

LVDT 제조를 위한 실튜브 레이저 용접기술

김수성 · 이철용 · 주기남 · 고진현

Laser Beam Welding Technology of Seal Tube for Radiation-Resistant LVDT Manufacturing

Soo-Sung Kim, Chul-Yong Lee, Kee-Nam Choo and Jin-Hyun Koh

1. 서 론

원자력 분야에서 핵연료의 성능평가는 연구용 원자로를 이용하여 수행된다. 이를 위해 일정 형태의 캡슐과 여기에 장착될 계장 핵연료 연료봉이 제작된다. 또한 조사시험용 연료봉은 조사시험에 맞게 설계되고, 핵연료 성능 특성 평가를 위해 열전대와 함께 압력 측정용 LVDT(Linear Variable Differential Transformer), 변형 측정용 LVDT 및 기타 계측기기가 부착 조립된다¹⁾. 이러한 정밀 계측기기가 부착된 연료봉은 원자로 내에서 연소 중 클래딩(cladding)은 파손되지 않아야 할 뿐만 아니라 방사성 핵분열 생성물이 누출되지 않도록 설계되어야 한다. 특히 LVDT 부품 용접부의 건전성에 대한 요구조건은 엄격할 뿐만 아니라, 조사시험용 계장 캡슐제작에서 매우 중요하다.

이러한 핵연료 계장을 위한 온도센서의 피복재에 용접은 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding), 레이저 및 전자빔 방식 등이 적용되고 있으나 다양한 종류의 피복 재료와 여러 형태의 조사시험용 연료봉 제작에 마이크로용접 적용 가능성에 대하여 관심이 증가하여 연구가 진행 중에 있다. 이들 용접방식 중 GTA 용접은 생산 공정에서는 매우 유리하나 마이크로 용접과 비교하여 용접 후 열영향부, 열변형의 문제가 있어, 특히 이종금속의 클래딩 용접에서는 이음형상에 따라 적용이 제한되고 있다. 현재 핵연료 계장 연료봉의 부착물에 대한 연구사례로 미국 INL(Idaho National Lab.)와 프랑스 Thermocoax사에서는 레이저 그리고 노르웨이 Halden사에서는 EB(Electron Beam)가 있다²⁾. 레이저 용접은 비접촉 공정으로 아크용접에서 용접봉에 의한 결함과 GTA 용접에서의 전류에 의한 손상을 피할 수 있고, 광섬유에 의한 전송이 가능하여 기존의 용접 방법으로는 접근이 불가능한 지역에서도 용접이 가능하므로 원격 용접 및 마이크로용접의 관점에서 가장 매력적인 요소이다. 아울러 핵연료 계장 캡슐장치의 고도화

및 이종금속 간의 마이크로용접의 적용을 위하여 최근에는 고효율과 빔 품질이 우수한 레이저 용접기술이 원자력분야 핵연료 정밀부품 가공에 점차 활용되고 있다³⁾. 또한 고온재료용 계장캡슐에 사용되는 3 핀 FTL(3-pin Fuel Test Loop) 등의 고연소도 핵연료 제조를 위하여 지속적인 레이저용접기술 개발이 필요하다.

본 기술보고에서는 압력 및 변형 측정용 LVDT 정밀부품을 연구용 원자로의 핵연료 성능평가에 적용하기 위하여 국내·외 핵연료 계장 관련 마이크로용접기술 동향을 조사하고, Zr합금 및 이종금속을 이용한 실튜브(seal tube) 제작에 용접의 적용 가능성을 검토한다.

2. 핵연료 계장용 마이크로용접 기술 동향

원자력 선진국에서는 1970년대부터 재료 및 핵연료에 대한 계장 조사시험을 많이 수행하여, 계측기기와 계측 센서의 부착기술 그리고 조사장치 등에 대한 기술이 많이 개발되었다. 특히 핵연료 조사시험 관련하여 개발된 기술은 핵연료 계장용 클래딩(cladding) 및 중심 온도 측정, 클래딩의 직경 및 신장 길이 변화, 연료봉 내의 핵분열가스(fission gas) 발생에 의한 압력변화 및 핵분열 가스 분석 등을 중심으로 전개되어 왔다. 이들 변수를 측정하기 위한 고온용 열전대와 클래딩 표면 온도 및 중심에 열전대를 부착하는 방법에 대한 사례를 다음과 같이 소개한다.

