

## 레이저를 이용한 Zr-1Nb 피복관의 봉단마개 용접 연구

# A Study on the End Cap Welding of Zr-1Nb Tube by Laser

김정석, 김한수, 정창용, 김수성, 김웅기  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

가연성흡수봉의 피복관 재료인 Zr-1Nb tube에 동일한 재질의 봉단마개를 용접하기 위해 용접파라메타를 개발하고 최적용접조건을 도출하였다. 헬륨분위기에서 가능한 용접방식에는 GTAW, PAW, LBW 등이 있으나 피복관의 치수와 가연성흡수봉의 제조조건을 고려하여 LBW를 선택하였다. 두 가지 치수의 피복관에 대해 charging voltage, rotation speed 등 용접파라메타를 달리하여 가연성흡수봉을 제조하였으며, 용접부위에 대한 He 누출시험, 미세조직 관찰 및 RT 검사를 통해 용접건전성을 평가하였다.

### Abstract

Weld parameters for the end cap welding of Zr-1Nb tube were developed and the optimal conditions for the welding of burnable absorber rod were determined. Among some weld method such as GTAW, PAW, LBW which can be applied in a He atmosphere, the last method was used for the sealing of burnable poison rod. The burnable poison rods were fabricated with different weld parameters, i.e. charging voltage, rotation speed for two kinds of cladding tubes. The soundness of welded rods was evaluated by He leak test, microstructure and radiography examination.

### 1. 서 론

노심부품봉 가운데 가연성흡수봉은 직경 4.5mm, 두께 0.45mm와 직경 7mm, 두께 0.9mm의 Zr-1Nb 피복관을 사용한다. 가연성흡수봉은 피복관에 가연성흡수물질을 장전하고 헬륨가스를 충전한 다음 봉단마개를 용접하여 제조된다. 헬륨분위기에서 적용할 수 있

는 용접방식에는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), PAW (Plasma Arc Welding), LBW (Laser Beam Welding) 등이 있다. GTAW는 일반적으로 널리 사용되고 있는 용접 방식이나 용융깊이가 얇은데 비해 열영향부가 넓기 때문에 직경이 작은 Zr-1Nb 피복관을 용접하는데 무리가 있다. 또한 LBW는 열영향부가 좁고 용접변수를 조절하여 용융깊이를 정밀하게 제어할 수 있어서 직경이 작은 피복관에 열변형을 주지않고 봉단마개 용접하는데 매우 용이하다. 따라서 가연성흡수봉의 제조를 위한 공정조건이 고려된 적절한 용접법의 선택이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 먼저 LBW를 이용한 가연성흡수봉의 봉단마개 용접부의 비드폭 및 용입특성을 비교 조사하였으며, 가연성흡수봉의 봉단마개 용접에서 최적조건을 조사하기 위하여 주요 용접변수(충전전압, 회전속도)를 분석하였고, 이에 따른 각 시편에 대한 He 누출시험, 미세조직 관찰 및 RT 검사를 통하여 용접부의 건전성을 평가하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료

피용접물의 재료는 Zr-1Nb 합금이며 그 조성은 표 1에 나타내었다. 피용접물의 크기는 가연성흡수봉의 피복관으로 사용되는 직경 4.5 x 두께 0.455mm와 직경 7.0 x 두께 0.9 mm의 2종류이다. 봉단마개 또한 피복관과 동일한 재질의 Zr-1Nb 봉으로부터 가공되었다.

### 2.2 실험방법

용접실험 전에 피복관 표면의 묻어있는 이물질을 제거하기 위하여 피복관의 양 끝단과 봉단마개를 아세톤으로 1분간 초음파 세척하고 건조시켰다. 봉단마개 용접실험에 500W 급의 Nd:YAG Laser 용접기를 사용하였다. lens holder를 가공하여 laser beam의 초점이 용접부 표면에 맞도록 조절하였으며, 봉단마개의 크기에 따라 cap holder를 가공하여 피용접물의 배열을 맞추었다.

