

Mn-(M, Al)_{1-x}(Bi, Sb)_x (M=Cu, Fe) 합금계의 상 분석 및 자기적 성질에 관한 연구

박중언 · 고관영* · 윤석길

울산대학교 재료공학과

*울산전문대학교 금형설계과

Phase Analyses and Magnetic Properties of Mn-(M, Al)_{1-x}(Bi, Sb)_x (M=Cu, Fe) Alloy Systems

Jung-eon Park · Kowan-young Koh* and Sokeel Yoon

Dept. of Materials Science & Engineering, University of Ulsan

*Dept. of Metal Mold Design, Ulsan Junior College

초 록 Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 및 Mn((Fe_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계의 상의 변화와 자기적 특성을 조사하였다. Mn((Cu, Al)(Bi, Sb)) 합금계는 Bi상, MnSb상, MnBi상, k-상, Heusler상, Mn₂Sb 및 β-Mn상의 혼합상으로 이루어졌으며 x가 증가함에 따라 Bi상과 Mn₂Sb상이 증가하고 k-상, Heusler상 및 β-Mn상이 줄어들거나 사라졌다. 자기적 성질은 자성을 띠는 MnSb상, MnBi상, Mn₂Sb상, k-상 및 Heusler상과 비자성인 Bi상과 β-Mn상의 상대적 분율에 의해 결정됨을 알 수 있었고, 150K~200K 부근에서 그 이하로 온도가 감소함에 따라 자화값이 급격히 감소하는 현상이 나타났다. Mn((Fe, Al)(Bi, Sb)) 합금계는 Bi상, MnSb상, MnBi상, β-Mn상, k-상 및 Mn₂Sb상의 혼합상으로 나타났으며, 자기적 성질은 조사한 전 조성에서 강자성을 띠고 있음을 알 수 있었다.

Abstract Phase analyses and magnetic measurements on Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) and Mn((Fe_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloy systems were performed. Mn((Cu, Al)(Bi, Sb)) alloys were found as mixture of Bi-, MnSb-, MnBi-, k-, Heusler, Mn₂Sb- and βMn phases and as x increased, Bi and Mn₂Sb phases increased and k-, Heusler and βMn phases decreased or disappeared.

Magnetic properties of the alloys could be interpreted by the relative amounts of magnetic phases (MnSb, MnBi, Mn₂Sb, k and Heusler phases) and nonmagnetic phases (Bi and βMn). When the temperature was lowered through 150~200K, magnetizations showed rapid decreases. Mn((Fe, Al)(Bi, Sb)) alloys were consisted of Bi-, MnSb-, MnBi-, βMn, k- and Mn₂Sb phases and were ferromagnetic through the range of x under investigation.

1. 서 론

금속간 중간 화합물 MnBi는 NiAs형 육방정의 결정구조로서 큰 자기 이방성과 Kerr회전각을 갖고 있으나 제조시 Mn의 편석과 반자성이고 저융점인 Bi상의 기지형성 그리고 상변태등이 MnBi의 실제 응용에 카다란 제약이 되고 있다^{1~3)}. 이를 개선하기 위하여 여러 연구가 수행되어 왔으며 예를 들면 분말야금법⁴⁾과 증착법^{5~6)} 그리고 급속응고된 비정질 리본의 열처리법⁷⁾ 등을 들 수 있다. 그러나

Bi의 편석 또는 기지형성을 완전히 제거하는데 성공한 예는 아직 보고된 바 없다. Wang⁸⁾과 Takahashi⁹⁾등은 Mn-Bi-Sb박막에 대한 연구에서 $\theta_k \cong 1^\circ$ 와 작은 결정립을 가짐을 밝힘으로서 수직자기 기록매체로서의 응용 가능성을 보여주었다. 그러나, 이러한 경우에도 역시 Bi상의 출현을 막지 못하였다. 본 연구에서는 벌크상의 Mn-(Bi, Sb)합금계에서 Bi 및 Sb를 Cu 및 Al 또는 Fe 및 Al으로 치환하였을 때 Bi상의 편석 경향과 상의 변화를 조사하고 자기적 특성을 연구하고자 하였다.

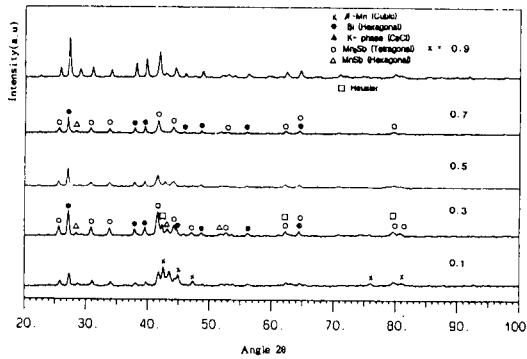


Fig. 1. X-ray diffraction result of Mn((Cu_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys. (as-cast)

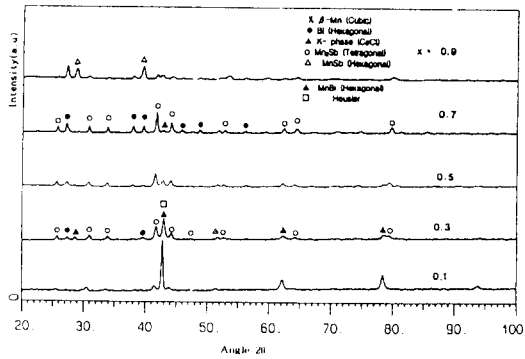


Fig. 2. X-ray diffraction result of Mn((Cu_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys. (RSP)

