

금속 판재의 성형한계도 시험법에 관한 연구

A Study on the Forming Limit Diagram Tests of Metal Sheets

장 옥 경* 장 윤 주* 김 형 중**
Jang, Uk-Kyeong Jang, Yun-Ju Kim, Hyung-Jong

Abstract

A forming limit diagram (FLD) defines the extent to which specific sheet material can be deformed by drawing, stretching or any combination of those two. To determine the forming limit curve (FLC) accurately, it is necessary to perform the tests under well-organized conditions. In this study, the influence of several geometric or process parameters such as the blank shape and dimensions, strain measuring equipments, test termination time, forming speed and lubricants on the FLC is investigated.

키워드 : 성형한계도, 한계돔높이, AZ31B 마그네슘 합금판재
Keywords : *forming limit diagram (FLD)*, *limit dome height (LDH)*, *AZ31B magnesium alloy sheet*

1. 서론

판재성형은 금형을 사용함으로써 원하는 형상으로 성형하여 제품을 얻는 가공법이다. 제품의 재료, 품질, 수량 등에 따라 다양한 성형법을 생각할 수 있으며, 최적의 성형법을 선택하기 위해서는 기술적·경험적 뒷받침이 필요하다. 특히, 판재성형에 있어서 성형한계도를 연구하는 것은 재료의 변형능력을 시험을 통해 사전에 예측할 수 있기 때문에 매우 중요하다. 다양한 변형 모드에서의 판재

의 성형성을 나타내는 성형한계도(forming limit diagram, FLD)는 재료의 본질적인 한계변형 정도와 금형과의 접촉에서 재료가 얼마만큼 균일하게 변형하였는가에 따라 결정된다. 정확하고 안정적인 성형한계도를 얻기 위해서는 시험장비의 환경, 시편의 형상, 시편에 그려진 격자의 모양 및 크기, 성형 속도, 측정 장비 등 많은 조건들을 구체화하고 체계화할 필요가 있다.

Keeler[1]와 Goodwin[2]에 의해 처음으로 소개된 이래 여러 가지 재료의 성형한계도를 얻기 위한 시험적 연구는 지난 수십년 간 수없이 많이 수행되어 왔으나, 성형한계도 시험법에 관한 체계적이고 일반적인 표준화 작업은 아직 미흡한 실정이다. Marciniak 등[3]은 성형한계도에서 소성영향력에 관해 연구하였고, Naka 등[4]은 여러 가지 온도와 변형률속도에 대한 Al-Mg 합금재료의 성형한계도를 얻었으며 김현영 등[5]은 온도별 성형한계에 관해 체계적인 연구를 실시하였다. 또한 이명환

* 강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과 석사과정

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 교수, 공학박사, 교신저자

등[6]은 마그네슘 합금판재를 온간에서 성형한계도를 이용하여 성형성 평가 하였으며, 김세호 등[7]은 AZ31B 합금판재 성형관련 기초물성 실험 및 해석에 관해 연구하였다. 특히, Chen 등[8,9]은 ASTM[10]을 근거로 하여 본 연구에서 사용한 AZ31B 마그네슘 합금 판재에 관해 온도별 성형한계도를 연구한 바가 있다. 최근 국제표준화기구(ISO)에서 발표한 규정 ISO 12004-2[11]은 지금까지 알려지 어떤 방법보다 구체적이고 명확한 시험법을 제시하고 있으나, 그 배경의 설명이 충분치 않고 항목에 따라서는 장비나 기술이 부족한 일반 연구자들이 선택하기 어려운 경우도 있다.

본 연구는 성형한계도 시험 결과에 영향을 미치는 여러 가지 형상인자 또는 공정변수들에 초점을 맞추고 이들의 영향을 분석함으로써 시험법의 체계적 정립을 도모하고자 하였다. 특히, 가공조건에 따라 성형성이 민감하게 달라지는 AZ31B 마그네슘 합금 판재를 대상으로 함으로써 다른 재료를 사용함에 있어서도 시험의 정확도와 정밀도를 보장받을 수 있도록 하였다. 이를 바탕으로 현재 성형한계도 시험이 가지고 있는 문제점을 검토하고 추후 고려해야 할 연구방향을 제시하였다.

