2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

감손우라늄 튜브 제조를 위한 연속주조 기술 개발

Development of the Continuous Casting Technology for Fabrication of Depleted Uranium Tube

김희승, 이윤상, 김창규
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

윤중묵
AnyCasting
서울특별시 강서구 내발산동 647-1

요 약

연구로용 U-Mo분산 핵연료의 노내조사시험에서 U-Mo입자/Al기지 사이의 과도한 상호반응에 의한 팽윤으로 피복압출에서 취약하게 결합된 부분에서 파손이 크게 발생하였다. 이런 U-Mo와 Al 기지사이의 과도한 반응을 최소화할수 있는 신형상 핵연료로 튜브형 핵연료가 적합한 것으로 결론내렸다. 튜브형 핵연료의 온도분포 및 성능예측을 통하여 직경 10mm, 두께 1mm이하의 튜브형을 제조하는 것을 목표로 하였으며 이를 제조하기 위하여 연속주조기술을 이용하였다. 본 연구에서는 U-Mo 튜브형 핵연료를 연속주조시 용탕의 열유동 해석과 응고 해석을 통한 튜브의 냉각 거동 예측을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 도입하였다. Cu를 이용한 시제조 실험을 수행하여 지름 10mm, 두께 1mm의 튜브형 Cu를 제조하였으며, 감손우라늄(Depleted Uranium)을 이용하여 지름 10mm, 두께 2mm의 튜브를 제조하는데 성공하였다.

Abstract

In the irradiation test of the U-Mo dispersed nuclear fuel that is used as nuclear fuels for research reactors, it was recognized that the swelling due to reaction between U-Mo particle and Al matrix caused some failures of the fuel claddings. The development of new style nuclear fuel that could minimize the reaction between U-Mo particles and Al matrix was needed. Tube style nuclear fuel was judged to be suitable as new style nuclear fuel. We are targeting to make U-Mo tube of diameter 10mm, thinner than 1mm thick, because temperature distribution of tube style nuclear fuel will be expected to have a good performance. We introduced the computer simulation to predict the cooling behavior of the tube by flow analysis and

solidification analysis for the continuous casting. In this research, we preliminarily have tried to make tube using the copper and then depleted uranium before we make U-Mo tube style nuclear fuel by continuous casting method. As a result of the experiment, we succeeded to make copper and depleted uranium tube of diameter 10mm, thickness 1mm, and diameter 10mm, thickness 2mm respectively.

1. 서론

하나로에서 고밀도(6.0 g-U/cc) U-Mo 분산 봉상핵연료의 노내조사시험에서 출력이 가장 높은 부위에서 피복재의 손상이 발생하여 조사시험 중 인출하였다. 이런 손상의 원인으로 U-Mo 입자와 Al 기지와의 상호 반응이 과다하게 일어나면서 저밀도 물질 형성에 따른 팽윤이 크게 발생하여 피복재에 영향을 주어 피복압출에서 취약하게 결합된 부분에서 파손이 일어난 것으로 분석되었다. 핵연료 입자와 Al 기지와의 반응 문제를 해결할 수 있는 신형상 핵연료의 개발이 필요하게 되었다. 이런 조건을 만족시킬수 있는 신형상 핵연료로 두께가 얇은 순수 U-Mo 튜브가 적합한 것으로 판단하였으며 이런 튜브형 핵연료는 그림 1 과 같은 개념으로 설계되었다. 첫번째 개념은 튜브형 U-Mo 핵연료를 길게 제작하고 Al 을 피복하여, 조사시 핵연료에서 발생하는 열이 튜브 내부에 흐르는 냉각수에 의해서 방출될 수 있도록 구성하였으며, 두번째 개념은 작은 튜브형 U-Mo 핵연료 여러 개를 일정한 간격으로 배열하고, Al 을 피복하여 조사시 핵연료에서 발생하는 열을 밖으로 원할하게 방출시킬 수 있도록 구성이다.

