

마이크로 단조 시스템을 이용한 Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형성에 관한 연구

손선천¹·강성규²·박규열¹·나영상[#]·이종훈³

A Study on the Micro-Formability of Al 5083 Superplastic Alloy Using Micro-Forging System

S. C. Son, S. G. Kang, K. Y. Park, Y. S. Na, J. H. Lee

(Received April 4, 2005)

Abstract

Among the most of manufacturing process, plastic deformation method offers a significant advantage in productivity and enable mass production with controlled quality and low cost. From the point of view, micro forming is a well suited technology in manufacturing very small metallic parts, in particular for mass production, as they are required in many industrial products. Meanwhile, Al 5083 superplastic alloy with very small grains has a great advantage in achieving micro deformation under low stress due to its relatively low strength at a specific high temperature range. This paper describes the micro formability of Al 5083 superplastic alloy and its application to die forging of micro patterns. Micro formability tests of Al 5083 superplastic alloy were carried out with the specially designed micro forging system by using V-grooved micro dies and pyramidal dies made of (100) silicon. With these dies, micro forging was conducted by varying the applied load, material temperature and forging time. The micro formability of Al 5083 superplastic alloy was evaluated by comparing R_f value, where $R_f = A_f/A_v$ (A_f : cross-sectional area of the flowed metal, A_v : cross sectional area of V-groove). The micro formability of 3 dimensional patterns was also evaluated using pyramidal type micro dies.

Key Words : Micro-Forming, Micro-Forging, Superplastic Alloy, Al 5083 Alloy, Superplasticity

1. 서 론

다양한 엔지니어링 분야에서 각종 시스템 및 부품에 대한 소형화 요구가 증가함에 따라 마이크로 형상의 성형에 관한 관심이 증대되고 있다.

이러한 소형부품의 제조방법으로는 반도체 제조 기술을 기초로 한 MEMS 기술, 전통적인 가공 기술을 이용한 마이크로 절삭 및 연삭 기술, 레이저나 이온 및 전자 빔을 이용한 기술 등이 이용되고 있다. 하지만 이러한 기술들은 많은 설비 투자,

환경오염 방지를 위한 고비용 문제와 더불어 3차원 형상을 가지는 마이크로 부품의 성형이 어렵다는 등의 문제점을 가지고 있다.

이에 따라 저비용, 대량생산이 가능한 마이크로 소성가공 기술 개발에 대한 관심이 점차 증대되고 있다. 일례로, 최근에 생산되는 전자 부품 및 통신기기들은 개인 휴대를 간편하게 하기 위해 초소형화 되어가는 추세에 있으며, 경량화, 슬림화, 대용량화 및 고기능화의 요구로 인해 마이크로 소성가공 기술에 대한 관심 또한 높아 지게 되었다.

1. 울산대학교 기계공학과 대학원
2. 울산대학교 자동차선박기술대학원
3. 한국기계연구원 재료기술연구소
교신저자: 한국기계연구원 재료기술연구소

마이크로 소성가공이란 금속재료 특유의 소성 변형능 (Plastic deformability)을 이용하여 수 μm 에서 수 mm정도의 크기에 해당 하는 소형부품을 성형하는 기술로 정의된다[1].

마이크로 소성가공에 대한 연구는 최근에 일본, 독일 등지에서 활발하게 수행되고 있으며, 일련의 연구결과에 의하면 마이크로 소성가공을 성공적으로 수행하기 위해서는 적합한 재료의 선택이 중요하며, 그 중에서도 재료의 결정립 크기가 성형성에 지대한 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다[2~4]. 이와 같은 연구결과에 근거하면, 마이크로 소성가공의 경우에는 일반 금속재료에 비하여 결정립 크기가 작은 초소성 합금이나 비정질 합금 등에 적용이 보다 용이한 것으로 추정할 수 있다[5]. 그러나 부품의 소형화로 인한 치수효과 (Size effect) 때문에 통상적인 금속 성형 기술을 마이크로 성형 공정의 최적화 나 성형성 평가 등 공정 제어 분야에 직접 적용 할 수 없으며 주로 경험적인 실험을 통해 성형 공정에 대한 기초 연구가 이루어지고 있다.

