

|||||||
論 文
|||||||

전자기력을 이용한 알루미늄 합금중 개재물의 연속적 제거에 관한 연구

윤의박†

A study on the Continuous Elimination of Inclusions in Al Alloy by Electromagnetic Force

Eui-pak Yoon†

Abstract

The growing use of aluminum for castings over the past decade has brought with it the increased scrutiny of component properties. One area that has received much attention is the effect of inclusions - or impurities particles held in the metal - on casting properties. A new method of electromagnetic separation for removal of inclusions in aluminum alloy melts is proposed. The principle is that as the electromagnetic force induced in metal acts on inclusions due to low electric conductivity, they are moved to the direction opposite to electromagnetic force and can be separated and removed from the melt. Experiments were carried out on A356 melt mixed alumina particles and commercial Al alloys of ADC 10 and 12. In the experiment using A356, it was proved that Al₂O₃ particles was separated and removed continuously from matrix melt by electromagnetic force. Based on these results, the continuous separation experiment that used ADC 10, 12 was carried and the cleanliness of melt was assessed by the amount of porosity, hydrogen contents, PoDFA and mechanical properties through tensile test. As the results of analyses, the amount of porosity and hydrogen contents decreased without variation of chemical composition in the specimen that passed the electromagnetic continuous separator. In addition, tensile strength and elongation of this specimen increased by 20~30% because of reduction of inclusions. (Received May 4, 2002)

Key words: Electromagnetic (Archimedes) force, Inclusions, Cleanliness, PoDFA, Mechanical properties

1. 서 론

전통적으로 수소의 함량과 수축공(shrink porosity)은 주조제품의 품질을 좌우하는, 주물인에게 있어서는 최대의 관심거리가 되어 왔다. 그러나 최근에는 상업적으로 가치가 있는 고품질의 주조제품 생산에 있어서 그 청정도를 좌우하는 용탕 중의 개재물(inclusions)이 가장 핵심적인 요소로 대두되고 있다[1]. 금속을 용해하여 최종의 제품을 만들기까지 여러 가지 공정을 거치게 되는데 이 과정을 거치면서 용융금속은 대기 접촉에 의한 산화물이나 외부로부터의 2차 오염이 불가피하게 발생한다. 이들은 수소가스의 불균일 핵생성 영역을 제공하여 기공과 같은 주조불량을 일으키고 기계 가공시 hard spot으로 작용하여 표면 마무리를 해치는

기계적 특성을 감소시키며 충전성 및 유동성 그리고 부식저항성도 감소시킨다[2-4]. 일반적으로 용융 알루미늄 중의 개재물을 제거하기 위한 방법으로는 침강법, 플럭스법, 여과법 등[3,5,6]이 있으나 이는 긴 공정시간에 따른 비용의 증가, 플럭스 처리에 의한 2차 오염, 미소한 입자에 대한 저 효율성 등과 같은 문제점을 안고 있다. 현재의 기술로는 유지로에서 나오는 용탕의 개재물 정도가 개재물 제거 효율의 척도가 되고 있으며 용탕의 수면이 잔잔하게 유지되고 있을 때 크기가 큰 개재물들의 제거는 상당히 효과적인 것으로 보고되고 있다. 그러나 크기가 작은 개재물의 제거에는 더 많은 유지 시간이 필요하게 되며 이에 따라 로(furnace)의 생산성은 자연스럽게 떨어지게 마련이다[7]. 고품질 Al 주조제품의 높은 생산성과 효율을 위해서 불순물(개

한양대학교 신소재공학부, 철강공정 및 응용연구소(Division of Materials Science & Engineering, Hanyang University)
†E-mail : epyoon@email.hanyang.ac.kr

재물)은 용탕이 한 공정에서 다음 공정으로 흘러가고 있을 때 연속적으로 제거되어야 한다. 전자기 분리법은 비교적 저렴한 에너지를 이용하여 용탕과 직접적인 접촉 없이 작용되므로 무엇보다도 그 청결함을 100% 유지시킬 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다[8-10]. 용탕에 직류전류를 흘려 일정의 전류밀도(J)를 가지게 하고 이 전류밀도의 방향과 수직된 방향으로 자속밀도(B)를 갖는 자장을 가하면 전하를 가진 물질은 로렌츠힘(Lorentz force: $F = J \times B$)을 받게 된다. 이때 용탕은 일정의 전기 전도도를 가짐으로써 이 로렌츠 힘을 받게 되지만 전기 전도도가 낮은 입자는 그 반대방향으로 힘을 받게 되는데 이 힘을 전자기적 아르키메데스 힘(electromagnetic Archimedes force)이라 한다[10]. 전자기력에 의한 개재물의 이동 속도는 유체 내에서 전자기력에 의해 개재물이 받는 힘과 Stokes viscous drag force와의 평형으로 다음과 같이 구할 수 있다[11-15].

$$\frac{3\pi d_p^3}{4} F = 6\pi\mu \left(\frac{d_p}{2}\right) v_{p,em}$$

$$v_{p,em} = -\frac{d_p^2 F}{24\mu} = -\frac{d_p^2 JB}{24\mu}$$

- d_p : 입자(개재물)의 직경
- μ : 용탕의 kinetic viscosity
- $v_{p,em}$: 전자기력에 의한 개재물의 이동 속도
- F : 유체의 단위 부피당 작용하는 전자기력(= $J \times B$)

위의 식에서 보는 바와 같이 개재물의 이동속도는 전자기력의 크기에 비례하여 증가하며 stokes의 법칙에 의하여 결정되어 지는 일반 중력장에서의 이동속도와 비교하였을 때, 알루미늄 산화물의 경우 $4 \times 10^5 N/m^3$ 의 전자기력이 인가되면 중력에 의한 자연침강보다 약 20 배 정도 속도가 증가한다.

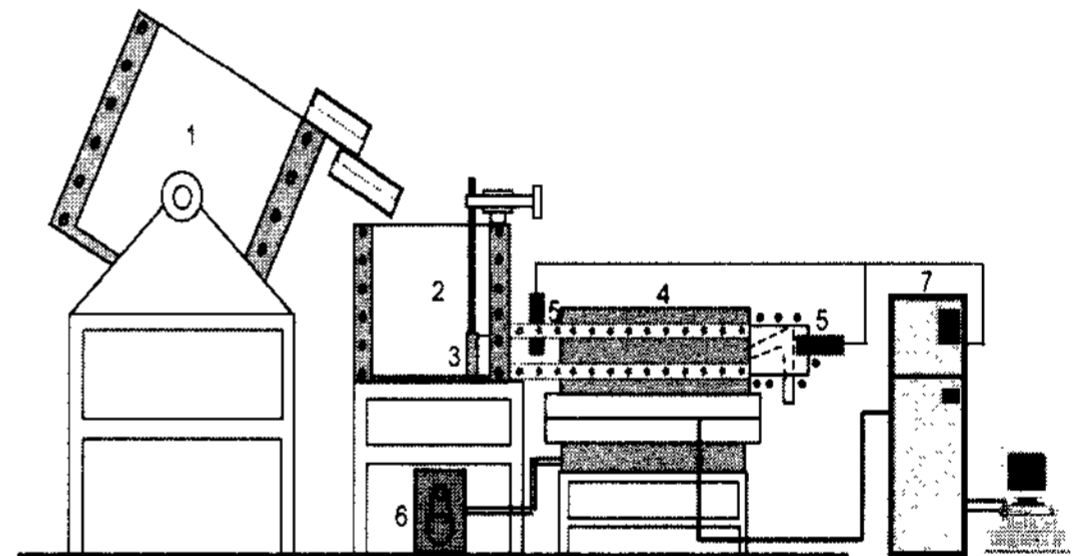
본 연구에서는 이 전자기 분리법을 이용하여 용융 Al중의 개재물을 연속적으로 분리 제거하였다. 유동하고 있는 용탕에 직류전류와 직류자장을 인가하여 이때 발생하는 전자기적 아르키메데스의 힘으로 용탕중의 개재물을 제거하였으며 여러 가지 분석을 통하여 개재물의 제거효과를 살펴보았다.

