

특집

Thema | 최근 열전소재 연구 동향

오민욱 선임연구원
(한국전기연구원 재료응용연구단)
박수동 선임연구원
(한국전기연구원 재료응용연구단)
이희웅 단장
(한국전기연구원 재료응용연구단)

1. 서론

화석연료의 고갈 및 환경문제로 인하여 우수한 열전특성을 갖는 새로운 열전재료를 찾고자 하는 많은 노력들이 진행되고 있다[1-2]. 1990년대 들어 집중적으로 발견된 새로운 열전재료들은 기존의 열전재료에서 한계점으로 여겨졌던 $ZT=1$ 을 뛰어넘는 우수한 열전특성을 보이고 있다. 그 결과 미국, 일본 등을 비롯한 선진 연구그룹에서는 새로운 열전재료 개발 및 열전특성 향상에 많은 연구 역량을 투입하고 있는 실정이다. 새롭게 발견된 열전재료들은 낮은 열전도도와 함께 우수한 전기적특성을 동시에 갖고 있다.

기존의 열전재료들은 사용온도에 따라 크게 3가지 영역으로 나눌 수 있다(그림1). 현재 상용화되어 있는 재료는 가장 우수한 열전특성을 보이는 온도영역이 상온에서 200 °C 영역인 Bi_2Te_3 합금, 200 °C - 600 °C의 중온 영역인 PbTe 합금, 그리고 그 이상의 온도 영역인 SiGe 합금 등이 있다. 한편, 각 온도 영역에서 기존의 열전재료들의 특성을 뛰어넘는 신 열전재료들이 개발되었다. 본 칼럼에서는 온도영역별로 새롭게 발견된 신 열전재료

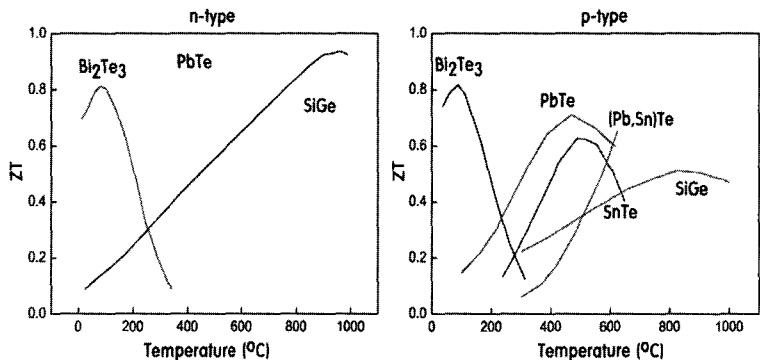


그림 1. 현재 상용화되어 있는 열전재료들의 온도에 따른 열전특성(ZT).

들을 정리해 보았다.

2. 상온 및 저온용 신 열전재료

• CsBi₄Te₆ 화합물

CsBi₄Te₆는 그림2와 같이 C2/m Monoclinic 구조로 열전특성에 있어 이방성을 나타내는 재료이다[3-4]. 그 형상은 그림3과 같은 침상 형태이며, 열전특성은 침상의 성장방향인 b축 방향의 열전특성이 우수하다[3]. 그림2에 나타나 있는 결정구조에서 가운데 부분에 존재하며 Bi-Bi 결합을 이루는 Bi는 Bi²⁺이온이며, 이로 인해 (Bi₄Te₆)¹⁻의 층상 구조체가 형성된다. 그리고 층상구조의 사이에 Cs⁺이온이 존재한다. CsBi₄Te₆의 열전특성은 도핑에 의해 크게 향상된다. 도핑하지 않은 CsBi₄Te₆의 최대 S₂₀는 211 K에서 6.4 W/cmK²이지만 SbI₃를 0.05 mol% 도핑 하였을 때는 51.5 W/cmK²에 이른다. 전기적특성은 p형이며 최대 ZT는 225K에서 0.8이다[3-4]. 이 수치는 상온 이하에서 보고된 ZT 값 중 최고 수치로 저온영역에서의 열전재료의 응용 가능성을 보여 준다. 측정된 띠틈간격은 0.04-0.1 eV로서 Bi₂Te₃ 합금에 비하여 작으며, 이러한 작은 띠틈간격은 저온에서 우수한 열전특성과 직접적으로 연관되어 진다[5]. 한편, 저온에서 p형 CsBi₄Te₆와 같이 우수한 열전특성을 보이는 n형 CsBi₄Te₆ 화합물은 아직 보고되지 않았다. 그러나 제

