

초전도 마그네트용 실용 초전도 복합선재의 기계적 특성 및 피로손상 평가에 관한 연구

신 형 섭* · 오 상 수**
(1999년 4월 30일 접수)

Evaluation of Mechanical Property and Fatigue Damage in A Practical Superconducting Cable for Magnet

Hyung-Seop Shin and Sang-Su Oh

Key Words: Superconducting Cable(초전도 케이블), NbTi Composite Wire(NbTi 복합선재), Mechanical Property(기계적 특성), S-N Curve(S-N선도), Fatigue Damage(피로손상), Critical Current(임계전류).

Abstract

In order to investigate how the fatigue damage effects on the critical properties of superconductor, a fatigue test at room temperature and an I_c measurement test at 4.2K were carried out in this study, respectively, using a 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cable. Through the fatigue test of a 9 strand Cu-Ni/NbTi/Cu composite cable, a conventional S-N curve was plotted even though there was a possibility of fretting among strands. It was found that the maximum stress corresponding to the inflection point on the S-N curve obtained was nearly the same value as the yielding strength of cable obtained from the static tensile test. However, the effect of cabling in multi-strands superconducting cable on the fatigue strength was not noticeable. The critical current(I_c) measurement was carried out at 4.2K in a NbTi strand out of the fatigued cable. It showed a degradation of I_c at high stress amplitude regions over 380MPa, and the degradation became significant as the applied stress amplitude increased.

1. 서 론

임계온도 이하에서 전기저항 없이 전류를 흘릴 수 있는 상태를 초전도상태라 하고, 이러한 특성을 나타내는 재료를 초전도체라고 한다. 초전도체는 그 재료가 갖는 임계온도 T_c , 임계자장 H_c , 임계전류밀도 J_c 의 세 임계값으로 이루어진 공간 내에서만 초전도상태를 유지한다. 따라서 이들과 고유 임계값들은 초전도체를 공학적으로 응용하는데 있어서 중요한 역할을 하며, 보다 우수한 임계치를 갖는 재료를 개발하려는 노력이 계속되고 있다.^(1,2) 이러한 초전도현상을 이용한 응용 기

기에는 핵융합로, 의료용 단층촬영 장치인 MRI, 자기부상열차, 입자 가속기, 조셉슨 소자에 의한 초고속 계산기 등을 들 수 있다. 이와 관련하여 국내에서는 핵융합로 실용로 건설(KSTAR)을 위한 연구⁽³⁾가 1995년 말부터 활발히 추진되어 오고 있고, MRI와 초전도 발전기의 시험제작에도 성공한 바 있다.

초전도 응용기기의 대부분은 초대형 초전도 마그네트를 사용하고 있고 여기에는 초전도 선재가 사용된다. 실제로 선재를 마그네트에 응용하기 위해서는 와인딩, 반응열처리 등의 가공을 거쳐 초전도특성을 가지게 된다. 이때 겪게 되는 기계적/열적 변형에 따른 선재의 임계특성의 변화, 특히 임계전류특성에 미치는 거동을 파악하는 것은 마그네트의 설계 및 운전에 따른 안전성 평가 등을 위해서 중요하다.^(4,5) 일반적으로 초전도 선재는 대전류, 고자장, 그리고 극저온이라는 가혹한

* 회원, 안동대학교 기계공학부
E-mail : hsshin@andong.ac.kr
TEL : (0571)850-5675 FAX : (0571)841-1630
** 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

환경하에서 사용되어진다. 이때 고자장에서 대전류가 흐르는 선재에는 강력한 로렌츠력이 발생하며, 이로 인한 선재요동과 유속점프(flux jump) 등이 발생하고, 특히 기기의 시동/정지에 따른 반복하중이 작용하게 된다. 따라서 초전도 마그네트의 안정성 평가를 위해서는 이러한 기계적 부하에 의한 선재의 변형 및 이때 발생하는 손상에 따른 초전도 특성의 거동을 파악하는 것이 중요하다.⁽⁶⁾ 이러한 초전도 케이블의 피로거동의 파악은 선재의 프레팅 피로 및 마모에 따른 손상기구의 파악측면에서도 의의가 있다고 생각한다.⁽⁷⁾

