

## 스탬핑 성형성평가를 위한 2, 3의 모사실험

### Advanced Simulative Tests for Formability Determination

김 영 석  
Young Suk Kim



김 영 석  
• 1957년생  
• 산업과학기술연구소 용접연구  
센터 책임연구원  
• 소성역학 및 수치해석 전공

#### 1. 서 론

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 완성한다. 한편 판넬형상의 대부분은 첫번째 공정인 드로잉금형에 의해서 결정되고 후속공정에서는 국부적인 성형, 트리밍, 플랜징 등이 행해진다. 스탬핑 공정중에 재료변수(material variable) 및 공정변수(process variable)가 적절하지 않아 발생하는 파단, 주름 등 다양한 형태의 가공불량은 주로 드로잉공정에서 발생한다. 따라서 스탬핑공정을 가공불량 없이 성공적 수행으로 수행하기 위해서는 이들 변수의 적절한 조화뿐 아니라 스탬핑공정에 대한 엄격한 공정관리가 필요하다. 특히 금형 트리아아웃(try-out)공

정에서 숙련기술자의 시행착오(trial and error)에 의해 확보된 최적 공정변수하에서는 소재자체의 스탬핑 성형성 확보가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

스탬핑공정에서 판재는 그림 1에서와 같이 판두께 방향으로의 응력이 영이고, 판면내에 2축응력을 받는 일반적인 평면응력상태로 간주할 수 있다. 이 판면내에 작용하는 2축응력상태에 따라 여러가지 변형모드가 조합된 변형을 받으며 통상 이런 변형모드는 드로잉 모드(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 부 변형물의 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 인장실험 등과 같은 기본실험(basic test)이 종래부터 널리 사용되고 있고, 재료의 기계적 특성과 성형성과의 상관관계를 도출하려는 연구가 지속적으로 수행되고 있으나

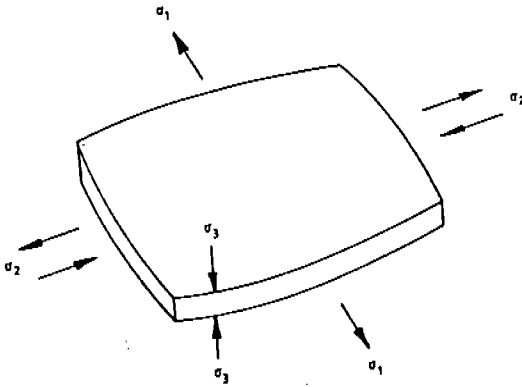


그림 1 판재성형공정에서의 응력상태

이들 기본실험에서 응력상태는 스탬핑 공정 중 에서 재료가 받는 응력상태와 다르고 또한 판 재의 표면마찰특성과 금형조건 등을 고려하고 있지않아 스탬핑 실적과 엄밀한 의미에서 상 관성이 결여되어있다고 간주할 수 있다. 최근 에는 스탬핑공정에서 재료가 받는 각각의 변 형모드 혹은 혼합된 변형모드를 잘 재현한 모사실험(simulative test)과 유한요소 해석 을 포함한 컴퓨터원용실험(computer aided test)이 판재의 스탬핑 성형성 평가 및 성형 불량 원인규명에 활발히 적용되고 있다.

본 글에서는 판재의 스탬핑 성형성 평가를 위해 소재 제조업체와 자동차업체에서 널리 사용되고 있는 2, 3개의 대표적인 모사실험 과 평면변형장출실험을 소개하고 각각의 특징 들에 대하여 논하고자 한다.

## 2. 딥 드로잉실험(deep drawing test after swift)

평균 판두께를 기본적으로 변화시키지 않 으면서 깊은 컵을 드로잉하는 것이 가능한지를 평가하는 실험이다. 여기서는 원형블랭크의 직경을 일정한 크기로 증가시켜가면서 그림2 에서와 같은 일정한 크기의 직경을 갖는 평 면편치로 컵을 드로잉하여 파단되기 전의 최 대 블랭크 직경을 편치직경으로 나눈 값 즉 한계드로잉비(Limiting Drawing Ratio,  $\beta^* = d_o/d_i$ )로 딥 드로잉성을 평가한다. 이 값

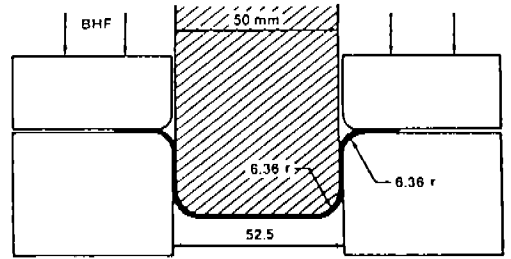


그림 2 Swift 컵성형실험에 대한 공구조건

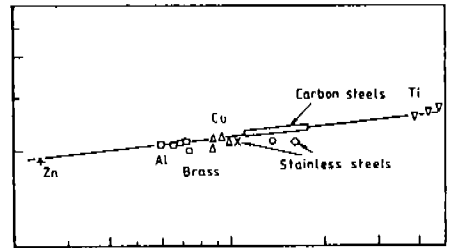


그림 3 소성이방성 계수  $r$  과 한계드로잉비  $\beta^*$ 의 상관관계

은 냉간압연된 판재의 집합조직 또는 결정의 선택방위에 의해 나타나는 소성이방성의 척도 인 Lankford의  $r$  값과 매우 밀접한 관계에 있다는 것이 보고되고 있다(그림 3). 한편 한 계드로잉비는 공구의 기하학적 조건, 블랭크 홀더압력, 편치속도와 공구표면 상태 등에 따 라 변하므로 한계드로잉비의 측정시에 이들 조건을 명확히 규정하여야 하며 특히 마찰의 영향을 배제하기 위해 블랭크면에 폴리에틸렌 판을 삽입하는 것이 바람직하다.

이 방법에 의해 판재의 한계드로잉비를 결 정하는 작업은 많은 시간과 노력이 요구되고 있어 보다 간편하게 두개의 시편을 이용하여 한계드로잉비를 결정하는 방법이 제안되어 있 다. 즉 하나의 시편은 드로잉이 가능한 크기 로 하고 다른 하나는 파단이 일어날 정도로 크게하여 드로잉실험을 한 경우 한계 드로잉 비는 다음식으로 주어진다.

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

여기서  $P_f$ 는 파단이 발생한 경우의 파단 하중,  $P_d$ 는 드로잉이 성공한 때의 최대하중,  $\beta_d$ 는 드로잉이 가능한 시편의 드로잉비이다. 이 방법은 간단하기는 하나 파단하중에 대한 재현성부족으로 만족할만한 결과를 주지 못하고 있다.

