

인크리멘탈 성형을 이용한 마그네슘 합금 판재의 성형변수에 관한 연구

박진기¹ · 유봉선² · 김영석[#]

A parametric Study in Incremental Forming of Magnesium Alloy Sheet

J. G. Park, B. S. You, Y. S. Kim

(Received July 14, 2008)

Abstract

Using lightweight materials in vehicle manufacturing in order to reduce energy consumption is one of the most effective approach to decrease pollutant emissions. As 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. Here we try the possibility of sheet metal forming at room temperature by adopting incremental forming technique with rotating tool, which is so called as rotational-incremental sheet forming (RISF). In this rotational-incremental sheet forming the spindle tool rotates on the surface of the sheet metal and moves incrementally with small pitch to fit the sheet metal on the desired shape. There are various variables defining the formability of sheet metals in the incremental forming such as speed of spindle, pitch size, lubricants, etc. In this study, we clarified the effects of spindle speed and pitch size upon formability of magnesium alloy sheets at room temperature. In case of 0.2, 0.3 and 0.4mm of pitch size with hemispherical rotating tool of 6.0mm radius, the maximum temperature at contact area between rotating tool and sheet metal were 119.2°C, 130.8°C, and 177.3°C. Also in case of 300, 500, and 700rpm of spindle speed, the maximum temperature at the contact area were 109.7°C, 130.8°C and 189.8°C.

Key Words: Incremental Forming, Warm Forming, Magnesium, Light Material

1. 서 론

최근 환경오염의 심각성이 대두되고 유가가 상승함에 따라 수송기기의 경량화를 통하여 환경오염의 가속화를 막고 유류비를 절감하기 위한 노력들이 증대되고 있다. 마그네슘은 밀도가 약 1.7g/cm³ 정도로 알루미늄(밀도: 2.7g/cm³)의

2/3 정도이며 공업적으로 사용되고 있는 구조용 금속 중 가장 가벼운 재료로서 자동차의 적용량이 확대되고 있는 소재이다. 마그네슘의 결정구조는 조밀육방 격자구조(Hexagonal Close Packed lattice structure; HCP)로 체심입방 격자구조(Body-Centered Cubic lattice structure; BCC)나 면심입방 구조 (Face-Centered Cubic Lattice structure; FCC)를

1. 경북대학교 대학원

2. 한국기계연구원부설 재료연구소

교신저자: 경북대학교 기계공학부,

E-mail: caekim@knu.ac.kr

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 확보하였고, 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(Depth drawing)에서 극부 냉각의 영향[7], 편지 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 모두 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 불가피하게 된다.

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 부가하는 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 원형틀이 전진하면서 재료를 점진적으로 성형하는 신개념 방식으로 프레스 성형에서 필요한 금형이 없어도 되는 장점을 갖기 때문에 최근 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 소성변형중의 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 합금 판재에 대해서는 연구된 바가 없다.

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. 본 연구에서는 회전공구에 의한 인크리멘탈 성형기술을 마그네슘 합금 판재의 원형 컵 가공에 적용하여 공구의 회전속도와 피치의 크기 변화가 마그네슘 합금 판재의 성형특성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한 가공 중에 발생한 열을 이론적으로 도출한 값과 비교함으로써 마그네슘 판재 성형에서 인크리멘탈 성형기술의 활용 가능성을 뒷받침 하고자 하였다.

2. 실험방법 및 결과

2.1 공구의 회전 속도에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성

본 실험에 사용된 마그네슘 합금 판재 AZ31B는 변형 경화되고 부분적으로 열처리된 재료로서(H24), 두께는 0.8mm이고 지름 10mm의 원형시편으로 화학 조성은 Table 1과 같다.

