

## 핵연료조사리그 계장선 통과부위의 밀봉을 위한 유도 브레이징 시스템 개발

홍진태\*† · 김가혜\* · 허성호\* · 안성호\* · 정창용\* · 손광재\* · 정양일\*\*

\* 한국원자력연구원 연구로이용연구본부, \*\* 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

### Development of Induction Brazing System for Sealing Instrumentation Feedthrough Part of Nuclear Fuel Test Rig

Jintae Hong\*†, Ka-Hye Kim\*, Sung-Ho Heo\*, Sung-Ho Ahn\*, Chang-Young Joung\*, Kwang-Jae Son\* and Yang-Il Jung\*\*

\* Dept. of Research Reactor Applications, Korea Atomic Energy Research Institute

\*\* LWR Fuel Technology Division, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received August 6, 2013 ; Revised October 7, 2013 ; Accepted October 7, 2013)

**Key Words:** Induction Brazing(유도 브레이징), Nuclear Fuel Test Rig(핵연료조사리그), Ni Brazing(니켈 브레이징), Sealing of Instrumentation Cables(계장선 밀봉)

**초록:** 핵연료의 연소성능을 시험하기 위해서는 시험 루프에 설치된 조사리그 내에 냉각수가 순환되도록 설계되어야 한다. 이때, 조사리그 내 냉각수는 300℃, 15.5 MPa 의 고온 고압으로 순환시키기 때문에 냉각수의 밀봉은 핵연료 조사리그를 제작할 때 가장 중요한 공정 중 하나이다. 특히 15 개의 계장선이 조사리그의 압력경계부위를 통과하게 되는데, 이의 밀봉을 위해 일반적으로 브레이징 공정이 적용된다. 본 연구에서는 조사리그 브레이징용 진공챔버 및 고주파 유도가열기를 포함하는 유도 브레이징 시스템을 개발하고, 다양한 실험을 통해 산화막이 발생하지 않는 공정변수를 검토하였으며, 브레이징 제품의 인장 시험, 단면검사, 밀봉성능검사 등을 통해 브레이징 공정의 건전성과 밀봉성능을 검증하였다.

**Abstract:** To test the performance of nuclear fuels, coolant needs to be circulated through the test rig installed in the test loop. Because the pressure and temperature of the coolant is 15.5 MPa and 300℃ respectively, coolant sealing is one of the most important processes in fabricating a nuclear fuel test rig. In particular, 15 instrumentation cables installed in a test rig pass through the pressure boundary, and brazing is generally applied as a sealing method. In this study, an induction brazing system has been developed using a high frequency induction heater including a vacuum chamber. For application in the nuclear field, BNi2 should be used as a paste, and optimal process variables for Ni brazing have been found by several case studies. The performance and soundness of the brazed components has been verified by a tensile test, cross section test, and sealing performance test.

#### 1. 서 론

핵연료의 연소성능을 분석/검증하기 위하여 한국원자력연구원의 연구용 원자로인 HANARO 에는 핵연료 종합성능검증설비인 FTL(Fuel test loop)이

설치되어 있다. FTL 은 원전의 수질조건과 동일한 환경하에서 핵연료에 중성자를 조사시키면서 핵연료 내부의 온도, 핵분열기체의 압력, 핵연료의 변형 등을 실시간으로 측정하는 설비이다. 특히 HANARO 는 다목적 연구용 원자로(Multi-purpose research reactor)로서 원자로 냉각수가 개방되어 있는 개방형 원자로 이다. 따라서 HANARO 의 냉각수는 40℃, 대기압으로 유지되기 때문에 FTL 은 경수로 핵연료 원자력 발전기와 동일한 수질 조건

† Corresponding Author, [jthong@kaeri.re.kr](mailto:jthong@kaeri.re.kr)

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

인 300°C, 15.5 MPa 과 수화학 조성을 맞추기 위하여 독립적인 냉각수 순환 루프를 갖추고 있다 (Fig. 1).

