

판재의 성형성평가 실험에 대한 고찰

김영석 · 박기철

A Consideration on the Simulation Tests for Evaluating Stamping Formability

Yongsuk Kim · Keechul Park



- 김영석 (산업과학기술연구소 용접연구센터 책임연구원)
- 1957년생.
- 소성역학 및 수치해석을 전공하였으며, 재료의 불안정현상해석 판재의 성형성평가 및 최적가공기술개발에 관심이 있다.



- 박기철 (산업과학기술연구소 용접연구센터 연구원)
- 1965년생.
- 고체역학 및 수치해석을 전공하였으며, 수치해석을 이용한 판재의 성형성평가와 예측시스템 개발에 관심이 있다.

1. 머리말

자동차 제조공정에 있어서 판재를 변형시켜 설계자가 요구하는 3차원 형상의 판넬을 제조하는 공정이 스탬핑공정(stamping process)이다. 이 공정에서 판재는 대개 3개 또는 4개의 연속적인 프레스 공정을 거쳐 판넬부품으로 완성된다. 한편 판넬형상의 대부분은 첫번째 공정인 드로잉금형에 의해서 결정되고 후속공정에서는 국부적인 성형, 트리밍, 플랜징 등이 행해진다. 스탬핑 공정중에 재료변수(material variable), 설계변수(design variable) 및 공정변수(process variable)가 적절하지 않아 발생하는 파단(tearing), 주름(wrinkling), 탄성복원(spring back)에 의한 치수정도불량 등 다양한 형태의 가공결함은 주로 드로잉공정에서 발생한다. 그림 1은 이들 대표적 가공불량을 나타낸다. 따라서 스탬핑공정을 가공불량 없이 성공적으로 수행하기 위해서는 이들 변수들의 적절한 조화뿐 아니라 스탬핑공정에 대한

엄격한 공정관리가 필요하다. 특히 금형 트라이아웃(try-out) 공정에서 숙련기술자의 시행착오(trial and error)에 의해 확보된 최적 공정변수하에서는 소재자체의 스탬핑 성형성 확보가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

그림 2는 스탬핑공정 중에 판재가 받는 일

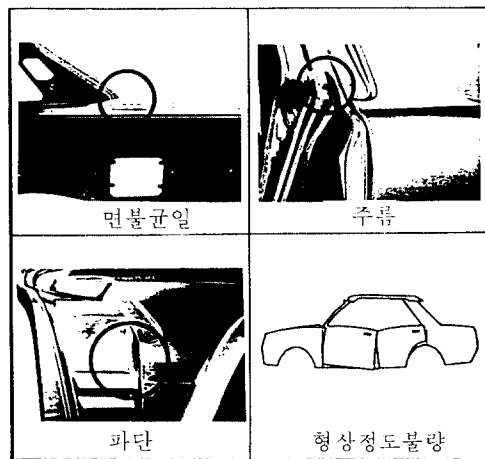


그림 1 판재성형중의 각종 가공불량 현상

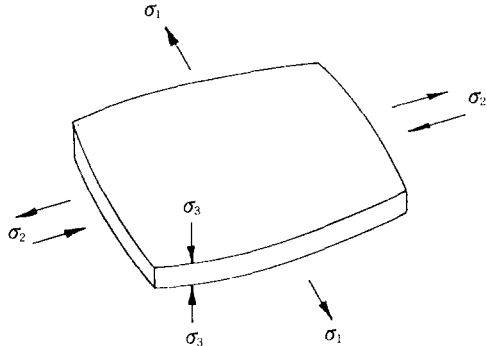


그림 2 판재 성형공정에서의 응력상태

반적인 응력상태를 나타내며, 스탬핑공정에서 판재는, 판두께 방향으로 응력이 영이고 판면 내에 2축응력을 받는 평면응력상태로 간주할 수 있다. 이 판면내에 작용하는 2축응력상태에 따라 여러가지 변형모드가 조합된 변형을 받으며 통상 이런 변형모드는 드로잉모드(drawing mode), 장출모드(stretching mode), 평면변형모드(plane strain mode)로 크게 분류할 수 있다. 이들 변형모드는 금형의 형상, 금형과 판재간의 마찰조건, 판재의 구속조건 등에 의해 결정되며 부변형률의 크기에 따라 구분된다.

판재의 성형성(formability)이란 벌크재의 가공성(workability)과 유사한 개념으로 재료가 파단발생없이 소성변형할 수 있는 능력 또는 재료가 상대적으로 소성변형하기 쉬운 정도를 나타내는 것을 의미한다. 통상 판재의 스탬핑 성형성을 평가하기 위한 대표적인 방법으로 인장시험 등과 같은 기본시험(basic test)이 종래부터 널리 사용되고 있고, 재료의 기계적특성과 성형성과의 상관관계를 도출하려는 연구가 지속적으로 수행되고 있으나 이들 기본시험에서 응력상태는 스탬핑공정 중에서 재료가 받는 응력상태와 다르고 또한 판재의 표면마찰특성과 금형조건 등을 고려하고 있지 않아 스탬핑 실적과 엄밀한 의미에서 상관성이 결여되어 있다고 간주할 수 있다. 최근에는 스탬핑공정에서 재

료가 받는 각각의 변형모드 혹은 혼합된 변형모드를 잘 재현한 모사실험(simulative test)과 유한요소법을 응용한 컴퓨터모의실험(CAT; computer simulation 또는 computer aided test)이 판재의 스탬핑 성형성평가 및 성형불량 원인규명에 활발히 적용되고 있다.

이 글에서는 판재의 스탬핑 성형성평가를 위해 소재 제조업체와 자동차업체에서 널리 사용되고 있는 2,3개의 대표적인 모사실험과 컴퓨터 모의실험을 소개하고 각각의 특징들에 대하여 논하고자 한다.

2. 디프 드로잉실험

평균 판두께를 기본적으로 변화시키지 않으면서 깊은 컵을 드로잉하는 것이 가능한지를 평가하는 실험이다. 그림 3은 원형컵의 디프 드로잉(deep drawing)공정을 나타내는 것으로 여기서는 원형블랭크의 직경을 일정한 크기로 증가시켜가면서 일정한 크기의 직경을 갖는 평면펀치로 컵을 드로잉하여 파단되기 전의 최대 블랭크 직경을 펀치직경으로 나눈 값 즉 한계드로잉비(limiting drawing ratio, $\beta^* = d_0/d_n$)로 디프 드로잉성을 평가한다. 이 한계드로잉비가 냉간압연된 판재의 집합조직 또는 결정의 선택방위에 의해 나타나는 소성이방성의 척도인 Lankford의 r 값과 매우 밀접한 관계에 있음을 그림 4에 나타내었다. 한편 한계드로잉비는 공구의 기하학적 조건, 블랭크홀더압력, 펀치속도와 공구표면 상태 등에 따라 변하므로 한계드로잉비의 측정시에 이들 조건을 명확히 규정하여야 하며 특히 마찰의 영향을 배제하기 위해 블랭크면에 폴리에틸렌판을 삽입하는 것이 바람직하다.

이 방법에 의해 판재의 한계드로잉비를 결정하는 작업은 많은 시간과 노력이 요구되고 있어 보다 간편하게 두 개의 시편을 이용하여 한계드로잉비를 결정하는 방법이 제안되

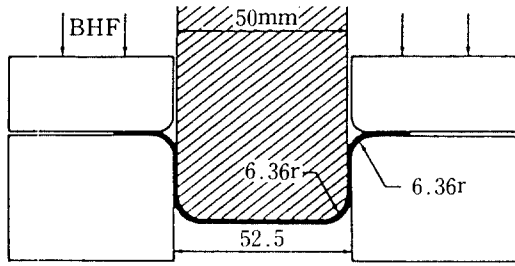


그림 3 Swift 컵성형실험에 대한 공구조건

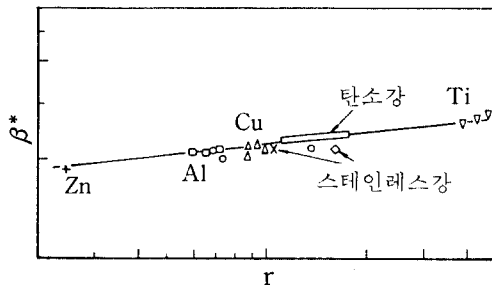


그림 4 소성이방성계수 r 과 한계드로잉비 β^* 의 상관관계

어 있다. 즉 하나의 시편은 드로잉이 가능한 크기로 하고 다른 하나는 파단이 일어날 정도로 크게 하여 드로잉실험을 한 경우 한계드로잉비는 다음식으로 주어진다.

$$\beta^* = (P_f / P_d) (\beta_a - 1.2) + 1.2 \quad (1)$$

여기서, P_f 는 파단이 발생한 경우의 파단하중, P_d 는 드로잉이 성공한 때의 최대하중, β_a 는 드로잉이 가능한 시편의 드로잉비이다. 이 방법은 간단하기는 하나 파단하중에 대한 재현성부족으로 만족할 만한 결과를 주지 못하고 있다.

소성이방성계수 r 을 측정하는 방법에는 코일의 압연방향에 대해 0° , 90° , 45° 로 인장시편을 채취하여 인장실험을 행하여 일정한 연신상태에서 폭방향과 길이방향 변형률을 측정하여 구하는 방법과 집합조직에 의한 각 방향의 탄성특성을 초음파진동에 의한 공진주파수를 이용해서 구하여 탄성계수와 r 값의 실험식을 이용하는 모듈- r 측정기

(module- r drawability tester)에 의한 방법이 사용되고 있다. 모듈- r 측정기에서는 작은 스트립형태의 강판 시편에 초음파진동을 부가하여 강판의 공진주파수를 구해서 r 값을 아래식에 의해 ± 0.1 오차로 간단히 정밀 측정이 가능하기 때문에 최근 널리 이용되고 있다.

$$r = 101.44 / (E - 38.83)^2 - 0.564 \quad (2)$$

$$E = \rho(2Lf)^2$$

여기서, ρ 는 밀도, L 은 시편길이, f 는 공진주기이다.

