

AZ31 합금 판재의 변형모드에 따른 성형한계에 관한 연구

정진호¹ · 이영선[#] · 권용남¹ · 이정환¹

Forming Limits Diagram of AZ31 Alloy Sheet with the Deformation Mode

J. H. Jung, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee

(Received May 8, 2008)

Abstract

Sheet metal forming of Mg alloy is usually performed at elevated temperature because of the low formability at room temperature. Therefore, strain rates affected with the forming temperature and speed must be considered as important factor about formability. Effects of process parameters such as various temperatures and forming speeds were investigated in circular cup deep drawing. From the experimental results, it is known that LDR (Limit Drawing Ratio) increase as the strain rate increase. On the contrary, the FLD (Forming Limit Diagram) shows lower value as faster strain rate. Therefore, anisotropy values are investigated according to the temperature and strain rates at each forming temperature. R-values also represent higher value as faster strain rate. It is known that the formability can be different with the deformation mode on warm forming of AZ31 alloy sheet.

Key Words: AZ31, Strain Rate, LDR, R-Value, Cup Drawing, FLD, Deformation Mode

1. 서 론

Mg 합금은 전자과 차폐성, 고비강도, 진동 감쇠 능력이 우수하여 사용분야가 급증하고 연구개발이 활발하게 진행되고 있다. 그러나, 낮은 소성변형 특성(성형성)으로 인해 대부분 주조 공정에 의한 제품이 주류를 이루고 있다. 반면, 핸드폰, 노트북과 같은 전자부품, 더 나아가서 자동차부품에 적용을 확대하기 위해 판재성형기술에 대한 기초 및 응용연구가 활발히 이루어지고 있다.

마그네슘 합금은 상온에서 낮은 성형성으로 인해 온간이나 열간에서 성형이 이루어지는 것이 일반적이다. 판재성형시 온도에 따라 성형성이 많은 영향을 받는 현상은 많은 선행연구자들의 연구 결과에 의해 분석된 바 있다[1~6]. 온도가 증가될

수록 성형결함 발생이 감소되고 적정온도(200~300°C)에서 최적의 조건을 나타내고 있다.

적정 성형온도가 온간영역인 만큼 Mg합금의 성형성은 온도이외에 변형율속도에도 영향을 받게 된다. 그러나, 변형율속도에 따른 성형성에 관한 연구는 진행된 바가 거의 없는 실정으로 현재까지는 펀치속도가 증가할수록 신장성형시 성형한계가 감소됨을 설명한 결과가 있는 정도이다[7].

신장성형과 함께 판재성형 공정의 대표적 유형 가운데 하나는 드로잉 성형이다. 딥 드로잉공정은 다양한 용기와 캔 등 외관 부품을 제조하는데 유용한 성형공정으로 Mg 합금 판재 딥 드로잉공정에 대한 연구 또한 많은 선행 연구가 수행되었다[8~12]. 그러나, 대부분 온도에 따른 영향을 분석하였으며 다이(die)와 블랭크 홀더(blank holder)와는 달

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소 소성응용그룹

교신저자 : 한국기계연구원 부설 재료연구소 소성응용그룹 책임연구원, E-mail : lys1668@kims.re.kr

리 편치온도를 냉각시킴으로써 LDR(Limit Drawing Ratio)을 증가시키는 내용이 주류를 이루고 있고, 편치속도의 영향에 대한 연구는 부족한 상태이다.

본 연구에서는 성형온도와 변형률속도에 따른 성형성을 분석하기 위해 원통컵 딥 드로잉시의 드로잉성(LDR)과 드로잉 특성에 영향을 주로 미치는 인자인 소성변형율비(R-value)를 측정하였다. 또한, 변형모드에 따른 성형성을 비교하기 위해 신장성형시 성형성(FLD)과 비교분석을 수행하였다. 드로잉 실험에 사용된 다이와 편치의 온도는 선행연구[7~11] 결과와 동일하게 편치는 상온, 다이는 소재온도와 동일온도로 가열하는 방식을 이용하였다. 소재의 실제 온도변화를 정밀분석하기 위해 성형공정 동안에 소재온도를 직접 측정하였다.

