

## The Characteristics of Current Distribution and Electrical Insulation on High-Tc Superconducting Cable

金榮錫\* · 郭東洵\*\* · 韓哲洙\* · 金相賢\*\*\* · 兵島高太郎§

(Young-Seok Kim · Dong-Soon Kwag · Chul-Soo Han · Sang-Hyun Kim · Takataro Hamajima)

**Abstract** - It is important to control layer current distributions of coaxial multi-layer HTS cables, because a homogeneous layer current distribution decreases AC loss and can supply the largest operational current. We have extended the theory that treat the operational current more than the critical current by considering V-I nonlinear characteristics of HTS tapes including flux flow resistance and contacting resistance between the cable and terminals. It is important to investigate the current distribution under the condition of operational current more than the critical current of cable, because the cable has experiences of fault current. In order to verify the extended theory, we have fabricated a two layers cable with the same twisting layer pitch. It was observed that almost all the operational current less than the critical current flowed on the outer layer because of its lower inductance. In case of operational current more than critical currents of layers, the flux flow resistances affect strongly current waveform and thereby the currents of layers were determined by the flux flow resistances. And we investigated breakdown characteristics in LN<sub>2</sub>/paper composite insulation system for the application to a HTS cable. In this experiment, we got some information out of that the electrical characteristics of the insulation materials depends on the condition of butt gap.

**Key Words** : HTS cable, Current distribution, AC loss, Flux flow, Butt gap

### 1. 서 론

고온 초전도케이블은 미래에 대 도시의 전력수송으로 유망하기 때문에 각 국에서 실용화를 위해 개발연구가 정력적으로 이루어지고 있으며, 100m 규모의 시험케이블의 성능시험이 개시되기 시작했다[1-6]. 고온 초전도 케이블은 도체, 도체를 둘러싼 절연부 그리고 극저온 냉매로 구성되어 있으며, 실제 케이블에 적용되기 위해서는 도체 부의 교류손실 저감과 고전압 송전에 따른 전기절연에 관한 연구는 불가피하다[7][8]. 먼저, 케이블의 교류 손실 저감을 위해서는 케이블 각 층의 전류분포 균일화가 요구되며, 필자는 지금까지 임계전류 이하에서 Maxwell 방정식을 인접하는 층의 초전도 filament간에 쇄교하는 자속에 적용하여 쇄교자속의 보존이 성립하는 것을 제시했다. 또한 자속 보존 식을 이용하여 각 층의 전류분포를 지배하는 방정식을 케이블의 3가지 기본적인 구성 파라메타(twist pitch, twist 방향, 층 반경)의 함수로 해서 표시하는 것을 새롭게 구축했다. 또한 케이블 구성 파라메타와 전류분포의 관계를 수치적으로 구축하였고 2층과 3층의 케이블을 제작하여 시험결과를 통해 이를 증명

했다[9-12]. 그러나, 실제의 케이블에서는 단락 사고 등이 발생하여 임계전류이상으로 전류가 초과해서 흐르는 flux flow 상태로 되며, 이때의 케이블 상태에 관한 연구는 케이블 도체 부의 최적설계에 중요하다 하겠다.

고온 초전도 케이블의 절연구성은 액체질소와 적층 테이프의 복합절연계의 사용이 유력하며, 고온 초전도 케이블을 상정한 절연특성, 특히 절연파괴에 현상에 관한 연구가 절연설계상 중요하다고 생각된다[13][14]. 특히 고온 초전도 케이블에서는 적층 테이프 사이에 존재하는 butt gap 형상이 약점이 되어 부분 방전등에 의한 절연 내력의 저하를 가져오게 된다. 따라서 액체질소와 적층 테이프의 복합절연계에 대한 절연파괴 특성의 조사가 필요하다.

이와 같은 관점에서 본 논문에서는 Maxwell 방정식을 인접하는 층의 초전도 filament간에 쇄교하는 자속에 적용하고, 각 층의 전류가  $I_c$  이상의 경우에 대해서 성립하는 전류분포 지배방정식을 유도하였다. 그리고 실제에 2층의 초전도 케이블을 제작해서 구축한 전류분포 방정식의 당위성을 확인했다. 또한 고온 초전도 케이블의 절연물로 사용되는 재료에 관한 절연 특성을 조사하였으며, 액체 질소와 적층반 합성지 PPLP의 복합절연계를 구성하여 전기적 절연특성에 관해 연구하였다.

### 2. 시료 제작

먼저, 전류분포 파형을 조사하기 위해, 길이 1m, 2층 구조의 초전도케이블을 설계 제작하였다. 도체에 사용된 은

\* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 博士課程  
 \*\* 準 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 碩士課程  
 \*\*\* 正 會 員 : 慶尙大 工大 電氣工學科 教授 · 工學研究員  
 § 非 會 員 : 日本 山口大學 工大 電氣電子工學科 教授  
 接受日字 : 2002年 12月 17日  
 最終完了 : 2003年 4月 30日

피복 고온 초전도체는 폭 3.2mm, 두께 0.21mm 그리고 임계 전류 15A를 가진다. twist 방향은 각 층 모두 동일방향(S방향)으로 하고 도체의 twist pitch는 1층, 2층 모두 500mm로 한 편류 model 케이블을 제작하였다. 또한 각층의 초전도 선재의 수는 반경과 twist pitch에 관계하며, 각 층 모두 15개의 선재를 사용하였다. 제작된 도체의 설계 제원을 표 1에 나타낸다.