소성이방성계수  $r$ 을 측정하는 방법에는 코일의 압연방향에 대해  $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 로 인장 시편을 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 스트립 형태의 강판 시편에 초음파진동을 부가하여 강판의 공진주파수를 구해서  $r$ 값을 아래식에 의해  $\pm 0.1$  오차로 간단히 정밀측정이 가능하기 때문에 최근 널리 이용되고 있다.

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

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

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $L$ 은 시편길이,  $f$ 는 공진주기이다.

### 3. 돔 장출실험(dome punch stretching test)

#### 3.1 성형한계선 도출

지난 20년간 스탬핑 성형성평가 기술에 있어서 가장 두드러진 진보는 스탬핑공정 해석을 위한 수단으로서 원형그리드 해석기법(Circle Grid Analysis, CGA)과 함께 성형한계선개념(Forming Limit Curve, FLC 일명 Keeler-Goodwin curve<sup>12)</sup>)의 도입이었다. 강판의 성형성평가척도 및 공정진단 수단으로 널리 사용되고 있는 성형한계선은 판면내에 존재하는 주 변형률과 부변형률의 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 강판의 성형 난이도 평가(forming severity)와 성형불량 원인분석 및 조치에 보다 과학적인 접근이 가능하게 되었고 여러 활용예를 통하여 그 유효성이 입증되었다. 즉 그림 4에서 나타낸 바와 같이 스탬핑공정에 있어서 성형판재의 특정점에서 CGA에 의해 측정된 변형률 상태를 10% 안전영역(safety zone)-통상 시간에 따른 윤활유의 점도변화, 금형마모, 대기온도 및 금형온도의 변화 등의 공정변수 변화를 고려하여 FLC 밑에 10%정도 폭의 안전영역을 설정하여 두는 것이 일반적인-을 갖는 FLC 상에 표시하여 비교하므로써 성형의 가부 및 성형 난이도를 쉽게 평가할 수 있다. 측정된 변형률점이 FLC 보다 밑에 존재하면서 FLC에 가까울 수록 성형이 어렵고 파단위험이 커지는 것을 의미하며 이 경우에는 공정 및 재료변수의 개선 등의 조치로 변형률점을 FLC보다 10%이상 낮게 하는 것이 요구되며, 또한 FLC 보다 10%이상 상당히 밑에 존재하는 경우는 판재는 충분한 안전성형 여유를 갖고 있으므로 저급재료로 재질변경 등이 가능하다는 것을 알

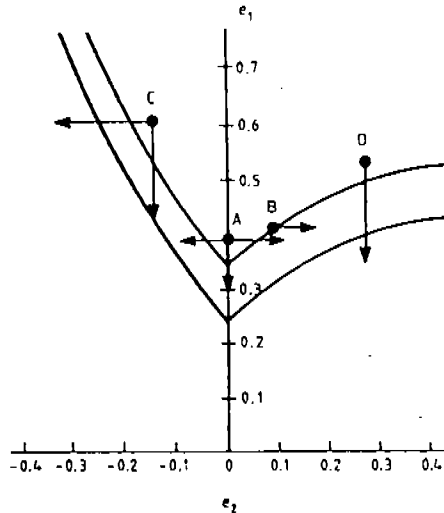


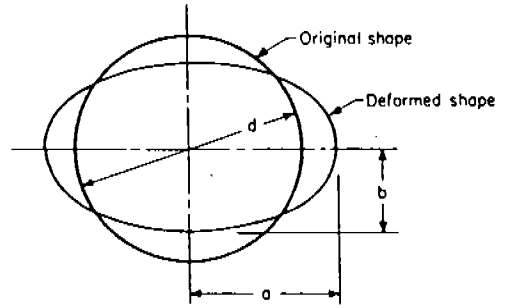
그림 4 10% 안전영역을 갖는 FLC 형상

수 있다. 한편 변형률점이 FLC 보다 위에 존재하면 벽에 의한 판단이 발생한 것을 의미하므로 또한 공정 및 재료변수에 대한 개선이 요구된다. 예를들면 그림 4 에서 평면변형모드에서 판단이 발생하고 있는 A 점 ( $\epsilon_1 = 0.4$ ,  $\epsilon_2 = 0$ )에 대해서는 부변형률이  $\epsilon_2 > 0$  혹은  $\epsilon_2 = 0$  값을 갖도록 부 변형률 방향으로 인장하거나 드로잉을 허용하면 판단이 피해될 수 있음을 알 수 있다.

성형판넬의 변형률 측정을 위해서는 선형전에 판재표면에 측정목적에 맞는 적당한 크기의 원형그리드를 마킹한 후 스탬핑하여 타원으로 변형한 그리드에 대해서(그림 5) 마이크로스코프(배율 10 배, 20 배 정도)나 Mylar 테이프를 이용하여 타원의 장축과 단축 방향에서 주, 부 변형률을 쉽게 측정할 수 있으나 광학그리드 해석기(Optical Grid Analyzer, OGA)를 이용하면 보다 빠르게 정밀한 측정이 가능하다.

FLC를 도출하기 위한 대표적 방법은 Hecker<sup>3)</sup>에 의해 제안된 방법으로, 이 방법은 그림 6에 나타난 것과 같이 폭을 25mm-152mm 사이에서 변화시키고 2.5mm의 원형그리드가 에칭된 장방형 시편을 원주방향 고정비드에 의해 강하게 클램핑하고 100mm 혹은 101.6mm(4in)직경의 동형편치로 시편에 국부벽이 발생할 때까지 장축성형하여 국부벽 근방의 변형된 원으로부터 한계변형률을 구하여 주, 부 변형률의 2차원 좌표상에 표시한 것이다(주: 종종 성형한계도(Forming Limit Diagram, FLD)라고 불림). 이 실험에서는 시편의 폭과 편치와 판재간의 윤활조건의 조합에 의해 비례변형경로하에서 변형률 상태를 단축인장( $\epsilon_1 > 0$ ,  $\epsilon_2 < 0$ )에서 평면 변형( $\epsilon_2 = 0$ ) 그리고 등 2축인장( $\epsilon_1 = \epsilon_2$ ) 상태까지 재현가능한 특징이 있다.

