

## Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 조셉슨 접합에서 저항측정을 이용한 Nb 전극의 침투깊이 측정

### Determination of Penetration Depth of Nb Electrodes in Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson Junction by Resistive Method

김동호\*, 김규태\*\*, 박종원#, 홍현권##, 황준석#

Dong Ho Kim\*, Kyu-Tae Kim\*\*, Jong Won Park#, Hyun-Kwon Hong##, and Joon Seok Hwang#

**Abstract:** Penetration depth of Nb electrodes in Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junctions has been measured by resistive method. For a given applied field, the total flux through the junction is temperature dependent because the penetration depth of Nb electrode varies with temperature. If the total flux equals an integral multiple of the flux quantum at certain temperatures, resistive peaks appear at those temperatures. The penetration depth of Nb can be determined by applying the above condition. The temperature dependence of penetration depth was found to be well described by the two-fluid model.

**Key Words:** penetration depth, Josephson junction, resistive peak, two-fluid model

#### 1. 서 론

초전도체를 이용한 디지털 소자 응용분야에서 가장 핵심이 되는 단위소자로 조셉슨 접합을 들 수 있다. 조셉슨 접합은 두 개의 초전도 전극 사이에 얇은 절연층이 삽입되어 있는 형태로 1962년 Josephson은 이 두 초전도체 전극 사이를 전압강하 없이 흐를 수 있는 초전도 전류가 존재할 수 있음을 예견하였고[1]. 이 예견은 후일 실험으로 증명되었다. 조셉슨 접합은 소자로서의 응용 뿐 아니라 전극을 이루는 초전도 물질의 자기장 침투깊이를 측정할 때에도 유용하게 사용된다. 전극의 침투깊이의 크기와 온도 의존성은 접합의 전극을 이루고 있는 초전도체의 물성에 대한 정보를 제공함으로써 접합의 특성을 향상하는데 아주 유용하게 사용될 수 있다.

조셉슨 접합면에 자기장이 평행하게 가해진 경우 접합을 투과하여 흐를 수 있는 최대 초전도 전류( $I_{max}$ )는 다음과 같이 주어진다.

$$I_{max} = I_c \left| \frac{\sin(\pi\Phi/\Phi_0)}{\pi\Phi/\Phi_0} \right| \quad (1)$$

여기서  $\Phi$ 는 접합을 투과하는 총 자속,  $\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-7}$

Gcm는 양자단자속,  $I_c$ 는 자기장이 없을 때 접합의 임계전류이다. 접합을 투과하는 총자속은

$$\Phi = Hw(2\lambda + d) \quad (2)$$

로 나타나며 여기서  $H$ 는 가해진 자기장,  $w$ 는 자기장과 수직한 접합의 폭,  $\lambda$ 는 Nb 전극의 침투깊이,  $d$ 는 절연층의 두께이다. 식 (2)는 전극의 두께가 침투깊이에 비해 충분히 두꺼울 때 성립함으로 저온에서는 적용할 수 있지만, 임계온도 근방에서는 침투깊이가 급격히 증가하여 전극의 두께보다 크게됨으로 보다 일반적인 식(3)을 사용해야 한다.

$$\Phi = Hw \left( d + \lambda \tanh\left(\frac{b_1}{2\lambda}\right) + \lambda \tanh\left(\frac{b_2}{2\lambda}\right) \right) \quad (3)$$

여기서  $b_1$ 과  $b_2$ 는 각각 하부전극과 상부전극의 두께이다. 만약  $\Phi$ 가  $\Phi = N\Phi_0$  인 조건을 만족하면 (여기서  $N$ 은 정수) 식 (1)에 의해 접합을 흐르는  $I_{max}$ 는 영이 된다. 접합 전극의 침투깊이를 측정하기 위해 통상적으로 사용되는 방법은 시료를 일정한 온도로, 주로 4.2 K, 유지하면서 자기장 변화에 따른 전류-전압 특성곡선을 측정하는 것이다. 여기서 얻어진  $I_{max}$ 를 자속의 함수로 나타내면 식 (1)과 같은 Fraunhofer 무늬를 얻을 수 있고 여기에  $\Phi = N\Phi_0$  에서  $I_{max} = 0$  인 조건에 식 (2)나 식 (3)을 적용하면 침투깊이가 결정된다.

