

친환경 자동차용 고강도 알루미늄 신소재(Almag6) 성형성 평가

이상민¹, 레 쯡 다이², 홍석무^{3*}

¹공주대학교 미래융합공학과, ²공주대학교 그린카기술연구소, ³공주대학교 미래자동차공학과

Formability Evaluation of New High Strength Aluminum Materials (Almag6) for Environment-Friendly Vehicle

Sangmin Lee¹, Le Trong Dai², Seokmoo Hong^{3*}

¹Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University

²Green Car Technology Laboratory, Kongju National University

³Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University

요약 최근 자동차 배기가스로 인한 환경오염을 줄이기 위한 환경규제로 경량화에 관한 연구들이 활발하게 이뤄지고 있으며, 최근 사용하는 소재를 스틸에서 알루미늄으로 변경되고 있다. 알루미늄은 철에 비해 비중이 1/3로 경량화에 효과적이지만 철강소재에 비해 최대강도가 낮고, 연신율 또한 낮은 단점이 존재한다. 본 연구에서 사용한 Almag6은 이러한 단점을 개선하기 위해 기존 5000계열 소재에 마그네슘 함유량을 높여 강도를 향상시키고 특수 열처리를 통해 연신율을 향상시킨 신소재이다. 본 연구에서는 Al5052-H32 소재와 Almag6 신소재의 강도 및 연신율 특성을 비교하기 위해 인장시험과 성형한계도 시험을 수행하였다. 연신율이 낮고 강도가 높은 소재의 경우 성형한계도 시험 중 그립부 파단 현상이 발생하기 쉽기 때문에 본 연구에서는 소재에 작용하는 응력비에 따라 새로운 인장시편을 사용하여 인장시험 기구 성형한계도 2사분면을 완성하였다. 또한 DIC(Digital Image Correlation)를 적용하여 네킹 및 파단 시점의 국부 변형률을 측정함으로써 해서 성형한계도의 네킹에서 파단까지의 범위를 도출할 수 있게 되었다. 따라서 기존 보수적인 네킹 발생 시 성형한계도를 작성한 경우 보다 파단에 근접한 제품 설계까지 파단 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract Recently, studies have been conducted on weight reduction to reduce environmental pollution caused by vehicles. Aluminum has 1/3 the weight of steel and is effective in reducing weight, but it has a disadvantage of low strength and elongation. Almag6 is a new material with increased magnesium content in compared to 5000 series material, which improves the strength and elongation through heat treatment. A tensile test and forming limit test were conducted to compare the strength and elongation characteristics of Al5052-H32 and Almag6. For materials with low elongation and high strength, it is easy to fracture a gripped part during the forming limit test, so a two-quarter forming limit was completed with a tensile tester using a new tensile specimen depending on the stress ratio applied to the material. In addition, we applied Digital Image Correlation to measure the local strain at the time of necking and fracture to show the range from necking to fracture of the forming limit diagram. It is expected that it will be possible to present a basis for determining product designs that are closer to breakage than before.

Keywords : Aluminum, Digital Image Correlation, Forming Limit Diagram, R-value, Sheet Metal Forming

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (G012001306003)

*Corresponding Author : Seokmoo Hong(Kongju National Univ.)

email: smhong@kongju.ac.kr

Received July 11, 2022

Revised August 23, 2022

Accepted October 7, 2022

Published October 31, 2022

1. 서론

배기가스에 의한 환경오염을 줄이기 위한 방법으로 경량화에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 그중 소재의 변경은 가장 큰 효과를 얻을 수 있어 활발한 연구가 진행되고 있다[1]. 경량 소재 중 알루미늄은 철에 비해 약 35% 정도 가볍기 때문에 가장 대표적으로 사용되고 있다. 특히 전기자동차에는 최대 주행거리가 중요하고 Fig. 1과 같이 배터리 캔의 핵심 소재로 사용되기 때문에 필수적으로 사용된다. 하지만 순수 알루미늄 소재인 1000계열 알루미늄은 철에 비해 항복강도, 최대인장강도, 연신율 등 고유 물성치가 낮기 때문에 기존에 사용하던 고강도강을 대체하기 어렵다[2]. 이를 해결하기 위해 알루미늄과 마그네슘을 혼합한 5000계열 합금이 만들어졌는데, 마그네슘 함유량에 따라 기계적 강도가 증가하게 된다[3]. 그렇기 때문에 5000계열 알루미늄은 기존 1000계열 알루미늄 대비 항복 강도 및 최대인장강도가 2배 정도 높다는 장점은 있지만, 강도가 높아질수록 연신율이 떨어져 성형하기 어렵다는 단점이 있다[4].



