

프랑스 加壓輕水爐 爐内部品の 磨耗對策

최근 프랑스 가압경수로(PWR)의 하부계측관과 제어봉에서 마모가 발견되었는데, 이는 냉각수의 흐름에 따른 진동에 의해 야기되는 문제여서 광범위한 분석이 이루어져 효과적인 해결대책이 개발·수행되고 있다. 다음은 Nuclear Engineering Int'1 7월호에 발표된 대처방안의 개요이다.

1986년 중반경 프랑스의 17×17 핵연료 집합체 타입 900MWe급 원자력발전소에서 클러스터형 제어봉 집합체(RCCA)의 제어봉손상에 의해 비정상적으로 높은 銀방사능이 검출되었다. 그 제어봉 집합체는 4주기제 운전중이었으며, 운전중에 대부분 인출되어 있었다.

17×17형 핵연료 집합체는 스파이더에 연결된 24개의 제어봉을 갖으며, 각 제어봉은 은-인듐-카드뮴(AgInCd)의 원통형 바아에 얇은 304SS 재질의 튜브로 구성되어 있다. 길이는 3.8m로서 가늘고 길며 굴절성이 매우 좋다.

프라마툼사에서는 2단계 제어봉마모측정시스템을 개발하여 1986년 중반 이후부터 광범위에 걸쳐 사용하고 있다. 이 시스템의 와전류게이지는 제어봉의 상단에서부터 하부까지 이동 측정하여 마모부위를 찾아내 각 부위의 마모정도를 판독하며, 초음파게이지는 가장 손상이 심한 부위의 정확한 마모프로필을 기록한다.

이러한 제어봉의 마모현상은 제어봉 집합체의 작동과 효율에 영향을 주지 않는 한도내에서는 허용이 가능하지만, 제어봉을 구성하는 중성자

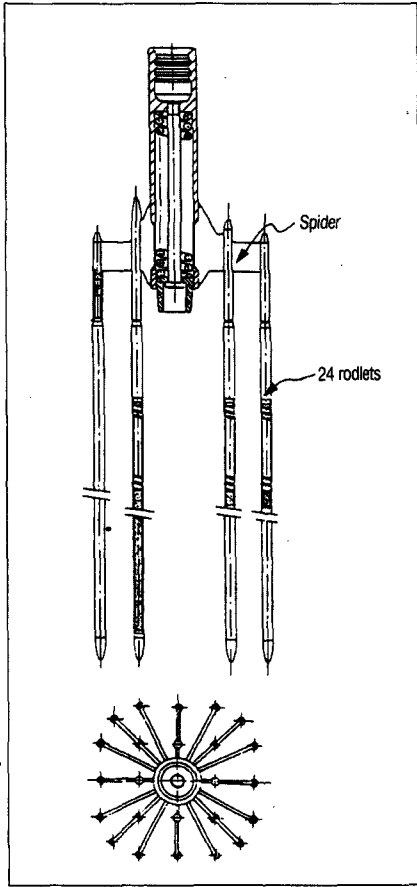
흡수체의 물리적 특성에 따라 그 허용기준이 달라진다. 프랑스에서는 3루프 발전소의 경우 AgInCd 제어봉이지만, 4루프 발전소는 B₄C 제어봉을 갖추고 있다.

AgInCd는 물에 대해서 안정적이지만, B₄C는 1차냉각재와 접촉할 경우 반응이 비교적 B₄C 제어봉에 대한 허용기준은 더욱 엄격하여 그 다음 운전주기중에 구멍의 발생을 허용하지 않는다. 물론 제어봉 집합체의 작동에 지장을 주는 제어봉의 파손에 대해서는 두종류 모두에서 허용되지 않는다.

제어봉 집합체의 평균수명은 약 7년이나 실제로는 차이가 대단히 심하다. 8주기 후에도 아무런 손상이 없는 제어봉이 있는 반면, 어떤 제어봉은 2주기 사용후 마모되어 버리는 경우도 있다.

