

2003 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 월성 1호기 시범장전 조사 CANFLEX-NU 핵연료의 열 및 기계적 성능평가

### Evaluation of Thermal and Mechanical Performance of CANFLEX-NU Fuel Irradiated in Wolsong Generation Station #1

정종업, 전지수, 석호천

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

국내 최초의 중수로인 월성 1호기는 1983년 준공이래 약 20년 간 운전 중에 있으므로, 향후 원자로가 노후화 (aging)되어 발생할 문제에 대비하여야 한다. 특히 압력관에 크립이 발생되고, 증기발생기 세관에 이물질이 누적되면 원자로의 운전여유도가 감소되어 원자로의 운전 및 안전에 지장을 초래할 수가 있다. 이와 같은 문제들에 대한 대처방안으로 원자로 측면의 대책방안이 강구되어야 하지만, 경제적이면서도 효율적 방법으로 원자로의 노후화에 따른 운전여유도 감소를 보상할 수 있는 중수로용 개량핵연료 CANFLEX-NU가 한국원자력연구소와 캐나다원자력공사에 의하여 공동으로 개발되었고, 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발을 2002년 7월 월성1호기에 시범장전 하여 현재 조사중에 있으며, 원전 운전 자료를 기초로 하여 조사중인 CANFLEX-NU 핵연료의 성능평가를 수행하였다. 본 성능 평가 결과에 의하면, 월성 1호기에서 시범 장전 조사중인 CANFLEX-NU 핵연료봉의 내부 기체압력, 핵연료 온도, 피복관 온도, 피복관 변형도 등이 설계기준을 만족하고 있음을 확인되었다.

#### Abstract

Wolsong Unit 1 as the first heavy water reactor in Korea has been in service for about 20 years since 1983. It would be about the time to prepare a plan for the solution of problems due to aging of the reactor. The aging of CANDU reactor could lead especially to the steam generator cruding and pressure tube sagging and creep and then decrease the operation margin to make some problems on reactor operation and safety. To overcome these problems, an advanced fuel called CANFLEX-NU was developed jointly by KAERI and AECL. The CANFLEX fuel could compensate the reduced operation margin. 24 CANFLEX-NU fuels have been irradiated in Wolsong Unit 1 since July 2002. The performances of the CANFLEX-NU fuel elements being irradiated in the reactor were analyzed, based on the reactor operation data. The analysis results indicate that CANFLEX-NU fuel has been satisfied with the fuel design criteria such as the element internal gas pressure, the pellet center temperature, the sheath temperature, and the sheath total hoop strain at

the ridge and at the mid-plane.

## 1. 서론

국내 최초의 중수로인 월성 1호기는 1983년 준공 이래 약 20년 간 운전 중에 있으므로, 향후 원자로가 노후화 (aging)되어 발생할 문제에 대비하여야 한다. 특히 압력관에 크립이 발생되고, 증기발생기 세관에 이물질이 누적되면 원자로의 운전여유도가 감소되어 원자로의 운전 및 안전에 지장을 초래할 수가 있다. 이와 같은 문제들에 대한 대처방안으로 원자로 측면의 대책방안이 강구되어야 하지만, 경제적이면서도 효율적 방법으로, 원자로의 운전여유도를 향상시켜 원자로의 노후화에 따른 운전여유도 감소를 보상할 수 있는 개량핵연료의 개발이 요구되었다. 이에 한국원자력연구소는 캐나다 AECL과 공동으로 노후화 된 중수로의 출력감소 운전을 해결하고, 원전 경제성을 제고하기 위한 방법으로 천연우라늄 (Natural Uranium)을 핵연료로 이용하는 중수로용 개량핵연료 다발 (CANFLEX-NU)을 개발하였다[1, 2].

CANFLEX-NU 핵연료다발은 43개의 핵연료봉으로 이루어지며, 기존 37개 핵연료봉다발과 핵연료봉 직경 및 배열은 다르지만 CANDU 6 중수원전의 핵연료장전계통과 양립하는 특성을 갖는다. CANFLEX-NU 핵연료다발은 기존 37개봉 핵연료다발과 비교하여 다음과 같은 두 가지 개선된 설계 특성을 가진다. 첫째, CANFLEX-NU 핵연료봉다발에서는 중심봉과 내환봉의 직경이 보다 크고 중환봉과 외환봉의 직경이 보다 작다. 따라서 연료봉 선출력 침투치를 약 20% 정도 감소시키며, 이러한 낮은 연료봉 선출력 침투치는 CANDU 원자로의 안전여유도를 향상시키는 역할을 한다. 둘째, “button”이라 불리는 CHF 향상물이 각 핵연료봉의 최적위치에 부착되어 있어, 임계채널출력 (critical channel power, CCP)을 약 5% 이상 증가시킴으로써 운전여유도를 향상시킨다. 이러한 장점은 CANFLEX-NU 핵연료다발에 대해 그동안 수행되어진 연구들, 즉, 핵연료다발 설계, 노심특성 분석, 열수력적 거동 분석, 안전성 해석 등의 연구[3-8]를 통하여 입증되었다.