2. 실험 방법

본 실험은 용융 알루미늄 중에 혼입되어 있는 개재

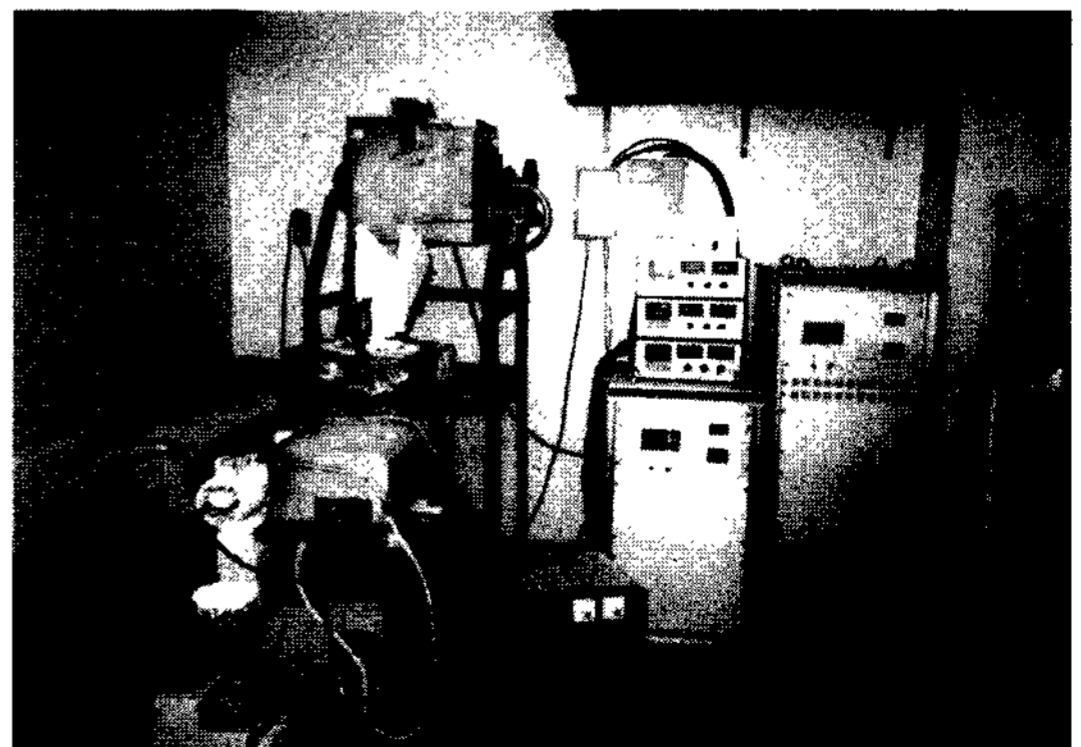
물을 전자기력을 이용하여 분리, 제거하는 것이 목적이다. 이를 위하여 직류 전류와 직류 자장을 발생시킬 수 있는 전자기 발생장치를 중심으로 전자기 연속분리 장치를 꾸며 알루미늄 용탕을 흘리면서 동시에 전자기력을 인가할 수 있도록 하였다. 먼저 연속적으로 흐르고 있는 용탕에서 전자기력에 따른 개재물의 이동 양상을 관찰하기 위해 알루미늄 용탕에 알루미나 입자를 강제 혼입시킨 모합금을 제조하여 전자기 연속분리 장치를 이용하여 연속 제거 실험을 하였으며 이를 바탕으로 하여 실제 상업적으로 이용되고 있는 ADC (Aluminium alloy Die Casting class, JIS) 10종과 12종을 이용하여 연속제거 실험을 행하였다.

알루미나 입자를 강제 혼입 시킨 모합금을 제조에서는 vortex melting법을 이용하여 A356합금에 alumina powder를 강제 혼입시켰다. 전자기 연속분리 장치는 그림 1과 같이 틸팅로(Tilting furnace), 보호유지로,



1. Tilting furnace 2. Holding furnace 3. stopper
4. core 5. Tungsten electrodes 6. Cooling system
7. AC/DC converter & magnetic field generator

(a)



(b)

Fig. 1. The continuous electromagnetic separation apparatus. (a) schematic diagram (b) photo

전자기 분리 구역, 그리고 출탕부로 구성되어 있다. 전자기 분리 구역을 통과하면서 청정화 된 용탕은 출탕부를 통하여 직경 30 mm, 높이 50 mm의 graphite 도가니에 회수하여 분석하였다. 연속 장치를 이용하여 알루미나 입자를 강제 혼입시켜 제조한 모합금을 이용하여 전자기 연속실험을 행하였으며 연속 실험후의 알루미나 입자의 이동양상과 제거효율을 살펴보았다.

위의 실험을 바탕으로 하여 우수한 기계적 특성 및 가공성과 주조성으로 인하여 자동차 산업에 널리 쓰이고 있으며 또한 용탕처리 공정 중에 발생하는 개재물을 필연적으로 제거하여야 하는 ADC 10종과 12종으로 전자기 연속 분리 장치를 이용하여 연속 제거 실험을 행하였으며 합금의 화학 조성을 표 1에서 나타내었다. 실험 후 전자기 연속분리 장치에 대한 개재물의 제거효과를 알아보기 위하여 우선적으로 전자기력 인가 시 합금의 성분변화를 알아보았고 조직사진을 통하여 알루미나입자의 산화물의 분포를 확인 할 수 있었다. 또한 color checking법을 이용하여 porosity의 양을 비교하였고 수소가스 분석기(RH/HF-402, LECO)로 각 시편의 수소가스의 양을 측정하였다. 또한 그림 2에서의

Table 1. The chemical composition of mother alloy by XRF (wt%)

	Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
ADC 10	9.06	2.76	0.83	0.3	0.2	0.87
ADC 12	10.38	2.38	0.7	0.17	0.12	0.26