3. 돔 장출실험

3.1 성형한계선 도출

지난 20년 간 스탬핑 성형성평가 기술에 있어서 가장 두드러진 진보는 스탬핑공정 해석을 위한 수단으로서 원형그리드해석기법 (CGA; circle grid analysis)과 함께 성형한계선개념 (FLC; forming limit curve, 일명 Keeler-Goodwin curve^(1,2))의 도입이었다. 강판의 성형성평가척도 및 공정진단 수단으로 널리 사용되고 있는 성형한계선은 판면 내에 존재하는 주 변형률과 부 변형률의 조합에 의해 판재 두께감소가 일어나는 영역에서 국부neck (localized necking)이 발생하기 전까지 재료가 견딜 수 있는 한계변형률을 나타낸다. Keeler와 Goodwin에 의해 FLC개념이 도입된 후 이 FLC는 CGA와 함께 강판의 성형성 우열평가 및 스탬핑공정과 금형의 트라이아웃 공정에 이용되어 종래에 숙련된 기능공의 기술에 의존했던 강판의 성형난이도 (forming severity) 평가와 성형불량 원인분석 및 조치에 보다 과학적인 접근이 가능하게 되었고 여러 활용 예를 통하여 그 유효성이 입증되었다.⁽³⁾ 즉 스탬핑공정에 있어서 성형판재의 특정점에서 CGA에 의해 측정된 변형률상태를 10% 안전영역 (safety zone) —통상 시간에 따른 윤활유의 점도변

화, 금형마모, 대기온도 및 금형온도의 변화 등의 공정변수 변화를 고려하여 FLC에서 아래쪽으로 10% 정도 폭의 안전영역을 설정하여 두는 것이 일반적임을 갖는 FLC상에 표시하여 비교함으로써 성형의 가부 및 성형난이도를 쉽게 평가할 수 있다. 그림 5는 10%의 안전영역을 갖는 FLC와 그 활용예를 나타낸다. 그림 5에서와 같이 측정된 변형률점이 FLC보다 아래에 존재하면서 FLC에 가까울수록 성형이 어렵고 파단위험이 커지는 것을 의미하며 이 경우에는 공정 및 재료 변수의 개선 등의 조치로 변형률점을 FLC보다 10% 이상 낮게 하는 것이 요구되며, 또한 FLC보다 10% 이상 상당히 밑에 존재하는 경우에 판재는 충분한 안전성형 여유를 갖고 있으므로 저급재료로 재질변경 등이 가능하다는 것을 알 수 있다. 한편 변형률점이 FLC보다 위에 존재하면 넥에 의한 파단이 발생한 것을 의미하므로 또한 공정 및 재료 변수에 대한 개선이 요구된다. 예를 들면 그림 5에서 평면변형모드에서 파단이 발생하고 있는 A점($\epsilon_1=0.4, \epsilon_2=0$)에 대해서는 부 변형률이 $\epsilon_2 > 0$ 혹은 $\epsilon_2 < 0$ 값을 갖도록 부 변형률방향으로 인장하거나 드로잉을 허용하면 파단이 피해될 수 있음을 알 수 있다.

성형판넬의 변형률 측정을 위해서는 그림 6과 같이 성형전에 판재표면에 측정목적에 맞는 적당한 크기의 원형그리드를 마킹한 후 스탬핑하여 타원으로 변형한 그리드에 대해서 마이크로스코프(배율 10배, 20배 정도)나 Mylar 테이프를 이용하여 타원의 장축과 단축방향에서 주·부 변형률을 쉽게 측정할 수 있으나 광학그리드해석기(OGA; optical grid analyzer)를 이용하면 보다 빠르게 정밀한 측정이 가능하다.

FLC를 도출하기 위한 대표적 방법은 Hecker⁽⁴⁾에 의해 제안된 방법으로, 이 방법은 시편의 폭을 25mm~152mm 사이에서 변화시키고 2.5mm의 원형그리드가 에칭된 장방형 시편을 원주방향 고정비드에 의해 강하

게 클램핑하고 100mm 혹은 101.6mm(4in) 직경의 돔형펀치로 시편에 국부넙이 발생할 때까지 장축성형하여 국부넙 근방의 변형된 원으로부터 한계변형률을 구하여 주·부 변형률의 2차원 좌표상에 표시하는 방법이다 (주: 종종 성형한계도(FLD; forming limit diagram)라고 불림.) 그림 7은 Hecker의 방법에 따라 Aluminum-Killed 냉연강판에 대해 구한 FLC를 나타낸다. 이 실험에서는

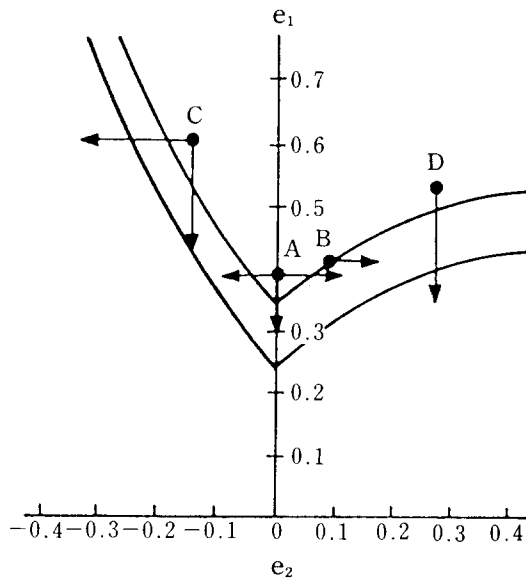


그림 5 10% 안전영역을 갖는 FLC 형상

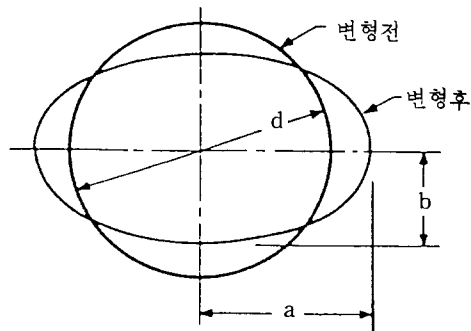


그림 6 원형그리드를 이용한 변형률측정
 $\epsilon_1 = I_n(a/d), \epsilon_2 = I_n(b/d)$
 $e_1 = \exp(\epsilon_1) - 1, e_2 = \exp(\epsilon_2) - 1$

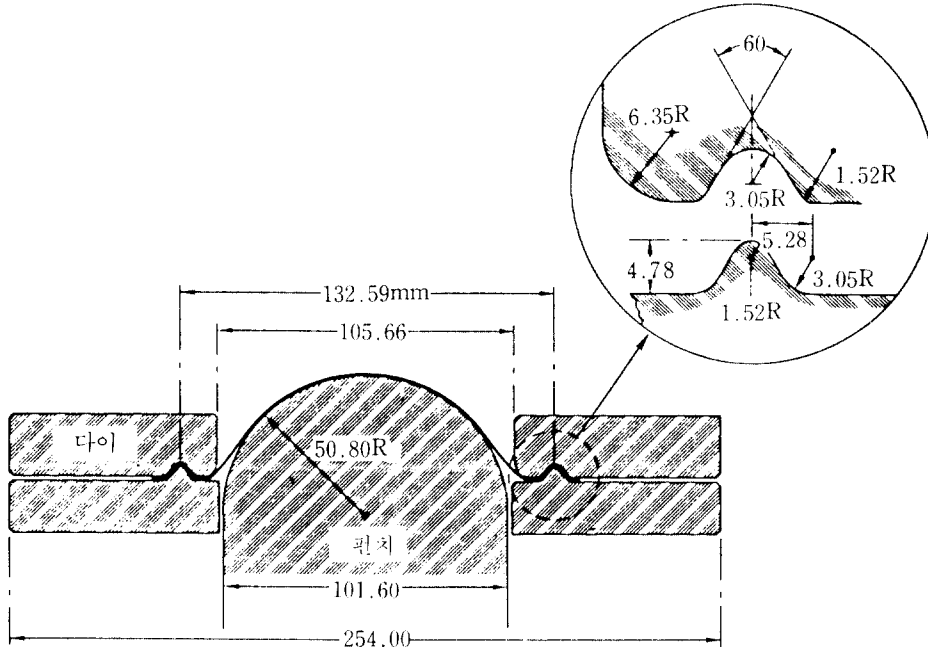


그림 7 FLC 측정을 위한 펀치장출실험

시편의 폭과 펀치와 판재간의 윤활조건의 조합에 의해 비례변형경로하에서 변형률상태를 단축인장($\epsilon_1 > 0, \epsilon_2 < 0$)에서 평면변형($\epsilon_2 = 0$) 그리고 등 2축인장($\epsilon_1 = \epsilon_2$) 상태까지 재현가능한 특징이 있다.

