

논문

경량합금 반응용 압출 기술 개발 - Part 2. 반응용 압출 공정 기술

김세광[†] · 윤영옥 · 장동인 · 조형호

한국생산기술연구원

Development of Thixoextrusion Process for Light Alloys - Part 2. Thixoextrusion Process for Light Alloys

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 main emphasis of this study was to utilize thixoextrusion process for improving extrudability of 7075, 7003 Al wrought alloys and AZ31 Mg wrought alloy. The results of thixobextrusion experiments about microstructures and extrusion pressures were compared with conventional hot extrusion results. The maximum extrusion pressure of thixoextrusion was greatly decreased compared with that of conventional hot extrusion. It was pointed out that the extrusion temperature dependence of the maximum extrusion pressure was large and the influence of extrusion temperature on the improvement of extrudability was remarkable in thixoextrusion. This will contribute to extrudability in terms of extrusion pressure, which in turn means that shorter process time is required and smaller extrusion machine can be applied for the same operation. The elongated grains to extrusion direction were generally observed during conventional hot extrusion, while the thixoextruded microstructures were isotropic.

Key words : Thixoextrusion, Isotropy, Extrusion pressure.

(Received August 9, 2006 ; Accepted October 12, 2006)

1. 서 론

최근 항공기, 자동차, 고속 전철 등 수송 산업 분야에서의 연료 절약 및 환경오염 문제 등으로 인하여 수송 부품 경량화에 대한 중요성이 크게 부각되고 있다. 이와 같은 수송 기계의 경량화 추진에 힘입어 Al 합금 및 Mg 합금 압출재에 대한 관심이 높아지고 있으며, 수요 또한 증가하고 있다[1,2].

Al 합금 중 Al-Zn-Mg 합금은 알루미늄 합금중에서 가장 높은 강도를 가지고 있으며, 주로 수송기기 구조재나 항공기용 구조재 등으로 사용되고 있다. 특히, 자동차의 경량화 추세에 부응하여 자동차의 범퍼보강재 등에 A7000계 합금 중 압출성이 비교적 양호하며 용접성 및 내식성이 우수한 A7003합금이 대표적으로 사용되고 있다. 하지만 A7003합금(압출지수 > 70)의 경우도 실제로는 압출지수가 50 이하로 떨어지는 경향을 나타내기 때문에 압출이 용이하지 않다[3]. Wheel chair rim과 door impact beam과 같은 hollow section 적용의 경우, 국내에서는 A7003 합금에 대한 압출가공기술 역시 확보되어 있지 않기 때문에 자동차 경량부품용 압출재를 개발하는데 어려움을 겪고 있는 실정이다. 또한, Al-Zn-Mg 합금 중에서도 A7075

합금은 상대적 압출성 지수가 10으로 매우 낮아 기존 압출가공으로는 복잡한 단면과 얇은 두께의 표면을 갖는 튜브 형태의 압출제조가 거의 불가능한 실정이다.

Mg 합금 부품은 다이캐스팅 공정과 같은 주조공정에 의해 주로 제조되지만, 주조재의 경우 낮은 강도와 수축공 등에 의한 결함은 피할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 압출, 압연 및 단조와 같은 성형공정의 경우에는 기계적 성질이 우수하며 내부결함이 없는 제품을 만들 수 있다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 최근에는 Mg 합금의 소성 가공 공정에 대한 관심이 증가하고 있다. 하지만, Mg는 조밀육방구조이며 소성변형에 필요한 슬립계가 3개로 한정되어 일반적인 압출시 낮은 압출 속도와, 높은 압출 압력을 요구하게 된다. Al의 압출성 지수와 비교할 때 대표적인 Mg 소성가공용 합금인 AZ31의 압출성 지수는 40으로 매우 낮다.

Al-Zn-Mg계 합금과 소성가공용 Mg 합금은 기존 압출가공에 의하여 압출하는 경우 높은 강도에 의하여 과도한 압출 압력이 필요하고 복잡형상의 부품을 압출함에 있어서 어려운 점이 있으며, 다이스와 빌렛간의 마찰에 의한 다이스의 손상으로 인해 제품의 결함, 복잡형상의 제한성 및 낮은 생산성 등의

[†]E-mail : shae@kitech.re.kr

발생하게 된다[3].

