

논문

경량합금 반응용 압출 기술 개발 - Part 1. 반응용 압출을 위한 조직제어

김세광[†] · 윤영옥 · 장동인 · 조형호

한국생산기술연구원

Development of Thixoextrusion Process for Light Alloys - Part 1. Microstructural Control of Light Alloys for Thixoextrusion

Shae K. Kim[†], Young-Ok Yoon, Dong-In Jang, and Hyung-Ho Jo

Adv. Mater. Div., Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

Abstract

The study for thixoextrusion process of 7075, 7003 Al wrought alloys and AZ31 Mg wrought alloy was carried out with respect to reheating rate, isothermal holding temperature and time with an emphasis to the effect of homogenization on thixotropic microstructures during the partial remelting, especially in the low liquid fraction ($f_L < 0.2$). The liquid fraction and average grain size with respect to reheating profile such as reheating rate, isothermal holding temperature and time were almost uniform. It is considered very useful for thixoextrusion in terms of process control such as billet temperature control and actual extrusion time. Microstructural controls of 7075, 7003 Al wrought alloys and AZ31 Mg wrought alloy before and after homogenization were available and thixotropic microstructures were obtained in both specimens.

Key words : Thixoextrusion, Reheating profile, Partial remelting, Microstructural evolution.

(Received August 9, 2006 ; Accepted October 10, 2006)

1. 서 론

Semisolid processing(S2P)는 종래의 가공법, 즉 완전 고체 상태를 취급하는 소성가공 또는 완전 액체상태에서의 주조가공과는 달리 고액 공존영역에서 금속 슬러리의 레올로지 및 텍소트로픽 특성을 이용하는 주조법이다[1,2]. 이중에서도 금속 슬러리의 텍소트로픽 성질을 이용하여 고액 공존영역에서 금속 재료를 성형하는 반응용 압출(thixoextrusion)에 대한 연구도 주목을 받고 있다[3-5].

반응용 압출법의 핵심 요소기술은 조직제어 기술, 금속 균일 가열하는 재가열 기술, 그리고 성형기술의 3가지로 대별되며, 재가열 과정에서 용질분포와 결정입도의 영향, 액상을 변화 과정과 입내액상의 조대화 과정, 고상입자의 형상변화 및 성장, 합제, 용질원소 재분배 과정등이 주요 변수가 된다.

반응용 압출법은 원소재를 고액 공존 영역으로 재가열하여 성형하는 공정으로, 우수한 품질의 제품을 제조하기 위해서는 압출시 반응용 빌렛의 원활한 유동 및 균일 변형을 위하여 재가열 빌렛 내에 존재하는 고상의 분율, 크기, 형상 등의 미세 조직을 성형에 적합하도록 제어하는 재가열 원소재의 조직 제어 기술 확보가 필수적이다. 아울러, 원소재 재가열시 가열온도,

가열시간 등의 재가열 조건이 적절하게 제어되지 않을 경우 원소재의 중심과 표면의 미세조직 차이가 유발되어 제품 특성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 따라서 최종 반응용 압출품의 품질 향상과 생산성 향상을 위해서는 원소재의 균일 재가열과 금속 재가열 기술의 확보가 요구된다[6-8].

반응용 조직제어 기술은 소정의 반응용 온도에서 고상과 액상이 공존하고 유지시간의 증가에 따라 액상율은 평형에 도달하며, 고상입자는 조대화하고 결정학적 방위에 따라 구형화하는 것은 자발적인 과정이라 할 수 있다[9,10].

반응용 슬러리의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 고상입자간에 액상성분이 존재하여 고상입자간의 결합력은 거의 없으며 따라서 거시적인 변형 유동에 대한 저항은 현저히 저하된다.
- 반응용 금속은 고상성분이 고르게 분산되어 있고 액상성분이 고상입자를 결합하게 되는 형태가 되어 외형의 변화없이 이송, 유지가 가능하다.
- 고상성분, 액상성분이 공존하여 양자의 계면에서 용융, 응고가 반복되고 활발한 확산이 일어나기 때문에, 용질 원소의 국부적인 농도는 계속 변화하며, 성형가공을 하였을 때 고상성분과 액상성분의 접촉조건, 형태가 계속 변화한다.