이러한 방법 외에 조셉슨 접합을 구성하는 전극의 침투깊이, 특히 온도의존성을 간편하게 구할 수 있는 저항측정에 의한 방법이 있다[2]. 조셉슨 접합에 일정한 미소 전류를 가할 때  $\Phi$ 가  $\Phi_0$ 의 정수배가 되지 않는 영역에서는 걸어준 전류가 초전류 상태로 접합을 투과함으로써 접합 양단의 전위차가 영이 되나,  $\Phi = N\Phi_0$ 이면 인가전류가 정상전류로 접합을 흐르기 때문에 접합 양단에 전위차가 발생하게 된다. 만약 일정한 자기장을 걸고 접합의 온도를 변화하면서 접합 양단의 전위차를 측정한다고 하자. 침투깊이가 온도에 따라 변함으로 접합을 투과하는 총 자속은 외부자기장이 고정되어 있음에도 불구하고 온도에 따라 변한다. 따라서  $\Phi = N\Phi_0$ 가 되는 특정한 온도가 반드시 존재한다. 이 온도에서는 접합에 저항이 나타남으로 온도-저항 곡선을 측정하면 해당온도에서 저항 최대치가 나타나게 된다. 여기서 식(3)이  $N\Phi_0$ 가 되는 조건을 풀면 그 온도에서의 침투깊이를 구할 수 있게되고, 이러

\* 정 회 원 : 영남대 이과대학 자연과학부 교수

\*\* 정 회 원 : 한국표준과학연구원 책임연구원

# 비 회 원 : 영남대 대학원 물리학과 박사과정

## 비 회 원 : 한국표준과학연구원

원고접수 : 2002년 04월 23일

심사완료 : 2002년 05월 15일

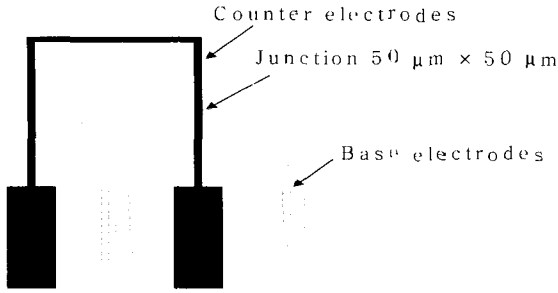


그림 1. Cross-type 조셉슨 접합의 개략도  
Fig. 1. Diagram of a cross-type Josephson junction

한 실험을 여러 자기장 하에서 수행하게 되면 온도에 따른 침투깊이의 변화를 알 수 있게 된다. 본 연구에서는 일정한 온도에서 자기장 변화에 따른 임계전류의 변화 및 온도에 따른 저항의 변화를 측정하여 Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 조셉슨 접합에서 Nb 전극의 침투깊이의 크기와 온도의존성을 구하였고, 이로부터 접합 제작에 사용된 Nb 전극의 물성을 조사하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 시료제작 및 실험방법

