

論文

Nb₃Sn 복합초전도 테이프의 미시적 변형거동 특성평가를 위한 음향방출기법 적용에 관한 연구

이민래* · 이준현**

A Study on Microscopic Deformation Behaviors of Nb₃Sn Superconducting Composite Tape using Acoustic Emission Technique

M.R. Lee* and J.H. Lee**

ABSTRACT

Since the surface diffusion processed Nb₃Sn superconducting tape has the advantage of having large overall critical current density, it is used for the construction of open type MRI superconducting magnets. However one of the disadvantages of this tape is that Nb₃Sn compound often exhibited multiple cracking due to its intrinsic brittleness when subjected to mechanical loading such as bending and winding during the fabrication process for superconducting coil. This will eventually cause the severe degradation of critical current density. Therefore it is important to understand the microscopic deformation behavior of this kind of superconducting tape under the mechanical loading.

In this study, acoustic emission(AE) was used to clarify microscopic deformation behavior at room temperature for Nb₃Sn superconducting tape which was strengthened and stabilized with copper. For this purpose, special attention was paid to AE characteristics including AE event, energy, and amplitude distribution which were associated with microscopic mechanism of deformation of Nb₃Sn superconducting tape under tensile load.

초 록

Nb₃Sn 복합초전도 테이프는 금속간 화합물로서 다른 초전도 재료에 비하여 임계밀도가 높아 MRI 등에 널리 이용되고 있다. 한편 Nb₃Sn층은 화합물이므로 bending이나 winding 등의 코아 제작시 테이프 도체에 응력이 작용하면 화합물층에 취성으로 인한 크랙이 발생하여 부분적으로 파단이 일어나 임계전류 특성이 열화하며 무응력 상태에 비하여 크게 저하된다. 따라서 이와 같은 Nb₃Sn 복합초전도 테이프의 실질적인 적용을 위해서는 선재의 제조과정 뿐만 아니라 가동 중에 기계적 응력에 대한 Nb₃Sn 복합 초전도 테이프의 미시적 거동 특성을 필히 이해하여야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 음향방출기법(Acoustic Emission)을 이용하여 Nb₃Sn 복합초전도 테이프에 대해서 일정변형속도(constant extension rate)제어로 인장하중이 작용할 경우 발생하는 AE 신호특성과 이에 대응하는 각 화합물층의 미시적 변형거동 특성과의 상관관계를 분석하였다.

* 부산대학교 기계공학부 대학원

** 부산대학교 기계공학부

1. 서 론

초전도체는 고자장, 고전류밀도등의 임계특성이 대단히 높기 때문에 전력기기 뿐만 아니라 자기공명영상장치(MRI)와 같은 의료기기 및 반도체 분야 등에 널리 이용되고 있다. 이러한 초전도체는 고안전성, 저교류손실, 고강도, 고균일과 같은 특성들이 요구되기 때문에 현재, 합금계로서 Nb-Ti와 화합물계로 Nb₃Sn, V₃Gn 등이 일부 실용화되고 있다[1-2]. 그 중에서 특히, Nb₃Sn 복합초전도 테이프는 금속간 화합물로서 다른 초전도 재료에 비하여 교류 손실치가 낮으면서 임계온도와 임계 전류밀도가 높아 케이블 코어용 도체로서 사용되고 있다. 그러나 이러한 Nb₃Sn 복합초전도 테이프는 Nb₃Sn층이 화합물이어서 bending이나 winding 등의 코아 제작시 테이프 도체에 응력이 작용하면 화합물층에 취성으로 인한 크랙이 발생하여 부분적으로 파단이 일어나 임계전류 특성이 열화하며 무응력 상태에 비하여 크게 저하된다.

특히 장시간에 걸친 고자장, 고전류밀도 하에서의 초전도 선체에 대한 기계적 강도 및 열화에 따른 초전도 특성은 마그네트의 안정성에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 이와 같은 Nb₃Sn 복합초전도 테이프의 실질적인 적용을 위해서는 선체의 제조과정 뿐만 아니라 가동 중에 기계적 응력에 대한 Nb₃Sn 복합 초전도 테이프의 미시적 거동 특성을 필히 이해하여야 할 필요가 있다[3].

본 연구에서는 금속 및 복합재료의 미시적 거동 및 파손기구 등을 온-라인 상태에서 평가할 수 있는 음향방출기법(Acoustic Emission)을 이용하여 금속과 절연체 등으로 복잡하게 조합되어져 있는 Nb₃Sn 복합초전도 테이프에 대해서 상온에서 일정변형속도(constant extension rate)제어로 인장하중이 작용할 경우 발생하는 AE 신호특성과 이에 대응하는 미시적 변형거동 특성과의 상관관계를 분석하여 복합 초전도 테이프를 구성하는 각 화합물층(compound layer)의 미시적 거동에 대한 AE특성 및 파손기구를 평가하였다.

