

중수로용 개량핵연료(CANFLEX-NU) 핵연료봉 건전성 평가

박광석, 심기섭, 석호천
한국원자력연구소.

요약

중수로용 핵연료봉의 주요 파손부위는 피복관 원주방향 주름부위와 봉단마개-피복관 용접부위로 알려져 있다. 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX 핵연료 개발시, 이러한 핵연료봉 부위들에 대한 건전성이 입증되어야 한다. 이에 따라 CANFLEX-NU 핵연료봉의 피복관 원주방향 주름부위 및 피복관-봉단마개 용접부위에 대한 정상상태 운전시의 건전성을 평가한 결과, 정상상태 운전시는 핵연료봉의 건전성이 유지가 됨을 알 수 있었다.

1. 개요

현재까지 알려진 가압중수로형 원자로(CANDU) 핵연료봉의 운전중 파손확률은 0.1% 정도로 매우 미미하지만, 중수로용 핵연료 설계시 핵연료봉 파손이 발생되지 않도록 설계하여야 한다[1]. 일반적으로 중수로용 핵연료봉의 파손은 응력집중부위인 피복관 원주방향 주름부위(sheath circumferential ridge) (그림 1 참조)와 봉단마개-피복관 용접부위(그림 2 참조)에서 PCI/SCC에 의해 주로 발생하는 것으로 알려져 있다[1]. 따라서 AECL과 공동으로 KAERI에서 개발중인 CANFLEX와 같은 개량핵연료 설계시, 그 핵연료봉이 PCI/SCC 등과 같은 구조적 파손기구에 의해 파손될 가능성을 완전 배제하도록 핵연료봉 국부지점에 대한 정밀한 건전성 평가를 수행하여 그 결과를 설계에 반영하여야 한다.

본 연구에서는 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX-NU 핵연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위 (그림 3) 및 피복관 원주방향 주름부위에 대한 건전성 평가를 수행하였다. 피복관 원주방향 주름부위에 대한 건전성 평가는 기존에 발표되어 있는 중수로용 핵연료의 PCI/SCC 파손확률 계산 모델을 이용하여 수행한다. 중수로용 핵연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위에 대한 건전성 평가는 이 부분에 대한 파손확률 해석용 모델이 개발되지 않았으므로, 유한요소 모델을 사용하여 응력집중 국부지점에서의 응력 평가를 통해 수행한다.

2. 건전성 평가 방법

2.1 피복관 원주방향 주름부위 건전성 평가

현재까지 알려진 중수로용 핵연료봉의 건전성을 평가하기 위한 PCI/SCC 파손확률 계산 모델로는 여러가지가 알려져 있지만, 대부분의 모델들은 실험적 자료들을 기초로 하여 만들어진 실험적 상관식들로 핵연료 연소도 및 핵연료봉 제원등에 있어서 제한성을 가져 그 실험범위를 만족하는 핵연료에 대해서만 적용 가능하다. 이러한 실험범위는 주로 37개 핵연료 봉다발에 적용 가능한 것으로, 피복관 제원이 적용가능 범위를 넘어서는 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대해서는 적용이 어렵다[1]. 그러나 최근에 발표된 INTEGRITY 모델[2]은 광범

위한 실험자료 뿐만 아니라 핵연료봉 제원에 제한이 없는 해석적 방법을 도입하여 개발되었기 때문에 기존 실험적 모델들의 적용 한계를 넘어서는 핵연료봉에 대해서도 PCI/SCC 파손확률을 계산할 수가 있다. 본 연구에서는 CANFLEX-NU 핵연료봉의 피복관 원주방향 주름 부위의 PCI/SCC 파손확률 해석을 위해 INTEGRITY 모델을 사용한다.

INTEGRITY 모델을 사용하여 파손 확률을 계산하기 위해서는 핵분열기체 방출량, 흑연도포층 두께, 핵연료 연소도, 단위 핵연료봉당 소결체 갯수 및 총 변형에너지(work density) 등에 대한 수치가 필요하다. 핵분열기체 방출량은 중수로용 핵연료봉의 정상상태 성능해석 코드인 ELESTRES[4]의 계산 결과로부터 구해지고, 흑연도포층 두께와 단위 핵연료봉당 소결체 갯수는 핵연료봉 제조와 관련된 설계치이다. 총 변형에너지는 유한요소 해석코드인 FEAST 코드[5] 계산결과로부터 구해지는 값인데, FEAST 코드를 사용하기 위한 입력자료는 ELESTRES 코드의 계산결과를 반영하여 작성한다. ELESTRES 코드 계산 결과를 FEAST 응력해석에 반영하기 위하여, ELESTRES-FEAST 연계코드인 FEAST_PRE를 개발하여 사용 하였다. ELESTRES 코드를 이용하여 출력급증 전후의 연료봉 조건을 계산할 때 사용되는 연료봉 출력이력은 노심해석 결과로부터 구해지는데, CANFLEX-NU 연료봉의 경우 내환봉 및 외환봉 모두에서 그 최대치가 $\sim 30 \text{ kW/m}$ 로 구해졌다(그림 4 참조).