Fig. 1. Battery cans for electric vehicles made by aluminum
(a) Pouch type battery can (b) Round type battery can

Table 1. Comparison of Mg content and elongation between Almag6 and Al5052, and Al5083

| | Al5052 | Al5083 | Almag6 |
|---------|-----------|-----------|-----------|
| Wt. (%) | 2.1 ~ 2.7 | 4.0 ~ 4.9 | 5.8 ~ 6.4 |
| EL (%) | 14.0 | 6.0 ~ 7.0 | 7.0 |

Table 1은 Almag6와 다른 두 가지 소재의 마그네슘 함유량(Wt) 및 연신율(EL)을 나타낸 표이며, Almag6는 기존 5000계열을 개선한 소재로 기존보다 마그네슘 함유량을 높여, 더 높은 강도를 가지면서 연신율을 동시에 개선하여 성형성을 향상시킨 소재이다. 그렇기 때문에 Almag6를 실제 제품 생산에 도입 시, 성형성 평가를 위

한 기준이 부족하여 Kim[4], In[5], Kim[6]의 시험방법을 참고하여 Almag6를 판재의 압연 방향 기준으로 0°, 45°, 90° 세 가지 방향으로 시편을 가공하여 단축인장시험(uniaxial tensile test) 및 돔장출시험(dome stretching test)를 진행하여 기계적 물성 및 성형한계선(FLC: forming limit curve, 이하 FLC)를 구한 후 그래프를 도시하여 성형한계도(FLD: forming limit diagram, 이하 FLD)를 작성했다. 그리고 기존 5000계열 소재 중 연신율이 높아 다양한 제품의 생산에 사용되고 있는 Al5052-H32를 동일한 시험들을 진행해 Almag6 비교했다. 이때 전통적인 FLD 측정방식은 시편의 파단부 주변의 변형률을 이용하여 측정하였는데[4], 변형경로를 알 수 없어 파단지점의 예측이 어렵다는 단점이 있다

본 연구에서는 시편의 파단 이후 측정된 변형률을 이용해 FLD를 측정하던 전통적인 방법의 정확한 파단 시점 확인이 어렵다는 단점을 개선한 단축인장시험 및 돔장출시험 진행 시 최근에 연구[4-6]가 진행되고 있는 디지털 이미지 상관기법(DIC: digital image correlation, 이하 DIC)을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정해, 변형경로 및 파단 시점 확인 후, 파단 직전 지점과 네킹 지점의 FLC를 한 그래프에 도시하여 새로운 FLD를 제시했다.

Table 2. Test information

| | |
|------------|---------------------|
| Equipment | Shimadzu (50kN) |
| Test | Uniaxial Tensile |
| Test Speed | 1mm/min |
| Material | Almag6, Al5052-H32 |
| DIC Sensor | GOM ARAMIS 6M (1Hz) |

2. 단축인장시험

2.1 단축인장시험

Almag6의 항복강도(yield strength) 및 최대인장강도(ultimate tensile strength), 소성 이방성 계수(plastic strain ratio) 등의 기계적 특성을 확인하기 위해 두께 0.5mm의 Almag6 판재를 Fig. 2 (a)와 같이 압연방향에 0°, 45° 그리고 90° 방향으로 KS B 0802 규격에 맞춰 시편을 제작했다. 그리고 기존 5000계열 소재와 차이점을 확인하기 위해 연신율이 높아 상용적으로 사용되는 Al5052-H32 소재를 동일 규격으로 시편 제작

및 인장시험을 비교 진행했다. Table 2에 인장 시험에 관한 정보를 나타냈으며, 시험하는 도중 DIC 기법을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정하였고, 시험 및 DIC 측정은 Fig. 2 (b)와 같이 setup 후 1 Hz로 촬영하였다.

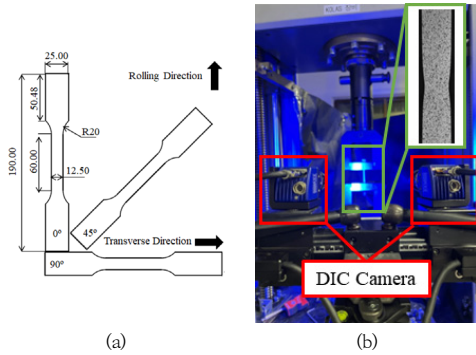


Fig. 2. Uniaxial tensile test & DIC setup

2.2 DIC 기법을 이용한 변형률 측정

DIC 기법은 시편에 불규칙한 스페클 패턴을 생성해, 변형 전 이미지와 변형 후 이미지를 비교하여 시편의 전체 영역을 계산하는 기법으로, 기존에 시편에 두 점을 표시하여 연신계를 이용해 변형률을 측정하던 방법에 비해 방향별 변형률, 국부 변형률 등 세부 정보를 얻을 수 있다[7]. 또한 시험 진행 동안 실시간으로 촬영을 하기 때문에 변형 경로 확인이 가능하여 네킹이 발생하는 시점이나 파단 직전의 변형률 예측이 가능하다는 장점이 있다.

