

## 피로손상을 받은 NbTi 초전도 선재의 RRR거동

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

신형섭\*, 배영준\*\*, 하동우\*\*\*, 오상수\*\*\*

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

**Abstract** : In order to investigate the effect of fatigue damage on the properties of RRR, in this study, fatigue tests at room temperature and residual resistivity measurement tests at 12K were carried out using annealed 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cables. Through fatigue tests of NbTi composite cables, a conventional S-N curve could be obtained even though there existed a possibility of fretting among strands. From the resistivity measurement of a NbTi strand after fatigue test, it was found that the RRR of virgin strand for annealed cables was 3 times more than that for as-received one. With increasing of fatigue cycles at a stress amplitude level, the RRR decreased, which was resulted from the accumulation of damage such as lattice defects and dislocation within the Cu stabilizer.

**Key Words** : NbTi cable, annealing, fatigue strength, residual resistance, RRR

## 1. 서 론

초전도기술을 응용한 에너지 기기 분야에서, 발전기 제자 및 전기자 코일의 초전도화에 의한 고효율, 고성능, 소형화가 가능한 차세대 플랜트의 개발이 진행되고 있다. 이와 관련하여, 초전도 발전기용 초전도 선재에는 임계온도( $T_c$ ), 임계자장( $H_{c2}$ )이 실용화에 적합한 높은 값을 가지며, 실용규모 장적물 제작이 용이하면서 제조법이 확립되어 있는 합금형 NbTi가 적용되고 있다. 초전도 발전기의 잦은 기동/정지에 따른 로렌츠력 등 하중의 반복적인 부하는 초전도 선재의 임계 특성치의 열화뿐만 아니라 선재를 구성하고 있는 안정화재의 전기적인 특성에도 열화를 가져오게 되어, 마그네트의 안정성에 큰 영향을 미치게 된다[1]. 따라서 발전기용 초전도선재인 NbTi선재의 피로 강도특성의 파악뿐만 아니라 피로 손상에 따른 초전도 특성의 거동을 조사할 필요가 있다[2].

특히 고자장, 고전류밀도하에서 장시간에 걸쳐서 안정한 초전도자석의 설계와 운전 을 위해서는, 안정화재

의 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 증가하여 선재 전체의 저항을 크게 함으로서 안정화 특성이 매우 나빠지게 된다. 그간 발전기용 NbTi선재의 입수재에 대하여 피로시험을 실시하여, 피로손상에 따른 잔류저항의 거동을 조사하였다[3]. 그 결과, 초기 잔류저항비(Residual Resistivity Ratio; RRR)값은 상당히 낮은 값을 나타내었고, 피로 반복수가 증가함에 따라 증가하는 거동을 나타내었다. 이것은 피로하중의 부하가 선재의 안정화재 부분에는 오히려 가공경화의 완화를 초래하였고 이에 따라 RRR이 증가하였다고 생각되어진다.

따라서 본 연구는 초전도 마그네트 설계 및 안정성 향상을 위한 소선 및 대용량 선재의 기계적 특성 평가의 일환으로, 아닐링 처리한(annealed) NbTi 초전도 케이블 선재를 사용하여 상온에서 피로시험을 실시하였고, 피로강도 특성과 피로손상에 따른 초전도선재의 잔류저항 및 잔류저항비(RRR)의 거동을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 시험재료

피로시험에는 GEC ALSTHOM사가 발전기용으로 개발 제조한 직경이 1mm인 소선을 꼬아서 만든 다심 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재(동비=5)를 사용하였다[4]. Fig. 1에 선재의 단면을 나타내었다.

Fig. 1(a)는 복합선재를 구성하는 소선의 단면을 나타내고 있다. 단면에는 직경이 약 5  $\mu$ m인 NbTi 필라멘트가 5710본 포함되어 있다. 실용 목적의 대용량 케이블은 9본 소선을 피치 20mm로 비튼(twisting) 후 압축 성형하여 Fig. 1(b)와 같은 평각형으로 제작하였다. 선재내 소선간 접촉은 Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 비교적 양호하였다.

