

고속 성형의 성형성 향상 입증을 위한 실험 및 이론적 성형한계선도 획득 및 비교

김민석¹ · 장윤희² · 김 정^{3,#}

Comparison of Forming Limit Diagram to Prove Improved Formability of High-speed Forming Acquired Experimentally and Theoretically

M. S. Kim, Y. H. Jang, and J. Kim

(Received January 11, 2024 / Revised February 13, 2024 / Accepted February 13, 2024)

Abstract

The current study aims to prove that high-speed forming has better formability than conventional low-speed forming. Experimentally, the quasi-static forming limit diagram was obtained by Nakajima test, and the dynamic forming limit diagram was measured by electrohydraulic forming. For the experiments, the LS-DYNA was used to create the optimal specimen for electrohydraulic forming. The strain measurement was performed using the ARGUS, and comparison of the forming limit diagrams confirmed that EHF showed better formability than quasi-static forming. Theoretically, the Marciniak-Kuczynski model was used to calculate the theoretical forming limit. Swift hardening function and Cowper Symonds model were applied to predict the forming limits in quasi-static and dynamic status numerically.

Keywords : Dynamic forming limit diagram, High speed forming, Formability, Marciniak-Kuczynski model, Experiment

1. 서론

최근 항공 및 자동차 산업을 비롯한 다양한 분야에서 경량화를 위한 다양한 성형 기술 연구가 이루어지고 있다. 기존 산업 분야에서는 자동차의 차체 및 항공기 동체 부품을 만들기 위해 딥 드로잉과 같은 성형공정을 사용하고 있다. 하지만 상기 방식은 성형 한계가 낮아 찢어짐이 발생하여 제품 생산에 제약이 있다는 단점이 존재한다. 위와 같은 이유로 상대적으로 높은 성형성을 확보할 수 있는 전자기 성형(Electromagnetic Forming)[1], 액중 방전 성형(Electrohydraulic Forming)과 같은 고속 성형 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2, 3]. 고속 성

형 기술은 알루미늄, 철과 같은 금속 소재를 1 ms 이내의 속도로 빠르게 성형을 진행하는 기술로서 높은 변형 속도 및 관성 효과로 인해 기존 저속 성형 대비 뛰어난 성형성을 가진다는 장점이 있다[4].

성형성을 정량적으로 판단할 수 있는 방법으로는 성형한계선도(Forming Limit Diagram)가 있다. 성형한계선도란 Keeler[5]와 Goodwin[6]에 의해 처음 제시된 것으로 판재 성형한계를 주변형률과 부변형률으로 표시한 것이다. 성형한계선도를 도출하는 방법으로는 이론적, 실험적 방법이 존재한다. 이론적인 방법에서는 Marciniak과 Kuczynski가[7] 제안한 초기결함을 이용한 M-K모델이 성형한계를 예측하는데 사용되고 있다. 실험적인 방법에서는 한계 돔 높이 실험, Nakajima test 와 같은 준정적 성형한계선도를 측정하는 방법이 존재한다[8]. 그러나 앞선 실험들은 모두 준정적 성형한계선도를 얻는 방법으로써, 고속 성형한계 측정 및 선도 획득에 대한 연구는 많이

1. 부산대학교 항공우주공학과, 석사과정

2. 부산대학교 항공우주공학과, 박사과정

3. 부산대학교 항공우주공학과, 교수

#Corresponding Author: Dept. Aerospace Engineering, Pusan Nat'l Univ.

E-mail: greatkg@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-7292-7441

부족한 실정이다.

본 연구에서는 정량적 데이터 분석을 통해 성형성 향상을 입증하고자 하였으며, 액중 방전 성형을 통한 동적 성형한계선도를 획득 및 기존의 저속 성형을 통한 준정적 성형한계선도와 비교하였다. 본 연구에서는 가공성이 좋고 열에 강해 자동차 부품에 많이 쓰이는 SUS430 판재를 이용하였다. 그리고 고속 성형 시편을 제작하였다. 고속 성형한계선도를 획득하는 동시에 Nakajima test를 통해 준정적 성형한계선도를 획득하여 고속 성형에서의 성형성의 향상을 입증하고자 하였다. 마지막으로 M-K 모델을 사용하여 이론적인 측면에서 성형한계선도를 계산하였으며, 이를 실제 실험결과와 비교함으로써 실험결과의 타당성을 확인하고 고속 성형의 성형성 향상 효과를 확인하였다.

