

유동유발진동에 의한 제어봉 Fretting Wear의 열수력학적 원인 분석

김상녕, 신 철

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

최근 울진 1, 2호기의 급정지 제어봉 E.C.T(Eddy Current Test) 결과 Fretting Wear가 심한 것이 관찰되었다. 이는 유동유발 진동에 의해 제어봉과 그 지지물 간의 접촉으로 인한 손상이 주요인으로 추정되고 있다. 제어봉 손상은 제어봉 교체로 인한 비용뿐만 아니라 마모금속의 방사화로 인한 냉각재의 오염을 수반한다. 따라서 본 연구는 원자로의 유동유발진동을 선별하여 파손 위치 및 형태, 유동조건, 제어봉과 안내관의 기하학적 구조 등을 분석한 결과 지배적인 손상원인을 Turbulence Excitation과 Fluidelastic Instability로 선정하였다. 특히 안내관내의 6번째 card 위치에서 발생하는 높은 마모현상이 난류도 증가에 의한 손상임을 제시하였다.

I 서론

원자력 발전소 부품의 건전성은 발전소의 연속적인 운전에 매우 중요하며 특히 급정지용 제어봉의 손상은 원자로의 안전성을 크게 저하시킨다. 또한 원자력 발전소의 안정성 확보란 측면에서 직접적인 영향을 미치며 마모로 인한 냉각재의 오염뿐만 아니라 제어봉 교체시기를 앞당겨 부대 비용이 증대되는 등 경제적 손실 역시 크다. 최근 울진 1, 2호기 E.C.T.(Eddy Current Test)결과 제어봉 피복관 손상은 최대 마모율이 77%에 이를 정도로 심각하며 운전기간(1호기: 6주기, 2호기: 5주기)중 제어봉이 대부분 인출된 상태에서 발생했다는 점에서 상부 제어봉 안내관내로 유입된 유체에 의한 진동손상이라는 것이 유력하다. [1] 한주기 더 운전한 울진 1호기 제어봉 손상이 2호기에 비해 훨씬 덜하다는 것은 유동 유발

진동이 원자로 상부 구성물의 기하학적 구조, 운전중 제어봉의 위치변화 그리고 초기 제어봉의 Card내 위치 상태등에 대해서도 민감하게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. [2] 즉 출력 조절에 따른 제어봉 삽입, 인출시 발생하는 마찰과 최초 설치시 Rodlet가 안내관내 Card에서 한쪽으로 치우쳐짐으로 인해 발생하는 과도한 국부적 손상이 있을 수 있지만 보다 근본적인 원인으로서는 상부 안내관내로 유입된 냉각수의 유체력에 의한 유동유발진동이며 이를 분석하는 것을 본 연구의 목적으로 하겠다. 이를 위해 첫째 원자로 상부 안내관내에서 발생하는 유동유발진동 메카니즘을 선별하고 둘째 손상이 발생하는 위치의 지배적인 메카니즘 도출을 본 연구의 목적으로 하겠다.

