

|||||||
論 文
|||||||

전자기력을 이용한 알루미늄 스크랩 중의 Fe 제거에 관한 연구:
(Part 2. Al-Si-Cu계 합금 스크랩에서 전자기력에 따른
Fe계 금속간화합물의 이동양상)

김정호 · 노정훈 · 박준표* · 윤의박

A Study on the Elimination of Fe Elements in Aluminum Alloy
by Electromagnetic Force
(Part 2. The Movement of Fe-Contained Intermetallics with
Electromagnetic Force in Al-Si-Cu Scrap)

Jeong-Ho Kim, Jeong-Hoon Noh, Joon-Pyo Park* and Eui-Pak Yoon

Abstract

In the view point of the environmental conservation and the energy reduction, the recycling of metal scrap is coming as one of the global subjects in the world. In this study, the movement of intermetallics with electromagnetic force in a melt of a scrap of Al-Si-Cu alloy (JIS ADC12), which was widely used in diecasting process, was investigated in order to eliminate the Fe element, which was usually accumulated in a scrap. In this study, we applied electromagnetic method to eliminate Fe element in ADC12 aluminum alloy scrap which contains 1.64wt.% Fe and the effects of electromagnetic force on the particle movement was visualized and confirmed by water modeling and experiment. As a result, the Fe intermetallic compounds are moved to the direction opposite to that of the electromagnetic force as the force applies, thus eliminated from the bulk metal. Therefore, the content of Fe in matrix decreased from 1.64wt.% to 0.45wt.%. (Received February 20, 1998)

1. 서 론

에너지 절약, 알루미늄 자원의 가격상승 및 자원의 한계성의 차원에서 Al 정련업계에서는 Al 지금의 정제 비용을 줄이고 Al 스크랩으로부터 고품질의 2차지금을 제조하기 위한 노력과 관심이 고조되고 있다. 그러나, 일반적으로 Al 스크랩 중에는 많은 양의 Cr, Cu, Mg, Mn, Si, Fe 등이 함유되어 있으며, 특히 Fe 원소는 Al에 고용도가 적어 Al-Fe, Al-Fe-Si 등의 여러 가지 금속간화합물을 형성하여 Al합금의 기계적 성질을 악화시키고 재료취성의 주원인이 된다. 또한 주조시 액상의 흐름을 방해하여 기공과 같은 주조결함을 유발하게 된다. 따라서, Fe의 양을 조절하는 것은 고품질의 2차

지금 제조에 있어서 기술적으로 대단히 중요하다[1-3].

지금까지 알려진 탈철법으로는 증류분리법, Al-Fe계 공정점을 이용한 편석법, α-고용체분리법, 온도구배법, 공정분리법, 금속간화합물법, 중력분리법 등이 있으나, 공해문제, 비용 그리고 정제의 저효율성, 장치의 복잡함 등으로 인하여 공업화에 어려움이 따른다[4, 5].

Al-Si 스크랩에서의 Fe 제거는 일정한 온도범위 내에서 철이 약 30wt.% 함유된 Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ 금속간화합물을 생성시켜 편석에 의해 제거할 수 있다고 보고되어 왔다[11]. 이러한 프로세스의 효율성은 주요한 변수인 초기 화학조성과 유지온도 및 유지시간의 함수로 결정된다고 연구되었다. 또한, 이러한 프로세스를 이용하여 플랜트 수준에서 0.3wt.%이하로 철이 함

한양대학교 철강공정 및 응용연구소 & RASOM(Research Institute of Steel Processing & Application, Hanyang University & RASOM)

*포항산업과학연구원 철강프로세스부문(Steel Process Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology)

유된 2차지급의 제조가 가능하게 되었다. 그러나, 이 프로세스는 철을 편석시키는데 장시간이 걸리 뿐만 아니라 고온유지에 따른 에너지 소비가 많은 단점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 전자기력에 의한 물리적 제거법을 도입하였다[6, 7]. 이 방법은 알루미늄 용탕과 Fe계 금속간화합물간의 전기전도도의 차이를 이용한 것으로 화합물의 형상 및 크기에 가장 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다[7, 8, 11]. 금속간화합물을 함유하고 있는 용융금속에 전자기력을 인가하면 일반적으로 금속간화합물은 용융금속보다 전기전도도가 낮아 금속간화합물을 통과하는 전류밀도는 작아지고, 금속간화합물 입자에 생기는 전자기력은 상대적으로 용융금속에 생기는 전자기력보다 작게 된다. 따라서, 반작용으로 금속간화합물입자에 전자기력의 역방향힘이 작용하여 금속간화합물입자는 전자기력의 인가방향과 반대방향으로 이동한다. 이러한 전자기력을 이용한 금속간화합물 제거방법의 특징은 중력분리법과는 달리 장시간이 소요되지 않고 단시간에 분리시키는 것이 가능할 뿐만 아니라, 여과법에서 제거하기 힘든 미소입자까지 전자기력에 의하여 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다[8-10].

