

고액공존재료의 변형거동에서 재료의 크기가 액상편석에 미치는 영향

윤성원*(부산대 대학원 기계공학부), 서판기*, 강충길**(부산대 기계공학부)

The Effect of Test Piece Size on Liquid Segregation in deformation Behavior in Mushy state Material

S. W. Youn(Mech. & Precision Eng. Dept., PNU), P. K. Seo, C. G. Kang(Mech. Eng. Dept., PNU),

ABSTRACT

For the optimal net shape forging of semi-solid materials (SSM), it is important to predict the deformation for variation of strain rate. It should be necessary to conduct a formation of stress-strain curve in semi-solid alloys for analysis of the thixoforming process. Particularly, important problem to application of computer aided engineering in SSM processing is to prevent a segregation of liquid component during compression process. The liquid segregation is studied as multistage change of the strain rate and test piece size to prevent the liquid segregation during the compression process. The compression test for semi-solid aluminium alloy with a controlled solid fraction is performed by dynamic material test system with a furnace. Moreover morphology of structure and fraction of pore are investigated through compression test.

Key Words : Liquid segregation(액상편석), Test piece size(시편크기), Compression test(압축실험), Mushy state(반용융상태)

1. 서론

반용융 가공은 용점보다 낮은 온도에서 조업을 하므로 응고시간이 짧아 수축결함이 작고 에너지 및 조업시간 절감효과도 크며 성형하중이 감소된다는 이점이 있다. 또한 구상화조직상태에서 제품을 제조하기 때문에 편석, 기공등을 감소시킬 수 있고 변형저항이 작아 적은 하중으로도 가공한계성을 증대시킬 수 있다. 반용융 성형기술은 알루미늄을 재활용할 수 있는 환경친화적 성형기술로 자동차 산업뿐만 아니라 다양한 산업분야로 그 적용영역이 넓어지고 있다. 반용융성형시 액상편석은 제품의 결함을 야기시켜 강도저하의 원인이 되고 있다. 액상편석 제어에 관한 연구로서 Suery등⁽¹⁾은 반용융상태의 Sn-15%Pb합금을 이용하여 변형율 속도에 대한 액상편석의 정도를 파악하여 낮은 속도보다 높은 속도로 압축할 때 더 균일하게 변형한다고 보고하고 있다.

Yoshida등⁽²⁾은 Al-4.5%Cu합금의 단조시 램의 속도가 낮을 때 액상편석이 증가하였으며 속도가 클수록 액상편석이 감소한다고 보고하였다. Pinsky⁽³⁾등은 Sn-Pb합금의 반용융 상태에서 압축과 링압축 실험을 통해 다이와 재료간의 마찰이 클수록 액상편석이 증

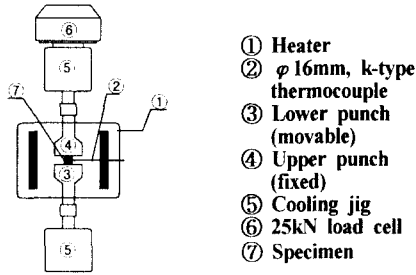
가한다고 하였다. 강⁽⁴⁾등은 성형중 액상편석을 방지하기 위하여 압축실험 중 속도제어 실험을 통하여 변형율이 증가함에 따라서 응력이 증가되도록 다단 속도제어실험 방법을 제시하였다. 반용융재료는 압축성형시 고상과 액상영역의 분리현상 때문에 응력-변형을 곡선에서 나타난 바와 같이 응력강하현상을 보이는데 이는 기공결함과 불균일한 고상을 분포의 원인이 되므로 반용융 재료의 변형시 발생하는 액상분리의 방지는 아주 중요하다. 지금까지 반용융 소재의 변형거동 연구에서는 실제 조업에 쓰이는 빌렛보다도 훨씬 작은 시편을 사용하였기 때문에 시편의 치수변화가 반용융재료의 변형거동에 미치는 영향을 고려하지 못하였다. 본 연구에서는 반용융 단조공정에서 가장 중요한 변수중의 하나인 압축속도의 변화와 시편의 크기가 액상편석에 미치는 영향을 파악하기 위하여 압축실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 압축실험

본 실험에서 사용한 반용융재료는 프랑스 페시니사에서 전자기식 교반(Electro-magnetic stirring)에 의

해 제조한 A356이다. 25kN MTS에 전기로를 부착하여 원하는 고상율의 온도까지 상승시켜 압축시편의 변형률 속도별, 직경별, 높이별 압축실험을 행하였다.



