

# 회전 인크리멘탈 성형을 이용한 마그네슘 합금 판재의 성형한계 연구

박진기<sup>1</sup>, 배문기<sup>1</sup>, 유봉선<sup>2</sup>, 김영석<sup>#</sup>

## A Study of forming limit on rotational incremental forming of magnesium alloy sheet

J. K. Park, M. K. Bae, Y. S. Kim

(September 5, 2008)

### Abstract

Being a lightweight material, magnesium is increasingly employed in automotive parts. However, because of its hexagonal closed-packed (HCP) crystal structure, in which only the basal plane can move, the magnesium alloy sheets show low ductility and formability at room temperature. Thus the press forming of magnesium alloy sheets has been performed at elevated temperature within range of 200°C ~ 250°C. However, we confirmed that using rotational incremental forming magnesium alloy sheets were formed without any heating at previous study. In this study, at the forming of square cup using rotational incremental sheet forming, the strain distributions were obtained and it was compared with forming limit curve at neck (FLCN). Also, forming limit curves at fracture (FLCF) of magnesium alloy sheets were obtained at elevated temperature and it was compared with the strain distribution of square cup of magnesium alloy sheet. In this study, we confirmed that conventional forming limit curves can not predict rotational incremental forming.

**Key Words** : Incremental forming, Forming limit, Magnesium, Warm forming

### 1. 서론

최근 환경오염의 심각성이 대두되고 유가가 상승함에 따라 수송기기의 경량화를 통하여 환경오염의 가속화를 막고 유류비를 절감하기 위한 노력들이 증대되고 있다. 마그네슘은 밀도가 약 1.7g/cm<sup>3</sup> 정도로 알루미늄(밀도:2.7g/cm<sup>3</sup>)의 2/3 정도이며 공업적으로 사용되고 있는 구조용 금속중 가장 가벼운 재료로서 자동차의 적용량이 확대되고 있는 소재이다. 마그네슘의 결정구조는 조밀육방 구조(Hexagonal Close Packed lattice structure; HCP)로 체심입방 격자구조(Body-Centered Cubic

lattice structure; BCC)나 면심입방구조 (Face-Centered Cubic Lattice structure; FCC)를 갖는 금속재료에 비하여 소성슬립시스템이 적기 때문에 일반적으로 상온에서의 소성가공성이 현저히 떨어진다 [1~4]. 이 때문에 현재 마그네슘 합금의 성형은 주로 다이캐스팅으로 이루어지고 있으나 마그네슘 합금 판재의 대량 생산이 가능하게 되면서 환경문제, 제품의 성형 가능성, 품질 및 환경 친화적 측면에서 우수한 마그네슘 합금 판재 성형 기술에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.

박[5]등은 마그네슘 합금 판재의 항복 곡면을 도출함으로써 성형성 평가의 기초데이터를 확보

1. 경북대학교 공과대학 대학원

2. 한국기계연구원부설 기계연구소

# 교신저자: 경북대학교 기계공학부, E-mail: caekim@knu.ac.kr

하였고, 원[6]등은 상온에서부터 200°C의 온도 범위에서 단축 인장 실험을 행하여 성형가능 온도인 200°C부근에서는 등방성이 나타나고 가공경화 특성이 거의 나타나지 않는다는 것을 밝혔다.

또한 마그네슘 합금 판재를 이용한 고온 딥 드로잉(Deep drawing)에서 국부 냉각의 영향[7], 편치 반경의 영향[8], 금형 코팅의 영향[9], 블랭크 홀딩력의 영향[10] 등 딥 드로잉 프레스 성형성을 높이기 위한 성형 인자들에 관한 연구들이 수행되었다. 하지만 이상의 연구들은 판재 프레스 성형 기술에 관한 연구들이다. 원[6]과 추[9]등은 마그네슘 합금판재가 상온에서 성형성이 열악함을 인식하고 마그네슘 합금판재의 고온 성형성 확보를 위해 연구하였다. 결국 마그네슘 합금의 성형성을 확보하기 위해서는 250°C 근방까지 온도를 상승시켜야 하며 과대한 에너지 소모가 불가피하다.

