

마그네슘 판재 온간 성형의 파단 예측 모델 비교 연구

김흥규[#] · 김종덕¹ · 허영무¹ · 김우진²

A Comparative Study of Failure Criteria for Magnesium Alloy Sheet under Warm Press Forming Condition

H. K. Kim, J. D. Kim, Y. M. Heo, W. J. Kim

(Received November 28, 2011 / Revised February 13, 2012 / Accepted February 24, 2012)

Abstract

Magnesium sheet alloys possess limited plastic formability at room temperature but their formability is substantially improved at elevated temperatures and optimum strain rates. In the present paper, three different types of failure criteria, namely, strain-based, stress-based, and work-based criteria, are compared for their applicability to warm press forming of magnesium sheet alloys. Warm deep-drawing experiments were conducted on AZ31 alloy sheet, and the results were used to assess the strength and weakness of the failure criteria.

Key Words : Magnesium Alloy, Formability, Failure Criteria, Warm Press Forming

1. 서 론

초경량의 마그네슘 판재는 상온에서의 소성가공 특성이 매우 나쁘기 때문에 성형성을 향상시키기 위해 보통 200℃ 이상의 온도 조건에서 프레스 성형을 수행하여 원하는 부품 형상을 얻게 된다. 냉간 공정과 마찬가지로 이런 온간 프레스 성형 공정의 효율적 설계를 위해서는 부품 형상에 따른 마그네슘 판재의 성형 한계를 미리 예측할 수 있는 파단 예측 모델이 필요하다.

현재 판재 성형을 위한 대표적인 파단 예측 모델로는 성형한계도(Forming Limit Diagram)가 있다 [1]. 그런데 온도와 변형률 속도 조건에 매우 민감한 특성을 갖는 마그네슘 판재의 경우에는 이와 같이 온도와 변형률 속도에 따른 영향을 모두 고려한 성형한계도를 얻기 위해서는 상당히 많은 시험이 필요하다는 문제점이 있다. 게다가 성형한

계도의 경우 성형공정에 따른 변형 이력에 의존하는 특성을 갖기 때문에 종종 신뢰도의 문제가 발생하기도 한다[2~4].

본 논문에서는 마그네슘 판재의 온간 프레스 성형에 적용 가능한 몇 가지 다른 형태의 파단 예측모델을 제시하고 그 특성을 비교 평가하고자 하였다. 파단 거동과의 연관성 측면에서 가장 적절한 상태변수를 찾기 위해, 변형률, 응력, 일의 3 가지 다른 종류의 상태변수를 그 기반으로 하는 파단 예측 모델들을 도입하였다.

각각에 대응하는 대표적인 파단 예측 모델을 적용한 유한요소해석을 수행하고 실제 마그네슘 판재 온간 성형 시험 결과와 비교하여 각 모델의 타당성을 평가하였다. 마그네슘 판재에 대한 온간 성형 시험으로는 등온(Isothermal)과 비등온(Non-isothermal)의 2 가지 금형 온도 조건에서 딥드로잉 성형을 수행하였다.

1. 한국생산기술연구원 금형기술연구그룹

2. 홍익대학교 신소재공학과

교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술연구그룹,

E-mail: krystal@kitech.re.kr

2. 파단 예측 모델

2.1 마그네슘합금 판재의 재료 특성

다양한 온도와 변형률 속도 조건에서 마그네슘합금 판재의 인장시험을 수행하면 그 재료 특성이 온도와 변형률 속도에 매우 민감하게 나타남은 최근의 여러 연구에 의해 잘 알려져 있다. 구체적으로 살펴보면, 온도가 높아질수록 유동응력과 가공경화는 감소하고 변형률 속도 의존성은 크게 증가하게 된다. 이러한 재료 특성은 다음과 같은 형태의 유동응력식을 사용하여 간단히 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n\dot{\bar{\epsilon}}^m \quad (1)$$

위 식에서 K 는 강도계수, n 은 가공경화지수, m 은 변형률속도 민감도지수를 각각 나타낸다. 마그네슘합금 AZ31 판재에 대해 온도별 인장시험을 수행하면 그 결과로부터 K, n, m 을 각각 온도의 함수로 표현할 수 있게 된다.

