

핵연료 봉의 Fretting Wear에 대한 열수력학적 원인 분석

김상녕, 정성엽

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

요 약

최근 국내의 PWR 발전소에서는 유체유발진동에 의한 핵연료의 Fretting Wear가 많이 발생하였다. 이는 Baffle Jetting이나 그밖의 요인도 있을 수 있으나 핵연료의 장주기화, 높은 열적여유도 등의 설계요건을 만족하기 위한 노심 내의 유동조건 변화에 기인한다. 특히 고리 2호기에서 발생한 핵연료 손상 중 15%정도가 유체유발진동으로 추정되고 있다. 따라서 본 연구는 손상 핵연료의 노심내 위치, 부위, 유동조건 등으로 부터 유체유발진동의 주요 손상 원인을 규명하는데 있다. 이를 위해 핵연료 집합체에서 발생할 수 있는 유체유발진동 메카니즘의 특징과 유동조건, 손상 핵연료의 노심내 위치, 파손 부위, 집합체와 지지격자의 기하학적 형태를 고려한 유동 방향 등을 연관 분석 결과 파손을 일으키는 주요원인을 단일 집합체 내에서 발생하는 Vortex Shedding과 인접한 집합체 사이에서 발생하는 Fluidelastic Instability의 중복효과로 규명하였다. 또한 최근 핵연료 설계에 도입된 Mixing Vane의 효과가 과도하여 핵연료 손상을 일으키는 가설을 정립하였다.

I 서론

핵연료 손상은 원자력 발전소의 안전성에 큰 문제를 야기하지는 않지만 발전소 정지에 따른 경제적 손실과 핵폐기물 증가와 같은 심각한 문제를 야기한다. 이중 핵연료의 Fretting Wear를 일으키는 원인으로는 연료봉을 지지하는 초기 스프링력 미달, 중성자 조사에 의한 스프링력의 이완, 피복관 크립에 의한 스프링력 저하, 유체유발진동 등으로 추정된다[1]. 이 원인 중 앞의 두 요인은 이미 다른 연구자에 의해 상당부분 밝혀졌으므로 본 연구에서는 연료봉의 진동을 유발하는 근원적인 힘 즉 유체유발진동에 국한하여 언급하기로 한다.

유체유발진동 메카니즘 중 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 유발요인으로는 Vortex Shedding, Turbulence Excitation, Fluidelastic Instability, Acoustic Resonance 등이다[2]. 그러나 핵연료 집합체의 경우 기하학적 복잡성, 유속 및 유동 방향의 복잡성 등으로 뚜렷한 원인을 찾아내는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 각각의 손상 메카니즘의 특징을 분석하고 핵연료의 운전개

시부터 파손까지 걸리는 시간, 파손 핵연료의 노심내 위치, 파손부위, 진동수 등을 비교하여 지배적인 원인을 도출한다. 또한 최근에 도입된 Mixing Vane의 효과로 노심 전체의 집합체에서 균등하게 일어나는 핵연료 손상이 유체유발진동에 의한 파손 현상을 설명할 수 있는 가설을 정립한다.

II 본론

1. 유체유발진동 메카니즘

핵연료 집합체 내에서 유속의 방향에 따라 발생할 수 있는 진동 메카니즘을 분석하면 표 1과 같다[2]. 이중 PWR 원자로의 경우 핵연료 집합체 내에서 유동 방향을 고려하여 예상되는 유체유발진동은 Axial Flow에서 발생하는 Turbulence Excitation 과 Cross Flow에서 발생하는 Fluid-elastic Instability, Periodic Vortex Shedding, Turbulence Excitation 등이다. 여기서

Flow Situation		Fluidelastic Instability	Periodic Shedding	Turbulence Excitation	Acoustic Resonance	
Axial	Internal	Liquid	×	×	●	△
		Gas	×	×	△	●
		Two Phase	×	×	●	×
Flow	External	Liquid	×	×	●	×
		Gas	×	×	△	△
		Two Phase	×	×	●	×
Cross	Cylinder	Liquid	×	●	●	×
		Gas	×	△	△	×
		Two Phase	×	×	●	×
Flow	Tube Bundles	Liquid	●	△	△	×
		Gas	●	×	△	●
		Two Phase	●	×	●	×