FTL의 노내조사시험부(IPS, In-pile test section)에는 시험용 핵연료봉을 장착하고 조사시험 중 핵연료봉 주변의 변화를 실시간으로 측정하기 위하여 열전대, LVDT, SPND 등의 센서들이 IPS 내·외부에 부착되어 있으며, 이들로부터 감지된 신호를 HANARO 수조수 밖에 있는 제어컴퓨터로 전달하기 위하여 계장선들이 IPS의 압력경계를 통과하여 수조 상부의 중간접속박스(junction box) 연결되어 있다. 이때 계장선 통과부위 주위로 고온/고압의 냉각수가 누설되지 않도록 밀봉성능이 유지되어야 한다.

Fig. 2와 같이 IPS의 계장선은 top flange의 sealing plug를 통해 외부로 인출되는데, 계장선의 직경은  $\phi 1.0$  mm 이고, 피복은 0.05 mm 두께의 AISI 304L이다. 또한 sealing plug의 계장선 통과부위 직경은  $\phi 1.1$  mm 이고, 재질은 AISI 316L이다. 그림에서 보듯이 계장선들이 1.4 mm 간격으로 매우 좁게 배치되어 있으므로 이런 경우 가장 신뢰성 높은 방법으로서 브레이징 공정이 적용 가능하다. 한편 브레이징 공정은 다양한 원자력 분야에서 널리 사용되고 있다. Hwang<sup>(1)</sup>은 핵연료다발 제작 시, Zircaloy 피복관과 지지체 및 간격체 접합에 로(furnace)브레이징을 적용하였으며, Shim<sup>(2)</sup>과 Cho<sup>(3)</sup>는 조사캡슐 제작을 위해 Inconel과 스테인리스 스틸의 접합에 토치 브레이징 공정을 적용하였다. 또한 Jeong<sup>(4)</sup>은 핵연료 조사리그의 계장선 통과부위 밀봉을 위해 다양한 브레이징 기초실험을 수행한 바 있다.

일반적으로 브레이징은 이종금속의 접합이 가능하고, 기밀성과 내부식성이 뛰어나며, 접합강도가 강한 장점이 있다고 알려져 있으나,<sup>(6-8)</sup> 피복두께

가 0.05 mm인 계장선의 접합에 브레이징 공정을 적용할 때 계장선이 고온에 의해 파열되기 쉽다. 또한 브레이징 공정은 재가공이 불가하므로 제품이 밀봉성능을 만족시키지 못하거나, 소재의 파열이 발생했을 때 관련 부품을 모두 새로 제작해야 하는 문제가 있다. 핵연료 조사리그에서는 설계 특성상 brazing 공정이 리그 제작의 마지막 공정에 적용되어야 하므로 내부조립체를 만든 후, 5.3 m에 이르는 조립체 전체를 거꾸로 들어올려서 마지막 공정으로서 brazing을 수행하기 때문에 브레이징 실패에 대한 기회비용이 매우 크다. 특히 기술자의 감각에 의존하는 토치 브레이징은 적용하기에 리스크가 매우 높으며, 내부조립체의 길이가 매우 길기 때문에 로 브레이징을 적용하는 것 또한 어려워 유도 브레이징을 고려해야 한다. Jeong<sup>(4)</sup>과 Park<sup>(5)</sup>은 Ar 가스를 보호가스로 하여 유도 브레이징을 수행하여 밀봉성능은 만족시켰으나, 브레이징 후의 sealing plug에 산화가 심하게 진행되어 이를 제거하기 위한 sand blast 후 가공을 수행했으나, 산화막이 완벽히 제거되지 못했다.

본 연구에서는 브레이징 공정 중 산화막 생성을 막기 위해 특별한 형태의 진공 챔버를 포함하는 자동제어 유도 브레이징 시스템을 개발하였으며, 본 장치를 이용하여 제작된 브레이징 부품의 단면 검사, 인장시험, 밀봉성능 시험을 통해 브레이징