磨耗패턴

제어봉 집합체의 마모문제는 잔동감소를 위한 안내관 개조에 의해 시작되었다. 1986년 중반



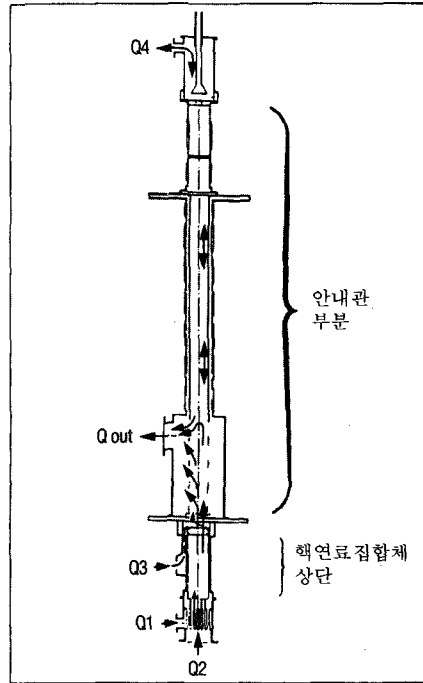
<그림 1> 17×17 핵연료집합체의 RCCA

부터 22개 발전소에 대해서 조사가 시작되었는데, 운전중, 인출되어 있었던 제어봉집합체에 대한 일반적 마모패턴이 나타났다.

Fretting마모는 냉각수 흐름에 기인한 제어봉의 진동에 의해서 발생하는 것이 분명히 밝혀졌는데 가장 심한 부분은 안내관 Upper Card에서 일반적으로 발견되었다. B,D,E,F,봉이 A,C 봉 보다 더 영향을 받았으며, 제어봉집합체의 상하작동에 기인한 마찰마모는 주로 A, C 봉에서 영향을 받았다.

實驗裝置

핵연료집합체 출구흐름은 3가지 요소를 가지



<그림 2> 제어봉 튜브 실험 어셈블리

고 있다(그림2 참조).

- Bundle 을 통한 주흐름 (Q1)
- 핵연료집합체 안내관으로의 우회흐름 (Q2)
- 옆 집합체로 부터의 횡흐름 (Q3)

안내관 상부에 상부플레넘으로 부터의 입구 흐름이 있다. (Q4)

전체흐름은 안내관 하부 구멍을 통해 나간다.

프랑스의 발전소는 앞에서 언급한 2가지 타입의 안내관으로 이루어진 2가지 타입의 제어봉집합체를 보유하고 있다. (AgInCd는 12ft이고, B₄C는 14ft의 길이이다.)

프라마토사는 현실성을 극대화하기 위해 실제의 크기와 흐름인 냉각실험장치를 Le Creusot에 위치한 Framatome's Laboratoire Polyvalent에 12개월동안 설계, 제작, 설치하여 1988년 1월부터 운영하고 있다.

실험은 다음과 같이 구성되어 있다.

- 제어봉 구동장치 및 제어봉 운행장치

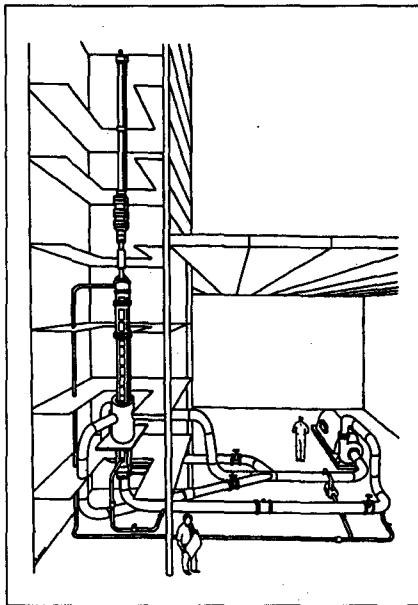
- Q4 유량의 주입·인출을 위한 Top Water Box
- Guide Tube Containment
- 안내관
- Q1, Q2, Q3를 각각 0에서 1.5값으로 놓는 Inlet Water Box
- 17×17 핵연료집합체 상부(60cm)

모든 작동부품들은 발전소설비사양에 맞추어 제작되었다.

