

## NbTi 초전도 케이블의 피로손상에 따른 RRR의 거동

신형섭\*, 배영준\*, 하동우\*\*, 오상수\*\*

\* 안동대학교 공과대학 기계공학과 \*\* 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

### RRR Behavior due to Fatigue Damage in a NbTi Superconductor Cable

Hyung-Seop Shin\*, Young-Zun Bae\*, Dong-Woo Ha\*\* and Sang-Soo Oh\*\*

\* Department of Mechanical Engineering, Andong National University

\*\* Applied Superconductivity Lab., KERI

e-mail : hsshin@anu.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 fatigue damage effects on critical properties. Through the fatigue test of a 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cable, 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 with increase of the repeated number the RRR increased slightly, and the trend became significant with increase in maximum value of the applied stress amplitude.

## 1. 서론

발전기용 NbTi 초전도케이블에 대하여 상온에서 피로시험을 실시하여 케이블선재의 강도특성, 피로손상에 따른 초전도특성(주로 잔류저항)의 영향을 조사하는 것은 중요하다. 그것은 초전도 발전기의 잦은 기동/정지에 따른 로렌츠력 등 반복적인 하중의 부하가 초전도 케이블재의 임계특성치 열화뿐만 아니라 선재를 구성하고 있는 안정화재의 전기적인 특성에도 열화를 가져오게 되어 마그네트의 안정성에 영향을 미치게 되기 때문이다(1).

특히 고자장, 고전류밀도하에서 장시간에 걸쳐서 안정한 초전도자석의 설계와 운전을 위해서는, 안정화재로 사용하는 금속의 전기저항과 열전도에 미치는 응력효과의 영향을 알아두는 것이 중요하다. 일반적으로 전기저항과 열전도사이에는 잘 알려진 Wiedeman-Franz의 관계식이 성립하고, 초전도선재에 외부에서 응력이 가해지면 격자결함에 의한 전기저항이 증가하여 결국은 선재전체의 저항을 크게 하여 안정화 특성이 크게 나빠지게 된다(2).

따라서 본 연구에서는 발전기용 선재인 NbTi 케이블의 기계적 강도, 미세조직 및 초전도 특성과의

상관관계를 분석하여 초전도마그네트 설계 및 안정성 향상을 위한 소선 및 대용량 케이블의 기계적 특성 평가를 위한 연구의 일환으로 피로손상에 따른 초전도선재의 RRR의 거동을 조사하였다. 이를 위하여 합금계 초전도체인 NbTi와 동을 복합화한 케이블선재를 상온에서 피로시험을 실시하여, 선재의 피로특성 및 피로손상에 따르는 초전도특성, 특히 RRR의 거동을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험재

실험에 사용한 초전도케이블은 GEC ALSTHOM사가 발전기용으로 개발 제작한 직경이 1mm인 다심 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재(동비:5)이다(3). 선재의 단면을 Fig. 1에 나타내었다. 이 복합선재의 소선에는 직경이 약5 $\mu$ m인 NbTi 필라멘트가 5710본 포함되어 있다. 실용 목적의 대용량 케이블을 제작하기 위하여, 9가닥의 소선을 피치 20mm로 꼰 후 압축 성형하여 평각형으로 제작하였다.



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

그림에서 볼 수 있듯이 케이블내 소선간 접촉은 비교적 양호하고 간극의 존재 또한 크게 눈에 띄지 않는다. Table 1에 공시재로 사용한 초전도선재의 소선과 케이블의 사양을 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of superconducting wire.

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

## 2.2 피로시험

초전도케이블의 피로시험은, 시험편의 척간 간격을 60mm로 하여 전기유압식 서보시험기(Instron 8516, 용량 100kN)를 사용하여, 반복주파수 10Hz, 응력비 R(최소응력/최대응력)=0.1, 소선에 작용하는 응력진폭의 최대값( $\sigma_{max}$ )이 120-480MPa 범위에서 실시하였다. 시험편의 척킹시는 유압식 척을 사용하였고, 800psi의 면압으로 선재부에 보호대 없이 척킹하였다. 소선의 피로시험은 보유시험기의 로더셀 용량이 큰 관계로 제어가 곤란하여 케이블선재 만 피로 시험을 실시하였다.