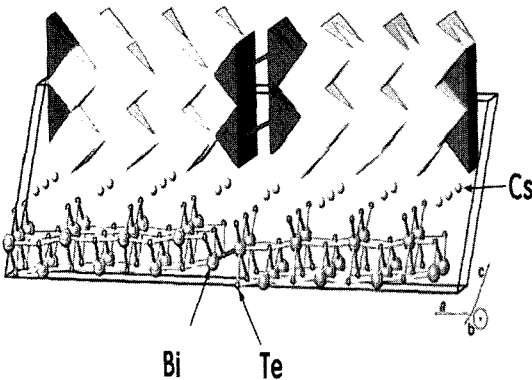


그림 2. CsBi₄Te₆의 결정구조.



그림 3. 제조된 CsBi₄Te₆ 형상.

일원리를 이용한 계산에 따르면 적절한 도핑에 의해서 p형보다 우수한 n형의 열전특성이 예측되고 있다[5].

3. 중온용 신 열전재료

3.1 β-Zn₄Sb₃ 화합물

β-Zn₄Sb₃ 화합물은 673 K 이하의 온도에서 우수한 열전특성을 보이는 재료이다[6]. 그 결정구조는 공간군 R-3C이며 263 K ~ 765 K 온도구간에서 안정한 상이지만, 673 K 이상에서는 ZnSb 및 Zn으로 상분해 되기 시작한다. β-Zn₄Sb₃는 Quartz 판을 이용하여 원료 분말을 용해하고 제조된 합금을 분쇄하여 Hot Pressing 및 SPS 등을 이용하면 고밀도의 합금이 제조된다[7-9].

β-Zn₄Sb₃ 화합물의 열전특성은 p형으로서 최대 ZT=1.4가 673 K에서 관찰되었다. β-Zn₄Sb₃의 Power Factor (S²σT)는 673 K에서 0.87 W/mK로 우수한 편은 아니지만, 300 K에서의 열전도도가 약 0.9 W/mK로 매우 낮기 때문에 우수한 열전특성을 나타낸다.

β-Zn₄Sb₃의 낮은 열전도도는 그 결정구조의 특이성에 기인한 것으로 이해되고 있다[10-11]. 단결정 및 Rietvelt 법 등을 이용한 결정구조 분석에 따르면 일부 Zn 원자는 결정구조의 침입형 자리에 위치하는 것이 관찰되었으며, 이러한 침입형 Zn은 열적 진

동 반경이 매우 커 Phonon의 이동을 산란시켜 열전도도를 크게 감소시키는 것으로 알려지고 있다. Sb 또한, 합금에서 Sb^{3+} 및 Sb^{2+} 이온으로 구성되어 있는데 이러한 Sb 이온의 불규칙성이 낮은 열전도도의 원인으로 지목되고 있다.

다른 합금계에서 많이 이루어지고 있는 도핑원소 첨가는 $\beta-Zn_4Sb_3$ 합금에서는 크게 연구되지 못하고 있다. Sn 및 Cd 등의 합금원소 등이 치환형 원소로 첨가 가능하나 그 첨가량이 제한적이어서 열전특성의 향상은 이루어지지 못했다[7].

3.2 Clathrate 화합물

Clathrate 화합물의 결정구조는 4족 원소 단독 또는 4족 및 3족 원소로 이루어져 있는 Cage 구조와 Cage안에 위치하는 Guest 원자들로 이루어진다. Cage을 구성하는 원소는 Ge, Si, Sn 등이 있으며, 3족 원소인 Al, Ga 등이 4족 원소를 치환하며, Guest 원자들은 Sr, Ba, Eu 등의 원소들이다. Cage을 이루는 원자의 숫자 및 Guest 원자의 숫자, Cage의 형상에 따라 Type-I~IX Clathrate 화합물들로 구분된다. 그림4는 Type-I Clathrate 화합물의 결정구조로 8개의 Guest 원자가 46개의 원자로 구성된 Cage 구조 안에 포획된 형상이다.