2.1 Zr-4 연료봉 표면에 열전대 용접

1980년대 미국의 INL에서는 직경 0.61mm Zr-4(Zircaloy-4) 연료봉에 0.13mm 직경의 Mo 와이어와 BeO 절연체를 사용하여 외경 0.51mm 두께의 열전대를 Fig. 1과 같이 표면에 홈을 파고 레이저용접으로 부착하였다. 성능실험으로 K형 티타늄 시스(K형 Ti보호관, 1.2mm)와 내재 K형(intrinsic K type, 0.25mm) 열전대를 비교하였는데, 수중에서 8.5ms의 평균 상승

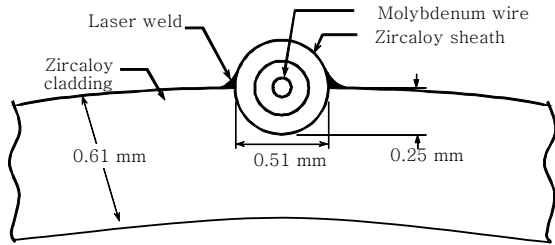


Fig. 1 Mo-Zircaloy thermocouple

시간, 0.3ms 표준 변위, 19°C/ms 과도응답 및 144°C 평균 피크 값을 보여 양호한 특성이 확인되었다⁴⁾.

2.2 LOFT 클래딩 표면 온도센서 용접

티타늄 시스와 MgO 절연체 K형 열전대를 사용하여 냉각재 상실 사고(LOCA, Loss Of Coolant Accident)에서 연료봉의 표면온도를 측정하는 실험이 수행하였다⁵⁾. 이 열전대 시스는 Ti 첨가 와이어(Ti filler wire)를 사용하여 레이저 용접되었고, LOFT(Loss Of Fluid Test) 표면 열전대의 성능실험은 클래딩 표면에 끼워 넣은 형태의 열전대로 온도변화를 비교 측정하였다. 여기서 루프(loop)의 실험조건은 15.5 MPa, 온도 563K, 유량 1.5 l/s 에서 루프의 유량을 차단하여 열전대의 온도변화를 측정 한 실험 결과는 LOFT 열전대와 끼워 넣은 형태의 열전대가 거의 유사한 온도응답을 보였다. 이와 같이 열전대 시스 용접시편과 LOFT 표면 열전대를 이용하여 연료봉의 표면온도를 측정할 수 있었다.

2.3 끼움형 지르칼로이 시스 용접

직경 0.61mm의 K형의 Zr 시스 열전대를 가공하여, 0.43mm 두께로 납작하게 만들어 Fig. 2와 같이 연료봉 표면에 레이저 용접으로 끼워 넣은 형태로 만들었다⁶⁾. 이러한 열전대는 LOFT 클래딩 표면 열전대와 비교하기 위해서 제조되었다. 이때 열전대 온도의 응답시간은 8ms로 측정되었다.