피로시험에는 350  $^{\circ}$ C에서 8시간 아닐링 처리한 선재를 사용하였다. 이 열처리 조건은 선재를 구성하고 있는 Cu의 미소조직은 완전히 풀림 처리되고 NbTi와 CuNi는 그대로 남아있는 상태가 된다[5].

Table 1에는 시험에 사용된 초전도선재의 소선과 케이블의 사양을 나타내고 있다.

### 2.2. 피로시험

초전도선재의 피로시험은, 전기유압식 서보시험기(Instron 8516, 용량 100 kN)를 사용하여, 시험편의 척간 간격 60mm, 반복주파수 10 Hz, 소선에 작용하는 응력진폭의 최대값( $\sigma_{max}$ )이 120~480 MPa 범위, 응력비  $R(= \sigma_{min}/\sigma_{max})=0.1$ 에서 실시하였다.

\* 정 회 원 : 안동대 기계공학부

\*\* 비 회 원 : 안동대 대학원 기계공학과 석사과정

\*\*\* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

원고접수 : 2001년 04월 24일

심사완료 : 2001년 05월 24일

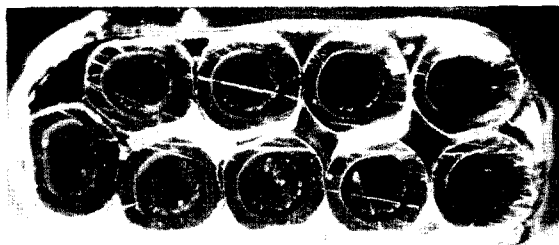
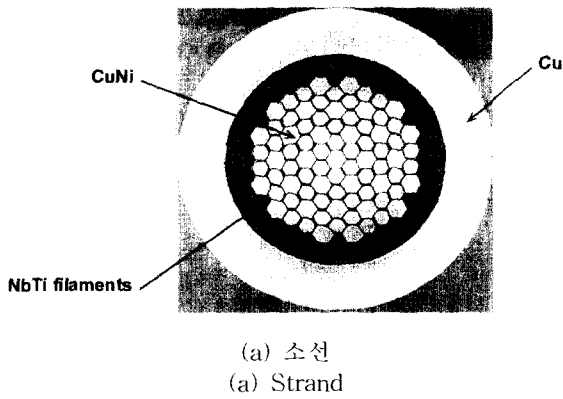


그림 1. Cu-Ni/NbTi/Cu복합선재의 단면 모양  
Fig. 1. Cross-sectional view of Cu-Ni/NbTi/Cu composite wire.

표 1. 초전도선재의 규격  
Table 1. Specification 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 compact cable
Size	4.78 x 1.76mm
Cable pitch	20mm
Critical current	≥2040A at 5T

시험편은 유압식 척을 사용하여 800 psi의 면압으로 선재의 양단부에 보호대 없이 장착하였다. 한편 케이블을 구성하는 소선에 대한 피로시험은 보유시험기의 로드셀 용량이 너무 커서 제어가 곤란하였기 때문에, 본 연구에서는 케이블선재의 피로시험만 실시하였다.

### 2.3. 잔류저항의 측정

Fig. 2는 상온에서 피로시험후 파단된 선재로부터 소선 시험편의 잔류저항 측정에 사용된 직선형 시험편 홀더의 모식도를 나타내고 있다. 시험편 홀더는 4.2

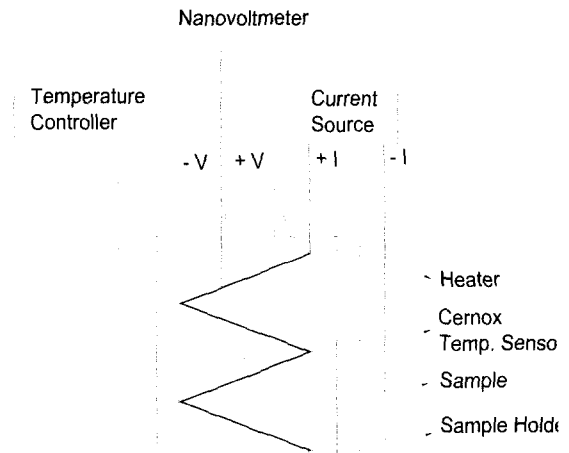


그림 2. RRR 측정용 장치의 모식도  
Fig. 2. Schematic illustration of apparatus for RRR measurement.