2. 동적 성형한계선도

2.1 성형한계선도 획득 해석 모델

동적 성형한계선도(Dynamic FLD)를 얻기 위해 액중 방전 성형(EHF)장치를 활용한 유한요소해석 모델을 구축하였다. EHF는 순간적으로 급방전 된 전류가 전극팁 사이에 연결된 와이어에 흘러 와이어가 폭발하고, 이로 인한 폭발력이 유체를 거동시킴에 따라 소재를 고속 성형하는 기술로, 변형률 속도가 $1000 s^{-1}$ 이상으로 짧은 시간 내에 성형이 가능하다는 특징을 가진다[9, 10]. 동적 성형한계선도 획득을 위해서는 EHF장치에 맞는 시편을 설계하는 것이 필수적이다. 현재 연구실에 보유 중인 EHF 장치 및 커패시터는 Fig. 1과 같고 최대 인가 전압은 11 kV이다. 성형한계선도 획득을 위해서 LS-DYNA를 통해 구축한 유한요소해석 모델은 Fig. 2와 같다. 이때 EHF 실험에서 드라이버 시트를 사용하였기 때문에 Fig. 3과 같이 블랭크와 드라이버 시트를 함께 유한요소 해석을 진행하였다.

유한요소해석 모델은 크게 유체 파트(물, 공기, 플라즈마)와 구조 파트(챔버, 블랭크, 다이)로 구성되며, 소요되는 해석 시간을 줄이기 위해 1/4 모델로 구축하였다. 유체 파트들의 거동은 ALE(Arbitrary Lagrange and Eulerian) 기법을 이용하여 모사되었으며, 공기 모델을 기반으로 유한요소해석 프로그램 내 IVFG(Initial Volume Fraction Geometry) 기법을 이용하여 특정 범위로 지정된 요소 세그먼트를 플라즈마

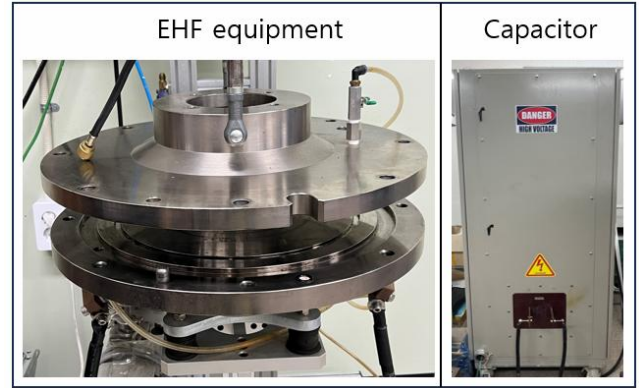


Fig. 1 Electrohydraulic forming equipment

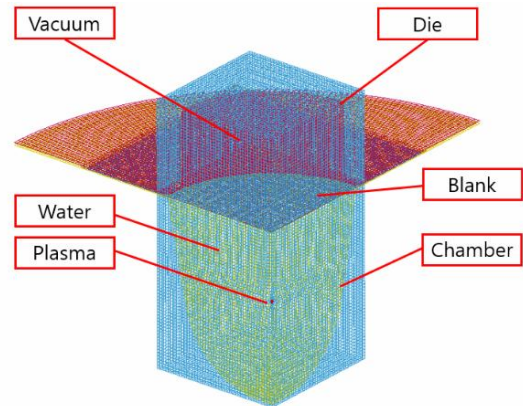


Fig. 2 Finite element analysis model for obtaining dynamic FLD

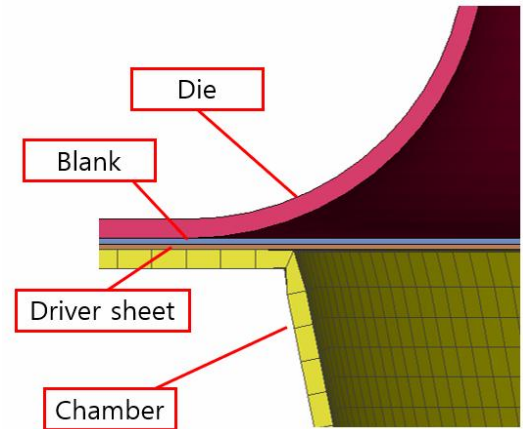


Fig. 3 Aspect of finite element analysis

및 챔버에 담겨 있는 물로 지정하였다. 와이어의 폭발에 의해 성형력이 발생하게 되므로 EOS_LINEAR POLYNOMIAL_ENERGY_LEAKAGE 키워드를 사용하여 폭발 에너지를 모사하였다. 폭발 에너지는 로

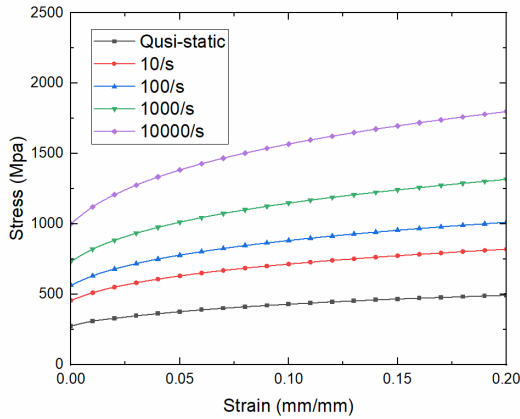


Fig. 4 Stress-Strain diagram of SUS430

고스키 코일을 이용해 측정된 시간에 따른 교류 전류와 전압을 공급한 전력 데이터를 이용하여 모사하였고, 키워드 내 상수를 조절하여 동일 입력 전압 인가 조건에서 유한요소해석이 수행된 판재 성형 결과가 성형 실험 결과에 있어 큰 차이가 없도록 하였다. MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 키워드를 사용하여 strain rate(변형률 속도)별 strain-stress diagram을 각각 curve data로 입력하여 소성 변형을 재현하였으며 이 때 적용된 SUS430 시편의 변형률 속도에 따른 strain-stress diagram은 Fig. 4와 같다. 대칭면에서는 symmetric 조건을 줌으로써 1/4 모델을 구현하였다.

