

## [ 요약문 ]

Nb 및 Nb합금은 과거 냉전시대에 우주·군사용 고온재료 중 하나로 각광을 받으며 활발한 연구개발이 이루어졌으나 고온 산화에 취약한 특성으로 인해 실제로는 크게 적용되지는 않았다. 이후 Nb은 주로 고강도 철강 및 내열합금의 합금원소로 사용되고 있다. 일부에서 Nb이 가지는 초전도 특성을 활용한 부품 개발이 진행되고 있다. 본고에서는 국내에서 많이 연구되지 않은 Nb소재의 일반적인 특징 및 공업적 응용사례에 대해 간략하게 소개를 하고자 한다. 또한, Nb이 가지는 초전도특성을 이용하여 고에너지입자 가속기의 핵심부품인 radio-frequency cavity의 개발에 대해서도 소개를 하고자 한다.

## 1. 서론

Nb(niobium)은 1801년 Charles Hatchett이라는 영국인에 의해 처음 발견된 금속이다. Charles Hatchett은 미국 매사추세츠에서 발견된 광물의 분석을 위해 당시에 가능한 분석기술을 모두 동원해 새로운 물질임을 밝혀내고 1801년 11월 26일 영국 Royal Society 회의에서 보고를 하였으며 1802년 Philosophical Transaction of the Royal Society에 새로운 금속이 미국에서 처음 발견된 물질임을 기려 Columbium으로 명명하였다. 이후 1970년대에 접어들어 Niobium으로 이름을 바꿔 오늘에 이르게 되었다.

Nb은 원자 번호 41번의 천이금속으로 BCC구조를 가지며 용점 2477℃, 밀도는 8.57g/cm<sup>3</sup>으로 용점이 2000℃를 넘는 금속 중에서 가장 낮은 밀도를 가지는 소재이다. 다른 희유금속합금들과 비교할 때 상용 Nb합금의 강도는 낮으나 매우 우수한 연신율 및 성형성을 가지고 있어 냉전시대에 항공우주용도로 공업적 응용에 대한 탐구와 기대가 높은 소재였다. 하지만, 대표적인 고온재료인 Ni기 초내열합금과 비교할 때 고온 강도가 몇 백도 높은 수준이나 산화 및 크립 특성이 낮아 부품으로 사용하는데 많은 제한이 있는 것으로 밝혀졌다.

19세기 초반에 발견되었지만 Nb을 이용하고자 하는 시도는 2차 세계대전 전후를 기점으로 시작되었으며 본격적인 공업용 사용은 1960년대 이후에 접어들어서야 시작되었다. 1960년대 이후 Nb은 ferroniobium의 형태로 line pipe 강, 자동차 강판 등에 미량첨가원소로, 고온용 초내열합금의 합금원소로 첨가되기 시작하였다. 현재 사용되는 Nb의 95% 이상은 철강과 Ni합금의 합금원소로 사용되고 있다. 약 1~2%의 Nb만이 순수금속이나 Nb 기반 합금으로 사용되고 있다. Nb기반 소재는 대부분 초전도 특성을 이용하여 의료용 진단장비 및 방사광가속기 부품으로 적용되고 있다. 이밖에 고온용 Nb합금과 방식용 원료로 소량이 사용되고 있다.

본고에서는 국내에서 많이 연구되지 않은 Nb소재의 일반적인 특징 및 공업적 응용사례에 대해 간략하게 소개를 하고자 한다. 또한, Nb이 가지는 초전도특성을 이용하여 고에너지입자 가속기의 핵심부품인 radio-frequency cavity의 개발에 대해서도 소개를 하고자 한다. 이를 통해 Nb소재의 이해를 높이는 데 조금이나마 기여하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 Nb의 생산

2006년 전세계적으로 44,500톤의 Nb이 생산되었으나 90%는 철강재의 합금원소, 5%는 내열합금의 합금원소로 사용되고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 1~2%의 Nb 만이 자체적인 Nb소재로 사용되고 있으며 이중의 절반은 초전도 Nb-Ti소재로 제조에 적용되고 있다. 나머지 용도는 고온용 Nb합금 제조에 사용되고 있다. 표 1은 Nb 제품의 형태 및 응용사례를 정리한 결과를 나타내고 있다.