2. 성형한계도 이론

박판의 성형한계에 관한 해석을 위해서는 Keeler와 Goodwin이 처음 도입한 성형한계선(Forming Limit Curve, FLC)이 사용된다. 성형한계선은 크게 파단이 일어나는 영역과 안전하게 성형이 일어나는 영역으로 나뉜다. 그림 2.1의 검은 실선은 성형한계선을 나타내며, 그림의 위쪽 부분이 파단이 일어나는 영역이고 아래쪽 부분이 안전하게 성형이 일어나는 영역이다. 즉 성형한계선은 변형에 의한 주변형률과 부변형률의 변화에 의하여 판재의 두께변화가 일어나는 시점에서부터 국부변형이 일어나기 전까지 재료가 견딜 수 있는 한계변형률을 뜻한다. 이러한 성형한계선을 나타내기 위한 대표적인 방법은 Hecker[12]에 의해 고안되었다. 이 방법은 변형모드의 변화를 주기위해 폭을 25mm~200mm사이에서 변화시킨 시편을 2.5mm의 원형그리드가 입혀진 장방형 시편을 원주방향 고정비드에 의해 클램핑하고, 106.6mm직경의 둥형 펀치로 시편에 국부변형이 발생 할 때까지 장출시험을 실시하여 국부변형 근방의 변형된 원형그리드로부터 얻은 주변형률과 부변형률을 2차원 좌표상에 표시하는 방법이다. 이것을 성형한계도(Forming Limit Diagram, FLD)라 한다. 파단이 일어난 지역에 대한 그리드와 그렇지 않은 지역과의 변형률 데이터는 necking변형영역과 안전변형영역으로 나뉘게 된다. 이렇게 나뉜 영역은 necking이 일어난 시기를 정하는 방법과 necking 발생 부위에서 얼마나 떨어진

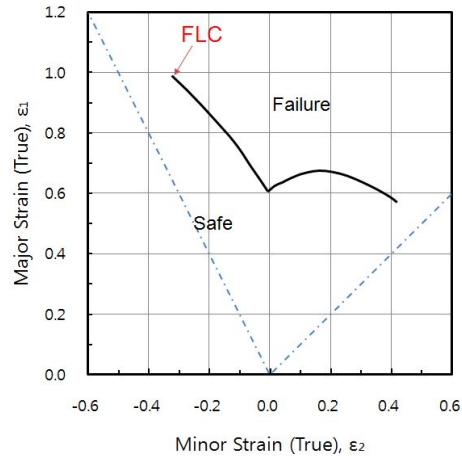


그림 2.1 An example of FLD

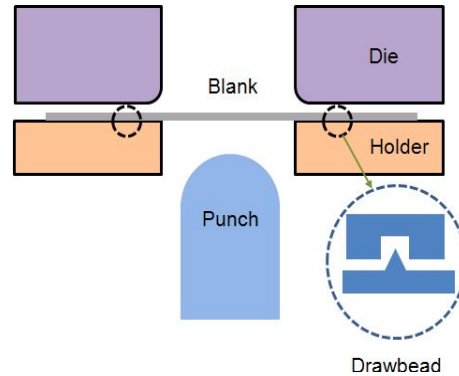


그림 2.2 Tooling geometry of dome stretching test

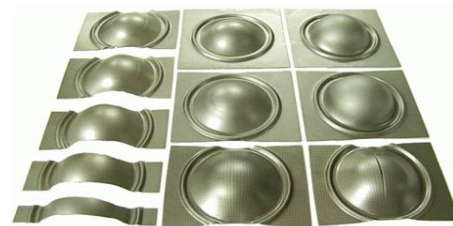


그림 2.3 Specimen geometry after FLD test

지역을 안전영역으로 선택하는가에 따라 많은 차이를 보인다. 그림 2.2는 일반적인 장출시험의 시험장치이고, 그림 2.3은 시험 후 변형된 시편의 예이다. 정확한 판재의 성형성을 평가하기 위해 오랜 시간과 노력을 통해 얻은 성형한계도는 그만큼 가치가 있다. 하지만, 수 없이 많은 재료를 시험적으로만 평가하려는 방법은 경제적 부담이 크므로, 축

적된 많은 데이터를 바탕으로 성형한계선을 이용하는 방법이 제안되어 북미를 중심으로 세계적으로 사용되고 있다. 이 방법은 실험과 이론식으로 얻어진 성형한계도의 한계평면변형률(Plane strain intercept, FLC0)을 이용하여 대표 성형한계선을 주변형률 축으로 한계평면변형률지점까지 이동시켜 판재의 성형한계선을 정의한다. 대표 성형한계선은 Hecker가 AK-냉연강판에 대해 구한 성형한계선이 주로 이용되고 있다. 또한, FLC0의 크기는 두께, 항복응력, 연신률, 가공경화지수 등에 의존하며, NADDRG(North American Deep Drawing Research Group)에서는 다음과 같은 실험식을 권장하고 있다.

$$FLC_0 = (n/0.21)(23.3 + 14.1 * t) \quad (2.1)$$

판재성형에서 문제가 될 수 있는 부분들을 예측하고 예방하기 위해서는 성형한계도를 활용하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면, 실제 성형에 앞서 시편을 통해 성형한계도를 먼저 구한 후 예비성형을 실시하였을 때, 성형품의 파단지역을 성형한계도와 비교 할 수 있고, 파단이 일어나지 않았더라도 그 지역의 위험도를 평가할 수 있기 때문이다. 만약, 위험도가 높은 지역에서 금형의 온도변화 및 마모의 정도, 판재의 형상변화, 윤활변화 등의 여러 변수들을 파악 할 수 있다면 공정의 변화를 주어 문제점을 해결 할 수 있다. 그리고 측정된 변형모드에 따라 문제점이 어떤 변형을 보이는지 알 수 있으므로, 블랭킹 홀딩 포스(BHF)와 비드 사용의 유무 등의 변화를 주어 드로잉 및 스트레칭의 변형조건을 고려 할 수 있다.