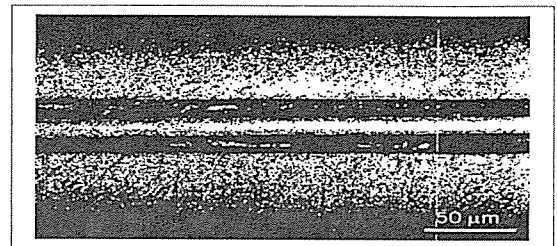
2. 재료 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 Nb₃Sn 복합초전도체는 미국의 GE社로부터 입수한 것으로서 Fig. 1에 나타난 바와

Cu Stabilizer
Nb ₃ Sn Compound Layer
Unreacted Nb Layer
Nb ₃ Sn Compound Layer
Cu Stabilizer

(a) Constitution of Nb₃Sn



(b) Cross section image

Fig. 1. Configuration of Nb₃Sn superconducting tape specimen.

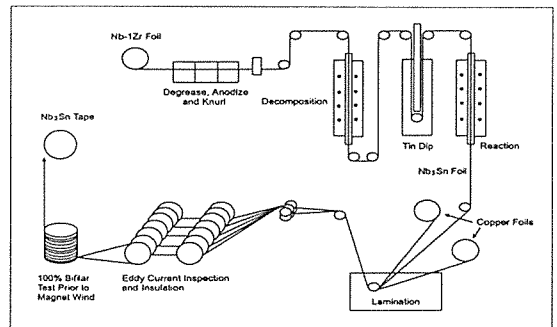


Fig. 2. Manufacturing process of Nb₃Sn super-conducting tape

같이 Cu, Nb₃Sn 및 Nb의 3가지 성분으로 구성되어 있다. 대부분 volume fraction은 Cu가 차지하고 있으며, Nb₃Sn 및 Nb barrier의 volume fraction은 상대적으로 작은 비율로 구성되어 있다. 그림에서 단면의 중앙에 위치하는 것은 Nb 미반응층이고 Nb₃Sn 테이프의 상하에 붙은 Cu는 테이프재의 기계적 강도 및 열적 안정화에 기여한다. 이러한 초전도 테이프는 주로 초전도 송전 케이블 제작용 도체로 사용되는 것으로서 현재는 이 테이프를 이용하여 의료용 MRI 및 에너지 저장장치(SMES) 분야 등에 활용하고 있다.

Fig. 2는 Nb₃Sn 복합초전도 테이프의 제조과정을 나타낸 것으로서, 먼저 Nb-1wt%Zr을 용해하여 얇은

Table 1. The dimensions of Nb₃Sn superconducting tape

Constituents	Thickness of each layer	Cross sectional area	Volume fraction of each layer
Nb ₃ Sn	0.02mm ×2	0.0582mm ² ×2	0.2
Nb	0.017mm	0.0495mm ²	0.09
Cu	0.071mm ×2	0.2066mm ² ×2	0.71

호일(foil) 형태로 만든 후 주석(Sn)을 도금하고 열처리로를 통과시키면 Nb와 Sn의 직접적인 반응에 의하여 Nb₃Sn층이 상하 양쪽에 생성된다. 그후 Cu foil을 테이프 양쪽에 적층 시켜서 Nb₃Sn 복합초전도 테이프를 제조한다. 한편, Table. 1은 Nb₃Sn 복합초전도 테이프의 재원을 나타낸 것이다.

2.2 실험 장치 및 방법

Fig. 3은 본 실험의 전체적인 개요도를 나타낸 것으로서, 인장실험은 최대용량 10ton의 유압식 만능재료 시험기인 INSTRON 8500을 사용하였으며, 하중은 0.05mm/min의 일정변형속도(constant extension rate)로 변위제어를 하였다. 실험은 시험편의 변형정도에 따른 AE 신호특성을 분석하기 위하여 탄성영역, 항복영역, 소성영역 초반부, 소성영역 후반부(파단)로 구분하여 각각 실험하였다.

한편, AE측정은 시험편의 중앙에 AE 센서를 부착하였으며, AE 센서의 수신감도를 높이기 위해서 시험편에 coupling agent(Krautkramer社)를 바른 후 접착

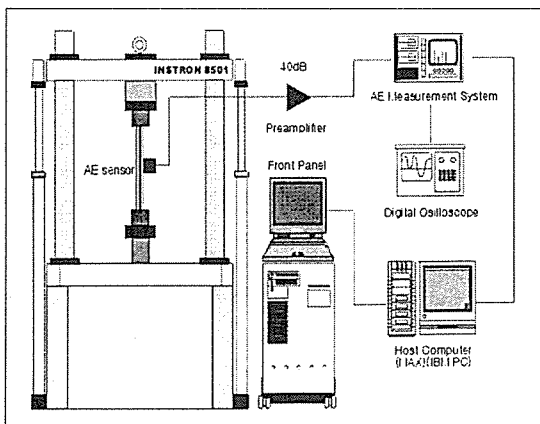


Fig. 3. Schematic diagram of acoustic emission monitoring system

테이프로 압착하였다. 그리고 센서 및 AE측정장비는 PAC社의 WD 광대역 센서와 MISTRAS 2001 장비를 사용하였다. 한편, 기계적 잡음과 같은 불필요한 주변 잡음(background noise)을 제거시키기 위하여 프리앰프(1220A)에서 100~1200kHz의 대역필터(band pass filter)를 사용하여 필터링 시킨 후 40dB로 증폭시켰다. 그리고 주변잡음을 고려하여 AE threshold는 18mV(45dB)으로 설정하였으며 실험을 통해서 측정된 데이터는 하중단계별로 AE 파라미터(count, event, amplitude 등)와 AE 신호의 파형 분석을 위해 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310)로 측정된 AE 파형(waveform)의 형태로 각 발생원에 대한 신호를 구분하여 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