[†]E-mail : shae@kitech.re.kr

특히, 기존의 반응용 조직제어에 대한 연구들이 thixocasting에 주안점을 두어 주조용 합금에 대하여 고액상을 영역에서의 조직제어에 대하여 활발이 이루어져 왔으나, 반응용 압출의 개발을 위해서는 가공용 합금에 대한 저액상율($f_L < 0.2$) 영역에서의 조직제어 연구가 필수적으로 이루어져야 하며, 저액상율 영역에서의 유지온도 및 실질적인 압출 시간을 고려한 유지시간 동안에도 액상율 및 고상입자의 크기가 균일하게 유지 되어야 한다[11,12].

이러한 배경하에, 본 연구에서는 Al 합금 중 Al-Zn-Mg계 합금과 소성가공용 Mg 합금에 대하여 반응용 압출을 위한 조직제어시 조직전개에 미치는 유지온도, 유지시간, 재가열 속도 및 균질화 여부 등에 따른 액상을 변화, 고상형상 변화, 고상의 조대화 및 조직 변화를 관찰하고 원인을 규명하여 액상 및 고상 입자 크기가 균일하게 유지되는 재가열 조건을 확립하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 상용 A7003, A7075 합금과 AZ31 합금을 용해하여 200°C로 예열된 $\phi 52 \times 270$ mm 주철계 금형에 주입하여 빌렛을 제조하였다. 제조된 빌렛은 전기로에 삽입하여 A7003 합금은 480°C에서 8시간, A7075 합금은 480°C에서 24시간, AZ31 합금은 350°C에서 12시간동안 각각 균질화 처리를 하였다. 제조된 합금에 대하여 가열시 액상선 및 고상선 온도를 구하기 위하여 DSC로 열분석을 하였다. DSC 분석시 승온속도 10°C/분으로 행하여 얻은 액상선 온도를 Scheil 식에 넣어서 계산된 액상율 0.1, 0.2, 0.3인 온도에서 실험을 행하였다. 액상선 온도는 A7003 합금은 655°C, A7075 합금은 641°C, AZ31 합금은 644°C이다. 이후 반응용 조직 제어를 위해서 주조된 빌렛을 $\phi 48 \times 20$ mm로 가공 후 시편을 재가열 유도도로 장착하여 Scheil 식에 의한 액상율 0.1, 0.2, 0.3인 온도에서 유지시간을 0, 5, 10 및 30분으로 변화시켜 조직제어를 하였으며, 반응용 조직제어 후 시편은 수냉하였다. 유지시간을 최대 30분으로 제한한 이유는 본 연구의 목적이 반응용 조직 제어를 통한 반응용 압출 공정에서의 적용 가능성을 검토하는 단계이므로 유지시간을 30분까지 행하여 실질적인 반응용 압출 공정에서의 압출 시간을 고려하였기 때문이다.

반응용 압출을 위해서는 시편을 소정의 반응용 온도에서 가능한 단시간에 처리하는 것이 바람직하며, 또한 시편 전체에 균질한 반응용 조직을 얻어야만 한다. 따라서 반응용 조직전개에 대한 재가열 속도에 대한 영향을 알아보기 위하여 재가열 속도를 30, 60 및 100°C/분으로 변화시켰다. 또한 균질화 처리에 따른 반응용 조직전개의 특성을 관찰하고자 균질화 처리를 하지 않은 시편에 대해서도 반응용 조직제어를 하였다.

반응용 압출을 위한 원소재의 재가열시 양산화를 위한 최적화 조건은 재가열 시간과 재가열 온도의 오차를 최소화 시키는 것으로서 고주파 유도가열을 이용한 재가열은 이러한 조건을 모두 만족할 수 있어 양산화를 위하여 절대적으로 필요한 장치라 판단된다. 본 연구에서는 온도제어가 용이하며 빠른 시간내에 소재를 가열할 수 있는 30 kW 용량의 유도가열기를 사

용하였다. 유도가열기는 기존의 전기로에 비해 빌렛을 가열하는 시간이 짧으므로 산화막과 금형수명 단축을 유발하는 스케일링(Scaling)이 생성되는 시간을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 기존의 전기로에서 3~4%에 이르는 스케일링을 유도가열 방식을 이용함으로써 0.5%로 줄일 수 있다[13]. 재가열시 소재부위별 온도 편차를 알아보기 위하여 소재 중심부 및 표면부 4곳의 온도를 K-type 열전대로 측정하였다. 본 연구에 사용한 장비는 시편의 표면과 내부의 온도차가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 차 이내로 온도를 유지토록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유지시간의 영향