2.2 봉단마개-피복관 용접부위 건전성 평가

중수로용 핵연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위에 대한 PCI/SCC 파손 해석 모델은 아직 까지 개발 제시된 바가 없다. 따라서, 본 연구에서는 ELESTRES 코드와 FEAST 코드를 연계하여 봉단마개-피복관 용접부위에서 응력을 계산하고, 이 응력값을 평가하여 PCI/SCC 파손 가능성을 예측하였다. 봉단마개-피복관 용접부위 파손은 취성파손의 특징을 보이는 것으로 알려져 있으므로, 금속재료의 취성파손에 관한 2가지 일반적 해석모형들인 Rankine's theory (maximum normal stress theory) 와 modified Mohr's theory, 그리고 유효응력 분포 contour 에 의한 최대응력 작용지점 위치 해석 등을 통하여 봉단마개-피복관 용접부위 파손예측을 수행하였다.

CANFLEX-NU 핵연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위 건전성 평가를 위하여 ELESTRES-FEAST-HyperMesh 코드체계를 연계하는 해석코드 체계를 구축하였다. 즉, ELESTRES 코드를 사용하여 출력급증 이전의 연료봉 조건과 출력급증 동안의 연료봉 변위량을 구하고, 이 자료를 해석대상의 유한요소 모델링 자료 및 표 1 과 같은 재료 물성치와 함께 FEAST 코드에 입력으로 주어 응력해석을 수행하였다. HyperMesh 프로그램[7]은 해석대상의 유한요소 모델링 (pre-processing) 및 해석결과와 post-processing 에 사용된다.

ELESTRES 코드를 이용하여 출력급증 전후의 연료봉 조건을 계산할 때 사용되는 연료봉 출력이력은 상기 2.1항의 피복관 원주방향 주름부위 파손확률 계산에서 처럼, 그림 4 에 도시된 바와 같다. 양단 소결체 부위에서의 연료봉 선출력은 end flux peaking factor 를 고려 하였다[8].

3. CANFLEX-NU 핵연료봉 건전성 평가 결과

3.1 피복관 원주방향 주름부위에서의 PCI/SCC 파손 확률

ELESTRES 및 FEAST 코드로 부터 산출된 CANFLEX-NU 내환봉 및 외환봉의 출력급증시 핵연료봉 조건을 INTEGRITY 모델 입력 변수값으로 하여 CANFLEX-NU 내환봉

및 외환봉의 피복관 원주방향 주름부위의 파손확률을 계산한 결과 파손확률이 각각 0.0053%, 0.01481%로 나타났다. INTEGRITY 모델에서는 1%이하의 파손확률은 파손이 일어나지 않는 것으로 간주하므로, 원자로 정상상태 운전시 CANFLEX-NU 내환봉 및 외환봉의 원주방향 주름부위에 대한 파손은 일어 나지 않을 것으로 예상된다.

3.2 봉단마개-피복관 용접부위 건전성 평가 결과

○ Rankine's theory [9] 에 의한 파손 예측

Rankine's theory 에서는 principal stresss 가 fracture stress 를 넘어설때 취성 파손이 발생한다라고 고려한다. PCI/SCC 파손을 일으키는 threshold stress 는 일반적으로 항복응력의 1/3 이상인 것으로 알려져 있으므로[9], 봉단마개-피복관 용접부위에서의 파손 시작 응력은 ~181 MPa 로 고려할 수 있다. 표 2 에서 내환봉과 외환봉의 봉단마개-피복관 용접부위에서의 최대 principal stress 는 각각 77.8 과 89.2 MPa 로 나타났는데, 이 값들은 상기 기준치 181 MPa 보다 낮다. 이러한 결과를 통해, CANFLEX-NU 연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위에서의 PCI/SCC 파손이 발생할 가능성이 매우 희박함을 알 수 있다.

