

결합 성장을 고려한 수치해석적 성형한계도 예측

김경태¹· 송정환¹· 이근안¹· 이형욱²· 김세호³· 이용신[#]

A Numerical Prediction of the Forming Limit Diagram Considering Damage Evolution

K. T. Kim, J. H. Song, G. A. Lee, H. W. Lee, S. H. Kim, Y. -S. Lee

(Received August 26, 2009 / Revised November 17, 2009 / Accepted November 23, 2009)

Abstract

Finite element simulation is an alternative method to practically find the forming limit diagram(FLD). In this paper, the novel fracture criterion is utilized to predict the FLD in conjunction with finite element analysis for sheet forming. The principal scheme of the fracture criterion in this paper is that growth of the micro voids leads up to fracture in the viewpoint of micro-mechanics. The numerical FLD is verified by results of the out-of plane stretching test using hemispherical punch. The verification is also conducted about two types of material. These results are in good accord with the experimental results. Especially, the proposed scheme is appropriate to predict FLDs for a restricted material with low ductility after the instability point or ultimate tensile strength.

Key Words : Forming Limit Diagram, Sheet Metal, Formability, Finite Element Method, Void Growth

1. 서 론

성형한계도는 판재의 면내 주변형률을 구해 2차원 그래프상에 도시한 것으로 성형성, 즉 금속 판재의 네킹 혹은 파괴 발생 여부를 판단하기 위한 대표적인 도구이다. 성형한계도는 작성방법에 따라 실험적, 이론적 그리고 수치해석적인 세가지 방법으로 분류할 수 있다[1, 2]. 이들 중 성형한계도의 수치해석적인 예측에 대한 연구는 컴퓨터와 유한요소 해석 기법의 발전에 기인하여 최근 십여 년간 집중적으로 연구되어 왔다[3, 4]. 수치해석적인 방법을 통해 예측된 성형한계도가 충분한 정확도를 가진다면, 이를 통해 판재 성형공정시 공정변수의 영향을 이해하고 최적성형을 위한 금

형의 트라이아웃에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있다는 측면에서 큰 장점을 가진다. 그러나 수치 예측 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 고정도의 해석기법과 함께 소재의 거동과 관계된 물성 및 파단 모델의 정확도가 필수적이다. 특히 적절한 파단 모델, 즉 국부네킹이나 파괴가 발생하는 조건을 수립하는 것이 유한요소해석을 이용한 성형한계도 수치 예측의 관건이라 할 수 있다.

수치해석적으로 국부네킹이나 파괴를 결정하기 위해 적용된 방법으로써 Takuda[5]와 Han[6] 그리고 Ozturk 등[7]은 연성파괴조건과 그것을 응용한 방법을 적용하여 금속판재의 성형한계도를 작성하고자 하였다. Petek[8]과 Pepelnjak 등[9]은 판재 성형시 두께변형률의 2차 미분을 추적하여 두께

1. 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부
2. 충주대학교 에너지시스템공학과
3. 대구대학교 자동차·산업·기계공학부
교신저자: 국민대학교 기계자동차공학부,
E-mail: yslee@kookmin.ac.kr

감소가 급속히 이루어지는 부분을 국부네킹으로 정의하였다. Părăianu 등[10]은 두께변형률의 속도 민감성을 고려한 이론적 모델을 유한요소 해석에 적용하여 성형한계도를 예측하고자 하였다. 이 밖에도 이론적 모델에 기반한 다양한 수치 예측 모델이 개발되어 왔다. 이러한 수치 예측 모델은 성형성을 어느 정도 정확하게 예측하지만 각각의 모델은 여전히 한계를 지니고 있다. 예측 모델의 문제점은 판재금속의 종류, 결정학적 구조, 변형률 경로, 공정변수 등의 변동에 대응하여 정확한 결과를 제공할 수 있는 단일 모델이 없다는 것이다. 그 중, 주로 벌크성형 공정에 이용되어 왔던 경험적 혹은 반경험적 연성과괴 모델이 한계변형률 계산을 위해 종종 사용되어 왔지만 실제 재료가 지닌 파괴시점까지의 거동을 정확하게 나타내는데 한계가 있는 것으로 나타났다[7, 11].