따라서, 본 연구에서는 Al-Si-Cu합금 용탕에 Mn을 첨가시켜 침상의 Al_5SiFe 의 3원계 금속간화합물을 괴상의 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ 4원계 금속간화합물로 생성시켰으며[11], 이 금속간화합물의 생성온도 이하의 액상에서 전자기력을 인가하여 인가전류에 따른 Fe계 금속간화합물의 이동양상과 그 제거효율을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 입자이동 수모델 실험

본 실험에서는 전자기력에 의한 입자이동을 수모델 실험을 통하여 확인하고자 하였다. 따라서, 전자기력의 크기에 따라 입자이동을 쉽게 관찰할 수 있도록 알루미늄 용탕을 전해질 용액인 NaCl 수용액으로, Fe계 금속간화합물을 폴리스티렌 비전도성 입자로 상정하여 직류 전기장과 직류 자기장에 의한 직류 전자기력을 인가하여 입자의 이동을 관찰하였다. Fig. 1은 수모델 실험의 개략도를 나타낸 것으로 250 ml 비이커에 증류수를 약 200 ml를 넣고, NaCl을 약 5.28 g 첨가하

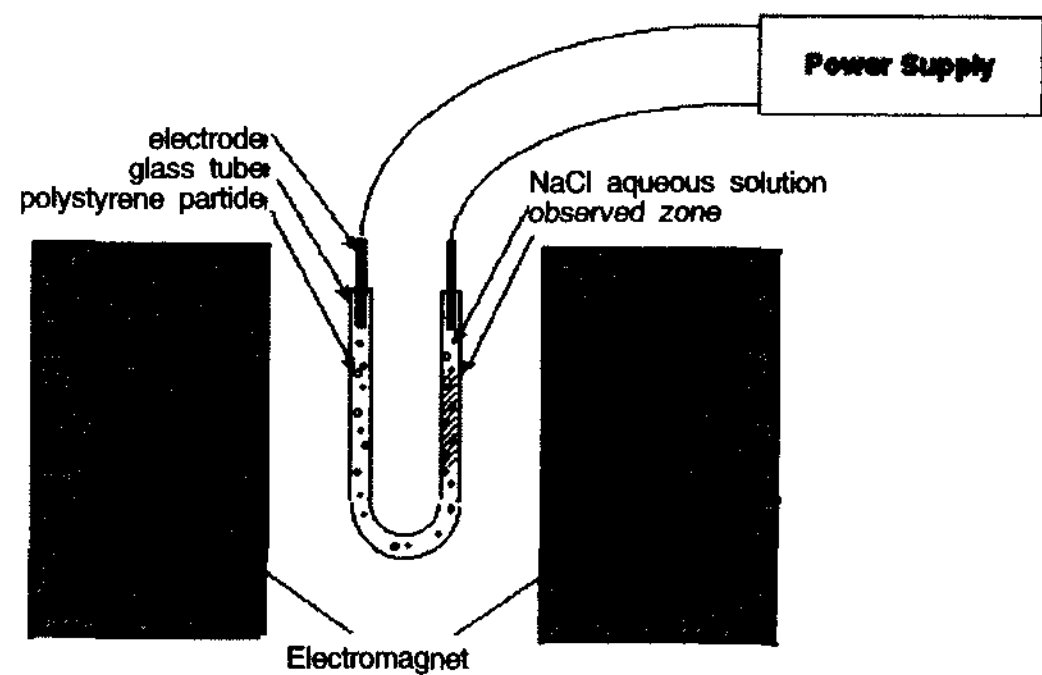


Fig. 1. Schematic diagram of water modeling experiment.

여 NaCl 수용액의 비중이 1.05가 되도록 맞춘 후, 직경 140 μm 인 폴리스티렌구($\rho=1.05$)를 NaCl 수용액에 적당량 첨가하여 자기교반자(magnetic stirrer)를 이용하여 충분히 저어 주어 폴리스티렌 입자들이 비이커 전체에 분포하도록 한다. 이 용액을 직경 5mm인 U자형 유리관에 적당량 주입하고 전자장 제어장치의 자기코어 내부에 고정시킨 다음 유리관의 상부 양단에 텅스텐 전극을 설치하고 폴리스티렌 입자의 움직임이 없을 때까지 유지시킨다. 그 후 전류밀도가 약 $8 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ 이 되도록 직류전류 16A와 직류자장 0.3Tesla를 수직으로 인가하여 폴리스티렌 입자의 이동을 관찰하였다.

