

피로손상을 받은 NbTi 초전도 선재의 RRR거동에 미치는 아닐링 효과

신형섭*, 오상엽**, 하동우***, 오상수***

* 안동대학교 공과대학 기계공학과 **경북대원 ***한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

Annealing effect on RRR Behavior due to Fatigue Damage in NbTi Superconductor Cable

Hyung-Seop Shin*, Sang-Yeob Oh**, Dong-Woo Ha*** and Sang-Soo Oh***

*Department of Mechanical Engineering, Andong National University, **Graduate school, Kyungpook National University *** Applied Superconductivity Lab., KERI

e-mail : hsshin@andong.ac.kr

Abstract - In this study, the fatigue test at room temperature and residual resistivity measurement test at 12K were carried out, respectively, using a 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cable, in order to investigate how the annealing treatment effects on critical properties due to fatigue damage. Through a fatigue test of a 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cables, a conventional S-N curve was obtained even though there existed a possibility of fretting among strands. From the resistivity measurement of a NbTi strand after fatigue tests, it was found that the RRR for annealed cables was 3 times more than that for as-received one, but with increase of the repeated number the RRR decreased which was resulted from the accumulation of damage such as lattice defects dislocation within the Cu stabilizer.

1. 서론

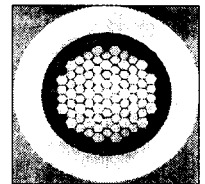
에너지 분야에서 발전기 계자 및 전기자 코일의 초전도화에 의한 고효율, 고성능, 소형화가 가능한 차세대 플랜트의 개발과 관련하여, 여러 초전도 재료중 임계온도(T_c), 임계자장(H_{c2})이 실용화에 적합한 높은 값을 가지며, 제조가 용이하면서 제조법이 확립되어 있고, 또한 실용규모 장치물 제작에 적용되고 있는 대표적인 선재인 발전기용 합금형 NbTi 초전도선재를 열처리한 후 상온에서 피로시험을 실시하여 이 선재의 강도특성, 피로 손상에 따른 초전도 특성의 영향을 조사할 필요가 있다. 그것은 초전도 발전기의 잦은 기동/정지에 따른 로렌츠력 등 반복적인 하중의 부하가 초전도 선재의 임계특성치 열화뿐만 아니라 선재를 구성하고 있는 안정화재의 전기적인 특성에도 열화를 가져오게 되어 마그네트의 안정성

에 큰 영향을 미치게 된다(1).

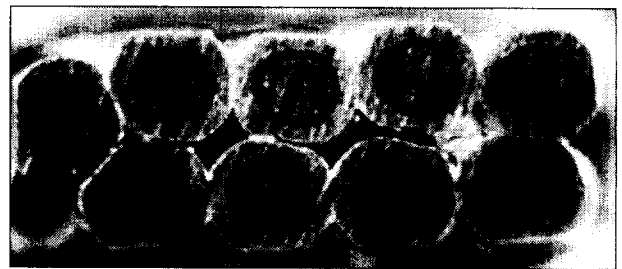
특히 고자장, 고전류밀도하에서 장시간에 걸쳐서 안정한 초전도자석의 설계와 운전을 위해서는, 안정화재로 사용하는 금속의 전기저항과 열전도에 미치는 응력효과의 영향을 파악하는 것이 중요하다. 일반적으로 전기저항과 열전도 사이에는 잘 알려진 Wiedeman-Franz의 관계식이 성립하고, 외부로부터 초전도선재에 응력을 가하면 격자결함에 의한 전기저항이 증가되어 선재 전체의 저항을 크게 함으로서 안정화 특성이 매우 나빠지게 된다.

따라서 본 연구는 초전도 마그네트 설계 및 안정성 향상을 위한 소선 및 대용량 선재의 기계적 특성 평가를 위하여 앞서 보고한 As-received 선재에서 연구 결과 RRR값이 증가하는 거동을 나타내었기 때문(4)에 이를 명확히 하기 위하여 처녀재를 350°C에서 8시간 열처리한 후 피로손상에 따른 초전도선재의 RRR값의 특성을 조사하였다. 이를 위하여 합금계 초전도체인 NbTi와 Cu를 복합화한 선재를 상온에서 피로시험을 실시하여, 선재의 피로특성 및 피로손상에 의한 초전도특성, 특히 RRR값의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법



(a)



(b)

Fig. 1 Cross-sectional view of NbTi superconducting cable.

