

이중 피복관 성장과 진동차이에 따른 용접부 피로손상 가능성 Probability of Fatigue Failure of End-Cap Weld due to Difference in Growth and Vibration of Dual-Cooled Annular Fuel Cladding

이강희† · 강흥석* · 김재용* · 이영호* · 윤경호* · 박대섭**

Kang-Hee Lee, Heung-Seok Kang, Jae-Yong Kim, Young-Ho Lee, Kyung-Ho Yoon

1. 서 론

이중냉각 연료봉의 내측과 외측 봉단 마개 용접 부에는 외/내 피복관의 열 및 방사능 조사(neutron irradiation)에 의한 노 내 성장차이⁽¹⁾와 이에 따른 응력불균형, 용접 경계와 열 영향부(heat affected zone)에 의한 재료관점에서의 피로적 취화, 외/내 피복관의 진동특성(응답)의 차이 등으로 고주기 피로손상(high cycle fatigue)이 우려되고 있다. Fig.1은 이러한 문제점을 간략히 형상화한 것이다.

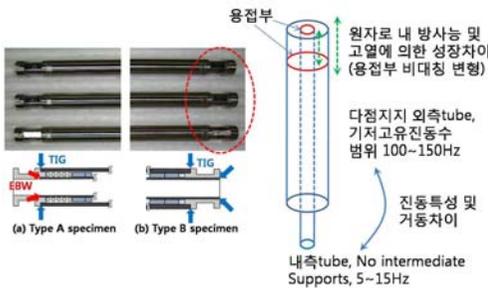


Fig.1 Welded end cap of Dual-cooled annular fuel rod and influencing factors to fatigue failure of that welded part.

고주기 피로손상은 재료의 항복응력보다 극히 낮은 응력수준에서 10^4 사이클 이상의 반복하중에 의한 재료의 파단 혹은 균열의 진전을 의미한다. 피로적 수명의 관점에서 영향을 미치는 여러 요인(평균 응력 상태, 표면거칠기, 열처리, 노치/불연속단면, 구조물의 크기 등)들과 함께, 용접부의 여러 가지 기하학적/재료적 특성과 용접시공의 방법들은 피로수

명에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 아울러, 원자로의 내부와 같이 고열과 고방사능이 오랜 기간 유지되는 환경적인 요인에 의해서도 재료의 피로수명은 크게 영향을 받겠지만, 환경적인 요인을 피로해석 인자로 고려할 수 있는 수치(및 코드) 해석적인 방법은 현재 없다. 다만, 열부하의 변동이 큰 조건에서 특별히 심각한 피로적 결함이 발생할 수 있고, 방사능 조사에 따른 재료의 피로적 취화의 문제는 재료과학 분야에서도 비교적 새로운 연구주제로 생각된다. 한편, 내/외측 피복관의 저차 고유진동수를 고려하여 총 사이클 수명을 계산하면, 10^9 사이클 이상으로 계산되는데, 이 값은 특정 재료의 피로한계수명에 가깝기 때문에, 봉단 마개의 피로손상은 초고주기 피로문제가 되며, 이 경우 특별히 재료의 한계수명 피로특성에 주목해야 한다.

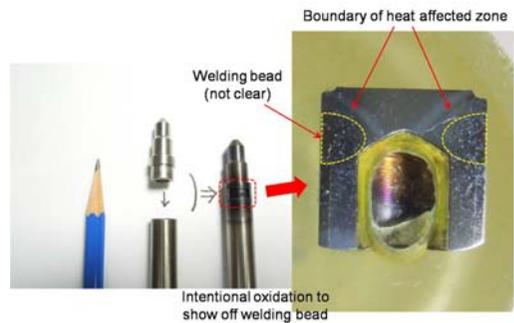


Fig. 2 End-cap welded cross section

Fig. 2는 기존 봉단마개 용접부 단면을 나타낸다. 봉단마개 용접부 고주기 피로해석의 목적은 핵분열 생성물에 대한 1차 방호벽인 연료봉의 기계적 접합부에 대한 피로수명을 예측하고, 피로적 결함의 발생가능성과 위치를 파악하여 설계관점에서 대비하기 위함이다. 연료봉 봉단마개의 구조거동은 내/외 피복관의 비선형 유체유발 랜덤진동, 용접부 거동, 고열영향, 고속 유동과 압력변동을 포함하는 복잡한 다물리적 구조거동 문제로, 현상의 수치해석적 모사가 어려우며, 하나의 수치해석 툴(tools)을 이용하여 응답에 대한 수치해를 구하기 어렵다. 이 경우, 개별

† 교신저자, 정희원, 한국원자력연구원

E-mail : leekh@kaeri.re.ker

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

* 한국원자력연구원, 경수로연료기술개발

** 태성에스엔이, FEA 사업부

적인 현상들에 대해 가정하고, 다른 두 영향관계들을 서브조합(sub-group)으로 모델링하여 계산한 후, 전체를 다시 조합/분석하여 이후의 계산과정을 전개하는 계산흐름으로 해석의 전체적인 scheme 을 구성할 수 있을 것이다.

