

# P형 FeSi<sub>2</sub>의 열전물성에 미치는 입자크기 및 첨가물 영향

배철훈<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>인천대학교 생명공학부

## The Effect of Particle Size and Additives on the Thermoelectric Properties of P-type FeSi<sub>2</sub>

Chul-Hoon Pai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Bio-Engineering, Incheon National University

**요 약** Fe-Si계 합금은 우주탐사용으로 응용되고 있는 Si-Ge합금보다는 낮은 성능지수를 나타내지만 원료가 풍부하여 저가이고, 제조가 간단하며, 800℃까지 사용가능한 중고온용 열전발전재료이다. 본 연구에서는 고주파 진공유도로를 이용해서 제조한 p형 FeSi<sub>2</sub>의 열전물성에 미치는 입자크기 및 첨가물 영향에 대해 조사하였다. 조성입자크기가 작을수록 소결 밀도 증가와 함께 입자와 입자간의 연결성 향상에 의해 도전율이 증가하였다. Seebeck 계수는 600~800K에서 최고값을 나타내었고, 잔존하는 ε-FeSi 금속전도상에 의해 약간 감소하였다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>를 첨가한 경우, 잔존 금속전도상 및 Si 결핍량 증가에 의해 도전율은 증가하였고 Seebeck 계수는 감소하였다. 반면에 SiO<sub>2</sub>를 첨가한 경우에는 도전율과 Seebeck 계수 모두 상승하였다.

**Abstract** Although Fe-Si based alloy has lower figure of merit than Si-Ge alloy applied for space probe, its low cost related to abundant raw material, rather simple processing, high temperature resistance and reliability up to 800℃ made it one of the most promising middle temperature thermoelectric generation materials. The effect of particle size and additive on the thermoelectric properties of p-FeSi<sub>2</sub> prepared by a RF inductive furnace was investigated. The electrical conductivity increased slightly with decreasing particle size and hence better grain-to-grain connectivity due to the increase of density. The Seebeck coefficient exhibited the maximum value at about 600~800K and decreased slightly with increasing particle size. This must be due to the amount of residual metallic phase ε-FeSi. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and/or Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-doped specimens showed the higher electrical conductivity and the lower Seebeck coefficient due to increase of the metallic phase and Si-vacancy. On the other hand, SiO<sub>2</sub>-doped specimen showed the higher electrical conductivity and the higher Seebeck coefficients.

**Key Words** : Additives, Electrical conductivity, Mn-doped FeSi<sub>2</sub>, Particle size, Seebeck coefficient

### 1. 서 론

열전발전이란 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 열전반도체를 응용한 것으로 선진국에서는 수십년전부터 연구 개발하여 고속증식로, 우주항공, 해저탐사 등 각종 분야에 사용되어지고 있다. 또 열전발전은 열(폐)에너지를 이용하여 전기를 얻을 수 있는 유일한 방법으로,

이용 열원이 다양하고, 무소음이며, 소형화가 가능하며, 출력을 용이하게 조절할 수 있다는 장점을 지니고 있어서 소형 발전기로서의 응용도 가능하다.

이중 물질 a-b 접합회로의 한쪽 접합부를 고온, 다른 쪽의 접합부를 저온으로 유지하면, 스위치를 개방한 두 개방회로의 단자간에는 접합부 온도차에 대응하는 개방 전압이 발생한다. 이 현상을 Seebeck 효과라 하며, 발생

본 논문은 인천대학교 2009년도 교내학술연구지원사업에 의해 수행되었음.

\*Corresponding Author : Chul-Hoon Pai(Incheon National Univ.)

Tel: +82-32-835-8277 email: paichlab@incheon.ac.kr

Received March 13, 2013

Revised March 25, 2013

Accepted April 11, 2013

하는 전압을 열기전력이라고 한다. 이것은 온도차를 구동력으로 해서, 고체 중의 전류 캐리어가 고온측에서 저온측으로 이동하여, Fermi 준위의 경사도와 캐리어의 차이에 의한 전계가 함께 작용하는 형태로 열기전력이 발생하는 것이다. 캐리어가 전자이면 저온측에 (-)의 전하가, 정공이면 (+)의 전하가 모이기 때문에, 온도차 1K에서의 열기전력인 Seebeck 계수(부호를 포함)  $\alpha$ 를 다음의 식으로 정의하면, 그 부호를 갖는 캐리어가 존재하는 것을 알 수 있다.

$$\alpha = -\frac{\Delta V}{\Delta T}$$

즉,  $\alpha > 0$ 이면 (+)의 전하를 갖는 캐리어가,  $\alpha < 0$ 이면 (-)의 전하를 갖는 캐리어가 존재하게 된다. 열전변환이라는 것은, 이러한 원리에 의해서 열에너지를 전기에너지로 변환시키는 것을 말한다.

