2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로용 개량핵연료 CANFLEX-NU의 월성 1호기 시범장전 조사 현황

Status of the Demonstration Irradiation of the CANDU New Fuel Bundle CANFLEX-NU in Wolsong Generation Station #1

석호천[1], 전지수[1], 정종엽[1], 조문성[1],
이창섭[2], 김용배[2], 김용덕[2], 이성덕[3], 서형범[3]

[1] 한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150
[2] 한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지동 103-16
[3] 한국수력원자력㈜, 월성원자력본부 제1발전소, 경북 경주시 양남면 나아리

요약

2002년 7월부터 한국원자력연구소(KAERI), 한전전력연구원(KEPRI) 그리고 한국수력원자력㈜가 공동으로 월성 1호기에 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX-NU를 시범장전 조사 중에 있다. 시범장전 채널로는 고출력 채널인 Q07과 저출력 채널인 L21을 선정하였고, 2003년 8월 현재 두 채널에 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발이 장전되었고 그 중 16개의 다발이 방출되었으며 나머지 8개 다발은 2004년 2월 경에 방출될 예정이다. 시범장전 조사 중 수집된 노내 열수력 운전자료들의 분석에 의하면 원자로가 안정적으로 작동하고 있음을 알 수 있었고, ELESTRES 코드를 이용한 핵연료다발의 기계적 성질 평가로부터 CANFLEX-NU 핵연료다발이 핵연료의 기계적 설계기준을 만족하고 있음을 확인 할 수 있었다. 한편 원자로로부터 방출되어 수조에 보관중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 육안검사 결과 특별한 이상은 발견되지 않았으며, 자세한 수조 내 검사와 측정(in-bay visual examinations and dimensional measurement)은 2003년 말경에 수행될 예정이다.

ABSTRACT

A demonstration irradiation (DI) of 24 KNFC made CANFLEX-NU fuel bundles in the Wolsong Power Generation Station–1 has been conducted jointly by KEPRI/KHNP/KAERI

since July 10, 2002. By selecting the Q07 (high power) and L21(low power) channels, the total 24 and 16 CANFLEX bundles were respectively loaded into and discharged from the reactor by 2003 August, and the final discharge of the other 8 CANFLEX bundles is expected on around February 2004. Tracking the reactor operation data, it is noted that the reactor has been stably operated during the DI. An unusual performance and integrity of the CANFLEX elements could not be found in the ELESTRES predictions. By looking at the discharged CANFLEX bundles in the bay, all the bundles were intact, free of defects and appeared to be in good condition. A detailed in-bay visual examinations and dimensional measurements of the discharged CANFLEX bundles will be made at the end of 2003.

1. 서론

한국원자력연구소 (KAERI)와 캐나다원자력공사 (AECL)는 1991년부터 공동으로 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX 핵연료다발을 개발하여 왔다. CANFLEX 핵연료다발은 KAERI와 AECL의 다양한 열수력 및 노내 시험을 통해 성능이 입증되었으며, 1998년 9월부터 2000년 8월까지 천연 우라늄을 장입한 24개 CANFLEX-NU 핵연료다발의 시범장전이 캐나다 Pt. Lepreau 발전소 (PLGS)에서 성공적으로 수행되었다[1]. 한편, 이 기간 동안 CANFLEX-NU 핵연료다발의 월성1호기 시범장전계획도 진행되었다[2].

Figure 1에 보인 바와 같이 CANFLEX 핵연료다발은 기존 37개봉 핵연료다발과 동일한 양의 우라늄 양을 갖지만, CANFLEX 핵연료다발은 기존 37개 핵연료봉 다발과는 달리 43개의 핵연료봉으로 이루어진다. 이때, CANFLEX 핵연료다발의 외환 및 중환봉의 외경은 11.5 mm 그리고 내환 및 중심봉의 외경은 13.5 mm이며, 이러한 각 봉의 직경 차이로 인해 좀 더 평탄한 반경방향 출력 분포를 얻을 수 있으며, 기존 37개 핵연료봉 다발과 직경 및 배열은 다르지만 CANDU 6 중수원전의 핵연료장전계통과 양립하는 특성을 갖는다. 이러한 CANFLEX-NU 핵연료다발은 기존 37개봉 핵연료다발과 비교하여 다음과 같은 두 가지 개선된 설계 특성을 가진다. 첫째, “button"이라 불리는 CHF (Critical Heat Flux) 향상물이 각 핵연료봉의 최적위치에 부착되어 있어, 임계채널출력 (Critical Channel Power, CCP)을 약 5% 이상 증가시킴으로써 운전여유도를 향상시킨다. 이러한 사실은 캐나다 Stern Laboratories에서 수행된 full scale water CHF 시험을 통해 입증되었다[3-5]. 둘째, CANFLEX 핵연료다발은 외환봉과 내환봉의 크기가 다른기 때문에 보다 평탄한 반경방향 출력분포를 얻을 수 있으며, 이로 인해 연료봉 선출력 첨두치가 약 20% 정도 감소되며 이러한 낮은 연료봉 선출력 첨두치는 CANDU 원자로의 안전여유도를 향상시키는 역할을 한다[6-8].

월성 1호기에의 CANFLEX-NU 핵연료다발 시범장전은 2000년 11월부터 한전전력연구원

(KEPRI)과 한국수력원자력㈜, 그리고 한국원자력연구소(KAERI)에 의해 공동으로 진행되었는데, 이는 국내의 인허가 조건 하에서 CANFLEX 핵연료다발의 성능을 확인하고, 핵연료 제조 능력을 검증하며 월성 1호기에의 전량장전에 대한 근거를 제시하기 위함이다.