3. 시험장비 검증

3.1 열간성형시험기 및 금형설계

상온에서의 성형한계도는 비교적 손쉽게 얻을 수 있으며 대개 판재 제조업체에서도 제공하고 있다. 그러나 고온에서의 성형한계도는 소재와 금형의 온도를 정밀하게 제어·유지할 수 있는 가열 장치와 변위 제어 장치가 필요하기 때문에 특별한 설비를 갖추지 않고서는 얻어내기 힘들다. 특히, 마그네슘과 같이 고온에서 성형성이 좋은 재료는 온도 변화에 따른 성형한계도가 매우 중요하며, 이는 곧 검증된 시험 장비를 사용해야 함을 뜻한다.

그림 3.1(a)는 본 연구실에 보유하고 있는 냉·온·열간 성형시험 장비로, 금형에 카트리지를 삽입하는 방식의 온도 제어로 최고온도 500℃까지의 성형이 가능하며, 성형속도는 0.01~1.5 mm/s 범위에서 제어할 수 있다. 편치변위와 성형속도, 편치하중 등은 시간 단위로 데이터가 저장되며, 이러한



(a)



(b)

그림 3.1 Formability testing equipment (a), and FLD test tools (b)

데이터는 성형한계도 시험에서 하중이 떨어지는 시점에서 성형을 중단(termination)하는 지표가 된다.

본 연구의 성형한계도 시험에 사용될 금형(그림 3.1(b))은 몇 가지 중요한 변수에 맞추어 제작되어야 한다. 그 변수중의 하나는 고온에서 성형해야 한다는 것이다. 그렇기 때문에 판재가 금형에 닿는 부위의 온도가 일정하게 유지되어야만 실험 결과를 신뢰 할 수 있다. 이번에 제작된 금형은 다이와 홀더 모두 금형의 정 가운데로부터 60°간격으로 카트리지가 삽입구를 뚫었으며, 시편과 직접 맞닿는 부분의 정확한 온도를 측정하기 위해 다이와 홀더의 가장자리에 센서 구멍을 따로 만들었다. 이는 실제 시험 시 측정되는 온도가 시편의 온도와 거의 일치함을 증명해주는 지표가 된다. 두 번째 변수중의 하나는 마그네슘의 고온 성형 특성상 클램핑비드(clamping bead) 부분에서의 파단이 발생할 우려가 있다는 것이다. 따라서 비드가 없는 형태의

금형을 제작하였다. 제작된 금형의 형상 및 치수는 ISO 12004-2 규정[11]에 맞게 제작하였다.

3.2 인쇄장비 검증

변형률을 측정하기 위해서는 변형 전의 시편에 특별한 격자망을 인쇄해야 한다. 격자망의 종류와 간격은 변형률 측정 장비나 시편에 따라 다양하다. Fig. 3.3은 다양한 격자망의 종류의 예이다. 본 연구에서는 한 가지 격자망으로 ASIAS와 ARGUS 장비 모두 사용할 수 있도록 그림 3.3의 오른쪽 그림과 같은 정사각형 격자의 중심에 원형 포인트가 첨가된 형태의 격자망을 사용하였다. 격자선의 굵기는 측정 정밀도의 변수가 될 수 있기 때문에 인쇄 가능한 가장 가는 굵기(0.15 mm)로 하였으며, 격자의 간격은 조밀할수록 국부 변형률을 잘 표현할 수 있으나 측정 한계와 정밀도를 고려하여 가능한 최소간격 2 mm로 설정하였다. 격자를 시편에 인쇄하는 방법으로 전기·화학적 부식법(etching)이 많이 사용되나, 마그네슘 합금판재의 경우 부식된 격자선의 노치효과가 조기 파단을 유도할 수 있으므로 본 연구에서는 에폭시 수지 계열의 잉크를 사용한 실크스크린법을 적용하였다. 이 방법은 인쇄 작업 도중 에폭시 잉크가 말라 실크스크린의 선이 막히는 문제가 발생할 수도 있으나, 300°C 이상의 온도에서도 잉크가 타거나 변형되지 않기 때문에 온·열간 시험용으로 적합한 것으로 판단된다. 그림 3.4는 전기·화학적 부식법을 사용한 시편과 실크스크린법을 사용한 시편을 비교하였다. 시험에 쓰인 실크스크린장비는 그림 3.5에서 보는 바와 같이 시편을 놓고 고정시키기 위한 지지대와 잉크 및 스퀴즈 그리고 스텔실로 구성되어 있다.