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

성형에 사용된 공구의 반경은 6mm이며, 공구의 회전속도를 300, 500, 700rpm의 3가지 조건으로 하여 가공 공정을 G-Code로 작성해 공구의 가공 경로와 간섭여부를 확인한 후, 피치의 크기를 0.3mm로 일정하게 제어하면서 성형 깊이를 최대 10.2mm까지 성형 실험하였다. 또한 공구의 이동속도는 100mm/min으로 하였고, 성형이 진행되는 동안 공구가 지나간 뒤편에서 적외선 온도 측정

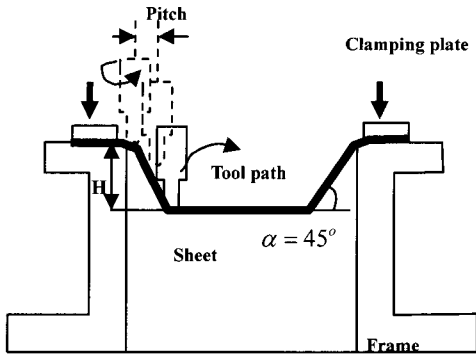


Fig. 1 The schematic of incremental forming



Fig. 2 CNC machine used for incremental forming

기(모델명: 68 IR Thermometer-FLUKE)를 이용하여 시편 표면의 온도를 측정하였다.

인크리멘탈 성형에는 Fig. 2 에 나타난 것과 같이 CNC머신(모델명: CNC-MM 250S3)을 사용하였다. 인크리멘탈 성형은 통상의 프레스 가공에서와 같이 상하 대응하는 금형이 필요 없는 성형방법이지만 블랭크를 장출 모드에서 성형하기 때문에 블랭크 시편을 고정시키기 위한 고정 판이 필요하다. 본 연구에서는 케미칼 우드(Chemical wood)를 사용하여 시편의 고정 판을 만들고 나사 체결로 블랭크를 고정시켰다.

공구의 회전 속도에 의한 성형성을 변수로 하여 실험을 하게 된 이유는 공구의 회전 속도가 빠를수록 공구와 판재 사이의 마찰 빈도가 높아져 소성 가공열과 마찰열이 많이 발생되어 가공성을 높여 줄 것이 기대되었기 때문이다. 공구와 판재가 접하고 있는 부위에서 적외선 온도 측정

Table 2 Temperature of tested sheet at each rpm with pitch size of 0.3mm

rpm	300	500	700
Temperature(°C)	109.7	130.8	189.8

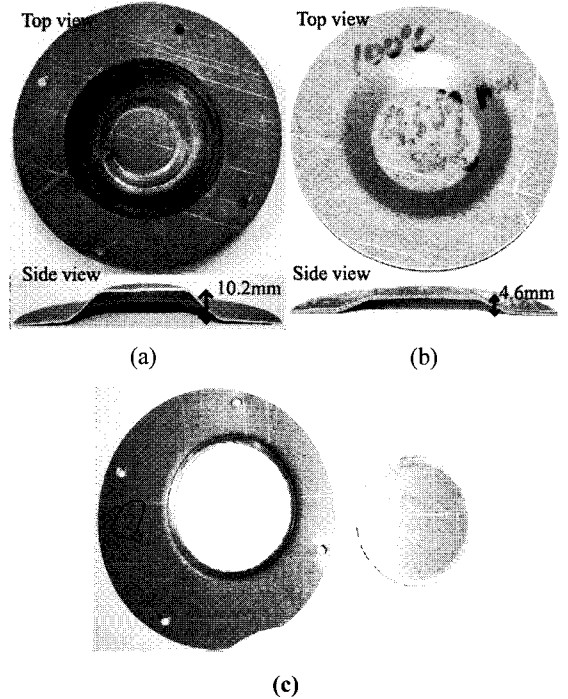


Fig. 3 (a) Incremental formed shape with rotation tool at room temperature for 0.3mm pitch, 500rpm, the forming depth is 10.2mm (b) press formed shape at 100°C, the forming depth is 4.6mm and (c) incremental formed shape with fixed tool (no rotation) at room temperature for 0.3mm pitch