그림 8은 Hecker에 의해 AK-냉연강판에 대해 구해진 성형한계선으로 자동차용 강판의 대부분은 Keeler-Goodwin 밴드 내에 존재하고 있고 거의 유사한 형태의 FLC를 갖는다고 알려져 있다. 따라서 공학적 의미에서 실험적으로 매번 평가하려는 강판에 대해 많은 시간과 노력을 기울여 FLC를 도출하는 것은 실용적이지 못하므로 축적된 많은 데이터로부터 대표적인 FLC(standard FLC)를 이용하는 방법이 제안되어 복미를 중심으로 널리 사용되고 있다.¹⁵⁾ 이 방법에서는 대표 FLC와 실험이나 이론식으로부터 구한 FLC 상의 제일 낮은 점인 평면변형절편(FLC₀; plane strain intercept, 또는 한계평면변형률)을 이용하여 대표 FLC를 주 변형률축으

로 FLC₀점까지 평행이동시켜 강판의 FLC로 정의한다. 대표 FLC로는 Keeler-Goodwin curve 혹은 Hecker가 AK-냉연강판에 대해 구한 FLC가 이용되고 있다. FLC₀의 크기는 재료의 두께, 가공경화지수, 전 연신율, 항복응력 등에 의존하며 다음과 같은 실험식들이 자주 이용되고 있다.

NADDRG :

$$FLC_0 = (n/0.21) (23.3 + 14.1 * t)$$

Bethlehem steel :

$$FLC_0 = 2.78 + 3.24 * t + 0.892 * EI_{90}$$

POSCO :

$$FLC_0 = 35.22 - 0.38 * YP + 0.47 * EI_0 \quad (3)$$

여기서, n 은 가공경화지수, t 는 두께, EI_0 및 EI_{90} 는 각각 압연방향에 대해 0° 및 90° 방향에서의 전 연신율이고 YP는 항복응력이다. 그림 9는 저탄소강판과 알루미늄 판재의 성형한계도를 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 재료별 성형한계선의 레벨은 다르나 그

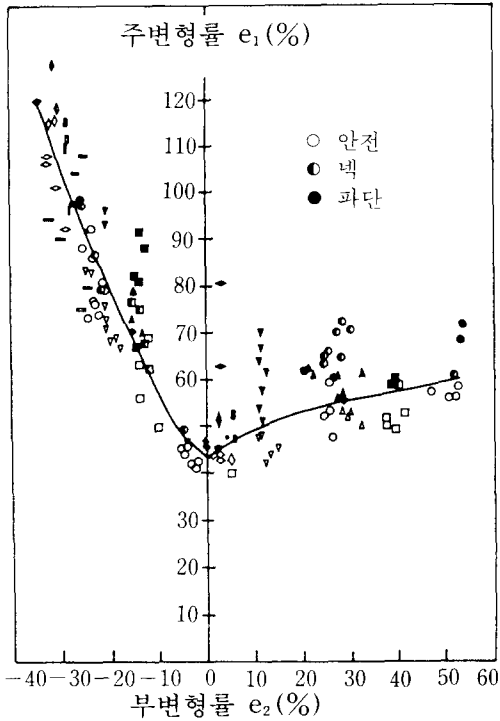


그림 8 FLC 결정을 위한 Hecker 실험방법
 (주) FLC는 각 시편에 대해 파단면 주위의 변형된 그리드들의 변형률을 측정하여 결정한다. 즉 그림에서 검은원은 파단이 발생한 그리드에 대한 것이고, 흰원은 파단면으로부터 멀리 떨어져 있는 그리드에 대한 것이고, 부분적으로 검은 원은 파단면 근처에 있어 넥의 영향을 받은 그리드에 대한 것이다. 따라서 각 시편에 대한 성형한계는 안전변형 영역과 넥 영향영역의 경계로 주어진다.⁽⁴⁾

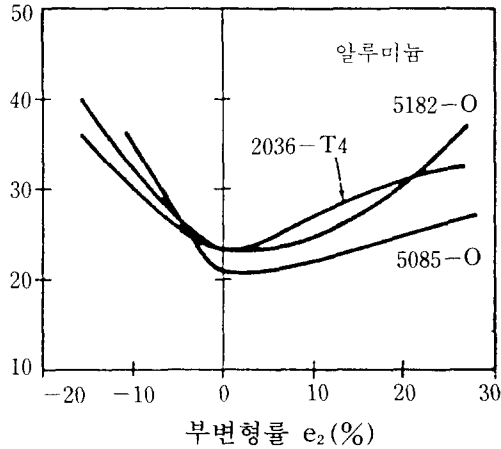
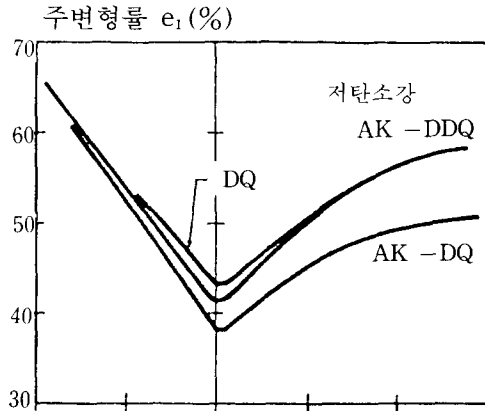


그림 9 저탄소강판과 알루미늄판재에 대한 FLC

형태에서는 큰 차이를 보이지 않고 있으므로 대표적인 형상의 FLC를 선택하여 대표 FLC를 주 변형률축으로 FLC₀의 값까지 평행이동하면 각 재료의 성형한계도를 근사적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

3.2 한계돔높이 도출

FLC는 앞에서 논한 바와 같이 스템핑공정에서 판재의 성형성해석과 성형불량원인 분석에 유용한 도구를 제공하고 있으나 돔장출 실험에 의해 FLC를 도출하는데는 많은 수고

가 필요하고 또한 자동차용 강판의 대부분은 Keeler-Goodwin 밴드 내에 존재하고 있어서 재료의 성형성 우열을 정량적으로 확실히 판정하기가 곤란한 점이 있다. 한편 판재의 전반적인 성형성은 FLC에 의해 나타내지는 국부넙 발생에 대한 재료의 한계변형능력과 금형과의 접촉면에서 재료가 얼마만큼 균일변형하여 변형집중을 억제할 수 있는나에 따라 결정된다. 따라서 FLC만으로 실제 스템핑공정에서 재료의 스템핑성형성을 정확히 평가하였다고는 볼 수 없고, 재료의 한계변형능

력과 금형접촉면에서의 균일변형능력에 의한 영향을 동시에 고려할 수 있는 기존의 간단한 장출실험방법으로 유럽에서의 Erichsen 실험, 북미에서의 Olsen 실험 그리고 일본에서의 Fukui 실험 등이 각각 널리 사용되고 있다. 그러나 이들 실험들은 어느 것이나 모두 반경방향으로의 재료의 드로잉은 피할 수 없으며 결과적으로 장출-드로잉변형에 의해 반복실험에서 재현성(reproducibility)이 떨어지고 또한 작은 펀치직경을 사용함으로써 상당한 굽힘변형을 수반하여 두께 의존성을 크게 하는 단점이 지적되고 있다.

이들 결점을 극복하기 위하여 Hecker에 의해 제안된 새로운 장출실험방법은 FLC 측정실험방법에 대한 변형된 형태로 정사각형 시편의 전체원주를 고정비드로 강하게 클램핑하여 재료의 반경방향 드로잉을 억제하고 무운활상태에서 상대적으로 큰 직경(50, 75, 100mm)의 돔형펀치를 사용하여 시편이 파단때까지 완전구속 장출성형(full dome test)하여 파단시 돔높이 h^* 로 재료의 장출성형성을 평가하는 방법이다. 이 실험에서 한계펀치높이의 크기는 재료의 한계변형 능력과 균일변형능력을 동시에 고려한 재료의 장출성형성에 대한 척도가 된다. 그림 10은 무운활상태와 윤활상태에 대한 완전구속 장출실험

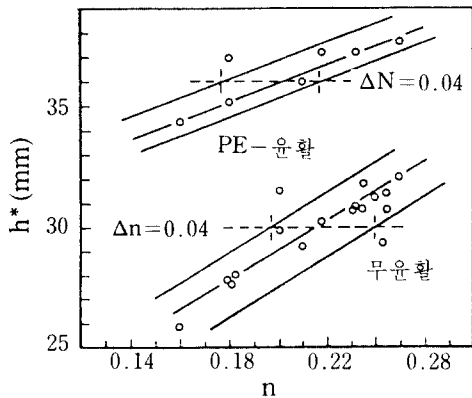


그림 10 건조마찰과 윤활마찰상태에서 n 과 펀치높이의 관계

결과로 돔높이 h^* 는 장출성형성의 척도인 가공경화지수 n 에 비례하며 또한 윤활성이 향상될수록 재료의 변형이 균일하게 분포하여 돔높이가 증가함을 알 수 있다. 한편 무운활상태로 실험한 시편의 위험부위에서 변형률 상태는 $\epsilon_2/\epsilon_1=0.1\sim 0.2$ 사이에 존재하고 일반적으로 스템핑공정에서 관널의 위험부위에서 변형률 상태와 유사하므로 무운활상태에서 돔출실험 결과는 재료의 스템핑성형성에 대한 일반적 지표로 활용가능함을 알 수 있다.