2가지 크기의 피복관에 대해 봉단마개의 용접조건은 표 2와 같다. 피용접물을 용접기의 chamber에 장입하고 봉단마개와 피복관의 배열을 맞추고 laser beam의 초점과 용접부위의 위치를 정확하게 조정한다. 진공펌프를 가동하여  $5 \times 10^{-3}$  torr 이상의 진공도를 유지한 후 헬륨가스를 충전한다. chamber내의 헬륨가스압력이  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ 에 도달하면 가스밸브를 잠그고 주어진 용접파라메타에 따라서 용접을 진행한다.

용접된 가연성흡수봉의 용접건전성을 평가하기 위해 헬륨 RT 검사와 헬륨 누출 시험을 하였으며 용접부의 단면을 절단하여 일련의 metallography과정을 거친 다음 광학현미경을 이용하여 용접결합, 열영향부위, 용융깊이 등을 검사하였다.

#### 2.2.1 RT 검사

일반적으로 핵연료 피복관 봉단 용접부의 건전성을 검사하기 위하여 헬륨누설시험, 와전류탐상시험, 초음파탐상시험, 방사선투과시험과 같은 비파괴검사와 금속학적 조직시험, 기계적 시험과 같은 파괴검사가 수행된다. 각각의 검사방법은 장단점이 있으며 본 연구에서는 용접 비이드 폭이 수 mm에 불과한 용접 영역 내부의 미세결함을 비파괴적으로 검사하고 용접부의 건전성을 확인하기 위해 마이크로포커스 X-선 투과시험을 적용하였다. 연료봉 용접부에 대한 마이크로포커스 X-선 투과시험을 위해 마이크로포커스 X-선 발생장치, 고분해능 image intensifier와 비디오 카메라, 연료봉 회전장치, 방사선 차폐체 및 영상처리장치로 구성된 X-선 투과시험장치를 이용하여, 연료봉 용접부를 검사하였다. 용접부에 존재하는 결함을 세밀하게 검사하기 위하여 영상처리방법을 적용함으로써 랜덤 노이즈가 감소하고 콘트라스트가 개선된 X-선 영상을 획득하였으며 개선된 영상을 이용하여 용접부에 존재하는 결함을 검사하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

레이저용접은 집광된 빔 에너지를 이용한다는 점을 감안하여 볼 때, 광학전송계의 특성인 집광렌즈의 초점거리를 비롯하여 레이저빔 크기, 레이저변수 및 열변형 등이 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 공정변수들은 용접장치가 정해지면 작업자로서 손댈 수 없는 부분이 있는 반면에 용접을 실시할 때마다 시편조건에 따라 작업자가 최적의 상태로 유지해야 하는 조건이 있다. 따라서 레이저용접에서 용입깊이에 영향을 주는 공정변수로는 초점위치, 보호가스, 용접속도 및 레이저변수 등을 들 수 있다. 여기서 레이저변수란 발전부에서 얻어지는 출력 특성 즉, 충전전압, 반복율 및 펄스폭 등을 제어하기 위하여 작업자가 바꿀 수 있는 조건들이다. 일반적으로 레이저의 발산각이 커지면 spot size가 커질 뿐만 아니라 집광렌즈로 입사되는 레이저빔의 크기도 달라진다. 특히 레이저용접에서 레이저변수에 의해 결정되는 파워밀도는 에너지가 시편에 입사되는 효율을 결정짓는데 중요한 역할을 하게 된다. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 용접형상에 영향을 주는 주요 변수는 충전전압, 반복율, 펄스폭 및 회전속도 등이다. 본 연구는 이러한 여러 가지 용접변수에 따라 적합한 Zr-1Nb 피복관의 용접형상이 어떻게 변하는지 알아보았다. 그림 2는 회전속도가 Zr-1Nb 피복관의 봉단마개 용접에 미치는 영향을 조사한 것이다. 그림 2의 (a)와 (b)는 같은 용접과워(280V)에 지그의 회전속도를 각각 8RPM, 10RPM으로 변화시킨 것이다. 서로 다른 두 조건에 대해 RT검사에서는 아무런 용접결함도 발견되진 않았으나 회전속도가 느리면 미세조직에서 열영향부위가 큰 것을 볼 수 있다. 8~10RPM의 범위에서 피용접물의 회전속도는 Zr-1Nb 피복관의 용접성에 결정적인 영향을 미치지 않으나 회전속도가 빠르면 용접부의 열영향부위가 작고 표면상태에 있어서 bead의 모양이 매끈한 것으로 나타났다.