Fig. 1은 A7075 합금을 유지온도 622°C에서 유지시간을 0, 5, 10 및 30분으로 달리하여 얻어진 시편의 조직 사진이다. 등은 유지시간이 경과함에 따라 덴드라이트 조직이 점차적으로 구상화 되고 평균 고상입자 크기는 일정함을 알 수 있다. 유지시간 없이 수냉된 Fig. 1(a)에서도 입계 액상과 입내 액상이 모두 존재함을 볼 수 있으며, 유지시간 10 min 이후에는 고상입자의 구형화가 일어났으며, 입내 액상은 줄어들었고, 유지시간 변화에 따른 전체 적인 액상율은 거의 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 입내에 액상이 생기는 이유는 시편의 온도가 상승함에 따라 용질의 재분배가 일어나지만 결과적으로는 용질확산 속도가 느리기 때문에 입내의 용질 농도가 그 온도에서의 평형농도보다 높아져서 과열된 효과를 보이기 때문이다.

Fig. 2, 3 및 4는 각각 A7075, A7003 및 AZ31 합금의 각각의 온도에서 유지시간 변화에 따른 전체 액상율 및 고상입자 크기의 변화를 화상해석(Image-pro plus) 장치를 이용하여 정량화 한 것이다. Fig. 2(a)는 A7075 합금의 유지시간 변화에 따른 전체 액상율을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 유지온도 및 유지시간 변화에 따라 전체 액상율의 변화는 크지 않았다. 즉 유지온도 0분일 때, Scheil 식에 의해 계산된 액상율 0.1인 온도 609°C에서는 0.121, 0.2로 계산된 622°C의 온도에서는 0.137, 0.3으로 계산된 628°C에서는 0.149의 액상율을 나타내었다. Scheil 식에 의해 계산된 액상율과 실험에서 구해진 액상율과는 차이가 있으며, 이는 기본적으로 Scheil 식은 2원계의 고상내 무확산-액상내 확산의 기준에 의한 값으로 다원계에서 냉각과 유지시 고상의 확산과 액상의 균일화가 용이한 반응용의 경우 다르게 나타난다.

Fig. 2(b)는 A7075 합금의 유지시간 변화에 따른 고상입자의 크기 변화를 정량화하여 나타낸 것이다. 각각의 온도에서 유지시간 증가에 따른 고상입자의 크기는 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 유지시간이 경과함에 따라 덴드라이트 조직이 점차적으로 구상화 되고 고상입자의 평균 크기는 유지온도 622°C에서 유지시간이 0분에서 5분으로 증가하면 35.5에서 39.6 μm 으로 약간 증가하고 유지시간 30분에서는 39.3 μm 의 평균 고상입자 크기를 가졌다.

Fig. 3(a)는 A7003 합금의 유지시간 변화에 따른 전체 액상율을 나타낸 것이다. 유지온도 증가에 따라 전체 액상율은 약간 증가하고 있음을 볼 수 있다. 즉 Scheil 식에 의해 계산된

