

어트리션 밀링법으로 제조된 티타늄합금의 상변화 및 미세조직특성

진주보건대학 치기공과

차 성 수

=Abstract=

Phase Changes and Microstructural Properties of Ti Alloy Powders Produced by using Attrition Milling Method

Sung-Soo Cha

Dept. of Dental Laboratory Technology, Chinju Health College

Microstructure and phase transformation of Ti-Ni-Cu alloy powders produced by using attrition milling method were studied. Mixed powders of Ti-(50-X)Ni-XCu (X=0~20 at%) in composition range were mechanically alloyed for maximum 20 hours by using SUS 1/4" ball in argon atmosphere. Ball to powder ratio was 50:1 and impeller speed was 350rpm. Mechanically alloyed with attrition milling method, powder was heat treated at the temperature up to 850°C for 1 hour in the 10^{-6} torr vacuum. Ti-Ni-Cu alloy powders have been fabricated by attrition milling method, and then phase transformation behaviours and microstructural properties of the alloy powders were investigated to assist in improving the the high damping capacity of Ti-Ni-Cu shape memory alloy powders.

The results obtained are as follows :

1. After heat treating of fully mechanically alloyed powder at 850°C for 1hour, most of the B2 and B19' phases was formed and TiNi₃ were coexisted.

2. The B19' martensite were formed in Ti-Ni-Cu alloy powders whose Cu-content is less than 5at%, where as the B19 martensite in those whose Cu-content is more than 10at%.
3. The powders of as-milled Ti-Ni-Cu alloys whose Cu-contents is less than 5at% are amorphous, whereas those of as-milled Ti-Ni-Cu alloys whose Cu-content is more than 10at% are crystalline. This means that Cu addition tends to suppress amorphization of Ti-Ni alloy powders.

Key words : Ti-Ni alloy, Attrition Milling

1. 서 론

생체재료로서의 티타늄은 비 강도가 높고 뛰어난 인성을 가지며 열팽창 계수가 낮고 비중이 금 합금에 비하여 약1/4로서 자연치아와 유사하고, 열전도가 낮아 치수를 자극하지 않고 보호하는 특성이 있다. 특히 탄성률이 다른 금속에 비해 뼈 조직에 가까워 현재 가장 주목받고 있는 생체재료 중의 하나이다. 순수 티타늄 및 Ti-Ni합금등은 인공 치근재료, 치관, 국소의치의 프레임 및 교정용 선재등으로 이용(정중현등, 2000)되고 있으며 Ti-Ni계 합금은 진동흡수능 성질이 우수한 생체용 재료(Bieler, Mukherjee.1990)의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 임플란트 보철물을 사용시 치조골 흡수를 보호하고 Ti-Ni계 합금이 갖는 우수한 진동흡수능을 이용하여 양질의 치과 보철물 제작을 목적으로 어트리션 밀링법으로 Ti-Ni-Cu계 형상기억 합금을 제조하여 진동감쇠능 특성을 향상시키고자 하였다. 이러한 형상기억 효과는 Au-Cd합금에서도 발견되었는데(Otsuka & Shimizu, 1970; Benjamin & Bomford,1974) Ti-Ni합금은 Au-Cd합금이나 Ti-In합금에 비하여 가격이 저렴하고 형상기억 효과가 우수하여 치열 교정장치에 많이 사용되고 있다.

1980년대부터는 형상기억 효과를 이용한 진동감쇠능의 향상을 위한 기능재료로서의 응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며(Wayman & Shimizu, 1975; Mercier & Melton, 1981; Davis & Koch, 1987), 합금으로는 Ti-Ni합금을 비롯하여 10여종이 있는데, 이 합금들은 가역적인 열탄성 마르텐사이트 변태를 하는 것으로 알려져있다(Chang & Read, 1951; Wollants et al, 1980; Srinivasan et al, 1991). 그러나 현재 Ti-Ni합금이 주로 실용화되고있다(지광구, 1990). 어트리션 밀링법을 이용한 기계적 합금법은 종래의 주조법과는 달리, 고상상태에서 합금화가 진행하기 때문에 원칙적으로 합금 성분의 조합과 성분수에 제한이 없고 독특한 성질을 가진 재료 합성이 가능하며(Hasiguti et al, 1968) 초미세혼합(Furuya et al, 1993) 및 입자의 크기와 비중의 차이가 큰 이종의 입자를 초미세화시키는 것도 가능하며(Tong & Wayman, 1974) 초인성, 초소성(Miyazaki & Otsuka, 1983; 古屋泰文, 1992) 등의 가능성도 크게하는 장점이있다. 따라서 어트리션 밀링법은 새로운 제조기법으로 주목되고 있다. 진동흡수능 합금중 진동흡수능 특성이 가장 우수한 쌍정형 합금은 합금내부에 결정결함으로써 존재하는 쌍정을 이용하는 것으로 진동에너지가 가해지면 에너지를 감소시키기 위하여 쌍정계면이

