

# Fe-P-(Mo,Mn)계 소결분말 합금에서 Si 첨가에 따른 기계적 특성 변화에 대한 연구

정우영<sup>a</sup> · 박동규<sup>c</sup> · 고병현<sup>a</sup> · 박진우<sup>a</sup> · 안인섭<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>경상대학교 나노신소재 공학부, <sup>b</sup>경상대학교 그린에너지 융합연구소, <sup>c</sup>경상대학교 링크사업단

## Mechanical Properties of Fe-P-(Mo,Mn) Sintered Alloy Related with Si Contents

Woo-Young Jung<sup>a</sup>, Dong-Kyu Park<sup>c</sup>, Byung-Hyun Ko<sup>a</sup>, Jin-Woo Park<sup>a</sup>, and In-Shup Ahn<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup>School of Nano and Advanced Materials Science & Engineering, <sup>b</sup>RIGET and <sup>c</sup>LINC, Gyeongsang National University, 900 Gajwa-dong, Jinju, Gyeongnam 660-701, Korea  
(Received October 10, 2016; Revised October 22, 2016; Accepted October 24, 2016)

**Abstract** A lean alloy is defined as a low alloy steel with a minimum amount of the alloying element that maintains the characteristics of the sintered alloy. It is well known that the addition of elements such as Cr, P, Si, or Mn improves the mechanical characteristics of the alloy, but decreases the sinterability. The mother alloy is used to avoid an oxidation reaction with the alloying elements of Cr, P, Si or Mn. The purpose of this study is to determine the change in the mechanical properties of Fe-P-Mo and Fe-P-Mn alloys as a result of the addition of Si. In this article, the Fe-P-Mo and Fe-P-Mn alloys to which Si is added are compacted at 7.0 g/cm<sup>3</sup> and then sintered in H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> at 1120°C. The P around the macropores and large grains reduces due to the formation of SiO<sub>2</sub> as the Si content increases. This is caused by the increase in strength owing to reducing intergranular fracture by suppressing the reaction with oxygen.

**Keywords:** Lean alloy, Sintered density, Deflective strength, Fe-P-(Mo,Mn) alloy

### 1. 서 론

분말야금공정은 주조공정에 비해 기계가공이 적으며, 손실량이 적기 때문에 경제적이지만 기공으로 인하여 주 단조재에 비해 강도가 낮은 단점을 가지고 있다. 이를 개선하기 위해 밀도를 높이거나 합금원소를 첨가하여 강도를 보완하기도 한다. 그러나 합금원소를 다량으로 첨가하면 성형성이 낮아져 성형압력을 높여야 하거나 다이 마모를 높이는 등의 공정비가 증가하고 합금원소의 첨가로 인해 경제성이 떨어지게 되는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 해소하기 위하여 고가 합금원소 첨가량을 감소시켜서 린합금을 개발하는 연구가 진행되고 있다.

린합금(lean alloy)은 소결합금의 소결 특성을 유지하면서 합금원소의 함량을 최소화시킨 저합금강으로 정의되고

있다. 특성 향상을 위해 Ni, Mo 등과 같은 고가의 원소 대신에 보다 경제적인 Cr, P, Mn 또는 Si 등의 원소를 첨가한다고 알려져 있다[1].

P를 첨가하는 주된 이유는 Fe-P계 상태도에서 알 수 있듯이 비교적 낮은 온도의 공정반응과[2], P 원자가 오스테나이트에 비해 약 두 배 정도 철의 확산도와 자기확산 속도를 증가시키기 때문에  $\alpha$ -철의 안정화 효과를 가진다[3,4]. P의 경우 철의 소결공정을 가속화시켜주는 효과를 가지고 있다[5]. P를 첨가함으로써의 장점은 액상소결, 페라이트 안정화, 고용경화 3가지로 설명된다[6]. P의 함량이 더욱 증가 할 경우 재료는 더욱 약해지며, 이는 P가 산소와의 높은 친화력으로 인해 산소와 반응하여 산화물층을 형성시켜 입계파괴 양상이 생성되기 때문이다. 그러므로 산소와의 친화력이 높아 전반적으로 분말야금에서 사용되지

\*Corresponding Author: In-Shup Ahn, TEL: +82-55-751-5304, FAX: +82-55-772-1670, E-mail: ais@gsnu.ac.kr

않았으나, 이를 보완하기 위해 모합금 형태로 사용하여 산화반응을 피할 수 있는 가능성이 제시되었다[7].