× : Unlikely △ : Possible ● : Most important

표 1 유동 형태에 따라 예상되는 유체유발진동 메카니즘

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 frequency를 유발하며 급속한 마모 현상 유발.
Turbulence Excitation	<ul style="list-style-type: none"> • 유체의 Turbulence fluctuation이 구조체 표면에 표면 압력을 변화시킴으로 진동 유발. • 대부분 실험을 통해 진동수 파악. • Low frequency를 유발하며 장시간에 걸친 마모 현상을 일으킴.
Fluidelastic Instability	<ul style="list-style-type: none"> • Instability는 유속이 야기하는 fluid force가 damping에 의해 사라지는 에너지 보다 높을 만큼 유속이 빠를 경우 야기되는 현상. • Inherent, unsteady한 유속 방향이 진동을 야기함으로 Vortex shedding과 상이함. • Tube bundle의 경우 2번째 붐에 손상을 유발함 • High frequency를 유발하며 급속한 마모 현상 유발

표 2 유체유발진동의 특징

Acoustic Resonance의 경우는 노심과 펌프의 거리가 상당히 멀고 유로의 방향이 여러번 바뀌므로 배제한다. 위의 3가지 유발 요인의 특징을 분석하면 표2와 같다[2,3]. 표2의 유체유발진동의 특징과 원전 개시부터 핵연료 파손까지의 시간을 비교하면 고리2호기 KOFA 핵연료의 경우 1주기 연소 후 2주기에서 80일 경과 후에 Fretting Wear 증후가 나타났다[5]. 비교적 장시간에 걸친 연료 손상이므로 Periodic Vortex Shedding과 Fluidelastic Instability Vibration은 배제할 수 있으나 냉각재의 유속이 임계유속 미만일 경우 장시간의 마모를 예상할 수 있으므로 고려에 포함시켰다.

2. 핵연료의 손상 위치

KOFA 핵연료에서 발생한 파손 위치는 상부에서 보았을 경우 그림1과 같다. 이 그림은 노심 내의 손상 핵연료 봉을 한 개의 집합체 내에 표시한 것이다[4]. 특이한 점은 손상된 봉의 78%가 외각에서 2번째 행이나 열에 있다는 것이다. 또한 핵연료 파손 위치가 일정한 간격을 두고 손상되는 점도 특이하다.

정면(옆)에서 본 핵연료 손상 위치는 3~6 번째 지지격자에서 심한 Fretting Wear가 발생하였다[5]. 이는 구조물의 기하학적 형태와 증성자 조사로 인한 스프링력의 손실이 가장 많은 부분이 3~6 번째 지지격자이기 때문이다. 또한 실제 핵연료가 첫주기 운전 후 중간에 위치한 지지격자의 스프링력은 거의 0에 가깝다. 때문에 이곳에서 Fretting Wear가 집중적으로 발생한 것으로 추정된다.

핵연료 집합체의 노심 위치에 따른 연료봉의 손상은 그림 2와 같다. 노심 가장자리의 Baffle 모서리에서 발생한 Fretting Wear의 경우는 Baffle Jetting에 의한 손상으로 알려져 있다[5]. 특이한 점은 노심의 가장자리라도 Baffle의 모서리가 아닌 벽면 근처의 연료봉은 손상이 없는 반면 노심 내에 위치한 핵연료 집합체의 경우는 집합체 간의 경계면 근방에서 오히려 Fretting Wear가 많이 발생한 점이다.

이와 같은 핵연료 파손 위치의 특이점과 집합체 내의 기하학적 형태에 따른 유동 특징과 진동 메커니즘을 연관 비교하여 주요 손상 원인을 규명 하고자 한다.

3. 유체유발진동 메커니즘의 규명

먼저 Periodic Vortex Shedding의 경우 핵연료 집합체와 같이 집적된 봉형 집합체에서는 어떤 현상으로 인해 진동이 발생하는지 잘 알려져 있지 않다[2]. 때문에 실험을 통해 진동을 측정한다.