2.2 동적 성형한계선도 시편 설계

앞서 EHF 유한요소해석 모델을 활용하여 동적 성형한계선도를 획득하기 위한 시편을 설계하였다. 해당 시편은 가로 250 mm, 세로 250 mm 크기의 SUS430 0.3t 설계 시편과 실제 EHF 실험 중에 구멍이 뚫린 시편 형상에서 물이 튀어나오는 것을 방지하기 위한 SUS430 0.3t 드라이버 시트 2장이며, 완전히 겹쳐 해석을 수행하였다. 해석 수행 결과에서, 성형된 블랭크의 최대 벌징 높이가 측정되는 최상단 요소를 선택하여 strain path를 확인하였고, 이를 통해 uni-axial, intermediate, plane 그리고 bi-axial path를 보여주는 4개의 형상을 결정하였다. 시편형상 설계인자는 Gauge width와 Corner radius로써 설계된 시편 형상과 함께 Fig. 5에 나타내었으며, 유한요소해석 결과는 Fig. 6와 같다. 최종적으로 각 설계 시편별 유한요소해석 결과에 따른 strain path는 Fig. 7와 같다.

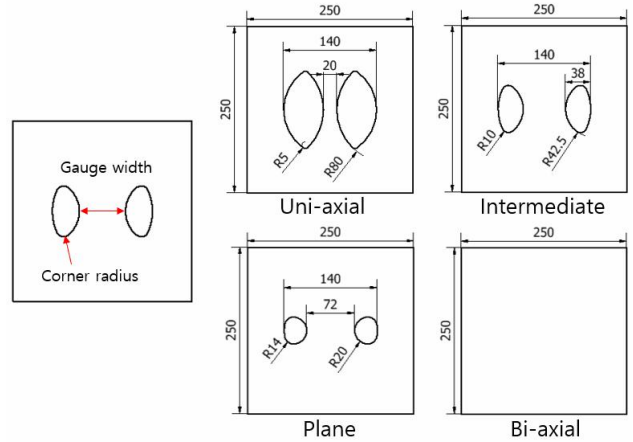


Fig. 5 Specimens for obtaining dynamic FLD

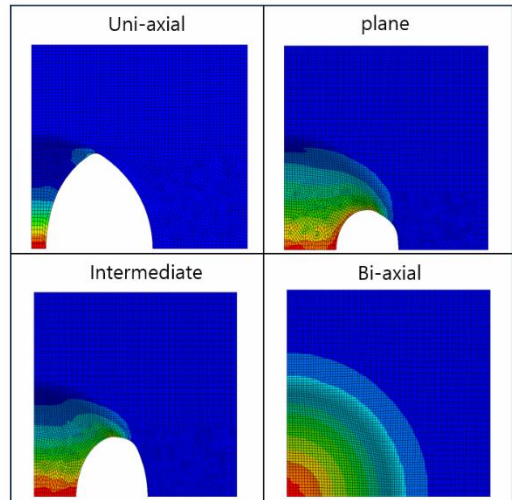


Fig. 6 Effective plastic strain through FEM

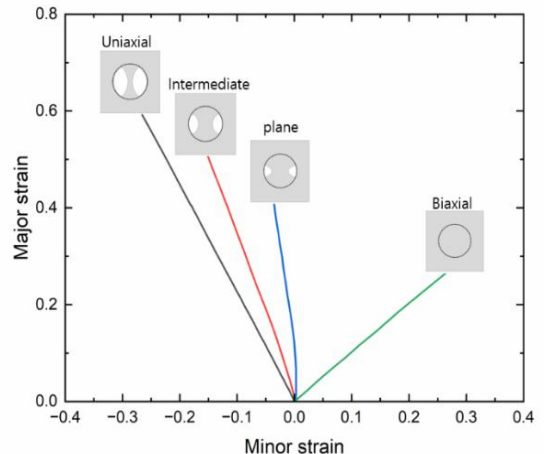


Fig. 7 Strain path of each specimen

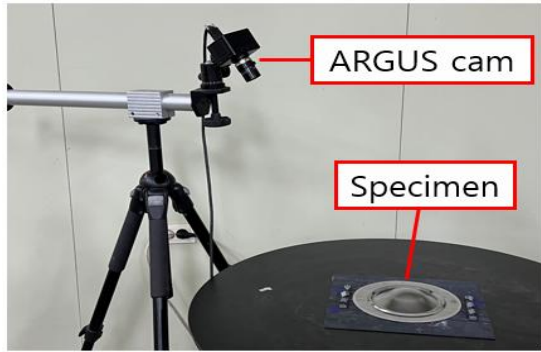


Fig. 8 ARGUS system for strain measurement

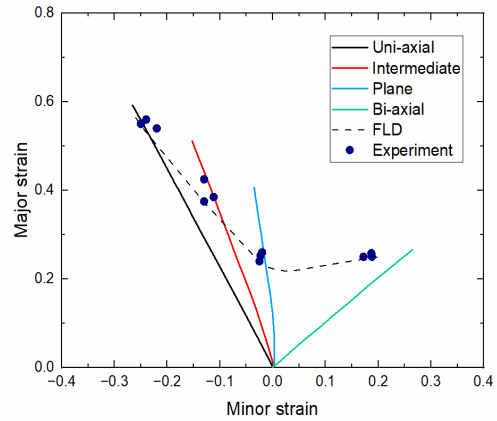


Fig. 10 Estimated strain paths and experiment results

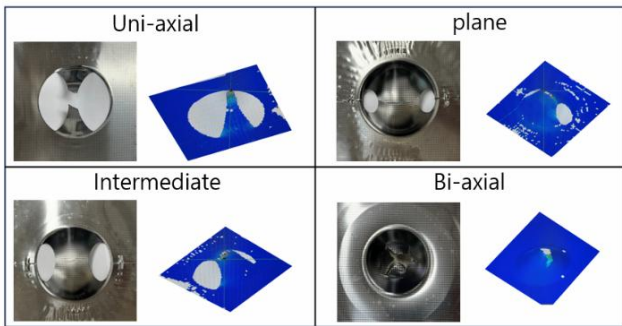