이동하고, 그 결과 진동에너지가 감소되어 진동흡수능 효과를 나타내게 된다. 현재까지는 주로 Ti-Ni 2원계 합금이 이용되고 있지만 Ti-Ni-Cu 합금에 대해서는 연구가 거의 전무한 실정이다. 특히 주조체인 경우 Ti-Ni-Cu 합금이 Ti-Ni 합금보다 형상기억특성 및 진동감쇠능은 우수하지만 가공성이 열악한 측면을 고려할 때 Ti-Ni-Cu 합금의 실용화를 위하여는 가공성의 향상이 필수적인 과제로 부각되고 향후 이 분야에 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 어트리션 밀링법을 이용한 기계적 합금화법(Park et al, 1990)으로 Ti-Ni 합금의 제조와 상온에서 마르텐사이트상을 증가시키기 위하여 Ti-Ni-Cu계 형상기억 합금을 제조하여 미세조직특성 및 상변태 거동을 조사하고 조성에 따른 합금화의 최적조건을 규명하고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

분말은 입도분포도가 1-60 μm , 순도가 99.9%인 미국 Johnson Matthey사의 Ti 분말과 평균입도가 5 μm 인 Cera사의 Ni분말 및 입도분포가 2~150 μm , 평균입도가 40.54 μm 인 Cu 분말을 사용하였다.

2. 실험방법

1) 합금 제조

Ti-Ni 및 Ti-Ni-Cu합금을 어트리션 밀링을 이용한 기계적 합금법으로 제조하였으며 이를 도해하면 그림 1과 같다. 이때 볼과 분말의 비율은 50:1로 하였으며 회전속도는 Ti-Ni 합금은 350 rpm, Ti-Ni-Cu 합금은 250 rpm으로 하였고, 1/4" SUS볼을 사용하여 10시

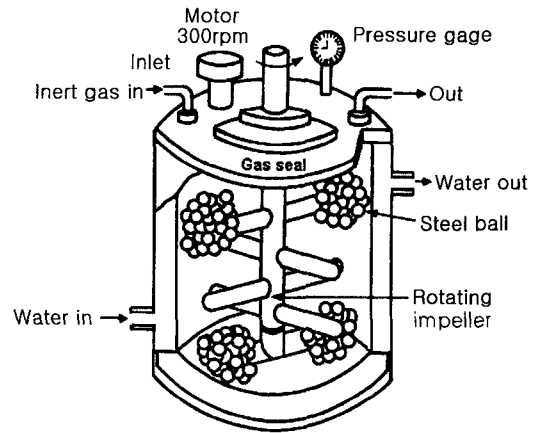


Fig. 1. Schematic diagram of attrition milling.

간 동안 Ti-48.5Ni, Ti-50.0Ni 및 Ti-51.5Ni(a/o)의 조성 분말 및 Ti-45Ni-5Cu, Ti-40Ni-10Cu Ti-30Ni-20Cu(a/o)의 조성으로 제조하였고 합금분말 제조시 분말의 산화를 방지하기 위하여 용기의 내부는 아르곤가스 분위기로 하였고, 용기 외부에는 냉각수를 흘려주어서 밀링하는 동안 분말의 온도상승을 방지하였다. 합금화된 분말의 형상, 크기 및 합금화정도를 평가하여 합금화 최적조건을 찾았다.

2) 열처리

10시간 동안 기계적 합금화로 제조된 Ti-Ni 및 Ti-Ni-Cu 비정질 분말을 열처리 하여 결정질로 만들기 위하여 석영관에 분말을 채워 넣고 10-5torr의 진공분위기로 한 다음 열처리 온도를 450 $^{\circ}\text{C}$, 600 $^{\circ}\text{C}$, 850 $^{\circ}\text{C}$ 로 변화시키면서 1시간 동안 열처리한 후 열음물 속에서 수냉하여 열처리 하였다.

3) 미세조직 및 상변화 조사

Ti-Ni 및 Ti-Ni-Cu 합금분말의 결정화 온도를 조사하기 위하여 X-선 회절분석을 하였으며 X-선

회절시험은 Cu K α 를 이용하였다. 조성에 따라 어트리션 밀링법으로 기계적 합금화된 Ti-Ni(Cu)분말의 합금화정도 및 열처리에 의한 상변화와 기계적 합금 분말의 합금화상태를 규명하였고, 합금분말의 미세구조를 관찰하기 위하여 전자현미경으로 관찰하였으며 전자현미경은 JEOL 2010을 이용하고 가속전압은 200KV로 하였다.