2. 시험 및 평가

2.1 소성변형율비 측정시험

판재의 방향별 특성을 분석하기 위하여 소성변형율비를 측정하였다. Fig. 1과 같은 1축 인장시험 시편을 방향별로 시편을 가공하여 시험을 실시하였고, 연신율을 기준으로 10%(2mm)로 인장 시험을 실시하여 두께와 폭의 변화량을 측정하였다. 상온시험은 10⁻²/s의 속도로 시험을 실시하였고 그 외 자세한 시험 조건은 아래 Table 1과 같다.

2.2 원통 컵 드로잉 실험

온도와 성형속도에 따른 드로잉 특성을 분석하기 위해 원통 컵 드로잉 시험을 실시하였다. Fig. 2(a)는 드로잉시험을 위한 다이의 가열장비이고 (b)는 드로잉 시험기(Erichsen Tester)를 나타내고 있으며 시험 조건은 Table 2와 같다.

2.3 원통 컵 드로잉 실험 시 온도측정

원통컵 드로잉 실험시 소재의 온도는 블랭크 홀더 부분에서는 가열된 상태를 유지하지만, 편치는 가열되지 않은 상태이기 때문에 온도가 하강한다. 따라서, 온도에 따른 드로잉 특성 분석실험의 신뢰도와 결함발생 원인 분석을 위해 판재의 온도변화를 드로잉실험 동안 직접 측정하였다. 실험 직전 다이와 소재의 온도를 측정한 후 다이를 에릭슨 시험기에 장착하고 실험을 진행하면서 소재의 온도를 연속으로 측정하였다. 금형이 가열된 부분은 편치를 제외한 다이 전체이며 소재는 실험조건에 따라 가열 후 thermocouple을 이용하여 측정하였다.

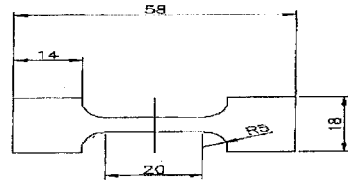


Fig. 1 Dimension of specimen for R-value test

Table 1 R-value test conditions

Thickness	1 [mm]	
Temperature	R.T, 100, 200, 250, 300, 400 [°C]	
Strain rate	1, 10 ⁻¹ , 10 ⁻² , 10 ⁻³ [s]	
Heating time	15 [min]	
Gage-Length	20 [mm]	
Measuring instrument	Thickness	Micrometer
	Width	Microscope
Test Machine	UTM	

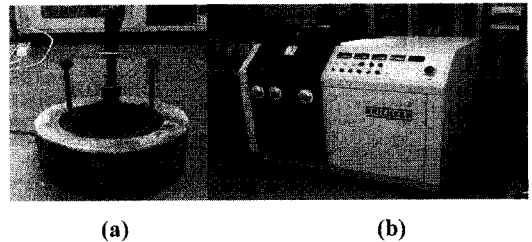


Fig. 2 Testing machine and tools for circular cup deep drawing(Erichsen Co.)

Table 2 Test conditions of circular cup deep drawing

Blank size	Ø 117	Punch size	Ø 50
Temperature	100, 200, 250, 300, 400 [°C]		
Drawing ratio	2.34		
Punch speed	0.05, 0.5, 5 [mm/sec]		
Heating time	15 [min]		
Test Machine	ERICHSEN		
Lubricant	Graphite		

3. 소성변형율비 및 드로잉 실험결과

3.1 원통 컵 드로잉 실험 결과

100°C에서부터 400°C까지 각각 성형속도에 따라 원통 컵 드로잉 실험을 수행한 결과는 Fig. 3과 같다. 드로잉성은 온도가 증가될수록 향상되며, 250°C 부근에서 가장 우수한 성형성을 나타내었