그림 7은 Hecker에 의해 aluminum-killed 냉연강판에 대해 구해진 성형한계선으로 자동차용강판의 대부분은 Keeler-Goodwin 밴드 내에 존재하고 있고 거의 유사한 형태의 FLC를 갖는다고 알려져 있다. 따라서 공학적 의미



$$\epsilon_1 = \ln(a/d), \quad \epsilon_2 = \ln(b/d)$$

$$e_1 = \exp(\epsilon_1) - 1, \quad e_2 = \exp(\epsilon_2) - 1$$

그림 5 원형그리드를 이용한 변형률 측정

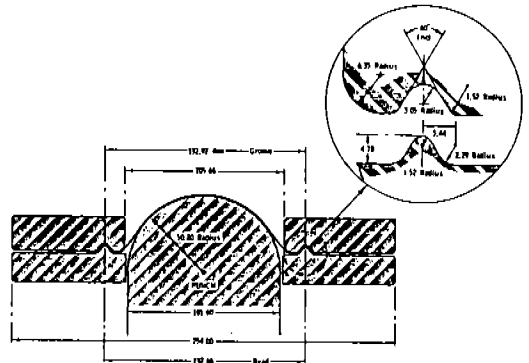


그림 6 FLC 측정을 위한 펀치장출실험

에서 실험적으로 매년 평가하려는 강판에 대해 많은 시간과 노력을 기울여 FLC를 도출하는 것은 실용적이지 못하므로 축적된 많은 데이터로부터 대표적인 FLC (standard FLC)를 이용하는 방법이 제안되어 북미를 중심으로 널리 사용되고 있다.<sup>4)</sup> 이 방법에서는 대표 FLC와 실험데이터로부터 구한 FLC상의 제일 낮은 점인 평면변형절편(Plane Strain Intercept, FLC<sub>0</sub> 또는 한계평면변형률)을 이용하여 대표 FLC를 주 변형률축으로 FLC<sub>0</sub>점까지 평행이동시켜 강판의 FLC로 정의한다. 대표 FLC로는 Keeler-Goodwin curve 혹은 Hecker가 AK-냉연강판에 대해 구한 FLC가 이용되고 있다. FLC<sub>0</sub>의 크기는 재료의 두께, 가공경화지수, 전 연신률, 항복응력 등에 의존하며 다음과 같은 실험식들이 자주 이용되고 있다.

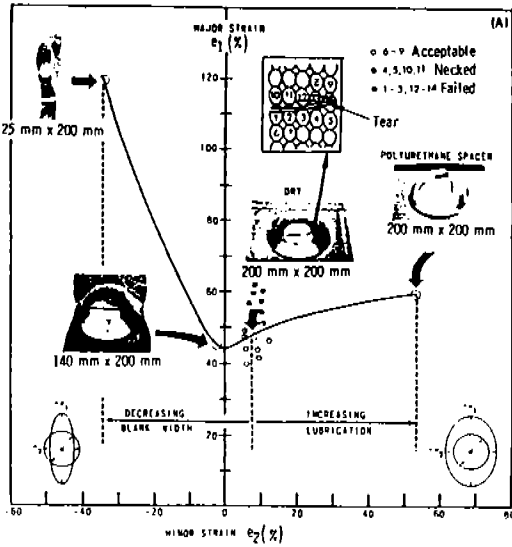


그림 7 FLC 결정을 위한 Hecker 실험방법

④ 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 검은원은 파단면 근처에 있어 벽의 영향을 받은 그리드에 대한 것이다. 따라서 각 시편에 대한 성형한계는 안전변형영역과 벽 영향영역의 경계로 주어진다.<sup>3)</sup>

$$\begin{aligned}
 FLC_0 &= (n/0.21)(23.3 + 14.1 t) \\
 &: \text{NADDRG} \\
 FLC_0 &= 2.78 + 3.24 t + 0.892 El_{90} \\
 &: \text{Bethlehem steel} \\
 FLC_0 &= 35.22 - 0.83 YS + 0.47 El_0 \\
 &: \text{POSCO}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

여기서  $n$ 은 가공경화지수,  $t$ 는 두께,  $El_0$  및  $El_{90}$ 는 각각 압연방향에 대해  $0^\circ$  및  $90^\circ$  방향에서의 전 연신률이고  $YS$ 는 항복응력이다. 그림 8은 저탄소강판과 알루미늄판재의 성형한계도를 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 재료별 성형한계선의 레벨은 다르나 그 형태에서는 큰 차이를 보이지 않고 있으므로, 대표적인 형상의 FLC를 선택하여 대표 FLC를 주 변형률축으로  $FLC_0$ 의 값까지 평행이동하면 각 재료의 성형한계도를 근사적으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

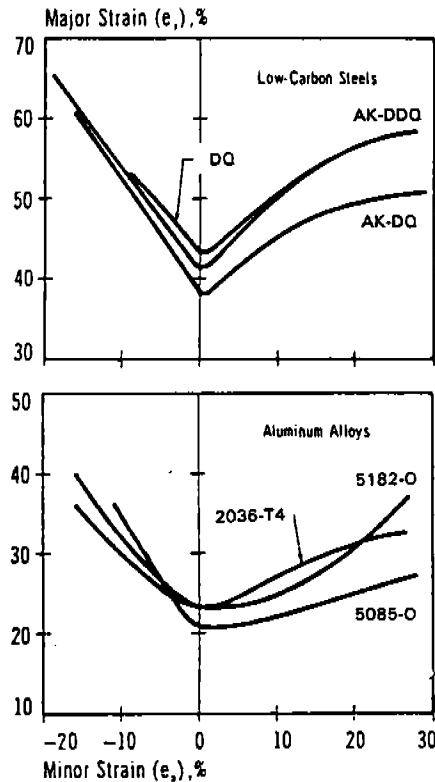


그림 8 저탄소강판과 알루미늄판재에 대한 FLC

### 3.2 한계돔높이 도출

FLC는 앞에서 논한바와 같이 스템핑 공정에서 판재의 성형성해석과 성형불량원인 분석에 유용한 도구를 제공하고 있으나 돔장출실험에 의해 FLC를 도출하는데는 많은 수고가 필요하고 또한 자동차용 강판의 대부분은 Keeler-Goodwin 밴드내에 존재하고 있어서 코일의 성형성 우열을 정량적으로 확실히 판정하기가 곤란한 점이 있다. 한편 판재의 전반적인 성형성은 FLC에 의해 나타내지는 국부변형 발생에 대한 재료의 한계변형 능력과 금형과의 접촉면에서 재료가 얼마만큼 균일변형하여 변형집중을 억제할 수 있는가에 따라 결정된다. 따라서 FLC만으로 실제 스템핑 공정에서의 재료의 스템핑 성형성을 정확히 평가하였다고는 볼 수 없고, 재료의 한계변형 능력과 금형접촉면에서의 균일변형 능력에 의한

영향을 동시에 고려할 수 있는 기존의 간단한 장출실험 방법으로 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 사용하므로써 상당한 굽힘변형을 수반하여 두께의존성을 크게 하는 단점이 지적되고 있다.