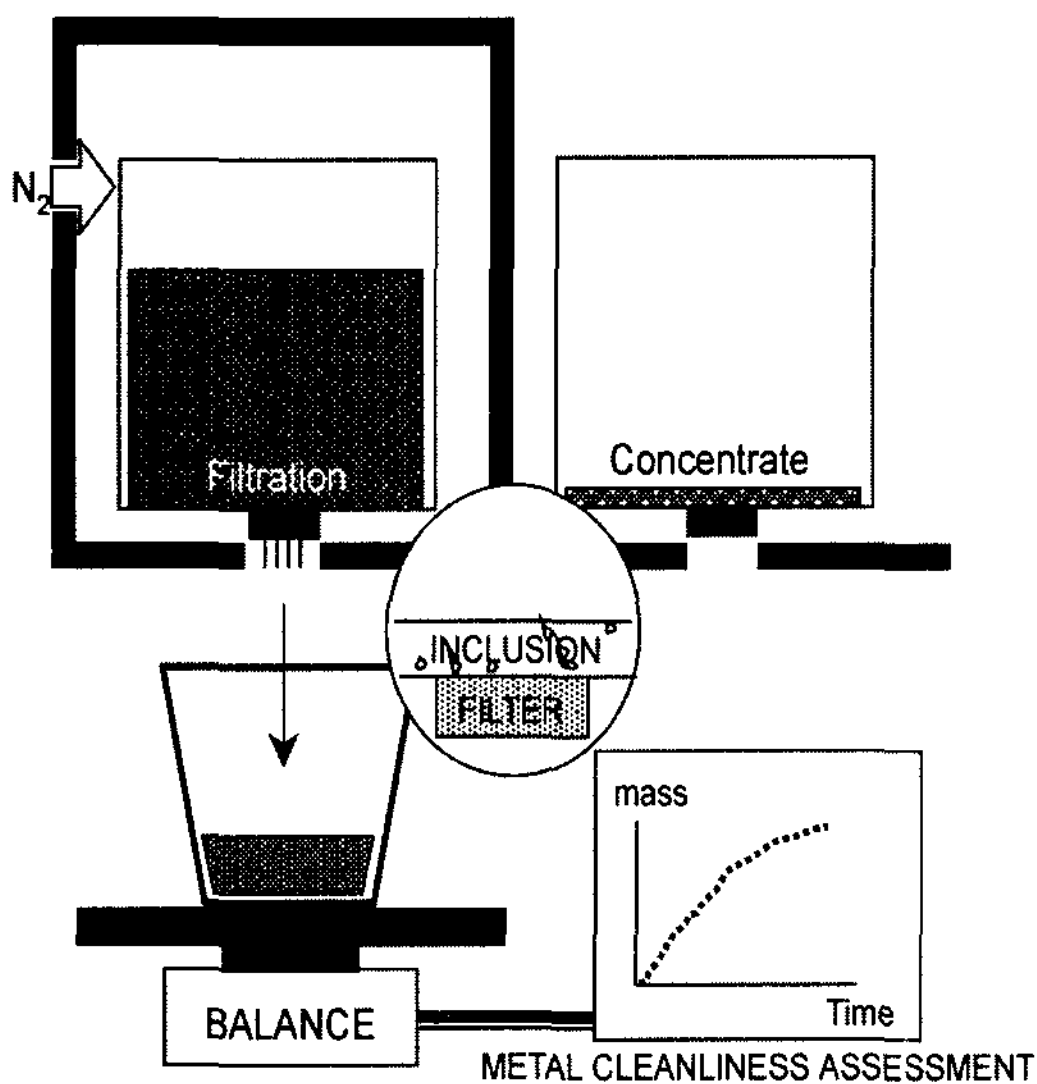


Fig. 2. Principle of the PoDFA.

가압의 원리로 고안된 PoDFA (Porous Disc Filtration Analysis)법을 사용하여 용탕 중의 개재물을 정량적으로 분석하였으며 특히 기계적 특성을 평가하기 위해 인장실험을 통하여 전자기력을 인가하여 청정화 된 알루미나의 인장강도와 연신율의 변화를 살펴보았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 알루미나를 강제로 혼입한 모합금을 이용한 실험

알루미나 용탕에서의 전자기력에 의한 개재물의 이동양상을 알아보기 위하여 우선적으로 용융 알루미나에 알루미나(Al_2O_3) 입자를 강제 혼입시켜 모합금을 제조하였으며 이 용탕을 전자기 연속분리 장치에 장입시켜 실험에 임하였다. 알루미나 입자가 균일하게 분포되어 있는 알루미나 용탕을 전자기 연속 분리 장치를 이용하여 연속 실험을 한 후에 개재물로서의 알루미나 입자의 이동양상을 관찰하였다. 이때 인가된 전자기력은 $2.64 \times 10^5 N/m^3$ ($J = 7.53 \times 10^5 A/m^3$, $B = 0.35 Tesla$)이며 관에 흐르는 용탕의 유속은 약 0.12 m/s 이었다. Fig. 3은 전자기력의 효과를 보기 위하여 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편과 통과하지 않은 시편을 비교한 그림이다. 연속 장치를 통과하지 않은 모합금에서의 알루미나 입자들이 전자기 연속 장치를 통과한 후에는 그 수가 현저하게 감소하였음을 그림을 통하여 알 수 있다. Fig. 4는 시편을 광학현미경으로 세부촬영

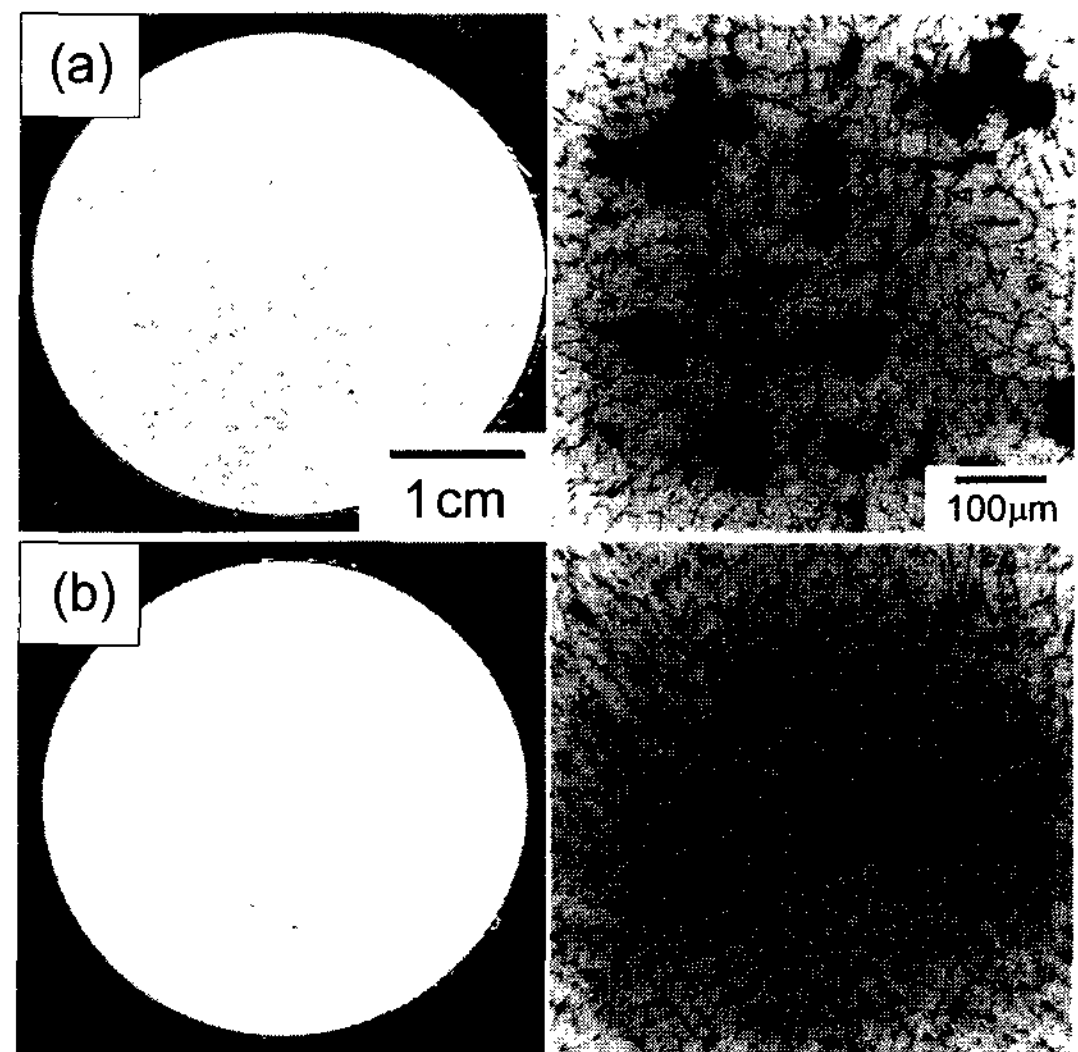


Fig. 3. Effect of electromagnetic force on melt cleanliness. (a) without EMF (b) with EMF

