

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

## 반용융 단조를 위한 SIMA 공정에서 유효 변형률이 구상화 조직에 미치는 영향

박형진\*, 이병목\*, 최재찬\*\*

### The Influence of Effective Strain on the Globular Microstructure by SIMA Process for Semi-Solid Forging

Hyung Jin Park\*, Byung Mok Lee\*, Jae Chan Choi\*\*

#### ABSTRACT

For semi-solid forging, it is necessarily required to prepare a workpiece with globular microstructure. Among several processes to obtain globular microstructure, SIMA process is very simple and advantageous with respect to equipment. This paper presents the influence of effective strain on the globularization with aluminium 2024 alloy in cold working stage by SIMA process. Upsetting and forward extrusion are tested for cold working and induction heating is also carried out for reheating to obtain globular microstructure. Microstructure is observed with an optical microscope. And finite element simulations to obtain effective strain in cold working stage are performed by using commercial finite element code, DEFORM.

**Key Words:** Semi-Solid Forging(반용융 단조), Globular Microstructure(구상화 조직),  
SIMA Process(시마 공정), Solid Fraction(고상률)

#### 1. 서 론

반용융 상태에서 부품을 성형하기 위한 제조 기술은 1970년대 이후부터 매우 빠른 속도로 발전하고 있다<sup>(1)</sup>. 반용융 단조(semi-solid forging)에서는 소재의 유효 저항을 줄이고 정형 부품을 성형하기 위하여 구상화 조직(globular microstructure)을 가지는 소재를 이용하는 것이 일반적이다.

반용융 단조를 위하여 구상화 조직을 가지는 소재를 만

드는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는 기계식 혹은 전자식 교반법이고 둘째는 SIMA(strain induced melt activated) 공정인데, SIMA 공정은 교반법에 비하여 단순하고, 복잡한 장치가 필요하지 않으며 균일하고 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. SIMA 공정은 열간 압출된 소재를 급냉한 후에 적절한 수준의 변형률을 발생시키기 위하여 냉간 변형을 주고 고상선 온도 이상에서 반용융 상태로 가열하여 구상화 조직을 만들어서 성형하는 방법이다<sup>(2)</sup>.

\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과,

\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

반용용 단조를 위한 SIMA 공정에 관한 연구에는 Young등<sup>(2)</sup>이 특허로 미세 입자를 얻을 수 있는 방법을 제안하였으며, Turkeli등<sup>(3)</sup>은 알루미늄 7075 합금 소재에 대하여 구상화 조직을 얻기 위한 가능성과 가열 온도에 따른 영향을 조사하였다. 그리고 Choi 등<sup>(4)</sup>은 냉간 압축을 하여 알루미늄 20계열 합금과 다른 알루미늄 합금들의 구상화 조직을 얻을 수 있는 조건을 연구하였다.

본 연구의 목적은 알루미늄 2024 합금에 대하여 SIMA 공정의 냉간 변형 단계에 냉간 압축과 전방 압출을 적용하여 구상화된 소재를 실험으로 얻고, 각각의 냉간 변형 단계에서 소재의 유효 변형률을 DEFORM<sup>(5)</sup>으로 해석하여 구한 후, 해석과 실험을 연계하여 SIMA 공정에서 유효 변형률이 소재의 구상화 정도에 미치는 영향을 기술하는 데 있다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 소재 준비

본 연구에서 SIMA 공정을 이용한 소재의 구상화 실험에 사용한 소재는 알루미늄 2024 합금이다. 소재의 화학 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of aluminium 2024 alloy

chemical composition [%]									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb	Ti	Al
0.237	0.133	4.470	0.628	1.413	0.012	0.028	-	0.0181	REM

SIMA 공정에서 순수하게 냉간 변형이 소재의 구상화 정도에 미치는 영향을 알기 위하여 알루미늄 2024 합금을 풀림(annealing) 처리하였다. 풀림 처리 조건으로 380 ℃까지 가열한 후 3 시간 30 분 동안 유지하고 260 ℃까지 23 ℃/Hr로 노냉한 후에 공냉하였다.