표 1 Bi-2223 선재 및 고온 초전도 케이블의 사양  
Table 1 Main parameters of Bi-2223/Ag tape and HTS cable.

Bi-2223/Ag tape Width / thickness Critical current	3.2 mm / 0.21 mm 15 A (1uV/cm criterion)	
2-layer HTS cable	1st layer	2nd layer
Former radius	11.1 mm	16.1 mm
Total length	970 mm	1010 mm
Twisting pitch	500 mm	500 mm
Twisting direction	S	S
Number of tapes	15	15
Critical current	225 A	225 A

2층 고온 초전도케이블 제작은 먼저, 초전도 선재를 twist pitch에 맞게 잘라낸 후, 배열하고 양면테이프를 사용하여 선재와 Kapton 시트를 밀착시켰다. 제작은 1층부터 순차적으로 구성했다. 1층은 원형 FRP former(두께 1.0mm)상 위에 선재와 Kapton 시트가 밀착된 것을 감았다. 또한 1층과 2층 사이에는 Rogowski coil의 삽입을 위해 약 4mm의 gap을 두었으며, 제작상의 오차를 줄이기 위해 고정재 수개를 삽입해서 제작하였다. 그리고 1층의 전류를 측정하기 위해 2개의 Rogowski coil을 삽입했다. 2층의 제작은 반으로 절단된 원통 FRP를 사용해서, 1층과 같은 방법으로 작업을 수행하였다. 또한 접촉저항의 영향을 적게 하기 위해 계단형태의 동 block을 제작하고 선재와 동 block의 접촉 면적은 15mm로 하였으며, 스테인레스 선으로 감은 후 납땀을 이용해서 고정하였다. 1층과 2층의 도체 길이는 각각 970mm, 1010mm 정도였다. 완성된 2층 초전도 케이블의 형상을 그림 1에 나타낸다.

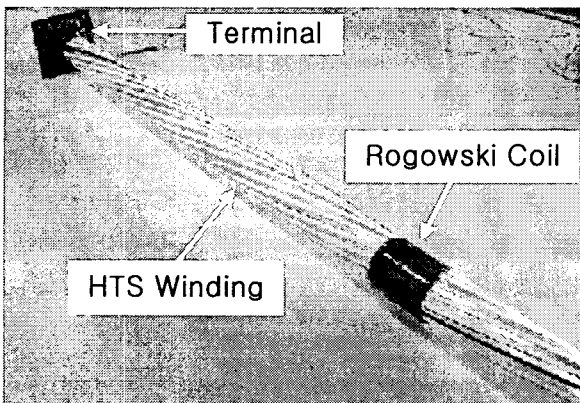


그림 1 완성된 2층 고온 초전도 케이블의 사진  
Fig. 1 Photograph of completed 2-layer HTS cable.

고온 초전도 케이블의 복합절연계에 대한 절연특성을 조사하기 위해 그림 2와 같은 butt gap 형상으로 제작하였다. 사용된 시료는 두께 0.12mm의 PPLP(Poly Propylene Laminated Paper)의 반합성지이다. 시료는 60mmφ의 원형상 시료로, 내부에 5mmφ로 절단하여 butt gap을 만들었다. butt gap의 형상은 hole의 위치에 따라 no-hole, upper hole, middle hole, lower hole의 4가지 형태로 하였다.