표 1. Nb 제품 및 적용 사례

Nb제품	적용	특징
HSLA Ferro-niobium (~60%Nb)	Niobium additive to 'high strength low alloy' steel and stainless steel for oil and gas pipelines, car and truck bodies, architectural requirements, tool steels, ships' hulls, railroad tracks.	Imparts a doubling of strength and toughness due to grain refining. Weight reduction.
Niobium oxide	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Manufacture lithium niobate for surface acoustic wave filters.</li> <li>- Camera lenses.</li> <li>- Coating on glass for computer screens.</li> <li>- Ceramic capacitors.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- High index of refraction.</li> <li>- High dielectric constant.</li> <li>- Increase light transmittance.</li> </ul>
Niobium carbide	Cutting tool compositions.	High temperature deformation, controls grain growth.
Niobium powder	Niobium capacitors for electronic circuits.	High dielectric constant, stability of oxide dielectric.
Niobium metal plates, sheets, wire, rod, tubing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sputtering targets.</li> <li>- Cathode protection systems for large steel structures.</li> <li>- Chemical processing equipment.</li> </ul>	Corrosion resistance, formation of oxide and nitride films. Increase in high temperature resistance and corrosion resistance, oxidation resistance, improved creep resistance, reduced erosion at high temperatures.
Niobium-titanium alloy Niobium-tin alloy	Superconducting magnetic coils in magnetic resonance imagery (MRI), magnetoencephalography, magnetic levitation transport systems, particle physics experiments.	Electrical resistance of alloy wire drops to virtually zero at or below temperature of liquid helium (-268.8°C).
Niobium-1%zirconium alloy	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sodium vapor lamps</li> <li>- Chemical processing equipment</li> </ul>	Corrosion resistance, fixation of oxygen, resistance to embrittlement.
Vacuum-grade ferro-niobium and nickel-niobium	Superalloy additions for turbine blade applications in jet engines and land-based turbines. Inconel family of alloys, superalloy.	Increase in high temperature resistance and corrosion resistance, oxidation resistance, improved creep resistance, reduced erosion at high temperatures.

Nb은 aluminothermic 환원 반응으로 통해 원광석에서 추출을 한다. Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 알루미늄 분말 혼합한 후 발열반응을 유도하면 niobium과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>슬래그가 발생한다. 이 과정을 통해 얻어진 crude niobium은 수 %의 불순물(Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb 산화물)을 함유하고 있다. 이들 불순물은 Nb에 비해 고온에서 훨씬 높은 증기압을 가지기 때문에 전자빔용해(electron beam melting) 과정을 통해 정련을 한다. 수차의 재용해 후 알루미늄과 산소의 함량은 50ppm이하로 감소시킨다. 낮은 증기압을 가지는 Ta, W등은 전자빔용해를 통해서도 제거되지 않기 때문에 aluminothermic 환원 전에 액상추출법을 제거한다. 현재 Nb제조는 표준공정인 전자빔 용해가 상용화되기 전인 1950년대 후반까지는 Nb의 환원 후 Nb 분말의 압연, 단조 등의 소성가공을 통해 Nb를 제조하였다. 대표적인 Nb 생산회사들은 주로 브라질에 위치하고 있다. 표 2는 주요 Nb생산업체들의 현황을 정리한 표로 나타내었다.

표 2. 주요 Nb 생산업체

	Araxa MG-Brazil		Catalao	St. Honore Canada
pyrochlore ore	residual	fresh rock	residual	fresh rock
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	3.0	1.57	1.34	0.67
reserve(million ton)	456	936	18	22
mining	open pit		open pit	undergroud
products	FeNb std Nb oxides NiNb FeNb VG Nb metal		FeNb std	FeNb std

## 2.2 Nb 및 Nb합금 공업적 적용

스테인레스강의 입체부식을 막기 위해 Nb을 첨가하는 연구가 1930년대 시작된 후 다양한 철강재료의 미세합금원소로 Nb이 활용되어 왔다. 특히, 석유 및 가스 운송용 라인파이프, 자동차 경량화용 고강도 판재용 소재의 합금원소로 Nb의 중요성은 매우 높다. 그림 1은 1980년에서 2000년 기간동안에 Nb이 철강소재에 적용되는 비중을 보여주는 그림으로 Nb의 사용량이 기간 중 60%이상 증가하고 있음을 알려준다. 표 3은 라인파이프용 소재에서 Nb의 역할을 보여주는 것으로 Nb이 필수적인 합금원소로 사용되고 있다. 표 4는 주요 내열합금의 조성을 보여주는 것으로 Nb이 주요 합금원소로 사용되고 있음을 보여준다.