돔높이/펀치반경

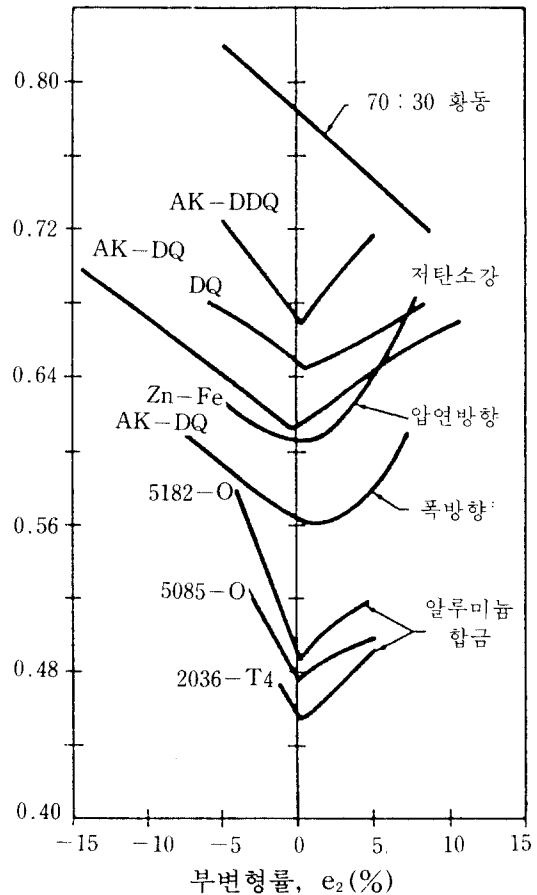


그림 11 저탄소강판과 알루미늄판재에 대한 부분 변형률과 LDH계

이 돔장출실험은 Ghosh⁽⁶⁾와 Ayres⁽⁷⁾에 의해 재료의 장출과 어느 정도의 드로잉변형을 포함하는 실험방법으로 발전되어 한계돔높이(LDH; limiting dome height) 개념이 도입되었다. Ghosh는 사각시편의 폭, W을 117mm~138mm 사이에서 3mm의 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 함수로 나타내었다. 이 방법은 스탬핑판넬의 파단위험부위에서 부 변형률을 측정하여 돔장출실험에서 동일한 부 변형률을 주는 시편의 폭을 결정하여 그 폭에서 입하소재에 대한 주기적인 한계돔높이평가로 통계적 스탬핑 공정관리에 이용하고 있다.

그림 11은 저탄소강판과 알루미늄강판에 대해 측정한 부 변형률에 따른 한계돔높이를 나타낸다. 일반적으로 한계돔높이는 부 변형률(혹은 시편폭)에 따라 V자 형상을 이루고 있고, FLC 형태와 같이 평면변형모드 근처에서 가장 낮은 값을 갖는다. 그러나 그림 9와 비교하여보면 재료별로 장출성형성의 우열이 확실하게 나타남을 알 수 있다.

한편 Ayres는 돔장출실험을 이용하여 보다 간단하게 장출성형성을 평가하는 시험법을 도입하였는데 그는 스탬핑 성형불량의 약 85%~90%가 부 변형률이 $-0.1 < \epsilon_2 < 0.2$ 범위인 평면변형모드 근처에서 발생한다는 것에 주목하여 LDH 곡선에서 평면 변형모드에 대응하는 폭에서 최소 한계돔높이(LDHo; minimum of limiting dome height)를 스탬핑 성형성 평가척도로 사용하였다. 이 LDHo 값은 앞에서 논한 Ghosh 실험방법에 의해 최소한계돔높이를 주는 임계 폭, W_0 을 결정한 후(예비실험)에 이 폭에서 5회 반복실험(본실험)하여 평균값으로 취한다. 이 방법에 의하면 돔 높이가 높을수록 파단발생

위험판넬의 스탬핑에 사용될 강판의 성형성이 양호하다고 할 수 있다. 이와 같이 스탬핑 성형성평가 척도로 한 점의 값, LDHo을 사용하는 것은 판넬에 대한 원형그리드 해석을 수행할 필요가 없고 시험 시편수가 줄어드는 장점이 있다.

한편 평면변형에 대응하는 임계폭, W_0 는 펀치와 시편표면의 마찰에 의한 구속력의 크기에 의해 정해지는데, 통상 자동차용 냉연강판의 경우 W_0 는 126mm~132mm 사이에 존재하고 도금강판의 경우는 이 보다는 낮은 범위인 123mm~129mm 사이에 있다고 보고되고 있다. 이는 도금강판의 경우에는 도금층의 표면마찰특성이 냉연강판보다 일반적으로 불량하고 또 불균일하기 때문에 작은 폭에서 큰 폭에서와 같은 구속효과를 갖기 때문이다. 최근에는 매 코일마다 임계폭 W_0 를 결정하는 작업은 매우 번거로우며 시간이 소요되므로 폭을 일정하게 고정하여 실험을 행하는 방법이 널리 이용되고 있는 실정이다.⁽⁹⁾

그림 12는 LDHo와 스탬핑결과의 비교를 나타낸 것으로 그림에서와 같이 LDHo 값은 제한된 조건에서 스탬핑실적과 잘 일치하고 있고 재료별로 스탬핑 성형성 우열을 충분히 구별해주는 장점이 있어 이 방법은 현재 북미를 중심으로 스탬핑라인에 투입되는 소재에 대한 적정성여부의 평가와 스탬핑공정 및 자동차용 강판 제조공정에 대한 통계적 품질관리에 활용되고 있다. 그러나 LDH는 각종 공정변수의 영향을 받는 시스템특성 값으로 LDH값은 실험조건-금형 및 시편의 표면조건, 시편의 벡상태, 클램핑력, 경계(마찰)조건, 성형온도와 펀치속도조건 등의 변화에 따라 상당히 산포된 결과를 나타낸다.^(8,9) 실험데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서는 특히 금형과 시편 간의 마찰조건은 장출성형공정에서 변형률분포를 결정하므로 잘 제어되어야 하고 재현되어야 한다. 통상 각 시편표면에 부착되어 있는 압연유 등의 영향을 배

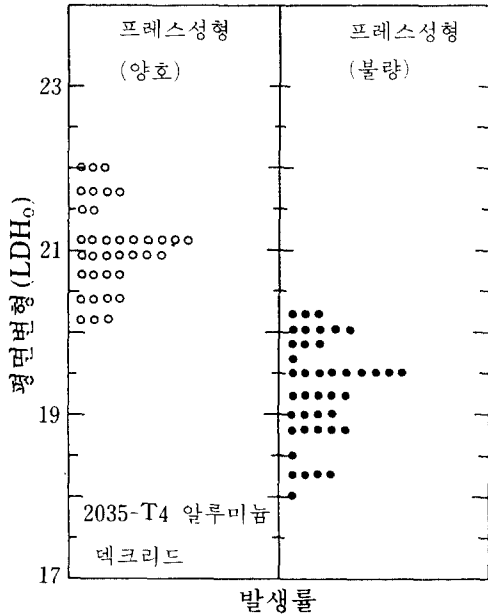


그림 12 LDH와 프레스 실적의 상관성

제하기 위해서는 기름을 완전히 제거하여 건조마찰상태에서 실험하여야 하나 이 경우 자주 반복실험에서 불규칙적인 변화에 따른 재현성이 문제가 되어 해결책으로 시편의 표면을 mineral spirit 등과 같은 용제로 세척하여 기름을 제거한 후 4.6cSt 정도의 저점도 유를 도포하여 실험하는 방법이 추천되고 있다. 따라서 동장출실험에 의해 평가되는 LDH시험법이 재현성이 있는 성형성 평가시험법으로 가치를 인정받기 위해서는 모든 영향인자에 대한 정확한 평가와 함께 규격화된 시험법의 확립이 요구되고 있어 북미 디프드로잉 연구그룹(NADDRG: North American Deep Drawing Research Group)에서는 본 LDH 시험법에 대한 공동연구를 통해 안정된 재현성을 갖는 LDH 시험조건에 대한 기준을 제시하고 있다.

4. 평면변형인장실험

종래의 단축인장실험이 금형과 재료와의

접촉에 따른 마찰의 영향에 의한 교란과 굽힘변형을 수반하지 않고 재료 고유의 특성으로 성형성을 평가하는 척도로서 자주 이용되고 있다. 그러나 단축인장에서의 변형은 폭방향 수축을 포함하는 드로잉모드로 이 변형 모드에서는 앞에서 논한 바와 같이 스템핑공정에서 대부분의 파단불량이 발생하는 평면변형모드 하에서 재료의 성형성에 대한 충분한 정보를 제공하지 못한다. 따라서 인장시편의 일부에서 폭방향변형을 구속하여 평면변형상태를 재현하여 평면변형상태하에서 재료의 성형성을 평가하려는 실험방법에 대한 연구가 일부 행해지고 있다. 예를 들면 두꺼운 재료에 대해서는 폭방향에 홈을 가공하여 시편폭에 비해 게이지 길이를 작게 하여 인장실험하면 비 변형영역이 폭방향수축을 구속하여 변형률상태는 평면변형에 가까워진다. 또한 그림 13에서와 같이 얇은 판재의 경우에는 판의 양면에 샌드위치 형태로 구속판을 전자빔 용접하여 인장하면 평면변형이 얻어진다.⁽¹⁰⁾ 통상사각시편의 경우 게이지 길이·폭의 비를 1/4로 하면 부 변형률이 영인 평면변형이 확보된다.