Fig. 9 Specimens and ARGUS measurement results

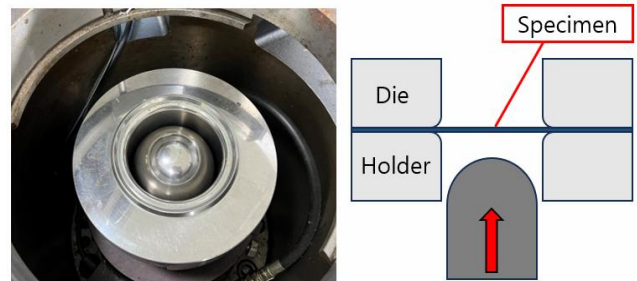


Fig. 11 Nakajima test equipment

2.3 고속성형 및 동적 변형률 측정 결과

두께 0.3 t 를 가지는 SUS430 판재의 고속 성형성을 평가하기 위해 설계된 시편에 대한 EHF 실험을 수행하였다. 이때 마찰의 영향을 최소화하고 시편 중앙 부분에서 파단 및 네킹을 유도하기 위해 드라이 이터 시트와 시편 사이에 0.05 t 두께의 테프론 (PTFE) 시트[11]를 삽입하여 실험을 진행하였다. 변형률 측정을 위해 시편에 지름이 1.2 mm인 원형격자를 2 mm 간격으로 인쇄하였다.

각 시편에 대해 3회씩, 총 12회의 실험을 수행하였고, 실험 후 광학식 3차원 변형률 측정 장치인 ARGUS[12]를 활용하여 파단 지점 주변부[13]에서의 주변형률과 부변형률을 획득하였다. ARGUS는 성형된 시편의 변형률 분포를 정확히 확인할 수 있는 성형 분석 시스템으로써 카메라를 통해 변형률을 측정하며, 성형된 시편의 변형률을 측정하는 실험 과정은 Fig. 8와 같다. 설계 시편의 변형률 측정 결과는 Fig. 9과 같으며, 파단 지점 주변 영역에서 획득한 변형률 데이터를 기반으로 한 동적 성형한계선도를 Fig. 10에 나타내었다.

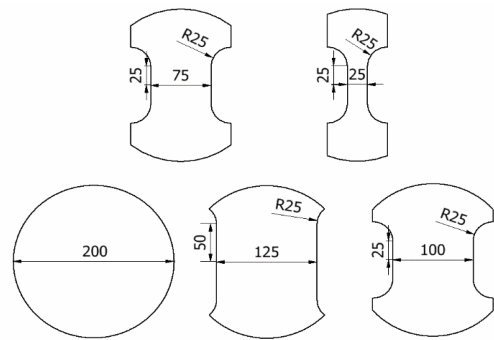


Fig. 12 Specimens for Nakajima test

3. 준정적 성형한계선도

3.1 Nakajima test

SUS430 0.3t 판재에 대한 준정적 성형한계선도를 확보하고 고속 성형에서의 성형한계선도와의 비교를 위해 Nakajima test를 수행하였다[14, 15]. Nakajima test 실험에서 사용된 돔 장치는 지름이 100 mm 인 반구형 펀치를 포함한 장치로 Fig. 11과 같다. 블랭크 홀더력을 가한 상태에서 펀치 속도를 1 mm/s로 설정하여 무윤활 상태로 실험을 수행하였다.



