

10⁻¹⁴ Ohm의 미소저항을 갖는 NbTi 초전도선재 접합방법 및 저항측정 기술

김우곤, 이호진, 홍계원

(한국원자력연구소 초전도체연구실)

1. 서론

초전도자석 제작시 초전도선재간의 접합은 필수적이며 접합부에 대한 성능평가는 반드시 이루어져야 한다. 초전도 선재간의 접합은 자석설계치를 만족시킬 수 있는 기계적, 전기적, 열적 요구조건에 부응하여야 하는데, 만약 자석시스템의 운전전류에서 접합저항으로 인하여 발생된 높은 열하중은 자장의 안정도를 떨어뜨리게 되며, 과도한 냉각을 요구하거나 혹은 상전도 상태로 전이하는 시발점이 될 수 있다. 초전도선재의 접합부위는 원래 초전도체 만큼의 충분한 기계적 강도가 되기를 바란다. 그러나 선재 접합부에 기계적 손상이 발생한다면 자석코일에 심각한 결과를 초래할 수도 있다. 이와같이 초전도선재의 접합방법은 자석시스템의 요구되는 전기적 저항수준 및 기계적 강도를 만족시키는 적절한 접합방법을 선택해야 하며, 또한 접합부의 성능평가는 전체 자석시스템의 안정성을 평가하는데 중요한 요소가 되므로 정밀한 측정기법이 요구되고 있다[1,2,3].

NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 시스템용 자석은 10ppm in 50mm dsv(dimeter spherical volume)의 자기균질도(field homogeneity)와 0.1 ppm/hr 이하의 자기안정성(field stability)을 필요로 한다. 이런 높은 정밀도 및 안정성을 요구하는 자석은 국내에서 아직 시도 해본 경험이 없는 자석으로서 몇개의 코일을 조합하여야만 하고, 또한 shim코일을 이용하여야만 얻을 수 있는 자기균

질도이다. 이런 종류의 자석은 균일한 자장을 얻기 위해서 많은 코일단면으로 나누어지게 되는데, 이때 코일단면간 조합을 위해서 선재간의 접합은 한개의 코일을 사용하는 자석의 경우와는 달리 많은 접합부위가 필요하게 되며, 접합부의 접합저항은 최소 10⁻¹²Ω 이하의 저항치가 요구된다. 따라서 초전도 선재간의 접합방법은 여러가지 방법중에서 자석설계치를 만족시키는 우수한 방법을 선택하여야 함은 물론, 접합부의 안정성을 평가를 위한 정밀한 측정기법이 필요하다.

본 해설에서는 초전도자석 제작과 관련하여 30여년간의 축적된 기술을 보유하고 있는 러시아 Kurchatov 연구소의 정밀 초전도자석 제작에 사용되고 있는 초전도선재의 접합방법 및 특성평가 기술에 대해 Kurchatov 연구소에서 직접 실험을 통해 얻는 연구결과들을 소개하고자 한다. 본고의 제2절에서는 초전도선재의 접합방법 및 접합부의 특성평가 방법에 관한 내용을 간략히 소개하였으며, 제3절에서는 Kurchatov 연구소에서 수행한 실험결과들을 기술하였다. 향후 이들기술들은 국내에서 우리의 기술로 초전도자석을 제작시 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 접합종류 및 전기적 특성평가 방법

2.1 접합법의 종류

현재 주로 사용되고 있는 초전도선재의 접합방법으로는 납땜(soldering), 파이프가압법(pipe pre-

ssing method), 점 용접법(spot welding), 핀 삽입법(pin-inserting method), 확산 접합법(diffusion bonding), 2방향 구속가압 방식에 의한 고상접합법 등 여러가지가 있다. 이 중에서 스포트용접, 파이프가압법, 압착 같은 고상접합등으로 "NbTi 필라멘트 봉치를 직접 접합시킨 시편"에서는 접합저항이 $10^{-14} \sim 10^{-17} \Omega$ 로써 우수한 접합이 가능한 것으로 알려지고 있다[3-8]. NMR용 자석과 같은 균질도가 높은 정밀초전도 자석에 대해 현재 러시아 Kurchatov 연구소가 사용하고 있는 선재접합 방법은 종래에 알려진 파이프가압방법(pipe pressing method)에서 구리 슬리브(sleeve) 대신에 선재와 동일한 초전도 NbTi 슬리브를 사용하고 있었다.

