

## 금속판재의 성형성 평가를 위한 실험 및 유한요소해석에 관한 고찰

곽인구\* · 신용승\* · 김형종\*\* · 김현영\*\*

(2000년 2월 2일 접수)

### Some Remarks on the Experiment and Finite Element Analysis to Evaluate to Forming Limit of Sheet Metals

I. K. Kwak, Y. S. Shin, H. J. Kim and H. Y. Kim

#### Abstract

This study aims to examine the influence of experimental and numerical factors on the results of the test and finite element simulation to evaluate the formability of sheet metals. The stretch-forming test with a hemispherical punch is carried out to obtain the limiting dome height (LDH) and forming limit diagram (FLD) for several kinds of aluminium and steel sheet. The results of the LDH and FLD tests are analysed to find any correlation with the uniaxial tensile properties. It proves that the size of the prescribed grid has great influence on the measured value of strain. The finite element analysis of the punch stretching process is also carried out and the result is compared with the experimental data. The influence of the numerical parameters such as friction coefficient, element size and anisotropy model on the simulation results turns out to be very considerable.

**Key Words** : Sheet Metal Forming, Formability, Limiting Dome Height, Forming Limit Diagram, Finite Element Analysis

#### 1. 서론

판재성형 분야의 제품설계, 공정설계 및 금형설계에 있어서 설계인자의 도출이나 설계조건 결정은 기본적으로 소재의 성형성(formability) 평가에 그 근거를 두고 있다. 실제 스탬핑 공정에서 소재는 보통 여러 가지 변

형모드가 조합된 형태로 성형되므로, 성형의 성패 여부나 난이도를 체계적으로 규명하는 것은 사실상 어려운 일이다. 원형격자해석법<sup>(1)</sup>과 함께 도입된 성형한계도(forming limit diagram, FLD)의 개념<sup>(2,3)</sup>은 판재의 성형성 및 성형난이도 평가와 성형불량 원인 분석에 대한 과학적 접근을 가능하게 하였으며, 여러 활용 예를 통하

\* 강원대학교 대학원

\*\* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

여 그 유효성이 입증되었다. 성형한계도를 도출하기 위한 가장 대표적인 방법은 Hecker<sup>(4)</sup>가 제안한 것으로, 여러 가지 폭의 직사각형 시편에 적당한 크기의 격자를 인쇄하고 둘레를 고정비드로 완전히 구속한 후 직경 100 mm(또는 2 in)의 반구형 펀치로 국부 넥(neck)이 발생할 때까지 신장성형하여 넥 부근 격자의 변형률 측정값을 주변형률-부변형률 좌표계에 표시하는 방법이다. 이 방법은 변형률 측정에 상당한 노력과 시간이 필요하고 '과단'과 '안전' 영역의 경계를 판단하는 데 어려움이 있는데다가, 이렇게 구한 자동차용 강판의 성형한계선(forming limit curve, FLC)이 대부분 'Keeler-Goodwin 밴드' 내에서 거의 비슷한 형태로 존재하여 재료의 성형성 평가를 위한 변별력이 떨어지는 단점이 있다. 따라서, 보다 실용적인 방법으로서 성형한계선의 주변형률측절편인 FLC<sub>0</sub>, 또는 근사 평면변형률 모드에서 과단한계까지의 성형높이인 한계돔높이(limiting dome height, LDH) 등이 구하기 간단하면서도 신뢰성 있는 성형성 평가 시험법으로 인정받고 있다<sup>(5)</sup>.

최근 복잡한 형상의 3차원 판재성형 공정해석이 가능한 유한요소 코드들이 개발·보급되면서 설계 단계에서 이를 활용하여 제품개발 기간 단축과 비용 절감을 추구하려는 노력이 활발히 전개되고 있다. 그러나 유한요소 해석 결과의 실험적 검증에 대한 필요성은 인정되더라도, 실험에 따르는 기술적·시간적 문제로 인하여 실제로 충분한 비교·검증은 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 몇가지 자동차용 판재에 대하여 기본 물성 시험과 함께 한계돔높이 및 성형한계도 시험을 실시하고, 주요 물성치들과 성형성과의 관계를 조사하였다. 실험 결과에 영향을 미치는 인자들 중에서 특히 격자 크기의 영향을 집중적으로 분석하였다. 또한, 성형한계도 시험 공정에 대한 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 실험치와 비교하였다. 이때 마찰계수, 유한요소 크기, 이방성 모델 등과 같은 입력변수들이 해석 결과에 미치는 영향을 분석함으로써 성형해석 모델링에 대한 기준을 얻고자 하였다. 또한, 성형해석을 통하여 성형성 평가를 할 때 필요한 과단 또는 성형한계 기준을 검토하기 위하여 변형모드에 따른 과단 시 변형률 상태를 성형한계도 상에 표시하고 실험 결과와 비교하였다.

## 2. 실험 및 고찰

### 2.1 실험 재료

사용되고 있는 여러 가지 금속판재의 기본적인 성형성을 평가하기 위하여 인장 시험, 한계돔높이 시험, 성형한계도 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 모든 재료의 종류와 제작회사, 초기두께는 Table 1과 같다.