한편 Sang과 Nishiyama⁽¹¹⁾는 길이방향으로 평행한 칼날을 원형노치를 갖는 인장시편 게이지부의 양표면에 클램핑하여 폭방향변형을 구속하는 실험방법을 통하여 평면변형에서 파단한계를 도출하였다. 그림 14는 원형

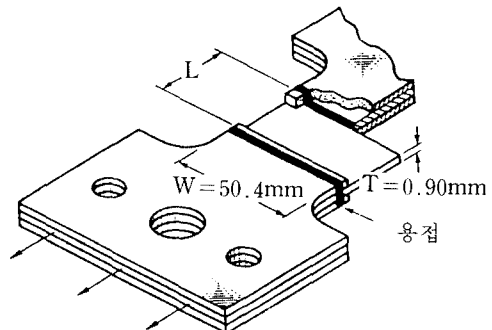


그림 13 평면변형 인장시편의 개념도

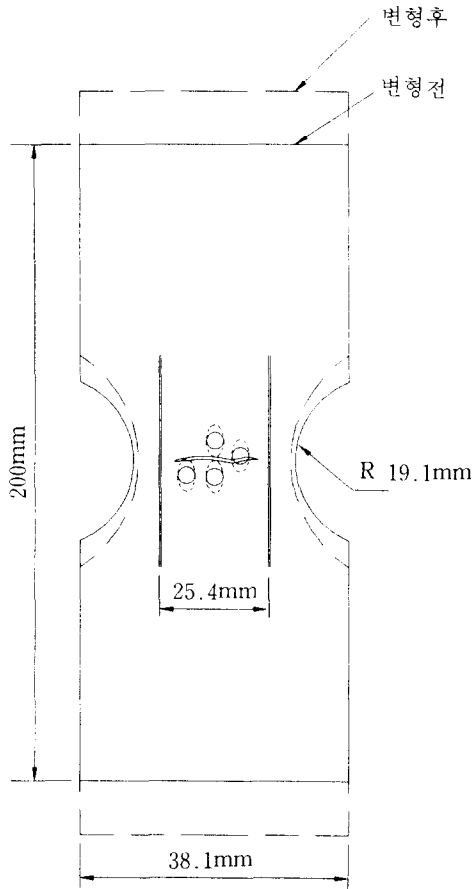


그림 14 시편의 평면변형상태

그리드가 에칭된 시편의 변형전과 변형후의 형상을 나타낸 것이다. 여기서 그들은 육안으로 검출가능한 넥 발생위치는 길이방향으로 두께변화율이 0.1에 달하는 위치에 해당한다고 간주하여 그 위치에서 두께를 정밀측정하여 한계평면변형률을 결정하였다.

5. 평면변형장출실험

5.1 한계펀치높이 도출

Kim^(12,13)은 앞에서 언급한 Ayres의 둠장출실험과 비교하여 재현성이 높고 안정적으로 스템핑성형성을 평가할 수 있는 평면변형장출 실험방법을 개발하여 스템핑실적과 그

결과가 잘 일치함을 보였다. 이하에 동 실험 기술에 의한 스템핑성형성 평가방법을 소개하고 또한 초음파두께측정기(UTG; ultrasonic thickness gauge)를 응용하여 한계평면 변형률을 간단히 도출할 수 있는 방법에 대하여 상세히 설명한다.

그림 15(a), 15(b)는 평면변형상태에서 재료의 파단을 잘 재현하기 위한 평면변형장출 실험의 개요를 나타낸다. 이 실험에서는 둠장출실험에서와 같이 일정한 폭의 사각시편을 이용하여 시편의 원주방향 가장자리를 상하형 다이에 가공된 고정비드로 강하게 클램핑하여 다이 내부로 재료의 유입을 방지하고 반 실린더형의 말안장형태로 가공된 펀치를 이용하여 장출성형하여 시편표면의 전면에 평면변형을 유지하면서 재료의 파단시에 한계펀치높이(LPH; limit punch height) 또는 파단면 근처에서 측정한 한계평면변형률의 크기에 의해 재료의 성형성에 대한 우열을 평가한다. 따라서 동 실험에서 LPH가 높은 판재는 스템핑성형성이 좋고 한편 LPH가 낮은 판재는 스템핑성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다.

이 실험에서는 펀치상승에 따라 구속상태에 있지 않는 시편폭의 일부가 유입되어 점차 펀치를 감싸주는 “c”자 형태로 변형함에 따라 “c”자의 플렌지부에 의해서 시편의 폭방향변형이 기하학적으로 구속되어 더 이상 재료의 폭방향 유입이 억제되고 시편에는 길이방향으로 장출변형만이 존재하게 되어 평면변형상태가 얻어진다.

그림 16(a), 16(b)는 폭이 126mm인 사각시편을 각각 평면변형장출실험과 둠장출실험하여 OGA를 이용하여 시편의 길이방향으로 측정된 주 변형률 및 부 변형률 분포를 나타낸다. 주 변형률 분포는 두 실험의 경우에 큰 차이가 없으나 부 변형률의 경우에는 서로 상이한 결과를 나타내고 있다. 즉 평면변형장출실험의 경우는 시편의 전면에 걸쳐 평면변형상태가 확보되고 있으나 둠장출실험의

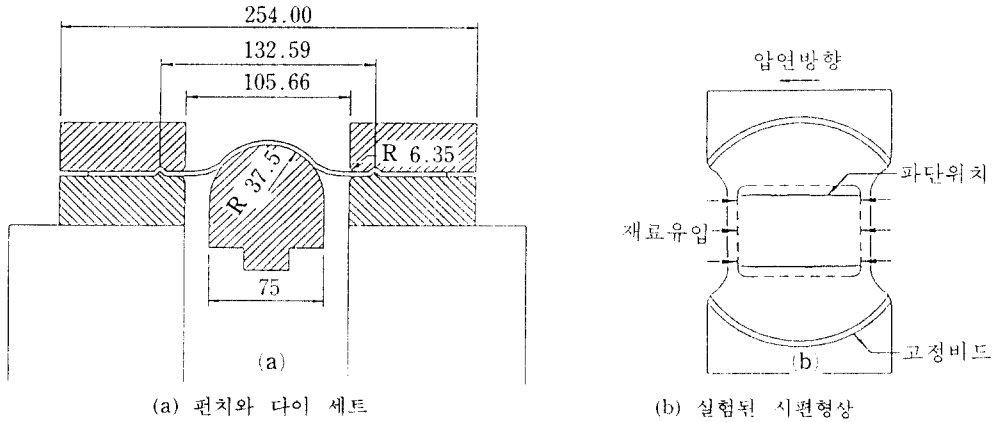


그림 15 평면변형장출실험의 개념도

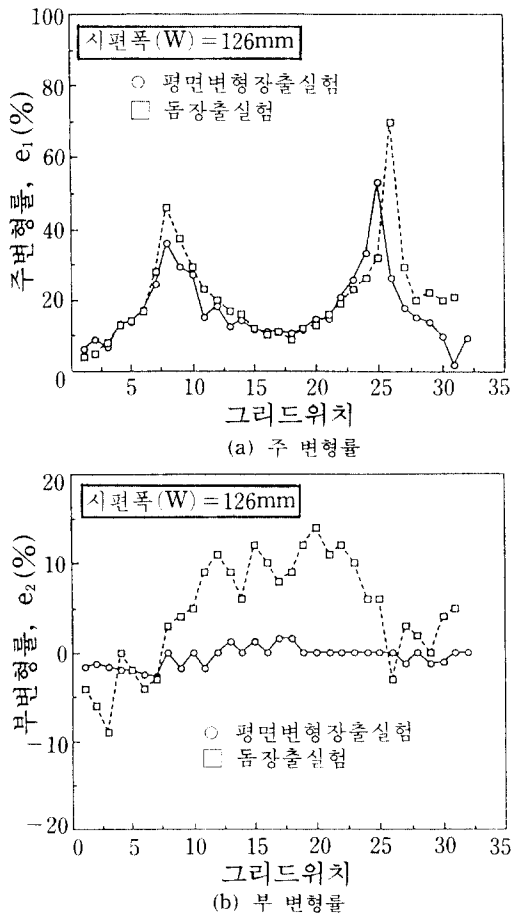


그림 16 평면변형장출실험과 돔장출실험에서 변형률분포 비교

경우에는 최대 주 변형률 위치에서만 평면변형이 이루어지고 있고 그리드 위치의 중앙인 펀치의 극점으로 갈수록 양의 부 변형률이 최대 13%까지 증가하여 시편이 완전한 평면변형상태에 있다고 볼 수 없다.

평면변형장출실험에서 한계펀치높이는 실험적으로 재료의 전 연신율 EL_0 과 항복응력 YS 에 의해 다음식으로 표시된다.

$$LPH = 30.096 - 0.364 * YP + 0.203 * EL_0 \quad (4)$$

그림 17은 28개의 코일로부터 채취한 자동차용 냉연 및 표면처리강관에 대해 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이와 1000톤 복동식유압프레스를 활용한 610mm*530mm 크기의 대형 사각컵 스탬핑실적과의 관계를 나타낸다. 한계펀치높이가 32.5mm 이하인 판재에서는 스탬핑결과 사각컵의 코너벽 부위에서 파단이 발생하였고 그 이상의 값을 갖는 판재에서는 안전하게 성형이 이루어졌다. 따라서 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이는 스탬핑결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 이 실험이 실제 자동차판넬을 대상으로 한 실물 스탬핑실험은 아니지만 평면변형장출실험에 의한 한계펀치높이는 자동차판넬의 스탬핑성형여부의 사전 예측 및 재료의 성형성우열을 가리는데 효과적으

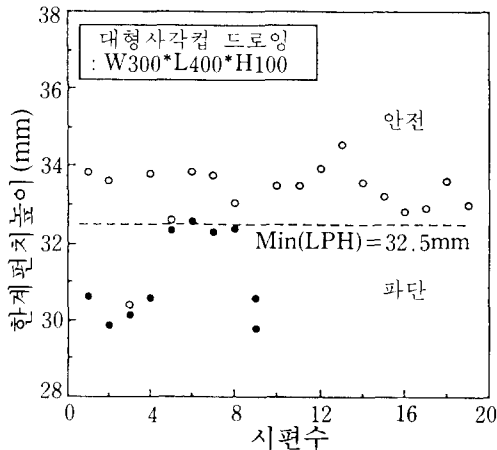


그림 17 대형 사각컵성형에서 LPH와 프레스 실적의 상관관계

로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 실험기술은 자동차용 판재제조업체에 있어서 제조소재에 대해 스탬핑성형성에 관한 통계적 품질보증(statistical quality assurance) 및 스탬핑공정에서 공정관리수단으로 활용가능하다.