튜브형 U-Mo 핵연료에 대한 온도분포 계산 및 성능예측을 통하여 적합한 튜브의 형상을 직경 10 mm, 두께 1 mm 이하의 것을 제조하는 것이 적당함을 알 수 있었다. 직경 10 mm, 두께 1 mm 의 튜브형 U-Mo 핵연료를 제조하기 위하여 이용되는 방법으로 연속주조법을 이용하였다. 한국원자력연구소에서는 이미 연속주조법을 이용하여 감손우라늄을 봉형상으로 연속주조하는 기술을 이미 발표한 적이 있다[1]. 이 연속주조 장치를 이용하여 몰드와 스타트바를 개선하여 튜브형 핵연료를 제조할수 있는 장치를 구성하였다.

본 연구에서는 Cu 와 감손우라늄(DU, Depleted Uranium)를 이용한 튜브 제작을 통해 실험조건 및 변수에 대한 정보를 축적하고 이를 바탕으로 U-Mo 튜브형 핵연료를 제조하는 실험을 수행하고자 하였다. Cu 와 DU 를 이용한 실험조건을 기초로 U-Mo 튜브 연속주조 시뮬레이션을 통하여 용탕의 열유동 현상을 해석하고 응고해석을 수행할 것이다. 시뮬레이션을 위해 사용된 상용 프로그램은 열유동 및 응고해석에 널리 이용되고 있는 AnyCasting 을 이용하였으며, Solid modeling 은 그림 2 와 같이 구성하였다. 이런 실험을 통해 직경 10mm, 두께 1mm 의 튜브형 U-Mo 핵연료 제조

를 최종목표로 본 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

2-1. 용해 장치

튜브형상으로 연속주조하기 위한 수직연속주조 장치의 개략도를 그림 3 에 나타내었다. 이 용해 장치는 고주파 유도 가열 방식으로 주파수 3kHz, 75kW 를 사용하며, 진공챔버, 냉각반, 도가니, 몰드, 진공 펌프로 구성되어 있다. 냉각반은 수냉방식을 채택하여 냉각자켓으로 유입되어 몰드를 냉각하도록 되어있다. 도가니의 재질은 흑연으로 하였으며 도가니와 가열 코일 사이는 graphite felt 로 도가니를 감쌌다. 진공펌프는 R.P(Rotary Pump), B.P(Booster Pump), D.P(Diffusion Pump)로 구성되어있으며 최대 진공도 10^{-6}torr 까지 유지할 수 있도록 되어있다.

2-2. 몰드 디자인

튜브형상으로 주조하기 위해서는 몰드의 설계가 중요하며 주로 멘드렐(Mandrel)을 이용하여 튜브를 제조하는 기술이 널리 이용된다[2]. 본 연구에서 이용된 몰드는 튜브로 재질에 따라 그 형상과 디자인을 달리 하여 실험을 수행하였다. Cu 튜브 제작시에는 그림 4 와 같이 흑연 몰드와 흑연 멘드렐을 이용하였으며, DU 튜브 제작시에는 그림 5 과 같이 Si_3N_4-BN 계 몰드를 이용하였다. 이는 DU 와 흑연이 반응 때문에 DU 연속주조시에는 흑연 몰드는 적합하지 않다. 그림 5 에서 보듯이 DU 주물과 접촉하는 부분만 Si_3N_4-BN 으로 구성되어 있고 외곽은 흑연으로 구성되어 있다. 도가니에서 용해된 주물은 그림 4 와 5 에서 보는 것과 같이 몰드 안으로 들어와 멘드렐 부분에서 응고가 일어나 튜브형상으로 제조할 수 있도록 구성되어있다. 또한 몰드 안으로 흘러 들어온 주물을 인출하기 위한 스타트바는 그림 6 에서 보는 것 처럼 설계하여 사용하였다. 이 스타트바의 재질은 Cu 주조시에는 스테인리스 스틸을 이용하였고, DU 주조시에는 탄탈늄(Tantalum)을 이용하였다. 이 또한 DU 와의 반응을 고려한 것이다.