한편, 초소성 합금(Superplastic alloy)은 특정한 온도에서 인장파괴가 일어나기까지 수백 % 이상의 연신율을 가지며, 이러한 변형특성은 재료 결정립의 크기, 변형속도 및 온도 등에 영향을 받는다. 그리고, 초소성 변형을 위해서는 대략 $10\mu\text{m}$ 전후의 미세한 결정립의 크기가 요구되는 것으로 알려져 있다[6].

따라서 본 연구에서는 대표적인 초소성 합금인 Al 5083 합금에 대해 성형 하중, 소재 온도, 성형 시간 및 부품 형상 등에 따른 마이크로 성형 성 평가를 실시하고, 이를 기초로 하여 3차원 형상의 마이크로 성형에 대한 소성가공의 적용 가능성을 조사하였다. 성형성 실험에는 자체적으로 설계, 제작한 마이크로 단조 시스템(Micro-forging system)을 이용하였다.

2. 실험장치 및 방법

Al 5083 초소성 합금의 성형성 실험을 위하여 Fig. 1과 같은 마이크로 단조시스템을 설계, 제작하였다. 본 시스템은 크게 펀치의 위치 및 속도 제어부, 펀치 및 다이부, 밴드히터 및 온도 제어부로 구성되어 있다. 펀치는 선형 액츄에이터 (Linear actuator)의 상하구동에 의해 위치를 제어하며, 성형하중은 0.78kgf~9.78kgf 범위에서 시하중

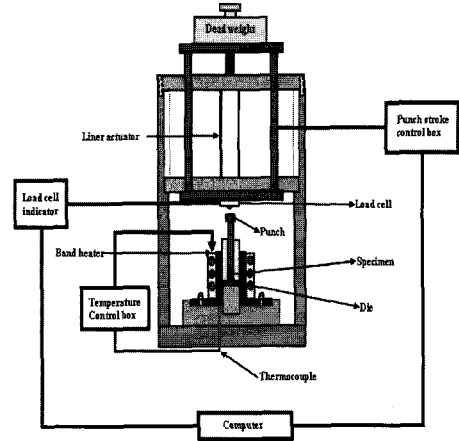
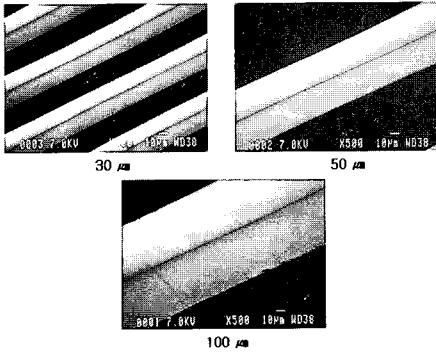


Fig. 1 Schematic illustration of micro forging system

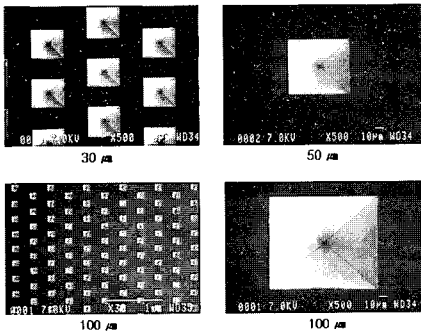
(Dead weight)으로 가할 수 있도록 하였다.