이런 에너지 소모성 가공기술을 대체하려는 노력으로 박[11] 등은 종래의 Iseki[12,13]가 제안한 고정 공구에 의한 인크리멘탈 판재 성형(Incremental sheet forming(ISF) 또는 점진성형) 기술을 개선하여 인크리멘탈 성형용 공구에 회전을 추가하는 방법(회전-인크리멘탈 판재성형 공정; rotational-incremental sheet forming(RISF)이라고 부름)을 조사하였다. 종래의 고정 공구에 의한 인크리멘탈 성형은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 CNC 머신에 장착된 원형 툴이 전진하면서 재료를 점진적으로 성형하는 신개념 방식으로, 프레스 성형에서 필요한 상·하 금형이 없어도 되는 장점을 갖기 때문에 자동차 및 항공기 부품의 시제품개발, 맞춤형 의료기기 등 다품종 소량생산 제품의 제조에 널리 이용되고 있으며 종래의 제조방법으로 가공이 어려운 알루미늄 판재, Ti 판재 등 다양한 재료에 활용하기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다[14~20]. 또한 인크리멘탈 성형기술은 소성 변형중의 판재 내부의 보이드 발생, 성장, 합체의 일련의 과정을 통한 연성파괴 기구의 Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) 모델에서의 재료상수를 결정하는데 이용하기도 한다[21,22]. 인크리멘탈 성형방식을 이용하면 통상 알루미늄이나 강판의 경우에는 프레스 성형공정과 비교하여 성형 한계가 높아진다는 것이 알려져 있으나 상온 성형이 불가능하다고 알려진 마그네슘 합금판재에 대해서는 연구된 바가 없다. 김[23]등은 마그네슘 합금 판재의 온간 점진 성형에 대해 연구 하였으나 온도 상승에 따른 성형성향상은 관찰된 반면 점진

성형으로 인한 성형 한계 개선은 관찰되지 않았다. 또한, 본 연구와 달리 재료를 승온시키기 위한 별도의 장치가 필요하다.

회전공구에 의한 인크리멘탈 성형 방법을 이용하면 공구가 회전하면서 공구와 재료 사이의 회전 마찰과 공구의 가압에 의해 국부적으로 소성 변형된 영역에서 심한 회전전단소성변형에 의한 소성열과 마찰열이 자연적으로 발생한다. Iseki [12,13]와 박[24]등의 연구에 의하면 일반적으로 널리 사용되는 Hecker의 편치 장출실험에 의해 구한 성형한계도(Forming Limit Curve at Necking, FLCN)는 인크리멘탈 성형에서의 성형한계를 예측하는데 어려움이 있는 것으로 보고 되고 있고, 연성파괴에 의한 성형한계도(Forming Limit Curve at Fracture, FLCF)가 인크리멘탈 성형에서의 성형한계를 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 회전공구에 의한 인크리멘탈 성형기술을 마그네슘 합금 판재의 사각 킵 가공에 적용하였으며, 연성파괴를 이용하여 마그네슘 합금 판재의 성형한계에 대해 조사하였다.

## 2. 실험방법 및 결과

### 2.1 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성

본 실험에 사용된 마그네슘 합금 판재 AZ31B는 변형 경화되고 부분적으로 열처리된 재료로써 (H24), 두께는 1.0mm이고 화학 조성은 Table 1과 같다. 상온, 100, 150, 200, 250°C의 여러 온도에서 크로스헤드의 속도가 2mm/min 되도록 하여 인장 실험을 수행하여 Fig. 2에 나타내었다. 온도가 증가 할수록 대체적으로 항복응력은 감소하며, 연신율은 증가하는 경향을 보인다.