이들 결점을 극복하기 위하여 Hecker에 의해 제안된 새로운 장출실험방법은 FLC 측정 실험방법에 대한 변형된 형태로 정사각형 시편주위를 고정비드로 강하게 클램핑하여 재료의 반경방향 드로잉을 억제하고 무유헌상태에서 상대적으로 큰 직경(50, 75, 100 mm)의 둥형펀치를 사용하여 시편이 파단때까지 장출성형하여 파단시 돔높이  $h^*$ 로 재료의 장출성형성을 평가하는 방법이다(그림 9). 따라서 이 실험에서 한계펀치 높이의 크기는 재료의 한계변형능력과 균일변형능력을 동시에 고려한 재료의 장출성형성에 대한 척도가 된다. 한편 무유헌상태로 실험한 시편의 위험부위에서 변형률상태는  $\epsilon_2/\epsilon_1 = 0.1 \sim 0.2$  사이에 존재하고 일반적으로 스탬핑공정에서 판넬의 위험부위에서 변형률상태와 유사하므로 무유헌상태에서 돔장출실험결과는 재료의 스탬핑성형성에 대한 일반적 지표로 활용 가능하다.

이 돔장출실험은 Ghosh<sup>6)</sup>와 Ayres<sup>6)</sup>에 의해 재료의 장출과 어느정도의 드로잉변형을 포함하는 실험방법으로 발전되어 한계돔높이(Limiting Dome Height, LDH) 개념이 도입되었다. Ghosh는 사각시편의 폭을 117mm ~ 138mm 사이에서 3mm의 일정간격으로 변화시켜 돔펀치의 장출에 따라 재료의 폭방향 드로잉을 허용하여 평면변형모드 좌우 양쪽의 변형모드, 즉 드로잉모드와 스트레칭모드를 재현하면서 각각의 변형경로에서 파단시의 한계돔높이 및 파단면 주위의 부 변형률을 측정하였다. 이 실험은 자동차 스탬핑라인에서

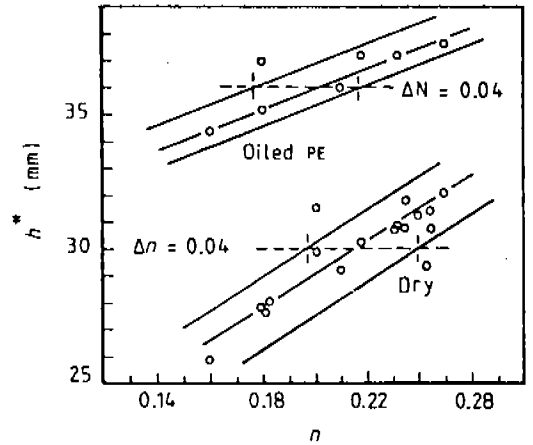


그림 9 건조마찰과 윤활마찰상태에서 n과 펀치높이의 관계

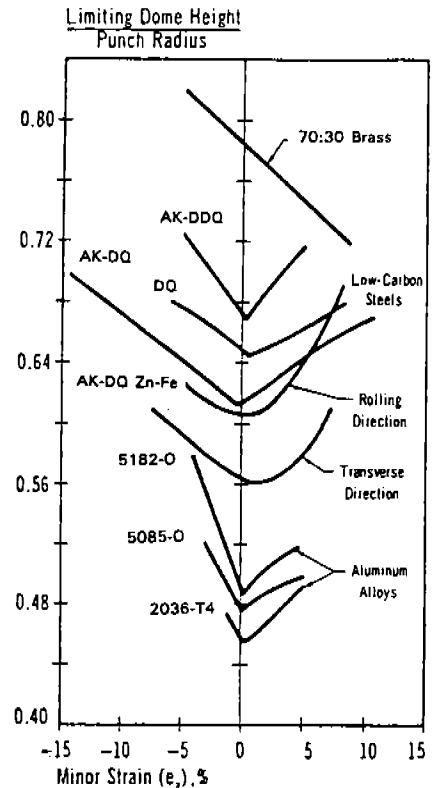


그림 10 저탄소강판과 알루미늄판재에 대한 부변형률과 LDH 관계

투입소재에 대한 적정성여부의 평가와 스탬핑공정에 대한 통계적 품질관리에 복미를 중심으로 활용되고 있다. 예를들면 스탬핑 관넬의 파단위험부위에서 부 변형률을 측정하여 동장출장실험에서 동일한 부 변형률을 주는 시편의 폭을 결정하여 그 폭에서 입하소재에 대한 주기적인 한계돔높이 평가로 통계적 스탬핑성형성에 대한 평가가 가능하다.

그림 10은 저탄소강판과 알루미늄강판에 대해 측정된 부변형률에 따른 한계돔높이를 나타낸다. 일반적으로 한계돔높이는 시편폭에 따라 V자 형상을 이루고 있고, FLC 형태와 같이 평면변형모드에서 가장 낮은 값을 갖는다.

한편 Ayres는 동장출실험을 이용하여 보다 간단하게 장출성형성을 평가하는 시험법을 도입하였는데 그는 스탬핑 성형불량의 약 85%~90%가 부변형률이  $-0.1 < \epsilon_2 < 0.2$  범위의 평면변형모드 근처에서 발생한다는 것에 주목하여 LDH 곡선에서 평면변형모드에 대응하는 폭에서 최소 한계돔높이(Minimum of Limiting Dome Height, LDHo)를 스탬핑 성형성 평가치로도 사용하였다. 이 LDHo 값을 앞에서 논한 Ghosh 실험방법에 의해 최소한계 돔높이를 주는 폭을 결정한 후에 이 폭에서 5회 반복실험하여 평균값으로 취한다. LDHo는 실험결과와 재료의 전 연신률과 다음의 상관관계를 갖는다고 보고되고 있다.

$$LDHo = 10.0 + 0.508 EI_0 \quad (4)$$

LDHo 값은 제한된 조건에서 스탬핑실적과 잘 일치하고 있고(그림 11) 재료별로 스탬핑성형성 우열을 충분히 구별해주는 장점이 있다. 그러나 LDH는 각종 공정변수의 영향을 받는 시스템 특성 값으로 LDH값은 실험조건-금형 및 시편조건, 클램핑력, 경계(마찰)조건, 성형온도와 편치속도 조건 등-의 변화에 따라 상당히 산포된 결과를 나타내고 있다.<sup>7,8)</sup> 따라서 실험결과와 신뢰성을 확보하기 위해서는 특히 금형과 시편간의 마찰조건은 장출성형공정에서 변형률분포를 결정하므로 잘 제어

