

타원체 보이드를 갖는 이방성 판재의 성형한계 예측

손현성*·김진*·김영석**

Prediction of forming limits for anisotropic sheet metals with ellipsoidal voids

H.S. Son, J. Kim, and Y.S. Kim

Abstract

The modified yield function of Gologanu-Leblond-Devaux in conjunction with the Barlat and Lian'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 shape parameter defining non-spherical(prolate ellipsoidal) voids with initially random orientations is introduced in M-K model. The predicted forming limits are compared with the published experimental data.

Key Words : M-K Model, Material Damage, Prolate Ellipsoidal Voids

1. 서론

판재의 성형한계를 이론적으로 예측하기 위해 많은 이론 모델들의 연구^[1]가 행해지고 있는데, 이들 모델의 대부분은 연성재료인 판재가 이축인장 변형 하에서 변형이 진행될수록 일부 결함을 갖는 부위에 변형이 집중되어 재료가 파괴에 이른다고 가정하고 있다. 하지만, 상용 판재재료에는 제조시 열적·기계적 공정 중에 자연적으로 발생하거나 미세구조의 특징을 제어하기 위한 인위적 조절에 의해 제2상(second-phase)입자를 포함하게 된다. 제2상 입자는 소성변형 중 주변 모재와 균열로부터 이탈되며, 이로 인해 보이드가 생성된다. 이러한 보이드의 생성, 성장 및 합체의 현상은 국부neck 발생 전의 변형률을 제한하므로 성형한계의 관점에서 필히 고려해야 할 사항

중의 하나이다. 즉, 보이드를 함유하고 있는 연성재료인 이방성 판재의 소성변형 거동을 정확히 예측할 수 있는 항복함수와 그에 대응하는 구성방정식의 도입이 필요하다. Gurson이 등방성 보이드 재료의 항복조건식^[2]을 제안한 이래로, Gurson의 항복함수는 많은 연구자들^[3,4]에 의해 모재 재료의 이방성 성질을 고려한 여러가지 형태로 수정되었으며 이를 이용하여 김영석^[5]등은 neck 형상을 정의하는 공정길이를 도입하여 성형한계도 상에서 neck 영역에서의 3축응력효과도 논의하였다. 한편, Gologanu^[6]등은 일반적인 형상의 보이드를 편향한 타원체(prolate ellipsoid) 보이드 형상으로 묘사하여 평행 또는 임의방위를 갖도록 배열한 재료에 대한 근사 항복함수를 연구하였다.

본 연구에서는 보이드 이방성재료의 소성변형을 묘사하기 위해 Gologanu-Leblond-Devaux(GLD)항복함수^[6]와

* 경북대학교 기계공학부 대학원

** 경북대학교 기계공학부

Barlat과 Lian의 평면이방성 항복조건^[7]을 결합하여 적용하였다. 또한 수정된 GLD항복함수를 이용하여 편장한 타원체 보이드를 갖는 이방성 재료에 대해 이축인장 하중을 받는 다양한 변형경로의 성형한계를 예측하였다. 이러한 이론들을 기반으로 재료의 기계적 성질, 보이드의 체적분율(void volume fraction), 초기 보이드 형상 등과 같은 변수들이 성형한계에 미치는 영향을 검토하였고 기존에 발표된 판재의 실험 데이터^[8]와 비교하여 그 타당성을 고찰하였다.

2. 이론적 고찰

편장한 타원체 보이드를 고려한 GLD항복함수^[6]는 쌍곡선 함수의 항이 변형을 증분계산을 위한 편미분이나 소성변형의 해석적 해를 구하는데 불편하므로 급수전개 형태로 근사적으로 풀면 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}^2 = (1 - q_1 C_v)^2 \bar{\sigma}_M^2 - q_1 C_v x^2 \sigma_m^2 \quad (1)$$

with $x = [1/\sqrt{3} + (\sqrt{3}-2) \ln(e_1/e_2) / \ln C_v]^{-1}$

$$e_1 = \sqrt{1 - e^{-2S}}, \quad e_2 = \sqrt[3]{C_v(1 - e_2^2)/(1 - e_1^2)} e_1$$

여기서 보이드 형상변수 S 는 타원체 보이드의 형상비로 정의($S = \ln a_1/b_1$)되며, $S \geq 0$ 인 편장한 타원체의 경우에서만 고려하였다(Fig.1 참조).