다음은 충전전압의 영향을 그림 3, 4에서 나타내었다. 그림 3은 직경 4.5mm 관에 봉단마

개를 용접한 것으로 회전속도를 10RPM으로 고정하고 충전전압을 (a) 260V, (b) 280V, (c) 300V로 각각 변화시켰을 때의 결과를 보여주고 있다.

그림 3의 (a)를 보면 용접깊이는 충분치는 않으나 용접부가 봉단마개까지 형성되어 있어 접합은 이루어진 듯 하다. 그러나 RT검사에서 용접결함인 용접선이 부분적으로 나타나 는 것으로 보아 파워부족으로 인해 전체적으로 균일한 용접깊이를 형성하지 못했기 때문으로 사료된다. 그러나 (b)와 (c)는 파워가 커질수록 용접부가 깊어지면서 용접선이 전혀 보이지 않는 균일한 접합이 이루어 졌다. 또, 파워가 증가하여도 표면의 bead 모양 역시 매끈하고 과잉용융도 없는 것으로 보아 파워도 적당한 것으로 사료된다.

그림 4는 직경 7mm 관에 봉단마개를 용접한 것으로 회전속도 10RPM, 충전전압을 (a)320V, (b)360V, (c)400V로 변화시켰다. 이 실험 역시 (a)는 RT검사 통해 파워부족으로 인한 용접선이 나타났으나 (b), (c)는 파워가 커짐에 따라 용접부가 커지면서 균일한 용접이 이루어 졌다. 그러나 (c)의 미세조직을 보면 입계성장이 뚜렷하게 나타나고 있으며 다른 두 조건에 비해보면 표면의 과잉용융이 일어났음을 알 수 있다. 이런 결함들은 과도한 파워에 기인한 것으로 사료된다.

그림 5, 6은 각 피복관과 봉단마개 용접시 충전전압에 따른 용접깊이를 나타내고 있다.

헬륨 누출 시험은 결함이 발견되지 않은 small tube의 (b), (c)와 large tube의 (b), (c)를 가지고 실험한 결과 시험 주변온도 19°C, 시험 용기 진공도  $5 \times 10^{-5}$  Torr 이상에서 누출을  $1 \times 10^{-9}$  (mbar l/sec or cc/sec STP)이하로서 용접부의 건전성이 입증되었다.

#### 4. 결론

본 연구는 가연성흡수봉 제조를 위한 Zr-1Nb 피복관과 봉단마개를 Nd:YAG Laser 용접기를 이용하여 회전속도와 충전전압을 변수로 용접실험을 하였다. RT 및 미세조직 검사, 헬륨 누출 시험 등의 결과를 토대로 종합해보면,

1. 직경 4.5mm, 두께 0.455mm 피복관 봉단마개의 최적 용접조건은 용접속도 10RPM, 용접 peak power는 280~300V가 적합하다.
- 2 직경 7mm, 두께 0.9mm 피복관 봉단마개의 최적 용접조건은 용접속도 10RPM, 용접 peak power는 340~360V가 적합하다.

이상의 용접조건에서 가연성 흡수봉의 용접부가 최적의 용접건전성을 갖는 것으로 평가되었다.

## Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

## 5 .참고문헌

- [1] 김수성, 이정원 외 4명, 광섬유 전송시 Zircaloy-4 봉단레이저 용접이 특성조사, 대한용접학회 춘계학술발표 개요집, 05 (1998), pp.246~248
- [2] 김수성, 이정원 외 4명, Nd:YAG레이저 이용한 Zr-4봉단마개 용접특성 연구, 대한용접학회, 춘계학술발표 개요집, 05 (1996), pp.219~222
- [3] 김수성, 김덕현, 김철중, 펄스형 Nd:YAG레이저를 이용한 지르칼로이-4 용접 특성 조사, 대한용접학회, Vol 9, (1991), pp.23~31