본 연구에서는 24개 CANFLEX-NU 핵연료다발의 월성 1호기 시범장전에 대한 인허가와 시범장전 채널 선정, 핵연료다발 제조와 품질보증, 시범장전 노내 자료의 열수력 분석 결과 등을 기술하였고, CANFLEX-NU 핵연료봉의 출력-연소도 이력을 도출한 후 이를 이용한 핵연료봉의 기계적 성능평가를 수행하여 CANFLEX-NU 핵연료다발의 성능과 건전성을 확인하였다.

2. CANFLEX-NU의 월성 1호기 시범장전 현황

2.1 시범장전 인허가 승인 및 시범장전 채널 선정

KAERI는 CANFLEX-NU (Mk-Ⅳ) 핵연료다발 설계와 24개 다발의 시범장전에 대한 국내 인허가 과정으로 핵연료 설계 (Fuel Design, FD)와 제조방법 (Fabrication Method, FM)을 기술한 CANFLEX-NU 핵연료다발 설계보고서를 1996년 7월에 작성하였고, 시범장전에 대한 평가보고서를 2001년 6월에 완료한 바 있다. 이들 보고서들은 한국원자력안전기술원 (KINS)에 의해 검증되어졌고, 과학기술부 (MOST)에 의해 1999년 8월과 2002년 6월에 각각 핵연료설계와 시범장전 안전성 평가에 대한 인허가 승인이 발표되었다.

시범장전 채널은 PLGS에서 수행된 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 시범장전 결과에 따라 선정되도록 하였다.

2.2 CANFLEX Bundle 제조 및 품질보증

총 26개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (24개는 시범장전용, 2개는 기록보관용)이 한국원전연료㈜ (KNFC)에 의해 2002년 5월까지 월성 1호기에 공급되었다. 또한 KNFC는 제조시방서와 제품 세부 도면 등의 생산 이력 문서도 아울러 제공하였다. CANFLEX 핵연료다발 설계 사양은 KAERI/AECL이 공동으로 개발한 기본 제작도면과 제품 시방서에 명시되어 있다. 이러한 CANFLEX 핵연료다발은 KAERI 소유 장비를 이용하여 KNFC 기술자들에 의해 제조되었고, 월성 발전소에 공급되는 37개봉 핵연료다발에 정상적으로 적용되는 품질보증기준 CSA Z299.2를 따르도록 하였다.

2.3 월성 1호기 고출력 및 저출력 채널에 대한 CANFLEX-NU (Mk-IV) 다발의 장전 이력

앞서 언급한 채널 선정 기준과 함께, 월성 1호기의 두개 채널에 대한 24개 CANFLEX-NU 핵연료다발의 장전은 위험부담을 줄이고 원자로 가동을 최대한 보장할 수 있는 방향으로 진행되었다. 장전 채널 중 하나는 고출력 채널로써 액체영역 제어장치 (liquid zone controller)의 중간 수위근처에 위치하고 CANFLEX-NU 핵연료다발을 이용하여 두 번의 정기적인 8-다발 핵연료 교체방법으로 장전이 이루어지며, 다른 한 채널은 저출력 채널로써 8-다발 핵연료 교체방법으로 CANFLEX-NU 핵연료다발을 한 번 장전한다.

CANFLEX-NU 핵연료다발의 장전은 Figure 2와 3에 나타낸 바와 같이 수행되며, 총 시범장전 기간은 약 18개월 정도로 예상되고, 2003년 1월 31일부터 3월 16일까지의 기간 동안은 정기적인 원자로 예방 정비 보수 작업이 진행된다.

Figure 2에 나타낸 바와 같이 2002년 7월 10일 오전에 8개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0114, KF0115, KF0102, KF0103, KF0101, KF0104, KF0105, KF0125)이 저출력 채널인 L21 채널의 5번 – 12번 위치에 장전되었다. 이 후 2003년 4월 1일에 8개의 37개봉 핵연료다발이 장전됨에 따라 5번 – 8번 위치에 있던 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0114, KF0115, KF0102, KF0103)은 방출되었고, 9번 – 12번 위치에 있던 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0101, KF0104, KF0105, KF0125)은 1번 – 4번 위치로 이동해 계속 조사 중에 있으며 2004년 2월 경에 완전 방출될 예정이다.

Figure 3에 나타낸 바와 같이 2002년 7월 10일 오후에 8개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0124 ~ KF0117)이 고출력 채널인 Q07 채널의 1번 – 8번 위치에 장전되었다. 2003년 1월 6일에 다른 8개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0106 ~ KF0113)이 장전됨에 따라 5번 – 8번 위치에 있던 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0120 ~ KF0117)은 방출되었고, 1번 – 4번 위치에 있던 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발(KF0124 ~ KF0121)은 9번 – 12번 위치로 이동하였다. 이 후 2003년 8월 11일, 8개의 37개봉 핵연료다발이 장전됨에 따라 5번 – 12번 위치에 있던 8개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0110~KF0113, KF0124~KF0121)은 방출되었고, 1번 – 4번 위치에 있던 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (KF0106 ~ KF0109)은 9번 – 12번 위치로 이동해 계속 조사 중에 있으며 2004년 2월 경에 완전 방출될 예정이다.