기로 측정한 재료의 가공 온도를 측정하였으며 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 확인할 수 있는 것처럼 공구의 회전 속도가 높아질수록 동일한 가공 피치일지라도 공구와 재료간의 마찰이 증가하여 열이 많이 발생함을 알 수 있으며, 특히 700 rpm의 경우 원[6] 등이 연구했던 결과처럼 성형이 잘되는 등방성 성질을 나타내는 200°C 근방까지 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a)는 상온에서 깊이 10.2mm, 벽면각도 45°로 인크리멘탈 성형을 하여 얻은 시편의 정면과 측면의 형상이다. Fig. 3의 (b)는 비교를 위해 100°C에

서 프레스 성형된 제품의 정면과 측면의 형상이며 Fig. 3의 (c)는 공구의 회전이 없는 종래의 인크리멘탈 성형에 의해 성형된 제품의 형상이다. Fig. 3의 (b)와 같이 사진에서는 명확하게 확인이 힘들지만 100°C에서 프레스 성형한 시편은 성형 깊이가 약 5mm일 때 펀치 어깨부에서 파단이 발생하였다. 또한 Fig. 3의 (c)에서와 같이 공구의 회전이 없는 경우는 거의 성형이 되지 않고 시편이 파단 되는 것을 알 수 있다. 이에 반해 회전하는 공구에 의한 인크리멘탈 성형의 경우는 상온에서 성형함에도 불구하고 성형 깊이가 10mm가 넘도록 파단이 발생하지 않고 온전히 성형되는 것을 알 수 있다.

가공온도의 상승에 따른 성형성의 증가는 Fig. 4에 나타낸 마그네슘 판재의 온도별 인장 응력-변형률 곡선에서 알 수 있듯이, 성형온도가 200°C 근방까지 상승하면 상온에서의 값과 비교하여 재료의 항복응력은 약 65% 떨어지며, 재료의 최대 연신율은 47% 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 공구의 피치가 0.3mm일 때 공구의 회전속도 별 시편 단면의 두께 분포를 나타내었다. 구간 AB와 EF, CD와 같이 공구에 의해 성형되지 않은 부분의 두께 변화는 없으나 BC, DE와 같이 공구에 의해 가공된 부분에는 0.5mm까지 두께가 얇아진 것을 볼 수 있다. 특히 두께 감소가 가장 커서 파단 위험이 높은 위치가 컵 높이의 1/2 근방에 존재하는 것을 알 수 있는데 이는 프레스 가공에서 통상 펀치의 어깨부 근방에서 파단이 발생하는 것과 큰 차이를 보인다.

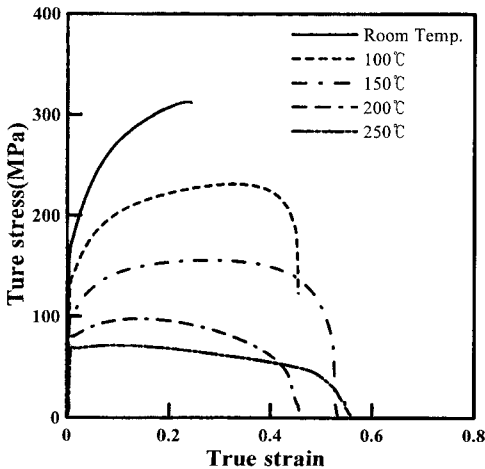


Fig. 4 True stress-true strain curves of magnesium alloy sheets at elevated temperature

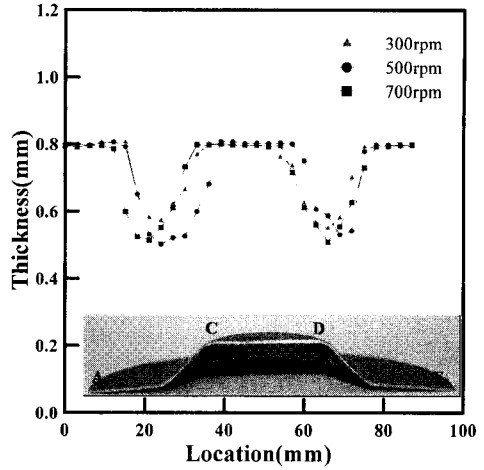


Fig. 5 Thickness distribution of blanks at spindle speed of 300, 500, 700rpm respectively with the pitch of 0.3mm