2. 실험방법

시편의 제조

본 실험에서 사용된 합금 구성 원소(Fe, Al, Bi, Sb, Mn, Cu)들은 99.99% 이상의 순도를 가진 것을 사용하였다. Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 및 Mn((Fe_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계에서 x=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9로 총량이 약 30g 정도가 되도록 칭량하여 진공 아르곤 아크로에서 용해시켰다. 균일하게 섞이게 하기 위하여 아크로내에서 4~5번 뒤집어 재용해 시켰다. 용해한 후 무게의 손실이 1% 이내인 시료만을 사용했다. 이것을 분쇄기에 넣고 파쇄하여 노냉 시편, 급속응고 시편, X-선 회절 시편 등을 제작하였다. 급속응고 시편은 melt spinning 방식으로, 합금의 용융에는 고주파 유도로를 사용했다. 노즐은 투명한 석영관(내경 13mm)을 가공하여 만든

것으로 노즐의 직경은 약 0.7mm로 하였다. 회전체로는 열전도도가 좋은 Cu 원판(반경 15cm, 폭 4cm)을 사용했으며 용융분사 가스는 아르곤가스를 사용하였다. 회전체의 회전속도는 1200~1500rpm으로 하였고 분사압은 1.1 kg/cm², 노즐과 Cu 원판사이의 거리는 15mm이었다. 이상적인 접촉으로 가정할 경우 냉각속도는 약 10⁵K/sec이다. 급속 응고에 의해 제조된 리본은 두께가 40~60μm, 폭은 ~8mm 정도이었으며 매우 취약하여 제조시에 조그만 조각들로 부숴졌다.

X-선 회절실험

결정구조 조사는 X-선 회절 분석기를 이용하여 상온에서 측정하였으며, 이때 Cu 타겟과 Ni필터를 사용하였다. 노냉시편은 분말상태로 하였고, 급속응고 시편은 결정학적 이방성을 배제하기 위하여 매우 작은 조각으로 파쇄하여 사용하였다.

자화측정

자화 측정은 full scale이 0.01~100emu이고 정밀도가 2%인 진동 시료형 자력계(PARC, MODEL 155)를 사용하였다. 노냉 시편은 대체적으로 타원회전체의 모양을 갖는 것을 선택하여 사용했으며, 급속응고 시편은 자기이방성의 방향을 배제하기 위하여 매우 작은 조각으로 파쇄하여 사용하였다. 최대자기장의 크기는 10kOe이며, 1kOe 간격으로 자화를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

상의 분석

Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계

노냉 시편과 급속응고 시편에 대한 XRD결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. 노냉 시편의 경우 cubic구조인 k-상과 역시 cubic의 초격자구조인 Heusler상(Cu₂MnAl형), Tetragonal구조인 Mn₂Sb, Hexagonal구조의 MnSb 및 MnBi, 그리고 β-Mn과 Bi상이 혼재하고 있음을 알 수 있었다. 각 상의 상대적인 분율은 정량적으로는 구할 수 없었으며 조성(x)에 따른 분율의 변화는 정성적으로 밖에 조사하지 못하였다. x의 값이 증가함에 따라 Mn₂Sb상과 MnSb상이 증가하고 이에 따라 잉여 Mn으로 이루어진 것으로 판단되는 β-Mn상은 감소하여 x=0.5이상에서는 나타나지 않았다.

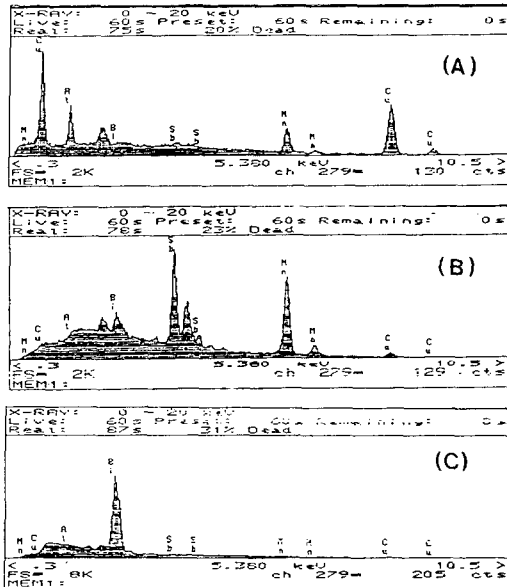
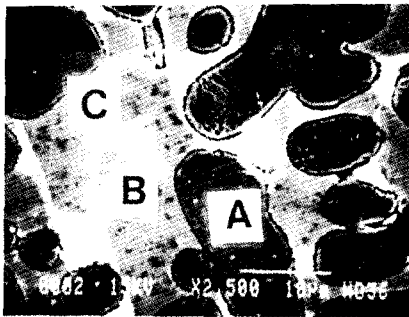


Fig. 3. EDX analysis patterns for $\text{Mn}((\text{Cu}_{0.66}\text{Al}_{0.33})_{0.7}(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_{0.3})$ alloys. (as-cast)

또한 x 의 증가는 곧 Cu와 Al의 감소를 뜻하고 Cu와 Al을 포함하는 k-상 및 Heusler상은 감소하게 되어 $x=0.7$ 이상에서는 XRD결과로부터 그 존재를 확인할 수 없을 정도로 미량만 존재하였다. Bi상의 편석은 전 조성에 걸쳐 일어나고 있었으며 x 가 증가함에 따라 Bi상의 분율도 증가하는 것으로 보아 MnBi상의 형성은 Mn_2Sb 나 MnSb상의 형성보다 제한적일 것으로 생각되나 이의 정량적인 분석은 행하지 못하였다.