2.4 CANFLEX 핵연료다발 장전 채널의 열수력 거동

시범 장전 조사하는 동안 원자로 노심 상태를 추적하기 위해서 원자로 운전 자료로서 입구 및 출구 모관과 CANFLEX 핵연료 장전 채널의 온도, 압력 및 기타 열수력 운전 자료 등을 월성 1 호기로부터 입수하였다. 이들 자료는 매일 1회 측정되었으며 Q07 및 L21 채널에 CANFLEX 혹은 37개봉 핵연료다발이 장전되는 동안에는 매분 마다 자료를 측정하였다. 2002

년 7월 11일부터 2003년 4월 21일까지 시범 장전 조사 동안은 100% 전출력으로 원자로가 가동되었으며 매일 측정된 운전 자료의 평균치는 다음과 같다.

Q07 및 L21 채널 출구 온도는 각각 308.183 ± 0.237 °C 와 306.510 ± 0.850 °C로 나타났고 여기서 측정된 값은 실제 채널 출구 온도보다 약 2 °C 정도 낮은 것으로 나타났는데 이는 자료가 출구 자관 (outlet feeder)에서 측정되었기 때문이다. L21 채널에 연결된 모관 (headers)으로써, RIH4의 압력 및 온도는 110.944 ± 1.296 bar 와 263.004 ± 0.558 °C로 나타났고 ROH1의 압력 및 온도는 98.307 ± 0.513 bar 와 309.211 ± 0.523 °C로 각각 측정되었다. Q07 채널에 연결된 모관으로써, RIH6의 압력 및 온도는 111.202 ± 1.064 bar 와 263.375 ± 0.688 °C로 나타났고 ROH7의 압력 및 온도는 98.215 ± 0.308 bar 와 308.937 ± 0.547 °C로 각각 측정되었다. 이러한 매일 측정된 자료 결과는 시범 장전 조사 동안에도 원자로는 정상 운전 상태로서 매우 안정적으로 가동되고 있음을 보여주고 있다.

Figure 4와 5는 Q07 및 L21 채널에 핵연료를 장전하는 전후 동안에 각각 채널의 출구 온도 변화를 보여주고 있으며 자료는 매분 마다 측정되었다. 그림에서 보는 바와 같이, 핵연료를 교체하는 동안 채널 출구 온도는 약 45 °C ~ 48 °C 폭으로 급격히 감소하는데, 이는 핵연료를 교체하는 동안 핵연료 장전기에서 93 °C 온도와 1.9 kg/s 유량을 갖는 중수가 채널에 주입되기 때문이다. Figure 4에서 보는 바와 같이 핵연료 교체 후 L21 채널의 출구 온도는 핵연료 교체 전보다 약 3 °C 정도 증가하였는데 이는 새로운 핵연료 장전에 따른 채널 출력 증가 때문이다. 저출력 L21 채널이 고출력 Q07 채널보다 핵연료 교체 동안 출구 온도 차이가 훨씬 민감하게 나타났다. 그러나 Figure 5에서 보는 바와 같이 핵연료 교체 전후 Q07 채널 출구 온도는 거의 차이가 나타나지 않았는데, 이는 고출력 채널의 핵연료 교체 전 출구 온도가 이미 포화 상태이기 때문이다. 고출력 Q07 채널의 평균 출구 온도는 저출력 L21 채널보다 약 2 ~ 3 °C 높았다.

3. CANFLEX-NU의 출력-연소도 이력 도출 및 기계적 성능 평가

3.1 CANFLEX-NU 핵연료 다발 각 봉의 출력-연소도 이력 도출

Figure 6 (a) ~ (d)에 나타낸 바와 같이 Q07 고출력채널과 L21 저출력채널에서 조사되는 CANFLEX 핵연료다발 각 봉의 출력-연소도 이력이 도출되었고, 이를 이용하여 핵연료다발의 건전성과 성능을 평가하였다. 이때 중수로 해석을 위해 RFSP[10]를 이용하였고 POWDERPUFS-V[11]와 WIMS-AECL[12] 코드를 이용하여 격자 계산을 수행하였다

Figure 6 (a)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지 Q07 고출력채널의 6번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0119 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외환봉은 전형적인 고출력-고연소도의 이력을 보이고 있다. 장전 직후의 선출력은

41 kW/m이고, 68 MWh/kgU의 연소도에서 최대 42 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 210 MWh/kgU의 방출연소도에서 35 kW/m의 선출력까지 감소함을 알 수 있다.

Figure 6 (b)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지는 Q07 고출력채널의 4번 위치에서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기 까지는 12번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0121 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 이 핵연료다발은 다발 재장전으로 인해 출력이 급감하게 되는데, 외환봉의 경우 처음 장전 직후 약 35 kW/m의 선출력을 보이다 180 MWh/kgU 연소도에서 30 kW/m의 선출력까지 감소하고 이 후 채널 내의 12번째 위치로 이동한 후 213 MWh/kgU의 연소도까지 약 7 kW/m의 거의 일정한 선출력이 유지됨을 알 수 있다.

Figure 6 (c)는 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지는 Q07 고출력채널의 1번 위치에서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기 까지는 9번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0124 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 이 핵연료다발은 다발 재장전으로 인해 출력이 급증하게 되는데, 외환봉의 경우 처음 장전 직후부터 약 48 MWh/kgU의 연소도까지 약 7 kW/m의 선출력을 유지하다 채널 내의 9번째 위치로 이동한 후 약 35 kW/m의 선출력까지 급증하고 하고 이 후 약 188 MWh/kgU의 연소도까지 약 30 kW/m의 선출력까지 감소됨을 알 수 있다.

Figure 6 (d)는 2002년 7월 10일부터 2003년 4월 1일까지 L21 저출력채널의 6번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0115 각 봉의 출력-연소도 이력이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외환봉의 장전 직후 선출력은 약 32 kW/m이고, 약 131 MWh/kgU의 연소도에서 최대 38 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 약 131 MWh/kgU의 연소도에서 약 27 kW/m의 선출력까지 감소한다. 그러나 이후 약 170 MWh/kgU의 연소도까지 약 29 kW/m의 선출력까지 증가하고 이후 199 MWh/kgU의 방출연소도에서 약 26 kW/m의 선출력까지 감소함을 알 수 있다.