Fig. 13 Specimens and ARGUS measurement results

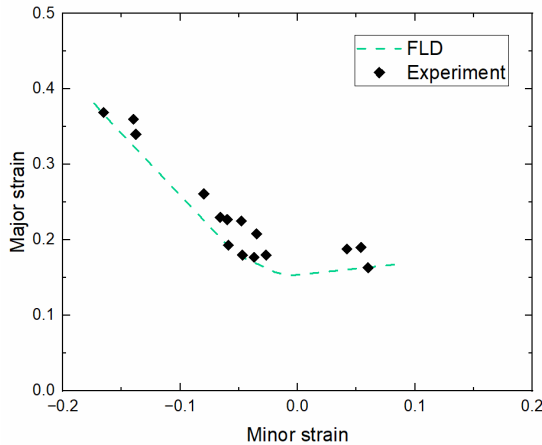


Fig. 14 FLD of quasi static test

사용된 시편은 Fig. 12와 같이 ISO 12004-2규격[16]에 따른 시편으로, 각 시편 별로 각각 3회, 총 15회의 실험을 수행하였다.

3.2 준정적 변형률 측정 결과

준정적 변형률 측정을 위해 적용된 격자무늬 패턴은 동적 변형률 측정에서 사용된 것과 동일하다. ARGUS를 통한 준정적 변형률의 측정 결과는 Fig. 13과 같으며 파단 지점을 빨간 원으로 나타내었다. 파단면 주위 영역에서의 변형률 측정 데이터를 기반으로 획득한 준정적 성형한계선도는 Fig. 14와 같다. 이때 성형한계선도는 변형 경로 별 측정된 점의 하한 지점을 이어 완성하였다.

4. 이론적 성형한계선도

4.1 M-K모델

M-K모델은 Marciniak과 Kuczynski가 제안한 성형한계 예측모델이다. 이 모델은 판재 일부 홈(Groove)

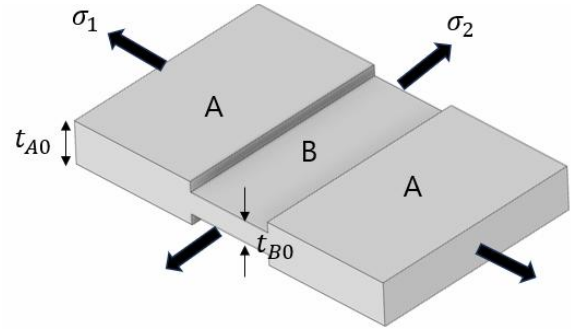


Fig. 15 Initial imperfection of M-K model

에서의 초기 재료결함(f_0)이 존재하며, 판재가 2축 인장응력을 받으면서 결함이 성장하고 국부 neck 형성한다는 이론을 기반으로 한다. 현재까지 이 모델은 판재의 성형한계를 예측하는데 가장 널리 사용되고 있으며 변형률 속도 민감 지수, 재료의 이방성, 여러 항복함수를 고려할 수 있도록 지속적으로 수정되어 왔다.

M-K모델의 알고리즘은 다음과 같다. Fig. 15와 같이 균일영역을 A, 초기결함을 가진 결함 영역을 B라고 하면, 초기결함을 균일영역과 초기 결함영역의 두께 비를 나타내는 식 (1)로 정의할 수 있다.

$$f_0 = \frac{t_{B0}}{t_{A0}} \quad (1)$$

균일 영역인 A와 결함 영역인 B에서의 1방향 힘은 평형을 이루므로 식 (2)가 성립한다. 이때 σ_{1A} , σ_{1B} 은 균일영역과 결함영역에서의 주응력 방향의 응력을 나타낸다.

$$t_A \sigma_{1A} = t_B \sigma_{1B} \quad (2)$$

판재에 비례변형이 가해진다고 가정하면 영역 A에서는 식 (3)와 같이 비례 변형이 유지된다. 이때 $d\varepsilon_{A1}$, $d\varepsilon_{A2}$ 는 각각 균일 영역에서의 1방향, 2방향에 대한 변형률 증가량을 나타낸다.

$$\beta_A = \frac{d\varepsilon_{A2}}{d\varepsilon_{A1}} \quad (3)$$

결함 영역에서는 비례변형이 유지되지 않으며, 2방향에서의 변형률 증가량은 식 (4)와 같이 균일 영역에서의 2방향 변형률 증가량과 같은 값을 가진다.