K에서 열전도도가 100 W/m·deg이상을 나타내는 무산소등을 사용하였다. 그 위에 저온 테이프를 감아서 절연시켰다. 시험편의 온도 측정은 시험편 홀더 중앙에 위치한 온도센서(Cernox, Model CX-1050-SDX08 827)를 사용하였고, 그 신호로 온도컨트롤러(DRC-93CA)를 작동시켜 소정의 온도를 유지하였다 [6]. 시험편의 온도 조절을 위하여, Fig. 2에 보인 바와 같이 시험편 홀더에 망간 히터선을 감은 구리봉재를 삽입하고 저온용 에폭시로 고정하였다.

잔류저항 측정은 4단자법을 사용하여, Nanovoltmeter로 전압을 측정하였다. 이때 시험편에 외력이 걸리지 않도록 홀더에 시험편을 장착하였다. 시험편 길이는 36 mm, 전압단자간 거리는 25 mm이다. 먼저 상온에서 약 0.4~4.8 A/mm<sup>2</sup>의 전류밀도를 갖는 전류 I<sub>1</sub>을 인가하여 발생하는 전압 V<sub>1</sub>을 측정하여 잔류저항(R<sub>m</sub>)을 계산하였다. 식 (1)을 사용하여 293K에서의 저항(R<sub>1</sub>)을 계산하였다.

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

여기서 T<sub>m</sub>은 측정시의 온도(°C)를 나타낸다. 한편 임계 온도 바로 위의 온도에서 전기저항(R<sub>2</sub>)의 측정은 시험편을 액체 헬륨 온도에서 5분 이상 냉각시킨 후, 시험편을 헬륨 액면 위로 들어 올려 0.1~0.6 K/min의 범위 내에서 시험편 온도를 상승시키면서 전압을 측정하였다. 이때 시험편에 흘리는 전류의 극성을 바꾸어 전압을 측정하였고, 두 값을 평균하여 R<sub>2</sub>를 계산하였다.

잔류저항의 측정에 사용된 시험편은 낮은 응력 반복수의 영향을 조사하기 위하여, 100회, 500회 및 1000회 반복하중을 가한 시험편과 높은 반복수에 대해서는 예상 파단수명의 10%, 50%, 80% 및 100%까지 피로시험을 실시한 것을 각각 사용하였다. 본 연구에서는 한국전기연구소의 RRR 측정설비를 사용하였기 때문에 선재의 피로시험을 일괄적으로 수행한 후 잔류저항을 측정하였다. 이 때문에 피로 시험후 잔류저항 측정시까지 상온에서 시험편을 방치함에

따라 예상되는 시효효과의 영향은 고려하지 않았다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 피로시험 결과

Fig. 3은 척간거리 60 mm, 응력비 R=0.1, 실온에서 NbTi초전도 케이블의 피로시험 결과 얻어진 S-N선도를 나타내고 있다. 아닐링 처리한 선재를 ○로, 비교를 위하여 열처리전의 입수재(as-received)를 ●로 표시하였다. 초기에는 피로의 영향이 나타나지 않고, 반복수가  $3 \times 10^3$ 회를 지나면서 피로에 기인한 파단을 나타내었다. 반복수가  $10^6$ 회까지는 응력 진폭이 낮아짐에 따라서 피로수명의 증대를 가져왔다. 그 후는 거의 피로한도에 가까운 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 반복수  $10^7$ 회 추정 NbTi 케이블의 피로한도(fatigue limit)는 약 120 MPa에 상당하였다.

