

중수로용 개량핵연료 (CANFLEX) 피복관의 기계적 설계

심기섭, 박광석, 석호천
한국원자력연구소

요 약

CANFLEX 핵연료다발은 구조적 설계면에서 기존 핵연료다발과 큰 차이가 나도록 설계되어 있으므로, 핵연료 피복관 설계도 기존 핵연료 피복관 설계와 당연히 달라진다. 여기에서는 CANFLEX 핵연료 피복관의 기계적 설계 요건과 그 설계제원 해석을 통해 수행한 설계 타당성 검토 결과를 기술한다.

1. 서론

한국원자력연구소에서는 AECL 과 공동으로 중수로용 개량 핵연료인 CANFLEX 핵연료를 개발하고 있다 [1]. CANFLEX 핵연료다발의 구조적 설계 특성 때문에 CANFLEX 핵연료봉의 피복관 제원은 기존 중수로용 핵연료봉에 사용되는 피복관 제원과 다르다. CANFLEX 피복관의 설계 제원은 핵연료 개발의 초기 단계에서 어느 정도 결정되었으나, 핵연료 개발 전 과정을 통해 드러나는 여러 문제점을 종합하여 궁극적으로 핵연료 재장전 및 정상상태 운전조건하에서 그 건전성을 잃지 않도록 최종 조정되고 있다. 국내에서의 중수로용 핵연료 피복관 설계 기술은 CANFLEX 핵연료 개발 과정을 통해 체계적으로 수립되고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 여기에서는 CANFLEX 핵연료 개발 과정을 통해 확립한 중수로용 핵연료 피복관의 설계 요건을 소개하고, CANFLEX 핵연료 피복관의 설계 제원 해석 결과를 기술한다.

2. 중수로용 핵연료 피복관 설계 기준

Zircaloy-4 는 낮은 중성자 흡수 특성과 양호한 내식성 때문에 핵연료 피복관으로 널리 사용되고 있다. 핵연료 피복관은 핵연료 장전 및 정상운전 조건에서 그 건전성을 잃지 않도록 설계되어야 하므로, 다음의 재료특성 요건과 기계적 성능 요건들을 모두 만족하여야 한다. 재료특성 요건은 기술시방서에 시방되어야 하며, 기계적 성능 요건은 핵연료봉 설계와 연계되어 핵연료 설계 지침서 (또는 핵연료 설계보고서) 에 기술되어야 하는 내용들이다.

○ 재료특성 요건

- 화학적 조성 (chemical composition)
 - 합금원소 함량
 - 불순물 함량
- 기계적 성질 (mechanical properties)
 - 길이방향 인장 특성 : UTS, YS, Elongation

- 밀봉 파단 특성 : UHS, TCE
- 결정입자 크기
- 수소화합물 방향성

○ 기계적 성능 요건

- 소결체와 피복관의 밀착 (sheath collapse on pellet)
- 피복관 축방향 주름 형성 (sheath longitudinal ridge formation)
- 핵연료봉 buckling
- 집중된 축방향 틈새로의 피복관 함몰 (sheath collapse into concentrated axial gap)
- 피복관 원주방향 주름 (sheath circumferential ridge) 에서의 연료봉 파손
- 노내조사 특성

3. CANFLEX 핵연료 피복관의 설계 해석

3.1 CANFLEX 핵연료 피복관의 설계 제원

CANFLEX 핵연료다발은 총 43개 핵연료봉으로 구성되어 있는데, 외환봉 선출력을 낮추기 위해 다발 외환과 중환에 직경이 11.5 mm 인 핵연료봉들을 위치시키고, 작은 연료봉 사용에 따른 우라늄량 저하의 보상과 핵연료다발 반경방향 출력 평탄화를 위해 다발 내환과 중심에 직경이 13.5 mm 인 핵연료봉들을 위치시키고 있다 [1]. CANFLEX 핵연료봉의 선출력은 기존 핵연료봉 선출력보다 20% 정도 낮아서 CANFLEX 피복관 두께를 기존 핵연료 피복관 두께보다 두껍게 설계할 필요가 없으므로, 주어진 핵연료봉 설계 조건내에서 피복관 축방향 주름이 형성되지 않을 두께를 구하여 그 설계 최소두께로 결정하였다.

