

## 단층 초전도케이블 샘플에서 교류손실의 수치해석에 대한 연구

### A Study on Numerical Analysis of the AC Loss in a Single-layer Superconducting Cable Sample

이주영<sup>1</sup>, 마용호<sup>1</sup>, 류경우<sup>1,a</sup>, 황시돌<sup>2</sup>  
(ZhuYong Li<sup>1</sup>, YongHu Ma<sup>1</sup>, KyungWoo Ryu<sup>1,a</sup>, and SiDole Hwang<sup>2</sup>)

#### Abstract

AC loss is one of the important factors for commercialization of a high temperature superconducting (HTS) cable from an economic point of view. But AC loss characteristics of the HTS-cable are not elucidated completely because of its complex structure. As an earlier stage of analyzing the AC loss in the 22.9 kV/50 MVA, 100 m HTS-cable system of Korea Electric Power Corporation (KEPCO) which is now in collaboration with us, a two-dimensional (2D) numerical model, which takes into account the nonlinear conductivity properties of a high temperature superconductor, has been developed. In order to examine our 2D model, we have prepared several single-layer cable samples whose AC losses are sufficiently reliable due to their simple structure. The AC losses of the samples were experimentally investigated and then compared with our 2D model. The results show that the numerically calculated AC losses are not in good agreement with the measured ones for the cylindrical cable and deca-cable samples with low critical current density. However, the numerically calculated and measured AC losses are relatively in good agreement for the deca-cable and hex-cable samples with high critical current density, although the difference between these two loss data in the deca-cable sample tends to increase in the low current region.

**Key Words** : AC loss, Critical state model, Nonlinear conductivity model,  
Single-layer superconducting cable sample, Two dimensional numerical analysis

#### 1. 서론

고온초전도전체는 액체질소 온도 (77 K)에서도 운전전류밀도가 기존 구리도체보다 월등히 우수한 특성을 가지고 있어 전력응용 중, 특히 전력케이블의 경우는 실제의 전력계통에 도입되어 수년전부터 운전되어 오고 있는 실정이다[1,2]. 그러나 기존의 CV 및 OF 케이블과의 경쟁에서 우위를 확보하

여 이들 수준으로 사용되기 위해서는 무엇보다도 고온초전도케이블시스템에서 발생하는 단열파이프를 통해 외부로부터 침입되는 침입열 (heat leak) 및 고온초전도케이블을 구성하는 도체 (conductor) 와 차폐층 (shield)에서 발생하는 교류손실을 최소화하는 것이 이들의 상용화를 위해서 필수적이라 할 수 있다.

이와 같은 고온초전도케이블에서 발생하는 교류손실은 기존 전력기기의 철심에서 발생하는 히스테리시스손실과 동일할 뿐만 아니라 케이블의 구조적인 복잡성 (도체, 차폐 및 다층구조) 때문에 그 평가가 현재 까지도 명료하지 못하여 고온초전도케이블의 교류손실 최소화 방안이 확립되어 있지 못한 실정이다.

1. 전남대학교 전기공학과  
(광주시 북구 용봉동 300)  
2. 한국전력공사 전력연구원  
a. Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr  
접수일자: 2009. 4. 10  
1차 심사: 2009. 5. 20  
심사완료: 2009. 6. 5

따라서 본 연구에서 (주)한전과의 공동연구를 통하여 고창시험장에 2005년에 국내 최초로 설치되어 현재 운전 중인 22.9 kV/50 MVA, 100 m급 고온초전도케이블시스템에서의 교류손실특성 규명 및 해석기술을 정립하기 위한 선행 연구로서, 먼저 가장 간단한 고온초전도선재 1본에 대한 교류손실을 실험적으로 측정하여 수치해석 결과와의 검토 분석을 통한 기초지식을 확립하였다. 또한 실제 고창케이블의 경우는 2층구조의 도체와 단층구조의 차폐로 구성되어 있지만, 그 첫 단계로서 단층구조의 케이블 샘플을 상정하여 먼저 이상적인 원통형상의 케이블 샘플과 다수본의 고온초전도선재로 된 다각형상의 케이블 샘플 (10각 및 6각 케이블 샘플)을 준비하여 이들에 대한 DC 및 AC 특성을 실험적으로 조사한 후, 측정된 케이블 샘플의 DC 특성을 반영한 수치해석 결과와 비교검토를 하였다.