### 2.2 인장 시험

재료의 진응력-진변형률 곡선 및 항복응력, 강도계수, 변형경화지수, 연신율, 그리고 이방성계수를 구하기 위하여

Table 1 List of the materials used and results of the uniaxial tension, LDH and FLD tests

Material	Feature	Manufacturer (Country)	t <sub>0</sub> (mm)	E (GPa)	Y (MPa)	TS (MPa)	K (MPa)	n	e <sub>u</sub> (%)	R	LDH (mm)	FLC <sub>0</sub> (%)
Al 6016-T4	Aluminium alloy	Hoogovens (Netherlands)	1.15	69	74	215	341	0.289	21	0.53	24.7	26
SPC3	Mild steel	POSCO (Korea)	0.70	200	75	282	434	0.306	29	1.87	33.2, 37.4*	36, 41*
SPC3C	Mild steel	POSCO (Korea)	0.70	200	150	390	497	0.236	41	1.95	37.3	39
DDQ	Mild steel (deep drawing quality)	Thyssen Krupp Stahl (Germany)	0.98	200	157	373	494	0.211	28	1.43	31.3	46
DP600 ZE	Dual phase steel	Thyssen Krupp Stahl (Germany)	1.02	200	309	660	989	0.208	15	0.71	24.0	32
SHCP	High strength steel	POSCO (Korea)	1.40	200	235	417	553	0.172	20	0.92	25.5	43

t<sub>0</sub> : thickness, E : Young's modulus, Y : yield stress, TS : tensile strength, K : stiffness coefficient,

n : hardening exponent, e<sub>u</sub> : uniform elongation, R : average R-value

\* Values for SPC3 specimen cut in the transverse direction

여 단축인장 시험을 실시하였다. 인장 시편은 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 각도로 각 3개씩, 전단 금형을 사용하여 KS B 0801 13B호 규격으로 채취하였다.

인장 시험은 각 재료의 세 방향에 대한 진응력-진변형률 데이터를 평균하여 멱함수( $\sigma = K\varepsilon^n$ ) 형태로 곡선근사하였다. 또한, 이방성계수 R값을 구하기 위하여 인장 시편에 2×2mm의 정사각형 격자를 실크스크린 방법으로 인쇄하고, 15% 신장 후 표점거리 내에서 격자의 길이방향과 폭방향 변형률을 측정하였다. 각 재료에 대한 인장 시험 결과는 Table 1에 정리하였다.

R값은 보통 한 조의 extenso-meter 와 contraction-meter를 사용하거나 인장시편의 표면에 정사각형 격자를 인쇄하여 변형 후 길이 및 폭 방향의 변형률을 측정하는 방법으로 구하며, 최근에는 판재의 공진 주파수를 측정함으로써 간편하게 R값을 구하는 방법도 사용되고 있다<sup>(5)</sup>. Fig. 1은 3×3mm의 정사각형 격자가 인쇄된 시편의 가운데 12×36mm 영역에서 각각 1×1(모든 격자), 2×2, 4×4 및 4×12 격자 간격으로 격자점 좌표를 윤곽투영기(profile projector)로 측정하고 R값을 계산하여 그 분포를 비교한 것이다. 그림에 표시된 격자점들이 바로 그 좌표를 측정된 점들이다. 모든 격자에 대하여 측정된 그림 (a)에서 R값은 위치에 따라 1.2에서 2.4까지 큰 차이가 나며 격자 간격이 커질수록 R값의 분포가 균일해지는 것을 알 수 있다. 이러한 R값의 불균일한 분포는 여러 가지 내적·외적 요인에 의한 표점거리 내 변형의 불균일성 외에도 실험과 측정의 오차가 큰 원인이 된다. 특히, 폭 방향 치수의 측정오차는 길이 방향보다 더욱 민감하여 R값의 산출에 큰 영향을 미친다. 예를 들어, 3mm 격자의 15% 신장변형 후 폭이 2.73mm라 할 때, 불과 ±0.01mm의 측정오차 때문에 R값은 0.5까지 차이를 나타내게 된다. 따라서 이러한 불균일성은 적

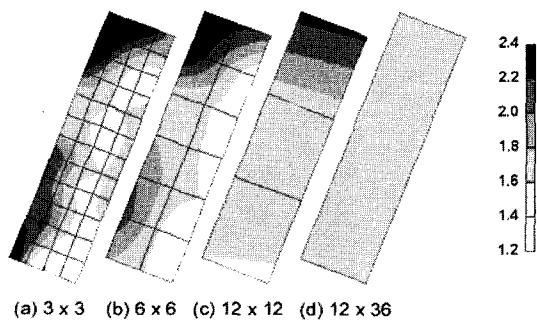


Fig. 1 Nonuniform distribution of R-value over various-sized grid patterns

당한 크기의 영역에서 평균을 취함으로써 무시하는 수밖에 없다. 또한, R값의 변형률에 대한 의존성도 보고된 바 있으나, 그 변화가 크지 않으므로 신장률 10~20% 정도에서의 값으로 취하는 것이 무방하다고 할 수 있다.

### 2.3 한계돔높이 시험

Fig. 2는 한계돔높이 시험에 사용된 금형 세트의 형상과 주요 치수를 나타낸다. 시편은 길이(압연방향) 180mm, 폭 100mm의 규격으로 채취하였다. 금형과 시편의 치수는 NUMISHEET '96<sup>(6)</sup> 벤치마크 문제에서 제시한 것과 동일하다. 다만 SPC3 소재는 길이를 압연방향에 직각방향(90° 방향)으로도 채취하여 방향성의 차이를 조사하고자 하였다.

한계돔높이 실험은 용량 100 ton의 유압식 프레스에서 실시하였다. 펀치는 프레스의 크로스헤드에 고정되며, 블랭크홀더와 다이는 프레스 베드 위에 놓인 다이 프레임의 상판과 중판에 각각 장착되는 구조로 되어있다. 알루미늄판은 10 ton, 강판은 두께와 강도에 따라 20~30 ton 정도의 충분한 클램핑 하중을 가하여 비드부를 완전 구속하였으며, 윤활을 하지 않은 상태에서 펀치 이송속도를 1.3mm/sec로 하여 국부 네킹이 일어날 때까지 성형하였다. 펀치행정에 따라 펀치하중이 증가하다 갑자기 감소하는 순간 네킹이 발생한 것으로 간주하여 시험을 종료하고, PC로 입력된 펀치 하중-변위 데이터로부터 한계돔높이를 결정하였다.