Fig. 3은 노냉 시편에 대한 SEM 미세 조직 사진과 EDX 분석 결과이다. 그림에서 보듯이 k-상과 Heusler상이 주를 이루는 A부분과 Mn_2Sb , MnSb가 주가 되는 B부분 그리고 그 사이에 Bi로 이루어진 C부분이 비균질적으로

존재하는 조직을 이루고 있다. 이러한 조직은 x 의 증가와 함께 A부분이 점차 감소하여 $x=0.7$ 이상에서는 작은 입자($1\mu\text{m}$)형태로 적은량만 존재하고 B부분이 전체를 이루는 가운데 Bi상인 C부분은 계속 존재함을 알 수 있었다.

급속응고 시편의 경우에는 XRD 결과(Fig. 2)에서 볼 수 있듯이 노냉 시편과 달리 $\beta\text{-Mn}$ 상은 전조성에 걸쳐 나타나지 않았으며 $x=0.1$ 에서는 k-및 Heusler상(두상의 명확한 XRD피크의 분리는 얻을 수 없었음)과 소량의 Mn_2Sb 상이 증가하였으며 Bi상도 $x=0.3$ 부터 나타나서 x 와 함께 증가함을 알 수 있었다. Mn_2Sb 상은 $x=0.7$ 에서 가장 많이 나타난 후에 $x=0.9$ 에서는 그 양이 급격히 줄고 대신 MnSb상이 주상을 이룸을 알 수 있었다.

Fig. 4는 급속응고 시편에 대한 SEM 조직 사진 및 EDX 분석 결과이다. 그림에서 보듯이 조직이 매우 미세하였으며 직접적인 분별은 불가능하였으며 Bi와 Al에 대한 line scanning의 형태로 미루어 k-상과 Mn_2Sb 상의 미세한 결정립으로 존재하고 결정립계에 Bi상이 편석되어 있는 것으로 생각된다.

$\text{Mn}((\text{Fe}_{0.66}\text{Al}_{0.34})_{1-x}(\text{BiSb}_{0.7})_x)$ 합금계

Fig. 5와 Fig. 6에 노냉 시편과 급속응고 시편의 XRD결과를 나타내었다. 노냉 시편의 경우 Mn_2Sb 상, k-상, MnSb상, MnBi상, $\beta\text{-Mn}$ 상 그리고 Bi상이 혼재하고 있음을 알 수 있었다. 상들의 상대적 분율을 정량적으로 조사하지 못하였다. 그러나 조성(x)의 변화에 따라 상들의 상대적 분율을 정성적으로 분석할 수 있었다. $x=0.1$ 에서는 $\beta\text{-Mn}$ 상이 주상을 이루는 가운데 Mn_2Sb 상과 Bi상이 소량 존재하고 있으나 x 가 증가함에 따라 즉 Sb량이 증가함에 따라 잉여 Mn으로 이루어지는 것으로 판단되는 $\beta\text{-Mn}$ 상은 감소하여 $x=0.5$ 이상에서는 그 피크를 확인할 수 없었다. 반면 Mn_2Sb 상은 증가하며 $x=0.7$ 에서 그 분율이 가장 높았으며 $x=0.9$ 에서는 MnSb상과 MnBi상이 Mn_2Sb 상을 대체함을 알 수 있었다. k-상은 x 값이 0.3이상에서 발견되었으나 분율은 낮은 것으로 나타났다. Fig. 7은 노냉 시편에 대한 SEM조직 사진과 EDX 분석 결과이다. 그림에서 보듯이 k-상이 주가 되는 A부분과 Bi상으로 이루어진 B부분 그리고 Mn_2Sb 와 MnSb로 이루어진 C부분이 비균질적으로 존재하고