본 실험에서 사용한 Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 조셉슨 접합은 한국표준연구원에서 개발한 표준제작공정을 사용하여 제작되었으며 cross 형으로 그 개략도는 그림 1과 같다. 산화막이 형성된 Si 기판에 먼저 dc sputtering 방법으로 Nb 하부전극과 Al 장벽층을 200 nm와 10 nm의 두께로 증착하고 고순도 산소를 주입시켜 Al 박막을 열산화한 다음 상부 Nb 전극을 증착시켜 삼층 구조를 형성한다. 그 후 원하는 형태로 식각한 다음 접합면을 제외한 부분을 SiO<sub>2</sub> 산화막을 증착하여 하부 전극과 wiring 전극이 단락되지 않도록 한다. 마지막으로 wiring 전극을 증착한다. 여기서 제작된 접합의 면적은 50 μm×50 μm이며 상세한 공정과정은 문헌 [3]에 잘 나타나있다. 접합의 임계전류는 Al 산화막의 두께에 따라 결정되는데 본 실험에서 측정한 접합은 임계전류밀도가 0.1 kA/cm<sup>2</sup>인 산화막 표준공정을 도입하여 제작되었다.

제작한 시료는 Quantum Design 사의 Physical Properties Measurement System을 사용하여 전류-전압 특성 곡선과 온도-저항 특성 곡선을 dc 방법으로 측정하였다.

### 2.2. 온도-저항 특성

그림 2는 11.1 G의 자기장을 접합면에 평행하게 가한 상태에서 측정한 조셉슨 접합의 온도-저항 특성 곡선이다. 세 개의 곡선은 인가전류가 각각 2, 5, 10 μA에 해당한다. 비교를 위하여 자기장이 영인 경우도 함께 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 온도가 내려가면서 특정온도에서 저항 최대치가 나타난다. 지금의 경우는 약 5 K까지 3개의 최대치가 나타나는데, 자기장이 변하면 최대치의 개수와 나타나는 온도가 다르다. 이렇게 저항 최대치가 나타나는 이유는 앞 절에서 설명하였듯이 그 온도에서  $\Phi = N\Phi_0$  인 조건을 만족하기 때문이다. 인가 전류가 증가하면 저항 최대

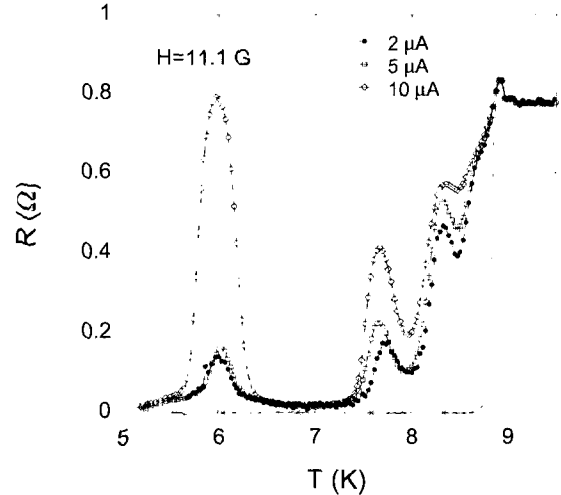


그림 2. 11.1 G의 자기장이 접합면에 평행하게 걸린 상태에서 측정한 조셉슨 접합의 온도-저항 특성 곡선. 접합을 투과하는 총 자속이 양자단자속의 정수배가 되는 조건을 만족하는 온도에서 저항의 최대치가 나타난다. 실선은 자기장이 없을 때 측정한 결과이다.  
Fig. 2. Temperature dependence of resistive transition of Josephson junction under a parallel magnetic field of 11.1 G. The resistive peaks appear if the total magnetic flux through the junction becomes an integral multiple of a single flux quantum. A solid line is a resistive transition in an ambient field.

치도 증가하는 경향을 보이나 특정한 규칙은 보이지 않는다. 측정 온도의 범위를 5 K 이상으로 하였는데  $T < 0.5T_c$  에서는 침투깊이의 온도의존성이 거의 없기 때문이며 다른 한가지 이유는 저온에서는 2.3절에서 정의되는 조셉슨 침투깊이가 접합의 폭보다 크지 않으므로 식(3)이 잘 성립하지 않기 때문이다.

