

< 논문 >

## 기공을 포함한 이방성 판재의 성형한계 예측

원성연<sup>†</sup> · 유봉선\* · 임창동\* · 김영석\*\*

(2005년 4월 27일 접수, 2005년 7월 2일 심사완료)

### A Theoretical Investigation of Forming Limits of Voided Anisotropic Sheet Metals

Sungyeun Won, Bongsun You, Changdong Yim and Youngsuk Kim

**Key Words:** Forming Limit Diagrams(성형한계도), M-K Theory(M-K 이론), Material Damage(재료 손상), Process Length(공정 길이)

#### Abstract

Most failures of ductile materials in metal forming processes occurred due to material damage evolution - void nucleation, growth and coalescence. In this paper, the modified yield function of Liao et al in conjunction with the Hosford's yield criterion is studied to clarify the plastic deformation characteristic of voided anisotropic sheet metals. The void growth of an anisotropic sheet under biaxial tensile loading and damage effect of void growth on forming limits of sheet metals are investigated. Also the characteristic length defining the neck geometry is introduced in M-K model to incorporate the effect of triaxial stress in necked region on forming limits. The forming limits theoretically predicted are compared with experimental data. Satisfactory agreement was obtained between the predictions and experimental data.

#### 1. 서론

판재의 가공 공정에서 성형성은 내부 손상발전(damage evolution)이 진행되어 국부적 파단으로 제한된다. 판재의 성형성은 프레스 가공조건의 최적화를 위해 재료의 파단과 관련하여 재료 고유의 인장특성과 함께 프레스 가공 중에 재료가 파단되지 않으면서 최대 변형될 수 있는 한계를 나타내는 성형한계도(forming limit diagrams, FLD)의 개념을 기초로 한 변형 해석을 사용하여 주로 평가된다. Marciniak과 Kuczynski(M-K)<sup>(1)</sup>는

넥으로 인한 파단의 원인을 분석하고 해석적 모델을 제안하여 초기 국부 결함으로 인한 판재의 성형 한계를 이론적으로 예측하였다. 이러한 판재의 성형한계를 이론적으로 예측하기 위해 많은 이론 모델들의 연구가 행해지고 있는데, 이들 모델의 대부분은 연성재료인 판재가 2축인장 변형 하에서 변형이 진행될수록 일부 결함을 갖는 부위에 변형이 집중되어 재료가 파괴에 이른다 가정하고 있다. 하지만, 상용 판재재료에서 미세구조의 특징을 제어하기 위한 것 중의 하나로 도입된 제2상(second-phase) 입자는 열적-기계적 공정에서 자연적 또는 인위적 조절에 의해 일반적으로 포함된다. 제2상 입자는 소성변형 중 주변 모재와 균열로부터 이탈되며, 이로 인해 기공이 생성된다. 이러한 기공의 생성, 성장 및 합체의 현상은 국부적 발생 전의 변형률을 제한하므로 성형한계의 관점에서 필히 고려해야 할 사항 중의 하나이다. 즉, 기공을 함유하고 있는 연성재료인 이방성 판재의 소성변형 거동을 정확히 예측

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 경북대학교 대학원 기계공학부  
E-mail : caekim@knu.ac.kr

TEL : (053)950-5580 FAX : (053)956-9914

\* 한국기계연구원 재료연구부

\*\* 회원, 경북대학교 기계공학부

할 수 있는 항복함수와 그에 대응하는 구성방정식의 도입이 필요하다.

Gurson<sup>(2)</sup>은 기공을 함유한 연속체를 동심의 구를 갖는 균일 등방구로서 이상화하여 변형에 대한 강소성 극한해석을 수행하여 근사적으로 등방성 기공 재료의 항복조건식을 제안하였다. 또한, Gurson의 항복함수는 많은 연구자들<sup>(3-5)</sup>에 의해 모재 재료의 이방성 성질을 고려한 여러가지 형태로 수정되었다. 최근, Liao<sup>(4)</sup> 등은 평면응력하에서 Hill의 비이차 모델을 따르는 기공 수직이방성 재료에 대한 근사 항복함수를 연구하였다.