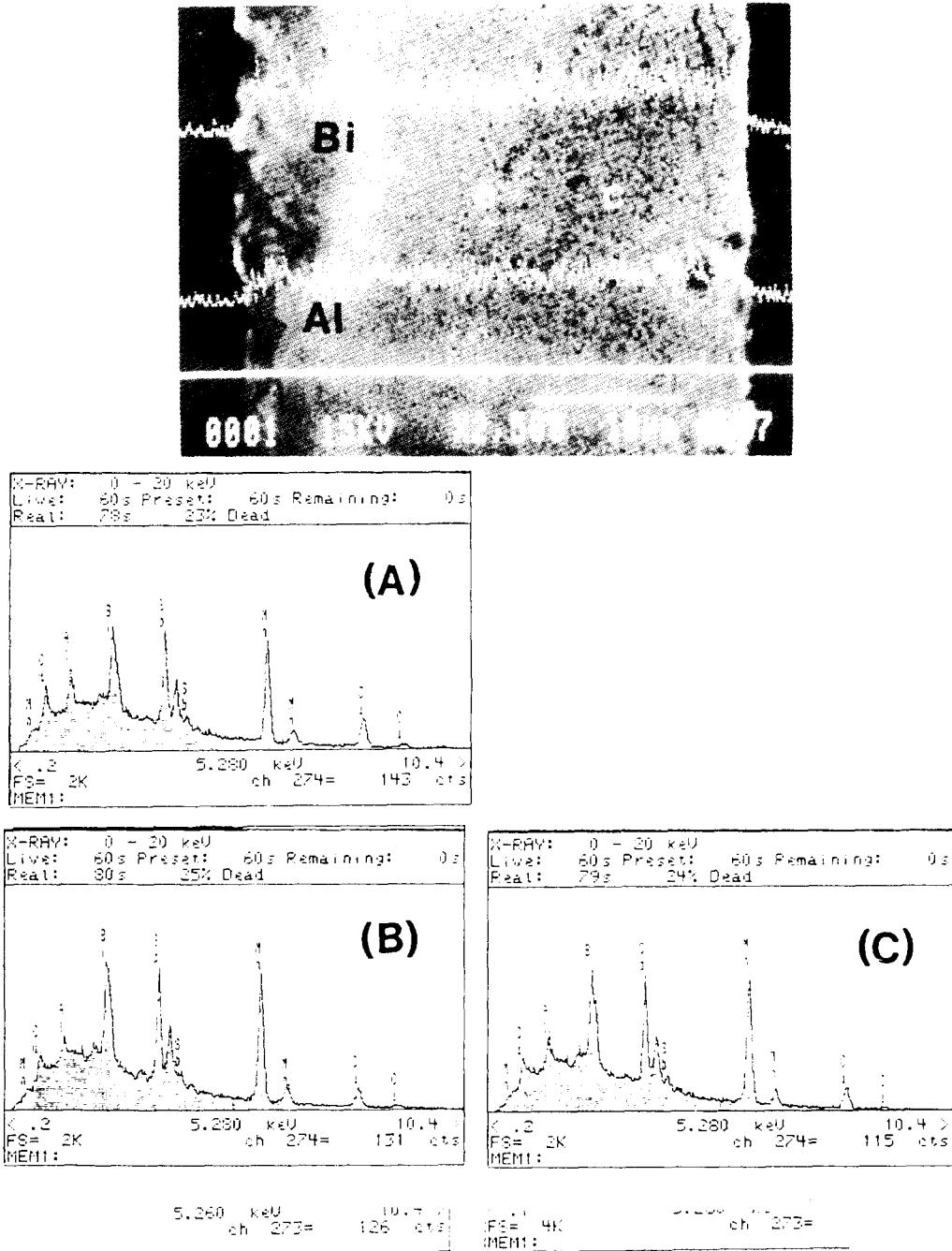


Fig. 4. EDX analysis patterns for Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys. (RSP)

있음을 알 수 있다.

급속응고 시편의 상의 구성은 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 노냉 시편의 경우와 크게 다르지는 않으나 x=0.9일 때 k-상과 Mn₂Sb상이 거의 완전히 사라지고 대신 MnSb상과 MnBi상이 두드러지게 나타나는 것이 노냉 시편과 다른

점이었다. Fig. 8에 주어진 SEM 조직 사진과 EDX 분석 결과를 볼 때 급속응고에 따라 조직은 미세화 됨을 알 수 있었다.

자기적 성질

Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계

본 합금계의 자화곡선(σ-H)은 이 논문에서 실

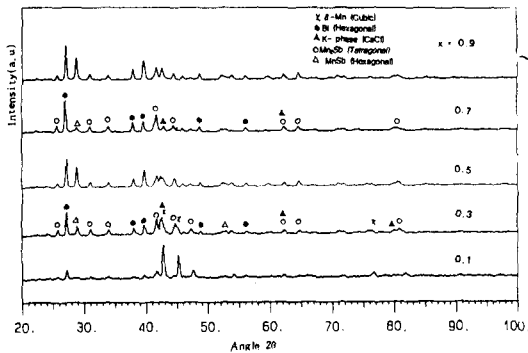


Fig. 5. X-ray diffraction result of $Mn((Fe_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x)$ alloys. (as-cast)

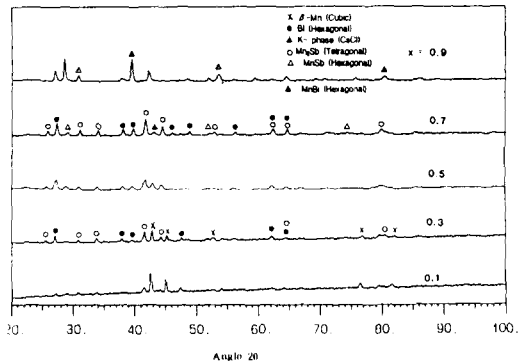


Fig. 6. X-ray diffraction result of $Mn((Fe_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x)$ alloys. (RSP)

리지는 많았으나 낮은 인가 자장에서 포화가 잘되는 전형적인 강자성체의 형태를 보여주었다. 자발자화의 온도에 대한 변화 즉 $\sigma_{0.1}-T$ 곡선은 여러가지 자성상에 의한 자화의 중첩으로 이루어진 것과 같이 변곡점들을 보이고 있다. (Fig. 9, Fig. 10)

본 합금계에 존재하는 여러 상 중에서 강한 자성을 띄는 것으로는 k-상, Heusler상, Mn_2Sb 상, $MnSb$ 및 $MnBi$ 상이 있으며, 이들 상에 대한 자기적 성질에 대한 연구 보고를 살펴보면 다음과 같다. $Mn-Al-Cu$ 의 Cubic구조를 갖는 k-상은 조성에 따라 $\sigma_{0.0}=40\sim 73\text{emu/g}$ 이고 $T_c=270\sim 445\text{K}$ 인 강자성으로 보고되고 있고¹⁰⁾, Cu_2MnAl 상인 Heusler상은 $\sigma_{0.0}=96\text{emu/g}$, $T_c=603\text{K}$ 인 강자성으로 보고되고 있으나¹¹⁾ Cu , Mn , Al 의 상대 조성 변화에 따라 자화값과 큐리온도에 변화가 있을 것으로 생각된다. 본 합금의 전 조성(x)범위에 걸쳐 발견되는 Mn_2Sb 상은 페리자성으로서 $\sigma_{0.0}=45.2\text{emu/g}$,

