

'95 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Nd:YAG 레이저를 이용한 증기 발생기 전열관 sleeve 보수 용접 연구

정진만, 권성욱, 김철중
한국원자력연구소

요 약

국내 상업적으로 운용중인 경수로 원자력 발전소중, 증기발생기의 건전성 유지를 위하여 보수 유지에 많은 비용을 소비하고 있다. 특히 증기발생기 전열관으로 사용되는 inconel 600 재질에 많은 문제점이 발생되었다. 전열관 파손에 대한 보수 및 방지기술은 plugging, sleeving, shot penning, Ni-plating 등이 있다. 특히 최근에 개발된 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용한 sleeving 보수 기술이 개발되었다. Nd:YAG 레이저를 이용한 보수 방식은 미국의 WH 및 일본의 MHI 등이 선 정하여 실용화 단계에 있으며, 이는 광섬유로 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저를 이용하여 원격으로 가공할 수 있는 기술이다. 현재 한국 원자력 연구소에서는 전열관 레이저 보수 용접에 대한 개념 을 확립하고 장비 및 기구를 개발하였으며, 고리 1 호기 전열관규격에(7/8") 3/4" sleeve tube 를 삽입하여 약 50 m 떨어진 곳으로 부터 원격 레이저 용접을 실험실적 규모로 실증 하였다.

1. 서론

현재 경수로 증기 발생기 전열관 결함은 tubesheet 및 tubesupport 부분에서 많이 발생한다. 전 열관의 결함검사는 보수 정비 기간동안에 eddy current 방식으로 결함위치를 조사하고 있으며, 결함 위치가 발견될시 plugging 또는 sleeving 방식으로 문제점을 해결한다. 그러나 기존의 방 식으로 보수가 어려운 증기 발생기의 shell 부근이나 tubesupport 등의 깊숙한 부분에서 레이저 를 이용한 보수용접으로 짧은 시간에 보다 넓은 영역에서 보수가 가능하다.

2. 증기발생기 전열관 파손 유형

전열관의 재질로는 초창기에 주로 inconel 600의 MA(mill annealed) 를 사용해왔다. 그후 70년대 후반부터 보다 내식성이 좋은 inconel 600 TT (thermal treatment) 을 사용하였으나 장시간 사용한 결과 MA 와 비슷한 결과로 인하여 Inconel 690 재질이 개발되고, 현재 신규 발전소에 사용될 예정이나 국내에서는 이재료가 사용된적은 없다. 증기발생기의 주요 문제점은 열화에 의한 전열관 재료의 부식, 피로마모, 침식등으로 주로 표면에서 발생하여 내부로 진행된다. 증기 발생기 전열관의 주요파손부위 위치는 그림 1 에 나타내었다. 즉, tubesheet, tubesupport 및 U-bend 부분이며, 전열관보수는 주로 tubesheet, tubesupport 부분에서 이루어 진다. [1] [2]