2.2 전기적 특성 평가방법

접합부의 성능은 전체 자석시스템의 안정성을 평가하는데 중요한 요소가 되므로 정밀한 측정기법이 요구된다. 현재까지 알려진 측정기법으로는 비교적 높은 저항측정에 사용되는 4단자법과, $10^{-14} \Omega$ 이하의 매우 낮은 접합저항 측정에 사용되는 자장감쇠 측정기술(field decay measuring technique)이 있다. Kurchatov 연구소의 경우 NMR용 자석과 같은 정밀한 자석에 대해 자장감쇠 측정기술을 이용하여 접합부의 전기저항치를 측정하고 있었다. 이들의 각 측정방법에 대하여 간략히 소개하기로 한다.

2.2.1 사단자법

접합부를 갖는 초전도선의 짧은 시료(길이 5~50cm)는 액체헬륨으로 냉각시키고 자계중에 선재의 임계전류이하로 전류를 통하면 접합부 양단의 전위차를 $1 \mu V$ 정도의 정확도로 측정한다. 저항치는 $10^{-8} \Omega$ 로 부터 $10^{-9} \Omega$ 정도를 얻는다. 납땜 접합에 의한 접합부의 저항치는 4단자법으로 측정한다. 이 방법은 $10^{-10} \Omega$ 이상의 비교적 높은 저항치 측정에 사용된다.

2.2.2 자계감쇠 측정법

$10^{-10} \Omega$ 이하의 저항치는 4단자법으로 측정이 곤란하므로 영구전류의 발생 자계를 자체측정 소자등으로 장시간 연속 측정 한다. 높은 자계안정성을 요

구하는 NMR용 초전도 자석에 대해서는 영구전류모드로 운전되는데, 이때 영구전류의 감쇠(attenuation)가 문제가 된다. 영구전류의 감쇠는 자석에 축적된 자기에너지를 직류저항 손실 열로 변환되기 때문에 발생한다. 그 감쇠시간상수(time constant of attenuation), τ 는

$$\tau = L / R \tag{1}$$

로 표시된다. L은 자석의 인덕턴스(inductance), R은 접합저항이다. 이 관계식에서 NMR용 초전도 자석에 요구되는 자계안정성 (1시간당의 자계 변화율이 0.0001% 이하)를 달성하기 위해서는 접합부의 저항치가 $10^{-12} \Omega$ 이하로 하지 않으면 안된다. 측정에 의해 얻어진 자계의 감쇠시간 상수 τ 는 시료가 갖는 자기 인덕턴스 L로 부터 저항치를 계산하여 얻는 방법이 이용된다. 스포트 용접, 파이프가압법, 압착 같은 고상접합등으로 NbTi 필라멘트 봉치를 접합시킨 시편에서는 $10^{-14} \sim 10^{-17} \Omega$ 의 저항치가 측정되고 있다. 자계감쇠 측정법에 의하면 $10^{-14} \Omega$ 이하의 저항치를 측정할 수 있으며, 높은 자계안정성을 요구하는 정밀 초전도 자석이나 NMR용 자석의 저항측정에 접합한 방법이다. 측정에 대한 자세한 사항은 접합실험에서 언급하기로 한다.