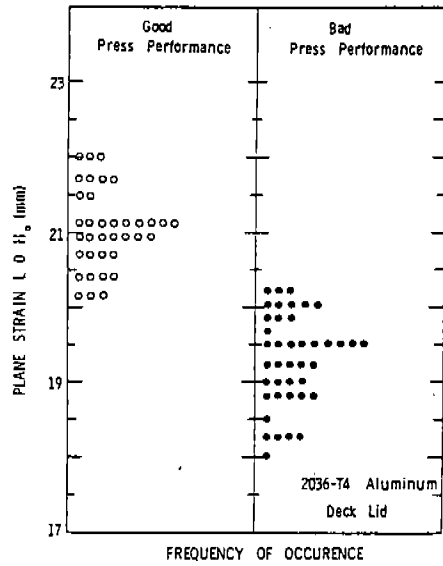


그림 11 LDHo와 프레스 실적의 상관성

되어야 하고 재현되어야 한다. 통상 각 시편 표면에 부착되어 있는 압연유등의 영향을 배제하기 위해서는 기름을 완전히 제거하여 건조마찰상태에서 실험하여야 하나 이 경우 자주 반복실험에서 불규칙적인 변화에 따른 재현성이 문제가 되어 해결책으로 시편의 표면을 mineral spirit 등과 같은 용제로서 세척하여 기름을 제거한 후 4.6c St 정도의 저점도유를 도포하여 실험하는 방법이 추천되고 있다. 동장출실험에 의해 평가되는 LDH가 재현성이 있는 성형성 평가시험법으로 가치를 인정받기 위해서는 모든 영향인자에 대한 정확한 평가와 함께 규격화된 시험법의 확립이 요구되고 있어 복미 덩드로잉 연구그룹(North American Deep Drawing Research Group, NADDRG)에서는 본 LDH 시험법에 대한 공동연구를 통해 안정된 재현성을 갖는 LDH 시험조건에 대한 기준을 제시하고 있다.

#### 4. 평면변형인장실험(plane strain tension test)

종래의 단축인장실험이 금형과 재료와의 접촉에 따른 마찰의 영향에 의한 교란과 굽힘

변형을 수반하지 않고 재료고유의 특성으로 성형성을 평가하는 척도로써 자주 이용되고 있다. 그러나 단축인장에서의 변형은 폭방향 수축을 포함하는 드로잉모드로 이 변형모드에서는 앞에서 논한바와 같이 스템핑 공정에서 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. 예를들면 두꺼운 재료에 대해서는 폭방향에 홈을 가공하여 시편폭에 비해 게이지길이를 작게하여 인장실험하면 비 변형 영역이 폭방향수축을 구속하여 변형률상태는

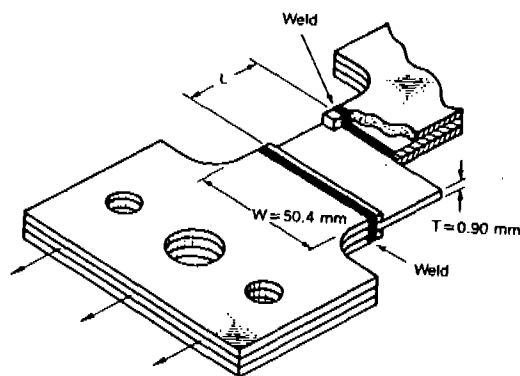


그림 12 평면변형 인장시편의 개념도

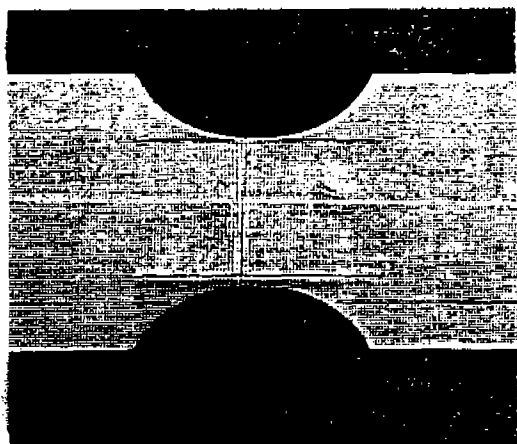


그림 13 시편의 평면변형상태

평면변형에 가까워진다. 또한 그림 12 에서와 같이 얇은 판재의 경우에는 판의 양면에 샌드위치 형태로 구속판을 전자빔 용접하여 인장하면 평면변형이 얻어진다.<sup>9)</sup> 통상 사각시편의 경우 게이지길이 / 폭의 비를 1/4 로 하면 부변형률이 영인 평면변형이 확보된다.

한편 Sang 과 Nishiyama<sup>10)</sup>는 길이방향으로 평행한 칼날을 원형노치를 갖는 인장시편 게이지부의 양표면에 클램핑하여 폭방향 변형을 구속하는 실험방법을 통하여 평면변형에서 파단한계를 도출하였다(그림 13). 여기서 그들은 육안으로 짐작 가능한 넥 발생위치는 길이방향으로 두께 변화율이 0.1에 달하는 위치에 해당한다고 간주하여 그 위치에서 두께를 정밀측정하여 한계평면 변형률을 결정하였다.

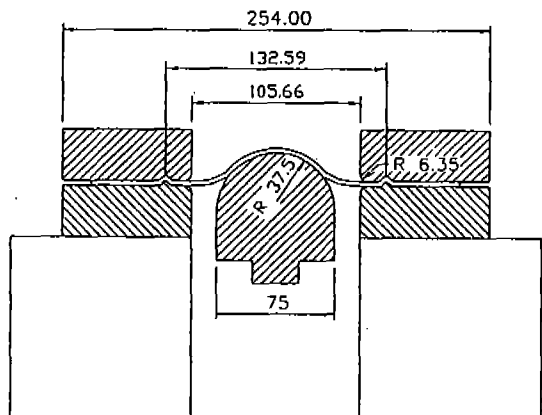
## 5. 평면변형장출실험(plane strain punch stretching test)

### 5.1 한계펀치높이 도출

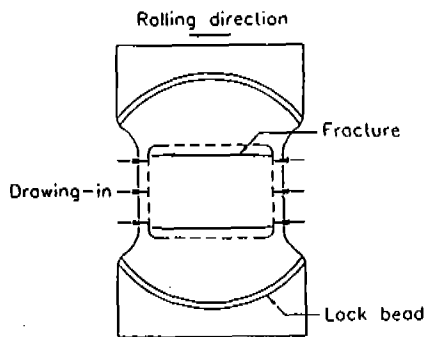
Kim<sup>11,12)</sup>은 앞에서 언급한 Ayres 의 동장출실험과 비교하여 재현성이 높고 안정적으로 스템핑성형성을 평가할 수 있는 평면변형장출실험방법을 개발하여 스템핑실적과 그 결과가 잘 일치함을 보였다. 이하에 동 실험기술에 의한 스템핑성형성 평가방법을 소개하고 또한 초음파두께 측정기(Ultrasonic Thickness Gauge, UTG)를 응용하여 한계평면 변형률을 간단히 도출할 수 있는 방법에 대하여 상세히 설명한다.

