

## 고액공존재료의 변형거동에서 재료의 크기가 액상편석에 미치는 영향

윤성원\* · 서판기\* · 강충길\*\*

(2002년 7월 24일 접수)

## The Effect of Specimen Size on Liquid Segregation in Deformation Behavior of Mushy State Material

S. W. Youn, P. K. Seo and C. G. Kang

### Abstract

For the optimal net shape forging of semi-solid materials (SSM), it is important to predict the deformation behavior and defects of materials. Among these defects, liquid segregation is detrimental to produce products with good mechanical properties. Moreover, to apply a numerical method to thixoforging, it is very important to prevent a liquid segregation during forming process. The liquid segregation phenomena in deformation behavior of semi-solid material with variation of test specimen size were studied. The SSM compression tests were performed by dynamic material test system with a furnace. Stress-strain curves and microstructures of SSM were investigated, and Porosities were analyzed to evaluate the effects of experiment parameters on liquid segregation.

**Key Words** : Liquid Segregation, Porosities, Test Specimen Size, Compression Test, Semi-Solid Material

### 1. 서론

반용융가공은 소재를 고상선 온도 이상으로 가열시켜 액상과 고상이 공존하는 상태에서 성형하는 공정이다. 반용융가공의 예로는 반용융 다이캐스팅, 단조, 인발, 몰딩 등이 있으나 현재 실재 산업에 적용되고 있는 공정은 반용융 다이캐스팅 공정이다. 전통적인 주조 공정에 비

하여 성형하중을 감소시킬 수 있으며, 또한 성형온도가 낮기 때문에 금형의 수명을 연장 할 수 있다. 또한, 수지 상정조직을 파괴시켜 구상화조직상태에서 제품을 제조하기 때문에 편석, 기공등을 감소시킬 수 있고 변형저항이 작아 가공한계성을 증대시킬 수 있다. 반용융가공은 기존의 성형방법에 비해 많은 장점을 가지고 있기 때문에 고기능성 자동차경량화 부품개발에 활용이 크게 기대된

\* 부산대 대학원 기계공학부

\*\* 부산대 기계공학부, 성민성형 및 규형가공 연구소(ERC/NSDM)

다. 반응용 가공공정의 가장 큰 목적은 분포가 균일하고 기공이 없는 구상조직을 얻는 것이다. 고상이나 액상의 분포가 불균일할 경우 액상의 경도가 조정보다 높기 때문에 최종제품의 기계적 성질의 저하를 초래할 수 있다.<sup>(1)</sup> 예를들어, 3차원 복잡형상 부품의 반응용 다이캐스팅 공정에서 발생하는 최종 충전 부위에서의 액상편석(액상과 고상의 분리현상)은 액상의 분포를 불균일하게 하여 제품의 경도저하는 물론 표면처리의 저해요인이 될 수 있다.

고상과 액상의 분리현상에 관한 연구로써 Suery등<sup>(2)</sup>은 반응용상태의 Sn 15%Pb합금을 이용하여 압축실험을 할 때 액상편석의 정도를 파악한 결과 변형률속도가 증가할수록 고상분이 균일하게 분포한다고 보고하고 있다. Loue<sup>(3)</sup>등은 Al 6%Si-0.3%Mg, Al-7%Si 0.3%Mg합금을 변형률 속도가 0.05 sec<sup>-1</sup>이하에서 압축실험을 할 때 변형률 속도가 변화하더라도 응력은 일정한 변형률 속도로 압축했을 때의 응력값으로 회복된다고 보고하였다. Yoshida등<sup>(4)</sup>은 Al-4.5%Cu합금의 단조시 램의 속도가 감소할수록 액상편석이 증가하였다고 보고하였다. Pinsky<sup>(5)</sup> 등은 Sn Pb합금의 반응용 상태에서 압축과 링압축 실험을 통해 급형와 재료간의 마찰이 클수록 액상편석이 증가한다고 하였다. 강<sup>(6)</sup>등은 성형중 액상편석을 방지하기 위하여 압축실험 중 속도제어 실험을 통하여 변형률이 증가함에 따라서 응력이 증가되도록 다단속도제어실험 방법을 제시하였다. Valencia<sup>(7)</sup>등은 미세조직 관찰을 통하여 세가열시 빌렛의 온도구배와 Si의 조대화가 발생하지 않는 A356 합금의 급속 가열조건을 제시하였다. Chen<sup>(8)</sup> 등은 반응용상태의 A356합금의 변형거동에서 액상편석을 예측할 수 있는 모델을 제시하여 실험데이터와 비교하였다.

반응용 성형중 발생하는 액상편석은 사출속도와 고상율의 제어에 의하여 감소시킬 수 있다. 그러나 성형품의 크기, 형태 및 성형장비 등에 따라서 액상편석의 제어방법을 달리 하여야 하기 때문에 반응용 단조 및 캐스팅 성형에 응용할 수 있는 연구결과가 발표되지 않고 있다.

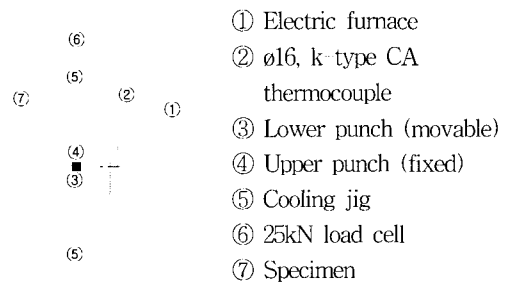
본 연구에서는 빌렛의 크기 변화가 액상편석에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시편의 직경 및 높이를 변수로 하여 압축실험을 하였으며 미세 및 거시적 조직사진, 응력 변형을 곡선, 기공율 등을 조사하였다. 또한, 시편의 온도변화에 따른 반응용재료의 변형특성을 관찰하였다.