Si 원소 첨가는 주단조제와 유사한 효과를 갖는 것을 확인할 수 있다. Si 첨가로 인한 페라이트의 강도 증가와 펄라이트 구조를 미세화시켜 경도를 증가시키는 효과를 가지고 있다. 또한 Si는 높은 탄소함량에서의 탄화물 형성을 억제시켜 강도를 증대시키며 이로 인해 합금비용 감소에 큰 영향을 줄 수 있다[8]. 이들 원소들은 특정 경제적 효과를 가지고 있지만, 산소와의 친화성으로 소결조건 등이 제한되는 문제가 있다.

본 연구에서는 Fe-P-Mo계 및 Fe-P-Mn계에서 산소와 반응을 줄이기 위해 모합금을 이용하여 Si 첨가에 따른 기계적 특성의 변화에 대해 알아보려고 하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 수행된 실험 공정을 그림 1에 나타내었다. 사용된 분말은 Posco사의 Fe분말(IPB)과 Quebec Metal Powder사의 Fe-0.85Mo 합금분말(AT-4401)을 베이스로 하고, 합금 첨가물들은 산화와의 친화력을 낮춰 소결 공정 중에 확산이 용이하게 진행되도록 Fe-25P, Fe-75Mn, Fe-75Si의 모합금 형태로 사용하였다. 모합금의 경우 덩어리 형태로 구입하여 볼밀(ball mill)을 이용하여 45  $\mu\text{m}$  이하의 입도로 분쇄 후 사용하였다.

이와 같은 원재료 분말은 Fe-0.5P-0.5Mo, Fe-0.5P-0.2Mn 합금조성을 가지며 Si 함량을 달리하여 (0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 wt%) Si 첨가에 의한 영향을 관찰하고자 하였다.

혼합은 V형 혼합기(V-mixer)를 이용하여 회전 속도비 270 rpm에서 30분 동안 혼합을 실시하였다. 혼합한 분말을 유압식 프레스를 이용하여 성형하였다. 성형은 무게 6g, 7.0 g/cm<sup>3</sup>의 성형밀도, 50×4×4 mm의 크기를 가지는 bar 형태로 제조하였다. 소결은 벨트로(Belt type furnace)에서 1120°C 온도로 수소-질소 분위기에서 30분간 실시하

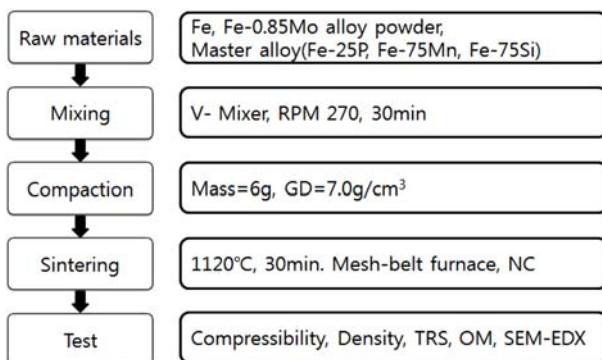


Fig. 1. Flowchart of experimental procedure.