### 2. 관련 이론

현재 상용화된 1세대 고온초전도선재 (BSCCO)는 테이프형상으로 순수초전도체영역(코어; core)은 타원형상이 일반적이며, 이들 형상에 대한 DC특성을 임계상태모델 (critical state model)로 가정하여 도출된 1본 고온초전도선재에 대한 자기자계손실 (Norris손실)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi} \left( \left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_c}\right) + \frac{(2 - I_p/I_c)/I_p}{2I_c} \right), \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $I_c$ 는 고온초전도선재의 임계전류, 그리고  $I_p$ 는 이에 흐르는 교류피크전류를 각각 나타낸다.

또한 순수초전도체의 형상이 기존 케이블과 닮은 원통형상에 대하여서도 식 (1)처럼 임계상태모델을 가정하여 도출된 교류손실 (Monoblock손실)은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[4].

$$Q = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi \delta^2} \left( (1 - \delta\beta) \ln(1 - \delta\beta) + \delta\beta(1 - \delta\beta/2) \right), \quad (2)$$

$$\delta = 1 - (R_i/R_o)^2, \quad \beta = I_p/I_c$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $I_c$ 는 원통형 고온초전도체의 임계전류,  $R_i$  및  $R_o$ 는 원통형 고온초전도체의 내·외 반경을 그리고  $I_p$ 는 이에 흐르는 교류피크전류를 각각 나타낸다.

그러나 1세대 고온초전도체의 실제 DC특성은 식 (1) 및 (2)에서 가정한 임계상태모델과는 달리 임계전류부근에서 전압의 수직상승 특성은 보이지 않고 비교적 완만한 특성을 보이며[5], 이러한 고온초전도체의 비선형적인 DC특성을 고려하기 위해서는 수치해석의 도입은 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 먼저 2차원의 지배방정식 및 고온초전도체의 실제 DC특성을 잘 기술하는 비선형 전도도( $\sigma$ ) 모델을 사용하였으며, 이들은 식 (3) 및 (4)로 각각 나타낼 수 있다[6,7].

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} (\nabla A_z) = -\sigma(E_z) [\nabla V]_z - \sigma(E_z) \frac{\partial A_z}{\partial t}, \quad (3)$$

$$\sigma(E_z) = \frac{E_z^n}{E_c^n} J_c, \quad (4)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율,  $A_z$ 는 고온초전도체에서 자기벡터포텐셜의 z성분, n은 고온초전도체의 고유한 DC V-I 특성데이터로부터 결정되는 값 (n-value),  $E_z$ 는 전계벡터의 z성분, V는 스칼라전위,  $E_c$ 는 임계전계로서 1  $\mu$ V/cm, 그리고  $J_c$ 는 고온초전도체 코어에서 임계전류밀도를 각각 나타낸다.

### 3. 실험 샘플 및 방법

표 1에는 본 연구를 위해 제작된 원통형케이블 샘플 및 다각형케이블 (10각 및 6각 케이블) 샘플에 대한 주요사양을 각각 나타내었으며, 특히 10각 케이블 샘플의 경우는 그 직경을 고창시험장에서 운전 중인 고온초전도케이블의 도체 직경 (약 16 mm)과 거의 유사한 직경으로 준비하였다. 특히 10각-케이블 샘플의 경우는 고온초전도선재의 단면적은 유사하지만 임계전류가 약 5배정도 차이가 나는 상이한 특성의 고온초전도선재를 사용하여 준비하였다.