III. 결과 및 고찰

Ti-Ni-Cu의 합금화 분말을 제조하기 위하여 Ti, Ni 및 Cu의 원료분말을 사용하였다. 그림 2는 99.9% Ti 분말의 미세조직 사진으로 분말의 평균 입도는 30 μ m이고 그림3은 Ni 분말의 미세조직 사진으로 분말의 입도가 평균 5 μ m인 비교적 균일한 분말이었다. 그림 4는 Cu원료 분말의 미세조직 사진으로 평균입도는 40.54 μ m였다.

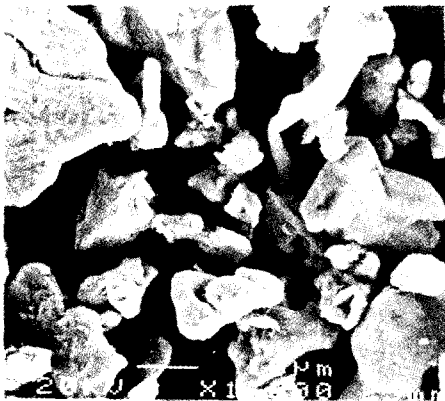


Fig. 2. SEM morphologies of Ti-powder.

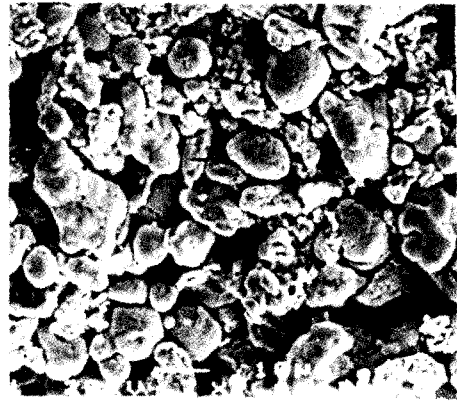


Fig. 3. SEM morphologies of Ni powder.

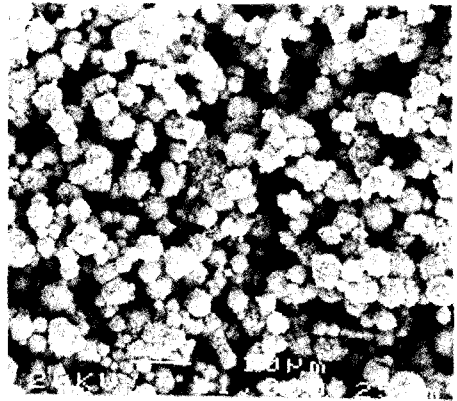


Fig. 4. SEM morphologies of Cu-powder.

그림 5는 Ti 과 Ni 분말을 원자비 50:50의 조성으로 혼합하고 볼과 분말의 비율을 50:1로하여 기계적 합금화를 1시간, 5시간, 10시간, 20시간 행한 후 Ti-Ni 합금분말의 형상을 보여 주는 주사전자현미경 조직사진으로써, a)는 볼밀링을 이용한 기계적 합금화를 1시간동안 하였을때의 조직사진이며, b)는 5시간까지 c)는 10시간, d)는 20시간까지 볼 밀링하여 기계적 합금화 시킨것으로 1시간에서 5시간까지는 입자의 형상이 불균일하였으며, 10시간

부터 20시간까지는 구형의 균일한 분말이 제조되었으며, 20시간 기계적 합금화한 것이 더 균일하였고 크기의 변화도 거의 없었다. 그림 6은 어트리션 밀링 시간에 따른 분말의 입자분포도를 나타낸 것으로 1시간과 5시간동안 기계적 합금화시킨 분말의 분포도는 0.1~150 μm 로서 그림 5의 a), b)와 같이 균일하지 못하였다. 10시간 합금화 한 분말의 분포도는 1~110 μm 였으며, 평균 입도분포는 25.68 μm 였다. 20시간 기계적 합금화한 분말의 분포도는 4~210 μm 였고, 평균 입도분포는 23.15 μm 로서 10시간 보다 미세한 입도 분포도를 나타내었다.

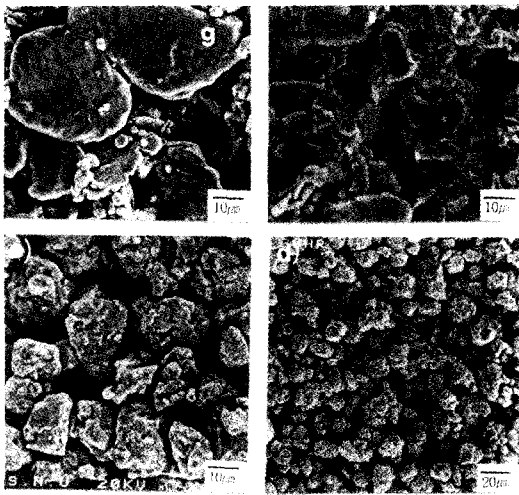


Fig. 5. SEM morphologies of mechanically alloyed Ti-50Ni powders.