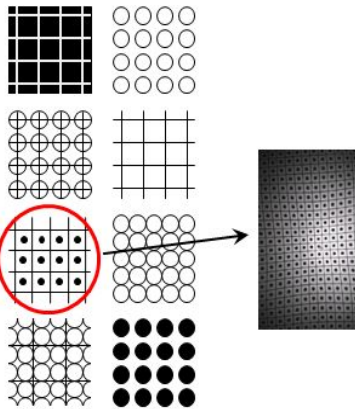
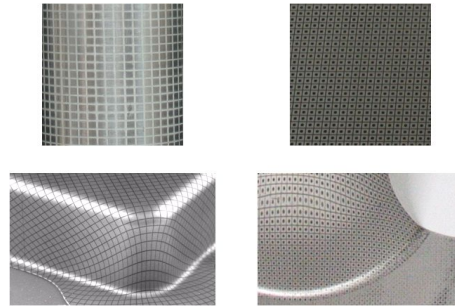


그림 3.3 Example of grid patterns



(a) (b)

그림 3.4 Compare etching(a) to silk-screen(b)

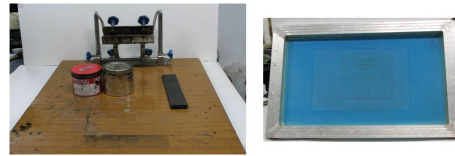


그림 3.5 Silk-screen Tools

3.3 측정장비 검증

본 연구에 사용된 변형률 측정장비는 그림 3.6의 사진과 같은 ASIAS[13]와 ARGUS[14]의 2 가지이다. ASIAS는 본 연구팀이 자체 개발한 것으로, 2대의 카메라로 촬영한 화상으로부터 이미지 프로세싱 및 스테레오 비전 기법을 통하여 3차원 좌표를 측정하고, 대변형 이론에 의거하여 곡면변형률 계산 및 후처리를 수행하는 시스템이다. ARGUS는 시편 주위에 서로 다른 모양의 표식을 두어 카메라의 위치와 각도 변화를 인식하고, 시편에 인쇄되어 있는 원형 포인트의 좌표를 측정하는 장비이다.

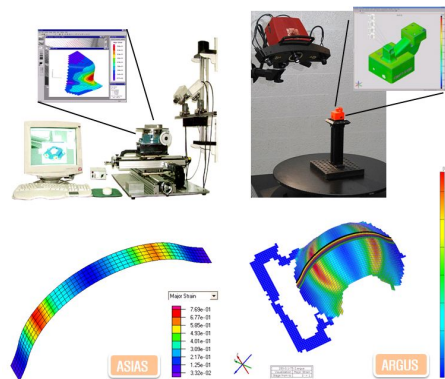


그림 3.6 Strain measuring equipment

4. 성형한계도 시험

4.1 기본 시험 조건

성형한계도 시험에서 결과에 영향을 미치는 인자로 생각할 수 있는 시험 조건들은 매우 많다. 이러한 인자들은 시편의 변형모드를 결정할 뿐 아니라 시험의 정확성에도 큰 영향을 미친다. 시편의 형상을 비롯하여 성형온도, 성형속도, 압연방향(rolling direction, RD)에 대한 시편 채취 방향, 윤활 등이 주요 변수로 작용하고, 변형률 측정 방법 또한 결과에 영향을 미친다. 표 4.1은 기본적인 시험 조건들을 나타내었다.

표 4.1 Basic conditions of FLD tests

Material	AZ31B Mg alloy sheet
Thickness	0.5 mm
Temperature	250℃
Punch speed	0.1 mm/s
Specimen shape	Nakajima w/ circular cut
Specimen direction	Rolling direction
Lubrication	Graphite powder

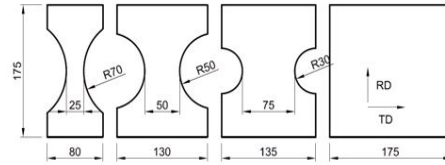


그림 4.1 Geometry of Nakajima specimens

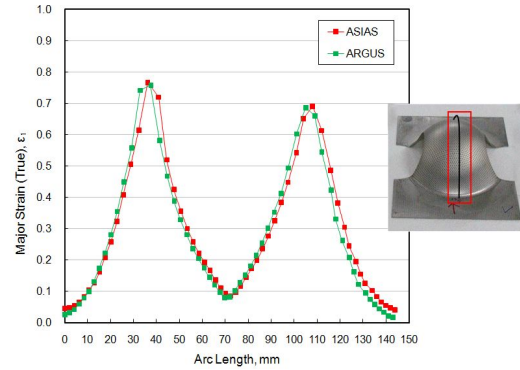


그림 5.1 Major strain distribution along the center line

4.2 영향변수 설정

기본적인 시험 조건 이외의 본 시험에서 변수로 작용된 조건은 표 4.2에서 보는 바와 같다. 시편은 그림 4.1과 같이 압연방향을 길이방향으로 하여 여러 가지 폭으로 CNC 가공한 Nakajima 시편형상을 채택하였다. 기본적으로 그림의 4 가지 시편에 대해서는 무윤활 상태로 시험하고, 폭 175 mm의 정사각형 시편에 대해서는 등2축 변형모드를 얻기 위해 윤활제를 사용한 시험을 추가로 실시하였다. 시험 도중 열간성형시험기의 펀치하중이 떨어지는 시점에서 시험을 중단하고 네킹 발생 유무를 확인하였으며, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해 동일한 조건에서 3회 이상의 시험을 실시하였다.