한편, Needleman과 Tvergaard<sup>(6)</sup>은 등이축 인장을 받는 판재에 대한 유한요소연구에서 3차원 효과로 인해 넥 영역에서의 3축응력이 하중 유지 능력을 향상시켜 넥 생성 시기를 지연시킨다는 것을 밝혔다.

본 연구에서는 기공 이방성재료의 소성변형을 묘사하기 위해 Hosford의 비이차 이방성 항복조건<sup>(7)</sup>과 결합된 Liao 항복함수<sup>(4)</sup>가 적용되었고, 또한 기공을 고려한 이방성 재료에 대해 이축인장 하중을 받는 다양한 기공 이방성 판재의 성형한계를 예측하기 위해 사용되었다. 또한, 성형한계에 영향을 미치는 기공률(void volume fraction), 판재의 두께, 넥 형상 등과 같은 변수들의 영향이 연구되었으며, 넥형상을 정의하는 공정 길이(process length) 또는 특성 길이(characteristic length)를 도입하여 성형한계도 상에서 넥 영역에서의 3축응력 효과도 논의되었다. 이러한 이론들을 기반으로 제안된 모델을 이용한 이론적 성형한계도는 기존에 발표된 림드(rimmed) 강판의 실험 데이터<sup>(8)</sup>와 비교하여 그 타당성을 고찰하였다.

## 2. 이론적 고찰

기공을 고려한 항복조건은 제1차의 응력불변량  $J_1$ 과 제2차의 편차응력 불변량  $J_2$ 의 함수로써 표현된다. 그 중 Liao<sup>(4)</sup>의 수정된 항복함수는 쌍곡선 함수의 항이 변형을 증분계산을 위한 편미분이나 소성변형의 해석적 해를 구하는데 불편하므로 급수 전개 형태로 근사적으로 풀면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}^2 = \bar{\sigma}_M^2 (1 + q_1^2 C_v^2) - 2C_v q_1 \bar{\sigma}_M^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( A \frac{3q_2 \sigma_m}{2 \bar{\sigma}_M} \right)^2 \right] \quad (1)$$

여기서  $\bar{\sigma}$ 는 거시적인 유효응력,  $\bar{\sigma}_M$ 는 모재의 유효응력,  $\sigma_m$ 는 거시적 평균응력,  $C_v$ 는 기공률(void volume fraction),  $A$ 는  $\sqrt{(1+2R)/\{6(1+R)\}}$ 이다. 또한  $q_1$ 과  $q_2$ 는 다공성(porous) 연성재료의 소성유동의 수치적 해석과 실험적 결과를 일치시키기 위한 도입 변수이다.

식 (1)과 결합할 항복함수로 Hosford의 수직이방성 항복조건<sup>(7)</sup>을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{1}{(1+R)} [R|\sigma_1 - \sigma_2|^a + |\sigma_2 - \sigma_3|^a + |\sigma_3 - \sigma_1|^a] \right\}^{1/a} \quad (2)$$

여기서  $R$ 은 압연방향( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )에 대한 각각의 소성이방성계수를 평균한 값이며, 항복지수  $a$  ( $\geq 2$ )는 항복곡면의 형상을 나타내는 변수로, 결정방위 분포함수를 고려한 결정소성학적 접근에 의해 결정된다. 즉, 체심입방격자(BCC)는 6승, 면심입방격자(FCC)는 8승을 사용한다.

식 (2)와 (1)의 조합된 식은 이방성 모재에 대한 수정된 Liao 항복함수의 형식을 가진다. 만약 기공 이방성재료에 대해 항복지수로  $a=2$ 라 대입하면 Doege<sup>(3)</sup> 등의 항복함수와 일치한다.