였다. 소결 후에도 시편의 변형이 없었으므로 마이크로미터를 이용하여 치수밀도를 측정하였다. 소결된 합금계의 기계적 특성을 조사하기 위해 TRS(Transverse Rupture Strength) 특성분석을 실시하였고, TRS 측정값은 각 15회 측정하여 평균값으로 나타내었다. TRS 특성분석을 통하여 얻어진 파단면은 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, Philips Co., XL30S FEG)을 이용하여 관찰하였으며, 성분 분석을 위해 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 측정하였다. Si 함량에 따른 미세조직에 미치는 영향을 분석하기 위해 광학현미경(OM, Olympus Co., GX51)을 이용하여 소결체를 연마 후 부식시켜 미세조직을 비교하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 Fe-P-Mo, Fe-P-Mn계의 7.0 g/cm<sup>3</sup>의 성형밀도로 성형한 성형체의 Si 함량 변화에 따른 압축성을 보여주는 그래프로 Si 함량이 0.3 wt% 이하에서는 Fe-P-Mo계가 더 높은 성형압을 나타냈으나, 이후 1.0 wt%까지의 범위에서는 Fe-P-Mn계가 성형압이 더 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상에 대해서는 구체적으로 알려진 바가 없으므로 추후 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. Si 0.3%이하 첨가된 경우에는 Fe-P-Mn계에 사용되는 Fe분말이 Fe-P-Mo계에 사용되는 Fe-0.85Mo 분말보다 높은 성형성 결과를 나타내었다. 하지만 Si 함량 0.3% 기준으로 Si 함량이 증가함에 따라 Fe-0.85Mo의 성형성이 더 우수한 것을 확인할 수 있었다.

그림 3은 Fe-P-Mo, Fe-P-Mn계의 7.0 g/cm<sup>3</sup>의 성형밀도로 성형한 성형체의 1120°C 소결 후 밀도 변화를 보여 주고 있다. Fe-P-Mo계가 Fe-P-Mn계보다 소결밀도가 0.05 g/cm<sup>3</sup>가량 높았고, 소결 시 Si 첨가와 더불어 더 큰 밀도감

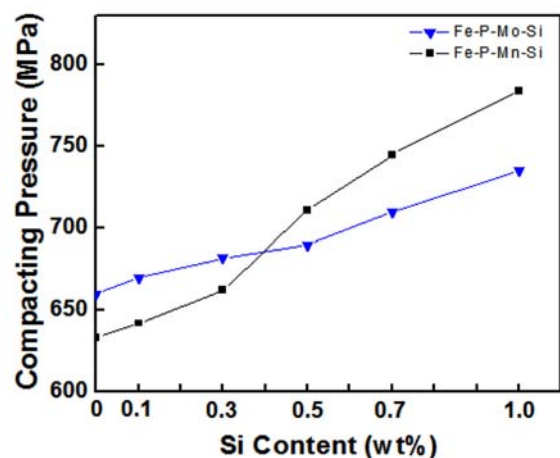


Fig. 2. Compressibility of Fe-P-Mo and Fe-P-Mn related with Si contents.

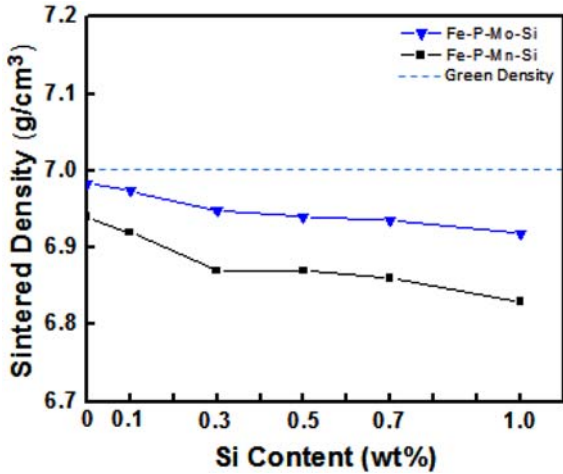


Fig. 3. Sintered density of Fe-P-Mo and Fe-P-Mn related with Si contents.