- ① Heater
- ② ϕ 16mm, k-type thermocouple
- ③ Lower punch (movable)
- ④ Upper punch (fixed)
- ⑤ Cooling jig
- ⑥ 25kN load cell
- ⑦ Specimen

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus

변형률 속도($\dot{\epsilon} = V_p/h_0$) 변화에 따른 압축실험은 ϕ 20 \times h20(mm)의 시편에 대해 고상율(f_s) 50% ($t=584^\circ\text{C}$)에서 $\dot{\epsilon} = 5\text{sec}^{-1}$ ($V_p=100\text{mm/sec}$), 25sec^{-1} ($V_p=500\text{mm/sec}$), 40sec^{-1} ($V_p=800\text{mm/sec}$), 45sec^{-1} ($V_p=900\text{mm/sec}$)의 속도로 실험을 하였다. 시편직경 (ϕ 20 \times h20(mm), ϕ 30 \times h20, ϕ 40 \times h20, ϕ 50 \times h20)에 있어서는 변형률 속도, 높이감소율, 고상율이 각각 $\dot{\epsilon} = 5\text{sec}^{-1}$, $R_h=60\%$, $f_s=50\%$ 에서 압축실험을 행하였다. 시편높이(ϕ 20 \times h20(mm), ϕ 20 \times h30, ϕ 20 \times h40, ϕ 20 \times h50)에 있어서는 편차속도, 높이감소율, 고상율이 각각 $V_p=100\text{mm/sec}$, $R_h=80\%$, $f_s=55\%$ 에서 압축실험을 행하였다. 소재의 조직을 구상화로 만들기 위해 시편이 원하는 고상율에 도달하고 나서 15분동안 유지한 후 압축실험을 수행하였으며 그 때의 조직을 관찰하기 위해 급냉하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 변형률속도 변화에 따른 압축실험

Fig. 2 는 $\dot{\epsilon} = 5, 25, 40, 45\text{sec}^{-1}$ 일 때의 시편을 각각 4등분한 후 거시적으로 관찰한 사진이다.

사진 안의 \downarrow 크기의 원은 시편의 초기크기를 나타내는데 기공발생 위치를 알기 쉽게 하기 위해서 표시하였다. \downarrow 원을 기준으로 보면 변형률 속도가 5sec^{-1} 인 경우에는 기공은 시편 중심과 원주의 중간 정도 위치에서 밴드를 형성하고 있다. 변형률 속도가 $25\sim 40\text{sec}^{-1}$ 인 경우에는 기공의 밴드가 원주쪽으로 이동하였고 45sec^{-1} 에서는 기공의 밴드가 \downarrow 원을 완전히 벗어났다. 따라서 변형률 속도가 증가할수록 기공이 없는 영역이 넓어짐을 알 수 있었다. 이것은 다이속도가 빠를수록 액상과 고상이 같이 빠르게 자유표면 쪽으로 유동하여 내부에는 고상이 균일하게 분포되어 거시적인 분리가 작아지는 것으로 추정된다. 따라서 반응용 재료의 열세팅시에 액상영역의 유동으로 인하여 표면이 분리되어 지므로 폐쇄기공

형태로써 가공을 하면 액상영역들이 자유표면쪽으로 유동이 불가능해지므로 기공을 매워주는 역할을 하게 되어 가공시에 문제가 되는 표면결함들을 제거해 줄 것으로 생각된다.

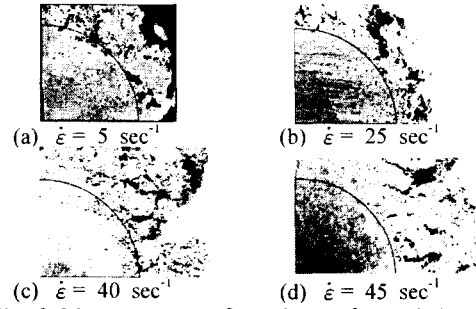


Fig. 2 Macrostructure of specimens for variation of specimen strain rate ($\phi \times h=20 \times 20(\text{mm})$, 584°C)

Fig. 3(a) 은 Fig. 2의 시편들의 미세조직 사진인데 정량적 해석 장비를 이용하여 시편중심부에서 바깥쪽으로 약 6mm 간격으로 촬영한 것이다.