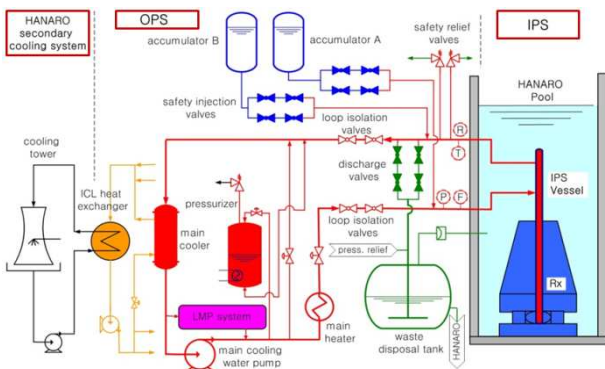


Fig. 1 Schematics of FTL

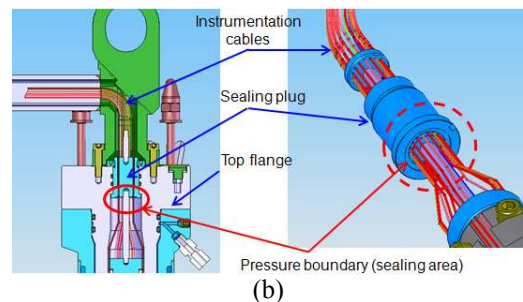
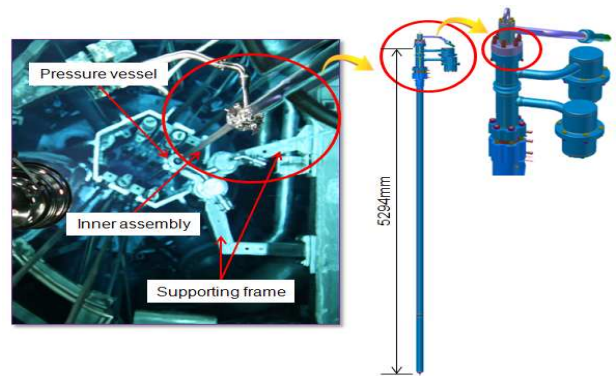


Fig. 2 Sealing area of the in-pile test section (IPS) (a) IPS and its sealing area (b) instrumentation feed through part of the IPS

공정의 신뢰성을 검증하였다.

## 2. 유도 브레이징 시스템 설계

### 2.1 고주파 유도가열기 및 유도코일

본 연구에서는 핵연료 계장선 통과부위 밀봉을 위한 고주파 유도가열 접합에 적합하도록 장치를 구성하였다. 대상물이 원자로 내에 장착되고 방사화된 냉각수와 접촉하기 때문에 방사화에 의한 영향이 거의 없는 니켈(Ni) 합금을 용가재로 사용해야 하며, 본 연구에서는 BNi-2 paste 를 적용하였다. BNi-2 의 녹는점은 970 ~ 1040℃ 이며, 기화점은 1100℃ 이다. 브레이징 대상물인 sealing plug 의 중량은 118 g 이며, 가열에 필요한 전력은 식 (1)에 의해 최대 1.23 kW 가 소모된다.

$$P = 4.186 \times m \times C_p \times \Delta T / t \quad (1)$$

여기서,  $C_p$  는 재료의 평균 비열로서 0.15,  $\Delta T$  는 가열 온도로서 1000℃,  $t$  는 가열시간으로서 60 sec 이 적용되었다. 그러나 재료의 가열 중 발생하는 열방사 손실(10 ~ 15%), 유도가열기의 회로손실(최대 5%), 열대류/전도 손실(15 ~ 20%), 가열코일의 전송 손실(15 ~ 20%)을 고려하여 정미흡수전력  $P$  보다 최소 2 배 이상의 용량을 적용해야 하며, 본 연구에서는 15 kW 용량의 OSH-140(OSUNG(주))를 적용하였다.

브레이징 공정 중 온도가 너무 높아질 경우 0.05 mm 두께의 계장선 피복이 터지거나 용가재가 기화될 수 있으므로, K-type 열전대를 브레이징 접합부 주변에 설치하여 측정된 온도를 제어기(NP-100, Hanyoung electronic co., ltd.)에 피드백 함으로써 설정된 온도에 따라 출력이 자동으로 조절되

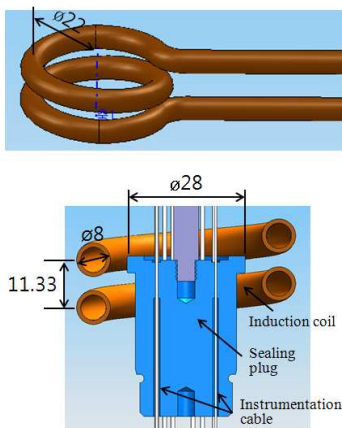


Fig. 3 Design of induction coil

도록 설계하였다. Sealing plug 의 형상이 ø28 직경의 원통형이므로, 유도코일은 외경 ø8 두께 1.0 mm 인 동관을 이용하여, 반경 ø22, 피치 11.33 mm 의 2 회전 코일로 설계하여 소재와 6 mm 간격을 유지하면서, 브레이징 대상부위가 충분히 가열되도록 하였다(Fig. 3).