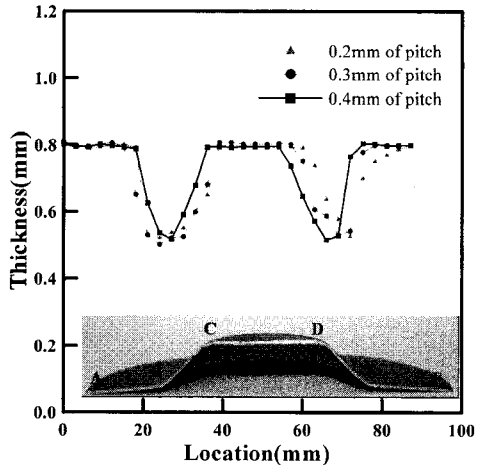


Fig. 6 Thickness distribution of blanks at pitch size of 0.2, 0.3, 0.4mm respectively with the spindle speed of 500rpm

2.2 피치의 크기에 따른 마그네슘 합금 판재의 성형성

공구의 회전속도를 500rpm로 고정하고 피치를 0.2, 0.3, 0.4mm의 3가지 조건으로 변경하면서 피치 크기의 영향을 조사하였으며, 가공 온도를 측정하였다. 피치의 크기에 따른 성형성 측정을 하는 목적은 피치가 작을수록 가공시간은 길어지지만, 공구와의 빈번한 마찰로 인해 가공 온도가 상승하여 성형성이 증가하므로, 재료의 가공성 측면에서

최적화된 피치의 크기를 얻고자 함에 있다. 피치의 크기에 따른 가공 온도를 Table 3에 나타내었다.

본 실험에서는 공구와 재료간의 접촉 면적이 큰 0.4mm에서의 가공 온도가 177.3°C로 가장 높았고, 0.2, 0.3mm에서 상대적으로 낮은 가공 온도를 보였다. 즉, 피치의 크기가 클수록 마그네슘 합금 판재의 등방성이 나타나는 200°C 근방까지 온도가 상승하고 있음을 알 수 있다. 피치가 작으면 상대적으로 피치가 긴 것에 비해 공구와 시편과의 접촉 빈도가 증가하여 시편의 온도가 상승할 것이라고 예상하였지만, 피치가 큰 쪽이 상대적으로 더 많은 온도 상승을 보였다. 이는 공구와 시편간의 접촉 빈도는 상대적으로 긴 시간 동안 일어나는 현상이나, 접촉 면적은 매 순간 발생하는 현상 이기 때문에 시간당 발생 열량은 식 (2)에서와 같이 피치가 크게, 즉 접촉면적이 큰 경우에 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 공구의 회전속도가 500rpm일 때 피치의 크기에 따른 재료의 두께 변화를 나타내었다. 공구에 의해 성형되지 않은 구간 AB, CD, EF에서는 두께의 변화가 없으나 공구에 의해 가공이 된 BC, DE구간에서는 0.52mm까지 두께가 얇아지고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Temperature of tested blanks at each pitch size with spindle speed of 500rpm