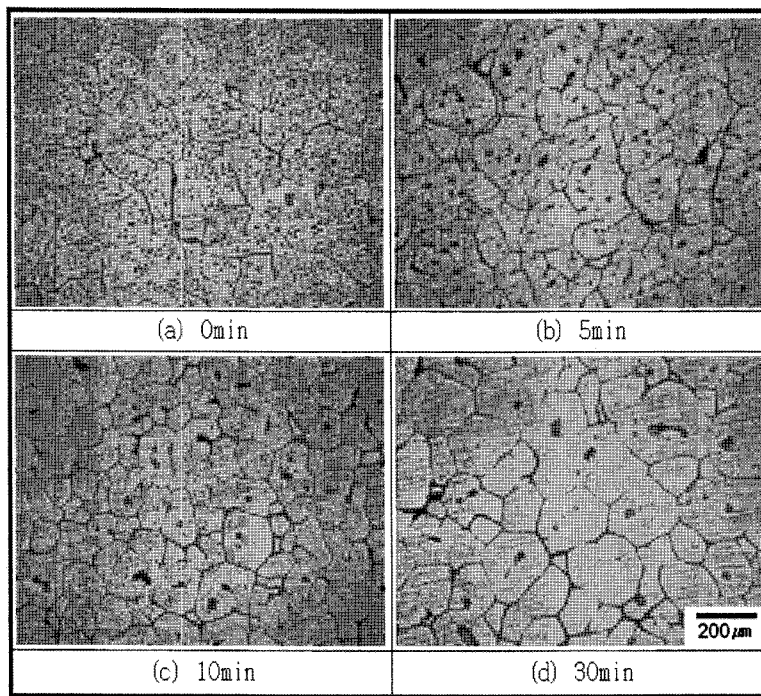
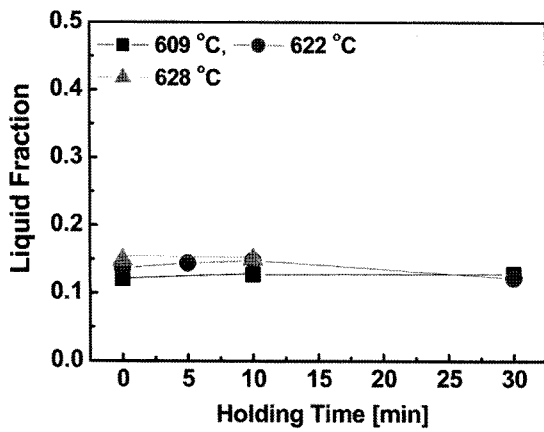
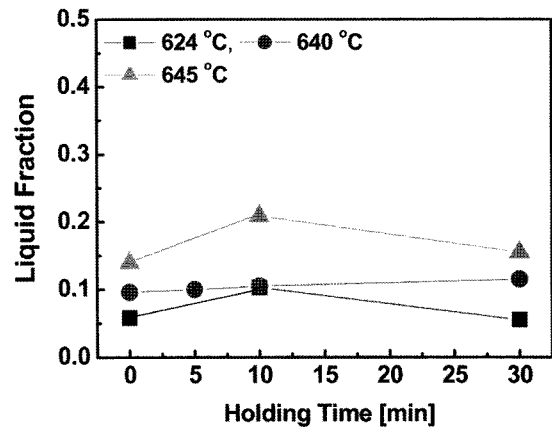


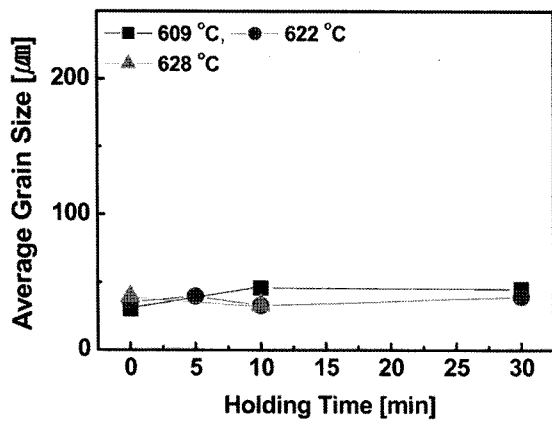
Fig. 1. As-quenched microstructures of 7075 Al wrought alloy after isothermal holding at 622°C.



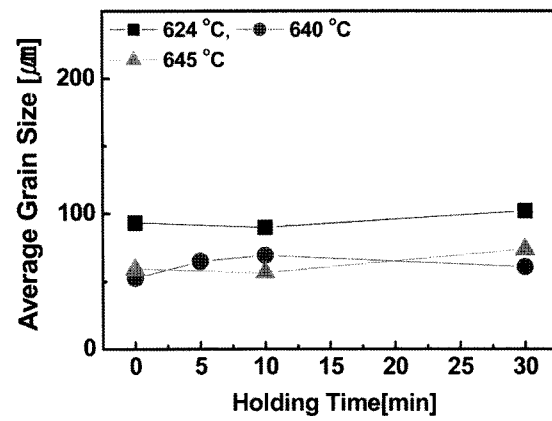
(a) total liquid fraction



(a) total liquid fraction



(b) average grain size



(b) average grain size

Fig. 2. Results of microstructural evaluation of 7075 Al wrought alloy after isothermal holding at the given temperature.

Fig. 3. Results of microstructural evaluation of 703 Al wrought alloy after isothermal holding at the given temperature.