2.2 용탕 실험

본 연구에서는 Fe가 약 1.64wt.% 함유된 ADC12종 알루미늄 다이캐스팅용 합금과 이것에 Al-20wt.%Mn 합금을 Mn/Fe의 비가 4/4가 되도록 첨가한 시편을 사용하였으며 Table 1에 화학성분을 나타내었다. 두 시편에 대하여 금속간화합물의 생성온도와 전자기력 인가의 유지온도를 설정하기 위하여 DSC분석을 행하였다.

Fig. 2는 알루미늄 합금에 전자기력을 인가하여 금속간화합물의 이동 양상을 알아보기 위한 실험장치의 개략도이다. Mn/Fe의 비가 4/4가 되도록 Mn을 첨가한 ADC12 알루미늄 합금을 800°C에서 용해한 후 690°C에서 20분간 유지시켜 괴상의 Fe 금속간화합물

Table 1. Initial chemical composition of the alloys (wt.%)

Specimen	Si	Cu	Fe	Mn	Zn	Mg	Cr	Al
ADC12	7.34	1.82	1.64	0.12	0.66	0.00	0.03	bal.
4/4(Mn/Fe)	6.41	1.67	1.68	1.66	0.59	0.00	0.06	bal.

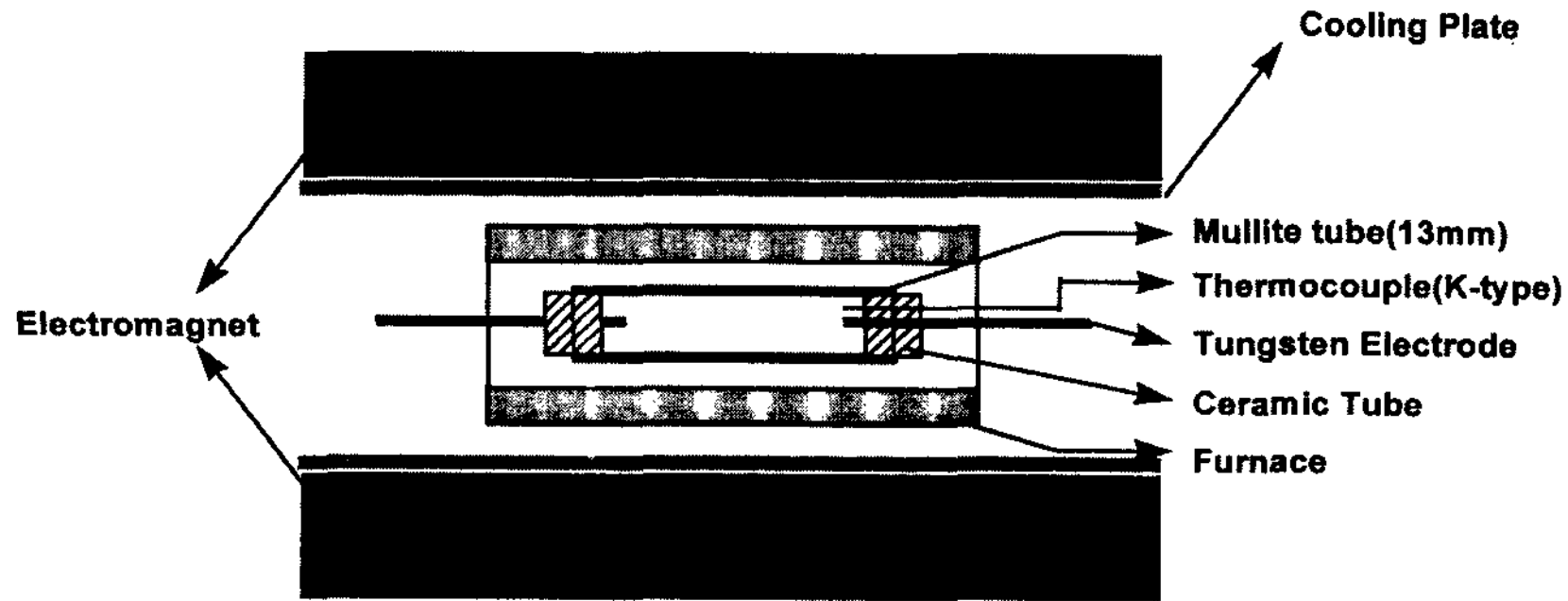


Fig. 2. Schematic diagram of mullite tube for electromagnetic separation.

을 충분히 생성시킨 후 내경 13 mm, 외경 16.5 mm, 길이 200 mm인 물라이트 관에 완전히 차도록 주입한 후 인가자장을 0.3Tesla로 고정하고 직류전류 10, 20, 30, 40A를 각각 60초간 인가하고 급냉시켜 시편의 거시조직을 관찰하고 EPMA로 성분분석을 행하였다.