## 2. 압축실험

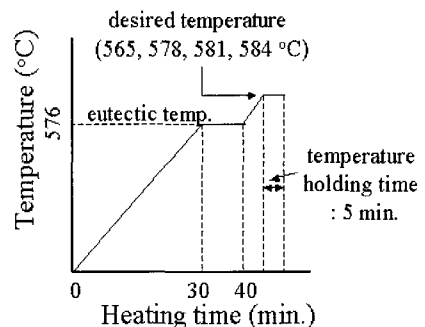
압축실험에 사용된 반응용재료는 자동차 부품개발에

널리 이용되는 주조용 합금재료로서 프랑스 Pechiney에서 전자기식 교반에 의해 제조한 A356 합금이다. 반응용 재료의 압축실험은 25kN MTS에 전기로틀 부착하여 목적온도까지 가열시킨 후 압축시편의 온도, 시편직경, 시편높이, 변형률 속도의 변화에 따른 압축실험을 하였다.

온도측정은  $\phi 1.6$ 의 K-Type CA type 열전대를 사용하여 시편의 중심부의 온도를 측정하였으며(Fig. 1 (a)), Fig. 1 (b)는 가열조건을 나타내고 있다. 펀치의 재료는 고온 공구강인 SKD61에 고경도(HRC55~60)와 인성을 부여하기 위해 열처리한 것을 사용 하였다. 시편과 펀치에서 소재의 소착을 방지하기 위해서 B/N spray를 사용 하였으며 펀치의 중심과 시편의 중심을 일치시키기 위해 시편의 중앙과 펀치면의 중심에  $\phi \times h=3 \times 2$ (mm)의 요철을 만들었다.



(a) Schematic diagram of apparatus used for the compression test



(b) Temperature-time curve

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus used for the compression test and heating condition

압축실험시 변형률측정기(extensometer)를 시편에 부착할 수 없었기 때문에 변형률속도는 펀치속도조절에 의해 변화되었다. 변형률속도는  $\dot{\epsilon} = V_p/H_0$ 로 정의되며,  $V_p$ 와  $H_0$ 는 각각 펀치속도와 시편의 초기높이를 나타낸다.

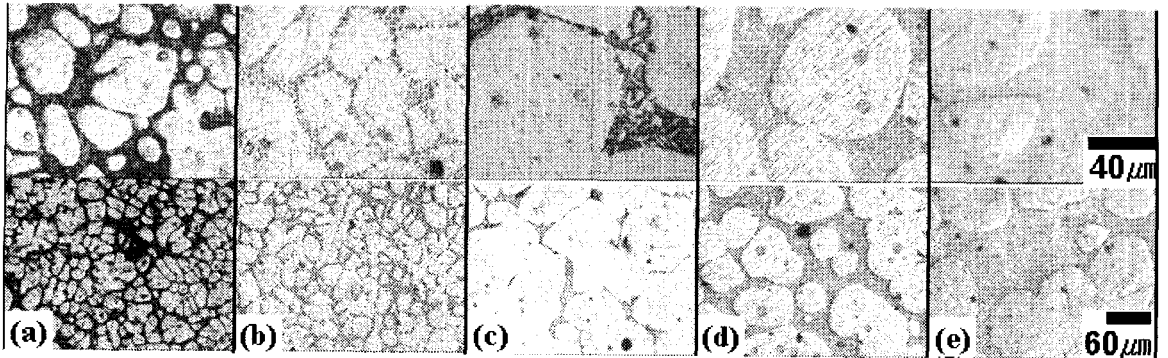


Fig. 3 Microstructural variation of A356 alloy with variation of heating temperature after compression test (=5sec-1)  
 (a) A356 raw material((by pechney) (b) 565°C (c) 578°C (d) 581°C (e) 584°C

### 3. 실험결과 및 고찰

3.1 성형온도변화에 따른 반응용 재료의 변형거동 가열온도에 따른 반응용재료의 변형특성을 조사하기 위하여 온도를 변수 (578, 581, 584°C)로 하여 압축실험을 실시하였다. 비교를 위하여 완전고상 상태인 565°C에서의 압축실험도 수행되었다. 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm)인 시편이 사용되었으며, 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ ) 및 높이감소율( $R_n$ )은 각각  $5\text{sec}^{-1}$ , 60%였다. 높이감소율은  $R_n(\%)=1-(H/H_0) \times 100$ 으로 정의되며, H와  $H_0$ 는 각각 시편의 압축 후 높이와 초기높이를 나타낸다.