위에서 언급한 다발들뿐 아니라 장전된 다른 모든 CANFLEX-NU 핵연료다발들에 대해서도 시범장전 기간동안 특이한 출력 이력을 보인 다발은 없었으며 따라서 모든 다발들이 봉 내부 기체 압력으로 인해 야기되는 변형률 속도가 10^{-9}/sec 보다 크지 않아야 한다는 설계기준과 또한 봉 내부 기체 압력이 냉각재 압력보다 클 경우 소성 변형량이 0.3 % 보다 크지 않아야 한다는 설계 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

3.2 핵연료봉의 성능 평가

ELESTRES 코드[13]는 중수로용 핵연료봉의 설계 및 정상상태 성능해석 계산에 사용되는 전산코드로써, 이미 여러 종류의 소결체 및 피복관으로부터 구해진 수십 종의 실험자료를 이용

하여 그 성능이 검증되었으며, 실험치에 대한 예측치의 결과가 매우 정밀한 것으로 입증된 바 있다. ELESTRES 코드는 핵연료봉의 기하학적 구조 및 경계조건과 핵연료봉 선출력을 고려하여 핵연료봉 내 온도분포를 계산하고, 이 온도 계산결과를 이용하여 소결체 및 피복관의 열팽창, 소결체 고밀화 및 팽윤, 그리고 핵분열 기체 방출 등을 계산한다. 이후 핵연료봉 내에서 핵분열 기체를 수용할 수 있는 빈 공간의 부피를 계산하고, 이로부터 핵연료봉 내압을 계산한다. 그리고 피복관 외표면에 작용하는 냉각수 압력과 피복관 내표면에 작용하는 힘들로부터 피복관의 변형도를 계산하게 된다.

Figure 7 (a) – (d)에는 시범장전 중인 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉의 출력-연소도 이력과 ELESTRES 코드를 이용하여 구한 봉의 내부 기체 압력(MPa), 소결체 중심온도(°C), 피복재 내면 온도(°C) 그리고 피복재의 원주방향 총 변형량(%) 등에 대한 결과가 나타나있다.

Figure 7 (a)는 월성 1호기의 Q07 고출력채널과 L21 저출력채널에서 조사된 CANFLEX 핵연료다발 (KF0119, KF0121, KF0124, KF0115, KF0111)의 외환봉 내부 기체압력 결과를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 출력 급증을 보이는 KF0124 다발 외환봉에서 약 0.78 MPa의 최대 내부 기체 압력이 계산되며 이는 설계기준인 냉각재 압력에 비해 상당히 낮은 결과임을 알 수 있다.

Figure 7 (b) ~ (d)는 앞서 언급한 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에 대해 ELESTRES 코드를 이용해 구한 소결체 중심 온도, 피복재 내면 온도, 그리고 끝단에서의 원주방향 변형률 결과를 보여주고 있다. 그림들에서 알 수 있듯이 각 경우의 최대값은 전형적인 고출력-고연소도 출력이력을 나타내는 Q07 고출력채널의 KF0119 다발의 외환봉에서 계산되었다.

Figure 7 (b)에 나타낸 바와 같이, 소결체 중심온도의 최대값은 약 1250 °C로 이는 설계기준값인 UO_2 용융온도 2840 °C 보다 낮은 값이다. Figure 7 (c)에 나타낸 바와 같이, 피복재 내면의 최대온도는 339 °C로 이는 설계 기준값인 피복관 산화가속 기준온도 397 ^{0}C 보다 작음을 알 수 있다. 중수로용 핵연료의 경우 피복관 내면에 Canlub 피막처리를 하므로 피복관 내면에서는 산화 층의 형성이 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서 피복관 산화는 냉각재와 접촉하는 피복관 외면에서 발생된다. 그러나 보수적 평가를 위해 피복관 내면에서의 온도를 기준으로 피복관의 산화 개시 여부를 평가하도록 하였다. 이 때 피복관 산화는 피복관 온도에 큰 영향을 받기 때문에 피복관 온도가 산화를 가속시키는 온도보다 높아지지 않도록 해야 한다. Figure 7 (d)에 나타낸 바와 같이, 최대 원주방향 변형률은 약 0.75 %이며, 이로 인해 야기될 수 있는 결함확률(defect probability)은 0 이다.

시범장전 조사후 방출되어 수조에 보관되어 있는 CANFLEX 다발들의 육안검사 결과 모든 방출 다발들이 건전한 상태임을 확인할 수 있었고, 좀 더 자세한 수조 내 검사 및 제원 측정은 2003년 말 경에 수행될 예정이다.

.

4. 요약 및 결론

월성 1호기에의 CANFLEX-NU 핵연료다발 시범장전은 2000년 11월부터 한전전력연구원(KEPRI)과 한국수력원자력㈜, 그리고 한국원자력연구소(KAERI)에 의해 공동으로 진행되었는데, 이는 국내의 인허가 조건 하에서 CANFLEX 핵연료다발의 성능을 확인하고, 핵연료 제조 능력을 검증하며 월성 1호기에의 전량장전에 대한 근거를 제시하기 위함이다. 핵연료설계와 제조, 그리고 시범장전에 대한 인허가는 각각 1999년 8월과 2002년 6월에 과학기술부로부터 승인받았다. 총 26개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 (24개는 시범장전용, 2개는 기록보관용)이 한국원전연료㈜ (KNFC)에 의해 월성 1호기에 공급되었으며, 이 연료들의 제조 시, 월성 발전소에 공급되는 37개봉 핵연료다발에 정상적으로 적용되는 품질보증기준 CSA Z299.2를 따르도록 하였다.