본 논문에서는 금속 판재의 성형한계도를 수치해석적으로 예측하기 위한 실용적인 방법을 고찰한다. 특히, 소성변형시 미세 결합의 성장을 고려한 파단 조건을 수립함으로써 연성과괴 모델을 이용한 한계변형률 계산 및 성형한계도 수치 예측의 개선된 방법을 제안하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 유한요소 모델링

유한요소 해석은 상용 유한요소 해석프로그램인 Abaqus/Standard[12]를 사용하여 수행되었다. 우선 형상 모델링을 위해 Kim 등[13]의 논문에서 반구형 펀치, 블랭크홀더 그리고 다이로 이루어진 면외변형 시험을 채택하여 Fig. 1 과 같이 모델링하였다. 성형한계도를 작성하기 위한 한계변형률은 Fig. 2 와 같이 여섯 형상의 블랭크에 대하여 각각 유한요소 해석을 수행하여 획득하였다.

Table 1 은 적용된 유한요소 해석 조건을 나타낸다. 접촉조건으로 펀치-블랭크간의 쿨롱 마찰계수 μ 는 0.15를, 블랭크 홀더-블랭크 및 다이-블랭크 사이의 μ 는 0.3을 부과하였다. 하중 및 경계조건은 블랭크 홀딩력 150kN, 펀치 속도 20mm/min 을 부과하였고 대칭 형상임을 고려하여 1/4 모델을 해석하였다. 요소망은 해석의 정확성 및 소요시간을 고려하여 블랭크는 4절점 감차적분(reduced integration) 셸 요소(S4R of Abaqus library)를, 다이, 블랭크 홀더 및 펀치는 강체 요소(R3D4 of Abaqus library)를 사용하였다.

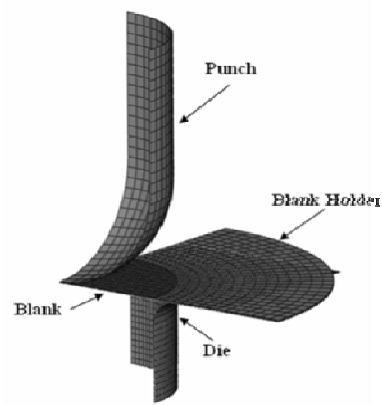


Fig. 1 Finite element model of the out-of plane stretching test

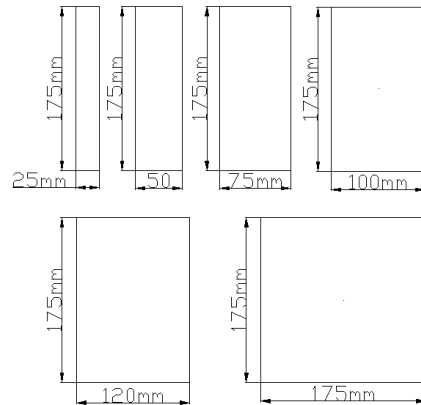


Fig. 2 Various geometry of the blanks used in the out-of plane stretching test

Table 1 Analysis condition of FE simulation

	Analysis Condition	
	Friction coefficient	$\mu=0.15$ between Punch and Blank
Punch velocity	20 mm/min	
Blank holding force	150 kN	
Element type	Shell element for Blank	Rigid body element for Die/Holder/Punch

2.2 물성

본 논문에서는 수치해석적 예측 결과의 검증을 위해 기존 연구결과로부터 AKDQ(aluminum killed drawing quality electrogalvanized) 강[7]과 AZ31B 마

Table 2 Material input data for selected sheet metals

Material	t ₀	Forming temperature	E	ν	0.2 % Yield Strength	Strength coefficient	Strain hardening coefficient (n)	R-values		
								R _{0°}	R _{45°}	R _{90°}
AKDQ steel	0.8 mm	Room temperature	200 GPa	0.3	174 MPa	480 MPa	0.202	1.83	1.28	2.60
Mg alloy	0.8 mm	100 °C	45 GPa	0.35	147 MPa	359 MPa	0.201	1.44	2.31	2.97

그네슘 합금[13]의 두 가지 소재에 대해 유한요소 해석에 필요한 입력 물성치와 실험적인 성형한계도를 참고하여 연구를 수행하였다.