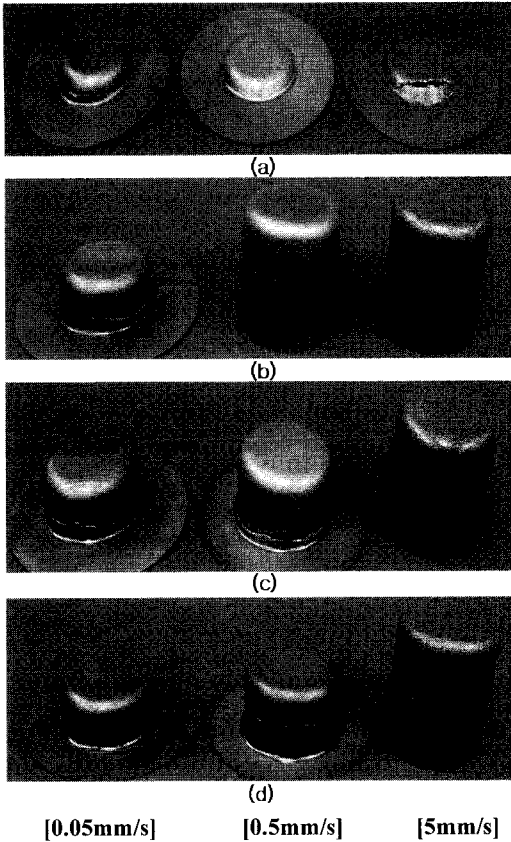


Fig. 3 Appearances of cup drawn at each temperature and punch speed (a)200°C, (b)250°C, (c)300°C, (d)400°C

다. 성형속도는 증가할수록 성형성이 향상되고 컵의 높이 또한 증가하고 있다. 특히, 200°C 이상부터 변형률 속도가 빠를수록 드로잉성이 향상됨을 알 수 있다. 250°C 0.5mm/sec.와 250°C, 300°C와 400°C에서는 5mm/sec.에서 결함 발생이 없으며 더 낮은 성형속도에서는 파단이 발생하였다. Table 3은 원통컵 드로잉의 파단유무와 컵의 성형높이를 측정된 결과이다. 성형온도가 높고 속도가 빠를수록 컵의 높이가 증가되고 있다. 0.5mm/sec의 조건에서 파단이 발생한 시점에서 측정된 실제 소재온도는 약 135°C정도로 측정되었다.

3.2 원통컵 드로잉 온도 측정

원통컵 드로잉 실험결과 성형속도는 증가될수록 드로잉성이 향상됨은 Fig. 3에서 확인하였다. 그러나, 동일한 시험 종류에서 성형속도가 증가될수록 드로잉 특성이 감소되는 결과에 대한 선행결

Table 3 Cup height at each process condition

Temp. [°C]	[mm]		
	0.01/s [0.05mm/s]	0.1/s [0.5mm/s]	1/s [5mm/s]
100	3.90 (X)	3.61 (X)	5.69 (X)
200	16.17 (X)	6.55 (X)	8.68 (X)
250	20.73 (X)	60.35 (O)	60.52 (O)
300	27.41 (X)	35.88 (X)	60.04 (O)
400	26.73 (X)	39.13 (X)	60.31 (O)

(*: O : No crack, X : crack)

