

Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si 합금 리본의 변태특성 및 형상기억능에 미치는 열처리 영향

강후원* · 지광구** · 장우양 · 강조원
조선대학교 공과대학 금속·재료공학부
*동아인재대학 자동차기계계열
**한국과학기술연구원 재료연구부

Influence of Heat Treatment on Transformation Characteristics and Shape Recovery in Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si Alloy Ribbons

H. W. Kang*, K. K. Jee**, W. Y. Jang and J. W. Kang

Division of Metall. and Mater. Engr., Chosun University, Kwangju 501-759, Korea

*Dept. of Auto and Mechanics, Dong-A College, Chunnam 526-872, Korea

**Korea Institute of Science and Technology, Div. of Materials Reserch, Seoul 136-791, Korea

Abstract The change of ribbon geometry, microstructure and shape recovery with Mn contents, wheel speed and various annealing temperature have been studied in Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si (X%=15, 20, 24) shape memory alloy (SMA) ribbons rapidly solidified by single roll chill-block melt-spinning process. The thickness and width of melt-spun ribbons are reduced, results in refining and uniformizing grains with increasing wheel speed. In the ribbons melt-spun at a wheel speed of 15m/sec, both ϵ and α' martensites are formed in ribbon 1 (15.5wt%Mn), while only ϵ martensite is revealed in ribbon 2 (20.2wt%Mn) and ribbon 3 (23.5wt%Mn). The volume fraction of ϵ martensite is decreased with increasing Mn contents, and those of ϵ as well α' martensites are increased due to thermal stress relief and grain growth with increasing annealing temperature. M_s temperatures of the ribbons 1, 2 and 3 are fallen with increasing Mn contents. M_s temperatures of the ribbons 1, 2 and 3 annealed at 300°C for 3 min are risen abruptly, but are nearly constant even at higher annealing temperature, i.e., 400, 500 and 600°C for 3 min. Shape recovery of the ribbons 1, 2 and 3 increased 30%, 52% and 69% with Mn contents, respectively. Shape recovery of ribbon 1 (15.5wt%Mn) formed ϵ and α' martensites decreased because of the presence of α' martensite but those of ribbon 2 (20.2wt%Mn) and ribbon 3 (23.5wt%Mn) formed ϵ martensite increased with increasing annealing temperature.

(Received March 31, 2001)

Key words: Fe-Mn-Si based SMA ribbon, Rapidly solidified process, Heat treatment, Martensitic transformation, Shape recovery.

1. 서 론

Fe계 합금의 경우, 열탄성 마르텐사이트변태를 하는 Fe-Pt계, Fe-Pd계 및 Fe-Ni-Co-Ti계 합금 또는 비열탄성 마르텐사이트변태를 하는 Fe-Ni-(C)계, Fe-Cr-Ni계 및 Fe-Mn-Si계 합금 등에서 형상기억효과가 발현된다 [1~5].

특히 이 중에서 비열탄성 마르텐사이트변태를 하는 Fe-Mn-Si계 합금은 비교적 제조원가가 낮고 형상회복은 도가 실은 근처이므로 이 분야 연구자들의 많은 관심이 집중되고 있으며 주로 판재 및 선재와 같은 bulk 상태

의 Fe-Mn-Si계 합금을 대상으로 fcc \leftrightarrow hcp 마르텐사이트 변태 특성, 형상기억효과에 영향을 미치는 제 인자, training 및 가공열처리 등에 대한 많은 연구결과가 보고되고 있다[6~11].

그러나 현재 Fe-Mn-Si계 합금의 형상회복률은 이룬값(≈19%)에 크게 미치지 못하여 약 4% 내외에 머무르는 수준으로서 이의 실용화를 위한 형상회복률의 개선은 매우 절실한 문제로 부각되고 있다. 일반적으로 Fe-Mn-Si계 합금의 형상회복은 오스테나이트의 강도, M_s 및 TN 등과 같은 변태온도 및 적층결합 에너지 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 보고되고 있다[9,10].

한편, 형상기억합금의 제조 방법에는 일반적 용해가 공법, 분말야금법, 급속응고법 또는 박막제조법 등이 있다. 이러한 형상기억합금 제조법 중 급속응고에 의한 멜트 스피닝법은 용융된 금속을 열전도도가 높은 매체를 통해 빠른 속도($>10^5\sim 6$ K/sec)로 냉각시킴으로써 고온상에서만 얻을 수 있는 균일한 조성의 범위가 넓어져 고용도가 증가되고 결정립 미세화와 응고시 집합조직을 얻을 수 있으며 한 번의 공정으로 리본이나 선재 등과 같은 반제품을 얻을 수 있는 특징이 있다[12,13].