3. NbTi 초전도선재 접합 및 미소저항 측정 실험

3.1 개요

러시아 Kurchatov 연구소에서의 선재접합에 사용된 파이프 프레스링 방법으로서, 기존에 사용해 오던 구리 슬리브 대신에 선재와 동일한 초전도 슬리브를 사용하고 있다. 초전도 슬리브를 사용하므로써 선재 필라멘트들 사이에서 발생할 수 있는 불확실한 접합을 초전도 슬리브가 재차 보증할 수 있도록 하고 있다. 이 방법은 지금까지 사용해 오던 기존의 방법보다 우수한 접합방법으로 평가되며, 또한 프레스링 작업에서 1, 2차의 가압과정을 통하여 에칭시 질산용액속에서 각 세심 필라멘트들의 표면에 존재하는 NbO₂ 등의 산화물 피막을 제거하므로써 보다 충분한 접합을 유도할 수 있도록 하는데, 본 방법에 의하면 $10^{-14} \Omega$ 이하의 접합저항을 얻을 수 있어 정밀자장용 자석의 선재접합에 적합

한 방법으로 평가되고 있다. 그 접합방법 및 특성 측정에 관한 세부내용들을 소개하기로 한다.

3.2 접합방법 및 순서

3.2.1 NbTi 슬리브 가공 및 측정 loop의 준비

접합부의 슬리브(sleeve)로 사용하는 NbTi 초전도 육각 봉을 길이 20mm로 자른 후 선재직경의 2배 크기로 드릴가공으로 구멍을 가공한다. 그림 1에 접합에 사용될 슬리브의 단면을 나타낸다. 구멍가공이 끝난 육각 슬리브는 드릴가공시 절삭유 등에 의한 오일을 제거하기 위해 아세톤 용액에서 세척하여 보관한다. 저항측정을 위한 시편 준비는 측정 hall probe를 삽입하기 위하여 원형 loop 직경 11.5mm, 길이 115mm의 시편을 만든다. NbTi 초전도 선재 외피안정화 구리를 원활히 녹여내기 위해 선재 양끝단(접합할 부분)의 약 30mm에 대해 sand paper로 선재외피의 코팅을 벗겨낸다. 코팅을 벗겨낸 상부 5mm를 soldering하여 이후작업을 용이하게 하고 선재의 움직임을 방지하도록 한다. Soldering 작업 후 알콜용액으로 깨끗히 닦아낸다. 접합실험에 사용된 선재직경은 1.0mm, 0.85mm, 0.5mm이었다.

3.2.2 구리기지의 에칭(etching)

NbTi 초전도 선재의 외피 구리기지를 녹여내기 위해 (2)식과 같은 용액비로 용액을 만든다음 시편을 질산용액에 약 20-30분간 담구어 구리를 녹여내어 세심 필라멘트들이 완전히 나타나도록 한다 [9].

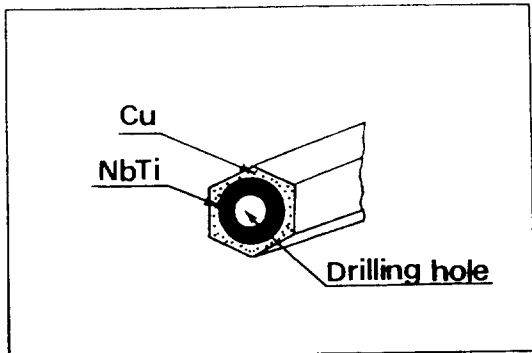
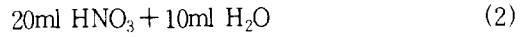


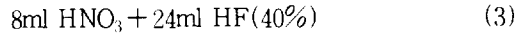
그림 1. 접합에 사용된 슬리브의 단면 개략도



세심 필라멘트들이 완전히 나타나면 증류수(pure water)에 담구어 산용액을 깨끗이 씻어낸다. 이때 녹여낼 선재길이는 soldering 한 부분이 닿지않는 약 20mm 정도를 녹여낸다.

3.2.3 Niobium 슬리브와 세심필라멘트들의 cleaning

질산용액에서 녹여진 세심필라멘트와 구멍가공된 육각슬리브에 대해 산화물(oxide)을 제거하기 위해 (3)식의 용액비로 준비된 용액속에서 cleaning 한다.