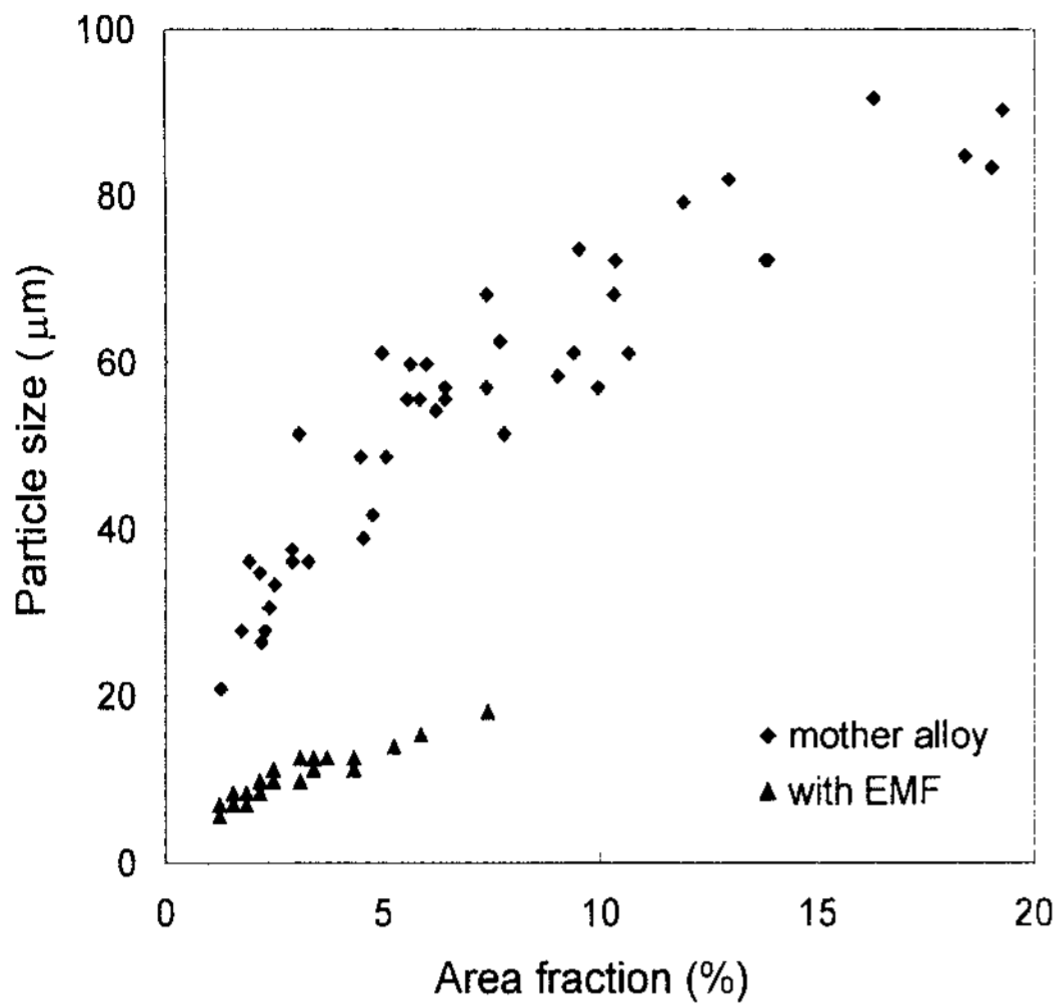


Fig. 4. Distribution of particle size and area fraction of residual Al₂O₃.

후 image analyzer를 이용하여 미세조직 사진의 잔존 알루미늄 입자의 평균 크기와 면적 분율을 측정된 결과를 나타낸 그림으로 최초 모합금에서는 100 μm 이상의 입자까지 넓게 분포하고 있으나 전자기 연속분리 장치를 통과한 시편에서는 20 μm 이상의 대부분의 입자는 분리, 제거되었으며 면적분율 또한 현저히 감소하였음을 관찰할 수 있었다. 이로써 이 전자기 연속 분리 장치가 알루미늄 중의 개재물(알루미늄 입자)을 효과적으로 제거 할 수 있음을 연속 실험을 통하여 알 수 있었다.

3.2 상용합금을 이용한 연속 실험

앞에서의 실험에서 용탕 중에 강제 혼입시킨 알루미늄 입자들이 전자기력에 의하여 연속적으로 분리 제거 됨을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 하여 실제 상업적으로 쓰이고 있는 합금에 대하여 전자기 연속 분리 방법을 적용시켰다. 앞에서도 언급하였듯이 가공성과 주조성, 특히 기계적 성질이 우수하여 자동차 부품으로 각광받고 있으며 이로 인하여 개재물의 함유여부가 제품의 생산성과 품질에 막대한 영향을 미치게 되는 ADC 10종과 ADC 12종의 알루미늄 다이캐스팅용 합금을 선정하여 실험에 임하였다. 모합금을 전자기 연속 분리 장치의 텀팅로에서 용해하고 680~700°C 사이에서 출탕하였다. 전자기 분리 구역에서는 $3.06 \times 10^5 \text{ N/m}^3$ ($J = 8.29 \times 10^5 \text{ A/m}^3$, $B = 0.37 \text{ Tesla}$)의 전자기력이 인가 되었으며 개재물의 제거효율을 알아보기 위하여 다음