성형성을 평가하는 방법으로는 앞서 진술한 마이크로 단조장치와 평판상의 단결정 실리콘(100) 표면에 포토리소그래피(Photolithography) 및 이 방식 에칭기술을 적용하여 미세형상을 부여하는 방법으로 제작된 미세 금형(Micro die)를 사용하였다. Fig. 2(a)는 V홈 형상을 갖는 실리콘 미세 금형으로서 V홈 입구의 폭(W_d)은 각각 30, 50, $100\mu\text{m}$ 이다. 또한 밑변의 크기가 역시 30, 50, $100\mu\text{m}$ 인 피라미드 형상을 갖는 실리콘 미세 금형 (Fig. 2(b))도 제작하여 3차원 마이크로 형상 성형 연구에 활용하였다. 실험에 사용한 Al 5083 합금의 시편은 1mm 두께의 판재를 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$ 크기의 정방형으로 절단하여 사용 하였다.

성형성 실험에서는 V홈 형상의 미세 금형 위에 Al 5083 초소성 합금을 올려놓고 하중과 특정 온도 조건에서 마이크로 단조시험을 수행하였다. 성형온도는 Al 5083 합금의 초소성 특성을 고려하여 $430\sim 550^\circ\text{C}$ 범위에서 수행하였으며, 성형 하중의 경우에는 마이크로 단조장치의 자중을 고려하여 0.78~9.78kgf 범위에서 실험을 수행하였다. 성형시간은 5, 10, 15, 20분으로 변화시켜 실험을 하였으며, 성형성 평가를 위해서는 실험 후에 소재에 전사된 형상을 SEM으로 관찰하여 V-홈 금형의 형상 데이터와 비교하여 Fig. 3에 나타내는 방법으로 성형성 평가지수인 R_f 값을 계산하였다. 여기서 R_f 는 V-홈에 유입된 재료의 단면적 A_f 에 대한 V-홈 금형의 단면적 A_v 의 비($R_f=A_f/A_v$)를 나타내며, 각각의 실험에서 얻어진 R_f 값을 중



(a) V-grooved dies



(b) Pyramid shape dies

Fig. 2 (a) SEM views of V-grooved dies and (b) pyramid shape dies

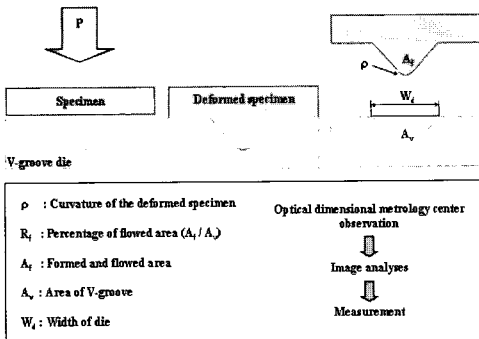


Fig. 3 Evaluation method of formability in micro forging experiment

합하여 Al 5083 합금의 성형성에 관하여 평가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형성 기초실험

일반적인 알루미늄 합금(Al 1050, Al 5020)과 Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형성 차이를 조사하기 위하여 100 μ m 폭의 미세 V홈 금형을 이용하여 성형 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 마이크로 성형은 하중 6.78kgf, 온도 520 $^{\circ}$ C에서 20분간 수행하였다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이, 일반적인 알루미늄 합금에 비하여 Al 5083 초소성 합금이 금형의 V홈 형상에 더 근접한 형상으로 성형이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 실험에 사용한 Al 1050과 Al 5020은 약 50 μ m 이상의 결정립 크기를 갖는 합금으로서, 100 μ m 폭의 V홈 금형에 소재가 유입되어 성형되기 위해서는 결정립 자체의 극심한 변형이 요구되며 따라서 상당히 큰 성형하중 및 성형시간이 필요하다. 하지만 본 실험에서 적용한 성형 하중 및 성형시간의 경우 결정립 변형을 일으킬 만큼 충분하지 않았기 때문에 Fig. 4(b)와 (c)에서와 같이 성형이 거의 이루어지지 않은 것을 알 수 있다.