Clathrate 화합물의 열전특성은 Type-I Clathrate 화합물의 "Glass-like" 열전도도로 인해 크게 주목받았다[12]. $Sr_8Ga_{16}Ge_{30}$ 의 상온 열전도도는 약 1 W/mK로 낮고, 전기적특성 또한, 비교적 우수하다. 한편, 고온에서의 열전특성에 관한 연구는 많지 않다. Kuznetsov 등은 Type-I Clathrate 화합물의 상온 이상에서의 열전특성을 처음으로 측정하였으며 $Ba_8Ga_{16}Ge_{30}$ 은 700 K에서 $ZT=0.7$, $Ba_8Ga_{16}Si_{30}$ 은 870 K에서 n형으로 $ZT=0.87$ 의 값을 예측하였다[13]. 최근에는 고온에서의 열전특성 향상을 위하여 도핑 등을 통한 열전특성의 최적화 연구가 진행 중이다. Ge Clathrate의 경우는 650 K에서 Power Factor가 약 1 W/mK에 이르고 있다[14]. 한편, Type-I Clathrate 이외에도 Type-II 및 Type-III 그리고 Type-VIII 화합물 등에서도 우수한 열전특성이 보고되고 있다. Type-VIII 화합물은 상온에서 n형의 $ZT=0.4$ 가 측정되고 400 K에서 n형의 $ZT=1.2$ 가 이론적으로 예측되

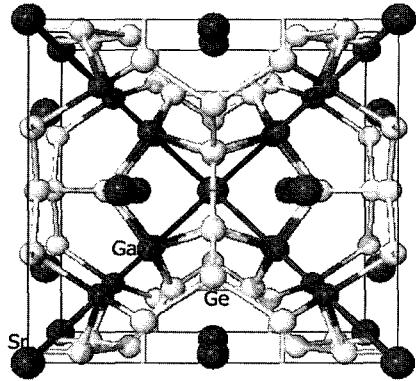


그림 4. Type-I $Sr_8Ga_{16}Ge_{30}$ Clathrate 화합물의 결정구조.

었다[15]. Type-III 화합물의 경우는 Ba-Ga-Ge 합금계에서 n형의 $ZT=1.25$ 가 943 K에서 측정되었다[16]. Type-II 화합물은 다른 Clathrate 화합물과는 달리 Guest 원자들이 Cage 구조 안의 빈 공간을 일부분만 채우는 구조로 인해 새로운 합금조성을 다양하게 설계할 수 있어 우수한 열전특성이 예측되고 있다[14].

3.3 Tl계 Chalcogenide 화합물

이 화합물은 특히 낮은 열전도도에 의해 우수한 열전특성을 나타낸다. $AgTlTe$ 및 Ag_9TlTe_5 는 300 K에서 두 화합물 모두 약 0.3 W/mK의 낮은 열전도도를 나타내며, 그에 비해 상대적으로 낮은 전기비저항으로 인해 각각 600 K에서 p형의 $ZT=0.6$ 및 700 K에서 $ZT=1.23$ 의 우수한 열전특성을 보인다[17-18]. $AgTlTe$ 는 그 결정구조가 그림5와 같이 단순하지만 낮은 열전도도를 보인다. 일반적으로 복잡한 결정구조를 갖는 화합물은 낮은 열전도도를 갖지만 이와 같이 단순한 구조에서 극히 낮은 열전도도를 갖는 원인은 아직 명확하지 않다. 한편, Ag_9TlTe_5 의 결정구조는 공간군 R-3c의 육방정 격자를 가지며 단위 격자 안에 12개 분자가 포함되는 매우 복잡한 구조이다. 이 밖에도 Tl_9BiTe_6 및 Tl_2SnTe_5 합금 역시 크게 주목받고 있다[19-20]. Tl_9BiTe_6 은 0.4 eV 이상의 띠틈격을 가지며 결정구조는 그림6과 같다. 상온에서의 열전도도는 약 0.5 W/mK로서 500 K에서 최대