그리고 냉간 단조에서 마찰을 감소시키고 가공 하중을 줄이기 위하여 인산염 윤활 피막 처리를 하였다.

또한 응력-변형률의 관계와 마찰 상수를 구하기 위하여 실린더 압축 시험과 링 압축 시험을 하였다<sup>(6,7)</sup>.

실린더 압축 시험에서는 시편의 직경을 29.5 mm, 높이를 20 mm로 가공하였고, Tokyo Testing Machine MFG. CO. LTD.의 200 톤 유압 프레스를 사용하여 램 속도를 1 mm/min으로 일정하게 유지하면서 압축하였다. 압축 시험된 자료를 이용하여 최소자승법으로 구한 응력-변형률 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 375.2\bar{\epsilon}^{0.1882} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

링 압축 시험을 위한 시편은 외경:내경:두께의 비를 6:3:2가 되도록 외경(15):내경(7.5):두께(5)로 가공하였고, 사용한 시험기는 Toyo Baldwin사의 25 톤 만능 시험기(Universal Testing Machine)이며, 압축 속도는 1 mm/min으로 일정하게 유지하였다. 마찰 상수를 결정하기 위하여 높이 감소율에 대한 내경 감소율의 보정곡선을 구하고 마찰 면적분할법(friction-area divided method)<sup>(8)</sup>을 이용하였는데, 마찰 상수는 0.16 정도이다.

한편, SIMA 공정의 냉간 변형 실험 중에서 냉간 압축을 위한 초기 시편은 직경 15 mm, 높이 15 mm로, 전방 압출을 위한 초기 시편은 직경 29.5 mm, 높이 30 mm로 가공하여 준비하였다. 이 시편들도 마찰을 감소시키고 가공 하중을 줄이기 위하여 인산염 윤활 피막 처리를 하였다.

### 2.2 냉간 압축

냉간 압축 실험을 위하여 Toyo Baldwin 사의 25 톤 만능 시험기를 사용하였고, 압축 속도는 전 실험 동안에 1 mm/min으로 일정하게 유지하였다.

실험 조건으로 높이 감소율(H.R.)을 15 %, 20 %, 25 %, 40 %, 60 %로 하여 냉간 압축을 하였고 각각에 대하여 소재의 형상 변화를 Fig.1에 나타내었다.



Fig.1 Experimental results for upsetting  
 (a) initial billet (b) H.R.=15%  
 (c) H.R.=20% (d) H.R.=25%  
 (e) H.R.=40% (f) H.R.=60%

### 2.3 전방 압출

전방 압출 실험을 위하여 Tokyo Testing Machine MFG. CO. LTD.의 200 톤 유압식 프레스를 이용하였고, 램 속도는 냉간 압축의 경우와 마찬가지로 1 mm/min로 하였다.

그리고 다이 반각은 30°로 동일하며 단면적 감소율(R.A.)이 30 %, 40 %, 50 %로 서로 다른 3 가지의 원추형 다이를 사용하여 펀치 행정을 20 mm로 전방 압출

하였다. 다이와 펀치의 재질은 열처리한 SKD 11이고 컨테이너(container)와 다이 홀더(die holder)는 SCM 4이다.

압출 실험에 대한 결과는 Fig.2에 나타내었고, 전방 압출을 위하여 사용한 다이는 Fig.3과 같다.

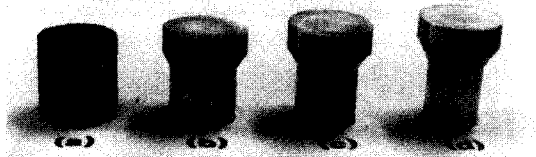


Fig. 2 Experimental results for forward extrusion (semi-die angle :30°)