Fig. 2는 실험을 통해 얻어진 압축온도변화에 따른 A356 합금의 응력-변형을 곡선이다. 시편의 온도가 시편의 온도가 578°C인 경우는  $\epsilon=0.1$ 에서 응력의 감소현상이 관찰되었다.(Fig. 2 (a)) 581°C이상의 온도조건에서는 높은 액상률 때문에 반응용재료의 변형특성이 관찰되지 않았

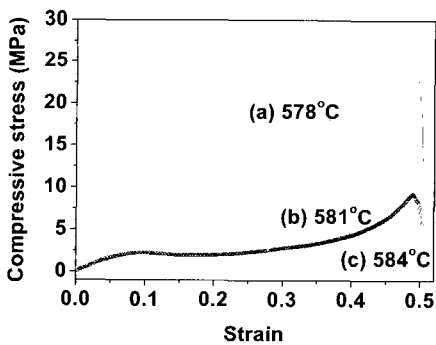


Fig. 2 Relationship between stress and strain of A356 with various temperature( $\dot{\epsilon}=5\text{sec}^{-1}, \phi 20 \times h20$ (mm))

다.(Fig. 2 (b), (c))

Fig. 3 은 변형을 속도가  $5\text{sec}^{-1}$  일 때 온도변화에 따른 시편의 미세적 조직을 관찰한 것이다. 시편의 중앙부는 압축에 의해 조직이 심하게 변형되어 액상분포의 관찰이 어려워져 중앙으로부터 약 3mm정도 떨어진 곳에서 미세조직을 관찰하였다. Fig. 3 (a)는 Pechiney사에서 제조한 A356 빌렛의 미세조직 사진으로써, 장미상(Rossete)과 구상이 혼재한 조직을 나타내고 있다. 이 조직사진 내에서 흑색영역은 공정조직이고 백색영역은 조정조직을 나타낸다. 이러한 조직은 고온에서 전자기교반법에 의해 얻어진 소재를 급냉하여 얻은 것이다.<sup>(9)</sup> Fig. 3 (b)는 565°C에서 압축된 시편의 조직사진을 나타낸 것이다. 고상이 성장하여 계면간의 거리가 감소하고 있다. 위의 원인은 액상영역의 Si가 고상에 고용되고 있기 때문으로 사료된다. 소재의 재가열 공정중 소재의 온도가 575°C이 되었을 때는 가열시간이 증가하더라도, 일정시간동안 더 이상의 온도상승이 일어나지 않았다. 578°C의 경우에는 새롭게 생성된 공정조직에 의해 고상조직 간의 계면이 재형성 되고 있다. 그러나 공정조직은 원소재 (Fig. 3 (a))와는 달리 침상조직을 나타내고 있으며 미용해된 회색의 Si입자가 남아 있는 것을 관찰할 수 있다.(Fig. 3 (c)) 소재의 온도가 581°C (Fig. 3 (d))인 경우, 공정조직은 완전히 미세한 망상조직을 보이고 있으며, 미 용해된 Si입자는 관찰되지 않았다. 또한, 공정조직이 차지하는 면적이 증가하였으며 고상조직이 원소재에 비해 구상화된 것을 관찰할 수 있었다. 이는 고상이 계면에너지를 감소시키기 위해 구상화된 것으로 판단된다. 584°C인 경우에는 액상이 차지하는 면적이 581°C의 경우보다 증가했음을 알 수 있다.(Fig. 3 (e))

3.2 시편직경의 변화가 액상편석에 미치는 영향

시편의 직경변화가 반응용재료의 변형거동 미치는 영향을 조사하기 위하여 크기가 각각  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ ,  $\phi 40 \times h 20$ ,  $\phi 50 \times h 20$ 인 시편들을  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h(\text{height reduction})=60\%$ ,  $\dot{\epsilon}=25\text{sec}^{-1}$  ( $V_p=500\text{mm/sec}$ )에서 압축하였다. 직경이 40, 50(mm)인 시편은 MTS의 로드셀의 측정한계 때문에 응력 변형률 곡선을 조사하지는 못하였다.

Fig. 4는 크기가 각각  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ ,  $\phi 40 \times h 20$ ,  $\phi 50 \times h 20$ 인 시편들을 압축한 시험편의 거시적 조직 사진을 나타낸 것이다. Fig. 4 (a)~(c)에서 보여주는 원과 기호(A~E)는 시편의 초기직경과 미세조직을 관찰하기 위한 위치를 각각 나타낸 것이다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우에는 고상과 액상의 분리현상에 의한 현저한 표면균열 현상 및 기공이 관찰되며(Fig. 4 (a)), 시편의 크기가  $\phi 20 \times h 40(\text{mm})$ ,  $\phi 20 \times h 50(\text{mm})$ 인 경우에는 표면 균열현상 및 기공이  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우에 비해 현저히 적음을 알 수 있다.(Fig. 4 (b), (c)) 표면균열 현상은 반응용재료의 압축실험 중 액상이 표면쪽으로의 유동하기 때문에 발생된다.<sup>(10)</sup> 따라서 반응용 성형공정에서 이러한 표면균열 현상을 방지하기 위해서는 자유표면이 존재하지 않는 폐쇄단조형태의 가공법이 필요하다.