ZT=1.2 (p형)를 가진다[19]. Tl_9BiTe_6 의 낮은 열전도도는 Tl^{1+} 및 Bi^{3+} 이온들의 혼재화로 인해 Phonon이 크게 산란되기 때문으로 생각되고 있다. Tl_9BiTe_6 은 Tl_5Te_3 조성에서 확장된 화합물로 비슷한 화합물은 Tl_9BiSe_6 , Tl_9SbTe_6 , Tl_9SbSe_6 , Tl_4PbTe_3 , Tl_4SnTe_3 등이 있으며 이러한 화합물의 열전특성에 대한 연구가 진행 중이다. Tl_2SnTe_5 는 상온에서 0.5 W/mK의 낮은 열전도도를 보이며 500 K에서 p형으로 최대 ZT=1을 보인다[20]. 한편, Tl계 화합물은 우수한 열전특성에도 불구하고 환경적 유해성으로 인해 실제 응용가능성에는 제약을 받고 있다. 그러나 낮은 열전도도와 함께 나타나는 우수한 열전특성을 이해한다면 새로운 열전재료 설계에 큰 도움이 있을 것으로 기대되고 있으며, 이에 관하여 최근 제일원리를 이용한

수송성질 분석 등의 연구가 시도되고 있다.

3.4 $AgPb_mSbTe_{m+2}$ 화합물

LAST-m (Lead-Antimony-Silver-Tellurium)으로 불리기도 하는 $AgPb_mSbTe_{m+2}$ 화합물은 700 K에서 LAST-18의 경우 p형이며, ZT~1.7의 우수한 열전특성을 보인다[21]. 결정구조는 각각의 원소들이 단순한 NaCl 구조를 서로 공유하는 구조로 금속 양이온들은 NaCl 구조에서 임의적으로 배열되어 있다. Ag, Pb, Sb는 Na 위치를 차지하며, Te은 Cl 위치를 차지한다. 그러나 고배율 투과전자현미경 분석을 수행한 결과 LAST-m 화합물은 완전히 균일한 화합물은 아니며 그림7과 같이 1-10 nm의 크기를 갖고 조성이 불균질한 나노 구조를 갖고 있다. 이러한 나노 사이즈의 불균질 영역에서 발생하는 Coulomb Force 등의 변화가 전기전도도 및 Seebeck 계수 등의 전기적 특성에 영향을 미치는 것으로 생각되고 있다. LAST-m 화합물의 격자진동에 의한 열전도도는 700 K에서 약 0.45 W/mK 로 매우 낮는데, 이것은 미세구조 전반적으로 존재하는 다수의 나노 구조에 의해 포논의 이동이 산란되기 때문으로 생각되고 있다. 한편, PbTe 합금에서 Sn을 Pb 치환형 합금원소로 첨가한다. 이를 바탕으로 n형의 LAST 화합물을 만들기 위해 LASTT (Lead- Antimony- Silver- Tellurium-Tin) 화합물을 제조하였으나 결과적으로 p형의 화합물이었으며, n형의 화합물을 만들기 위한 많은 연구가

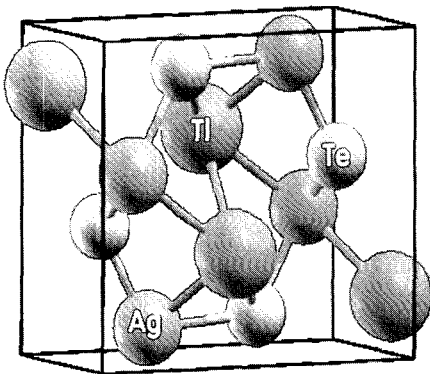


그림 5. AgTlTe의 결정구조.

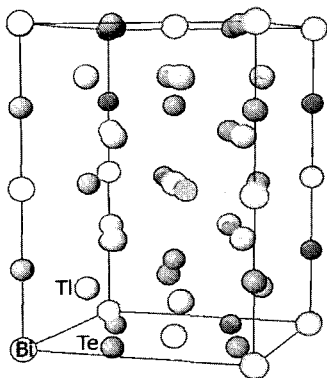


그림 6. Tl_9BiTe_5 의 결정구조.