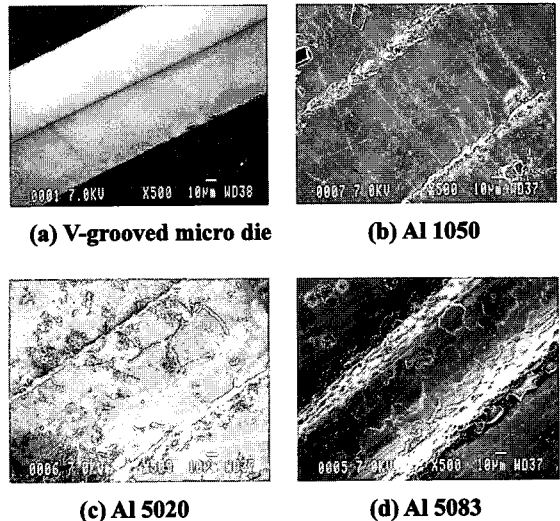


Fig. 4 (a) SEM views of V-grooved micro die, (b) deformed specimens of Al 1050, (c) Al 5020 and (d) Al 5083

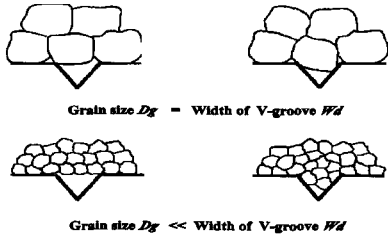


Fig. 5 Deformation models in micro forging of super-plastic alloy[7]

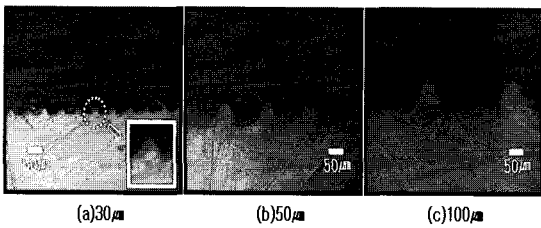
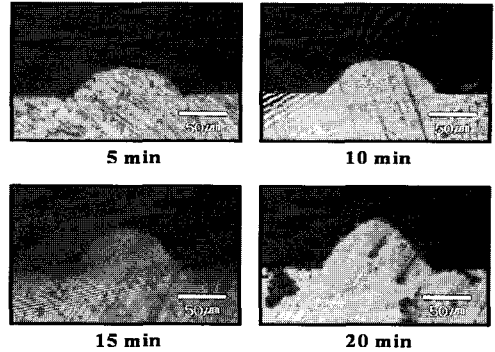


Fig. 6 Cross-sectional views of the deformed specimens using V-grooved dies (Temperature=530 °C, Load=9.78kgf, Time=20 min)

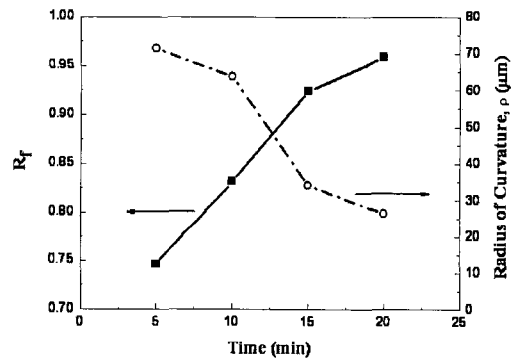
그러나 Al 5083 초소성 합금의 경우에는 미세 결정립(6~15 μm)을 갖는 소재로서 결정립 자체의 극심한 변형 없이 결정립계의 미끄러짐이나 결정립의 회전을 통해 비교적 낮은 응력 상태에서도 미세 부위로의 금속 충전이 이루어질 수 있으며 Fig. 4(d)에서 보는 바와 같이 상대적으로 우수 한 형상 전사가 이루어진 것으로 판단된다.

이는 소재의 결정립 크기에 따른 마이크로 성형성의 변화, 즉 마이크로 성형에서의 결정립의 치수 효과를 보여주는 결과로서, 일본 군마대학의 Saotome 등[7]은 미세 결정립 크기를 갖는 초소성 합금의 마이크로 성형성에 대한 기구를 제시한 바 있는데(Fig. 5참조), 본 연구의 결과도 이들 이 제시한 기구와 유사한 변형거동을 가지는 것으로 판단된다.