Spindle of pitch(mm)	0.2	0.3	0.4
Temperature(°C)	119.2	130.8	177.3

2.3 단면의 조직특성

미세조직의 변화를 알아보기 위해 성형 깊이가 10.2mm인 시편 단면의 조직을 촬영하여 비교하였다. Fig. 8의 (a)는 Fig. 7의 A부위이며, Fig. 8의 (b)와 (c)는 Fig. 7의 B부위이다. Fig. 8의 (a)와 같이 소성변형에 직접 참여하지 않은 부위의 평균 결정립 크기는 약 10~15µm로 H24한 처리한 AZ31소재의 초기 미세조직을 유지하고 있는 것으로 나타났다[23]. 즉, Fig. 7의 A부위는 공구와 접촉하지 않았으며, 공구의 회전 및 이동에 따라 발생하는 가공열이나 마찰열의 전달이 크지 않아 semi-aged 된 초기소재의 추가적인 재결정이나 결정립의 성장이 크지 않은 것으로 확인되었다. 실제 국부적으로 측정된 Fig. 7의 A부위의 최고 온도는 300rpm의 공구회전 속도에서는 109.7°C, 700rpm의 공구회전

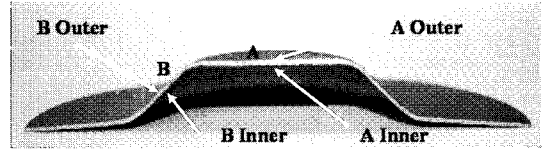


Fig. 7 location at which micro texture was taken

	0.3mm of Pitch, 300rpm (Max. temp. = 109.7°C)	0.3mm of pitch, 700rpm (Max temp. = 189.8°C)
(a)		
(b)		
(c)		

Fig. 8 Micro texture for each parameter

속도에서는 189.8°C로 재결정온도인 200°C[24] 보다 낮은 것으로 나타났다.

Fig. 7의 B부위에서 바깥표면부의 단면조직은 Fig. 8의 (b)와 같이 소성변형을 받은 조직으로 A부위와는 전혀 다른 것을 알 수 있다. 공구의 회전속도가 상대적으로 저속인 300rpm일때는 전단 변형에 의해 결정립이 연신된 형태가 나타나며 twin 및 전단밴드가 관찰되었다. 반면 공구의 회전속도가 증가하여 700rpm일 경우에는 변형조직이 사라지고 동적 재결정이 일어난 것으로 관찰

되었다. 이는 공구의 회전속도 증가에 의해 마찰 열의 발생량이 커지기 때문에 가공부위의 온도는 부분적으로 재결정온도 이상으로 상승하기 때문이다.

이와 같이 변형부위의 공구 회전속도에 따른 온도상승과 재결정 거동은 Fig. 8의 (c)와 같이 내부표면부 조직에서도 동일하다. 공구의 회전속도가 300rpm일 때, 공구와 직접적인 접촉을 하는 내부표면부에서부터 두께방향으로 약 60 μ m까지는 미세한 동적 재결정 조직이 관찰되나 표면에서 보다 멀어질수록 재결정은 일어나지 않고 단지 전단에 의한 결정립의 연신형태만 관찰되었다. T. Al-Samman 등의 연구에 따르면 변형률 속도에 따라 동적 재결정된 결정립의 크기가 다르게 관찰되었으며 변형률 속도가 증가할수록 결정립의 크기는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 200 $^{\circ}$ C, 10 $^{-2}$ s $^{-1}$ 의 변형률 속도조건에서 결정립의 크기는 1~2 μ m였다[24]. Fig. 8(c)에서 내부표면부 주위에서는 평균 결정립의 크기가 약 1~2 μ m이며 내부표면부에서 멀어질수록 결정립의 크기는 증가한다. 즉, 소재표면과 접촉하고 있는 공구의 회전에 의해서 깊이 방향으로 변형률 속도 구배가 생기는 것으로 판단된다.