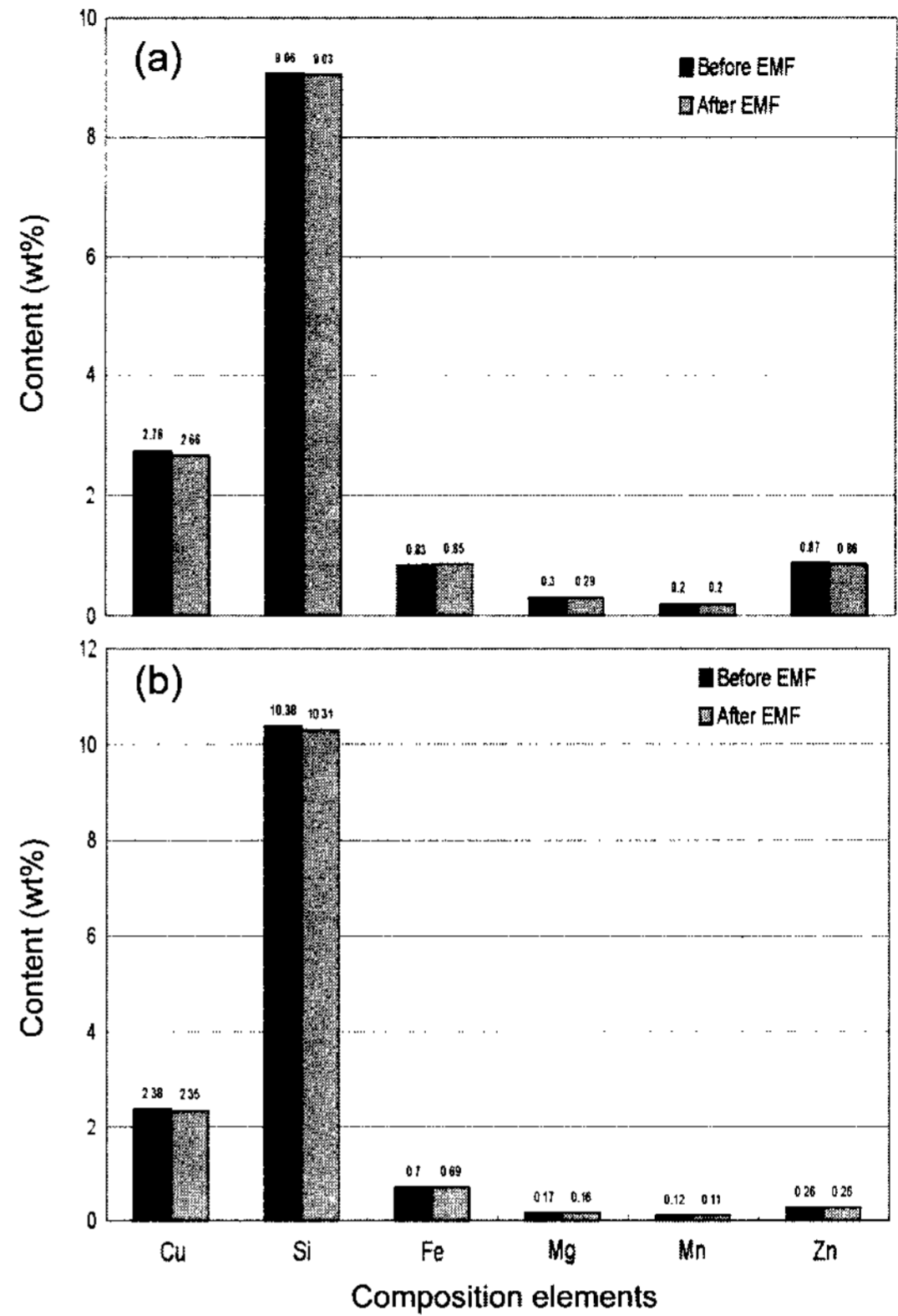


Fig. 5. Compositional comparison between before and after EMF. (a) ADC 10 (b) ADC 12

과 같은 분석을 실시하였다. 각각의 합금은 그 용도에 따라 고유한 합금의 조성을 가지고 있으며 성분의 변화가 발생하면 그 합금의 성질 또한 변화하므로 일련의 공정을 거쳤을 때 그 조성은 변함이 없어야 한다. 본 실험에서는 용탕을 용해시킨 후 전자기 연속 분리 장치를 통과한 용탕과 통과하기 전의 용탕의 화학적 성분을 비교하여 이 장치 및 공정이 조성에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 5는 각각 ADC 10종과 ADC 12종이 전자기 연속분리 장치를 통과하기 전과 통과후의 주요원소의 성분 함량을 나타낸 그림으로서 최고 Cu의 0.1 wt%의 손실만 있을 뿐 대부분의 원소들이 모합금의 함량을 그대로 유지하였다. 이로써 이 전자기 연속분리 장치를 이용하고 본 공정을 사용하였을 경우 어떠한 금속간 화합물의 생성 및 분리 등에 의한 성분의 변화는 일어나지 않으며 모합금의 spec.을 그대로 유지 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 실험에서는 전자기 연속분리 장치를 통과한 시편과 통과하지 않은 시편의 각각의 porosity의 양을 비

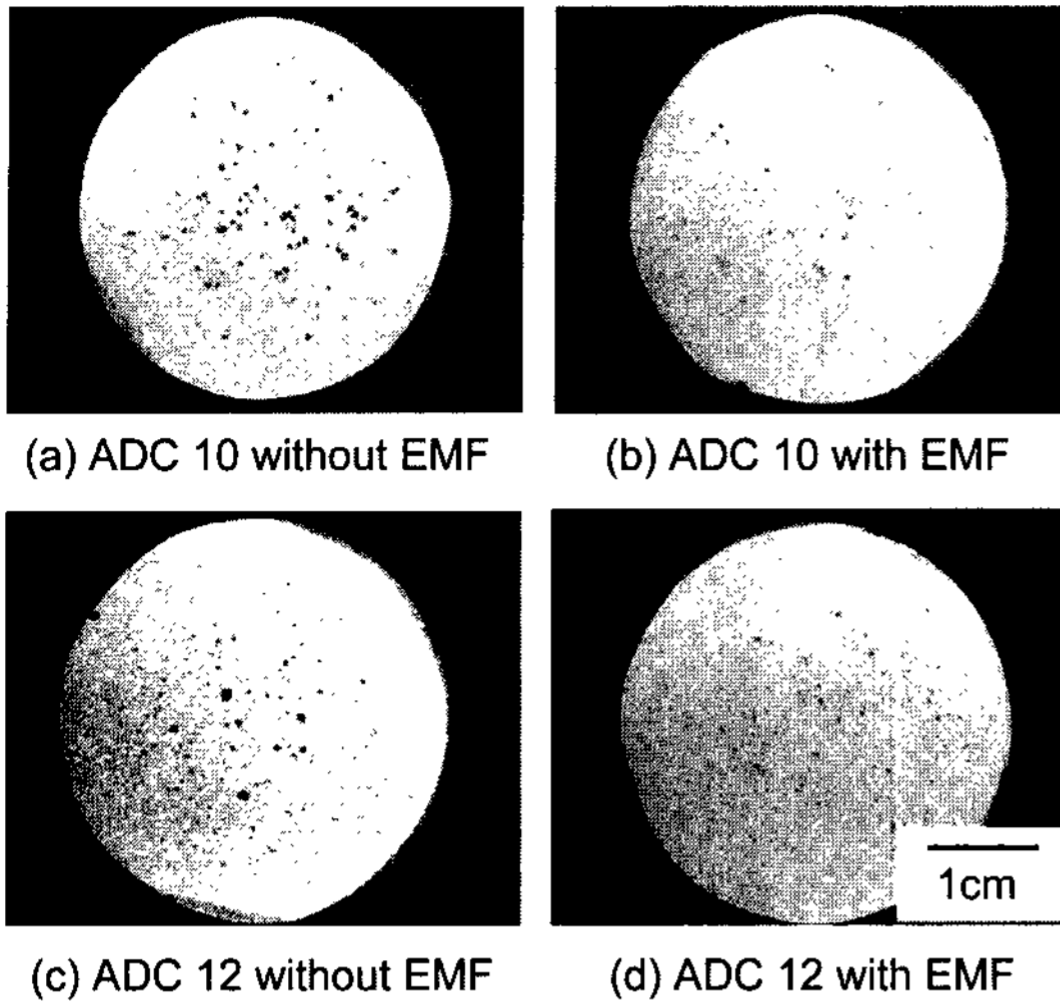


Fig. 6. Comparison the amount of porosity between with and without EMF in specimens.

교하여 전자기력의 의한 개재물의 제거효과를 알아보았다. sampling 도가니에서 채취한 시편에서 높이 10 mm 지점을 절단하여 그 단면을 대상으로 측정하였으며, 염색 침투 탐상법 (Dye Penetrant Test)으로 각각의 porosity를 식별하였다. 각각의 시편은 탈가스에 관련된 어떠한 처리도 행하지 않았으며 함유된 수소의 함량은 같다고 가정하였다. 그림 6은 그 결과로서 빨갛게(검게) 염색된 부분이 porosity를 나타내고 있는데, 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편을 그렇지 않은 시편과 비교하여 볼 때 porosity의 양이 확연히 감소하였음을 알 수 있다. 이로써 이 전자기력에 의하여 용탕중에 개재물이 제거되었으며 이를 porosity의 상대적인 비교로 확인할 수 있었다.

앞에서의 porosity의 비교와 더불어 수소 가스 분석기를 이용하여 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편과 그렇지 않은 시편 각각이 함유하고 있는 수소 가스의 함량을 측정하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 전자기 장치를 통과한 시편의 수소 가스의 함량이 그렇지 않은 시편의 것보다 50%이상 낮았다. 이는 개재물의 존재 여부와 응고후의 수소 가스 함량이 상관관계를 가지고 있음을 암시하는 것으로서 개재물이 수소 가스의 핵생성 장소를 제공할 뿐 만 아니라 전체적인 수소 가스의 함량에도 영향을 미치는 것으로 사료되어 진다.