한편 아닐링처리한 선재(○)는, 아닐링처리 하지 않은 선재(●)의 경우[3]와는 달리, 응력레벨 약 400 MPa 이상에서는 피로손상보다는 연성 파단이 일어났다. 그리고,  $2 \times 10^4$ 회과  $10^6$ 회 사이에서는 응력진폭의 최대값이 낮아짐에 따라 파단까지 반복수는 증가하였지만, 이 경우 열처리에 따른 피로특성에의 영향은 나타나지 않고 거의 동일한 거동을 나타내었다. 선재의 S-N선도는 전체적으로 보아 선재의 항복응력에 대응하는 약 320 MPa을 경계로 하여 꺾여져 있다[2, 7]. 피로시험에 사용한 선재가 9본 소선을 연선 처리한 후 압축 성형한 케이블이라는 점을 고려하면, 피로하중 부하시 소선간 다소의 접촉이 예상되지만 큰 분산 없이 완만한 형태의 S-N선도를 얻을 수 있었다.

NbTi 초전도선재의 피로파괴는 결국 소선의 바깥부에 위치한 안정화재인 Cu의 피로손상에 기인하였다고 생각된다. 특히 케이블선재의 경우, 반복 하중 작용시 소선간 접촉부에서 마찰에 따른 손상이 발생하고, 특히 손상은 소선의 방향이 급격히 변화하는 선재의 모서리진 부분에 집중되리라 예상된다. 이러한 손상이 반복수의 증가와 더불어 진행되어 선재의 피로파괴를 초래하였다[2].

#### 3.2. 잔류저항의 거동

선재의 구성 요소중 안정화재인 Cu에서의 잔류저항보다는 CuNi와 NbTi에서의 잔류저항이 적어도  $10^3$ 배 이상 크기 때문에, 선재 전체의 저항에 미치는 안

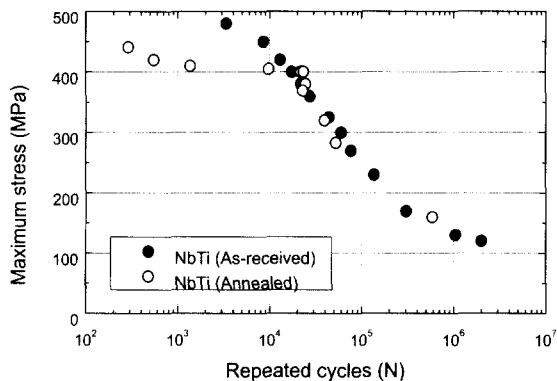
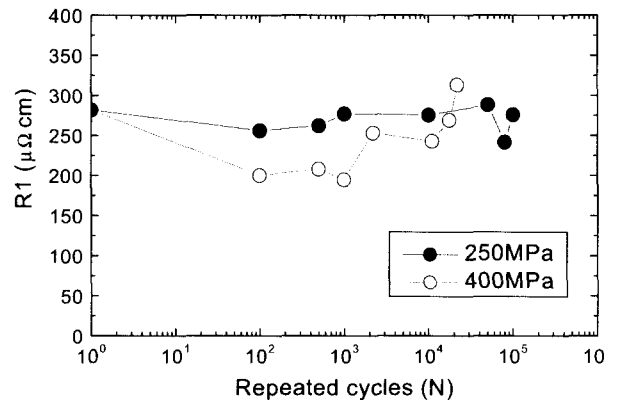