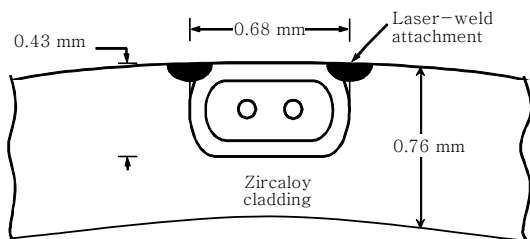


Fig. 2 Embedded Zircaloy sheath

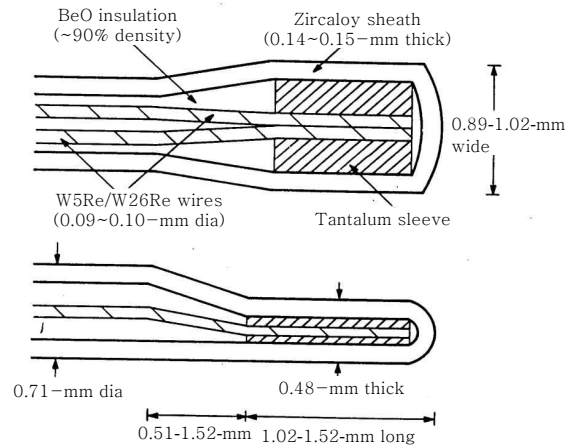


Fig. 3 Zr sheathed W-Re cladding thermocouple

2.4 고온용 지르칼로이로 피복된 열전대 용접

Fig. 3과 같이 0.71mm 직경의 지르칼로이 시스에 텅스텐-레늄(W-Re) 합금 열전대를 지르칼로이 클래딩(Zircaloy cladding)에 부착하여 경수로(Pressurized Water Reactor, PWR) 환경조건에서 사용되었다⁷⁾. 절연체인 베릴륨 산화물은 지르칼로이와 우수한 양립성 그리고 고온 저항성 때문에 사용된다. 한편 센서의 온도범위는 지르칼로이 시스의 용점에 의해 제한을 받는다. 100시간의 PWR 조건으로 성능실험을 수행했을 때 이 열전대는 열과 압력의 영향을 받지 않았다. 또한 1370°C에서 50 고속 열사이클(fast thermal cycles) 14초 동안 사용 시 열전대의 건전성이 입증되었다. 그리고 레이저용접으로 부착된 이 열전대의 응답시간은 약 24ms로 측정되었으며, 이때 모의 원자로 냉각 파이프의 과열(blowdown) 조건실험(980°C 스팀과 수증 주변온도)은 5 내지 6 cycles 이었다. 여기서 열전대의 건전성 실패는 고온에서 높은 산화가 발생하여 W-Re 합금의 온도기능을 약화시켰기 때문이다.

2.5 피복재 및 중심온도 측정을 위한 열전대 용접

미국 INL의 파워 버스트(power burst) 시설에서 연료봉 클래딩 및 중심온도를 측정하기 위해 2가지 형태의 열전대를 만들었다²⁾. 클래딩 표면의 온도를 측정하기 위해서 지르코늄/탄탈륨(Zr/Ta) 이중 피복을, 중

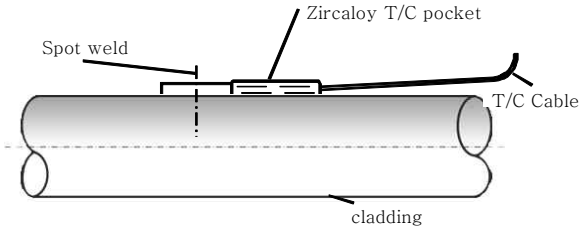


Fig. 4 Pocket type thermocouple

심온도 측정을 위해서 몰리브덴/레늄(Mo/Re) 합금 시스템을 사용하였다. 또한 이들 각각 열전대의 절연체로 BeO을, 전열소자(thermo element)로는 W5Re/ W26Re를 사용하였다. 클래딩에 지르칼로이 첨가제(Zircaloy filler)를 사용하여 레이저 용접으로 열전대를 부착하였다. 그리고 부착 후 열전대가 부풀어나는 것을 방지하기 위하여 최소 용접거리는 2.5cm로 유지하였다.

그밖에 열전대를 클래딩에 부착하는 방법으로 노르웨이 Halden사는 Fig. 4와 같이 IFA-613 시험리그(test rig) 방법을 고안하였다. 이것은 얇은 지르칼로이 포켓을 클래딩 표면의 열접점(hot junction) 앞쪽으로 레이저 스폿용접을 하였다. 또한 Fig. 4에서와 같이 지르칼로이 포켓 내에 삽입된 열전대 열접점이 위치하는 곳에 얇은 판재를 대고 레이저 스폿용접을 하였다.

2.6 중심온도 측정을 위한 열전대 용접

핵연료 계장 시 열전대를 연료봉 중심에 설치하여 온도를 측정할 때, 가장 중요한 문제는 핵분열 가스의 누출을 방지하기 위한 밀봉방법이다. 1982년 S. Wilkins⁸⁾는 Fig. 5와 같이 확장 케이블(extension cable)에 금속/세라믹 실(metal/ceramic seal)을 사용하는 방법을 고안하였다. Fig. 5(a)에서와 같이 핵분열 가스 밀봉은 스플라이스 하우징(splice housing) 혹은 확장

