 평면변형장출실험에 미치는 영향을 파악하기 위해 평면변형장출실험을 행하여 한계펀치높이와 인장특성값과의 상관성을 검토한다. 또한 기존의 Erichsen실험 및 LDH 실험결과와 비교하여 평면변형장출실험을 자동차용강판의 스템핑 성형성평가에 활용가능한지를 논하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 인장실험

실험에 사용한 재료는 현재 자동차 내·외 판넬 용으로 널리 사용되고 있는 냉연 및 합금도금강판 17종으로 Table 1에 인장실험에 의한 각각의 기계적특성을 나타내었다. 인장실험은 압연방향에 대해 90° 방향으로 ASTM E-8규격(평행부 폭 $w_0=12.5$ mm, 평행부 길이 $l_0=50$ mm)의 인장시편을 제작하여 20톤 용량의 Instron 만능시험기에 의해 10 mm/min의 일정한 인장속도로 실시하였다. 가공경화지수 n 값은 강판의 인장특성이 Holloman의 식, $\sigma=K\epsilon^n$ (σ 는 진응력, ϵ 는 소성변형률, K 는 소성계수)에 따른다고 가정하여 연신률이 10%와 20% 일때 각각의 인장하중 P_1 , P_2 를 이용하여 다음식으로부터 결정하였다.

$$n = [\ln(P_1/P_2) + 0.087] / 0.648 \quad (1)$$

미국재료시험규격(ASTM)에서는 n 값의 측정을 인장응력-연신률 곡선에서 최대하중전의 균일연신범위에서 등간격으로 5점 이상의 연신률과 응력데이터를 이용하여 회귀분석하여 구하도록 규정하고 있

으나 그 결과는 Eq.(1)를 이용한 결과와 소수점 이하 두자리까지 일치한다.

한편 폭방향 변형률 ϵ_w 과 길이방향 변형률 ϵ_l 의 비로 정의되는 소성이방성계수 R 값(R-value 혹은 plastic anisotropic parameter)은 연신률 15%에서 평행부의 폭 W 를 정밀측정하여 다음식으로 구하였다.

$$R = \epsilon_w / \epsilon_l = 1 / [\ln(1.15 l_0 / l_0) \ln(W_0 / W) - 1] \quad (2)$$

여기서 ϵ_l 는 두께방향 변형률이다.

2.2 평면변형장출실험

Fig. 1(a), (b)는 평면변형상태에서 재료의 파단을 잘 재현하도록 한 평면변형장출실험의 개요를 나타낸다. 이 실험에서는 등장출실험에서와 같이 일정한 폭의 사각시편을 이용하여 시편의 원주방향 가장자리를 상하형 다이에 가공된 고정비드로 강하게 클램핑하여 다이내부로 재료의 유입을 방지하고 반실린더형의 말안장형태로 가공된 직경이 큰 펀치를 이용하여 장출성형하여 시편표면의 전면에 평면변형을 유지하면서 재료의 파단시에 한계펀치높이(limiting punch height, LPH) 또는 파단면 근처에서 측정된 한계평면변형률의 크기에 의해 재료의 성형성에 대한 우열을 평가한다. 따라서 LPH가 높은 판재는 스템핑성형성이 좋고 LPH가 낮은 판재는 스템핑성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다. 평면변형장출실험에서는 Fig. 1b에서와 같이 펀치상승에 따라 구속상태에 있지 않는 시편폭의 일부가 유입되어(lateral drawing-in) 점차 펀치를 감자주는 π 자 형태로 변형함에 따라 π 자의 플랜지부에 의해서 시편의 폭방향변형이 기하학적으로 구속되어 더이상 재료의 폭방향 유입이 억제되고 시편에는 길이방향으로 장출변형만이 존재하게되어 평면변형상태가 쉽게 얻어지는 특징이 있다.