Table 1. Chemical composition of alloy Zr-1Nb

Element	Max. content (ppm)	Element	Max. content (ppm)
Hf	500	K	40
Si	200	Cd	0.3
Al	80	Li	8
Ni	200	Mo	50
Cu	50	O	1000
Be	30	C	200
Ca	300	N	60
Mn	20	F	30
Ti	50	Nb	9000-11000
Pb	50	Sn	500
B	0.5	H	15
Fe	500	Cl	30
Cr	200		

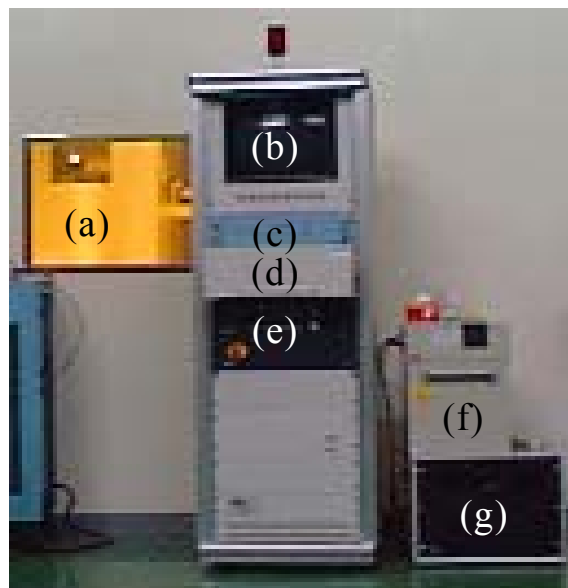


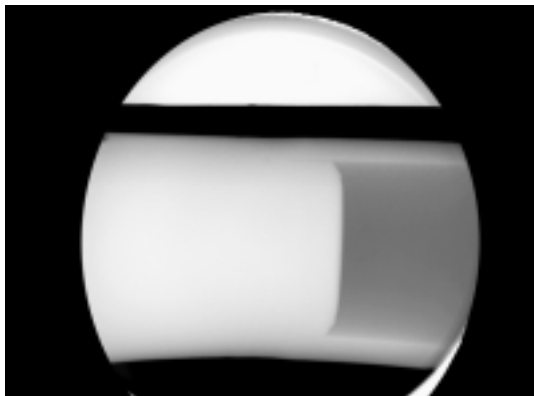
Fig. 1. X-ray inspection system (a)Shield cabinet (b)CRT monitor (c)Image intensifier controller (d)Motion controller (e)X-ray generator controller (f)High voltage generator (g)Vacuum system

Table 2. Condition of Laser Welding

No.	실험 조건		비고	
	회전속도 (RPM)	Voltage (V)		
1-1	8	260	frequency ; 7pps time ; 7ms ø4.5, t=0.455mm tube (small tube)	
1-2	10			
2-1	8	280		
2-2	10			
3-1	8	300		
3-2	10			
4-1	8	240		
4-2	10			
5-1	8	200		
5-2		180		
6-1	10	400		frequency ; 7pps time ; 7ms ø7.0, t=0.9mm tube (large tube)
6-2	10	360		
7-1	10	320		
7-2	10	280		



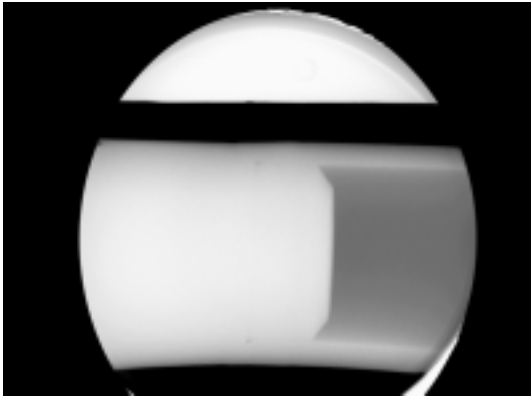
(a) 2-1 (280V, 8rpm, 7ms, 7pps)



