

원자력 발전소의 격납 용기 시스템에 딸린 압력 받는 구성 부품들의 누설시험(IX)

Leak Testing of Pressurized Components of Nuclear Power Containment System(IX)

본 원고는 지난 1999년 6월호
(VOL.32 NO.3) 기술사지부터 연재
되어 온 원고입니다.

글 | 朱昇煥

(Choo, Seung Hwan)
방사선관리기술사, 공학 박사,
고려공업검사(주) 연구소장,
SRI, 본회 홍보위원,
E-mail: shchoo@unitel.co.kr



<제 5 부>

5.1 핵연료 봉들의 비파괴 검사 기법들

핵연료 봉들을 밀봉한 용접들은 그 용접 부위
들을 침투할 좁은 결함들이 없도록 확인하려면,
지금까지 해 온 재래식 비파괴 시험법으로서는
문제가 많이 있었다. 그러한 결함들은 원자로 냉
각재의 유체 속으로 방사성 분열 가스들을 탈출
시키므로 허용될 수 없는 조건이다. 대형 결함들
은 초음파, 방사선, 또는 액체 침투법 등으로 쉽
게 검출되긴 하지만, 이런 방법들의 검출 한계를
벗어난 허용할 수 없는 좁은 결함들이 존재할 가
능성은 있다. 부품의 모양새는 이들 방법들을 이
용하기에는 어려움이 많아 측정의 감도가 낮아진
다. 전형적으로 시험되는 짜임새들은 두께 0.38
mm(0.015 in.), 지름 4.8 mm(3/16 in.)의 스테인리스강 튜브의 녹인 plug 용접들(burn-

down plug welds)로 이뤄진다.

질량 분석계 헬륨 누설시험은 1~10 MPa(1~
100 기압)의 압력을 받는 헬륨을 이용하여 연료
봉의 조립 후에, 용접 가스를 거쳐 연료 봉에 있
는 헬륨을 잡아내든지 또는 연료 봉 배후의 압력
을 높임으로써 나오는 헬륨을 이용하여 시험했던
적이 있다. 하지만 이들 헬륨 누설시험 기법들은
누설 검출기의 기구들 쪽으로 헬륨의 이동 중에,
또는 이 방법에서 요구된 상대적으로 높은 진공
수준으로 배기를 하는 시간 동안 이탈하는 헬륨의
상태를 알아내지 못한다.

앞으로 해설할 누설시험법은 압력을 견뎌 낼 수
있는 부피의 챔버 속에, 연료 봉 끝을 밀봉하고,
미리 결정된 압력에서 이 챔버 속으로 알고 있는
가스의 양을 주입시켜 지정된 속도보다도 더 많이
압력이 떨어지는 지를 알아내는 방법이다. 이 방
법은 10^{-5} Pa · m³/s(10^{-4} std m³/s)보다도 낮은
누출률을 검출할 수 있는 '압력 감쇠 누설 시험

법'의 한 형태이다.

핵연료의 누설시험 시방서의 예

핵연료 봉들의 누설시험 시방서들은 연료 봉의 유형, 이용되는 내부 시스템, 그리고 이 분야를 규제하는 기관인 핵규제위원회, 그리고 각 기술 단체들의 법규 개정 에 따라 바뀔 수가 있다. 전형적인 품질보증의 요건들은 모든 연료 봉 폐쇄 용접부위들이 헬륨 추적자 가스의 기법들으로써 누설시험을 해야 됨을 요구한다. 나트륨을 채운 핵연료 봉의 경우, 밑바닥 용접은 나트륨을 채우기 이전에 누설시험을 해야 한다. 이런 경우, 지정된 최소 허용가능 누설시험 시스템의 감도(sensitivity)는 $2 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ($2 \times 10^{-9} \text{ std m}^3/\text{s}$)이다.