그림 3. 9 소선 NbTi 케이블의 S-N선도  
Fig. 3. S-N curve of 9-strand NbTi cable

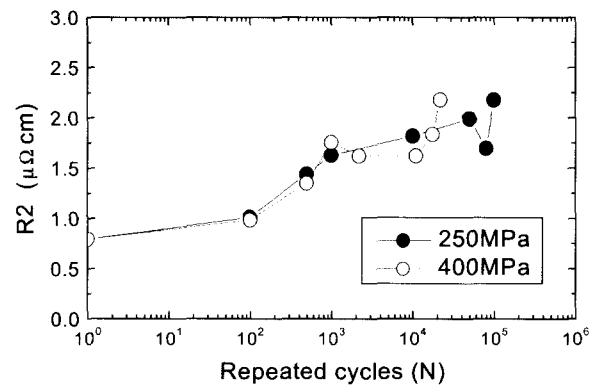
정화재의 영향은 거의 없을 것이다. 결과적으로 비저항은 단면적에서 Cu의 단면적 분율을 사용하여 계산된다. 응력비 R=0.1에서 피로시험한 NbTi 복합선재 중 두 응력진폭 레벨, 250 MPa과 400 MPa을 선정하여 반복수에 따른 잔류저항의 변화를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 실온, (b)는 임계온도보다 다소 높은 12 K에서 측정한 값을 나타낸다.

Fig. 4(a)는 실온에서 측정한 잔류저항, R1을 반복수에 따라 나타낸 것이다. 여기서 각 데이터 점들은 피로 시험 도중 소정의 반복수에서 정지한 시험편의 9본 소선 중에서 채취한 1본 소선에 대한 결과를 나타낸다. 먼저 피로하중을 가하지 않은 선재(이후 처녀재라 함)는 실온에서 약  $280 \mu\Omega\text{cm}$ 의 전기저항을 나타내며 열처리하지 않은 경우의  $260 \mu\Omega\text{cm}$ [3]와 비슷한 값이다.

250 MPa의 경우, 반복수 100회에서 저항은 처녀재보다 다소 낮은 값을 나타내었고, 이후 반복수가 증가함에 따라 도중에 다소의 변동을 보이거나 거의 같은 정도의 저항값을 나타내었다. 그리고 400 MPa의 경우, 반복수가 증가함에 따라 250 MPa의 경우보다 더



(a) 실온  
(a) at RT



(b) 12 K  
(b) at 12 K

그림 4. 피로 반복수에 따른 잔류저항의 변화  
Fig. 4. Variation of residual resistivity with repeated cycles

낮은 저항값을 보이다가 파단 직전에 급격히 증가하는 거동을 볼 수 있다. 따라서 열처리된 선재의 경우, 실온에서 피로 반복수에 따른 잔류저항의 변화에는 응력진폭의 레벨에 따른 명확한 차이는 나타나지 않았지만, 응력진폭 레벨이 클수록 다소 낮은 잔류저항을 나타냄을 알 수 있다. 또한 이것은 열처리하지 않는 경우와도 같은 거동이다[3].

Fig. 4(b)는 12 K에서 측정된 잔류저항, R2를 반복수에 따라 나타낸 것이다. 여기서 처녀재는 12 K에서 약  $0.8 \mu\Omega\text{cm}$ 의 저항을 나타내며, 열처리하지 않은 경우( $2.4 \mu\Omega\text{cm}$ )[3]의 1/3정도이다. 따라서 열처리하지 않은 입수재의 경우는 케이블 제작시의 가공경화에 의한 높은 격자결함 및 전위 밀도로 인해 안정화제를 포함한 선재의 구성요소가 높은 잔류저항을 나타내었다는 것을 알 수 있다.

반복수 100회까지는 잔류저항이 처녀재와 거의 같거나 다소 높은 값을 나타내었고, 이후 반복수가 증가함에 따라 도중에 다소의 변동이 있으나 증가하는 거동을 나타내었다. 이것은 12K에서는 피로 반복수의 증가에 따라 격자결함, 손상누적에 기인하는 저항의 증가로 생각되고, 또한 응력레벨이 높은 400 MPa의 경우 파단 직전에 잔류저항의 급격한 증가를 나타내 실온의 경우와 유사한 경향을 보였다. 그리고 응력진폭에 따른 분명한 차는 나타나지 않았고, 파단시의 잔류저항은 처녀재에 비하여 두 응력레벨 모두 약 175% 증가하였다.