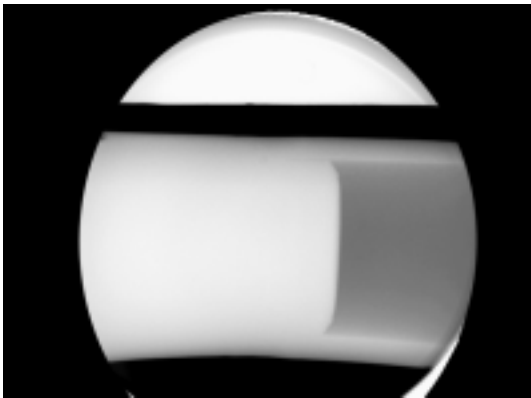
(b) 2-2 (280V, 10rpm, 7ms, 7pps)

Fig. 2. Photos of radiography and microstructure of end cap weld with rotation speed.

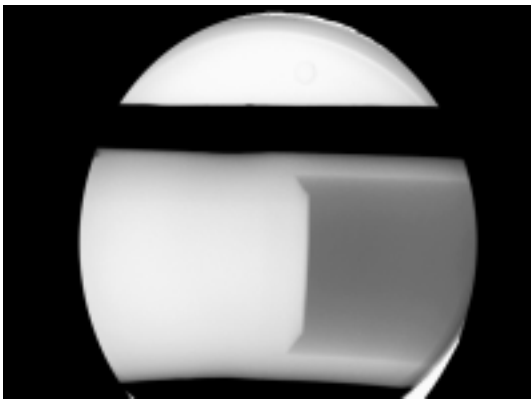




(a) 1-2 (260V, 10rpm, 7ms, 7pps)

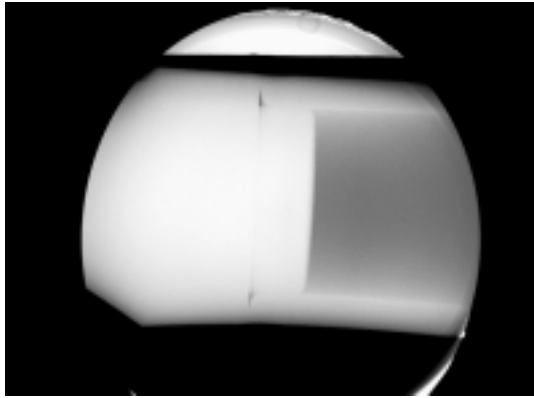


(b) 2-2 (280V, 10rpm, 7ms, 7pps)

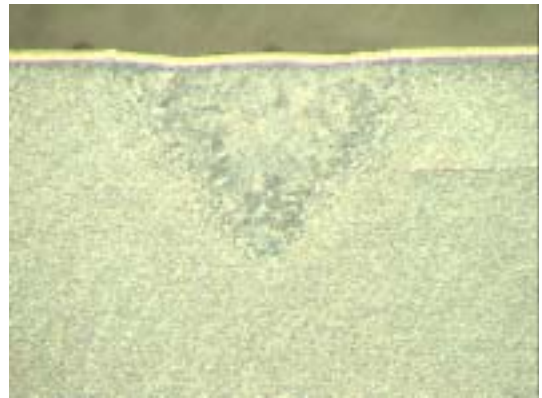
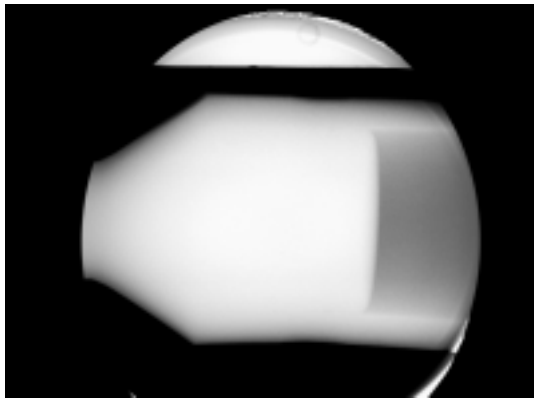


(c) 3-3 (300V, 10rpm, 7ms, 7pps)