2.4 가공열 발생의 이론적 접근

마그네슘 합금 관재의 상온 성형기술로서 인크리멘탈 성형기술의 적용 가능성을 이론적으로 뒷받침하기 위해 실험에서 측정된 온도 값을 인크리멘탈 성형공정에 대한 기하학적인 관계를 고려하여 재료와 공구의 마찰 에너지의 열변환 관계로부터 이론적으로 도출하여 상호 비교하였다. 여기서는 회전 속도가 500rpm이고, 피치의 크기가 0.3mm인 경우에 대해서 검토하였다. 재료의 변형저항으로는 마그네슘의 단축인장 커브에서 100 $^{\circ}$ C에서의 값을 취하였다. 소성가공에 의해 발생하는 열 에너지는 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$Q = cmdT = 0.9W \quad (1)$$

$$W = Fs = (\mu zA)vt \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\epsilon} \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

$$A = \pi \{R^2 - R(R - 0.3)\} \quad (4)$$

여기서 Q는 열 에너지(J), c는 마그네슘 재료의 비열(1,020 kJ/kg $^{\circ}$ C), m은 공구와 접하는 재료 부위의 질량(kg), dT는 온도변화를 나타낸다. 가공시 발생하는 열 에너지 Q는 접촉부위에서 마찰력이 한 일 W와 같다고 하면 인크리멘탈 가공 중의 재료의 온도상승을 알 수 있다.

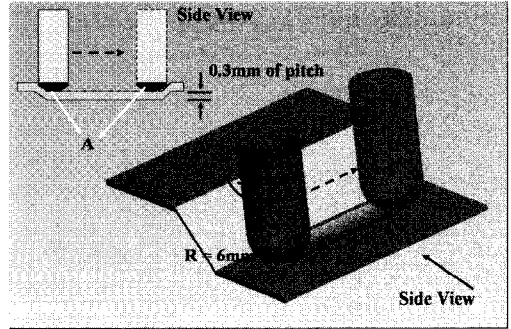


Fig. 9 Schematic view of plastic deforming

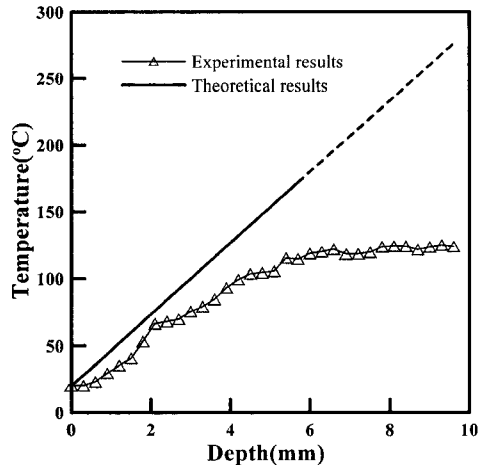


Fig.10 Comparison of contact area temperature between theoretical and experimental results in the case of 500rpm and 0.3mm pitch

식 (2)에 공구가 한 일 W를 나타내었다. 여기서 재료의 변형에너지에 대한 열 소산은 마찰열에 비해 적은 것으로 판단되어 무시하였다. μ 는 마찰계수(=0.3), τ 는 평균 전단 항복응력(N/mm 2), A는 공구와 재료가 접하는 면적(mm 2), v (= $r\omega$)는 접선속도(mm/s), r은 접촉부위의 반경(mm), ω 는 각속도(rad/s), t는 시간(s)을 나타낸다. 평균 전단 항복응력($\tau = \sigma_y / \sqrt{3}$)은 식 (3)으로부터 구한 평균 변형