열전변환효율은 시스템의 고온부와 저온부의 온도차가 클수록, 열전재료의 성능지수  $Z(Z = \alpha^2/\kappa)$ 가 증가할수록 높아진다[1,2]. 여기서  $\alpha$ 는 도전율,  $\alpha$ 는 Seebeck 계수,  $\kappa$ 는 열전도율을 나타낸다. Wiedemann-Franz-Lorenz 법칙에 의하면 금속의 경우 열전도율과 도전율의 비가 일정하므로 높은 성능지수를 얻는 것은 불가능하다. 반면 반도체의 경우 도전율에 비해 열전도율이 상대적으로 높아지게 되므로 중원소 화합물, 격자의 고용효과 및 비정질화에 의한 무질서도를 부여할 필요가 있다. 이론적으로 보면 이 세 가지 변수는 캐리어농도에 따른 함수이므로 성능지수의 최대값은 반도체 물질에서 나타나게 된다. 따라서 재료공학적인 측면에서는 Seebeck 계수와 도전율이 큰 재료를 선택하여 미세구조 및 결정구조제어에 의해 열전도율을 낮추고자하는 방법이 이용되고 있다.

일반적으로 열전재료들은 성능지수의 최대값이 지시하는 온도에 따라 저온용(실온~100℃), 중온용(200~600℃), 고온용(700℃ 이상)의 3가지로 분류할 수 있다. Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>, PbTe 등과 이들의 고용체 화합물 반도체들이 냉각장치와 발전재료로 상업적으로 적용되고 있지만, 이 재료들은 1000℃ 이상의 고온에서 쉽게 산화되고 분해되거나 또는 용해되는 등 고온에서 적용시키기 부적합한 단점이 있다.

이에 반해 본 연구에서의 Fe-Si계 반도체는 중고온용 열전발전재료로서 원료가 풍부하여 저가이고, 비교적 단순한 세라믹공정으로 제조할 수 있으며, 또한 비교적 큰 Seebeck 계수값을 지니고 도전율도 높은 재료이며, 산화분위기에서는 표면에 치밀한 산화층이 형성되어 그 이상의 산화가 진행되지 않기 때문에 1000K정도의 고온까지 안정하게 사용할 수 있다[3-6]. 한편 Fe-Si계 재료는

1212℃의 용융점 이하의 고온에서는 금속성의  $\epsilon$ -FeSi상과  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>Si<sub>3</sub>상이 존재하고, 포석반응에 의해 970℃ 이하에서 반도체성의  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>가 안정하게 된다. 따라서 반도체인  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>상을 얻기 위해 장시간 열처리가 필요하다는 단점도 있다[7,8].

Matsubara 등은 이온클러스터빔(ICB)법으로 제작한 Fe-Si-O계 박막이  $\mu$ V수준의 대단히 큰 Seebeck 계수를 지니는 것을 보고하였다[9]. 그러나 박막재료로서는 큰 전류를 흘릴 수가 없어서 발전을 목적으로 하기에는 실용적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 벌크상인 Mn 첨가 p형 FeSi<sub>2</sub>를 출발물질로 해서 입자크기 및 추가 첨가물이 열전변환물성에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료제조 및 분석