실험은 다음을 측정하기 위해 계장되어 있다.

- 수직상의 6군데에서의 제어봉 오위치(Optical Gauge)
- Guide Cards위치에서의 충격소음 (Acoustic Detector)
- 제어봉 구동장치 제어봉 오위치(Eddy Current)
- 7군데에서의 안내관내 입력

Optical Gauge는 특히 이 실험을 위하여 개발되었는데 각 Gauge는 Micro Light Receiver에 의해 받아지는 작은 빛빔을 발사하는 Micro Component로 이루어져 있다. 그 빛빔



<그림 3> 제어봉 안내관 실험루프

은 제어봉을 가로질러 제어봉의 오위치에 따라 광도가 영향을 받는다. 그 부품들은 방수수지 혼합물로 주물되어 있다. 이 시스템은 1 μ m의 정확도와 넓은 영역을 가진다.

더욱이 모의 제어봉집합체는 안내관 하부의 압력장과 제어봉 및 안내관들 사이의 마찰력을 정확히 측정할 수 있도록 되어 있다.

모든 데이터는 측정후 바로 분석할 수 있도록 기록이 되며, 특히 빔오제어봉의 진동운동 혹은 카드위치에서의 제어봉 이동 등이 재구성될 수 있다.

實驗프로그램

실험프로그램은 다음 3가지 단계로 이루어져 있다.

1단계: 이해단계

- 진동기구의 복사
- 근본원인의 소재 파악
- 모든 적절한 물리적 자료의 기록

진동은 매우 변화가 심하므로 공차, 카드와 제어봉의 접촉점과 같은 숨은 인자의 영향을 측정하기 위해서는 상당히 많은 실험을 필요로 하였다.

이 실험의 중요한 결론은 다음과 같다.

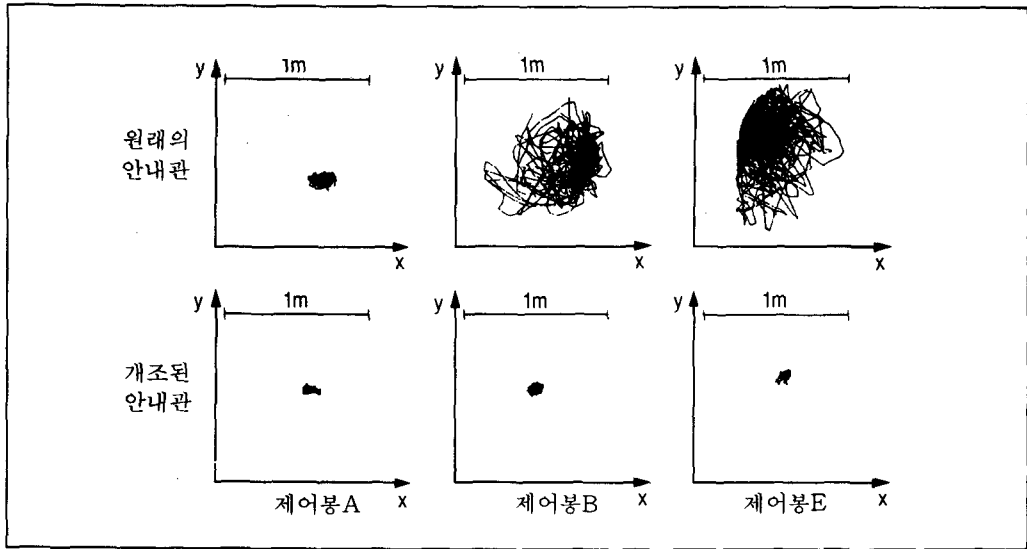
- 주요 흐름진동요인의 인자는 출구구멍을 통한 횡흐름이다.
- 안내관 상부를 통한 조그만 흐름(Q4)은 두번째 진동요인인자이다.