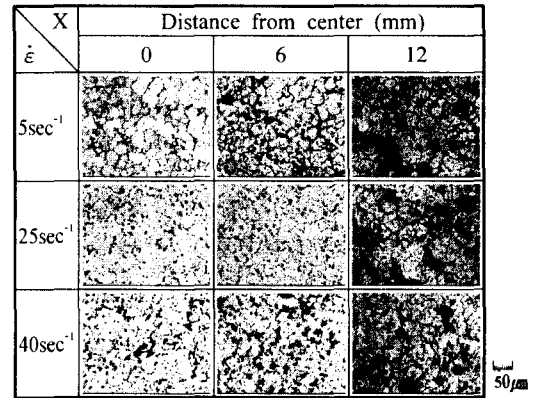


Fig. 3(a) Microstructure of specimens after compression for variation of strain rate

모든 압축시편은 중심부는 심하게 소성변형된 조직을 나타내고 있고 원주방향으로 갈수록 미 변형된 재가열 조직을 나타내고 있다. 이것은 압축실험시 구속이 없는 쪽으로 액상이 이동하기 때문이다. 기공의 측면에서 $\dot{\epsilon} = 5\text{sec}^{-1}$ 일 경우와 $\dot{\epsilon} = 25\text{sec}^{-1}$ 일 경우를 비교해 보면 시편중심부에서는 큰 차이가 나타나지 않는다. 그러나 시편중심부에서 멀어질수록 기공분율이 높아지고 기공의 크기도 커짐을 알 수 있었다. Fig. 3 (b)는 기공도를 Fig. 3 (a)의 조직사진의 기공율을 측정된 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 시편중심부에서 거리에 따라 기공도가 변화하는 양상을 보이므로 시편중심에서 원주방향으로의 거리(mm)대 기공분율의 그래프로 나타내었다. Fig. 3 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 변형률 속도가 높을수록 기공분율이 낮아짐을 알 수 있다

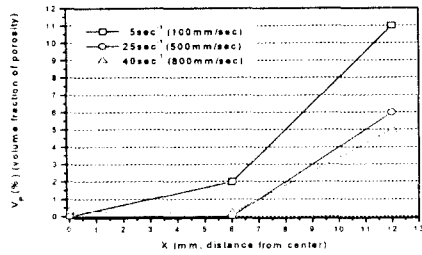


Fig. 3(b) V_p - X curve after compression for variation of strain rate ($\phi 20 \times h20$ (mm), 584°C)

Fig. 4는 변형율속도의 변화에 따른 응력과 변형율의 관계를 나타낸 것이다. 변형율 약 0.1 부근에서 응력이 감소하다가 다시 응력이 증가하는데 이 현상은 반응용 재료의 변형특성으로 고상과 액상의 분리현상에 의해 초기에는 조직의 치밀화 및 액상의 유동을 유발시키기 위하여 하중이 증가하지만 고상과 액상간의 분리현상 때문에 시편표면에서는 균열이 발생하여 하중이 감소하고 재료의 조직이 치밀화 되면서 고상영역이 소성변형 하면서 하중이 증가하는 것으로 사료된다

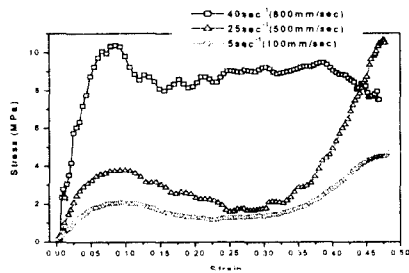


Fig. 4 Stress-strain curve for variation of strain rate

3.2 시편직경 변화에 따른 압축실험

Fig. 5는 직경의 변화에 따른 압축실험 결과를 나타낸 것이다.

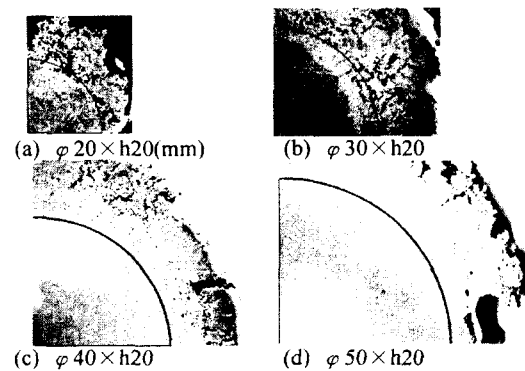


Fig. 5 Macrostructure of specimens for variation of specimen diameter ($\dot{\epsilon}=5\text{sec}^{-1}$, 584°C , $R_h=60\%$)