- a) 1 hour b) 5 hours
- c) 10 hours d) 20 hours

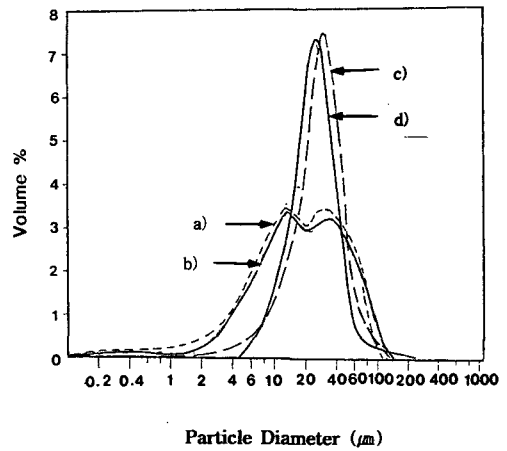


Fig. 6. Particle size distribution of mechanically alloyed Ti-50Ni powders.

- a) 1 hour b) 5 hours
- c) 10 hours d) 20 hours

그림 7은 Ti-50a/oNi 분말을 1, 3, 5, 10, 20 시간씩 각각 기계적 합금화시킨 후 분말의 합금 정도를 알아보기 위하여 X-선 회절 분석한 결과이다. 1시간 및 3시간 기계적 합금화시킨 경우는 Ti 과 Ni 결정상 피-크가 아직 그대로 존재하였으나 5시간 기계적 합금화 하였을때부터 피-크의 강도는 현저히 감소하기 시작하여 10시간 및 20시간 기계적 합금화시킨 경우는 각 성분 피-크는 모두 사라지고 피-크의 강도도 저하되면서 폭이 넓어졌다 이는 Ti 과 Ni이 상호 고용에 의한 합금분말이 되면서 미세한입자 또는 비정질상이 형성된 것으로 생각할 수 있다. 기계적 합금화에 의해서 비정질 상의 Ti-Ni 합금분말이 형성되었다면 이러한 비정질 Ti-Ni상은 쌍정변형에 기인한 형상 기억효과가 없는 것으로 알려져 있다.

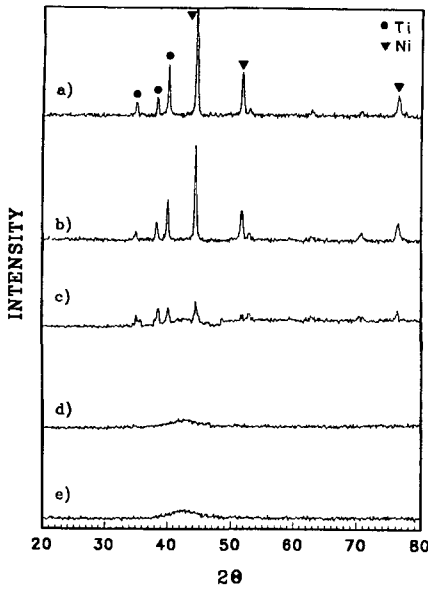


Fig. 7. XRD patterns of mechanically alloyed Ti-50Ni powders as a function of milling time.
 a) 1 hour b) 3 hours
 c) 5 hours d) 10 hours e) 20 hours

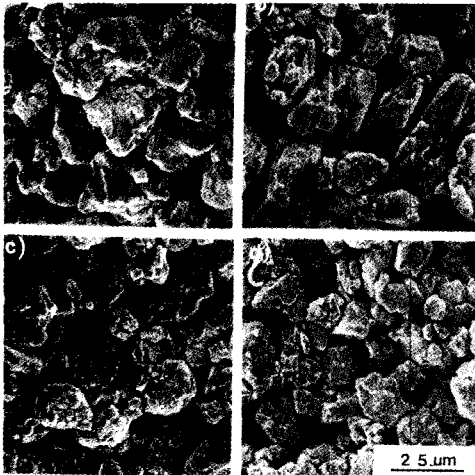


Fig. 8. SEM morphologies of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti, Ni, Cu powders (before heat treatment).
 a) Ti-45Ni-5Cu b) Ti-40Ni-10Cu
 c) Ti-35Ni-15Cu d) Ti-30Ni-20Cu

