

# 고온초전도 계자권선의 보빈 접촉법에 대한 실험적 연구

김석환, 손명환, 백승규, 조영식, 서무교, 이언용, 권영길  
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

## Experimental study on bobbin contact for HTS motor field winding

S. W. Kim, M. H. Sohn, S. K. Baik, Y. S. Jo, M. G. Seo, E. Y. Lee and Y. K. Kwon  
KERI

swkim@keri.re.kr,

**Abstract** - To wind a HTS (High Temperature Superconductor) tape conductor on a bobbin, double pancake winding technique is widely used to reduce number of splicing contacts between conductor pieces. However, this makes some  $I_c$  (critical current) degradation on kink points which is unavoidable. This paper describes the two ways of winding; usual double pancake and soldered double pancake, Characteristics of the two windings are measured and compared.

층의 구조를 보여주고 있다. 그림의 (a)는 흔히 사용하는 구조이고 (b)는 내부에서 접촉한 방식의 구조이다.



Fig. 1. The two ways of pancake winding.  
(a) inclined wire, (b) soldered wire.

### 1. 서 론

고온초전도 선재는 대부분 tape의 형태로 만들어진다. Tape 형태의 선재는 측면으로 구부러질 경우 내부의 손상에 의해 초전도 특성의 열화가 생겨 전류 용량이 저하되므로 기존의 구리 또는 저온 초전도 선재처럼 자유롭게 권선할 수가 없다. 그래서 고안된 방법이 pancake이라는 방법인데, 많은 고온초전도 마그넷에서 응용되고 있다. Double pancake 방법은 긴 선재의 한가운데를 bobbin에 붙이고 양쪽으로 감아 나오는 권선 방법으로 두 층의 pancake을 함께 만드는 방법으로 초전도 선 간의 접촉을 줄이기 위해 제안된 방법이다.

이 두 방법은 각각의 장점과 단점을 가지고 있다. Inclined wire 방법의 가장 큰 장점은 초전도 도선 간의 접촉 수가 적어서 발열이 적다는 것이고, 단점은 전류 용량의 저하가 생길 수 있다는 것과 제작을 위해 필요한 도체의 연속 길이가 더 길다는 것이다. Soldered wire 방법의 경우는 필요한 연속 길이가 짧고 전류 용량의 저하의 염려가 적지만, 발열이 상대적으로 크게 된다. 그 외에도 여러 가지 장단점이 있는데, Table 1에 정리되어 있다.

그러나 이 방법도 두 pancake 층 간의 부분은 기울어져야 하고 따라서 선재의 두 부분이 측면으로 꺾어지게 되는 것은 불가피하다. 이 꺾어진 부분은 통전 능력의 저하를 가져오므로 될 수 있는 대로 꺾여지지 않는 구조로 권선을 하는 것이 필요하다. 꺾여지지 않고 pancake coil을 만들려면 두 층 사이에 초전도 선 간의 평행한 접촉을 만들어야 한다.

Table 1. Comparison between inclined wire and soldered wire double pancake techniques.

본 논문에서는 꺾여지지 않고 pancake coil을 만드는 방법으로 도체 재질의 bobbin에 두 선을 납땀한 다음 double pancake 구조를 만드는 방법을 제안하고 이 방법과 기존의 double pancake 방법을 비교 검토했다.

	Inclined wire	Soldered wire
연속 선재 길이	pancake 2개	pancake 1개
$I_c$ degradation	있다	없다
저항발열	없다	있다
권선작업의 난이도	어렵다	쉽다
Bobbin에 고정	덜 어렵다	어렵다
Bobbin 내경 조절	불가능	가능
권선 내부고정	별도고정 필요하다	별도고정 필요없다
Bobbin 재질	보다 자유로움	도체

### 2. Double pancake 권선

Fig 1은 두 가지 pancake winding의 가장 내부

### 3. 비교 실험

비교를 위해 구리로 만들어진 race track 모양의 bobbin 위에 각 방법의 구조를 만들었다 (Fig. 1 참조). 도체는 NST 사의 tape을 사용했는데, 77K에서의 임계전류는 38A 이다. 30K - 77K의 온도에서의 이 두 sample의 전압-전류 특성이 측정되었고 이 측정 결과로부터 임계전류 접촉 저항 등이 계산되었다.