반응용 압출법은 금속 슬러리의 틱소트로픽 성질을 이용하여 고액 공존영역에서 금속재료를 성형하는 것이며 반응용 압출법의 가공공정은 종래의 열간 압출공정과 기본적으로는 같다. 즉, 가열로를 이용하여 균일하게 가열한 빌렛을 압출프레스의 컨테이너에 삽입한 후 압력을 가하여 필요한 제품을 압출한다. 빌렛의 고상율이 75% 이하가 되면 스스로 붕괴되는 경우가 있으므로, 적정용기의 사용과 온도유지에 주의를 요한다. 반응용 압출법의 경우에는 반응용된 빌렛을 컨테이너에 밀폐상태에서 다이스를 통해서만 유출되므로 유동·변형의 자유도는 낮고 내부의 고상·액상성분이 독자적으로 유동하기는 어렵다. 많은 경우 압출시에 약간의 액상성분이 선행되어 유출되는 경향을 제외하면 거의 균일한 유동·변형을 하여 다이스를 통해 압출된다. 따라서 정상적 또는 안정한 가공을 하기 쉽다. 반응용 압출은 고액공존영역에서의 가공에 의해 다이스 충전성이 향상되어 복잡한 형상의 압출이 가능하며, 제품의 내부 조직과 기계적 특성의 균일성, 유동성이 좋아 압출 압력이 저감되며 이로 인하여 다이스의 손상을 감소시키는 장점이 있어 난가공성 경량합금인 Al 합금 및 Mg 합금 뿐만 아니라, 복합재료, 재활용된 저품질재료 등의 가공에 유용한 기술이 될 것으로 예상된다[4-9]. 반응용 압출의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 반응용 압출은 열간압출에 비교하여 압출 압력이 약 1/3~1/7로 매우 낮으며, 이는 반응용 빌렛의 주요 변형기구가 액상에 의하여 좌우되기 때문이다.
- 반응용 빌렛내의 액상성분은 또한 압출과정에서 컨테이너와 압출다이스 사이에서 윤활제 역할을 하기 때문에 성형에 따른 압출 압력의 상승이 적다.
- 반응용 압출은 매우 낮은 압출 압력으로도 압출이 가능하기 때문에 높은 압출비에서도 압출재 제조가 가능하며, 특히 복잡한 단면과 얇은 두께의 표면을 갖는 압출재의 제조가 가능하다.
- 낮은 압출 압력으로도 압출재의 제조가 가능하기 때문에 난가공성 합금에서 압출이 가능하다.

위와 같은 특징을 갖는 반응용 압출을 위해서는 재가열 공정 동안 가열온도, 가열시간 및 가열유지시간 등의 재가열 공정변수들에 의하여 소재에 균일하게 분포된 미세한 고상입자를 얻기 위한 최적의 재가열 조건이 확립되어야 한다[10-13]. 또한, 반응용 압출을 위해서는 빌렛의 재가열 조건의 확립과 더불어 빌렛 가열장치 및 이송장치 등의 시스템 구축이 필수적이며, 압출시 슬러브 및 다이스의 온도 제어 또한 정밀하게 이루어져야 한다.

따라서, 본 연구에서는 반응용 압출에 적합한 저액상율 영역에서의 조직제어를 통하여 액상율, 고상입자 형상 및 크기가 균일한 재가열 조건을 확립하고, 반응용 압출 시스템을 구축하여 기존의 열간 압출 공정에 의해 난가공성 경량합금 Al 합금 및 Mg 합금 압출시 발생하는 과도한 압출 압력의 감소, 집합 조직의 제어 및 기계적 특성의 향상을 도모하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 반응용 압출기는 수평식으로 20톤 용량을 가지며, 컨테이너의 크기는 직경 50 mm 그리고 길이 300 mm이고, 컨테이너 안에는 봉형 히터를 삽입하여 반응용 압출시 압출 빌렛의 온도 제어 및 온도 유지를 할 수 있도록 하였다. 압출 압력의 측정은 스트레인 게이지(strain gauge)가 내장된 압력변환기를 압출기의 램(ram)에 부착하여 X축에는 램의 변화, Y축에는 유압의 변화가 표시되는 X-Y기록계를 이용하였다.