Table 1에 한계돔높이 시험 결과가 물성치와 함께 정리되어 있으며, Fig. 3은 주요 물성치와 한계돔높이와의 상관관계를 보여준다. 항복응력과 관계에서 알루미늄 재료만이 강 재료와 다른 경향을 나타내는 것을 제외하고는, 일반적으로 R값과 균일연신율은 클수록, 항복응력

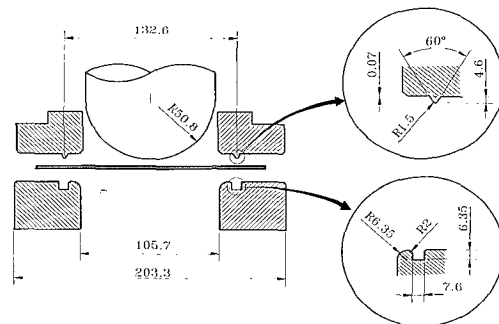


Fig. 2 Dimensions of the die set for LDH and FLD tests

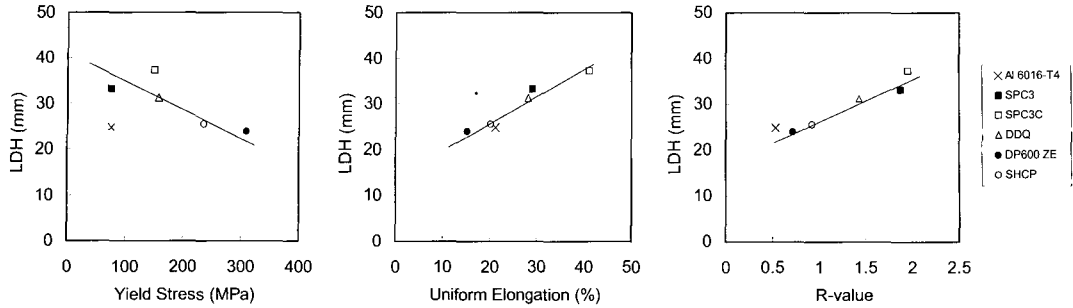


Fig. 3 Relations between LDH and mechanical properties

과 인장강도는 작을수록 한계돛높이가 커지는 것을 알 수 있다. 한편, SPC3 재료의 경우 압연방향에 직각방향으로 길게 채취한 시편의 한계돛높이가 압연방향으로 채취한 시편에 비하여 10% 이상 큰 것으로 나타났다.

#### 2.4 성형한계도 시험

Hecker<sup>(4)</sup>의 방법대로, 길이는 압연방향으로 180mm로 일정하고 폭은 각각 25, 50, 75, 100, 110, 120, 130, 140, 180 mm인 9 가지의 사각형 시편을 준비하고(폭 180 mm 시편은 2배수로 준비), 표면에는 3×3 mm 정사각형 격자를 실크스크린 법으로 인쇄하였다. SPC3 재료는 이 방향, 즉 방향에 따른 성형한계의 차이를 조사하기 위하여 시편의 길이 방향을 압연방향(0° 방향)과 그 직각방향(90° 방향)으로 취한, 두 세트의 시편을 준비하였다. 시험 방법은 한계돛높이 시험에서와 같이 충분한 클램핑 하중을 가하여 소재가 유입되지 않도록 구속하였으며, 국부 네킹이 일어날 때까지 즉, 펀치 하중이 감소하는 순간까지 신장 성형하였다. 180 mm 폭의 시편 1 개에 대해서만 우지를 바른 폴리우레탄 수지를 펀치와 소재 사이에 삽입하여 마찰을 극소화함으로써 등이축인장 모드의 변형을 유도하였으며, 나머지 시편들은 모두 윤활하지 않은 건마찰(dry friction) 조건에서 실험하였다. 본 실험에서도 한계돛높이 실험에서와 같은 금형(Fig. 2)과 프레임 및 유압 프레스를 사용하였다.

원형격자해석법은 타원으로 변형된 특정 격자의 장축과 단축의 길이를 측정함으로써 용이하게 주변형률과 부변형률을 측정할 수 있으나 판재면 전체의 변형 양상이나 변형률 분포를 측정하는 데는 부적절하며, 이때는 격자간의 연결관계를 정의하기 쉬운 정사각형 격자를 사용하는 것이 더 편리하다. 그러나 정사각형 격자는 그 교차점들의 3차원 좌표를 측정할 수 있는 특별한 장비와 소프트웨어가 필요하다<sup>(7,8)</sup>. 본 연구에서는 '자동곡면정

보분석시스템(ASIAS)<sup>(7)</sup>을 사용함으로써 변형률 측정과 성형한계도 작성을 용이하게 수행하였다. 이 시스템은 스테레오비전(stereo vision)과 화상처리 기술을 이용하여 개발된 것이다.

Fig. 4는 이 시스템을 사용하여 여러 가지 폭을 가진 성형 시편들의 네킹부 또는 파단부 주변 격자들에 대한 주변형률과 부변형률을 측정하는 디지털 화상이며, Fig. 5는 이들로부터 '파단'과 '안전'을 판단하여 성형한계도를 그린 결과이다.

Fig. 6은 이러한 방법으로 재료별로 각각 얻은 성형한계선을 비교한 것이다. 성형한계선의 모양은 재료에 관계없이 거의 비슷한 형태를 보이고 있다. 성형한계도 상에서 가장 대표적인 값이라 할 수 있는 FLC<sub>0</sub> 값은 평면변형률 모드에서의 한계 주변형률을 나타내며, 대체로 폭 120~130 mm 시편에서 얻어진다.

재료별로 구한 FLC<sub>0</sub> 값은 앞의 Table 1에 정리하였으며, Fig. 7에는 FLC<sub>0</sub> 값과 주요 물성치들과의 상관관계를 나타내었다. FLC<sub>0</sub> 값은 한계돛높이의 경우와는 다르게 특정 물성치와 주목할 만한 상관관계를 가지지 않는 것으로 보인다. 이는 성형한계도가 소재의 미세 조직과 방향성, 소재 두께, 윤활조건, 변형 모드나 경로 등 여러 가지 공정변수들과 복합적인 관계를 가지기 때문이다<sup>(9)</sup>. 더욱이, 성형한계도를 구하는 실험에서 파단부 근처의 변형률을 정확히 측정하는데는 여러 가지 어려움이 있어 상당한 오차를 포함할 수밖에 없는 이유도 있다. 한편, SPC3 재료의 경우 압연방향에 직각방향으로 길게 채취한 시편의 FLC<sub>0</sub>가 압연방향으로 채취한 시편에 비하여 역시 10% 이상 큰 것으로 나타났다.