본 실험에서는 AE기법을 이용하여 하중증가에 따른 Nb₃Sn 복합초전도테이프의 신호특성을 각 재료의 변형정도에 따른 하중을 고려하여 전체적인 거동을 4단계로 구분하여 비교, 분석하였다. Fig. 4는 시간에 대한 하중과 그에 따른 AE 이벤트수(사상수) 변화를 나타낸 결과로서, I, II, III, IV는 각각 탄성영역 전반부(I), 탄성영역 중반부~항복영역(II), 소성영역 전반부~소성영역 중반부(III) 및 소성영역 후반부(IV)의 각 단계를 나타낸다. 실험결과, 하중이 증가함에 따라서 일반적으로 AE이벤트수도 증가하는 경향을 나타내었다. 즉 탄성영역 초기에는 AE 이벤트가 거의 발생되지 않다가 탄성영역 중반부에 이르면서 점차 발생하기 시작하

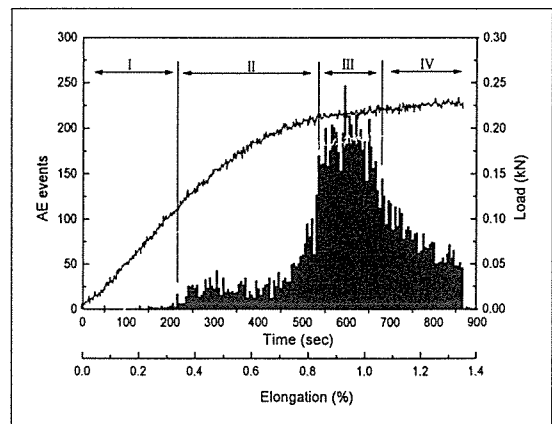


Fig. 4. AE events, Load vs. Elongation, Time

여 탄성영역 이후 항복점에 이르기까지 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 소성영역 전반부에서 중반부에 이르면서 AE 이벤트는 급격하게 증가하였다가 소성영역 후반부에서는 다시 감소하여 파단에 이르기까지 AE 신호가 검출됨을 알 수 있다.

한편, 복합 초전도체는 기계적 특성을 향상시키기보다는 전, 자기적 특성을 향상시키는 것이 목적이므로 일반적인 복합재료의 파괴모드와는 다른 양상을 나타낸다[4-6]. 즉, 일반적인 라미네이트 복합재료의 주 파괴모드에서는 초기영역에서 기지재의 균열과 더불어 기지와 섬유와의 파단(debonding) 및 미시적인 계면간 박리(delamination)를 거쳐 최종 파괴를 일으키는 것이 대부분이다. 하지만 Nb₃Sn 복합 초전도체의 경우는 응력 크기에 의존하여 각각의 화합물층(compound layer)은 탄성상태나 소성상태 중 어느 하나로 존재하며, Nb₃Sn층의 경우는 매우 취성이 강하므로 탄성영역내에서 이미 파단이 발생한다.

Ochiai(1986)[7]등은 인장하중에 대한 Nb₃Sn 복합 초전도 재료의 파괴형태는 다음과 같은 2가지 특징적인 거동을 보이고 있음을 보고하고 있다. 먼저 type I의 경우는 초전도 복합재료가 높은 파괴변형률(ϵ_c)을 수반하는 경우로서 소성역이 뚜렷하며 이때의 화합물층은 복합적인 파괴형태(multiple fracture)를 나타낸다. type II의 경우는 파괴변형률이 매우 낮은 (1%이하) 경우로서 탄성영역 이후에 소성역이 뚜렷하게 나타나지 않고 거의 항복영역 부근에서 파괴에 이르는 경우이다. 이러한 경우에 있어서 화합물층은 복합적인 파괴형태를 나타내지 않고 단일파괴현상(single fracture)을 나타내게 된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 본 실험의 경우, Nb₃Sn 성분에 대한 파괴모드는 type I의 경우와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 Nb₃Sn층은 전반적으로 탄성영역에서 이미 변형을 수반하여 파괴가 일어나기 시작하였으며 하중이 증가함에 따라서 이들 성분들은 복합적인 파괴(multiple fracture) 메카니즘을 나타내었다.

3.1 하중증가에 따른 AE거동

Fig. 4에서 보는 바와 같이, Nb₃Sn 복합 초전도 테이프에 대한 변형거동은 4단계로 나누어 기술할 수 있다. 첫번째 단계인 영역 I에서는 모든 재료가 완전한 탄성상태인 경우이며, 두 번째 단계인 영역 II에서는 취성재료인 Nb₃Sn에 의한 변형 및 Nb의 소성상태를 나타내며 세 번째 단계인 영역 III은 Nb와 Cu가 모두

소성상태인 경우이다. 그리고 네번째 단계인 영역 IV는 복합재료의 전체적인 파단과정으로 가정할 수 있다.