전형적인 시방서는 짜여진 누설시험 절차에 있는 자세한 설명 또는 사본도 요구한다. 그 설명은 시험 연료 봉의 물리적 짜임새 그림들과 누설시험 작업을 하는 동안의 누설 검출기 시스템의 배치된 그림도 포함한다. 실제의 시험 데이터는 반드시 갖춰야 되고 모든 용접 폐쇄부분의 시험기간 중에 누설시험 시스템의 감도 유지도 포함한다. (1) 각 연료 봉에 관한 예정된 절차에 따라 시험해야 하고, 그리고 (2) 시험에 선택된 연료 봉에서는 어떠한 검출 가능 누출량도 발견되지 않는다는 것을 증명할 필요가 있다. 인증서는 각 조립 연료 봉의 누출률 값과 시험 작업 중에 실제의 누설시험 시스템 감도를 포함시켜야 한다.

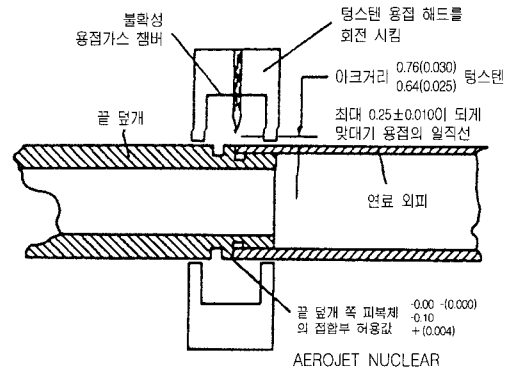
5.2 원자력 발전 원자로 연료 봉들의 모범적 구조

<그림 6>은 어떤 실험 가압경수로에 쓰이던 전형적인 원자력 발전소의 원자로 연료 봉을 그린

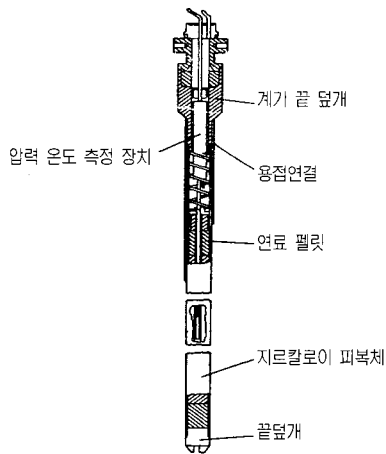
모습이다. 그 연료 봉은 지름이 9.93 mm(0.391 in.)인 지르칼로이(zircalloy) 튜브 속에 넣는다. 용접 준비는 <그림 7>에서 보인 정밀한 공차(tolerance)에 따라야 한다. 튜브 끝 쪽에 피복할 지르칼로이의 정밀 끼워 맞춤(fit-up)은 그림 8에서 표시된 것처럼, 허용 가능하고, 그리고 재생 가능한 용접 물체들(reproducible weldments)이어야 한다.

이미 원자로 속에서 중성자에 쪼여진 연료 봉들을 분해하기, 그들을 검사하기, 그리고 다시 조립하기 등의 작업은 hot-cell 속에서 원격 조작으로 이뤄진다. 그런 일들은 쪼인 연료 봉들에서 나오는 불활성 가스들을 대기로 내보내기, 기계적으로 연료 봉 정상 끝을 절단하기, 그리고 개별 연료 펠릿을 끄집어내기의 작업들이 포함된다. 피복 된 원주를 절단하는 것은 먼저 연료 봉에 구멍을 내고, 대기에 노출시킨 다음, 낮은 마구리 덮개를 끝 마구리피복 용접 아래에서 잘라 내고 곧바로 이뤄진다. 마구리 덮개와 연료 더미 예비 장전 스프링은 떼서 저장하고 연료 펠릿들을 제거한다. 피복 재료는 대개 육안시험과 '맥동 와전류 비파괴 시험(pulsed eddy current nondestructive test)'으로 이뤄진다. 내부의 지름은 공기 마이크로미터기(air gauge) 방식으로 연료 펠릿의 규정된 크기를 정밀하게 잴다. 연료 펠릿들의 센터리스 연삭으로 정해진 지름까지 깎는다. 이것은 지정된 공간까지 피복의 틈 간격에 펠릿을 조절 가능케 한다. 연료 봉들과 원료 심의 전체 길이는 시방서의 설계에 일치돼야 하며, 피복과 마구리 덮개 길이도 이에 따른다. 예외적으로 피복 재료와 마구리 덮개들은 필요한 길이를 기계로 절단한다. 끝 덮개 피복의 이음매 용접은 지르칼로이 피복 끝을 주의 깊게 다뤄야 한다. 표면 산화물들은 선반 위에 피복체를 회전시키면서 마포로써 바깥 지름으로 4 cm(1.5 in.) 거리로 제거시킨다. 내