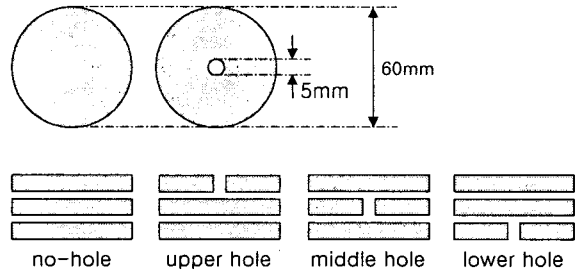


그림 2 Butt gap 형상  
Fig. 2 Shape of Butt gap

3. 실험장치 및 방법

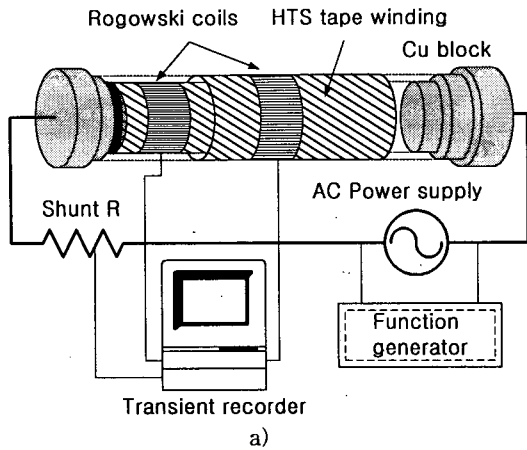
2층 고온 초전도케이블에 교류전류를 인가할 때의 측정회로의 개략도와 butt gap 형상에 따른 전기적 절연과파 특성 조사를 위한 전극계를 그림 3 a),b)에 나타낸다. 그림 3 a)의 경우의 제작된 2층 고온 초전도케이블은 단부를 포함해서 액체질소 내에 침적하였다. 교류전류는 shunt 저항을 이용해서 100~800A까지 인가하였으며, 주파수는 20~200Hz의 범위에서 시험했다. 또한 각 층의 전류는 Rogowski coil을 이용하여 transient recoder에서 측정하였다. 제 2층의 전류는 shunt에서 구한 전류와 Rogowski coil에서 구한 값을 비교하였습니니다. 또한 케이블과 return 전류의 busbar는 자기적 영향을 최소화하기 위해 충분한 거리를 두었다. 각 층의 전류분포 측정은 Rogowski coil을 이용하여 먼저 1층 케이블을 완성한 후에 통전 시험을 실행하였으며, 그 결과에 의해 Rogowski coil의 k값을 구하였다. 따라서 다음의 관계식으로부터 각 층의 전류를 구하였다.

$$I_1 \sim -k \int V_1 dt \tag{1}$$

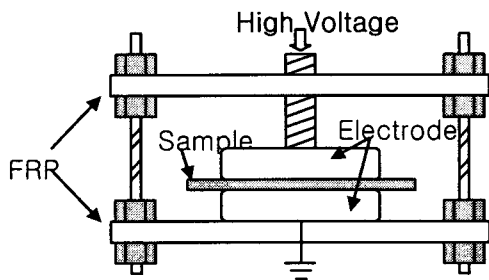
$$I_2 \sim -I_T - I_1 \tag{2}$$

여기서, k는 1/L을 나타내고 실험에서 구한 상수 값이며, I<sub>1</sub>은 1층 도체의 전류peak값, I<sub>2</sub>는 2층 도체의 전류 peak값 그리고 I<sub>T</sub>는 전체 통전 전류를 나타낸다. V<sub>1</sub>은 1층 Rogowski coil 출력 전압의 peak값을 나타낸다. 하지만, 위의 식은 통전 전류의 주파수가 일정한 정현파인 경우에 적용되며, 이외의 경우에는 1주기에 대한 적분으로 구할 필요가 있다.

그림 3의 b)는 복합계에 대한 절연 파괴 특성 조사를 위한 전극계이다. 전극은 스테인레스(SUS304)로서, 40mmφ의 평판전극과 40mmφ의 평판전극들을 사용하였다. 모든 전극의 표면은 0.1μm 이하로 경면 처리하였으며, 전극계의 holder는 극저온 특성과 내구성이 뛰어난 FRP를 사용하였다. 또한 butt gap 형상의 시료를 평판-평판 사이의 전극계



a)



b)

그림 3 실험장치 개략도 및 전극계 형상

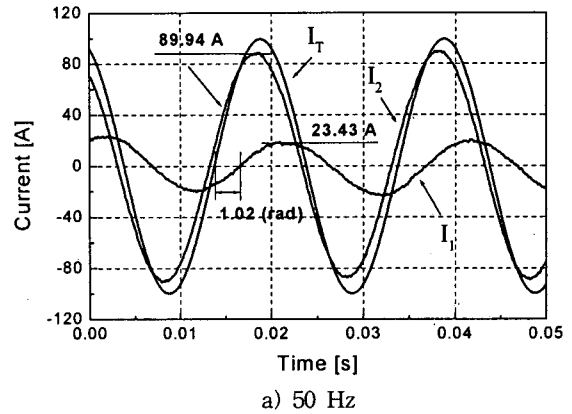
Fig. 3 The schematic drawing of experimental setup and electrode system.

에 삽입하여 전압을 인가하였다. 고전압의 인가는 상승속도 1kV/s로 하였으며 액체질소 속에서 충분히 침적하여 냉각시킨 후, 절연파괴 특성 실험을 하였다. 측정 전압 값은 시료 당 10회 이상 실시하여 50%의 파괴 값을 채택하였다.

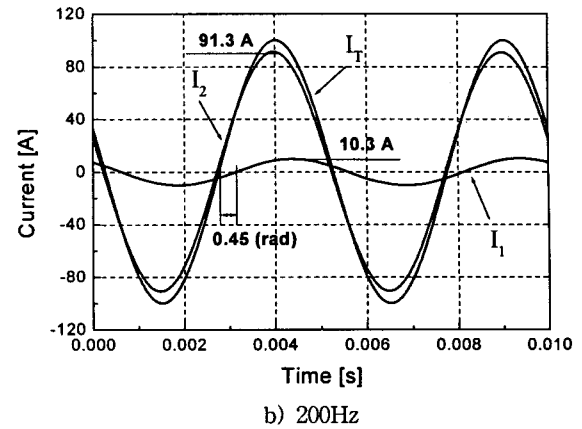
### 3. 실험결과 및 검토

2층 고온초전도 케이블에 주파수 20~200Hz, 통전 전류 100~800A까지 변화시켰을 때의 전체전류에 대한 각 층의 전류 파형을 구하였다. 이때의  $I_c$ 는 각 층의 임계전류,  $2I_c$ 는 케이블 전체의 임계전류를 표시한다.