반응용 압출시 다이스의 온도는 일정하게 하였으며 다이스의 2α는 90°, 압출비는 11로 하였다. 반응용 압출의 온도는 DSC 분석 결과를 토대로 고액공존영역인 A7003 합금은 624°C, A7075 합금은 609°C, AZ31 합금은 605°C에서 반응용 압출을 하였다. 또한, 반응용 압출재의 특성과 열간 압출재의 특성을 비교하고자 800ton 수평형 직접 압출기를 이용하여 열간 압출을 하였다. 다이스 온도는 A7003 및 A7075 합금은 250°C, AZ31 합금은 300°C, 다이스의 2α는 90°, 압출비는 11로 하였다. 압출 빌렛의 온도는 A7003 및 A7075는 450°C, AZ31 합금은 350°C로 하였다.

미세조직을 관찰을 위해서 기계적 연마를 행한 후 A7003 및 A7075 합금은 Keller 시약, AZ31 합금은 Acetic-picral 시약을 사용하여 조직관찰을 하였다. 압출재의 인장시험은 ASTM B557 규격으로 제작하였으며, 인장시험은 크로스 헤드 속도 1 mm/min의 조건으로 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 A7075 합금의 압출 조건에 따른 압출 압력 비교

Fig. 1은 A7075 합금의 열간 압출시와 각 조건별 반응용 압출시 최대 압출 압력을 나타낸 것이다. Case 1은 열간 압출시의 최대 압출 압력이며, Case 2~5는 반응용 압출시 압출 온도 변화, 베어링 길이 변화, 압출 속도 변화에 따른 반응용 압출 압력이다. 열간 압출(Case 1)시 최대 압출 압력은 729 MPa

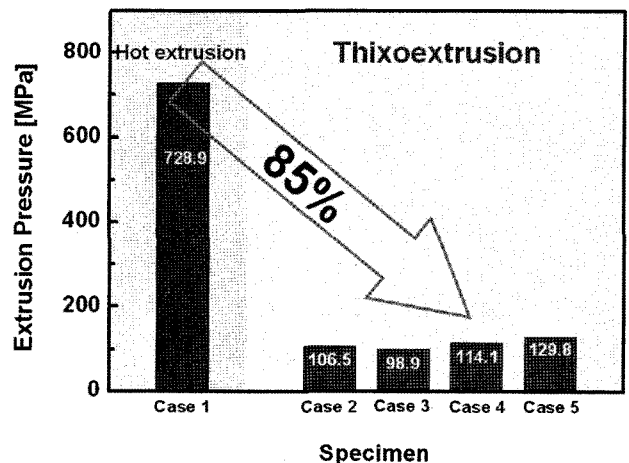


Fig. 1. Maximum extrusion pressure of 7075 Al wrought alloy in hot extrusion and thixoextrusion.

이며, 반응용 압출(Case 2)일때의 최대 압출 압력은 107 MPa로 압출 압력이 열간 압출시 최대 압출 압력보다 85% 정도로 크게 감소하였다. 일반적으로 합금변형 저항은 온도가 상승함에 따라 감소하여 압출 압력을 낮추게 되며 특히 반응용 압출시는 매우 낮은 압출 압력으로 압출이 가능함을 알 수 있다. 이러한 이유는 고액공존영역에서의 합금의 변형저항이 크게 작아져 매우 낮은 유동응력을 갖기 때문이다. 또한, 압출시 반응용 압출 빌렛내의 액상성분이 압출과정에서 슬리브와 압출다이스 사이의 마찰을 최소화시키는 윤활제 역할을 함으로 해서 압출 압력을 낮게 하는 한 요인으로 작용한다.

Case 2와 3은 반응용 압출 빌렛의 온도를 온도 609와 622°C로 변화시켜 반응용 압출시 최대 압출 압력을 나타낸 것이다. 609°C에서 반응용 압출시 최대 압출 압력은 107 MPa이며, 622°C에서 반응용 압출시 최대 압출 압력은 99 MPa로 온도가 622°C일때 최대 압출 압력이 약간 감소하였다. 일반적으로 압출 속도가 일정할 경우, 압출 압력의 변화는 압출 온도가 높아짐에 따라 감소하게 된다. 반응용 압출시에는 온도 증가에 따른 고상과 고상사이에 존재하는 액상물의 증가로 인하여 압출시 유동응력을 낮추어서 매우 큰 압출 압력의 감소가 발생한다. A7075 합금의 경우는 반응용 조직제어를 통하여 얻어진 유지 온도에 따른 액상물의 변화가 크지 않기 때문에 609°C와 622°C에서의 압출시 유지 온도에 따른 최대 압출 압력의 변화가 크지 않은 것으로 사료된다.