2.2 변형률(Strain) 기반의 파단 모델

AZ31 판재에 대한 인장시험으로부터 재료의 파단이 발생하는 시점인 파단 변형률 $\bar{\epsilon}_f$ 이 유동응력식과 유사하게 시험조건인 온도와 변형률 속도에 의존한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 파단 변형률을 온도 및 변형률속도의 특정 함수 형태로 표현할 수 있을 것이다.

그 동안 Johnson-Cook 모델을 비롯한 여러 형태의 함수식이 이런 목적으로 제시되어 왔다. 그런데 미리 정해진 형태의 함수 관계식은 피팅(fitting) 변수 값을 바꾸더라도 재료 특성을 완전히 표현하는데 한계가 있을 수 있다. 따라서 미리 정해진 형태가 없이 실험 데이터에 충실한 함수식을 적용할 필요성이 있다.

이런 이유로 본 연구에 사용한 방법론은, 온도와 변형률 속도에 대한 의존성은 Zener-Holloman 변수, 즉, 다음 Eq. (2)로 정의된 Z 로 묶어 표현하되, 다양한 온도와 변형률 속도 조건에 대한 파단 변형률 거동 데이터를 Z 의 함수로 나타내는 것이다.

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

파단까지 진행된 인장 시험 결과로부터 파단 변형률과 Z 의 관계를 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있고 [5, 6], 이로부터 파단 변형률을 다음과 같은 형

태의 함수 식으로 구할 수 있게 된다.

$$\bar{\epsilon}_f = H_2(Z) \quad (3)$$

성형 공정 중에 소재의 온도 또는 변형률 속도가 변하는 경우, 위의 Eq. (3)으로 정의되는 파단 변형률 $\bar{\epsilon}_f$ 는 이에 따라 변하게 되는 문제점이 있다. 이를 고려하여 다음 Eq. (4)와 같은 시간 평균 개념의 파단 변형률 $\bar{\epsilon}_f^{AVE}$ 를 정의하고 사용할 수 있다[5]. 이를 통해 성형 공정 중 시시각각 변하는 온도 및 변형률 속도의 영향이 평균적으로 반영될 것으로 예상된다.

$$\bar{\epsilon}_f^{AVE} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{\epsilon}_f^i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N \Delta t_i} \quad (4)$$

위 식에서 $\bar{\epsilon}_f^i$ 는 성형 공정 중의 i 번째 시간 구간 Δt_i 에서의 파단 변형률을 나타내고, N 은 전체 성형 공정의 분할된 시간 구간 개수이다.

파단 여부의 판단은, 성형 소재에 발생하는 변형률 값이 위 Eq. (4)와 같이 정의된 파단 변형률 값을 초과하는 경우 그 지점에서 파단이 발생하는 것으로 간주하는 것이다. 이와 같은 방식으로 다양한 온도와 변형률 속도를 갖는 프레스성형 공정 조건에서 AZ31판재의 파단 거동을 예측할 수 있다.

위 Eq. (3)과 (4)는 유효 변형률로 정의된 파단 변형률을 사용하고 있는데, 만약 판재의 이방성이나 Stress Triaxiality 가 중요한 경우라면 변형률 성분을 사용한 파단 변형률 정의가 필요할 것이다.

여기서 정의된 파단 예측 모델은 변형률을 그 기반으로 한다는 점에서 주변형률 및 부변형률에 기초한 성형한계도와 유사한 특성을 나타낼 수 있다. 즉, 변형 이력에 따라 파단 변형률이 달라질 가능성이 존재한다. 이러한 이유로 변형률이 아닌 응력 또는 일을 기반으로 하는 파단 예측 모델도 고려할 필요가 있다.

2.3 응력(Stress) 기반의 파단 모델

변형률 경로 의존성은 판재에 널리 적용되는 성형한계도에서 종종 관찰되어 온 현상이다. 최근 Stoughton[3,4]의 연구결과에 따르면 변형률

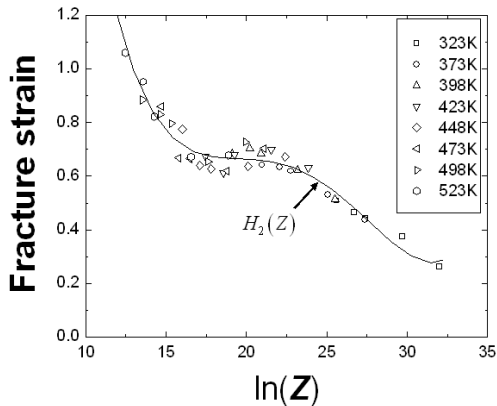


Fig. 1 Fracture strain as a function Zener-Holloman parameter[6]