- (a) initial billet
- (b) R.A. =30%
- (c) R.A. =40%
- (d) R.A. =50%

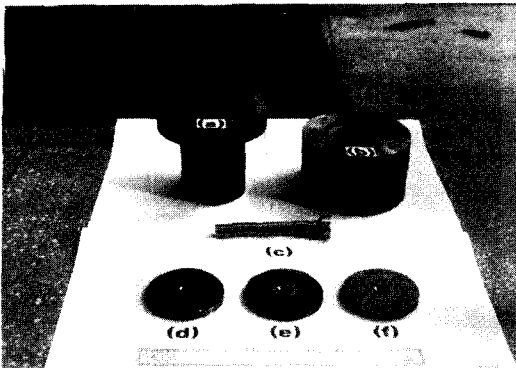


Fig. 3 Experimental apparatus of forward extrusion

- (a) container
- (b) die holder
- (c) punch
- (d) die for R.A.=30%
- (e) die for R.A.=40%
- (f) die for R.A.=50%

#### 2.4 소재의 가열

냉간 압축과 전방 압출을 한 소재를 가열하기 위하여 220 V, 15KW, 25.5 KHz의 용량을 가진 유도가열기를 사용하였다. 가열 조건은 알루미늄 2024 합금의 고상률 80%에 해당하는 625 ℃로 하였는데, 고상률에 대한 가열 온도는 Kiuchi<sup>(9)</sup>등이 제안한 방정식으로 소재의 평형 상태도를 이용하여 계산하였다.

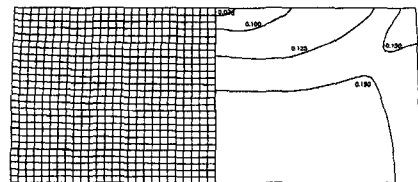
유도가열시 소재의 부위에 따라서 온도차가 발생하여 이것이 구상화 정도에 영향을 미치게 되는데, 이러한 온도 차이가 발생하지 않게 하기 위하여 반복 실험으로 소재의 중심부와 표면의 온도를 측정하여 소재의 온도를 균일하게 하는 조건을 찾았다. 이 때의 출력은 3KW이고,

목표 온도에 도달하는 시간은 약 5 분 정도였다.

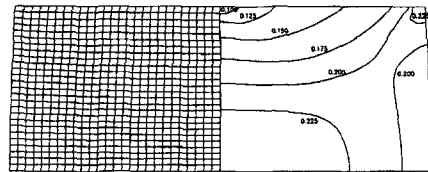
### 3. 유효 변형률

상용 강소성 유한 요소 코드인 DEFORM을 이용하여 냉간 압축과 전방 압출 공정을 해석하여 유효 변형률을 계산하였는데, 그 분포를 각각 Fig.4와 Fig.5에 나타내었다.

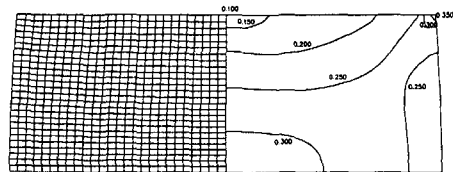
냉간 압축의 경우에는 높이 감소율 15 %에서 최대 유효 변형률이 0.15이고, 높이 감소율 20 %에서는 0.225



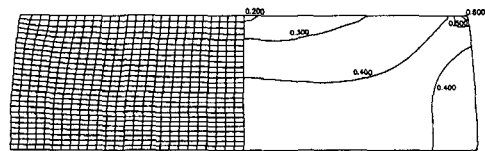
(a) H.R. =15%



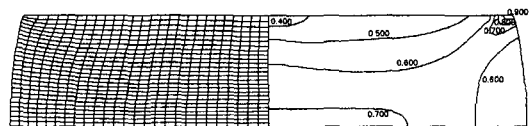
(b) H.R. =20%



(c) H.R. =25%

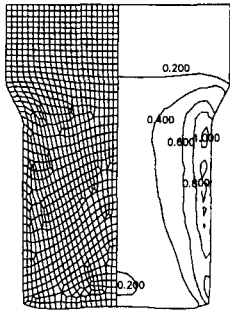


(d) H.R. =40%

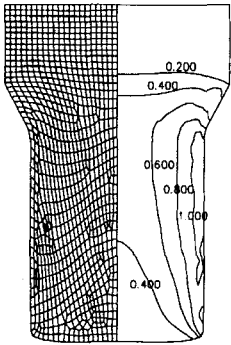


(e) H.R. =60%

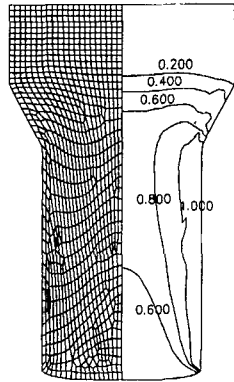
Fig. 4 Deformed mesh and distribution of effective strain for upsetting



