

## Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재용 대형 빌렛 제조 및 가공 조건 연구

하동우, 오상수, 하홍수, 이남진, 권영길, 류강식  
한국전기연구소 초전도응용연구그룹

### Fabrication of Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wire from large billet stage

D. W. Ha, S. S. Oh, H. S. Ha, N. J. Lee, Y. K. Kwon, K. S. Ryu  
Applied Superconductivity Group, Korea Electrotechnology Research Institute

dwha@keri.re.kr

**Abstract** - A key technology for achieving commercial Nb<sub>3</sub>Sn superconducting wires may be driven from fabrication process of big-scale billets. There was no breakage in the strand that was constituted with annealed sub-element. It was need that billet had to treat HIP because of remove of voids and good contact between Cu and Nb filaments. Ta wound sheet was better than Ta tube for barrier in the strand.

#### 1. 서 론

내부확산법에 의한 초전도 선재의 제조에 있어 우선적으로 Cu 기지금속과 Nb 봉재들로 구성된 sub-element를 위하여 빌렛을 제조하여야 한다. 이 빌렛은 Cu와 Nb 필라멘트간의 접합성을 높이고 빌렛 원래의 형상대로 직경이 줄어들도록 열간 압출을 수행하게 된다.[1] 압출된 sub-element 봉재를 적정한 크기까지 인발한 다음 가운데에 건드릴을 하여 홀 가공을 하여 여기에 Sn을 삽입하고 다시 인발하여 완전한 sub-element를 구성하도록 한다.[2] 이후에는 이들 subelement를 다발로 하여 Nb 또는 Ta 재질의 확산 장벽을 안정화용 Cu tube에 넣어 인발을 하여 초전도 소선(strand)을 제조하게 된다.[3]

이러한 공정에 있어 초기의 sub-element를 제조하는 기술을 보유하는 것은 매우 중요한데, 이 과정에서 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도체를 위한 각 성분의 비율과 분포를 결정할 수 있는 빌렛 설계 능력과 빌렛의 제조 및 압출 과정에서의 여러 가지 민감한 기술을 확보할 수 있다. 특히 상업용으로 실용화하기 위해서는 빌렛의 직경이 200~300 mm 정도가 되어야 경제성을 가질 수 있다.

본 연구에서는 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선의 실용화를 위하여 빌렛의 설계 기술과 균일하고 단선이 없는 초전도 선재를 가공할 수 있는 기술을 확보하

기 위하여 초전도 선재 제조의 전 공정에 있어 가장 중요한 빌렛의 제조와 가공을 통해 재료의 특성을 평가하였고 재료의 특성과 단선 없는 균일한 선재 가공과의 상호 관계를 조사하였다.

#### 2. 실 험

압출기의 컨테이너 직경 200 mm에 맞추어 sub-element 빌렛의 직경을 194 mm로 하여 빌렛을 설계하였다. 내부확산법에서는 Cu 기지금속의 가운데에 Sn core가 위치하며 주위로 Nb 필라멘트가 배치되어 있는 구조가 일반적이다.

본 연구에서도 이와 같은 구조를 가진 빌렛을 제조하고자 하였는데, 표 1에 빌렛을 구성하는 Cu, Nb 및 Sn의 부피분율과 크기를 나타내었다. 그리고 그림 1에는 직경 194mm, 길이 300 mm의 빌렛의 단면을 나타내었다. Sn core는 빌렛의 가운데 부분에 위치할 것이나, Sn의 용융점이 232℃이기 때문에 열간 압출 후에 건드릴 가공을 한 다음 Sn 봉재를 넣기 때문에 실제로 이 부분은 Cu solid 상태였다. 직경 7.0 mm, 총 162 개의 Nb-Ta 필라멘트 봉재를 Sn core의 바깥으로 4 열로 배치시켰다.

Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 층을 생성시키기 위해서는 우선 Sn과 Cu가 반응하여 bronze를 형성시켜야 하고 bronze 내의 과잉의 Sn이 Nb 필라멘트로 확산하여 Nb<sub>3</sub>Sn 층을 형성하는 2 가지 열처리로 구분시킬 수 있다. 이 과정에서 기지금속이 되는  $\alpha$ -phase 내에 Sn이 13at%가 고용되어 있어야 하고 나머지 Sn이 Nb와 반응할 것을 고려하여 표 1에서 나타낸 것과 같은 부피 분율을 결정하였다.