부 지름은 크기가 정해지고 기초 금속은 조정할 수 있는 압착기를 써서 5 cm(2 in.)의 두께까지 노출시킨다. 정확한 용접 접합부의 배치가 끝 덮개 모형 속으로 설치되고 나면 hot-cell의 일은 끝난다. 피복의 끝 덮개 용접은 자동 튜브 용접기를 이용, 가스 텅스텐 아크 용접(GTW)으로 마감한다. 모터로 구동되는 전극 받침은 접합 부위에 불활성 가스를 공급하면서 용접 주변을 원주로 돌면서 이동한다. 용접 전원과 이동 파라미터들, 그리고 용접 순서는 모두 hot-cell 밖의 전원공급과 프로그램 제어대에서 진행된다.



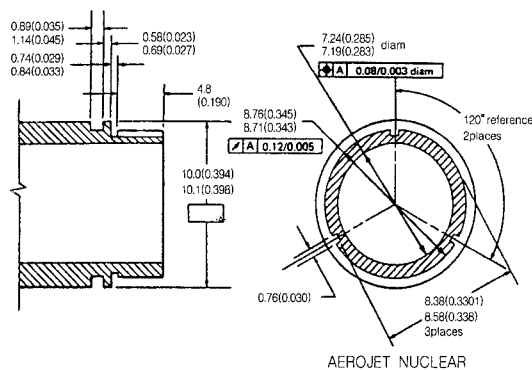
〈그림 8〉 가스텅스텐 아크 용접 시스템을 회전시켜 핵연료 봉을 정밀하게 부착시킴(단위:mm(인치))



〈그림 6〉 계측기가 달린 한 실험 핵연료 봉의 구조

5.3 지르칼로이 피복체 속에 연료 펠릿들을 집어넣기

중성자에 쪼인 연료 봉의 지르칼로이 피복 속에 연료 펠릿들을 채워 넣을 때, 고정할 장치는 펠릿 덩이가 적정한 자리에 잡혀 있도록 피복체 안에 펠릿들을 끼운다. 펠릿과 피복체 사이에 최대의 허용 틈새는 0.36 mm(0.014 in.)이므로 정밀한 위치 조정이 필요하다. 중성자에 쪼이지 않았던 연료 펠릿 덩이는 hot-cell 밖에서 조립하여 그 피복체 안에 놓일 연료 덩이는 hot-cell로 운반하여 장진한다.



〈그림 7〉 끝 덮개 부착에 쓰인 실험 핵연료 봉의 용접 접합부(치수는 mm(인치))

채우기 이전에 중성자에 쪼인 펠릿의 처리

중성자에 쪼이지 아니한 연료 펠릿들은 한 연료 봉 덩이의 수량을 선택하여 치수, 중량, 그리고 밀도가 정해진다. 펠릿 지름과 길이의 평균값이 4 자리 숫자로 직접 읽을 광학 게이지를 써서 치수들을 정한다 사각형 모서리 편차는 V-block에서 펠릿을 피복시켜 펠릿 끝은 높낮이 사이의 편차를 측정한다. 펠릿들은 분석 저울로 무게를 단다. 저울은 1 마크로 그래를 바로 읽을 수 있는 것을 쓴

다. 기하 밀도(geometry density)는 시료의 무게와 부피로서 바로 셈한다(평균 치수). 액침 밀도는 고전 방식인 물의 무게 손실로 측정한다. 액침 무게를 달기 전에 펠릿들은 진공 속에 노출시켜 완전히 배기시킨 것임을 확인한 후에 물과 포화시킨다.