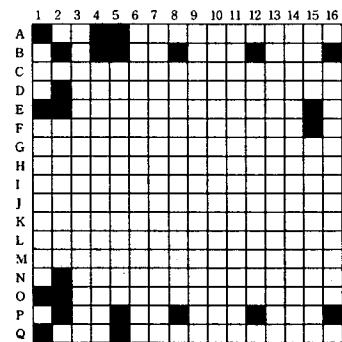


그림 1 Fretting Wear 손상 연료봉의 집합체내의 위치

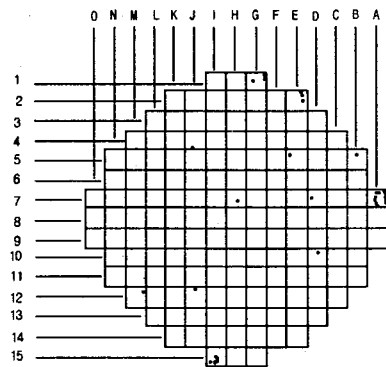


그림 2 노심 내의 Fretting Wear 손상을 입은 연료봉의 위치

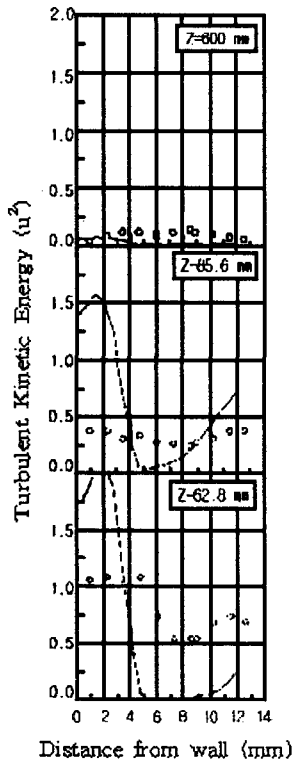


그림 3 Turbulent Kinetic Energy 측정실험

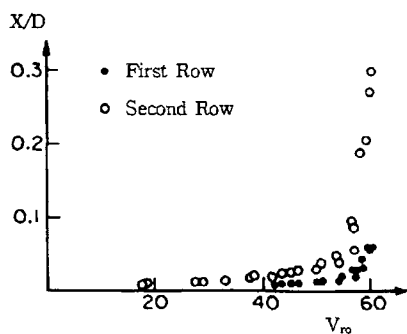


그림 4 P/D=2일 때 유속에 따른 진동측정실험

16×16 JDFA 집합체의 경우 KNFC에서 실시한 유동실험결과 27Hz 부근의 특정유량범위에서 과도한 진동이 발생하였다[6]. 이는 Periodic Vortex Shedding의 일반적인 특성과 일치한다. 하지만 이 실험에서는 단일 집합체로 실험을 했기 때문에 집합체 내에서 유속의 차이로 발생한 횡류가 일으키는 진동은 잘 모사되었지만 실제 노심 조건에서 발생할 수 있는 집합체와 집합체 사이의 유동 영향은 고려되지 않았다. 따라서 이 실험의 결과는 단일 핵연료 집합체 내에서 Periodic Vortex Shedding에 의한 진동임을 알 수 있다.

다음으로 Turbulence Excitation의 경우는 Turbulence Kinetic Energy의 크기에 진동이 좌우된다. KAERI에서 수행된 Turbulence Kinetic Energy의 실험을 인용하면 그림3과 같다[7]. 실험장치는 D(직경)=9.5mm, P(피치)=12.6mm, H(높이)=680mm 5×5 rod 집합체 형태이다. 3곳의 높이에서 Turbulence Kinetic Energy를 측정 하였다. Turbulence Kinetic Energy는 외각에서 높고 2번째 행과 열에서는 상대적으로 낮은 값을 가지고 있다. 앞서서도 지적했듯이 핵연료 손상 형태와는 상이한 면을 가지고 있다. 또한 Turbulence Excitation의 경우 Axial Flow의 유속에 의해서 더 높은 진동을 야기하는데 속도가 빠른 집합체 내부에서는 오히려 Fretting Wear가 존재하지 않는 점이 있다. 더구나 옆에서 본 핵연료의 손상은 3~6번째 지지격자 즉 핵연료 중간 부근에서 Fretting Wear가 발생하는

반면에 Turbulence Kinetic Energy는 입구 쪽에서 더 높은 Turbulence Kinetic Energy를 보여주고 있으며 상부로 갈수록 낮은 Turbulence Kinetic Energy를 보이고 있다. 따라서 Turbulence Excitation은 핵연료 집합체에서 발생하는 유체유발 진동의 원인이 아니라고 판단된다.