개재물의 정량적인 분석중의 한 방법으로 PoDFA 분석을 실시하였다. 약 2 kg의 시편을 그림 2와 같은 잘

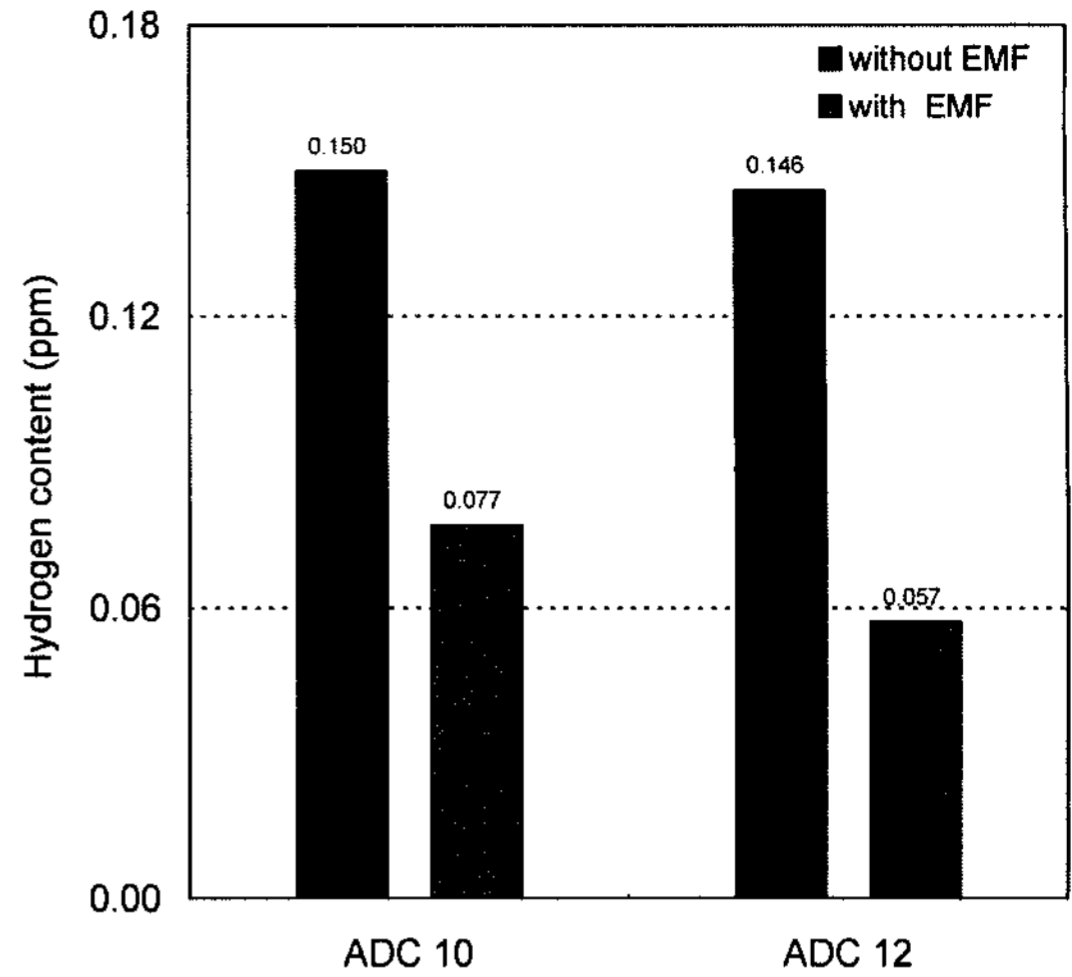


Fig. 7. Hydrogen content of specimens without and with EMF.

밀폐된 로(furnace)에 장입한 후 용해하여, 750°C에서 질소를 이용하여 0.6 kgf/cm²의 압력으로 하부에 장착된 porous한 필터에 통과시키면서 전자저울을 통하여 시간당 투과되어 나오는 용탕의 무게를 연속적으로 측정하였다. 각각의 시편에 대하여 투과되는 용탕의 양을 시간에 따라 측정한 결과를 그림 8에서 나타내었다. 용탕의 청정도가 좋을수록 시간당 투과되는 용탕의 양이 커지기 때문에, 그림 8에서 기울기가 크면 클수록 용탕의 청정도가 좋음을 시사한다. 그림 8에서 보는 바와 같이 실험에 쓰인 두 종의 합금 모두가 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편이 그렇지 않은 시편보다 그 청정도가 높음을 알 수 있었다. 그러므로 기존의 합금 속에 내재되어 있던 개재물이 전자기 연속 분리 장치를 통해 전자기력에 의하여 연속적으로 제거되었음을 알 수 있었다.

앞에서 언급하였듯이 주조공정 중의 개재물은 제품의 기계적 성질에 치명적인 영향을 끼치며 ADC 10종과 12종의 경우에는 그 용도상 개재물의 제거는 필연적이다. 따라서 본 실험에서는 전자기력을 인가하여 연속적으로 개재물을 제거하였을 때 기계적 특성에 미치는 영향을 인장실험을 통하여 알아보았다. 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편과 그렇지 않은 시편을 각각 ASTM E 8 standard specimen(Nominal Diameter: 0.500 inch, Gage Length: 2.000 inch) 규격으로 제작하여 INSTRON(1127) Tensile Tester 로 실험을 실시하였다. Strain rate는 2 mm/min로 고정시키고 측정치를 이용하여 각각의 시편에 대하여 Strain-Stress곡선을 그렸다.

