

## Cu-Si 기지금속을 사용한 교류용 초전도선재 제조 및 특성

하동우<sup>o</sup>, 오상수, 오봉환, 권영길, 조전욱, 류강식, 한일웅<sup>\*</sup>, 백홍구<sup>\*\*</sup>  
(한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, \*대성전선, \*\*연세대 금속공학과)

### Fabrication and characteristics of NbTi superconducting wires with Cu-Si matrix for AC use

D.W.Ha, S.S.Oh, B.H.Oh, Y.G.Kwon, J.W. Cho, K.S.Ryu, I.Y.Han, H.K.Baik  
KERI, \*Daesung Cable Co., LTD, \*\*Yonse Univ.

#### Abstract

The Cu-Si alloy has been proposed as a new matrix material for filamentary Nb-Ti wires in AC use. The Cu-Si alloy shows appropriate mechanical and electrical properties, and is economically more favourable than the Cu-Ni alloy matrix used currently. Moreover, the addition of Si to Cu prevents the formation of intermetallic compounds around the filaments. After we investigated resistivity and hardness of Cu-Si alloy as matrix material, investigated CuSi/NbTi interface reactions and superconductivities of superconducting wires that were made by various heat treatment.

#### 1. 서 론

초전도선재의 응용범위를 확장하기 위해 60 Hz의 교류전류에서 사용할 수 있는 교류용 초전도선재의 연구가 활발히 진행되고 있다. 교류용 초전도선재의 실용화를 위해서는 교류손실을 저감시켜야 하는데, 이를 위해서는 초전도 필라멘트의 직경이 1 μm 이하로 되도록 가공하여야 할 뿐 아니라 기지금속의 비저항을 증가시켜 히스테리시스 손실과 결합손실을 감소시킬 필요가 있다. 현재 교류용 초전도선재의 기지금속으로 사용되는 Cu-Ni 합금은 결합손실이 크다는 것과 Cu - 30wt%Ni의 경우와 같이 초전도선재로의 가공 동안 가공경화가 너무 커서 균일한 가공을 방해하는 단점을 지니고 있는데, 이를 개선하고자 기지금속으로 Cu-Ti 합금을 선택하여 균일한 가공의 가능성을 확인할 수 있는 물리적 특성을 조사하였으며 단심 선재를 가공하여 열처리 변화에 따른 선재의 초전도 특성을 측정하였다.

#### 2. 실험

NbTi 초전도선재를 제작하기 위해 우선 압출을 하기 위한 초전도 빌렛을 제작하였다. 직경 50 mm, 길이 150 mm의 Cu-2.5wt%Si 조성의 Cu 합금 튜브에 직경 38 mm, 길이 120 mm의 Nb-47wt%Ti의 초전도 봉재를 넣어 양 단을 Cu 마개로 막은 후 진공중에서 전자빔 용접기를 사용하여 밀폐·용접을 행하여 초전도 빌렛을 제작하였다. 이와 같이 만들어진 초전도 빌렛을 700 °C에서 1 시간 예열을 한 다음, 컨테이너 직경이 55 mm 이며, 400 °C로 예열한 압출기를 이용하여 압출가공을 하였다. 이때 압출이 완전히 되지 않았는데 이는 Cu-Si 합금의 변형용력이 너무 커 압출가공 동안 빌렛이 냉각이 되어 소성가공이 되지 않았던 것으로 생각된다. 이렇게 압출된 선재의 직경은 15.8 mm 였으며 이를 인발가공하여 직경 5 mm까지 가공하였다. 이를 선선기를 이용하여 직경 2.93 mm와 직경 1.18 mm 까지 가공한 다음 375 °C, 45 시간 열처리하였다. 이들을 다시 선선가공하여 최종 직경이 0.5 mm가 되도록한 후 처음과 같은 열처리 조건으로 열처리를 하였다. 인발 및 선선가공의 단면적 감소율은 5 - 10%로 하였으며 선재의 경도측정을 위한 시료를 위해 가공 도중에 선재를 조금씩 남겨두었다.