### 2.2 조사리그용 진공챔버 개발

챔버는 니켈(BNi, BNi-2) 브레이징 설계 및 공정 기준인 SFA-5.31 Specification for Fluxes for Brazing and Braze Welding 에 따라, 진공압  $1 \times 10^{-3}$  Torr 이상을 견딜 수 있도록 두께 10 mm 의 AISI 304L plate 로 제작하였다(Fig. 4).

챔버 상부에는 IPS 의 내부 조립체가 조립 가능하도록 플랜지를 설계하였으며, 브레이징 접합공정을 관찰 가능하도록 sight glass 를 설계하였다.

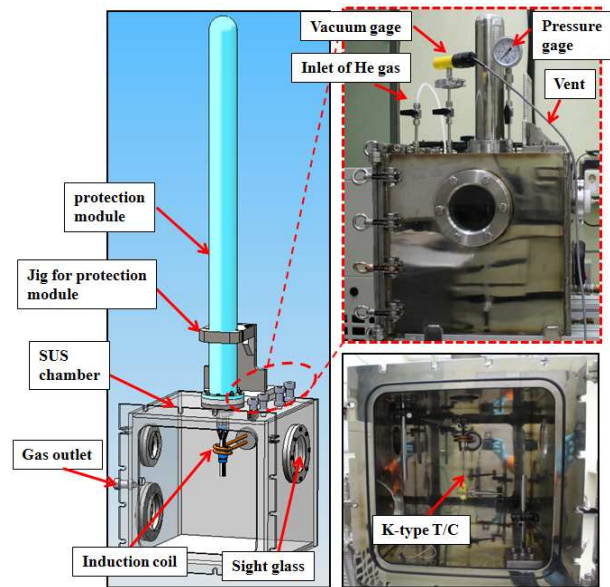


Fig. 4 Design of vacuum chamber for irradiation test rig

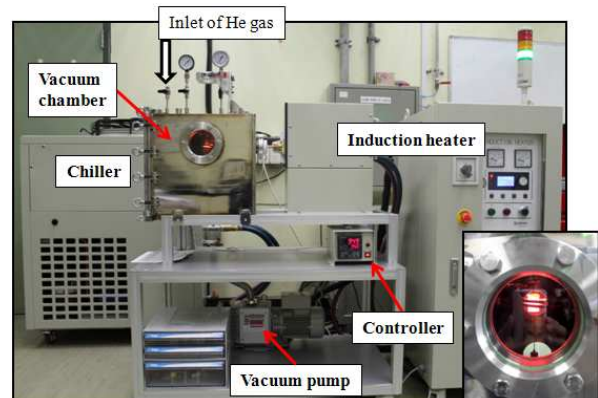


Fig. 5 Induction brazing system

또한 챔버내 purging gas 공급 및 배기, 진공도 측정을 위하여 니플을 설계하였다. 이는 진공배기 ( $1 \times 10^{-3}$  Torr) 후, He 가스 충전(0.15 MPa) 과정을 두 차례 반복하고 최종적으로 진공배기를 시킴으로써 챔버 내부의 잔존 산소량을 최소화하기 위함이다. 진공펌프는 rotary & diffusion pump(220 V, 3 Kw) 를 사용하였으며, 챔버 내부에는 브레이징부에 연결될 K-type 열전대 등의 부품 고정을 위한 지그를 배치하였다. 유도가열기와 챔버, chiller 를 결합하여 제작된 장치는 Fig. 5 와 같다.

### 3. 유도 브레이징 실험 및 밀봉성능 검증

#### 3.1 유도 브레이징 실험

전절에서 제작된 장치를 이용하여 계장선통과부위의 브레이징 실험에 적용하였다. 모든 부품은 질산을 이용하여 산세척 후, dry chamber 에서 5 시간 이상 건조하여 사용하였으며, 공정 순서는 다음과 같다(Fig. 6).