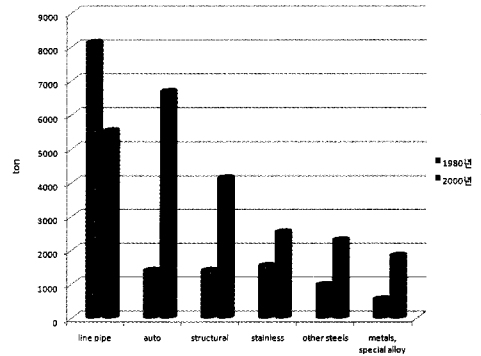


그림 1. 분야별 Nb 적용 비중

표 3. 라인파이프에서 Nb 적용

grade	alloy	average Nb content(%)	application
X52~X65	0.08C-Nb(+V)	0.02~0.05	standard
X70	0.08C-Nb(+V)	0.03	standard
X80	0.08C, Nb(+Ti)	0.045	increased pressure or reduced wall thickness
X100	0.07C, Nb+Ti+MO+TM +ACC(DQ)	0.05	in body arrest behavior

표 4. 주요 내열합금에서 Nb 적용

grade	chemical compositions(%)										others
	Ni	Cr	Co	Nb	Mo	W	Ti	Al	Fe	C	
Inconel 718	52.2	19.0	-	5.1	3.0	-	0.9	0.5	18.5	-	-
Inconel 625	41.6	16.0	-	2.9	-	-	1.8	0.2	37.5	0.03	-
RENE 95	61.0	14.0	8.0	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	<0.3	0.16	0.01B; 0.05Zr
Udimet 630	50.0	17.0	-	6.5	3.0	3.0	1.0	0.7	18.0	0.04	0.004B
Inconel 751	72.5	15.5	-	1.0	-	-	2.3	1.2	7.0	0.05	0.25Cu max
Inconel X750	73.0	15.5	-	1.0	-	-	2.5	0.7	0.7	0.04	0.25Cu max
Alloy 713C	74.0	12.5	-	2.0	4.2	-	0.8	6.1	-	0.12	0.012B; 0.10Zr
In-738	61.0	16.0	8.5	0.9	1.7	2.6	3.4	3.4	-	0.17	0.010B; 0.10Zr;1.7Ta
MAR-M 200	60.0	9.0	10.0	1.0	-	12.0	2.0	5.0	-	0.15	0.015B; 0.05Zr
Inconel 907	38.0	-	13.0	4.7	-	-	1.5	0.03	42.0	-	0.15Si