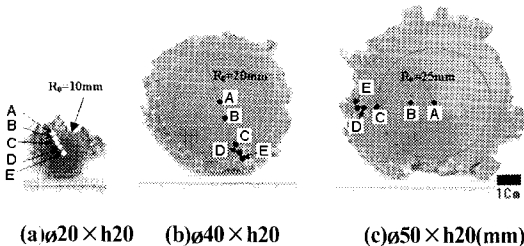


Fig. 4 Macrographs of specimens compressed for variation of specimen diameter. ( $\dot{\epsilon}=25\text{sec}^{-1}$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h=60\%$ ,  $R_0$ : initial diameter, A~E: position for microscopic observation)

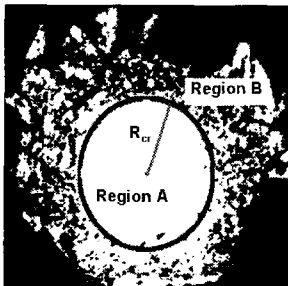


Fig. 5 Schematic of the specimen showing the porosities distribution. (A: region without porosities,  $R_{cr}$  (critical radius): radius of A, B: region with porosities)

Fig. 4의 거시적 조직사진은 기공이 존재하지 않는 일정 반경을 가진 원형영역이 있음을 보여주고 있다. 본 실험에서는 Fig. 5에서 기공이 관찰되지 않는 원형영역의 반경을 한계반경( $R_{cr}$ )이라 정의하였다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우 Fig. 4(a)에서 보여주는 바와 같이 한계반경( $R_{cr}$ )이 시편의 초기반경( $R_0$ )보다 작다. 반면에  $\phi 20 \times h 40(\text{mm})$ ,  $\phi 20 \times h 50$ 인 경우에는 Fig. 4 (b), (c)에서 보여주는 바와 같이 한계반경( $R_{cr}$ )이 시편의 초기반경( $R_0$ )보다 큰 것을 알 수 있다. 위는 시편의 전체면적에서 기공이 발생된 영역의 면적이 차지하는 비율이 직경증가에 따라 감소한다는 것을 나타낸다.

Fig. 6의 미세조직사진들은 Fig. 4의 시편사진에 표시된 [A], [B], [C], [D] 및 [E]에서 촬영되었으며, X(mm) 값은 시편 중심부로부터의 거리를 나타내고 있다. 시편들의 직경의 차이가 크기 때문에 일정한 간격으로 미세조직을 관찰 할 수가 없었다. Fig. 6 [A]의 미세조직 사진들은 시편중앙부의 미세조직을 나타내고 있다. 압축시 구속이 가장 많이 되는 위치이기 때문에 조직이 치밀화되어 명확한 고상과 액상의 분포를 관찰할 수가 없었다.

Fig. 6 [B]는 고상영역과 액상영역이 급격히 변화하는 경계영역에서 관찰된 조직사진들이다. Fig. 6 [C]는 균일한 액상의 분포를 보이는 영역의 조직사진이다. Fig. 6 [D]는 기공영역이 시작되는 지점인 한계반경에서의 미세조직을 나타내며, Fig. 6 [E]는 기공영역 내의 조직사진이다. Fig. 6 [D]와 Fig. 6 [E]에서 알 수 있는바와 같이 기공(흑색영역)이 발생된 영역의 미세조직에서는 고상과 액상의 분포가 불균일하고 고상입자들이 현저하게 소성 변형되어 있음을 알 수 있다. 또한 일부 고상입자들은 액상의 유동에 의하여 파괴되어 미세화 된 것을 관찰할 수 있었다. 이 결과는 기공의 분포와 양이 액상편석의 영향을 반영하고 있다는 것을 나타낸다. 따라서 기공의 발생위치 및 기공분율을 알면 액상편석의 영향을 가장 많이 받는 시편부위를 알 수 있다. 이러한 관점에서 액상편석의 영향을 정량적으로 조사하기 위해 상분석기를 이용하여 기공율을 계산하였다.

Fig. 7은 시편중심부로부터의 거리의 변화에 따른 기공율의 변화를 나타낸 곡선이다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $R_{cr}$ )은 7(mm)이고, 기공분율은 10~30%로 추정되었다.(Fig. 7 (a)) 시편의 크기가  $\phi 40 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $R_{cr}$ )은 24(mm)이고, 기공분율은 11~20%로 추정되었다.(Fig. 7 (b)) 시편의 크기가  $\phi 50 \times h 20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $R_{cr}$ )은 30(mm)이고, 기공율은 10~19%로 추정되었다.(Fig. 7 (c)) 위 결과로부터 시편의 직경이 증가할수록 기공의 양은 감소함