- 1) 계장선의 sealing plug 안착부에 paste 도포
- 2) Sealing plug 를 밀어 올려 BNi-2 paste 안착
- 3) Paste 건조(대기중 1 일 or 진공/50℃/2 시간)
- 4) 내부조립체를 진공 챔버에 조립하여 sealing plug 를 유도코일 중앙에 위치
- 5) Sealing plug 에 열전대 부착
- 6) 챔버 도어 밀폐
- 7) 챔버 내 진공배기( $1 \times 10^{-3}$  Torr) → He gas 0.15 MPa 충전 작업 2 회 반복
- 8) 제어기 세팅(시간별 온도제어)
- 9) 챔버 내 진공배기하여  $1 \times 10^{-3}$  Torr 도달 시, 고주파 가열기 이용 1000℃ 까지 가열
- 10) 브레이징 완료 후, 부품 온도 120℃ 이하로 냉각 후 부품 취출

브레이징 시간에 따른 가열온도 제어는 수차례 반복실험을 통해 1000℃까지 가열하는 동안 장치에서 overshoot 이 발생하지 않는 최단 시간이 5 분으로 검증되어 Fig. 7 과 같은 가열 곡선으로 진행되었으며, 이때, 최대 입력 전압, 전류, 주파수는 각각 210 V, 11 A, 25.8 kHz 였다.

본 연구에서는 개발된 장치의 브레이징 성능을 확인하기 위하여, 5 m 길이인 실제의 rig 대신 내부 부품만을 이용하여 실험을 진행하였다. 따라서, 300 mm 길이의 protection module 을 사용하고, 내부에는 고정용 부품을 설계하여 브레이징 실험에 적용하였다.

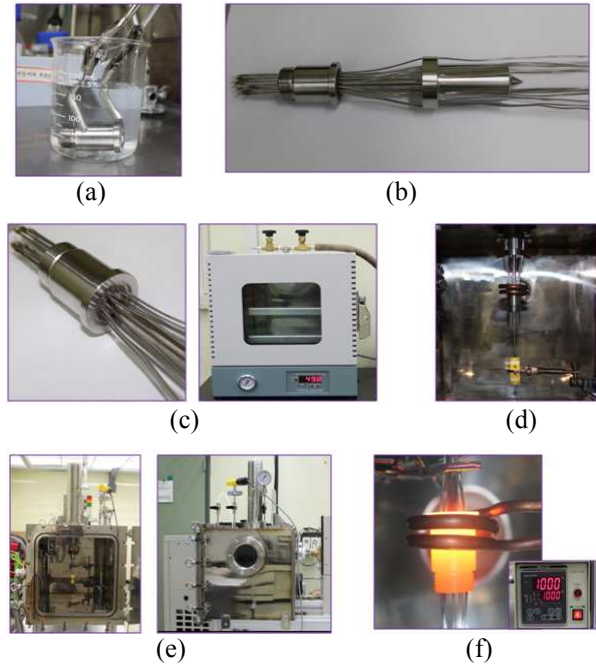


Fig. 6 Sequence of induction brazing process of the sealing plug (a) Acid pickling (b) Assemble MI cables with a sealing plug (c) Spread paste and dry in the chamber (d) Install a sealing plug at the of induction coil (e) Close cover of the chamber and purge helium gas (f) Heat up the sealing plug up to 1000℃ and cool down

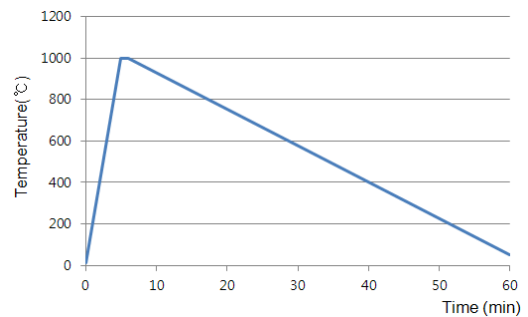


Fig. 7 Controlled heating curve (time-temperature)