2-3. 용해 방법

원료(Cu 또는 DU)를 도가니에 장입한 후 R.P, B.P, D.P 를 이용하여 챔버 내부가 10^{-2}torr 이하의 진공상태로 만든 후 발진 주파수가 3 kHz 인 고주파 용해 장치를 이용하여 용해하였다. 발진기 전원을 켠 후 도가니 온도 300℃까지는 출력 10 kW 로 승온시키고, 그 이후 용해온도까지는 출력 20 kW 로 승온시켰다. 용해가 완료된 후 진공을 파기하기 위해 1 차 Ar 가스(순도 99.9%)를 넣어주었다. Ar 가스는 연속주조 중에 표면의 산화를 방지하기 위해 사용되어진다. High-Low 방식의 콘트롤러를 이용하여 용탕 온도를 설정온도에서 약 10 여분 동안 보온 유지시켰다. 이는 용탕의 균질성을 유지하고 잉고트 내부의 기공형성을 방지하기 위해 수행하였다.

2-4. 인출 방법

인출 제어판에서 인출길이와 정지시간을 설정하고 servo motor 의 회전속도를 미리 설정한다. 진공이 파기되어 Ar 가스로 불활성 분위기가 된 챔버 내부로 인출봉을 넣어 스타트바와 연결시킨다. 인출봉에 의해 연결된 스타트바는 인출롤러에 의해 2 step 방식으로 인출(전진-정지)되었다.

3. 실험 조건 및 결과

3-1. Cu 튜브 시제조 실험 조건

튜브형상의 Cu 를 시제조하기 위한 실험조건은 표 1 에 나타내었다. 외경 13.5mm, 두께 2mm 부터 실험하여 외경과 두께를 줄여가며 실험하였다.

표 1. Cu 튜브 제조 실험조건

Conditions / Samples		Temperature				Cooling		Withdrawal			Ar gas	
		Pyrometer (℃)	TC1 (℃)	TC2 (℃)	TC3 (℃)	Pressure of Water (kgf)	Quantity of Water (lpm)	Length (mm)	Dwell time (sec)	Avg.rate (mm/min)	1^{st} gas (lpm)	2^{nd} gas (lpm)
Cu-01	OD : 20mm T : 2mm	1330	1190	1091	731	4.5	1	1	2	20	20	0
Cu-02	OD : 10mm T : 2mm	1334	1192	1069	743	4	0.8	1	2	20	20	10
Cu-03	OD : 10mm T : 1.5mm	1359	1191	1099	790	4.5	0.8	1	2	20	20	0
Cu-04	OD : 10mm T : 1mm	-	1198	1045	753	4.5	0.8	1	2	20	20	0

3-2. Cu 튜브 제조 실험결과

도가니 온도 범위를 일정하도록 하고, 1차 가스양과 인출 조건을 일정하게 유지한 조건에서 튜브의 직경 및 두께를 줄여 가면서 연속주조를 수행하여 그림 7와 같은 튜브형상의 Cu를 얻을수 있었다. 인출봉과 인출롤이 닿는 부분에서의 중심선이 맞지 않아 직경 10mm의 튜브에서는 두께 차이를 발결할 수 있었다. Cu-02, Cu-03, Cu-4의 실험에서 최대-최소 두께차이가 각각 2.1~2.3mm, 1.6~1.8mm, 1.1~1.3mm로 차이가 있었다.

3-3. DU 튜브 제조 실험 조건

튜브형상의 DU를 연속주조하기 위한 실험조건은 표 2에 나타내었다.

표 2. DU 튜브 제조 실험조건

Conditions / Samples		Temperature				Cooling		Withdrawal			Ar gas	
		Pyrometer (℃)	TC1 (℃)	TC2 (℃)	TC3 (℃)	Pressure of Water (kgf)	Quantity of Water (lpm)	Length (mm)	Dwell time (sec)	Avg.rate (mm/min)	1^{st} gas (lpm)	2^{nd} gas (lpm)
DU-01	OD : 10mm T : 2mm	1304	1201	-	772	4.5	1	1	2	20	30	0

3-4. DU 튜브 제조 실험결과

DU 튜브의 제조 실험에서 150mm의 DU 튜브를 주조할 수 있었으며 제조된 DU 튜브는 그림 8과 같다. 튜브의 내경은 약간의 편심이 일어났으며 표면층은 산화가 일어 났다. 2차 Ar gas의 주입양을 조절하여 산화 방지 한다면 건전한 표면의 DU 튜브를 제조할 수 있을 것을 판단된다.