표 4.2 FLD test parameters

Specimen shape	Circular & Parallel waist
Punch speed	0.1 mm/s & 1.0 mm/s
Termination time	Early, Standard & Late
Measuring equip	ASIAS & ARGUS
Lubricant	Ointment, Grease & Graphite

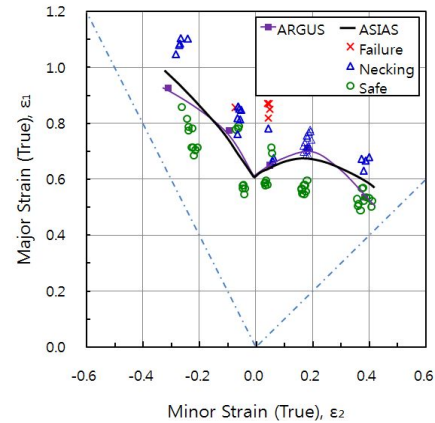


그림 5.2 FLCs obtained by using ASIAS and ARGUS

그림 5.1은 기본 조건에서 성형한 폭 75 mm 시편의 길이방향 중심선을 따른 주변형률 분포를 ASIAS와 ARGUS로 측정하여 비교한 그림이다. ASIAS는 정사각형 격자의 꼭지점, 그리고 ARGUS는 정사각형의 중심점의 좌표를 각각 측정하기 때문에 변형률 값을 계산하는 요소망이 성형 전부터 1 mm 어긋나있는 점을 고려하면 두 시스템으로부터 얻은 결과는 거의 일치하며, 두 가지 모두 신뢰할 만한 측정 장비임을 알 수 있다.

5. 시험 조건에 따른 결과 비교

5.1 측정 장비에 따른 결과 비교

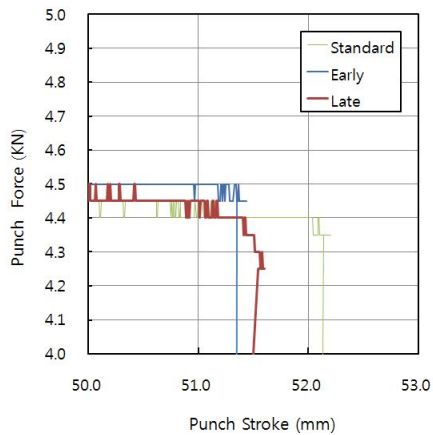


그림 5.3 Punch force - punch stroke graph showing standard, early and late termination times

그림 5.2에서는 두 가지 장비로 측정된 성형한계도를 비교하였다. ASIAS 측정은 ASTM E2218-02[10]에서 제시한 방법대로 파단과 네킹 및 안전 영역을 구분하여 표시하고 네킹과 안전 영역의 경계선을 FLC로 표시하였다. 또한, ARGUS 측정은 5.2절에서 기술한 바와 같이 ISO 12004-2[11]에 규정된 방법을 따랐다. 윤활을 하지 않은 175×175 mm의 시편에서 약간의 차이를 보이는 것을 제외하고 대체적으로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 지금까지 일반적으로 사용되어 온 ASTM 방식은 파단(또는 네킹)과 안전 영역이 섞여 있거나 너무 떨어져 있어 그 정확한 경계를 추출하는 것이 모호할 때가 많으므로, 가능하다면 새로운 ISO 규정을 따르는 방법이 바람직할 것으로 판단된다.

5.2 성형 종료 시점에 따른 결과 비교

성형한계도 시험에서 네킹이 일어나는 시점을 예측하거나 육안으로 관찰하여 성형을 종료하는 시점을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 성형 종료시점이 너무 이르면 네킹(또는 파단) 위치를 찾기가 어렵고, 너무 늦으면 파단부가 벌어져 그 부근의 변형이 지나치게 왜곡되고 합리적인 성형한계를 구하기가 어렵게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 분석하기 위해서 실제 네킹이 발생한 시점과 네킹이 발생하기 전, 그리고 네킹(또는 파단)이 과도하게 진행된 시점에서 각각 성형을 종료하고 성형한계 변형률을 측정하여 서로 비교하였다.