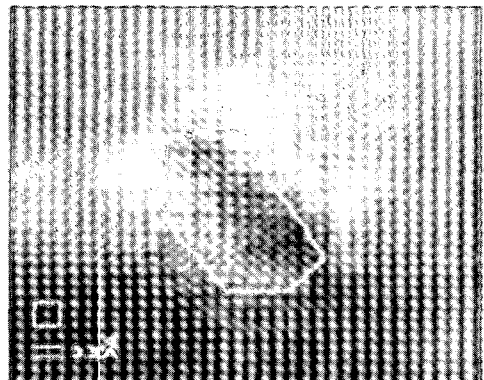
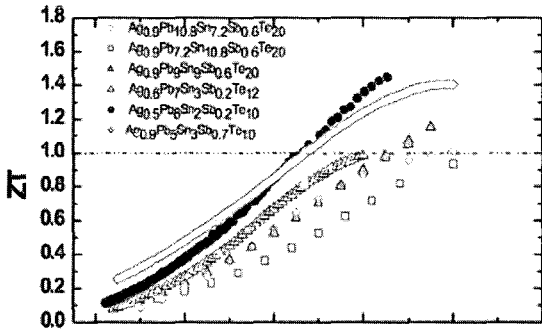
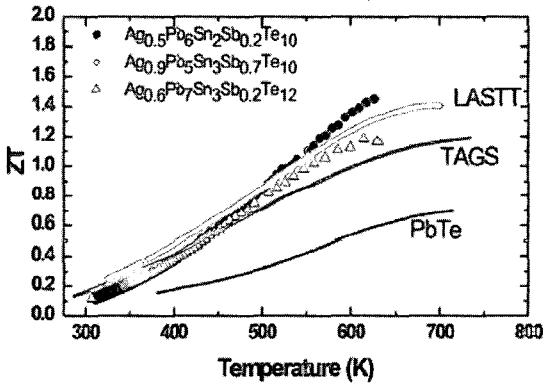


그림 7. LAST-18 화합물의 고배율 투과전자 현미경 사진.



(a)



(b)

그림 8. LASTT 화합물의 열전특성.

진행되고 있다[22]. 그림8은 LASTT 화합물의 열전 특성을 나타낸 것인데, LAST-18보다는 그 특성이 낮다. 한편, LAST 화합물은 그 제조법 및 미세한 조성 변화에도 열전특성이 민감하게 변하는 것으로 보고되고 있다.

4. 고온용 신 열전재료

4.1 Half-Heusler 합금

Half-Heusler 합금은 금속간화합물로서 고온용 열전재료로 새로이 주목받고 있다. 금속간화합물의 특성인 강한 결합력으로 인해 고온에서의 열적상안

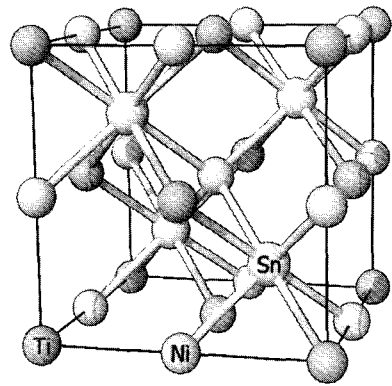


그림 9. TiNiSn Half-Heusler 합금의 결정구조.

정성이 우수하며, 전기적특성 또한, 우수하다. 결정 구조는 공간군 F-43m으로 3개의 fcc 부격자들이 관입된 구조이다(그림9). 화학조성은 XYZ로서 대표적 합금은 TiNiSn 및 ZrNiSn이다. 대부분의 Half-Heusler 합금은 띠허격이 0.1~0.3 eV 정도로 작으며, 띠허격이 작은 화합물에서 자주 관찰되듯이 Seebeck 계수가 상대적으로 크기 때문에 우수한 열전특성을 나타낸다.

Half-Heusler 합금의 열전특성 향상을 위한 연구 방향은 크게 두 가지로 나누어진다. 첫번째는 도핑에 의한 수송체(Carrier)의 농도 조절이다. TiNiSn에서 Sn을 Sb와 같은 5족 원소로 치환함으로써 최적의 수송체 농도를 갖도록 하는 것이다. 두 번째는 Ti를 Hf 및 Pd 같은 무거운 원소로 치환하여 열전도도를 낮추는 것이다. Half-Heusler 합금은 다른 열전재료에 비해 상대적으로 열전도도(5~10 W/mK)가 크기 때문에 열전특성 향상을 위해서는 이와 같은 시도가 필수불가결하다. 또한, 위 두 가지 방법을 동시에 적용할 수도 있다. Sb이 도핑된 TiNiSn 합금의 Power Factor는 650 K에서 4.6 W/mK로서 향상되었다[23]. 한편, Sb이 도핑된 TiNiSn 합금에 Zr 및 Hf를 Ti 치환 합금원소로 첨가했을 때 700 K에서 ZT=1.4의 우수한 열전특성이 일본 Toshiba Corp. 그룹에 의해 보고되었다[24]. 이와 같은 우수한 열전특성이 다른 그룹에 의해 재현되지는 않았지만, 이로 인해 Half-Heusler 합금에 대한 많은 연구가 진행되었다. Half-

Heusler 합금의 열전특성은 제조법 등에 따라 각기 다른 열전특성을 나타내는데, 이것은 열처리 조건 등의 변화에 따른 입자 크기, 조성의 미세한 변화 등에 의해서 열전특성이 크게 좌우되는 것으로 생각된다.