그림 1에는 표 1에서와 같이하여 제작된 원통형 및 다각형 (10각 및 6각) 케이블 샘플에 대한 단면도를 각각 나타내었다. 특히 다각형케이블의 경우는 각수에 따른 고온초전도선재의 가장자리 부분에서 선재 테이프 면에 수직인 자장이 케이블 교류손실특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 10각 (deca-cable) 및 6각 (hex-cable) 케이블을 각각 준비하였다.

표 1. 단층케이블 샘플의 주요사항.

Table 1. Specifications of the single-layer cable samples.

低 $J_c$ 선재	Bi-2223/Ag/Stainless	27 %/43 %/30 %
	폭 × 두께 코아의 폭 × 두께 필라멘트의 수	4.1 mm×0.3 mm 3.7 mm×0.26 mm 37
高 $J_c$ 선재	Bi-2223/Ag/Stainless	38 %/40 %/22 %
	폭 × 두께 코아의 폭 × 두께 필라멘트의 수	4.1 mm×0.21 mm 3.9 mm×0.15 mm 55
원통형 케이블	Bi-2212벌크 내·외 직경	100 % 21.8 mm×25 mm
10각-케이블 (低 $J_c$ 선재)	포머의 직경 선재의 수	11.9 mm 10본
10각-케이블 (高 $J_c$ 선재)	포머의 직경 선재의 수	12.6 mm 10본
6각-케이블 (高 $J_c$ 선재)	포머의 직경 선재의 수	6 mm 6본

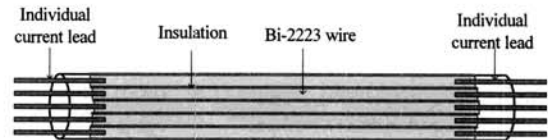


그림 2. 다각형케이블 샘플에서 전류리드에 대한 개략도.

Fig. 2. Schematic of the current lead in the polygonal cable samples.

다른 상황이 되어 버린다. 따라서 실제의 고온초전 전도케이블시스템에서의 전류분포특성을 감안하여 교류손실특성 평가 시, 각각의 선재에 동일한 전류가 흐르도록 하기위하여 그림 2에서 보는 바와 같이 각각의 선재를 먼저 절연한 후, 이들 각각에 개별전류리드 (individual current lead)를 부착하고 이들을 다시 직렬로 접속하여 다각형케이블 샘플의 각종 특성을 시험하였다.

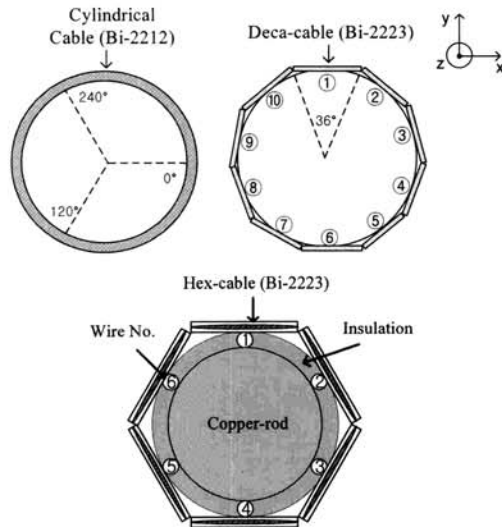


그림 1. 원통형 및 다각형 케이블 샘플의 단면도.

Fig. 1. Cross-sectional view of the cylindrical and polygonal cable samples.

그림 2에는 다각형케이블 샘플의 시험에 사용된 전류리드에 대한 개략도를 나타내었다. 다수본의 고온초전도선재로 제작된 케이블 샘플의 경우, 특히 길이가 수십 cm정도로 짧게 되면 각각의 선재에 흐르는 전류의 크기뿐만 아니라 위상까지도 상이하게 되어 거의 균일한 전류분포특성을 지니는 수백 m이상의 실제 고온초전도케이블시스템과는