Table 1 Chemical composition of tested material (mass %)

	Al	Zn	Mn	Ni	Fe	Cu	others	Mg
Mass (%)	3.1	0.88	0.35	<0.001	0.002	<0.0008	<0.01	Bal

### 2.2 연성파괴를 이용한 마그네슘 합금 판재의 성형한계

본 연구에서는 Clift[25]등이 소성일의 합의 원리에 근거를 두고 제안한 아래의 식을 이용하였다. 여기서 C는 재료상수로써 재료가 파단 될 때까지의 소성일이다.

$$\int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon = C \quad (1)$$

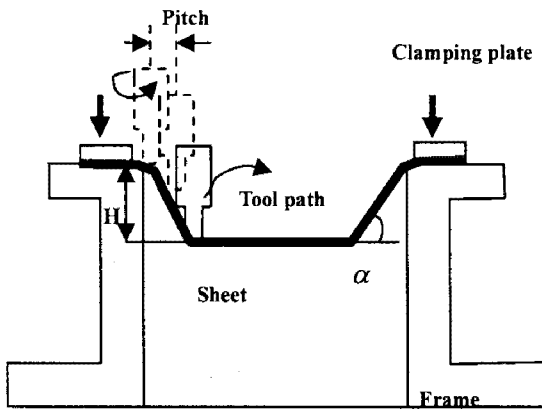


Fig. 1 The schematic of incremental forming

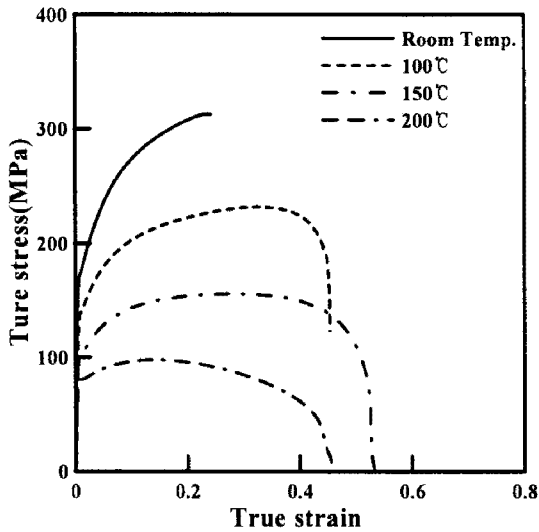


Fig. 2 flow stresses of magnesium alloy sheets at elevated temperature

Table 2에는 온도별 단축 인장실험으로부터 얻는 기계적 물성을 나타내었다. 또한 각각의 응력-변형률 선도는 아래의 식으로 근사화 하였다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (2)$$

$$\sigma_b = K(2\epsilon_b)^n \quad (3)$$

$$\sigma_{ps} = (2/\sqrt{3})K(2/\sqrt{3}\epsilon_{ps})^n \quad (4)$$

여기서  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $K$  그리고  $n$ 은 각각 상당응력, 상당 변형률, 소성강도계수, 가공경화지수이다.

등 2축 인장의 경우에는  $\sigma = \sigma_b$ ,  $\epsilon = 2\epsilon_b$  인

관계에 있으므로 등 2축 인장에서의 식(2)는 아래의 식 (3)과 같이 되며, 평면 변형의 경우에는  $\sigma = (\sqrt{3}/2)\sigma_{ps}$ ,  $\epsilon = (2\sqrt{3})\epsilon_{ps}$  인 관계에 있으므로 평면변형에서 응력-변형률 관계는 식 (4)가 된다.

Table 2 Mechanical properties of magnesium alloy sheets at elevated temperature

Temp. (°C)	Tensile strength (MPa)	Total elongation (%)	Strength coefficient, K (MPa)	Strain hardening exponent, n	Plastic work, C(W/mm <sup>2</sup> )
Room Temp.	186	0.25	433	0.207	66
100	125	0.44	295	0.181	95
150	93	0.51	198	0.161	74
200	85	0.45	140	0.160	37

Table 2에 나타나있는 소성일을 기준으로 하여 2축 인장과 평면변형 모드에서도 동일한 소성일에서 파단이 발생한다는 가정으로 연성파괴에 근거한 성형 한계도를 Fig. 3에 나타내었다.