이에 따라, 한국원자력연구소와 한국전력연구원은 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발을 2002년 7월 월성1호기에 시범장전 하여 현재 조사중[9]에 있다. 본 연구에서는 가장 높은 출력을 보이는 CANFLEX-NU 다발과 핵연료의 재장전으로 인해 급격한 출력변화가 생긴 핵연료다발에 대하여 2003년 1월 초까지 약 6개월 간의 노내 데이터를 수집하여 핵연료봉의 출력-연소도 이력을 구하였고, 이 출력-연소도 이력을 바탕으로 조사중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 핵연료봉 내부 기체 압력, 핵연료 온도, 피복관 온도, 피복관 변형도 등과 같은 열 및 기계적 성능평가를 수행하여 중수로 핵연료다발 설계 기준에 만족하는지의 여부를 평가하였다.

## 2. 시범장전 CANFLEX-NU 핵연료다발의 연소이력 도출

### 2.1 CANFLEX-NU 핵연료다발 장전 노심의 운전자료

2002년 7월 10일, 월성 1호기 Q-07 고출력 채널과 L-21 저출력 채널에 CANFLEX-NU 핵연료다발이 각각 8 개씩 시범 장전되었다. 그리고 2003년 1월 6일 Q-07 채널에서 8개의 CANFLEX-NU 핵연료다발이 재장전 되었고 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발이 노내로부터 방출되었다. 본 연구에서는 처음 CANFLEX-NU 핵연료다발이 장전된 이후부터 재장전이 이루어진 후인 2003년 1월 9

일까지의 월성 1호기 운전 자료를 확보하여 분석하였다. 월성1호기 Q-07 고출력 채널과 L-21 저출력 채널에 CANFLEX-NU 핵연료다발의 최초 장전 및 재장전되는 과정을 그림 1에 도식적으로 나타내었다.

## 2.2 CANFLEX-NU 핵연료다발의 출력이력

월성 1호기의 정규 절차에 따라 매주 2회씩 수행되는 RFSP 코드계산은 크게 중성자 확산 방정식 계산과 Powermap 계산으로 나뉘어 진다. 중성자 확산 방정식 계산은 정상운전 중 POWDERPUF 및 SIMULATE 모듈을 사용하며 History Based (HI Card) 방법에 의해 수행된다. 중성자 확산방정식 계산 후 Powermap 계산이 수행되는데, 정상운전 중 READAMODE, FLUXMAP 및 SIMULATE 모듈이 사용된다.

두 채널의 축방향 출력분포를 노심계산 일자 중 시범장전 다음 날인 2002년 7월 11일, 그리고 9월 5일, 11월 4일과 Q-07 채널에 대해 재장전이 이루어진 후인 2003년 1월 9일에 대하여 그림 2에 나타내었다. 그림 2로부터 시범장전 된 CANFLEX-NU 핵연료 채널의 축방향 출력분포는 정상적인 좌우 대칭형태가 유지되면서 연소됨을 알 수 있으며, 두 채널 모두 다발 6에서 최대출력 값을 갖는다. 또한 CANFLEX-NU 핵연료다발의 장전 이후 각 다발의 출력값이 감소하다 재장전 이후 높아지는 것을 확인할 수 있다. 시범장전 이후부터 현재까지 두 채널의 각 다발별 최대출력치는 표 1에 정리되어 있다.

## 2.3 CANFLEX-NU 핵연료다발 및 각 봉의 연소 이력 산출

CANFLEX-NU 핵연료다발 성능해석을 위한 핵연료봉의 선출력 및 연소도 등의 각 환별 연소이력을 산출하였다. 앞서 언급한 바와 같이, 시범장전 이후부터 현재까지의 24개 CANFLEX-NU 핵연료 다발 중에서 가장 높은 출력을 내는 Q-07 채널 6번째 다발의 연소도 및 출력을 노심 계산 일자별로 각 환별 연소이력으로 환산하였다. 이를 위하여, 우선 WIMS-AECL 2-5d 코드를 사용하여 CANFLEX-NU 핵연료의 평균 연소도에 따른 각 환별 연소도 및 상대출력분포(Relative Power Density)를 생산하였다. WIMS-AECL 계산에 사용된 핵단면적으로는 최신 자료인 ENDF/B-VI 라이브러리를 사용하였다. 그림 3과 4에 CANFLEX-NU 핵연료 다발의 평균 연소도에 따른 각 환별 연소도와 상대출력분포 결과를 각각 나타내었으며, 계산된 상대출력분포를 사용하여 구한 CANFLEX-NU 핵연료의 각 환별 선출력계산 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 나타난 CANFLEX-NU 핵연료의 평균 다발 연소도에 따른 각 환별 선출력 자료와 WIMS-AECL 코드를 통해 기 계산된 핵연료 다발의 각 환별 연소도를 이용하여 Q-07 채널의 6 번째 다발인 KF0119, 그리고 재장전으로 인해 급격한 출력 상승과 감소를 보이는 KF0124와 KF0119, 그리고 L-21 채널의 6번째 다발인 KF0115에 대해 각 환별 연소도 및 선출력을 구하였다. 이 결과는 그림 6에 나타내었으며 성능평가를 위한 입력자료로 이용되었다.