다양한 변형모드에 따른 기공률 및 소성변형 관계식은 다음과 같다.<sup>(9)</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_1^p &= \left\{ \frac{1}{(1+R)} [R(1-\alpha)^a + \alpha^a + 1] \right\}^{(2/a-1)} \\ &\times \frac{1}{(1+R)} [R(1-\alpha)^{a-1} + 1] \\ &\times \frac{4}{3q_1 q_2^2 A (1+\alpha)} \ln \frac{C_v (C_{vo} - 1)}{C_{vo} (C_v - 1)} \\ &+ \frac{1}{3} \ln \frac{C_{vo} - 1}{C_v - 1} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 응력비 ( $\sigma_2/\sigma_1$ )이고,  $C_{vo}$ 와  $C_v$ 는 각각 초기와 현재의 기공률을 나타낸다. 재료의 전체 제적, 보이드부의 체적을 각각  $V_T$ ,  $V_V$  라고 하면 현재의 기공률은  $C_v = V_V/V_T = (V_T - V_M)/V_T$ 로 정의 된다.

모재에 대한 구성방정식은

$$\bar{\sigma}_M = K' \bar{\epsilon}_M^{-n_M} \bar{\epsilon}^{-\gamma_M} \quad (4)$$

이며,  $\bar{\sigma}_M$ ,  $\bar{\epsilon}_M$ 는 모재의 유효응력과 유효변형률

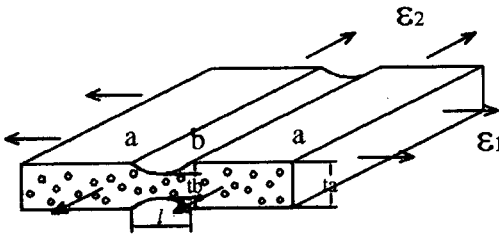


Fig. 1 Schematic view for sheet metal having a heterogeneous distribution of voids in addition to initial thickness imperfection

이다.  $K'$ 은 수정된 재료강도계수이고,  $n_M, \gamma_M$ 은 모재의 가공경화지수와 변형률 민감도지수이다.

본 연구에서 성형 한계도를 계산하기 위해 M-K 모델을 채용하였다. M-K 모델에서는 Fig. 1과 같이 결함이 없는 영역(a)와 결함영역(b)으로 구성된 것에 내부 결함을 갖도록 기공을 분포시킨다.

M-K모델에서 힘의 평형방정식 ( $F_{1a} = F_{1b}$ ,  $\sigma_{1a}t_a = \sigma_{1b}t_b$ )을 이용하면

$$\frac{\sigma_{1a}}{\sigma_{1b}} = \frac{t_{bo}(1 - C_{vb})}{t_{ao}(1 - C_{va})} \quad (5)$$

$$= f_o \frac{(1 - C_{vb})}{(1 - C_{va})} \exp(\epsilon_{3a} - \epsilon_{3b})$$

가 되고, 여기서  $f_o = t_{bo}/t_{ao}$ 로 영역 a에 대한 영역 b의 상대적인 결함을 나타내는 초기 결함 계수이고,  $\epsilon_{3a}$ 와  $\epsilon_{3b}$ 는 각각 a와 b영역의 두께방향 변형률이다.

위 식들과 홈부의 접선방향으로의 기하학적 적합방정식 ( $\epsilon_{2a} = \epsilon_{2b}$ )을 사용하여 수치적인 반복 해석을 통해 성형한계를 계산할 수 있다. 또한 본 연구에서 성형공정에서의 손상발전은 기공 생성보다 기공 성장이 더 중요한 역할을 담당<sup>(10)</sup>하기 때문에 초기부터 존재하는 기공으로부터 성장하는 손상발전만을 고려하였다.