(a) R.A. = 30%



(b) R.A. = 40%



(c) R.A. = 50%

Fig. 5 Deformed mesh and distribution of effective strain for forward extrusion (semi-die angle :30°)

이다. 그리고 이 두가지의 조건에서는 소재의 유효 변형률이 전반적으로 균일함을 알 수 있다. 그러나 높이 감소율 25%, 40%, 60%의 경우에는 최대 유효변형률이 각각 0.35, 0.6, 0.9로 증가하면서 부위별로 최대 및 최소 유효 변형률의 차이가 커짐을 알 수 있다.

또한 전방 압출의 경우에는 압출된 부위의 유효 변형률 분포를 살펴보면, 단면적 감소율 30%에서 유효 변형률이 0.2부터 1.0까지 부위별로 차이가 있음을 알 수 있고, 단면적 감소율 50%에서는 유효 변형률이 0.4부터 1.48까지 분포되어 있음을 알 수 있다.

냉간 변형 단계에서 소재에 발생하는 유효 변형률이 구상화 정도에 영향을 미친다고 한다면, 유효 변형률이 소재 전체에 걸쳐서 비교적 균일한 값을 가지는 것이 바람직하다고 생각한다.

한편, 유한 요소 해석시 펀치와 다이는 강체로 가정하였고, 4절점 사각형 축대칭 요소를 사용하였으며 요소수는 882 개이고 절점수는 946 개다. 그리고 소재의 응력-변형률 관계는 식(1)을 이용하였다.

#### 4. 구상화 조직의 고찰

반응용 단조에서는 소재를 가열하여 구상화 조직을 만든 후 성형 공정에 사용하는 것이 일반적인 성형 방법인데, 이 과정에서 소재의 구상화 정도가 중요한 성형 변수가 된다. 그러므로 SIMA 공정을 이용하여 구상화 조직으로 만든 소재를 급냉시켜서 대칭축을 포함하는 수직면으로 절단하여 그 구상화 정도를 광학현미경을 사용하여 100배 확대해서 관찰하였다. 이때 계산한 유효 변형률을 기준으로 소재의 구상화 정도를 비교하였다.

또한 구상화 입자의 크기는 Jeffries planimetric method<sup>(10)</sup>를 사용하여 구하였다.

SIMA 공정의 냉간 변형 단계에서 냉간 압축을 한 소재의 유효 변형률에 대한 구상화 조직의 평균 입자 크기를 Fig.6에 나타내었고, 그때의 구상화 조직은 Fig.7에 나타내었다.

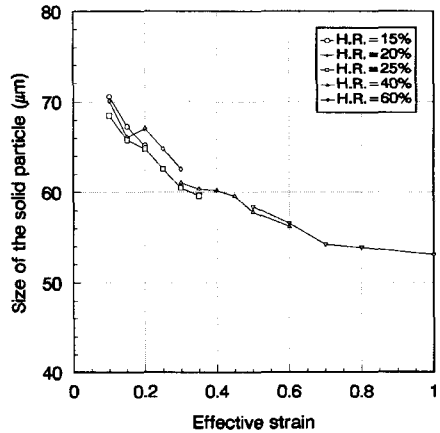


Fig. 6 Average size of globular microstructure vs. effective strain for upsetting in SIMA process

그리고 전방 압출된 소재의 유효 변형률에 대한 평균 입자의 크기를 Fig.8에 나타내었으며 그 때의 구상화 조직은 Fig.9에 나타내었다.