2. 본 론

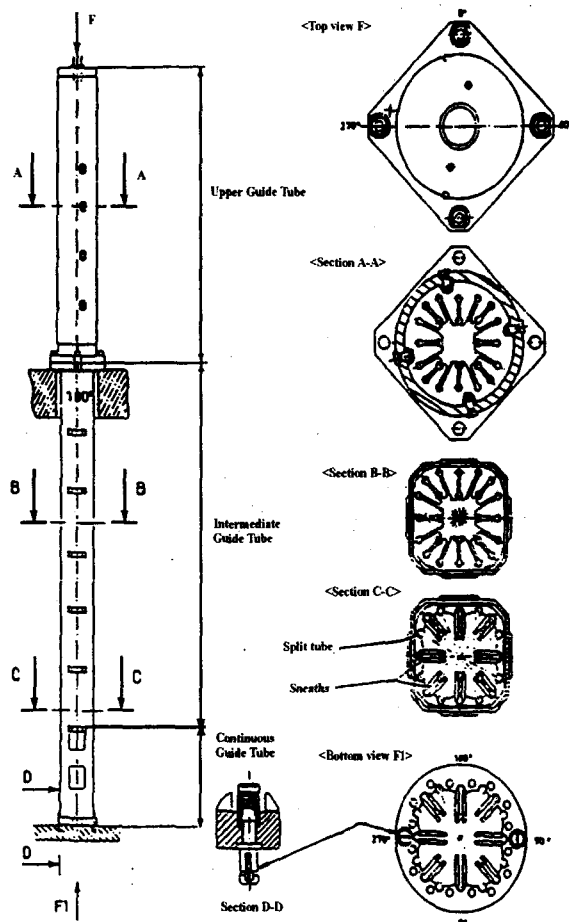


그림 1 노심상부 제어봉 안내관 및 Card

1) 제어봉 안내관의 형태
 올진 1, 2호기의 경우 제어봉 집합체는 Spider에 24개의 Rodlet가 부착된 형태이고 각 Rodlet는 304SS 피복관내에 Ag-In-Cd를 함유하고 있다. 이들 집합체는 인출된 상태에서 원자로 상부 제어봉 안내관내에 위치하게 되고 안내관내에는 각 Rodlet들이 삽입되는 Card들이 일정 간격으로 배치되어 있다. [1, 3] 안내관은 크게 3부분으로 나뉘어 지는데 아래로부터 차례로 Upper Core Plate 위에 위치한 Continuous Guide Tube, Intermediate Guide Tube, Upper Guide Tube이다. Continuous Guide Tube와 Intermediate Guide Tube

내경(I.D.)이 190.26mm인 1개의 관으로 이루어져 있고 Upper Guide Tube는 내경이 202.3mm로 Upper Support위에 고정되어 있다.

Continuous Guide Tube 표면에는 Flow Hole이 있다. 그림1은 안내관의 위치와 각 위치에 따른 안내관내 Card의 형태를 보여준다. [3]

2) 유체 유동유발 진동메카니즘

원자로내에서 발생할 수 있는 주요 유동유발 진동메카니즘은 다음 네 가지가 있다. 1) Fluidelastic Instability 2) Periodic Shedding 3) Turbulence Excitation 4) Acoustic Resonance. 이들 메카니즘은 유동조건에 따라 상대적 중요성을 가지는데 이는 표 1에 명시하였다.

Flow Situation			Fluidelastic Instability	Periodic Shedding	Turbulence Excitation	Acoustic Resonance
Axial Flow	Internal	Liquid	·	·	★	▲
		Gas	·	·	▲	★
		Two Phase	·	·	★	·
	External	Liquid	·	·	★	·
		Gas	·	·	▲	▲
		Two Phase	·	·	★	·
Cross Flow	Single Cylinder	Liquid	·	★	★	·
		Gas	·	▲	▲	·
		Two Phase	·	·	★	·
	Tube Bundles	Liquid	★	▲	▲	·
		Gas	★	·	▲	★
		Two Phase	★	·	★	·

· : Unlikely ▲ : Possible ★ : Most important

표 1 유동 형태에 따라 예상되는 유체유발진동 메카니즘

노심으로부터 완전히 인출된 상태에서 제어봉 주위의 유동조건을 살펴보면 제어봉과 제어봉 안내관내에서 예상되는 유동유발 진동요인은 축방향 유동일 경우 Turbulence Excitation 이 지배적이고 횡방향 유동일 경우 Fluidelastic Instability, Periodic Shedding, Turbulence Excitation중의 하나이다. Acoustic Resonance는 고려대상에서 제외된다. 이 3가지 메카니즘의 특징을 분석하면 표2와 같다. [4, 5]

한편 울진 1,2호기 제어봉 손상 사례 [1] 와 프랑스 Framatome의 제어봉 손상 보고서 [6] 에 의하면 제어봉 마모는 5주기와 10주기 사이의 장주기 운전 중 발생하는 것으로 나타나 있다. 그러므로 단시간에 손상을 일으키는 Periodic Shedding과 Fluidelastic Instability 보다는 Turbulence Excitation에 가까운 것으로 추정된다. 그러나 Periodic shedding과 Fluidelastic Instability의 임계유속을 넘지 않을 경우에는 장기간의 마모를 유발

할 수 있으므로 배제할 수는 없다.

특 징	
Periodic Shedding	<ul style="list-style-type: none"> • 유속에 비례하지 않음. • 구조체의 natural frequency와 유체가 유발하는 frequency가 일치할 때 급격한 진동 유발. • High vibration amplitude를 유발하며 급속한 마모 현상 유발. • 구조물의 Downstream 중 횡류에 즉각적으로 발생
Turbulence Excitation	<ul style="list-style-type: none"> • 유체의 Turbulence fluctuation이 구조체 표면에 불규칙한 압력변화를 발생시킴으로 진동 유발. • 대부분 실험을 통해 진동수 파악, 축방향 유동에서 주요한 여기 Mechanism • Far-field excitation은 벨브와 같은 up-stream 구조물에 의해 야기될 수 있음. • Low vibration amplitude를 유발하며 장시간에 걸친 마모 현상을 일으킴.
Fluidelastic Instability	<ul style="list-style-type: none"> • 유동유발 유체력과 구조물의 움직임이 겹쳐서 발생 • Instability는 유속이 야기하는 fluid force가 damping에 의해 사라지는 에너지보다 높을 만큼 유속이 빠를 경우 야기되는 현상. • Inherent, unsteady한 유속 방향이 진동을 야기함으로 Vortex shedding과 상이함. • Tube bundle의 경우 2번째 봉에 손상을 유발함 • High vibration amplitude를 유발하며 급속한 마모 현상 유발