Table 1 Specifications of superconducting wire.

Cu-Ni/NbTi/Cu composite wire	
<i>Strand</i>	
Diameter	1.0mm
No. of filament	5710
Cu-Ni/NbTi/Cu	1/1/5
<i>Cable</i>	
Type	9 strand compacted cable
Size	4.78 x 1.76mm
Cable pitch	20mm
Critical current	≥2040A at 5T

2.1 시험재료

실험에는 GEC ALSTHOM사에서 발전기용으로 개발 제조된 직경이 1mm인 다심 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재(Cu비=5)를 사용하였다(2). Fig. 1에 이 선재의 단면을 나타내었다.

Fig. 1(a)와 같이 복합선재의 소선에는 직경이 약5 μ m인 NbTi 필라멘트가 5710본 포함되어 있다. 실용 목적의 대용량 케이블을 제작하기 위하여, 9가닥의 소선을 피치 20mm로 twist시킨 후 압축 성형하여 Fig. 1(b)와 같은 평각형으로 제작하였다. 그리고 피로시험전 350 $^{\circ}$ C에서 8시간 열처리를 하였다. 이 열처리 조건은 Cu의 미소조직이 완전히 풀림처리되고 NbTi와 CuNi는 그대로 남아있는 상태가 된다(8).

Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 선재내 소선간 접촉은 비교적 양호하였다. Table 1에는 시험에 사용된 초전도선재의 소선과 케이블의 사양을 나타내고 있다.

2.2 피로시험

초전도선재의 피로시험은, 전기유압식 서보시

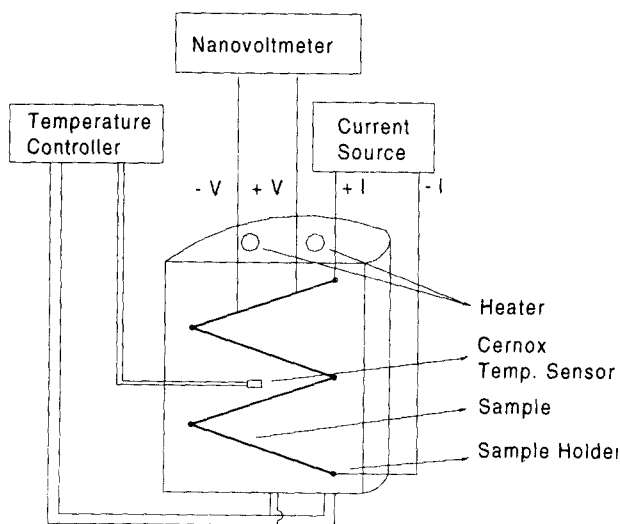


Fig. 2 Schematic illustration of apparatus for RRR measurement.

험기(Instron 8516, 용량 100kN)를 사용하여, 시험편의 척간 간격 60mm, 반복주파수 10Hz, 소선에 작용하는 응력진폭의 최대값(σ_{max})이 200~450MPa 범위이내, 응력비 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})=0.1$ 에서 실시하였다. 시험편의 장착은 유압식 척을 사용하여 800psi의 면압으로 선재부에 보호대 없이 척킹하였다. 소선의 피로시험은 보류시험기의 로드셀 용량이 너무 커서 제어가 곤란하기 때문에 케이블선재 만 피로시험을 실시하였다.

2.3 잔류저항의 측정

Fig. 2는 RRR 측정에 사용된 직선형 시험편 홀더의 개략도를 나타내고 있다. 시험편 홀더는 4.2K에서 열전도도가 100W/m \cdot deg이상을 나타내는 무산소동을 사용하였다. 그 위에 저온 테이프를 감아서 절연시켰다. 시험편의 온도 측정은 시험편 홀더 중앙에 위치한 온도센서(Cernox, Model CX-1050-SD X08 827)를 사용하였고, 그 신호로 온도컨트롤러(DRC- 93CA)를 작동시켜 소정의 온도를 유지하였다(3). Fig. 2에 보인 바와 같이, 시험편의 온도조절을 하기 위해 시험편 홀더에 망간히터선을 감은 구리봉재를 삽입하고 저온용 에폭시로 고정하였다.