한편, Needleman와 Tvergaard<sup>(6)</sup>는 원형 봉의 인장시에 넥이 발생하면 변형이 불균일해지고 넥 발생부의 응력상태는 원주방향과 반경방향의 응력도 함께 존재하는 3축 응력 상태가 되어 넥 과정에서 3축응력의 영향을 고려하는 것이 필요하다고 지적하였다. Bridgeman<sup>(11)</sup>은 네 rjqkftod부에서 겹보기 상의 균일 평균 응력을 브릿지만의 수

정계수를 이용하여 축방향 응력을 수정하였고 기하학적인 고려와 함께 3축 응력장에서의 정수 인장 성분을 추가하여 두께 당 폭의 비가 5배 이상인 박판의 넥에서 3축응력 상태를 해석하였으며, 응력의 분포가 변한다는 것을 증명하였다. 홈부의 수직방향인 인장방향에 평행한 평균 주응력  $\sigma_1^*$ 는

$$\frac{\sigma_1^*}{\sigma_1} = \left(1 + \frac{2\rho_o}{t}\right)^{1/2} \ln \left[ 1 + \frac{t}{\rho_o} + \left(\frac{2t}{\rho_o}\right)^{1/2} \right. \\ \left. \times \left(1 + \frac{t}{2\rho_o}\right)^{1/2} \right] - 1 \quad (6)$$

이며,  $\sigma_1$ 은 넥형상이 없는 균일응력에 상응하는 넥 표면의 응력이고  $\rho_o$ 는 넥의 반경,  $t$ 는 판재의 두께이다.

넥 반경  $\rho_o$ 에 대한 기하학적 형상으로부터 다음식이 유도된다.

$$\rho_o = \frac{l^2 + (t_a - t_b)^2}{t_a - t_b} \quad (7)$$

여기서  $l (= l_o \exp(\epsilon_{1b}))$ 은 넥의 폭, 즉 넥 공정 동안 판재의 공정 길이로써 초기 넥의 폭인  $l_o$ 의 지수함수로 정의 된다. 본 연구에서는 식 (7)로부터 넥의 반경을 결정하는 넥의 초기 폭은 주로 입자의 크기, 표면 거칠기와 같은 판재의 결정학적인 특성과 표면 특성에 의해 영향을 받는다고 가정하였다. 그러므로 넥의 초기 폭은 판재의 넥 공정 길이라고 고려되어 질 수 있고 넥의 반경은 넥 공정 동안 지속적으로 변한다.

성형한계의 계산에 넥 영역에서의 3축 응력의 영향을 도입하기 위해서 식 (5)의 b영역에서의 주응력  $\sigma_{1b}$ 는 식 (6)의  $\sigma_{1b}^*$ 로 교체한다. 넥 형상을 정의하는 공정 길이를 사용함으로써 성형한계 계산에서 판재의 두께 영향은 자연스럽게 고려될 수 있다.<sup>(12)</sup>

### 3. 결과 및 토론

제안된 항복함수의 소성변형특성을 밝히기 위해, 현재의 기공률  $C_o$ 에 대한 기공 성장률의 변동이  $a=6, R=2.0, q_1=1.5, q_2=1.0$ 의 값을 가지는 경우 대표적인 3가지 변형모드에 대해

Table 1 Mechanical properties of rimmed steel

Material	thickness [mm]	n value	R value	m value
rimmed steel	1.00	0.21	1.37	0.01

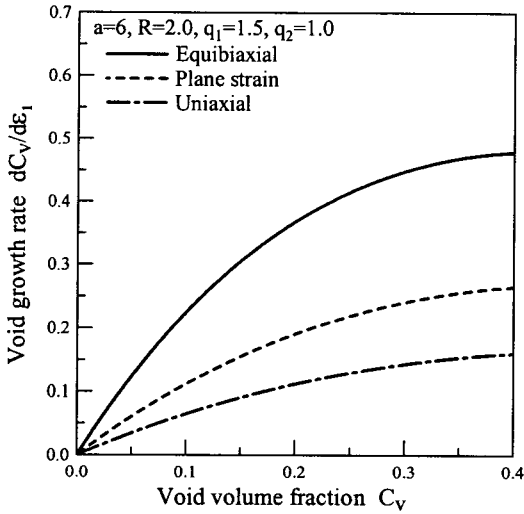


Fig. 2 Variations of the void growth rate with the current void volume fraction  $C_v$  for different deformation mode

Fig. 2에 나타나 있다. 즉, 등이축 변형모드에서의 기공 성장률이 가장 높았는데, 이는 Luo<sup>(13)</sup> 등에 의한 실험에서도 증명되었듯이 변형모드가 기공 성장에 대해 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

한편, 성형한계의 계산에 사용된 판재의 기계적 성질은 Table 1과 같다.