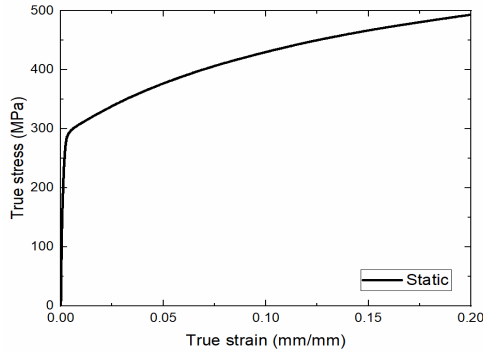


Fig. 16 Stress-strain relationship of SUS430

Table 1 Parameters of Swift equation

| Parameter | K | n |
|-----------|--------|------|
| Value | 689.74 | 0.21 |

$$d\epsilon_{.A2} = d\epsilon_{B2} \quad (4)$$

위의 조건들을 바탕으로 $\Delta\epsilon_{.A1} / \Delta\epsilon_{B1}$ 값이 0.1보다 작을 때 네킹이 발생한다고 가정하였고, bisection method를 사용한 수치해석을 수행하였다.

4.2 경화 모델

준정적 성형한계선도 예측에는 Swift 경화 모델을 사용하였고[17], 동적 성형한계선도 예측에서는 Cowper Symonds 경화 모델을[18] 사용하여 M-K 모델에 접목시켰다. Swift 경화 모델을 나타내는 식 (5)은 준정적 상태에서의 응력-변형률 관계를 나타내는 것으로, 상수 값은 본 연구에서 사용된 재료의 준정적 유동응력 곡선을 나타내는 Fig. 16에 따라 Table 1과 같다.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (5)$$

반면에, Cowper Symonds 경화 모델은 금속 재료의 변형률 속도를 고려할 수 있는 동적 응력-변형률 관계를 표현하는 식이다. 경화 모델 도출을 위해 사용된 SUS430 재료의 변형률 속도별 유동응력 곡선은 Fig. 17과 같다. 식 (6)은 Cowper Symonds 식을 나타내며, 본 연구에 사용된 재료의 유동응력 곡선에 따른 해당 식의 계수는 Table 2와 같다.

$$\bar{\sigma} = (\sigma_0) \left(1 + \frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{\frac{1}{p}}}{c} \right) \quad (6)$$

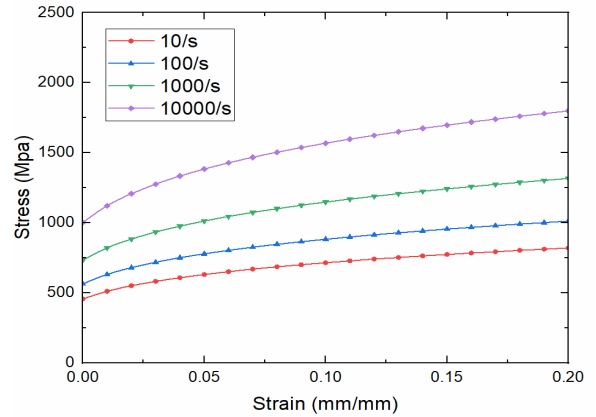


Fig. 17 flow stress curve by strain rate

Table 2 Parameters of Cowper Symonds equation

| Parameter | c | p |
|-----------|-------|-----|
| Value | 76.26 | 5.0 |

4.3 항복 함수

M-K 모델에서 사용된 항복 함수는 Hosford 79 방정식으로[19], 식 (7)과 같다. 해당 방정식은 결정계수와 이방성을 고려할 수 있다. α 는 1축과 2축의 응력비를 나타내며 a 는 결정구조 계수를 나타낸다. 본 연구에 활용된 재료의 특성을 따라 수직이방성 평균값 \bar{r} 은 1로 설정했으며, 결정구조 a 값은 2로 설정하고 등방성이라 가정하였다.

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{1+\bar{r}} (1 + |\alpha|^a + \bar{r}|1-\alpha|^a) \right]^{\frac{1}{a}} |\sigma_1| \quad (7)$$

4.4 M-K 모델 수치해석 결과

Swift 경화 함수를 활용하여 예측한 준정적 성형한계선도와 실험에서 측정된 변형률 데이터를 함께 나타낸 결과는 Fig. 18와 같다. 초기 재료결함(f_0) 값이 작아질수록 성형한계도가 낮아지는 경향을 보이는데, 특히 f_0 값이 0.97일 때 준정적 실험 결과와 가장 잘 부합하는 모습을 보인다. 동적 성형한계선도 예측에서도 f_0 값을 0.97로 설정하고 Cowper Symonds 경화 함수를 이용하여 수치해석을 수행하였다. Uni-axial 영역과 Bi-axial 영역에서 실제 결과와 유사하게 예측됨을 알 수 있으며, 이에 대한 이론적 결과 및 실험 결과는 Fig. 19와 같다.