유한요소 해석에 사용된 각각의 소재에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 물성 적용시 AKDQ 강 경우 식 (1)로써 표현되는 Hollomon 경화식에 따라 가공경화 거동을 구현하였다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1)$$

여기서, K 는 강도계수(strength coefficient), n 은 변형경화지수(strain hardening coefficient)를 나타낸다. 마그네슘 합금 판재의 경우 성형온도에 따라 변형연화(strain softening) 현상이 크게 일어나기 때문에 기존 강재나 알루미늄 합금에 기반한 지수함수 형태의 물성 모델을 사용하는 것이 적합하지 않다. 따라서 마그네슘 합금의 경우 해석중 변형연화에 의한 해의 발산을 방지하기 위하여 균일연신까지의 진응력-변형률 데이터만을 소성 물성치로 활용하고 네킹 이후의 응력값은 네킹시 인장강도의 값을 크게 벗어나지 않는 수준으로 큰 변형률 범위까지 가정하여 입력하였다. 또한, Hill의 1948 평면이방성 항복조건[2]을 적용하여 금속 판재의 소성 이방성을 고려하였다.

3. 성형한계도의 수치 예측

3.1 결함성장을 고려한 수치 예측 절차

본 논문에서는 Lee-Dawson[14]에 의해 제시된 손상 모델을 적용하여 마그네슘 합금 판재의 성형한계도를 예측하고자 하였다. Lee-Dawson은 기공률을 연성결함으로 정의하고 변형경화와 변형률 속도 경화를 갖는 금속재의 결함성장 모델을 제시하였다. 제시된 손상 모델은 식 (2)와 같이 평균응력을 상태변수로 나눈 비를 지수함수의 형태로 반영하였고, 결함성장 속도가 현재의 결함 크기에 의존하는 형태이다.

$$d\phi_{Lee} = C_1 \frac{\phi}{1-\phi} \text{Exp} \left[C_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right] d\varepsilon_e \quad (2)$$

여기서, σ_m 은 평균응력, σ_e 는 유효응력, ε_e 는 유효변형률을 나타내고, 초기 결함값 ϕ 는 참고문헌 [14]로부터 0.0011(0.11%)을 부과하였다. Lee-Dawson 모델의 경우 결함의 성장 거동이 지수함수의 형태로 기존의 경험적인 연성과파괴 조건과 달리 실제 기계적 열성화에 의한 파괴 과정을 잘 모사한다고 알려져 있다[11].

Lee-Dawson 모델을 적용하여 성형한계도를 예측하기 위한 수치 예측 절차는 다음과 같다. 우선 식 (1), 혹은 일축 인장시험으로부터 획득한 유동곡선을 식 (2)에 적용하여 재료상수 C_1, C_2 를 각각 결정한다. 그리고 판재 스트레칭 시험의 유한요소 해석을 통해 취한 출력결과를 식 (2)에 적용, 계산된 결과값이 공학재료의 일반적인 임계 결함값인 0.3보다 크면 파단된 것으로 판단한다. 이때, 최초 파단이 발생한 시간 증분(time increment)에서 시편의 모든 절점(node) 중 결함 값이 가장 큰 절점의 면내 주, 부 변형률을 획득하여 성형한계도 내에 도시하게 된다.