따라서 Fe-Mn-Si계 합금을 급속응고에 의해 리본으로 제조할 경우 결정립 미세화 및 집합조직의 형성에 의해 형상회복률을 개선시킬 수 있을 것으로 판단되며 또한 비표면적이 큰 리본의 경우에는 가열 및 냉각속도를 크게 할 수 있기 때문에 빠른 형상회복속도를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 급속응고에 의해 결정립 미세화 및 미세조직 변화에 의해 형상회복률을 개선시키고자 멜트 스피닝법에 의해 두께 100 μm 이하의 Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si (X%=15, 20, 24wt%)계 합금 리본을 제작하여 리본 제조시 합금조성 및 휠 회전속도의 변화 등에 따른 리본의 형상 및 미세조직 등을 조사하였다. 또한 제조된 Fe-Mn-Si계 형상기억 리본의 새로운 응용분야를 창출시키고자 이들 리본의 열처리 온도에 따른 변태특성 및 형상회복률의 변화 등에 대해서 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구를 수행하기 위하여 Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si (X=15, 20, 24wt%) 5원계 합금을 설계하였으며 고주파 진공유도용해로에서 마그네시아 도가니를 이용하여 2.5 kg의 모합금 주괴를 제작하였다. 주괴는 미세편석을 제거하기 위해 1000°C에서 12시간 동안 Ar가스 분위기에서 균질화처리한 후 소정의 크기로 절단하였다.

리본의 제조는 단률 멜트 스피닝장치를 이용하였다. 모합금 3g을 오리피스 직경이 $\varnothing 0.9$ mm인 석영관(\varnothing : 11 mm, t: 1 mm)에 장입한 후 10^{-3} torr의 He 가스 분위기에서 유도가열장치를 이용하여 모합금을 용해하였으며 용탕과 석영관의 반응을 방지하기 위하여 용해 후 3분 이내에 지름 200 mm의 회전하는 Cu제 휠에 0.4 kg/mm²의 압력으로 분사하였다. 이 때 휠과 오리피스의 간격은 3 mm로 일정하게 하였으며 휠의 회전속도를 10~30m/sec로 조절하여 리본의 형상 및 냉

Table 1. Chemical composition of ribbons 1, 2 and 3 investigated in this study(wt%)

	Mn	Cr	Co	Si	Fe
ribbon 1	15.5	5.1	5.2	3.8	bal.
ribbon 2	20.2	5.2	5.3	3.7	bal.
ribbon 3	23.5	4.9	4.9	3.8	bal.

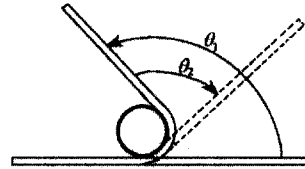


Fig. 1. Method of examining shape memory effect by bending test for shape memory alloy Ribbon.

각속도를 변화시켰다. 급속응고장치를 이용하여 제조된 리본의 화학성분은 Table 1과 같다.

리본의 미세조직은 전해연마후 1.2% potassium metabisulfate 수용액에서 착색부식하여 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰하였다. 또한 투과전자현미경에 의한 미세조직 및 제한시야회절상을 관찰하기 위하여 직경3 mm, 두께 20 μm 의 시편을 0°C의 perchloric acid(1pt)+acetic acid(3pt)+butylcellosolve(6pt)의 혼합용액에서 젯트연마하여 친공한 후 가속전압 200kV에서 미세조직을 관찰하였다. 합금조성 및 휠의 회전속도 변화에 따른 상 변화를 조사하기 위하여 $\text{Cu}\alpha$ 특성 X-선을 이용하여 X선 회절시험을 하였으며 이 때 얻어진 회절도형으로부터 오스테나이트 및 ϵ 마르텐사이트의 체적분율을 구하였다. 또한 급속응고된 리본과 300°C~600°C에서 3분간 열처리된 리본의 변태특성을 조사하기 위하여 10°C/min의 가열·냉각속도로 시차주사열량계를 이용하여 열분석 실험하였으며 변태온도는 가열/냉각시 얻어진 흡열 및 발열 피크로부터 구하였다.