먼저, 영역 I에서는 초전도체를 이루고 있는 어떠한 재료도 변형되지 않았기 때문에 아무런 AE신호도 검출되지 않는다. 영역 II에서는 전반적으로 탄성상태임에도 불구하고 다수의 AE신호가 검출되기 시작하는데, 이는 취성이 매우 강한 Nb₃Sn층에서 주된 변형이 야기되어 탄성영역 내에서 AE 이벤트가 발생하는 것으로 보아진다. 그리고 이 영역에서 발생하는 신호의 대부분이 취성재료에서 나타나는 AE진폭이 높고 지속시간(duration)이 짧은 돌발형 신호(burst signal)형태와 AE신호의 진폭(amplitude)이 비교적 작고 지속시간이 다소 긴 두 가지 형태의 신호임을 감안하면 Nb₃Sn층의 변형(deformation)과 더불어 부분적으로 Nb층과 Nb₃Sn층 사이에서의 변형으로 인한 복합적인 거동 때문인 것으로 판단된다.

실제로 보고된 바에 의하면 Nb₃Sn 재료의 비가역 변형률이 0.1-0.5%이하임을 감안하여 볼 때, 본 실험에서는 Fig. 4의 결과에서 알 수 있듯이 Nb₃Sn의 비가역 변형률이 대략 0.35% 이하로써 탄성영역에서 Nb₃Sn층에 균열이 발생하여 부분적으로 파단됨을 알 수 있다. 그리고 이러한 Nb₃Sn층에 대한 변형은 전 단계에 걸쳐서 발생하였다.

한편 영역 II에서 Nb₃Sn층의 부분적인 파단에도 불구하고 하중이 계속 증가하는 것은 이러한 각층들의 초기파단이 인장부위의 연신율을 상쇄할 만큼 크지 않고 복합재료의 전체적인 응력에만 의존하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 전체적인 복합재료의 load-bearing capacity 감소가 Cu 및 Nb와 같은 연성성분의 가공경화(work hardening)에 의해서 보상되기 때문이다.

세번째 단계인 항복점 부근에서부터 소성영역 전반부에 이르면서 AE발생률이 현저하게 증가한다. 이는 Cu의 소성변형에 의한 신호와 더불어 복합초전도테이프를 이루는 모든 재료, 즉 Cu/Nb/Nb₃Sn의 변형에 의한 복합적인 파괴양상에 기인하기 때문인 것으로 판단된다. 이 단계에서는 영역 II에 검출되었던 신호들과 Cu층의 변형으로 추정되는 연속형 신호(continuous signals)들이 검출되었다. 이 때 연성재료인 Cu에 대한 신호로써 진폭이 비교적 낮고 지속시간이 긴 신호의 형태가 검출되었으며, 영역 II에서와 마찬가지로 AE진폭이 Nb₃Sn층의 변형에 의한 신호보다 다소 낮고 지속시간은 긴 신호들이 현저하게 증가하였다. 이는 Nb 및 Nb₃Sn층의 계면분리 등에 의한 신호의 중첩에

의해서 발생된다고 판단된다.

네번째 단계로서 소성영역 중반부 이후부터 파단에 이르기까지는 점차 AE이벤트가 감소하는 경향을 나타낸다. 이 단계에서 더 이상 하중이 증가하지 않고 일정한 값을 유지하다가 뚜렷한 하중의 감소없이 갑자기 파단이 일어나는데, 이는 각 구성성분들의 파단이 복합재료의 연신율의 증가를 상쇄할 만큼 커지면서 나타나기 때문이다.

3.2 AE파라미터와 AE발생원

AE 파라미터는 재료의 파손기구와 서로 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있으며[8], AE기술의 중요한 연구과제가 되고 있다. 일반적으로 고강도, 이방성, 비균질재료와 결합을 내포하는 취성재료일수록 진폭이 높은 돌발형 신호를 가지며, 반면 연성재료일수록 진폭이 비교적 낮고 지속시간(duration time)이 긴 연속형 신호를 나타낸다.

Fig. 5는 하중 및 시간에 따른 AE 카운트의 누적분포를 나타낸 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이, 영역 I에서는 아무런 신호도 검출되지 않았기 때문에 기울기가 제로이며, 영역 II에서부터 기울기가 비교적 완만하게 증가함을 알 수 있다. 이는 취성재료인 Nb_3Sn 층의 연속적인 변형에 기인하기 때문이다. 한편 영역 III에서는 AE카운트의 기울기가 급증함을 알 수 있는데 이것은 일반적으로 복합재료의 계면분리 등에서 나타나는 현상으로 본 경우에 있어서는 일부 Cu층의 변형 및 Nb층의 파단과 더불어 주로 Nb층과 Nb_3Sn 층 사이에서 발생하는 신호 때문인 것으로 사료된다. 한편 Cu층과 Nb_3Sn 층 사이에서의 변형은 관찰되지 않았

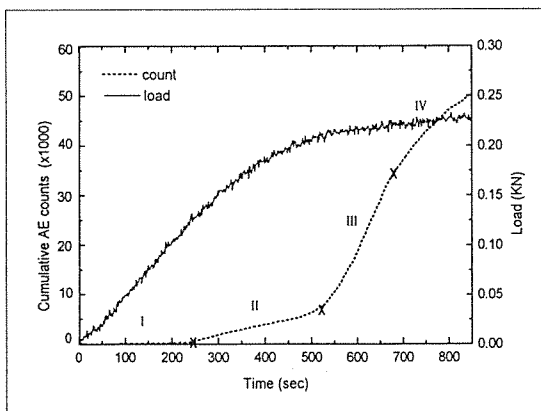


Fig. 5. Load and AE cumulative counts versus time

다. 영역 IV에서는 다시 AE카운트의 기울기가 작아짐을 알 수 있다. 이 영역에서는 주로 Nb 및 Cu층의 파괴모드가 지배적이기 때문에 앞서 언급한 모든 파괴형태 중에서 대부분 Cu층에 의한 신호들과 Nb층의 파단으로 인한 신호가 검출되었다.