4. 결론

U-Mo 분산 핵연료의 노내조사시험에서 핵연료 입자와 Al 기지사이의 상호 반응에 따른 팽윤으로 피복재에 손상을 주는 문제점을 해결하기 위한 방안으로 튜브형상의 신형상 U-Mo 핵연료 제조를 위해 Cu 를 이용한 예비 실험을 수행하여 직경 10mm, 두께 1mm 의 튜브형상을 제조하는데 성공하였으며, DU 튜브 연속주조에서 직경 10mm 두께 2mm 튜브를 제조하는 성공하였다. 이를 바탕으로 실제 U-Mo 튜브 핵연료를 연속주조법으로 제조가 가능할 것으로 판단된다. 또한 시뮬레이션을 통해서 연속주조시에 발생하는 용탕의 열유동 현상 해석 및 응고 해석을 바탕으로 실험조건을 최적화 한다면 공정 변수(주입온도, 인출속도, 냉각속도)에 따른 튜브의 냉각거동을 예측할 수 있으며, 고액 계면의 위치 및 형상을 파악 할수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업인 “연구로용 개량핵연료개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

[1] 이윤상 외 “사용후핵연료 금속저장봉의 연속주조 방안 연구” 2000 추계학술 발표회 논문집, 한국원자력학회

[2] J.M. Rodriguez, A. Esteva, S. Meza “A note on the control of the solidification front in the continuous casting of copper tubes” Journal of materials Processing Technology 96 (1999) 42-47