직경이 커짐에 따라 내부의 기공이 점점 감소되고 기공이 없는 영역이 점점 넓어짐을 알 수 있다. 시편사진에 있는 1 원은 시편의 초기 크기를 나타내

는데 Fig. 5(a), (b)일 때에는 시편의 원주부근에서부터 기공이 급속히 증가되지만 직경이 높이의 2배 이상인 Fig. 5(c), (d)에서부터는 초기 시편의 반경 원보다도 더 바깥쪽에서부터 기공이 증가되고 있다. 시편의 높이가 일정한 경우 직경이 커질수록 기공의 수와 크기가 현저히 줄어들음을 알 수 있었다.

Fig. 6 (a)는 압축실험후 시편의 중심부로부터 원주방향으로 6mm간격으로 촬영한 미세조직 사진을 나타낸 것이다. 중심부는 심하게 소성변형된 조직이고 원주방향으로 갈수록 미 변형된 재가열 조직을 나타내고 있다. 결정립 크기는 약 $20\sim 30\mu\text{m}$ 정도였고 구상화된 α 고용체 내의 흑색의 구상은 θ 상(CuAl_2)으로 사료된다. 기공의 측면에서 관찰하면 시편이 클수록 기공함량이 감소함을 알 수 있었다.

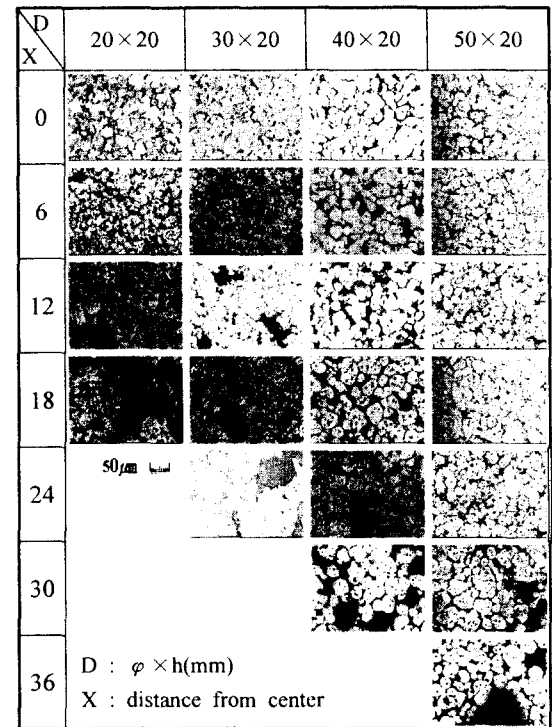


Fig. 6(a) Microstructure of specimens after compression for variation of specimen diameter

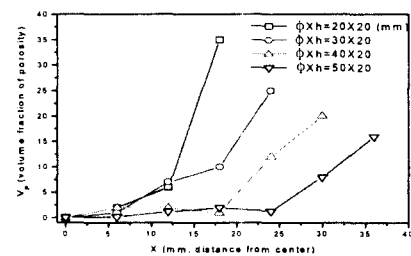


Fig. 6(b) V_p - X curve after compression for variation of specimen diameter ($\dot{\epsilon}=5\text{sec}^{-1}$, 584°C)

Fig. 6 (b)는 Fig. 6 (a)의 조직사진의 기공율을 그래프로 나타낸 것이다. 직경이 증가함에 따라 기공분율이 감소하고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 직경별 압축실험에 대한 응력과 변형률 관계를 나타낸 것이다. 직경의 증가에 따라서 가압하중은 증가하였으나 응력으로 환산했을 때 오히려 감소하고 있음을 알 수 있었다. 변형률 0.1까지는 시편의 크기변화에 따른 응력변화가 크게 나타나지 않다가 변형률 0.1 이후부터는 응력이 크게 증가하고 있다. 위의 현상은 압축성형시 시편의 크기가 큰 경우는 기공발생현상이 적어 소재와 다이사이의 마찰계수가 급격히 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 속도의 변화에 따른 압축실험에서와 마찬가지로 변형률이 약 0.1 부근에서 응력이 감소하다가 다시 응력이 증가하는 반응용 재료의 변형특성을 보여주고 있다.

또한 미소하지만 직경이 증가하면서 응력 강하점이 우측으로 이동하는 결과를 보이고 있다.