소 폭을 보였다. 이는 Fe-P-Mo계에서 Mo과 Si의 페라이트 소결로 인해 확산속도를 증가시켜 재료의 치밀화를 향상시켜주는 역할을 가진다[9]. 두 합금계의 소결밀도 변화 차이를 보았을 때, 연구결과에 따르면 Si 첨가 시 Mo과 함께 합금화 될 경우 시너지 효과로 인해 향상된 열처리 특성을 갖는 것으로 나타나 있다[10]. Si 첨가량이 증가함

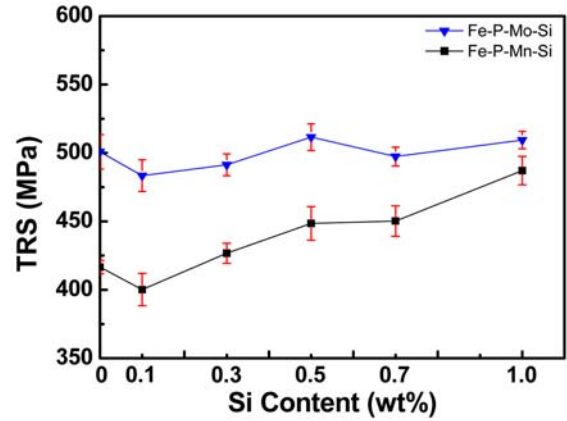


Fig. 4. TRS Curves of Fe-P-Mo and Fe-P-Mn related with Si contents.

에 따라 소결 시 Fe-P-Mn계가 Fe-P-Mo계에 비해 치수팽창이 더 크고 확산이 늦어 밀도 감소폭이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. Si 함량이 증가할수록 두 합금의 경우 모두 밀도는 감소하였는데 이는 앞선 연구자들에 의하면 Si 함량이 증가할수록 밀도는 감소하며 기계적 특성에서 연신율은 감소하지만 강도와 충격에너지가 증가하는 것으로 알려졌다[11]. 이는 본 연구에서도 마찬가지로 Si 함량이