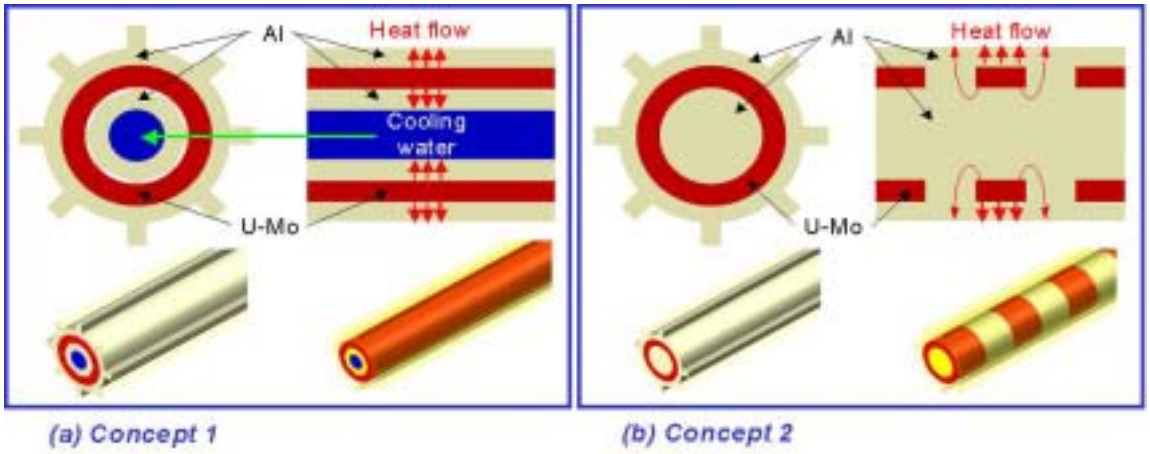

그림 1. 튜브형 핵연료 개념도

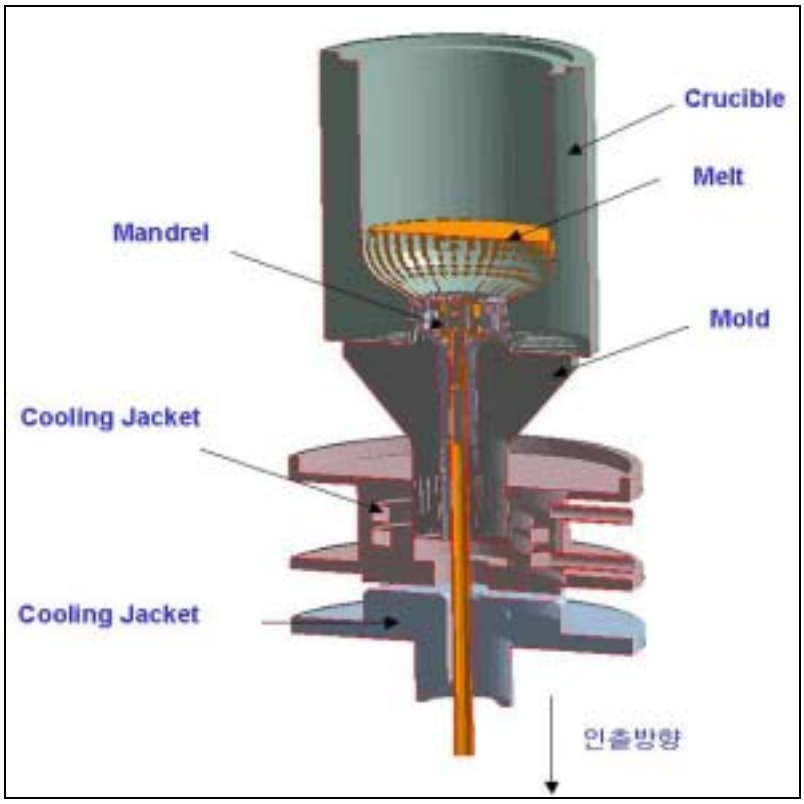

그림 2. 시뮬레이션을 위한 Solid Modeling