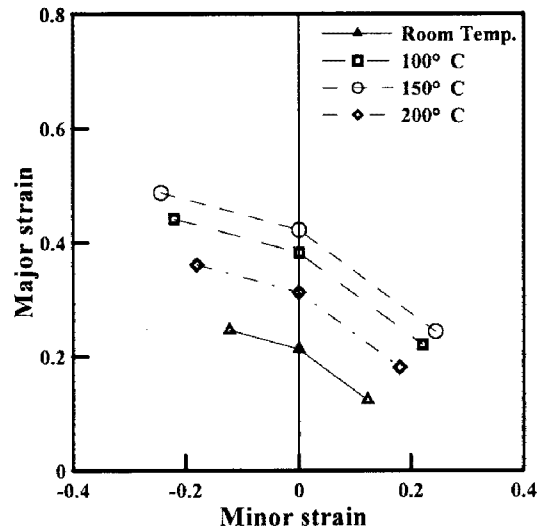


Fig. 3 Forming limit curve at fracture for elevated temperature

### 2.3 벽면각도에 따른 성형성

실험장치는 이전연구[26]에서 사용한 장비와 동일하며, 시편은 가로, 세로 150mm이며 두께는 1mm이다. 실험모델은 가로, 세로 80mm의 높이 25mm로 높이에 따라 단면이 줄어드는 사각 컵형상이다. 1회 성형 깊이는 0.4mm로 동일하게 유지하였으며 사각 컵의 벽면각도만 45°, 60°, 70°로 다르게 설정하였다. 공구는 반경 6mm의 반구형이

며, 이동속도는 400mm/min로 하나의 사각 컵을 성형하는데 약 20분이 소요되었다. 공구의 회전속도(자전속도)는 4000rpm으로 수회 성형한 후 측정된 공구의 온도가 80°C가 되면 3000rpm으로 감소시켰다. 이는 4000rpm으로 수회 반복하면 국부적으로 공구와 시편과의 접촉 면적에서 온도가 급격히 증가하여 80°C 이상이 되면서, 공구가 재료를 절삭하는 현상이 발생하기 때문에 공구의 회전속도를 감소시켜 급격한 온도상승을 방지하여 성형성을 높이기 위함이다.

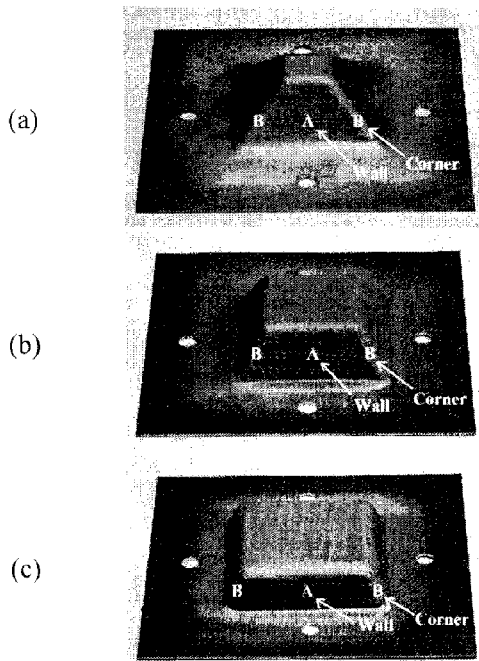


Fig. 4 Experimental results : (a) 45° wall angle, (b) 60° wall angle, (c) 70° wall angle at which the crack were occurred