Fig. 8은 2, 3, 4, 5 mm 크기의 정사각형 격자가 각각 인쇄된, 폭 110 mm의 시편들에 대하여 중심선을 따른 주변형률 분포를 도시한 것이다. 격자 크기가 작을수록 주변형률의 최대값은 더 높게 나타나는 반면, 분포 곡선

의 진동은 더 심하게 나타난다. 이는 격자 크기가 작을수록 국부적인 변형은 잘 표현할 수 있으나 변형을 평가치가 측정오차에 더욱 민감해지기 때문이다.

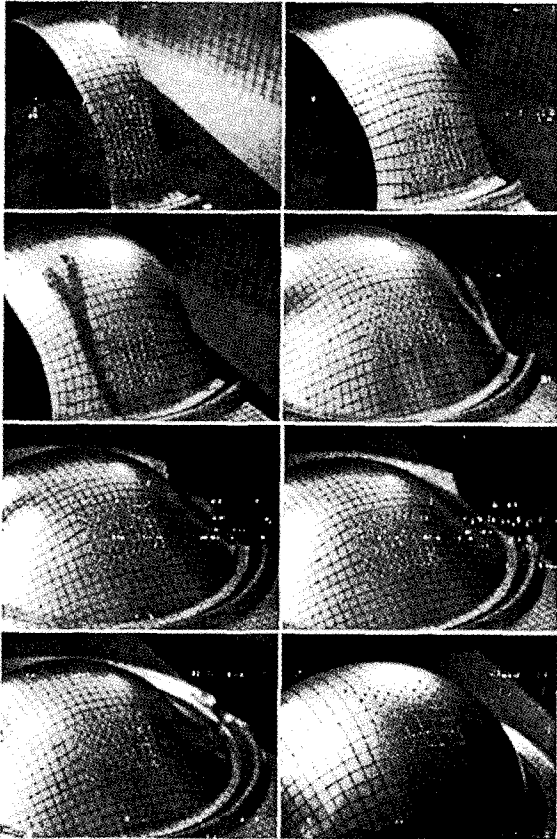


Fig. 4 Digitized images of the FLD specimens of various widths

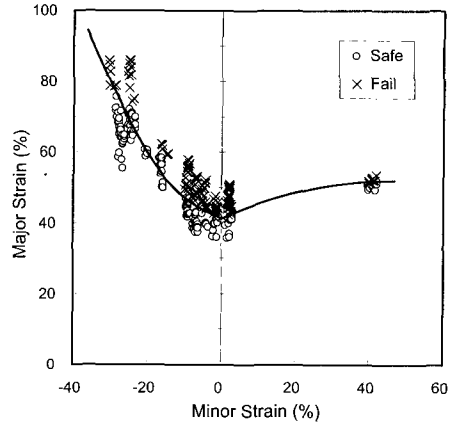


Fig. 5 FLD for SPC3C sheet

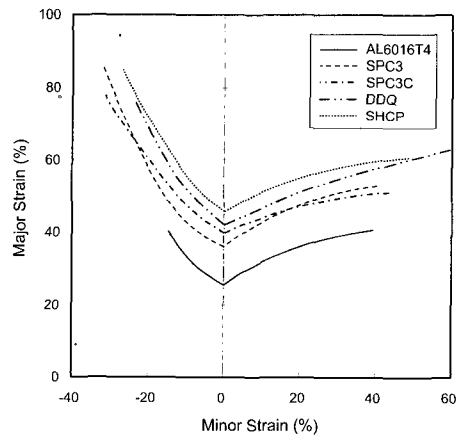


Fig. 6 Comparison of the FLC's for all materials used

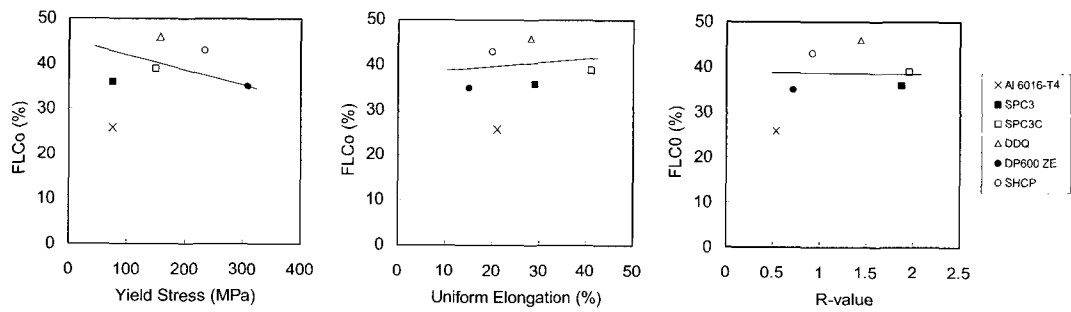


Fig. 7 Relations between  $FLC_0$  and mechanical properties

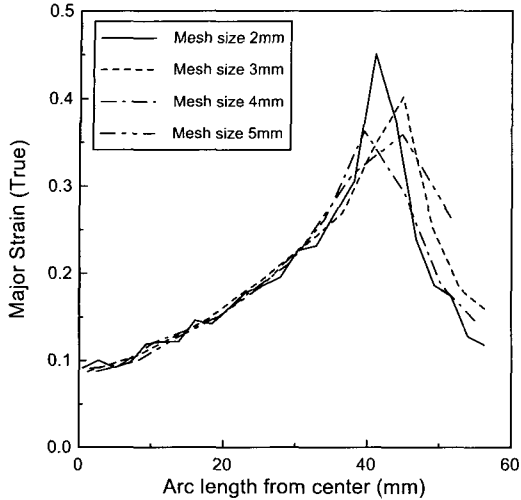


Fig. 8 Influence of grid size on the section distribution of measured major strain