그림 5.3은 편치의 하중-변위 그래프로, 하중이 떨어지자마자 '조기(early)'에 성형을 종료한 경우

와 하중이 한 단계(0.05 kN) 떨어진 후 종료한 경우, 즉 '표준(standard)', 그리고 하중이 두 단계(0.1 kN) 이상 떨어진 후에 '지연(late)' 종료한 경우를 보여준다. 실제 시험에서는 대부분 표준 종료 시점에서의 성형한계를 평가한다.

그림 5.4는 3 가지 종료시점에 대해 ARGUS를 사용하여 ISO 규정에 따라 성형한계를 구하는 과정을 보여준다. 시편 중심선을 따른 주변형률 및 부변형률 분포의 최고점 좌우에서 각각 5 개 이상의 자료점을 선택하고 곡선근사(curve fitting)와 평탄화(smoothing)를 거쳐 종 모양의 역포물선(reverse parabola)으로 근사한 후 그 최대값을 성형한계로 간주하는 방법이다. 3 가지 그래프를 비교해 보면, 표준종료 시 0.723, 지연종료 시 0.739 로 비슷한 주변형률을 보이지만, 조기종료 시에는 0.641로 현저히 낮은 값을 나타낸다. 이는 성형한계도 시험에서 하중 감소를 근거로 성형 종료시점을 결정할 때 그 시점이 너무 이른 경우 성형한계가 지나치게 낮게 평가될 수 있으므로 네킹이 발생하여 하중 감소가 확실하게 나타날 때까지 기다리는 것이 바람직하다는 점을 시사한다.

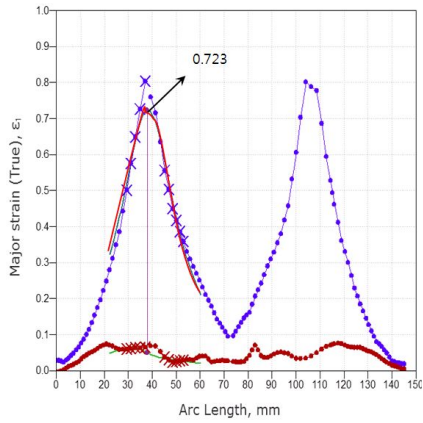
5.3 성형속도에 따른 결과 비교

그림 5.5는 0.1 mm/s 및 1.0 mm/s 등 2 가지 편치속도에 대한 성형한계도를 비교한 그림이다. 성형속도가 느릴수록 성형성이 좋아지는 변형률속도 민감 재료의 일반적 특성에 따라 성형한계선이 전 변형모드에서 5% 정도 높게 나타났다.

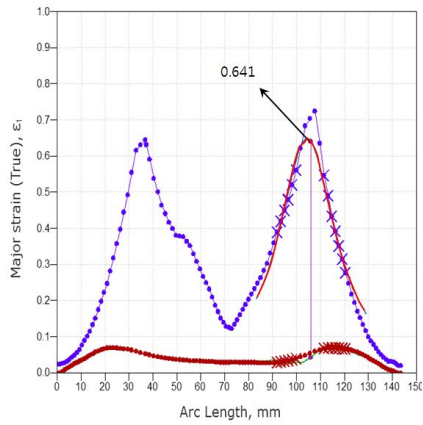
5.4 시편 형상에 따른 결과 비교

완전한 성형한계도를 얻어내기 위해서는 원하는 변형모드를 예상하여 시편의 형상을 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 평면변형률 모드를 나타내는 폭 75 mm의 Nakajima 시편(W75)을 대상으로 기본 형상(L0-R30) 외에 7 가지 형상을 추가로 제작하여 형상에 따른 성형한계를 비교하고자 하였다. 그림 5.6은 시편형상을 정의하였으며, 평행부길이(shaft length) L과 필렛반지름(fillet radius) R의 조합, 즉 'L25-R30'의 형식으로 시편을 명명하였다. 그림 5.7은 시험 후의 시편 사진을 나타내었다.

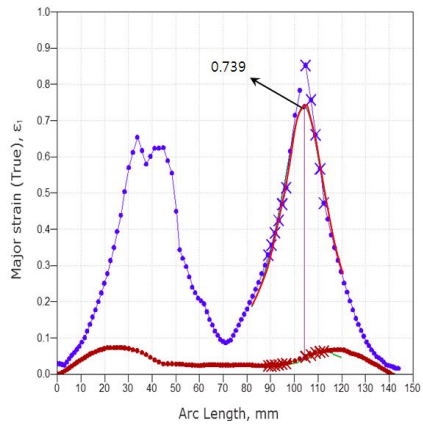
그림 5.8은 이들을 ARGUS로 측정하여 구한 성형한계를 비교한 그림이다. 편의상 평행부를 가진 시편과 그렇지 않은 시편들을 구분하여 선으로 연결하였다. 폭 75 mm의 모든 시편에 대하여 부변형률 -0.06~+0.09 사이에서 성형한계점이 위치하는 사실로부터 시편 폭이 변형모드를 결정하는 가장 큰 변수이지만, 평행부길이나 필렛반지름을 조절함으로써도 부변형률 수준을 최대 15%까지 변화시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 동일한 평행부길이에 대하여 필렛반지름이 클수록, 그리고 동