액상율 0.1인 온도 624°C에서는 0.058, 0.2로 계산된 640°C의 온도에서는 0.096, 0.3으로 계산된 645°C에서는 0.14의 액상율을 나타내었다. 이때 용질원소의 농도가 높은 고상입계가 우선 액화되기 시작하였고, 유지온도가 증가하면 입계의 액상 증가와 더불어 고상의 부분적 구형화가 진행되었다. 또한, 공정상 및 고경각 결정입계와 용질과포화 영역등에서 선택적으로 부분용융이 일어나며, 온도가 증가함에 따라 수직상 가지의 합체와 대 곡률반경 영역에서 소 곡률반경 영역으로의 용질확산에 의한 고상입자의 구형화가 진행되었고, 전체 액상율은 증가하였다. 624°C와 645°C에서는 유지시간 증가에 따라 액상율은 10분에서는 유지시간 0분보다 약간 증가하였으며, 유지시간 30분에서는 약간 감소하는 경향을 보였다. 반면에 640°C에서는 유지시간 증가에 따른 액상율의 변화는 거의 일어나지 않았다.

Fig. 3(b)는 A7003 합금의 유지시간 변화에 따른 고상입자의 크기를 정량화 하여 나타낸 것이다. 각각의 온도에서 유지시간 변화에 따른 고상입자의 크기 변화는 크지 않음을 볼 수 있다.

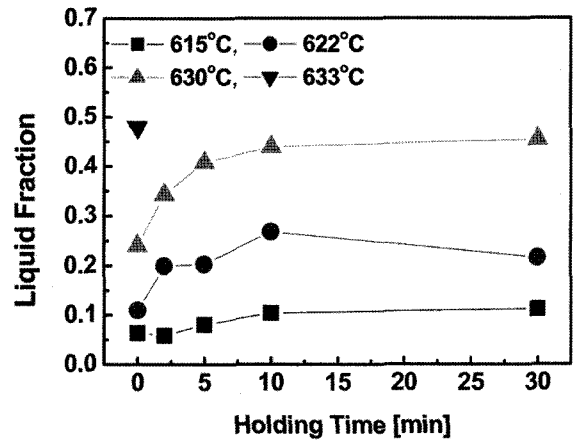
Fig. 4(a)는 AZ31 합금의 각각의 온도에서 유지시간 변화에 따른 전체 액상율을 나타낸 것이다. 유지온도에 따른 각각의 액상율은 유지온도 615°C에서는 0.064, 622°C에서는 0.11, 유지온도 630 및 633°C에서는 각각 0.24와 0.48의 액상율을 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 전체 액상율은 증가하였으며, 고상입자의 형상은 구형화 되었다.

각각의 온도에서 유지시간 0분일 때는 Scheil 식에 의해 계산된 액상율의 값과 유사하였지만, 유지시간 증가에 따라 액상율은 증가 하였으며, 유지시간 10분 이후 에는 액상율이 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.

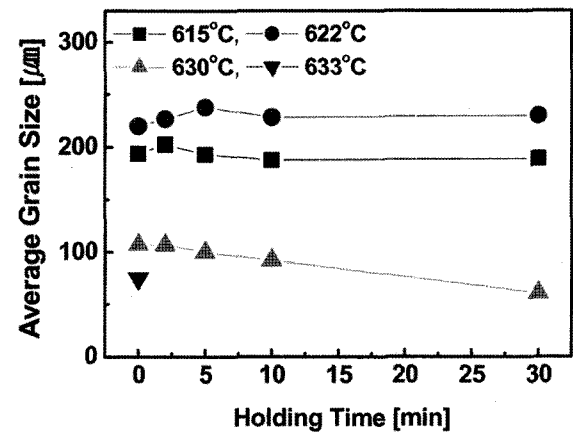
Fig. 4(b)는 AZ31 합금의 유지시간 변화에 따른 고상입자의 크기를 정량화하여 나타낸 것이다. 고상입자의 크기 변화는 유지시간 증가에 따라 약간 증가하였으며 유지시간 10분 이후에는 거의 일정한 값을 나타내었다. 유지온도 622°C에서 고상입자의 평균 크기는 유지시간이 0분에서 5분으로 증가하면 220에서 237.8 μm으로 증가하고 유지시간 10분에서는 228.5 μm이며 유지시간 30분에서는 230 μm로 일정한 평균 고상입자 크기를 나타내었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 유지시간 증가에 따른 전체적인 액상율의 변화는 크지 않음을 확인할 수 있으며, 이는 유지시간이 증가함에 따라 용융과 용질의 재분배 및 응고가 동시에 일어나고 A7075, A7003 및 AZ31 합금의 경우 유지시간이 길어짐에 따라 용융과 응고가 거의 평형을 이루기 때문에 액상율이 변하지 않은 것으로 사료된다.