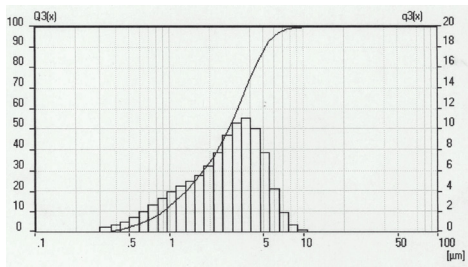
Fe-Si계 열전반도체 제조를 위한 출발물질로 Fe(고순도화학, 순도 99% 이상, -200 mesh), Si(고순도화학, 순도 99%, -200 mesh), Mn(고순도화학, 순도 99% 이상, -200 mesh) 분말을 Fe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>Si<sub>2</sub> 조성이 되도록 칭량한 후 볼밀로 혼합하였다. 고주파 진공유도로를 이용할 경우, 용융 시 고주파에 의해 혼합되는 현상이 일어나며, 냉각 시에는 급랭의 효과를 볼 수 있어 비중차가 큰 시료들의 ingot 제작에 유용하다. 따라서 본 연구에서는 고주파 진공유도로에서 용융처리 하였고, 제조한 ingot를 조분쇄한 후, 볼밀로 미분쇄하고, 체가름으로 입도를 >2  $\mu$ m(평균입도 0.786  $\mu$ m), >10  $\mu$ m(평균입도 2.958  $\mu$ m), >40  $\mu$ m(평균입도 25.468  $\mu$ m) 정도인 조성분말을 제조하였다(Fig. 1). 또한 추가 첨가물의 영향을 조사하기 위해서 >10  $\mu$ m 입도인 Fe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>Si<sub>2</sub> 조성분말에 SiO<sub>2</sub>(고순도화학, 순도 99% 이상, -200 mesh), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(고순도화학, 순도 99.5% 이상, -200 mesh) 및 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>(고순도화학, 순도 99.5% 이상, -200 mesh) 분말을 각각 1wt%를 첨가 후 혼합하였다.

제조한 각 조성분말들을 30×7×3~5mm의 막대형으로 일축가압 성형하였고, 성형체를 Ar 분위기 1200℃에서 7시간 소결한 후, 830℃에서 100시간 열처리하였다[Fig. 2].

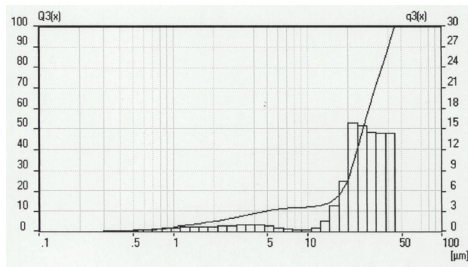
X선 회절분석으로 상분석을, 주사현미경과 EDS 및 XRF를 이용해서 미세조직관찰과 성분분석을 행하였다. XRF 분석결과 약 1% 이하의 불순물이 포함되어 있으나, 그것을 무시하고 Fe, Si 및 Mn만의 비율로 나타내었다[Table 1].

[Table 1] Preparation Conditions and Characteristics of Specimens

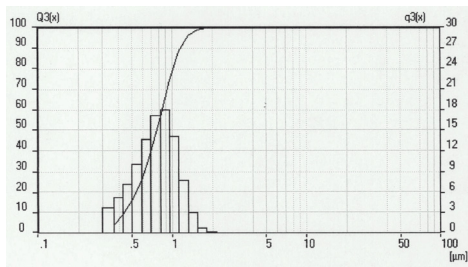
Sample name	Composition	Particle size(μm)	Additive	Sintering condition		XRF(wt%)			Density (g/cm <sup>3</sup> )	Annealing condition	
				T(°C)	Time(h)	Fe	Si	Mn		T(°C)	Time(h)
P1	Fe <sub>0.99</sub> Mn <sub>0.01</sub> Si <sub>2</sub>	>10	-	1200	7	49.74	49.81	0.45	4.338	830	100
P2	Fe <sub>0.91</sub> Mn <sub>0.09</sub> Si <sub>2</sub>					48.09	47.90	4.01	4.586		
P3	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>					48.60	49.22	2.18	4.487		
P4	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>	>40				48.56	49.27	2.17	4.804		
P5	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>	>2				48.69	49.15	2.16	4.853		
P6	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>	>10	SiO <sub>2</sub>			48.71	49.12	2.17	4.839		
P7	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								
P8	Fe <sub>0.95</sub> Mn <sub>0.05</sub> Si <sub>2</sub>		Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>								