## 2.3 잔류저항의 측정

Fig. 2는 RRR측정에 사용된 직선형 시험편 홀더의 개략도를 나타내고 있다. 시험편홀더로는 4.2K에서 열전도도가 100W/m·deg이상을 나타내는 무산

소동을 사용하였다. 그 위에 저온 테이프를 감아서 절연을 하였다. 시험편의 온도조절을 위해 그림에 보인 바와 같이 시험편홀더에 망간히터선을 감은 구리봉재를 삽입하고 저온용 에폭시로 고정하였다. 시험편의 온도 측정은 시험편홀더 중앙에 위치한 온도센서(Cernox, Model CX-1050-SD X08827)를 사용하였고, 그 신호로 온도컨트롤러(DRC-93CA)를 작동시켜 소정의 온도를 유지할 수 있었다(4).

잔류저항의 측정에는 4단자법이 사용되었고 Nano-Voltmeter로 전압을 측정하였다. 이때 시험편에는 외력이 걸리지 않도록 홀더에 장착하였다. 시험편 길이는 36mm, 전압단자간 거리는 25mm이다. 먼저 상온에서 약 0.4-4.8A/mm<sup>2</sup>의 전류밀도를 가지는 전류  $I_1$ 을 인가하여 발생하는 전압  $V_1$ 을 측정하여 잔류저항( $R_m$ )을 계산하였다.  $R_1 = R_m / [1 + 0.00393(T_m - 20)]$ 을 사용하여 293K에서의 저항( $R_1$ )을 계산하였다. 여기서  $T_m$ 은 측정시의 온도(°C)를 나타낸다. 한편 임계 온도 바로 위의 온도에서 전기저항( $R_2$ ) 측정은 시험편을 액체 헬륨온도에서 5분 이상 냉각시킨 다음 시험편을 헬륨액면위로 들어 올려 0.1-0.6 K/min의 범위에서 시험편 온도를 상승시키면서 전압을 측정하였다. 이때 시험편에 흘리는 전류의 극성을 바꾸어 전압을 측정하고, 그 값을 평균하여  $R_2$ 를 계산하였다.

잔류저항의 측정에 사용된 시험편은 세 개의 응력진폭을 선정하여, 낮은 반복수에서 영향을 보기 위해 100cycles, 500cycles 및 1000cycles 반복하중을 가한 시험편과, 높은 반복수의 영향을 조사하기 위하여 파단예상수명의 10%, 50%, 80%, 100%에서 피로 시험을 실시한 것을 준비하였다. 본 연구에서는 한국 전기연구소의 RRR측정설비를 사용하는 관계로 피로 시험을 일괄적으로 수행한 후 잔류저항을 측정하였다. 이 때문에, 피로시험후 상온에서 시험편을 방치함에 따라 예상되는 시효(annealing) 효과의 영향은 고려하지 않았다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 피로시험

NbTi 초전도케이블을 사용한 상온에서 피로시험 결과, Fig. 3에 보인 바와 같이 S-N선도를 구할 수 있었다. 반복수가 10<sup>3</sup>cycles까지는 거의 피로손상에 따른 효과가 나타나지 않았다. 5x10<sup>3</sup>cycles와 10<sup>6</sup>cycles사이에서는 응력진폭의 최대값이 낮아짐에 따라서 파단까지 반복수는 증가하였다. 선재의 S-N선도는 전체적으로 보아 선재의 항복응력에 대응하는 330MPa을 경계로 하여 꺾여져 있다. 또한 반복수가 5x10<sup>6</sup>cycles를 지나면서 거의 피로한도에 가까운 거동을 나타내고 있다. 피로시험에 사용한 케이블이 9분 소선을 연선처리한 후 압축 성형한 것이라는 점을 고려하면, 피로하중 부하시 소선간 접촉의 존재에도 불구하고 비교적 안정된 S-N선도를 얻을 수 있었다(5,6).

NbTi 초전도복합선재의 피로파괴는 결국 안정화재인 Cu의 손상에 기인하였다고 생각된다. 특히 케이블선재의 경우, 반복 하중의 작용시 소선간 접촉부