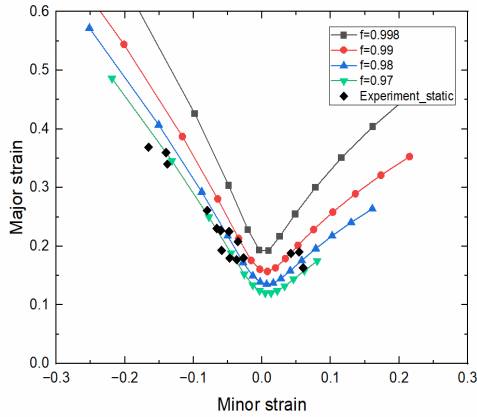


Fig. 18 Static theoretical forming limit curves with M-K model and Experiment result of Nakajima test

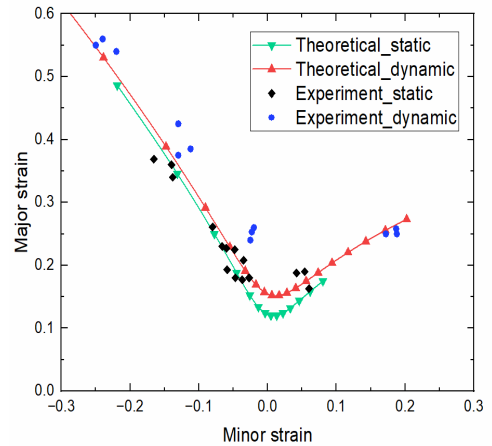


Fig. 20 Theoretical FLD and experimental results

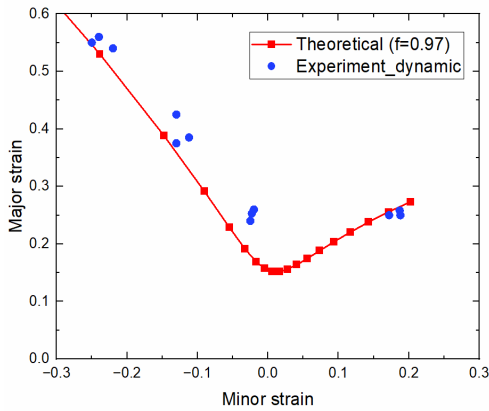


Fig. 19 Dynamic theoretical forming limit curves with M-K model and experimental result of EHF

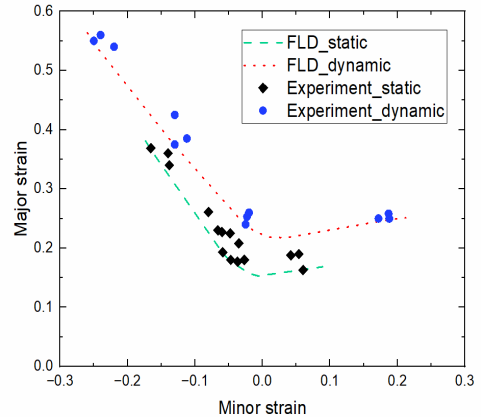


Fig. 21 Comparison of dynamic FLD and static FLD

5. 성형한계선도 비교

준정적 및 동적 M-K 모델의 이론 성형한계선도와 Nakajima test 및 고속 실험 결과를 모두 비교한 결과를 Fig. 20에 나타내었다. 이론적 결과에 따르면 동적 성형한계선도가 준정적 성형한계선도보다 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 21은 변형 경로 별 측정된 점의 하한 지점을 이은 준정적, 동적 성형선도로서 실험 결과적으로 고속 성형이 준정적 성형보다 더 높은 성형성을 보여 주고 있음을 나타낸다.

6. 결 론

본 연구에서는 고속 성형을 통해 SUS430 0.3 t 소재에 대한 고속 성형한계선도를 획득하여 준정적

성형한계선도와 비교하였고 M-K 모델을 활용하여 성형한계선도를 예측하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 고속에서의 성형한계선도 도출을 위해 LS-DYNA를 사용하여 EHF 실험에 맞는 시편을 설계 및 제작하였다. 실험 결과는 예측된 변형경로와 유사하여 시편 설계 방법을 도출하였다.

(2) 고속 성형은 기존의 저속 성형 공정보다 더 높은 성형 한계선도를 보여준다. 이는 고속 성형이 소재의 성형성을 향상시킨다는 결과를 보여준다.

(3) M-K 모델에서 Swift 경화 모델을 활용하여 준정적 성형한계선도를 예측하였으며, Cowper Symonds 경화 모델을 활용하여 동적 성형한계선도를 예측하였다. 모두 초기 재료결함 값이 0.97일 때 이론적 결과와 실험 결과가 가장 잘 부합하며, 실험 결과와 유사한 경향성을 보임을 확인하였다.

본 연구를 통해 고속 성형에서의 성형성 개선을

확인하였다. 하지만 시편 형상에 따라 일정한 성형력을 만들어 낼 수 없다는 EHF 성형 공정의 한계로 인해 성형된 시편 형상별로 네킹 및 파단부 변형률 속도가 다를 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 획득한 동적 성형한계선도는 실험 장비 특성에 따라 특정 범위를 갖는 변형률 속도에 대한 성형한계선도이다. 이는 동적 성형한계선도를 구함에 있어 개선해야 할 문제로, 후속으로 특정 변형률 속도에 따른 동적 성형한계선도를 획득하는 연구 진행이 필요하다.