(a) P3

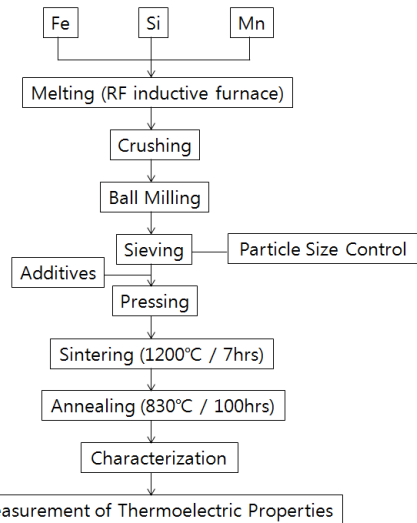


(b) P4



(c) P5

[Fig. 1] Particle size distribution

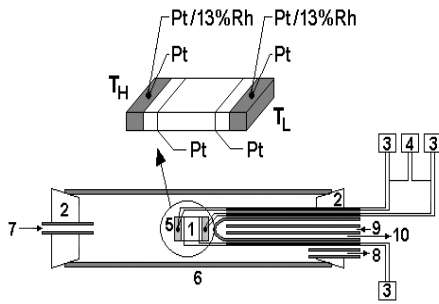


[Fig. 2] Experimental procedure for the specimen preparation

### 2.2 전기적 물성 측정

열전변환물성을 측정하기 위해 다이아몬드커터를 이용하여 직육면체형 시편에 4개의 홈을 만들고, 2개의 Pt-Pt13%Rh 열전대의 끝 부분을 각각 시편의 양끝에 만든 구멍에 넣고, 홈을 감고 있는 백금선으로 고정시켰다. Ar 분위기, 상온~750°C 범위에서 동일 시편에 대하여 도전율과 Seebeck 계수를 측정하였다[Fig. 3].

전기전도도는 직류 4단자법으로 측정하였다. 두 쌍의 열전대 중 바깥쪽의 백금선을 통하여 일정한 전류를 공급하고, 안쪽의 백금선을 사용하여 기전력을 측정하였다. 오믹성 확인을 위해 전류방향을 정방향과 역방향으로 변환시켜 얻은 기전력의 평균치로부터 도전율을 산출하였다.



[Fig. 3] Schematic diagram of the apparatus for electrical conductivity and Seebeck coefficient measurement (1)specimen (2)silicon rubber (3)voltmeter (4)DC current source (5)thermocouples (6)alumina tube (7)gas inlet (8)gas outlet (9)air inlet (10)air outlet

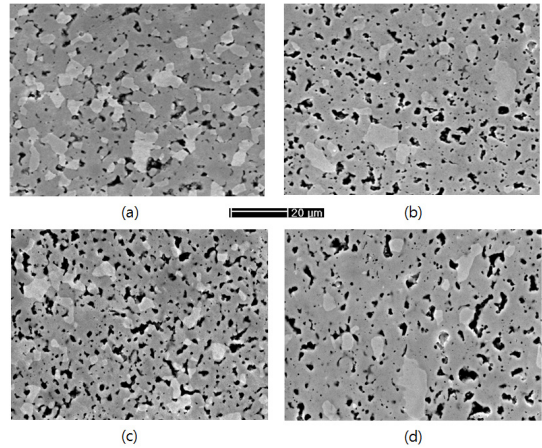
열기전력을 측정하기 위하여 시편의 한쪽 끝 부근에 설치된 알루미늄 보호관 속에 냉각 공기를 흘려 시편 내에 온도 구배를 발생시켰다. 양 끝 사이의 온도 차이를 공기량을 변화시켜 2~10K가 되도록 조절하였다. 온도 차와 열기전력의 관계가 모든 경우에서도 직선적임을 확인한 후, 직선의 기울기로부터 Seebeck 계수를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