가공-열처리 조건을 달리한 선재를 4단자법으로 4.2 K, 자장 중에서 전류밀도를 측정하였다. 경도측정은 마이크로 비커스 경도기를 사용하였는데 피라미드형 다이아몬드 헤드들 하중 100 g으로 10 초 동안 시료에 압력을 가하여 경도를 환산하였다. 또한 CuSi 합금의 비저항 측정을 위해서는 ϕ2.93 선재를 기준으로 압연량을 증가시켰으며 이를 4 단자법으로 온도를 상온에서 9 K까지 변화시키면서 비저항을 측정하였다. 초전도체와 기지금속 간의 열

처리 동안 금속간 화합물의 생성 거동을 살피기 위해 CuSi/NbTi 선재와, Cu/NbTi 선재를 650 °C에서 24 시간과 50 시간 같은 조건으로 열처리를 하여 주사전자현미경과 EDS 분석을 통하여 계면반응을 조사하였다.

### 3. 결과 및 고찰

초전도체와 기지금속간의 균일한 가공을 위해서는 상호간의 단면적 감소율이 같아야 한다. 이를 위해서는 2 가지 금속의 기계적인 성질과 가공경화성이 비슷해야 할 필요가 있다. 그래서 CuSi 합금에서 가공률 변화에 대해 온도를 300 °C에서 600 °C의 범위에서 1 시간 열처리 하였을 때의 경도 변화를 그림 1에 나타내었다. 여기서 단면적 감소율  $\epsilon$ 는 다음과 같이 정의된다.  $\epsilon = \ln(A_0/A_f)$   $A_0$ 는 초기 선재의 단면적,  $A_f$ 는 가공 후 선재의 단면적으로  $A_0$ 는 압출가공 후의 직경인 15.8 mm를 기준으로 하였다. 대체적으로  $\epsilon$  값이 클수록 경도가 크게 나타나며 300 °C에서의 열처리에서는 가공경화의 회복이 뚜렷하지 않으나 400 °C 이상에서는 급격히 감소하였다. 그리고 가공경화의 회복에 있어 선재의 굵기가 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 직경  $\phi$  2.0 이하인 ( $\epsilon \geq 4.0$ ) 선재들에서는 열처리 전의 경도에 비해 열처리 후의 경도가 급속히 감소함을 보였다. 그리고 직경이  $\phi$  2.02( $\epsilon = 4.11$ )인 단심선재에서의 열처리 온도 변화에 따른 NbTi 필라멘트의 경도변화를 나타내었다. 가공경화의 효과는 NbTi에 비해 CuSi합금에서 높게 나타나 NbTi에서는 170 정도였으나 CuSi에서는 220 정도였다. 그러나 열처리에 의해 CuSi의 회복에 의해 경도가 NbTi에 비해 낮아졌는데 이 현상은 열처리 온도가

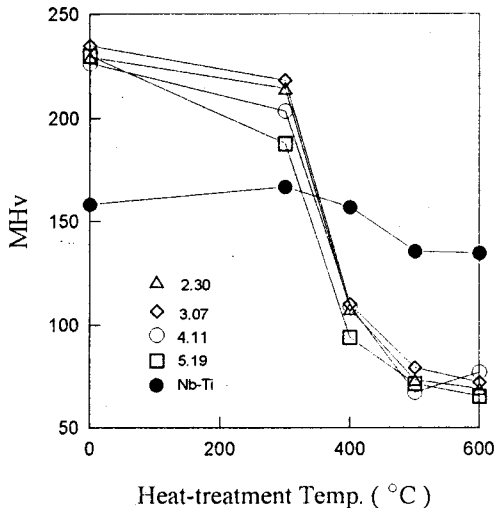


그림 1. CuSi/NbTi 선재의 가공-열처리에 따른 경도

높을수록 그 차이가 커졌다. 그리고 300 °C에서 열처리한 후 NbTi의 경도가 증가한 것은 열처리에 의한 회복 효과 보다는 전위 등의 가공결합에서  $\alpha$ -Ti 상의 석출에 의한 경도 증가라고 추측된다. 기지금속으로 순수 Cu를 사용했을 때의 경도값은 가공 후 150 정도, 열처리 후 70 정도이므로 Cu에 비교한다면 CuSi의 가공경화성이 커지만 비교적 회복이 잘 일어나는 400 °C 부근의 온도에서 열처리를 한다면 적합하리라 여겨진다. 그리고 열처리 시간을 증가시킬 경우 열처리 온도를 더 낮게하여도 회복에 의해 경도 감소가 클 것으로 여긴다.