다음에는 초소성 합금의 성형한계를 조사하기 위하여 V홈 폭(W_d)이 각각 30, 50, 100 μm 인 미세 금형을 사용하여 성형온도 530 $^{\circ}\text{C}$, 성형하중 9.78 kgf의 조건 하에서 성형한 결과를 Fig. 6에 나타 내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 미세 패턴의 형상이 클수록 전사능이 우수하며, 이는 폭 100 μm 의 V홈 성형에 비해 상대적으로 V홈의 폭이 30 μm 인 경우 적은 수의 결정립으로 성형이 이루어 지기 때문이다. 즉, V홈의 치수가 커질수록 금형



(a) cross-sectional view



(b) micro formability with time

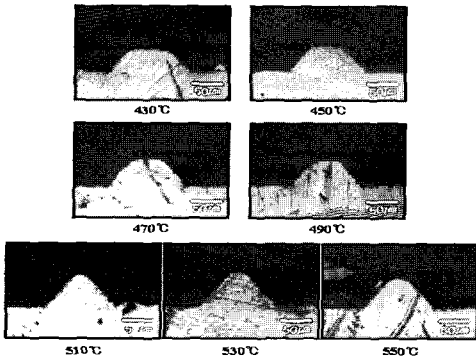
Fig. 7 Cross-sectional views of the deformed specimens using V-grooved die(a), and variations of micro formability with time(b) ($W_d=100\mu\text{m}$, Temperature =490 $^{\circ}\text{C}$, Load=9.78kgf)

의 폭에 대한 결정립 직경(D_g)의 비가 작아지고 결국 성형에 참여하는 결정립의 수가 많아짐으로써 우수한 형상 전사성이 얻어진다는 사실을 확 인할 수 있다.

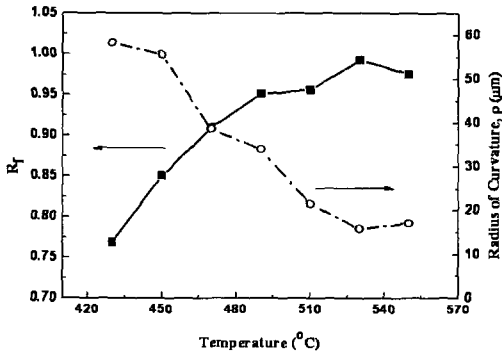
3.2 Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형 성 평가

3.2.1 성형시간 변화에 따른 마이크로 성형성

성형시간에 따른 Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형성의 차이를 조사하기 위하여 시하중 9.78kgf, 온도 490 $^{\circ}\text{C}$ 에서 V홈 폭(W_d)이 100 μm 인 금형을 사용하여 마이크로 성형 실험을 수행 하였다. Fig. 7(a)는 성형시간에 따른 시편의 단



(a) cross-sectional view



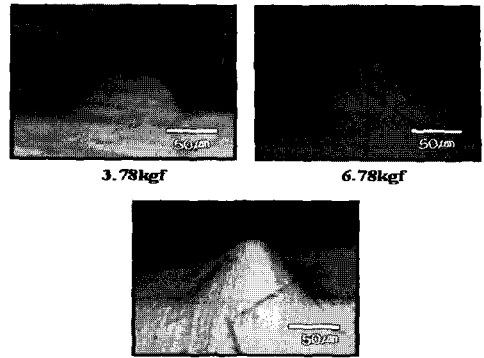
(b) micro formability with temperature

Fig. 8 Cross-sectional views of the deformed specimens using V-grooved die(a), and variations of micro formability with temperature(b) ($W_d=100\mu m$, Load=9.78 kgf, Time=20 min)