합금조성 및 열처리에 따른 리본의 형상회복률의 변화는 Fig. 1과 같이 상온에서 굽힘 변형한 후(θ_1) A_4 온도 이상으로 가열하여 회복된 양(θ_2)으로부터 형상회복률($\theta_1/\theta_2 \times 100\%$)을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 냉각속도에 따른 리본의 형상

멜트 스피닝법에서 리본의 형상 및 미세조직은 노즐

직경, 분사각도, 분사압력 또는 휠 회전속도 등과 같은 공정변수에 의해 영향을 받는다. 본 실험에서는 노즐 직경 $\varnothing 0.9$ mm, 휠과 노즐 간격 3 mm, 분사압력 0.45kgf/cm^2 , 용융시간 180~200sec 및 분사각 90° 로 일정하게 고정하고 휠 회전속도를 변화시켜 리본의 형상을 조사하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다.

휠 회전속도가 10 m/sec에서 30 m/sec로 증가함에 따라 전반적으로 리본의 두께와 폭은 감소하였다. 즉 리본의 두께는 $140\ \mu\text{m}$ 에서 $50\ \mu\text{m}$, 리본의 폭도 역시 8 mm에서 3.8 mm로 감소하여 결과적으로 리본의 단면적은 휠 회전속도의 증가에 따라 $73 \times 10^4\ \mu\text{m}^2$ 에서 $20 \times 10^4\ \mu\text{m}^2$ 으로 감소하였다.

한편 휠 회전속도의 변화에 따른 리본의 표면기복과 결정립의 균일화 정도 및 크기를 관찰한 결과 휠 회전속도가 낮은 경우 표면기복이 심하고 결정립 크기 역시 상당히 불균일하게 분포되어 있었다. 그러나 휠 회전속도가 20 m/sec 및 30 m/sec로 증가함에 따라 표면기복은 적어지며 결정립은 미세화되고 그 크기는 균일화되었다. 즉 10 m/sec인 경우 결정립 크기는 대략 10~30 μm 범위로 불균일하였으나, 휠 회전속도가 증가함에 따라 20 m/sec에서 결정립 크기는 약 5~14 μm , 30 m/sec에서 3~7 μm 으로 미세화되었다. 또한 결정립 크기의 편차도 10 m/sec에서는 약 20 μm , 20 m/sec 및 30 m/sec에서는 각각 약 10 μm 및 4 μm 으로 감소하여 휠 회전속도가 증가함에 따라 결정립 크기의 균일도가 개선되었다.

이와 같이 휠 회전속도가 증가함에 따라 제조된 리본의 단면적이 감소하고 결정립이 미세화되는 이유는 용융금속이 분사압력에 의해 회전하는 휠에 분사될 때 용탕과 휠 젖음, 냉각 및 응고의 단계를 거치는 리본의 두께와 폭은 젖음 및 냉각의 단계에서 용탕에 전달되는 휠의 원심력의 크기에 의존하기 때문이다. 즉 휠 회전수가 증가하면 용탕에 보다 더 큰 원심력이 작용하여 리본의 두께 및 폭이 감소하게 된다. 또한 이와 같이 휠 회전속도의 증가에 따라 리본의 단면적이 감소하게 되면 리본의 응고 단계에서 냉각속도는 빨라지기 때문에 결정의 핵생성 장소가 증가하여 결정립은 미세화된[14].

3.2. 열처리 온도에 따른 미세조직 변화

Fig. 3은 Mn의 조성이 각각 15.5, 20.2 및 23.5 wt%인 모합금으로부터 휠 회전속도 15m/sec에서 제조

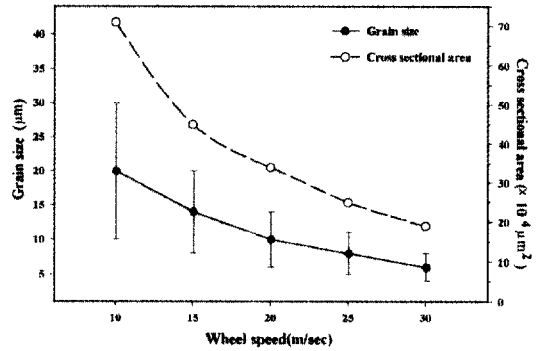


Fig. 2. Changes of grain size and cross sectional area of melt-spun ribbons with various wheel speeds.