잔류저항 측정은 4단자법을 사용하여, Nano-Voltmeter로 전압을 측정하였다. 이때 시험편에 외력이 걸리지 않도록 홀더에 시험편을 장착하였다. 시험편 길이는 36mm, 전압단자간 거리는 25mm이다. 먼저 상온에서 약 0.4~4.8A/mm²의 전류밀도를 갖는 전류 I_1 을 인가하여 발생하는 전압 V_1 을 측정하여 잔류저항(R_m)을 계산하였다.

$$R_1 = \frac{R_m}{[1 + 0.00393(T_m - 20)]} \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 293K에서의 저항(R_1)을 계산하였다. 여기서 T_m 은 측정시의 온도($^{\circ}$ C)를 나타낸다. 한편 임계온도 바로 위의 온도에서 전기저항(R_2)의 측정은 시험편을 액체 헬륨 온도에서 5분 이상 냉각시킨 후, 시험편을 헬륨 액면 위로 들어 올려 0.1~0.6K/min의 범위내에서 시험편 온도를 상승시키면서 전압을 측정하였다. 이때 시험편에 흐르는 전류의 극성을 바꾸어 전압을 측정하여, 그 값을 평균하여 R_2 를 계산하였다.

잔류저항의 측정에 사용된 시험편은 낮은 반복수의 영향을 조사하기 위하여 100사이클, 500사이클 및 1000사이클 반복하중을 가한 시험편과, 높은 반복수에 대해서는 예상 파단수명의 10%, 50%, 80% 및 100%까지 피로시험을 실시한 것을 사용하였다. 본 연구에서는 한국전기연구소의 RRR 측정설비를 사용하였기 때문에 피로시험을 일괄적으로 수행한 후 잔류저항을 측정하였다. 이 때문에, 피로 시험후 상온에서 시험편을 방치함에 따라 예상되는 시효효과 영향은 고려하지 않았다.

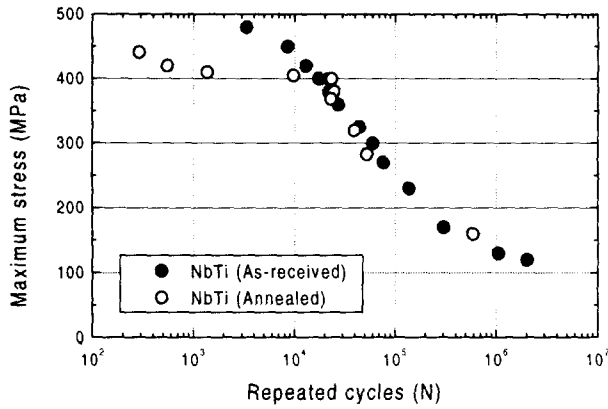


Fig. 3 S-N curve of 9-strand NbTi cable

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로시험

Fig. 3에 보인 바와 같이, 상온에서 아닐링처리한 NbTi 초전도선재(●)를 사용하여 피로시험한 결과 얻어진 S-N선도를 구하였다. 아닐링처리를 하지 않은 선재(○)의 경우와는 달리(4), 약 400MPa 응력레벨 이상에서는 피로손상보다는 연성 파단이 일어났다. 그리고, 2×10^4 사이클과 10^6 사이클 사이에서는 응력진폭의 최대값이 낮아짐에 따라 파단까지 반복수는 증가하였지만 열처리에 따른 영향이 나타나지 않고 거의 동일한 거동을 나타내었다. 선재의 S-N선도는 전체적으로 보아 선재의 항복응력에 대응하는 약 350MPa를 경계로 하여 꺾여져 있다(4,6). 피로시험에 사용한 선재는 9본 소선을 연선처리한 후 압축 성형한 것이라는 점을 고려하면, 피로하중 부하시 소선간 다소의 접촉이 예상되지만 비교적 안정된 S-N선도를 얻을 수 있었다(6).