3.2 성형한계도의 수치 예측 결과

3.2.1 AKDQ 강의 성형한계도 예측

먼저 인장시험 결과로부터 AKDQ 강에 대한 Lee-Dawson 모델의 재료상수 C_1, C_2 를 각각 8, 0.001로 결정하였다. 그 후 상기 절차를 따라 성형한계도를 수치해석적으로 예측하고, Ozturk 등[7]에 의해 획득된 실험결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 예측된 결과는 실험결과와 비교할 때 성형한계를 다소 과대평가하고 있지만 한계선의 형상은 일치하는 경향을 보이고 있다. 적용된 시편의 형상이나 AKDQ 강의 물성 모델에 따라 예측의 정확성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

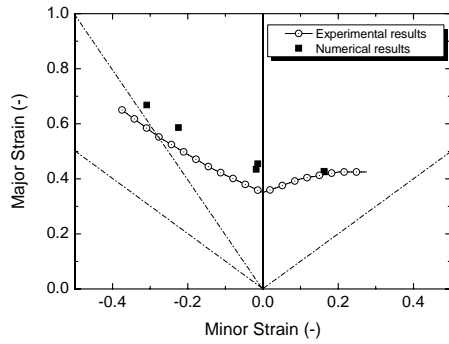


Fig. 3 Numerical and experimental FLDs of AKDQ steel

3.2.2 마그네슘 합금의 성형한계도 예측

AZ31B 마그네슘 합금 판재는 150~300℃의 온간 영역에서 의미있는 성형성이 나타난다고 알려져 있다[13]. 그러나 이 경우 성형온도에 따른 변형연화(strain softening) 현상을 규명하고 균일연신 범위를 벗어난 네킹 이후의 소성 거동을 파악하기가 쉽지 않다. 따라서 마그네슘 합금 판재의 경우 성형한계도를 수치 예측하기 위한 기초 연구로써 의미를 두고 일반적으로 통용되는 파괴시 성형한계도(Forming Limit Curve at Fracture; FLCF) 대신 네킹 기반의 성형한계도(Forming Limit Curve at Necking; FLCN)를 수립하고자 한다. 여기서 FLCF 는 주변형률장에서 파괴시 변형률의 조합을, FLCN 은 확산 네킹이 시작될 때 주변형률의 조합을 나타낸다.

앞서 AKDQ 강에 적용된 방법과 같이 마그네슘 합금 판재에 대해서도 Lee-Dawson 모델을 적용하여 성형한계도를 수치해석적으로 예측하였다. Fig. 4 는 성형온도 100℃ 에서 실험과 수치해석을 통해 획득한 마그네슘 합금 판재의 성형한계도를 나타

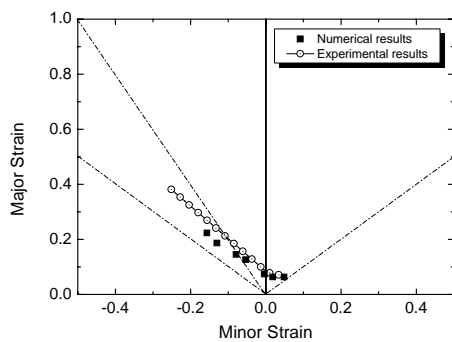


Fig. 4 Numerical and experimental FLDs of Mg alloy sheets at 100℃

낸 것이다. 여기서, 수치 예측에 적용된 Lee-Dawson 손상 모델의 재료상수 C_1 , C_2 의 값은 Mg 합금 판재에 대한 인장시험 결과[13]로부터 각각 16, 0.75 로 결정되었다.

수치 예측 결과는 실험결과와 비교하여 단축신장시 변형률의 차이를 제외하면 성형한계도의 형상과 한계평면변형률값(FLD_0) 모두 상당히 일치하는 것으로 나타났다. 언급한 바와 같이 수치 예측된 성형한계도는 네킹 기반의 성형한계(FLCN)을 예측한 것으로 성형온도 100℃에서 마그네슘 합금이 변형 연화(strain softening)를 거의 보이지 않고 파괴에 이른다는 것을 감안한다면 타당한 결과로 사료된다.

4. 결론

결합 성장을 고려한 손상 모델을 적용하여 금속 판재의 성형한계도를 수치해석적으로 예측하기 위한 방법을 연구하였다. 실험결과와의 비교를 통해 검증한 수치 예측 결과는 다음과 같다.