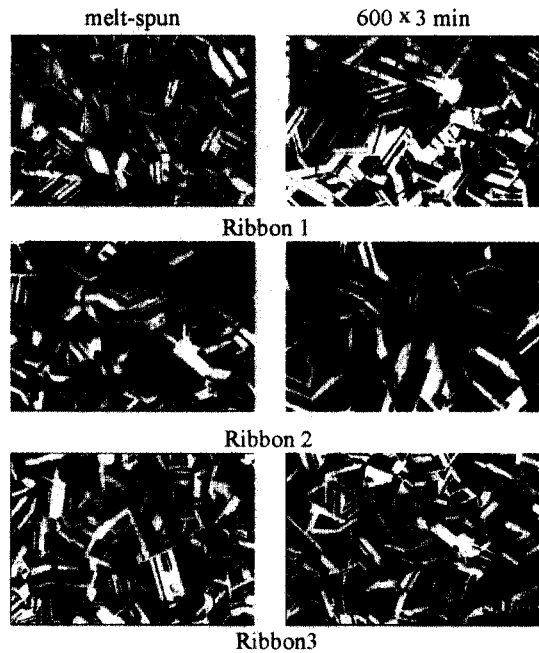


Fig. 3. Optical micrographs of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun at a wheel speed of 15 m/sec and then annealed at 600°C for 3min.

한 리본 1, 2 및 3의 리본 상태와 600°C에서 3분간 열처리한 리본들의 미세조직을 나타낸다. Mn 함량이 낮은 리본 1의 경우 리본 상태에서 오스테나이트 내에 흰색의 플레이트 형상으로 보이는 ϵ 마르텐사이트가 생성되었으며 특히 일부 ϵ 마르텐사이트 플레이트 내에는 α' 마르텐사이트가 관찰되었다. 이러한 미세조직을 갖는 리본을 600°C에서 3분간 유지한 후 공냉한 경우 결정립은 일부 성장하였으며 이에 따라 ϵ 마르텐사이트의

체적분율은 증가하였다. 또한 길이 및 폭 방향으로 성장한 ϵ 마르텐사이트 플레이트 내의 α' 마르텐사이트의 체적분율 역시 열처리 전에 비해 크게 증가하였다.

한편 오스테나이트 안정화 원소인 Mn의 양이 리본 1에 비해 많은 리본 2 및 3의 경우 ϵ 마르텐사이트 체적분율은 감소하였으며 리본 1과는 달리 ϵ 마르텐사이트 플레이트 내에서 α' 마르텐사이트는 관찰되지 않았다. 한편 리본 2 및 3을 600°C에서 3분간 열처리한 경우 ϵ 마르텐사이트의 체적분율은 약간 증가하는 경향을 나타냈으며 리본 1과는 달리 리본 2 및 3에서는 열처리 후에도 ϵ 마르텐사이트 플레이트 내에서 α' 마르텐사이트는 관찰되지 않았다.

Fig. 4 및 5는 Fig. 3에 나타낸 리본 1, 2, 및 3의 열처리 전후의 X선 회절시험 결과를 나타낸다. 리본 1, 2 및 3의 열처리 전의 X선 회절도형을 나타낸 Fig. 3을 보면 Fig. 2의 미세조직 사진에서 확인할 수 있었던 기지인 fcc 구조를 갖는 오스테나이트(γ) 피크 및 급속응고 중에 생성된 hcp 구조의 마르텐사이트(ϵ) 피크들을 관찰할 수 있다. 특히 이들 피크의 적분강도의 비는 리본 1, 2 및 3에서 다르게 나타났으며 리본 1→2→3의 순으로 ϵ 마르텐사이트 피크의 적분강도는 감소하고 기지인 γ 피크의 적분강도는 증가하였다. 이는 리본 1, 2 및 3에서 Mn 함량의 차이에 기인하는 것으로서 치환형 원소인 Mn이 오스테나이트를 안정화시켜 급속응고 중에 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 마르텐사이트 변태가 억제되기 때문이다.