(a) 'Standard' termination time



(b) 'Early' termination time



(c) 'Late' termination time

그림 5.4 Bell-shaped curve fit to determine the limit strain

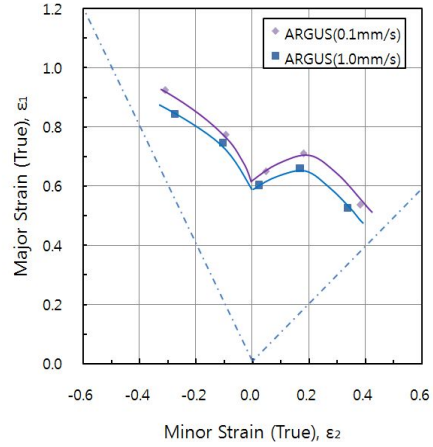


그림 5.5 Influence of the punch speed on the forming limit

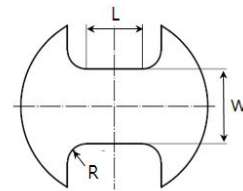


그림 5.6 Geometry of FLD specimens

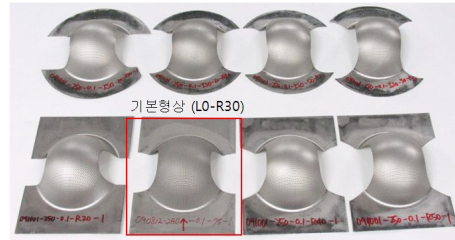


그림 5.7 Specimens size and Photograph of the FLD specimens

일한 필렛반지름에 대하여 평행부길이가 클수록 부변형률이 작아진다는 사실을 알 수 있다. 한편, 평행부를 가진 시편들은 그렇지 않은 시편들보다 주변형률의 편차가 작은 것으로 나타났다. 따라서 여러 가지 폭에 대하여 적절한 평행부길이를 가진 시편들을 사용하는 것이 불필요한 실험 오차를 줄이는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다. 이와 관련하여 더욱 다양한 종류의 시편에 대한 체계적인 분석이 필요하다.

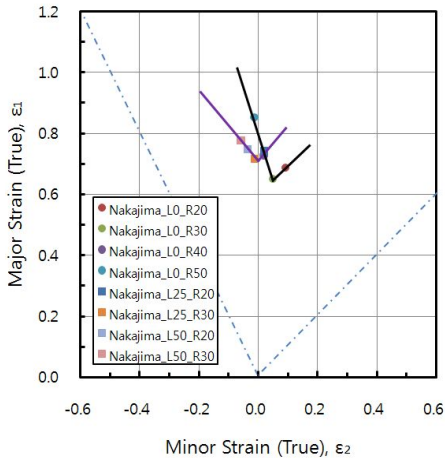


그림 5.8 Influence of the specimen shape on the limit strain

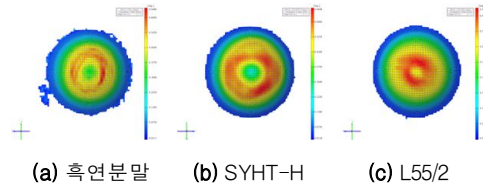


그림 5.9 Six kinds of lubricants

5.5 윤활조건

등2축 모드의 성형한계를 얻기 위해서는 시편과 펀치 사이의 윤활을 통해 마찰력을 최대한 줄임으로써 시편 중앙에서의 파단을 유도해야 하나, 시험 환경이 고온인 경우 적절한 윤활제를 구하는 것이 쉽지 않고 윤활 성능도 상온에서보다 크게 떨어진다. 본 연구에서는 그림 5.9와 같이 그리스(ream) 형태 연고제(ointment) 2 가지, 액체형 윤활제 종류 3 가지 및 고체형 윤활제인 흑연분말(graphite powder) 등 크게 6 가지를 성형한계도 시험에 사용해보고 그 효과를 비교하였다.

그림 5.10은 연고제, 그리스, 흑연분말 등 종류별로 대표적인 윤활제 1 가지씩에 대한 주변형률 분포 및 FLD를 측정된 결과이다. 이들 중 연고제인 Barrierta L55/2 윤활제가 시편 중앙에 가장 가까운 곳에서 최대 주변형률을 나타내어 거의 등2축 모드의 성형한계를 주는 것을 확인할 수 있다.