이때 즉시반응(3-5초정도)이 일어나므로 바로 끄집어 내어 각 세심필라멘트들이 밝은색을 띄는지 확인한 후, 증류수 속에 즉시 담구어 산용액을 수초간에 걸쳐 세척한 다음 알콜 용액속에 담구어 둔다.

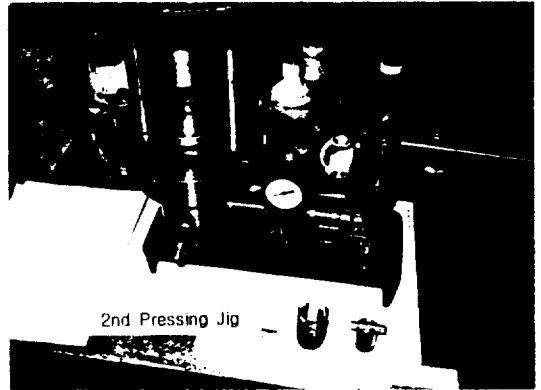


그림 2. 선재가압에 사용된 유압프레스및 가압치구

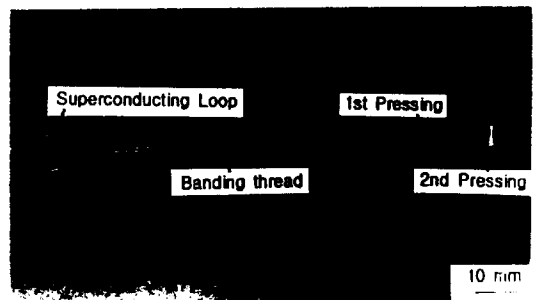
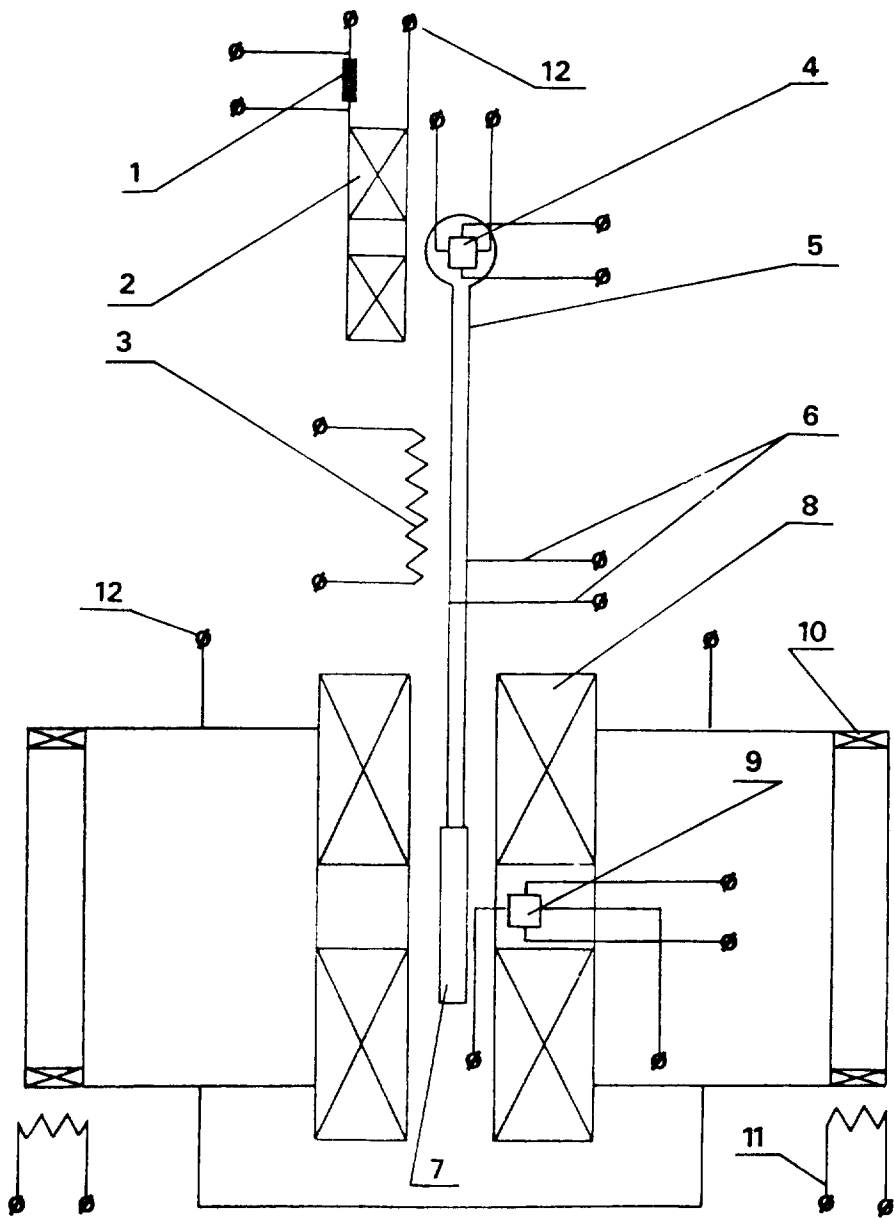