캐나다 PLGS에서 수행된 24개의 CANFLEX-NU 다발의 시범장전 시에 이용된 채널 선정 기준에 근거하여 월성 1호기의 L21 저출력채널과 Q07 고출력채널에 각각 8개씩의 CANFLEX-NU 핵연료다발이 2002년 7월 10일에 처음으로 장전되었다. 현재까지 L21 채널에는 총 8개의 CANFLEX-NU 다발이 장전되었고 4개 다발이 방출되었으며, Q07 채널에는 16개 다발이 장전되었고 이중 12개 다발이 방출되었다. 현재 각 채널에서 조사되고 있는 CANFLEX-NU 다발들은 2004년 2월 경 방출될 예정이며, 따라서 총 시범장전 기간은 약 18개월 정도로 예상된다.

시범 장전 조사하는 동안 원자로 노심 상태를 추적하기 위해서 원자로 운전 자료로서 입구 및 출구 모관과 CANFLEX 핵연료 장전 채널의 온도, 압력 및 기타 열수력 운전 자료 등을 월성 1 호기로부터 입수하였다. 수집한 자료를 이용하여 열수력 거동을 분석한 결과, 시범 장전 조사 동안에도 원자로는 정상 운전 상태로서 매우 안정적으로 가동되고 있음을 학인 할 수 있었다.

시범장전 조사 중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 출력 이력을 도출하기 위해 RFSP, POWDERPUFS-V, 그리고 WIMS-AECL 등의 코드를 이용하였다. Q07 고출력채널의 6번 위치에서 조사 된 KF0119 외환봉은 전형적인 고출력-고연소도의 이력을 보여 주었다. 장전 직후의 선출력은 41 kW/m이고, 68 MWh/kgU의 연소도에서 최대 42 kW/m까지 선출력이 증가하고 이후 210 MWh/kgU의 방출연소도에서 35 kW/m의 선출력까지 감소하였다. 한편 2002년 7월 10일부터 2003년 1월 6일까지는 Q07 고출력채널의 1번 위치에서, 이후 2003년 8월 11일에 방출되기까지는 9번 위치에서 조사된 CANFLEX-NU 핵연료다발 KF0124 다발 재장전으로 인해 출력이 급증하였는데, 외환봉의 경우 처음 장전 직후부터 약 48 MWh/kgU의 연소도까지 약 7 kW/m의 선출력을 유지하다 채널 내의 9번째 위치로 이동한 후 약 35 kW/m의 선출력까지 급증하고 이 후 약 188 MWh/kgU의 연소도까지 약 30 kW/m의 선출력까지 감소되었다. 시범 장전된 모든 CANFLEX-NU 핵연료다발들에대해 조사 기간동안 특이한 출력 이력을 보인

다발은 없었으며 따라서 모든 다발들이 봉 내부 기체 압력으로 인해 야기되는 변형률 속도가 10^{-9}/sec 보다 크지 않아야 한다는 설계기준과 또한 봉 내부 기체 압력이 냉각재 압력보다 클 경우 소성 변형량이 0.3 % 보다 크지 않아야 한다는 설계 기준을 만족하고 있음을 확인하였다.

ELESTRES 코드를 이용하여 조사된 CANFLEX-NU 다발의 성능 평가를 수행한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다: a) 최대 내부 기체 압력은 출력 급증을 보이는 KF0124 다발 외환봉에서 약 0.78 MPa로 구해졌고, 이는 설계기준인 냉각재 압력에 비해 상당히 낮은 결과임을 알 수 있으며, b) 소결체 중심온도의 최대값과 피복재 내면의 최대온도는 각각 약 1250 °C와 339 °C로 KF0119 다발에서 구해졌으며 이는 각각의 설계기준인 UO_2 용융온도 2840 °C와 피복관 산화가속 기준온도인 397 ^{0}C 보다 작음을 확인하였으며, c) 최대 원주방향 변형률은 약 0.75 %로 이로 인해 야기될 수 있는 결함확률(defect probability)은 0임을 계산결과로부터 확인하였다. 시범장전 조사 후 방출되어 수조에 보관되어 있는 CANFLEX 다발들의 육안검사 결과 모든 방출 다발들이 건전한 상태임을 확인할 수 있었고, 좀 더 자세한 수조 내 검사 및 제원 측정은 2003년 말경에 수행될 예정이다

.

후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

REFERENCES

[1] W. Inch, and H.C. Suk, “Demonstration Irradiation of CANFLEX in Pt. Lepreau”, Proceedings of IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Cycle Options for LWRs and HWRs, Victoria, Canada, 1998.

[2] H.C. Suk, M.S. Cho, J.S. Jun, S.H. Lee, and Y.B. Kim, “Status of the Demonstration Irradiation Program of the New Fuel Bundle CANFLEX-NU in Korea”, Proceedings of the 7th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, pp 63-74, Kingston, Ontario, Canada, 2001 September 23-27.

[3] G.R. Dimmick, W.W. Inch, J.S. Jun, H.C. Suk, G.I. Hadaller, R.A. Fortman, and R.C. Hayes, “Full Scale Water CHF Testing of the CANFLEX Bundle”, Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 2, Niagara Falls, Ontario, Canada , 1999 September 26-30.