그림 4 a), b)에 주파수 50 Hz, 200Hz에서 통전 전류( $I_T$ ) 100A에 대한 각 층의 전류분포 파형을 나타낸다. 그림으로부터 전류는 1층보다 2층에 많이 흐르고 있는 편류현상과 1층의 위상이 2층보다 늦게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 좀더 상세하게 보면, a)의 경우, 각 층의 전류 peak값이 23.43A, 89.94 A로서 위상은 전체 전류로부터 어긋나서 1층이 1.02(rad)정도 늦고, 2층이 0.22(rad) 앞서는 것을 알 수 있고 b)의 경우는 전류 peak값이 10.3A, 91.3A, 위상은 1층이 0.45(rad) 늦고, 2층은 0.063(rad)앞서고 있는 것을 알 수 있다. 그래서, 주파수가 증대하는 것에 따라서 1층과 2층의 전류 peak값의 비가 크게 된다. 또한 위상의 어긋남도 주파수가 증가에 의해 줄어들게 된다. 이것은 주파수가 높게 되면, 케이블의 리액턴스가 크게 되기 때문에 편류현상이 크게 되는 것을 알 수 있다. 그리고 상대적으로 접촉저항의 영향이 적게 되어 위상도 줄어드는 것을 알 수 있다.



a) 50 Hz



b) 200Hz

그림 4  $I_T < I_c$ 의 경우, 불 균일 2층 초전도 케이블의 전류 분포 파형

Fig. 4 In case of  $I_T < I_c$ , Current distribution waveform of inhomogeneous 2-layer HTS cable.

통전 전류가  $I_c$ 와  $2I_c$ 의 사이에 있는 경우에서의 주파수 50Hz에 의한 각 층의 전류분포 파형을 그림 5에 나타낸다. 그림으로부터 각 층의 전류는 파형의 찌그러짐과 위상의 차이도 관측되었다. 제 2층이 먼저 임계전류  $I_c$ 이상이므로 도달하고, 이 부근으로부터 제 1층의 전류가 급격하게 증가하는

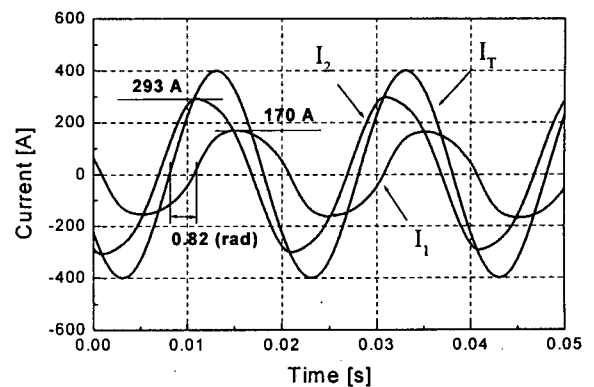


그림 5  $I_c < I_T < 2I_c$ 의 경우, 불 균일 2층 초전도 케이블에서 전류분포 파형

Fig. 5 In case of  $I_c < I_T < 2I_c$ , Current distribution waveform of inhomogeneous 2-layer HTS cable.

것을 알 수 있다. 전체 전류가 최대 값으로부터 감소하기 시작하면, 제 2층의 전류로부터 먼저 감소하기 시작하는 형태를 관찰 할 수 있다. 그리고 50Hz에서의 각 층의 전류 peak 값은 170A:293A정도이며, 위상은 제 2 층의 케이블이 Ic에 도달하는 까지의 시간으로 결정되어진다.

통전 전류가 2Ic 이상의 경우에서의 주파수 50Hz에 대한 각 층의 전류 파형을 그림 6에 나타낸다. 각 층의 전류는 모두 임계 전류값 이상으로 도달하고 파형의 찌그러짐 현상이 관측된다. 그림 5의 결과와 같이 제 2층이 먼저 Ic에 도달하고, 계속해서 제 1층이 Ic에 도달한다. 통전전류가 Ic를 초과하면, 각각의 층은 flux flow 상태로 되고 통전전류의 peak값에서는 저항이 발생하며, 제 1층과 제 2층은 거의 같은 전류 peak값을 가지게 된다. 하지만, 상세하게 관찰하면, flux flow 상태의 전류 peak값이 약간 다른 것을 알 수 있다. 이것은 고온 초전도 케이블 제 2층의 길이가 길기 때문에 제 2층의 저항이 크게 되고 전류가 적게 흐른다고 사료되어진다.