그림 3. 접합된 최종 시편의 모양



1-shunt, 2-SC transformer primary winding, 3-sample heater
 4,9-Hall probes, 5-sample loop, 6-voltage leads, 7-SC joint
 8-test field coil winding, 10-SC switch, 11-switch heater,
 12-current leads

그림 4. 접합시편의 특성측정을 위한 개략도

3.2.4 1,2차 가압(pressing)작업

깨끗이 세척된 각 세심 필라멘트의 양끝단을 한 두바퀴 정도 감은후 슬리브 속으로 가볍게 밀어 넣은 다음, 그림 2에 나타난 유압프레이스로 5톤의 가압력을 적용하여 niobium 슬리브를 1차 가압 접합한다. 1차 프레싱작업 이후 선재 끝단 부위에 그림에 표시된 가압치구(pressing jig)를 사용하여 2톤의 가압력으로 2차 가압작업을 실시한다. 2차 가압작업의 목적은 산용액에서 반응된 각 세심 필라멘트 표면위의 NbO₂ 등의 산화피막을 제거하고 선재간 충분한 접합을 유도하기 위해 적용한다. 그림 3에 접합된 최종시편의 모양을 보이고 있다.

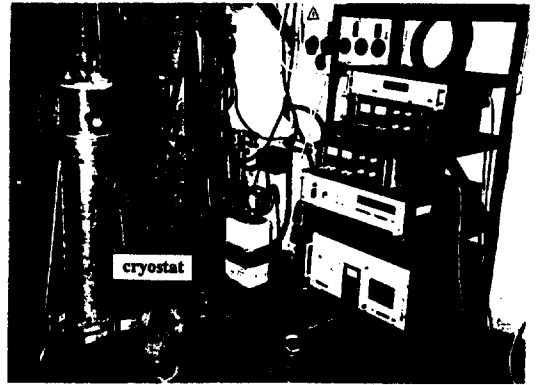


그림 6. 전체실험 상황

3.3 측정장치 및 원리

프레싱 작업으로 최종 접합된 시편의 접합저항 측정장치는 그림 4에 나타내었다. 그림에서 처럼 접합부를 갖는 시편 loop에 전류를 여기시키는 1차 코일(2번)과 자장하에서 측정할 수 있는 초전도코일(8번)이 있으며, 코일이 발생할 수 있는 최대자장은 4Tesla 까지이다. 초전도 스위치(10번)는 8번의 초전도 코일을 영구전류 모드로 만들기 위해 사용된다. 그림 5에 외부자계 초전도코일 및 초전도 스위치를 나타낸다. 코일의 유기된 자장의 측정은 hall probe sensor(9번)로 한다. 또한 시편 loop를 정상상태로 만들기위해 히타(heater, 3번)가 있다. 시편 loop의 hall probe sensor에 설치하는 우선 lo-