2.3 Almag6 인장시험 결과

인장시험 후 Fig. 3과 같이 공칭응력-변형률 그래프를 도시했으며, Table 3에 시험 결과를 나타냈다. Table 3에서 F_{max} 는 최대하중을 뜻하며, σ_y 는 항복강도, σ_{UTS} 는 최대인장강도를 뜻하며, ϵ_f 는 파단 직전 변형률, EL은 연신율을 뜻한다. 0°와 90°는 최대하중과 항복강도 및 최대인장강도는 비슷했으며, 연신율은 약 5 %의 차이를 확인하였고, 45°는 0°와 90°에 비해 최대하중 및 강도가 약 13 % 정도 낮지만, 연신율은 0°와는 5 % 이상, 90°와는 2 % 정도의 차이를 확인하였고, 압연 방향별 기계적 특성의 차이를 확인하였다.

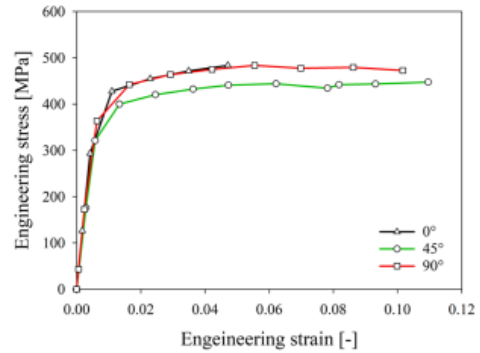


Fig. 3. Engineering stress-strain curves of Almag6 for three different tensile directions

Table 3. Mechanical properties of Almag6 according to rolling directions

| | F_{max} [N] | σ_y [MPa] | σ_{UTS} [MPa] | EL [%] |
|-----|------------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| 0° | 3064.98 | 368.59 | 489.95 | 5.80 |
| 45° | 2802.89 | 319.38 | 444.83 | 12.08 |
| 90° | 3042.62 | 366.36 | 486.70 | 10.34 |

따라서 재료에 나타나는 이방성의 정도를 거시적으로 표현하기 위해 Lankford 변수[8]를 사용하여 Almag6의 압연 방향별 수직 이방성 계수(R-value)를 구했다. 그리고 GOM ARAMIS[9]에서 Fig. 4와 같이 파단 지점의 중심에 점을 표시한 후, 시험이 진행되는 동안의 길이 방향 변형률(ϵ_l), 두께 방향 변형률(ϵ_t)를 측정 후 Eq. (1)을 이용하여 폭 방향 변형률(ϵ_w)를 구하여 각 각도 별 수직 이방성 계수 R을 계산하여 Table 4에 나타내었다. 계산 결과 각도별로 50 % 이상 차이가 남을 확인하였으며, 평균 수직 이방성 계수 \bar{R} 을 구하기 위해 Eq. (2)를 이용했다. 측정 결과 1.10으로 기존 알루미늄(0.7)보다 값이 높았다[10-12]. 따라서 평균 수직 이방성 계수가 1에 가까워 기존 알루미늄 대비 드로잉성이 우수함을 확인하였다.

$$R = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{-\epsilon_w}{\epsilon_t + \epsilon_w} \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \quad (2)$$

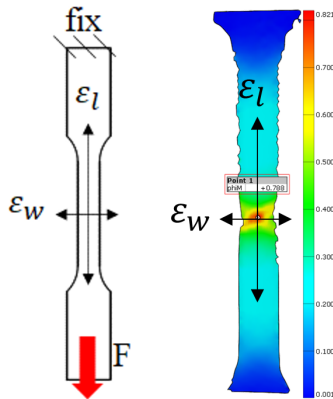


Fig. 4. Measurement of strain in the longitudinal direction and strain in the width direction

Table 4. R-value of Almag6 for three different rolling directions

| | 0° | 45° | 90° | \bar{R} |
|---------|------|------|------|-----------|
| r-value | 0.37 | 1.51 | 1.04 | 1.10 |

2.3.1 Almag6, Al5052-H32 비교분석

Almag6와 기존 5000계열 알루미늄 소재의 차이점을 확인하기 위해 상용되는 Al5052-H32 소재를 Almag6와 동일한 방법으로 단축인장시험을 진행하여 기계적 특성을 비교하였다. Fig. 5는 Almag6와 Al5052-H32의 공칭응력-변형률 곡선을 비교하여 나타낸 그래프이며, Table 5에 나타낸 두 소재의 기계적 특성을 나타내어 비교하였다. Almag6의 항복강도는 368.59 MPa, 최대인장강도는 489.95 MPa이며, 연신율은 5.8 % 측정되었고, Al5052-H32의 항복강도는 132.35 MPa, 최대인장강도가 223.10 MPa이며, 연신율은 7.5 %로 측정되었다. 따라서 Almag6의 항복강도 및 최대인장강도가 Al5052-H32에 비해 약 2.5배 높았으며, 연신율은 약 2 % 낮음을 확인하였고, 연신율의 차이 대비 강도 차이의 비율이 크기 때문에 다양한 제품에 도입할 수 있다는 예를 할 수 있었다.