#### 4. 결과 및 고찰

식 (4)의 비선형 전도도모델에서 보는 바와 같이 전도도는 고온초전도체의 DC V-I 특성데이터로부터 결정되는 임계전류밀도 ( $J_c$ ) 및  $n$ -value에 의존함을 알 수 있다. 따라서 이들 인자들이 식 (3) 및 (4)의 수치해석 결과에 미치는 민감도를 먼저 이론적 관점에서 조사하였다. 또한 이들 이론결과와 비교검토를 위하여 현 단계에서 가장 잘 규명되어 있는 1본의 고온초전도선재에 대한 자기자기손실을 그 검토 대상으로 하였으며, 실험에 사용된 고온초전도선재 (테이프: 3.1 mm×0.17 mm, 코아: 3.0 mm×0.11 mm)는 본 연구의 실험 온도인 77 K에서 임계전류가 76 A였다. 그림 3에는 이들 이론적 및 실험적인 결과를 각각 나타내었다.

그림 3에서 보는 바와 같이 고온초전도선재의 DC V-I 특성데이터 ( $I_c=76$  A,  $n=20.8$ )를 고려하여 계산된 수치해석 결과는 동일 선재에 대하여 측정된 자기자기손실과 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한  $n$ -value (5 ~ 20사이)는 수치해석 결과에 그다지 영향을 못 미치는 반면, 임계전류밀도는 비교적 커다란 영향을 수치해석 결과에 미치는 것을 알 수 있다. 이는 다수본의 고온초전도선재로 구성되는 고온초전도케이블의 교류손실에서 각 선재의  $n$ -value보다는 임계전류특성이 더욱 중요함을 의미한다.

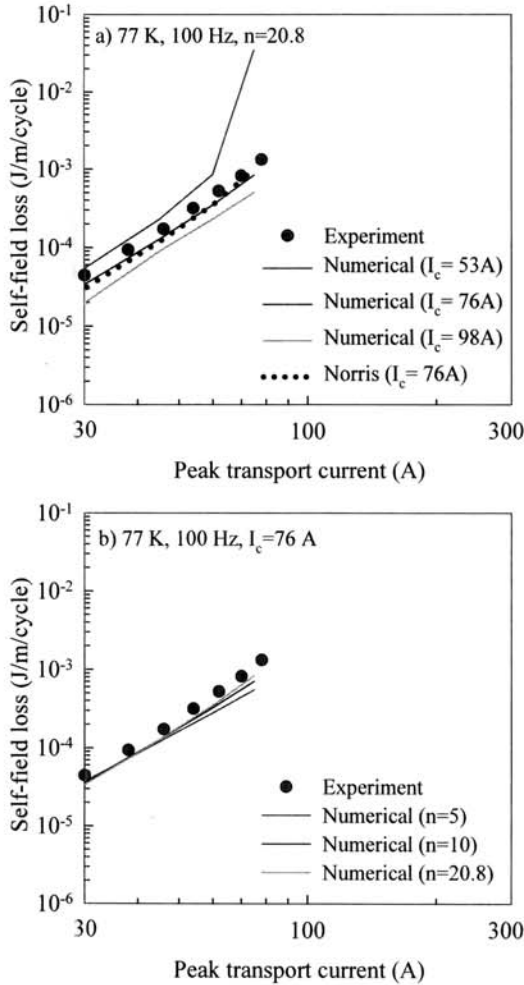


그림 3. 임계전류밀도 및 n-value가 고온초전도선재의 자기장손실 계산결과에 미치는 영향.  
 Fig. 3. Effect of critical current density and n-value on the numerically calculated self-field loss in the high temperature superconducting wire.

그림 4에는 표 1의 원통형케이블 샘플에 대하여 측정된 교류손실을 나타내었으며, 그림 4에서 ○, △ 및 □ 기호는 전압리드의 접촉위치를 각각 달리하여 측정된 결과를 나타낸다. 또한 식 (2)로부터 계산된 Momoblock손실뿐만 아니라 그림 1에서 원통형케이블의 단면도와 측정된 DC V-I 특성 데이터 ( $I_c=1495$  A,  $n=8.5$ )를 사용하여 계산된 수치해석 결과도 함께 나타내었다.