Table 1. Specification of billet elements

분류	빌렛 설계		IGC
	부피분율	직경	
Cu	57.5 %	194 mm	53 %
Nb-Ta	21.9 %	7.0 mm	26 %
Sn	20.5 %	21 %	21 %

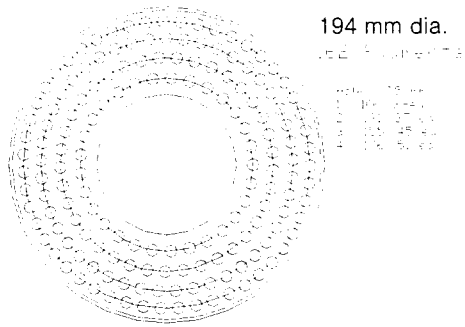


Fig. 1. Design of sub-element billet

이와 같이 제조한 sub-element 빌렛을 세척한 다음 전자빔 용접에 의해 진공 상태에서 빌렛 몸체와 뚜껑을 접합시켰다. 이렇게 완전히 제조된 빌렛을 열간 압출 하여 봉재로 가공한 다음 여기에 건드릴에 의해 홀 가공을 하였으며 준비한 Sn 봉을 홀에 넣어 완전한 sub-element를 만든 다음 인발 가공을 하였다.

Nb 또는 Ta barrier와 동비가 1.5인 동 안정화 튜브로 구성되는 strand에 19 개의 sub-element와 6 개의 spacer를 다발로 하여 이를 Ta 또는 Nb 확산 장벽용 tube 내에 넣고 이를 다시 안전화용 동 튜브에 넣어 strand를 조립하였다. 표 2에서는 Ta 또는 Nb tube를 확산 장벽으로 사용했을 때의 사양을 나타내고 있으며 그림 2에서는 조립한 상태에서의 strand의 외관을 나타내고 있다. 이와 같이 조립한 strand를 인발 및 신선하여 최종 선재 직경인 0.8 mm까지 가공하였다.

이러한 제조 공정 중에 균일한 가공 및 단선 없는 가공 조건을 찾기 위해 경도 및 미세조직을 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Sub-element 빌렛을 790°C, 15분간 예열하여 40 mm  $\phi$ 로 압출하였다. 압출할 봉재를 분석한 결과, Nb 필라멘트 층 중 내부 열부터 먼저 압출되어 나오다가 후에 바깥 층이 압출되어 4 열 모두 균일하게 나온 부분은 약 200 mm 정도가 되었다. 이는 계산에 의하면 어느 정도의 가공 불균일한 부분을 제외하더라도 최소 약

Table 2. Specification of strands with two types of barriers.

	Nb tube	Ta tube
strand 외경	35 mm	25 mm
strand 내경	22 mm	17 mm
Barrier 외경	21 mm	16 mm
Barrier 내경	20 mm	15 mm
sub-element 직경	3.15 mm	2.4 mm
sub-element 수	19	19
spacer 수	6	6

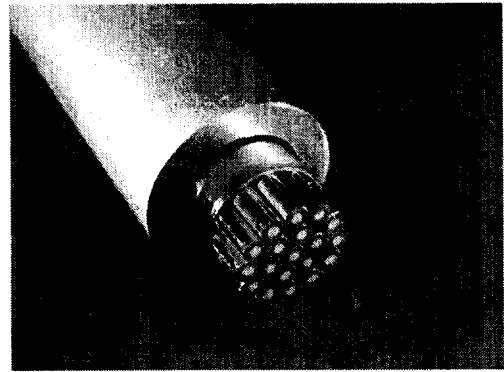


Fig. 2. The strand assembled with 19 sub-elements, 6 spacers, Ta barrier tube and stabilizer Cu tube.

400 mm 정도에서는 균일한 가공 부분이 나타나야 하였다. 이러한 원인으로서는 빌렛을 압출하기 전에 HIP(hot isostatic press) 공정에 의해 Cu 기지 금속과 Nb 봉 사이의 틈을 제거시켜야 한다는 것과 압출을 위한 예열 시간을 2 시간 열처리함으로써 Nb의 가공 경화를 방지하는 것이 중요하다는 것을 알았다.

압출한 sub-element를 어느 정도 인발한 다음 건드릴 가공을 하여 Sn 봉을 삽입하여야 하는데, 이 과정에서도 가공 경화를 제거하여야 하는 것이 중요함을 알았다. 즉 연화시키지 않은 상태에서 Sn을 넣고 신선 가공하여 strand를 제조한 선재에서는 단선 현상이 발생하였다. 반면에 Sn을 넣기 전에 sub-element를 연화처리하여 같은 공정으로 선재를 만든 경우에는 단선이 발생하지 않았다. 이러한 차이는 그림 3의 건드릴 후 열처리 유무에 따른 이어지는 공정에서의 경도 변화를 보면 알 수 있다. 직경 26.2 mm에서 열처리를 하게 되면 Nb와 Cu의 경도가 줄어들게 되고 가장 강도가 낮은 Sn과의 후 공정에서 결합 상태가 좋은 복합체로 가공이 되었다. 따라서 strand를 조립할 때 sub-element의 가공 경화 정도가 이후의 strand 가공에서 매우 중요한 영향을 미침을 알 수 있었다.

그리고 strand를 제조하는데 있어 확산 장벽으로 사용하는 Ta의 경우 그 형상에 따라 가공성이 매우 중요함을 알았다.