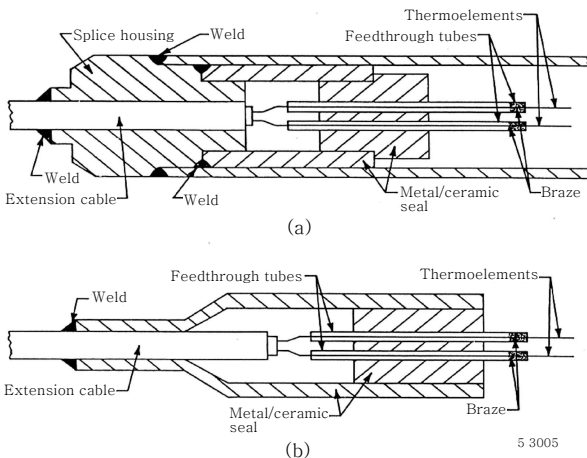


Fig. 5 Fission gas sealing

케이블 종단에 설치되며, 브레이징된 열전대 와이어가 금속/세라믹 실(metal/ceramic seal)의 작은 튜브를 관통한다. 그리고 스플라이스 하우징과 확장 케이블 접촉 부분을 레이저 용접하였다. 또한 Fig. 5(b)는 확장 케이블과 W-Re 와이어가 연결된 부분을 보여준다. 이때 열전대 실 건전성 확인은 백필 홀(backfill hole)에 He을 채우고, 레이저 용접하여 He 누출시험으로 확인되며, 마지막으로 X-ray 검사를 수행하였다.

반면에 이와 유사한 방법으로는 노르웨이 Halden사에서 고안된 2 가지 방법 중 첫 번째는, 공유압출성형 이음(coextruded joint) 방법으로 중심 열전대를 설치하고 연료봉 지르칼로이 봉단마개(Zircaloy end-plug)에 지르칼로이 및 인코넬600(Inconel600) 재질을 이용하는 공유압출성형 이음 형태로 삽입하여 밀봉 부분을 EB 용접한다. 한편 두 번째로 열전대 외부에 실튜브를 삽입하고, 봉단마개에 스웨지록(swage-lock) 방식으로 한 다음, 마지막으로 EB로 밀봉하는 방법을 사용하고 있다. 국내의 경우 핵연료 계장 시 UO₂ 소결체에 대한 중심온도 측정시험이 수행되었지만, 중심 온도 센서의 열전대 용접기술이 아직 개발되지 않아 실튜브가 조립된 센서를 외국에서 직접 주문 제작하였다. 최근에 들어 건식공정 핵연료 개발로 계장시험 시 중심온도 센서에 실튜브를 이용하는 레이저용접이 시도되었으나 현재로서는 여러 가지 기술개발이 필요한 실정이다.

3. Zr합금 및 기타 이종금속 용접

3.1 실험장치 및 방법

실험에 사용된 레이저 용접장치는 Fig. 6에서와 같이 레이저 발전장치, 광섬유 전송헤드 및 기타 주변기기로 구성되었다. 여기서 레이저 발전은 IPG사의 150W급 펄스형 파이버 레이저이며 모델은 YLR-150/1500-QCW-AC 이다. 발전된 레이저는 빔 확대기로 확대된 후 집광렌즈로 집속되어 50μm SI형 광섬유를 거쳐 용접시편 위치로 전송하게 된다. Fig. 6에서와 같이 광섬유로 발산되어 나오는 레이저는 광섬유와 연결된 전송용 광학기기에서 두 개의 렌즈를 통하여 재집속되어 원

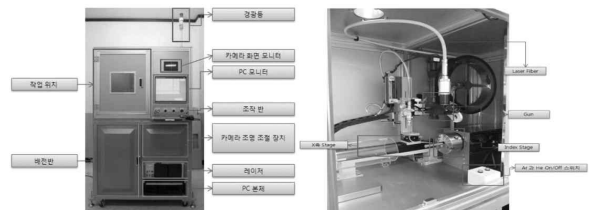


Fig. 6 Experimental setup of laser welding system

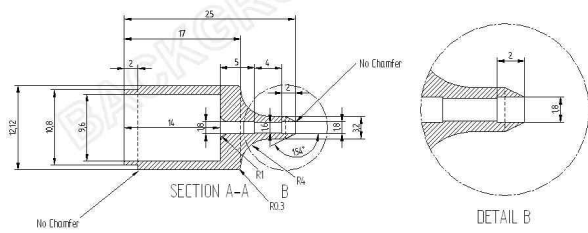


Fig. 7 Configurations of laser welding specimen



Fig. 8 Welding nozzle using assistant He gas

Table 1 Laser welding parameters and its weldability

Cladding metals	Laser power(W)	Pulse width(ms)	Welding speed(rpm)	Laser weldability
STS316L x STS316L	30% (45W)	10	2	Satisfactory
Zr-4 x Ta	35% (53W)	10	2	Satisfactory
Zr-4 x STS316L	30% (45W)	10	2	(brittle)