초기결함계수  $f_o$ 의 값은 다양한 종류의 판재에 대한 실험적 데이터와 이론적 예측값이 가장 잘 일치하는 것으로 선정되었다.<sup>(14)</sup> 또한,  $C_{vao}$ 와  $C_{vbo}$ 에 대한 값은 립드 강판에 대한 대표적인 값으로 선정되었다.<sup>(15)</sup> 공정 길이  $l$ 의 값은  $0.7 \leq l \leq 1.0$ 인 두께를 갖는 판재의 면내 (in-plane) 변형모드의 성형한계 시험에서 공정 길

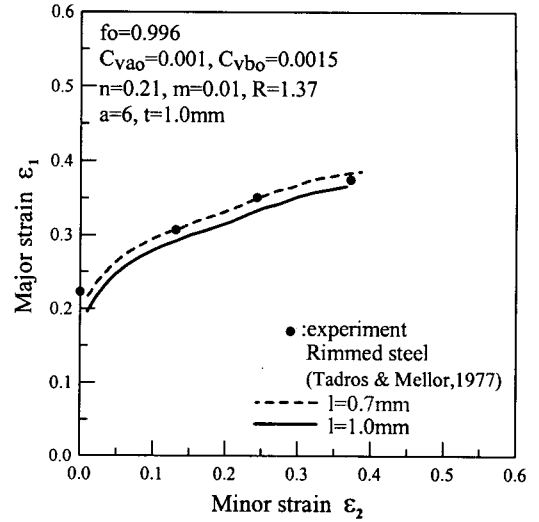


Fig. 3 Comparison between the predicted and experimental FLDs for rimmed steel sheet

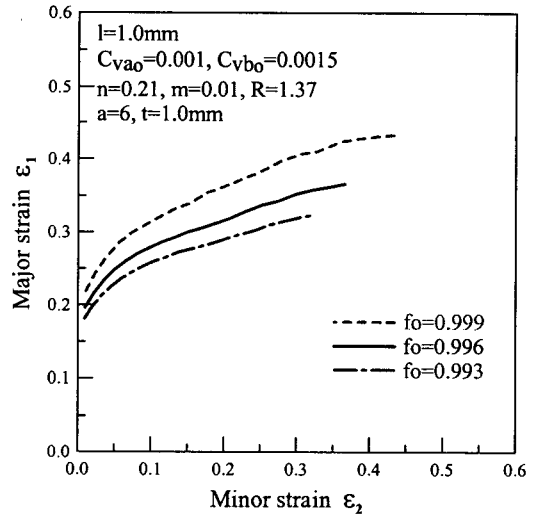


Fig. 4 Effect of initial geometric imperfection on the analytical FLDs

이가  $0.3 \leq t/l \leq 1.0$ 인 것으로부터 선정되었다.

제안된 기공 이방성 판재에 대한 손상모델의 타당성을 검토하기 위해 Fig. 3에 Tadros와 Mellor<sup>(8)</sup>로부터 얻어진 립드 강판에 대한 실험적 성형 한계도와  $f_o=0.996$ ,  $C_{vao}=0.001$ ,

