

DUO 연료봉 동적 설계 안정성 비교평가

Dynamic Design Stability Evaluation of DUO Fuel Rod

이강희† · 강홍석* · 김형규*

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang and Hyung-Kyu Kim

1. 서 론

새로운 기하형상을 갖는 DUO 핵연료 봉을 대상으로, 노심 냉각계의 축방향 유동조건에 놓인 기준 치수 연료봉의 동적 설계 안정성을 기존연구⁽¹⁾를 참고하여 유체유발 진동관점에서 비교/평가하였다. 구체적으로, 중간 지지점이 없는 내측 피복관의 동적 좌굴 가능성과 펠렛 제한효과에 대한 실험결과에 대해 기술하고, 집합체 내부에서 발생가능한 와류여기 주파수와 이에 따른 공진문제와 함께 지지격자 두께 선단에서 발생하는 고주파 와류여기와 지지격자 판의 공진문제, 음향공진의 가능성과 펌프여기 주파수와와의 공진문제, 축방향 유동에 의한 유체탄성 불안정 문제에 관하여 기술하여 이중냉각 핵연료의 기존 연료에 대비 상대적 동적 설계안정성의 우수성을 보인다.

2. 동적설계안정성 비교

2.1 내측봉 좌굴 가능성과 펠렛 제한효과

이중냉각 핵연료봉의 내부유동은 비교적 균일한 축류유동만 존재하고, 봉 외부에는 주류인 축류와 함께 지지격자 및 혼합날개 영역에서 발생한 횡류가 혼재된 혼합유동일 것이다. 외측 피복관은 지지격자 스프링과 덤플에 의해서 길이방향으로 다짐 지지되어 비교적 강건하나, 내측 피복관은 기능적으로 어떠한 중간 지지부도 가질 수 없으므로 인해, 제한된 범위에서 저주파수의 과대진동이 예상되고 있다. 내측 연료봉이 횡방향으로 미소변위할 때, 힘의 동적 평형에 관여하는 힘은 붕질량과 인접유체의 부가질량에 의한 관성력, 붕의 굽힘강성에 의한 탄성력(복원력), 유체압력, 유체유동에 의한 원심력, 유체유동에 의한 Coriolis력으로 구분된다. 축류 유동장 내 유연 내측봉의 좌굴(정상상태 동적불안정)은 붕의 굽힘강성에 의한 탄성복원력과 유체유동에 의한 원심력, 붕 내/외 압력차에 의해서 결정되며, 이로

부터 좌굴이 발생하는 임계유속을 계산할 수 있다⁽¹⁾. 결론적으로, 임계유속 결정식에서 내부 피복관의 내/외 압력 차이에 의한 항이 지배적이 되어 연소중에 변화될 수 있는 가능성이 크기 때문에, 내측봉이 좌굴될 가능성을 배제할 수 없다는 결론에 이른다. 그러나, 내측봉에 좌굴이 발생되어도 이웃하는 내부 펠렛의 제한효과로 인하여 피복관이 항복응력에 도달할 가능성은 극히 희박하다. 아울러, 이중냉각 핵연료봉 내부 피복관의 펠렛 제한효과(pellet bounding effect)는 모의 시험용 연료다발을 이용한 상온상압 수력시험장치를 이용하여 실험적으로 확인한 바 있다⁽²⁾.

2.2 와류여기 주파수와 격자판 고주파진동

봉 또는 붕의 집합체가 횡류에 놓일 때, 붕 단면의 양 쪽 끝에서 후류방향으로 일정한 주기(f_s)의 와류가 발생하게 된다. 이때의 와류발생 주기는 횡류 유속에 비례하고, 붕의 직경에 반비례하며 Strouhal 수의 함수가 된다. 이러한 와류 발생은 흐름방향과 흐름의 수직방향으로 각각 $2f_s$ 와 f_s 의 주기로 발생하는 교번 하중을 발생시킨다. 이러한 교번하중의 주기(주파수)가 구조물의 고유진동수에 근접하거나 일치하게 되면, 구조물은 통상 구조공진과 같은 구조물의 진동변위가 급증하는 동적 불안정 현상을 나타내는데, 와류여기 진동에 의한 구조물의 손상을 방지하기 위한 경험적 설계방법은 구조물의 고유진동수가 이러한 와류여기 주파수로부터 적어도 30% 떨어질 수 있도록 설계하거나 감쇠를 크게 하는 것이다. 다만, 핵연료 집합체와 같이 가늘고 긴 유연봉들의 집합체의 경우, 조직적인 와류여기 진동이 예상되지 않음으로 인해 큰 설계 issue는 되지 못할 것으로 생각된다. 즉, 예상되는 횡류발생의 가능성이 작기 때문에 와류여기 관점에서는 큰 문제점이 없을 것으로 예상된다. 다만 예상되는 와류 주파수가 발전소 마다 다른 특성을 갖는 펌프회전 여기 주파수나 집합체 길이방향으로 형성되는 acoustic cavity에서 발생가능한 음향 주파수와 일치하는 지의 여부는 확인해야 할 필요성이 있다.