$T_c=550\text{K}$ 로 보고되고 있다¹²⁾. 그러나 $Mn_{2-x}M_xSb$ ($M=3d\text{ metal}$)의 경우 치환원소 M의 증가에 따라 큐리온도가 낮아질 뿐 아니라 $M=V, Co, Cu$ 의 경우에는 200K 전후에서 온도가 내려감에 따라 페리자성에서 반강자성으로 변환되는 것이 보고되고 있다.¹³⁾ $MnSb$ 상은 강자성으로서 $\sigma_{0.0}=111.7\text{emu/g}$, $T_c=587\text{K}$ 인 것이 보고되고 있으며¹⁴⁾ Mn을 Cu가 일부 치환할 때의 자화 및 큐리온도 변화는 알려진 바가 없다. $MnBi$ 상은 노냉 및 급속 응고 시편에서 생성될 것으로 판단되는 고온상(HTP)은 $T_c=460\text{K}$ 의 강자성으로 알려져 있다¹⁵⁾.

노냉시편의 자발자화의 온도에 따른 변화를 Fig. 9에 보여주었다. 그림에서 우선 볼 수 있는 것은 모든 조성에 걸쳐 200K 부근에서 온도 저하에 따라 급작스런 자화의 감소를 나타내는 현상이다. 이는 $Mn_{2-x}Cu_xSb$ 상의 페리자성으로부터 반강자성으로 변환되는 현상의 결과로 이해할 수 있다. 자화의 감소되는 양으로부터 합금내 Mn_2Sb 상의 분율을 비교해 볼 수 있으며 x값이 0.1로부터 증가함에 따라 Mn_2Sb 상의 양은 증가하며 0.5~0.7에서 최대량이 되었다가 다시 감소하는 것으로 판단되며 이는 XRD 실험결과(Fig. 1참조)와 일치한다. 또 그림9에서 볼 수 있는 것은 전조성에 걸쳐 강한 자성을 띄는 상이 둘 이상이라는 점이다. 이는 XRD실험을 통해서도 알 수 있으나 자성측정을 통하여 확인이 된다고 하겠다. $x=0.1$ 에서는 소량의 Mn_2Sb 상외에 T_c 가 $\sim 600\text{K}$ 인 Heusler상(또는 k상)이 미량 존재하고 대부분 β -Mn상으로 이루어져 있으나 $x=0.3$ 에서는 Mn_2Sb 상이 증가하고 Heusler상이 크게 증가함에 따라 Fig. 9에서와 같은 $\sigma-T$ 곡선을 형성하게 된다고 하겠다. $x=0.5$ 로 Sb량이 증가함에 따라 Mn_2Sb 상은 더욱 증가하고 Heusler상은 상대적으로 감소하게 되며 $x=0.7$ 에 이르러서는 Heusler상은 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다. Sb 및 Bi의 양이 더욱 증가한 $x=0.9$ 에서는 Mn_2Sb 상이 감소하고 대신 $MnSb$ 상과 Bi상이 증가한다. 따라서 $x=0.9$ 의 $\sigma-T$ 곡선은 Mn_2Sb 상과 T_c 가 $\sim 450\text{K}$ 정도의 $MnSb$ (및 $MnBi$) 상의 중첩으로 이루어진 것으로 해석할 수 있다.