본 연구에서 생성된 괴상의 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ 금속간화합물의 비중(3400 kg/m^3)은 Al-Si-Cu(2500 kg/m^3)용탕보다 크기 때문에 알루미늄합금 용탕 내에서 비중 차에 의해 하부로 침강하게 된다. 따라서, 전자기력에 의한 금속간화합물의 이동을 확인하기 위해서 전자기력을 중력방향으로 인가하여 금속간화합물이 상부로

이동하는가를 확인하고자 하였다.

또한 괴상의 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ 금속간화합물은 비중이 크므로, 위의 실험과 같이 상부로 이동시켜 분리하는 것보다 하부로 침강시키는 것이 보다 경제적이며 효율적이다. 따라서, 본 연구에서는 전자기력을 중력의 반대방향으로 인가하여 인가전류에 따른 금속간화합물입자의 침강양상을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 전자기력에 따른 NaCl 수용액 내의 폴리스

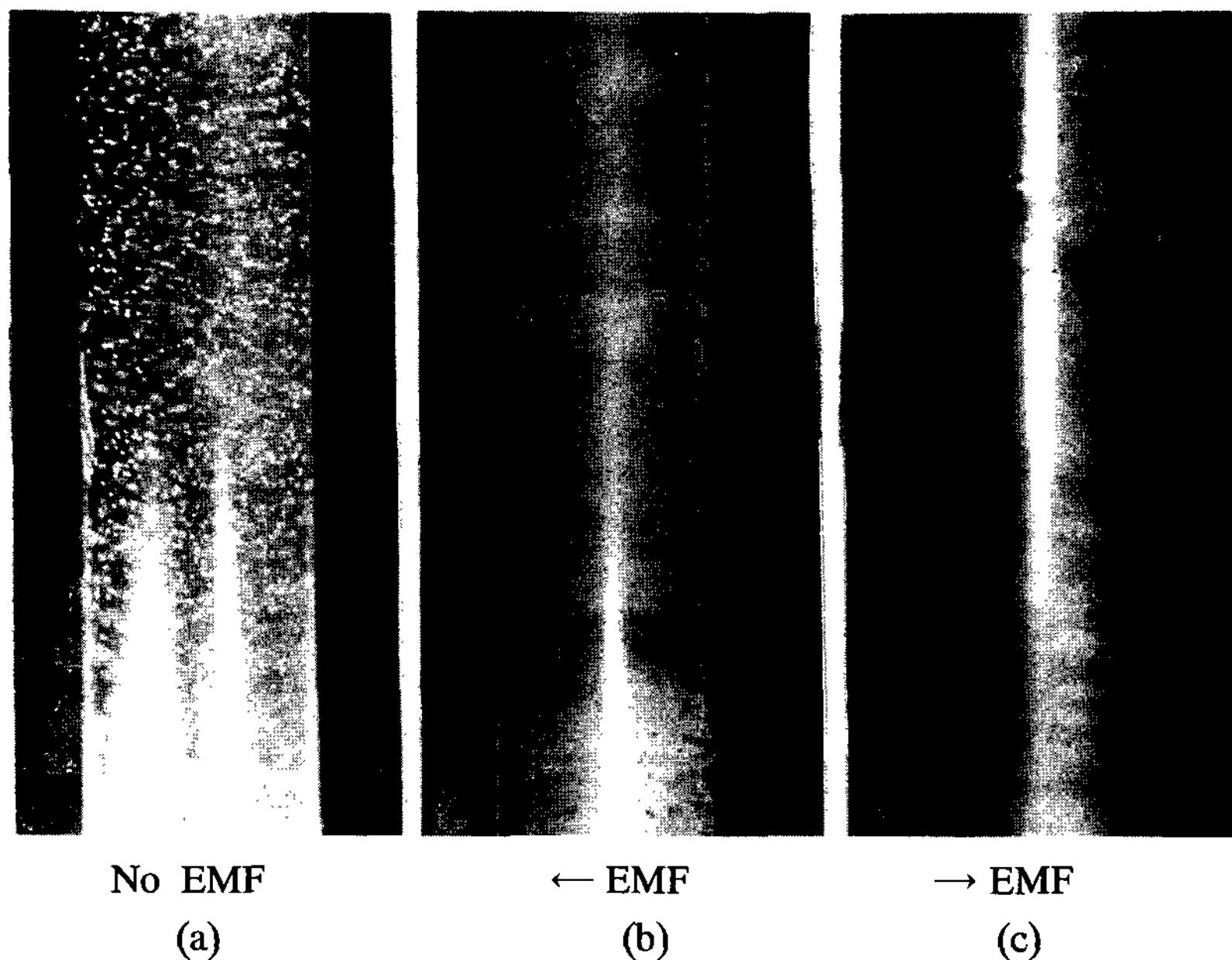


Fig. 3. Movement of polystyrene particles in the different directions of electromagnetic force in water modeling. (a) without EMF, (b) EMF induced at the right direction, (c) EMF induced at the left direction