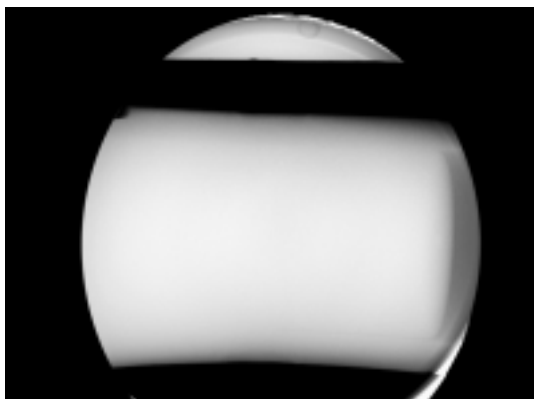
Fig. 3. Photos of radiography and microstructure of end cap weld for small tube with charging voltage.



(a) 7-1 (320V, 10rpm, 7ms, 7pps)



(b) 6-2 (360V, 10rpm, 7ms, 7pps)



(c) 6-1 (400V, 10rpm, 7ms, 7pps)

Fig. 4. Photos of radiography and microstructure of end cap weld for large tube with charging voltage.

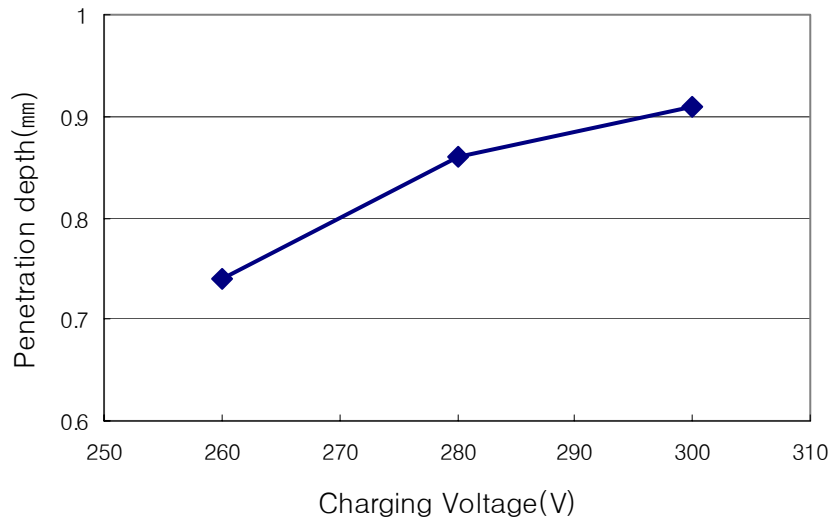


Fig. 5. Penetration Depth of small tube with Charging Voltage

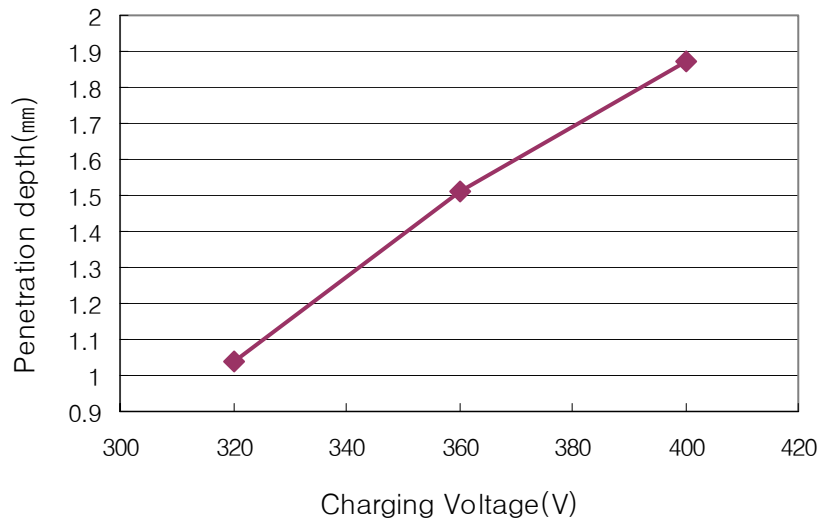


Fig. 6. Penetration Depth of large tube with Charging Voltage