한편 Demeri⁽¹⁴⁾는 굽힘변형이 우세한 경우에 평면변형 하에서 장출성형성을 평가할 수 있는 각 장출-굽힘 실험방법(angular stretch-bend test)을 제안하였다. 이 실험에서는 76mm 폭의 사각시편을 평행한 고정비드로 크램핑하고 반경이 작은 뿔기형 펀치를 사용하여 장출성형하고 파단시의 펀치높이로 성형성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 스탬핑실적과 잘 일치한다는 보고는 없으나 일부업체에서는 LDH와 함께 자동차용판재의 품질 평가에 활용하고 있다.

5.2 성형한계선 도출

평면변형장출실험에서는 사각시편의 폭이 126mm인 경우에 시편의 길이방향으로 전면에 걸쳐 부 변형률이 영인 평면변형상태가 얻어지고 있고 소성변형중에는 체적변화가 없으므로 파단면 주위의 주 변형률 ϵ_1 두께

변형률로부터 구할 수 있다. 한계평면변형률 ϵ_1 은 실험전 시편에 원형그리드를 새겨놓고 장출성형 후 파단면 주위의 변형률들을 OGA를 활용하여 측정함으로써 구할 수 있으나 시편에 원형그리드를 새기지 않고도 파단면 근방의 시편 두께 t 를 정밀측정하면 다음식에 의해 한계평면변형률을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= \ln(t/t_0) \\ \epsilon_1 &= \exp(-\ln(t/t_0)) - 1 \\ &= \text{FLC}_0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ϵ 과 e 는 각각 대수변형률과 공학 변형률을 나타낸다. 한편 t_0 는 변형전 시편의 두께이다.

파단면의 두께측정에는 마이크로미터 또는 초음파와 X-선에 의한 측정방법이 이용될 수 있으나 현실적으로 초음파를 이용한 두께 측정이 가장 효과적이다. 이 방법은 측정하려는 물체에 원형단면의 접촉침을 접촉시켜 초음파음향에너지를 방사하여 빔이 물체를 관통하여 뒷면에서 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 물체의 두께를 비파괴적으로 정밀측정하는 방법이다. 초음파측정기는 널리 알려진 Krautkramer Branson사의 모델 CL-304를 이용하면 파단면 주위의 시편두께를 0.001mm까지 정밀측정 가능하며 본 모델의 경우에는 접촉침은 직경이 4.76mm인 원형단면을 갖고 있어서 두께를 정밀측정하기 위해서는 측정면이 평면을 유지하여야 하고 곡면을 갖는 경우에는 정밀측정이 곤란하다. 그러나 평면변형장출 실험의 경우는 파단면 주위의 시편형상은 항상 평면을 유지하고 있어 초음파두께측정기를 이용한 정밀한 두께측정이 용이하다. 두께측정은 가능한한 파단면 근처에서 이루어져야 하고 또한 국부 변 및 파단발생에 의한 두께 감소에 따른 측정곤란 및 측정오차의 영향을 배제하기 위해서 접촉침의 가장자리를 파단면의 경계에 일치시켜서 측정한다. 그러면 평균적으로 파단

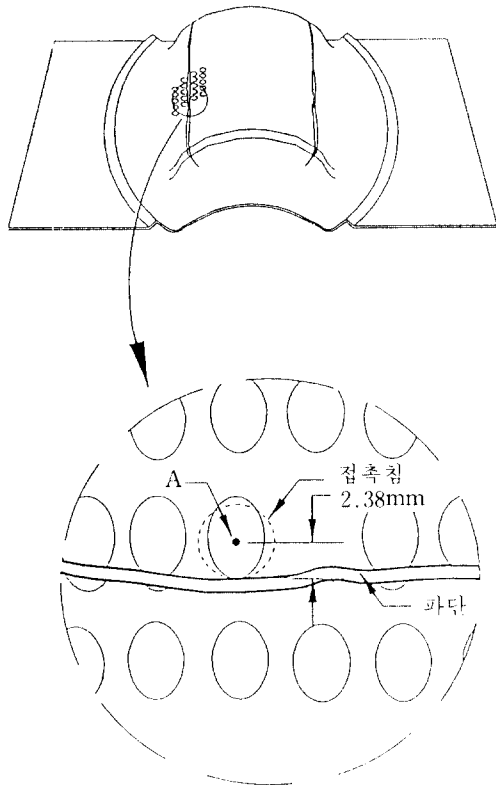


그림 18 파단면 근처의 두께측정 방법에 대한 개념도

면에서 약 2.38mm 떨어진 접촉침의 중심 A 위치에서 두께가 측정되고 있으므로 식 (5)에 의해 계산한 주 변형률, 즉 한계평면변형률은 거리상으로 파단면에 접하고 있는 원형 그리드에 대해 OGA를 이용하여 측정된 한계평면변형률과 같다고 생각할 수 있다. 그림 18에 초음파 두께측정기를 이용한 두께측정의 개요를 나타내었다.

그림 19는 초음파두께측정기를 이용한 두께측정에 의해 계산된 FLCo와 OGA에 의해 측정된 FLCo의 비교를 나타낸다. 두께측정으로부터 구한 FLCo는 OGA에 의해 측정된 FLCo와 거의 1% 오차범위 내에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 평면변형장출실험된 시편에 대한 파단면 주위의 두께정밀측정에 의한 FLCo의 도출은 시편에 그리드를 새기는 작업 및 변형 그리드의 정밀측정을 위한 장비를 필요로 하지 않아 스탬핑공정에서 재료의 성형한계선을 도출하는데 쉽게 이용할 수 있는 장점이 있다. 본 실험에서 구한 FLCo 값을 이용하면 이론적으로 성형한계도의 정확한 예측이 가능하고⁽¹⁵⁾ 또한 이 FLCo 값은 3차원 스탬핑공정을 이상화한 2차원 단면에 유한요소해석시^(16,17)에 필요한 재료의 성형한계에 대한 데이터로 유익하게 활용될 수 있다.

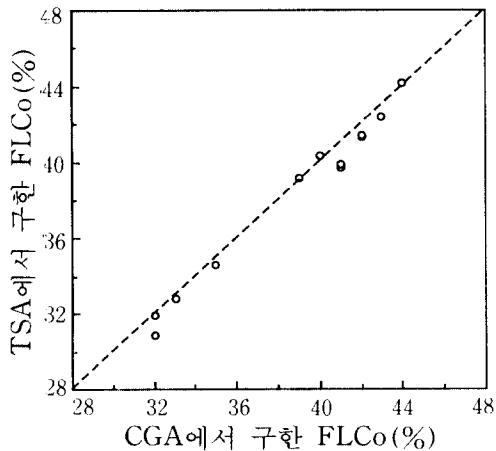


그림 19 두께측정에 의해 계산된 FLCo와 OGA에 의해 측정된 FLCo 간의 상관관계

6. 컴퓨터 모의실험

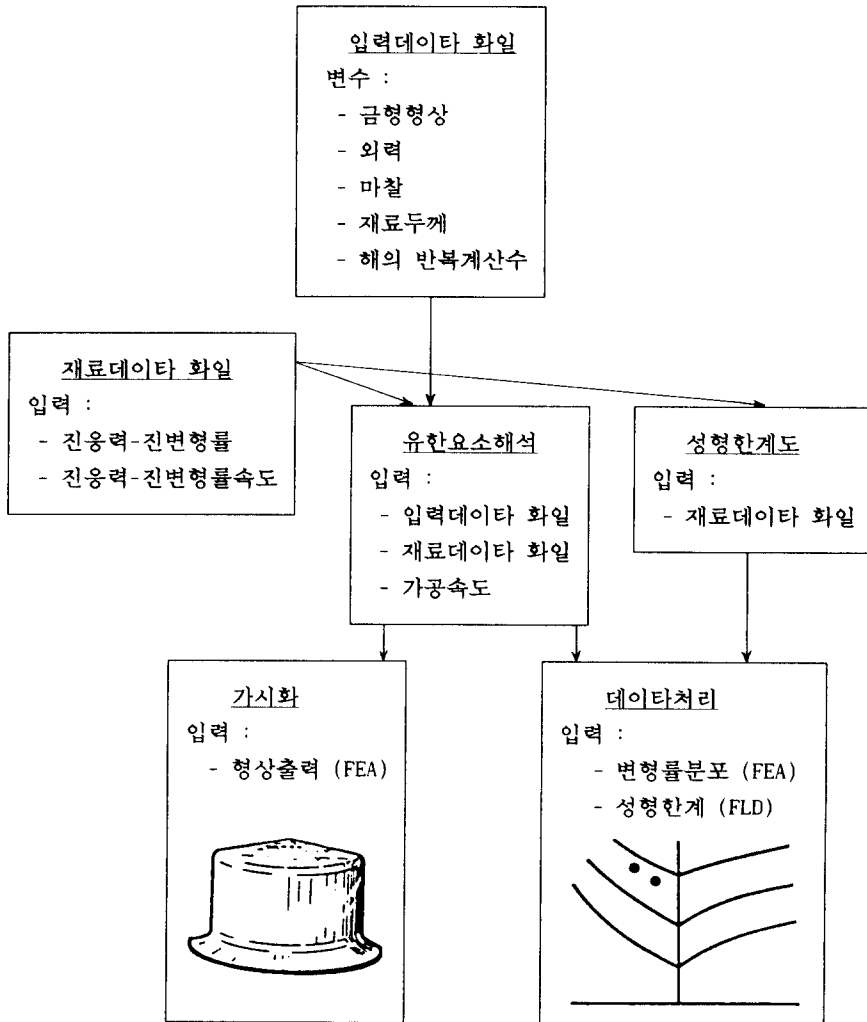
근년에 이르러 제품의 라이프 사이클이 급속히 짧아지고 있어, 시간과 비용이 많이 소요되는 시행착오에 의한 스탬핑금형의 제작 및 적정가공조건의 도출은 신제품 개발에 막대한 지장을 초래하고 있다. 따라서 금형의 설계 및 수정시간을 단축하기 위하여 금형의 설계단계에서 최종 성형결과를 신속하게 예측할 수 있는 능력이 절실히 요구되었고, 금형설계 및 성형해석에 있어서 컴퓨터를 이용한 유한요소해석(FEA; finite element analysis)에 의한 모의실험기술이 개발, 응용되고

있다.