Half-Heusler 합금의 녹는점은 1400~1600 K로서 고온에서의 상안정성이 우수하기 때문에 1000 K 정도에서 현재 이용되고 있는 SiGe 합금을 대체할 수단으로 많이 연구되고 있다. 1000 K 이상에서의 고온 열전특성은 (Zr, Hf)NiSn_{1-x}Sb_x 조성의 5원계 합금에서 많은 결과가 보고되었다. Tritt 등은 1100 K에서 ZT=0.9를 보고하였다[25].

4.2 Transition Metal-Silicide(TM Silicide)

TM Silicide는 우수한 고온 상안정성 및 박막화 하였을 때 Si소자 제조 기술을 직접적으로 이용할 수 있다는 장점으로 인해 새로운 열전재료로 탐색되기 시작했다. 그중에서도 Rhenium Silicide (ReSi_{1.75}) 단결정은 1073 K에서 n형의 ZT=0.7을 갖는다. 이는 합금화 되지 않은 이원계 합금에서는 상대적으로 높은 값으로 합금원소 첨가 등으로 그 특성을 향상시키고자 하는 연구가 진행 중이다. 한편, 그 열전특성은 [100] 방향으로서는 양수의 Seebeck 계수를 갖고 [001] 방향으로서는 음수의 Seebeck 계수를 갖는 큰 이방성을 갖는데, 이는 전자구조의 이방성에 기인한 것으로 생각되고 있다(그림10). Ti₃SiC₂ 같은 화합물에서

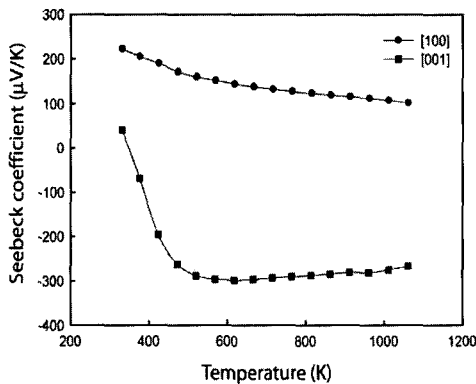


그림 10. ReSi_{1.75} 단결정의 Seebeck 계수.

도 전자구조의 이방성으로 인해 이와 같이 Seebeck 계수의 이방성이 나타나는 것으로 예측되고 있다.

4.3 Yb₁₄MnSb₁₁ 화합물

새로운 고온용 열전재료로서 p형의 전기적특성을 갖는다[26]. 그림1에서 보이듯이 1000 °C 부근에서 p형의 ZT는 SiGe에서 0.5 정도로 다른 온도 및 n형 화합물의 열전특성들에 비해서도 현저히 낮다. 그러나 Yb₁₄MnSb₁₁의 최대 열전특성은 p형으로 1223 K에서 약 ZT=1 정도로 기존 재료의 2배에 달한다(그림11). 전기비저항은 1200 K에서 5.4 mΩm이며 Seebeck 계수는 1275 K에서 185 μV/K로 p형이다. 한편, 열전도도는 300-1275 K 영역에서 0.7-0.9 W/mK로서 매우 낮으며, 그 결과 우수한 열전특성

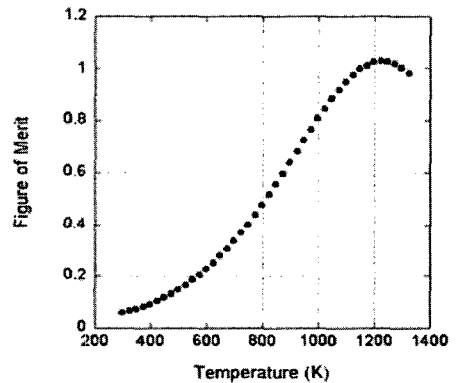


그림 11. Yb₁₄MnSb₁₁ 화합물의 ZT.