마지막으로 Fluidelastic Instability의 경우는 횡류에 의해서 발생하는 진동메카니즘이다[2,3]. 핵연료 집합체내의 경우 집합체간의 정압차 및 부수로에 따른 효과와 Mixing Vane에 의해서 횡류가 존재하며

따라서 예상 가능한 진동 메카니즘이다[9]. 또한 집합체 내의 각각의 연료봉 진동은 인접한 연료봉 진동에 영향을 받는다[8]. 횡류에 의한 Fluidelastic Instability의 임계유속 측정 실험은 그림 4와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 같은 유속에서 2번째 열의 연료봉이 더 높은 진동을 가지

며 3번째 열은 2번째 열보다 낮은 진동을 갖는다. 또한 핵연료의 경우처럼 $P/D=1.3$ 일때는 이러한 현상이 더욱 두드러 진다는 것이 실험으로 밝혀졌다[8]. 이는 핵연료의 손상 위치와 일치한다. 또한 KNFC에서 실험한 집합체 유동실험에서 진동변위가 한쪽 방향으로 발생하였으며 이는 16×16 JDFA의 중간 지지격자의 혼합날개의 방향성에 기인한 것으로 판단하고 있다[1]. 즉, Mixing Vane에 의해 횡류가 발생하며 이로 인해 연료봉이 진동을 하는 것으로 판단 할 수 있다. 때문에 연료봉은 Fluidelastic Instability에 의해 진동이 야기된다고 판단할 수 있다.

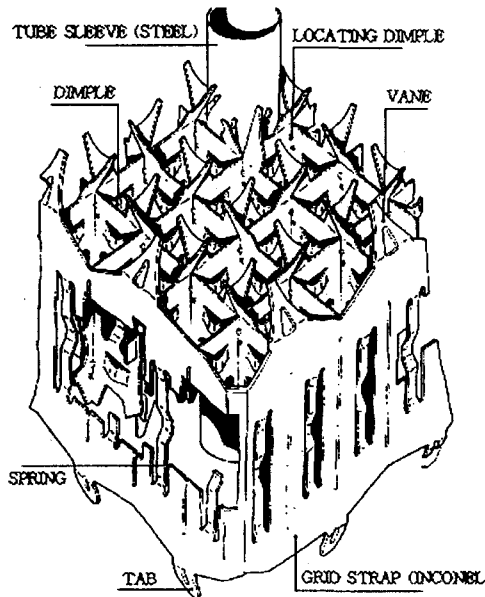


그림 5 Mixing Vane의 형태

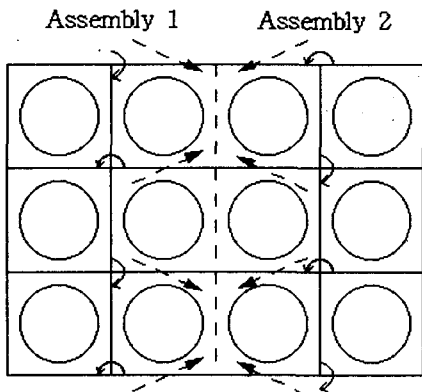


그림 6 인접한 집합체 내의 유동분포

4. 노심 중앙에 위치한 핵연료 집합체의 Fretting Wear

Baffle 모서리 뿐만 아니라 노심 중앙에 위치한 집합체의 핵연료봉에서도 Fretting Wear 에 의한 핵연료 파손이 집합체의 외각으로 부터 2번째열에서 주로 발생하고 있다. 그러므로 이와 같은 파손은 다음과 같은 유체유발진동에 의해 발생한다고 설명할 수 있다.