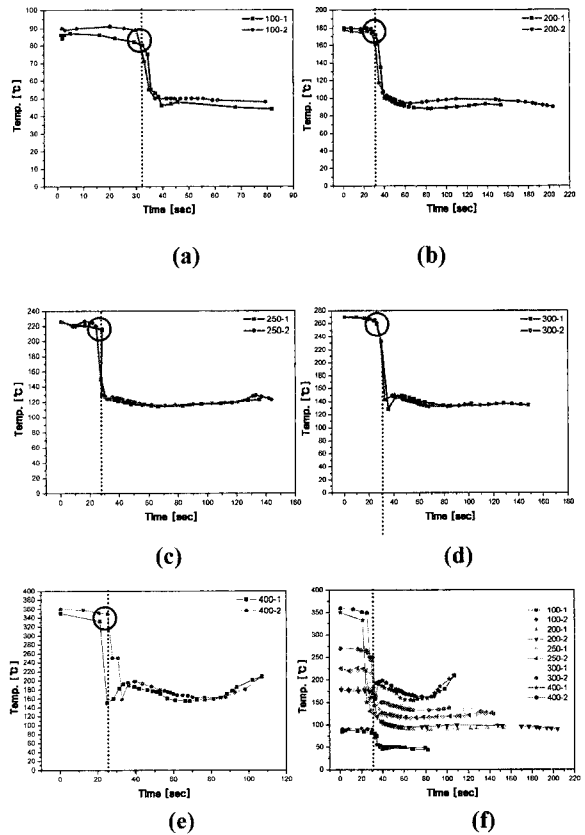
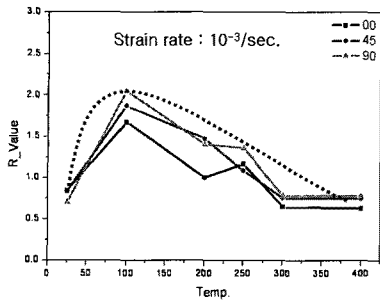
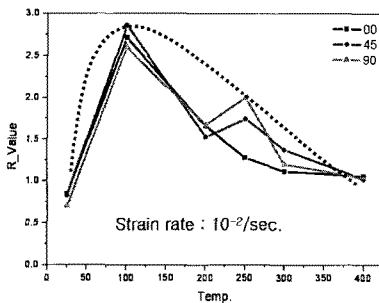


Fig. 4 Temperature changes of blank during forming stages (from furnace to final forming, punch speed : 0.5mm/sec) (a) 100°C (b) 200°C, (c)250°C, (d)300°C, (e)400°C, (f)total

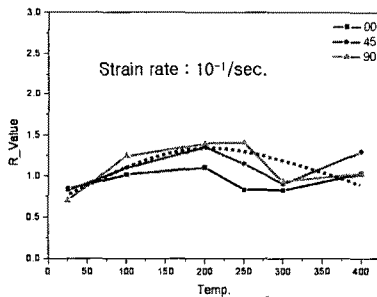
과 또한 존재한다[13]. 따라서, 본 연구에서는 드로잉 시험시 낮은 성형속도에서는 소재의 실제온도가 하강함으로써 드로잉 특성이 감소되는 것인지에 대한 확인을 위해 전 공정 동안 소재의 실제



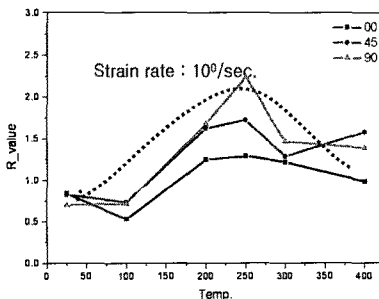
(a) strain rate ; $10^{-3}/\text{sec.}$



(b) strain rate ; $10^{-2}/\text{sec.}$



(c) strain rate ; $10^{-1}/\text{sec.}$



(d) strain rate ; $10^0/\text{sec.}$

Fig. 5 Results of R-value test at various condition

온도를 접촉식으로 직접 측정하였다. 온도는 드로잉 성형을 시작하기 전부터 시험을 진행하는 동안 연속으로 측정하였다. 측정 결과 금형과 소재

가열을 시작한 후 에릭슨 시험기에 금형을 장착하고 펀치가 소재에 닿는 순간(30초) 급속히 온도가 하강하였고 그 후 일정한 온도가 유지되는 결과를 나타내었다. 소재의 하강온도는 약 50~160℃ 정도로서 가열온도에 따라 차이를 보이고 있으나, 성형속도에 따른 차이는 거의 없는 결과를 나타내었다. Fig. 4는 각각의 온도에 대한 측정결과로서, 곡선내 원은 소재와 펀치가 서로 접촉하는 순간을 표시하고 있다.

3.3 소성변형율비 측정시험 결과

소성변형율비를 측정하기 위해 인장시험 후 두께와 폭 변화량을 측정하여 소성변형율비를 계산하였다. Fig. 5는 온도와 변형률속도에 따른 소성변형율비를 나타내고 있다. 상온보다 100℃부터 250℃까지 소성변형율비가 증가하고 이후 소성변형율비는 온도가 증가하면서 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 상온에서 400℃까지의 소성변형율비는 처음에는 값이 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타내고 있다.