Table 5. Mechanical properties of Almag6 according to rolling directions

| | F_{max} [N] | σ_y [MPa] | σ_{UTS} [MPa] | EL [%] |
|------------|------------------|---------------------|-------------------------|-----------|
| Almag6 | 3064.98 | 368.59 | 489.95 | 5.80 |
| Al5052-H32 | 1392.23 | 132.35 | 223.10 | 7.50 |

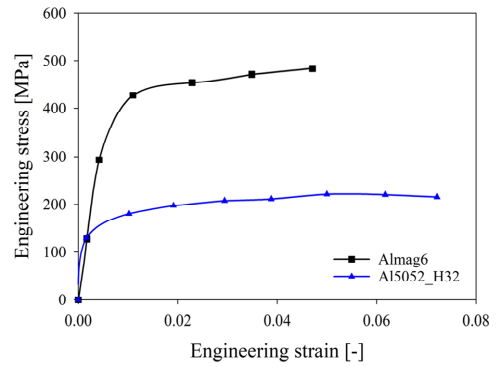


Fig. 5. Engineering stress-strain curve of Almag6 vs. Al5052-H32

3. 성형한계도시험

3.1 성형한계도(FLD)

FLD는 제품 설계 시, 유한요소 해석 및 제품 생산 이후 소재의 성형성을 평가하기 위한 수단으로, 주방향 변형률(major strain)과 부방향 변형률(minor strain)을 이용하여 구한다[13-15]. Fig. 6의 좌측은 단축인장모드를 나타내며 중심은 평면변형모드, 우측은 양축인장모드를 나타낸다. FLD[5] 내의 FLC 아래는 안전영역, 위는 파단 영역이며 이를 기준으로 성형성을 평가한다.

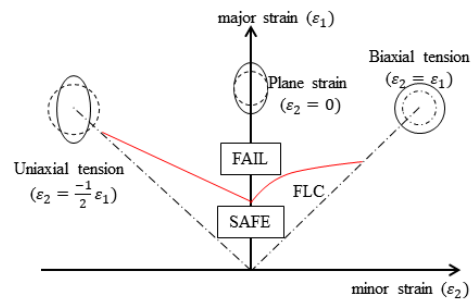


Fig. 6. Forming Limit Diagram

3.2 돔장출시험

돔장출시험(dome stretching test)은 성형한계도를 측정하기 위한 시험으로 반구형의 펀치를 이용하여 시편을 변형시켜 변형률을 측정하는 시험이다. 시험 규격은 ISO 12004-2를 참조하였으며, Fig. 7과 같이 반구형의 펀치와 블랭크 금형을 제작했고, 시편은 Fig. 8과 같이 단축인장부터 양축인장모드 사이의 5 가지 형상으로 제

작했으며, 직접 제작한 5톤 프레스기에 앞서 제작한 블랭크 금형을 장착해 동장출시험을 진행하였다. 이때 정밀한 변형률 측정을 위해 초당 1000장 촬영이 가능한 초고속카메라 2대를 이용하여 프레스기 위에서 시편을 촬영하여 DIC 측정을 진행했으며, GOM ARAMIS 소프트웨어를 이용하여 변형률을 계산하였다[5,6,15].

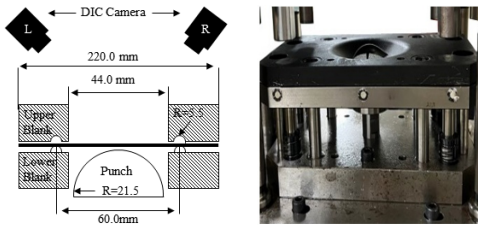


Fig. 7. Blank and punch design and DIC setup on 5-ton press

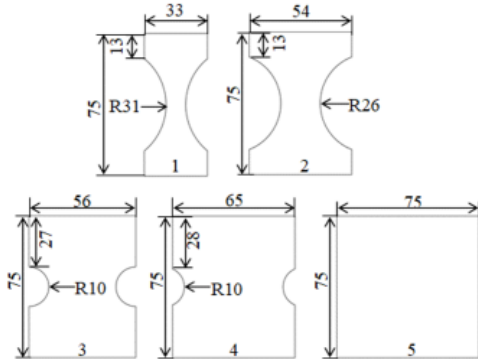


Fig. 8. Specimen for Dome Stretching Test

3.2.1 시편 변형률 계산

Fig. 9는 ARAMIS 상에서 FLD 시험 데이터를 계산하여 나타냈으며, 계산 방법은 시험 중 실시간으로 시편 표면을 계산 및 파단 방향에 수직으로 3개의 Section을 나누어 각 Section 별 변형률 계산 이후, 세 가지 section의 주방향 변형률(major strain)과 부방향 변형률(minor strain)의 평균값으로 FLC 구하여 Almag6의 FLD를 작성하였다.