후 기

이 논문은 2023년도 중소기업기술정보진흥원의 재원으로 중소기업기술개발지원사업의 구매조건부신제품개발사업(구매연계형) (No. G21S334512301)과 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 기본연구지원사업(RS2023-00253462182065300001)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] Ang Xiao, Yuhong Lin, Changqing Huang, Xiaohui Cui, Ziqin Yan, Zhihao Du, 2023, Effect of electromagnetic forming-heat treatment process on mechanical and corrosion properties of 2024 aluminum alloy, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 1027-1038, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.036>
- [2] Qiuli Zheng, Haiping Yu, 2020, Hyperplasticity mechanism in DP600 sheets during electrohydraulic free forming, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 279, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116582>
- [3] H. B. Byun, & J. Kim, 2022, Estimating Strain Rate Dependent Parameters of Cowper-Symonds Model Using Electrohydraulic Forming and Artificial Neural Network, *Transactions of Materials Processing*, vol. 32, pp. 81-88, <http://data.doi.or.kr/10.5228/KSTP.2022.31.2.81>
- [4] J. Kim, W. J. Song, B. S. Kang, 2013, Study on Formability Enhancement of Electromagnetic Forming using Gurson Plasticity Material Model, *Trans. of the Kor. Society of Automotive Eng.*, vol. 21, No. 3, pp. 98-104, <http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.3.098>
- [5] Keeler, S.P. Backhofen, W.A., 1963, Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches, *ASM Trans. Q.*, pp. 25-48.
- [6] Goodwin, Gorton M, 1968, Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop, *SAE Transactions*, vol. 77, pp. 380-87, <https://www.jstor.org/stable/44565070>
- [7] Marciniak, Z. and K. Kuczyński, 1967, Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal, *J. Mech. Sci.*, vol. 77, pp. 609-620, [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(67\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90066-5)
- [8] Nakazima, K.K., T; Hasuka, K., 1971, Study on the formability of steel sheets, in *Yawata Tech Rep*, pp. 678-680.
- [9] Min-A Woo, Woo-Jin, S., Kang, B., & Jeong, K, 2019, Acquisition and evaluation of theoretical forming limit diagram of al 6061-T6 in electrohydraulic forming process. *Metals*, vol. 9, pp. 401, <https://doi.org/10.3390/met9040401>
- [10] Y. H. Jang, M. S. Kim, and J. Kim, 2023, Experimental Comparison of Electrohydraulic Forming of SUS430 with Free Bulging Die Depending on Wire of Electrodes, *Transactions of Materials Processing*, vol. 32, no. 6, pp. 303-310, <https://doi.or.kr/10.5228/KSTP.2023.32.6.303>
- [11] G. Sun, W. Zhang, Z. Wang, H. Yin, G. Zheng, and Q. Li, 2020, A novel specimen design to establish the Forming Limit Diagram (FLD) for GFRP through stamping test, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, vol. 130, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105737>
- [12] J. S. Lee, J. D. Kim, and H. J. Kim, 2013, Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metal Using Inverse Quartic Curve Fitting, *Transactions of Materials Processing*, vol. 22, no. 6, pp. 328-333, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2013.22.6.328>
- [13] Shabanpour, M., & Arezoodar, A. F, 2023, Experimental and numerical investigation of forming

- limit diagram of Al/Cu two-layer sheet in high strain rate forming process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 237, pp. 779-790, <https://doi.org/10.1177/09544054221113644>
- [14] S. G. Kim, T. H. Oh, J. D. Kim, & H. J. Kim, 2015, Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metals by the Time-dependent Method, Transactions of Materials Processing, vol. 24, pp. 361-367, <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.24.5.361>
- [15] H. G. Noh, B. E. Lee, J. Kim, B. S. Kang, W. J. Song, 2014, Evaluation of Analytical Parameters on Forming Limit Diagram based on Initial Geometrical Instability, Transactions of Materials Processing, vol. 23, pp. 199-205, <http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.2014.23.4.199>
- [16] International Standard, 2008, ISO 12004-2:2008(E).
- [17] Swift, H, 1952, Plastic instability under plane stress. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 1, pp. 1-18, [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(52\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90002-1)
- [18] Peixinho, N., & Doellinger, C, 2010, Characterization of dynamic material properties of light alloys for crashworthiness applications, Materials Research, vol. 13, pp. 471-474, <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000400008>
- [19] Liu, W., Lin, Y. Z., Meng, Z. H., Li, J. Q., & Huang, S. Y, 2022, Constitutive model and forming limit prediction of AA5182-O aluminum alloy sheet in electromagnetic forming, Materials Science and Engineering, vol. 1270, pp. 012047, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1270/1/012047>