그림 8은 Ti, Ni 및 Cu 분말을 아트리터 속에 동시에 장입하여 10시간 기계적 합금화시킨 Ti-Ni-Cu 합금분말의 형상을 합금의 조성에 따라서 보여주는 주사전자현미경 조직사진으로 a)는 Ti-45Ni-5Cu, b)는 Ti-40Ni-10Cu, c)는 Ti-35Ni-15Cu, d)는 Ti-30Ni-20Cu(a/o)로서 10시간 기계적 합금화한 후 압접된 조직사진으로 비교적 구형의 분말이 형성되었다. 그림 9는 Ti 분말과 Ni 분말을 10시간 기계적 합금화시켜 Ti-Ni 합금분말을 제조하고 그 후 Cu를 조성별로 장입하여 추가로 10시간 볼 밀링하여 Ti-Ni-Cu 합금을 제조한 합금분말의 형상을 보여주는 주사전자현미경 조직사진으로 그림 7에서 Ti, Ni, Cu 분말을 동시에 장입하여 기계적 합금화한 것보다는 분말입자의 형상이 더욱 미세화 되었다. 이는 아트리터내에서 합금화가 일어날 때 볼의 충격 작용에 의해 반복 단조 되고 그 후 파괴, 응집, 응착을 반복하면서 미세한 층상조직을 가진 등축형 입자가 생성되며, 최종적으로 분말들의 압접속도와 파괴 속도가 평행을 이루게 되어 분말의 형태는 미세한 구형이 된 것으로 생각된다. 하지만 본 연구에서는 Ti, Ni, Cu 분말을 동시에 장입하여도 기계적 합금화가 되었으므로 합금 제조시간이 절감되는 Ti, Ni, Cu 분말을 동시에 장입하는 방법으로 연구를 진행하였다.

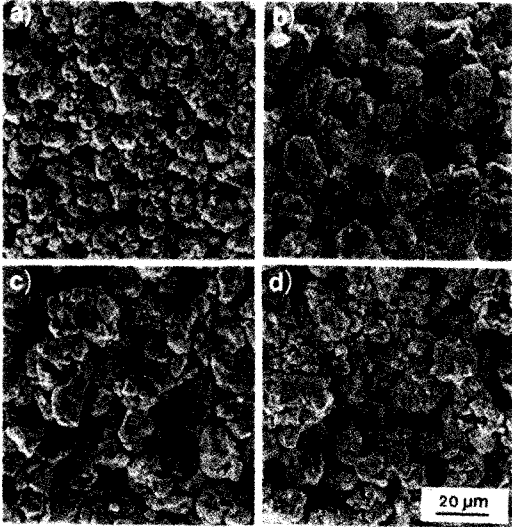


Fig. 9. SEM morphologies of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti-Ni and Cu powders.

- a) Ti-45Ni-5Cu b) Ti-40Ni-10Cu
c) Ti-35Ni-15Cu d) Ti-30Ni-20Cu

그림 10에서 Ti-Ni-Cu 분말은 Ti-(50-x)Ni-xCu (a/o) (x=5, 10, 15, 20) 조성의 분말을 각각 동시에 아트리터속에 장입한 후 임펠러의 회전 속도를 250rpm으로 고정하고 볼과 분말의 비율을 50:1로 하였으며 밀링시간은 10시간으로 행한 후 합금분말을 X선 회절분석한 결과로서 Ti-45Ni-5Cu, Ti-40Ni-10Cu, Ti-35Ni-15Cu, Ti-30Ni-20Cu(a/o) 모두 각 성분 피크는 모두 사라지고 피크가 폭넓게 형성되었다. 이는 Ti과 Ni 및 Cu가 상호고용에 의한 합금 분말이 되면서 미세한 입자 또는 비정질상이 형성된 것으로 생각할 수 있다.

그림 11은 Ti과 Ni 분말을 10시간동안 볼 밀링한 후 Cu분말을 조성별로 장입하여 다시 10시간 기계적 합금화시킨 것으로, 합계 20시간 기계적 합금화시킨 분말을 X선 회절분석한 결과로서 그림 9에서 10시간 기계적 합금화한 것 같이 비정질 과 미세결정립에 의해 피크는 broadening하게 나타났다.

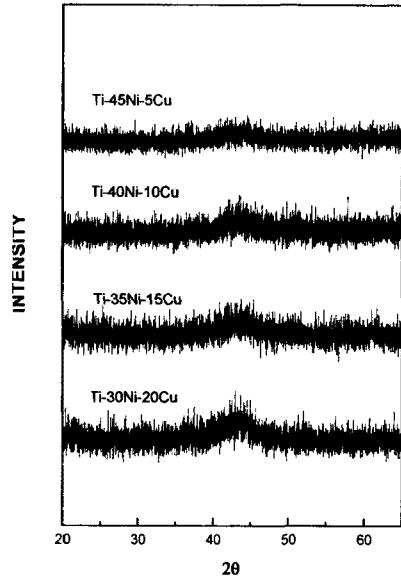


Fig. 10. XRD patterns of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti, Ni, Cu powders (before heat treatment).