이러한 유지시간 증가에 따른 평균 고상입자의 크기 및 액상율이 균일하게 유지되는 결과는 반응용 압출시 실질적인 압출 시간을 고려한다면 반응용 압출 적용에 매우 유용할 것으로 예상되며, 균일한 재료의 내부 조직을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 조직제어에 의하여 고상입자의 크기 및 액상율이 제어 가능하다는 것은 반응용 압출재의 고상의 크기 및 액상율을 제어할 수 있다는 측면에서 매우 중요하다. 특히, A7075 및 A7003 합금은 재가열 공정의 제어를 통해서 유지 온도 및 유지시간 변화에 따라 액상율을 0.2 이하로 제어함으



(a) total liquid fraction



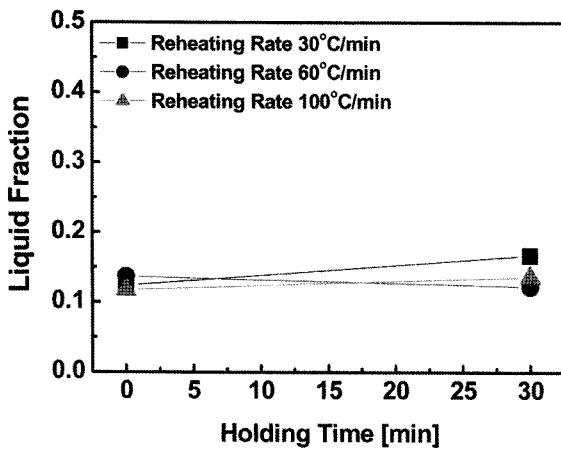
(b) average grain size

Fig. 4. Results of microstructural evaluation of AZ31 Mg wrought alloy after isothermal holding at the given temperature.

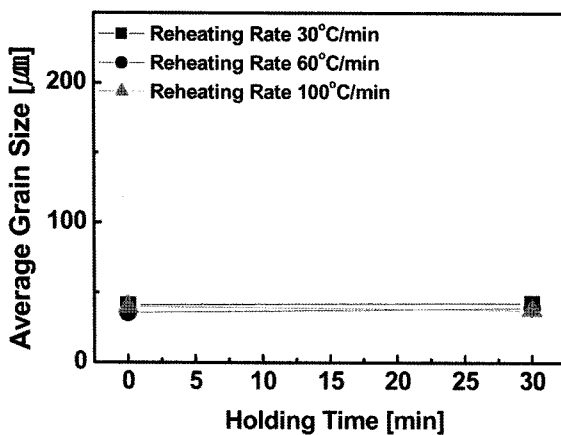
로써 반응용 압출시 과도한 액상에 의해 발생할 수 있는 조성적 불균일을 방지 할 수 있을 것으로 사료된다. AZ31 합금의 경우에도 622°C 이하에서의 반응용 압출을 통하여 균일한 조성을 갖는 압출재를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

3.2. 재가열 속도의 영향

수직상 조직은 액상과 비교해서 아주 강한 결합력을 구성하고 액상은 고상과 고상 사이에 존재하기 때문에 반응용 상태에서도 유동성은 매우 작게 된다. 특히, 반응용 압출을 적용하기 위해서는 매우 낮은 액상율을 요구하므로 압출시 압출압력에 큰 영향을 미치는 액상의 균일성, 고상입자의 조대화 및 불균일화를 가능한 억제할 수 있는 가열 조건을 선정하는 것은 매우 중요하다. 특히, 반응용 상태와 같은 높은 온도에서는 금속 원자들의 유동도가 급격히 향상되어 조직의 조대화 및 불균일화가 짧은 시간에 일어날 가능성이 많다. 따라서 반응용 압출 온도로의 가열시간 및 성형 전 유지시간을 가능하면 짧게 하고 최적의 압출에 필요한 액상율을 유지하는 것이 필요하다. 이러한 배경하에 본 연구에서는 재가열 속도에 따른 조직전개를 살펴보았다.