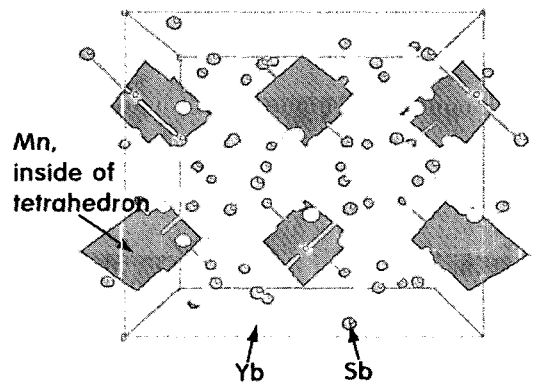


그림 12. Yb₁₄MnSb₁₁의 결정구조.

이 나타난다. 이러한 낮은 열전도도는 그림 12와 같은 복잡한 결정구조 및 그 구조를 이루는 무거운 원소들에 기인한 것으로 생각되고 있다. Jet Propulsion Lab.의 G. J. Snyder 그룹에 의해 합금원소첨가에 따른 열전특성 향상 가능성이 계속적으로 연구되고 있다.

5. 결론

최근 새롭게 발견된 대부분의 신 열전재료들은 낮은 열전도도를 갖는 재료로서 우수한 열전특성을 갖는 신물질 탐색하는데 있어 낮은 열전도도가 우선적으로 고려되어야 한다는 것을 알 수 있다. 낮은 열전도도는 다음의 여러 가지 원인으로 획득될 수 있다. 첫번째는 LAST에서와 같이 모재에 다수 포함되어진 나노구조가 Phonon의 이동을 방해하는 것이다. 실제 MIT 및 Boston College 등에서는 벌크 물질에 나노 사이즈의 제2상 물질을 분산시키는 연구들을 수행하고 있다. Superlattice 및 Quantum dot과 같은 인위적인 나노 구조 형성을 통해서 열전도도를 저하시키는데 성공한 결과도 다수 보고되고 있다. 두 번째는 II계 화합물 및 CsBi₄Te₆ 화합물 등에서와 같이 각 이온들의 이온화 차이 및 이온종류 차이에 의한 Phonon 이동을 방해하는 것이다. 한편, 재료에서 Phonon의 이동에 관한 구체적이고 명확한 이론이 확립되었다고는 할 수 없기 때문에, 새롭게 발견된 재료의 열전도도 특성에 관한 세밀한 연구가 필요하다.

참고 문헌

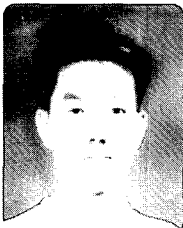
[1] T. M. Tritt, Science, Vol. 272, p. 1276, 1996; Vol. 283, p. 804, 1999.
 [2] B. C. Sales, Science, Vol. 295, p. 1248, 2002.
 [3] D. Y. Chung, T. Horgan, P. Brazis, M. Rocci-Lane, C. R. Kannewurf, M. Bastea, C. Uher and M. G. Kanatzidis, Science, Vol. 287, p. 1024, 2000.
 [4] D. Y. Chung, T. P. Hogan, M. Rocci-Lane, P. Brazis, J. R. Ireland, C. R. Kannewurf, M Bastea, C. Uher