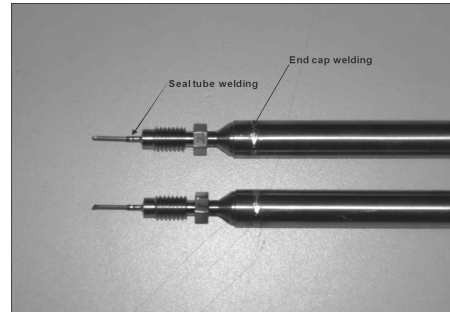


Fig. 9 Welding samples using end cap and seal tube parts

하는 목적의 위치에서 용접하게 된다. 레이저의 집광렌즈는 초점거리가 137mm이며 레이저 스폿크기는 약 400µm 내외이다. 그리고 전송용 광학계는 x축 제어장치에 연결되어 용접속도와 시험편의 위치를 정밀하게 조정하였다.

예비 용접시험에서는 Zr-4 봉단마개 및 실튜브 용접 비드 형상의 관찰과 용입 상태를 조사하였으며, 이때 사용한 시험편은 외경 10 mm, 두께 0.5mm의 Zr-4 피복관, 봉단마개 및 실튜브이며, Zr-4 시험편의 이음 형상은 Fig. 7과 같다. 또한 Zr-4 시험편은 이물질을 제거하기 위하여 메타놀 용액에 30분간 세척한 다음 건조기에 의해 60°C로 건조시켰다. Fig. 7과 같은 원주 방향의 실튜브 용접은 파이버 레이저를 효율적으로 이용하면서 가능한 용접 폭과 용접 깊이가 적절하게 용접하기 위한 이음구조를 가졌으며, 두께 0.5mm 이상의 깊은 용접을 위해서는 Table 1과 같이 적절한 레이저 변수를 선정하였고, 또한 높은 파워밀도를 갖도록 레이저를 집속시킬 때 용접 중에 집광렌즈의 흠 제거 및 용접표면의 산화방지를 위해 고순도 He(UPC grade)을 사용하였다. 그리고 원주방향의 용접 조건에 만족하도록 Fig. 8과 같이 특수하게 설계된 보호가스 용접노즐을 제작하여 사용하였다⁹⁾. Fig. 9는 실제로 Zr-4 봉단마개와 실튜브를 이용한 용접 샘플을 보여 준다.

3.2 전송용 광학헤드 설계 및 개선

효과적인 실튜브 레이저용접 실험을 위하여 보다 개선된 전송용 광학헤드 장치가 필요하게 되었다. Fig. 10에서와 같이 광학헤드 장치의 설계 변경 전과 변경 후의 내용을 비교하여 보자. 전송용 광학헤드의 변경 전 내용을 요약하면 광학계 외부에 콜리메이션(collimation) 렌즈를 장착하여 이를 전송하는 레이저가 약간 수렴하는 특성을 가지고 있으며, 이때 사용된 집광렌즈의 초점거리는 137mm 정도에서 형성되었음을 알았다. 이러

$$\begin{aligned} \text{Image 1} \times \text{NA 1} &= \text{Image 2} \times \text{NA 2} \\ \text{의 관계 (Lens's Law)에 의하면} \\ 0.05\text{mm} \times 1/(2 \times 5) &= \text{Image 2} \times 1/(2 \times 34.5) \\ \text{Image 2} &= 0.345\text{mm} \end{aligned}$$