(a) total liquid fraction



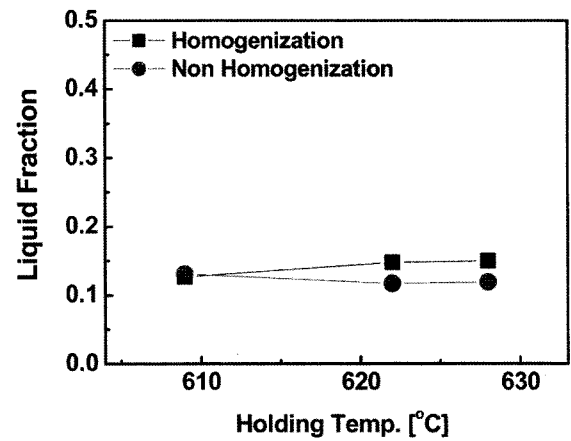
(b) average grain size

Fig. 5. Results of reheating rate on microstructural evolution of 7075 Al wrought alloy after isothermal holding at 622°C.

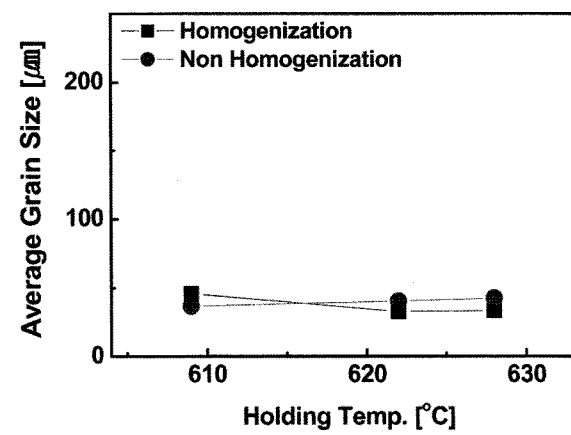
Fig. 5는 A7075 합금을 유지온도 622°C에서 재가열 속도를 30, 60 및 100°C/분으로 하여 각 온도에서 0 및 30분 유지 후 수냉한 시편의 액상률 및 고상입자의 크기를 나타낸 것이다. 재가열 속도 변화에 따른 조직의 변화는 뚜렷하지 않았으며, 유지시간 0분에서는 입내 액상이 여러 곳에서 관찰되나, 유지시간이 30분에서는 입내 액상은 줄어들었으며, 고상입자의 구형화가 일어났다. 재가열 속도 변화에 따라 액상률은 0.2 이하로 제어 되었으며, 고상입자의 크기는 100 μm 이하로 제어되었다. 또한, 각각의 재가열 속도에서 유지시간 변화에 따라 액상률 및 고상입자의 크기가 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이는 반응용 압출시 재가열 속도를 빠르게 하여도 균일한 재료의 내부 조직을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있으며 빠른 재가열 속도로 인하여 압출 시간을 크게 단축하여 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 균질화 유무의 영향

Fig. 6은 A7075 합금을 480°C에서 24시간 균질화 처리를 행한 시편과 주조재의 시편을 유지온도 609, 622 및 628°C에서 각각 10분 유지 후 수냉시킨 시편의 액상률 및 고상입자의



(a) total liquid fraction



(b) average grain size

Fig. 6. Results of homogenization on microstructural evolution of 7075 Al wrought alloy after isothermal holding at 622°C.

크기를 정량적으로 나타낸 것이다. 균질화 처리된 시편의 경우 각각의 조건에서 주조재의 경우보다 입내 액상이 다수 존재하였으나, 전체적인 액상률 및 고상입자의 크기는 균일하게 유지되었다. 균질화 처리 유무에 관계없이 재가열 조건에 따른 반응용 조직제어가 가능함은, 상용 빌렛을 균질화 처리를 행하지 않고 반응용 압출에 적용함으로 해서 균질화 처리에 요구되는 시간을 단축 할 수 있으며, 따라서 전체적인 가공 공정 시간을 단축 할 수 있다는 장점이 있다. 균질화 유무에 따른 기계적인 특성을 알아보기로 하자 반응용 조직제어된 균질화 처리재와 주조재의 경도를 측정하였다. 반응용 조직제어 후 경도 값은 주조재의 경도 값보다는 낮고 균질화 처리된 시편의 경도 값보다는 높은 값을 나타내었다. 균질화 처리후 반응용 조직제어한 시편의 경도 값이 주조재를 반응용 조직제어한 시편의 경도 값보다 약간 높은 값을 나타내었으며, 유지온도 증가에 따라 경도 값은 감소하는 경향을 보였다. 즉 유지온도 609, 622 및 628°C에서 반응용 조직제어한 균질화재 및 주조재의 경도 값은 각각 88.5, 85.2, 74.5 및 83, 80.3, 76.5HRF를 나타내었다.