○ Modified Mohr's theory [9] 에 의한 파손 예측

Modified Mohr's theory 에서는 principal stress 와 Mohr's circle 에서 구해지는 파 단면 응력 제한치와의 비가 1.0 이상이 되면 취성 파손이 발생하는 것으로 고려한다. FEAST 코드 계산 결과, 그 비값의 최대가 내환봉에서 0.997 로 외환봉에서 0.977 로 나타났는데(표 2 참조), 이 결과 또한 CANFLEX-NU 연료봉의 봉단마개-피복관 용접부위에서 PCI/SCC 파손 발생 가능성이 희박함을 보여준다.

○ 최대 응력 작용 지점 위치해석에 의한 파손 예측

그림 5는 CANFLEX-NU 내환봉 봉단마개 부위에서의 유효응력(effective stress) 분포 등고선을 도시한 것이다. 그림 5 에서 최대응력이 봉단마개-피복관 용접부위에서의 re-entrant corner (A지점) 에서가 아니고 봉단마개 내부 corner (B 지점) 에서 발생된 것으로 나타났다. A 지점에서 연료봉 외부까지의 두께는 봉단마개 부위에서에서 가장 얇으므로 상대적으로 A 지점이 연료봉 파손에 가장 민감한 부분이다. 기존 연료봉의 경우 최대 응력이 주로 A 지점에서 발생되어 이 결과로 연료봉 파손이 가장 빈번하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그림 5 에서 최대 응력이 A 지점이 아닌 B 지점에서 나타난 결과는 CANFLEX-NU 연료봉이 출력급증 조건에서 파손될 가능성이 기존 핵연료봉에 비해 낮음을 의미한다. 그림 6 에서 보는 바와 같이 CANFLEX-NU 외환봉에서도 내환봉에서와 마찬가지로 봉단마개 부위 최대 응력이 용접부위 re-entrant corner 가 아닌 봉단마개 내부 corner 에서 나타났는데, 이 결과도 내환봉에서와 마찬가지로 외환봉이 출력급증 조건에서 파손될 가능성이 매우 낮음을 의미한다.

4. 결론

본문에서 언급한 CANFLEX-NU 핵연료봉에 대한 기계적 건전성 평가 결과를 종합하면

다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 정상상태 운전시 CANFLEX-NU 핵연료봉의 원주방향 주름 부위에서는 PCI/SCC에 의한 파손이 일어나지 않을 것으로 예상된다.
- 정상상태 운전시 CANFLEX-NU 핵연료봉의 봉단마개-피복관 용접 부위에서는 PCI/SCC에 의한 파손이 일어나지 않을 것으로 예상된다.
- 그러므로, 정상상태운전시 CANFLEX-NU 핵연료봉의 원주방향 주름 부위와 봉단마개-피복관 용접 부위에서는 그 건전성이 유지될 것으로 판단 된다.

5. 참고문헌

- [1] 심기섭, 석호천, “중수로용 핵연료 정상상태 설계해석 기술”, KAERI/TR-468/94 (1994).
- [2] M. Tayal, et al., “INTEGRITY: A Semi-Mechanistic Model for Stress Corrosion Cracking of Fuel”, IAEA Technical Committee Meeting on Water Reactor Fuel Element Modelling at High Burnup and Its Experimental Support, Windermere, U.K., 1994 September 19-23.
- [3] L. Lunde, K. Videm, “The Influence of Testing Conditions and Irradiation on the Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Zircaloy”, Journal of Nuclear Materials, 95(1980), pp. 210-218
- [4] M. Tayal, “Modeling CANDU Fuel under Normal Operating Conditions ; ELESTRES Code Description”, AECL-9331 (1987).
- [5] M. Tayal, “FEAST: A Two-Dimensional Non-Linear Finite Element Code for Calculating Stresses”, AECL-8763 (1986).
- [6] Y.O. Lee, “Power and Power Boost Envelope for CANFLEX-NU in Wolsong-1”, KAERI/TR-487/95 (1995).
- [7] “HyperMesh Reference Manual”, Altair Computing, Inc. (1990).
- [8] C.J. Jeong, “End Flux Peaking Calculation for CANFLEX-43 Fuel Bundle”, KAERI/TR-470/94 (1994).
- [9] J.A. Collins, “Failure of Materials in Mechanical Design”, John Willey & Sons, 1981.