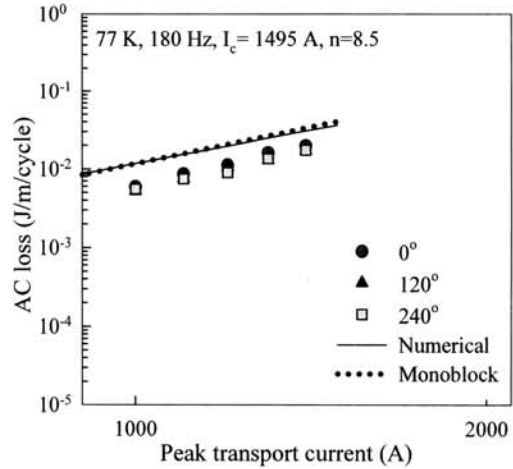


그림 4. 원통형케이블 샘플의 교류손실 특성.  
 Fig. 4. AC loss characteristic of the cylindrical cable sample.

그림 4로부터 두 이론적인 손실인 Momoblock 손실과 수치해석 결과는 비교적 잘 일치하는 반면 측정된 교류손실과는 다소 불일치하는 것을 볼 수 있다. 이의 한 원인으로서는 원통형케이블 단면에서 임계전류밀도가 불균일한 결과를 들 수 있다.

그림 5에는 표 1의 저임계전류밀도 특성을 지닌 고온초전도선재를 사용하여 제작된 10각-케이블 샘플에 대하여 측정된 선재 (No. 1/3/5/7/9)의 임계전류 및 n-value를, 또한 측정된 교류손실을 선재 1본으로 환산하여 각각 나타내었다. 그림 5(b)에서 각각의 기호는 그림 4에서처럼 전압리드의 접촉위치를 각각 달리하여 측정된 결과를 나타내며, 또한 식 (2)의 Momoblock손실 및 그림 1에서 10각-케이블의 단면도와 그림 5(a)의 특성데이터를 평균한 값 ( $I_c=23.4$  A,  $n=10.8$ )을 사용하여 계산된 수치해석 결과도 함께 나타내었다.

그림 5(a)로부터 선재의 측정된 임계전류 및 n-value는 비교적 균일하여 어떠한 값을 사용하더라도 교류손실에 대한 수치해석 결과에는 크게 영향을 주지 못함을 알 수 있다. 또한 식 (2)의 Momoblock손실은 수치해석 결과보다 작으며, 저임계전류밀도 선재로 된 10각-케이블의 측정된 손실과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

그림 6에는 그림 5에서 사용된 선재와 사이즈는 유사하지만 임계전류가 약 5배 큰 선재를 사용한 10각-케이블 샘플에 대하여 측정된 임계전류, n-value 및 교류손실을 각각 나타내었다. 물론 수