Fig. 4에 회전 인크리멘탈을 이용하여 성형한 사각 컵을 나타내었다. Table 3에 벽면각도에 따른 공구와 시편의 최고온도를 나타내었다. 측정된 공구와 시편의 온도는 마그네슘의 경우 성형성이 향상되는 250°C까지 도달 하지 않았지만 이전의 연구[26]에 따르면 공구가 재료를 지나가는 순간 국부적으로는 동적 재결정 온도 이상으로 상승하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서도 동일한 현상을 관찰하였다. 성형이 끝난 후 Fig. 4에 나타난 각각의 벽면부(A)와 모서리부(B)에서 변형률을 측정 한 결과 Fig. 5와 같이 벽면부는 평면변형 모드로 변형이 진행되었고 모서리부는 2축 인장 모드로 변형이 진행 되었다.

Table 3 Maximum temperature of tool and specimen for each square cup

Wall angle (°)	Temp. of tool (°C)	Temp. of specimen (°C)
45	105	60
60	125	80
70	150	80

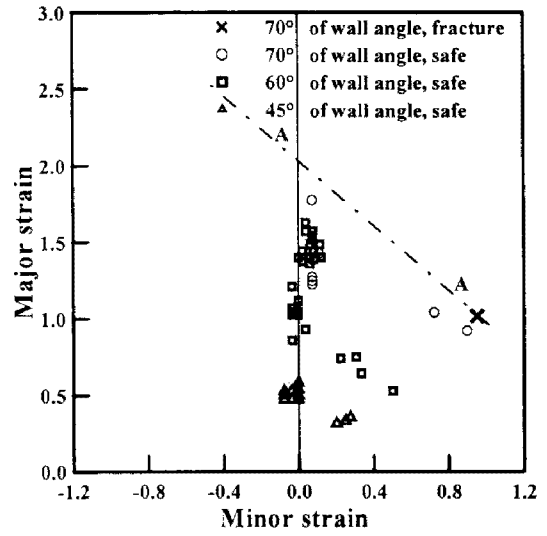


Fig. 5 Forming limit curve at fracture for incremental forming

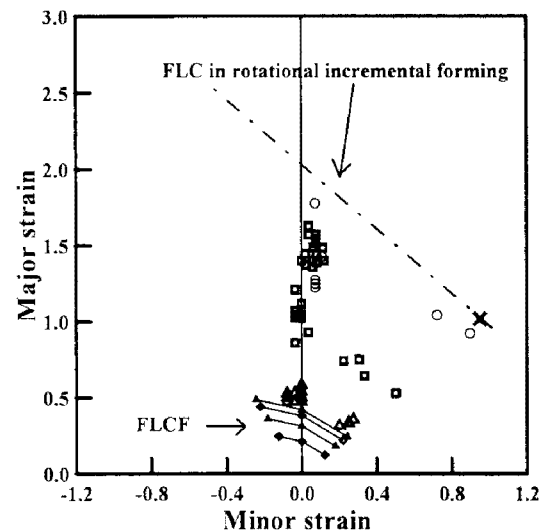


Fig. 6 The comparison of FLCF and FLC in rotational incremental forming

벽면각이 45°와 60°인 시편에서는 파단이 발생하지 않았지만 벽면각이 70°인 시편에서는 모서리부에서 파단이 발생하였으며 이때 주 변형률과

부 변형률은 각각 1.2, 1 이었다. 또한, 벽면부에서는 주변형률이 거의 2에 가깝게 변형을 하였으나 파단은 발생하지 않았다. 이는 마그네슘 합금판재의 성형한계가 1정도로 보고되고 있는 문헌들과 비교하면 2배 이상의 성형성 증가를 보이고 있다. Fig. 5에서 보듯이 벽면각이 증가할수록 변형률이 비례적으로 증가하다 벽면각이 70°일 때 파단이 발생하였으며 Fig. 5의 선분 (A)가 회전 인크리멘탈 성형의 성형한계인 것으로 판단된다.