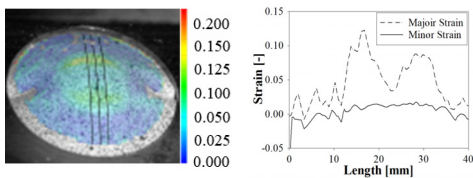


Fig. 9. Strain measurement using ARAMIS software

이때 Al5052-H32는 문제없이 진행되었지만, Almag6는 연신율이 낮고 강도가 높은 특성에 의해 1 ~ 3번 형상 시편이 블랭크 홀더와의 마찰에 의해 Fig. 10과 같이 시편 중심부가 아닌 그립 부분에서 파단이 발생하는 문제가 지속적으로 발생했다. 따라서 Almag6의 FLC 중 단축인장모드부터 평면변형 모드사이의 변형률을 구할 수 없었는데, 이를 해결하기 위해 Fig. 11과 같이 GISSMO 시편 중 단축인장모드와 평면변형모드 사이에 위치하는 N16, N9, N5 세 가지 형상을 추가로 제작하여 대체했다[16,17].



Fig. 10. Fracture at grip area by upper die

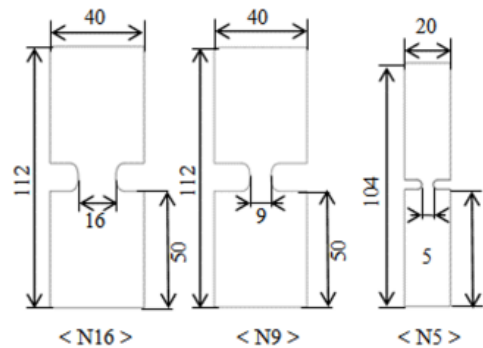


Fig. 11. Specimen for GISSMO

3.2.2 GISSMO 이론

GISSMO(generalized incremental stress state dependent damage model)[16,17]는 Fig. 12의 삼축 응력상태를 고려한 TFD (triaxiality failure diagram)를 기반으로 개발된 모델로, 네킹, 파단 변형률의 삼축성을 고려한 그래프이며, 곡선 지점별로 시편을 제작하여 시험을 진행하여 작성한다. GISSMO 시편 중 Fig. 10의

문제가 발생한 1번, 2번, 3번 시편과 동일한 영역에 위치하는 N16, N9, N5 시편을 대체할 수 있었고, 시편 이름의 N은 노치 형상을 뜻하며, 숫자가 커질수록 평면변형에서 단축인장에 가까워진다. 따라서 GISSMO 시편을 단축인장시험 진행 및 DIC를 이용해 변형률을 구하여 Almag6의 FLC에 부족한 부분을 보완하여 FLD를 도시하였다.

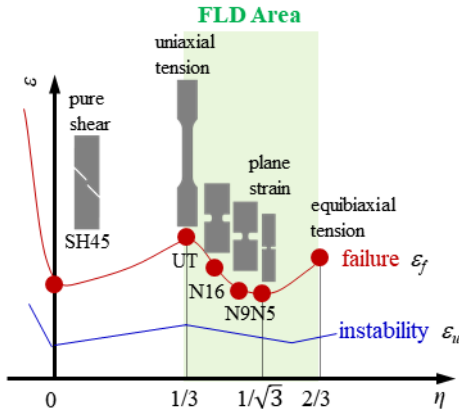


Fig. 12. Triaxiality failure diagram

3.3 Almag6와 Al5052-H32 FLD 비교

Fig. 13는 Almag6와 Al5052-H32 소재를 앞선 인장시험(Uniaxial Tensile), 동장출시험(1 ~ 5번 형상), GISSMO시편(N16, N9, N5) 인장시험 시 DIC 기법으로 측정된 변형률을 이용해 구한 FLC를 함께 도시하여 비교한 FLD이다. 두 FLD의 비교 결과 Almag6가 Al5052-H32에 비해 성형한계선이 약 40 % 낮게 위치함을 확인할 수 있었으며, Almag6는 기존의 제품들을 전부 대체하기 어렵다는 것 확인했다.

이때 UT의 경우 앞서 인장시험에서 측정된 연신율과 차이가 발생했는데, 연신율의 경우 DIC상에 시편 표면에 KS B 0802 규격을 참조하여 gauge length를 생성해 변형률을 측정하였고, FLC 경우 파단부 중심에서의 국부 변형률 측정했기 때문에 차이가 발생했으며, 양축인장모드(4, 5번 시편)은 시편과 마찰력에 의해 양축인장에서 평면변형모드로 전환되어 성형 가능 범위가 예상보다 적게 측정되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 펀치와 시편 사이에 테프론 테이프와 그리스를 이용하여 마찰력 개선 후, 재시험을 진행 후 그래프를 재도시하였다.

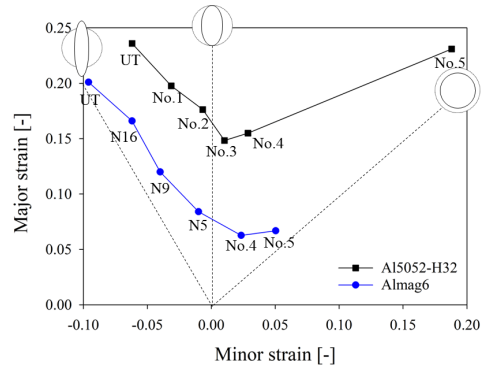


Fig. 13. Conventional FLD of Al5052-H32 vs. Almag6

3.3.1 기존 FLD와의 차이점

전통적인 FLD 측정 방법은 시편 표면에 그리드를 생성한 후, 파단될 때까지 동장출시험을 진행하여 파단부 주변 변형률들의 평균값을 이용해 측정했고, 이를 이용하여 제품 설계 시 Fig. 14와 같이 측정된 FLC를 기준으로 약 $\pm 5\%$ Offset 하여 사용했다.