(1) 일축 인장시험 결과만을 물성 조건으로 이용하여 충분한 정확도를 갖는 성형한계도를 예측, 제시된 방법의 타당성을 검증하였다.

(2) AKDQ 강에 대한 성형한계도의 수치 예측을 위해 본 논문에서 제시된 방법을 적용한 결과 전체적인 성형한계선의 형상이 실험결과와 비교하여 일치하는 경향을 나타내었다.

(3) 재료의 변동에 대응하여도 유의한 결과를 나타내는지 확인하기 위해 마그네슘 합금 판재에 대해서도 수치 예측을 수행한 결과, 변형 연화(strain softening)을 고려하지 않은 네킹 기반의 성형한계도의 경우 단축신장시 변형률의 차이를 제외하면 실험결과와 비교하여 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

(4) 결과적으로 본 논문에서 제시된 성형한계 예측 방법은 물성이 잘 정의되었을 경우 정확한 예측이 가능하였다. 특히, 네킹 이후에는 연성이 크지 않아 바로 파괴로 이어지는 소재에 대해 큰 정확도를 보였으며, 향후 변형 연화를 고려한 물성 적용시 더 많은 유용성을 나타낼 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2009년도 국민대학교의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] D. Banabic, H. J. Bunge, K. Pöhlandt, A. E. Tekkaya, 2001, Formability of metallic materials(Plastic Anisotropy, Formability Testing and Forming Limits), Springer Verlag, Herdelberg.
- [2] W. F. Hosford, R. M. Caddell, 1993, Metal forming mechanics and metallurgy, Prentice-Hall PTR.
- [3] W. Volk, R. Illig, H. Kupfer, A. Wahlen, P. Hora, L. Kessler, W. Hotz, 2008, Benchmark Study Chap.1 Virtual forming limit curves, The Numisheet 2008, Interlaken, pp. 3~42.
- [4] D. Banabic, F. Barlat, O. Cazacu, T. Kuwabara, 2007, Anisotropy and formability, Advances in Material Forming-ESAFORM 10 Years on, Springer, Heidelberg-Berlin, pp. 147~173.
- [5] H. Takuda, K. Mori, N. Hatta, 1999, The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals, J. Mater. Process. Technol., Vol. 95, pp. 116~121.
- [6] H. N. Han, K. H. Kim, 2003, A ductile fracture criterion in sheet metal forming process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 142, pp. 231~238.
- [7] F. Ozturk, D. Lee, 2004, Analysis of forming limits using ductile fracture criteria, J. Mater. Process. Technol., Vol. 147, pp. 397~404.
- [8] A. Petek, T. Pepelnjak, K. Kuzman, 2005, An improved method for determining a forming limit diagram in the digital environment, J. Mech. Eng., Vol. 51, pp. 330~345.
- [9] T. Pepelnjak, K. Kuzman, 2007, Numerical determination of the forming limit diagrams, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., Vol. 20, pp. 375~378.
- [10] L. Părăianu, D. S. Comşa, J. J. Gracio, D. Banabic, 2007, Modelling of the forming limit diagrams using the finite element method, Advanced Method in Material Forming, Springer.
- [11] S. H. Yoon, Y.-S. Lee, W.-J. Nam, K.-T. Park, D.-J. Yoon, 2008, Comparative study on damage evolution models, Proc. KSPE Spring Conf., pp. 903~904.
- [12] ABAQUS theory and user's manual, 2005, Hibbit Karlsson & Sorensen Inc.
- [13] S. H. Kim, K. D. Park, J. H. Jang, K. T. Kim, H. W. Lee, G. A. Lee, S. Choi, Y.-S. Lee, 2008, Experimental and analytical researches on mechanical properties related to formability of AZ31B alloy sheet, Trans. Mater. Process., Vol. 17, pp. 466~472.
- [14] Y.-S. Lee, P. R. Dawson, 1993, Modeling ductile void growth in viscoplastic materials. Part 1. Void growth model, Mech. Mater., Vol. 15, pp. 21~34.