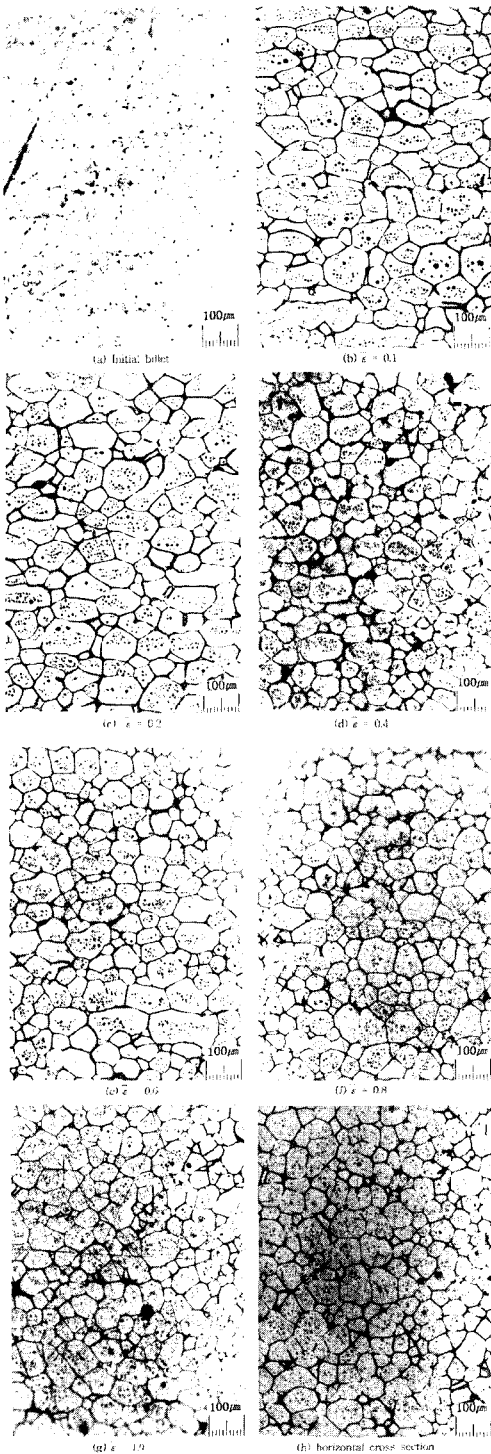


Fig. 7 Microstructure of 2024 aluminum alloy for upsetting in SIMA process

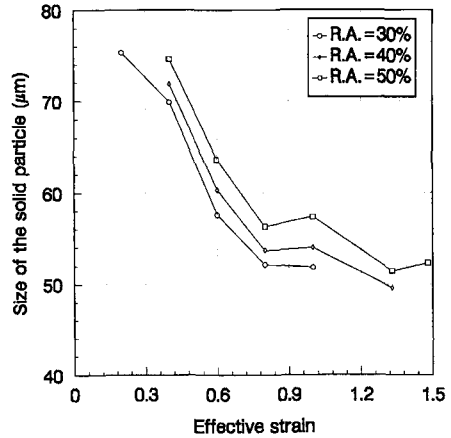


Fig. 8 Average size of globular microstructure vs. effective strain for forward extrusion in SIMA process

이상의 조건으로부터 구상화 조직을 관찰한 결과, 고상률 80%의 반응용 상태의 알루미늄 2024 소재를 사용할 경우에 SIMA 공정을 이용하여 양호한 구상화 조직을 얻을 수 있고, 구상화 입자의 크기는 약 49.56 μm에서 75.31 μm 정도가 됨을 알 수 있다.

냉간 압축의 경우, 높이 감소율이 15% 일 때는 소재 내부의 유효 변형률이 약 0.15로 거의 균일하고, 구상화 입자의 크기도 약 68 μm 정도로 균일하게 분포된다. 높이 감소율이 증가할수록 소재 내부의 유효 변형률의 차이가 커지는데, 높이 감소율이 60% 일 때 소재 내부의 유효 변형률은 0.4에서 0.7 정도이고 금형과 접촉한 소재의 자유 표면의 좁은 영역에서는 0.9 정도로 높은 값을 보인다. 이와 같은 유효 변형률의 차이는 구상화 입자의 크기를 차이하게 하는데, 소재 내부에서는 58.44 μm에서 54.24 μm 정도로 약 4 μm 정도 차이가 생기게 한다. 그리고 금형과 접촉한 소재의 자유 표면의 영역은 높은 유효 변형률로 인하여 구상화 입자의 크기가 약 52.37 μm 정도로 작아지지만, 그 영역의 크기가 작으므로 소재 내부의 구상화 입자의 크기에 미치는 영향도 작음을 알 수 있다. 높이 감소율 15% 일 때, 소재의 바닥으로부터 6.5 mm 위치에서 냉간 압축의 방향에 수직인 단면에 대한 구상화 조직을 Fig.7(h)에 나타내었는데, 구상화 정도는 양호하였다.