한편 600°C에서 3분간 열처리한 리본 1, 2 및 3의 회절도형을 나타낸 Fig. 5를 Fig. 4와 비교하면 전체적으로 열처리에 의해 ϵ 마르텐사이트 피크의 적분강도는 증가하는 경향을 나타내고 있으며 특히 Mn 함량이 15.5wt%인 리본 1에서는 bct 결정구조를 갖는 α' 마르텐사이트 피크 역시 관찰되었다. 일반적으로 Fe-Mn 이원계 합금에서 Mn 함량이 15wt% 근방에서는 $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$ 이단계 변태에 의한 ϵ 마르텐사이트로부터 α' 마르텐사이트가 생성되고 이러한 변태거동은 주로 Mn 함량이 크게 의존하며 Mn 이외의 첨가원소에는 큰 영향을 받지 않은 것으로 보고되고 있다[15]. 600°C에서 3분간 열처리한 리본의 X선 회절도형을 나타낸 Fig. 5와 열처리 전의 Fig. 4를 비교하면 같은 조성에서도 열처리에 의해 ϵ 마르텐사이트 체적분율이 증가하거나 Mn 함량이 낮은 경우에는 ϵ 마르텐사이트로부터 α' 마르텐사이트가 생성됨을 알 수 있다. 이러한 미세조직의 변화

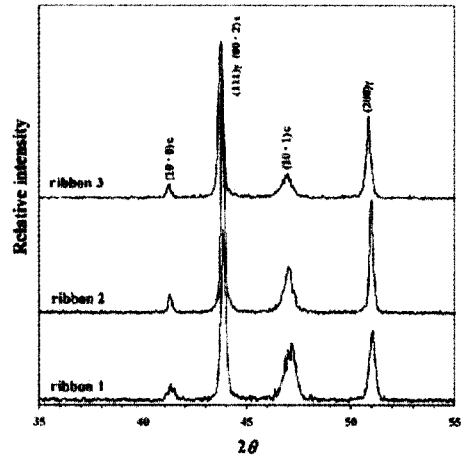


Fig. 4. X-ray diffraction profiles of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun at a wheel speed of 15 m/sec.

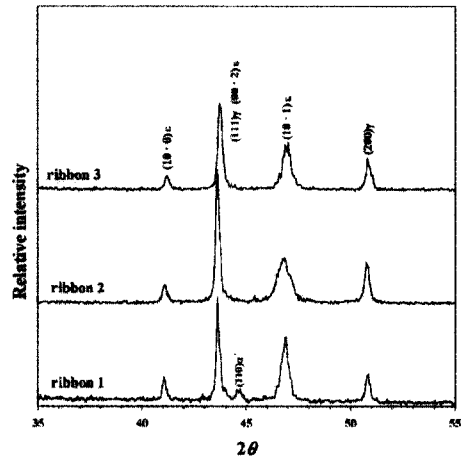


Fig. 5. X-ray diffraction profiles of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun at a wheel speed of 15m/sec and then annealed at 600°C for 3min.

는 리본 제조시 도입되는 원자공공, 전위, 적층결함, 열응력 또는 열처리 전후의 결정립 크기 변화 등에 영향을 받은 것으로 판단된다.

Fig. 6은 이와 같은 미세조직의 변화에 미치는 열처리의 영향을 조사하기 위하여 300~600°C에서 각각 3분간 유지하여 공냉한 시편들에 대한 ϵ 마르텐사이트의 체적분율을 나타낸다. 전체적으로 300~600°C 열처리에 의해 ϵ 마르텐사이트 체적분율은 리본상태보다 증가하고 있으며 α' 마르텐사이트가 생성되는 리본 1을 제외하고는 600°C 열처리에 의해서 ϵ 마르텐사이트의 체적분율

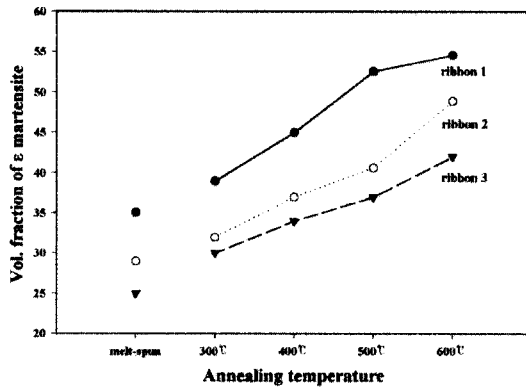


Fig. 6. Variations in the volume fraction of ϵ martensite of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun and annealed at 300°C, 400°C, 500°C and 600°C for 3 min, respectively.