판재의 방향별 특성은 압연방향(0°방향) 보다 90°방향에서 소성변형율비가 더 크게 나타나고 있다. 이는 Fig. 3에서 알 수 있듯이 크랙이 발생하는 방향이 주로 압연방향인 결과에 대한 원인을 설명해주고있다. 250℃부근에서는 변형률속도가 빠를수록 소성변형율비가 증가되고 있다. 즉, 100℃부근에서는 낮은 변형율속도에서, 250℃부근에서는 변형율속도가 빠를수록 소성변형율비가 증가됨을 알 수 있다.

3.4 신장성형시 성형한계도(FLD)

변형률 속도 1/s, $10^{-1}/\text{s}$, $10^{-2}/\text{s}$ 과 성형 온도 200℃, 250℃, 300℃의 조건으로 신장성형을 통한 성형한계도 시험을 실시하였고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다[7]. Fig. 6은 성형 온도 250℃, 300℃, 변형률 속도 $10^{-1}/\text{s}$ 에서의 성형한계도를 각각 나타내고 있다.

성형한계도는 파단이 발생된 부분과 발생되지 않은 부분을 기준으로 한계도 곡선을 작성하였다. 반구형 펀치(지름 100mm)를 이용한 신장성형시 성형한계도에서 성형성은 온도가 높을수록 주변형률과 부변형률의 값이 큰 것으로 나타나고 있어 성형성이 상대적으로 좋은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구 결과에서도 동일한 결과를 나타내고 있다[14~15].