실험결과와의 비교를 위해 이미 보고된 논문[1]에 기초해서 임계전류 이상에서 적용할 수 있는 해석방법으로 고온 초전도선의 비 선형 V-I특성을 고려한 전류분포의 시뮬레이션을 검토했다.

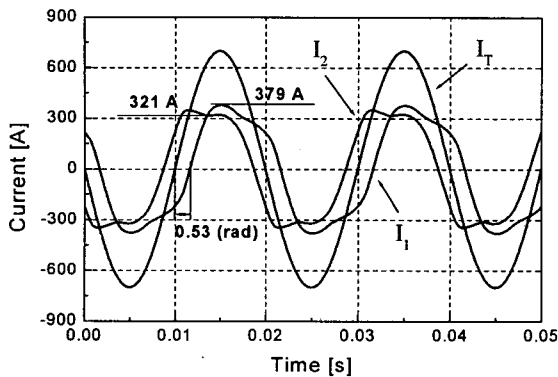


그림 6  $I_T > 2I_c$ 의 경우, 불 균일 2층 고온 초전도 케이블에서 전류분포 파형

Fig. 6 In case of  $I_T > 2I_c$ , Current distribution waveform of inhomogeneous 2-layer HTS cable.

Maxwell의 방정식을 인접하는 층의 초전도 filament의 사이에 쇄교하는 자속에 적용하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\oint E \cdot dl \sim - \frac{\partial \Phi_T}{\partial t} \quad (3)$$

이때, 좌변(Left Hand Side)은 다음 식으로 주어질 수 있다.

$$LHS \sim -R_k i_k(t) - R_{k+1} i_{k+1}(t) \sim \dots (k=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

여기서,  $R_k i_k(t) \sim -R_{c,k} i_k + (V_c / I_c^n) i_k^n$  (5)

이다. 다만, 제 1항의 Rc는 접촉저항, 제 2항은 초전도도체의 전류전압특성을 표시하고, Vc는 기준전압인 10-4V/m, Ic는 임계전류, n은 지수를 표시한다. 또한, 쇄교 자속은 본 연구에서 제작하는 다층초전도 케이블이 실제의 케이블같이 충분한 길이를 가지지 않기 때문에, 케이블 유한길이에 의한

단부로부터의 효과 및 각층의 충분하지 않은 초전도 테이프로 구성되기 때문에 누설자속을 고려할 필요가 있는 경우에는 다음 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \Phi_T \sim & -\mu_0 L_s \left[ \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{r_{k+1}}{r_k} \right) \right] \left[ \sum_{j=1}^k i_j (1 - d_{k,j}) + \sum_{j=k+1}^n i_j d_{k,j} \right] \\ & + \mu_0 L_s \sum_{j=1}^k \left\{ \frac{\epsilon_k (1 - g_{k,j})}{L_k} - \frac{\epsilon_{k+1} (1 - g_{k+1,j})}{L_{k+1}} \right\} \pi r_j^2 \left( \epsilon_j \frac{I_j}{L_j} \right) \\ & + \mu_0 L_s \sum_{j=k+1}^n \left\{ \frac{\epsilon_k (1 - g_{k,j})}{L_k} \pi r_k^2 \right. \\ & \left. - \frac{\epsilon_{k+1} (1 - g_{k+1,j})}{L_{k+1}} \pi r_{k+1}^2 \right\} \left( \epsilon_j \frac{I_j}{L_j} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, rk는 층의 반경, Lk는 twist pitch,  $\epsilon_k$ 는 twist 방향으로 S의 경우는 -1, Z의 경우는 1로 주어진다. 또한, 케이블이 충분한 길이를 가지는 무한장으로 간주하고 선재의 폭이 넓은 1개의 선재로 구성되며, 층내의 전류분포가 균일하다고 생각되는 경우에는  $dk_{j,k}$ 와  $g_{k,j}$ 는 0으로 된다. 그리고 각 층의 시간적인 전류 파형을 검토하는 것은 Runge-Kutta 방법을 이용해서 구하였다. 실험결과와 비교하기 위해, 실험에서 얻어진 접촉저항인 1층 1 $\mu\Omega$ , 2층 5 $\mu\Omega$ 와 n=12값 등을 유도된 식 중에 도입하여 계산하였다. 또한, 2층 구성의 재원에 기초해서 Vector potential로부터 정확한 쇄교 자속을 구하고, 보정계수를 계산하면,  $dk_{j,k}$ 와  $g_{k,j}$ 는  $d11 = -7.2 \times 10^{-4}$ ,  $d12 = -7.98 \times 10^{-4}$ ,  $g11 = 2.06 \times 10^{-3}$ ,  $g12 = 3.77 \times 10^{-3}$ ,  $g22 = 8.85 \times 10^{-3}$ 을 얻을 수 있다. 이것을 이용해서 각층의 전류분포의 시뮬레이션을 수행했다.