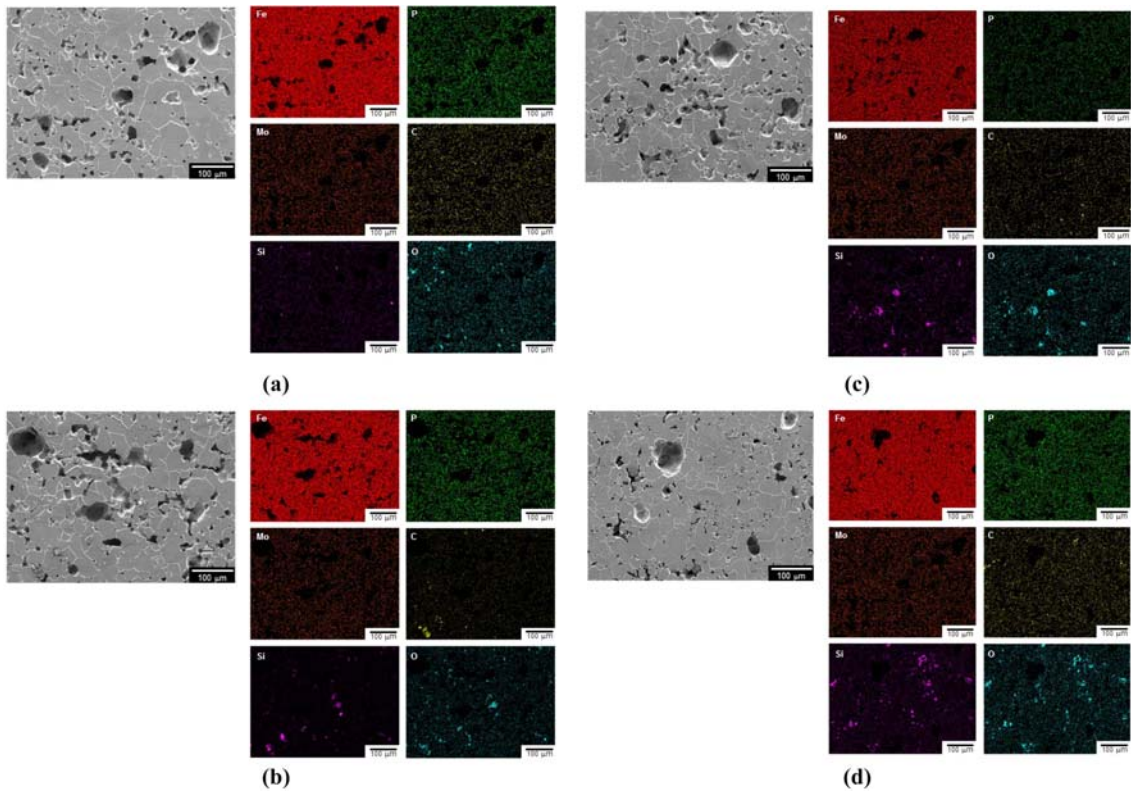


Fig. 5. EDS mapping results of specimens : (a) Fe-P-Mo-0.1Si, (b) Fe-P-Mo-0.3Si, (c) Fe-P-Mo-0.5Si, (d) Fe-P-Mo-1.0Si.

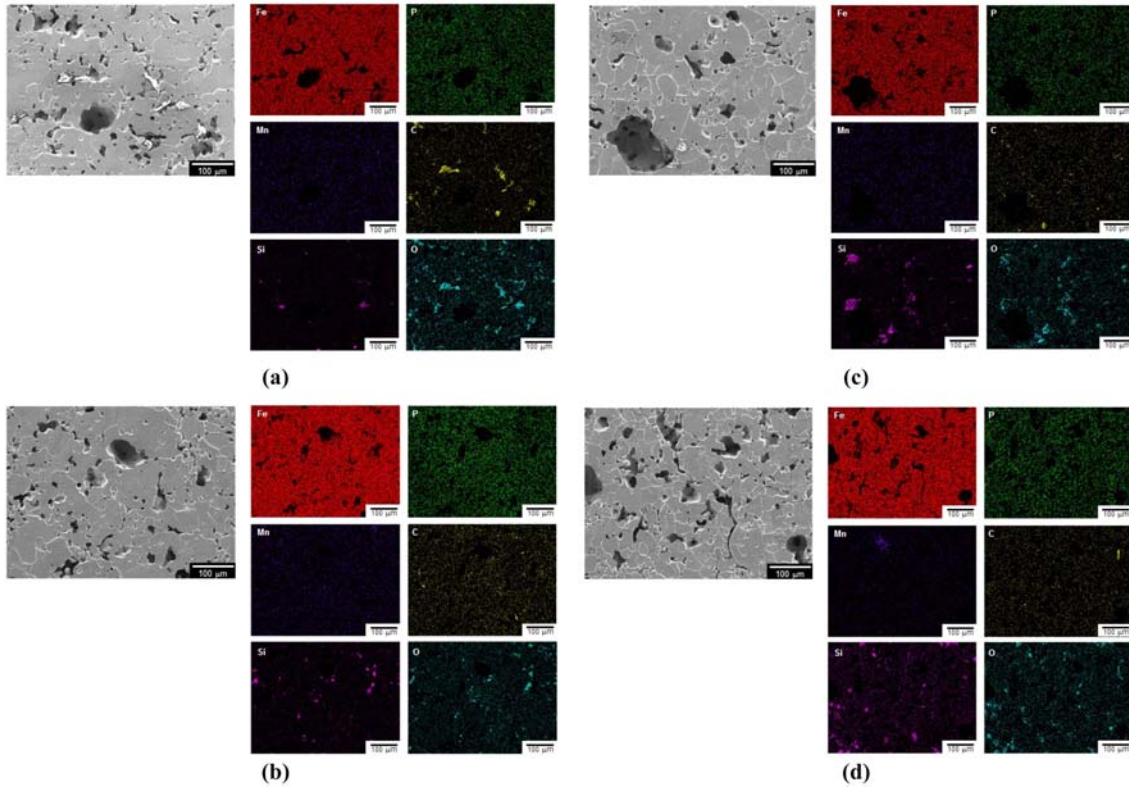


Fig. 6. EDS mapping results of specimens : (a) Fe-P-Mn-0.1Si, (b) Fe-P-Mn-0.3Si, (c) Fe-P-Mn-0.5Si, (d) Fe-P-Mn-1.0Si.

증가할수록 밀도는 감소하고 TRS 강도는 동일한 밀도일 경우 증가할 것으로 사료된다.