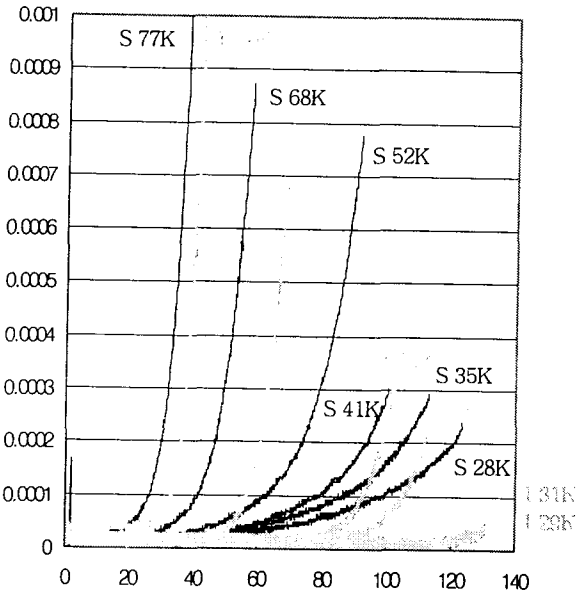


Fig. 2. Volt-current wave forms of the two pancake windings. Black lines indicate soldered wires, and grey lines indicates inclined wires.

Fig. 2는 측정된 모든 데이터를 정리한 것인데, offset 보상과 software적인 filtering 처리를 하기 전 단계의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 soldered wire의 경우에는 임계전류 이하의 전류에서도 전압이 증가하는데, 이 기울기는 접촉의 저항을 나타낸다.

### 4. 실험 결과 분석

측정된 결과로부터 임계전류와 접촉저항을 산출할 수 있다. 이 계산은 다음과 같은 방법에 의해 이루어진다. Fig. 2는 전압과 전류의 관계를 측정된 것인데, 전압  $v$ 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v = R_c i + V_0 \left( \frac{i}{I_0} \right)^n \quad (1)$$

여기서  $i$ 는 전류,  $R_c$ 는 접촉저항,  $V_0$ 는 임계전류가 흐를 때의 전압,  $I_0$ 는 임계전류이고  $n$ 은 전압의 증가정도를 나타내는 정수로 재료에 따라 정해진다.

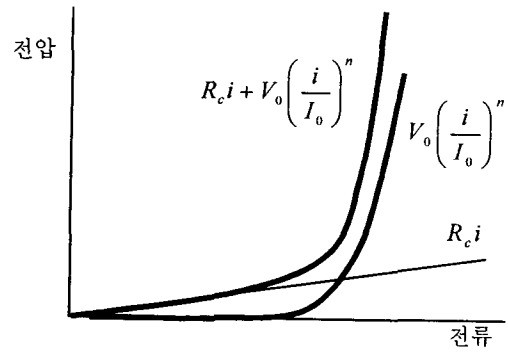


Fig. 3. Voltage-current characteristics with and without contact resistance.

두 sample 중 inclined wire의 경우에는 접촉저항이 없으므로 식 (1) 우변의 첫 번째 항은 0이 된다. Soldered wire의 경우에는 접촉저항이 있으므로  $I_0$ 보다 낮은 전류에서도 저항이 나타난다. 이 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 3과 같이 되고 이 관계를 이용하여 soldered wire의 각 온도에서의 접촉저항을 계산하면 Fig. 4와 같이 된다.

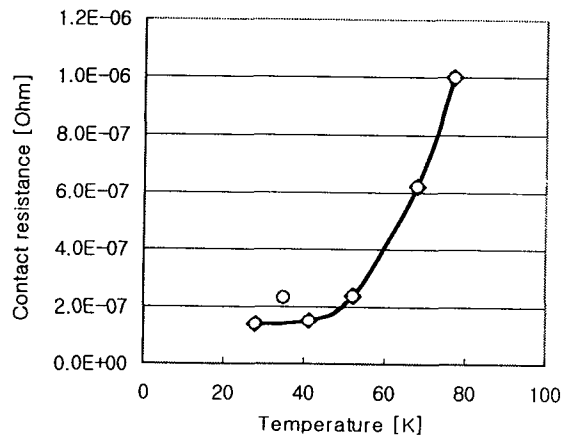


Fig. 4. Contact resistance of the soldered wire sample vs. temperature.

그림에서 원으로 표시한 점이 측정으로부터 계산한 접촉저항을 나타내고 선은 그 결과로부터 유추한 온도에 따른 접촉저항 곡선이다. 그림에서 보는 바와 같이 35K에서의 결과는 다른 점들과 동떨어져 있으므로, 오차가 큰 결과로 판단하여 제외하였다.