통전 전류가 Ic 이하의 영역에서 주파수 50Hz에 의한 전류 파형의 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타낸다. 그림 4의 실험결과와 동일하게 제 2층에 전류가 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 이것을 그림 4와 비교하면, 제 1층과 2층의 전류 peak값은 각각 21.6A, 87.3A로서 실험결과와 거의 같은 값을 나타내었다. 또한 전체 전류로부터 1층과 2층의 위상도 각각 0.85(rad) 늦고, 0.17(rad) 앞서는 것에서 실험결과도 거의 동등했다. 통전 전류가 Ic와 2Ic사이의 영역에서의 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타낸다. 그림으로부터, 제 2층이 먼저 임계전

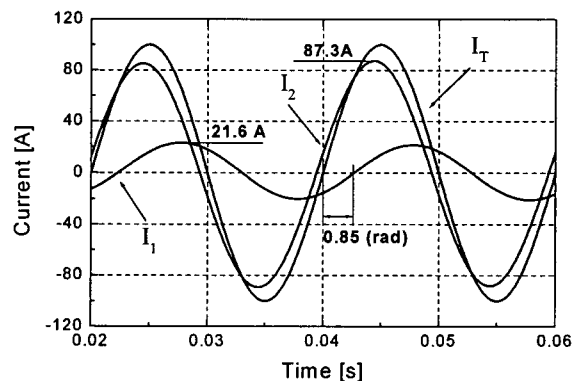


그림 7  $I_T < I_c$ 인 경우, 불균일 2층 고온 초전도 케이블에서 전류분포 파형의 시뮬레이션 결과

Fig. 7 In case of  $I_T < I_c$ , simulation results of current distribution waveform in inhomogeneous 2-layer HTS cable.

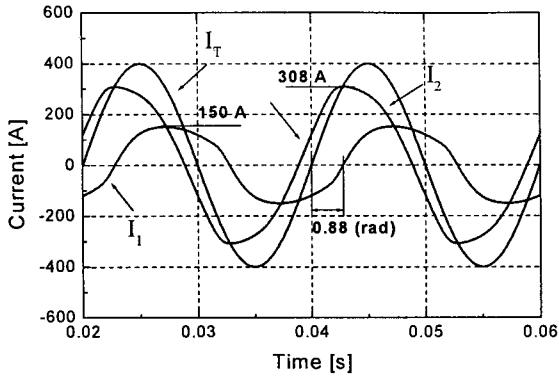


그림 8  $I_c < I_T < 2I_c$ 인 경우, 불 균일 2층 고온 초전도 케이블에서 전류분포 파형의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 8 In case of  $I_c < I_T < 2I_c$ , simulation results of current distribution waveform in inhomogeneous 2-layer HTS cable.

류 값에 도달하고, 다음에 제 1층의 전류가 급격하게 증대하는 것을 알 수 있다. 그리고 flux flow 저항이 생기는 것에 의해 파형이 찌그러짐이 나타나고, 위상차도 관측되었다. 이 결과도 실험결과와 거의 일치하고 그 peak값도 일치하는 것을 알 수 있다.

통전 전류가  $2I_c$ 이상의 영역에서의 시뮬레이션 결과를 그림 9에 나타낸다. 이 경우도 각 층의 전류 파형은 찌그러지

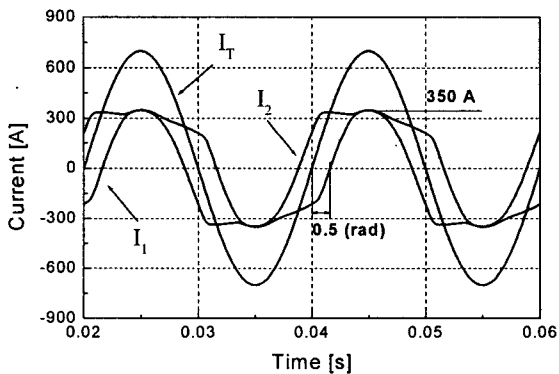


그림 9  $I_T > 2I_c$ 인 경우, 불 균일 2층 고온 초전도 케이블에서 전류분포 파형의 시뮬레이션 결과  
 Fig. 9 In case of  $I_T > 2I_c$ , simulation results of current distribution waveform in inhomogeneous 2-layer HTS cable.

고 임계전류  $I_c$ 를 초과해서 각층은 flux flow 상태로 되고 저항이 나타나며 제 1층과 제 2층의 전류 peak값은 거의 동일하게 나타났다. 하지만, 그림 6의 실험결과의 전류의 peak값과 이론 값이 약간의 차이가 나타난다. 이 오차에 대해서는 이후 검토할 예정이다. 이상으로부터,  $I_c$  이상에서 성립하는 전류분포 지배방정식의 타당성을 확인하였다.

그림 10은 반 합성지인 PPLP의 적층에 따른 AC 절연 파괴전계 값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 적층수에 따른 절연파괴 전계는 적층되는 횟수가 증가함에 따라 저하하며, 절연파괴 전계값(EBDS)은 식(7)과 같이 되었다.