4. 결 론

반응용 압출을 위한 난가공성 경량합금의 저액상용 영역에서 조직제어 및 이에 미치는 유지온도, 유지시간 및 재가열 속도 등의 영향을 평가하였으며 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 상용 A7075, A7003 및 AZ31 합금을 이용하여 저액상용 영역에서도 고상입자 및 액상용의 조직 제어가 가능함을 확인하였고, 유지온도 및 유지시간 변화에 따른 액상용 및 고상입자의 크기 변화는 매우 작으며, 이러한 결과는 반응용 압출시 온도 제어 측면과 실질적인 압출 시간을 고려한다면 반응용 압출 적용에 매우 유용한 것으로 사료된다. 또한, 재가열 속도 변화에 따른 유지시간 변화에서도 액상용 및 고상입자의 크기가 거의 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 이는 반응용 압출시 재가열 속도를 빠르게 하여도 균일한 재료의 내부 조직을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있으며 빠른 재가열 속도로 인하여 압출 시간을 크게 단축하여 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 균질화 처리 유무에 관계없이 재가열 조건에 따른 반응용 조직제어가 가능함을 확인하였으며, 이는 상용 빌렛을 균질화 처리를 행하지 않고 반응용 압출에 적용함으로 해서 균질화 처리에 요구되는 시간을 단축할 수 있으며, 따라서 전체적인 압출 성형 시간을 단축할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 생산기반혁신기술개발사업의 연구결과로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] M. C. Flemings : Metall. Trans., "Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State", 22A (1991) 957-981.

[2] D. H. Kirkwood, Inter. Mater. Rev., "Semisolid Metal Processing", 39 (1994) 173-189.

[3] K. Kiuchi and S. Sugiyama : Proc. of 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Mashy-state Extrusion, Rolling and Forging", (1994) 245-257.

[4] Y. O. Yoon, H. H. Jo, J. K. Lee, D. I. Jang and S. K. Kim : Solid State Phenomena, "Development of Thixoextrusion Process for 7000 Series Al Wrought Alloys", 116-117 (2006) 771-774.

[5] Y. O. Yoon, H. Cho, H. H. Jo and S. K. Kim : Magnesium Technology 2006, "Development of thixoextrusion process for AZ31 magnesium wrought alloy", (2006) 191-194.

[6] A. Turkel and N. Akbas : Proc. of 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Formation of Non-dendritic Structure in 7075 Wrought Aluminum Alloy by SIMA Process and Effect of Heat Treatment", (1996) 71-74.

[7] M. L. Tims, J. Xu, G. Nickodemus and F. R. Dax : Proc. of 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Computer Based Numerical Analysis of Semi-solid Metalworking", (1996) 120-125.

[8] P. Kapranos, R. C. Gibson, D. H. Kirkwood and C. M. Sellars : Proc. of 4th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Induction Heating and Partial Melting of High Melting Point Thixoformable Alloys", (1996) 148-152.

[9] S. K. Kim and Y. J. Kim : J. Kor. Foundrymen's Soc., "Semi-liquid Forming of Magnesium Alloys", 17(4) (1997) 319-326.

[10] S. K. Kim and Y. J. Kim : J. Kor. Inst. Met & Mater., "Control of Liquid Fraction and Microstructure of Semisolid AZ91D Mg Alloy Slurry", 38 (2000) 1620-1625.

[11] Y. O. Yoon, H. H. Jo, J. K. Lee, D. I. Jang and S. K. Kim : Mater. Sci. Forum, "Microstructural Control of Al Wrought Alloys through Thixoextrusion Route", 510-511 (2006) 362-365.

[12] H. H. Jo, Y. O. Yoon, J. K. Lee and S. K. Kim : Solid State Phenomena, "Effect of Partial Remelting Procedure on the Microstructural Evolution of 7075 Al wrought Alloy for Thixoextrusion", 116-117 (2006) 336-339.

[13] N. R. Stansel, Peter Peregrinus Ltd : McGraw-Hill, New York, "Conduction and Induction Heating", (1990).