and M. G. Kanatzidis, J. Am. Chem. Soc., Vol. 126, p. 6414, 2004.
 [5] L. Lykke, B. B. Iversen and G. K. H. Madsen, Phys. Rev. B, Vol. 73, p. 195121, 2006.
 [6] T. Caillat, J.-P. Fleurial and A. Borshchevsky, I. Phys. Chem. Solids, Vol. 58, p. 1119, 1997.
 [7] V. L. Kuznetsov and D. M. Rowe, J. Alloys Compd., Vol. 372, p. 103, 2004.
 [8] S. C. Ur, I. H. Kim and P. Nash, Mater. Lett., Vol. 58, p. 2132, 2004.
 [9] K. Ueno, Al Yamamoto, T. Noguchi, T. Inoue, S. Sodeoka, H. Takazawa, C. H. Lee and H. Obara, J. Alloys and Compd., Vol. 385, p. 254, 2004.
 [10] G. J. Snyder, M. Christensen, E. Nishibori. T. Caillat and B. B. Iversen, Nature Mater., Vol. 3, p. 458, 2004.
 [11] F. Cargoni, E. Nishibori, P. Rabiller, L. Bertini, G. J. Snyder, M. Christensen and B. B. Iversen, Chem. Eur. J., Vol. 20, p. 3861, 2004.
 [12] G. S. Nolas, G. A. Slack and S. B. Schujman, Semiconductors and Semimetals, Vol. 69, edited by T. M Tritt (Academic Press, San Diego, 2001)p. 255.
 [13] V. L. Kuznetsov, L. A. Kuznetsov, A. E. Kaliazin and D. M. Rowe, J. Appl. Phys., Vol. 87, p. 7871, 2000.
 [14] G. S. Nolas, Thermoelectric Handbook: Macro-to Nano-Structured Materials, edited by D. M. Rowe (CRC Press, Boca Raton, FL) in press.
 [15] G. K. H. Madsen, K. Schwarz, P. Blaha and D. J. Singh, Phys. Rev. B, Vol. 68, p. 125212, 2003.
 [16] J. -H. Kim, N. L. Okamoto, K. Kishida, K. Tanaka, H. Inui, Acta Materialia, Vol. 54, p. 2057, 2006.
 [17] K. Kurosaki, A. Kosuga, H. Muta, M. Uno and S. Yamanaka, Appl. Phys. Lett., Vol. 87, p. 061919, 2005.
 [18] K. Kurosaki, A. Kosuga, K. Goto, H. Muta and S. Yamanaka, 2005 Intl. Conf. on Thermoelectrics Proceedings, p. 311, 2005.
 [19] B. Wolfing, C. Kloc, J. Teubner and E. Bucher, Phys. Rev. Lett., Vol. 86, p. 4350, 2001.
 [20] J. W. Sharp, B. C. Sales and D. M. Mandrus, Appl. Phys. Lett., Vol. 74, p. 3794, 1999.
 [21] K. F. Hsu, S. Loo, F. Guo, W. Chen, J. S. Dyck, C. Uher, T. Hogan, E. K. Polychroniadis and M. G. Kanatzidis, Science, Vol. 303, p. 818, 2004.
 [22] J. Androulakis, K. F. Hsu, R. Pcionek, H. Kong, C.

Uher, J. J. D'Angelo, A. Downey, T. Hogan and M. G. Kanatzdis, *Advanced Materials*, Vol. 18, p. 1170, 2006.

- [23] S. Bhattacharya, A. L. Pope, R. T. Littleton, T. M. Tritt, V. Ponnambalan, Y. Xia and S. J. Poon, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 77, p. 2476, 2000.
- [24] S. Sakurade and N. Shutoh, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 2105, 2005.
- [25] S. R. Culp, S. J. Poon, N. Hickman, T. M. Tritt and J. Blumm, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, p. 042106, 2006.
- [26] S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin and G. J. Snyder, *Chem. Mater.*, Vol. 18, p. 1873, 2006.

저|자|약|력



성 명 : 오민욱

- ◆ 학 력
 - 2000년 한국과학기술원 재료공학과 공학사
 - 2002년 한국과학기술원 재료공학과 공학 석사
 - 2006년 한국과학기술원 재료공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
 - 2002년 - 2004년 일본 Kyoto대학 재료공학과 특별연구학생
 - 2006년 - 현재 한국전기연구원 재료응용연구단 선임연구원



성 명 : 박수동

- ◆ 학 력
 - 1987년 경북대 금속공학과 공학사
 - 1990년 경북대 대학원 금속재료공학과 공학석사
 - 1999년 경북대 대학원 금속공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
 - 2002년 - 현재 한국전기연구원 재료응용연구단 선임연구원



성 명 : 이희웅

- ◆ 학 력
 - 1977년 서울대 공과대학 금속공학 공학사
 - 1979년 서울대 대학원 금속공학과 공학 석사
 - 1990년 서울대 대학원 금속공학과 공학 박사

- ◆ 경 력
 - 1979년 - 1985년 홍익공업전문대학 금속과 조교수
 - 1985년 - 현재 한국전기연구원 재료응용연구단 단장/책임연구원