Fig. 5는 두 sample의 온도변화에 따른 임계전류의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로 계기에서 측정된 결과를 그대로 보인 것으로서, 식 (1)과 Fig. 3에서 설명한 것과 같은 환산을 하지 않은 것이다. 환산을 하게 되면 soldered wire sample의 임계전류 값은 inclined wire sample의 값에 보다 접근하게 된다. 오차의 범위를 생각하면 이 두 결과는 거의 같다고 말할 수 있다.

## 6. 결 론

Double pancake을 제작하기 위한 두 가지 방법에 대해 실험을 통해 비교 분석했다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Inclined wire 방법은 접촉의 개수를 줄일 수 있어 발열이 준다는 것이 가장 큰 장점이었다. 그러나 soldered wire 방법의 발열도 접촉 당 1 mW이하의 낮은 값이었다.

Inclined wire 방법으로 권선을 하려면 pancake 두 개를 만들 수 있는 길이의 선재가 필요한데, soldered wire 방법으로 하면 pancake 한 개를 만들 수 있는 길이의 선재가 두 개 있으면 된다. 고온초전도 선재의 생산가능 길이 또는 가격적인 측면에서 이것은 큰 장점으로 작용한다.

또한 soldered wire는 두 권선의 작업을 따로 하므로 작업이 보다 용이하고 bobbin의 내경을 다르게 할 수 있다는 장점도 가지고 있다.

그러나 bobbin의 재질로 도체를 사용해야한다는 제약이 있고, bobbin에 선재를 납땜하는 작업을 해야 한다는 점은 inclined wire 방법에 비해 불리한 점이 된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다."

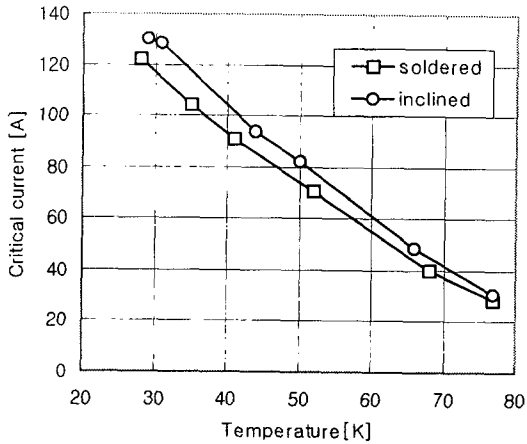


Fig. 5. Measured critical currents of the two samples.

## 5. 분석 결과 토의

결과 분석으로부터 알 수 있는 것은 두 sample이 임계전류에 큰 차이를 보이지 않았다는 것, 그리고 soldered wire sample의 경우 관측된 접촉저항은 온도가 내려가면 급격히 감소하다가 40K 이하에서는 큰 변화를 보이지 않는다는 것이다. 두 sample이 임계전류에 큰 차이를 보이지 않았다는 것은 inclined wire 방법이 soldered wire 방법에 비해 전류용량이 떨어지지 않았다는 것을 보여준다.

Fig. 6은 전류가 20A, 40A, 60A 그리고 80A인 경우 접촉에서 생기는 발열량을 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 표시한 부분은 임계전류 이상의 운전 조건이므로 실제 설계에서는 고려하지 않는 부분이다. 이와 같은 결과로부터 알 수 있는 것은 정상적인 운전상태에서의 접촉에서의 열 발생은 1 mW 이하라는 것이다.

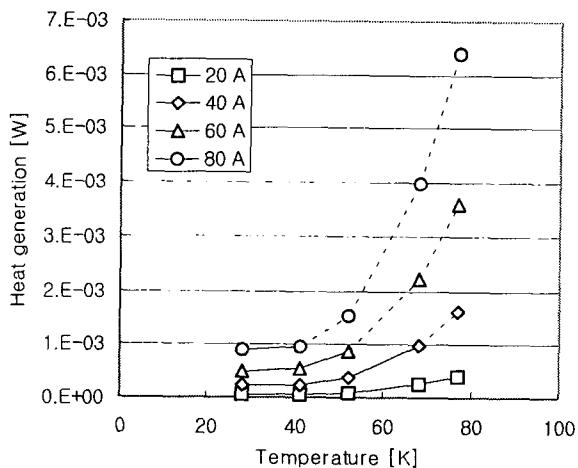


Fig. 6. Heat generation from the contact. Data points on dashed lines show current over the critical current.