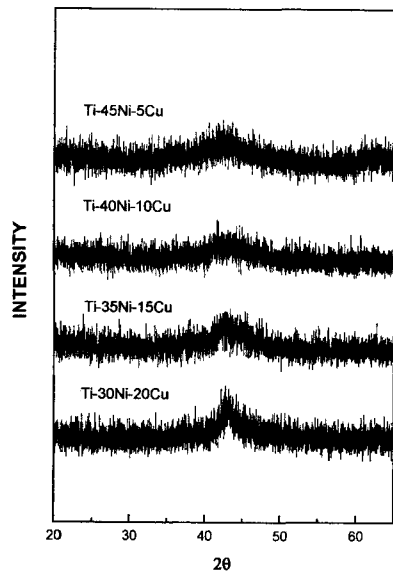


Fig. 11. XRD patterns of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti-Ni and Cu powders (before heat treatment).

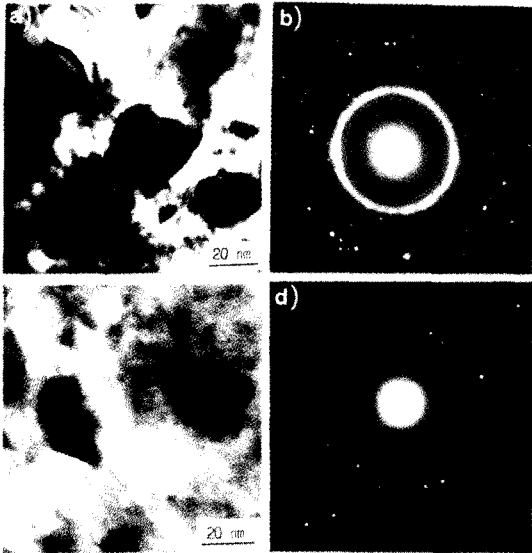


Fig. 12. TEM photographs of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti-Ni and Cu powders
 a) Bright field image of a Ti-45Ni-5Cu alloy
 b) Electron diffraction pattern obtained from a)
 c) Bright field image of a Ti-30Ni-20Cu alloy.
 d) Electron diffraction pattern obtained from c)

그림 12는 10시간 기계적 합금화하여 Ti-Ni 합금을 제조한 후 Cu 분말을 장입하여 한번더 10시간 기계적 합금화시켜서 Ti-Ni-Cu 합금을 제조하여 투과 전자현미경으로 관찰한 결과로서 a)는 Ti-45Ni-5Cu 분말의 명시야상이며 b)는 a)의 전자선 회절도형이다.

Ti-45Ni-5Cu의 경우 미세한 결정립과 비정질 상이 공존하고 있음을 알 수 있었다. c)는 Ti-30Ni-20Cu의 명시야상이며 d)는 c)의 전자선 회절도형으로서 Ti-45Ni-5Cu와 같이 얼마간의 비정질과 미세한 결정립이 형성되어 있었다.

Ti-Ni-Cu 비정질 분말의 결정화를 위한 적정 열처리 온도를 조사하기 위하여 Ti-Ni비정질 분말을 석영관 속에 넣고 진공펌프를 이용하여 진공상태에서 토치를 사용하여 밀봉한 후 열처리조에 넣고 온도를 변화시키면서 열처리하여 X-선회절 실험을

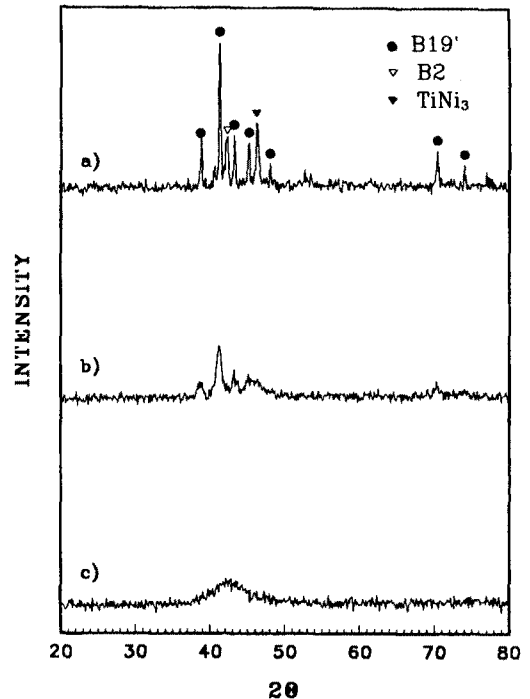


Fig. 13. XRD patterns of heat treated powders for 1 hour at various temperatures after 10 hours mechanically alloyed Ti-50Ni powders.
 a) 850°C b) 600°C c) 450°C