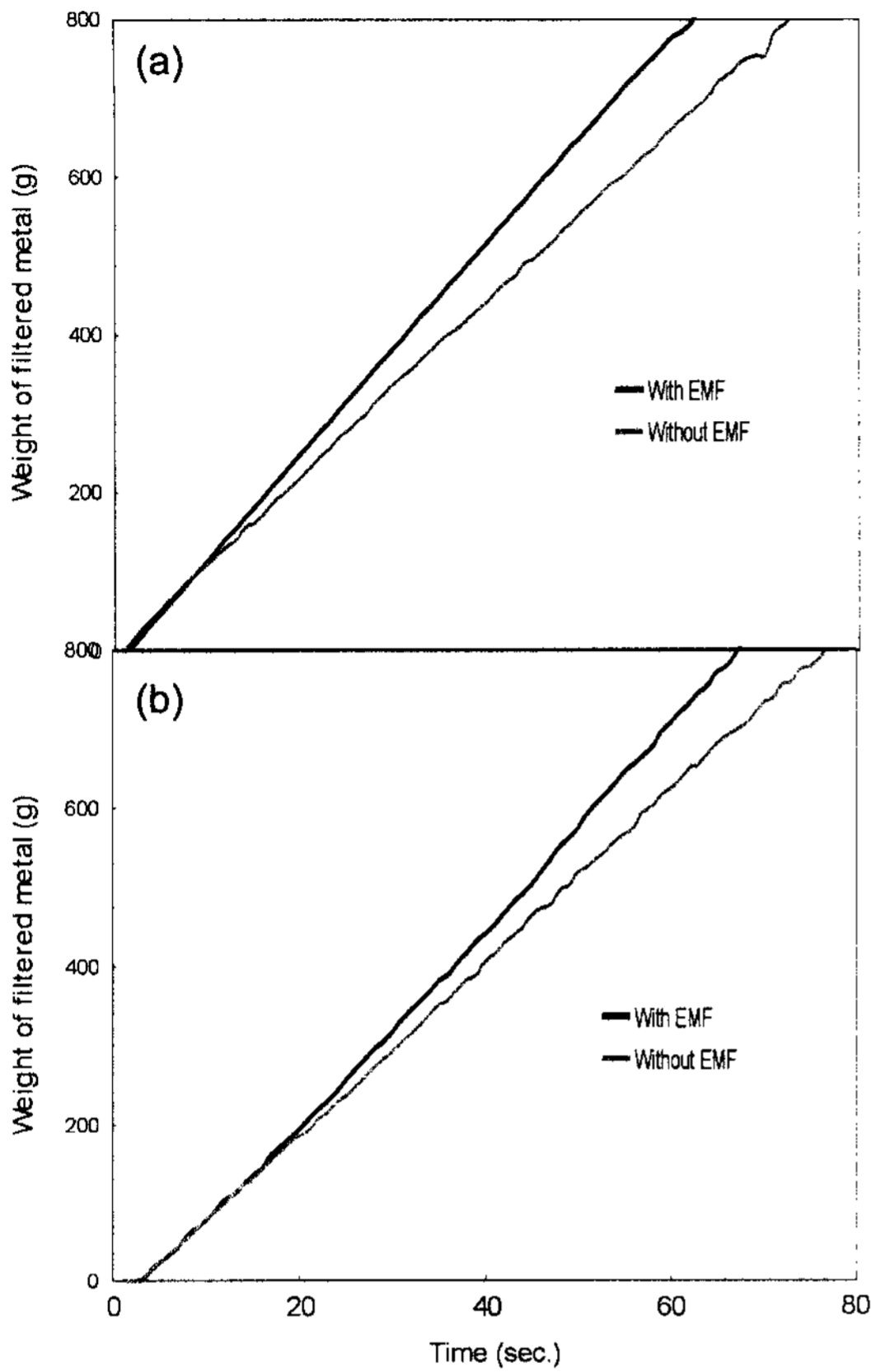


Fig. 8. Metal cleanliness assessment by mass flow rate. (a) ADC 10 (b) ADC 12

그림 9는 그 결과로서, 곡선에서 보는 바와 같이 전자기 연속 분리 장치를 통과한 시편이 그렇지 않은 시편보다 인장강도(UTS)와 연신율이 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 인장강도를 감소시키는 개재물이 전자기력에 의하여 제거되었음을 의미하고 있으며, 인장실험 후의 파단면을 관찰한 결과 그림 10에서 보는 바와 같이 전자기력을 인가하지 않은 시편에서는 파단면에서 개재물이 관찰되었으며 전자기 연속 분리 장치에 의하여 이 개재물을 제거됨으로서 인장강도와 연신율을 증가된 것으로 보인다. 이로서 이 전자기 연속 분리 장치를 이용하여 알루미늄 용탕 내의 개재물을 효과적으로 분리 제거하여 실제 상업적으로 쓰이고 있는 합금의 기계적 성질을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 전자기력을 이용하여 알루미늄 중의

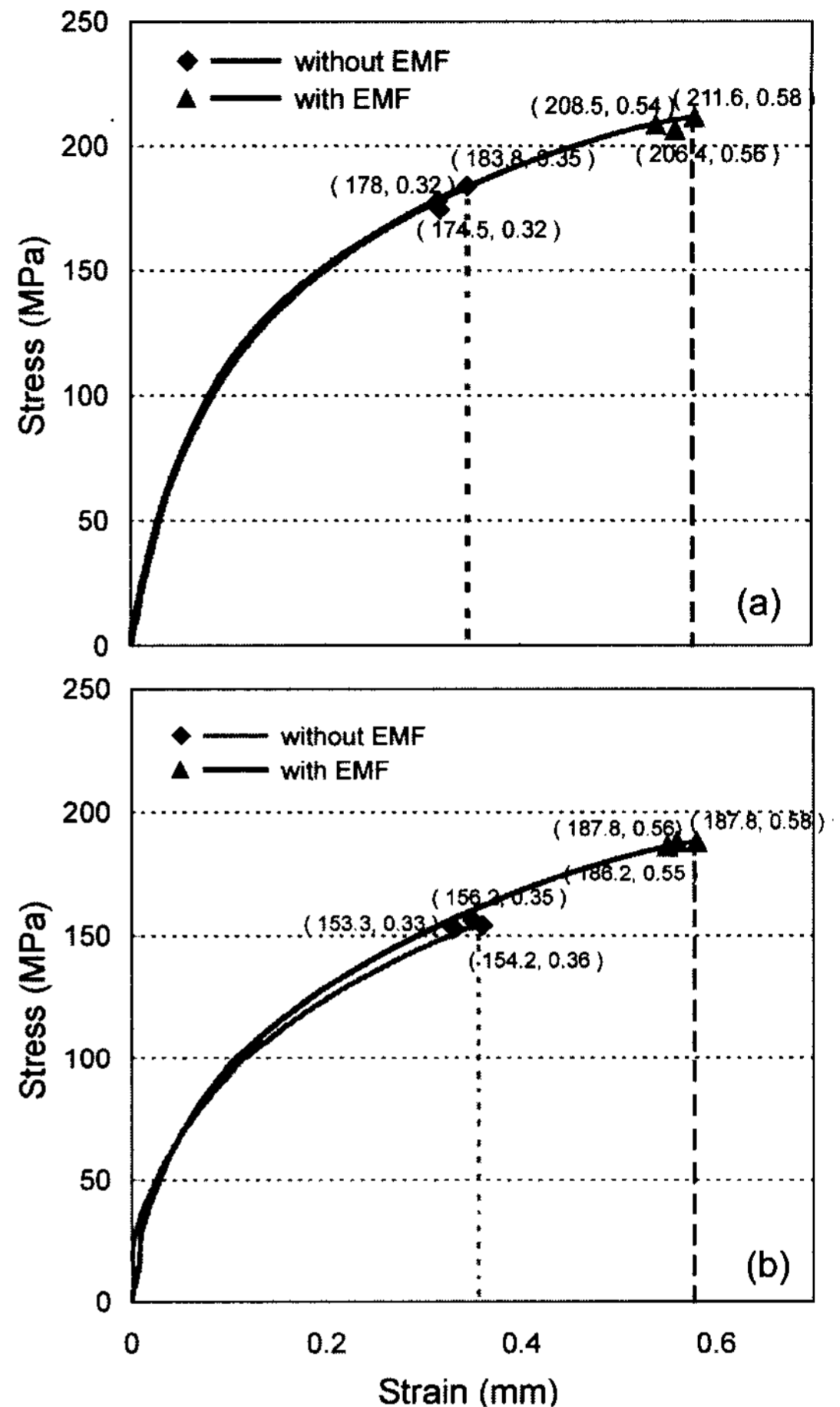


Fig. 9. Stress strain curves with and without EMF. (a) ADC 10 (b) ADC 12

개재물을 연속적으로 제거하는 것에 대하여 연구하였으며 이에 알루미늄이 강제 혼입된 알루미늄 용탕과 상업용 알루미늄 용탕에서 직류전류와 정자장 발생장치로 이루어진 전자기 연속 분리 장치를 이용하여 개재물을 연속적으로 분리 제거하였으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 전자기 연속 분리 장치를 이용하여 알루미늄을 강제 혼입시킨 용탕에서 알루미늄 입자의 연속적인 이동 양상과 분리 제거 양상을 확연히 관찰할 수 있었으며 $2.64 \times 10^5 \text{N/m}^3$ 의 전자기력을 인가하여 입자의 크기가 직경 약 $20 \mu\text{m}$ 이상의 알루미늄 입자를 모두 분리 제거 할 수 있었다.
2. 실제 상업적으로 쓰이는 ADC 10종과 12종을 이용한 실험에서는 전자기 연속 분리 장치는 합금의 성