급속응고시편에 대한 $\sigma-T$ 곡선은 Fig. 10에 주어졌다. 이를 Fig. 9와 비교해 볼 때 전조성

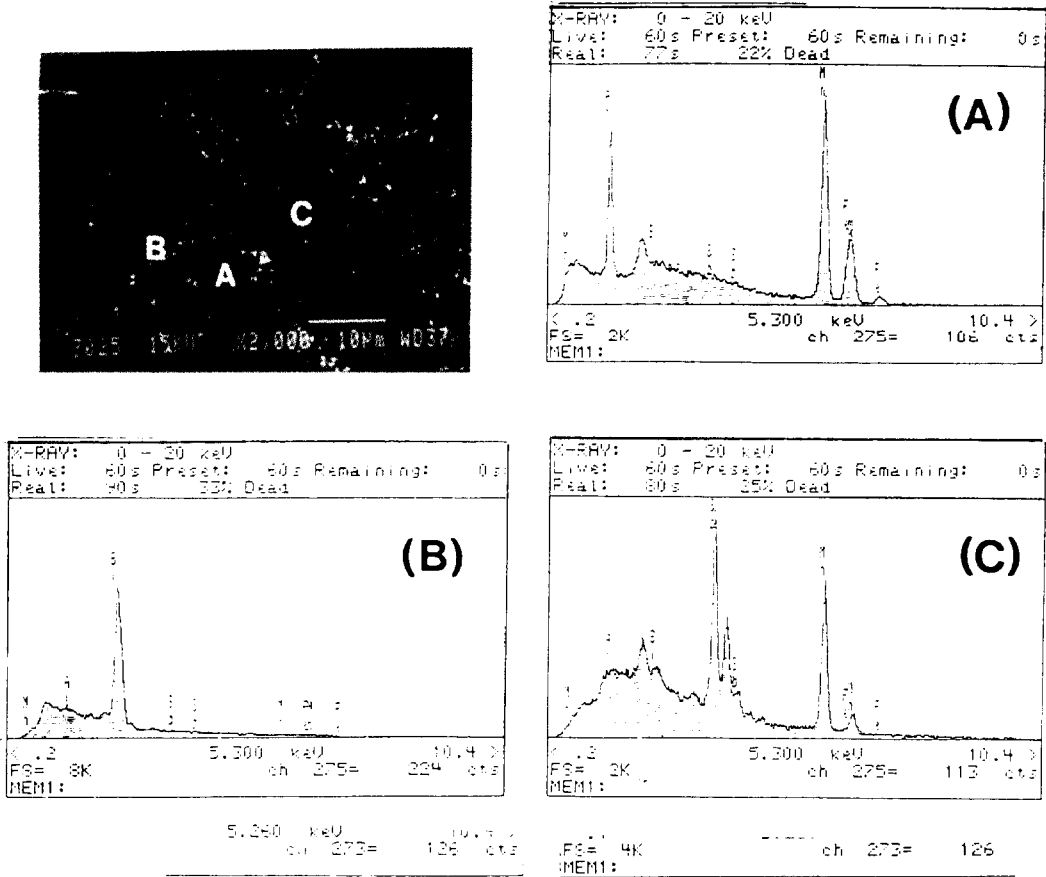


Fig. 7. EDX analysis patterns for Mn((Fe_{0.66}Al_{0.33})_{0.93}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_{0.07}) alloys. (as-cast)

에 걸쳐 Mn₂Sb상의 형성은 노냉시편의 경우와 같음을 알 수 있다. 단, x=0.1의 경우 노냉시편은 소량의 Mn₂Sb상을 제외하고는 대부분 비자성 β-Mn으로 이루어져 있던 것과 달리 급속응고시에는 소량의 Mn₂Sb상과 함께 Heusler 상(또는 k상)이 주상을 이루고 있는 것이 뚜렷한 차이라고 하겠다. 이와 같은 사실은 XRD 결과에서도 볼 수 있다. (Fig. 2 참조) 또한 x=0.1에서는 Mn₂Sb상을 200K 이하에서 반강자성으로 변하는 현상을 나타내지 않고 있으며 이는 x=0.1에서 급냉시 Cu가 소량의 Mn₂Sb상으로 Mn을 치환해 들어가는 것보다 주상인 Heusler상을 형성하는 것으로 해석할 수 있으나 그 원인에 대하여는 알려진 바가 없다.

Mn((Fe_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계

본 합금계의 노냉시편과 급속응고 시편의 σ-T곡선을 Fig. 11과 Fig. 12에 각각 주었다.

XRD 실험결과(Fig. 5 및 6)로 알 수 있듯이 이 합금계도 k-상, Heusler상, Mn₂Sb, MnSb 및 MnBi 등의 자성상과 β-Mn 및 Bi상의 비자성상이 공히 존재하고 있기 때문에 σ-T 곡선은 각 자성상들의 σ-T 곡선의 중첩으로 이루어질 것으로 해석할 수 있다. 다만 본 합금계 내의 Mn₂Sb상에는 Cu대신 Fe가 Mn을 치환해 들어갈 가능성이 있다. 이때는 Mn_{2-x}Cu_xSb 합금계와는 달리 200K에서 페리자성에서 반강자성으로 변하는 현상이 일어나지 않기 때문에¹³⁾ 온도강하에 따른 자화의 급격한 감소 현상을 볼 수 없다.

x=0.9인 합금의 급냉시편의 경우 XRD 실험결과 자성상으로는 MnBi(HTP)상과 MnSb상으로 되어 있는데 Fig. 12에서 보듯이 σ-T 곡선에서 ~480K에서 마치 Compensation 현상이 일어나는 것과 같은 곡선을 보이고 있는 것이 특이하나 이에 대한 해석은 아직 구하지

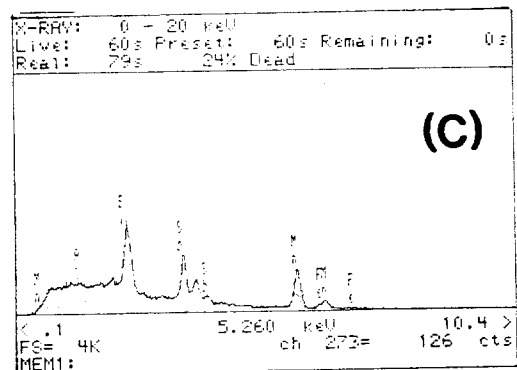
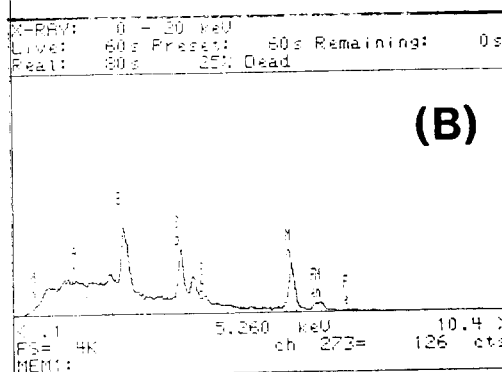
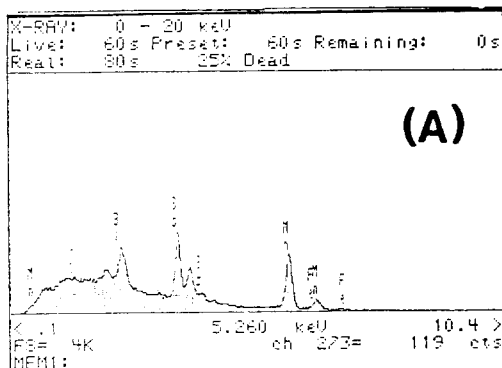
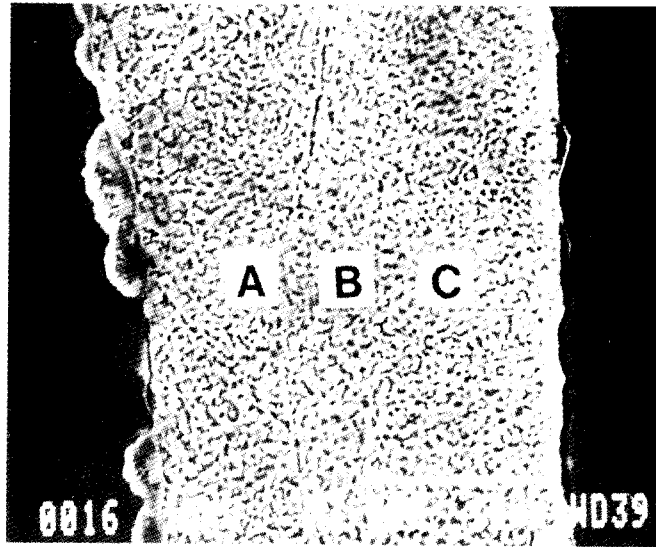