핵연료봉 프래팅 마멸손상과 관련하여, 1~1.5 kHz 이상에서 발생하는 지지격자 판의 고주파 진동문제가 최

† 교신저자; 정회원, 한국원자력연구원

E-mail : leekh@kaeri.re.kr

Tel : 042-868-2298, Fax :042-863-0565

* 한국원자력연구원 경수로핵연료기술개발부

근 issue가 되고 있다³⁾. 이중냉각 핵연료의 경우는 붕을 지지하는 지지부 설계가 상용수준으로 현실화되지 못한 점을 감안하면, 아직 언급하기 이른 문제점이 있지만, 향후 지지격자 형상설계 시에, 발생가능한 지지격자판의 고주파 진동문제에 관해서도 충분히 실험적으로 연구할 필요성이 있다.

2.3 음향공진

팬, 펌프, 밸브, 곡관, 유동장 내 장애물, 불연속 유로 등은 관내 유동에서 standing wave 형태의 고유한 음향파를 만들어 낸다. 평면파는 파동의 방향이 유동장에 놓인 유연구조물의 진동방향과 수직하기 때문에 직접적인 영향은 크지 않겠지만, 이러한 음향주파수와 구조물의 고유진동수가 만나면 일종의 공진현상이 발생되어, 해당 구조물의 피로수명을 단축시킬 수 있다. 또한, 경우에 따라 와류여기 주파수와 음향 주파수의 일치에 따른 공진이 발생하게 되면, 상당히 심각한 구조물의 손상이 발생될 수 있다. 그러나 경험적으로, 이론적인 와류여기 주파수와 음향공진 주파수가 일치하게 되더라도, 축방향 유동장에 놓인 핵연료 집합체에서 발생 가능한 조직화된 와류여기의 가능성은 크지 않기 때문에, 대부분은 큰 문제가 되지 않는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 따라서 음향공진에 따른 집합체 형상의 구조물에 적용 가능한 보다 실제적인 설계지침으로 제안된 평가 식을 근거로 참고해 볼 수도 있다. 펌프회전에 의한 여기주파수와 양단이 개방된 내부 피복관에서 발생 가능한 음향 주파수의 공진 가능성만을 살펴본 결과, 노심에 존재하는 펌프여기 가진 주파수와 내부 피복관 유동에 의해 발생가능한 음향주파수 사이에는 일치하여 공진이 발생할 수 있는 가능성이 큼을 알 수 있다. 이것은 핵연료봉의 길이를 적절히 변경하여 음향 주파수를 조정하거나 원전에 사용되는 펌프의 회전수를 조정해야 할 필요성이 있음을 의미한다. 향후, 단순 관내 유동이나 단순 Duct 유동에 따른 음향주파수 계산이 아닌, 핵연료 집합체 내부 유로형상 및 이중냉각 붕의 내/외부에 대한 음향주파수 계산이 필요하다.

2.4 유체탄성 불안정과 비교

축류 유동장에 놓인 실린더 붕 또는 관 군의 횡방향 진동문제에서 유속이 증가됨에 따라 대상 구조물의 진동변위가 완만한 기울기로 일정하게 증가되다가, 어느 특정 유속(임계유속, Critical velocity)에서 붕의 진동변위가 갑작스럽게 증가되는 유체탄성불안정(FEI, Fluidelastic instability)이 발생된다. 이것은 이론적으

로 유체유동에 의해서 형성된 유체작용력이 구조물의 탄성복원력을 넘어서게 될 때, 발생하게 되며 음의 감쇠효과에 의해 진동변위가 급격하게 증가된다. 축류에 놓인 가늘고 긴 붕다발에 대한 유체탄성 불안정 임계유속은 통상 운전유속보다 상당히 높으며, 단일봉의 그것과 유사하지만, 붕 사이의 간격이 좁을수록(P/D 비), 유체의 밀도가 높을수록 임계유속은 낮아진다. Paidoussis⁵⁾는 축류에 놓인 관군의 유체탄성 불안정을 피하기 위한 조건식($u^* < 1.5$)을 제안하였고, 이를 근거로 무차원 임계유속(u^*)을 계산해보면, 기존 연료봉과 환형 연료봉은 0.2 이하의 극히 작은 값을 가졌고, 이중냉각 연료의 그것이 상대적으로 컸다.

3. 결 론

새로운 기하형상을 갖는 DUO 핵연료 붕을 대상으로, 노심 냉각재의 축방향 유동조건에 놓인 기준 치수 연료봉의 동적 설계 안정성을 기존연구를 참고하여 유체유발 진동관점에서 비교/평가하였다. 평가결과, 이중냉각 핵연료는 기존 연료에 대비 상대적으로 우수한 동적 설계안정성을 보였다. 향후, 난류 압력맥동에 의한 랜덤진동 응답해석을 수행하여, 동적인 응답특성을 비교할 계획이다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. Zhao, et al, Mechanical analysis of high power internally cooled annular fuel, Nuclear Technology, Vol. 146, p. 164-180, 2004.
- (2) K.-H. Lee, et al, Effect of the fuel pellet bounding on flow-induced vibration of inner tube of the annular fuel; experimental investigation, Proceedings of NCFE (fluid engineering), 2008.
- (3) K.-H. Lee, et al, High Frequency Flow-Induced Vibration of the 5x5 Test Bundle, Proceedings of KNS, 2006.
- (4) M. K. Au-Yang, Flow-induced vibration of Power and process plant components, Professional Engineering Publishing Limited 2001.
- (5) M. P. Paidoussis, A review of flow-induced vibrations of reactors and reactor components, Nuclear Engineering and Design, Vol. 74, p. 31-60, 1982.