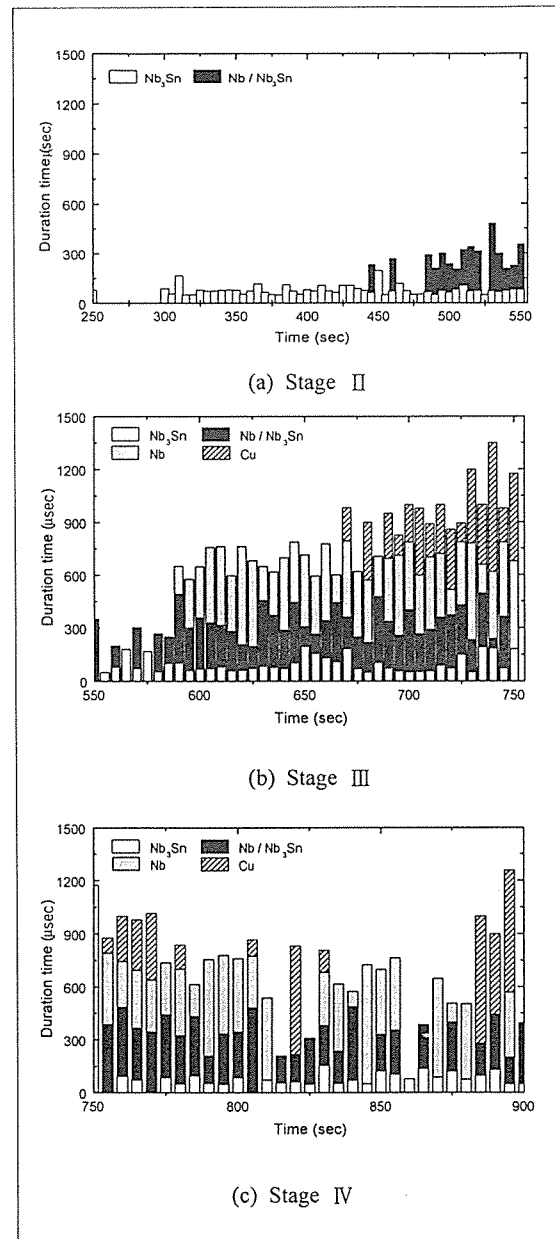


Fig. 6. AE duration time distribution versus time

한편, 본 연구에서 사용된 AE파라미터들 중에서 AE지속시간은 신호의 잡음제거에 유용할 뿐만 아니라 에너지 정보를 내포하고 있기 때문에 재료의 파괴과정과 같은 AE신호의 발생원의 성질을 규명하는데 유용하다. 본 연구에서는 해석시 매우 짧은 AE지속시간의 경우 전기적인 잡음으로 처리하여 해석하였다.