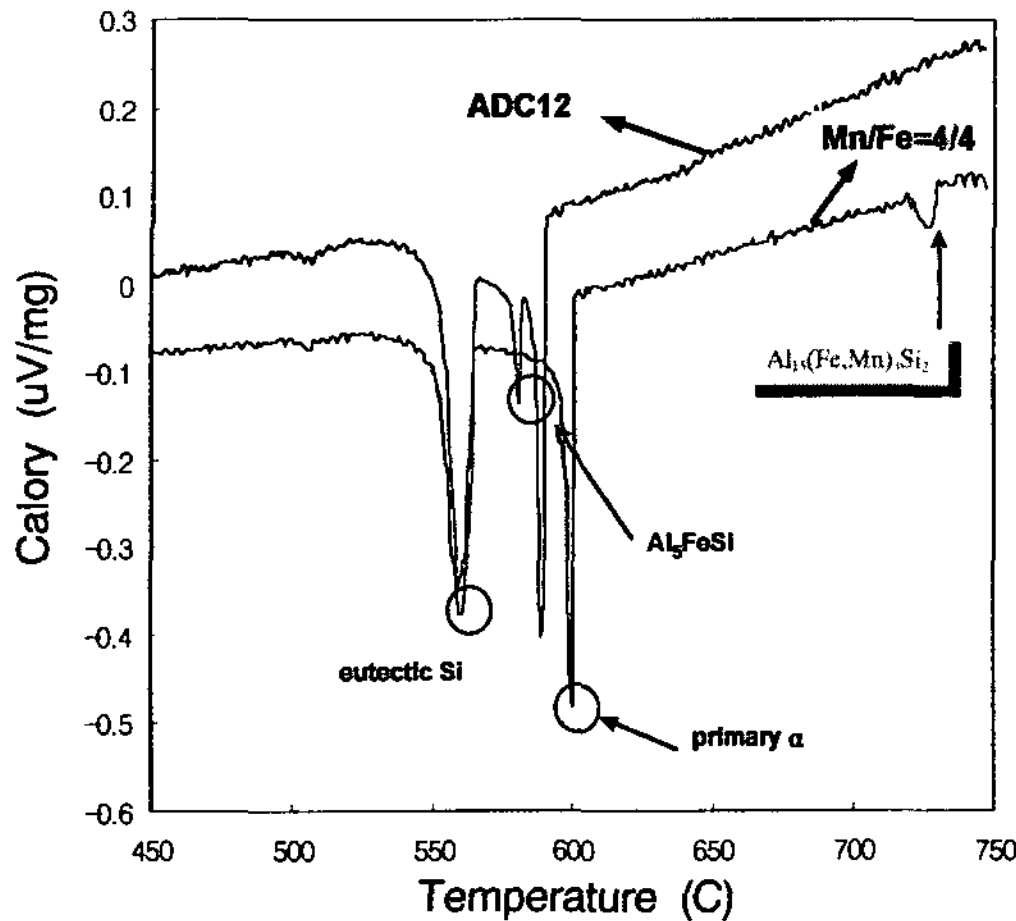


Fig. 4. Plot of calory versus temperature of the specimen.