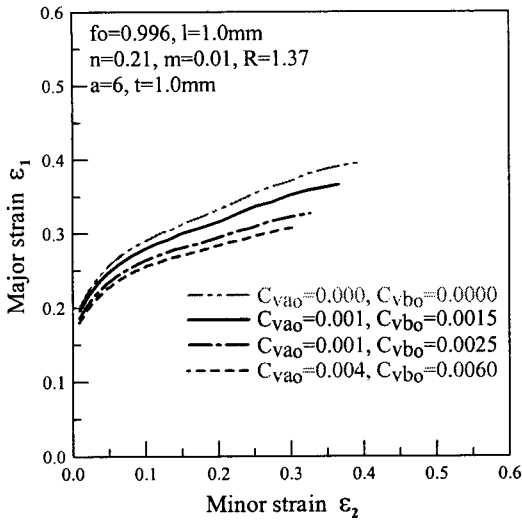


Fig. 5 Effect of initial void volume fraction on the analytical FLDs

$C_{vbo} = 0.0015$ ,  $l = 1.0mm$ 를 사용한 이론적 성형한계도를 비교한 결과, 실험 데이터와 미소한 차이가 있는 것을 제외하고는 예측된 성형한계도의 모양은 실험적 데이터의 형태를 잘 표현함을 알 수 있다. 또한, 미소한 차이는 앞서 밝힌 녀의 쪽으로 정의되는 공정 길이를 조정함으로써 제거할 수 있는데, 즉  $l = 0.7mm$ 로 계산하면 보다 정확한 일치가 얻어진다. 이는 녀의 쪽으로 정의되는 공정 길이가 성형한계 계산에 있어 결합계수 뿐만 아니라 또 다른 중요한 변수로서 고려될 수 있음을 의미한다.

Fig. 4~7은 본 연구에서 제안된 모델에서 성형한계에 영향을 미치는 변수들을 나타낸 것으로 특별히 언급되지 않은 값들은 립드 강판의 동일한 기계적 성질과 초기결합계수  $f_0 = 0.996$ , 초기기공률  $C_{vao} = 0.001$ ,  $C_{vbo} = 0.0015$  및 공정길이  $l = 1.0mm$ 를 기본적으로 사용하였다. 먼저, Fig. 4는 초기결합계수  $f_0$ 의 변화가 성형한계에 미치는 영향을 보여준다. 많은 이전의 연구에서 논의되었듯이 초기결합계수  $f_0$ 는 성형한계에 있어 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 초기결합계수의 증가와 더불어 각각의 변형경로에서의 성형한계 변형률을 비교해보면, 등이축 변형 상태에서의 성형한계 변형률의 증가가 평면변형

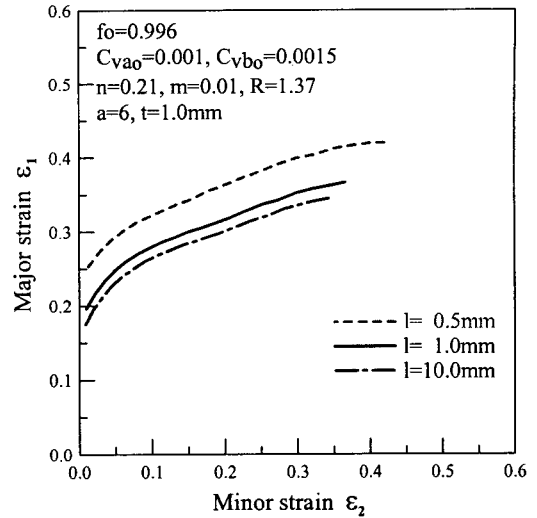


Fig. 6 Effect of internal length defining the length of the neck on the analytical FLDs

상태의 성형한계 변형률의 증가보다 높다.  $a = 2$ 인 이차 항복지수의 경우 비합리적으로 높은 한계변형률 및 급격한 변형 기울기를 갖는 것<sup>(14)</sup>과 달리 비이차 항복지수의 사용의 경우 등 이축 인장상태의 성형한계는 상대적으로 낮다. 또한 항복 지수는 등 이축 변형 상태에 많은 영향을 미치며 항복 지수가 커질수록 등 이축 인장 상태에서의 성형 한계는 낮아진다.