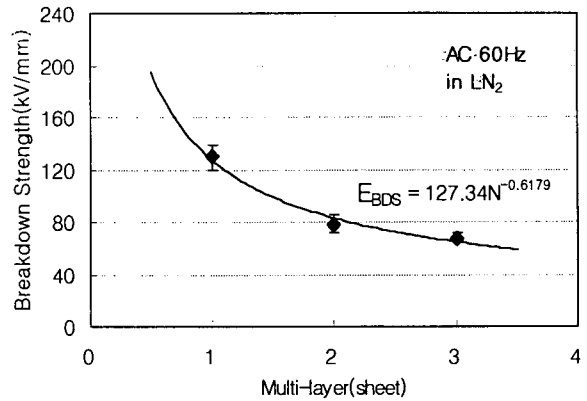


그림 10 적층 시 절연파괴 전계.  
 Fig. 10 Breakdown strength of multi-layers.

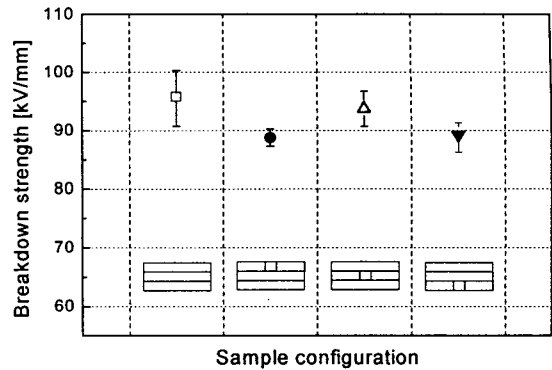


그림 11 Butt gap 형상에 따른 절연파괴 효과  
 Fig. 11 Effect of breakdown strength as butt gap shape.

$$EBDS = 127.34 N^{-0.6179} [kV/mm] \quad (7)$$

또한 고온 초전도 케이블의 절연시험으로 butt gap 형상에 따른 절연파괴 특성을 그림 11에 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 butt gap이 없는 시료의 경우가 절연파괴 전압이 가장 높게 나타났다. 또한 butt gap이 있는 3가지의 경우에는 middle hole 시료의 경우가 다른 두 가지 경우보다 절연파괴 전압이 약게 높게 나타났으며, upper hole과 lower hole의 시료의 경우는 전극과 접촉한 hole 부분의 void에 의한 부분방전의 발생과 연면방전에 의해 약게 낮게 나타났고 사료된다.

그림 12에 upper hole 상태에서 압력에 따른 절연파괴를 나타낸다. 그림에서 압력을 증가시킬수록 절연파괴 전계값이 점점 높게 나타남을 알 수 있다. 압력이 가해지지 않은  $0 \text{ kg/cm}^2$  상태에서는 butt gap에 액체질소의 침투가 일어나지 않아 void가 존재하므로 절연파괴 전계값은 낮게 나타났으며, 압력을 가했을 경우에는 서서히 butt gap에 액체질소의 침투가 이루어짐으로 해서 절연지와 액체질소와의 복합 절연 층이 형성되어 그 절연파괴 전계값이 높아지는 것으로 사료된다.

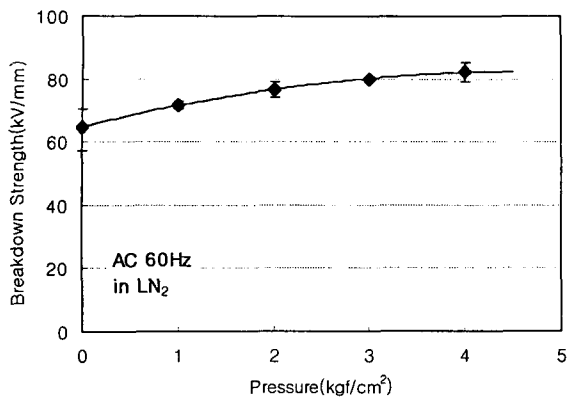


그림 12 Butt gap의 압력에 따른 절연파괴전계.  
Fig. 12 Breakdown strength of pressure on butt gap.