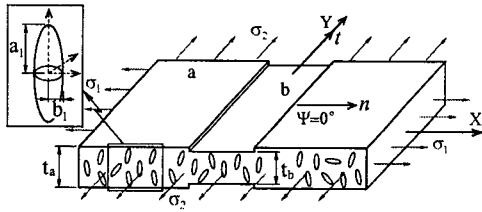


Fig.1 Schematic view for sheet metal having a heterogeneous distribution of prolate ellipsoidal voids in addition to initial thickness imperfection

타원체의 형상변수 S 의 진전(evolution) 방정식 S 는 다음과 같다^[6].

$$S = 3 \left(\frac{1 - 3K_1}{C_v} + 3K_2 - 1 \right) \bar{\epsilon}_m + \frac{3}{2} [2 - t^2 + (t^2 - 1)e_1^2] d\epsilon_{zz}' \quad (2)$$

with $\bar{\epsilon}_m = C_v / \{3(1 - C_v)\}$, $t = \sigma_m / \bar{\sigma}$

$$K_1 = 1/(2e_1^2) - (1 - e_1^2)/(2e_1^3) \tanh^{-1} e_1$$

$$K_2 = 1/(2e_2^2) - (1 - e_2^2)/(2e_2^3) \tanh^{-1} e_2$$

$$d\epsilon_{zz}' = 2/3 \{ d\epsilon_{zz} - 0.5(d\epsilon_{xx} + d\epsilon_{yy}) \}$$

식(1)과 결합할 항복함수는 Barlat과 Lian의 평면이방성 항복조건식^[7]을 사용하였고, 조합된 식은 이방성 모재에 대한 수정된 GLD항복함수의 형식을 가진다. 다양한 변형모드에 따른 보이드 체적분율 및 소성변형 관계식은 다음과 같다.

$$d\epsilon_x / dC_v = \left[\left\{ \bar{\sigma} / \sigma_x \right\}^{2-M} \cdot A + C_v (1 + \alpha / 4) \right] \cdot \frac{4}{3(1 + \alpha)(1 - C_v)C_v} \quad (3)$$

with $\alpha = \sigma_y / \sigma_x$, $kp_1 = k_1 / \sigma_x$, $kp_2 = k_2 / \sigma_x$,

$$A = \frac{2-c}{2} \left\{ \begin{aligned} &0.5 |kp_1 + kp_2|^{M-1} (1+B) \\ &+ 0.5 |kp_1 - kp_2|^{M-1} (1-B) \\ &+ \frac{c}{2-c} |2kp_2|^{M-1} B \end{aligned} \right\}$$

$$B = (1 - h_1 \alpha_1) / (2kp_2)$$

구성방정식은 장출편치의 곡률에 의한 재료 두께방향의 변형을 구배를 고려하기 위해 Shi와 Gerdeen^[9]이 제안한 식을 이용하였다.

본 연구에서 성형한계를 계산하기 위한 M-K모델은 Fig.1과 같다. 여기서 일반적인 형상의 보이드들은 장반경이 a_1 , 단반경이 b_1 인 타원체로 근사화되며, 보이드들의 장반경 축방향은 자기 다른 임의의 방향을 향하기 때문에 식(2)의 계산시 평균적으로 편장한 타원체가 유지된다고 가정한다. 성형한계는 힘의 평형방정식과 기하학적 적합방정식($\epsilon_{2a} = \epsilon_{2b}$)을 사용하여 수치적인 반복해석으로 구하였다. 성형공정에서의 손상발전은 보이드 생성보다 보이드 성장이 더 중요한 역할을 담당^[10]하기 때문에 초기부터 존재하는 보이드로부터 성장하는 손상발전만을 고려하였다.

3. 결과 및 토론

제안된 이방성 항복함수의 소성변형특성을 밝히기 위해, $M=6$, $q_1=1.5$, $R_0=1.53$, $R_{45}=1.13$, $R_{90}=1.69$ 인 판재에 대해 초기 보이드 체적분율 C_{v0} 가 0.05인 경우 앞서 밝힌 식을 이용하여 계산한 결과가 Fig.2에 나타나있다. 대표적인 3가지 변형모드의 경우, 등이축 변형모드에서의 보이드 성장이 가장 높았는데, 이는 Luo^[11]등에 의한 실험에서도 증명되었듯이 변형모드가 보이드 성장에 대해 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 또한 초기 보이드 형상변수 S_0 의 경우는 보이드의 형상이 구형($S_0=0$)일 때 보다 타원체($S_0 \neq 0$)인

경우가 보이드 성장이 더 빠르며, 같은 타원체의 경우라도 등이축 변형모드에서의 보이드 성장이 훨씬 더 빠르다는 것을 알 수 있다.