유한요소법은 연속체인 물체를 유한요소로 분할하여 각 요소들에 대한 가상일정리를 유한요소정식화하고 변위 및 하중경계조건하에서 강성매트릭스를 풀어 매 증분변형에 있어서 변형률증분과 응력증분을 구하여 재료내부의 변형률과, 응력상태를 갱신해가는 수치해석방법이다. 따라서 이런 유한요소해석을 금형의 설계단계 또는 스탬핑공정에 적용하면 각 인자(금형형상, 가공조건, 재료특성

등)의 독립적 변화에 따른 성형공정에 대한 해석과 가공결함 발생유무를 사전에 평가할 수 있고 또한 성형결함을 방지할 수 있는 최적성형조건 및 최적재료의 선정으로 신제품의 개발기간단축과 비용 절감이 가능한 특징이 있다.

탄소성 비선형거동을 해석하기 위한 범용 프로그램으로 널리 알려진 것으로는 ABAQUS, NIKE, DYNA-3D, MARC 등이 있고 판재성형해석 전용으로는 PAM-STAMP,



SHEET-3, ROBUST 등이 있으나 아직 실제 자동차 내·외 판넬의 복잡한 3차원 형상에 대해서는 만족할 만한 결과를 얻지 못하고 있어서 지속적인 연구가 진행되고 있다. 이런 스탬핑공정에 대한 유한요소해석에 있어서는 3차원 금형에 대한 정확한 모델링, 재료의 탄소성 비선형거동(구성식) 및 바인더면의 구속조건, 그리고 금형과 판재 간의 마찰조건에 대한 정확한 처리가 해의 정밀도를 좌우한다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 그림 20은 스탬핑공정에 있어서 성형난이도 평가를 위해 유한요소해석을 이용한 소프트웨어의 구성도를 나타낸다.

한편 유한요소법을 이용한 컴퓨터원용실험은 에이츠의 조합실험(Yates factorial experiment)⁽²¹⁾ 혹은 타구치의 직교배열실험(Taguchiorthogonalarray experiment) 등과 같은 효과적 계획실험법(designed experiment)⁽²²⁾과 병행하면 각 인자의 상호작용(interaction)을 배제하면서 계산회수를 줄이고, 스탬핑 성형품질에 미치는 각 인자의 영

향을 정량화하고 최적화하는 것이 가능하다.⁽²³⁻²⁵⁾

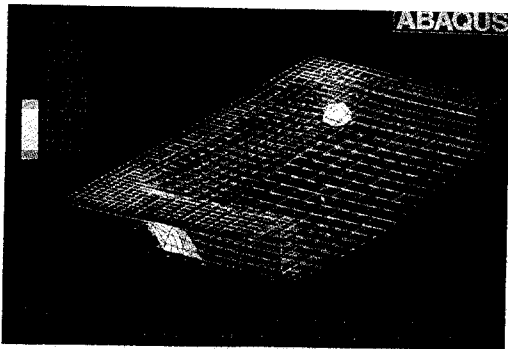
표 1은 오일팬의 스탬핑 성형공정에 대한 해석 예를 나타낸 것으로 통상 7개 인자의 영향을 평가하기 위해서는 7개 인자의 전조합(full factorial)으로 128(=2⁷)회의 모사실험이 필요하나 계획실험법에 따르면 부분조합(partial factorial)에 의한 8회만의 실험으로 줄일 수 있다. 표 1의 행렬은 계획실험법에 의한 각 실험조건을 나타내고, 가장 오른쪽 열은 각 실험조건에 따라 유한요소해석에 의해 계산한 결과로부터 구해진 안전여유변형률을 나타낸다.⁽²⁴⁾ 그림 21(a), 그림 21(b)는 각각 판넬의 주 변형률 e_{11} 분포와 부 변형률 e_{22} 분포를 나타낸 것으로 안전여유변형률은 변형이 집중하고 있는 위험부위에서 최대 주변형률과 그 위치에서의 FLC상의 값과의 차이로 나타낼 수 있다. 표 1로부터 오일팬 성형공정에서 성형성에 가장 영향을 미치는 인자는 소성이방성계수이고 그 다음은 블랭크 홀더력과 성형깊이임을 알 수

표 1 오일팬 성형의 시뮬레이션 조건과 결과

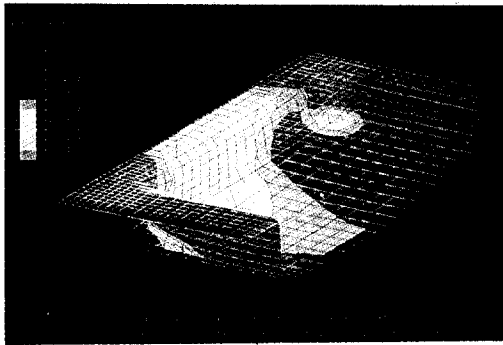
Run No.	r value	n value	Friction coeff.	Die radius	Punch radius	Part depth	Blank force	Safety margint
1	2.2	0.25	High	8.9mm	38mm	245mm	High	-22
2	2.2	0.25	High	2.5mm	31.8mm	238mm	Low	- 6
3	2.2	0.19	Low	8.9mm	38mm	238mm	Low	+7
4	2.2	0.19	Low	2.5mm	31.8mm	245mm	High	- 9
5	1.0	0.25	Low	8.9mm	31.8mm	245mm	Low	*
6	1.0	0.25	Low	2.5mm	38mm	238mm	High	- 5
7	1.0	0.19	High	8.9mm	31.8mm	238mm	High	- 5
8	1.0	0.19	High	2.5mm	38mm	245mm	Low	*
Opt.	2.2	0.25	Low	8.9mm	38mm	238mm	Low	+16

(주) * : 음의 매우 큰 안전여유변형률.

편치, 다이 및 플렌지영역에서 각각의 마찰계수값 : High=0.18/0.08/0.17, Low=0.12/0.08/0.02, 블랭크 홀더력 : High=편치력, Low=(1/3)편치력



(a) 주 변형률



(b) 부 변형률

그림 21 오일팬 성형공정에 있어서 변형률 분포

있고 이는 실제 스탬핑결과와 잘 일치한다. 한편 각 인자의 최적조합을 가장 아래행에 나타내었고 이 조건에 의한 계산결과 16%의

안전여유변형률이 얻어져 실제 충분히 안전 성형이 가능함을 알 수 있다.

그림 22는 요시다 좌굴실험⁽²⁶⁾에서 강판의 좌굴특성에 미치는 강판의 기계적특성 및 두께의 영향을 평가하기 위하여 유한요소해석한 예로 좌굴된 시편의 형상과 좌굴높이 U_3 를 나타낸다. 유한요소해석에는 범용코드인 ABAQUS를 이용하였고 S9R5 쉘요소와 두께방향으로 7점적분을 행하였다. 표 2는 강판의 좌굴발생시기 및 좌굴높이에 미치는 강판의 기계적특성 및 두께의 영향을 정량화하기 위해 실험계획법에 의한 직교배열에 따라 수치모사실험을 수행하여 분석한 결과이다.⁽²⁵⁾ 표 2에서 좌굴발생시기는 시편의 중심부에서 평면외 방향으로 0.1mm 높이의 좌굴이 발생하였을 때의 시편의 인장길이를 평가하였고, 좌굴높이는 1% 인장되었을 때 시편의 중심부에서 평면외 방향으로 가장 많이 좌굴한 높이로 평가하였다. 그림 23과 그림 24는 각각 표 2의 결과를 이용하여 좌굴높이 및 좌굴발생시기에 대해 평균분석(ANOM; ANalysis Of Mean)을 행하여 구한 인자의 수준변동에 따른 S/N 비를 나타낸다. 평균분석결과로부터 좌굴높이에는 항복응력과 시편두께가 크게 영향을 미치고 소성이방성계수에도 어느 정도 의존함을 알 수 있다. 한

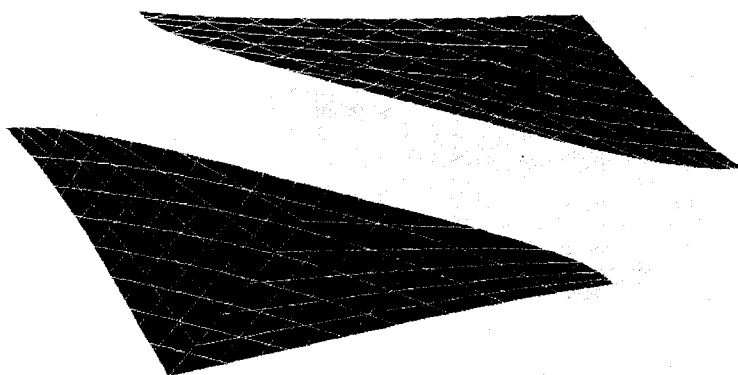


그림 22 좌굴된 시편의 형상과 좌굴높이 분포

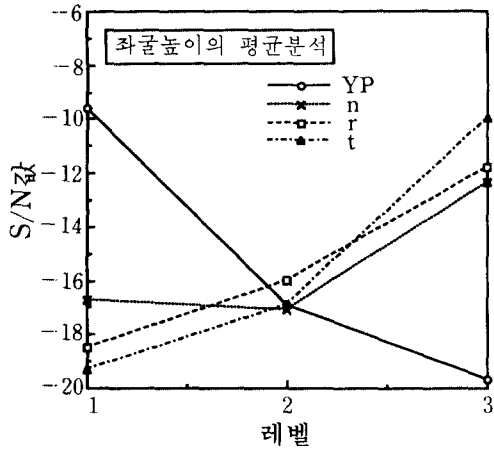


그림 23 좌굴높이에 대한 수준변동에 따른 S/N 비
여기서 각각의 인자에 대한 레벨은 YP의
경우 1=12.0kg/mm², 2=15.0kg/mm², 3
=18.0kg/mm², r값의 경우 1=1.2, 2=
1.6, 3=2.0, n값의 경우 1=0.21, 2=
0.24, 3=0.27이고 t의 경우 1=0.75mm,
2=0.80mm, 3=0.85mm이다.