초전도선재의 변형에 따른 임계특성의 변화에 관한 연구가 1970년대 말부터 활발히 진행되어 오고 있다.⁽⁶⁾ 안정화재를 포함하는 초전도 복합선재의 경우, 실온에서 극저온으로 냉각이 이루어짐에 따른 선재 구성물질간의 열수축률 차에 기인하는 잔류변형률의 평가에 관해 많은 연구가 이루어져 왔다.^(5,8) 초전도 마그네트가 실용화됨에 따라, 이들 선재를 초전도 마그네트용 요소에 적용하기 위해서는 선재 고유의 기계적 특성 평가뿐만 아니라 가동/운전 중에 발생하는 변형, 손상에 따른 초전도특성, 특히 임계전류(I_c)특성의 평가에 관한 연구가 필요하다.⁽⁹⁾ 그러나 국내의 경우, 극저온, 고자장 시험설비 사정 등으로 인해 초전도마그네트의 요소 설계와 관련된 연구의 보고 예는 거의 없어서 앞으로 초전도응용 기기의 개발을 위해서는 설계데이터의 확보 측면에서 초전도선재의 강도특성, 변형에 따른 고유 초전도특성의 거동 및 내구성 평가와 관련된 연구가 필요하다. 특히 대용량도체의 특성을 평가하기 위한 시험의 경우, 시험실시가 대규모이고 수행이 쉽지 않기 때문에, 가능한 한 구성요소의 제반 특성으로부터 추정할 수 있는 외삽법의 확립 기술 또한 필요하다.

본 연구에서는, 8Tesla 이하의 초전도 마그네트에 사용되는 대표적인 합금계 실용 복합선재인 NbTi 초전도케이블의 기계적 강도 및 피로 특성을 조사하고, 반복하중의 부하에 따른 피로손상이 초전도 특성인 임계전류에 미치는 영향을 조사하였다.

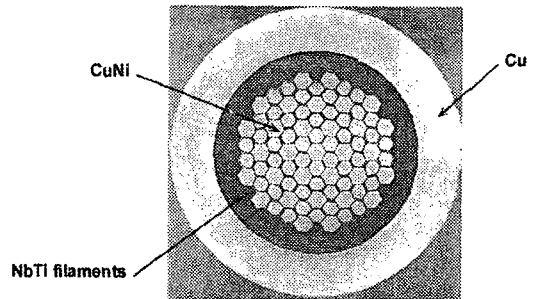
2. 실험방법

2.1 시험재료

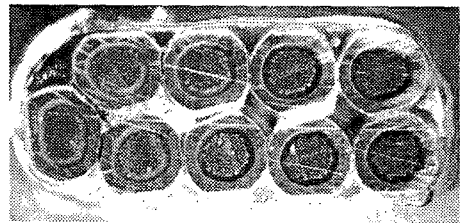
실험에 사용한 케이블은 GEC ALSTHOM사가 발전기용으로 개발 제조한 직경이 1mm인 스트랜드(strand, 이후 소선이라 부른다)를 꼬아서 만든 다심 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재이다. 소선과 케이블의 단면을 Fig. 1에 나타내었다. 이 복합선재의 소선에는 직경이 약 5 μ m인 NbTi 필라멘트가 5710본이 포함되어 있다. 실용 목적의 대용량 케이블은, 9가닥의 소선을 연선피치(cabling pitch)를 20mm로 압축 성형하여 평각형 케이블 형태로 제작 공급되었다. Table 1은 공시재로 사용한 초전도체 소선과 케이블의 사양을 나타내고 있다.

2.2 인장 및 피로시험

실온에서 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재의 인장시험을 실시하여 탄성계수, 항복강도, 인장강도 등 기계적 특성치를 구하였다. 소선 및 케이블의 인장시험은 전기유압식시험기(Instron 8516, 용량 100kN)를 사용하여 척간거리(gage length)를 100mm, 액추에이터 속도 3mm/min에서 실시하였다. 시험편의 척킹은 케이블 양단에 샌드페이퍼를 댄 상태로 하였다.



(a) Strand



(b) Cable

Fig. 1 Cross-sectional view of Cu-Ni/NbTi/Cu composite wire

한편 초전도 케이블의 피로시험은, 길이 120 mm의 시험편을 사용하여 실시하였다. 이때 시험편의 게이지부 길이는 척간 간격이 연선편치의 3 배에 해당하는 60mm로 하였다. 반복주파수를 10Hz, 응력비($\sigma_{min}/\sigma_{max}$)를 R=0.1로 하여 응력진폭의 최대값 σ_{max} 가 120MPa~480MPa 범위에 걸쳐 피로시험을 실시하였다. 케이블 제조과정에서 소선의 연선편치가 피로강도 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 척간 거리를 연선편치의 배수에 해당하는 20, 60, 80 및 120mm로 변화시켜, 최대응력(σ_{max})을 280MPa과 360MPa로 선정하여 각각의 응력진폭에서 피로시험을 실시하였다.