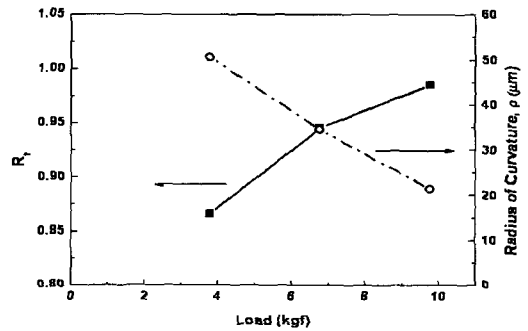
면형상이고, Fig. 7(b)는 성형시간에 따른 성형률 (R_f)과 선단곡률반경(ρ)의 변화를 나타낸 그래프이다. 성형시간이 증가할수록 R_f 값은 증가하고 선단곡률반경은 감소하는 경향을 보이는데, 이는 성형시간이 증가할수록 결정립계의 미끄러짐이나 결정립의 회전이 충분히 일어남으로써 결과적으로 미세 V홈에 초소성합금의 유입이 용이하여 R_f 값이 증가하는 것으로 판단된다.

3.2.2. 온도 변화에 따른 마이크로 성형성

Al 5083 초소성 합금의 미세 결정립이 유지되면서 마이크로 성형이 가능한 특정 온도구간을 확인하기 위하여 시하중 9.78kgf, 성형시간 20



(a) cross-sectional view



(b) micro formability with load

Fig. 9 Cross-sectional views of the deformed specimens using V-grooved die(a), and variations of micro formability with load(b) ($W_d=100\mu m$, Temperature=530 °C, Time=20 min)

분의 조건 하에서 소재의 온도를 변화시키면서 성형실험을 수행하였다. Fig. 8(a)는 온도 변화에 따른 성형 후 시편의 단면 사진이며, Fig. 8 (b)는 온도변화에 따른 R_f 값과 선단곡률반경의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 약 530°C 부근에서 가장 우수한 형상 전사특성을 보였으며, 대체적으로 Al 5083 합금의 초소성 특성이 가장 크게 발현되는 온도 구간인 490~550°C에서 높은 R_f 값을 보였다.

490°C이하의 구간에서는 초소성 특성의 발현이 미약하며 결정립계의 미끄러짐이 용이하지 않아 낮은 R_f 값을 나타냈으며, 550°C 이상에서는 과도한 결정립 성장으로 V홈 폭에 대한 결정립

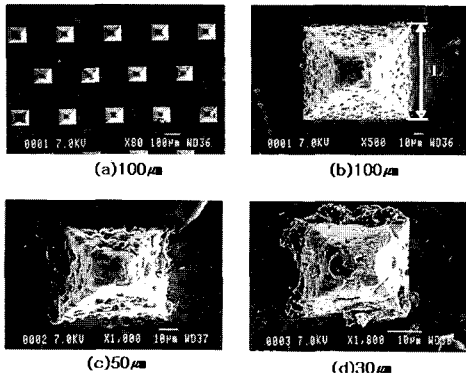


Fig.10 SEM views of the deformed specimens with pyramidal dies(a), L=100 μ m(b), L=50 μ m(c), L=30 μ m(d) (Temperature=530 $^{\circ}$ C, Load=9.78kgf, Time=20 min)

크기의 비가 증가함으로써 낮은 R_f 값과 큰 선단곡률 반경이 나타난 것으로 판단된다.

3.2.3 성형하중 변화에 따른 마이크로 성형성

성형온도 530 $^{\circ}$ C, 성형시간 20분에서 V홈 폭이 각각 30, 50, 100 μ m인 금형을 이용하여 성형하중 변화에 따른 단조실험을 수행하여 그 결과를 Fig. 9에 나타낸다. Fig. 9(a)는 100 μ m의 V홈 금형을 사용하여 성형한 시편의 단면사진이며, Fig. 9(b)는 성형하중에 따른 R_f 값 및 선단곡률 반경의 변화를 나타낸 그래프이다.

성형하중이 증가할수록 성형물은 증가하게 되는데, 시하중을 9.78kgf로 하였을 경우 가장 큰 R_f 값을 보였고, 선단곡률반경은 가장 작은 값을 보이고 있다.