표 1 연료봉 봉단마개-피복관 용접부위 응력해석시 사용된 재료의 물성 (300°C 자료)

Material Region	봉단마개	용접부위	피복관
Material	Recrystallized	40% CW & no	As-received, CW
Characteristics	Zircaloy-4	SR Zry-4	& SR Zry-4
Yield Stress (MPa)	358	464	414
Plastic Mdulus(MPa)	80	30	30
Elastic Mdulus(MPa)	80	80	80
Poisson's Ratio	0.43	0.43	0.43

* CW = Cold-Worked, SR = Stress-Relieved

표 2 CANFLEX-NU 연료봉 봉단마개 및 봉단마개-피복관 용접부위 응력 해석 결과

Parameters	CANFLEX-NU Inner Element	CANFLEX-NU Outer Element
Max. radial stress (MPa)	77.8	88.0
Max. hoop stress (MPa)	43.4	14.8
Max. axial stress (MPa)	32.5	61.2
Max. effective stress(MPa)	201	215
Max. Principal stress (MPa)	77.8	89.2
Coulomb-Mohr normal factor for failure indication (max.)	0.997	0.977

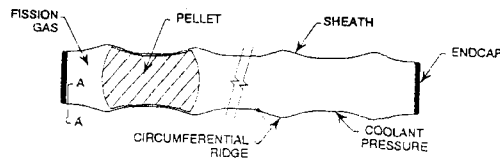


Fig. 1 Definition of Terms - Sheath Circumferential Ridge Region

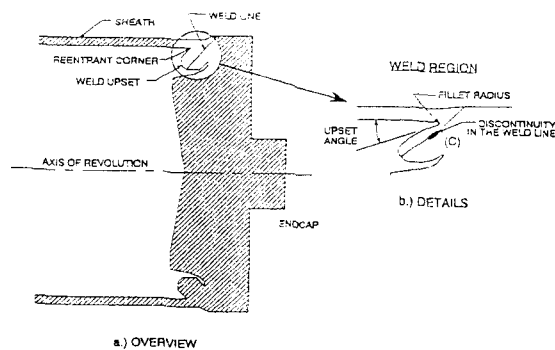
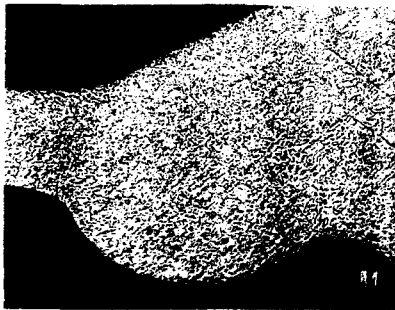


Fig. 2 Definition of Terms - Sheath/Endcap Weld Region

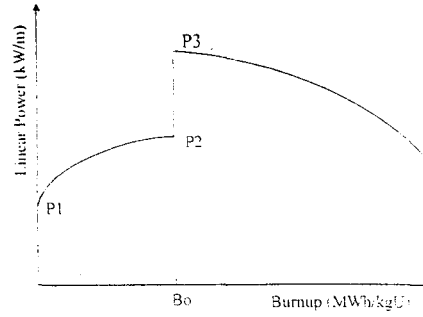


a) for Inner Element



b) for Outer Element

Fig. 3 The Photographs at Sheath/Endcap Welding Region (x100)



	INNER ELEMENT		OUTER ELEMENT	
	MIDDLE PELLETT	END PELLETT	MIDDLE PELLETT	END PELLETT
P1	12.42	21.25	11.66	16.38
P2	13.23	22.33	12.97	17.35
P3	41.71	50.77	40.07	45.35

* Bo=37.37MWh/kgU for the inner element, 45.36 MWh/kgU for the outer element

Fig. 4 Power Histories Used in the Calculation of Pellet Expansion

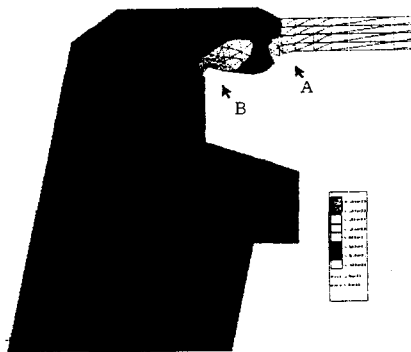


그림 5 CANFLEX-NU' 중환봉의 effective stress 분포도

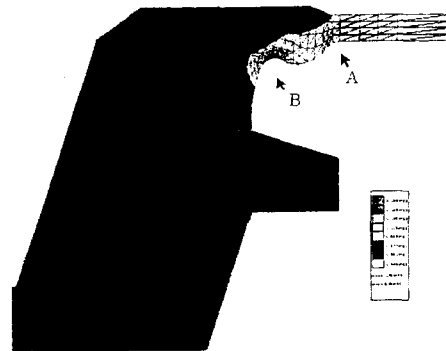


그림 6 CANFLEX-NU' 외환봉의 effective stress 분포도