Case 4는 다이스 베어링 길이를 15 mm로 하여 반응용 압출시 최대 압출 압력을 나타낸 것이다. 다이스 베어링 길이가 15 mm인 경우 최대 압출 압력은 114 MPa로 다이스 베어링 길이가 7 mm(Case 2)인 경우보다 약간 감소하였다. 다이스 베어링 길이에 따라 압출 압력이 크게 차이가 나지 않는 것은 다이스 베어링 길이 변화에 따른 마찰면적이 전체 마찰면에 비해 상대적으로 작은 값을 나타내므로 다이스 베어링 부에서 소재와의 마찰에 의한 압력 상승이 아주 작은 영향을 미치는 것으로 예상할 수 있다.

Case 5는 반응용 압출시 초기 램 속도에 따른 압출 특성을 검토하고자 초기 램속도를 2 mm/sec로 하여 반응용 압출시 최대 압출 압력이다. 이때의 최대 압출 압력은 130 MPa로 압출 속도가 5 mm/sec(Case 4)인 경우보다 약 16 MPa가 증가하였다.

기존의 열간 압출법에서는 일반적으로 압출 온도, 다이스 베어링 길이 및 압출 속도에 따른 압출 압력의 변화가 뚜렷하나 반응용 압출시에는 이러한 압출 조건 변화에 따라 압출 압력의 변화는 크지 않음을 확인할 수 있다. 특히, A7075 합금은 기존의 열간 압출법으로 압출시 높은 압출 압력, 낮은 압출 속도를 나타내고, 복잡한 단면과 얇은 두께의 표면을 갖는 튜브 형태의 압출재의 제조가 거의 불가능하다. 따라서, 반응용 압출의 장점을 활용하면 작은 용량의 압출기로도 압출이 가능함으로 인해 생산단가를 크게 낮출 수 있으며, 기존의 열간 압출법과 같은 동일한 압출 압력으로도 높은 압출비를 갖는 압출재를 생산할 수 있으며 상대적인 압출지수가 높은 합금을 압출 할 수 있을 뿐 만 아니라, 윤활제 역할을 하는 액상성분으로 인해 복잡한 단면과 얇은 두께의 표면을 갖는 튜브 형태

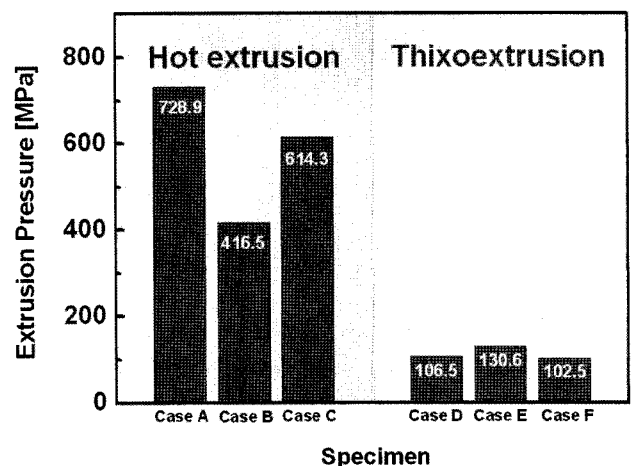
의 압출재의 제조가 가능하다.

3.2 반응용 압출과 열간 압출의 최대 압출 압력 비교

Fig. 2는 A7075, A7003 및 AZ31 합금의 열간 압출시와 반응용 압출시 최대 압출 압력을 나타낸 것이다. A7075 합금은 상대적 압출지수가 10, A7003 합금은 압출지수가 70이며 AZ31 합금은 40을 나타낸다. 따라서 열간 압출시 압출지수가 제일 낮은 A7075 합금의 경우는 매우 높은 압출 압력을 필요로 한다.