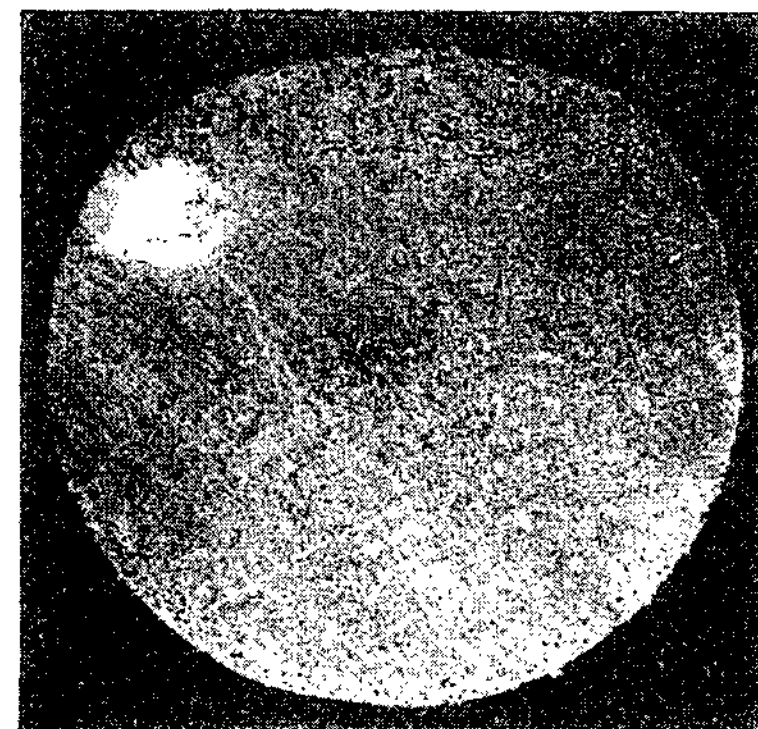
틸렌 입자의 이동양상을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 전자기력이 가해지기 전 입자들이 수용액 내에 고루 분산되어 있는 것을 나타내고 있으며, Fig. 3(b)는 전자기력이 왼쪽 방향으로 가해졌을 때 입자들이 오른쪽 벽면에 모두 모여 있는 것을 나타내고 있다. 그리고, Fig. 3(c)의 경우는 Fig. 3(b)와 반대로 전자기력이 오른쪽 방향으로 가해졌을 때 폴리스틸렌 입자들이 왼쪽 벽면에 모두 모여 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 비전도성의 폴리스틸렌 입자들이 전자기력과 반대방향으로 이동하는 것을 쉽게 관찰할 수 있었으며, 이것은 이론과 잘 일치하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4는 ADC12종 합금과 Mn/Fe의 비가 4/4가 되도록 Mn을 첨가하여 제조한 시편의 냉각시 DSC분석 곡선을 나타낸 것이다. Mn을 첨가하지 않은 시편의 분석 곡선에서는 괴상의 4원계 금속간화합물은 정출하지 않고 약 580°C에서 침상의 3원계 Al₅FeSi 금속간화합물이 정출하였다. Mn을 첨가한 경우는 729°C에서 괴상의 4원계 Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ 금속간화합물이 정출하였으며, 침상의 3원계 Al₅FeSi 금속간화합물은 나타나지 않았다[11]. 따라서, 전자기력을 인가하기 위한 최적 유지 온도로 괴상의 4원계 금속간화합물을 충분히 정출시키고 침상의 3원계 화합물은 생성되지 않도록 580°C와 729°C 사이인 690°C로 설정하였다.

Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂금속간화합물은 괴상으로 비중이 알루미늄에 비하여 상당히 높기 때문에 일정시간 유지하면 하부로 침강하게 된다. 따라서, 전자기력에 의한 이동효과를 알아보기 위해서는 이를 상부로 이동시킴으로써 전자기력에 의한 이동을 확인할 수 있다.



(a) As cast without EMF



(b) with EMF 2mm

Fig. 5. The distribution of intermetallic compounds. (a) Without EMF, (b) with EMF imposed downward (0.3 Tesla, 60A)

Fig. 5(a), (b)는 각각 전자기력을 가하지 않았을 때와 전류 60A, 자장 0.3 Tesla를 중력방향으로 60초간 인가한 후 수냉하여 얻은 시편의 현미경 사진을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 전자기력이 가해지지 않았을 경우로 생성된 금속간화합물은 하부에 어느 정도 침강해 있음을 알 수 있다. 그러나 전자기력이 중력방향으로 가해진 Fig. 5(b)의 경우는 금속간화합물이 상부로 이동해 있음을 알 수 있다. 이것은 용탕내에 전자기력이 가해졌을 경우 관내의 알루미늄 용탕은 중력 방향의 전자기력의 영향을 받아 하부로 이동하려는 압력을 받고, 이와 반대로 전기전도성이 상대적으로 약한 금속간화합물은 전자기적 아르키메데스력을 받아 반중력방향으로 이동한 것으로 이론 및 수모델 실험과 잘 일치하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 6은 인가전류에 따른 금속간화합물의 침강양상을 나타낸 것이다. 인가자장을 0.3 Tesla, 유지온도