은 급격히 증가하였다. 그러나 Fig. 3으로부터 알 수 있는 바와 같이 α' 마르텐사이트는 $\epsilon \rightarrow \alpha'$ 변태에 의해 ϵ 마르텐사이트로부터 생성되기 때문에 α' 마르텐사이트의 체적분율이 약 10% 내외인 점을 감안하면 리본 1에서도 모상으로부터 변태한 ϵ 마르텐사이트의 체적분율 역시 급격히 증가한 것으로 판단된다.

일반적으로 같은 조성을 갖는 합금에서도 냉각속도가 빠르면 마르텐사이트의 핵생성 장소로 작용하여 변태를 조장하는 다수의 격자결합이 존재하게 되어 마르텐사이트의 변태량은 증가하는 것으로 보고되고 있다[16]. 그러나 Fig. 6의 결과를 보면 300~600°C에서 3분간 유지하여 공냉한 시편들의 ϵ 마르텐사이트의 체적분율은 빠른 냉각속도로 인하여 다수의 격자결합이 포함되어 있을 것으로 판단되는 리본상태의 ϵ 마르텐사이트의 체적분율보다 크게 나타나고 있으며 특히 이러한 ϵ 마르텐사이트의 체적분율의 변화는 500°C까지는 완만히 상승하나 600°C 열처리에서는 급격히 증가하고 있다.

이러한 열처리 온도에 따른 ϵ 마르텐사이트의 체적분율의 변화는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉 급속응고에 의해 리본을 제조하는 경우 리본에는 여분의 원자공공 및 적층결함 등과 같은 격자결합 등이 도입되며 이러한 격자결합들은 Fe-Mn-Si계 합금의 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 또는 $\epsilon \rightarrow \alpha'$ 마르텐사이트변태에 기여하게 된다. 그러나 급속응고의 경우 냉각속도는 105~106K/sec로 매우 크기 때문에 이와 같이 변태를 조장하는 격자결합뿐만 아니라 급냉에 따른 결정립 미세화 또는 열응력 등과 같이 모상을 안정화시키는 요인 역시 상존하게 된다. 따라서 리본 상태인 경우에는 후자의 요인에 의해 모상의 안정화

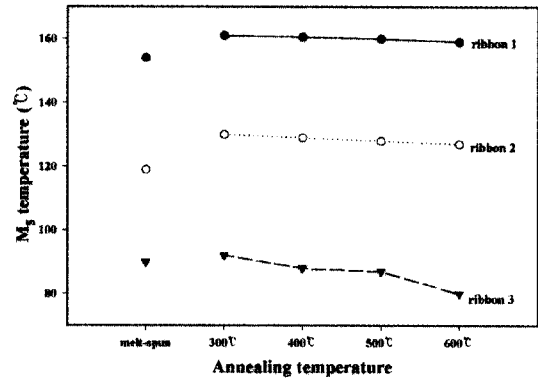


Fig. 7. Variations in M_s temperature of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun and annealed at 300°C, 400°C, 500°C and 600°C for 3 min, respectively.

가 일어나 ϵ 마르텐사이트의 변태가 억제되나 300~600°C의 열처리에 의해 열응력 등과 같은 모상의 안정화 요인이 감소하고 특히 600°C 열처리에서는 결정립의 성장 역시 수반하여 Fig. 6과 같이 열처리에 의해 ϵ 마르텐사이트의 체적분율은 크게 증가하게 하게 된다.

3.3. 열처리 온도에 따른 변태온도 변화

열처리온도에 따른 리본 1, 2 및 3의 변태온도의 변화를 조사하기 위하여 시차주사열량계를 이용하여 열분석 시험하였으며 열분석 곡선으로부터 구한 M_s 온도변화는 각각 Fig. 7과 같다.

M_s 온도를 나타낸 Fig. 7에서 보면 전체적으로 M_s 온도는 Mn 함량에 따라 크게 차이가 나며 Mn 함량이 증가함에 따라 즉 리본 1→2→3의 순으로 M_s 온도는 낮게 나타났다. 또한 모든 리본에서 열처리에 의해 M_s 온도는 리본 상태보다 상승하며 상승 폭은 300°C에서 가장 크고 열처리온도가 400, 500 및 600°C로 되더라도 그 폭은 크게 변하지 않았다. 이와 같이 열처리에 의해 변태온도가 전반적으로 상승하는 이유는 이미 전항에서 언급하였듯이 열처리에 의해 열응력 등과 같은 모상의 안정화 요인이 감소하여 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 변태가 더 쉽게 일어나기 때문이다.