2.3 임계전류 (I_c) 측정

임계전류는 초전도 선재의 중요한 특성치로, 그것은 시험편에 직류전류를 서서히 증가시켜 전압 단자에서 저항이 발생할 때의 전류값으로 결정한다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 반복하중의 작용에 의해 발생하는 피로손상이 초전도선재의 임계특성치에 미치는 영향을 살펴보기 위하여,⁽¹¹⁾ 피로파단된 NbTi 케이블의 소선 중 피로파면 양상을 띄는 소선을 택하여 측정에 사용하였다. 선재는 Fig. 2에 나타낸 임계전류 측정용 치구홀더의 전극 터미널에 납땜으로 부착하였고, 그 중앙부에 10mm간격의 전압단자를 치부하였다. I_c 측정용 시료홀더는 1회 쿨다운(cool-down)으로 6번의 소선 시험편 장착이 가능한 구조로 되어 있다.

4.2K에서 6T까지의 자기장을 부가할 수 있는 크라이오스테트(cryostat) 내에 시험편 홀더를 삽

입하였다. Fig. 3에 보인 바와 같이 4단자법에 의해 시험편에 설치한 2개의 전압단자간에 발생하는 전압으로부터 전기저항, 즉 시험편의 전압-전류특성곡선(V-I curve)을 X-Y기록계에 기록하여 검출하였다. Fig. 4는 360MPa에서 피로파단된 NbTi 소선에 대하여 기록된 V-I선도의 측정 예를 보여주고 있다. 전류 공급은 500A급 정전류 전원으로 부터 스위퍼(sweeper)를 사용하여 일정한 스윙속도로 서서히 증대시킨다. 시험편이 처음에는 초전도상태에 있으므로 전압이 발생하지 않지만, 인가된 전류가 임계치를 넘으면 초전도상태가 깨어지면서 전압이 발생하기 시작한다. 본 연구에서는 선재 시험편 10mm에 대하여 1 μ V의 flux flow 전압이 발생하였을 때 수송전류(transport

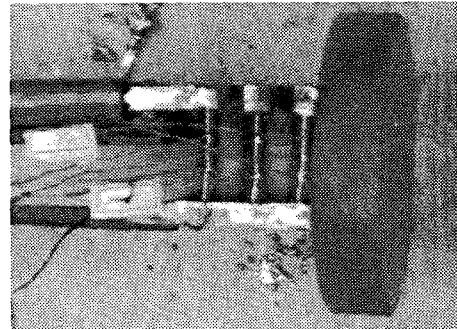


Fig. 2 Test jig for I_c measurement at 4.2K

Table 1 Specification of superconducting wire

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

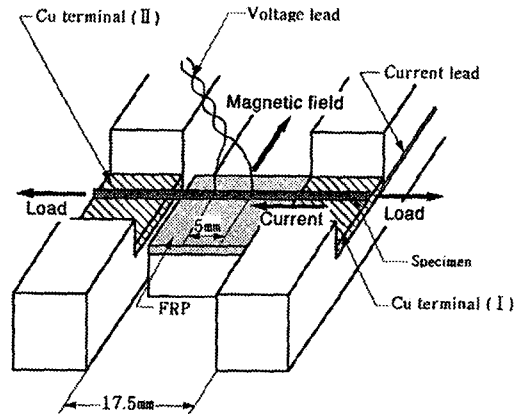


Fig. 3 Schematics of four probe method for I_c measurement

current)를 임계전류, I_c 로 정의하였다.⁽¹⁰⁾ 임계전류의 측정은 한국전기연구소 초전도응용사업팀의 8 Tesla 급 고자장 초전도 마그네트를 사용하여 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초전도선재의 인장시험 결과

초전도선재에 대한 실온에서 인장시험 결과 얻어진 응력-변형률선도를 Fig. 5에 나타내었다. (a)는 소선의 결과를, (b)는 케이블의 결과를 각각 나타내고 있다.

먼저 소선의 변형거동을 살펴보면, 복합선재 특유의 다소 복잡한 선도를 나타내, 최초의 약 80MPa까지는 탄성적 거동을 나타내나, 그 이후는 비교적 변형이 크게 되어 항복을 나타내고 있다. 항복 후 변형률 2%까지 가공경화가 발생하나, 그 후는 거의 일정한 유동응력을 나타내어 완전소성을 나타내고 있다. 일반적으로 초전도 복합선재의 역학적 거동은 연속섬유로 강화된 섬유강화합금과 같아서, 그 변형단계를 3단계로 나눌 수 있다.⁽¹²⁾ 처음 80MPa까지는 Cu 안정화재와 NbTi 필라멘트 그리고 CuNi이 탄성적으로 변형하는 영역, 그 후 항복강도가 낮은 안정화재 Cu는 소성 변형거동을 나타내고 필라멘트와 CuNi은 탄성 변형거동을 나타내는 영역, 응력이 330MPa를 넘어서면 필라멘트와 CuNi도 소성변형 또는 영구변형을 시작하면서 다소의 가공경화를 나타낸다. 마지막으로 완전 소성변형후 파단에 이르는 영역으로 나눌 수 있다.