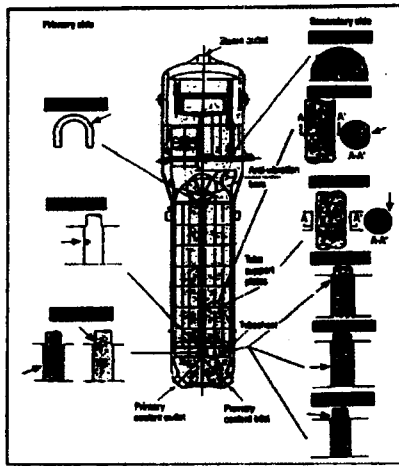


그림 1: 증기 발생기 전열관의 주요파손부위

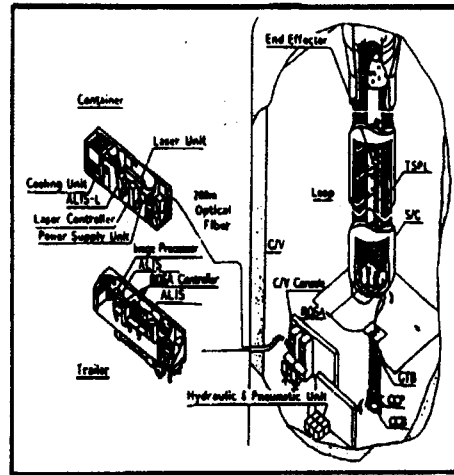


그림 2: 레이저 보수용접 개념도

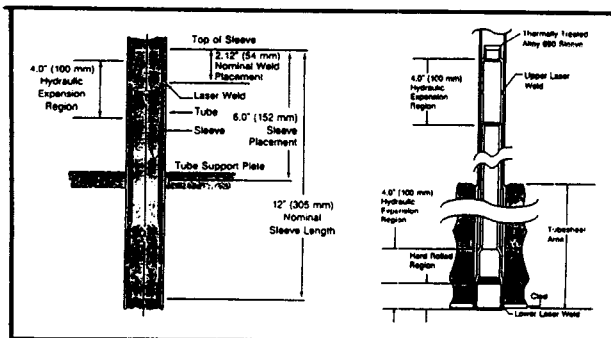


그림 3: 전열관에 삽입된 sleeve pipe

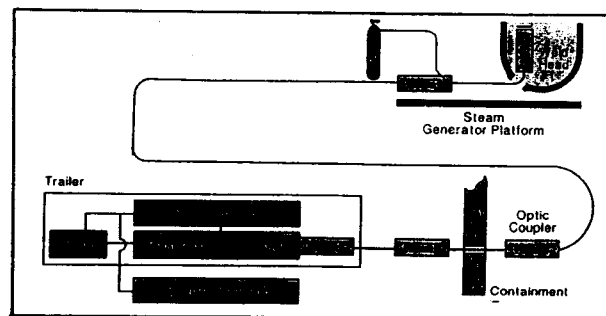


그림 4: sleeve 용접용 광섬유 장치 개념도

2-1. pitting

Tubesheet 부분에서의 pitting 현상은 주로 sludge 퇴적물이 많은 secondary 쪽에서, 복수기 또는 tubesheet 의 구리이온 성분에 의하여 일어난다. 구리이온 성분이 금속으로 환원되면서 전열관 니켈 성분이 이온으로 산화되어 표면에 pitting 이 생성 전파된다. 특히 보수유지나 가동중지로 인하여 2 차측의 온도가 섭시 150도 부근에서 pitting 현상이 가속화 된다.[3]

2-2. 2차측 입계응력부식 균열/입계부식(IGSCC/IGA)

2 차측 입계응력부식 균열/입계부식은 그림 1 에서와 같이 tubesheet 상부의 확관전이 부근 또는 tubesupport 주위에서 일어나며, 원인은 확관이나 denting 에 의한 높은 잔류응력 작용으로 응력 부식균열이 발생하기 쉬운 장소에서 일어난다.

2-3. 1차측 입계응력부식 균열(PWSCC)

1 차측 입계응력 부식균열은 그림 1 에서 tubesheet 상단부의 전이부분, 확관부위 및 U-bending 부분에서 일어난다. 이는 2차측의 입계응력 부식 균열과 거의 비슷하게 응력 상태나 미세조직상태는 거의 같다. 특히 framatome 에서 개발된 확관방식(kiss-rolling 방식)으로 제작된 올진 1 호기에서 응력 부식균열(PWSCC)가 더욱 많이 발생하고 있다.

2-4. 기타

Tube-support 부분의 유체흐름에 의한 진동에 의하여 전열관과 tube support 의 마찰에 의한 전열관 단면이 파손된 사고가 일본의 미하일 2 호기에서 1992년에 발생하였다.

3. 레이저 sleeving 보수용접 개념 및 장치개발

증기발생기는 그림 2 와 같이 격납고 안에서 약 수천개의 U-tube 를 갖고 있다. 전열관의 주요 손상부위인 tubesheet 와 tubesupport 부위에서는 그림 3 과 같이 직경이 작은 sleeve pipe 를 삽입하여 상하 부분에 sleeve pipe 내부로부터 lap-joint 용접을 한다. 이때 사용되는 sleeve 의 재질은 inconel 690 을 사용한다. tubesupport 위치는 tube sheet 부분으로 부터 수미터 이상 떨어져 있고, 또한 방사능 오염지역이므로 장거리 전송이 가능한 원격 레이저 가공 기술이 필요하다. 그림 4 은 보수 용접용 광섬유 장치 개념도이다.