대신 응력을 사용할 경우 변형률 경로에 크게 의존하지 않는 응력 기반의 성형한계도를 얻을 수 있다. Stoughton 에 의해 제시된 변형률 기반의 성형한계도와 응력 기반의 성형한계도를 Fig. 2 에 비교하여 나타내었다. 이 때 Stoughton 은 주응력 값이 Eq. (1)로 표현되는 유동응력식의 강도계수 K 값의 70%에 도달할 경우 파단 가능성이 있다고 판단하였다.

그런데, Fig. 2(b)에 나타낸 응력 기반 성형한계도를 관찰해 보면 성형한계점에서 주응력(Major Stress)은 부응력(Minor Stress) 값과 상관없이 비교적 일정한 값에 도달해 있음을 알 수 있다. 이로 부터 파단을 나타내는 응력 조건은 다음과 같이 파단 주응력, 즉 σ_f^{major} 에 대한 조건 만으로 표현 가능함을 유추할 수 있다.

$$\sigma_f^{major} = 0.7K \quad (5)$$

인장시험 결과를 보면 강도계수 K 가 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 온도의 함수로 표현됨을 알 수 있다. 특히, K 는 온도가 증가할수록 그 값이 점점 감소함을 볼 수 있다.

K 가 온도의 함수이므로 Eq. (5)로 표현되는 파단 주응력도 온도의 함수가 된다. 다만, Stoughton 에 의해 제시된 성형한계도와 그에 기초하여 제안된 Eq. (5)에서는 변형률 속도의 영향이 고려되지 않았음을 주의해야 한다. 만약 변형률 속도의 영향이 적절히 고려되려면, 응력기반 성형한계도와 그에 따른 Eq. (5)에 변형률 속도 항이 포함될 필요가 있다. 이럴 경우 파단 주응력은 단순히 온도의

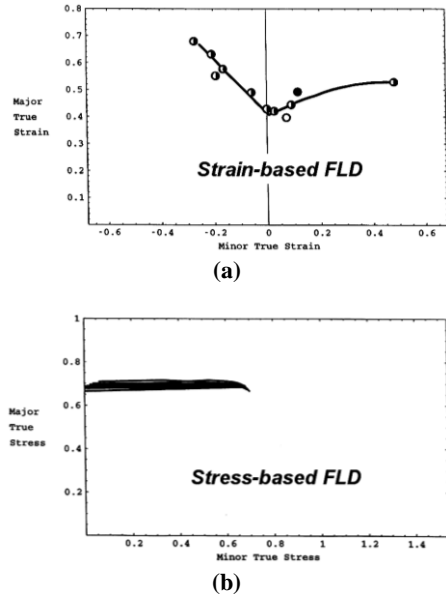


Fig. 2 (a) Conventional strain-based FLD, and (b) stress-based FLD [3]

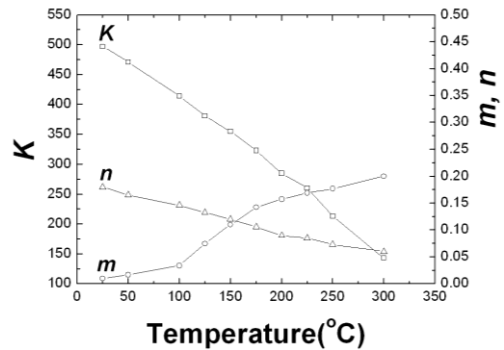


Fig. 3 Strength coefficient K , strain hardening exponent n , and strain-rate sensitivity m as a function of temperature[6]

함수가 아니고, 온도 및 변형률 속도의 함수가 될 수 있다. 즉, 앞의 변형률 기반 파단 모델의 경우 처럼 Z 의 함수가 될 가능성이 있다. 그러나 응력 기반 성형한계도에서 변형률 속도의 영향이 아직 실험적으로 명확히 알려지지 않은 상태이다. 따라서 본 논문에서는 우선 Eq. (5)를 파단 예측에 적용하였다. 결과적으로 파단 주응력 σ_f^{major} 의 조건, 즉 Eq. (5)에서 온도에 따른 영향은 K 를 통해 반영되지만 변형률 속도의 영향은 명시적으로 고려되지 않는 상황이다.