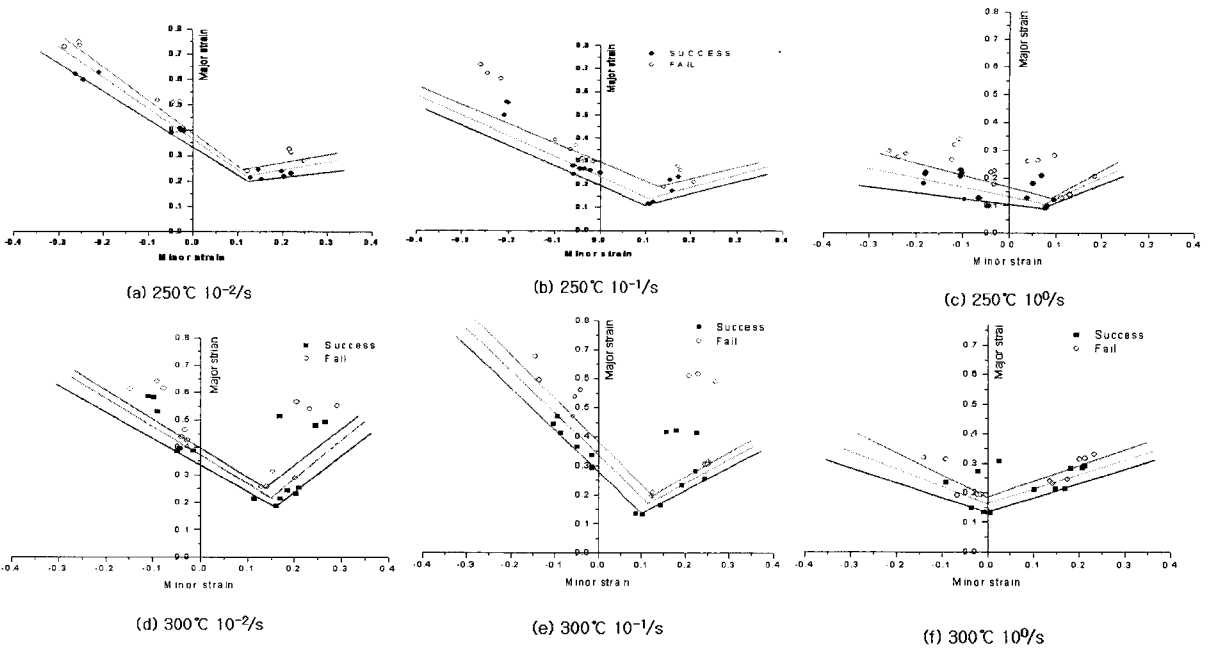


Fig. 6 FLD (Forming Limit Diagram) at each strain rate and temperature

성형속도에 따른 영향으로는 250°C와 300°C에서 모두 성형속도가 증가될수록 성형한계가 감소되고 있다. 이는 1축인장시험시 낮은 변형률속도가 성형성에 유리한 결과와는 동일하지만 드로잉 모드와는 반대 경향을 나타내고 있는 것이다. 신장성형은 2축 인장상태로서 1축인장시험과 동일하게 변형률속도가 낮을수록 크랙발생이 지연되는 것으로 판단된다. 반면에 드로잉 모드에서는 인장-압축 응력상태로서 변형률속도가 증가될수록 이방성지수가 증가되는 특성에 영향을 받아 성형성이 증대되는 것으로 분석된다.

3.5 원통컵 드로잉시 성형한계선도

변형모드(신장성형, 드로잉성형)에 따른 성형한계의 차이가 발생하는 원인을 분석하고 각 변형모드에 따른 정량분석을 위해 원통형 컵 드로잉을 통한 성형한계도를 작성하였다. 컵 드로잉 시험편에 그리드(Grid)를 구성한 후 컵 드로잉 실험 후 주 및 부변형율을 측정하여 도시한 결과 Fig. 7과 같이 성형속도가 증가될수록 주변형율과 부변형율 모두 증가됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Narayanasamy[16]이 수식화한 LDR의 온도와 변형률속도에 따른 영향에 관한 수식에 부합되는 결과이다.

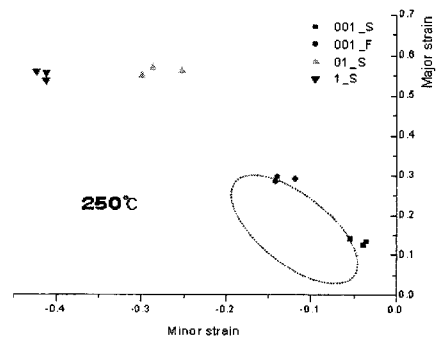
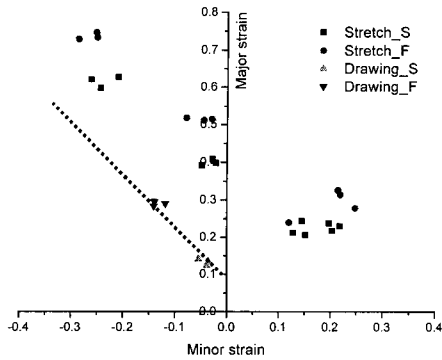
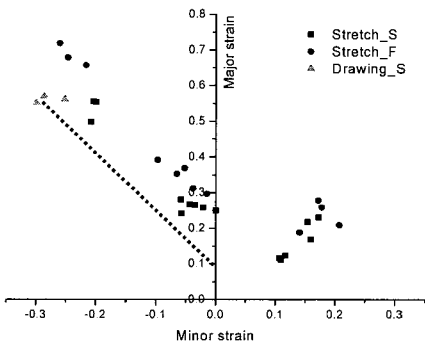


Fig. 7 Minor strain and major strain measured at deep drawing test(forming temperature : 250°C)

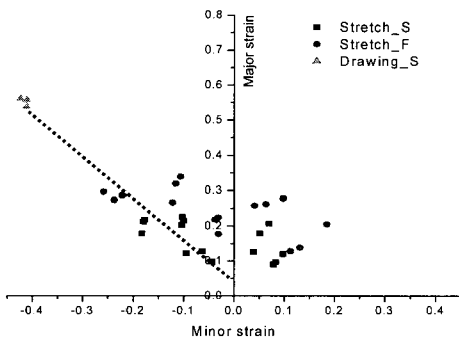
Fig. 7은 250°C에서 1/s, 0.1/s, 0.01/s에서의 성형한계도를 나타내고 있다. 원통컵 드로잉을 통한 성형한계는 1축 인장응력 부위에서 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 그래프의 1사분면은