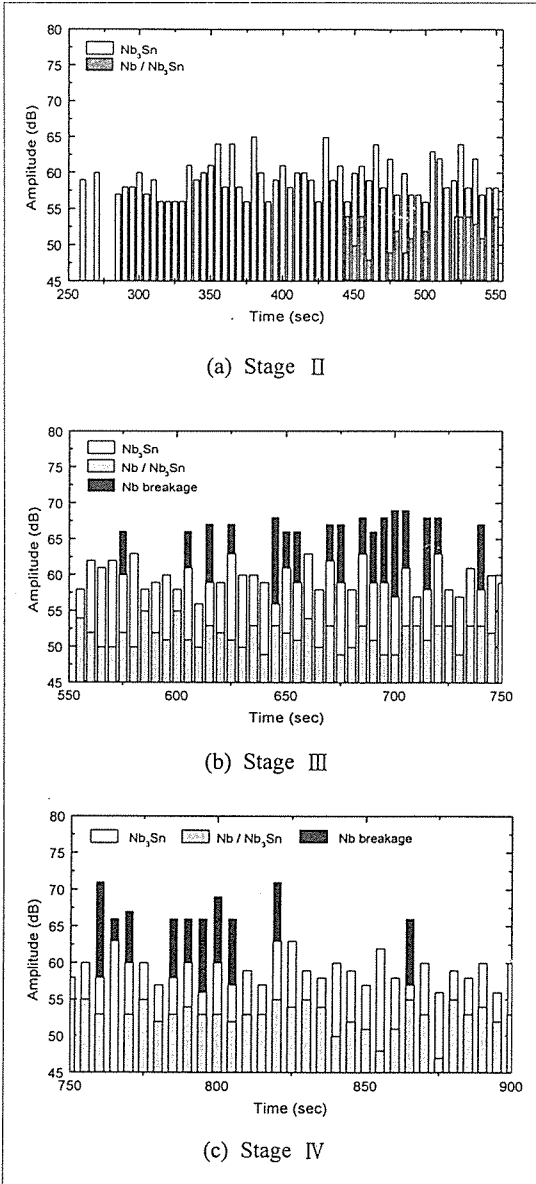


Fig. 7. AE amplitude distribution versus time

Fig. 6은 시간에 따른 AE지속시간(duration time)을 나타낸 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 영역Ⅱ에서 검출된 AE신호는 지속시간이 200 μ sec 이하의 특성을 가진 신호들이 대부분이며, 450초 이후에는 지속시간이 다소 긴(200~500 μ sec)신호들이 검출됨을 알 수 있다. 영역Ⅱ에서는 Nb₃Sn층의 주된 변형과 더불어 일부 Nb층과 Nb₃Sn층 사이에서의 변형이 지배적이다. 따라서 영역Ⅱ의 후반부에 나타나는 일부 신호들은 Nb 및 Nb₃Sn사이에서 발생하는 신호임을 알 수 있었다.

한편 영역Ⅲ에서는 Nb₃Sn에 의한 신호와 더불어 Nb/Nb₃Sn층 사이의 변형에 기인하여 지속시간이 200~500 μ sec인 신호들이 급격하게 많이 검출되었다. 그리고 500~800 μ sec와 800 μ sec 이상의 새로운 신호들이 검출되었는데, 이는 Nb층의 파단에 의한 신호와 Cu층의 변형에 의한 신호로 판단된다. 그리고 영역Ⅳ에서는 영역Ⅲ에서와 같은 파괴과정이 계속 진행되어 재료의 전체적인 파단에 이르고 있다.

Fig. 7은 시간에 따른 AE진폭분포를 나타낸 결과이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 영역Ⅱ에서의 Nb₃Sn층의 변형에 기인한 신호들은 대부분이 55~65dB 사이의 신호들이 지배적이며, 450초 이후의 45~55dB 사이의 신호들은 지속시간(Fig. 6)의 경우와 마찬가지로 Nb 및 Nb₃Sn층 사이의 변형에 기인한 신호임을 알 수 있다. 그리고 영역Ⅲ에서는 Nb층의 파단에 의하여 65dB 이상의 높은 진폭을 가진 신호들이 검출되었다. 그리고 영역Ⅳ에서는 Fig. 7에서 보는 바와 같이, 점차적으로 파단에 이르면서 AE진폭이 50~60dB 사이이고 지속시간은 800 μ sec 이상인 Cu층에 의한 신호들이 다수 검출되었다. 한편 Nb층과 Nb₃Sn층 경계에서 복합적으로 발생하는 신호들과 Cu변형에 의한 신

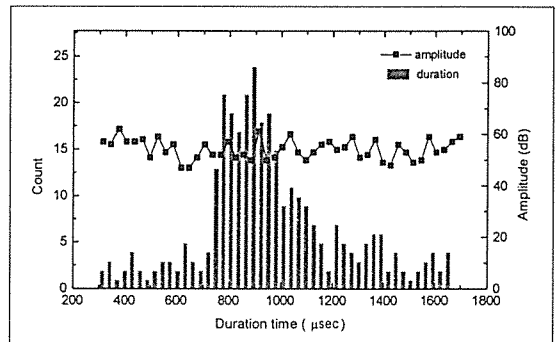
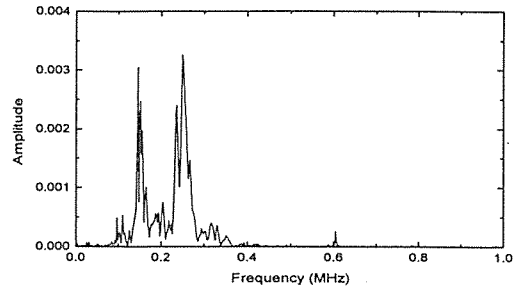
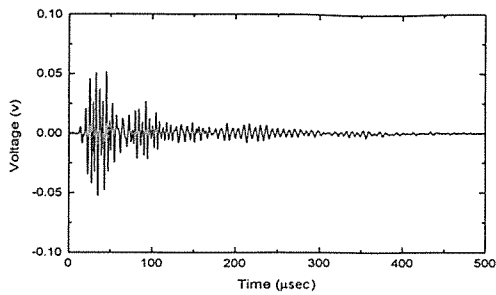


Fig. 8. The results of AE duration time and amplitude during tensile test of Cu tape

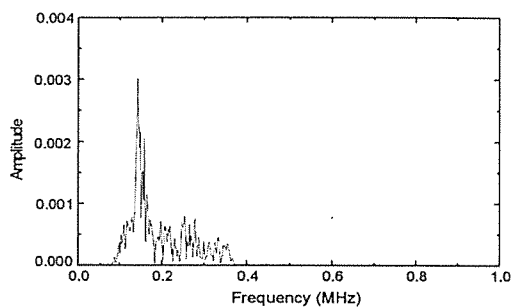
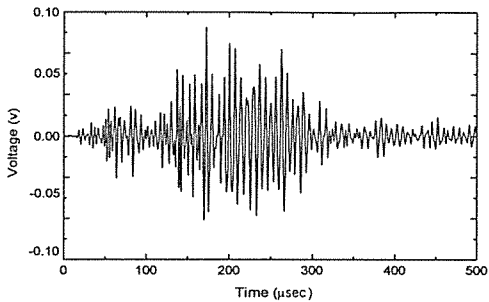
호들을 구분하기 위해서 Nb₃Sn복합재료의 순수 Cu의 인장실험을 통하여 비교, 분석하였다. Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 순수 Cu 테이프에 대한 인장실험결과, Cu의 변형에 기인한 AE신호들은 대부분 지속시간이

길고 이에 반해 진폭은 낮은 신호특성을 보였다.