Fig. 5은 성형한계도 상의 초기 기공률의 영향을 나타낸 것으로 평면변형 상태의 경우 영향이 미비하나 등이축 변형경로의 경우 높은 기공률을 가질수록 성형한계를 급격히 감소시킨다. 즉, 기공의 영향을 고려하지 않은 일반적 M-K모델의 경우 등이축 인장상태에서는 성형한계를 과대평가<sup>(16)</sup>하지만, 기공의 영향을 고려한 손상발전을 M-K모델에 적용했을 때에는 이런 불합리한 현상을 제거할 수 있다. 또한, 평면변형 상태의 변형경로는 기공 성장이 상대적으로 작은 변화가 일어났는데, 이는 Fig. 2에서 논의된바와 같이 성형한계 변형률의 감소량은 각각의 변형경로에서의 기공률의 증가율에 의존함을 의미한다.

Fig. 6는 녀의 쪽을 정의하는 공정 길이의 영향을 나타낸 것으로 성형한계도는 공정 길이의 크기에 따라서 상당한 의존성을 나타낸다. 공정 길이가  $l = 1.0mm$ 에서  $l = 0.5mm$ 로 근소하게 감소하더라도 성형한계는 상당히 증가한다. 식 (7)

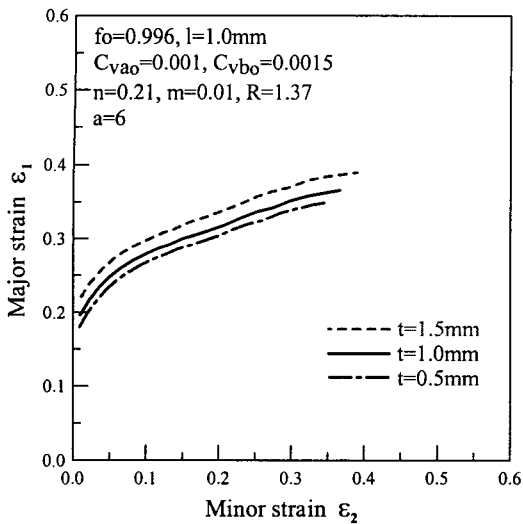


Fig. 7 Effect of sheet thickness on the analytical FLDs

에서 공정 길이가 감소할때 넥의 반경도 감소하고, 식 (6)로부터 평균 주응력  $\sigma_1^*$ 는 넥영역의 3축 응력의 영향으로 증가한다. 즉, 3축응력은 국부넥의 개시를 지연시키는데 기여하여 판재의 성형한계를 증가<sup>(16)</sup>시킨다. 이 결과로부터 넥 형상을 정의하는 공정 길이는 초기결함계수처럼 성형한계도의 수준을 조절하기 위한 또 다른 중요 변수로써 사용될 수 있다는 것으로 결론지을 수 있다.

본 연구에서 제안된 공정 길이를 M-K모델에 적용함으로써 성형한계도 상에서 판재 두께의 영향을 고려할 수도 있는데 Fig. 7이 성형한계도 상의 판재의 두께 영향을 나타낸다. 즉, 판재의 두께가 증가할수록 성형한계는 비례적으로 증가하는데,  $\Delta t=0.5mm$ 의 두께 증가가 성형한계도 상에서 약 0.02까지 증가시킨다. 이 경향은 장출펀치의 곡률에 의한 재료 두께방향의 변형률 구배를 고려한 Shi와 Gerdeen<sup>(17)</sup>의 연구 결과와 유사하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수정된 Liao 항복함수를 이용하여 기공을 고려한 이방성 판재의 재료거동을 묘사하였다. 이축인장 상태하에서 기공 성장을 고려하고 넥의 폭을 정의하는 공정 길이를 M-K모