평면변형장출실험은 60톤/40톤 복동식 박판종합시험기를 이용하였으며 블랭크홀더력은 30톤으로 하였고 펀치속도는 약 250 mm/min로 하였다. 실험에 사용한 펀치의 반경은 35.0 mm, 길이는 70 mm이고 펀치 코너반경은 5 mm이다(Fig. 1a). 한편 시편의 길이는 내경이 105.7 mm인 상하다이에 설정된 원주방향의 고정비드에 의해 완전히 플랭핑되도록 충분히 크게하였고 폭 W 은 시편의 표면상태 및 종류에 관계없이 항상 평면변형상태가 얻어

Table 1 Mechanical properties of tested materials

| Material No. | t (mm) | YS (kg/mm ²) | TS (kg/mm ²) | El (%) | R 15% | n 10~20% | Remarks |
|--------------|--------|--------------------------|--------------------------|--------|-------|----------|---------|
| 1 | 0.78 | 16.0 | 29.5 | 46.4 | 1.87 | 0.24 | 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 | 0.18 | CHSP35E |
| 6 | 0.78 | 14.3 | 29.8 | 47.3 | 1.53 | 0.25 | 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 | 0.20 | EZN |
| 12 | 0.69 | 20.0 | 37.0 | 37.8 | 1.51 | 0.19 | CHSP35E |
| 13 | 0.71 | 16.3 | 29.6 | 48.1 | 1.88 | 0.24 | DDQ |
| 14 | 0.88 | 21.1 | 32.5 | 40.5 | 1.68 | 0.20 | CQ |
| 15 | 0.88 | 22.0 | 37.2 | 36.2 | 1.36 | 0.19 | CHSP35E |
| 16 | 0.98 | 23.0 | 36.4 | 33.6 | 1.44 | 0.19 | CHSP35E |
| 17 | 1.57 | 23.2 | 35.2 | 38.6 | 1.17 | 0.18 | CHSP35E |
| 18 | 0.81 | 26.1 | 73.5 | 55.0 | 0.98 | 0.47 | SUS304 |
| 19 | 0.99 | 10.6 | 21.0 | 23.2 | 0.66 | 0.26 | Al-5052 |

*Tensile specimen : ASTM E-8 standard, t : thickness.

CQ, DDQ, EDDQ : Commercial, Deep drawing, Extra-deep drawing quality.

EZF, EZN : Electro Zn-Fe, Zn-Ni alloy coated steel sheet.

CHSP : Cold-rolled high strength steel plate.

SUS : Stainless steel sheet.

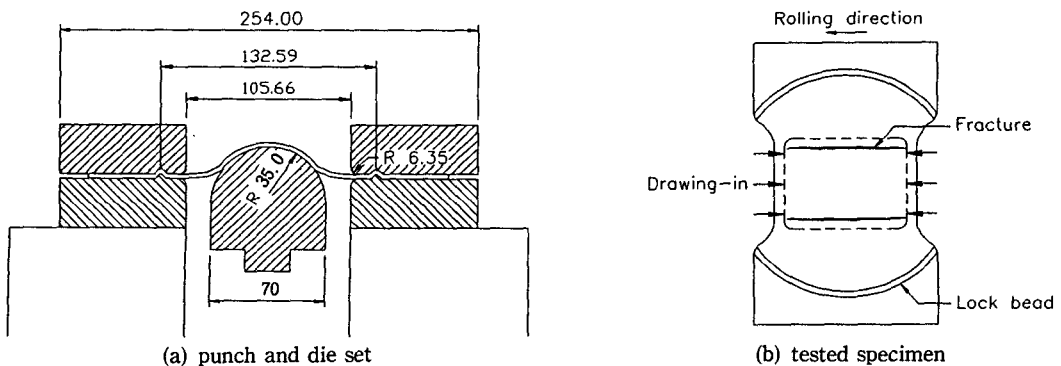


Fig. 1 Overview of plane strain punch stretching test

지는 126 mm로 하였다.^(13,14) 한계펀치높이는 평가 하려는 코일에서 사각시편의 폭을 압연방향에 90° 방향으로 하여 5매씩 절단하여 가장자리의 버어를 제거하고 시편표면을 아세톤으로 세척한 후, 무도 유상태에서 장출성형하여 파단될 때의 한계펀치높이를 평균하여 구하였다.