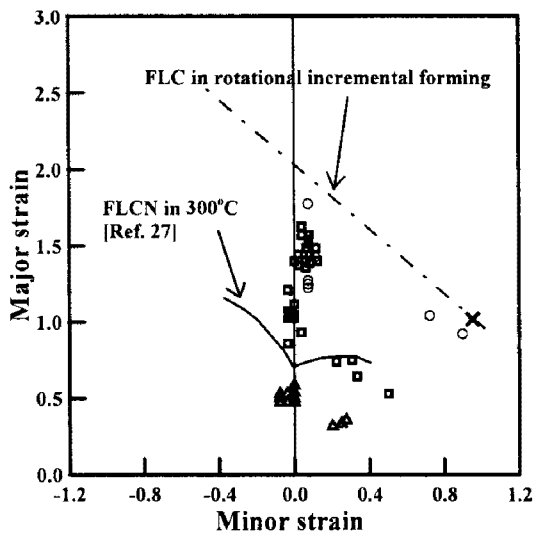


Fig. 7 The comparison of FLCN and FLC in rotational incremental forming

### 3. 고 찰

본 연구에서는 재료의 연성파괴이론을 이용하여 회전 인크리멘탈 성형에서 성형한계를 예측하고자 하였다. Fig. 6을 보면 회전 인크리멘탈 성형도 변형모드는 연성파괴와 비슷한 경향을 보이고 있으나 연성파괴 모델이 회전 인크리멘탈 성형에서의 성형한계를 과소 평가하고 있다. 또한, 김 [27]등이 연구한 결과와 비교하여 나타낸 Fig. 7을 보면 FLCN도 회전 인크리멘탈의 성형 한계를 과소평가 하고 있는 것으로 나타났다. 회전 인크리멘탈의 성형한계가 기존의 방법으로 예측한 성형 한계보다 높게 평가된 것은 회전공구에 의해 국부적으로 변형이 진행되고 온도도 상승해 공구가 접촉하지 않는 부분은 변형에 거의 참여하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이것은 밀가루 반죽을 당겨서 늘일 때와 부분부분 늘려서 늘일 때 후자가 훨씬 더 넓게 늘일 수 있는 원리로 설명

이 가능하다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 인크리멘탈 성형과 판재 프레스 성형의 성형한계 예측에 널리 사용되는 FLCF와 FLCN을 이용하여 마그네슘 합금판재의 회전 인크리멘탈 성형의 성형한계를 예측하고 회전 인크리멘탈 성형의 성형한계를 조사하였다. 본 연구에서 대상으로 한 마그네슘 합금 판재의 사각컵 형상의 회전 인크리멘탈 성형에서 얻은 실험 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 상온에서 성형이 거의 불가능한 마그네슘 합금판재에 회전 인크리멘탈 성형을 적용하여 가로세로 80mm, 높이 25mm의 사각 컵을 성형하였다.

(2) 기존의 성형법과 비교하여 회전 인크리멘탈 성형을 이용하면 성형성을 2배 이상 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 기존에 알려진 FLCN과 FLCF로는 회전 인크리멘탈의 성형한계를 예측하지 못함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 BK21 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 제위께 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] Y. S. Kim, 1992, Recent and Future Development of Stamping Technology for Aluminum Car Body Sheets, KSME, Vol. 14, No.1, pp. 3~12.
- [2] Y. S. Kim, C. Kim, S. Y. Lee, S. Y. Won and S. M. Hwang, 2003, Forming limits for anisotropic sheet metals, JSME. Int. J., Vol. 46A, No.4, pp.627~634.
- [3] D. Li and A. Ghosh, 2003, Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures, Mat. Sci. Eng. 352A, pp. 279~286.
- [4] H. G. Jeong, S. Choi, K. H. Na, 2005, Plastic forming technologies of magnesium alloys, Transactions of Materials Processing, Vol. 14, No. 8, pp. 661~667.
- [5] J. K. Park, Y. S. Kim, T. Kuwabara, B. S. You, 2005,