3.2 CANFLEX 핵연료 피복관의 재료 특성

천연우라늄을 사용하는 CANFLEX 핵연료의 운전조건이 기존 핵연료 운전조건과 동일하므로, 기존 핵연료 피복관에 적용하는 기술시방서 [2] 상의 요건을 그대로 적용하여 CANFLEX 피복관의 재료특성 요건으로 규정하였다. 표 1 은 CANFLEX 핵연료 피복관의 재료특성 시험 결과 [3] 를 상기 2. 절의 재료특성 요건 및 기존 핵연료 피복관 재료특성과 비교하여 나타낸 것이다. 표 1에서 얻어진 주요 결과들을 요약하면 다음과 같다:

- CANFLEX 피복관의 재료특성 결과는 기술시방서상의 재료특성 요건을 모두 만족한다.
- CANFLEX 피복관은 내식성 및 수소화합물 방향성에서 기존 핵연료 피복관과 동등한 특성을 보이나, 기계적 특성면에서 더 강한 특성(즉, 높은 강도 및 낮은 연신률) 경향을 보인다.

피복관의 강한 특성은 핵연료의 고출력 및 고연소도 운전을 방해할 수 있는 조건이 될 수 있으므로 [4], 향후 개량 핵연료주기 핵연료를 사용하는 CANFLEX 핵연료를 개발하여 고연소도 운전을 겨냥할 경우 피복관 기술시방서의 기계적 성질 요건을 개정하고, 이를 바탕으로 CANFLEX 피복관의 기계적 재료 특성을 더욱 향상시켜야 할 것으로 사료된다.

3.3 CANFLEX 핵연료 피복관의 기계적 성능 특성

○ 소결체와 피복관의 밀착

중수로용 핵연료의 경우 증성자의 효율적 관리를 위해 핵연료 피복관의 두께를 얇게 하는데, 이 때문에 노내 운전상태에서 피복관이 소결체에 밀착(collapse)되도록 설계된다. 따라서, 중수로용 핵연료 피복관 최대 두께는 collapse 가 시작되는 두께치보다 작아야 한다. Bryan 의 상관식 [5] 을 사용하여 CANFLEX 피복관에 대해 피복관 최대 허용 두께를 구하였다.(그림 1) 10.7 MPa 의 냉각재 압력 조건에서 피복관 최대 허용 두께는 $\varnothing 13.5$ mm 경우 0.51 mm 로, $\varnothing 11.5$ mm 경우 0.44 mm 로 구해졌는데, 이들 값들은 CANFLEX 피복관 최대 두께 설계치 보다 매우 크므로 CANFLEX 핵연료 피복관은 노내에서 장전된 직후 소결체와 바로 밀착하게 된다.

○ 피복관 축방향 주름 형성

중수로용 핵연료 피복관의 최소 두께는 피복관에 축방향 주름이 형성되지 않을 두께로 결정되는데, 이렇게 정하여진 두께 값이더라도 핵연료 재장전 강도시험 조건에서 핵연료봉이 좌굴(buckling) 될 정도로 너무 얇아도 안된다.

중수로용 핵연료 피복관의 축방향 주름 형성에 관한 실험적 상관식 [6] 을 사용하여 CANFLEX 핵연료 피복관의 최소 두께를 구하였다. (그림 2) 빈 튜브에서 축방향 주름을 형성하지 않을 최소 두께는 $\varnothing 13.5$ mm 경우 0.39 mm 로 $\varnothing 11.5$ mm 경우 0.33 mm 로 구해지는데, $\varnothing 13.5$ mm 연료봉의 0.39 mm 는 기존 핵연료 피복관 최소 두께보다 크다. CANFLEX 핵연료봉의 낮은 선출력을 감안할때 CANFLEX 핵연료 피복관을 기존 핵연료 피복관보다 두껍게 설계할 필요가 없다. $\varnothing 13.5$ mm 연료봉의 피복관 최소 두께치는 소결체-피복관 직경틈새의 최대치에서 축방향 주름이 형성되지 않을 값이다.