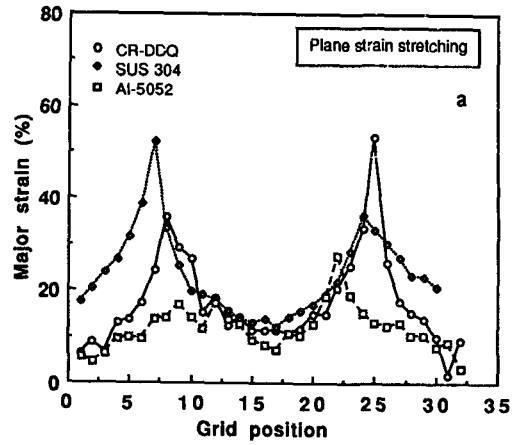
3. 실험결과 및 고찰

3.1 인장특성과 한계펀치높이의 관계

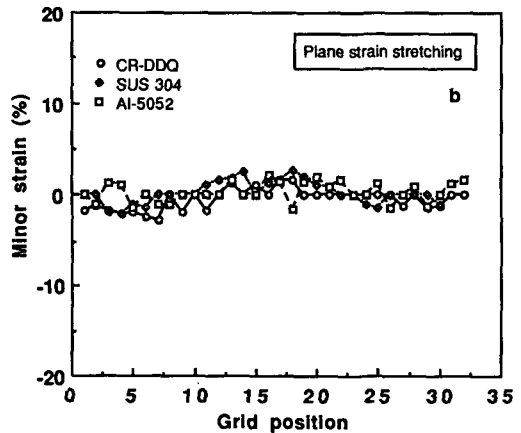
Fig. 2(a), 2(b)는 본 방법의 타당성을 확인하기 위하여 시편 폭이 126 mm인 냉연강판(DDQ), 스텐레스강판(SUS-304), 알루미늄판재(AI-5182)에 대해 평면변형장출실험후에 시편의 길이방향으로 주변형률 및 부변형률을 측정된 결과이다. 변형률은 실험전에 시편표면에 직경이 2.54 mm인 원형그리드를 전해에칭하여 평면변형실험후에 원형그리드 해석기(circle grid analyzer, CGA)를 이용하여 측정하였다. Fig. 2a에서 주변형률은 전체적으로 펀치와 재료가 접촉한 경계근처에서 최대값을 갖고 양단과 펀치의 극점으로 갈수록 점차 감소하는 형태를 취하고 있다. 그러나 최대 주변형률의 크기는 각 재료의 인장특성에 따라 다른데 스텐레스강판의 경우는 높은 가공경화지수로 인하여 주변형률이 시편 전체에 균일하게 분포되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 한편 부변형률은 재료에 관계없이 시편전면에 걸쳐 $\pm 3\%$ 범위내에서 거의 영인 값을 갖고 있어 시편 폭이 126 mm에서 항상 평면변형상태가 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 재료의 가공경화지수 n 과 한계펀치높이와의 관계를 나타낸다. 재료의 가공경화지수가 커질수록 한계펀치높이가 증가하는 밀접한 상관성이 있음을 알 수 있다. 이는 가공경화지수가 커질수록 재료의 균일변형능력이 증가하며, 따라서 펀치와 시편의 접촉부에서 변형집중없이 재료의 변형이 균일하게 분포되어 장출변형을 지속하기 때문에 사각시편의 길이방향 장출성형성에 대한 척도인 한계펀치높이가 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 4는 재료의 전연신률 El 과 한계펀치높이와의 관계를 나타낸다. 전연신률이 증가할수록 한계펀치높이가 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 전연신률이 커질수록 국부neck 발생에 대한 재료의 한계변형능력이 증가하므로 본 실험에는 펀치의 상승에 따라서 시편에 평면변형이 확보된 후



(a) major strain



(b) minor strain

Fig. 2 Strain distributions along longitudinal direction for DDQ, SUS-304 and AI-5182