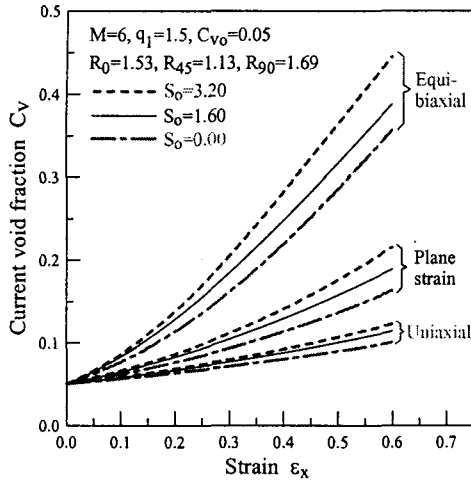


Fig.2 Current void volume fraction C_v for different deformation mode

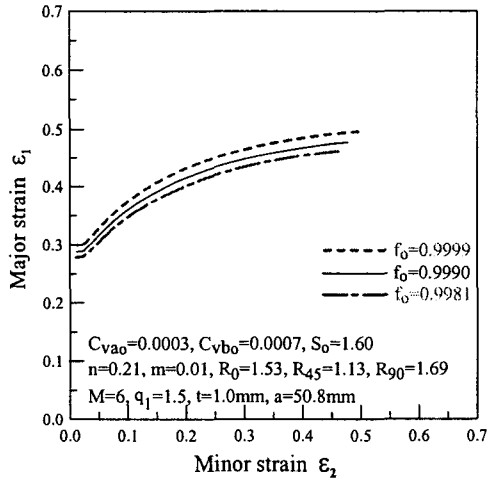


Fig.3 Effect of initial geometric imperfection on the analytical FLDs

Fig.3~5는 본 연구에서 제안된 모델에서 성형한계에 영향을 미치는 변수들을 나타낸 것으로 특별히 언급되지 않은 값들은 Fig.2에서 사용된 동일한 기계적 성질과 초기결함계수 $f_0=0.9990$, 초기 보이드 체적분율 $C_{va0}=0.0003$, $C_{vb0}=0.0007$ 및 초기 보이드 형상변수 $S_0=1.60$ 을 기본적으로 사용하였다. 먼저, Fig.3은 초기결함계수 f_0 의 변화가 성형한계에 미치는 영향을 보여준다. 많은 이전의 연구에서 논의되었듯이 초기결함계수

는 성형한계에 있어 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. $M=2$ 인 이차 항복지수의 경우 비합리적으로 높은 한계변형률 및 급격한 변형 기울기를 갖는 것과 달리 비이차 항복지수의 사용의 경우 등이축 인장상태의 성형한계는 상대적으로 낮다.

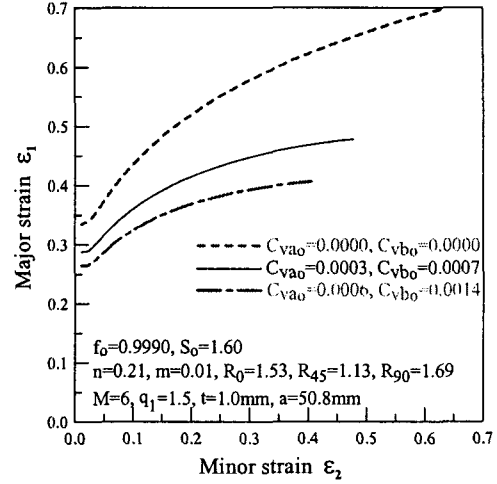


Fig.4 Effect of initial void volume fraction on the analytical FLDs

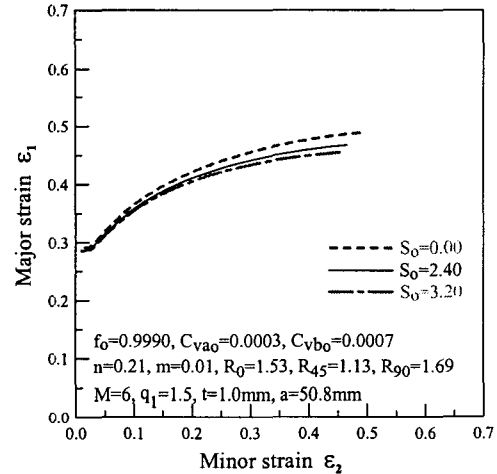


Fig.5 Effect of initial void shape parameter on the analytical FLDs

Fig.4는 성형한계도 상의 초기 보이드 체적분율의 영향을 나타낸 것이다. 초기 보이드 체적분율의 증가와 더불어 각각의 변형경로에서의 성형한계 변형률을 비교해보면, 등이축 변형상태에서의 성형한계 변형률의 증가가 평면변형 상태의 성형한계 변형률의 증가보다 높다. 즉, 보이드의 영향을 고려하지 않은 일반적 M-K모델의 경우 등이축 인장상태에서는 성형한계를 과대평가하지만,

보이드의 영향을 고려한 손상발전을 M-K모델에 적용했을 때에는 이런 불합리한 현상을 제거할 수 있다.