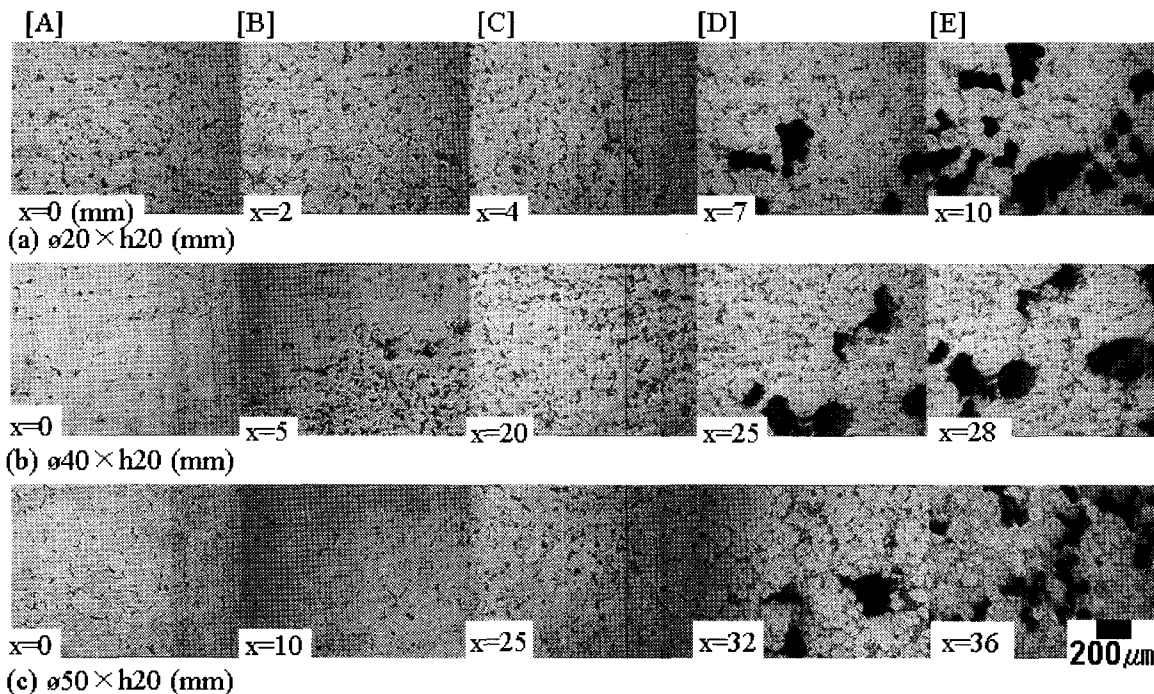


Fig. 6 Micrographs of A356 alloy after compression at 578°C for variation of specimen diameter ( $\dot{\epsilon}=25\text{sec}^{-1}$ ,  $R_h=60\%$ ,  $X(\text{mm})$ : Distance from center of specimen after compression test)

을 알 수 있었다.

Fig. 8은 시편의 직경증가에 따른 한계반경( $R_{cr}$ )의 변화를 정량적으로 조사하기 위해서 Fig. 7을 상대거리( $X_R$ )에 따른 기공율( $V_p$ )의 변화로 나타낸 것이다. 상대거리와 상대한계반경은 각각  $X_R=X/R_0$ 와  $R_{crR}=R_{cr}/R_0$ 로 정의되며,  $R_0$ 는 시편의 초기반경이다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $X_R$ )은 0.7이다.(Fig. 8 (a)) 시편의 크기가  $\phi 40 \times h20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $X_R$ )은 1.2이며(Fig. 8 (b)), 시편의 크기가  $\phi 50 \times h20(\text{mm})$ 인 경우 한계반경( $X_R$ )은 1.24이다.(Fig. 8 (c)) 위 결과는 한계반경은 직경이 증가함에 따라 증가함을 나타낸다. 전술한 바와 같이 한계반경( $R_{cr}$ )은 기공이 없는 원형영역의 반경을 나타내므로, 한계반경의 증가는 액상편석의 영향을 현저하게 받는 부위의 면적이 감소함을 나타낸다. 따라서, 시편의 직경의 증가와 더불어 액상편석 현상이 감소됨을 관찰 할 수 있었다.

3.3 시편높이의 변화가 액상편석에 미치는 영향  
 시편의 높이변화가 반응용재료의 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 크기가 각각  $\phi 20 \times h20(\text{mm})$ ,

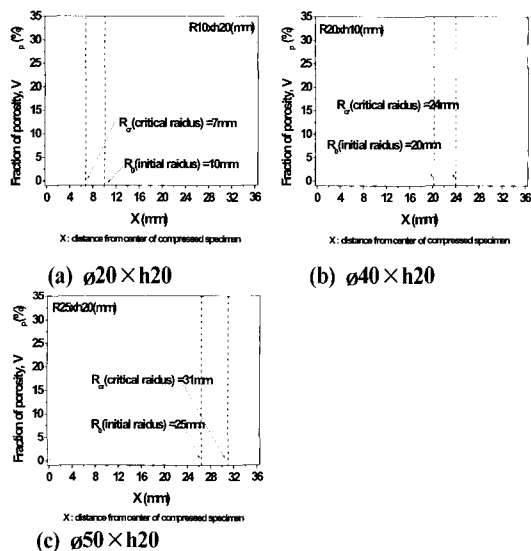


Fig. 7 Porosities( $V_p$ ) vs distance( $X$ ) along the radius of a specimen of A356 with a variety of specimen diameter( $\dot{\epsilon}=5\text{sec}^{-1}$ ,  $R_h=60\%$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $X(\text{mm})$ : Distance from center of specimen after compression test)