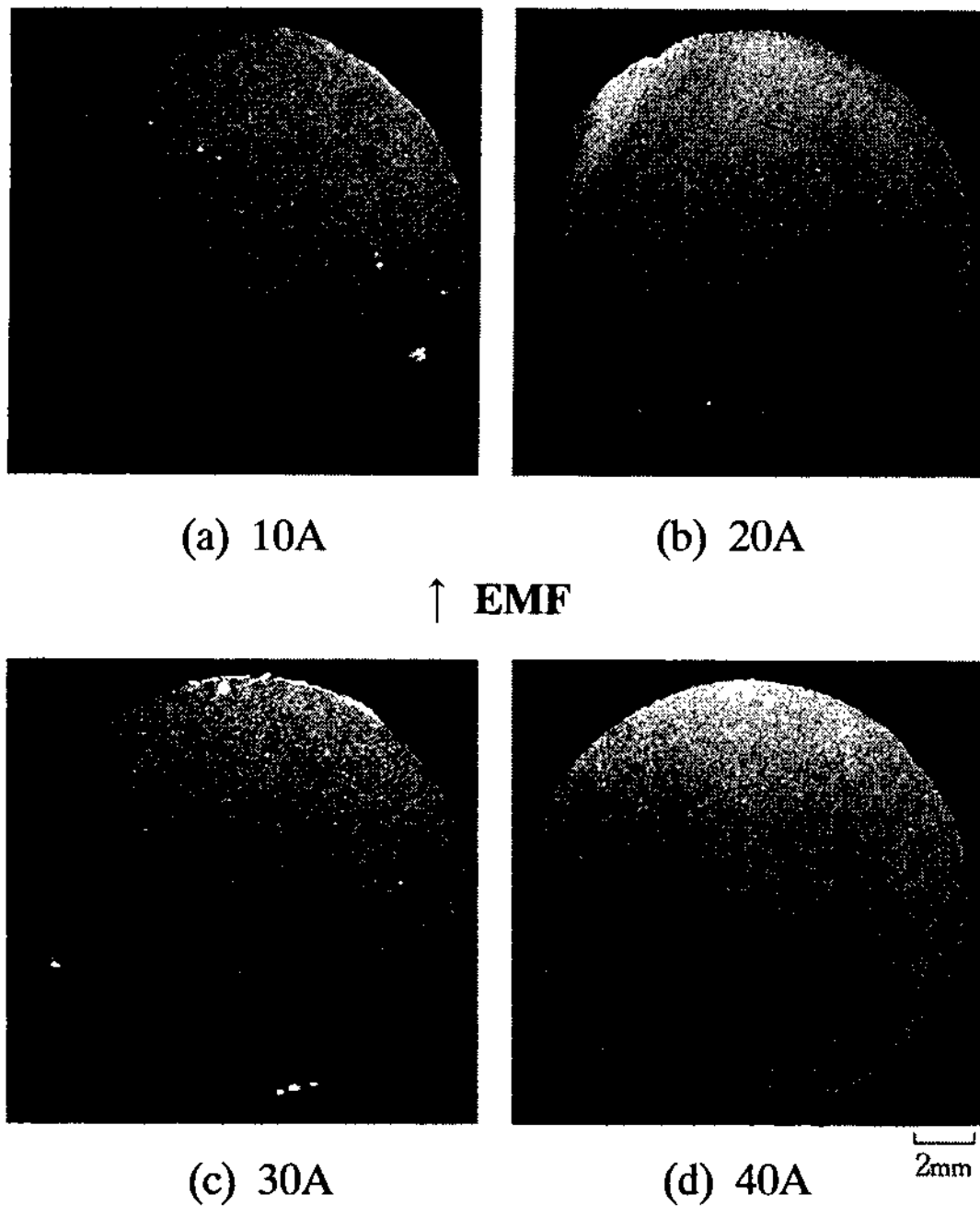


Fig. 6. The distribution of $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ intermetallic compounds with induced currents. (EME: upward, tube diameter = 13 mm, magnetic field = 0.3 Tesla, imposing time = 60s)

690°C에서 20분간 유지한 후 10, 20, 30, 40A를 약 60초간 중력반대방향으로 인가한 후 수냉한 시편의 조직사진을 나타낸 것이다. 10~30A까지 인가한 경우인 Fig. 6(a)~(c)의 경우, 금속간화합물이 하부에 침강해 있으나, 측면벽면에도 상당량이 분포해 있다. 따라