Nb이 합금원소가 아니라 그 자체로 이용되는 경우는 전체 사용량의 5% 미만으로 매우 작은 규모이기는 하지만 Nb이 가지는 내열성 및 초전도 특성이 꼭 필요한 분야에서 효과적으로 사용되고 있다. 이러한 Nb의 개발은 냉전시대와 일정 정도 연관을 가지고 있다. 구 소련이 1953년에 수소폭탄을 제조하자 이듬해인 1954년도에 미국은 원자핵잠수함인 Nautilus를 건조하였고 1957년에 소련은 최초의 우주선인 Sputnik을 발사함으로써 냉전시대가 개막되었다. 이러한 시대분위기에 따라 미국내의 희유금속 연구가 매우 활발하게 전개되었다. 이러한 연구에 Wah Chang, Boeing, Du Pont de Nemours, General Electric, Fansteel, Union Carbide 등 다수의 기업들이 Nb 연구에 뛰어들었다. 현재도 다른 금속에 비해서 Nb의 자료는 매우 적지만 그 당시에는 Nb에 대한 연구결과가 거의 없는 상황이었다. 1960년대 초 새로운 희유금속 관계개발을 위해 Wah Chang과 Boeing의 공동연구 프로그램이 구성되었고 “C”라는 기호를 가진 23개의 Nb합금이 개발되었다. 이후 개발을 통해 1970년대까지 살아남아 연구와 실제 적용이 이루어진 합금을 표 5에 정리하였다. 냉전이 지속된 1960년에서 1970년대를 걸쳐 Nb 연구의 활황기를 가졌다. Nb 연구의 대부분은 미-소간의 달착륙을 위한 우주개발 및 미사일개발 프로그램에 의해 지원을 받았다. 우주선 개발시 대기권 재진입시 요구되는 고온강도가 가장 큰 개발의 목표가 되었다. Nb 연구에서 초기부터 Nb의 고온에서 급격한 산화와 코팅 문제점을 해결하기 위한 내산화합금개발이 주요 이슈였다. 표 5에 나타난 합금을 포함해 Nb합금설계는 텅스텐, 탄탈륨 등을 고용시킴으로써 고온강도와 산화문제를 동시에 해결하려고 시도하였다. 1960년대 후반에는 Nb합금을 터보젯엔진이나 가스터빈에 적용하고자 하는 시도가 있었다. 하지만, 고온 산화문제를 항상 걸림돌로 작용하였으며 현재 2000도 이상의 초고온 구조용 소재로 Nb의 적용은 활발하지 않은 상태이다. 그림 2(a)은 Nb합금이 적용되는 예를 나타낸 그림으로 아폴로 우주선의 방향제어 노즐로 적용되는 사례를 나타내고 있다. 분말 Nb을 이용한 다공질 Nb구조체에 Li를 장입한 소재의 경우 실험실적으로 열제어 소재(thermal management material)로 활용될 수 있는 보고가 있으나 높은 산화경향으로 인해 본격적인 적용은 이루어지지 않다. 또한, 냉전종식에 따라 Nb 고온합금의 개발 동력도 상실된 상태이다.

표 5. 주요 내열 Nb 합금

합금명	합금조성	개발사
C103	Nb-10Hf-1Ti	Wah Chang/Boeing
FS85	Nb-10W-28Ta-1Zr	Fansteel
Cb129Y	Nb-10W-10Hf-0.2Y	Wah Chang/Boeing
Cb752	Nb-10W-2.5Zr	
Nb1Zr	Nb-1Zr	Union Carbide
30-09/15	Nb-30Hf-9W/15W	Wah Chang

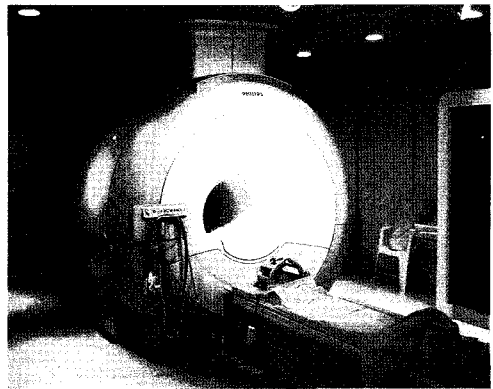
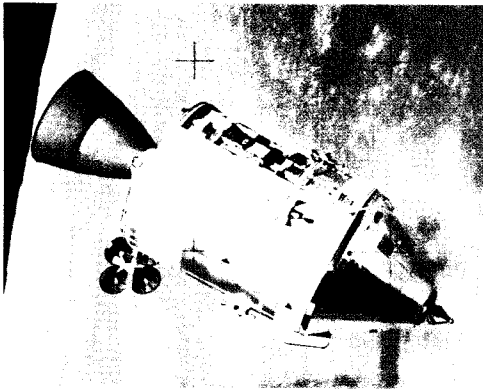


그림 2. (a) Apollo CSM with the dark rocket nozzle made from niobium-titanium alloy  
(b) 3 tesla clinical Magnetic resonance imaging scanner using niobium-superconducting alloy

Nb합금이 민수용으로 가장 많이 사용되는 예는 MRI 장비내에 초전도 선재이다. Nb의 초전도특성은 1954년에 처음으로 보고되었으며 이후 주로 Nb-Ti 및 Nb-Sn합금 형태로 제조되어 초전도 부품의 적용되고 있다. 1980년대 후반부터 고온초전도체의 개발이 활발하게 이루어지고 있어 Nb가 초전도체로 계속 각광을 받을 수 있을지에 대한 의문은 지속적으로 제기되고 있지만 현재까지는 각종 초전도용 부품으로 제일의 지위를 유지하고 있다.