그림 14a, 14b는 평면변형상태에서 재료의 파단을 잘 재현하기 위한 평면변형장출실험의 개요를 나타낸다. 이 실험에서는 동장출실험에서와 같이 일정한 폭의 시각편을 이용하여 시편의 원주방향 가장자리를 상하형 다이에 가공된 고정비드로 강하게 클램핑하여 다이내부로 재료의 유입을 방지하고 반 실린더형의 말안장형태로 가공된 펀치를 이용하여 장출성형하여 시편표면의 전면에 평면변형을 유지하면서 재료의 파단시에 한계펀치높이





(a) 펀치와 다이셋트



(b) 실험된 시편형상

그림 14 평면변형장출실험의 개념도

(Limiting Punch Height, LPH) 또는 파단면 근처에서 측정 한 한계평면변형률의 크기에 의해 재료의 성형성에 대한 우열을 평가한다. 따라서 동 실험에서 LPH가 높은 판재는 스태мп성형성이 좋고 한편 LPH가 낮은 판재는 스태мп성형성이 상대적으로 나쁘다고 볼 수 있다.

이 실험에서는 펀치상승에 따라 구속상태에 있지 않는 시편폭의 일부가 유입되어 점차 펀치를 감싸주는  $\pi$ 자 형태로 변형함에 따라  $\pi$ 자의 플렌지부에 의해서 시편의 폭방향변형이 기하학적으로 구속되어 더이상 재료의 폭방향 유입이 억제되고 시편에는 길이방향으로 장출변형만이 존재하게 되어 평면변형상태가 얻어진다.

평면변형장출실험에서는 동장출실험에서와 같이 시편 폭을 변화시켜 평면변형이 얻어지는 폭을 결정하여야 한다. 즉 그림 15에 나타난 바와 같이 시편의 폭이 펀치의 길이보다 커질수록 폭방향으로 유입되는 양이 작아져 변형률 상태는 부변형률이 음인 드로잉 상태( $W=117\text{mm}$ )에서 부변형률이 영인 평면변형 상태( $W=126\text{mm}$ )로 이동한다. 그러나 시편의 폭이 너무커서 시편 폭의 일부가 고정비드에 의해 완전히 클램핑되는 경우는( $W=130\text{mm}$ ) 재료의 폭방향 유입이 전혀 일어

나지 않아 재료가 장출변형모드에서 파단단계까지 변형하지 않고 펀치 코너반경부에서 국부굽힘변형에 의해 조기에 파단이 일어나므로 본 방법에 있어서 양의 부변형률을 갖는 변형모드는 존재하지 않는다. 또한 평면변형장출실험에서는 그림 15에서 알 수 있듯이 단축인장실험에서와는 달리 항상 시편의 길이방향에 직각방향으로 파단이 발생하고 파단면이 평면상태를 유지하는 특징이 있다.

그림 16a, 16b는 평면변형장출실험에서 파단까지 장출성형한 후 광학그리드 측정장치(Optical Grid Analyzer, OGA)를 이용하여 사각시편의 길이방향으로 측정 한 시편폭에 따른 주변형률과 부변형률 분포를 나타낸다. 시편의 폭이 넓어질 수록 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 부변형률( $e_2$ )이 -8% 정도로 상당한 값을 갖는 반면 시편폭이 126mm의 경우에는 시편의 전면에 걸쳐 부변형률이 거의 영인 상태가 되어 평면변형이 확보되고 있음을 알 수 있다.

평면변형장출실험의 경우에는 그림 14에서와 같이 펀치의 기하학적인 구속조건에 의해 평

면변형을 유도하고 있어서 도금강판과 같이 표면마찰상태가 냉연강판의 경우와 크게 상이한 경우에도 시편의 폭이 126mm에서 평면변형이 확보된다. 따라서 평면변형장출실험

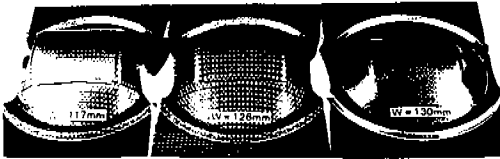
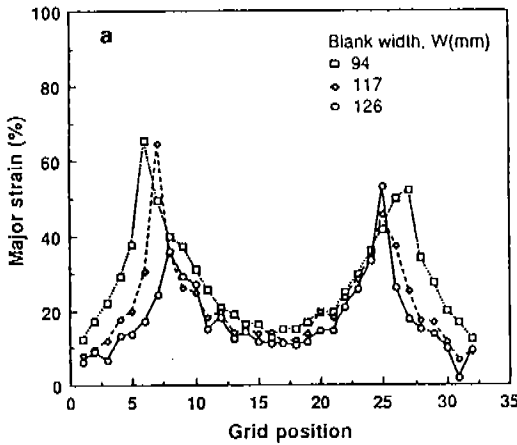


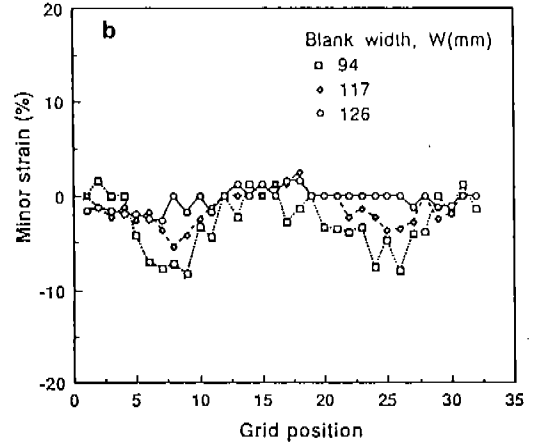
그림 15 폭을 변화시켜 성형한 시편형상

에서는 자동차용강판의 종류에 관계없이 폭이 126mm인 경우에 평면변형상태가 확보되고 있고 파단시의 한계편치 높이로 재료의 스텝핑성형성을 평가할 수 있는 장점이 있다.