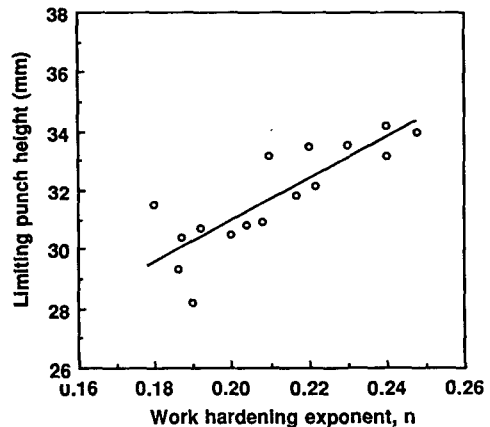


Fig. 3 Relationship between work hardening exponent and limiting punch height

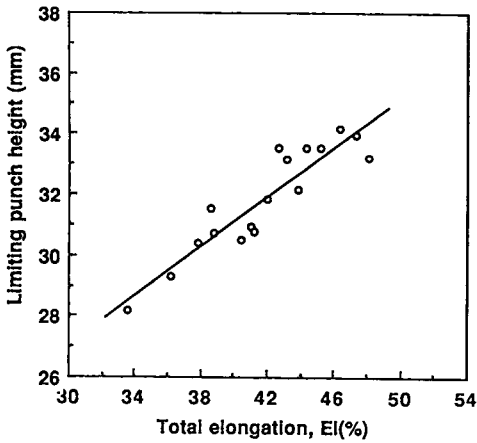


Fig. 4 Relationship between total elongation and limiting punch height

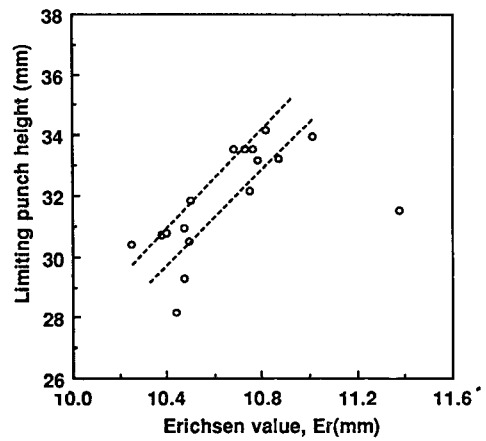


Fig. 6 Erichsen value versus limiting punch height

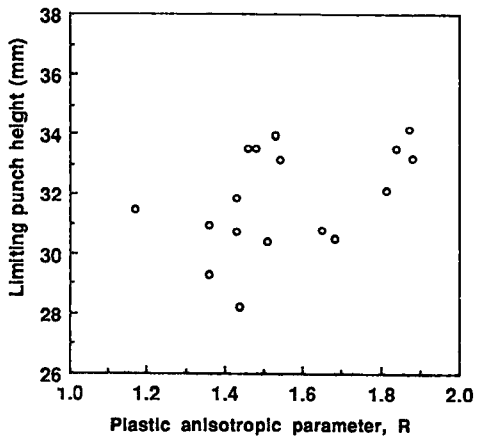


Fig. 5 Relationship between plastic anisotropic parameter and limiting punch height

에 최대 주변형을 위치에서 두계방향으로 변형의 집중이 지연되기 때문에 한계펀치높이가 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 한편 여기서는 나타내지 않았으나 전연신률 EI 는 항복응력 YS 과 반비례관계를 나타내고 있으므로⁽¹⁵⁾ 항복응력이 증가할수록 한계펀치높이는 감소하는 것을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 소성이방성계수 R 과 한계펀치높이와의 관계를 나타낸다. 한계펀치높이는 소성이방성계수에 따라 상당히 산포된 결과를 나타내고 있어 양자간에는 상관성이 적은 것으로 생각된다. 이는 평면변형장출실험이 펀치의 상승에 따라 시편이 펀치를 감싸는 기하학적 구속에 의해 폭방향변형이 억제되고 길이방향 장출변형만이 일어나는 평면변형상태에 있으므로, 재료의 폭방향 변형난이도를 나타내

는 소성이방성계수의 영향은 적은 것이다.

3.2 Erichsen값 및 LDH값과 한계펀치높이의 관계

Fig. 6은 재료의 장출성형에 대한 척도로 자주 이용되고 있는 Erichsen값과 한계펀치높이와의 관계를 나타낸다. 한계펀치높이는 Erichsen값이 커질수록 증가하는 선형관계에 있음을 알 수 있다. 평면변형장출실험과 Erichsen실험은 모두 재료의 장출변형능력을 평가하기 위한 실험이지만 서론에서 논한바와 같이 Erichsen실험은 펀치의 크기가 작아 재료의 굽힘변형에 대한 영향이 과대 평가되어 기계적특성이 우수한 재료와 열세인 재료들간의 Erichsen값의 차이는 1.11 mm로 작아 재료의 성형성우열에 대한 구분이 어려운 단점이 있다. 반면 평면변형장출실험의 경우는 큰 펀치를 사용하므로써 재료 고유의 장출변형능력뿐 아니라 재료와 금형의 마찰영향을 동시에 고려하여 양자간의 한계펀치높이의 차이가 6.3 mm로 커서 재료별 성형성우열에 대한 구분을 명확히 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 평면변형장출실험은 Erichsen실험을 대신하여 재료의 장출성형성 평가척도로 충분히 이용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 최소 한계둔높이와 한계펀치높이와의 관계를 나타낸다. 양자는 서로 1:1의 좋은 상관성을 갖고 있어 최소 한계펀치높이가 높은 재료의 경우는 한계펀치높이도 높은 것을 알 수 있다. 그러나 문헌(7, 13)에서 논한바와 같이 평면변형장출실험의 경우는 LDH 돔장출실험과는 달리 시편채취