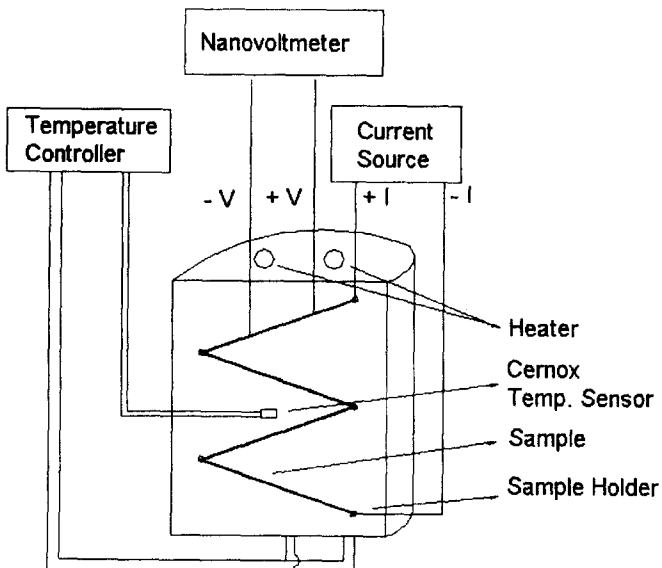


Fig. 2 Schematic illustration of apparatus for RRR measurement.

에서 마찰에 따른 손상이 발생하고, 특히 소선방향이 급격히 변화하는 케이블의 모서리 부분에 손상이 집중되어, 선재의 피로파단을 초래하였다고 생각된다. 이것은 피로파단후 파면 관찰을 통해서도 확인되었고, 파면의 대부분이 단부에 위치하였다.

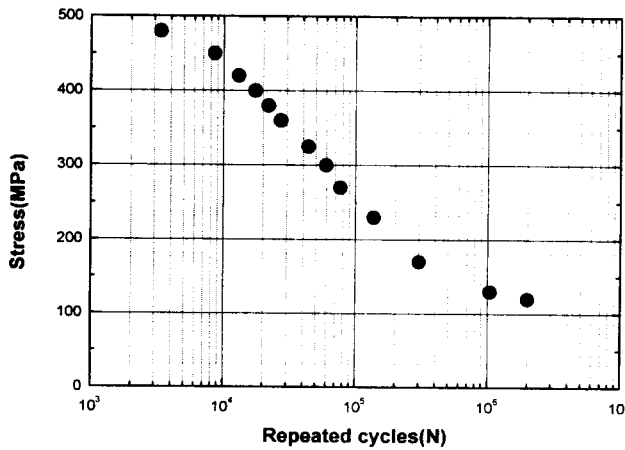


Fig. 3 S-N curve of 9-strand NbTi cable

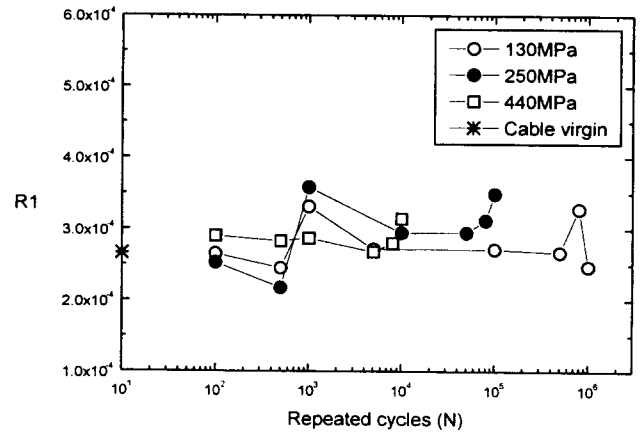
### 3.2 잔류저항의 거동

선재의 구성요소인 CuNi와 NbTi에서의 잔류저항이 안정화재인 등에 있어서 잔류저항보다는 적어도 10<sup>3</sup>배 이상 크기 때문에, 선재 전체의 저항에 미치는 그들의 공헌은 미미하다고 하겠다(6).

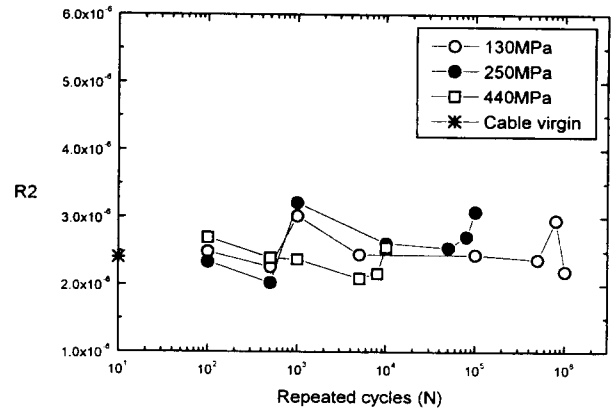
R=0.1에서 피로시험한 NbTi복합선재중 세 개의 응력진폭 레벨, 130MPa, 250MPa 그리고 4을 선정하여 반복수에 따른 잔류저항의 변화를 측정하여 Fig. 4에 나타내고 있다. (a)는 RT, (b)는 임계온도보다 다소 높은 12K에서 측정한 값을 나타낸다.