### 2.3. 전류-전압 특성

그림 3은 4 K에서 측정한 전류-전압 특성 곡선이다. 임계전류는 1.28 mA, 에너지 갭, 2Δ는 2.7 meV, 접합저항은 0.85 Ω으로 나타났다. 이론적인 임계전

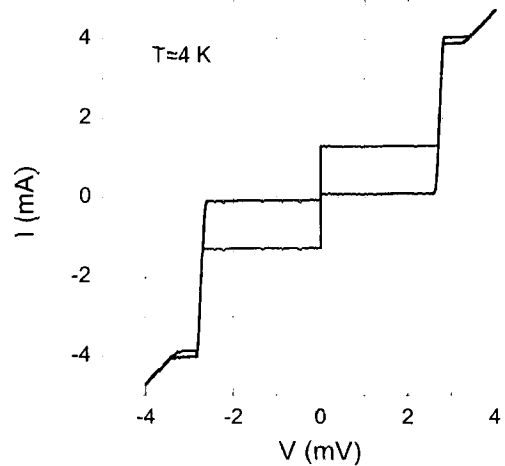


그림 3. 4 K에서 측정한 전류-전압 특성 곡선.  
Fig. 3. Current-voltage characteristics measured at 4 K.

류,  $I_0$ 는 knee 구조의 전류값인 3.3 mA의 0.78배인 2.6 mA이다. 이로부터 실제 접합의 이론임계전류밀도,  $J_c$ 는 약 0.1 kA/cm<sup>2</sup>로 제작조건과 잘 일치한다. 그러나 실제임계전류는 이론 값의 약 0.5 배가됨을 미루어 접합면을 따라 투과전류가 불균일하게 흐름을 의미한다. 작은 접합과 큰 접합을 나누는 기준은 조셉슨 침투깊이,  $\lambda_J$  이다. 다음 식(4)에서

$$\lambda_J = \left( \frac{\hbar}{2e\mu_0 J_c (2\lambda + d)} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$J_c=0.1$  kA/cm<sup>2</sup>인 조건을 이용하면 4 K에서  $\lambda_J=38$   $\mu\text{m}$ 가 된다. 따라서 본 논문에서 사용한 50  $\mu\text{m} \times 50$   $\mu\text{m}$ 의 터널 접합에서는 접합면의 가장자리를 따라 대부분의 전류가 흐른다고 볼 수 있다. 그러나 온도가  $0.5T_c$  이상으로 상승하면  $\lambda_J$ 도  $\lambda$ 처럼 급격히 증가함으로 small junction limit를 적용할 수 있게 된다.

**2.4. 자기장에 따른 임계전류 변화**

그림 4는 자기장에 따른 임계전류의 변화를 7 K에서 측정한 것이다. 전체적인 모양은 식 (1)에서처럼 Fraunhofer 무늬 모양을 나타낸다. 이를 식 (1)과 비교하면 양자단자속에 해당하는 자기장은 1.82 G가 되고 이때의 Nb의 침투깊이는 약 110 nm가 된다. 그림 2에서 관측된 저항 최대치를 이용하여 침투깊이를 구하기에 앞서 한 두 온도에서  $\lambda$ 를 이 방법으로 구하고 기준값으로 사용하면 편리하다. 그림 4에서 자세히 보면 무늬가 자기장이 영인 지점에 대하여 정확히 대칭이 되어있지 않고 양의 값 부분으로 약 0.15 G만큼 이동되어 있음을 볼 수 있다. 만약 접합의 폭이  $\lambda_J$ 보다 크면 투과전류에 의해 발생하는 자체 자기장,  $H_s$ 에 의하여 Fraunhofer 무늬의 최대점이  $H_s$ 만큼 이동한다고 알려져 있다(4).  $H_s=2\pi I_{max}/cw$ 로 주어지는데 이를 적용하면 자체 자기장은 약 0.06 G에 해당한다. 여기서 c는 빛의 속도이다. 따라서 7 K에서  $H_s$ 에 의한 영향은 미미하며 0.15 G 정도의 이동은 지구자기장이나 초전도자석에 trap된 자속에 의한 영향도 함께 포함된 것으로 보여진다. 4 K에서 측정한 경우에는  $\lambda=90$  nm로 나타났다.