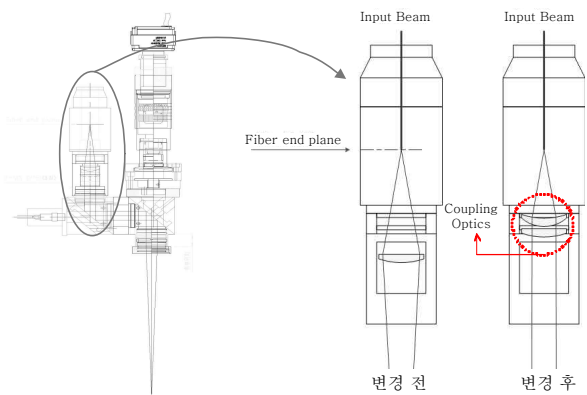


Fig. 10 Configurations of improved laser coupler

한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 10과 같이 단일 렌즈로 제작된 콜리메이션 렌즈를 수차 보정하여 구성된 더블릿(doublet) 렌즈로 대체하였다. 이때 레이저의 출사 빔이 가지는 발산각을 $NA=0.1$, 광섬유의 코어 직경이 $50\mu\text{m}$ 이어서 더블릿 렌즈의 초점거리는 28.1mm 로 하였으며 또한 $F\#$ 는 5의 값을 가지게끔 설계하였다. 상기의 실험 결과를 토대로 하여 광학적 렌즈의 법칙에 따라 계산된다. 여기서 개선된 전송용 광학헤드를 통해서 구현될 수 있는 스폿 크기는 대략 0.35mm 의 직경을 이루고 있었으며, 아래와 같이 레이저 스폿 크기의 계산방법을 보여주고 있다¹⁰⁾.

3.3 실험 결과

3.3.1 Zr-4 봉단마개 용접특성 분석

본 실험에는 먼저 광섬유 전송용 광학헤드를 이용한 Zr-4 봉단마개시험편에 대한 비드 표면을 살펴보았다. Fig. 11은 펄스폭 10ms, 반복율 5pps, 레이저 출력 150W(레이저 출력 100%)로 하였을 때 Zr-4 봉단마개 용접의 비드 형태를 보여주고 있다. 이때 He 보호가스의 유량은 90l/min , 용접속도는 2rpm 으로 하였다. 실험 결과는 용접비드 폭이 $1.0\text{--}1.1\text{mm}$ 범위였고, 비드 형태는 대체로 매끄럽게 나타났다. Fig. 12는 Zr-4 봉단마개용접의 외관 관찰 후 용접시편을 절단하여 상단 봉단마개와 하단 봉단마개 부분의 용접단면을 보여준다. 여기서 봉단마개와 피복관 사이의 용입은 $1.0\text{--}1.3\text{mm}$ 로 매우 양호하게 나타났으며, 피복관 두

께보다 2배 이상 이었다.

3.3.2 이종금속 신틸브 용접특성 분석

조사시험용 핵연료 계장인 경우 신틸브용접은 매우 정밀한 이종금속 부품으로 구성되어 이종금속 간의 제살붙이기 구조로 접합되어야 한다. 또한 용접 후에 모재와 유사한 금속학적 성질을 유지해야 하므로 적은 열변형과 양호한 비드 외관을 가져야 한다¹¹⁾. 본 실험에서는 Table 1의 용접방법과 같이 동종 및 이종금속 간의 외관 관찰으로 비교 확인하였다. Fig. 13에서와 같이 STS316L, Zr-4 및 Ta 재질을 사용했을 때 레이저 출력 30% 및 35%에서 비드표면이 매끈하게 관찰되었고 스페터링 현상은 발생되지 않았으나 이종금속인 Zr-4/Ta의 용접표면에서 스페터링 현상이 약간 발생되었다. 이것은 STS316L 재질에 비하여 Ta/Zr-4가 용융점이 높아 금속증기로 인한 미세한 산화물인 분말 형태로 산재해 있는 것으로 생각된다. 한편 이종금속 STS316L/Zr-4의 용접표면은 심하게 산화된 형태로 관찰되어 이종금속 용접부의 경계면에서 취화 현상을 보여주었다. Fig. 14는 펄스폭과 반복율 5pps를 일정하게 두고 레이저 출력을 사용했을 때 용입과 비드 폭을 나타낸 것이다. 여기서 STS316L의 경우 Zr-4/Ta보다 용융점이 낮고 시편 표면에 산화층이 없어서 흡수효율이 좋아져 양호한 용입을 얻은 것으로 판단되며, Zr-4/Ta 용접의 경우는 시험편 표면에 산화층이 존재

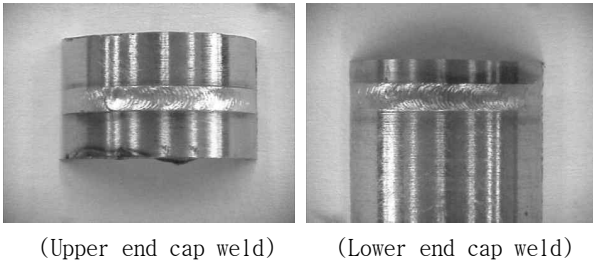


Fig. 11 Weld bead appearances using Fiber laser ($\times 20$)