중수로에서의 핵연료 재장전시, 기 장전 12개 핵연료다발과 신 장전 8개 핵연료다발 모두 20개 다발이 한 채널내에 있다가 기 장전 12개 다발중 8개 다발이 냉각재 유동 하류방향으로 방출된다. 20개 다발들이 한 채널에 있을때 이 핵연료다발 열은 유동 하류방향 마지막 다발이 핵연료장전기 측면정지기에 걸려 있는 형태로 채널내에서 지탱되는데, 이때 약 13개 핵연료다발들이 수력학적 견인력을 받으므로 측면정지기에 지탱되어 있는 하류방향 마지막 다발에 약 7300 N 이상의 압축하중이 작용하게 된다. 이 과도한 압축력에 의해 측면정지기에 걸려 있는 핵연료다발의 연료봉들이 좌굴될 가능성이 있다. 이러한 가능성은 해석과 실험 모두를 통해 검토될 수 있다. CANFLEX 핵연료의 경우, 상기 수력학적 견인력의 1.6배인 12000 N 의 수력학적 견인력 조건에서도 핵연료봉에 어떠한 변형도 관찰된 바 없다 [7].

○ 집중된 축방향 틈새로의 피복관 함몰

핵연료봉 제조시 피복관과 봉단마개의 용접을 용이하게 하고 누적된 소결체들이 축방향 팽창하더라도 봉단마개와 접촉하지 못하도록 핵연료봉 내에 축방향 틈새를 마련하는데, 피복관 두께가 너무 얇고 축방향 틈새 길이가 너무 긴 경우 과도한 냉각재 압력에 의해 피복관이 집중된 축방향 틈새로 함몰될 수도 있다. 이러한 피복관 함몰은 핵연료 장전 직후 과도한 압력을 받아 발생될 수도 있고, 과도한 압력하에 오래 머무름에 따라 크립에 의해 촉진될 수도 있다.

유한요소 응력해석 코드인 FEAST [8] 를 사용하여 냉각재 압력에 순간적으로 발생하는 피복관 반경방향 압축 변위량을 해석하였다. (그림 3) 해석 결과, 냉각재 압력이 증가함에 따라 피복관의 압축 변위량은 점차 커지는데, 소결체-피복관 반경틈새가 $\varnothing 13.5$ mm 연료봉 및 $\varnothing 11.5$ mm 연료봉 모두에서 냉각재 압력이 20 MPa 이상 될때 닫히기 시작하고 집중된 축방향 틈새로의 피복관 함몰은 30MPa 이상의 냉각재 압력 조건에서나 가능한 것으로 나타났다. 크립이 피복관 함몰에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 평가하여 본 결과, 크립이 피복관 함몰량 성장에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 피복관 함몰은 ovality 와 같은 피복관의 불균일한 기하학적 구조와 재료의 이방성 등에 의해 영향을 받을 수 있는데, 이러한 불완전성이 피복관 함몰에 미치는 영향을 평가하기 위해 Monte Carlo simulation 을 또한 수행하였다. Monte Carlo simulation 결과, 집중된 축방향 틈새로의 피복관 함몰이 30 MPa 이상의 냉각재 압력 조건에서 발생하는 것으로 나타났는데, 이 결과는 상기 유한요소 해석 결과와 거의 동일하다.

○ 피복관 원주방향 주름에서의 연료봉 파손

CANDU 핵연료봉의 파손은 피복관 원주방향 주름 위치와 피복관-봉단마개 용접 부위에서 주로 PCI/SCC 에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 핵연료봉 파손은 피복관 설계뿐만 아니라 소결체 설계를 포함하는 모든 연료봉 설계변수에 종합적으로 영향을 받아 나타난다. 이들중 피복관 두께가 CANFLEX 핵연료봉 피복관 원주방향 주름 부위에서의 PCI/SCC 파손에 미치는 영향을 INTEGRITY model 을 이용하여 검토하였다. 즉, $\varnothing 13.5$ mm 연료봉의 피복관 두께를 0.33 mm 까지 아주 얇게 고려하여도 PCI/SCC 에 의한 파손 확률이 0.02% 이하로 나타났고 $\varnothing 11.5$ mm 연료봉의 피복관 두께를 0.30 mm 까지 아주 얇게 고려하여도 PCI/SCC 에 의한 파손 확률이 0.02% 이하로 나타났는데, 이는 CANFLEX 핵연료봉이 설계 조건내에서 운전될때 피복관 원주방향 주름 부위에서의 PCI/SCC 파손 발생 가능성이 매우 희박함을 보여준다.