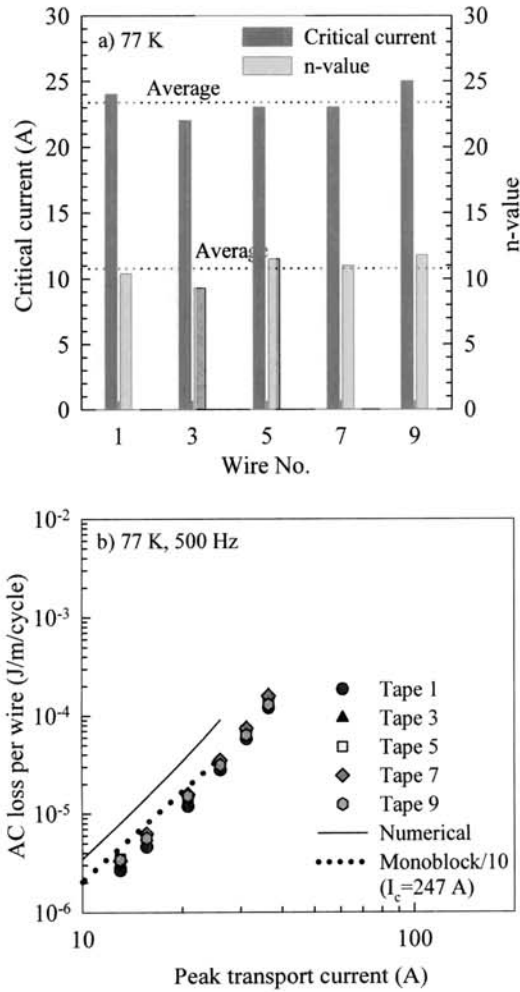


그림 5. 저임계전류밀도 선재로 된 10각-케이블 샘플의 교류손실 특성.  
 Fig. 5. AC loss characteristic of the deca-cable sample composed of the low critical current density wires.

치 해석 시는 그림 5에서처럼 그림 6(a)의 특성 데이터를 평균한 값 ( $I_c=125$  A,  $n=13.8$ )을 사용하였다. 그림 6(a)로부터 측정된 임계전류는 그림 5에서처럼 비교적 균일한 반면, n-value는 선재에 따라 매우 의존하고 있지만, 그림 3(b)에서 보는 바와 같이 n-value가 2배이상 차이가 남에도 불구하고 수치해석 결과에는 그다지 영향을 주지 못한다는 사실로부터 그들의 평균값을 사용하게 되었다. 또한 고임계전류밀도 선재로 된 10각-케이블의 측정된 손실은 그림 5(b)와는 달리 특히 큰 전류

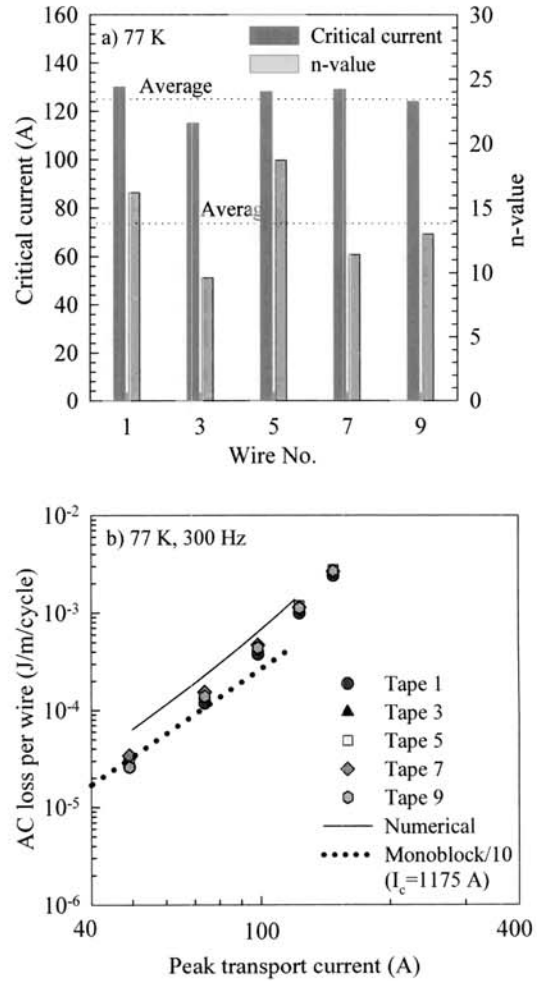


그림 6. 고임계전류밀도 선재로 된 10각-케이블 샘플의 교류손실 특성.  
 Fig. 6. AC loss characteristic of the deca-cable sample composed of the high critical current density wires.

영역에서 수치해석 결과에 근접하는 것을 볼 수 있다. 그림 7에는 그림 6에서 사용된 선재를 사용하여 본수만 줄인 6각-케이블 샘플에 대하여 측정된 교류손실을 나타내었다. 물론 수치해석 시에 사용된 특성데이터는 그림 5 및 6에서처럼 평균값 ( $I_c=127$  A,  $n=20$ )을 사용하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 고임계전류밀도 선재로 된 6각-케이블의 측정된 손실은 그림 6(b)와 달리 전 전류영역에서 Monoblock손실보다 수치해석 결과에 근접하는 것을 볼 수 있다.