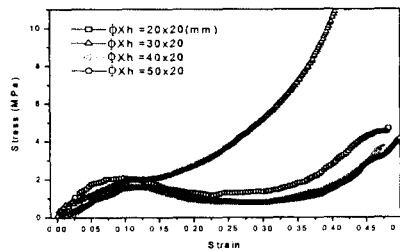


Fig. 7 Stress-strain curve for variation of specimen diameter

3.3 시편높이 변화에 따른 압축실험

Fig. 8는 시험편 크기가 각각 $\phi 20 \times h20$, $\phi 20 \times h30$, $\phi 20 \times h40$, $\phi 20 \times h50$ 인 시편들을 $V_p=100$ mm/sec의 속도로 동일한 높이 감소율(80%)만큼 압축한 후의 조직 사진을 나타낸 것이다. 사진내의 원은 시편의 초기크기를 나타낸다. 시편높이가 높아질수록 내부에 기공이 증가함을 알 수 있다. 이것은 변형률속도의 정의($\dot{\epsilon} = V_{dis}/h_0$)에 따라 시편높이의 증가에 따라 변형률속도가 낮아지기 때문으로 사료된다.



(a) $\phi 20 \times h20$ (b) $\phi 20 \times h30$ (c) $\phi 20 \times h40$ (d) $\phi 20 \times h50$
 $\dot{\epsilon} = 5 \text{sec}^{-1}$ $\dot{\epsilon} = 3.3 \text{sec}^{-1}$ $\dot{\epsilon} = 2.5 \text{sec}^{-1}$ $\dot{\epsilon} = 2 \text{sec}^{-1}$

Fig. 8 Macrostructure of specimens for variation of specimen height ($V_p=100$ mm/sec, 576°C , $R_f=80\%$)

Fig. 9는 시편의 높이변화에 따른 응력과 변형률 관계를 나타낸 것이다. 펀치속도가 일정할 때 높이가 높아질수록 응력이 낮아지고 있고 시편의 높이가

직경의 2배이상인 경우 응력이 급속히 감소하였다. 위의 원인은 변형률속도의 감소효과와 소재와 다이사이의 접촉효과의 차이 때문인 것으로 사료된다. $\phi 20 \times h20$ 의 경우는 변형률 약 0.1부근에서 응력강하가 일어났지만 높이가 높아질수록 점점 낮은 변형률값에서 응력강하가 발생하고 있었다.

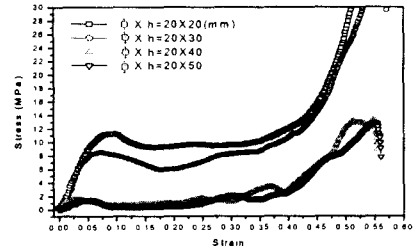


Fig. 9 Stress-strain curve for variation of specimen height

4. 결론

반응용 Al재료의 압축성형시 변형률 속도, 높이, 직경변화를 고려한 변형거동 조사를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 변형률속도와 시편의 크기가 증가할수록 내부의 기공은 감소되는 경향을 보였다.
- (2) 시편의 직경이 커질수록 기공이 시편전체에 걸쳐 감소하였고 최고 응력점에 대응하는 변형률의 값이 오히려 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 시편의 높이가 높아질수록 변형률속도의 감소 효과에 의해 낮은 응력값이 얻어졌으며 최고응력점에 대응하는 변형률의 값이 감소함을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. Suery, M., Flemings, M.C., "Effect of Strain Rate on Deformation Behavior of Semi-solid Dendritic Alloys", Metall. Trans., Vol. 13A, pp.1809-1819, 1982.
2. Yoshida, C., Moritaka, M., Shinya, S., Takebayashi, K., Nanba, A., "Semi-solid Forging of Aluminium Alloys", Proc. of 2nd Int. Conf. on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Cambridge MA, April, 1992, Brown, S. B., Flemings, M.C., eds., MIT, Cambridge MA, 1992, pp.95-102.
3. Pinsky, D.A., Charreyron, P.O., Flemings, M.C., "Compression of Semi-Solid Dendritic Sn-Pb Alloys at Low Strain Rates", Metal. Trans., 15B, pp.173-181, 1984.
4. Kang, C.G., Jung, G.D., "Improvement of the Liquid Segregation Phenomena of Semisolid Aluminium Alloys by the Multistage Strain Rate Control in the Compression Test", J. Mater. Eng. and Perform., Vol. 10, No. 4, pp.419-428, 2001.