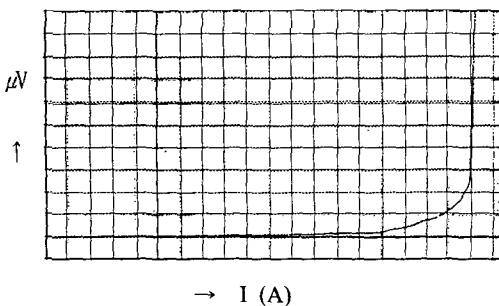
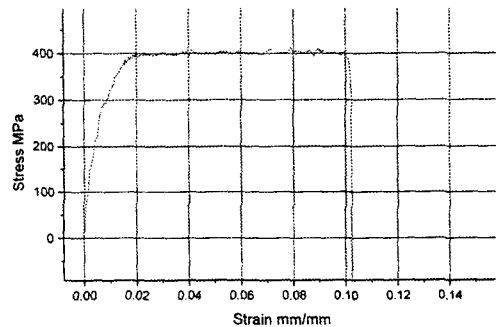


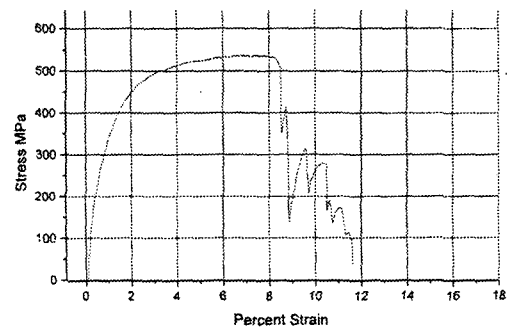
Fig. 4 An example of voltage-current record in a fatigued NbTi strand(at $\sigma_{max}=360\text{MPa}$, 2T)

Fig. 5 (b) 케이블재에 대한 응력-변형률 선도는 (a) 소선의 경우와 유사한 거동을 나타내고 있으나 초기 탄성변형역의 응력이 소선의 경우보다 높은 값을 나타내었고 연성재료 특유의 거동을 나타내고 있다. 또한 필라멘트가 소성변형을 나타낸 후에도 다소의 가공경화를 관찰할 수 있다. 이것은 케이블재의 경우 압착가공에 따른 선재의 가공경화에 주로 기인한 것으로 판단되고 하중선도 후반부에 나타나는 하중의 급격한 저하는 케이블을 구성하는 각 소선의 파단에 기인한 것이다.

Table 2는 인장시험 결과 얻어진 초전도선재의 기계적 특성치를 나타낸다. 케이블의 특성치 중 영률과 항복응력은 소선의 경우와 다소 차를 나타내고 있는데, 이것은 케이블의 경우 9본 소선을 피치 20mm로 연선, 압착 가공하였기 때문에 소선 사이에는 작지만 간극이 존재하는 관계로 부하 초기의 변형거동에 그 영향이 나타나 다소



(a) Strand



(b) Cable

Fig. 5 Tensile stress-strain curves at room temperature

Table 2 Mechanical Properties of NbTi composite wire at room temperature

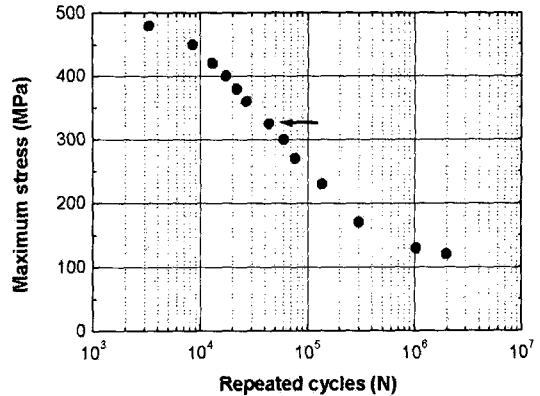
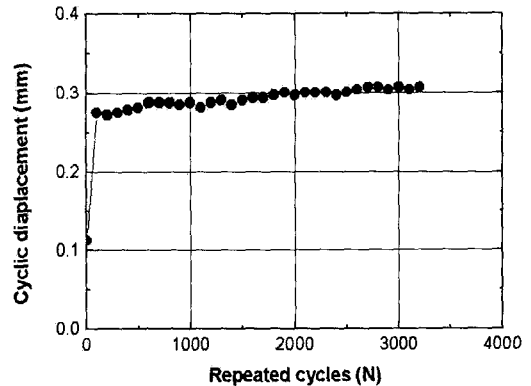
Type	Young's modulus (GPa)	0.2%Proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Strand	50.2	220	453	9.7
Cable	45.3	345	537	10.6