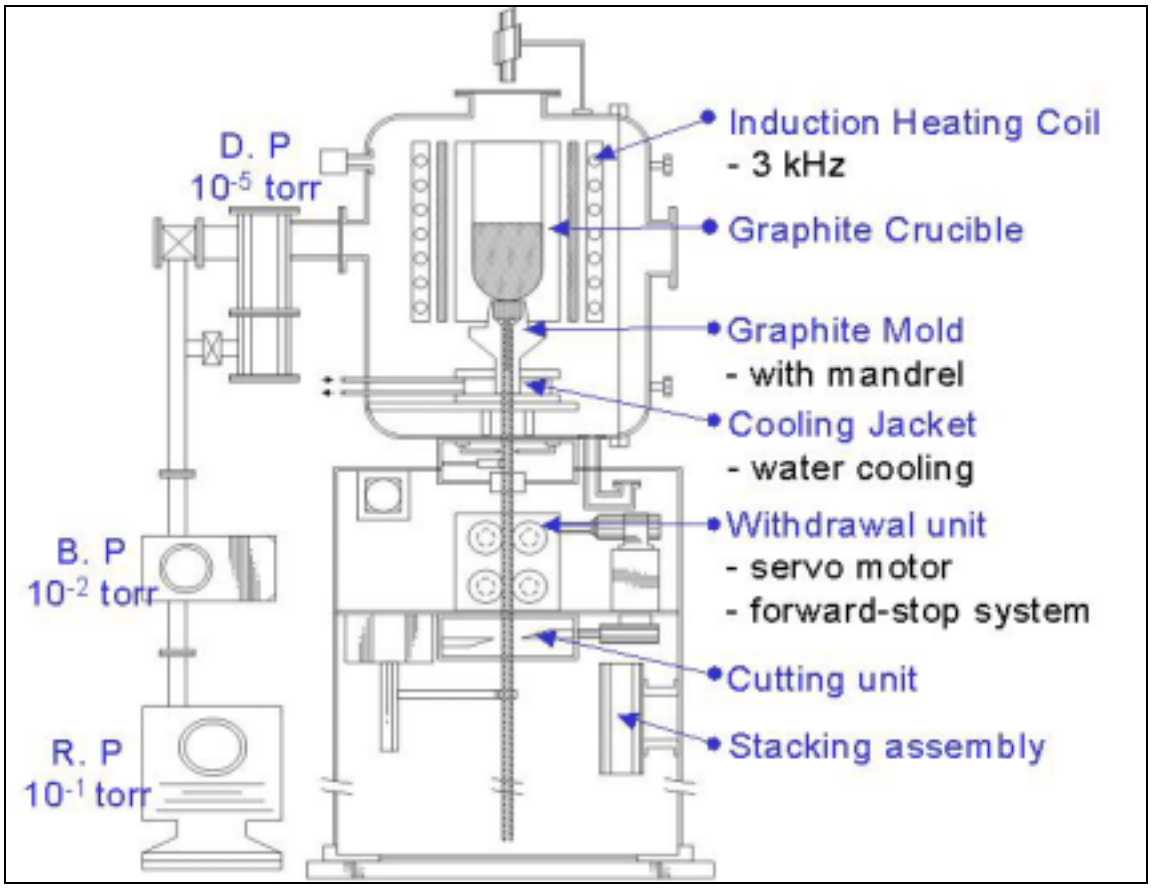

그림 3. 연속주조 장치의 개념도

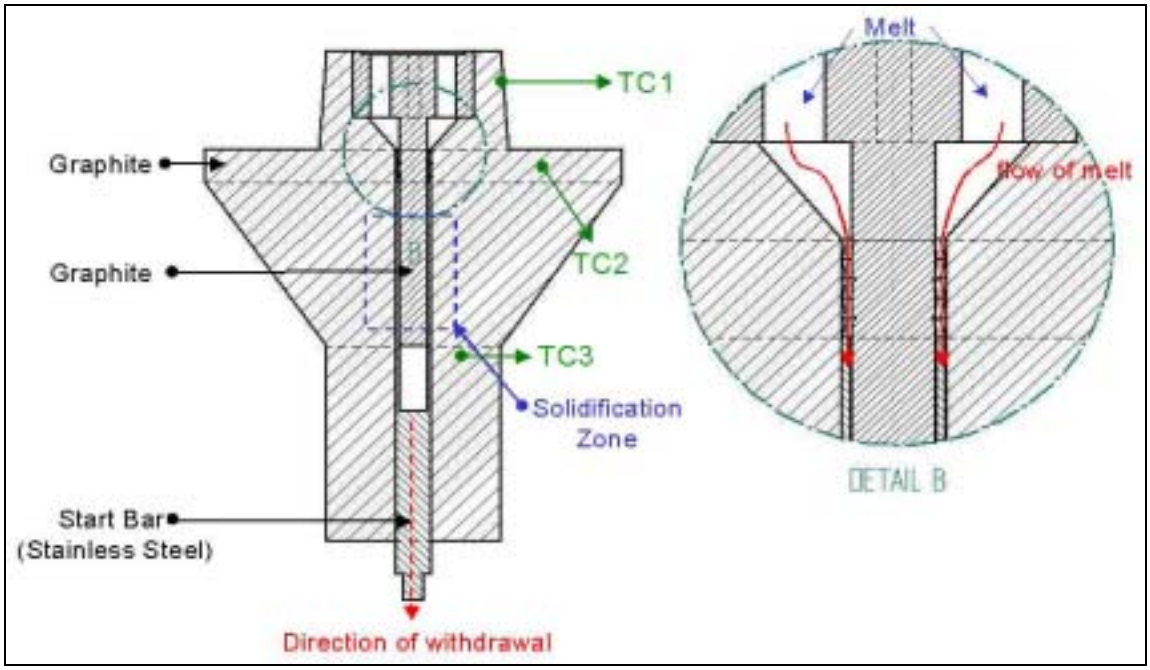

그림 4. Cu 튜브 제작을 위한 몰드 형상

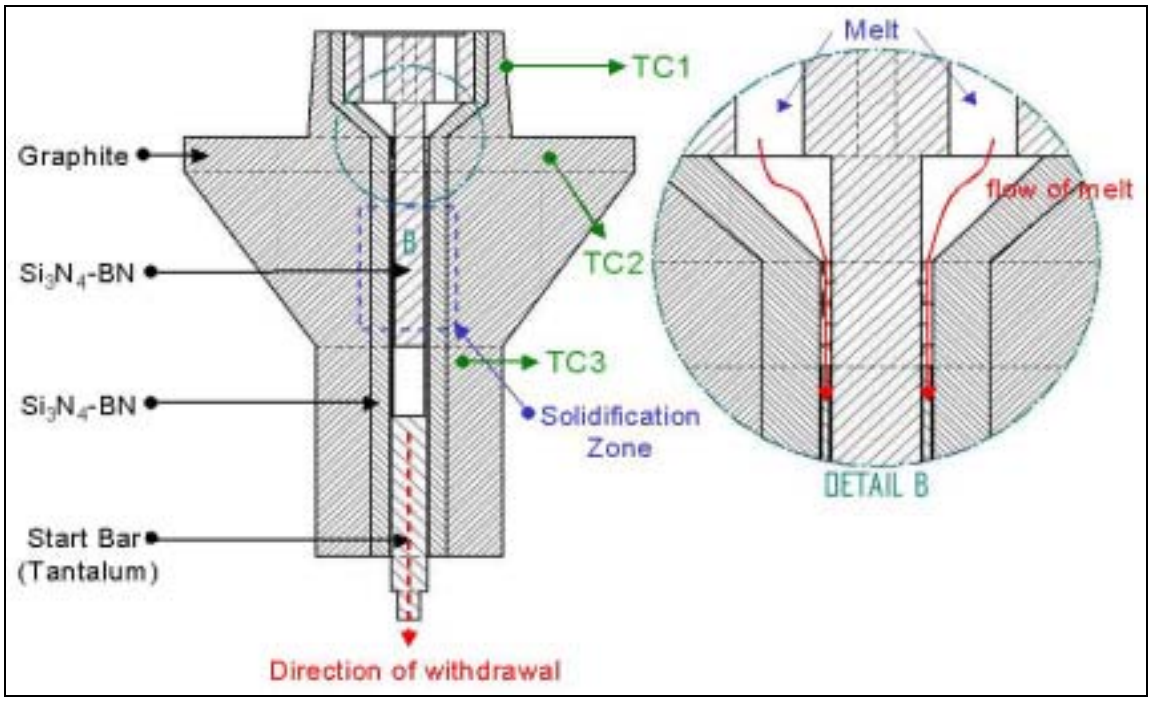