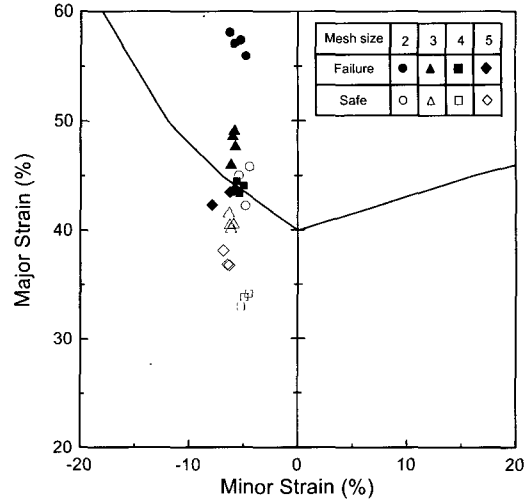


Fig. 9 Effect of grid size represented on FLD

Fig. 9는 폭 110mm 시편의 네킹부 주위 격자들에 대한 변형률 상태를 성형한계도 상에 표시한 것으로, 그림에 표시된 성형한계선은 3mm 격자를 사용하여 구한 것이다. 격자 크기가 작을수록 과도한 변형률 값이 높게 평가되어 결국 성형한계선의 위치가 상향조정될 것임을 알 수 있다. 2mm 격자와 5mm 격자로부터 얻어진 한계 주변형률은 약 10%에 달하는 상호간 편차를 보이고 있다. 격자 크기는 작을수록 국부적인 변형을 정확히 표현할 수 있으나 상대적으로 측정오차의 영향을 많이 받게 되므로, 제품 크기와 측정 목적에 알맞은 크기의 격자를 선택하는 것이 바람직하다. 성형한계도 시험과 같은 실험실 수준의 시편 크기에 대하여는 2~3mm (또는 0.1in) 정도의 격자가 적당할 것으로 판단된다.

### 3. 유한요소 모델링

성형한계도 실험 공정에 대하여 상용 유한요소해석 프로그램 PAM-STAMP<sup>(10)</sup>를 이용하여 성형해석을 수행하였다. 마찰계수, 초기 소재의 요소 크기, 이방성계수 등 유한요소 모델링에서 중요한 인자들의 변화에 따른 해석 결과를 비교·분석함으로써 성형해석 모델링에 대한 기준을 얻고자 하였다. 또한, 성형해석을 이용하여 판재의 성형성을 평가할 때 그 기준이 명확하지 않은 '파단'에 대한 정보를 얻기 위하여 변형모드에 따라 파단 시의 두

께변형률, 주변형률 및 성형한계도를 실험 결과와 비교하였다. 해석에 사용된 재료는 SPC3C이며, 변형모드가 명확히 구분되는 25, 110, 180mm 등 세 가지 폭의 시편에 대하여 해석을 수행하였다. 이들은 각각 드로잉, 근사 평면변형률 및 이축인장 모드에서 파단이 일어난다.

#### 3.1 마찰계수

폭 25 및 110mm 시편은 건마찰 조건으로 마찰계수 0.15와 0.20의 두 가지, 그리고 폭 180mm 시편은 우지를 바른 폴리우레탄 막으로 윤활하는 조건에 해당하는 마찰계수 0.03과 0.05의 두 가지 경우에 대하여 각각 성형해석을 수행하였다. Fig. 10은 마찰계수가 성형해석에 미치는 전체적인 효과를 조사하기 위하여 마찰계수에 따른 편치하중의 변화를 실험 결과와 비교한 것이다. 폭 25mm 시편은 마찰조건에 영향을 상대적으로 작게 받으므로 해석과 실험 결과가 잘 일치하였으나, 폭이 넓은 두 시편은 해석 결과가 실험치보다 다소 높은 것으로 나타났다. 특히, 폭 110mm 시편의 경우에는 마찰계수의 영향이 비교적 크므로 변형률 분포 등 다른 성형해석 결과에도 상당한 차이를 보일 것으로 예상된다.

Fig. 11은 폭 110mm 시편에 대하여 편치변위가 29.5 및 37.0mm(실험 시에 파단이 발생하는 변위)이고 마찰계수가 0.15 및 0.20일 때, 시편 중심으로부터 길이방향 중심선을 따른 주변형률과 두께변형률의 변화를 실험치

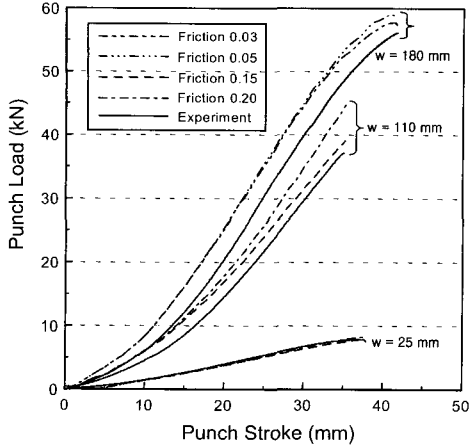


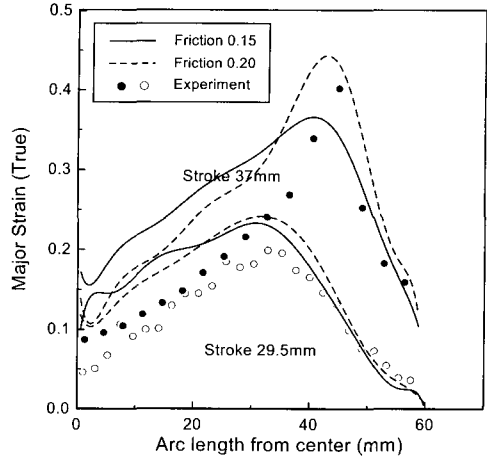
Fig. 10 Comparison between calculated load-stroke curves and experimental data

와 비교한 것이다. 펀치변위 29.5 mm인 경우 마찰계수의 영향이 크지 않으나 37.0 mm에서는 마찰계수에 따라 큰 차이를 나타내며, 파단부 주위에서의 변형률은 마찰계수 0.20일 때 실험치에 근접함을 알 수 있다. 마찰계수는 한 시편 내에서도 윤활조건이나 접촉상태의 불균일로 인하여 위치에 따라 다를 뿐만 아니라, 성형이 진행되는 동안에도 표면상태의 차이에 의하여 변화하므로, 마찰계수의 공간적·시간적 변화를 고려할 수 없는 일반적인 상용 코드로서는 마찰조건에 대한 완벽한 시뮬레이션이 어려운 것이 사실이다.