낮은 영률을 가져왔다. 또한 NbTi 선재의 경우, 실온에서의 실험결과로부터 실제 사용온도에서 거동을 추정하는 것이 필요한데, 일부 재질의 경우, 액체질소온도(77K) 및 액체헬륨온도(4.2K)에서도 거의 같은 변형거동을 나타낸다는 보고의 예⁽¹³⁾도 있으나, 이에 대하여는 앞으로 검토가 필요하다.

3.2 S-N 곡선

Fig. 6은 척간거리 60mm, 응력비 $R=0.1$, 실온에서 NbTi 초전도 케이블의 피로시험 결과 얻어진 S-N곡선을 나타내고 있다. S-N 곡선은 앞에서 언급한 바와 같이 練線처리한 재료임에도 불구하고 큰 분산 없이 완만한 형태의 연성재료의 특징을 나타내고 있다. 초기에는 피로의 영향이 나타나지 않고, 반복수가 3×10^3 회를 지나면서 피로에 기인한 파단을 나타내었다. 반복수가 10^6 회까지는 응력진폭이 낮아짐에 따라서 파단수명의 증대를 가져왔다. 그 후는 거의 피로한도에 가까운 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 반복수 10^7 회 추정 NbTi 케이블의 피로한도는 약 120MPa이다.

NbTi 케이블의 S-N곡선은 최대응력값이 330MPa를 경계로 곡선의 기울기에 변화가 나타남을 알 수 있다(화살표 부). 즉 이 값을 경계로 재료의 변형 혹은 손상 양상에 변화가 발생하였다고 생각된다. 이 값은 인장시험의 결과로부터 얻어진 NbTi 케이블의 항복응력에 가까운 값을 나타내고 있다. 또한 시험편의 파단은 주로 각형 단면의 모서리부에 집중되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이것은 피로시험시 연선처리에 따른 소선간의 프래팅 마찰에 의해 소선 외부에 위치한 안정화 Cu재에서 균열이 먼저 발생한 후 진

**Fig. 6** S-N curve for 9-strand NbTi cables**Fig. 7** Change of cyclic displacement range during fatigue test in a 9 strand NbTi cable ($\sigma_{max}=380\text{MPa}$)

진하여 소선 파단을 가져왔다는 것을 나타낸다.

특히 초전도 케이블의 피로시험시 고려해야 할 사항은, 케이블이 9본의 소선을 피치 20mm로 연선처리한 후 압착 성형되었다는 점이다. 이로 인해 존재하는 소선간 틈새 및 국부적 불완전 접촉이 반복하중의 부하시 안정된 피로시험의 실시 여부가 주목된다. 따라서 피로시험시 일정 사이클 간격으로 시험편의 하중방향 변위량을 측정하여, 반복수의 증가에 따른 거동을 조사하였다. Fig. 7은 응력진폭의 최대값이 380MPa에서 반복수에 따른 변위량의 변화를 나타내고 있다. 피로시험 도중 변위량의 변화는 이러한 소선간 틈새 등 케이블내에 존재하는 불완전한 부분으로 인해 초기 100 사이클 이내에서 안정한 값을 나타내었

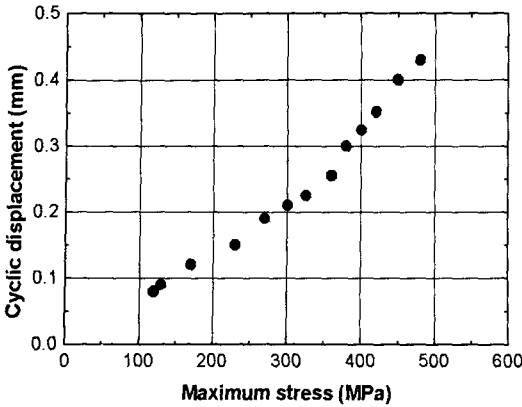


Fig. 8 Relationship between applied maximum stress and cyclic displacement range during fatigue test