NbTi 초전도선재의 피로파괴는 결국 안정화재인 Cu의 피로손상에 기인하였다고 생각된다. 특히 케이블선재의 경우, 반복 하중의 작용시 소선간 접촉부에서 마찰에 따른 손상이 발생하고, 특히 소선의 방향이 급격히 변화하는 선재의 모서리진 부분에 손상이 집중될 것이 예상된다. 이것이 선재의 피로파괴를 초래하였다고 생각된다(5).

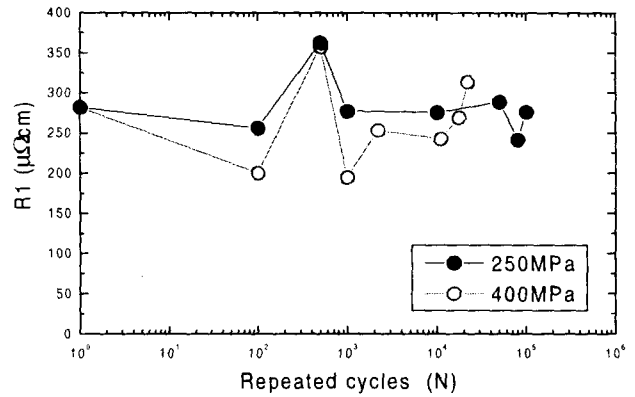
3.2 잔류저항의 거동

선재의 구성 요소중 안정화재인 Cu에서의 잔류저항보다는 CuNi와 NbTi에서의 잔류저항이 적어도 10^3 배 이상 크기 때문에, 선재 전체의 저항에 미치는 안정화재의 영향은 거의 없을 것이다(6). 결과적으로 비저항은 단면적에서 Cu의 단면적 분율을 사용하여 계산된다. 응력비 $R = 0.1$ 에서 피로시험한 NbTi 복합선재중 두 응력진폭 레벨(250MPa, 400MPa)을 선정하여 반복수에 따른 잔류저항의 변화를 측정하여 Fig. 4에

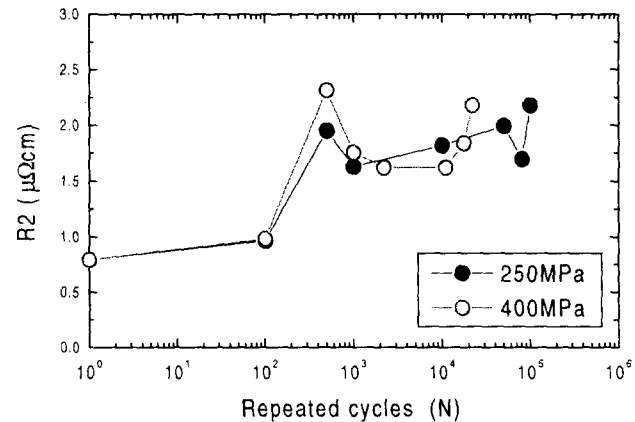
나타내었다. (a)는 실온, (b)는 임계온도보다 다소 높은 12K에서 측정된 값을 나타낸다.

Fig. 4(a)는 실온에서 측정된 잔류저항, R1을 반복수에 따라 나타낸 것이다. 각 데이터 점들은 개별로 시험한 시험편의 9본 소선 중 1본의 결과를 나타낸다. 먼저 피로하중을 가하지 않은 선재(이후 처녀재라 함)는 실온에서 약 $280 \mu\Omega\text{cm}$ 의 전기저항을 나타내며 열처리하지 않은 경우의 $260 \mu\Omega\text{cm}$ (4)와 거의 같았다. 반복수 100사이클에서 저항은 250MPa인 경우 처녀재보다 다소 낮은 저항률을 나타내며, 이후 반복수가 증가함에 따라 도중에 다소의 변동을 보이거나 거의 같은 정도의 저항값을 나타내었다. 그리고 400 MPa인 경우, 250MPa인 경우보다 반복수가 증가함에 따라 더 낮은 저항값을 보이다가 파단 직전에 급격히 증가하는 거동을 볼 수 있다. 따라서 실온에서 피로손상을 받은 열처리된 선재의 잔류저항의 변화에는 응력진폭의 레벨에 따른 명확한 차이는 나타나지 않았지만 응력진폭 레벨이 클수록 저항이 다소 낮아짐을 알 수 있다. 또한 열처리하지 않는 경우(4)와 비슷한 거동을 보였다.