**2.5. 온도-저항 특성으로부터 Nb 침투깊이의 온도 의존성 결정**

그림 2에서 저항 최대치가 나타나는 온도는 6.0, 7.7, 8.3 K이다. 이때의 자기장이 11.1 G 임으로 이를 식 (3)에 적용하여  $\Phi=N\Phi_0$  인 조건을 풀면  $N=5, 6, 7$  일 때 각각  $\lambda=91, 117, 153$  nm로 나타난다.  $N$ 이 다르면 물론 다른  $\lambda$  값들이 나타나나 2.4 절에서 구한  $\lambda$  값들과 비교하면 6.0 K에서는  $N=5$  일 때 가장 잘 맞음을 알 수 있다. 따라서 7.7과 8.3 K에서는 접합을 투과하는 총 자속이 각각  $6\Phi_0$ 와  $7\Phi_0$ 가 된다. 이 방법을 다른 자기장 하에서 측정한 온도-저항 특성 곡선 결과에 적용하면 여러 온도에서의  $\lambda$  값을 결정할 수 있다. 이렇게 구한 침투깊이의 온도 의존성을 그림 5에 나타내었다. 여기서 삼각형은 자기장에 따른 임계전류의 변화로 측정한 결과이고 나머지는 온도-저항 특성으로부터 구한 것들이다. 온도가

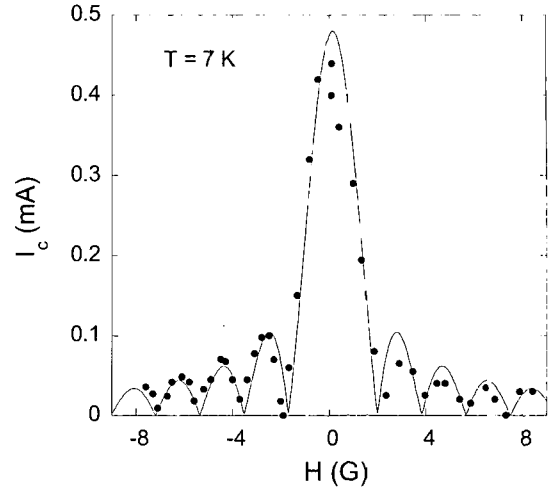


그림 4. 7 K에서 측정한 자기장에 따른 접합의 임계전류의 변화. 실선은 식 (1)을 나타냄.

Fig. 4. Magnetic field dependence of critical currents of Josephson junction at 7 K. Solid line is a fit to Eq. (1).

증가하면서 침투깊이도 함께 증가함을 볼 수 있다. 고온에서는 침투깊이에 약간의 오차가 보인다 이는 접합면적이 상대적으로 크므로 절연층의 불균일성 등에 의한 현상으로 여겨지며 그림 2에서도 볼 수 있듯이 저항의 최대치가 나타나는 온도가 매 측정마다 정확하게 일치하지 않음에서 기인한다.

침투깊이의 온도의존성은 초전도체의 근본적인 물성을 나타내는 변수인 BCS 가간섭길이  $\xi_0$ 와 전자의 평균자유행로  $l$ 간의 조건에 의하여 결정된다. 가간섭길이는  $\xi_0 = \hbar v_F / \pi \Delta(0)$  로 표현되며 기본적인 물성으로만 정의되기 때문에 시료의 형태에는 거의 의존하지