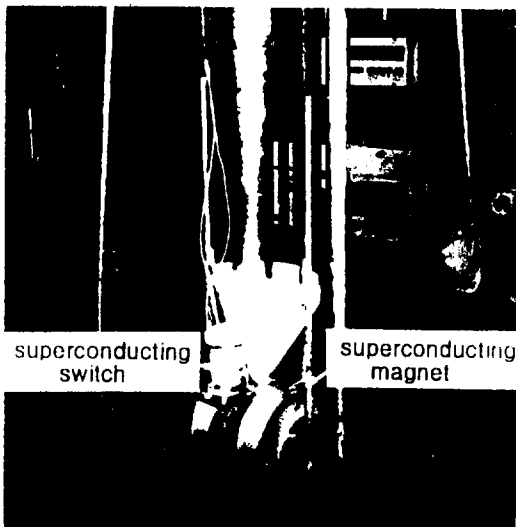


그림 5. 외부자계용 초전도 스위치 및 초전도 코일

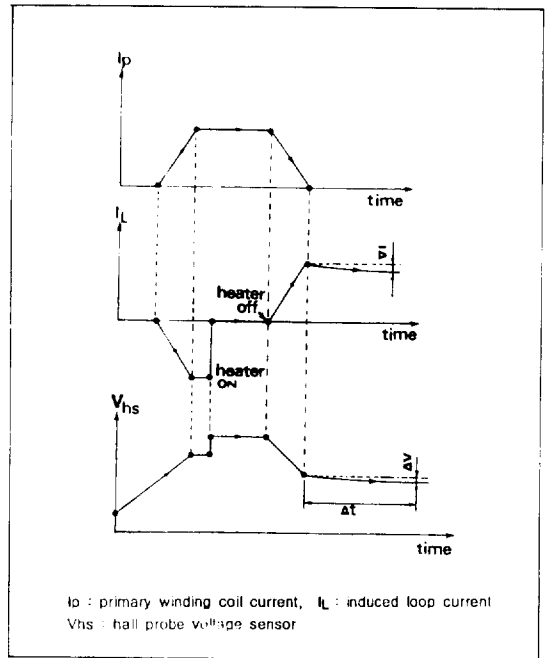


그림 7. 자계감쇠를 이용한 측정방법

p를 실로 조밀하게 감아서 loop에 전류의 여기시 선재의 움직임을 방지하도록 하며 hall probe sensor의 중심위치에 위치시킨다. 또한 시편 loop를 히타(3번)에 접촉시켜 열 효과를 충분히 발휘할 수 있도록 한다. 초전도 코일(8번)의 전류리드는 분리형으로 제작하여 코일에 필요한 자장을 유기시킨후 초전도스위치(10번)에 의하여 코일이 영구전류모드(persistent mode) 상태가 되도록 한 다음 분리한다. 8번 초전도 코일에 대한 접합부의 자장방향은 최대 자계하에 위치시키기 위해 코일의 자계 중

심위치에서 직각방향으로 작용하도록 한다. 저온조 및 실험상황을 그림 6에 나타낸다.