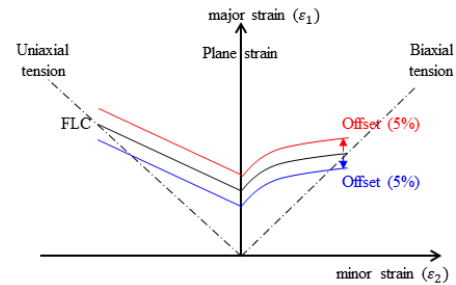


Fig. 14. Offset curves by +/-5% from forming limit curve

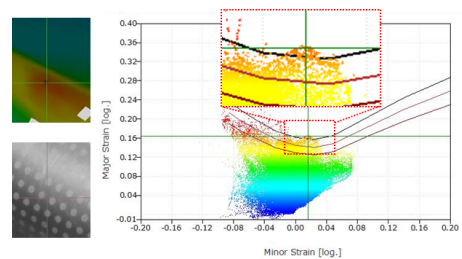


Fig. 15. Difference between actual product and measured FLC

이때 몇 가지 문제점이 있는데, 우선 시편의 파단 이후에 측정하기 때문에 변형 경로를 알 수 없고, 파단부 주변 변형률들의 평균값으로 구하기 때문에 정확한 파단 변형률을 예측하기 어려운데, 이를 Offset 하여 사용하게 되면 정확도가 더욱 떨어져 Fig. 15와 같이 FLD 상에 선 파단으로 판단되지만, 실제로는 파단이 발생하지 않아 해석과 실제 생산한 제품 간의 오차가 발생하게 된다.

반면에 DIC 기법을 이용하여 측정된 FLD는 시험 중 실시간으로 변형률을 측정하기 때문에 기존의 단점을 보완할 수 있다. Fig. 16은 Almag6의 UT, N16, N9, N5, 4번, 5번 시편의 변형 경로를 ARAMIS를 이용해 측정된 그래프로 4번, 5번 시편의 경우 양측인장모드에서 펀치와의 마찰에 의해 평면변형모드로 변환되는 경로를 확인할 수 있었고, 네킹 및 파단 변형률의 예측이 가능하다는 것을 확인하여 신뢰성 있는 FLD를 측정할 수 있었다.

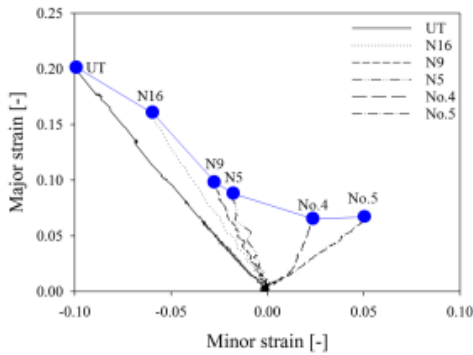


Fig. 16. Strain path of Almag6 using DIC

3.3.2 파단 직전지점과 네킹 발생지점에서 Almag6의 FLD비교

앞선 측정값들을 기준으로 기존의 DIC 기법을 이용한 FLD 측정 기법을 응용하여 파단 지점과 네킹 지점에서의 FLC를 동시에 도기한 새로운 FLD를 제시하였고, 두 지점의 FLC를 비교 진행하였다. Fig. 17은 파단 중심 지점의 시험의 시작부터 끝까지의 변형률 및 변형률 속도를 계산하여 시간과의 관계를 나타낸 그래프이다. 네킹이 발생하는 지점의 판단 기준으로 변형률이 급격하게 증가하는 시점으로 계산하였는데, Fig. 17의 그래프에서 Strain-Time 곡선에서는 변형률이 급격하게 증가하는 지점을 명확하게 찾기 어려웠다.