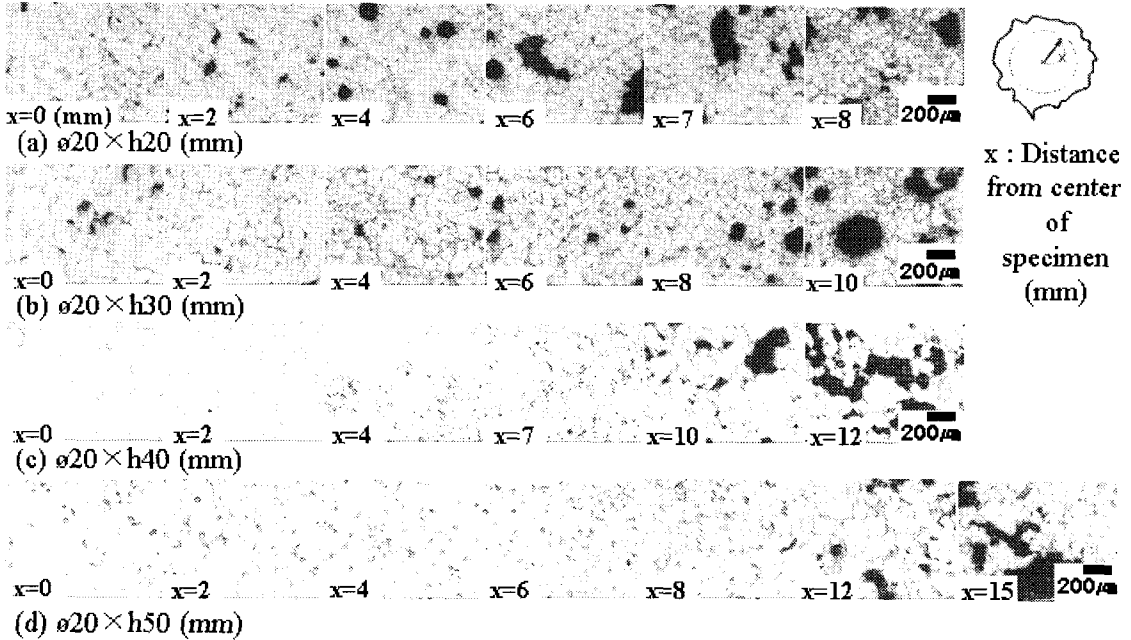


Fig. 10 Micrographs of specimens tested at same punch velocity with a variety of specimen height ( $V_p=100\text{mm/sec}$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h=80\%$ )

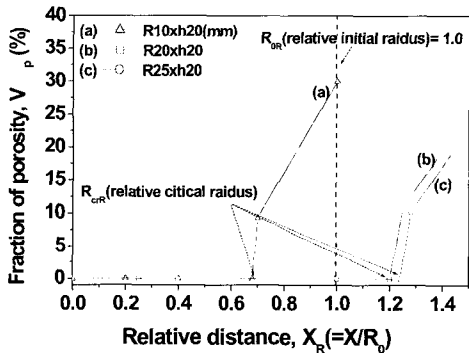


Fig. 8 Porosities( $V_p$ ) vs relative distance( $X_r$ ) along the radius of a specimen compressed for variation of specimen diameter at a strain rate of  $5\text{sec}^{-1}$  ( $R_h=60\%$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ )

$\phi 20 \times h30$ ,  $\phi 20 \times h40$ ,  $\phi 20 \times h50$ 인 시편들을  $R_h$ (height reduction)=80%,  $V_p=100\text{mm/sec}$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ 에서 압축하였다. Fig. 9는 압축후 시편면의 거시적 조직 사진을 나타내고 있다. Fig. 9 (a)~(d) 내의 좌측 사진들은 반응용 압축시험 중 발생하는 재료의 표면균열 현상을 관찰하기 위해 나타낸 것이고, 우측사진들은 기공의 분포를 관찰하기 위해 나타낸 것이다. Fig. 9 (a)~(d)에서 보여주시는 원은 시편의 초기직경을 나타낸다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times$

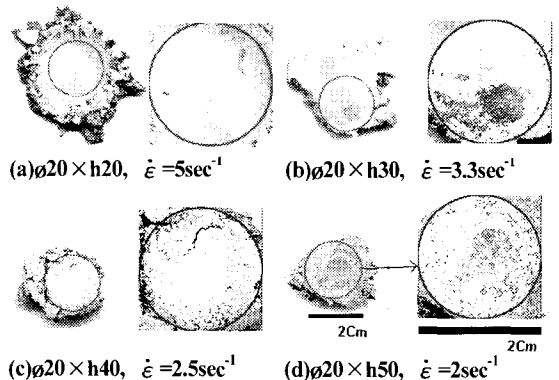


Fig. 9 Macrographs of specimens tested at same punch velocity for variation of specimen height ( $V_p=100\text{mm/sec}$ ,  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h=80\%$ )

$h20(\text{mm})$ 인 경우는 다른 시편들에 비해 표면균열 현상과 기공이 매우 적음을 알 수 있다.(Fig. 9 (a)) 시편의 크기가  $\phi 20 \times h30(\text{mm})$ 인 경우는 표면균열 현상에 의해 표면부의 1/3 가량이 떨어져 나갔으며 미세한 기공이 관찰되고 있다.(Fig. 9 (b)) 시편의 크기가  $\phi 20 \times h40$ ,  $\phi 20 \times h50(\text{mm})$ 인 경우에는 표면균열 현상에 의한 거시적 분리 현상이 현저히 발생되었으며, 기공의 분포영역이 증가하였음을 Fig. 9(c), (d)에서 알 수 있다. 위 결과는 시편의 높이가 높아질수록 표면균열현상이 증가된다는 것을 나

타내고 있다.

Fig. 10은 표면부와 중심부의 조직 및 액상분포의 차이를 조사하기 위하여 압축 시편의 중심부에서 원주방향으로 약 2mm간격으로 미세조직을 기록한 것이다. X값은 시편의 중심에서 관찰위치까지의 거리를 나타내고 있다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h40$ (mm),  $\phi 20 \times h50$ (mm)인 경우  $\phi 20 \times h20$ (mm),  $\phi 20 \times h30$ (mm)의 미세조직사전에 비하여 현저하게 변형된 고상입자, 불균일한 액상-고상영역의 분포 및 많은 기공등이 관찰되었다. 또한  $\phi 20 \times h40$ (mm),  $\phi 20 \times h50$ (mm)의 미세조직사전에서는 고액공존영역의 경계가 비교적 뚜렷하게 관찰되었다. 위의 원인은 압축도중에 발생한 변형률속도( $=V_p/H_0$ )의 감소현상과 버클링 등이 발생하여 시험편 중앙부분에서 충분한 치밀화가 발생하지 못했기 때문이다.