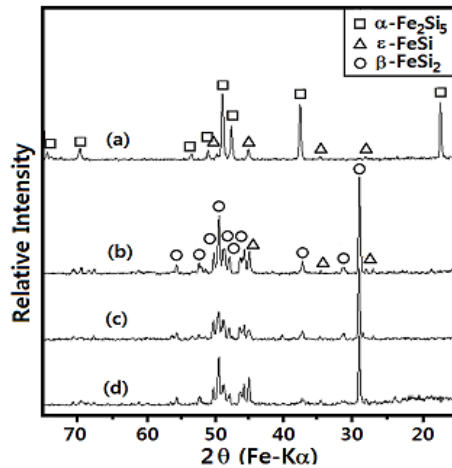
#### 3.1 입자크기 영향

Table 1에서 볼 수 있듯이, Mn의 첨가량 및 입자크기 변화에 따라 소결밀도의 변화는 그다지 크지 않았지만, 시편 P4의 경우는 Fig. 4(c)에 나타난 미세구조에서 볼 수 있듯이 비교적 다량의 기공 생성에 의해 소결밀도가 크게 감소하였다. 또한 Fig. 4로부터 소결/소둔처리한 시료는 짙은 회색부분, 옅은 회색부분 및 기공(흑색부분)으로 구성되어 있고, 소둔처리에 의해 옅은 회색부분이 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 시편 P3을 EDS로 면분석한 결과, 짙은 회색부분은 Fe/Si 무게비가 45.08/54.92로  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>상을, 옅은 회색부분은 63.14/36.86으로  $\epsilon$ -FeSi상을 나타냄을 알 수 있었다.

또한 Fig. 5(a)의 XRD 분석결과로부터, P3 소결시편에 있어서는 금속전도성인  $\epsilon$ -FeSi상과  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub>상으로 구성되어 있음을 알 수 있으며, Fig. 5(b)로부터, P3 소둔처리 시편에 있어서는 반도체성인  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>상의 피크가 주를 이루며,  $\epsilon$ -FeSi상의 피크가 약간 잔존함을 알 수 있으며, 전반적으로 조성분말의 입자크기에 따른 상변화는 거의 나타나지 않았음을 볼 수 있다.



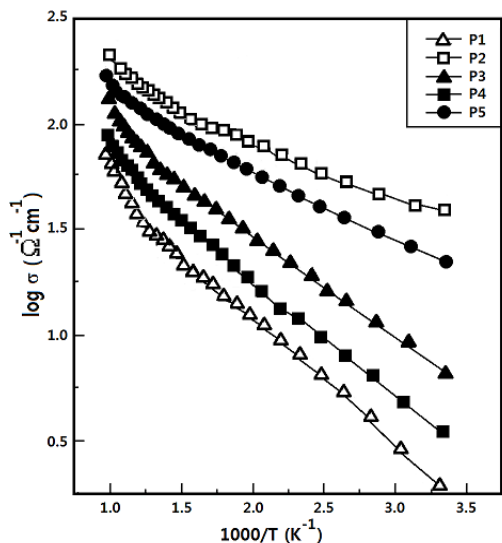
[Fig. 4] SEM photographs for the specimens (a) P3(sintered) (b) P3(annealed) (c) P4(annealed) (d) P5(annealed)



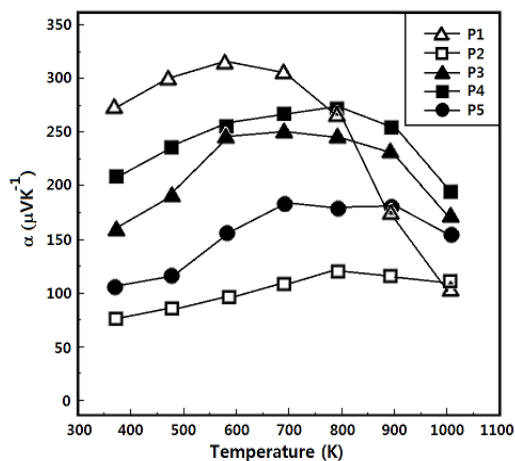
[Fig. 5] XRD patterns for the specimens (a) P3(sintered) (b) P3(annealed) (c) P4(annealed) (d) P5(annealed)

완전한  $\beta$ -FeSi<sub>2</sub>상을 얻기 위해서는 보다 장시간의 열처리가 필요하지만, 소둔처리 시간을 100시간으로 고정시키고 열전물성에 대해 조사하였다. 각 시편의 도전율의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 전반적으로 온도가 증가할수록 도전율이 증가하는 전형적인 반도체적 경향을 보였으며, 조성분말의 입자크기가 작을수록 도전율이 증가하였다. 이는 조성분말의 입자크기가 작을수록 소결밀도가 증가와 함께 시료 소결체의 입자와 입자간의 연결성이 향상된 결과에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 기 발표한 Mn 첨가량 변화에 따른 도전율[10]과 비교하면, P3~P5 (Fe<sub>0.95</sub>Mn<sub>0.05</sub>Si<sub>2</sub>)의 도전율은 P1(Fe<sub>0.99</sub>Mn<sub>0.01</sub>Si<sub>2</sub>)과