전방 압출의 경우, 단면 감소율이 30% 일 때는 소재 내부의 유효 변형률이 0.2에서 1.0까지의 분포를 보이는데, 이와 같은 유효 변형률은 구상화 입자 크기를 75.31 μm에서부터 51.82 μm까지 약 25 μm 정도 차이

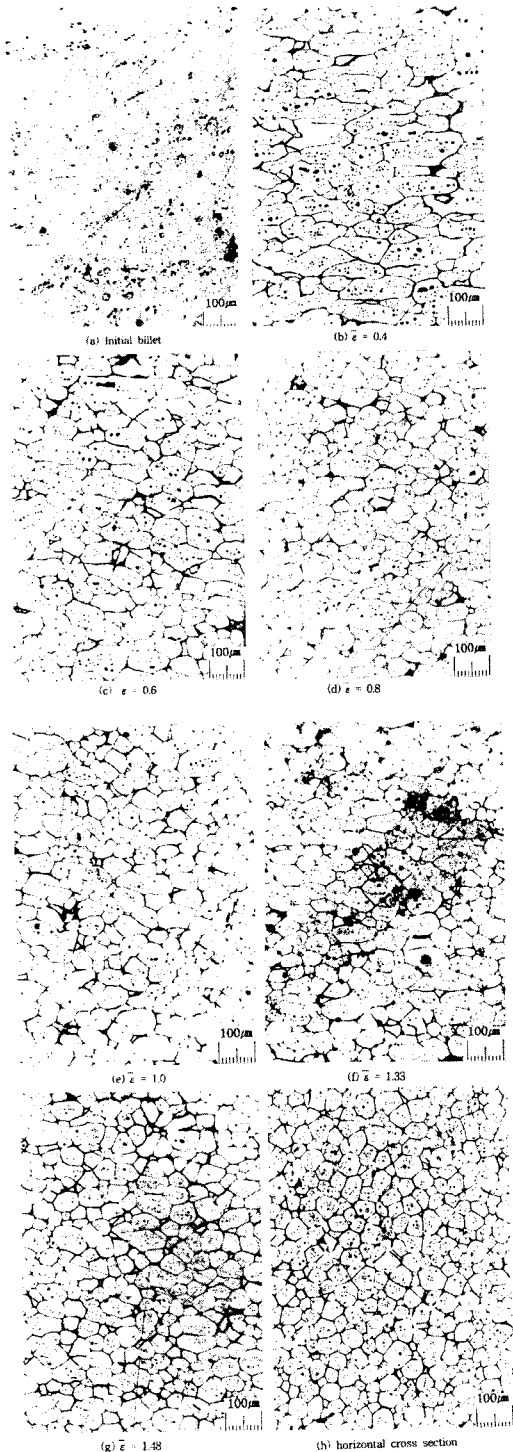


Fig. 9 Microstructure of 2024 aluminium alloy for forward extrusion in SIMA process

나게 한다. 단면 감소율이 40 % 일 때는 소재 내부의 유효 변형률이 약 0.4 에서 1.33 정도의 분포를 보이며, 구상화 입자의 크기도 71.84  $\mu\text{m}$  에서부터 49.56  $\mu\text{m}$  까지 약 22  $\mu\text{m}$  정도 차이나게 한다. 단면 감소율이 50 % 일 때는 소재 내부의 유효 변형률이 약 0.6 에서 1.48 정도의 분포를 보인다. 그러나 유효 변형률이 1.33 이상인 영역은 아주 작으므로 소재 전체의 구상화 정도에 미치는 영향은 작고, 나머지 영역에서는 구상화 입자의 크기가 63.62  $\mu\text{m}$  에서 51.43  $\mu\text{m}$  정도로 약 10  $\mu\text{m}$  정도 차이가 남을 볼 수 있다. 단면 감소율 50 % 일 때, 소재의 바닥으로부터 10 mm 위치에서 전방 압출 방향에 수직한 단면에 대한 구상화 조직을 Fig.9(h)에 나타내었는데, 구상화 정도가 양호하였다.