3-1. 용접용 레이저 발진장치

그림 3 의 container 에 있는 레이저 발진 장치는 직경 8 mm의 발집봉에 최대 1.2 kW 의 Pulse 형 Nd:YAG 레이저를 사용하였다. 레이저 발진장치의 beam divergence 는 레이저 용접시 매우 중요한 요소이다. 이런 발산값을 줄이기 위하여 2.5 배의 광확대기(beam expander) 사용하였다.

3-2. 광섬유 전송

레이저 빔을 용접 지점까지 장거리 전송하는데 광섬유를 이용하여 전송하며, 레이저 빔을 광섬유에 집속하는 input coupling, 장거리 전송을 위한 광섬유+광섬유 연결장치등이 필요하다. 이번 input coupling 에 사용된 입사렌즈의 #F 값은 약 3.3 으로, 집광시 spot 크기는 약 660 um 값을 갖는다. 따라서 광섬유의 core 와 cladding 을 보호하기 위하여 직경 1000 um 의 광섬유를 사용하였다. 광섬유의 연결은 광섬유가 손상될 경우 손상된 일부분만을 교체하기 위하여 필요하다. 광섬유 연결방식은 보통 렌즈를 사용하거나 광섬유를 직접 맞대는 방식으로 구성된다.

3-3. 레이저 용접 기구

사진 1과 같이 제작된 용접 기구에서는 광섬유 출구에서 퍼져나오는 레이저빔을 다시 집광시켜, 용접 하고자 하는 sleeve 벽면에 집속시키는 기능을 갖는다. sleeve 내면의 용접 spot 크기 조절은 collimating 렌즈($f=25$ mm)와 focusing($f=20$ mm) 렌즈의 비로 조절이 가능하다. 렌즈의 초점거리 비를 1:0.8 로 축소시켜 용접면의 레이저 밀도를 높여 사용하였다.[4]

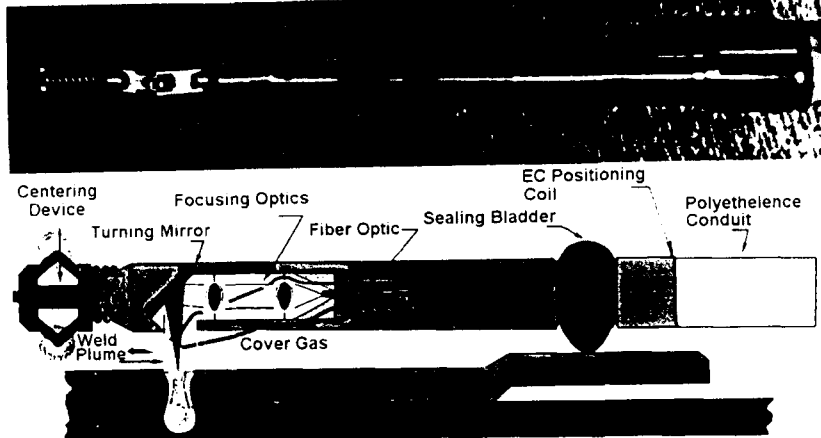


사진 1 : 제작된 용접기구

4. 레이저 용접조건

레이저 가공기로 부터 1000 um 광섬유로 약 50 m 전송된 레이저 빔으로 용접 기구를 이용하여 sleeve pipe 면에서의 용접을 실험실에서 수행하였다. 설계, 제작된 광학계를 기준으로 레이저 용접을 수행할 경우 보호가스의 종류 및 유량, 용접조건등에 많은 변화를 갖는다.

4-1. 보호가스

레이저 용접시 보호가스의 종류에 따라 용접 상태가 매우 다양하다. 특히 Ar 과 He 에서는 용접부위의 기공이 나타나며, N₂ 분위기 상태에서는 나타나진 않는다 [5]

또한 용입 깊이로 산소의 함유량이 많을수록 깊어지나 산소가 spatter의 양을 증가시키므로 이번실험에서는 보호가스로서 N₂ 만을 사용하였다.