저항 값($\sigma_y = 120MPa$)을, 표면적은 Fig. 9와 식 (4)로부터 구한 값($5.28mm^2$)으로 하여 각각의 값들을 식 (2)에 대입하면 공구가 한 일 W 를 구할 수 있다. 여기서는 발생하는 에너지 중에서 90%가 열 에너지로 변환된다고 가정하였다. 이상에서 구한 온도의 변화 값(이론값)을 실험 중 적외선 온도 측정기로 구한 값과 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 이론에서 구한 온도는 인크리멘탈 성형 깊이가 증가할수록 선형적으로 증가하고 있으나, 실험에서는 성형 깊이가 약 6mm 까지는 약 130°C 까지 거의 선형적으로 가공 온도가 상승하나 이후에는 이 온도에서 안정화되고 있음을 알 수 있다. 그러나 이론적으로 구한 온도변화는 대류 및 전도 열전달을 고려하지 않기 때문에 실험결과를 과대평가하고 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 공구를 회전시키는 인크리멘탈 성형 시 발생하는 열을 활용하여 상온에서 가공이 어렵다고 알려진 마그네슘 합금 판재에 대해 상온가공에 대한 연구를 수행하였다. 마그네슘 합금 판재의 성형성에 미치는 영향을 검토하기 위해 피치의 크기를 0.3mm으로 고정하고 공구의 회전속도를 300, 500, 700rpm으로 변화시켜 조사하였고, 또한 공구의 회전 속도를 500rpm으로 고정하고 피치의 크기를 0.2, 0.3, 0.4mm으로 변화시켰다. 본 연구에서 대상으로 한 마그네슘 합금 판재의 컵형 상제품의 회전-인크리멘탈 가공에서 얻어진 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 마그네슘 합금 판재는 상온에서 프레스 가공이 불가능하므로 통상 200°C~250°C 정도의 온도에서 가공이 이루어지나, 회전하는 공구를 갖는 인크리멘탈 성형 공정을 이용하면 성형공정 중에 발생하는 마찰 열로 인해 상온에서도 가공이 가능함을 확인하였다.

(2) 회전하는 공구를 갖는 인크리멘탈 성형 공정 중에 발생하는 열은 스펀들 공구의 회전수와 공구의 이동 피치 등에 따라 변하는 것으로 확인되었다.

(3) 성형 피치와 공구의 회전속도가 커질수록 가공 열 발생이 커져 변형부의 온도는 증가하였다. 즉, 0.2, 0.3, 0.4mm 의 각 피치별 인크리멘탈 성형시 가공부위의 시편의 최고 온도는 각각 119.2°C, 130.8°C, 177.3°C 로 나타났으며, 300, 500,

700rpm 의 공구의 회전속도별 가공부위의 시편의 최고 온도는 각각 109.7°C, 130.8°C, 189.8°C 로 나타났다.

(4) 공구의 회전속도가 다소 저속인 300rpm 일때는 전단에 의해 결정립 연신이 관찰되며, 700rpm 로 고속일 경우에는 변형조직은 사라지고 동적재결정이 발생한 것으로 관찰된다.

본 논문에서 언급한 것처럼 마찰열은 스펀들 속도나 피치에 의해서도 결정되지만 표면 거칠기, 접촉력, 공구경로 등에도 영향을 받는다. 향후 연구에서는 마찰 현상을 이해하고 제어하기 위한 다양한 변수에 대해서도 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원이 주관하는 21 세기 프론티어 연구개발사업과 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, S. M. Hwang, 2003, Forming limits for anisotropic sheet metals, JSME. Int. J., Vol. 46A, No.4, pp.627~634.
- [3] D. Li, 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, 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, N. Koga, 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, 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, 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, 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, D. Y. Yang, 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. Technol.*, Vol. 111, pp. 150~154.
- [16] M. S. Shim, J. J. Park, 2001, The formability of aluminum sheet in incremental forming, *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 113, pp. 654~658.
- [17] Y. H. Kim, J. J. Park, 2002, Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal, *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 130-131, pp. 42~46.
- [18] E. Ceretti, C. Giardini, A. Attanasio, 2004, Experimental and simulative results in sheet incremental forming on CNC machines, *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol. 152, pp. 176~184.
- [19] M. Pohlak, R. Kuttner, 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, Z. Y. Zhang, 2008, formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, (in press).
- [21] C. Chu, A. Needleman, 1980, Void nucleation effects in biaxially stretched sheets, *J. Eng. Mater. Technol.* 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] W. Xia, Z. Chen, D. Chen, S. Zhu, 2008, Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets produced by differential speed rolling, *J. Mater. Proc. Technol.*, (in press).
- [24] T. Al-Samman, G. Gottstein, 2008, Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium, *Mat. Sci. Eng. A* 490, pp. 411~420.