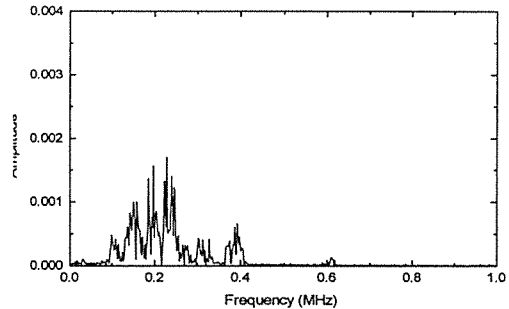
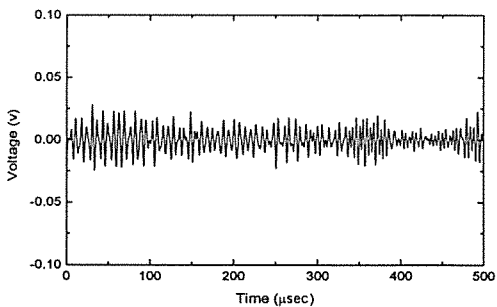
따라서 이상의 결과로부터, 취성파괴가 일어나는 Nb₃Sn층의 변형에 의한 신호 특성은 진폭이 최고 65dB까지이며, 이때 지속시간은 200 μ s 이하의 분포를



(a). AE waveforms and FFT by Nb₃Sn compound layer deformation



(b). AE waveforms and FFT by Nb layer deformation



(c). AE waveforms and FFT by Cu layer deformation

Fig. 9. AE waveforms and FFT analysis obtained in tensile test

나타내었다. 그리고 Nb와 Nb₃Sn층 사이의 변형에 따른 신호특성은 45~55dB 사이의 진폭분포와 이에 따른 지속시간은 200~500 μ s사이의 분포를 나타내었다. Cu의 변형에 의한 신호특성은 지속시간이 800 μ s 이상의 분포를 나타내었으며, 진폭은 50~60dB 사이의 분포를 나타내었다.

Fig. 9는 초전도 복합재료의 각 층들의 변형에 대한 파형을 관찰한 결과이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 (a)의 경우는 Nb₃Sn층의 변형에 의한 AE신호로서 이는 취성재료이기 때문에 지속시간이 비교적 짧은 고진폭의 신호가 발생하였으며, (b)의 경우는 Nb의 변형에 의한 신호로써, Nb₃Sn층에 비해서 연성성분이 강하므로 진폭이 비교적 작고 지속시간은 다소 긴 신호특성을 나타내었다.

그리고 (c)의 경우는 Cu의 연성파괴에 의한 신호로써 진폭이 작고 한편 (a)의 경우는 영역Ⅱ에서 나타났던 돌발형 신호임을 미루어 볼 때 Nb₃Sn층의 파단이 영역Ⅳ에서도 계속 나타남을 알 수 있으며 따라서 Nb₃Sn층의 변형이 영역Ⅱ에서부터 전 영역에 걸쳐 일어나음을 알 수 있다.

그리고 소성영역 후반부Ⅳ에서는 앞의 영역Ⅲ에서와 같은 신호 양상으로 비교적 높은 신호가 발생하였다. 이는 하중이 증가함에 따라 재료내의 변형정도가 커지므로 상대적으로 큰 신호가 발생된다고 판단된다. 한편, 주파수 분석결과로부터 Nb₃Sn변형의 경우는 150kHz와 250kHz의 주파수 특성을 나타내었으며, Nb의 경우는 150kHz, 그리고 Cu의 경우는 100-300kHz 범위내의 주파수특성을 각각 나타내었다.

Fig. 10은 초전도 복합재료의 각 하중영역에 따른 미세 파단면 사진을 나타낸 것으로, 영역Ⅲ에서 Nb의 부분적인 파단이 관찰되며 Nb₃Sn층과 Nb층 사이의 계면분리현상이 나타남을 알 수 있다. 그리고 파단에 이르는 영역Ⅳ에서는 Cu층의 뚜렷한 변형이 관찰되고 있음을 확인하게 알 수가 있다. 한편, 실험결과로부터 복합 초전도 마그네트의 변형에 대한 AE신호특성을 구분한 결과를 Table 2에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Nb₃Sn복합초전도 마그네트의 미시적 변형거동 및 파괴 특성을 평가하기 위하여 음향방출기법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