2. 피로해석 절차와 결과의 활용

Fig. 3은 봉단마개 용접부의 수치해석 계산절차를 나타낸다. 일반적인 구조해석 코드로 계산된 응력분포(stress field)와 외부하중에 대한 실험적인 측정값, 그리고 용접부 피로 물성 및 항복응력을 입력으로 제공하면, 피로해석 코드는 이들을 근거로 관심 구조영역의 피로특성을 평가하고 수명분포(contour)를 결과로 계산하게 된다. 특별히, 용접부의 피로물성은 별도의 실험수행을 통하여 얻어야 하지만, 재료의 항복응력과 기 실험된 이종재료 용접부의 피로물성을 근거로 적절히 보간(interpolation)하는 이론적인 방법이 제안되어져 있다⁽³⁾. 반복하중이 랜덤한 경우에는 입력하중이 PSD(파워 스펙트럼 밀도)함수로 정의되는데, 확률적인 방법으로 관심영역의 피로응답을 계산하는 별도의 해석모듈을 필요로 하게된다. 이때, 가용한 피로해석 코드는 ANSYS-fatigue, nCode사의 Design-Life, Fe-Safe가 있으며, 각 피로해석 solution모듈들은 ANSYS나 ABAQUS와 같은 범용 구조해석 코드들과 연동이 가능하다.

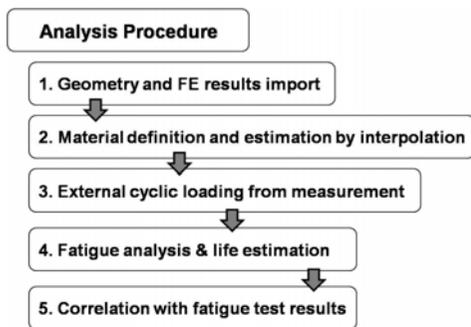


Fig. 3 Code calculation procedure

봉단마개 원주방향 및 상단 용접부는 Tubular 용접부 유한요소 모델링 지침⁽⁴⁾에 따라 수치해석 모델화하고, 유체유동에 의한 랜덤하중입력은 PSD 형태로 측정하여 입력하며, 선정된 피로해석 코드에서 피로랜덤 진동해석을 별도의 모듈로 수행하고, 이를 최종적인 피로수명 평가에 활용할 계획이다.

피로해석의 결과로부터 관심 위치의 피로적 수명

과 손상 가능성을 사전에 예측할 수 있으며, 3 차원으로 유한요소 모델링된 봉단 마개 접합부의 피로수명 Contour 곡선으로부터 피로에 의한 파단이나 크랙이 발생가능한 위치를 사전에 파악해 볼 수 있다. 아울러, 수치해석으로부터 얻은 피로수명의 결과는 실험결과와 비교하여, 둘 사이의 상관관계수(correlation factor)를 얻는데 활용된다. 개발된 수치해석 모델은 여러 가지 피로인자의 변화 따른 피로수명을 parametric study 하거나, 최적설계 모듈과 결합하여 설계변경을 시도하는데 활용된다.

3. 결 론

상기와 같이 이중냉각 연료봉 봉단마개 용접부에서 이웃하는 연료봉의 성장차이와 진동차이에 의한 고주기 피로손상 가능성에 대해 토의하였다. 용접부 피로물성을 얻는 1차적인 문제에서부터, 특성 실험자료를 근거로 피로수명을 예측하는 수치해석적인 방법에 대해서 기술하였고, 재료의 피로수명에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 피로인자들에 대해 기술하였다. 수치해석적인 피로해석의 결과는 통상 실험적인 결과와 큰 편차(대략 +/- 30%)를 갖는데, 따라서 해석의 목적은 정성적인 피로적 경향을 파악하고, 예상 파단위치를 확인하는 것이다.

후 기

본 연구는 교과부의 원자력기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되고 있으며, 저자일동은 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, H. -K. et al, Mechanical design issues and resolutions of a dual cooled fuel for the OPR-1000, Nucl. Eng. Des. v. 241, p. 2119 (2011).
- (2) Lee, Y.-L., Fatigue testing and analysis: theory and practice, Burlington, Elsevier (2005).
- (3) M. Hoffmann and T. Seeger, A generalized method for estimating multiaxial elastic-plastic notch stresses and strains, Part 1: Theory, J. Eng. Mat. Tech, v.107, p. 250 (1085).
- (4) W. Fricke and S.J. Maddox, Fatigue analysis of welded components: designer's guide to the structural hot-spot stress approach, International institute of welding, IIW-1430-00 (2006).