5. 결 론

본 연구에서는 실제에 케이블이 경험하는 전체 전류영역에 대해서 성립하는 Maxwell 방정식을 인접 층 사이의 초전도 filament에 쇄교하는 자속에 적용하는 것에 의해, 각 층의 전류분포의 시간적인 거동을 지배하는 방정식을 구축했다. 또한 각 층의 전류 파형을 조사하기 위해서 2층 구성의 케이블을 제작해서 flux flow 영역까지의 전류를 인가하여 실험을 수행하였다. 결과로부터, 동일한 twist pitch로 케이블이 구성되었기 때문에, 외층인 제 2층에 전류가 집중하는 편류 현상을 관측할 수 있었다. 케이블의 각 층의 전류가 임계전류값 이상으로 흐르면, 먼저, 2층 케이블에서 flux flow 상태가 되어 파형이 찌그러지고 위상 차가 발생하였다. 그리고 각 층 모두 임계전류값 이상으로 흐르게 되면 각 층의 전류 peak값은 거의 균일화하는 것을 알 수 있었다. 구축한 이론에 기초해서, 실험에서 얻어진 접촉저항을 도입하는 것에 의해 각층의 전류 파형을 시뮬레이션 하였으며, flux flow 영역에 이르는 전 영역에 대해서 실험결과와 잘 일치하는 것을 정량적으로 확인했다. 구축한 이론은 케이블 구성 파라미터를 이해하기 쉽고 케이블의 최적화 설계에 유효할 것으로 사료된다. 반 합성지인 PPLP 시료를 1~3장까지 적층하여 액체질소 중에서의 AC 절연파괴전압을 측정 한 결과 적층되는 횟수가 증가함에 따라 그 절연파괴 전계값은 줄어들었다. 복합절연방식으로 고온초전도 케이블의 절연을 할 때 생기는 butt gap의 특성실험에서는 압력을 증가시킴으로써 해서 부분 방전의 흔적이 현저히 줄어들었고 butt gap 내부에 존재하던 void가 액체질소로 채워지면서 그 절연내력도 증가하였다. 또한 butt gap 상태에서의 절연파괴 특성은 hole의 위치에 따라 약간의 절연파괴 전압값의 차이가 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 이 연구는 2002년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] 兵島高太郎ら: "超傳導導体内の電流分布解析", 低溫工學 35 pp.176-183, 2000.
- [2] C.Ramussen et al, "Design of a termination for a high temperature superconducting power cable", IEEE Trans. Appl.Supercond. Vol.9, No.2 pp.1273~1276, 1999.
- [3] 本庄昇一ら, "100m 超電導ケーブル實用性檢証試験の概要", 低溫工學 36 pp. 242-248, 2001
- [4] M.Nassi, "HTS prototype for power transmission cables: recent results and future programmes", Supercond. Sci. Technol : 13 (2000) 460
- [5] N. Steve et al, "High temperature superconducting cable field demonstration at Detroit Edison", Physica C 354, pp.49~54, 2001.
- [6] 藤上純ら: 低溫工學 33 (1998) 121
- [7] S.K.Olsen et al, "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting prototype Cable Conductor", IEEE Trans. Appl. Supercond. 9(1999) 833
- [8] M.Nagao, et al, "Breakdown Strength of Ice-Paper Composite Insulation in LN<sub>2</sub>", Proceeding of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xian. China, pp. 67-70, June 2000.
- [9] M.Tsuda, et al. : "Homogeneous Current Distribution in a Coaxial Superconductor with and without Return Current Path", IEEE Trans. Appl. Supercond. 11 pp.2481-2484, 2001.
- [10] A.K.M.ALAMGIRら: 同軸多層超傳導導体の均一分布に関する實驗", 低溫工學 36 pp.10-15 2001
- [11] Youngseok. Kim et al, "Analysis of Current Distribution on Multi-layer HTS Conductor Considering V-I Characteristics of HTS Tape", 平成14年電氣學會全國大會 5-019
- [12] 金榮錫ら: Flux flow狀態を考慮した同軸多層高溫超電導ケーブルの電流分布波形", 低溫工學 38 pp.54-61 2003
- [13] 前田洋秀ら, "液體窒素/FRP複合系における熱的氣泡存在下の部分放電開始特性", 電學論A, 118券6号, 平成 10年
- [14] Hiroshi Suzuki et al, "Dielectric Insulation Characteristics of Liquid-Nitrogen-Impregnated Laminated paper-Insulated Cable", IEEE Trans.Power Delivery, Vol. 7, No. 4, 1992.

저 자 소 개



김영석 (金榮錫)

1974년 4월 27일생. 1996년 경상대학교 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 박사과정 수료. 2001년 일본 야마구치 대학 외국인 연구자.

Tel: 055-751-5345 Fax: 055-759-2723  
E-mail : athens9@hanmail.net



곽동순 (郭東洵)

1975년 9월 8일생. 2002년 경상대학교 전기공학과 졸업. 2003년 3월~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel: 055-751-5345 Fax: 055-759-2723  
E-mail : kds3868@empas.com



한철수 (韓哲洙)

1947년 10월 18일생. 1973년 단국대학교 졸업. 1987년 울산대학교 대학원 졸업(석사). 2001년~현재 경상대학교 대학원 박사과정, 울산공고 교감

Tel: 052-273-1417 Fax:  
E-mail : arimhan@hanmail.net



김상현 (金相賢)

1950년 2월 7일생. 1974년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 오사카대학 전기공학과 졸업(공학). 2001년~2003년 한국 초전도·저온공학회 회장. 1989년~현재 경상대학교 전기공학과 교수.

Tel: 055-751-5345 Fax: 055-759-2723  
E-mail : shkim@nongae.gsnu.ac.kr



Takataro Hamajima (兵島 高太郎)

1948년 2월 7日生. 1977년 東京工業大學 理工學研究科 博士課程修了. 同年4월 (株) 東芝入社. 1998년~現在 日本山口大學 電氣電子工學科 教授

Tel : 836-85-9475 Fax : 836-85-9401  
E-mail: hamajima@yamaguchi-u.ac.jp