[4] L.K.H. Leung, D.C. Groeneveld, G.R. Dimmick, D.E. Bullock, and W.W. Inch, “Critical Heat Flux and Pressure Drop for a CANFLEX Bundle String Inside an Axially Non-Uniform Flow Channel”, Proceedings of the 6th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, Niagara Falls, Ontario, Canada , 1999 September 26-30.

[5] L.K.H. Leung, J.S. Jun, G.R. Dimmick, D.E. Bullock, W.W. Inch, and H.C. Suk, “Dryout Power of a

CANFLEX Bundle String with Raised Bearing", Proceedings of the 7th International Conference on CANDU Fuel, Vol. 1, pp 27-39, Kingston, Ontario, Canada, 2001 September 23-27.

[6] H. C. Suk, K-S. Sim, B. G. Kim, C. B. Choi, C. H. Chung, A. D. Lane, D. F. Sears, J. H. K. Lau, I. Oldaker, and P. G. Boczar, "CANFLEX as a CANDU Advanced Fuel Bundle", Proceedings of the 5th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety, pp.U1-1 to U1-16, Beijing, China, 1997 April.

[7] A. D. Lane, D. F. Sears, I. E. Oldaker, B. M. Townes, A. Celli, H. C. Suk, C. H. Chung and K-S. Sim, "Recent Achievement in the Joint AECL/KAERI Program to Develop the CANFLEX Fuel Bundle", Proceeding of the 10th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, 1995 April 6-7.

[8] A. D. Lane, G. R. Dimmick, J. H. K. Lau, H. C. Suk, C. H. Chung and C. B. Choi, "CANFLEX : A New CANDU Fuel Bundle with Expended Operating Capabilities", Proceeding of the 11th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, 1996 April 11-12.

[9] Wayne W. R. Inch, Paul D. Thompson, Patrick J. Reid and Ho Chun Suk, "Demonstration Irradiation of CANFLEX in CANDU 6 Power Reactor", Proceedings of 14th KAIF/KNS Annual Conference, Seoul, Korea, 2000 April 18-20.

[10] D.A. Jenkins and B. Rouben, "Reactor Fuelling Simulation Program- RFSP: Manual for Microcomputer Version", TTR-321 /COG-93-104, Rev. 1, (1993).

[11] E.S.Y. Tin and P.C. Loken. "POWDERPUFS-V Physics Manual", AECL Report TDAI-31, Part 1 of 3, 1979 July.

[12] J.V. Donnelly, "WIMS-CRNL, A User's Manual for Chalk River Version of WIMS", AECL-8955, (1986).

[13] M. Tayal, "Modelling CANDU Fuel under Normal Operating Conditions: ELESTRES Code Description," AECL-9331, 1987, "Users' Manual for the M11C Version of the ELESTRES Code" TTR-234A, February 1989.

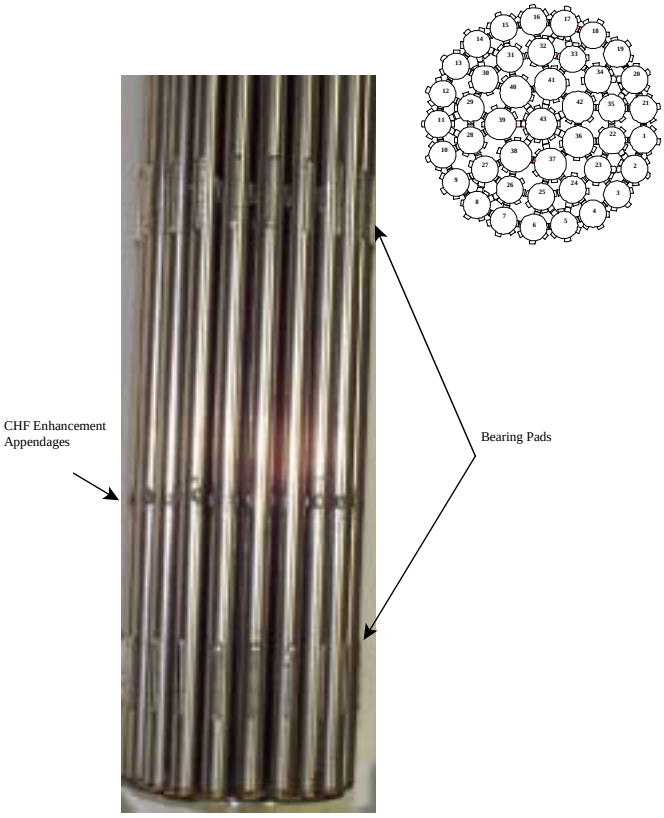


Figure 1. CANFLEX 43-Element Bundle

(a) 1st Fuelling (2002 July 10) : (C → A Refuelling)) & Bundle's Serial Numbers

A-Side			Bundle Position in L21 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
37ELEM	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	KF0114	KF0115	KF0102	KF0103	KF0101	KF0104	KF0105	KF0125

(b) 2nd Fuelling (2003 April 1) : (C → A Refuelling)) & Bundle's Serial Numbers

A-Side			Bundle Position in L21 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KF0101	KF0104	KF0105	KF0125	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*

- 4 CANFLEX-NU fuel bundles are discharged: KF0114, KF0115, KF0102, KF0103

(c) 3rd Fuelling(Expected on 2004 January):(C→A Refuelling) & Bundle's Serial Numbers

A-Side			Bundle Position in L21 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
37ELEM	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*

Figure 2. Fuelling History of CANFLEX-NU (Mk-IV) Fuel Bundles in the Low Power Channel L21 in WPGS-1

(a) 1st Fuelling (2002 July 10) : (A → C Refuelling) & Bundle's Serial Numbers

A-Side			Bundle Position in Q07 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KF0124	KF0123	KF0122	KF0121	KF0120	KF0119	KF0118	KF0117	37ELEM	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*