### 3.3. 잔류저항비의 거동

Fig. 5는 아닐링한 NbTi선재의 잔류저항비 ( $RRR = R_{293K}/R_{12K}$ )를 피로반복수에 따라 나타낸 것이다. 처녀재의 RRR값은 350으로, 이 값을 열처리를 하지 않은 입수재의 경우( $RRR=110$ )보다 약 3배 이상 큰 값이다. 피로에 따른 RRR의 거동을 보면, 반복수 100회에서도 RRR값은 처녀재보다 상당히 낮은 값을 나타내었고, 이후 반복수가 증가함에 따라 RRR값은 거의 선형적으로 감소하는 거동을 나타내었다. 즉 응력진폭의 최대치가 항복응력을 넘는 400 MPa에서 RRR값은, 반복수  $10^3$ 회에서 약 100까지 감소하였으나, 항복응력 이하인 250 MPa에서는 175까지 감소하여 높은 응력 레벨에서 보다 현저한 저하를 나타내었다. 그 이후에는 거의 포화된 값을 나타내다가 파단 직전에 다시 저하하였다. 이러한 결과는, 비교적 높은 변형률진폭( $\Delta \epsilon$ )에서 반복수의 증가에 따라서 급격한

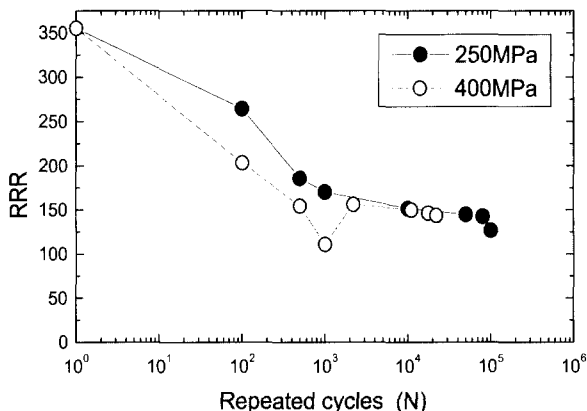


그림 5. 피로손상을 받은 NbTi시험편의 RRR곡선  
Fig. 5. RRR curve of fatigued NbTi specimens.

RRR값의 저하를 보인 Ekin 등의 결과[1]와 같은 거동이다. 아닐링한 NbTi 선재의 피로손상에 따른 RRR특성 및 그에 미치는 응력진폭의 영향은 다음과 같이 설명할 수 있다. 피로 초기는 변형에 따른 전위 및 결함의 증가로 인해 비교적 낮은 피로 반복수에서도 RRR값은 상당히 감소하였다. 한편 더욱 반복수가 증가하면, 케이블에 대한 피로시험의 경우는 소선의 경우와는 달리, 반복변형에 따른 손상의 누적뿐만 아니라 피로시 소선간 접촉부에서 상대 미끄럼 마찰 및 변위에 따른 발열이 부가적으로 발생하게 된다[2]. 이러한 발열이 선재의 안정화 등에 발생한 피로손상의 회복이 손상누적과 균형을 이루게 되어, 반복수가 증가하여도 더 이상의 RRR 저하는 일어나지 않고 거의 포화된 값을 나타내었다고 생각된다. 응력진폭의 영향은 부가 응력진폭이 클수록 피로시험시 케이블에 생기는 상대변위량은 증가하였고, 이로 인해 보다 큰 손상의 누적이 피로의 초기에 발생하였기 때문으로 생각된다[8].