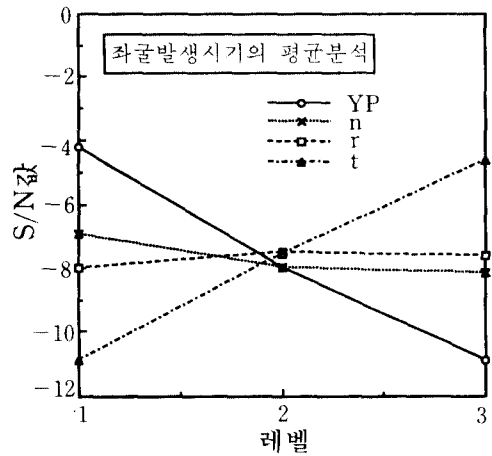


그림 24 좌굴발생시기에 대한 수준변동에 따른 S/
N비

편 좌굴발생시기에 미치는 인자의 영향은 항
복응력과 시편두께가 역시 중요하나 소성이
방성계수의 영향은 거의 없음을 보이고 있
다. 한편 평균분석 결과로부터 좌굴높이를

낮게 하기 위한 최적조건은 YP=12kg/mm²,
r=2.0, n=0.27, t=0.85mm이고 좌굴발생
시기를 늦게 하기 위한 최적조건은 YP=12
kg/mm², r=1.6, n=0.21, t=0.85mm임을
알 수 있다. 이 해석결과는 실험결과^(25,27)와
정상적으로 잘 일치하고 있어 유한요소해석
을 이용한 수치모사실험이 각종 성형품질에
미치는 재료변수 및 공정변수들의 영향을 정

표 2 요시다좌굴실험의 시뮬레이션 조건과 결과

Run No.	YP (kg/mm ²)	r value	n value	t (mm)	Wrinkle Height		Extension	
					h(mm)	η^1	e(%)	η^2
1	12	1.2	0.21	0.75	7.79	-17.9	0.45	-6.94
2	12	1.6	0.24	0.80	4.67	-13.4	0.62	-4.15
3	12	2.0	0.27	0.85	0.75	2.5	0.84	-1.51
4	15	1.6	0.21	0.85	4.68	-13.4	0.63	-4.01
5	15	2.0	0.24	0.75	8.82	-18.9	0.27	-11.4
6	15	1.2	0.27	0.80	8.44	-18.5	0.37	-8.64
7	18	2.0	0.21	0.80	8.85	-18.9	0.32	-9.90
8	18	1.2	0.24	0.85	8.97	-19.1	0.38	-8.40
9	18	1.6	0.27	0.75	11.51	-21.2	0.19	-14.4

(주) $\eta^1 = -10 * \log(h^2)$: 망소특성, $\eta^2 = -10 * \log(e^{-2})$: 망대특성

량적으로 평가하는 데 유익함을 알 수 있다.

7. 맺음말

판재의 스탬핑 성형성평가를 위해 소재제조업체와 자동차업체에서 널리 사용되고 있는 2,3개의 대표적인 모사실험과 컴퓨터 모의실험에 대하여 소개하였고 각각의 특징들에 대하여 논하였다. 스탬핑금형의 개발과 연속생산공정에 있어서 성형한계선은 원형그리드해석기법과 함께 판재의 성형난이도 평가 및 불량원인 규명과 조치에 유용하게 사용가능하다. 또한 둠장출실험과 평면변형장출실험에서 각각 얻어지는 한계돔높이와 한계편치높이는 입하코일에 대한 스탬핑성공여부의 사전확인 및 연속생산 공정에 대한 통계적 품질관리수단으로 활용하면 스탬핑공정에서의 불량률감소 및 생산성향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 평면변형장출실험은 평면변형하에서 한계편치높이로 안정적으로 스탬핑성형성을 평가할 수 있는 장점이 있으며 동 실험에 초음파 두께측정기를 이용하여 파단면 근처의 두께를 정밀 측정하면 재료의 한계평면변형률을 정확하게 예측할 수 있는 특징이 있다. 따라서 평면변형장출실험은 스탬핑공장 및 판재제조업체에서 재료에 대한 스탬핑 성형성평가 및 스탬핑공정에 대한 품질관리 수단으로 쉽게 활용가능하다. 한편 유한요소해석에 의한 컴퓨터 모의실험은 효과적인 계획실험법과 병행하면 스탬핑 성형성에 미치는 각 인자의 영향을 독립적으로 평가할 수 있는 특징이 있다.

참고문헌

- (1) Keeler, S. P., 1965, "Determination of Forming Limits in Automotive Stampings," SAE Paper, No. 650535.
- (2) Goodwin, G. M., 1968, "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop," SAE Paper, No.680093.
- (3) Dinda, S., James, K. F., Keeler, S.P. and Stine, P.A., 1981, "How to Use Circle Grid Analysis for Die Tryout," American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- (4) Hecker, S.S., 1975, "Simple Technique for Determining Forming Limit Curve," Sheet Metal Industries, Vol. 52, pp. 671 ~676.
- (5) Raghavan, K.S., Van Kuren, R.C. and Darlington, H., 1992, "Recent Progress in the Development of Forming Limit Curves for Automotive Sheet Steels," SAE Paper, No. 920437, pp. 87~104.
- (6) Ghosh, A.K., 1975, "The Effect of Lateral Drawing-in on Stretch Formability," Metal Engineering Quarterly, Vol. 15-7, pp. 53~64.
- (7) 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.
- (8) Lzworski, N. and Graf, A., 1991, "Obtaining LDH Stability," SAE Paper, No.910512, pp. 41~45.
- (9) 최원집, 김영석, 남재복, 김기수, 1991, "자동차용 강판의 통계적 품질관리 기술개발," 산업과기연 연구결과보고서, Code No. 82-0085A.
- (10) Devenpeck, M.L. and Richmond,O., 1982, "Limiting Strain Test for In-Plane Stretching," Metal Deformation Testing, ed., Wagoner, R.H., pp. 79~88.
- (11) Sang, H. and Nishikawa, Y., 1983, "A Plane Strain Tensile Apparatus," J. of Metals, Vol. 35, No.2, pp. 30~33.
- (12) 김영석, 김기수, 1992, "평면변형 장출 시험기술의 개발," 기계학회논문집, 인쇄

- 중.
- (13) 김영석, 박기철, 남재복, 1992, "평면 장출실험을 이용한 스탬핑 성형성평가," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 396~400.
- (14) Demeri, M.Y., 1981, "The Stretch-Bend Forming of Sheet Metals," J. of Applied Metalworking, Vol.2-1, pp. 3~10.
- (15) 전기찬, "소성불안정이론 및 그 응용," 1989, 대한기계학회지, Vol. 29-3, pp. 244~252.
- (16) 금영탁, Wang, N.M., 1990, "단면성형 해석에 의한 자동차 내부판넬의 설계," 자동차공학회지, Vol. 12-6, pp. 48~59.
- (17) 유동진, 이정우, 전기찬, 1989, "차체 판넬 프레스 성형공정의 평면변형해석," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 275~278.
- (18) 김권희, 1990, "판재성형용 프레스 금형설계를 위한 유한요소법의 응용," 대한기계학회지, Vol.30-3, pp. 231~236.
- (19) 김영석, 1989, "탄소성유한요소법에 있어서 구성식의 응용," 대한기계학회지, Vol. 29-3, pp. 270~278.
- (20) Toda, M., 1989, "프레스성형의 CAE," 일본소성가공학회지, Vol. 30-337, pp. 212~219.
- (21) Box, G.P., Hunter, W.G. and Hunter, J. S., 1978, "Statistics for Experimenters," J.Wiley and Sons.
- (22) Phadke, M.S., 1989, "Quality Engineering Using Robust Design," Prentice-Hall International Editions.
- (23) 박기철, 김영석, 최원집, 1981, "직교 배열실험에 의한 스탬핑가공의 영향인자 분석," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp. 104~107.
- (24) Keeler, S.P. and Stine, P.A., 1989, "Simulating the Sheet Metal Forming Process-An Optimization Exercise on the PC or Engineering Workstation," SAE Paper, No. 890345.
- (25) 김영석, 박기철, 김기수, 최원집, 1992, "대형 판넬의 스탬핑 성형성평가 기법 개발," 산업과기연 연구결과보고서, Code No. 91-1321B.
- (26) Yoshida, K., 1983, "요시다 좌굴시험의 목적과 성격," 소성과 가공, Vol. 24-272, pp. 901~908.
- (27) Hayashi, H., Hirata, M., Hira and Yoshida, K. T., 1983, "Buckling behaviour of a Square Specimen in the Diagonal Tensile Test-Yoshida Buckling Test and its Application I," 소성과 가공, Vol. 24-275, pp. 1298~1304. 