펠릿들은 석영 관에 넣고 10 mPa(10^{-4} mmHg) 진공에서 800 °C (147 °F)에서 15 분 동안 미리 달군다. 그 튜브를 용접으로 밀봉시킨다. 이런 처리는 펠릿의 습기를 최소화시켜 그 이후에는 통제된 저장을 할 수 있다.

5.4 연료 봉의 뒤채움 가스 압력과 누설시험

끝 덮개 폐쇄 용접이 이뤄진 후에 연료 봉은 압력 계기의 교정을 검증하기 위하여 끝 덮개와 연결된 주입 튜브를 통해 압력을 높여 인증 검사와 누설시험을 거치게 된다. 그 연료 봉 공극의 부피는 정밀 측정설비와 교정 부피를 이용하여 압력 부피 상관 관계로 측정된다. 연료 봉의 뒤채움 압력높임 설비 제어를 이용하여 헬륨과 아르곤 가스의 혼합체를 써서 압력을 높인다. 이 설비는 누출량을 측정하는 진공 가스의 포집과 측정 시스템을 갖춘 고압 가스 적용과 측정의 기능을 갖추고 있다. 혼합 가스는 15 MPa(2200 psi)로 채워진 가스 실린더에서 공급되며, 압력 변환기와 견준, 압력의 증가 변화를 표시할 미터기가 달려 있다.

헬륨과 아르곤으로 뒤채운 이후 연료 봉의 밀봉

연료 봉은 지름 1.6 mm(1/16 in.), 두께 0.25 mm(0.010 in.) 스테인리스강의 채움 튜브를 통해서 헬륨과 아르곤 가스로써 압력을 높인다. 이

런 채움 튜브는 튜브를 잡고 용접시켜 폐쇄된다. 계측기 끝 덮개를 조립하는 동안 틀 잡힘의 밀봉을 하기 위하여 지름 23.2 mm(1/8 in.) 스테인리스강 슬리브를 틀 잡힘 자리에 미리 놓고, 구리 철사를 채움 관속에 삽입한다. 슬리브와 구리 철사는 그 관의 부분에 놓여진다. 틀 잡음 장치는 수압력으로 작동하는 쥘틀이고 기계식 나사 틀로 죄어진다. 나사들을 바르게 위치를 잡아 구리철사 주입 주변 관을 주름 잡는다.

여전히 배관은 틀 잡힘 상태에 있고 수압을 받고 있는 동안 주입 관은 쥘틀로 조여 불활성 가스 텅스텐 아크 용합 밀봉으로 노출된 관 끝을 메운다. 이런 밀봉 용접이 완성된 틀 잡힘 쥘틀이 풀리고 밀봉 용접은 (1) 상품인 누설시험 유체 그리고 직접 육안관찰 기포 방출시험과 (2) 계기가 달린 끝 덮개 압력 변환기의 출력 신호를 감시한다.

5.5 원전 연료 봉의 마지막 질량 분석계 누설시험

조립과 밀봉 그리고 채움 관의 폐쇄 용접을 완성시킨 후 실험할 핵연료 봉들은 헬륨 누설시험을 한다(바로 전에 설명한 뒤채움 작업 중에 채운 헬륨으로). 용접된 연료 봉의 단면은 누설시험 챔버 속에 둘러싸이고 헬륨 누설 검출기는 진공이 될 물체인 챔버에 부착된다. 연료 봉들은 핵연료 봉에서 생긴 분열성 가스들의 특성과 닮은, 76% 헬륨과 24% 아르곤 혼합 가스로 채워진다. 뒤채움 압력은 2.5 MPa(363 psig 또는 24.7 기압)이다. 누출률이 2×10^{-9} Pa · m³/s(2×10^{-8} std cm³/s)보다 큰 것은 연료 봉 조립에서 제외시킨다.

〈다음 호에 계속됨〉
(원고 접수일 2000. 8. 22)