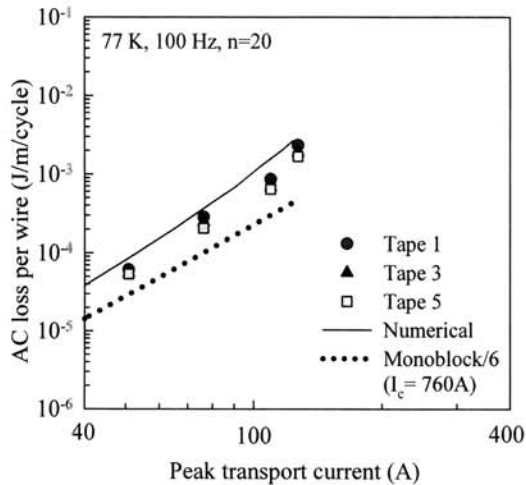


그림 7. 고임계전류밀도 전재료 된 6각-케이블 샘플의 교류손실 특성.

Fig. 7. AC loss characteristic of the hex-cable sample composed of the high critical current density wires.

### 5. 결론

고온초전도체의 실제 DC특성인 비선형 전도도 모델을 사용한 수치해석 결과와의 비교검토를 위하여 구조가 간단하여 측정된 교류손실을 충분히 신뢰할 수 있는 1본의 고온초전도선재와 이들 다수본을 원통형상으로 배열한 단층케이블 샘플들을 제작하여 각각의 교류손실을 평가하였다. 이들 이론적 및 실험적 결과에 대한 검토결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 1본 고온초전도선재에 대한 수치해석 결과는 선재의 측정된 자기자계손실과 잘 일치한다.
- 2) 특히 수치해석 결과에 비교적 큰 영향을 미치는 임계전류밀도가 낮은 원통형케이블 및 10각-케이블 (그림 5) 샘플에 대한 수치해석 결과는 이들 샘플의 측정된 교류손실보다 큰 것을 알 수 있다.
- 3) 반면 임계전류밀도가 비교적 큰 10각-케이블 (그림 6) 및 6각-케이블 샘플에 대한 수치해석 결과는 측정된 교류손실과 비교적 잘 일치하지만, 10각-케이블의 경우에 한해서 특히 작은

전류영역에서 이들 둘 사이의 차가 커지는 것을 알 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 지식경제부와 한국전력공사의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] T. Masuda, H. Yumura, and M. Watanabe, "Recent progress of HTS cable project", *Physica C: supercond.*, Vol. 468, p. 2014, 2008.
- [2] S. H. Sohn, H. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, S. W. Yim, T. Masuda, K. Yatsuka, M. Watanabe, H. S. Ryoo, H. S. Yang, D. L. Kim, and S. D. Hwang, "Field test of 3 phase, 22.9 kV, 100 m HTS cable system in KEPCO", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 15, No. 2, p. 1611, 2005.
- [3] W. T. Norris, "Calculation of hysteresis losses in hard superconductors carrying ac: isolated conductors and edges of thin sheets", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 3, p. 489, 1930.
- [4] G. Vellego and P. Metra, "An analysis of the transport losses measured on HTSC single-phase conductor prototypes", *Supercond. Sci. Technol.*, Vol 8, p. 476, 1995.
- [5] 이주영, 마용호, 류경우, 최세용, 김해중, "경사 외부자장에 대한 600 kJ급 SMES용 HTS도체의 DC V-I 특성", *전기전자재료학회논문지*, 21권, 1호, p. 79, 2008.
- [6] Y. H. Ma, Z. Y. Li, K. Ryu, S. Choi, K. B. Park, I. S. Oh, H. J. Song, and G. Cha, "AC loss characteristics of a cylindrical high temperature superconductor", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 17, No. 2, p. 3140, 2007.
- [7] S. Choi, W. Nah, J. H. Kim, J. Joo, Y. H. Jo, and K. Ryu, "AC transport current loss of horizontally attached Bi-2223/Ag tapes", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, Vol. 14, No. 2, p. 1894, 2004.