2.4 일(Work) 기반의 파단 모델

일(Work) 기반의 파단 예측 모델로 대표적인 것이 손상(Damage) 값을 기준 지표로 사용하는 연성파괴기준(Ductile Fracture Criterion)이다. 손상일 모델은 판재가 아닌 덩어리(Bulk) 형태의 금속성형에 대해 널리 적용되어 왔는데, 일을 계산하기 위한 경로 적분을 통해 변형 이력이 적절히 반영된다는 특징을 갖는다. 이전의 연구[5, 6]에서 마그네슘합금 AZ31 판재의 성형 공정을 대상으로 파단까지의 손상일과 Zener-Holloman 변수의 함수관계를 도출하였다. 이를 통해 손상일을 온도 및 변형률 속도의 함수로 표현함으로써 단순하면서도 유용한 파단 모델을 제시하였다. 제시한 몇 가지 다른 형태의 모델 중에서 Normalized Cockroft & Latham 모델에 기초한 다음과 같은 형태의 파단 모델을 대상으로 앞에서 설명한 다른 파단 모델과 비교 평가하였다[6].

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \left[\frac{\sigma^* / \bar{\sigma}}{H_2(Z)} \right] d\bar{\epsilon} = 1 \quad (6)$$

위 식에서 σ^* 는 최대 인장응력을 나타내며, 손상 값 D 가 1에 도달하는 경우 파단이 발생하는 것으로 정의된다.

한편, Cockroft & Latham 모델과 달리 Normalized Cockroft & Latham 모델은 최대 인장응력과 유효응력의 비로 구성되어 있기 때문에 엄밀한 의미에서 일 기반의 파단 모델은 아니다. 그러나 적분을 통해 변형 경로 이력을 반영할 수 있고 실제 파단 예측 결과에서도 큰 차이가 없었기 때문에 본 논문에서는 이를 대상으로 결과를 제시한다.

3. 파단 모델의 성능 평가

3.1 마그네슘판재 온간 딥드로잉 시험

위에서 제시한 파단 모델들의 타당성 평가를 위해 0.8mm 두께의 마그네슘합금 AZ31 판재를 사용한 온간 딥드로잉 시험을 하였다. 원형컵 딥드로잉을 대상으로 다양한 금형 온도 및 프레스 속도 조건을 적용하였다. 성형 시험은 펀치와 블랭크홀더/다이의 온도가 서로 다른 비등온 조건과 두 온도가 서로 같은 등온 조건의 2가지 조건에서 수행하였다. 비등온 조건은, 딥드로잉 성형성 향상을

을 위해 펀치 내부에 15℃의 냉각수를 순환시켜 온도 상승을 억제한 경우를 의미한다. 블랭크홀더/다이를 150, 250℃의 2가지 온도 조건으로 가열한 딥드로잉 성형 시험에서 관찰된 파단 깊이를 Fig. 4에 나타내었다. 여기에서 비등온 조건과 등온 조건의 결과를 비교하여 나타내었다. Fig. 4에서 %로 표현된 펀치속도는 프레스 장비의 최대 속도와 비교했을 때의 상대적인 값을 나타내는데, 프레스 하사점으로부터 10mm 구간에 대해 평균 속도를 구하면 펀치속도 1% ≃ 0.4mm/s가 된다[7].

보통 온간 딥드로잉 공정에서 성형성 향상을 위해서는 비등온 조건이 유리하다는 것이 알려져 있다. 이는 딥드로잉에서 파단에 가장 취약한 부위인 펀치 바닥면 근방 벽면에서의 변형을 소재 냉각으로 억제하고 이를 통해 파단 시점을 지연시키는 효과가 있기 때문이다.