그림 3은 2009년 KIMS 일반사업과제에서 개발하고자 하는 초전도 RF cavity의 형상을 나타낸 것이다. RF cavity는 방사광가속기를 비롯하여 다양한 입자들을 가속시키기 위하여 전기에너지로 입자의 운동에너지로 변환시키며 가속된 입자를 저장하는 역할을 하는 가속기 부품이다. 기존에는 전기전도성이 우수한 Cu를 이용한 상온 cavity가 사용되었는데 가속기 성능의 향상을 위해 초전도특성을 가지는 고순도 Nb을 이용한 cavity가 개발되어 최근 건설되는 가속기의 성능 향상에 기여하고 있다. 1980년부터 초전도 초저온 기술이 가속기에 응용되기 시작해서 90년대에 활발한 연구와 더불어 채택이 본격화되었다. 가속기에서 초전도 기술의 응용은 크게 두 분야로 DC 전류를 이용하는 초전



Operating at temperatures just above absolute zero, superconducting cavities accelerate bunches of electrons and positrons to 10 and 200 GeV.  
Photo: Fermilab

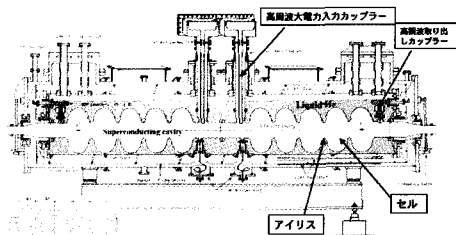


그림 3. 초전도 RF Nb cavity(ref:www.linearcollider.org) 및 장착 개략도

도 자석과 고주파 파워를 초전도 RF 분야이다. 초전도 자석은 합금으로 된 초전도 선재로 제작되고 이 기술은 이미 일반화 되었다. 반면 초전도 RF는 순수 Niobium 판재로 제작되며 아직도 성숙되지 않은 기술이다. 초전도 기술로 인해서 현대의 대형가속기가 상대적으로 적은 비용으로 건설과 운전이 가능해졌다. RF cavity는 Nb이 초전도 특성을 가지는 절대온도 4.5K이하인 액체 He조 내에 설치되어 동작된다(일반적인 작동온도 2~3K). 또한, 내부는 초고진공(10<sup>-9</sup> torr) 상태에서 다양한 입자들(electron, positron 등 가속기 종류에 따라 다른 입자)이 에너지를 흡수하여 빛의 속도로 가속되는 공간을 형성시켜 준다. 현재 전세계에서 건설되는 가장 큰 규모의 가속기는 International Linear Collider(ILC) 프로그램으로 500 GeV의 충돌에너지(향후 1000 GeV까지 업그레이드 예정)를 얻기 위하여 가속거리만도 30~50km에 이르는 것으로 설계되어 있다. 이에 따라 ILC 프로그램 자체만으로 Nb cavity소요량은 20,000개 수준이며 Nb사용량으로 환산하면 약 500톤이 소요될 것으로 예상된다. 이 밖의 전세계 다양한 형태의 가속기들(17기 운용중, 12기 건설중)도 성능향상을 위해 초전도 RF cavity 사용을 고려하고 있다. 우리나라 포항방사선가속기도 2009년도부터 3GeV급 저장링 업그레이드 작업(현재 2.5 GeV)에 착수한 상태로 초전도 RF cavity의 장착을 고려하고 있다.

### 2.3 방사광가속기용 Nb cavity 제조공정

그림 4는 기존에 RF cavity를 제조하는 방법 중 deep drawing공정과 전자빔용접(EBW)을 통해 multi-cell을 제조하는 방법을 나타낸 결과이다. 이러한 방법으로 제조될 경우 용접부를 따라 일본 KEK, 독일 DESY등의 선진국 가속기연구소 결과에 의하면 그림 5에 나타난 것과 같은 결정립 조대화층이 형성되며 이에 따라 초전도 특성이 변화하며 cavity성능에 문제가 발생하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 다른 제조방법이 없는 상태로 손실을 감수하고 적용하고 있는 상태이며 ILC 프로그램에서도 현재 표준기술로 채택되어 있는 상태이다. 독일 DESY 및 일본 KEK 등을 중심으로 차세대 cavity제작기술에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며 예비 결과들이 ILC workshop을 통해 보고되고 있다. 가속기 연구자들은 타 연구분야와 비교할 때 매우 개방적인 태도로 각국 연구진들이 독자적으로 수행한 연구결과를 공유하고 이를 통해 가속기 분야의 공동 발전을 꾀하고 있다.