측정원리는 그림 7에서 보는 바와 같이 1차코일(primary winding coil) 전류를 discharge시키는 동안 원형 loop내의 전류거동을 V_{hs} (hall probe voltage sensor)로 전압변화를 측정하여 초전도 접합특성을 조사하는 것이다. 실험은 그림에서 처럼 우선 1차코일을 5.4A/sec의 전류속도로 서서히 charge시켜 loop내에 전류를 여기시킨후, 히타를 작동시켜 loop를 상전도 상태로 만들어 여기된 전류를 zero로 만든다. 그 다음 히타를 끈후 1차코일을 서서히 discharge시키면 처음과 반대 방향의 전류가 여기된다. 이렇게 1차코일이 discharge된 상태에서 loop내에 여기된 전류는 시간의 경과에 따라 감쇠하게 되는데, 그 감쇠정도를 hall probe voltage sensor로 측정하여 초전도 접합저항을 계산으로 구할 수 있다. 이 장치를 이용하는 경우 초전도선재의 저항저항 측정은 물론, 1차코일의 전류를 변화시키는 경우 loop내에 여기되는 전류의 크기 변화를 hall probe voltage sensor로 측정함으로써 접합에 의해 감소되는 초전도선재의 임계전류값을 구할 수도 있다.

3.4 실험결과

저항저항의 측정은 loop내에 유기된 전류에 대해 시간의 경과에 따라 hall probe voltage의 voltmeter로 전압변화를 측정하여 접합저항을 계산하여 구한다. 접합저항의 계산식은 아래와 같다.

감쇠 시정수 $\tau = L/P \gg t$ 이면, loop 내에 유기된 전류(induced current)는

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau) = I_0(1-t/\tau) \quad (4)$$

로 표시되며[10], I_0 는 $t=0$ 에서의 전류이다. R 은 접합부의 접합저항이며, L 은 loop의 자기인덕턴스(self inductance)이다. Δt 시간 동안의 hall probe voltage, $V(t)$ 는

$$V(t) = V_0(1-t/\tau) \quad (5)$$

$$|\Delta V/V_0| = \Delta t/\tau \text{므로,}$$

$$\text{접합저항, } R = |\Delta V/V_0| \cdot L/\Delta t \quad (6)$$

로 구할 수 있다. 여기서 V_0 는 loop에 대한 hall probe voltage의 초기 전압값이다. L 은 기하학적인

치수에 의해 결정되는 상수로서 그 값의 측정은 접합부위가 없는 동일한 치수의 loop에 대해 측정장치로 측정되며, 본 시편에서의 그 값은 2.0×10^{-7} Henry 이었다.

본 실험에서는 선재직경 1.0mm에 대하여 1Tesla의 자장하에서 접합저항을 계산하기 위한 측정된 결과들을 보면, $L = 2.0 \times 10^{-7}$ Henry, $\Delta t = 960$ sec, $V_0 = 3.48$ mV, $\Delta V = 5 \times 10^{-5}$ mV, $\Delta V/V_0 = 1.43 \times 10^{-5}$ 로 측정되었다. 이들 결과로부터 저항값을 계산하면 $2.99 \times 10^{-15} \Omega$ 이었다. 또한 직경 0.85 mm, 0.5mm 선재에서도 동일한 수준의 저항값을 얻을 수 있었다. 당실에서 개발하고자 하는 정밀자장용 자석의 경우 코일권선에 사용된 선재직경은 1.0mm로써, 4Tesla의 자기장을 발생시키기 위해 선재의 운전전류(operating current) 설계치는 130 Ampere이며, 접합부위의 자계는 0.5 Tesla이하의 자계 상태에 놓이게 된다. 따라서 본실험에 실시한 실험 조건은 운전전류 300 Ampere에서 실시되었으며, 접합부위의 자기장은 보다 가혹한 1Tesla 조건하에서 이루어졌다. 결국 이러한 조건하에서 $R < 10^{-14} \Omega$ 의 낮은 접합저항치를 얻었으므로 자석 설계치를 만족시키는 적용 가능한 접합방법이라 할 수 있다.