고, 이후 파단 직전까지 다소의 증가를 나타내지만 거의 안정된 변형량을 나타내었다. 그 결과, 초전도 케이블의 피로시험에서 예상되는 프레팅의 영향에도 불구하고 Fig. 6과 같이 거의 분산이 없는 S-N곡선을 얻을 수 있었다. Fig. 8은 각 응력레벨에서 측정된 피로수명의 거의 대부분을 차지하는 안정된 영역에서 변형량을 측정하여 각 응력값에 대하여 나타낸 것이다. 이 경우도 약 330MPa를 경계로 변형거동의 차가 나타나, 330MPa 이하에서는 변형량이 최대응력값에 비례하는 선형적 변형거동을 나타내, 탄성적 변형영역임을 알 수 있고, 그 이상의 응력레벨에서는 보다 큰 변형을 가져왔다. 이 값은 앞서 케이블의 항복응력보다도 잘 대응하고 있다.

한편 케이블의 피로강도에 연선처리(cabing)에 따른 영향이 존재한다면 피로 파단수명에 그 영향이 나타나게 된다. 따라서 연선처리의 영향을 조사하기 위해 척간거리를 달리한 시험편을 사용하여 피로 시험을 실시하였다. Fig. 9는 두 응력레벨에서 피로시험을 행한 결과 얻어진 피로강도와 파단반복수의 관계를 나타내는 그래프이다. 피로시험결과 피치수에 따른 차는 거의 나타나지 않고 거의 동일한 파단반복수를 나타내었다. 따라서 연선처리한 NbTi 초전도케이블은 피로하중 하에서도 단일도체와 같은 거동을 나타냄을 알 수 있었다.

3.3 파면관찰

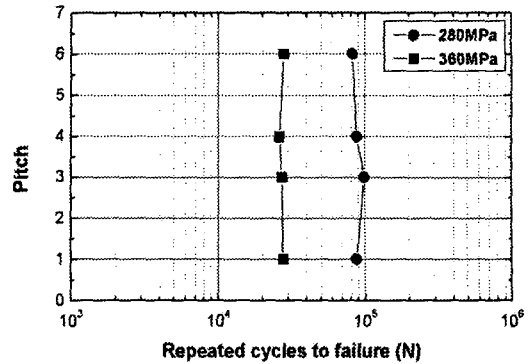


Fig. 9 Relationship between pitches of gage length and repeated cycles to failure

피로시험후 초전도 선재의 파단 특성을 알아보기 위해 파면을 비교 조사하였다. NbTi 케이블 9본의 소선중 일부는 피로파면을, 나머지는 인장시험시와 같이 전체적으로 현저한 백킹을 보이는 연성파면을 나타내었다. 또한 응력진폭이 낮을수록 피로파면이 차지하는 비율이 높게 나타났다. Fig. 10은 인장시험후 파단면(a)과 피로시험후 파단면(b, c, d)의 거시적 모양을 나타낸다. 소선의 거시적 파면양상을 비교해 보면, 피로파단면의 경우는 인장시험편의 경우에 비하여 안정화재인 Cu부의 수축이 현저히 적고 비교적 평탄한 파면양상을 보여주고 있다. 저응력진폭의 시험편(Fig. 10(b))과 중간정도의 응력을 가한 시험편(Fig. 10(c))이 비교적 평활한 파면을 보이고 있다. 반면 고응력 시험편 (Fig. 10(d))에서는 중앙의 Cu-Ni부에서 매우 조대한 덩플 파괴의 양상을 보여주고 있어서 다소의 연성파괴가 진행되었음을 알 수 있다. 이러한 사실은 Fig. 11에 보인 $\sigma_{max} = 450\text{MPa}$ 의 경우 파단면의 NbTi 필라멘트부의 고배율 관찰을 통하여 분명히 할 수 있었다.

또한 Fig. 10(d)의 고응력역에서는 안정화재와 필라멘트부 사이에 계면분리(delamination)가 발생한 것을 볼 수가 있다. 이것은 450MPa의 높은 응력이 복합선재에 반복 부하시 선재 구성요소간의 현저한 변형률 차에 기인한 것으로, 필라멘트부에 먼저 크랙킹이 일어나고 후에 안정화 Cu부가 파단이 일어났다고 생각되어지고, 이것이 고응력 하 선재의 피로파괴에도 영향을 미쳤다고 생각된다.