한편 지금까지 반복응력의 작용에 따른 Cu에 있어서 저항의 변화에 대한 많은 연구결과가 보고되고 있으나 그들 일부는 서로 상반되는 결과를 포함하는 경우도 많다. Katagiri 등의 결과[5, 9]에 따르면, 4.2 K에서 순수한 Cu의 저항은  $10^4$ 회까지는 포화가 일어나지 않는 반면, 순도가 다소 떨어지는 Cu(OFHC)의 저항은 피로시험의 초기단계에 포화되어진다. 상온에서는 저항의 포화가 피로의 초기단계인 약  $5 \times 10^3$ 회에서 일어났다. 본 연구에서는 아닐링재의 경우  $10^3$ 회의 피로반복수에서 RRR은 거의 포화하는 거동을 나타내었다.

## 4. 결 론

아닐링처리한 Cu-Ni/NbTi/Cu 초전도선재에 대하여 상온에서 피로시험후 잔류저항의 거동을 조사하여 얻어진 결과는 아래와 같다.

1) 아닐링처리한 Cu-Ni/NbTi/Cu 초전도선재의 상온 피로시험으로 양호한 S-N선도를 얻을 수 있었다. 이 선도는 소선의 항복응력을 경계로 기울기에 변화를 나타내었다. 약  $2 \times 10^4$ 회까지는 연성 파단을 나타내었고, 이후는 피로손상에 의해 파단이 일어났다. 선재의 S-N선도에 열처리 효과는 나타나지 않았다.

2) 피로시험후 상온에서의 잔류저항(R1)은 거의 변화가 없으나, 열처리한 선재의 12 K에선 잔류저항(R2)은 반복수와 더불어 증가하였고, 열처리하지 않은 선재의 약 1/3정도로 낮은 저항값을 나타내었다.

3) 열처리한 처녀재의 RRR값은 350으로 열처리하지 않은 선재에 비해 약 3배정도 높았다. 피로 반복수가 증가함에 따라 RRR은 거의 선형적으로 감소하다가 반복수가 1000회를 넘으면 포화하는 거동을 나타내었다. 또한 피로파단시의 RRR은 처녀재의 65%까지 감소하였고, 그 정도는 응력진폭의 레벨이 클수록 낮은 값을 나타내었다.

## 후 기

본 연구는 97년도 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학 공동연구소 주관의 연구과제(과제번호: 97-052)로 수행되었다. 이에 감사를 드립니다. 연구의 일부는 BK21 지역대학육성사업의 일환으로 수행되었습니다.

**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] 신형섭, 오상수, "초전도 마그네트용 실용 초전도 케이블의 기계적 특성 및 피로손상 평가에 관한 연구", 대한기계학회 논문집 A, Vol. 24, No. 3, pp. 761-768, 2000

[3] 신형섭, 배영준, 하동우, 오상수, "NbTi 초전도 케이블의 피로손상에 따른 RRR의 거동", 제1회 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, pp.30-33, 1999

[4] C. E. Bruzek, P. Mocaer, et al, "Recent Progress of NbTi 46.5wt% Superconductor Strands at GEC ALSTHOM", private communication, 1997

[5] 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

[6] 김상철, 오상수, 하동우 등, "초전도선재의 잔류 저항비 측정을 위한 장치제작 및 특성평가", 대한전기학회 하계학술대회논문집 D, pp. 1300-1302, 1998

[7] 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

[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

[9] K. Katagiri, S. Nishijima et al, "Mechanical Properties of Superconducting Wire for 0.5MJ Pulsed Magnet at Cryogenic Temperatures", Proc. of the Int Cryogenic Material Conf. (ICMC), Butterworth Kobe, Japan, pp.191-194, 1982



**배영준(裵永俊)**

1974년 05월 20일생, 1998년 안동대 공대 기계공학과 졸업, 2001년 8월 동 대학원 기계공학과 졸업예정



**하동우(河東雨)**

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 졸업(공학석사), 현재 연세대 대학원 금속공학과 박사과정, 1987년 ~ 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



**오상수(吳詳秀)**

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원

**저자 소개**



**신형섭(申亨燮)**

1959년 03월 27일생, 1981년 경북대 공대 기계공학과 졸업, 1991년 일본 토호쿠대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 안동대학교 공과대학 기계공학부 부교수