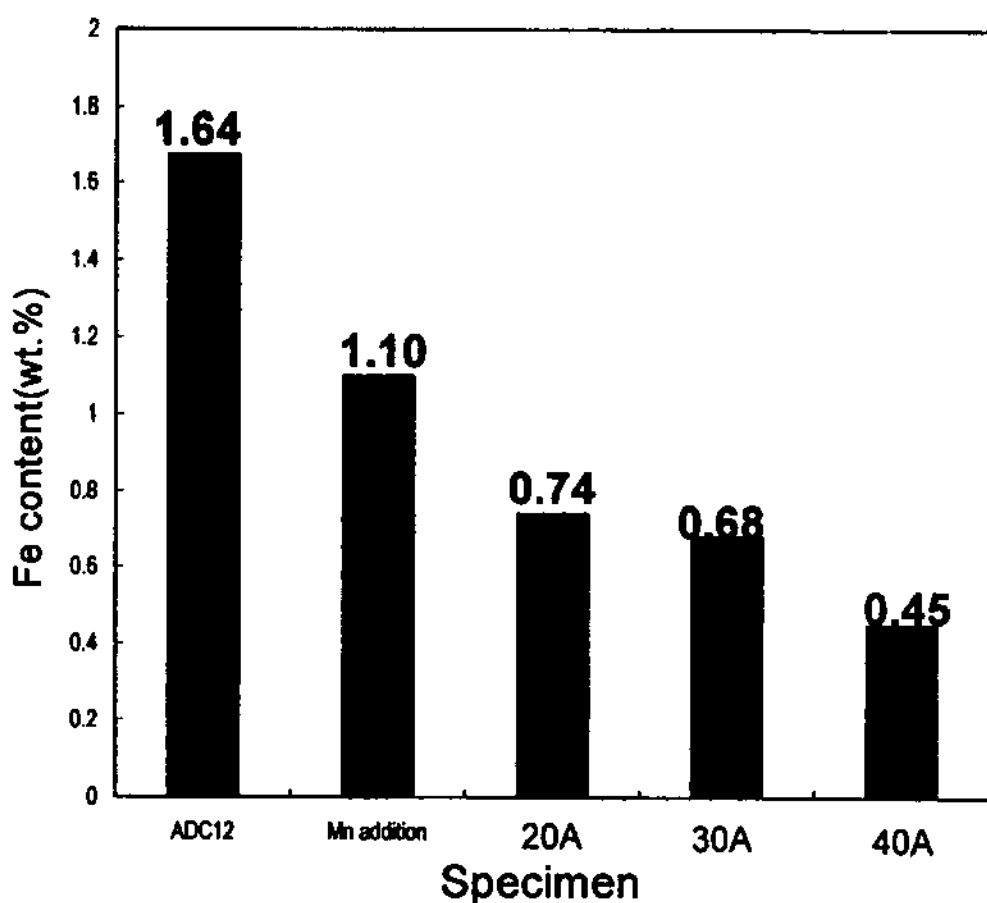


Fig. 7. Variations of Fe content of the matrix with induced currents analyzed by EPMA.

서, 이러한 경우는 하부를 분리 제거하고자 할 경우 그 회수율이 상당히 떨어진다. Fig. 6(d)의 경우는 40A를 인가한 경우로써, 생성된 금속간화합물이 전부 하부에 완전히 침강해 있다.

Fig. 7은 인가전류에 따른 Fe 제거효율을 알아보기 위하여 Fig. 6에서의 각 시편의 중심부에 대하여 EPMA 성분분석을 행한 것이다. 그림에서와 같이 ADC12 모합금의 Fe함량이 1.64wt.%Fe에서 Mn을 첨가하여 금속간화합물을 침강시킨 경우 1.10wt.%Fe까지 감소하였으나, 인가전류가 증가할수록 Fe 함량은 계속 감소하는 경향을 나타내었으며, 인가전류가 40A에서 0.45wt.%Fe로 상당히 감소하였다. 이것은 하부에 침강한 금속간화합물 뿐만 아니라 시편 중심부에 분포하고 있는 미세한 금속간화합물도 전자기력에 의해 하부로 제거된 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄 용탕을 NaCl 수용액으로, Fe 금속간화합물을 비전도성의 폴리스틸렌구로 상징하여 수모델 실험을 행한 결과, 폴리스틸렌구 입자들은 전자기력과 반대방향으로 이동함으로써, 전자기력의 효과를 확인할 수 있었다.

(2) 전자기력을 중력방향으로 인가한 경우 금속간화합물은 알루미늄보다 전기전도성이 낮아 중력 반대방향인 상부로 이동하였다.

(3) 전자기력을 중력반대방향으로 인가한 경우 금속간화합물의 침강정도는 인가전류, 즉 전자기력의 세기가 클수록 많은 양의 금속간화합물이 관의 하부로 침강하였다.

(4) 인가전류가 증가할수록, 즉 전자기력의 세기가 증가할수록 Fe의 제거효율이 증가하였으며 기지의 Fe함량을 1.64wt.%Fe에서 0.45wt.%Fe까지 감소시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 1997년도 통상산업부(한일산업기술협력재단)의 연구비 지원에 의한 일부 결과로 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] L. Anantha Narayanan, F. H. Samuel, and J. E. Gruzleski : Metall. Trans. A, 25A (1994) 1761.
- [2] S. Gowri, F. H. Samuel : Metall. Trans. A, 25A (1994) 437.
- [3] 加藤 銳次 : 輕金屬, 45 (1995) 9.
- [4] A. I. Beliajew : Metallurgy des Aluminums, Bd. II, (1957) 251.
- [5] H. Lovenstein : Light Metal Age, 11 (1953) 18.
- [6] J. P. Park, Yosiko TANAKA *et al.* : Int. Sym. on Electromagnetic Processing of Materials, Nagoya, ISIJ, (1994) 497.
- [7] P. Marty and A. Alemany : Proc. of a Sym. of the IUTAM, (1984) 245-259
- [8] Ch. Vives and R. Ricou : The 3rd Int. Seminar on Magnetohydrodynamic Flows and Turbulence, (1987) 387.
- [9] Anatoliy Fedorovich KOLESNICHENKO : ISIJ International, 30 (1990) 8.
- [10] Daniel Leenov and Alexander Kolin : J. of Chemical Physics, 22 (1954) 683.
- [11] J. H. Kim, H. S. Park, K. M. Kim and E. P. Yoon : J. of the Korean Foundrymen's Society, 18 (1998) 139-145.