Fig. 4(b)는 12K에서 측정된 잔류저항, R2를 반복수에 따라 나타낸 것이다. 여기서 처녀재



(a) at RT



(b) at 12K

Fig. 4 Variation of residual resistivity with repeated cycles

는 12K에서 약 $0.8\mu\Omega\text{cm}$ 의 저항을 나타내며, 열처리하지 않은 경우의 $2.4\mu\Omega\text{cm}$ (4)의 1/3정도로 낮게 나타났다. 열처리하지 않은 경우는 케이블 가공시의 가공경화에 의한 높은 격자결함 및 전위 밀도로 인해 높은 저항치를 나타내었다.

반복수 100사이클에서 저항은 처녀재와 거의 같거나 다소 높은 저항을 나타내었고, 이후 반복수가 증가함에 따라 도중에 다소의 변동이 있거나 상당한 증가를 나타내고 있다. 이것은 12K에서는 피로 반복수의 증가에 따라 격자결함, 손상 누적에 따른 저항의 증가로, 또한 응력레벨이 높은 400MPa인 경우 파단 직전에 급격히 증가하여 실온의 경우와 비슷한 경향을 보였다. 그리고 파단시의 잔류저항은 처녀재에 비하여 250MPa인 경우 약 75%, 400MPa인 경우 약 63%정도 증가하였다. 그러나 여기서도 응력진폭에 따른 분명한 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 5는 잔류저항비($RRR = R_{293K}/R_{12K}$)를 반복수에 따라 나타낸 것이다. Cu-Ni/NbTi/Cu 선재에서 처녀재의 RRR값은 356이다. 반복수 100사이클에서 RRR값은 처녀재보다 상당히 낮은 값을 나타내며, 그 이후 반복수가 증가함에 따라 RRR값은 거의 선형적으로 감소하는 거동을 나타내었다. 즉 응력진폭의 최대치가 항복응력을 넘는 레벨인 400MPa에서는 RRR값은 1,000사이클에서 약 100까지 감소하였으나, 항복응력 이하인 250MPa에서는 175까지 감소하여 높은 응력 레벨에서 보다 현저한 저하를 나타내었다. 그 이후에는 거의 포화된 값을 나타내다가 파단 직전에 다시 저하되었다.

이러한 결과는, 비교적 높은 변형률진폭($\Delta\epsilon$)에서 반복수의 증가에 따라서 급격한 RRR값의 저하를 보인 Ekin 등의 결과(1)와 비슷한 거동을 나타내었다.

NbTi 선재의 피로손상에 따른 RRR특성 거동 및 그에 미치는 응력진폭의 영향으로서, 피로손상에 의한 변형에 따른 전위 및 결함의 증가로 인해 RRR값은 상당히 감소하였다. 그리고 케이블 피로시험의 경우, 반복수가 증가하면 소선의 경우와는 달리, 반복변형에 따른 손상의 누적뿐만 아니라 피로시 소선간 접촉부에서 상대 미끄럼 마

찰 및 변위에 따른 발열이 부가적으로 발생하게 된다(4,5). 한편 지금까지 반복응력의 작용에 따른 Cu에 있어서 저항변화에 대한 많은 연구결과가 보고되고 있으나 그들 일부는 서로 상반되는 결과를 포함하는 경우도 많다. K. Katagiri 등(8,9)의 결과에 따르면, 4.2K에서, 순수한 Cu의 저항은 10^4 사이클까지는 포화가 일어나지 않는 반면, 순도가 다소 떨어지는 Cu(OFHC)의 저항은 피로시험의 초기단계에 포화되어진다. 상온에서는 저항의 포화가 피로의 초기단계인 약 5000사이클에서 일어났다.

4. 결론

1) 열처리된 Cu-Ni/NbTi/Cu 초전도선재를 상온에서 피로시험을 실시하여 S-N선도를 작성하였다. 이 선도에서 소선의 항복응력을 경계로 기울기에 변화가 있었다. 약 2×10^4 사이클까지는 연성 파단이며, 그 이후에는 피로손상에 의한 파단이 일어났다. 그러나 S-N거동에 열처리 효과는 나타나지 않았다.