제어봉은 유연성이 좋은 막대기와 같이 진동하며 어떤 위치에서의 진동은 제어봉 전체에 영향을 미친다.

- E와 F위치에서의 제어봉은 안내관 하부의 Sheath와 완전히 접촉되어 있지 않아서 다른 위치의 제어봉보다 훨씬 많이 진동한다.

2단계: 안내관 개발단계

이 단계는 프랑스 Chooz와 중국 광둥에 건설되고 있는 1,450MW급 발전소의 안내관 설계를 개발하기 위해서이다. 1단계에서 하부안내관구조가 제어봉의 진동을 감소할 수 있도록



<그림 4> 설계 변경전과 후의 전형적인 RCCA 제어봉 움직임

개선되었고, 흐름의 난류와 제어봉의 하부에 압력장을 만들어 견고하게 할 수 있는 다음의 여러가지 대책들이 실행되었다.

- Stepping 동안의 과도한 마찰을 방지하기 위해 각 제어봉에 적당한 마찰력을 적용.
- Scram 기간이 증가하지 않도록 RCCA에 미치는 총 마찰력은 증가하지 않음.

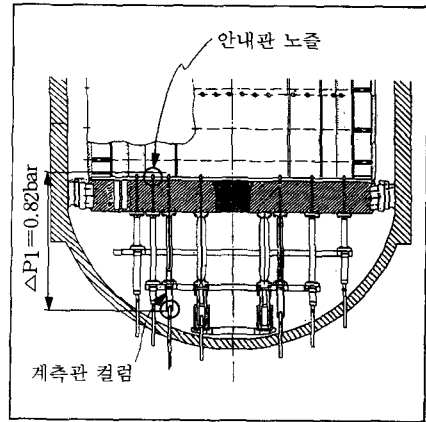
이상의 목적은 기대 이상으로 부합되었다.

3단계 : 안내관 개선

운전중 안내관에 관한 것으로서 2단계에서의 개선사항이 운전중의 안내관에 어느 정도 개선 효과를 미칠 것으로 생각할 수 있다. 이 단계는 진행중이며 가장 이상적인 방안이 평가중이다.

BMI 振動磨耗 완화

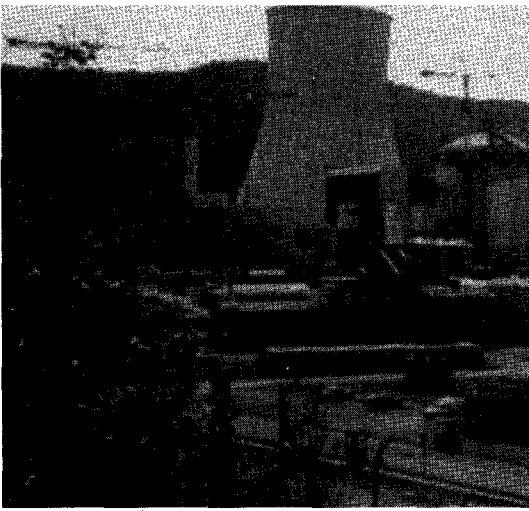
베셀하부의 내부진동마모와 관련하여서는 1,300MW급 Paluel 1호기 하부계측관(BMI)에서 운전 8개월 후에 누설이 발견되었다. 누설 그 자체는 안전성과 관련된 문제가 아니며, 1차 냉각수 누출도 없었다. 그 계측관은 누설 감지기가 부착된 누설방지 이차방호벽안에 위치되어 있었다.



<그림 5> 대부분의 BMI Thimble 에서의 마모흡집위치

하부계측관은 외경 7.5mm, 두께 1.15mm, 길이 15~17m 로서 안내관, 측정관, 안내노즐을 통해 측정실로 부터 핵연료에 삽입된다. 계측관의 와전류시험도 측정기를 계측관을 통해 밀어 넣음으로써 행해진다.