그림 17a, 17b는 폭이 126mm인 사각시편을 각각 평면변형장출실험과 돔장출실험하여 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 평면변형장출실험의

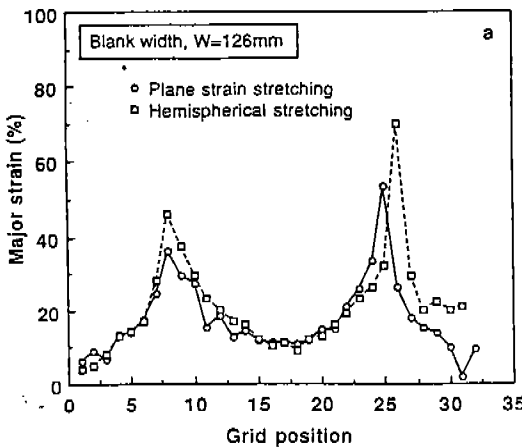


(a) 주 변형률

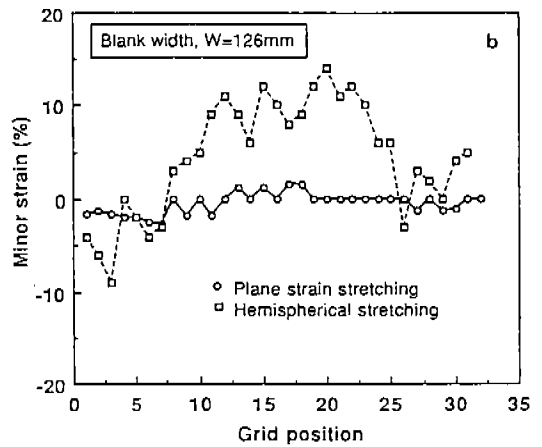


(b) 부 변형률

그림 16 시편폭에 따른 길이방향 변형률 분포



(a) 주 변형률



(b) 부 변형률

그림 17 평면변형장출실험과 돔장출실험에서 변형률 분포 비교

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

평면변형장출실험에서 한계편치높이는 실험적으로 재료의 전연신률  $El_0$ 과 항복응력  $YS$ 에 의해 다음식으로 표시된다.

$$LPH = 30.096 - 0.364YS + 0.203 El_0 \quad (5)$$

그림 18은 28개의 코일로부터 채취한 자동차용 냉연 및 표면처리강관에 대해 평면변형장출실험에 의한 한계편치 높이와 1000톤 복동식 유압프레스를 활용한 폭 610mm\* 길이 530mm 크기의 대형 사각컵 스태мп결과와의 관계를 나타낸다. 한계편치 높이가 32.5mm 이하인 판재에서는 스태мп결과 사각컵의 코너벽 부위에서 파단이 발생하였고 그 이상의 값을 갖는 판재에서는 안전하게 성형이 이루어졌다. 따라서 평면변형장출실험에 의한 한계편치 높이는 스태мп결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 비록 이 실험이 실제 자동차판넬을 대상으로 한 실물 스태мп 실험은 아니지만 평면

변형장출실험에 의한 한계편치 높이는 자동판넬의 스태мп성형여부의 사전 예측 및 재료의 성형성우열을 가리는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 본 실험기술은 자동차용 판재제조업체에 있어서 제조소재에 대해 스태мп성형성에 관한 통계적 품질보증 (statistical quality assurance) 및 스태мп 공정에서 공정관리수단으로 활용 가능하다.

한편 Demeri<sup>18)</sup>는 굽힘변형이 우세한 경우에 평면변형하에서 장출성형성을 평가할 수 있는 각 장출-굽힘실험방법 (angular stretch-bend test)을 제안하였다. 이 실험에서는 76mm 폭의 사각시편을 평행한 고정비드로 그램핑하고 반경이 작은 췌기형 편치를 사용하여 장출성형하고 과단시의 편치높이로 성형성을 평가하는 방법이다. 이 방법은 스태мп 실적과 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 주변형률이 영인 평면변형상태가 얻어지고 있고 소성변형중에는 체적변화가 없으므로 과단면 주위의 주변형률  $\epsilon_1$ 은 두께변형률로부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 &= 0, \\ \epsilon_1 &= -\epsilon_3 (\epsilon_2 = 0) \\ \epsilon_1 &= \exp(\epsilon_1) - 1 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\epsilon$ 은 대수변형률을 나타내고  $e$ 는 공학변형률을 나타낸다. 한편 첨자 1, 2, 3은 각각 시편의 길이, 폭, 두께, 방향을 나타낸다.

한계평면변형률  $e_1$ 은 실험전 시편에 원형 그리드를 새겨놓고 장출성형 후 과단면 주위의 변형률들을 OGA를 활용하여 측정함으로써 구할 수 있으나 시편에 원형그리드를 새기지 않고도 과단면 근방의 시편두께  $t$ 를 정밀측정하면 다음식에 의해 한계평면변형률을 구할 수 있다.

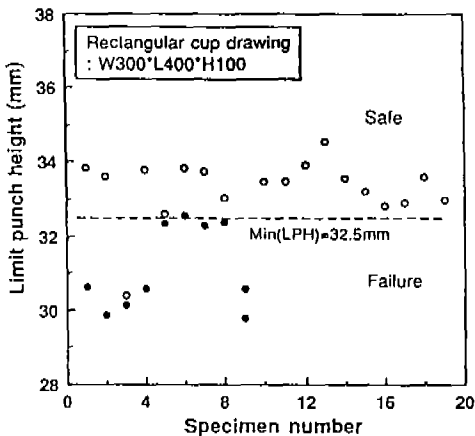


그림 18 대형 사각컵성형에서 LPH와 스태мп 실험적 상관관계

$$\begin{aligned} \epsilon_3 &= \ln(t/t_0) \\ \epsilon_1 &= \exp(-\ln(t/t_0)) - 1 \\ &= FLC_0 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $t_0$ 는 변형전 시편의 두께이다.

파단면의 두께 측정에는 마이크로메타 또는 초음파와 X-선에 의한 측정방법이 이용될 수 있으나 현실적으로 초음파를 이용한 두께 측정이 가장 효과적이다. 이 방법은 측정하려는 물체에 원형단면의 접촉침을 접촉시켜 초음파 음향에너지를 발사하여 빔이 물체를 관통하여 뒷면에서 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여 물체의 두께를 비파괴적으로 정밀 측정하는 방법이다. 초음파 측정기는 널리 알려진 Krautkramer Branson 사의 모델 CL-304를 이용하면 파단면 주위의 시편두께를 0.001mm까지 정밀 측정가능하며 본 모델의 경우에는 접촉침은 직경이 4.76mm인 원형단면을 갖고 있어서 두께를 정밀 측정하기 위해서는 측정면이 평면을 유지하여야 하고 곡면을 갖는 경우에는 정밀 측정이 곤란하다. 그러나 평면변형장출실험의 경우는 파단면 주위의 시편현상은 항상 평면을 유지하고 있어 초음파 두께 측정이 용이하다. 두께 측정은 가능한한 파단면 근처에서 이루어져야 하고 또한 국부적 및 파단발생에 의한 두께 감소에 따른 측정곤란 및 측정오차의 영향을 배제하기 위해서 그림 19에서와 같이 접촉침의 가장자리를 파단면의 경계에 일치시켜서 측정한다. 그러면 평균적으로 파단면에서 약 2.38mm 떨어진 접촉침의 중심 A위치에서 두께가 측정되고 있으므로 식(7)에 의해 계산한 주변형률, 즉 한계평면변형률은 거리상으로 파단면에 접하고 있는 원형그리드에 대해 OGA를 이용하여 측정 한계평면변형률과 같다고 생각할 수 있다.