(a) 250°C 10⁻²/s



(b) 250°C 10⁻¹/s



(c) 250°C 10⁰/s

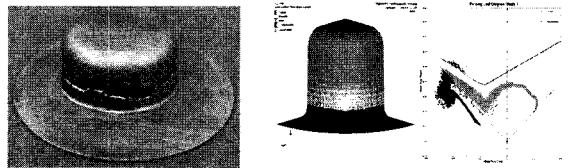
Fig. 8 FLD combined with results of stretching test and deep drawing test at each strain rate and temperature

신장성형 상태의 성형한계를 나타내었고 2 사분면에서는 드로잉 모드에서의 성형한계를 이용하여 성형한계도 곡선을 작성하였다. 이 곡선을 통해

신장성형 상태보다 드로잉 성형 모드에서 더 낮은 성형한계를 나타내고 있는 특징을 고려할 수 있게 된다.

3.6 유한요소해석을 통한 딥 드로잉 공정 해석결과

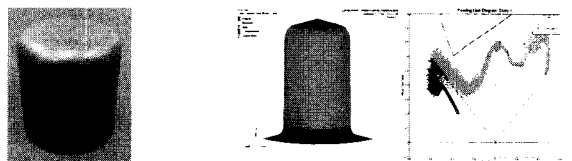
실험을 통해 얻은 성형한계도의 실효성 검증을 위해 수치해석을 이용하여 원통컵 딥 드로잉 공정을 해석하였다. 유한요소해석은 LS-Dyna™ 프로그램을 이용하였다. 신장성형 모드를 통한 성형한계도와 드로잉시험을 통한 성형한계도를 해석에 접목하여 성형이 일어나는 드로잉의 높이와 파단이 일어나는 위치, 성형성을 비교해보았다. Fig. 9는 250°C에서의 성형한계를 측정예측한 결과를 나타내었다. 유한요소해석 결과는 스트레칭 실험을 통해 얻은 성형한계도를 이용하였을 때 보다 드로잉 실험을 통해 얻은 성형한계도가 더욱 성형해석과 유사한 것으로 나타났고, 또한 파단위치와 파단시 컵의 높이 또한 스트레칭 모드에서의 성형한계도를 통한 결과 보다 드로잉 모드에서 나온 결과를 이용한 성형한계도 예측이 보다 적합함을 알 수 있었다.



(a) 250°C 10⁻²/s



(b) 250°C 10⁻¹/s



(c) 250°C 10⁰/s

Fig. 9 Failure prediction of cup drawing by the FLD measured on deep drawing test

Table 4 는 유한요소해석 결과 드로잉시 파단이 발생하는 시점의 컵 높이를 측정한 결과로서 파단이 발생하는 시점예측이 스트레칭 모드 보다 드로잉모드 실험결과와 더 좋은 일치율을 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 이방성이 큰 소재(SPCC)의 경우 스트레칭의 성형한계도와 딥

Table 4 Height of cup drawn at each process condition FEA

	[mm]		
	0.01/s	0.1/s	1/s
200℃	17.98	12.19	24.06
250℃	23.94	54.65	60.00
300℃	29.95	36.01	60.00

드로잉의 성형한계도 사이의 격차가 비교적 큰 것임을 설명한 결과와 동일한 양상을 보이고 있다[17].

4. 결론

마그네슘 합금판재의 변형모드에 따른 성형성 분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

(1) Mg 합금의 인장시험에서는 변형률 속도가 느릴수록 연신율이 높게 나타나지만 소성변형율비는 100℃ 부근에서는 낮은 변형률속도에서, 250℃ 부근에서는 변형률속도가 빠를수록 소성변형율비가 증가되고 있다.

(2) 소성변형율비의 방향별 특성은 압연방향(0°) 보다 압연방향의 수직방향(90°)에서 더 높은 값을 나타내었으며, 원통 컵 드로잉 실험에서도 동일한 특성을 보여 90°에서보다는 0°방향에서 파단이 발생하는 것을 알 수 있다.