행한 결과는 그림 13과 같다. 그림 13은 10시간 기계적 합금화한 후의 Ti-Ni분말을 450°C, 600°C 및 850°C에서 각각 1시간씩 열처리 하였을 때 나타나는 X-선 회절 피크로, 450°C에서는 결정상이 나타나지 않았지만 600°C에서 합금상의 피크가 나오기 시작하여 850°C에서 충분히 확인할 수 있는 합금상이 생성되었다. 이미 발표된 보고에 의하면 기계적 합금화시킨 Ti-Ni상의 결정화가 300°C이하의 온도에서 시작하지만, 본 실험에서는 600°C이상의 온도에서 1시간 열처리함으로써 합금 분말의 충분한 결정상을 얻을 수 있었다. 이는 기계적 합금화시 제조공정에 따른 분말 내부에 축적된 에너지 및 형성되는 합금상이 달라지기 때문인

것으로 생각된다. 그런데 Ti-Ni상태도 상에서 630°C 이상이 되면 B2상의 영역으로 충분히 균질화 처리를 할 수 있는 영역에 속하지만 조성범위의 폭이 좁은 영역이므로 본 실험에서는 이보다 충분한 결정화가 이루어질 수 있는 온도인 850°C를 열처리온도로 정하였다. Ti-Ni 합금분말이 갖는 형상 기억 특성은 마르텐사이트상인 B19'상이 모상인 B2상으로 변할 때 나타난다. 그런데 오스테나이트에서 마르텐사이트상으로의 변태온도는 합금의 조성에 민감하게 변하므로 이들상의 분율은 조성을 변화시켜서 조절할 수가 있다. 따라서 조성을 조금씩 변화시켜서 10시간의 동일한 조건에서 어트리션 밀링법을 이용하여 기계적 합금분말을 제조하고 850°C에서 열처리한 다음, 상들의 분율변화를 X-선회절을 이용하여 조사한 결과 그림 13과 같다. 그림 14는 Ti-45Ni-5Cu, Ti-40Ni-10Cu, Ti-35Ni-15Cu, Ti-30Ni-20Cu(a/o)의 조성별로 Ti 분말, Ni 분말, Cu 분말을 동시에 장입하여 10시간 동안 350rpm으로 기계적 합금화시킨 후 850°C에서 1시간 열처리한 것을 X-선 회절분석한 것이고, 그림 15는 Ti 분말과 Ni 분말을 어트리터내에 장입하여 10시간동안 350rpm으로 기계적 합금화시켜 Ti-Ni 합금분말을 제조한 후 다시 Cu 분말을 조성별로 5a/o, 10a/o, 15a/o, 20a/o 씩 장입하여 한번 더 10시간 동안 기계적 합금화시켜 제조하였다. 조성별로 Ti-45Ni-5Cu, Ti-40Ni-10Cu, Ti-35Ni-15Cu, Ti-30Ni-20Cu(a/o)를 X-선 회절 분석한 피크를 보여주는 그림으로서 Ti-45Ni-5Cu 합금에서 B19'상이 가장 많이 형성되었으며, Cu의 양이 증가하면서 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 14와 그림 15에서 보는 바와 같이 열처리 후 모두 마르텐사이트의 결정질이 나타났으나 Ti, Ni, Cu 분말을 동시에 장입한 것과 Ti-Ni 합금분말을 제조후

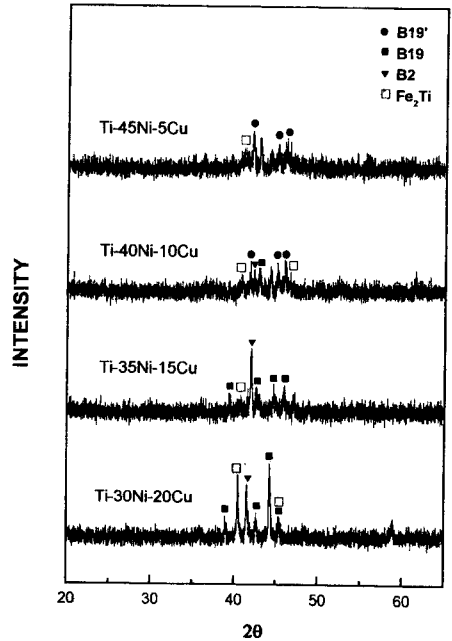


Fig. 14. XRD patterns of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti, Ni, Cu powders (after heat treatment).

Cu 분말을 장입한 것을 비교해 보면 Ti, Ni, Cu 분말을 동시에 장입하여 기계적 합금화하였을 때는 Ti-Ni 이원합금을 제조후 Cu를 장입하여 기계적 합금화를 한 경우보다 합금화가 지연됨에 따라 Fe의 혼입량이 많이 나타날것으로 생각되며, Ti-Ni 이원합금을 제조후 Cu를 장입하여 기계적 합금화를 행하는 과정에서 강구 및 어트리터의 임펠라에 의한 마모로 인하여 형성 될 것으로 생각되며, 이는 마르텐사이트의 생성을 억제하여 진동감쇠능을 저하시키는 원인이 될 것으로 생각된다.