델에 도입함으로써 판재의 성형한계도 상에서의 손상발전과 3축응력의 영향이 논의되었다. 또한 예측된 성형한계도는 립드 강판의 실험적 데이터와 비교되었다. 이 연구로부터 M-K모델에 손상발전의 적용은 훨씬 합리적이며 정확한 성형한계도의 예측이 가능하다고 결론지을 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 21세기 프론티어 연구 개발사업의 일환인 차세대 소재 성형 기술 개발 사업단의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Marciniak, Z. and Kuczynski, K., 1967, "Limit Strains in the Process of Stretch-Forming Sheet Metal," *Int.J.Mech.Sci.*, Vol. 9, pp. 609~620.
- (2) Gurson, A.L., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Materials," *J.Engng.Mater.Technol. ASME*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (3) Doege, E., Bagaviev, A. and Dohrmann, H., 1997, "Formability Analysis Based on the Anisotropically Extended Gurson Model," *Advanced Methods in Materials Processing Defects*, Ed. M.Predeleanu and P.Gilormini, pp. 281~288.
- (4) Liao, K-C., Pan, J. and Tang, S.C., 1997, "Approximate Yield Criterion for Anisotropic Porous Ductile Sheet Metals," *Mech. Mater.*, Vol. 26, pp. 213~226.
- (5) Kim, Y.S., Won, S.Y. and Needleman, A., 2002, "Prediction of Forming Limits for Anisotropic Sheet Metals Considering Void Growth," *Proc. Plasticity2002*, Aruba, USA, pp. 409~410.
- (6) Needleman, A. and Tvergaard, V., 1977, "Necking of Biaxially Stretched Elastic-Plastic Circular Plates," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 25, pp. 159~183.
- (7) Hosford, W.F., 1979, "On Yield Loci of Anisotropic Cubic Metals," *Proc. 7th North Am. Metalworking Conf.*, SME, Dearborn, MI, pp. 191~196.
- (8) Tadros, A.K. and Mellor, P.B., 1977, "An Experimental Study of the In-Plane Stretching of Sheet

- Metal," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 20, pp. 121~134.
- (9) Kim, Y.S. 2001, "Engineering Plasticity," *Sigma Press*.
- (10) Hu, J., Jonas, J.J. Zhou, Y. and Ishikawa, T., 1998, "Influence of Damage and Texture Evolution on Limit Strain in Biaxially Stretched Aluminum Alloy Sheets," *Mat.Sci.Engng.*, Vol. A251, p. 243.
- (11) Bridgeman, P.W., 1952, "Studies in Large Plastic Flow and Fracture," *McGraw Hill*.
- (12) Kim, Y.S., Lee, Y.M., Won, S.Y. and Hwang, S.M., 2002, "Effect of Material Damage on Forming Limits of Voided Anisotropic Sheet Metals," *Metal. Trans. A*, Vol. 34A, pp. 1283~1290.
- (13) Luo, Z.J., Ji, W.H., Guo, N.C., Xu, X.Y., Xu, Q.S. and Zhang, Y.Y., 1992, "A Ductile-Damage Model and Its Application to Metal-Forming Processes," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 30, pp. 31~43.
- (14) Son, H.S. and Kim, Y.S., 2001, "Strain Path Dependence of Forming Limit Predicted by Barlat and Lians Non-Quadratic Anisotropic Yield Criterion for Sheet Metals," *Int. J. Korean Soc. Mech. Engng.*, Vol. 15(2), pp. 210~216.
- (15) Ragab, A.R. and Saleh, Ch.A.R., 2000, "Effect of Void Growth on Predicting Forming Limit Strains for Planar Isotropic Sheet Metals," *Mech. Materials*, Vol. 32, pp. 71~84.
- (16) Needleman, A. and Triantafyllidis, N., 1978, "Void Growth and Local Necking in Biaxially Stretched Sheets," *J. Eng. Mater. Tech. Trans. ASME*, Vol. 100, pp. 164~169.
- (17) Shi, M.F. and Gerdeen, J.C., 1991, "Effect of Strain Gradient and Curvature of Forming Limit Diagrams for Anisotropic Sheets," *J. Mater. Shaping Technol.*, Vol. 9, pp. 253~268.