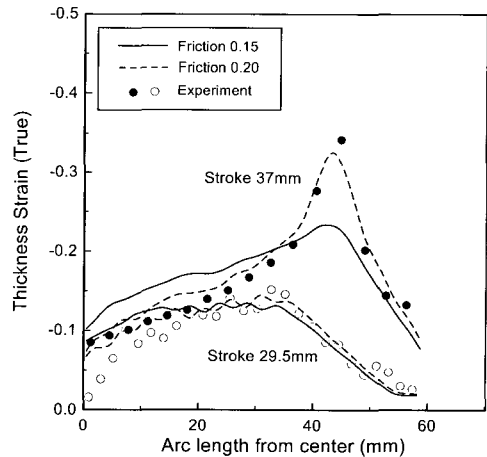
### 3.2 요소 크기

외연적(explicit) 시간적분 프로그램을 사용하는 경우, 초기 소재 요소의 크기는 기하학적 의미뿐만 아니라 해석시간, 탄성파의 전파 등과도 밀접한 관련이 있으므로 성형해석에서 매우 중요한 인자이다. Fig 12는 요소 크기가 각각 1, 2, 3, 4 mm 인 경우의 주변형률 분포를 비교한 것이다. 요소 크기가 1 mm와 4 mm인 경우를 비교하면 주변형률의 최대값이 약 20%의 상대편차를 나타낸다. 요소 크기가 1 mm 일 때 최대값의 크기와 위치가 실험결과와 정확하게 일치하나, 분포곡선에 나타나는 크고 작은 진동으로 해석결과의 신뢰도가 떨어짐을 알 수 있다.

Fig. 13은 실험적으로 구한 성형한계도 상에 요소 크기의 영향을 구현한 그림으로, 요소가 커짐에 따라 파단과 안전 영역의 경계가 실험 결과와 상당한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 성형한계도 실험의 경우 소재 두께에



(a) major strain



(b) thickness strain

Fig. 11 Influence of friction coefficient on the section distribution of strains (w = 110 mm)

비하여 펀치 반경이 커서, 성형해석 시 초기요소의 크기가 해석 결과에 미치는 영향이 비교적 작은 편이나, 파단 변형률 및 파단 위치를 예측하는 데는 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

### 3.3 이방성

Fig. 14는 재료를 수직이방성(평면등방성)과 평면이방성으로 각각 모델링 했을 때의 해석 결과를 성형한계도에 표시한 것이다. 폭 25 mm 시편의 경우 두 가지 이방성 모델이 거의 차이가 없었으며 실험 결과와도 잘 일

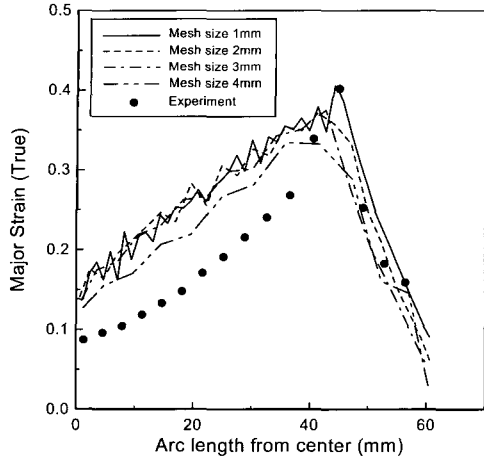


Fig. 12 Effect of initial mesh size ( $w = 110$  mm)

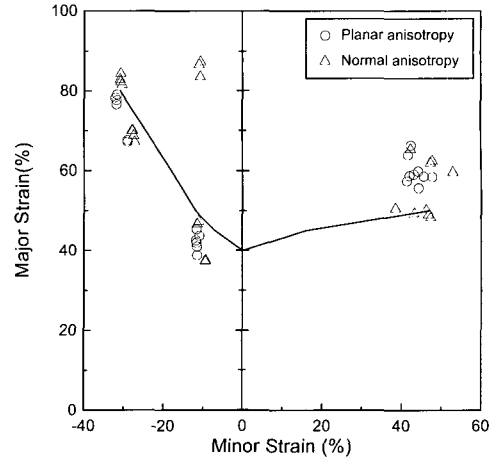


Fig. 14 Comparison between normal and planar anisotropy models on FLD

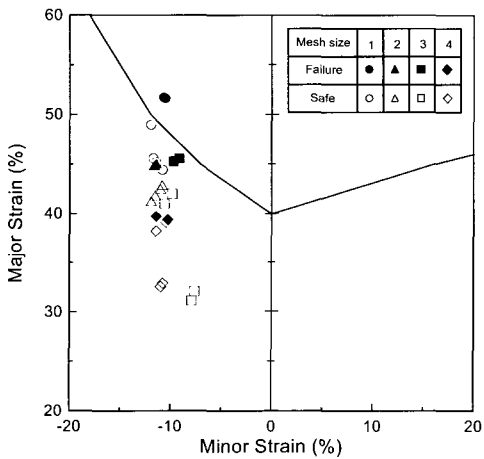


Fig. 13 Effect of initial mesh size represented on FLD

치하였다. 폭 110 mm 시편의 경우에는 평면이방성 모델은 실험결과와 잘 일치하였으나 수직이방성 모델은 상당한 차이를 나타내었다. 폭 180 mm 시편은 마찰이 거의 없는 조건에서 실험하였기 때문에 두께가 상당히 얇아지면서 불규칙한 파단이 발생하여 해석 결과와는 다소 차이를 보였다.