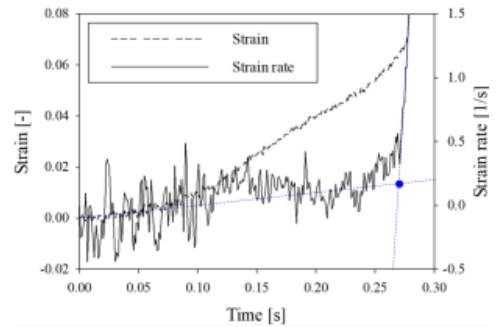


Fig. 17. Strain & strain rate-time curve of specimen No.5

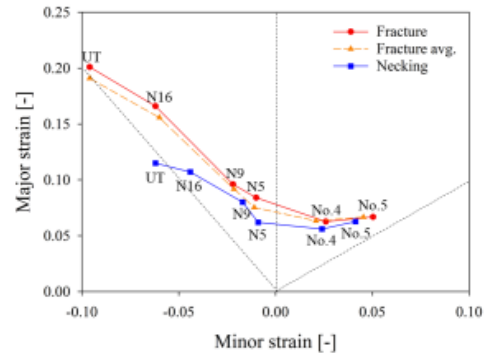


Fig. 18. Advanced FLD containing simultaneously necking and fracture of Almag6

이러한 문제를 해결하기 위해 변형률을 시간으로 나눈 Strain rate-Time 곡선[18]에서 기울기가 다른 두 지점의 추세선을 나타내어 두 추세선의 접점을 확인하면 약 0.27초 지점에 변형률 속도의 기울기가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 지점을 네킹 발생 지점이라고 판단하였다. Fig. 18는 파단 직전에 구한 최댓값과 평균값의 성형한계선과 네킹 발생 지점에서 구한 FLC를 나타낸 FLD이며, 파단 직전 지점과 네킹 지점에서 구한 변형률의 FLC를 비교 시, 주방향 변형률이 약 40 ~ 50 %정도 차이가 남을 확인했으며, 커브의 폭 또한 파단 직전이 약 30 %가 넓음을 확인하였다. 따라서 파단 직전에 측정된 FLD는 네킹 지점에서 측정된 FLD에 비해 40 ~ 50 % 정도 성형가능범위가 넓다는 것을 확인하였고, 위의 FLD를 기준으로 제품 성형 시 변형경로를 알 수 있기 때문에 사용자가 원하는 기준으로 설정하여 판단할 수 있으며, 기존의 정확한 파단 변형률을 알 수 없어 네킹 지점과 같이 보수적으로 측정하던 성형한계도에 비해 소재의 성형 범위가 증가하여 파단 직전까지의 설계에 대한 근거를 제시했다.

4. 결론

본 연구에서는 고강도 알루미늄 신소재 Almag6 판재의 기계적인 성질과 성형성을 평가하기 위해 단축인장시험과 돔장출시험을 진행하였으며, DIC 기법과 ARAMIS 소프트웨어를 통해 변형률을 측정하였다. 그리고 상용되는 5000계열 소재 대비 성형성을 확인하기 위해 Al5052-H32 판재를 동일한 실험을 진행하여 비교하였다.

- (1) Almag6 인장시험 결과 0°와 90°의 항복강도 및 최대인장강도는 유사하였지만, 연신율이 5 % 차이가 발생하였고, 45°는 항복강도 및 최대인장 강도는 두 시편에 비해 13 % 낮지만, 연신율은 가장 높게 측정되었다.
- (2) DIC기법을 이용하여 수직 이방성 계수 측정결과 0°일 때 0.37, 45°일 때 1.51, 90°일 때 1.04로 계산되었으며, 세 각도의 평균 수직 이방성 계수는 1.104로 기존 알루미늄 대비 0.4 정도 크게 측정되어 드로잉성이 우수함을 확인하였다.
- (3) Almag6 소재와 Al5052-H32비교 시 Almag6의 강도가 약 2.5배 높았으며, 연신율은 약 2 % 낮음을 확인하였고, 성형성이 40 % 정도 낮게 측정되어 Almag6는 Al5052-H32 대비 복잡한 형상 혹은 깊이가 깊은 제품 생산 시 대체하기 어렵다는 것을 확인하였다.
- (4) DIC 기법을 이용하여 FLD 측정 시, 기존의 시험 후 파단부 주변의 변형률로 측정하던 FLD와 다르게, 시험 중 실시간으로 변형률을 측정하기 때 변형경로 측정이 가능하여 네킹 및 파단 변형률 예측이 가능해 정확한 FLD 측정이 가능하다는 것을 확인하였다.
- (5) 네킹 지점과 파단 직전 지점에서의 FLC를 한 그래프에 도시한 새로운 FLD를 제시하였고, 두 FLC 비교 시, 파단 직전 지점의 FLC의 성형가능범위가 약 40 % ~ 50 % 이상 큰 것을 확인했다. 따라서 위 FLD를 기준으로 성형성평가시 사용자가 원하는 값을 이용하여 평가를 진행할 수 있으며, 기존의 네킹 지점과 같이 보수적으로 측정 FLD 대비 파단에 근접한 제품 설계에 대한 근거를 제시한다.