그림 5. DU 튜브 제작을 위한 몰드 형상

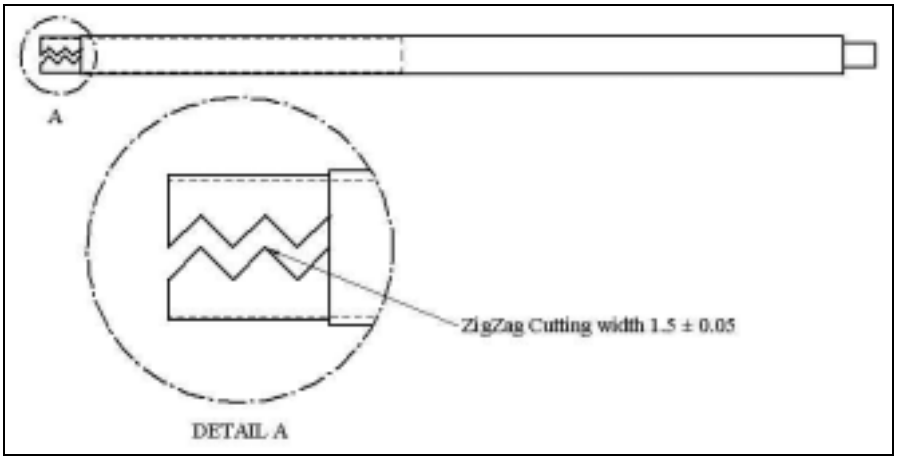

그림 6. 튜브형 연속주조를 위한 스타트바

그림 7. 연속주조를 이용한 Cu 튜브

그림 8. 연속주조를 이용한 DU 튜브