Fig. 15는 폭 110 mm 시편에 대하여 수직이방성과 평면이방성으로 각각 해석한 주변형률 분포를 실험 결과와 비교한 것으로, 수직이방성 해석의 경우 특히 파단부에서의 국부변형이 실제보다 상당히 크게 평가됨을 알 수 있다.

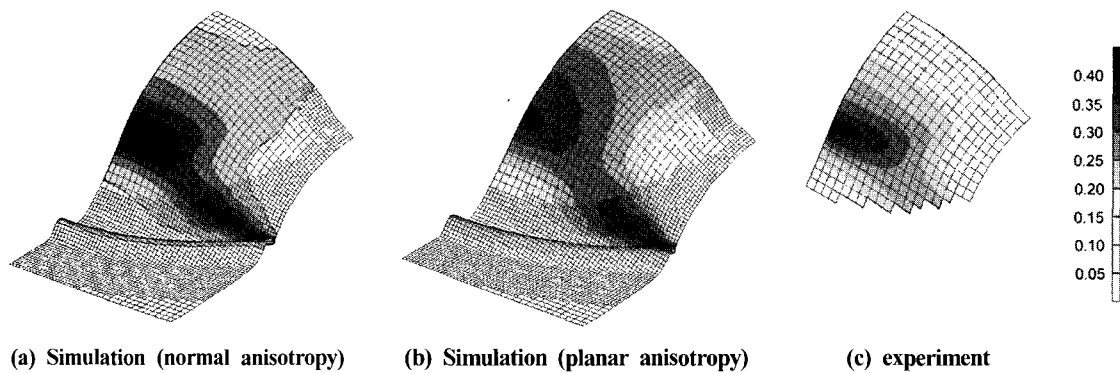
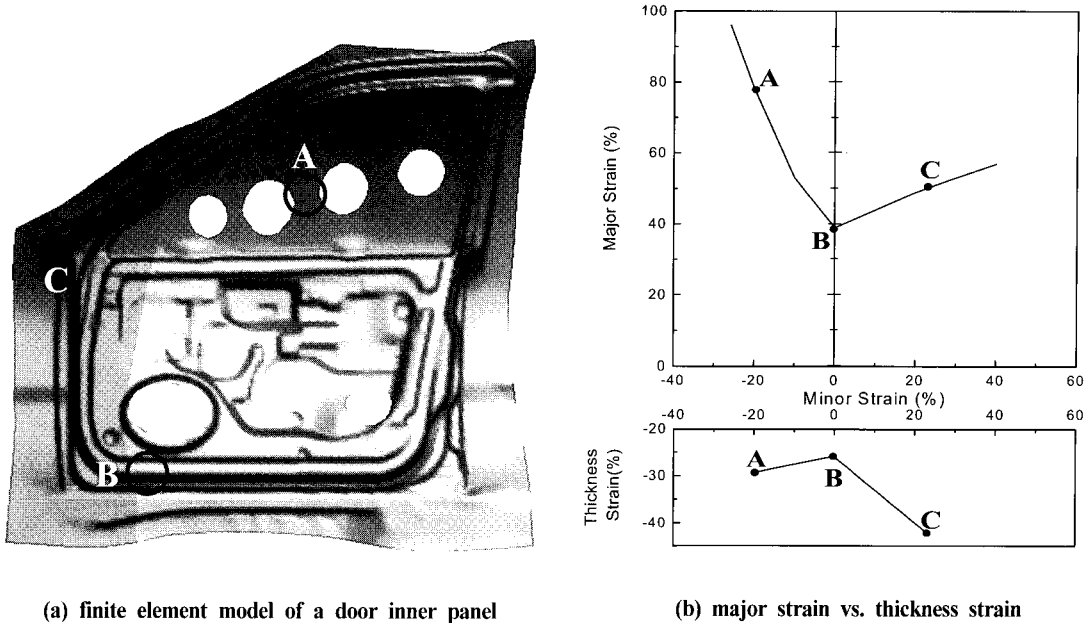


Fig. 15 Comparison of major strain distribution between simulation and experiment





(a) finite element model of a door inner panel

(b) major strain vs. thickness strain

Fig. 16 Comparison between the forming limit criteria in the finite element simulation

### 3.4 성형해석에 의한 파단 예측

성형해석에 의하여 소재의 파단을 예측·판단하는 척도로는 보통 최대유효변형률, 두께변형률, 성형한계도 등이 사용되고 있다. 최대유효변형률 기준은 단축인장 모드를 대표하기 때문에 변형모드가 다른 경우 정확성을 보장할 수 없다. Fig. 16은 성형한계도 기준 및 두께변형률 기준을 비교하기 위한 예로서 복잡한 변형모드를 포함하는 자동차 도어인너(door inner) 성형해석<sup>(11)</sup> 결과로부터, 성형한계도 상에서 변형모드별로 파단 가능성이 같은 세 부분을 찾아서 두께변형률을 비교한 것이다. 파단 시 두께변형률은 A부 0.293, B부 0.258, C부 0.42로서 성형한계도 상에서는 파단 가능성이 같은 세 부분이 변형모드가 다른 경우에는 파단 시 두께변형률의 상대편차가 최대 30%에 달하는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

판재의 성형성 평가를 위한 실험과 유한요소해석을 수행할 때 여러 가지 조건과 변수들이 실험과 해석 결과에 미치는 영향을 분석함으로써, 성형성 평가에 기초한 설계 기준을 얻고자 하였다. Al 6016-T4, SPC3, SPC3C, DDQ, DP600 ZE, SHCP 등 6 가지의 자동차용 판재에