(b) 2nd Fuelling (2003 January 06) : (A → C Refuelling) & Bundle's Serial Numbers

A-Side			Bundle Position in Q07 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KF0106	KF0107	KF0108	KF0109	KF0110	KF0111	KF0112	KF0113	KF0124	KF0123	KF0122	KF0121

- 4 CANFLEX-NU fuel bundles are discharged: KF0120, KF0119, KF0118, KF0117

(c) 3rd Fuelling (2003 August 11) : (A → C Refuelling) & Bundle's Serial Numbers

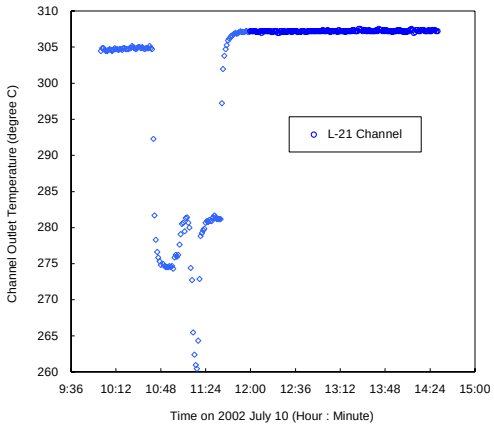
A-Side			Bundle Position in Q07 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
37ELEM	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	KF0106	KF0107	KF0108	KF0109

- 8 CANFLEX-NU fuel bundles are discharged: KF0110 to KF0113, KF0124 to KF0122, KF0121

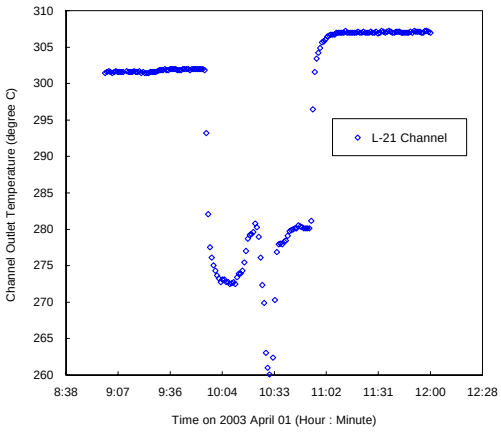
(d) 4th Fuelling(Expected on 2004 February) :(A→C Refuelling) & Bundle's Serial umbers

A-Side			Bundle Position in Q07 Channel							C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
37ELEM	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*	*37ELEM*

Figure 3. Fuelling History of CANFLEX-NU (Mk-IV) Fuel Bundles in the High Power Channel Q07 in WGS-#1

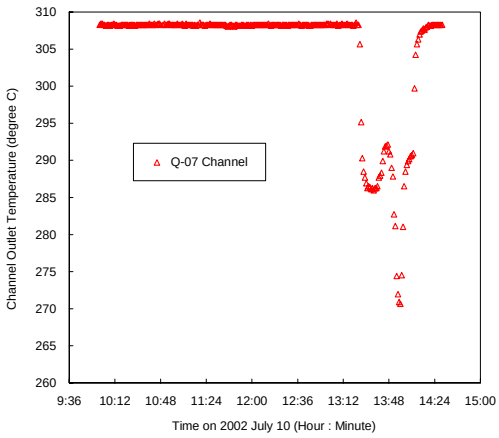


(a) L21 Channel Data on 2002 July 10
(Fuelling of the 8 CANFLEX bundles)

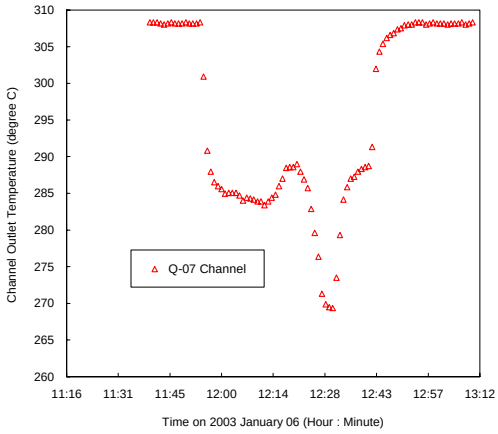


(b) L21 Channel Data on 2003 April 01
(Fuelling of the 8 37-element bundles)

Figure 4. L21 Channel Outlet Coolant Temperature Data during the Fuellingson 2002 July 10 and 2003 April 01

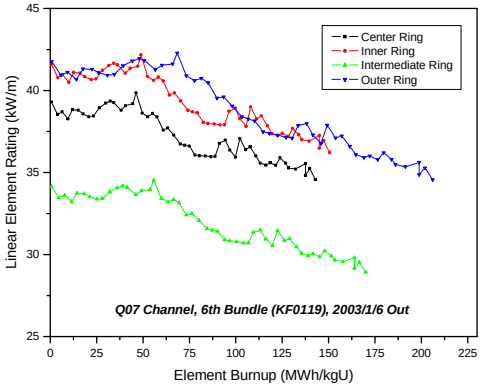


(a) Q07 Channel Data on 2002 July 10
(Fuelling of the 8 CANFLEX bundles)

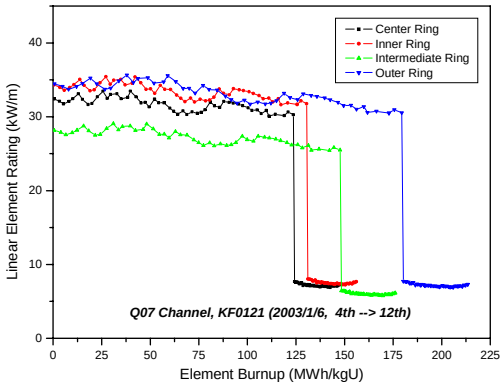


(b) Q07 Channel Data on 2003 January 06
(Fuelling of the 8 CANFLEX bundles)