그림 2는  $\phi$  2.93인 CuSi 봉을 압연하여 두께가 1.0 mm에서 0.2 mm 까지 가공한 시료를 4 단자법으로 냉동기를 이용하여 비저항을 측정된 결과이다. 가공량이 증가한 두께가 얇은 시료에서의 비저항이 높게 나타났는데 이는 가공량의 증가에 따른 내부 결함의 증가로 인해 저항이 증가하는 것을 보여준다. 이 값들은 상용의 Cu-10wt%Ni의 비저항에 비해 약간 높은 값으로 나타났는데 이는 교류손실의 주된 요소 중 한가지인 결합손실을 줄이기 위해서는 기지금속의 저항이 커야하는 조건에 대해 CuSi 합금이 CuNi 합금보다 유리함을 알수 있었다.

그림 3은 기지금속이 각각 Cu와 CuSi 인 초전도선재를 650 °C에서 24 시간 열처리 후의 계면반응을 광학현미경을 이용하여 관찰한 것이다. 기지금속이 Cu인 초전도 필라멘트의 주위로는 Cu와 NbTi의 Ti와 반응하여  $TiCu_4$ 로 알려진 금속간 화합물이 약 10  $\mu$ m 두께로 반응층이 형성되어있음을 보여주었다. 반면에 CuSi 합금에서는 현미경상으로는 관찰하기에 힘든 정도의 반응층이 관찰되었다.