열간 압출시 각 합금의 최대 압출 압력은 A7075 합금의 경우 729 MPa(Case A), A7003 합금은 417 MPa(Case B), AZ31 합금은 614 MPa(Case C)을 나타내었다. 반응용 압출시 최대 압출 압력은 A7075 합금은 107 MPa(Case D), A7003 합금은 130 MPa(Case E), AZ31 합금은 103 MPa(Case F)이다. 반응용 압출시의 최대 압출 압력은 열간 압출의 경우보다 A7075 합금은 85%, A7003 합금은 69%, AZ31 합금은 83% 감소하였다.

특히, A7003 합금의 압출지수가 70이고 A7075 합금의 압출지수가 10으로 매우 낮음에도 불구하고 반응용 압출시의 압출 압력은 A7075 합금의 경우가 더 낮은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 이러한 이유는 Scheil 식에 의해 계산된 액상물 10%인 온도(A7075-609°C, A7003-624°C)에서 실질적인 액상물이 A7075 합금은 12%, A7003 합금은 6%의 액상이 존재함으로 인해 액상물이 상대적으로 많은 A7075 합금의 변형저항이 낮아졌기 때문이다. A7003, A7075합금 및 AZ31 합금은 열간 압출시 합금 특성에 따라서 압출 압력에 큰 차이가 나지만 반응용 압출시에는 합금 특성에 상관없이 거의 동



- Case A: 7075 Al wrought alloy-Hot extrusion
- Case B: 7003 Al wrought alloy-Hot extrusion
- Case C: AZ31 Mg wrought alloy-Hot extrusion
- Case D: 7075 Al wrought alloy-Thixoextrusion extrusion
- Case E: 7003 Al wrought alloy-Thixoextrusion extrusion
- Case F: AZ31 Mg wrought alloy-Thixoextrusion extrusion

Fig. 2. Comparison of maximum extrusion pressure in hot Extrusion and thixoextrusion.

일한 압출 압력을 나타내고 있음을 볼 수 있다.

3.3 반응용 압출재와 열간 압출재의 미세조직 관찰

Fig. 3과 4는 A7075 합금과 AZ31 합금의 열간 압출재와 반응용 압출재의 미세조직 사진을 나타내었다. 압출 방향과 평행하게 압출재의 외각지점, 중간지점, 중앙부분을 미세조직을 관찰하였다. 열간 압출재의 경우 결정립의 형태가 압출재의 중심부에서 표면쪽으로 갈수록 길게 연신된 형태에서 점점 등축정의 형태로 변화되는 것을 볼 수 있다. 압출재 중심부에 나타나는 연신된 결정립은 열간 압출 도중에 일어나는 연화과정 (restoration process)이 주로 동적회복임을 나타내지만 압출재

표면에서 주로 관찰되는 등축상의 미세 결정립들은 열간 압출 시의 동적 회복과정만으로는 형성되기 어렵다. 일반적으로 소성 가공공정 중 등축상의 결정립이 형성될 수 있는 경우는 불연속 재결정, 연속재결정 및 기하학적 재결정 세가지로 구분할 수 있다. Al 합금과 같이 적층결함 에너지가 높은 금속에 있어서는 불연속 재결정은 거의 관찰하기 어려우므로, 압출재의 표면에 관찰되는 등축상의 결정립들은 연속재결정 또는 기하학적 재결정에 의해서 형성되는 것으로 생각된다.

반응용 압출재의 경우 압출 방향과 평행하게 결정립들이 연신된 현상은 관찰되지 않았다. 이러한 이유는 고상입자 사이에 존재하는 액상으로 인하여 고상입자들이 상대적으로 작은 변형