마모흡집은 원자로용기 관통부와 내부용기와 접촉하는 모든 Thimble과 핵연료집합체계측관의 입구측에서 발견되었다. 인출된 Thimble 의



육안검사는 흠집의 모양과 특성을 확인시켜준다.

水力 탄성 실험

마모는 물의 흐름에 의한 Thimble의 진동에 기인한 것으로서 주요인은 가이드칼럼, 가이드노즐안에서 순환하는 흐름이다. 물의 유속은 11m/sec이다.

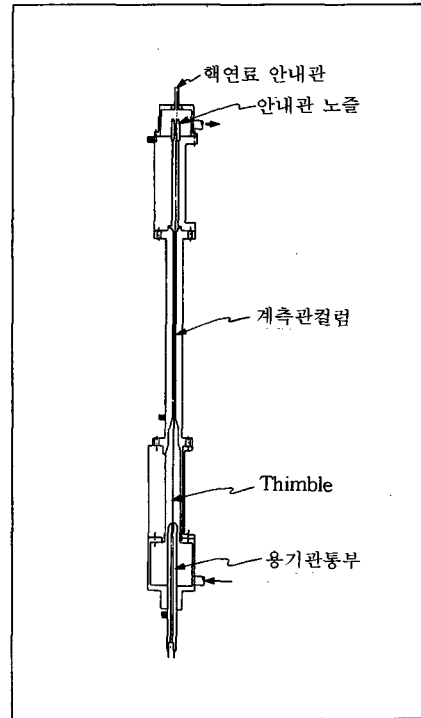
발전소 구조를 그대로 복제한 실규모 실험설비가 제작되었는데 몇몇부분은 투명한 물질로 만들어져서 Thimble의 진동을 실제로 볼 수 있도록 하였다.

1985년 중반 이후 다음과 같은 실험이 수행되었다.

- 진동기구를 복제하여 중요 수력 및 기계인자들을 정량화함
- 운전중인 발전소에 대한 보정측정을 정량화함
- 신규발전소를 위한 설계를 정량화하고 개선함.

결과 및 보정조치

광범위한 실험결과 진동의 중요요인은 Thimble주위를 순환하는 흐름, 좀 더 엄밀히 말하면 가이드노즐 주위를 순환하는 흐름에 의해서이다. 그 Thimble은 불안정하고, 진동폭은 용기구조에 의해 제한된다. 그리고 그 진폭은 Thimble 과 주변구조와의 접촉점 수와 위치에 따라 달라진다. 부품의 오위치는 진동을 제한하는 접촉점을 만들어낸다. 외경이 7.5mm인 원래의 Thimble은 상당히 큰 유로에서 순환하며



<그림 6> 실규모 Cold Test Bench

아주 작고 약한 접촉점을 가지고 있다.

즉각적인 해결책이 요구되었고, 이에 따라 몇몇 보정기가 설계 및 실험 되었다. 그중 Spring Loaded Cap은 매우 효율적이고 1985년 중반 이후 매우 성공적으로 작동중이다.

핵연료내 안내관을 관통하는 유량은 큰압력차를 일으키는 직경 2mm의 작은구멍을 통해 안내관 상부로 나온다. 처음 설치되었을때 Spring Loaded Cap은 유속을 처음의 1/10보다 작은 1m로 낮추었다.

신규 발전소에 대해서는 슬리브된 설계가 인정받았는데, Thimble 외경은 관성을 얻을 수 있고 슬리브와 Thimble 사이의 유속을 감소시키기 위해 증가하였다. 증가된 외경을 가진 Thimble을 실험하였는데 그 결과 외경이 클수록 진동이 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

이런 점들을 고려하여 현재 건설중인 프랑스의 발전소는 직경이 큰 슬리브된 Thimble이 장착될 것이다.

운전중인 4루프 발전소에 추가적용하는 것은 어려운 일이 아니지만, 몇몇 부품들은 교체되어야 할 것이다.