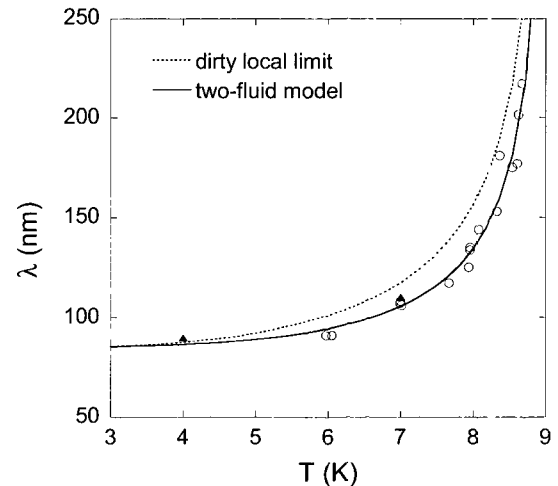


그림 5. Nb 전극 침투깊이의 온도 의존성. 삼각형은 Fraunhofer 무늬로부터 구한 값이고 나머지는 저항법으로 구한 결과이며 점선과 실선은 각각 식 (5)와 (6)에 해당함.

Fig. 5. Temperature dependence of penetration depths of Nb electrodes. Triangles are obtained by Fraunhofer pattern and the others are obtained by resistive method. Dotted and solid lines are fit to Eqs. (5) and (6), respectively.

않는다. 여기서  $v_F$ 는 Fermi 속도이다. 단결정 Nb에  
서 측정된 결과에 의하면  $\xi_0(0) = 36$  nm이다. 한편  
 $l$ 은 시료 내에 존재하는 산란중심의 밀도에 반비례함  
으로 시료의 형태 및 제작조건에 따라 크게 변한다.  
예를 들어 단결정의  $l$ 이 박막의 경우보다 대체적으로  
크며 박막도 성장방법에 따라  $l$ 이 변하게 된다. 만약  
 $l \ll \xi_0$ 이면 dirty local limit가 되는데 침투깊이의 온

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left( \frac{A(T)}{A(0)} \tanh \left( \frac{A(T)}{2k_B T} \right) \right)^{-1/2} \quad (5)$$

도의존성으로 주어진다. 여기서  $k_B$ 는 Boltzmann  
상수이다. 박막은 단결정 보다 많은 산란중심을 포함  
하므로 dirty local limit가 성립되는 경우가 많다.  
초전도체 내부의 전자들이 초전도 전자쌍과 일반적인  
전자로 구성되어 있다는 two-fluid model에 의하면  
침투깊이의 온도의존성은

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left( 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^4 \right)^{-1/2} \quad (6)$$

으로 주어진다. 그림 5의 점선과 실선은 실험결과를  
식 (5)와 (6)과 비교한 것으로 본 연구의 결과는  
two-fluid model에 더 잘 맞음을 볼 수 있다. 이는  
본 연구에서 제작된 Nb 전극의  $l$ 이 dirty local  
limit의 조건인  $l \ll \xi_0$ 을 만족하지 않음을 의미함으로  
 $l$ 의 크기가  $\xi_0(0) = 36$  nm에 비하여 아주 작지 않음  
을 알 수 있고, 이는 박막성장 조건이 잘 최적화 되어  
있음을 의미한다. 여기서 결정된  $\lambda(0) = 85$  nm이다.  
이는 다른 Nb 박막 연구결과에서 측정된 값들 중에서  
작은 편에 속하는 것으로 본 시료의 Nb 전극 특성이  
우수함을 보여준다. 참고로 단결정에서  $l = 400$  nm이  
다.