Spinning과 hydroforming은 multi-cell cavity을 일체화 성형할 수 있는 대표적인 후보 공정으로 일본과 독일의 가속기 연구팀에서 개발이 이루어져 가속기 연구자들에게 많은 주목을 받고 있는 상태이다. Spinning의 경우 단위 cell 중심부의 용접은 피할 수 있으나 multi-cell 제조를 위해서는 복잡한 제조공정 설계가 필요하다. 이에 반해 hydroforming은 적절한 preform 설계를 수반할 경우 multi-cell 제조에 적합한 공정으로 판단되어 연구가 수행중에 있다. 일체화 성형에 유리할 것으로 생각되는 이상의 두 공정은 성형 후 표면에 오렌지 껍질과 같은 표면 품질 저하가 발생한다. 이러한 결함은 전자빔용접의 결정립성장과 마찬가지로 전기흐름에 방해를 일으키는 요소로 작용하여 초전도 특성을 떨어뜨린다고 알려져 있다. Nb의 매장량이 향후 500년 이상을 안정적으로 사용할 수 있을 정도로 충분하지만 실제 거래 가격은 파운드당 300불 수준으로 매우 비싸기 때문에 사용량을 줄이기 위한 연구가 이상의 성형성 향상연구와 동시에 수행중이다. 대표적인 방법은 성형성 및 요구특성이 Nb에 유사하다고 판단되는 Cu를 Nb과 cladding하여 cavity제작에 적용하는 사례들이 보고되고 있다. 그림 6은 폭발

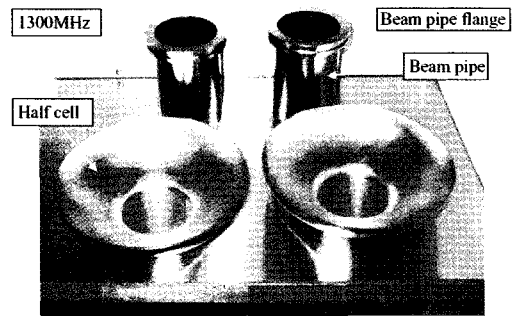


그림 4. 현재 RF cavity 제작방법, half cell의 deep drawing 후 EB용접법으로 multi-cell구성



그림 5. Nb cavity 전자빔 용접부에서 결정립 성장

용접법으로 제조한 Nb-Cu clad 판재를 deep drawing을 한 사례를 보여주는 것으로 성형 후 Cu 표면에 크랙이 발생 하는 사례들이 보고되고 있다. 이 밖에도 Cu 파이프를 cavity형태로 성형한 후 내부에 Nb코팅을 통해 초전도 특성을 얻고자 하는 시도도 이루어지고 있다. 표 6은 현재 진행되고 있는 cavity제조공정 연구의 현황을 정리한 결과이며 표 7은 각 공정이 가지는 특징 및 해결되어야 하는 문제점을 정리한 결과이다.

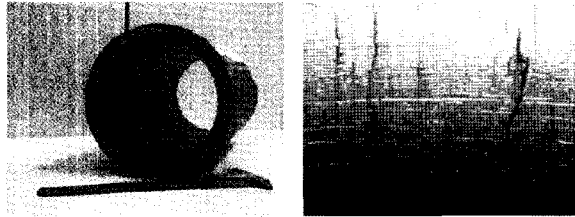


그림 6. Nb-Cu clad 판재 및 Nb-Cu 성형후 Cu표면에서 발생한 crack

표 6. RF cavity 제조기술 현황

기술내용	Item/주요사항 혹은 성능	개발기간/적용시점	업체/연구기관
spinning공정을 이용한 cavity 제작	9단 multi-cell cavity	2003년 시제품 제작	INFN Legnaro
hydro-forming 공정을 이용한 cavity제작	4단 multi-cell cavity	2004년 개발	DESY(독일), KEK(일본)
NbCu cavity 제작 기술	Cu-Nb복합판 제조 및 cavity 제작 기술	2004년 개발	DESY(독일), KEK(일본)