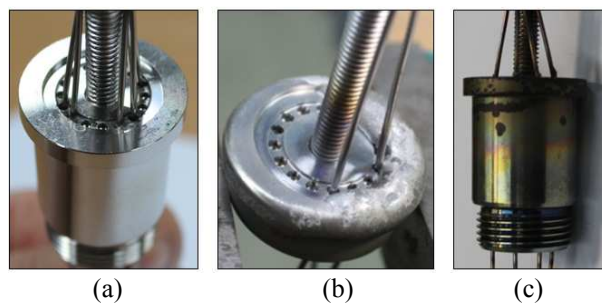


Fig. 8 Results of induction brazing (a) well brazed component (b) melt down due to overheating (c) oxidized due to moisture

**Table 1** Criteria for sealing performance test

Test items	Criterion
helium leak test	$\leq 5 \times 10^{-9}$ Torr-liter/sec
hydraulic pressure	$\geq 21.9$ MPa for 10 min. (125% of design pressure)

위와 같은 공정순서대로 작업하여 브레이징 완료된 시편의 형상은 Fig. 8 과 같으며, 온도 제어가 늦어 over shoot 이 발생한 경우 Fig. 8(b)와 같이 소재가 녹는 문제가 발생하였고, 시편이 청결하지 못하거나 챔버내 진공도가  $10^{-3}$  Torr 에 도달하지 못한 경우 시편에 수분이 남아있는 경우는 Fig. 8(c)와 같이 급속한 산화가 진행되었다.

3.2 브레이징 밀봉성능 검증

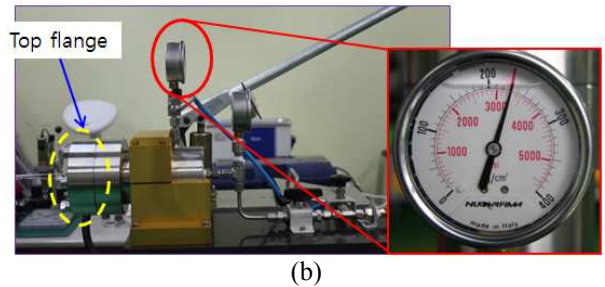
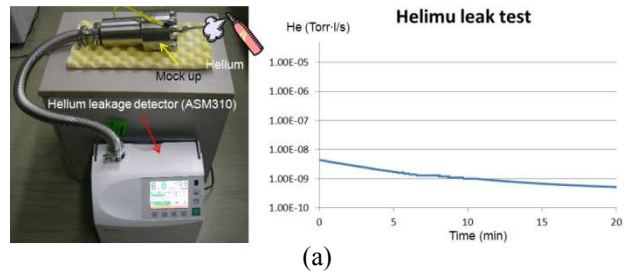
본 장치로 브레이징 접합된 부품의 밀봉성능 및 신뢰성을 검증하기 위하여 접합부 인장시험과 단면검사를 진행하였고, 헬륨누설 시험 및 정수압 시험을 진행하였다.

우선 헬륨누설 시험 및 정수압시험을 진행하였으며, ASME sec III B&PV 규격에 따라 Table 1 과 같은 기준으로 평가를 진행하였다. 정수압 시험의 경우 실제 작동 압력이 15.5 MPa 이므로 설계압력을 17.5 MPa 로 하였으며, 정수압 시험 기준은 설계압력의 125 % 이상이므로 21.9 MPa 이다.