Fig. 11은 시편중심부로부터의 거리(X)의 변화에 따른 기공률의 변화를 나타낸 곡선이다. 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm),  $\phi 20 \times h30$ ,  $\phi 20 \times h40$ ,  $\phi 20 \times h50$ 인 시편의 X=8mm위치에서의 기공률은 각각 0, 3, 6, 15 %이다. 이 결과는 시편의 높이가 높을수록 기공이 증가된다는 것을 나타낸다.

또한, 시편의 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm),  $\phi 20 \times h30$ ,  $\phi 20 \times h40$ ,  $\phi 20 \times h50$ 일 때 한계반경은 각각 11, 9, 0, 0이다. 시편의 높이가 높을수록 한계반경( $R_c$ )이 감소하고 있는데, 한계반경의 감소는 액상편석의 영향을 받는 시편의 결합 부위가 증가하는 것을 나타낸다. 따라서 시편의 높이가 높을수록 액상편석이 시편에 미치는 영향이 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 12는 시편의 높이변화에 따른 응력과 변형을 관계를 나타낸 것이다. 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm)인 시편의 경우 변형률  $\epsilon = 0.1$  까지는 펀치에 접촉된 부분의 고상입자의 변형에 의해 응력이 증가하고 있다. 변형률  $\epsilon = 0.1$  이상부터는 고상입자와 액상영역의 유동이 동시에 시작되면서 변형률의 증가와 더불어 응력이 감소하고 있다. 본 실험에서는 변형률의 증가와 더불어 응력이 감소하기 시작하는 변형률을 임계변형률( $\epsilon_{cr}$ )로 정의하였다. 변형률  $\epsilon = 0.13$  이상에서는 액상영역의 유동과 고상입자의 재배열이 동시에 일어나 변형률의 증가와 더불어 응력이 10Mpa 정도로 일정하게 유지되고 있으며, 변형률  $\epsilon = 0.4$  이상에서는 재료가 치밀화되어 고상입자의 소성변형과 압축변형에 의한 저항으로 응력이 증가하고 있다.(Fig. 12 (a)) 시편의 크기가  $\phi 20 \times h30$ (mm)인 경우는 Fig. 12 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 시편의 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm)인 경우에 비해 낮은 응력값을 나타내고 있다.

위의 원인은 시편의 높이증가에 따라 변형률속도가 감소되었기 때문이다. Fig. 12 (c)와 Fig. 12 (d)의 응력-

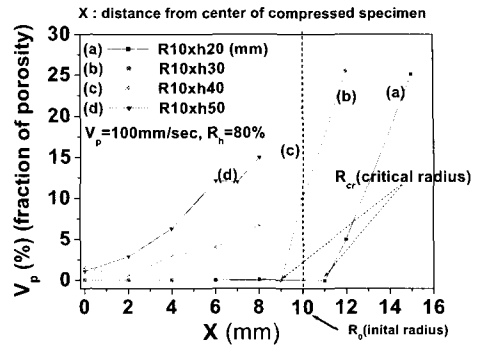


Fig. 11 Fraction of porosity vs distance along the radius of a specimen compressed for variation of specimen height ( $V_p=100$ mm/sec,  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h=80\%$ )

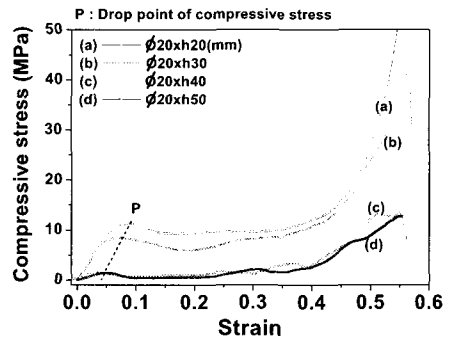


Fig. 12 Relationship between stress and strain of specimen tested for variation of height ( $V_p=100$ mm/sec ( $\dot{\epsilon}=2\sim 5\text{sec}^{-1}$ ),  $T=578^\circ\text{C}$ ,  $R_h=80\%$ )

변형률 곡선은 시편의 크기가  $\phi 20 \times h40$ (mm)와  $\phi 20 \times h50$ (mm)인 경우에 시편의 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm)와  $\phi 20 \times h30$ (mm)인 경우에 비해 현저하게 낮은 응력값을 나타냄을 보여주고 있다. 위의 원인은 시편의 높이증가에 따른 변형률속도의 감소현상 뿐만 아니라 버클링이 발생되었기 때문으로 사료된다. 위의 결과로부터 시편의 높이가 높을수록 변형률의 감소현상 및 버클링에 의해 액상과 고상의 분포가 불균일 해지고 액상편석에 의해 발생된 기공이 증가되며 응력이 감소한다는 것을 알 수 있었다.(Fig. 10, Fig. 12) 또한, Fig. 12은 시편의 높이변화에 따라 임계변형률( $\epsilon_{cr}$ )이 변화한다는 것을 보여주고 있다. 시편의 크기가  $\phi 20 \times h20$ (mm),  $\phi 20 \times h30$ ,  $\phi 20 \times h40$ ,  $\phi 20 \times h50$ 일 때 임계변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 각각 0.1, 0.08, 0.05, 0.04로써, 높이가 높아질수록 임계변형률( $\epsilon_{cr}$ )은 감소하였다. 위의 원인은 펀치와 접촉된 시편부위는 펀치와 소재사이의 열전도현상 때문에 냉각속도가 증가되었기 때문이다.<sup>(10)</sup> 본 실험에서는 시편직경을 일정하게 하고 시편의 높이만을 변화시켰기 때문에 펀치와 접촉된 부분의