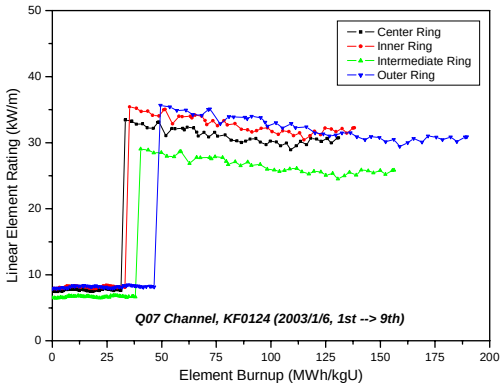
Figure 5. Q07 Channel Outlet Coolant Temperature Data during the Fuellings on 2002 July 10 and 2003 January 06



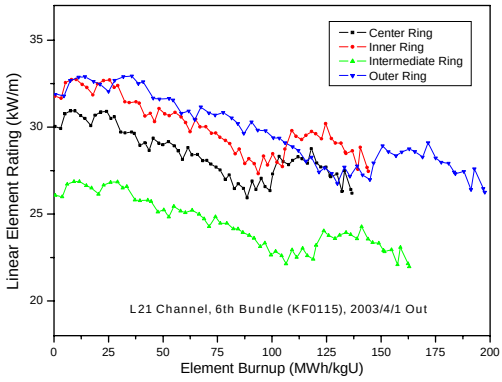
(a) KF0119 element power histories



(b) KF0121 element power histories



(c) KF0124 element power histories



(d) KF0115 element power histories

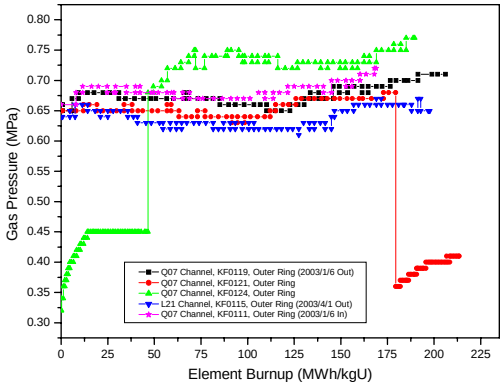
Figure 6. Element Power Histories of KF0119, KF0121, KF0124, and KF0115 CANFLEX Bundle Irradiated in WPGS-1(see Notes 1 to 4)

Note 1. KF0119 CANFLEX Bundle Irradiated in the 6th Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6.

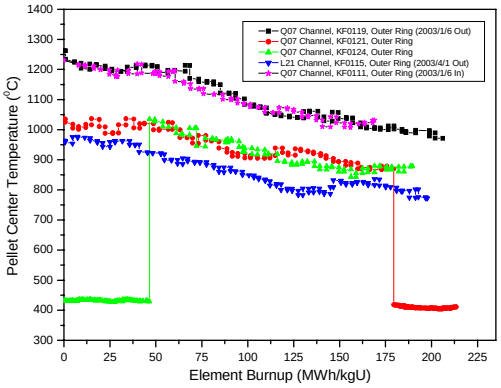
Note 2. KF0121 CANFLEX Bundle Irradiated in the 4th Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6 and then Being Irradiated in the 12th Channel Position from 2003 January 6.

Note 3. KF0124 CANFLEX Bundle Irradiated in the 1st Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 January 6 and then Being Irradiated in the 9th Channel Position from 2003 January 6.

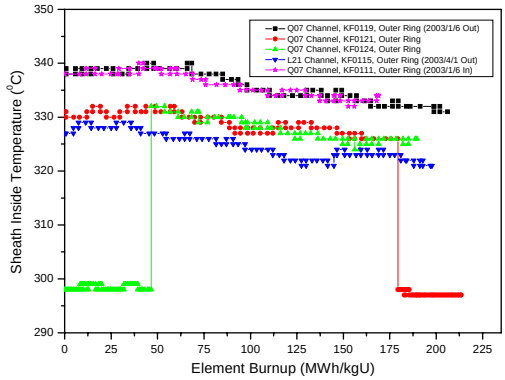
Note 4. KF0115 CANFLEX Bundle Irradiated in the 6th Bundle Position from 2002 July 10 to 2003 April 1



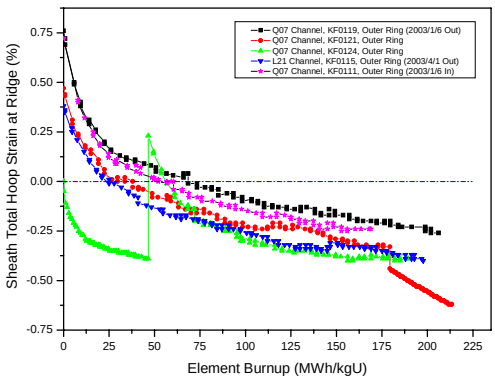
(a) Element Internal Gas Pressures



(b) Pellet Center Temperatures



(c) Sheath Insides Surface Temperatures



(d) Sheath Total Hoop Strains at the Ridges

Figure 7. ELESTRES Predictions of the Internal Gas pressures, Pellet Center Temperatures, Sheath Insides Surface Temperatures, and Sheath Total Hoop Strains at the Ridges of the CANFLEX Outer Elements Irradiated in WPGS-1