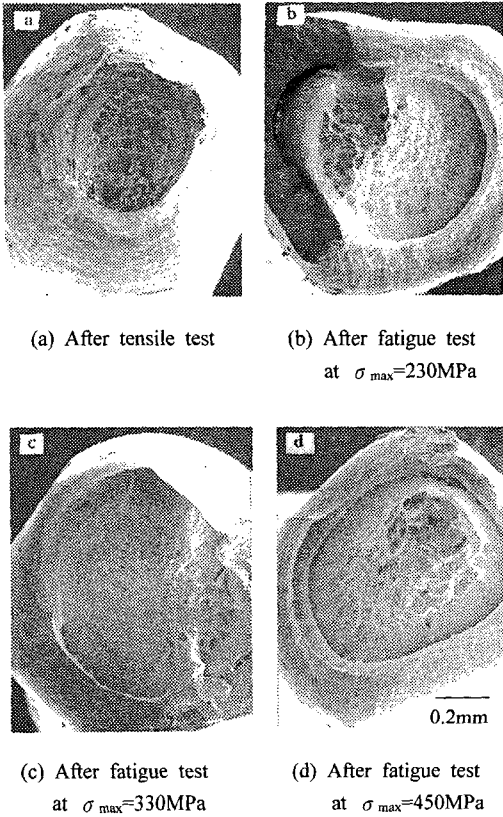


Fig. 10 SEM fractography of Cu-Ni/NbTi/Cu composite wire after testing

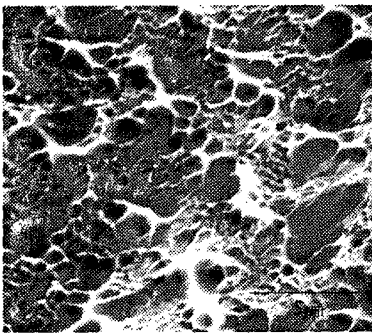


Fig. 11 SEM fractography of NbTi filament region after fatigue testing at $\sigma_{max}=450\text{MPa}$

3.4 임계전류에 미치는 피로손상의 영향

NbTi 케이블의 피로시험후, 피로 파단되었다고 판단되는 소선을 택하여, 4.2K에서 임계전류를

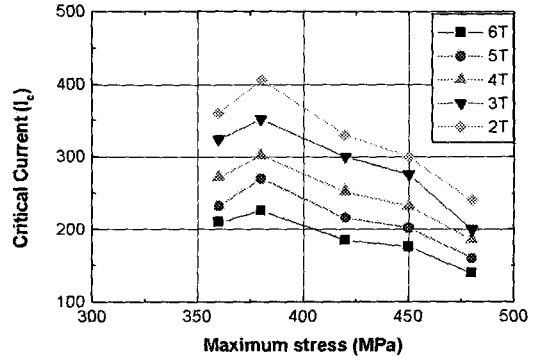


Fig. 12 Change in critical current with applied maximum stress in fatigued NbTi cables

측정한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 피로손상에 따른 임계전류는 응력진폭에 따라 변화를 나타내어 380 MPa 이상의 고응력역으로 갈수록 임계전류의 저하는 현저하게 나타났고, I_c 의 감소정도는 자장이 높을수록 크지 않았다. 한편 그 이하 응력 범위에서는 거의 처녀재의 I_c 값(예를 들면 2T에서 380A)을 나타내었다. 즉 낮은 응력진폭에서는 반복응력의 작용에 의해 복합선재에 발생하는 손상은 안정화제의 열화 및 마모 등에 따른 손상이 진전하여 선재의 파단에 이른 것으로 생각된다.

이에 반하여 높은 응력진폭역에서는, NbTi 필라멘트에 반복응력의 작용 도중 다중 넥킹(multiple necking)과 같은 변형을 발생시키게 되고 이에 따라 전류수송 단면적이 감소하여 이것이 임계전류의 저하를 초래하였다고 생각되어진다. 본 연구에서와 같이 다수의 소선으로 이루어진 케이블재의 피로시험의 경우, 프레팅에 의한 소선 표면 부근에 존재하는 Cu 안정화제에서 균열의 발생도 생각할 수 있으나, 고 응력진폭역에서는 NbTi 케이블의 파단수명이 약 2×10^4 사이클 이하였던 점을 감안하면, 임계전류의 저하는 NbTi 필라멘트의 변형 또는 손상에 기인하였다는 것을 충분히 예측할 수 있다.