(3) 소성변형율비 값이 높을수록 드로잉률이 향상되는 일반적 특성과 동일하게 300℃와 400℃에서 높은 소성변형율비로 인해 드로잉률이 향상되고 있다.

(4) 반구형 신장성형실험 결과에 의한 성형한계도는 1 축 인장시험 결과 온도가 높고 변형률속도가 느릴수록 연신율이 증가되었다. 그러나, 드로잉 모드에서는 신장성형 상태와 서로 상이한 현상을 나타내고 있었다.

(5) 유한요소해석 결과에서도 스트레칭 모드를 통한 성형한계도 보다 드로잉 모드를 통한 성형한계도를 이용한 예측이 더욱 실험과 유사함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 기본 연구사업인 “고비강도 소재 Fusion 성형기술 개발”의 연구 결과로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] F-K. Chen, T-B. Huang, 2003, Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 142, pp. 643~647.
- [2] M. C. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2004, Deep drawing of AZ31 alloy sheet in the warm forming temperature, Proceedings of the Korean Society for Technology of Plasticity Conference, pp. 47~52.
- [3] M. C. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2005, Finite element analysis considering heat transfer in sheet metal forming of AZ31, Proc. of the KSTP annual meeting., pp. 73~77.
- [4] K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, 2004, Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy, J. Mater. Proc. Tech., Vol.155-156, pp. 1313~1316.
- [5] M. C. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, S. W. Kim, J. H. Lee, 2005, A study on formability of AZ31 alloy sheet in square cup deep drawing process at temperature elevated, Proc. KSTP annual meeting, pp. 235~238.
- [6] W. J. Kim, S. W. Chung, 2000, Superplasticity in fine-grained AZ61 magnesium alloy, Metals Mater. Int., Vol.6, pp. 255~260.
- [7] J. H. Jung, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee 2007, A Effect of Strain rate of Forming limits of Mg alloy at warm sheet forming, Proc. KSTP annual meeting, pp. 279~280.
- [8] A. Yoshihara, B. J. Macdonald, H. Ishimura, H. Yamamoto, K. Manabe, 2004, Optimisation of magnesium alloy stamping with local heating and cooling using the finite element method, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 153-154, pp. 319~322.
- [9] F-K. Chen, T-B. Huang, C-K. Chang, 2003, Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheet, Int. J. Mach. Tools & Manu., Vol. 43,

pp. 1553~1559.

- [10] K. F. Zhang, D. L. Yin, D. Z. Wu, 2006, Formability of AZ31 magnesium alloy sheets at warm working conditions, *Int. J. Mach. Tools & Manu.*, Vol. 46, pp. 1276~1280.
- [11] T-B. Huang, Y-A. Tsai, F-K. Chen, 2006, Finite element analysis and formability of non-isothermal deep drawing of AZ31B sheets, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 177, pp. 142~145.
- [12] A. Wahab, E. Morsy, K. Manabe, 2006, Finite element analysis of magnesium AZ31 alloy sheet in warm deep-drawing process considering heat transfer effect, *Mater. Letter*, Vol. 60, pp. 1866~1870.
- [13] E. Doege, K. Droeder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys-formability and process technology, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 115, pp. 14~19.
- [14] H. G. Kim, J. W. Bae, D. K. Choo, C.G. Kang, 2006, A study on the deep drawing of AZ31B magnesium sheet at warm and for temperature, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 15, No. 7, pp. 504~511.
- [15] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, K. T. Lee, 2007, Experiments for forming limit diagram and springback characteristics of AZ31B magnesium alloy sheet at elevated temperature, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 16, No. 5, pp. 364~369.
- [16] R. Narayanasamy, R. Ponalagusamy, S. Raghuraman, 2008, The effect of strain rate sensitivity on theoretical prediction of limiting draw ratio for cylindrical cup drawing process, *Mater. Design*, Vol.29, pp. 884~890.
- [17] H. Huh, C. H. Lee, J. W. Chung, 1998, Identification of forming limits of sheet metals for automotive parts by asymmetric deep-drawing experiments, *J. KSTP*, Vol.7, No.1, pp. 81~93.