표 2 유체유발진동의 특징

3) 제어봉 손상 위치 및 형태

제어봉의 손상위치는 제어봉을 지지하는 안내관과 핵연료 집합체 상단부에 분포되어 있다. 유체 유동유발진동은 구조물의 기하학적 형태에 영향을 받으므로 위치에 따라 손상형태가 다르게 나타난다. 안내관 안에는 제어봉 집합체를 지지하는 card들이 일정한 간격으로 배치되어 있으며 이 Card들과 Rodlet들이 충돌 마찰을 하므로 Fretting Wear 손상을 일으킨다.

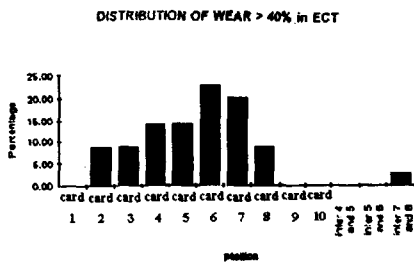


그림 2 card에서 제어봉 손상 분포

추정된다. Intermediate Guide Tube에서는 제어봉 수명에 직접 영향을 주는 접촉마모 (Fretting Wear)현상이 발생하며 미끌림 마모는 적게 발생한다. 접촉마모현상은 Intermediate Guide Tube의 하부보다는 상부쪽에 더 집중적으로 발생한다. [7]

Intermediate 안내관 최상부와 Upper Guide Tube의 하단부에서는 Card와의 접촉에 의한 손상이 20%이상인 것으로 밝혀졌다. 프랑스 Framatome사의 보고서에 의하면 Card에 의한 접촉마모 분포는 그림2와 같이 나타난다. [6]

4) 제어봉 위치에 따른 지배적인 유동유발 진동 메카니즘 분석

접촉마모가 주로 발생했던 지점은 Intermediate Guide Tube내 상부와 Upper Guide Tube 하부인 4, 5, 6, 7번 Card이다. [6] 이 위치에서의 유동상태는 다음과 같다. 상부에서는 Cold Leg과 Hot Leg의 Alignment Keys로부터 우회되는 노심상부 냉각유동이 제어봉 집합체 구동 축과 Upper Guide Tube 틈 사이로 유입된다. Upper Guide Tube(I.D.=202.3mm)

Intermediate내로유입된 냉각수는 Guide Tube(I.D.=190.26mm)에서 갑자기 관의 직경이 작아지게 되고, Card의 형태상 유량이 내려갈 수 있는 공간은 Card 중앙과 Card-Rodlet의 틈밖에 존재하지 않으므로 Card를 통과하면서 Gap에서의 압력변화에 의해 난류도가 증가할 것으로 추정된다. [3] 안내관의 직경이 갑자기 커지는 6번 Card에서는 난류도의 갑작스런 증가로 인해 과도한 진동이 발생할 수 있으며 이때 발생한 진동은 상하방향으로 전파되어 인접 Card인 7번과 5, 4번 Card에서 Rodlet와 Card간 Fretting Wear를 야기시킨다. 그러므로 두 구조물간 접촉손상을 일으키는 원인은 난류의 여기에 의한 진동이라고 볼 수 있으며 이 메카니즘이 Turbulence Excitation이다. 제어봉 손상이 장시간에 걸친 것이라는 점 역시 Turbulence Excitation이 지배적이라는 사실을 뒷받침해준다.

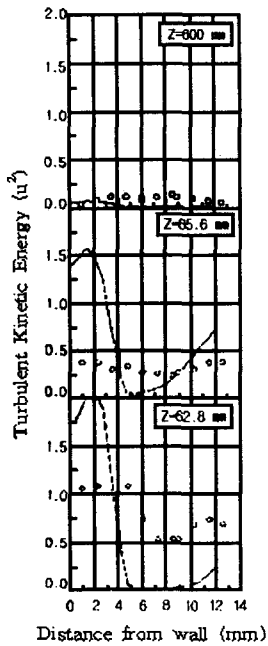


그림 3 KOFA 난류 운동에너지 분포

격도 2mm 정도임이 밝혀졌다.