2) 피로시험후 상온에서의 잔류저항(R1)은 거의 변화가 없으나, 12K(R2)인 경우, 열처리된 선재는 열처리하지 않은 선재의 약 1/3정도로 낮은 저항값을 나타내었고, 반복수와 더불어 증가하였다.

3) 열처리된 처녀재의 RRR값은 열처리하지 않은 선재에 비해 약 3배정도 높았으며, 열처리하지 않은 선재에 대한 결과와는 반대로 피로 반복수가 증가함에 따라 거의 선형적인 감소를 나타내었다. 또한 파단시 최대 65%까지 감소하였고 그 정도는 응력진폭의 레벨이 큰 경우가 낮은 값을 나타내었다.

본 연구는 "차세대 고효율 발전플랜트 기술개발" 과제의 일환으로 한국전기연구소의 지원에 의해 수행되었다. 아울러 97년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관(과제번호: 97-052)의 연구의 계속으로 수행되었다. 이에 감사를 드립니다.

(참고 문헌)

(1) J. W. Ekin, Fatigue and stress effects in NbTi and Nb₃Sn multifilamentary superconductors, in : "Advances in Cryogenic Engineering", Vol. 24, K. D. Timmerhaus, R. P. Reed and A. F. Clark, eds., Plenum Press, New York, pp. 306-316 (1978).

(2) C. E. Bruzek, P. Mocaer, et al, Recent progress of NbTi 46.5wt% superconductor strands at GEC ALSTHOM, private communication (1997).

(3) 김상철, 오상수, 하동우 등, 초전도선재의 잔류저항비 측정을 위한 장치제작 및 특성평가,

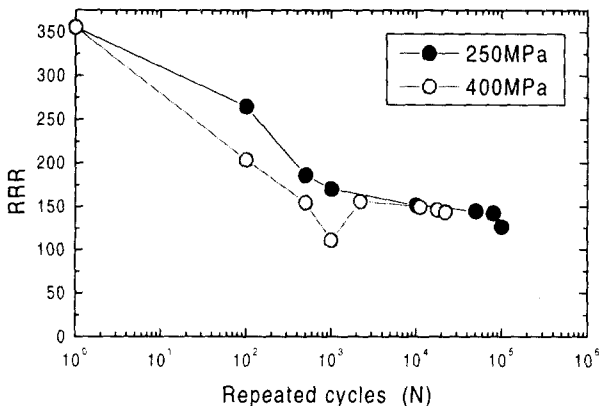


Fig. 5 RRR curve of fatigued NbTi specimens

대한기계학회 하계학술대회논문집 D, pp.1300-1302 (1998).

(4) 신형섭, 배영준, 하동우, 오상수, NbTi 초전도 케이블의 피로손상에 따른 RRR의 거동, 제1회 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, pp.30-33, 1999.

(5) 신형섭, 오상수, 초전도 마그네트용 실용 초전도 케이블의 기계적 특성 및 피로손상 평가에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 A, (2000) 인쇄중.

(6) N. Iwasaki, M. Hojo et al, Fatigue fracture mechanisms and superconducting property of Nb-Ti superconducting composite wire, Proc. of JSME MMD No.96-1, pp.677-678 (1996).

(7) E. W. Johnson and H. H. Johnson, Imperfection density of fatigued and annealed copper via electrical resistivity measurements, Trans. Met. Soc. AIME, Vol. 233, pp.1333-1340 (1965).

(8) K. Katagiri, K. Koyanagi, M. Fukumoto, T. Nishiura, T. Okada and M. Nagata, Degradation of copper stabilizer in a superconducting wire induced by cyclic stressing at cryogenic temperature, in : Advanced in Cryogenic Eng., Vol.30, Plenum Press, New York, pp.461-468 (1984).

(9) K.Katagiri, S. Nishijima et al, Mechanical properties of superconducting wire for 0.5MJ pulsed magnet at cryogenic temperatures, Proc. of the Inter. Cryogenic Material Conf. (ICMC), Butterworth kobe, Japan, pp.191-194 (1982).