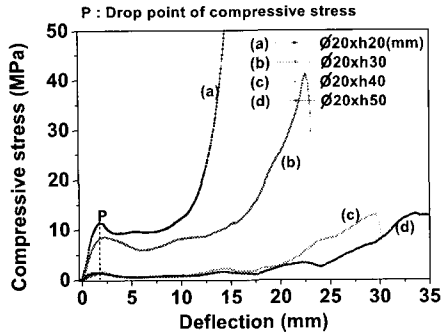


Fig. 13 Relationship between stress and deflection of specimen tested for variation of height ( $V_p=100\text{mm/sec}$  ( $\dot{\epsilon}=2\sim 5\text{sec}^{-1}$ ),  $T=578\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $R_s=80\%$ )

결과는 변하지 않았다. 따라서, 응력의 감소현상은 시편의 높이변화에 관계없이 일정한 변위부터 발생함을 예측할 수 있었다. Fig. 13은 시편의 높이변화에 따른 반응용 압축시험 결과를 응력-변위 곡선으로 나타낸 것이다. 액상편석에 의한 응력의 감소현상은 시편의 높이에 관계없이 변위가 약 2mm 일 때 발생하고 있다.

#### 4. 결론

온도, 변형률속도 및 시편의 크기를 고려한 반응용 재료의 압축시 변형거동 조사를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 반응용재료의 압축시험시 시편의 온도가 높을수록 액상영역이 증가하여 압축응력은 감소하였으며, 반응용 재료의 변형거동은 578°C의 조건에서 잘 관찰되었다.

(2) 동일한 압축속도에서 시편의 치수비(높이/직경)가 감소할수록 시편의 표면균열현상, 기공발생부위의 면적 및 기공의 양이 감소하였다..

(3) 동일한 압축속도에서 시편의 치수비(높이/직경)가 증가할수록 시편의 표면균열현상, 기공발생부위의 면적 및 기공의 양이 증가하였으며 변형률속도의 감소 효과 및 액상편석에 의해 유동응력은 감소하였다.

(4) 변형률의 증가와 더불어 응력이 감소하는 현상이 시작되는 임계변형률( $\epsilon_c$ )은 시편과 편치의 접촉면적의 큰 영향을 받았다.

#### 참 고 문 헌

(1) 정경득, 강충길, 2000, "반응용 합금의 압축공정에서 다단 속도 제어가 액상편석에 미치는 영향", 한국소성가공학회지, 제 9권, 제 7호, pp. 706~715.

(2) Suery, M., Flemings, M.C., 1982, "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-solid Dendritic Alloys", Metall. Trans., Vol. 13A, pp. 1809~1819.

(3) Loue, W.R., Suery, M., Quербes, J.L., 1992, "Microstructure and Rheology of Partially Remelted AlSi Alloys", Proc. 2nd Int. Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, MIT, USA, pp. 266~275.

(4) Yoshida, C., Moritaka, M., Shinya, S., Takebayashi, K., Nanba, 1992, "Semi-solid Forging of Aluminium Alloys", Proc. of 2nd Int. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, S.B. Brown, M.C. Flemings(eds), MIT, pp. 95~102.

(5) Pinsky, D.A., Charreyron, P.O., Flemings, M.C., 1984, "Compression of Semi-Solid Dendritic Sn Pb Alloys at Low Strain Rates", Metal. Trans., 15B, pp. 173~181.

(6) Kang, C.G., Jung, G.D., 2001, "Improvement of the Liquid Segregation Phenomena of Semisolid Aluminium Alloys by the Multistage Strain Rate Control in the Compression Test", J. Mater. Eng. and Perfor., Vol. 10(No. 4), pp. 419~428.

(7) Valencia, J.J., Friedhoff, T.G., Creeden, T.P., and Cardarella, J.J. 1998, "Microstructural Evaluation of Rapidly Heated Aluminium A356 Alloy Billets", Proc. of 5th Int. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, eds. by A.K. Bhasin, J.J. Moore, K.P. Young, S. Midson, Golden. Colorado School of Mines, June 23 25th, pp. 397~404.

(8) Chen, C.P., Tsao, C.Y., 1996, "Semi solid deformation of A356 Al alloys, Proc. of 4th Int. Conf. on Semi solid Processing of Alloys and Composites, eds. by Kirwood, D.H. and Kapranos, P., University of Sheffield, England, June 19 21th, pp. 16~20.

(9) Althix Billets, Aluminium Pechiney, 1996.

(10) Kang, C.G., Choi, J.S., and Kim, K.H., 1999, "The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy", J. of Mater. Process. Technol., Volume 88, Issues 1-3, April 15, pp. 159~168.