4-2. 보호가스의 유량

용접부위와 접근된 광학 부품의 spatter 에 의한 손상방지를 위하여 다량의 보호가스가 필요하다. 그러나 가스의 유량 조건에 따라 용접면의 품질과 광학계의 내구성에 영향이 있다. 적은 유량의 보호가스를 투입할 경우 광학계에 매우 적은 입자(spatter)가 부착되어 광학계의 수명을 단축시키고, 과도한 유량을 투입할 경우 용접면의 품질이 저하됨을 알수 있다. 이러한 이유로 보호가스의 유량은 0.3 bar 에서 27 liter/min. 의 속도로 투입하여 용접면과 광학계를 보호 하였다

4-3. 레이저 용접품질 조건

전열관과 sleeve pipe 와의 용접폭은 용접 강도면에서 sleeve pipe 두께 또는 그이상이 되어야 하며, 레이저의 용입깊이는 aspect ratio 가 1 일경우 그 깊이도 1.0 mm 이상이 되어야할 것이다. 따라서 용입 깊이 및 용접 폭은 1.0 mm 이상이 되어야 한다

5. 레이저를 이용한 전열관 보수용접

레이저 용접에서는 여러 가지의 장치가 필요하다. 첫째, 전열관의 sleeve pipe 를 삽입, 전열관과 sleeve pipe 를 밀착시키는 수압식 확관기와 둘째, 확관된 부위에서 용접을 위한 레이저 용접 기구, 셋째, 용접부위의 용접상태를 확인 할수 있는 비파괴 검사장치로 나눌수 있다.

사진 1 의 용접기구에서 광섬유로부터 나온 레이저 빔은 집광렌즈와 반사 거울을 통하여 직접

용접 부위에 조사되며, 반사 거울은 소형 회전 모터에 의하여 회전되면서 전열관의 원주방향을 용접하게 된다. 회전용 소형모터는 고효율 장치로서 encorder 를 부착하여 회전방향과 회전속도를 감지할수 있다. 자체 개발된 레이저 용접기구를 이용하여 원주 방향으로 용접되는 장면은 사진 2 와 같다. 용접 후 용접면의 단면은 사진 3 과 같다. 용접면의 용입 깊이는 약 1 mm, 용접면의 폭도 약 1 mm 의 값을 갖는다.

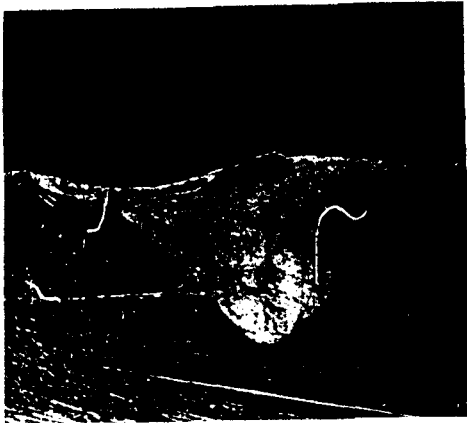


사진 2: sleeve 보수용접 장면



사진 3 : 레이저 용접 단면

6. 결론

전열관 sleeve 보수용접을 위하여, 3/4" pipe 안에서 용접이 가능한 외경 14 mm, 길이 300 mm 의 레이저 용접기구를 자체 개발하였다. 또한 광섬유를 통하여 전송된 고효율 Nd:YAG 레이저 빔은 3/4" sleeve 내의 협소한 장소에서 용접이 성공적으로 이루어 졌다. 이러한 곳의 용접에서는 광학계, 용접조건, 실시간 용접 감시방식등 해결되어야할 문제점이 있으며, 신뢰성 및 내구성이 입증되어야 발전소의 보수 유지에 응용될수 있을 것이다. 따라서 원자력 산업에 사용될 레이저 용접기술에 필요한 품질보증, 용접절차 그리고 자동화 과정등 많은 연구가 필요하다

- [1] H. Takamatsu, Nuclear Engineering International, Jan. (1991) 26.
- [2] 고리 원자력 1 호기 증기발생기 세관손상 원인 조사, 최종보고서, 한국 원자력 연구소, 1989
- [3] 원전 2차개통 부품의 안전성 평가기술 연구, KINS/AR-045/90, 한국 원자력 기술 안전원, 1990.
- [4] 레이저 가공 및 광계측 기술 개발 KAERI/RR-1492/94, 한국원자력연구소, 1994.
- [5] High Power YAG Laser Welded Sleeving Technology for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants. Proceedings of LAMP '92, June. 1992 957.