### 2.5. 저항 측정법의 장점

그림 5에 잘 나타났듯이 침투깊이의 온도의존성은  
 $T > 0.5T_c$  영역에서 뚜렷함으로 이 부분의 결과가 Nb  
의 물성을 유추하는데 중요하게 사용된다. 이론적으로  
는 그림 4처럼 자기장에 따른 임계전류의 변화할 모든  
온도에서 측정하여도 침투깊이의 온도의존성을 구할  
수 있지 않을까 라고 생각할 수 있으나 실제로는 그렇  
지 못하다. 온도가  $T_c$  근방이 되면 열적요동현상에  
의해서 그림 3과 같은 분명한 전류-전압 곡선 대신 완  
만한 형태의 곡선이 나타남으로 임계전류를 결정하는  
데 문제점이 발생한다. 특히 자기장 하에서는 전류-전  
압 곡선이 더욱 완만하여 짐으로 인하여 침투깊이 결  
정이 쉽지 않다. 그리고 이렇게 측정하였다 하더라도  
측정값은 실제 이론상 임계전류보다 항상 작게 나타난  
다. 그 이유는 열적에너지가 접합의 결합에너지 보다  
같거나 커짐으로 인하여 임계전류가 suppression되기  
때문이다. 예를 들어 그림 2에서 7.3 K 이상에서 접  
합에 저항이 나타나기 때문에 실험적으로 임계전류를  
결정하기가 곤란하지만 그렇다고 이론적 임계전류가  
영이라는 뜻은 아니다. 단지 열적요동현상에 의하여  
접합에 저항이 나타난다는 것이다. 그러나 저항 측정  
법은 이 영역에서도  $\Phi = N\Phi_0$  일 때 저항에 최대치가  
나타남을 측정할 수 있음으로 이를 이용하여 특히 임  
계온도 근방의 고온영역에서 침투깊이를 손쉽게 결정

할 수 있다.

## 4. 결 론

Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb 조셉슨 접합에서 Nb 전극의 자기장  
침투깊이를 저항법을 이용하여 측정하였다. 주어진 자  
기장 하에서 온도-저항 특성 곡선 측정 결과 특정한  
온도들에서 저항의 최대치가 나타났는데 이점들은 접  
합을 투과하는 쌍 자속이 양자단자속의 정수배가 되는  
조건을 만족한다. 이로부터 임계온도 근방에서 침투깊  
이를 구할 수 있었고 이들과 비교해 본 결과 침투깊이  
의 온도의존성은 two-fluid model을 잘 따름을 알  
수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세  
대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의  
해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] B. D. Josephson, "Coupled superconductors", Rev. Mod. Phys. pp216-220, 1964.
- [2] D. H. Kim, K. E. Gray, J. D. Hettinger, J. H. Kang, and S. S. Choi, "Resistive measurement of the temperature dependence of the penetration depth of Nb in Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb Josephson junctions", J. Appl. Phys. vol.75, pp8163-8167, 1994.
- [3] K.-T. Kim, "Damping effect on the rf frequency induced voltage steps in a Josephson tunnel junction", Appl. Phys. Lett. vol.66, pp2567-2569, 1995.
- [4] T. Yamashita and Y. Onodera, "Magnetic-field dependence of Josephson current influenced by self-field", J. Appl. Phys. vol.38, pp3523-3525, 1967.

### 저 자 소 개



#### 김동호(金東皓)

1957년 1월 6일생, 1979년 서울대 차  
연대 물리학과 졸업, 1981년 한국과학  
기술원 물리학과 졸업(이학석사),  
University of Minnesota 물리학과  
졸업(이학박사), 현재 영남대 이과대 자  
연과학부 교수



#### 김규태(金奎泰)

1960년 4월 5일생, 1989년 한국과학  
기술원 물리학과 졸업(이학박사), 현재  
한국표준과학연구원, 전기자기그룹장.



**박종원 (朴種原)**

1966년 12월 19일생, 1992년 영남대 이과대 물리학과 졸업, 1994년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사). 현재 동대학원 물리학과 박사과정.



**홍현권 (洪玄權)**

1973년 2월 22일생, 1999년 청주대 공대 반도체공학과 졸업, 2002년 충북대 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 현재 한국표준과학연구원.



**황준석 (黃俊錫)**

1972년 1월 19일생, 1995년 영남대 이과대 물리학과 졸업, 1997년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사). 현재 동대학원 물리학과 박사과정.