Fig. 4 (a)는 실온에서 측정한 잔류저항, R1을 반복수에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 각 데이터 점들은 별개로 시험한 케이블 시험편에서 9본 소선 중 1본의 결과를 나타낸다. 먼저 피로하중을 가하지 않은 선재(이후 처녀재라 함)는 실온에서 약 2.6x10<sup>-4</sup> Ωcm의 전기저항을 나타내고 있다. 반복수100cycles에서 저항은 처녀재와 거의 같거나(130MPa와 250MPa의 경우) 다소 높은 저항을 나타내었다(440MPa의 경우). 이후 반복수가 증가함에 따라 중도에 다소의 변동을 보이거나 거의 같은 정도의 저항값을 나타내다가 파단 직전에 급격히 증가하는 거동을 볼 수 있다. 따라서 실온에서 피로손상을 받은 선재의 잔류저항 변화 및 저항값에 미치는 응력진폭의 레벨에 따른 영향은 명확한 차를 나타내지 않았다.

Fig. 4 (b)는 12K에서 측정한 잔류저항 R2를 반복수에 대하여 나타낸 것이다. 먼저 처녀재는 12K에서 약 2.4x10<sup>-6</sup> Ωcm의 전기저항을 나타내고 있다. 반복수 100cycles에서 저항은 처녀재와 거의 같거나 (250MPa과 130MPa의 경우) 다소 높은 저항을 나타내었고(440MPa의 경우), 이후 반복수가 증가함에 따라 중도 다소의 변동을 나타내나 거의 같은 정도의



(a) at RT



(b) at 12K

Fig. 4 Variation of residual resistivity with repeated cycles.

값을 가지다가 파단 직전에는 급격히 증가하여 실온의 경우와 유사한 거동을 나타내었다. 다만 응력진폭의 최대값이 440MPa인 경우, 응력진폭이 낮은 경우보다 반복수가 증가함에 따라 잔류저항이 다소 저하하는 거동을 나타내, RRR에 그 영향이 예상된다. 이 온도에서도 응력진폭에 따른 분명한 차가 나타나지 않았다.

Fig. 5는 잔류저항비(RRR=R<sub>293K</sub>/R<sub>12K</sub>)를 반복수에 대하여 나타낸 것이다. Cu-Ni /NbTi/Cu선재에서 처녀재의 RRR값은 111이다. 반복수 100cycles에서 RRR은 처녀재보다 다소 낮은 값을 나타내나 그 정도는 미미하다. 그 이후 반복수가 증가함에 따라 RRR은 서서히 증가하는 거동을 나타내었고, 그 정도는 응력진폭에 따라서 차이를 나타내었다. 즉 응력진폭의 최대치가 440MPa으로 항복응력을 넘는 응력레벨에서는 파단시까지 RRR은 약 18%정도 증가하였다. 그러나 250MPa과 130MPa에서는 파단까지의 보다 큰 반복수에도 불구하고 약 5%와 1.5%의 증가

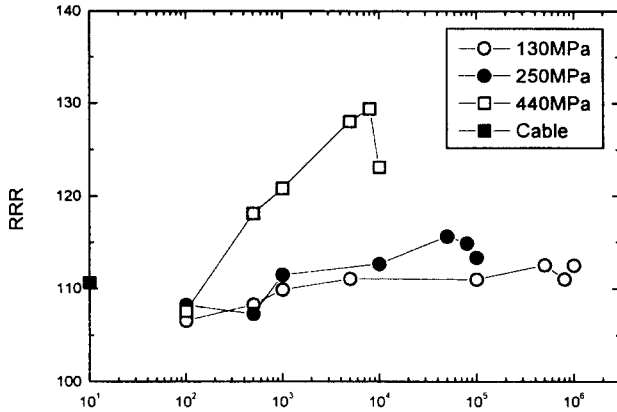


Fig. 5 RRR curve of fatigued NbTi specimens.