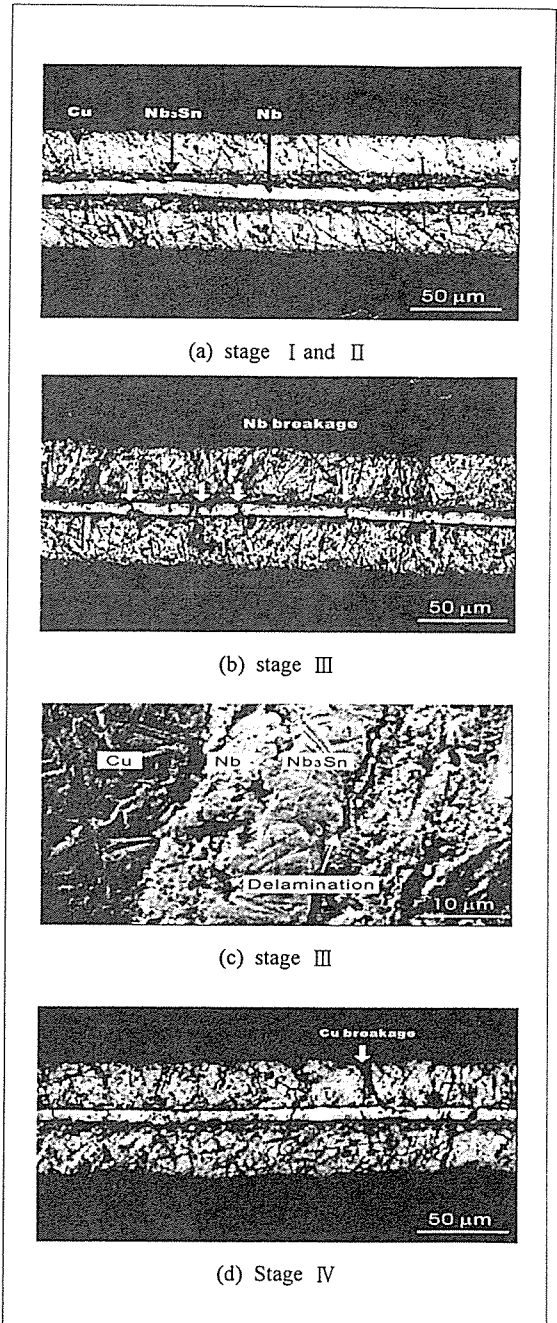


Fig. 10. SEM micrographs of cross sections of Nb₃Sn tape at each stage

본 실험을 통하여, AE 파라미터는 Nb₃Sn층의 변형 거동에 따른 발생원을 평가하는데 있어서 매우 유용함

Table 2. Classification of AE signals due to the microscopic deformation behavior of Nb₃Sn tape

신호형태	Amplitude (dB)	Duration time(μsec)
Nb ₃ Sn변형	55~65영역	~200영역
Nb/Nb ₃ Sn변형	45~55영역	200~500영역
Nb변형	65~영역	500~800영역
Cu변형	50~60영역	800~영역

을 알 수 있었다. 즉, AE지속시간 및 진폭해석을 통한 미시적 파괴 메카니즘과 파단면 관찰을 통한 해석을 비교, 검토한 결과 취성재료인 Nb₃Sn층의 변형에 의한 AE 신호특성은 진폭이 크고 지속시간이 짧은 특성을 보였으며, Cu와 같은 연성재료인 경우에 있어서는 저진폭의 지속시간이 긴 연속형 신호특성을 나타내었다. 그리고 주파수 분석결과 Nb₃Sn층의 변형에 기인한 신호들은 각각 150, 250kHz에서 주파수특성에, Cu변형에 기인한 신호들은 100-300kHz 범위내의 주파수 특성에 대응되는 것으로 판단된다.

한편, Nb₃Sn복합초전도체의 핵심인 Nb₃Sn화합물층은 탄성영역내에서 변형이 관찰되었으며 이는 선재 제작시 굽힘이나 권선하중이 탄성영역 이내라 할지라도 Nb₃Sn층의 변형율을 초과할 경우 Nb₃Sn화합물층의 손상을 증가시키게 되어 임계전류특성을 저하시키는 원인이 됨을 알 수 있었으며, 음향방출기법을 통하여 Nb₃Sn층의 미시적 변형 거동에 대한 평가가 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 성균관 대학교 산업설비 안전성 연구센터의 논문 지원비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 超傳導體의 基礎와 應用, 大韓電氣協會, 1993, pp. 140-145.
2. 한국전기연구소, "차세대 고효율 발전플랜트 기술 개발", 1997.
3. Joon-Hyun Lee, Min-Rae Lee, "Acoustic Emission Characterization of Microscopic Deformation Behaviors for Nb₃Sn Composite Superconducting Tape" ICCE/5, 1998, pp.533-534.
4. Kozo Osamura, "Composite Superconductors", 1994, pp. 150-164.
5. watanabe, K., Katagiri, "Residual Strain Estimation Multifilamentary Nb₃Sn wires with CuNb reinforcement" IEEE, Trac, Appl, Superconductivity, Vol.5, 1995, pp. 1905-1908.
6. "Acoustic Emission Diagnostic and Monitoring Techniques for Superconducting Magnets". American society for Nondestructive Testing, Vol. 5, 1987, pp. 389-401.
7. Shjiro Ochiai et al., "Tensile strength of Bronze-Processed Nb₃Sn Compound with itanium Addition", Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 28. 1988, pp. 973-977.
8. "Fundamentals of Acoustic Emission testing", Nondestructive Testing Handbook, Vol.5, 1987, pp 12-19.