Continuous Guide Tube에서는 표면의 누수 구멍을 통한 횡방향 유동이 일으키는 진동은 다음과 같다. 횡방향 유동이 안내관 내부 Rodlet들을 안내관 중앙으로 밀어내고 이 때문에 생긴 공간에 보다 높은 압력이 발생하여 이 압력차에 의한 횡방향 힘이 Rodlet에 전달되어 Card와 접촉하게 되나 [6] 누수구멍이 대칭적으로 배치되어 있기 때문에 Flow에 의한 마모가 Rodlet의 한 곳에만 집중되지 않는다. 마모형태의 대부분은 미끌림 마모(Sliding Wear)

한편 K.A.E.R.I.에서 수행된 K.O.F.A.(Korea Optimized Fuel Assembly)에 대한 유동실험을 보면 난류 운동에너지는 벽과 봉간의 간격이 가까울 수록 커지는 것을 볼 수 있다. 실험결과는 그림3에 나타냈었다. [8] 실제 제어봉과 Card 간의 간

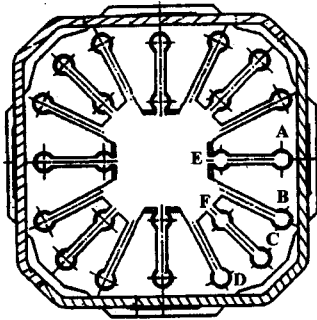


그림 4 continuous guide tube card

가 관찰되었으며 1차적으로 횡방향 유동과 접촉하는 내부 Rodlet들(E, F) 보다는 2차 접촉에 의한 누수구멍 근처의 외부 Rodlet들(A, B, C, D)이 손상됨을 볼 때 Fluidelastic Instability가 지배적임을 알 수 있다. (그림 4참조) [6]

핵연료 상부 Guide Thimble Tube에 위치한 제어봉 손상은 주로 Rodlet 끝에 위치한 Solid Plug에 분포한다. 손상원인은 제어봉과 핵연료 Thimble축과 정렬상태가 적절치 않은 경우와 핵연료를 통과한 냉각수에 의해 발생하는 제어봉 끝의 회전 때문으로 추정된다. [7]

이상과 같이 안내관내 제어봉의 손상은 위치 및 유동 형태에 따라 다르며 진동을 일으키는 메카니즘 역시 상이함을 알 수 있으나 보다 상세한 내부 유동을 검증하기 위한 실험이 필수적이다.

3. 결론

유체유발진동에 의한 안내관 내에서 제어봉의 Fretting wear 발생은 rodlet의 파손 형태와 위치, 안내관내 card 형태, 유동조건 등을 비교 분석한 결과 다음과 같은 요인으로 발생하는 것으로 추정된다.

- ◆ 제어봉의 Fretting wear는 상부 안내관 (upper guide tube)과 제어봉 구동축 사이로 유입되는 축방향 유동에 의해 주로 발생한다.
- ◆ 4, 5, 6, 6, 7 번째 card에 발생하는 과도한 Fretting wear의 원인은 유동조건에 변화에 따른 Turbulence excitation이 지배적이다.
- ◆ 하부 안내관의 A, B, C, D위치의 제어봉 손상은 Fluidelastic instability가 주요인으로 추정된다.

유동 메카니즘에 대한 상세한 정보는 실험적으로 증명 할 수밖에 없으며 본 연구의 결론 중 Turbulence Excitation은 실험을 통해 진동수를 파악해야 한다. 현재 주요 지배변수의 선정 및 실험 장치가 설계 중에 있다.

IV. 참고 문헌

- [1] 울진 원자력 본부 발전소 기술부, "제어봉 관리사례, 울진 2호기 ECT 경험"
- [2] 울진 원자력 본부 발전소 기술부, "울진 1, 2호기 제어봉 검사 후속조치(안)"
원발단(노) 743.06-붙임 1995. 6

- [3] Framatome - Korea Electric Co., Reactor Internal Structure 도면
- [4] M. J. Pettigrew, L. N. Carlucci, C. E. Taylor and N. J. Fisher "Flow-induced vibration and related technologies in nuclear components"
Nuclear Engineering and Design 131(1991) 81-100
- [5] Robert D. Blevins "Flow-induced vibration" 0-442-20828-6
- [6] J. Leclercq "Mechanical behaviour of Control Rod of 900 MWe PWR"
Report No. RC/1-Revision 0 March 1995
- [7] 전력연구원 재료 부식 연구소 "제어봉 상태 진단 기술 개발 " 중간 보고서 1997. 4
- [8] B. S Park, K. L. Jeon, S. K. Chung, H. T. Lim "Computational Fluid Dynamics Analysis for Spacer Grid Design" KNFC