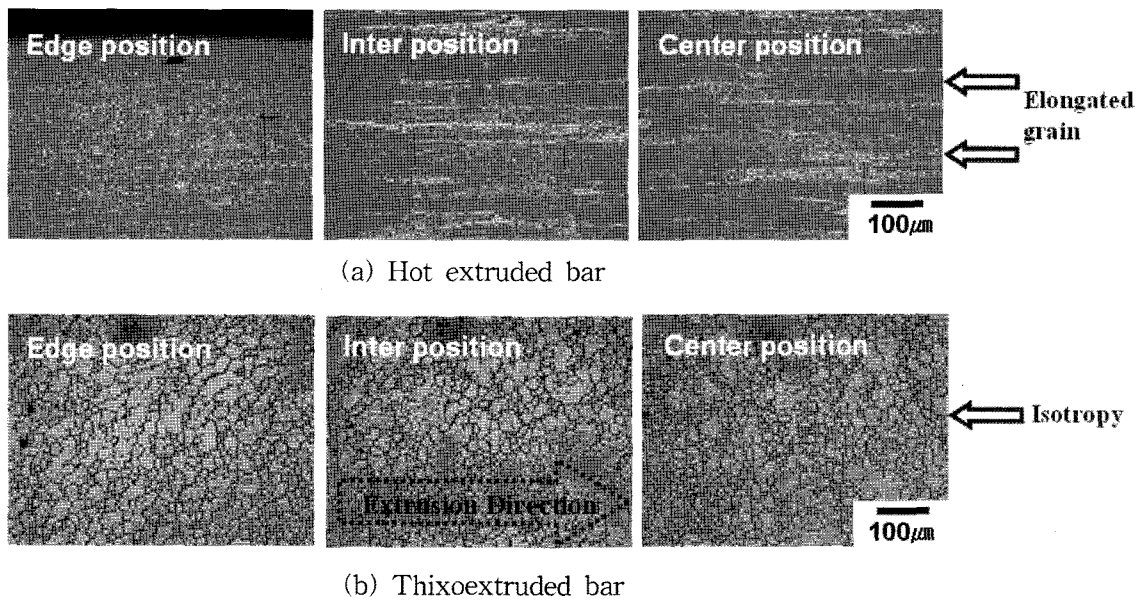


Fig. 3. Microstructures of hot extruded bar and thixoextruded bar of 7075 Al wrought alloy.

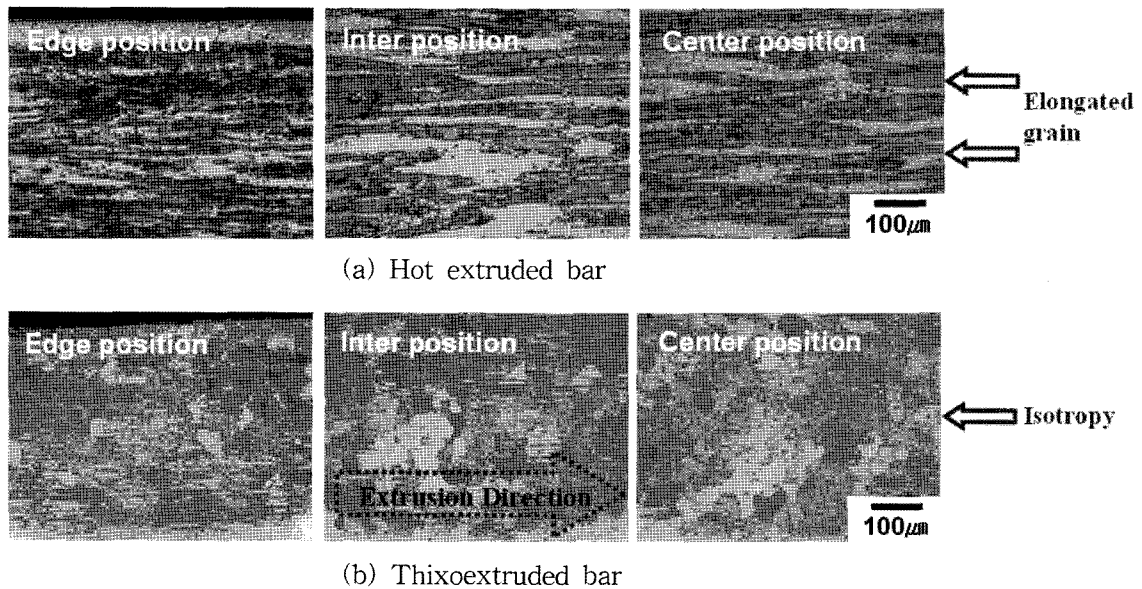


Fig. 4. Microstructures of hot extruded bar and thixoextruded bar of AZ31 Mg wrought alloy.