P2(Fe<sub>0.91</sub>Mn<sub>0.09</sub>Si<sub>2</sub>) 사이의 값을 나타내고 있는 바, 입자 간 연결성의 영향보다 Mn 첨가량 증가에 따른 캐리어 농도 증가에 따른 영향이 도전율에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 6] Temperature dependence of the electrical conductivity

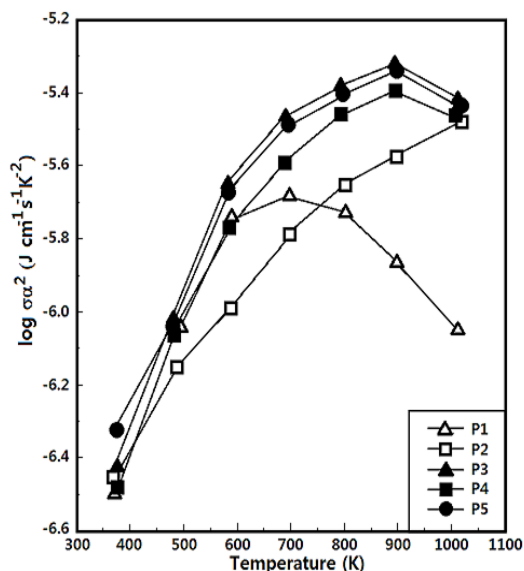


[Fig. 7] Temperature dependence of the Seebeck coefficient

Fig. 7의 Seebeck 계수의 변화를 살펴보면, 모든 시편에서 양의 값, 즉 p형 반도체를 나타내었으며, 600~800K에서 최고값을 나타내고 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 이 경향은 밴드모델로 설명이 가능할 것으로 생각되는데, 진성영역에서는 도전율은 전자와 정공에 의한 전도에 의해 지수함수적으로 증가하지만, Seebeck 계

수는 bipolar 효과에 의해 점차 감소한다고 볼 수 있다. 물론 보다 정확한 고찰을 위해서는 캐리어 밀도측정 등의 여러 인자들을 고려해야만 하겠지만, 주된 이유는 Si 결핍으로 생성된 엑셉터 준위에 의한 exhaustion 영역으로 Fermi 에너지와 함께 변화되는 것으로 사료된다. 또한 Fig. 4 (b)~(d)로부터 조성분말의 입자가 클수록 기공률 증가와 함께 열린 회색부분인 금속전도성상인 ε-FeSi상이 증가, 즉 반도체성 β-FeSi<sub>2</sub>상으로의 상전이가 불완전하기 때문에 Seebeck 계수가 감소한 것으로 사료된다.

도전율과 Seebeck 계수로부터 계산한 power factor( $\sigma \alpha^2$ )의 온도의존성을 Fig. 8에 나타내었다. 조성분말의 입자크기 변화와 관계없이 유사한 경향을 나타내었으며, 입자크기가 중간인 시료 P3의 power factor 값이 약간 크게 나타났다. 산출한 power factor 값은 10<sup>-5</sup>대로 다소 작은 값을 나타내었지만, 캐리어 농도와 미세구조를 정밀하게 제어하고, 최적의 소둔처리 조건으로 ε-FeSi상을 효율적으로 제거하면 보다 우수한 열전변환물성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



[Fig. 8] Temperature dependence of the power factor

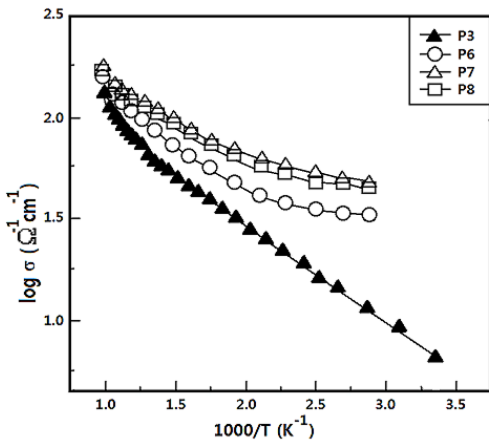
### 3.2 첨가물의 영향

Fe-Si계의 경우, 소결 및 소둔처리 공정 중에 혼입된 산소가 Fe보다 Si와의 친화력이 커서 SiO<sub>2</sub>를 형성하게 되어, 결국 FeSi<sub>2</sub> 중에 Si 결핍영역이 생성되어 Mn을 첨가하지 않은 무첨가 시료도 p형 반도체를 나타내었다 [10]. 또한, 이온클러스터빔법으로 제작한 Fe-Si-O계 박막이 μV수준의 대단히 큰 Seebeck 계수를 지니는 것으로