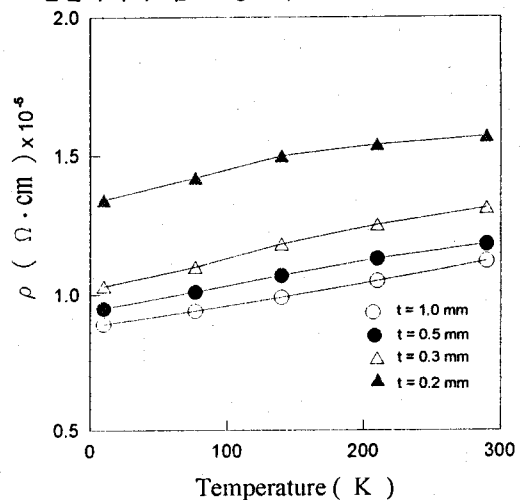


그림 2. CuSi합금의 가공률 변화에 따른 비저항

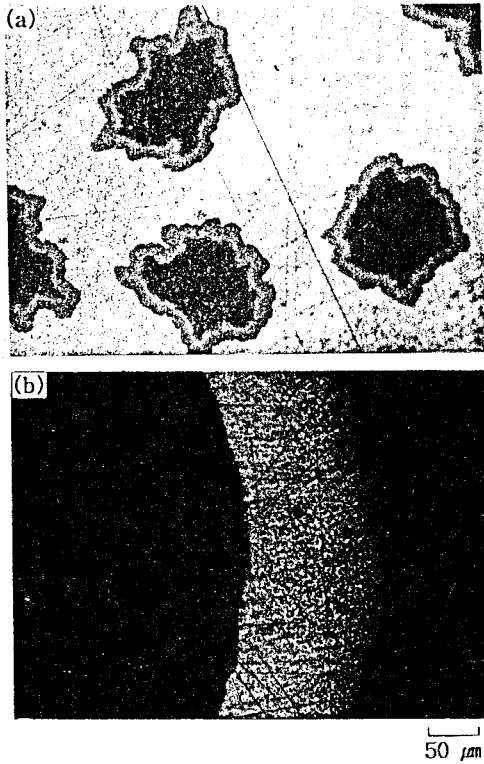


그림 3. 광학현미경으로 관찰한 계면반응  
(a) Cu/NbTi (b) CuSi/NbTi

그래서 계면반응 현상을 세밀히 관찰하기 위해 주사전자현미경의 EDS를 사용하여 650 °C에서 50 시간 열처리한 선제들의 계면에서의 조성 분포를 분석하였으며 이때 기지금속이 Cu 인 경우 Ti-Cu 의 화합물 및 합금층의 두께는 약 16 $\mu$ m 였으며, CuSi 인 경우 Ti-Cu의 합금층의 두께는 약 4  $\mu$ m 였다. 기지금속이 CuSi인 계면에서는 Cu및 Ti의 조성변화가 거리에 따라 일정하게 변하므로 금속간 화합물이라기 보다는 합금층으로 보이며 기지금속이 Cu인 계면에서는 Cu및 Ti의 조성변화에 굴곡이 있어 금속간 화합물 층이 생성하였음을 알수 있었다. 금속간 화합물은 초전도 필라멘트의 세선화 공정에 있어 악영향을 미친다. 즉 선제의 가공 동안 금속간 화합물은 소성변형이 되지 않아 필라멘트의 단선을 유발하여 전류밀도를 감소시킨다. 특히 교류용 선제를 위해서는 필라멘트의 직경이 1  $\mu$ m 이하가 되도록 가공하여야 하므로 금속간 화합물의 생성방지는 아주 중요하다. 그러므로 기지금속으로 CuSi을 사용하는 것은 매우 유리한데 이러한 이유는 Si이 계면으로 확산하여 금속간 화합물의 생성을 억제하는 것으로 생각된다.

그림 4는 NbTi/CuSi 단심선 초전도선제를 신선가

공을 하여 각각 선제의 직경이  $\phi$  2.93과  $\phi$  1.18까지 가공하여 375 °C에서 45 시간 열처리 후 다시 신선하여  $\phi$  0.5에서 375 °C에서 45 시간 열처리한 선제의 전류밀도의 변화를 보여주고 있다. 가공률  $\epsilon$  이 5 이상이 되는  $\phi$  1.18에서 열처리한 선제의 전류밀도 값이 더 높게 나타났는데 이는 초전도체 내부에 가공에 의한 전위셀과 같은 내부결함의 증가로 인해  $\alpha$ -Ti 비초전도상이 미세하게 고루분포한 상태로 석출하여 pinning 효과가 더 높은 것으로 판단된다.

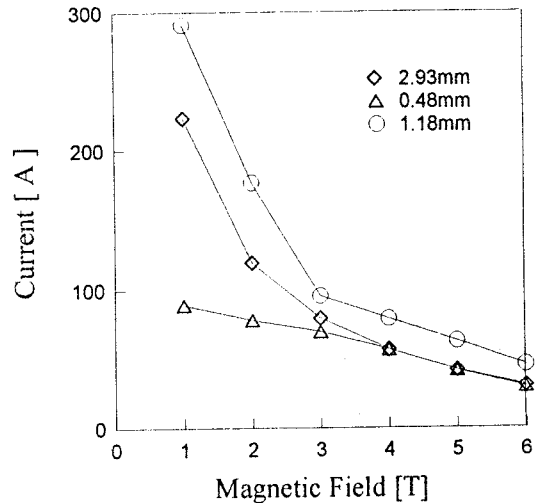


그림 4. 가공-열처리 변화에 따른 CuSi/NbTi 단심선 초전도 선제의 전류밀도

#### 4. 결 론

Cu-2.5wt%Si 합금의 비저항은 기존의 Cu-Ni 합금에 비해 높아 교류용 선제의 기지금속으로 적합하며 가공경화에 의한 경도 증가로 인해 NbTi와 비슷하거나 높은 값을 나타내었다. 그리고 NbTi와 CuSi의 계면반응이 현저히 억제되므로 초전도선제의 세선화에 매우 유리하게 작용할 것임을 알수 있었다. 또한 가공과 열처리의 적합한 조건을 인지할 수 있었다. 따라서 CuSi 합금은 경제적인 면 뿐 아니라 물리적 특성도 우수하므로 CuNi 합금을 대체할 수 있으리라 기대된다.

#### 참고문헌

1. Gregory, E. Kreilick T.S., et al. IEEE Trans Magn (1989)MAG-25 1926-1929.
2. S. Akita, S. Torii, et al. Cryogenics 1993 Vol 33, No 2.