Fig. 8. EDX analysis patterns for Mn((Fe_{0.66}Al_{0.34})_{0.7}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_{0.3}) alloys.(RSP)

못하였다.

4. 결 론

Mn-(Bi, Sb)합금계에 Bi와 Sb를 Cu 또는

Fe와 Al으로 치환하였을 때의 상의 구성과 Bi의 편석경향을 조사하고 이들의 자기적 성질을 측정 분석하였다.

Mn((Cu_{0.66}Al_{0.34})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) 합금계와 Mn

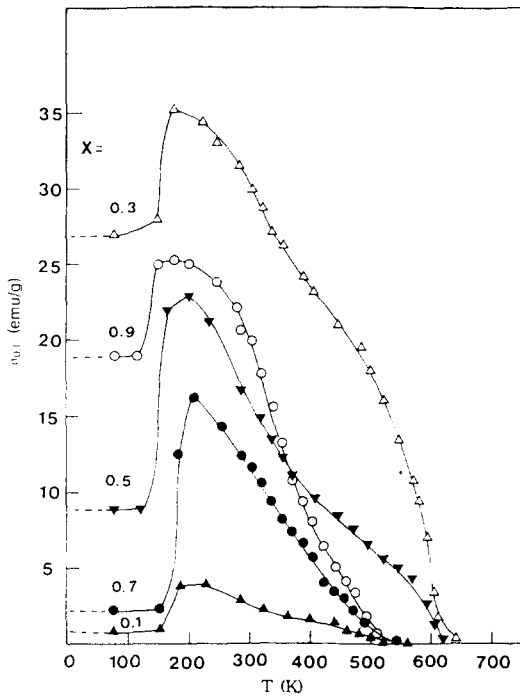


Fig. 9. $\sigma_{0,T}$ -T Curves of Mn((Cu_{0.65}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys.(as-cast)

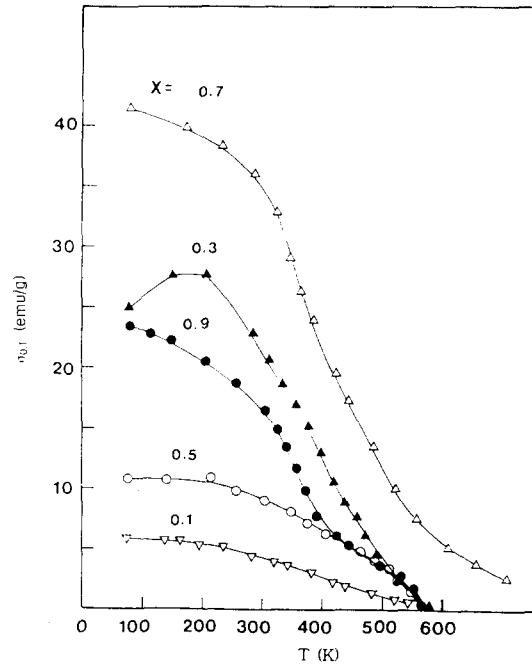


Fig. 11. $\sigma_{0,T}$ -T Curves of Mn((Fe_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys.(as-cast)

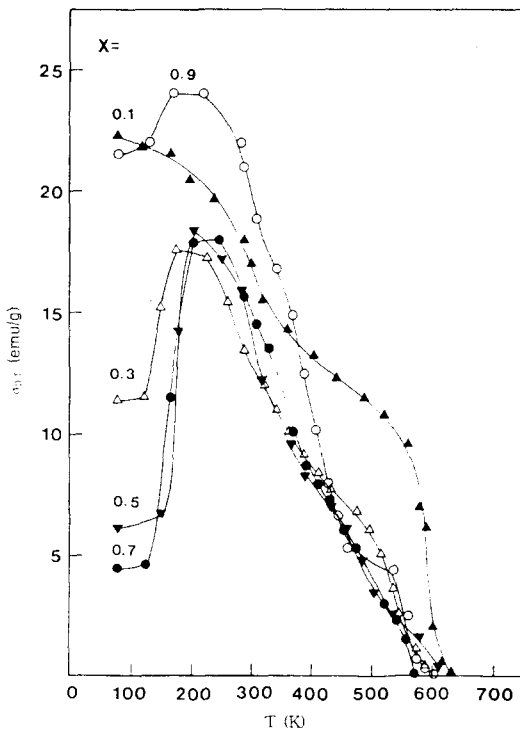


Fig. 10. $\sigma_{0,T}$ -T Curves of Mn((Cu_{0.65}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys.(RSP)