○ 노내조사 특성

CANFLEX 핵연료봉의 설계 최고 선출력은 48 kW/m 로, 다발의 인허가 최고 출력인 935 kW 조건에서 유도된 값이다. 그러나, 핵연료봉의 건전성 한계를 규명하기 위해 설계 최고 선출력부터 핵연료봉 파손이 확실하게 예상되는 매우 높은 연료봉 선출력 범위까지 핵연료봉의 연구로내 조사시험을 수행한다. CANFLEX 핵연료의 설계는 여러 단계의 설계 최적화 과정을 거쳐 현재의 Mk.4 까지 진화되어 왔다. 현재 Mk.4 설계 핵연료의 조사시험은 아직까지 수행된 바 없고, Mk.3 설계 핵연료의 조사시험은 표 2 에 나타난 바와 같이 NRU 연구로에서 수행되어 왔다. NRU 연구로에서 조사된 5개 CANFLEX Mk.3 핵연료다발들중 매우 높은 출력조건으로 연소된 2개 핵연료다발들 (AJJ, AJL) 은 연료봉에 결함이 발생되어 제거되었다. 이들 다발의 외환봉 선출력은 설계 최고 선출력 보다 무려 52% 까지나 초과되었기 때문에 핵연료봉 파손 발생이 어느 정도 예상되었으나, 그 자세한 원인 즉 피복관 기계적 설계를 포함하는 CANFLEX 핵연료 설계 변수가 고 출력 운전 조건에서 핵연료봉 파손에 미치는 영향은 PIE 를 통해 조만간 상세히 규명될 예정이다. 그러나, 설계 출력보다 약간 높은 출력으로 조사중인 나머지 3개 다발들 (AJK, AJM, AJN) 에서 최대 155 MWh/kgU 까지 조사가 진행되어도 핵연료봉 결함이 아직까지 발생되지 않았다는 결과를 참조할 때, 현재의 CANFLEX 피복관 설계를 그대로 확정하여도 무난할 것으로 예상된다. 즉, 1996년 1월부터 KAERI에서 제조한 CANFLEX Mk.4 다발을 NRU에서 조사 시험할 예정인데, 이때 핵연료봉 선출력을 60 kW/m 이하로 유지할 경우 핵연료봉의 파손 없이 목표 연소도까지의 조사가 무난히 달성될 것으로 예상된다.

4. 결론

CANFLEX 핵연료 피복관의 설계 요건을 검토하고, 설계제원 해석을 통해 그 설계 타당성을 검토하였다. 검토 결과, CANFLEX 핵연료 피복관은 기술시방서상의 재료특성 요건과 설계상의 기계적 성능 요건을 매우 잘 만족하는 것으로 나타났는데, 특히 연료봉의 설계 최고 선출력을 25% 이상 초과하는 출력 조건(~60 kW/m)에서도 핵연료봉 파손 없이 목표 연소도까지 조사될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] A.D. Lane and H.C. Suk, et al., "Recent Achievement in the Joint AECL/KAERI Program to Develop the CANFLEX Fuel Bundle", Presented at the KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, 1995 April.
- [2] "Technical Specification, Zirconium Alloy Seamless Tube for Reactor Fuel Sheathing", AECL document TS-XX-37354-1, 1981 September.
- [3] 석호천 외, "CANFLEX 핵연료 개발", KAERI/RR-1028/91, 1991.12.
- [4] "The Studsvik Power-Ramp Project, Final Report", Prepared by Studsvik Energiteknik AB, 1984 December.
- [5] G.H. Bryan, "Application of the Energy Test to the Collapse of a Long Thin Pipe under External Pressure", Cambridge Phil. Soc. Proc., Vol. 6, 1888.
- [6] L.C. Mizuno and W.R. Clendening, "Recommended Design Calculation for Prediction of Longitudinal Ridging of CANDU Fuel Cladding", CWAPD-320, 1978 March.
- [7] Unpublished data, To be issued.
- [8] M. Tayal, "FEAST: A Two-Dimensional Non-Linear Finite Element Code for Calculating Stresses", AECL-8763, 1986 June.