즉 Mixing Vane의 형태는 그림 5와 같으므로 이로 인해 발생하는 유속의 방향은 그림 6과 같이 화살표로 표시될 수 있다. 그림6의 Mixing Vane의 형태에서 나타난 것과 같이 Vane의 굽은 방향으로 인하여 집합체 둘레에서 안쪽으로 횡류가 발생하도록 되어 유체유발진동이 발생할 가능성이 있다[7]. 또한 실제 로심의 경우는 각 집합체마다 다른 유속을 가지므로 그림 6과 같이 집합체 경계면에서 합쳐지는 횡류는 완전 상쇠되지 않고 유속이 느린 집합체에서 빠른 집합체로의 횡류를 유발하게 된다. 뿐만 아니라 단일 집합체에서도 중심과 외각의 유속차이로 인한 횡류가 유발된다. 이 횡류는 첫번째 만나는 Mixing Vane의 날개에 의해 선택적으로 집합체 내로 유입된다. 따라서 이 횡류에 의한 진동이 주기적으로 봉을 2개씩 건너 뛰어서 일어나게 되는데 이는 손상 핵연료가 일정한 간격을 두고 파손되는 점과 유사하다.

결국 핵연료의 유체유발진동에 의한 파손은 파손 위치와 파손시 까지 걸리는 시간, 기하학적 형태에 따른 유동조건에 따라 각각 다른 메카니즘에 의해서 발생되며 고리2호기의 핵연료 손상은

파손의 형태와 진동 메카니즘의 특징, 노심의 주위 환경을 비교 검토한 결과 단일 집합체 내에서 발생하는 Periodic Vortex Shedding과 인접한 집합체 사이에서 발생하는 Fluidelastic Instability 중의 어느 하나이거나 이들 둘의 중복효과로 파손되는 것으로 결론지을 수 있다.

III 결론

핵연료의 Fretting Wear 중 유체유발진동에 의한 주요 원인을 핵연료 파손 형태와 집합체의 위치, 유속 방향 등을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 유추하였다.

- 핵연료의 Fretting Wear는 부수로로 흐르는 횡류에 의해서 주로 발생한다.
- 단일 집합체 진동평가 실험에서 핵연료 집합체가 특정 유량에서 진동이 발생하는 것으로 보아 Vortex Shedding이 유체유발진동 원인이다.
- 2열과 15열, B행과 P행의 손상증후로 인해서 Fluidelastic Instability가 유체유발진동 원인이다.
- 일정한 간격을 두고 파손되는 형태는 부수로의 Mixing Vane의 날개의 형태에 따라 선택적으로 유입될 수 있기 때문이다.
- 노심 중심에 놓인 집합체의 Fretting Wear는 앞의 가설에 의해 Swirl Flow의 불균형으로 발생하는 횡류에 의해 진동이 발생하는 것으로 설명할 수 있다.

IV 참고문헌

- [1] 김용환, 전상윤, 전경락, 김재원, "가압 경수로형 모의 핵연료 집합체의 유동시험", '95 춘계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1995
- [2] M.J. Pettigrew, L.N. Carucci, C.E. Taylor and N.J. Fisher, "Flow-induced vibration and related technologies in nuclear components", Nuclear Engineering and Design 131, 1991
- [3] R.D. Blevins, "Flow-induced vibration", ISBN 0-442-20828-6, 1977
- [4] KNFC, "Simulation Vibration Modes of the Fuel Rod Damaged Due to Grid-to Rod Fretting", 19th KAIF/JAIF Seminar, 1997
- [5] KNFC, "고리2호기 손상 연료 원인 규명을 위한 소내저장조 검사 결과 및 평가", KNFC/TR-026/94, 1994
- [6] 전상윤, 김용환, 전경락, 김재원, "경수로 핵연료집합체의 모드해석 및 유동실험 평가", '97 춘계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1997
- [7] B.S. Park, K.L. Jeon, S.K. Chung and K.T. Lim, "Computational Fluid Dynamics Analysis for Spacer Grid Design", KNFC
- [8] H. Tanaka, S. Takahara and K. Ohta, "Flow-induced Vibration of Tube Arrays with Various Pitch-to-Diameter Ratios", Mitsubishi Heavy Industries
- [9] N.E. Todreas, M.S. Kazimi, "Nuclear Systems I", ISBN 1-56032-051-6, P9, 1989