비등온 조건과 등온 조건 각각에서 온도에 따른 경향을 살펴보면, 비등온 조건에서는 금형 온도가 150℃에서 250℃으로 올라가면 파단 깊이가 크게 증가하지만 등온 조건에서는 오히려 150℃에서 파단 깊이가 더 크음을 볼 수 있다. 등온 조건에서 금형 온도가 증가할 때 소재의 한계 연신율이 증가함에도 불구하고 딥드로잉 가능 깊이가 감소하는 것은 주의해야 할 현상이다. 이것은 딥드로잉에서의 드로잉성이 단순히 소재의 한계 연신율에 비례하지는 않음을 보여준다.

동일한 블랭크홀더/다이 온도 조건에서 비등온과 등온 조건 시험의 파단 깊이를 비교하면, 250℃에서는 모든 프레스 속도 조건에서 비등온 조건의 파단 깊이가 훨씬 더 크게 나타나는 반면, 150℃에서는 프레스 속도 조건에 따라 파단 깊이의 우열에 차이가 발생한다. 즉, 낮은 프레스 속도(10% 이하)에서는 비등온 조건의 파단 깊이가 더 크지만 높은 프레스 속도(10% 이상)에서는 오히려 등온 조건의 파단 깊이가 좀 더 큰 것으로 나타났다.

시험 결과로부터 알 수 있는 것은, 온도 구배를 이용한 비등온 성형을 적용하여 성형성을 향상시키려면 블랭크홀더/다이의 온도가 250℃ 정도의 충분히 높은 온도로 가열되어야 한다는 점이다. 반면 150℃에서는 소재 고유의 한계 연신율이 낮은 상태로서, 비등온 조건을 적용하면 일부 프레스 속도 조건에서 약간의 성형성 향상이 있을 수 있지만 전체적으로는 큰 변화가 없는 것으로 보인다.

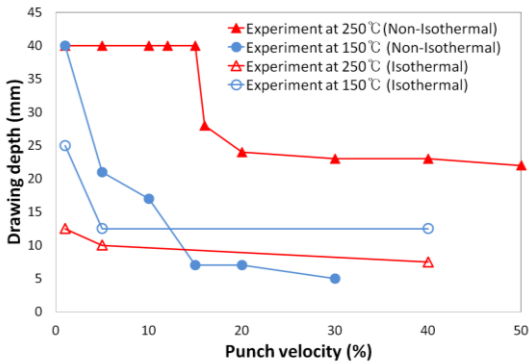


Fig. 4 Experimental fracture depth as a function of punch velocity (%) for non-isothermal deep drawing[6] and isothermal deep drawing test

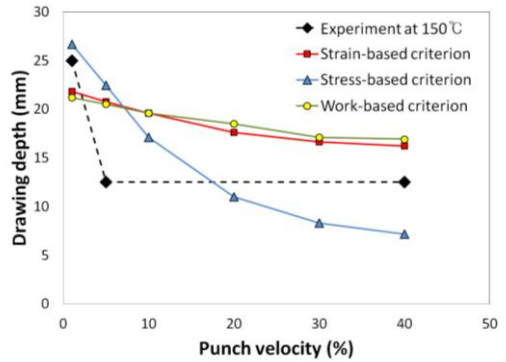


Fig. 5 Comparison of experimental fracture depth with FEM predictions based on three fracture criteria for isothermal deep drawing at 150°C

3.2 유한요소해석과 시험결과의 비교

위에서 제시한 파단 예측 모델들을 적용한 유한요소해석을 수행하였다. 변형률, 응력, 일 기반의 파단 모델을 사용했을 때 유한요소해석으로 예측되는 파단 깊이를 시험에서 관찰된 파단 깊이와 비교하였다. 150, 250°C의 2 가지 온도 조건에 대해 각각의 파단 모델에 의해 예측되는 파단 깊이를 시험 결과와 비교하여 Fig. 5, 6에 각각 나타내었다.

일 기반의 파단 모델을 주로 다룬 이전의 연구 결과[6]에서는 일 기반 파단 모델을 사용하여 비등온 조건에서의 파단 깊이를 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 그러나, Fig. 5와 6를 살펴보면, 일 기반 파단 모델이 등온 조건의 파단 깊이는 적절히 예측하지 못함을 볼 수 있다. 변형률, 응력, 일 기반의 모델들을 서로 비교하면, 등온 조건 결과에 대해서는 응력 기반의 파단 모델이 상대적으로 가장 정확히 파단 깊이를 예측하는 것으로 보인다. 특히, 변형률 속도 변수가 정의에 포함되지 않은 응력 기반 파단 모델, 즉 Eq. (5)를 사용하더라도 펀치 속도에 따라 파단 깊이의 예측 값이 달라지고 있는데, 이것은 Eq. (1)로 표현되는 재료의 유동응력식에서 속도에 따른 영향이 이미 반영되고 있기 때문으로 보인다.