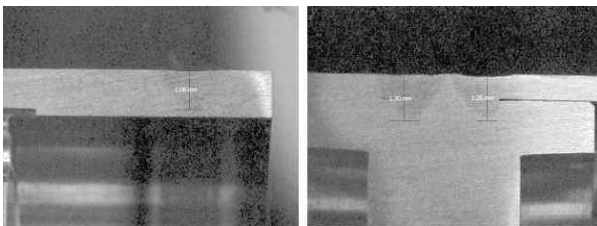


Fig. 12 Macro cross-sections of Zr-4 end cap welded specimens($\times 40$)

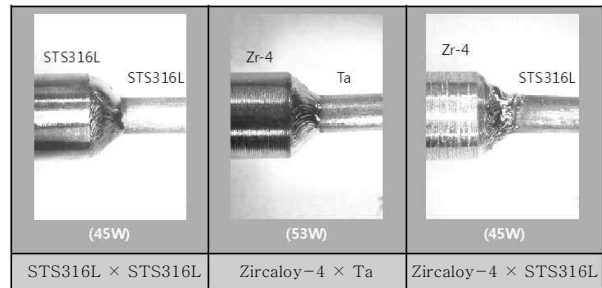


Fig. 13 Macro-graphs of STS316L, Zr-4 and Ta welded specimens($\times 15$)

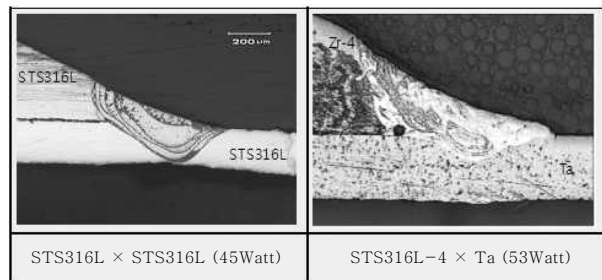
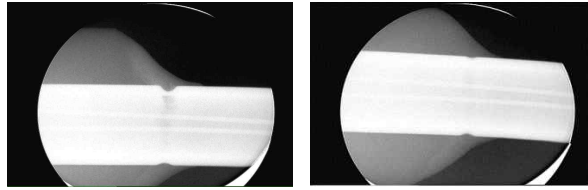


Fig. 14 Optical micrographs of STS316L, Zr-4 and Ta welded specimens($\times 50$)



STS316L × STS316L

Zircaloy-4 × Ta

Fig. 4 Pocket type thermocouple

해 다소 적은 용입의 단면이 관찰되었다. 따라서 실튜브 용접의 외관과 단면관찰에 의하여 STS316L 및 Zr-4/Ta 이종 금속간 용접 시 레이저용접 적용이 가능함을 확인하였다.

또한 미세한 실튜브 용접부의 비드 폭이 1mm에 불과하며 용접영역 내부의 결함을 비파괴 검사로 건전성을 확인하기 위해 방사선투과시험(RT) 방법인 미세초점 X-선 투과시험을 적용하여 정밀하게 검사하였다. Fig. 15는 STS316L 및 Zr-4/Ta 실튜브 용접부의 X-선 투과 영상을 보여주고 있다. 여기서 알 수 있듯이 STS316L 재질의 실튜브 부분은 X-선 투과율이 높아 짙은 색으로 표시되고, Zr-4/Ta 이종금속의 경우 실튜브 부분은 X-선 투과율이 상대적으로 낮아 밝은 색을 나타내고 있다. Fig. 13에서는 STS316L 및 Zr-4/Ta 간의 이종금속 모두 침투되어 적절하게 융합되었음을 관찰하였다. 이때 레이저 출력이 적절한 범위를 초과하면 용융된 센서 케이블 두께가 0.15mm를 관통할 수 있어 중심에 위치한 센서 라인에 중대한 영향을 미칠 수가 있다.