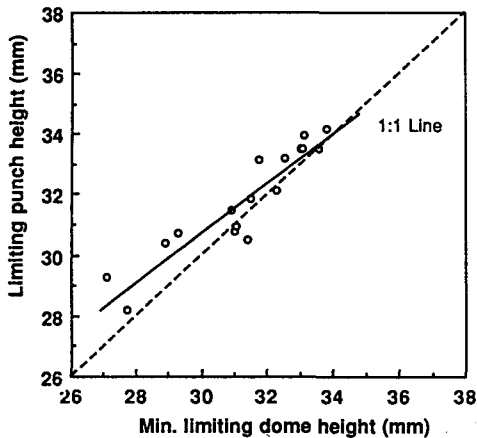


Fig. 7 Minimum of limiting dome height versus limiting punch height

부위의 표면특성-표면형태(surface morphology), 도금특성등-차이에 따른 실험편차가 적고 재현성이 우수한 특징이 있어, 스탬핑라인에서 입하코일의 사전 스탬핑 성형성평가에 매우 유익한 실험수단임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 평면변형장출실험을 통하여 자동차용강판의 인장특성이 평면변형장출성에 미치는 영향을 파악하여 한계편치높이와 인장특성값과의 관계를 규명하였다. 또한 평면변형장출실험에 의한 한계편치높이를 Erichsen값 및 LDH₀값과 비교하여 상관성에 대하여 논하였다. 평면변형장출실험에 의한 한계편치높이는 일반적으로 재료의 장출성형성에 대한 척도로 알려지고 있는 가공경화지수 n 과 전연신률 EI 과 선형관계에 있으나, 소성이방정계수 R 과는 본 평면변형장출실험의 특성에 의해 상관관계는 보이지 않는다. 한편 평면변형장출실험에 의한 한계편치높이는 Erichsen값 및 LDH₀값과 잘 일치하고 있고 재현성이 좋아 기존의 이들 실험방법을 대신한 새로운 스탬핑 성형성평가 실험방법으로 스탬핑라인 및 자동차용강판 제조업체에서 강판의 품질평가에 활용가능하다.

후 기

본 연구의 실험을 도와주신 김정철, 손원근씨와

시편을 제공하여 주신 포항종합제철(주) 냉연부 담당자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 김영석, 박기철, 1992, "판재성형성평가 및 응용기술," 산기연 워크숍자료, pp. 68~99.
- (2) Hecker, S. S. 1975, "Simple technique for determining forming limit curve," Sheet Metal Industries, Vol. 52, pp. 671~676.
- (3) Keeler, S. P. 1965, "Determination of forming limits in automotive stampings," SAE paper, No. 650535.
- (4) Goodwin, G. M. 1968, "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop," SAE paper, No. 680093.
- (5) Dinda, S. James, K. Keeler, S. P. and Stine, P. A., 1981, "How to use circle grid analysis for die tryout," American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- (6) Raghavan, K. S., VanKuren, R. C. and Darlington, H., 1992, "Recent progress in the development of forming limit curves for automotive sheet steels," SAE paper, No. 920437.
- (7) Kim, Y. S. and Park, K. C. 1992, "A consideration on the simulation tests for evaluating stamping formability," KSME, Vol. 33, No. 1 pp. 47~65.
- (8) Hecker, S. S., 1974, "A cup test for assessing stretchability," Metal Engng. Quarterly, Vol. 14, pp. 30~36.
- (9) Ghosh, A. K., 1975, "The effect of lateral drawing-in on stretch formability," Metal Engineering Quarterly, Vol. 15-7, pp. 53~64.
- (10) 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. 1-1, pp. 73~82.
- (11) Wagoner, R. H., 1980, "Measurement and analysis of plane strain work hardening," Metal. Trans., Vol. 11A, P. 165~175.
- (12) Lzworski, N. and Graf, A., 1991, "Obtaining LDH stability," SAE paper, No. 910512.
- (13) 김영석, 박기철, 남재복, 1992, "평면변형장

출실험을 이용한 스탬핑 성형성평가,” 대한기계학회 추계학술대회초록집, pp. 396~400.

- (14) Kim, Y. S. and Kim, K. S., 1993, “Development of plane strain punch stretching test,” Trans. KSME, Vol. 17, No. 5, pp. 1132~1137.
- (15) 김영석, 박기철, 김기수 외, 1992, “대형판넬 스탬핑 성형성 평가기법 개발,” 산업과학기술 연구 결과보고서, 과제번호 1321B.