다만, 응력 기반 모델을 비등온 조건에도 적용하기 위해서는, 변형률 기반의 파단 모델에서 논의된 것처럼, 변하는 온도 및 변형률 속도 효과를 파단 응력 결정에 어떻게 반영할지의 문제가 먼저 해결되어야 한다. 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하므로 본 논문에서는 응력 기반 파단

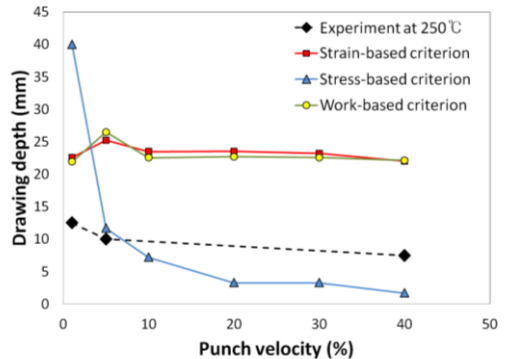


Fig. 6 Comparison of experimental fracture depth with FEM predictions based on three fracture criteria for isothermal deep drawing at 250°C

모델을 비등온 조건의 파단 예측에는 적용하지 못하였다.

4. 결론

변형률, 응력, 일을 기반으로 하는 세 가지의 파단 예측 모델을 마그네슘합금 AZ31 판재 온간 성형의 파단 예측에 적용하였다. 실제 등온 및 비등온 딥드로잉 시험에서의 파단 깊이와 파단 모델을 적용한 유한요소해석 결과를 비교하였다.

그 결과, 응력 기반의 파단 모델을 사용할 때 등온 조건의 딥드로잉 실험에서 관찰된 파단 깊이를 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

이전의 연구 결과에 따르면 일 기반 파단 모델이 비등온 조건 딥드로잉 실험에서 관찰된 파단

깊이를 잘 예측하였으나, 등은 조건에 대해 살펴본 본 논문 결과에 의하면 일 기반 파단 모델이 응력 기반 파단 모델에 비해 실험 값과의 차이가 더 크게 나타났다.

다만, 본 논문의 제한된 결과만으로 파단 모델 간의 우열을 결정하기는 어렵고, 향후 최적의 모델을 찾기 위한 추가 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] A. F. Graf, W. F. Hosford, 1993, Calculation of Forming Limit Diagrams for Changing Strain Paths, *Met. Trans. A.*, Vol. 24, No. 11, pp. 2497~2501.
- [2] H. J. Kleemola, M. T. Pelkkikangas, 1977, Effect of Predeformation and Strain Path on the Forming Limits of Steel, copper and brass, *Sheet Metal Indust.*, Vol. 63, No. 6, pp. 591~599.
- [3] T. B. Stoughton, 2000, A General Forming Limit Criterion for Sheet Metal Forming, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, No. 1, pp. 1~27.
- [4] T. B. Stoughton, X. Zhu, 2004, Review of Theoretical Models of the Strain-based FLD and their Relevance to the Stress-based FLD, *Int. J. Plasticity*, Vol. 20, No. 8-9, pp. 1463~1486.
- [5] W. J. Kim, H. K. Kim, W. Y. Kim, S. W. Han, 2008, Temperature and Strain Rate Effect Incorporated Failure Criteria for Sheet Forming of Magnesium Alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 488, No. 1-2, pp. 468~474.
- [6] H. K. Kim, W. J. Kim, 2010, Failure Prediction of Magnesium Alloy Sheets Deforming at Warm Temperatures using the Zener-Holloman Parameter, *Mech. Mater.*, Vol. 42, No. 3, pp. 293~303.
- [7] H. K. Kim, J. D. Kim, Y. M. Heo, 2009, Warm Formability Variation of AZ31 Sheet by Double Stage Forming Velocity, *Trans. Mater. Proc.*, Vol. 18, No. 2, pp. 112~115.