Fig.5는 편장한 타원체의 보이드를 정의하는 초기 보이드 형상변수 S_0 의 영향을 나타낸 것으로 성형한계는 S_0 의 값에 의해 평면변형 상태의 경우 영향이 거의 없는 반면, 등이축 상태의 경우 S_0 가 클수록 판재의 성형한계가 낮아지는 경향을 보인다. 즉, S_0 는 C_{∞} 와 더불어 등이축 인장영역에서의 성형한계도 수준에 영향을 미치는 또 다른 변수로 사용될 수 있다.

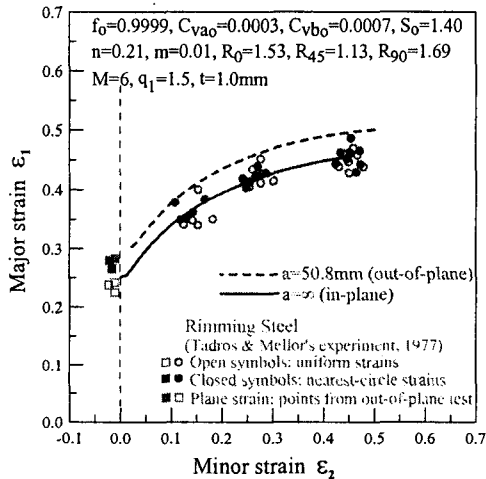


Fig.6 Comparison between the predicted and experimental FLDs for rimming steel sheet

제한된 보이드 이방성 판재에 대한 손상모델의 타당성을 검토하기 위해 Fig.6에 Tadros와 Mellor^[8]가 Rimming Steel로 구한 실험 데이터와 $f_0=0.9999$, $C_{va0}=0.0003$, $C_{vb0}=0.0007$, $S_0=1.40$ 를 사용한 이론적 성형한계도를 비교하였다. 여기서 f_0 의 값은 실험 데이터와 이론적 예측값이 가장 잘 일치하는 것으로 선정하였고, C_{va0} 와 C_{vb0} 의 값은 Rimming Steel에 대한 대표적인 값을^[12], S_0 는 일반적인 재료가 갖는 편장한 타원체 보이드의 범위 내에서 선정하였다. 그 결과, 실험 데이터와 미소한 차이가 있는 것을 제외하고는 예측된 성형한계도의 모양은 실험 데이터의 형태를 잘 표현함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수정된 Gologanu-Leblond-Devaux 항복 함수를 이용하여 편장한 타원체 보이드를 고려한 이방성

판재의 재료거동을 묘사하였다. 이축인장 상태에서 보이드 성장을 고려하고 초기 보이드 형상변수를 M-K모델에 도입함으로써 판재의 성형한계도 상에서의 손상발전의 영향을 검토하였다. 또한 예측된 성형한계도를 Rimming Steel의 실험 데이터와 비교하였다. 이 연구로부터 M-K모델에 손상발전의 적용은 훨씬 합리적이며 정확한 성형한계도의 예측이 가능하다고 결론지을 수 있다.

후기

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21사업의 연구비 지원에 의해 행해졌으며 이에 관계자 제위께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Marciniak, Z., and Kuczynski, K., 1967, "Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, p. 609.
- (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, p. 36.
- (3) 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, p. 409.
- (4) Kim, Y. S., Son, H. S., Yang, S. H. and Lee, S. R., 2003, "Prediction of forming limits for voided anisotropic sheets using strain gradient dependent yield criterion", Key Engineering Materials, Vols. p. 395
- (5) Kim, Y. S., Lee, Y. M., and Won, S. Y., 2003 "Effect of material damage on forming limits of voided anisotropic sheet metals" Metal. Tras. A, 게재예정논문
- (6) Gologanu, M., Leblond, J. B. and Devaux, J., 1993, "Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids-case of axisymmetric prolate ellipsoidal cavities", J. Mech. Phys. Solids, Vol. 41, No. 11, p. 1723.
- (7) Barlat, F. and Lian, J., 1989, "Plastic behavior and stretchability of sheet metals, Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions", Int. J. of Plasticity, Vol. 5, p. 51.
- (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, p. 121.
- (9) Shi, M. and Gerdeen, J., 1991, "Effect of strain gradient and curvature on forming limit diagrams for anisotropic sheets", J. Mater. Shaping Technol. Vol. 9, p. 253.
- (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) 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, p. 31.
- (12) 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, p. 71