표 7. RF cavity 제조기술의 취약성

기술내용	업체/연구기관	취약성
spinning공정을 이용한 cavity 제작	INFN Legnaro	치수정밀도 향상에 한계양산 기술 부족
hydro-forming 공정을 이용한 cavity제작	DESY(독일), KEK(일본)	Nb의 성형압력 증가에 따른 성형성 한계양산 기술 부족
NbCu cavity제작 기술	DESY(독일), KEK(일본)	Cu, Nb의 성형성 차이에 의한 표면 결함 발생으로 적용 어려움

### 3. 맺음말

KIMS의 극한환경재료개발 연구에서는 고성능 가속기 개발을 위해 국제적으로 관심이 높은 RF cavity의 제조기술을 개발을 목표로 하고 있다. 초고진공( $<10^{-9}$  torr), 극저온( $<4.5$ K) 액체 헬륨 분위기에서 사용되는 RRR급 Nb cavity의 다단화(최종적으로 9cell) 성형기술개발을 통해 International Linear Collider(ILC) 프로그램 및 포항방사선가속기의 성능향상 사업에 적극적으로 참여하고자 하는 목표를 가지고 있다. ILC 프로그램은 물리학계의 지속적인 연구 프로그램으로 이를 위해서 극한환경용 소재 및 부품의 뒷받침이 필수적으로 요구되고 있다. 이에 따라 Nb 소재 및 성형기술은 가속기 기술의 발전에 기반기술로 필요성이 높은 기술이다.

우리나라도 참여하고 있는 ILC 프로그램의 예산은 2008년 기준으로 66억불이 소요될 예정이나 RF cavity는 약 20,000개가 제작되어야 하기 때문에 경제적인 제조공정의 개발이 필수적이다. 따라서, 다수의 ILC 참여국들은



multi-cell cavity 제조기술연구를 활발하게 이루어지고 있다. ILC 참여국들은 cavity 현물을 제공하거나 제작능력이 없는 경우 예정비율에 따라 제작비용을 지불해야 한다. 따라서, 관련기술의 개발은 ILC 프로그램에서 우리나라의 기술 위상을 높일 수 있으며 궁극적으로 국내 매출증대에 기여할 수 있다. 또한, Nb의 초전도 특성은 MRI 등 의료장비의 필수 부품을 제작에 적용될 수 있으며 향후 국내 부품소재 산업의 고도화에 기여할 수 있는 기초연구로서 중요한 의미를 가진다.

## ✧ 참고 문헌

- [1] Charles Hatchett., FRS, Philosophical Transaction of the Royal Society, London, Part1, 1802, vol. 92, pp.49-66.
- [2] G. Tither, Progress in niobium markets and technology, Niobium Science and Technology, 2001, TMS, pp.1~28.
- [3] C. C. Wojcik, Thermomechanical processing and properties of Niobium alloys, Niobium Science and Technology, 2001, TMS, pp. 163~173.
- [4] www.linearcollider.org
- [5] 손영욱, 현대 가속기에서 초전도 RF기술의 현황과 전망, 2009, in private communication.
- [6] S. Calatroni, 20 years of experience with the Nb/Cu technology for superconducting cavities and perspectives for future developments, Physica C, vol. 441, 2006, pp.95-101.
- [7] Andy T. Wu, et. al, Smooth Nb surfaces fabricated by buffered electropolishing, Applied surface science, vol. 253, 2007, pp.3041-3052.
- [8] T. S. Byun, et. al, Low temperature mechanical properties of superconducting radio frequency cavity materials, J. Nuclear materials, vol. 392, 2009, pp.420-426.
- [9] B. A Zeitlin, The future of low temperature Niobium based superconductors, Niobium Science and Technology, 2001, TMS, pp.221~241.
- [10] Dieter Proch, et. al, Niobium in superconducting RF cavities, Niobium Science and Technology, 2001, TMS, pp.187~206.
- [11] F. Heisterkamp and T. Carneiro, Niobium: future possibilities – Technology and the market place, Niobium Science and Technology, 2001, TMS, pp.1109~1159.



권 용 남

· 재료연구소 융합공정연구본부 변형제어연구그룹  
 책임연구원  
 · 관심분야 : 금속재료의 소성변형  
 · E-mail : kyn1740@kims.re.kr