- Plastic deformation characteristic of AZ31 magnesium alloy sheet, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 6, pp. 520~526.
- [6] S. W. Won, S. G. Oh, K. Osakada, J. G. Park, Y. S. Kim, 2004, Evaluation of mechanical properties for AZ31 magnesium alloy(1), 2004 spring conference of KSTP, pp. 53~56.
- [7] S. Yoshihara and H. Nishimura, 2003, Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique circular cup deep drawing process, *J. Mater. Proc. Tech.* Vol.142, pp. 609~613.
- [8] S. Tagawa and N. Koga, 2003, Effect of tool radius of formability during deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheets, *J. Japan Inst. Light Metal*, Vol. 53, pp. 152~156.
- [9] N. Koga, 2001, Practical use of hard-carbon-coated tools in deep drawing of AZ31 magnesium alloy sheets, *J. Japan Inst. Light Metal*, Vol. 51, pp. 441~445.
- [10] D. K. Choo, S. Q. W. Oh, J. H. Lee, C. G. Kang, 2005, The drawability estimation in warm and hot forming of AZ31B magnesium sheet, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 14, No. 7, pp. 628~634.
- [11] J. K. Park, J. S. Lee, B. S. You, Y. S. Kim, 2006, Cup drawing of magnesium alloy sheet using incremental forming, 2006 fall conference of KSTP, pp. 259~262.
- [12] H. Iseki, K. Kato, and S. Sakamoto, 1992, Flexible and incremental sheet metal bulging using a path-controlled spherical corners, *Trans Japan Soc. Mech. Eng. Ser. C*, Vol. 58, No. 554, pp. 3147~3155.
- [13] H. Iseki and O. Kumon, 1994, Forming limit of incremental sheet metal stretch forming using spherical rollers, *Japan Soc. Tech. Plasticity*, Vol. 35, No. 406, pp. 1336~1341.
- [14] T.J. Kim and D.Y. Yang, 2000, Improvement of formability for the incremental sheet forming process, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 42, pp. 1271~1286.
- [15] H. Iseki, 2001, An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 111, pp. 150~154.
- [16] M.S. Shim and J.J. Park, 2001, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 113, pp. 654~658.
- [17] Y.H. Kim and J.J. Park, 2002, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 130~131, pp. 42~46.
- [18] E. Ceretti, C. Giardini, and A. Attanasio, 2004, Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 152, pp. 176~184.
- [19] M. Pohlak, R. Kuttner, and J. Majak, 2005, Modelling and optimal design of sheet metal RP&M process, *Rapid Prod. J.*, Vol. 11, pp. 304~311.
- [20] G. Hussain, L. Gao, and Z.Y.Zhang, 2008, Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, (in press).
- [21] C. Chu, A. Needleman, 1980, Void nucleation effects in biaxially stretched sheets, *J. Eng. Mater. Tech.* Vol. 102, pp. 249~256.
- [22] W. Lievers, A. Pilkey, D. Lloyd, 2004, Using incremental forming to calibrate a void nucleation model for automotive aluminum sheet alloys, *Acta Materialia*, Vol. 52, pp. 3001~3007.
- [23] S. W. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, and J. H. Lee, 2008, A study on warm incremental forming of AZ31 alloy sheet, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 17, No. 5, pp. 373~379.
- [24] J. J. Park and Y. H. Kim, 2003, Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique, *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 140, pp. 447~453
- [25] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess, and G. W. Rowe, 1990, Fracture prediction in plastic deformation processes, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 32, pp. 1~17
- [26] J. G. Park, B. S. You, Y. S. Kim, 2008, A parametric study in incremental forming of magnesium alloy sheet, *Transactions of Materials Processing*, (in press).
- [27] H. Y. Kim, S. C. Choi, H. S. Lee, H. J. Kim, and K. T. Lee, 2007, Experiments for forming limit diagram and springback characteristics of AZ31B magnesium alloy sheet at elevated temperature, *Transactions of Materials Processing*, Vol. 16, No. 5, pp. 364~369.