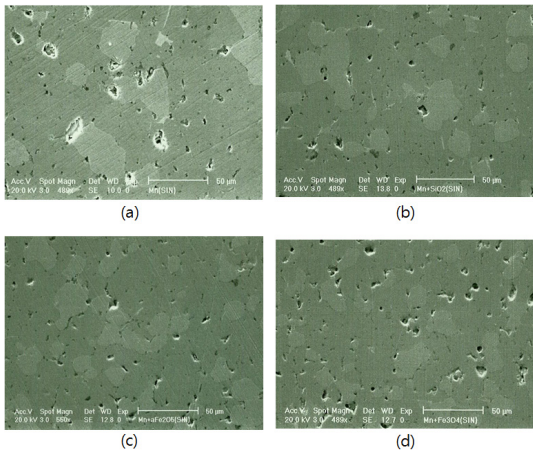
보고되었다[9]. 따라서 본 연구에서는 P3 ( $\text{Fe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05}\text{Si}_2$ ) 시료에 추가로  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  등을 첨가해서 열전물성을 조사하였다.

각 시편의 도전율의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 전반적으로 Mn만을 첨가한 시료(P3)보다 추가로 첨가한 시료(P6~P8)의 도전율이 증가하였다. 이는 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 첨가물을 추가로 첨가함에 따라 반도체인  $\beta\text{-FeSi}_2$  상으로의 전이가 불완전하고 회색부분인 금속전도성인  $\varepsilon\text{-FeSi}$  상의 잔존량이 많음에 기인하는 것으로 사료되며, 그 결과 도전율의 온도의존성은 Mn만을 첨가한 시료보다 감소하였다.

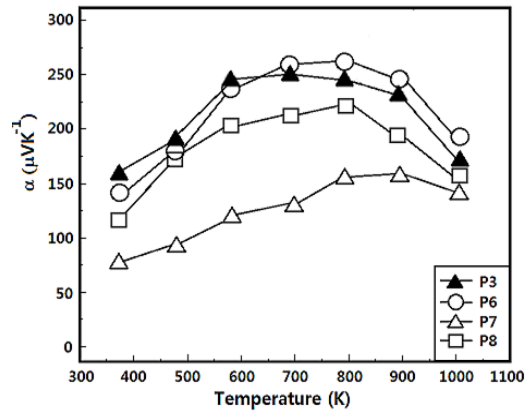
상대적으로  $\varepsilon\text{-FeSi}$  상의 잔존량이 많은 Fe-O계를 첨가한 경우가  $\text{SiO}_2$ 를 첨가한 경우보다 더욱 도전율이 상승하였다.



[Fig. 9] Temperature dependence of the electrical conductivity



[Fig. 10] SEM photographs for the specimens  
(a) P3 (b) P6 (c) P7 (d) P8



[Fig. 11] Temperature dependence of the Seebeck coefficient

Fig. 11의 Seebeck 계수의 변화를 살펴보면, 시료 P7과 P8의 Seebeck 계수가 작은 값을 나타낸 것을 알 수 있는데, 이는 상대적으로 금속전도성상이 많이 잔존하고 Si 결핍량이 많은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 반면  $\text{SiO}_2$ 를 추가로 첨가한 경우(시료 P6), 금속전도성상이 잔존하지만 시료 P3와 대등한 Seebeck 계수값을 나타내었다. 보다 정확한 고찰을 위해서는 캐리어 밀도측정 및 HREM 미세구조관찰 등의 여러 자료가 필요하지만,  $\text{SiO}_2$  첨가량 및 입자크기를 세밀하게 조절한다면 도전율과 Seebeck 계수 모두 증대시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

Mn 첨가 p형- $\text{FeSi}_2$ 의 열전변환물성에 미치는 조성분말의 입자크기 및 추가 첨가물의 영향에 대해 조사한 결과는 다음과 같다.