4. 맺음말

현재 일반 산업체뿐만 아니라 원자력분야에서도 마이크로용접을 위하여 이종금속 간의 정밀부품 및 특수 구조재를 결합하여 활용하는 추세로 나아가고 있다. 그 중 마이크로용접 공정은 고효율 및 빔 품질이 우수한 레이저를 사용하는 용접기술이 세계적인 추세로 볼 때 활발히 이용하게 될 전망이며, 향후 이러한 용접기술이 원자력의 핵연료 계장뿐만 아니라 방사선 환경에서 사용할 수 있는 고온재료용 캡슐, 3-pin FTL(Fuel Test Loop)에 장착될 연료봉 제작에도 활용하게 될 것으로 본다.

이상에서 보고한 바와 같이 핵연료 계장분야의 마이크로용접기술은 원자력 선진국에서 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 관심이 매우 미흡한 실정이다. 따라서 국내에서도 핵연료 계장의 정밀부품 용접의 적용을 추진하고자 레이저용접 관련 국외 기술동향을 조사하였

고, 조사시험 연료봉의 봉단마개용접, 압력 측정용 및 변형 측정용 LVDT 계장기기 제조를 위한 기초 연구로 STS316L 및 Zr-4/Ta 이종금속 간 용접실험을 수행하였다. 레이저를 이용한 마이크로 용접기술의 확보는 LVDT 계장기기의 제작시간을 대폭 단축시킬 수 있을 뿐만 아니라, 고가 부품의 수입대체 효과로 인하여 연구비 절감을 기대할 수 있고 그리고 조사시험 관련 연구를 보다 신속하게 수행할 수 있을 것이다. 아울러 레이저를 이용하는 마이크로용접기술을 독자적으로 개발하여 LVDT 계장기기 용접공정의 최적화, 용접시제품의 국산화 그리고 이종금속 간의 용접성능 검증 등의 분야에서 지속적인 연구가 요구된다.

후 기

This work was supported by the Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MEST).

참 고 문 헌

1. J. M. Sohn : Basic Design of Radiation-Resistant LVDTs, KAERI/TR-3552 (2007), 1-22 (in Korean)
2. O.Arrestad : Fuel Rod Performance Measurements and Re-Instrumentation Capabilities at HALDEN project, In-Core Instrumentation Proceeding, Aug. (1996), 33-42
3. V. Gapontsev, W. Krupke : Fiber Lasers Grow in Power, Laser Focus World, Aug. (2002), 83-87
4. S. C. Wilkins : Experimental Coaxial Molybdenum-Zircaloy Fuel Cladding Surface Thermocouple, TFBP/TR-284, (1978), 175-183
5. A. M. Eaton : LOFT Fuel Rod Surface Temperature Measurement Testing, CONF-781105-3, Nov. (1978)
6. S. C. Wilkins : Embedded Zircaloy-4 Sheathed Cladding Thermocouple, NUREG/CR-0271, June (1978)
7. S. C. Wilkins : Miniature Zircaloy-Sheathed Fuel Rod Cladding Surface Thermocouples, TFBP/TR-286, Dec. (1978)
8. S. C. Wilkins : Fabrication and Use of Zircaloy/Tantalum-Sheathed Cladding Thermocouples and Molybdenum/Rhenium-Sheathed Fuel Centerline Thermocouple, EGG/TFBP-6739, Jan. (1985)
9. A. Salminen, Anna Fellman : The Effect of Laser and Welding Parameters on Keyhole and Melt Pool Behavior During Fiber Laser Welding, ICALEO (2007), 416-422
10. G. C. Lim, W. M. Steen : Optics and Laser Technology, June (1982), 149-177
11. M. Bass : Laser Material Processing (Materials Processing Theory and Practices Vol. 3, North-Holland Publishing Co., (1983), 173-175



·김수성
 ·1954년생
 ·한국원자력연구원 재순환공정실증연구부
 ·용접시공 및 공정 최적화
 ·e-mail : sskim7@kaeri.re.kr



·주기남
 ·1961년생
 ·한국원자력연구원 하나로운영부
 ·원자력 재료 조사시험
 ·e-mail : knchoo@kaeri.re.kr



·이철용
 ·1960년생
 ·한국원자력연구원 하나로운영부
 ·핵연료 조사시험 및 용접설계
 ·e-mail : lcy@kaeri.re.kr



·고진현
 ·1952년생
 ·한국기술교육대학교 신소재공학과
 ·원자력 재료 및 용접야금
 ·e-mail : jhkoh@kut.ac.kr