를 나타내 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

이러한 결과는, 비교적 높은 변형률진폭( $\Delta \epsilon$ )에서 반복수의 증가에 따라서 급격한 RRR의 저하를 보인 Ekin 등의 결과(1)와는 다른 거동이나, 낮은 변형률진폭 역에서는 거의 RRR의 저하가 일어나지 않았다는 결과(1)와는 유사한 거동임을 알 수 있다.

NbTi선재 케이블의 피로손상에 따른 RRR거동 및 그에 미치는 응력진폭의 영향은 다음과 같이 설명할 수 있다. 피로초기는 변형에 따른 전위 및 결함의 증가로 인해 RRR은 다소 감소를 나타내었다. 그러나 케이블선재의 피로시험의 경우, 반복수가 증가하면 소선의 경우와는 달리, 반복변형에 따른 손상의 누적뿐만 아니라 피로시 소선간 접촉부에서 상대 미끄럼 마찰 및 변위에 따른 발열이 부가적으로 발생하게 된다. 케이블 시험편에서의 발열은 소선의 경우보다 훨씬 크게 되고, 이러한 발열이 선재의 안정화 등에 발생한 피로손상의 회복(아닐링)을 가져왔기 때문에 처녀재와 같거나 혹은 응력진폭 레벨이 높은 경우는 오히려 처녀재보다 높은 RRR을 가져왔다고 생각된다. 피로시험시 케이블에서 생기는 상대 변위량은 응력진폭에 따라 증가하였다(7). 따라서 높은 응력진폭의 경우 보다 큰 발열을 가져오리라 예상된다. 이에 대해서는 온도측정등을 통한 확인이 필요하다.

한편 반복응력의 작용에 따른 동에서 있어서 저항변화에 관하여, 지금까지 많은 결과가 보고되고 있고, 그들 일부는 서로 모순적인 내용을 포함하는 경우도 많다. 상온에서는 저항의 포화가 피로의 초기단계(약 5000사이클)에서 일어난다(8). Johnson등의 결과에 따르면(8), 4.2K에서, 순수한 동의 저항은 10<sup>4</sup>사이클까지는 포화가 일어나지않는 반면, 순도가 다소 떨어지는 동(OFHC)의 저항은 피로시험의 초기단계에 포화되어진다.

#### 4. 결론

1) 실온에서 Cu-Ni/ NbTi/Cu복합 케이블에 피로 시험을 실시하여 S-N선도를 작성하였다. S-N선도의 기울기는 소선의 항복응력을 경계로 변화가 존재하였다.

2) 피로시험후 잔류저하의 측정 결과, 응력진폭 레벨에 관계없이 잔류저항은 피로반복수의 증가에도 불구하고 거의 일정한 값을 나타내나, 파단 직전에는 저항의 급격한 증가를 나타내었다.

3) 케이블재의 RRR값은 피로 초기에는 다소 저하하였지만, 반복수가 증가함에 증가를 나타내었다. 그 정도는 응력진폭의 레벨에 따라 차를 나타내었다. 440MP에서는 파단시 약 18%의 RRR증가를 가져왔다.

#### 감사

본 연구중 일부는 97년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관 (과제번호: 97-052)으로 수행되었기에 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- (1) J. W. Ekin, Fatigue and stress effects in NbTi and Nb<sub>3</sub>Sn 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) 福本將彦, 超傳導線材에 있어서 應力/變形率 效果와 安定性, 大阪大學 博士學位論文 (1986).
- (3) C. E. Bruzek, P. Mocaer, et al, Recent progress of NbTi 46.5 Wt% superconductor strands at GEC ALSTHOM, (1997) private communication.
- (4) 김상철, 오상수, 하동우 등, 초전도 선재의 잔류저항비 측정을 위한 장치 제작 및 특성 평가, 대한전기학회 하계학술대회 논문집D, pp. 1300-1302, (1998).
- (5) N. Iwasaki, M. Hojo et al, Fatigue fracture mechanisms and superconducting property of Nb-Ti superconducting composite wire, Proc. of JSME MMD 96-1 (1996) pp. 677-678.
- (6) K. Kamata et al, Construction of high-field uniaxial-strain-effect and transverse-stress-effect measurement system, Proc. 11th Int. Conf. Magnet Tech.(MT-11), Tsukuba (1989) pp.1231-1236.
- (7) 신형섭, 오상수, 초전도 마그네트용 실용 초전도 케이블의 기계적 특성 및 피로손상 평가에 관한 연구, 대한기계학회 1998 춘계학술대회논문집 A, pp. 208-213 (1998).
- (8) 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).