그림 4는 Si 첨가량에 따른 TRS 강도 결과를 보여주고 있다. 두 합금계 모두 밀도의 감소에도 불구하고 강도가 일정 수준으로 유지하거나 높아지고 있다. 동일한 소결밀도에서 실험을 했을 경우, Si 함량이 증가 할수록 더 높은 강도증가가 예상된다. Fe-P-Mn계의 경우 Fe-P-Mo계보다 밀도가 더 낮음에도 불구하고 Si 함량이 증가 할수록 더 높은 강도 변화를 나타내고 있다. 이는 Si를 첨가함으로써 P와 산소와의 반응을 억제하고 높은 친화력으로 인해 입계취성과 입계파괴를 야기 시키는 Fe-P 영역을 감소시켜 강도가 증가할 것이라고 예상된다.

그림 5와 그림 6은 소결 후 Fe-P-Mo계와 Fe-P-Mn계의 미세조직 분석 및 EDS분석 결과이다. 공통적으로 Si 함량에 관계없이 거대 기공이 관찰되었다. 거대기공 주변으로 큰 결정립이 형성되어있음을 관찰할 수 있었고 성분분석 결과 큰 기공 주위의 크기가 큰 결정립에서는 P의 함량이 평균 1.3 wt%로 높게 나타나 Fe-P 영역이 존재하였고, Si 함량이 증가할수록 거대 기공은 줄어들며, 결정립크기가 작아지는 것을 확인할 수 있었다. Fe-P-Mo계의 경우에는 Si 함량이 0.5%, Fe-P-Mn계의 경우 0.3% 이상 첨가 시 Si의 일부가 SiO<sub>2</sub>로 연계되는 현상을 확인 할 수 있었으며,

이것이 Fe-P 영역을 감소시키고 P의 산소와의 반응을 억제시켜 입계파괴가 줄어들 것으로 생각된다.

그림 7은 TRS 시험을 진행한 시편의 파단면을 전계방출형 주사전자현미경을 이용하여 파단면을 관찰하였다. 파단면은 전체적으로 미세한 딴플 구조를 형성하고 있으며, 국부적인 영역에서 입계파괴의 양상이 나타남을 확인할 수 있다. 이는 0.45% 이내의 P의 소량첨가는 강도와 연성의 증가로 이어질 수 있지만, 입계파괴 영역은 0.3% 내에서도 관찰되어진다고 나타나있다. 그러나 P의 함량이 0.6% 이상일 경우 입계취성의 위험이 증가 된다[12]. P의 함량이 증가 할수록 산소와의 높은 친화력으로 인해 재료는 약해지며 높은 P 함량에서 순수 입계취성과파괴가 발견된다. 하지만 Si 함량이 증가할수록 입계취성 영역이 감소하였고, 그림 5와 6에서 확인할 수 있듯이 거대기공 주변의 큰 결정립들이 입계파괴 양상을 나타내며 Si 함량이 증가 할수록 입계취성이 줄어들며 전체적으로 딴플구조를 형성하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 Fe-P-Mo계보다 Fe-P-Mn계에서 Si 함량 증가에 따라 입계파괴양상으로 나타난 Fe-P 영역의 면적이 더 급격하게 감소하는 것으로 보아 Fe-P-Mn계에서 Si 함량이 증가할수록 P의 확산이 억제되어 강도증가가 더 크게 일어난 것으로 사료된다.