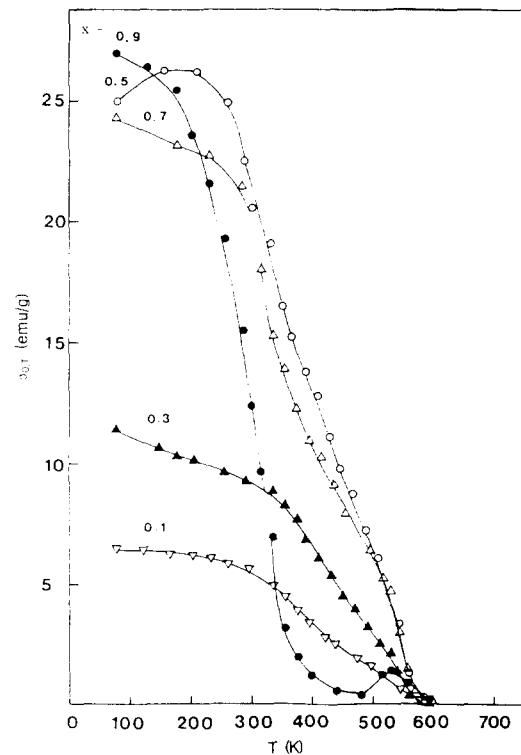


Fig. 12. $\sigma_{0,T}$ -T Curves of Mn((Fe_{0.66}Al_{0.33})_{1-x}(Bi_{0.3}Sb_{0.7})_x) alloys.(RSP)

$(\text{Fe}_{0.66}\text{Al}_{0.34})_{1-x}(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_x$ 합금계의 노냉 및 급속응고 시편에서 Bi의 편석은 조사한 조성 영역 전체에 걸쳐 일어나고 있었으며 Cu, Fe 및 Al이 Bi편석을 억제하는 효과는 발견할 수 없었다. 다만, 급속응고 시편이 경우 노냉시에 비해 Bi상의 분율이 낮아지고 조직이 미세하여짐을 알 수 있었다. 급속응고 시편에 대한 열처리 및 이에 따른 상변화와 미세조직 변화는 현재 조사중이다. 양 합금계에서 공통적으로 나타나는 Mn-Sb계의 상으로는 MnSb상보다 Mn_2Sb 상이 보다 넓은 조성범위에 걸쳐 생성됨을 알 수 있었다. MnBi상은 MnSb상보다 더 좁은 조성범위($x=0.9$ 부근)에서 발견되었으며 이는 Bi의 편석과 관련되는 것으로 생각된다. Mn-Cu-Al과 Mn-Fe-Al로 이루어진 k-상 및 Heusler상은 Cu 또는 Fe의 양이 감소함에 따라 감소하여 $x=0.7$ 이상에서는 거의 나타나지 않았다. Cu 또는 Fe는 k-상의 형성이외에 Mn_2Sb 또는 MnSb상에 Mn을 치환해서 준 2원 합금상인 $\text{Mn}_{2-x}\text{Cu}_x\text{Sb}$ 상 또는 $\text{Mn}_{2-x}\text{Fe}_x\text{Sb}$ 상을 만드는 것으로 판단된다. 양 합금계는 전조성에 걸쳐 상온에서 강자성과 같은 자화곡선(σ -H곡선)을 보였으나 온도에 따른 자화의 변화(σ -T)는 여러 자성상들에 의한 자화의 겹침으로 해석할 수 있었다. 이 합금계에서 발견된 자성상으로는 k-상 및 Heusler상, Mn_2Sb 상 그리고 MnSb 및 MnBi상들로서 조성에 따라 이들 상의 상대적 분율의 변화 등으로 이들 합금계의 자성을 분석할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D.Chen and Y. Gondo : J. Appl. Phys. 35, 1024 (1964)
2. D. Chen, Y. Gondo and M.D. Blue : J. Appl. Phys. 36, 1261 (1965)
3. T. Chen : J. Appl. Phys. 45, 2358 (1974)
4. E. Adams, W.M. Hubbard and A.M. Syeles : J. Appl. Phys. 23, 1207 (1952)
5. D. Chen, G.N. Otto and F.M. Schimit : IEEE Trans. Magn. MAG-9, 66 (1973)
6. M. Masuda, I. Izawa, S. Yoshino, S. Shiomi, S. Uchiyama : Jpn. J. Appl. Phys. 26, 1707 (1987)
7. X. Guo, Z. Altouman and J.O. Strom-Olsen, J. Appl. Phys 69(8) 6067(1991)
8. Y.J. Wang, J.X. Shen and Q. Tang : J. Magn. and Magn. Mater. 74,365 (1988)
9. M. Takahashi, Y. Kikuchi, T. Tanaka and T. Wakiyama : 日本應用磁氣學會誌, 14(2), 147 (1990)
10. J.G. Booth : Ferromagnetic Transition Metal Intermetallic Compound, 288 (1988)
11. A. Serres : J. Phys. Radium 8. 146 (1947)
12. B.W. Robert : Phys. Rev. 104, 507 (1956)
13. T. Kanomata and H. Ido : J. Appl. Phys. 55 (6), 15 (1984)
14. S.J. Picart and R. Nathans : J. Appl. Phys. 30, 280 (1959)
15. A.F. Andresen, J.E. Engebressten and J. Refsnes : Acta Chem. Scand 26, 175 (1972)