대하여 단축인장, 한계둔높이 및 성형한계도 시험을 실시하고, 주요 물성치들과 성형성과의 관계를 조사하였다. 또한, 성형한계도 시험 공정에 대한 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 실험과 비교하였다. 실험에서는 변형률 측정용을 위한 격자 모양 및 크기의 영향과 측정방법에 대하여 고찰하였으며, 해석에서는 마찰계수, 유한요소 크기, 이방성 모델 등과 같은 입력변수들이 해석 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

실험에 사용된 시편의 변형률 측정과 성형한계도 작성에는 스테레오비전 기술을 응용한 자동 곡면변형률 측정장치를 사용하였으며, 성형공정의 유한요소 시뮬레이션은 상용 프로그램인 PAM-STAMP<sup>TM</sup>를 사용하여 수행하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 한계둔높이는 강 재료의 경우 일반적으로 R값과 균일연신율은 클수록, 항복응력과 인장강도는 작을수록 거의 선형적으로 커지는 경향을 보이나,  $FLC_0$  값은 특정 물성치와 주목할 만한 상관관계를 가지지 않는 것으로 나타났다.

(2) SPC3 강판의 경우 압연방향에 직각방향으로 길게 채취한 시편의 한계둔높이와  $FLC_0$  값이 공히 압연방향으로 채취한 시편에 비하여 10% 이상 큰 것으로 나타났다. 이는 성형성과 가장 밀접한 관계를 가지는 R값이

압연방향보다 그 직각방향으로 더 큰 사실이 주요 원인으로 판단된다.

(3) 이방성계수 R값을 구할 때 측정하는 격자의 크기와 위치에 따라 결과에 상당한 편차가 날 수 있다. R값의 불균일한 분포는 여러 가지 내적·외적 요인에 의한 표점거리 내 변형의 불균일성 외에도 실험과 측정 시의 오차가 큰 원인이 된다. 특히, 폭 방향 치수의 측정오차는 길이 방향보다 더욱 민감하여 R값의 산출에 큰 영향을 미친다.

(4) 변형률 측정을 위하여 시편에 인쇄하는 격자의 크기가 작을수록 파단부와 그 근처의 주변형률 값은 일반적으로 더 크고 실제에 가깝게 평가되어 결국 성형한계선의 위치가 상향조정되는 경향이 있다. 그러나 격자 크기가 작으면 측정오차에 민감하여 변형률 분포 곡선에 진동이 나타날 수 있으므로 시편 크기와 측정 목적에 알맞은 크기의 격자를 선택하는 것이 중요하다.

(5) 성형해석에서 마찰계수의 선택은 성형하중과 변형률 분포에 큰 영향을 미친다. 특히 무윤활 조건에서 금형과 소재간의 접촉면적이 넓은 경우에 마찰계수의 영향은 더욱 심각해진다. 시뮬레이션을 통하여 소재 전체에 걸친 변형률의 분포를 정확히 예측한다는 것은 거의 불가능하므로, 성형성 평가에 바탕을 둔 설계에서는 국부적으로 변형이 집중되는 부분의 변형률 계산 결과에 초점을 맞추는 것이 바람직하다.

(6) 성형한계도 시험의 유한요소해석에서 요소 크기가 1mm와 4mm인 경우 최대 주변형률이 약 20%의 상대편차를 나타낸다. 성형해석에서 소재의 유한요소 크기는 해석시간과 금형의 기하학적인 형상과 관련하여 그 기준을 정하는 것이 일반적이나, 파단 시의 변형률의 크기와 위치를 예측할 때는 특히 세밀한 요소망 구성이 필요하다.

(7) 재료의 평면이방성을 무시하고 수직이방성으로 가정하면 성형해석 결과에서 파단부에서의 국부변형을 실제보다 상당히 크게 평가하여 실험과 큰 차이를 보인다.

(8) 성형해석을 통한 파단 예측에는 성형한계도 기준을 사용하는 것이 합리적이다. 도어 인너의 해석에서, 성형한계선 상에서는 파단 가능성이 비슷한 부분도 변형모드가 다를 경우(특히, 평면변형률 모드와 등축인장모드의 경우) 파단 시 두께변형률의 상대편차가 30%에 달하는 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97-C-02)에 의한 연구의 일부임.

## 참 고 문 헌

- (1) R. A. Ayres, E. G. Brewer and S. W. Holland, 1979, "Grid Circle Analyzer : Computer Aided Measurement of Deformation", Transactions SAE, Vol. 88, No. 3, pp. 2630~2634.
- (2) S. P. Keeler, 1965, "Determination of Forming Limits in Automotive Stamping", Sheet Met. Ind., Vol. 42, pp. 683~691.
- (3) G. M. Goodwin, 1968, "Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop", SAE Technical Paper, No. 680093.
- (4) S. S. Hecker, 1975, "Simple Technique for Determining Forming Limit Curve", Sheet Met. Ind., Vol. 52, pp. 671~676.
- (5) 김영석, 박기철, 1993, "판재의 성형성 평가 실험에 대한 고찰", 대한기계학회지, 제33권 제1호, pp. 47~65.
- (6) J. K. Lee, G. L. Kinzel and R. H. Wagoner (Ed.), 1996, Proceedings of the 3rd International Conference NUMISHEET '96, Dearborn, MI, USA, pp. 428~443.
- (7) 한상준, 김영수, 김형중, 오수익, 1998, "화상처리법을 이용한 곡면변형률 측정 시스템의 개발", 한국소성가공학회지 제7권 제6호, pp. 575~585.
- (8) CamSys, Inc., 1995, ASAME Reference Manual, Version 3.8.
- (9) 전기찬, 1993, "박판금속의 성형", 반도출판사, pp. 179~188.
- (10) Pam System International S. A., 1998, PAM-STAMP™ User's Guide, Version 1998.
- (11) 김현영, 신용승, 김관희, 조원석, 1998, "레이저 용접 차체의 성형해석과 금형설계", 한국소성가공학회지 제7권 제4호, pp.382~392.