그림 20은 초음파두께 측정기를 이용한 두께 측정에 의해 계산된  $FLC_0$ 와 OGA에 의해 측정된  $FLC_0$ 의 비교를 나타낸다. 두께 측정으로부터 구한  $FLC_0$ 는 OGA에 의해 측정된  $FLC_0$ 와 거의 1% 오차범위 내에서 잘

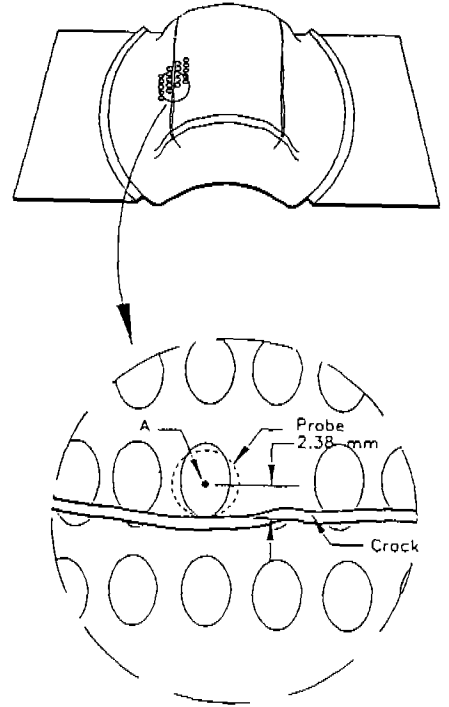


그림 19 파단면 근처의 두께 측정 방법에 대한 개념도

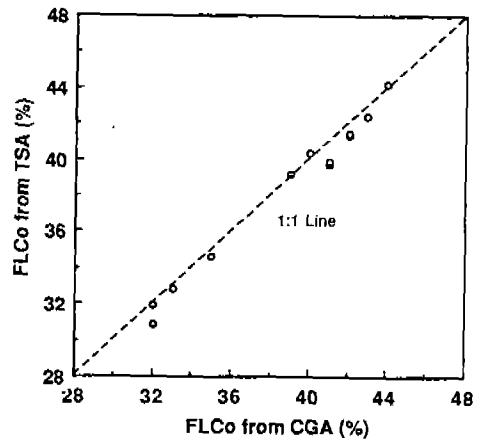


그림 20 두께 측정에 의해 계산된  $FLC_0$ 와 OGA에 의해 측정된  $FLC_0$ 간의 상관관계

일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 평면변형장출실험된 시편에 대한 파단면 주위의 두께 정밀측정에 의한 FLC<sub>0</sub>의 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 FLC<sub>0</sub> 값을 이용하면 이론적으로 성형한계도의 정확한 예측이 가능하고<sup>14)</sup> 또한 이 FLC<sub>0</sub> 값은 3차원 스탬핑공정을 이상화한 2차원 단면에 대한 유한요소해석시<sup>15,16)</sup>에 필요한 재료의 성형한계에 대한 데이터로 유익하게 활용될 수 있다.

## 6. 결 론

관재의 스탬핑 성형성평가를 위해 소재제조업체와 자동차업체에서 널리 사용되고 있는 2, 3개의 대표적인 모사실험과 평면변형장출실험을 소개하였고 각각의 특징들에 대하여 논하였다. 스탬핑금형의 개발과 연속생산공정에 있어서 성형한계선은 원형그리드 해석기법과 함께 관재의 성형난이도 평가 및 불량원인 규명과 조치에 유용하게 사용 가능하다. 또한 동장출실험과 평면변형장출실험에서 각각 얻어지는 한계두께와 한계편치높이는 입하코일에 대한 스탬핑성공여부의 사전확인 및 연속생산공정에 대한 통계적 품질관리수단으로 활용하면 스탬핑공정에서의 불량률 감소 및 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 특히 평면변형장출실험은 평면변형하에서 한계편치 높이로 안정적으로 스탬핑성형을 평가할 수 있는 장점이 있으며 동 실험에 초음파두께 측정기를 이용하여 파단면 근방의 두께를 정밀 측정하면 재료의 한계평면변형률을 정확하게 예측할 수 있는 특징이 있다. 따라서 평면변형장출실험은 스탬핑공장 및 관재제조업체에서 재료에 대한 스탬핑 성형성평가 및 스탬핑공정에 대한 품질관리 수단으로 쉽게 활용 가능하다.

## 참 고 문 헌

1. S.P. Keeler, "Determination of forming limits in automotive stampings," SAE paper, No.65 0535, 1965.
2. G.M. Goodwin, "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop," SAE paper, No.680093, 1968.
3. S.S. Hecker, "Simple technique for determining forming limit curve," Sheet metal Industries, Vol.52, pp.671-676, 1975.
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, 1992.
5. A.K. Ghosh, "The effect of lateral drawing-in on stretch formability," Metal Engineering Quarterly, Vol.15-7, pp.53-64, 1975.
6. 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.
7. N. Izworski and A. Graf, "Obtaining LDH stability," SAE paper, No.910512, 1991.
8. 최원집, 김영석, 남재복, 김기수, "자동차용 강판의 통계적 품질관리 기술개발," 산기연 연구결과보고서 No.82-0085A, 1991.
9. M.L. Devenpeck and O.Richmond, "Limiting strain test for in-plane stretching," Metal Deformation Testing, ed., R.H. Wagoner, pp. 79-88, 1982.
10. H. Sang and Y. Nishikawa, "A plane strain tensile apparatus," J. of Metals, Vol. 35, No.2, pp.30-33, 1983.
11. 김영석, 김정철 외, "평면변형 장출성형성 평가기술", 특허출원, 1992.
12. 김영석, 박기철, 남재복, "평면장출실험을 이용한 스탬핑 성형성평가," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp.396-400, 1992.
13. M.Y. Demeri, "The stretch-bend forming of

- sheet metals," J. Appl. Metal. Work., Vol.2-1, pp.3-10, 1981.
14. 전기찬, "소성불안정이론 및 그 응용," 대한기계학회지, Vol.29-3, pp.244-252, 1989.
15. 김영탁, N.M. Wang, "단면성형해석에 의한 자동차 내부판넬의 설계," 자동차공학회지, Vol.12-6, pp.48-59, 1990.
16. 유동진, 이정우, 전기찬, "차체판넬 프레스 성형공정의 평면변형해석," 대한기계학회 추계학술대회 초록집, pp.275-278, 1989.