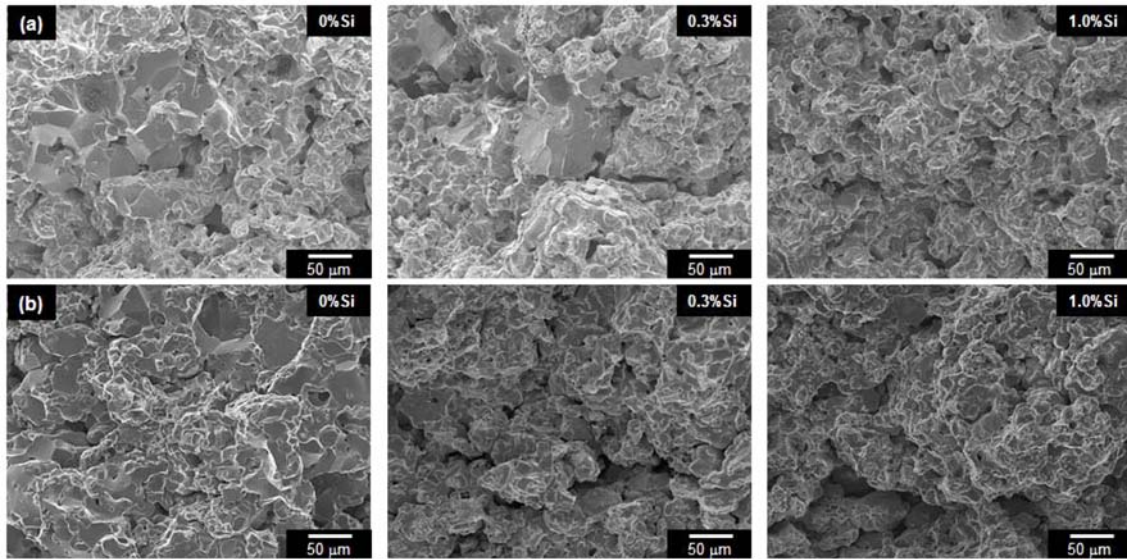


Fig. 7. SEM images of (a) Fe-P-Mo and (b) Fe-P-Mn related with Si contents.

### 3. 결 론

Fe-P-Mo계 및 Fe-P-Mn계 소결분말 합금에서 Si 첨가에 따른 기계적 특성 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

두 합금 모두 소결 후 밀도가 감소하였으며 이는 Si 함량이 증가할수록 체적이 팽창되어 밀도가 감소하는 경향을 보였다. Fe-P-Mo계의 경우는 Si 함량 증가에 따라 거의 변하지 않는 강도 값을 보였으며, Fe-P-Mn계의 경우 강도가 점차적으로 증가하였다. 이는 Si 함량이 증가할수록 거대기공 주위에 존재하는 P가 줄어들며 결정립 크기도 감소하였고 Si는 SiO<sub>2</sub>의 형태로 존재하여 이것이 산소와의 반응을 억제시켜 입계파괴 양상을 감소시켜 강도의 증가를 나타낸 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 논문은 한국연구재단(NO. NRF-2013R1A1A2063036)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### References

[1] R. Oro, M. Campos, JM. Torralba and C. Capdevila: Powder Metall., **55** (2012) 294.

[2] H. Okamoto: Phase Diagrams of Binary Iron Alloys, ASM **9** (1993).  
 [3] Houdremont, E.: Handbuch der Sonderstahlkunde, Springer-Verlag, Berlin, (1943) 944.  
 [4] P. Lindskog, J. Tengzelius and SA. Kvist: Powder Metall., **10** (1976) 97.  
 [5] RM. German and DS. Madan: Powder Metall., **15** (1984) 441.  
 [6] J. Lynn, P. Rosa, H. MeyerIII, U. Engstrom, S. Berg, J. Tengzelius and R. Frykholm: World Congress on Powder Metallurgy & Particulate Materials, (2005) 263.  
 [7] R Oro, M Campos, J M Torralba and C Capdevila: Powder Metall., **55** (2012) 294.  
 [8] Joe Capus.: Metal Power Report, **68** (2013) 17.  
 [9] Jens Rasmus, Anna Larsson and Heike Grosser: PIM International, **5** (2011) 84.  
 [10] Franciso Castro, Shandra Sainz, Bruce Lindsley and W. Brian James: Powder Metall., **29** (2007) 304.  
 [11] C. Schade, T. Murphy, A. Lawley and R. Doherty: Powder Metall., **49** (2013) 9.  
 [12] V. Vassileva, D. Krecar, C. Tomastik, Ch. Gierl-Mayer, H. Hutter and H. Danninger: Powder Metall., **15** (2015) 36.