4. 결 론

초전도자석 제작시 선재간의 접합은 필수적이며, 자석 설계치를 만족 시킬 수 있는 기계적, 전기적, 열적 요구조건에 부응하는 적합한 접합방법 및 정밀한 측정기법이 요구된다. NMR 시스템과 같은 정밀자장용 초전도자석에 사용되고 있는 러시아 Kurchatov 연구소의 초전도선재의 접합방법은 기존에 사용해 오던 파이프 가압법에서 구리슬리브 대신에 선재와 동일한 초전도 NbTi 슬리브를 사용함으로써 세심 필라멘트들과 슬리브간의 접합을 초전도체와 초전도체로 하여 전류의 흐름을 좋게 하고 있었다. 그리고 2차의 가압과정을 통하여 각 세심 필라멘트들 간에 발생할 수 있는 불확실한 접합을 보다 충분한 접합으로 유도할 수 있었던 것으로 평가되었다. 접합된 선재에 대해 자장감쇠 측정법을 이용하여 접합저항을 측정한 결과 초전도자석의 실제 운전조건보다 가혹한 조건인 1Tesla의 자기장하에서 $2.99 \times 10^{-15} \Omega$ 의 자석 설계치를 만족

시키는 전기저항치를 얻을 수 있었다.

현재 러시아의 경우 경제적인 어려움으로 인해 그들이 보유하고 있는 기술을 외국에 판매하고자 하는 의욕이 매우 대단하다. Kurchatov 연구소의 경우 초전도 자석과 관련하여 30여년간 축적된 기술을 보유하고 있으므로 초전도자석에 대한 접합 기술 및 접합부 평가기술은 우리의 기술개발 단계에서 볼때 한차원 도약할 수 있는 접근가능한 기술이라 평가되었달. 따라서 국내에서의 초전도자석 개발과 관련한 제반기술을 높이기 위해서는 지속적인 교류를 통한 보다 심도 있는 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnet", Oxford University Press, 1983.
 [2] R. D. Blaugher, et al, "Recent developments on methods for superconductor jointing," Adv. In Cryogenic Engineering, Vol. 28, pp. 689-700, 1982.
 [3] M. Mizutame, K. Nakanishi, "超電導材料の接合プロセスと継手の性能評價", 溶接學會誌, Vol. 56, 12-16, 1987.
 [4] H. Kita, M. Oda, et al., "Development of Superconductor Joint for Helical Coils," Fusion Technology, Vol 8, July, pp. 1693-1697, 1985.
 [5] K. U., O. Motojima, et al., "Contact Resistance of Demountable Multi-Pin Joint for Superconducting Helical Coil", Fusion Technology, Vol. 2, pp. 1727-1732, 1986.
 [6] T. Horiuchi, K. Uo. et al. "Superconducting Joint of The Demountable Helical Coil", Fusion Technology, Vol 8, July, pp. 1654-1658, 1985.
 [7] Feng-Xiang Qiu, Shi-Yuan Wang, et al., "Specific Butt Welds for Nb-Ti Multifilamentary Superconducting Composites", Adv. In Cryogenic Engineering, pp. 1057-1062, 1984.
 [8] G. Luderer, P. Dullenkopf, et al., "Sup-

erconducting joint between multifilamentary wires", Cryogenics, Sept, pp. 518-519, 1974.

[9] David G. Blair "How to make high critical current joints in Nb-Ti wire", Rev. Sci. Instrum., Vol. 46, No. 8, pp. 1130-1131, 1975
 [10] J. Chiussy, J. L. Genicon, et al., "Joints with low resistance between mono or multifilamentary superconductors", 10th International Cryogenic Conference, Helsinki, Finland, pp. 70-73, 1989.



김우곤(金雨坤)

1955년 3월 11일생. 1986년 대전공업대학 기계공학과 졸업. 1989년 숭실대 대학원 기계공학과 졸업(석사). 현재 한국원자력연구소 초전도체연구실 연구원.



이호진(李浩鎭)

1958년 1월 28일생. 1980년 한양대 공대 기계공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 정밀공학과 졸업(공학). 현재 한국원자력연구소 초전도체연구실 선임연구원.



홍계원(洪啓源)

1956년 4월 3일생. 1978년 서울대 공대 요업공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학). 현재 한국원자력연구소 초전도체연구실 실장.