한편 NbTi 소선에 대한 Ochiai⁽¹¹⁾ 등의 최근 피로시험 결과를 본 연구에서 케이블재의 경우와 비교하면, 소선에 대한 피로시험의 경우가 케이블에 대한 경우보다 손상에 따른 임계전류의 변화에 대해 보다 명확한 거동을 나타냈다. 임계전류는 본 연구에서와 마찬가지로 낮은 자장하와 높은 응력진폭역에서 보다 현저한 임계전류의 저하를 나타냄을 볼 수 있었다. 이것은 높은 응력

진폭 역에서는 NbTi 필라멘트에 반복응력의 부하중 다중 네킹과 같은 변형이 발생하여 낮은 자기장하에서도 임계전류의 저하를 초래하였기 때문으로 생각되어 진다. 계속해서 소선의 결과를 포함한 임계전류 저하의 원인에 대한 검토가 변형의 영향을 분명히 하기 위해 필요하다.

4. 결론

연선처리한 Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재 케이블에 대한 실온에서 인장 및 피로시험과 4.2K에서 임계전류 측정을 통하여 얻어진 결과는 아래와 같다.

(1) Cu-Ni/NbTi/Cu 복합선재 케이블의 피로시험 결과, 양호한 S-N곡선을 얻을 수 있었고, S-N 곡선상의 기울기 변화부분의 최대응력값은 인장시험에서 얻어진 항복응력과 거의 유사한 값을 나타내었다.

(2) NbTi 케이블의 피로강도에는 제작시 선재의 연선처리에 따른 영향이 거의 나타나지 않아서, 피로하중하에서는 케이블이 단일도체와 같은 강도 및 변형거동을 나타냄을 알 수 있었다.

(3) 피로파단 후 피로손상을 받은 선재에 대한 임계전류특성의 평가 결과, 피로손상에 따른 임계전류의 저하는 380MPa을 넘는 높은 반복응력에서 나타났고, 응력값이 클수록 부가자장이 낮을수록 임계전류의 저하정도는 크게 나타났다. 이때 높은 응력진폭 역에서 NbTi 선재의 피로손상에 따른 임계전류의 저하는 반복응력의 부하중 다중 네킹과 같은 변형에 기인하였다고 생각한다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 '97공모연구과제(지방대육성과제지원, 1997-002-E0026)의 지원에 의해 수행되었다. 또한 임계전류 측정시 한국전기연구소 초전도응용사업팀의 초전도 마그네트를 사용하였다. 관계자 여러분에게 감사사를 드린다.

참고문헌

(1) 박종철, 이규원, 홍계원, 이호진, 1996, "초전도 관련 표준의 현황과 대책연구," 국립기술품

질원 보고서.

- (2) 김상현, 1999, "한국에서의 초전도체료 및 전자소자 연구," 초전도와 저온공학, 제1권, pp. 10~17.
- (3) 이경수, 1998, "KSTAR 과제:차세대 정상상태 초전도 Tokamak 실험," 1998년도한국초전도저온공학회 연차총회 및 국제심포지엄논문집, pp. 35~43.
- (4) Easton D. S. and Koch C. C., 1978, "Mechanical Properties of Superconducting NbTi composites," *Advances in Cryogenic Engng.*, Vol. 24 pp. 453~462.
- (5) 신형섭, Katagiri K., 이해무, 1995, "극저온에서 실용 초전도 복합선재의 인장특성평가," 대한기계학회 1995년도 추계학술대회 논문집(I) pp. 752~756.
- (6) Ekin J. W., 1978, "Fatigue and Stress Effects in NbTi and Nb3Sn Multifilamentary Superconductors," *Advances in Cryogenic Engng.*, Vol. 24, K. D. Timmerhaus, R. P. Reed and A. F. Clark, eds., Plenum Press, New York, pp. 306~316.
- (7) For example; ASTM STP 1159, 1993, "Standardization of Fretting Fatigue Test Methods and Equipment," M. H. Attia and R. B. Waterhouse edited, Pliladelphia.
- (8) Flukiger R., Drost E. and Speaking W., 1984, *J. Appl. Phys.*, Vol. 504. p. 2869.
- (9) 福本將彦, 1986, 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.
- (10) 박종철, 이규원, 류강식, 오상수, 권영길, 1997, "Cu/Nb-Ti 초전도체의 임계전류 측정에 관한 연구," 국립기술품질원보고서.
- (11) Iwasaki N., Hojo M., Ochiai S., et al, 1996, "Fatigue Fracture Mechanisms and Superconducting Property of Nb-Ti Superconducting Composite Wire," *Proc. of JSME MMD* No. 96-1 pp. 677~678.
- (12) Taya M. and Arsenault R. J., 1989, "Metal Matrix Composites," Pergamon Press.
- (13) Hitotsuyanagi H., 1978, "Stress Effects in Superconducting Nb-Ti Wires," *Cryogenic Engineering, Japan*, Vol. 13, No. 3 pp. 114~129.