(a) 흑연분말 (b) SYHT-H (c) L55/2

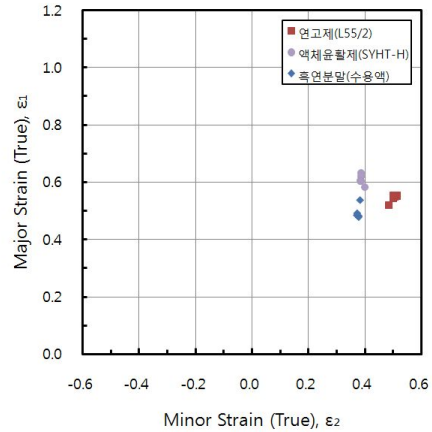


그림 5.10 Major strain contour and FLD distributions in tests using different lubricants

6. 결론

본 연구에서는 신뢰성 있는 성형한계도 시험법을 제시하고자 다양한 변수연구를 통한 체계적인 시험을 실시하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 성형성 평가 시험기 및 금형, 변형률 측정 시스템, 격자 인쇄법 등 성형한계도 시험을 위한 기본적인 구축 현황을 소개하였다.

(2) 자동변형률측정시스템인 ASIAs와 ARGUS의 비교 분석을 통하여 성형한계도 시험 결과의 신뢰성을 확보하였다.

(3) 성형한계도 시험에서 하중 감소를 근거로 성형 종료시점을 결정할 때 그 시점이 너무 이른 경우 성형한계가 지나치게 낮게 평가될 수 있으므로, 네킹이 발생하여 하중 감소가 확실하게 나타날 때까지 기다리는 것이 바람직하다.

(4) 고온에서의 마그네슘 합금관재는 변형률속도에 민감하므로 성형속도가 느릴수록 성형성이 좋은 것으로 확인되었다.

(5) Nakajima 시편의 평행부길이나 필렛반지름을 조절함으로써 부변형률 수준을 최대 15%까지 변화시킬 수 있었다. 또한, 평행부를 가진 시편들은 그렇지 않은 시편들보다 주변형률의 편차가 작은 것으로 나타나, 여러 가지 폭에 대하여 적절한 평행부길이를 가진 시편들을 사용하는 것이 실험 오차를 줄이는데 바람직하다.

(6) 고온에서 등2축 변형모드를 얻기 위한 윤활 시험에서 액체윤활제나 흑연분말보다 Barrierta L55/2 그리스형 연고제가 윤활 성능이 가장 우수한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] S. P. Keeler, "Determination of forming limit in automotive stamping", *Tran of the SAE*, no. 650535, pp. 1~9, 1965.
- [2] G. M. Goodwin, "Application of strain analysis to sheet metal forming problems in press shop", *Tran of the SAE*, no. 680093, pp. 77, 1968.
- [3] Z. Marciniak, K. Kuczynski and T. Pokora, "Influence of the plastic properties of a material on the forming limit diagram for sheet metal in tension", *Int. J. Mech. Sci.* 15, pp. 789~805, 1973.
- [4] T. Naka, G. Torikai, R. Hino, F. Yoshida, "The effects of temperature and forming speed on the forming limit diagram for type 5083 aluminum magnesium alloy sheet", *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 648~653, 2001.
- [5] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, "Experiments for Forming Limit Diagram and Springback Characteristics of AZ31B Magnesium Alloy Sheet at Elevated Temperature", *Trans of Materials Processing*, Vol. 16, No. 5, pp. 364~369, 2007.
- [6] M. H. Lee, K. K. Kim, H. Y. Kim, S. I. Oh, "Evaluation of the Formability of Warm Forming Simulation of Magnesium Alloy Sheet Using FLD", *Trans of Materials Processing*, Vol. 17, No. 7, pp. 501~506, 2008.
- [7] S. H. Kim, K. D. Park, J. H. Jang, K. T. Kim, H. W. Lee, G. A. Lee, K. P. Kim, Y. S. Lee, "Experimental and Analytical Researches on Mechanical Properties Related to Formability of AZ31B Alloy Sheet", *Trans of Materials Processing*, Vol. 17, No. 7, pp. 466~472, 2008.
- [8] F. K. Chen, T. B. Huang, "Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets", *J. Mat. Proc. Tech.*, vol. 142, pp. 643~647, 2003.
- [9] K. H. Chiu, F. K. Chen, "Stamping formability of pure titanium sheets", *J. Mat. Proc. Tech.*, vol. 170, pp. 181~186, 2005.
- [10] ASTM International, "Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves", *ASTM E2218-02*, pp. 2~7, 2002.
- [11] International Standard, "Metallic materials Sheet and strip Determination of forming-limit curves - Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory", *ISO 12004-2*, pp. 1~22, 2008.
- [12] S. S. Hecker, "Simple technique for determining forming limit curves", *Sheet Met Ind* 53, pp. 671~675, 1975.
- [13] S. C. Choi, H. J. Kim, "Improvement of the Accuracy and Conveniency in Automated Strain Measurement through High-Resolution Image Processing", *Trans. of Materials Processing Sheet forming symposium 5th*, pp. 34~39, 2006.
- [14] ARGUS, GOM mbH., <http://www.gom.com>