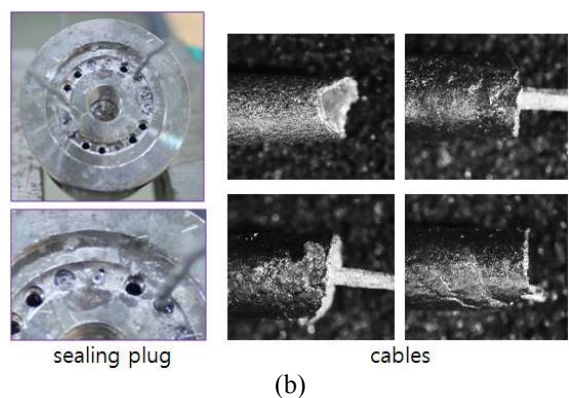
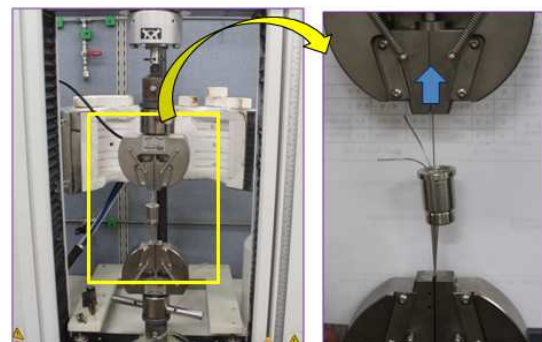
Fig. 9(a)에 보이는 바와 같이 헬륨검출기(ASM 310) 및 시험장치를 구성하여 헬륨누설율을 측정하였으며, 시험결과  $5.2 \times 10^{-10}$  Torr-liter/sec 로서 밀봉성능기준을 만족하였다.

정수압 시험은 Fig. 9(b)와 같이 제작된 장치에서 진행하였으며, 수동으로 레버를 통해 22 MPa 의 수압을 인가하고 20 분간 누수 및 압력저하 여부를 확인하였다. 실험결과 누수 및 압력저하 없이 밀봉 성능을 유지함을 확인하였다.

다음으로 브레이징 부위의 접합강도를 확인하기 위하여 인장시험을 진행하였다. 인장시험은 Fig. 10 과 같이 sealing plug 를 Instron 장비에 고정하고 계장선을 당겨 6 개의 계장선에 대해 파단 부위를 검증하였다. 실험 결과 평균 인장응력 265.25 MPa 에서 Fig. 10(b)와 같이 계장선의 브레이징이 끝난 부위에서 파단이 발생하였으며, 브레이징을 하지 않은 계장선의 평균 파단강도인 277.89 MPa 에 비해 4.5 % 낮아진 것이다. 이는 브레이징 공정 시 1000℃로 sealing plug 와 계장선이 가열되면서 약하게 열 영향을 받았기 때문이다. 그러나 낮아진



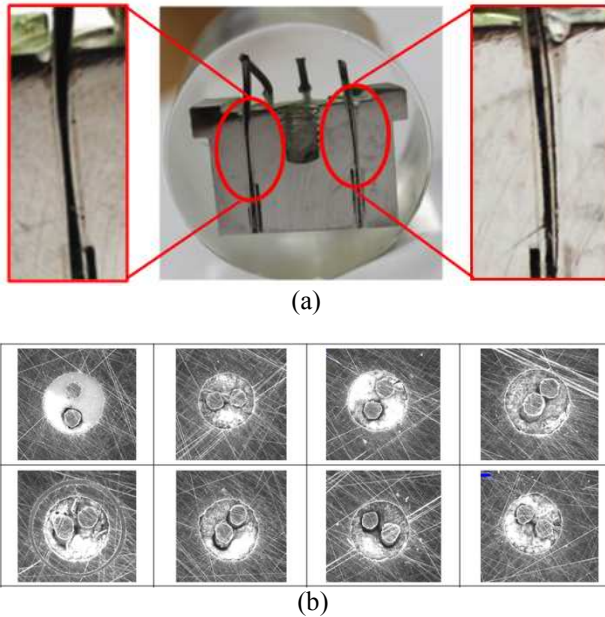
**Fig. 9** Results of sealing performance test (a) Helium leak test (b) Hydraulic pressure test



**Fig. 10** Result of tensile test for the brazing component (a) Test equipment and an installed specimen (b) result of shear test

파단강도의 크기가 적으며, 계장선 확대 사진에서 보듯이 계장선 피복인 스테인리스가 slip 에 의한 연성파괴가 일어났으므로 계장선에 미친 열 영향은 매우 적다고 할 수 있다.