Table 1 Assessment of Mechanical properties of CANFLEX Fuel Sheathing

Type of Test	Characteristics	Required Value	CANDU Sheath	CANFLEX Sheath	
				Ø13.5 mm	Ø11.5 mm
Tensile test in longitudinal direction	UTS (MPa)	480 min.	560	634	625
	0.2% YS (MPa)	410 min.	460	488	504
	Elongation (%)	20 min.	37	30	26
Closed-end burst test	UHS (MPa)	620 min.	820 ~ 840	820	864
	TCE (%)	10 min.	23	20	16
Corrosion resistance	Wt. gain (mg/dm ²)	22 max.	14.1	13.8	13.3
Hydride orientation	F _N	0.3 max.	0.11	0.15	0.13
Grain size	Grain size (µm)	15 ave. 35 max.		3.3~3.6 ave.	3.9~4.3 ave.

Table 2 CANFLEX Irradiations in NRU ('95.7)

Bundle	Outer Element Rating (kW/m)	Burnup (MWh/kgU)	Remarks
AJJ	67 ~ 57	290	Defected/Removed
AJK	54 ~ 47	155	Being irradiated
AJL	73 ~ 71	80	Defected/Removed
AJM	52 ~ 34	50	Being irradiated
AJN	54 ~ 51	75	Being irradiated

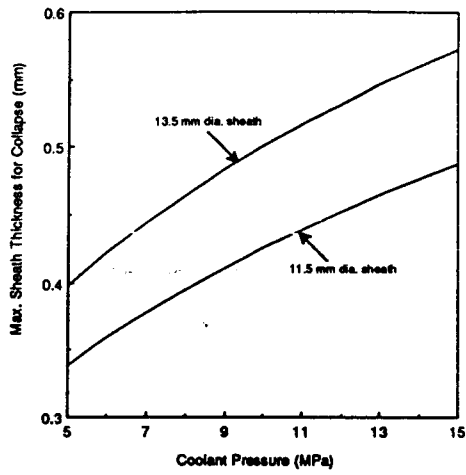


Fig.1 The Maximum Thickness of CANFLEX Fuel Sheaths for Collapse in Terms of Coolant Pressure

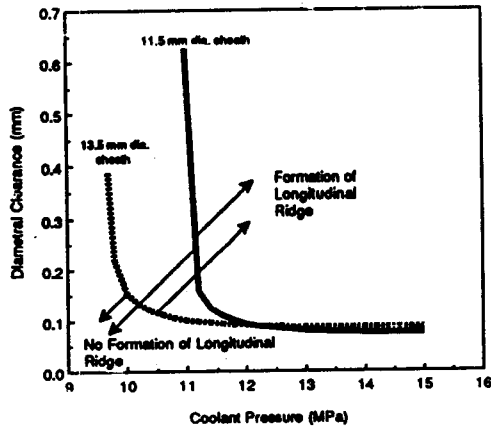


Fig. 2 Calculated Criteria of the Longitudinal Ridge formation on the CANFLEX Sheaths in Terms of Diametral Clearance and Coolant Pressure

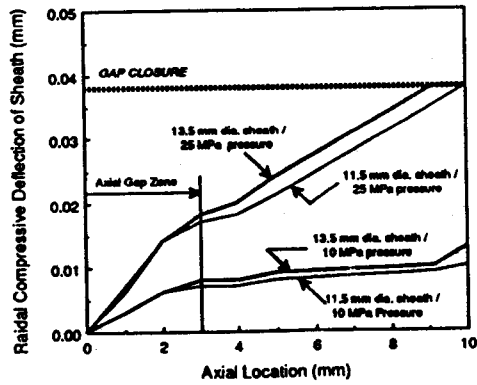


Fig. 3 Assessment of Sheath Collapse into the Concentrated Axial Gap of the CANFLEX Fuel Elements