3.4. 형상회복률

열처리 온도에 따른 리본 1, 2 및 3의 형상회복률을 비교하기 위하여 굽힘 변형 후 A_f 온도 이상으로 가열하여 형상회복률을 구하였다. 굽힘 변형시 변형률(ϵ)은 시편의 두께 및 굽힘 반경의 함수로서 다음 식과 같이

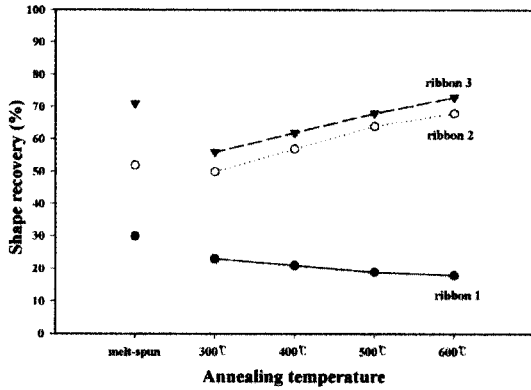


Fig. 8. Variations of shape recovery of the ribbons 1, 2 and 3 melt-spun and annealed at 300°C, 400°C, 500°C and 600°C for 3 min, respectively.

구하였으며 이 때 변형률은 약 3%이었다.

$$\epsilon = 1 / \{(2R/H) + 1\} \times 100$$

R: radius

H: thickness

Fig. 8은 리본 1,2 및 3의 열처리 전후의 형상회복률을 나타낸 것으로서 열처리 전 리본 1, 2 및 3에서 형상회복률은 Mn 함량의 증가에 따라 30, 52 및 69%로 증가하였다. 한편 열처리 온도가 상승함에 따라 리본 1에서 형상회복률은 감소하였으며 이러한 이유는 Fig. 3 및 Fig. 5에서와 같이 ϵ 마르텐사이트 내에 형상회복률을 저하시키는 α' 마르텐사이트의 체적분율이 증가하기 때문이다. 그러나 리본 2 및 3의 경우에는 300°C 열처리에서는 형상회복률이 감소하나 이후 열처리 온도의 상승에 의해 형상회복률은 상승하였다. 이와 같이 리본 2 및 3의 경우와 같이 300°C 열처리에 의해 형상회복률이 저하되는 이유는 열처리 전 급냉에 의해 생성된 리본과 300°C 열처리 후 공냉에 의해 생성된 ϵ 마르텐사이트의 미세조직이 같지 않기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 9는 급속응고에 의해 제조된 리본 2에서 생성된 ϵ 마르텐사이트의 투과전자현미경 사진으로서 bulk 시편 또는 공냉한 시편에서 얻어진 ϵ 마르텐사이트의 미세조직과는 다른 morphology를 갖고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서 보면 급속응고에 의해 얻어진 리본의 경우 bulk 시편 또는 공냉한 시편과는 달리 평행하고 그 폭이 약 10~20 nm 내외로 매우 미세한 ϵ 마르텐사이트



Fig. 9. Transmitted electron micrographs of ribbon 2 melt-spun at a wheel speed 15m/sec; (a) BF image, (b) DF image and (c) SAD pattern(Z; [01 · 0]).

플레이트를 관찰할 수 있으며 이는 오스테나이트 내에 ϵ 마르텐사이트의 핵생성 장소로 작용하는 많은 수의 적층결함이 리본 제조시 급냉에 의해 도입되었음을 의미한다. 따라서 Fig. 8에 나타난 바와 같이 리본 2 및 3의 경우 300°C에서 열처리한 리본에 비해 급속응고한 리본의 형상회복률이 큰 이유는 급속응고한 리본에서는 오스테나이트 내에 많은 수의 적층결함이 존재하기 때문에 변형시 형상회복에 유리한 ϵ 마르텐사이트가 생성되고 가열에 의한 이의 역변태가 쉽게 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 6 및 Fig. 8에서와 같이 리본 2 및 3에서 열처리 온도가 상승하여 적층결함이

소멸되고 ϵ 마르텐사이트의 체적분율이 증가함에도 불구하고 형상회복률이 증가하는 이유는 대해서는 추후 많은 검토가 필요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

급속응고에 의해 Fe-X%Mn-5Cr-5Co-4Si (X%=15, 20, 24wt%)계 합금 리본의 Mn의 함량 및 휠 회전속도의 변화 등에 따른 리본의 형상, 미세조직 및 형상회복률 등을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 휠 회전속도가 증가함에 따라 급속응고된 리본의 두께와 폭은 감소하였으며 결정립은 미세화되고 그 크기는 균일화되었다.