3.2.4 마이크로 3차원 형상성형

Al 5083 초소성 합금의 마이크로 성형실험에서 나타난 특성들을 기초로 3차원 구조를 가지는 피라미드형 미세 금형을 이용하여 마이크로 단조가공을 수행하였다. 실험조건은 V홈 미세 형상 성형으로부터 최적의 조건으로 판단된 온도 530 $^{\circ}$ C, 성형하중 9.87kgf, 성형시간 20분 조건으로 하였으며, 피라미드 밀변의 길이가 각각 30, 50, 100 μ m인 피라미드형 미세 금형을 이용하여 마이크로 형상 성형 실험을 수행하였다.

Fig. 10에서 보는 바와 같이 비록 최적의 성형 조건으로 미세 성형을 수행하였지만, 형상의 크

기에 따라 전사된 피라미드 형상의 정확성은 서로 달리 나타났다. 피라미드 형상의 밀변 길이가 클수록 전사된 피라미드 형상은 금형의 형상과 유사한 형상으로 나타났다. 이는 밀변길이가 작아질수록 금형 안으로 유입되는 결정립수, 즉 금속 유동에 참여하는 결정립의 수가 상대적으로 적어지게 되며 결국 결정립 자체의 변형이 동반되지 않는다면 피라미드 꼭지점 부근에서의 성형은 장시간의 성형시간을 설정하여도 결정립 직경의 제한으로 인하여 한계에 부딪치게 되기 때문이다. 따라서, 마이크로 3차원 형상 성형에서도 성형 소재의 결정립의 미세화가 필수적이라는 사실을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Al 5083 초소성 합금을 이용하여 마이크로 성형가공 실험을 수행하였다.

이로부터 마이크로 성형 시에 성형성은 재료가 가지는 결정립의 직경에 크게 의존하며, 3차원 마이크로 형상 가공에서도 결정립의 직경이 형상 전사성인 R_f 값에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 본 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 초소성 합금의 마이크로 성형에 있어서 성형하중과 시간을 증가시키면 성형률(R_f)은 증가한다.

(2) 폭(W_d) 100 μ m인 V형 홈의 성형시 Al 5083 초소성 합금의 최적 성형은 하중 9.87kgf, 온도 530 $^{\circ}$ C 및 성형시간 20분 조건에서 이루어졌다.

(3) 소재의 마이크로 성형성은 결정립 자체의 소성변형을 유발하지 않는 경우, 결정립의 크기에 많은 영향을 받는다.

(4) 특정 온도범위에서 초소성 특성을 보이는 초소성 합금의 미세 성형을 위해서는 성형중의 과도한 결정립 성장이 발생하지 않도록 소재의 온도와 성형시간을 적절히 조절하여야 한다.

참고 문헌

- [1] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, 2001, Microforming, Annals of CRIP, vol. 50/2, pp. 445-462.
- [2] U. Engel, R. Eckstein, 2002, Microforming from

- basic research to its realization, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 125~126, pp. 35~44.
- [3] Y. Saotome, H. Iwazaki, 2001, Superplastic backward microextrusion of micro parts for micro-electromechanical systems, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 119, pp. 307~311.
- [4] K. H. Na, C. S. Han, S. H. Hong, Y. S. Lee, 2002, *Jorunal of the KSME*, vol. 42, pp. 48~53.
- [5] Y. Saotome, T. Hatori, T. Zhang, A. Inoue, 2001, Superplastic micro/nano-formability of $\text{La}_{60}\text{Al}_{20}\text{Ni}_{10}\text{Co}_5\text{Cu}_5$ amorphous alloy in supercooled liquid state, *Materials Science and Engineering*, vol A304-306, pp. 716~720.
- [6] 이정환, 이영선, 2002, *신소성 가공 기술, 무절삭 정밀단조 연구실*, 한국기계연구원, p. 149.
- [7] Y. Saotome, T. Zhang, A. Inoue, 1999, Microforming of MEMS parts with amorphous alloys, *Mater. Res. Soc. Proc.*, vol 554, pp. 385~390.