References

- [1] G. S. Cole, A. M. Sherman, "Light weight materials for automotive application", *Materials Characterization*, Vol.35, No.1, pp.3-9, Dec. 2022.
DOI: [https://doi.org/10.1016/1044-5803\(95\)00063-1](https://doi.org/10.1016/1044-5803(95)00063-1)
- [2] R. Hu, C. Guo, M. Ma, "A Study on High Strength, High Plasticity, Non-Heat-Treated Die-Cast Aluminum Alloy", *Materials*, Vol.15, No.1, pp.295, Jan. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15010295>
- [3] L. F. Mondolfo, *Aluminum Alloys: Structure and Properties*, p.973, Butterworth-Heinemann, 1976, pp.311-317.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-70932-3.50053-X>
- [4] M. S. Kim, F. Rickhey, H. Lee, N. Kim, "Analytical determination of forming limit curve for zirlo and its experimental validation", *Journal of Manufacturing Processes*, Vol.23, pp.122-129, June 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.06.006>
- [5] J. H. In, K. C. Jeong, H. S. Lee, J. H. Kim, J. J. Kim, and Y.S. Kim, "A Study on Plastic Deformation Characteristics and Formability for Pure Titanium Sheet", *Transactions of Materials Processing*, Vol.27, No.5, pp.301-313, Oct. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.5.301>
- [6] Y. K. Kang, J. W. Park and Y. H. Moon, "An Experimental Study On The Formability of Aluminum 1050 and 5052 Sheet Metal", *Transactions of Materials Processing*, Vol.9, No.1, pp.27-34, Feb. 2000.
- [7] Y. H. Choi, Y. G. Sagong, J. W. Joo, 2021, "Digital Image Correlation Technique and Estimation for Measuring Thermal Deformation of Electronic Package," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol.45, No.1, pp.17-26, Jan. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2021.45.1.017>
- [8] C. I. Kim, S. H. Yang and Y S Kim, "Prediction of Formability of Aluminum Alloy 5454 Sheet", *Trans. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol.36, No.2, pp.179-186, Feb. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.2.179>
- [9] ARAMIS, GOM mbH
- [10] M. A. Meyers, K.K. Chawla, *Mechanical Metallurgy*, p.761, Prentice-Hall Inc., 1983, pp.635.
- [11] F. J. Humphreys, M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena* Pergamon, p.628, Oxford, 2004, pp. 399.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008044164-1/50001-3>
- [12] B. H. Kim, Y. O. Yoon, and S. K. Kim, 2021, "Fabrication and Evaluation of High Mg-content ECO-Almag6~9 Extruded Products by using Oxidation-resistant Mg Mother Alloy", *Journal of Korea Foundry Society*, Vol.41, No.3, pp.252-259, June 2021.
DOI: <https://doi.org/10.7777/jkfs.2021.41.3.252>
- [13] K. J. KIM, "Formability Evaluation of Automotive Light-Weight Aluminum 5182 Alloys and Sandwich Panels", *Journal Korean Society Mechanical Technology*,

Vol.20, No.4, pp.389-364, July 2018.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.20.4.201808.389>

- [14] M. S. Kim, F. Richkey, H. Y. Lee and N. S. Kim, "Numerical approach to the evaluation of forming limit curves for zircaloy-4 sheet", *Journal of Material Research*, Vol.30, No.21, pp.3277-3287, Oct. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.293>
- [15] K. Wang, J. E. Carsley, B. He, J. Li and L. Zhang, "Measuring forming limit strains with digital image correlation analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214, No.5, pp.1120-1130, May 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jimatprotec.2014.01.001>
- [16] M. S. Kim, H. S. Lee, S. M. Hong, "Experimental determination of the failure surface for DP980 high-strength metal sheets considering stress triaxiality and Lode angle", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.100, pp.2775-2784, Feb. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2867-z>
- [17] B. J. Gu, J. M. Lim, and S. M. Hong, "Determination and Verification of GISSMO Fracture Properties of Bolts Used in Radioactive Waste Transport Containers", *Materials*, Vol.15, pp.1893, March. 2022.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15051893>
- [18] S. G. Kim, T. H. Oh, J. D. Kim and H. J. Kim, "Determination of the Forming Limit Strain of Sheet Metals by the Time-dependent Method", *Transactions of Materials Processing*, Vol. 24, No.5, pp.361-369, Oct. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5228/KSTP.24.5.361>

이 상 민(Sangmin Lee)

[준회원]



- 2021년 8월 : 국립공주대학교 기계자동차공학부
- 2021년 9월 ~ 현재 : 국립공주대 학원 미래융합공학과 석사과정

<관심분야>

금속 판재성형, 유한요소해석

레 쯡 다이(Le Trong Dai)

[정회원]



- 2017년 2월 : PetroVietnam University, Vietnam, Department of Mechanical Engineering
- 2019년 8월 : 부산대학교 대학원 조선해양공학과 (석사)
- 2019년 9월 ~ 2021년 12월 : TST, 연구원
- 2022년 4월 ~ 2022년 7월 : 공주대학교 그린카기술연구소, 석사 후 연구원

<관심분야>

유한요소 해석

홍 석 무(Seokmoo Hong)

[중심회원]



- 1999년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 학사)
- 2001년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2007년 3월 : Technical University of Munich, Germany, Department of Mechanical Engineering (기계공학박사)
- 2007년 4월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 GTC, 수석연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 국립공주대학교 미래자동차공학과 교수

<관심분야>

금속 판재성형 및 단조, 유한요소해석, 최적 설계