마지막으로 브레이징이 기포나 이물질 발생 없



**Fig. 11** Inspection of the cross section of the brazed area  
(a) Axial cross section (b) Radial cross section

이 균일하게 잘 이루어졌는지 확인하기 위하여 단면검사를 실시하였다. 시편준비는 브레이징된 영역이 잘 보이도록 sealing plug 를 축방향 및 반경 방향으로 절단하여(IsoMet 5000, BUEHLER) PMMA 로 마운트한 후, MetaServ 250 Grinder-polisher (BUEHLER)를 이용하여 시료의 단면을 SiC 페이퍼로 #240, #400, #600 순으로 grinding 하고, 미세 연마를 위해 1.0  $\mu\text{m}$  의 diamond suspension 을 polishing cloth 에 적용하여 연마작업을 수행하였다. 이와 같이 준비된 시료를 현미경으로 분석한 결과 Fig. 11 과 같이 기포발생 없이 wetting 이 잘 이루어져 브레이징 되었으며, 이로써 시편의 세척을 포함한 전 공정이 불순물을 잘 차단하고, 진공 챔버내 분위기도 우수한 상태에서 브레이징공정이 진행되었음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 핵연료 조사리그의 계장선 통과 부위 밀봉을 위하여 진공 챔버를 이용한 브레이징 시스템을 개발하였다.

(1) 브레이징 품질을 극대화 하기 위하여 긴 핵연료 조사리그를 효과적으로 진공상태로 만들 수 있도록 플랜지 체결구조를 갖춘 진공 챔버를 설계하였다.

(2) 설정된 가열곡선에 맞도록 자동으로 제어되는 유도가열 시스템을 이용하여 균일하고 반복 가

능한 품질의 브레이징 공정이 이루어지도록 하였다.

(3) 브레이징된 sealing plug 부품의 밀봉성능시험, 인장시험, 단면검사를 통하여 개발된 장치를 활용한 브레이징 공정의 건전성 및 신뢰성을 검증하였다.

#### 후 기

본 연구는 원자력연구개발사업에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- (1) Hwang, Y. H., Kim, J. Y., Lee, H. K., Koh, J. H. and Oh, S.Y., 2006, "A Study on the Comparison of Brazed Joint of Zircaloy-4 with PVD-Be and Zr-Be Amorphous Alloys as Filler Metals," *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 7, No.2, pp. 113~119.
- (2) Shim, K. T., Cho, M. S. and Choo, K. N., 2011, "A Study on the Brazing Using Inconel 600 and STS 310 Materials," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 13, No.2, pp. 145~153.
- (3) Cho, M. S. and Choo, K. N., 2011, "Development of an Irradiation Device for High Temperature Materials in HANARO," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 13, No.2, pp. 145~153.
- (4) Jeong, H. Y., Hong, J. T., Ahn, S. H., Joung, C. Y., Lee, J. M. and Lee, C. Y., 2011, "Development of Sealing Technology for Instrumentation Feedthrough of High Pressure Vessel," *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 13, No.2, pp. 137~143.
- (5) Park, K. N., Lee, J. M., Youn, Y. J., June H. K., Ahn, S. H., Lee, K. H., Kim, Y. K. and Kennedy T. C., 2009, "The Assembly and Test of Pressure Vessel for Irradiation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 2, pp.179~184.
- (6) Kang, S. H., Park, S. H., Min, J. K., Jeong, H. S., Son, C. M., Ha, M. Y., Cho, J. R. and Kim, H. J., 2013, "Analysis of Two-Way Fluid-Structure Interaction and Local Material Properties of Brazed Joints for Estimation of Mechanical Integrity," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 9~16.
- (7) Tung, S. K. and Lim, L. C., 1995, "Wide Gap Brazing of Nickel Base Braze Mixes," *Mater. Sci. Technol.*, Vol. 11, pp. 949~954.
- (8) We, X. W., Chandel, R. S., Seow, R. S. and Li. H., 2001, "Wide Gap Brazing of Stainless Steel to Nickel-Based Superalloy," *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 113, pp. 215~221.

- (9) Wang, Y. Q., Afsar, A. M. and Song, J. I., 2009, "Optimization of Brazing Conditions for OFHC Cu and ASTM A501 Low Carbon Steel by Taguchi Method," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, Vol. 10, Issue 3, pp. 97~104.
- (10) Yu, T. I., Jeong, J. P. and Shin, Y. S., 2005, "Practical Brazing Technology," *Engineering Information*, Seoul, pp. 62~305.
- (11) ASME, 1998, "Specification for Filler Metals for Brazing and Braze Welding," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec II, part C, SFA-5.8, pp. 179~202.