- (1) 조성분말의 입자크기가 작을수록 소결밀도가 증가와 함께 소결체의 입자와 입자간의 연결성이 향상되어 도전율이 상승하였으며, 입자크기가 도전율에 미치는 영향은 p형 불순물인 Mn 첨가량 증가에 의한 캐리어 농도 변화에 따른 영향보다는 작았다.
- (2) Seebeck 계수는 600~800K에서 최고값을 나타내고 점차 감소하는 경향을 나타내었으며, 조성분말의 입자가 클수록 기공률 증가와 함께 금속전도성상인  $\varepsilon\text{-FeSi}$  상의 잔존량이 증가하여 감소하였다.
- (3)  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  등을 추가로 첨가함에 따라 반도체상인  $\beta\text{-FeSi}_2$  상으로의 전이가 불완전하여 도전율이 증가하였으며, 도전율의 온도의존성은 Mn

만을 첨가한 시료보다 감소하였다.

- (4) Fe-O계를 첨가한 경우에 ε-FeSi상의 잔존량 및 Si 결핍양 증가에 의해 Seebeck 계수가 감소하였다.
- (5) SiO<sub>2</sub>를 첨가한 경우, Seebeck 계수는 큰 변화가 없었지만 도전을 상승에 의해 열전물성이 향상되었다.

## References

- [1] D. M. Rowe and C. M. Bhandari, *Modern Thermoelectrics*, pp.35-48, Holt, Rinehart and Winston Ltd., London, 1983.
- [2] I. B. Cadoff and E. Miller, *Thermoelectric Materials and Devices*, pp.173-183, Chapman and Hall Ltd., London, 1960.
- [3] T. Kojima, M. Okamoto, and I. Nishida, "Semiconducting and Thermoelectric Properties of Sintered Iron Disilicide", *Proceedings of the 5th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, pp.56-61, 1984.
- [4] Y. Isoda, T. Ohkoshi, I. Nishida, and H. Kaibe, "Si-composition and Thermoelectric Property of Mn and Co doped FeSi<sub>2</sub>", *J. Mat. Sci. Soc. Jpn.* 25, p.311-319, 1989.
- [5] S. Tokita, T. Amano, M. Okabayashi, and I. Nishida, "Thermoelectric Properties of Mn- and Al-doped FeSi<sub>2</sub>", *Proceedings of the 12th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, pp.197-200, 1993.
- [6] C. H. Pai, T. H. Song and H. L. Lee, "Effect of Powder Oxidation on Thermoelectric Properties of Fe-Si Alloys", *J. Ceram. Soc. Jpn.* 109, p.386-390, 2001.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.2109/jcersj.109.1269\\_386](http://dx.doi.org/10.2109/jcersj.109.1269_386)
- [7] T. Sakata, Y. Sakai, H. Yoshino and H. Fuji, "Studies on the Formation of FeSi<sub>2</sub> from the FeSi-Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub> Eutectic", *J. Less-Com. Met.* 61, p.301-308, 1978.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5088\(78\)90225-4](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5088(78)90225-4)
- [8] T. Kojima, K. Masumoto and I. Nishida, "Formation of FeSi<sub>2</sub> from Sintered FeSi-Fe<sub>2</sub>Si<sub>5</sub> Eutectic Alloy", *J. Jpn. Inst. Met.* 48, p.843-847, 1984.
- [9] K. Matsubara and T. Koyanagi, "Amorphous FeSi<sub>2</sub> Films as a new Thermoelectric Material Prepared by Ionized-Cluster Beam(ICB) Technique", *Proceedings of the 6th International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, pp.1-6, 1986.
- [11] C. H. Pai, "Thermoelectric Properties of Mn-doped

FeSi<sub>2</sub>", *J. Kor. Inst. Met & Mater*, 46, p.315-320, 2008.

배 철 훈(Chul-Hoon Pai)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교 대학원 세라믹공학과 (공학석사)
- 1990년 3월 : 東京大學校 대학원 응용화학과 (공학박사)
- 1990년 4월 ~ 1992년 2월 : 東京大學校 공학부 문부교관
- 1992년 3월 ~ 1994년 9월 : 한국생산기술연구원 조교수
- 1994년 9월 ~ 현재 : 인천대학교 교수

<관심분야>  
전자재료, 에너지변환