을 받았기 때문인 것으로 사료된다. 또한, 열간 압출재의 경우 결정립들의 이방성(anisotropy)이 관찰되나, 반응용 압출재의 경우에는 결정립들이 등방성(isotropy)을 나타냄을 관찰할 수 있다. 결정립들의 연신되는 현상은 압출 방향과 그 직각 방향에 있어서 기계적 특성이 다르기 때문에 압출재의 기계적 특성을 전체적으로 불균일하게 만드는 결과를 초래한다.

4. 결 론

반응용 압출을 통한 난가공성 경량합금의 성형성 향상 및 집합 조직 제어와 이를 통한 기계적 특성 향상을 도모하고자 반응용 압출 공정에 관한 연구 수행 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 난가공성 경량합금 Al 및 Mg 합금의 반응용 압출 공정을 제안하고 반응용 압출 공정을 위한 원소재 조직 제어 기술, 재가열 기술 확립 및 반응용 압출 시스템을 제작하였다. 반응용 압출 시스템을 통하여 슬리브 안에서의 빌렛의 온도가 실질적인 압출시간 동안에도 균일하게 유지될 수 있었으며, 또한 다이스 형상의 개선을 통하여 원활한 금속의 흐름으로 인한 압출 압력의 저감 효과를 극대화 하였으며, 다이스 베어링 길이 변화를 통하여 압출재의 균열 발생을 억제 하였다. 난가공성 경량합금 Al 및 Mg 합금의 반응용 압출 결과, 열간 압출시보다 최대 압출 압력이 크게 저감됨을 확인하였다. 일반적인 열간 압출 공정에서의 최대 압출 압력은 소재에 따라 크게 차이가 발생하는데, 본 연구에서 행해진 반응용 압출에 의한 압출재 제조시에는 소재에 의한 최대 압출 압력 변화의 영향은 없으며, 최대 압출 압력에 미치는 인자는 유지 온도에 따른 액상율의 영향이 매우 큼을 확인 하였다. 또한, 열간 압출재의 경우 결정립들의 이방성(anisotropy)을 관찰할 수 있으나, 반응용 압출재의 경우에는 결정립들이 등방성(isotropy)을 나타냄을 확인 하였다.

향후 반응용 압출에 의한 최대 압출 압력의 저감 효과를 활용하면 높은 입출비를 갖는 압출재의 제조가 가능하며, 상대적인 입출지수가 높은 합금을 압출 할 수 있을 뿐만 아니라, 윤활제 역할을 하는 액상성분으로 인해 복잡한 단면과 얇은 두께의 표면을 갖는 튜브 형태의 압출재의 제조에 매우 유용할 것으로 사료된다. 또한, 향후 다른 산업과의 연계를 통해 온도 제어 기술 및 설비의 발전, 공정제어 기술 발달 등 공정 자동화가 이루어진다면 기존 공정과의 경쟁력이 크게 향상되어 기존의 공정을 상당 부분 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부가 지원하고 있는 생산기반혁신기술개발 사업의 연구결과로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] T. Sheppard et. al. : Kluwer Academic Publishers, "Extrusion of Aluminum Alloys", (1999) 239.
- [2] K.R. Brown, M.S. Venie and R.A. Woods: J. Mining, "The Increasing Use of Aluminum in Automotive Applications", 45 (1995) 20-23.
- [3] K. Laue et al : ASM Publishers, "Extrusion", (1981).
- [4] K. P. Young and R. Fitze : Proc. of 3rd Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Semi-Solid Metal Cast Aluminum Automotive Components", (1994) 155-177.
- [5] 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.
- [6] S. Kamado and Y. Kojima : J. Jpn. Inst. Light Met., "Semi-liquid and Semi-solid Forming Technology for Light Metals", 50 (2000) 682-688.
- [7] J.-C. Lee and H.-I. Lee : J. Kor. Inst. Met & Mater., "Recent R&D Trend in Thixoforming Process", 10 (1997) 129-138.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] M. Garat, S. Blais, C. Pluchon and W. R. Loue : Proc. 5th Int'l Conf. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, "Aluminum Semi-Solid Processing: From the Billet to the Finished Part", (1998) xvii-xxxii.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] H. Ho. 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.