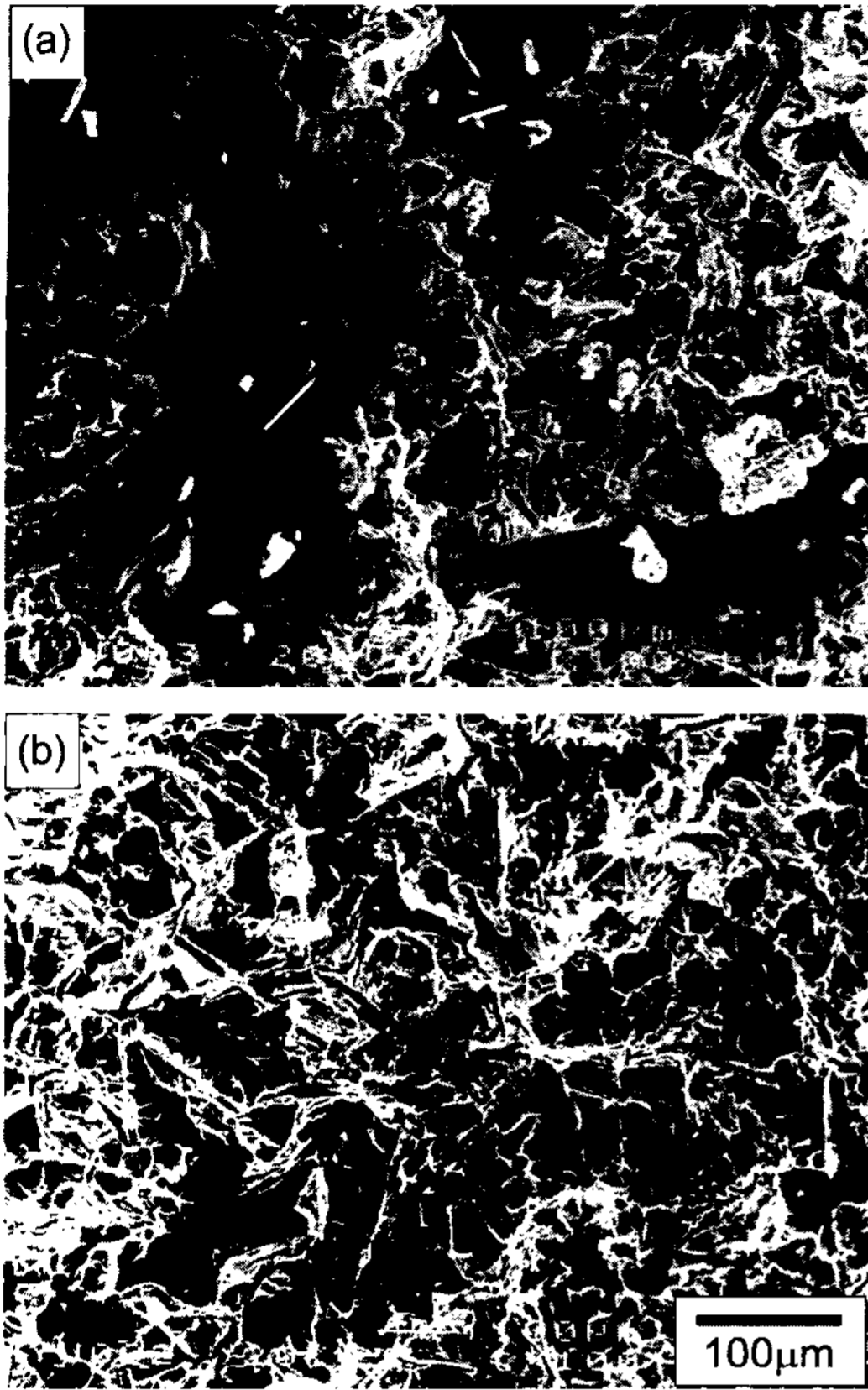


Fig. 10. Fracture surface of specimens after tensile test. (a) Without EMF (b) With EMF

분 변화 없이 응고 후 개재물 감소에 따른 porosity와 수소 가스함량을 감소현상을 보였으며, PoDFA 분석에서는 전자기 연속 분리 장치를 통과함으로써 용탕의 청정도가 향상됨을 입증하였다. 그리고 인장실험을 통한 기계적 특성평가에서도 전자기 연속 분리 장치 통과 후 인장강도와 연신율이 각각 약 20%와 30%정도 증가함을 보였으며 파단면 사진을 통하여 기계적 성질의 향상이 개재물의 제거에 의해 나타났음을 알 수 있었다.

3. 이로써 직류자장과 정자장으로 구성된 전자기 연속 분리 장치가 알루미늄 중의 개재물을 연속적이며 그리고 효율적으로 제거할 수 있음을 입증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행

되어 독특한 특성을 얻었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Eckert : Modern casting, "Inclusions in aluminum foundry alloys", April (1991) 28-30.
- [2] Paul N. Crepeau et. al. : 3rd Inter. Conf. on Molten Aluminum Processing, Orlando, Florida, "Characterization of oxide sludge, dross and inclusions in aluminum melting and holding furnace", (1992) 51-77.
- [3] Committee of chemical analysis/SC2 : Journal of Japan Institute of Light Metals, "Determination of oxide inclusion in aluminum alloys", 39(9) (1989) 646-650.
- [4] Loic Marechal et. al. : The Minerals, Metals & Materials Society, "Influence of convection on agglomeration and removal of nonmetallic inclusions in molten aluminum", Light metals (1993) 907-913.
- [5] S. G. Shabestari and J. E. Gruzleski : Metallurgical and Materials Transaction A, "Gravity segregation of complex intermetallic compounds in liquid aluminum-silicon alloy", 26A(4) (1999) 999-1006.
- [6] D. E. Groteke : Modern casting, "the reduction of inclusions in aluminum by filtration", April (1983) 25-27.
- [7] C. Sztur et. al. : The Minerals, Metals & Materials Society, "Setting of inclusion in holding furnace : modeling and experimental results", Light metals (1990) 709-716.
- [8] Shoji Taniguchi : ISIJ, EPM94, Nagoya, "Separation of nonmetallic inclusions from liquid metal pinch force", (1994) 429-434.
- [9] Joon-Pyou Park : ISIJ, EPM94, Nagoya, "Elimination of tramp element in molten metal using electromagnetic force", (1994) 497-502.
- [10] Nagy El-Kaddah : JOM, "The electromagnetic filtration of molten aluminum using an induces-current separator", May (1995) 46-49.
- [11] D. Shu et. al. : Metallurgical and Materials Transaction A, "Study of electromagnetic separation of nonmetallic inclusion from aluminum melt", Vol 30A, November (1999) 2979-2988.
- [12] F. Frisvid et.al. : The Minerals, Metals & Materials Society, "Removal of inclusion - a survey and comparison of principle", Light Metals (1992, 1991) 1125-1132.
- [13] P. Marty and A. Alemany : Proc. Symp. of the IUTAM, "Theoretical and experimental aspects of electromagnetic separation", The Metals Society, London, (1982) 245-259.
- [14] Jung-Pyung Choi, Jeong-Ho Kim, Eui-Pak Yoon : Bul. Kor. Inst. Met. & Mater, "The elimination of inclusions by electromagnetic force", 12(6) (1999) 688-692.
- [15] Jung-Pyung Choi, Eui-Pak Yoon : Trends in Metals & Materials Engineering, "A study on the continuous elimination of tramp element in molten metal by electromagnetic force", 13(3) (2000) 102-108.