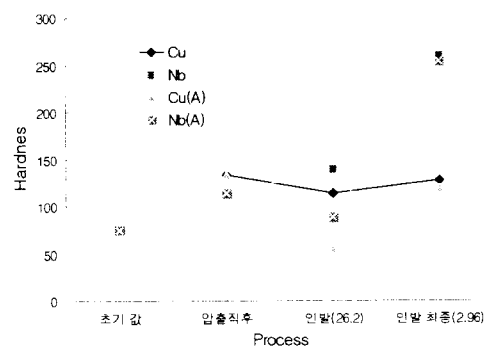


Fig. 3. The variation of hardness of sub-elements that worked differently.

Nb에 비해 Ta는 가공성이 매우 나쁘다고 알려져 있다. 그래서 Ta를 확산 장벽으로 사용하기 위해서는 열처리가 되어 있어야 하며 또한 tube 형태보다는 sheet를 말아서 사용하는 것이 중요함을 알았다. Ta tube를 사용한 strand에서는 가공 초기에 단선이 발생하였다. tube의 경우는 초기부터 단면적이 감소하는 변형이 수반되어야 하나, Ta sheet를 감은 경우에는 초기 가공 동안에는 Ta sheet가 더욱 감기면서 sub-element 사이의 공극을 매울 수 있는 여유가 있고 이후부터 다음 단면적이 감소되는 가공이 진행되면 되기 때문에 Ta의 변형에 어느 정도 여유가 있고 sub-elements와 Ta barrir 간의 접합력을 향상시킬 수 있을 것이라고 생각된다. 이러한 과정을 그림 4에 나타내었다.

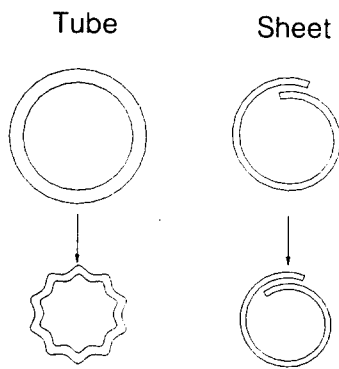


Fig. 4. Schematic diagram of Ta deformation during drawing process.

또한 strand를 조립하여 인발 공정을 거칠 때 strand 양단을 통해 인발유와 같은 오일의 침투가 막는 것이 매우 중요하였다. 그림 5에서는 오일의 침투에 의해 sub-element와 확산 장벽 사이에, 그리고 확산 장벽과 동 안정화 튜브 사이에 오일이 존재하여 금속간의 접합이 되지 않고 서로 간에 미끄러짐 현상이 발생하게 되어 인발 가공 동안 각 금속의 소성 변형이 진행되는 것이 아니라 일종의 인장력이 작용하여 결국 단선이 발생하게 되었다.

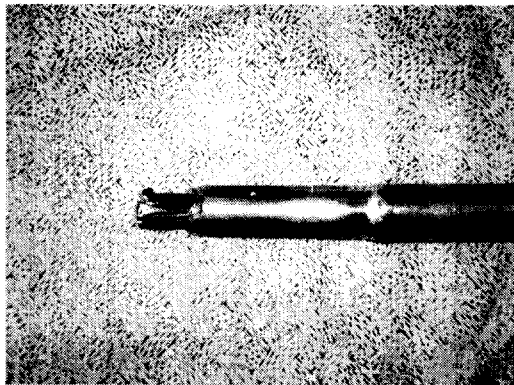


Fig. 5. Breakage wire due to penetration of oil during drawing process.

#### 4. 결 론

빌렛 압출 시 예열 과정이 중요한데, 800°C에서 2 시간 이상의 예열이 필요함을 알았다.

빌렛의 균일한 압출을 위해 HIP 공정을 거쳐야 하는데, 이는 Cu 기지금속과 nb 필라멘트 간의 접합력을 향상시키기 위함이다.

확산 장벽으로 Ta를 사용할 경우 tube 형상보다는 sheet를 감아서 사용하여야 단선이 발생하지 않았다.

Sub-element 봉재에 건드릴을 한 다음 Sn을 넣을 때 가공경화 된 sub-element를 어닐링하여 연화처리를 시켜야 추후의 가공에서 선재의 단선을 방지할 수 있었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] E. Gregory, E. Gulko, T. Pyon, and L. F. Goodrich, "Improvements in the properties of internal-tin Nb<sub>3</sub>Sn strands," Proceedings of ICEC-16, part 3, pp. 1715-1718, 1996.
- [2] B. A. Glowacki, "Changes of T<sub>c</sub>, J<sub>c</sub> and Stoichiometry of Nb<sub>3</sub>Sn phase formed during internal tin diffusion process," IEEE Trans. Magn. vol. 32, no. 4, pp. 2768-2771, 1996.
- [3] E. Gregory and T. Pyon, "Some recent developments in low temperature superconductors for fusion, high energy physics and other applications," Proceedings of ICEC-17, pp. 399-402, 1998.