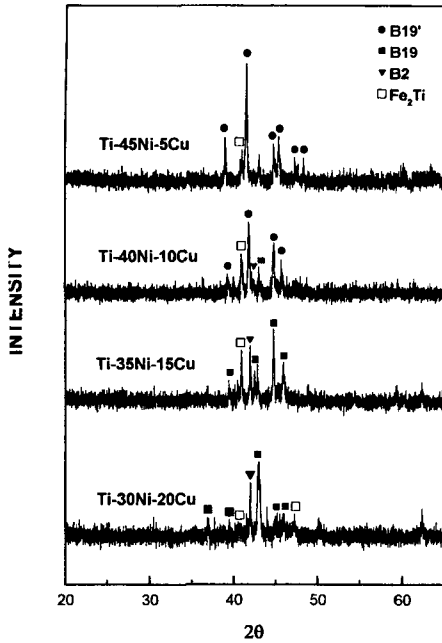


Fig. 15. XRD patterns of Ti-Ni-Cu powders fabricated by ball milling Ti-Ni and Cu powders (after heat treatment).

IV. 결 론

어트리션 밀링법으로 Ti-Ni(Cu)합금분말을 10시간 동안 제조하고 850°C에서 1시간 동안 열처리한 후 상변화 및 미세조직 특성을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 어트리션 밀링법으로 기계적 합금화를 10시간 시행하였을 때 충분한 합금상이 되었으며, 10시간 기계적 합금화시킨 TiNi분말을 850°C에서 1시간 열처리하여 결정화하였을 경우 B2상과 B19' 상이 공존하였으며 일부 TiNi₃ 금속간 화합물이 생성되었다.
2. Ti-45Ni-5Cu(a/o)합금에서는 B19' 상이 생성

되었으며 Ti양이 감소하고 Cu의 양이 증가함에 따라 Ti-30Ni-20Cu(a/o)합금에서는 B19 마르텐사이트상이 생성되었다.

3. Ti-Ni-Cu합금분말을 제조하기 위해서는 Ti, Ni, Cu, 분말을 동시에 장입하여 제조하는 것 보다 Ti-Ni합금 분말을 제조한 후 추후에 Cu분말을 제조한 것이 미세한 입자분말을 얻을수 있었고 Ti-45Ni-5Cu(a/o) 합금에서는 비정질상이 생성되었지만 Ti-30Ni-20Cu(a/o) 합금에서는 미세한 결정립이 생성되었다.

참고문헌

- 정중현, 백승남, 노학. 생체용 Ti-Zr-Nb-Pd계합금의 내마모성에 관한 연구. 대한치과기공학회지, 27(3): 199, 2000.
- 지광구. 박사학위논문. 한국과학기술원, 1990.
- Benjamin JS, Bomford MJ. Metall. Trans. A8: 1301, 1974.
- Bieler TR, Mukherjee AK. Mater. Sci Eng, A128: 171, 1990.
- Chang LC, Read TA, Trans. AIME, Vol 191: 47, 1951.
- Davis RM, Koch CC. Scripta Metall, 21: 305, 1987.
- Delay L, Krishinan RV, Tas H and Walimont H. J. of Materials Science, Vol.9 : 1521, 1974.
- Furuya Y, Sasaki A and Taya M: Marer. Trans., JIM, 34: 224, 1993.
- Hasiguti R, Iwasaki K. Appl J. Phys., 39: 2182, 1968.
- Mercier O, Melton KN, J. of Appl. Phys., Vol 52: 1030, 1981.
- Metals Handbooks 9th ed., American Society for

차성수 : 어트리션 밀링법으로 제조된 티타늄합금의 상변화 및 미세조직특성

Metals, vol 7: 710, 1984.

Miyazaki S, Otsuka K, Japan Bulletin of Met, Vol
22: 33, 1983.

Otsuka K, Shimizu K. Scr. Metall., 4: 469, 1970.

Park HR, Park JSL, Rigsbee JM, Wayman CM.
Mater. Sci Eng, A128: 129, 1990.

Srinivasan AV, Cutts DG and Schetky LM. Metal.
Trans, 22A: 623, 1991.

Tong HC, Wayman CM, Acta Metall., Vol 22: 887,
1974.

Wayman CM, Shimizu K. Met. Sci J, Vol 6: 175,
1975.

Wollants D, Ross JR and Delaey L, Scr. Met., Vol
14: 1217, 1980.

古屋泰文. 機械の研究. 44(9): 87, 1992.

高橋 輝男. 工業材料. 40(8): 46, 1992.

高橋 裕男. 日本金屬學會會報. 27(10): 808, 1988.

大塚和弘, 青水謙一. 日本金屬學會會報, 11: 12, 1972.

時實 正治. 工業材料. 40(8): 54, 1992.