(2) 리본상태에서 Mn 함량에 따라 ϵ 및 α' 마르텐사이트의 체적분율은 다르게 나타났다. 즉, Mn 함량이 15.5%인 경우 오스테나이트 기지에 ϵ 및 α' 마르텐사이트가, Mn 함량이 20.2 및 23.5wt%인 경우 ϵ 마르텐사이트가 생성되었으며 이러한 마르텐사이트의 체적분율은 Mn 함량의 증가에 따라 감소하였다.

(3) 열처리에 의해 ϵ 및 α' 마르텐사이트의 체적분율은 증가하였으며 이러한 이유는 리본 제조시 도입되는 열처리에 의해 열응력이 제거되거나 또는 결정립이 성장하기 때문이다.

(4) M_s 온도는 Mn 함량이 증가함에 따라 저하하였다. 또한 열처리에 의해 M_s 온도는 리본 상태보다 상승하며 상승 폭은 300°C에서 가장 크고 그 이상의 열처리 온도에서는 크게 변하지 않았다.

(5) 열처리 전후 리본의 형상회복률은 Mn 함량이 증가함에 따라 각각 30, 52 및 69%로 증가하였다. 열처리 온도가 상승함에 따라 ϵ 및 α' 마르텐사이트가 생성되는 리본에서는 형상회복률이 감소하였다. 그러나 ϵ 마르텐사이트만 생성되는 리본의 경우 300°C 열처리에 의해 형상회복률이 감소하나 이후 열처리 온도의 상승에

따라 형상회복률은 증가하였다.

후 기

본 연구는 1999학년도 조선대학교 교내연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. R. Oshima, S. Sugimoto, M. Sugiyama and F. E. Fugita, *Troms, Jpn. Inst. met.*, 26 (1985) 523.
2. T. Sohmura, R. Oshima and F. E. Fujita, *Scrip. Metall.*, 14 (1980) 855.
3. Y. N. Koval, V. V. Kokorin and L. G. Khandros, *Phys. Met. Metall.*, 48 (1981) 162.
4. T. Maki, K. Kobayashi, M. Minato and I. Tamura, *Scr. Metall.*, 18 (1984) 1105.
5. K. Enami, S. Nenno and Y. Minato, *Scr. Metall.*, 5 (1971) 183.
6. Y. Moriya, H. Kimura, S. Hashizume, S. Suzuki, H. Suzuki, T. Sampei, *J. Phys. France IV 1* (1991) C4-433
7. H. Inagaki, *Z. Metall.*, 83 (1992) 90.
8. J. Oyubo, P. R. Mei, S. Koshimizu, *J. Phys. France IV 5* (1995) C-8 427.
9. Y. Watanabe, Y. Mori, A. Sato, *J. Mater. Sci.*, 28 (1993) 1509.
10. M. S. Andrade, R. M. Osthues and G. J. Arruda, *Mater. Sci. and Engineer.*, A273-275 (1999) 521~516.
11. Q. Gu, L. Van Humbeeck and L. Delay, *Scripta Metall. Mater.*, 30 (1994) 1587
12. P. Donner and S. Eucken, *Mater. Sci. Forum Vol. 56-58* (1990) 723~728.
13. P. Donner, E. Hornbogen and M. Sade, *Jour. of Mater. Sci. Letters* 8 (1989) 37~40.
14. U. Gonser, R. M. Osgood, Jr. M. B. Panish and H. Sakaki, *Elements of Rapid Solidification Fundamentals and Applications*, Springer, New York, (1998) 2.
15. Z. Nishiyama, *Martensitic Transformation*, published by Academic Press, (1978) 306.
16. Zhenghong Guo, Yonghua Rong, Shipu Chen, T. Y. Hsu, Jianming Hong and Xiaoning Zhao, *Mater. Trans. JIM. No. 3.* (1999) 193~198.