따라서 소재 전체의 구상화 정도를 향상시키기 위해서는 유효 변형률 분포를 균일하게 하면서 유효 변형률을 증가시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

또한 냉간 압축과 전방 압출이라는 서로 다른 냉간 변형 조건에 대한 구상화 입자의 크기는 유효 변형률이 0.5 이하에서는 냉간 압축이 전방 압출보다 약 10  $\mu\text{m}$  정도 작으며, 그 이상의 유효 변형률에 대해서는 구상화 정도가 유사하다.

그리고 두가지의 냉간 변형 조건에서 유효 변형률이 증가할수록 소재의 구상화 정도는 좋아지고, 구상화된 평균 입자의 크기도 작아짐을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 SIMA 공정에서 순수하게 냉간 변형만에 의한 유효 변형률이 소재의 구상화 정도에 미치는 영향을 알루미늄 2024 소재를 사용하여 확인하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 소재의 구상화 정도는 냉간 변형시의 유효 변형률을 계산함으로써 예측할 수 있다.
- (2) 소재 전체의 구상화 정도를 향상시키기 위해서는 유효 변형률 분포를 균일하게 하면서 유효 변형률을 증가시키는 것이 바람직하다.
- (3) 냉간 압축과 전방 압출이라는 서로 다른 냉간 변형 공정에서 약 0.5 이상의 유효 변형률을 가지는 영역에서 동일한 유효 변형률에 대하여 소재의 구상화 정도가 유사함을 알 수 있다.
- (4) 냉간 변형시의 유효 변형률이 증가할수록 소재의 구상화 정도는 좋아지고, 구상화 입자의 크기도 작아짐을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. R.F.Decker, R.D.Carnahan, R.Vining, E.Eldener, "Progress in Thixomolding", 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, pp.221-224, 1996.
2. K.P.Young, C.P.Kyonka, J.A.Courtois, U.S.Patent 4,415,374, 1983.
3. A.Turkeli, N.Akbaz, "Formation of Non-dendritic Structure in 7075 Wrought Aluminum Alloy by SIMA Process and Effect of Heat Treatment", 4th Int'l Conf. on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, Sheffield, pp.71-74, 1996.
4. 최재찬, 조해용, 민규식, 박형진, 최중웅, "난가공성 경량소재의 반응용 단조에 관한 기초 연구", 한국정밀공학회지, Vol. 13, no. 7, pp.29-35, 1996.
5. S.I.OH, Private Communication, SFTC Inc., Columbus, Ohio and DEFORM Manual, Ver 4.0.
6. C.H.Lee, T.Altan, "Influence of Flow Stress and Friction upon Metal Flow in Upset Forging of Rings and Cylinders", ASME, J. of Engineering for Industry, pp.775-782, 1972.
7. T.Altan, F.W.Boulger, "Flow Stress of Metals and its Application in Metal Forming Analyses", ASME, J. of Engineering for Industry, pp.1009-1019, 1973.
8. Yang-Tai Lin, Jang-Ping Wang, "An Investigation into the constant friction factor with the upper-bound flow function elemental technique", J. of Material Processing Technology, Vol. 36, pp.55-68, 1992.
9. 木内學, 杉山澄雄, "半鎔融・半凝固金屬の固相率の測定法-1", 第42回 塑性加工聯合講演會, 日本塑性加工學會, pp.647-650, 1991.
10. Vander. Veort, "Metallography Principle and Practice", McGraw-Hill Book Company, New York, pp.410-508, 1984.