## 3. 시범장전 CANFLEX-NU 핵연료다발의 열 및 기계적 성능 평가

### 3.1 CANFLEX-NU 성능 평가 해석용 코드 ELESTRES [10]

ELESTRES 코드는 중수로용 핵연료봉의 설계 및 정상상태 성능해석 계산에 사용되는 전산코드로서, 이미 여러 종류의 소결체 및 피복관으로부터 구해진 수십 종의 실험자료를 이용하여 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.

### 3.2 CANFLEX-NU 핵연료봉의 열 및 기계적 설계 기준

핵연료봉은 정격출력 운전, 핵연료 재장전 때 발생하는 출력 증가와 과출력 운전 등을 포함하는 정상상태 운전 시에 구조적 건전성을 유지해야 하며, 이를 위해 다음의 열 및 기계적 설계기준들을 만족해야 한다.

- 핵연료봉 내압 : 냉각재 압력 이하로 유지
- 핵연료 온도 :  $UO_2$  용융온도 이하로 유지
- 피복관 산화 : 피복관 내면온도가 산화가속온도 이하로 유지

### 3.3 CANFLEX-NU 핵연료다발의 성능해석 결과

그림 6에 나타난 바와 같이 Q-07 채널의 KF0119, KF0124, KF0119 다발, 그리고 L-21 채널의 KF0115 다발의 각 봉별 선출력-연소도 이력과 표 2에 정리한 CANFLEX-NU 핵연료다발의 설계변수 값들을 ELESTRES 코드의 입력변수로 하여 월성 1호기에 시범장전 중인 CANFLEX-NU 핵연료다발의 성능 평가를 수행하였다. 이때, 냉각재 압력과 냉각재 온도값은 실제 운전조건 데이터로부터 구한 값인 10.427 MPa과 561.4 K를 각각 이용하였다.

#### (1) 핵연료봉 내압

가장 높은 출력을 나타내는 Q-07 채널 KF0119 다발의 외환봉과 내환봉에서 구한 내압 결과를 그림 7에 나타내었다. 모든 연소도 구간에서 외환봉의 내압이 높게 나타남을 알 수 있으며, 따라서 다른 핵연료다발의 경우에도 외환봉의 결과만을 비교하였다. 그림 8은 본 연구에서 고려하고 있는 4개의 CANFLEX-NU 핵연료다발의 외환봉에서 계산한 핵연료봉 내압변화 결과를 보여주고 있다. 외환봉의 최고 내압값은 Q-07 채널 KF0119 다발에서 계산된 0.71 MPa 이며, 이는 설계 기준값인 냉각수 압력 10.427 MPa에 비해 훨씬 작은 값이다. 연료봉의 내압이 냉각수 압력보다 작다는 것은 소결체와 피복관 사이에 틈새가 벌어지지 않음을 의미하며, 따라서 현재까지 CANFLEX-NU 핵연료봉은 핵연료봉 내압에 관한 설계기준을 만족한다고 할 수 있다.

#### (2) 핵연료 온도

그림 9에 Q-07 채널의 KF0119, KF0121, KF014 다발과 L-21 채널의 KF0115 다발의 외환봉 소결체 중심부분에서 구한 핵연료 온도변화 결과를 나타내었다. 결과에 나타나듯이 핵연료 온도는 출

력에 민감하게 변화하며, 최고온도는 Q-07 채널의 KF0119 다발 외환봉에서 1263 °C로 계산되었다. 이 값은 설계기준인 UO<sub>2</sub> 소결체 용융온도 (약 2,740 °C) 보다 낮은 값이며 따라서 CANFLEX-NU 핵연료봉은 현재까지 핵연료 온도에 관한 설계기준을 만족한다.

### (3) 피복관 산화

그림 10에 Q-07 채널의 KF0119, KF0121, KF014 다발과 L-21 채널의 KF0115 다발의 외환봉에서 구한 피복관 내표면 온도변화 결과를 나타내었다. 핵연료 중심온도 변화와 마찬가지로 피복관 온도변화도 출력에 민감하게 변화한다. 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. 해석을 통해 구해진 피복관 내표면의 최고온도는 KF0119 다발 외환봉에서 340 °C이며, 이들 값은 모두 산화가속 기준온도인 397 °C 보다 작음을 알 수 있다. 따라서 CANFLEX-NU 핵연료봉은 현재까지 피복관 산화에 관한 설계기준을 만족한다.

### (4) 핵분열 기체 방출

CANFLEX-NU 핵연료를 시범장전한 이후, 현재시점까지 (약 6개월 연소) 노내 연소를 완료한 후, 조사 후 핵연료 저장소로 방출되었을 때를 가정하여 연료봉 내에서 핵분열 기체 방출을 계산하였다. 계산 결과, 최대 0.06 %의 기체가 소결체로부터 나와 직경틈새 등 연료봉 내의 빈 공간으로 방출된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지난 20년 동안 경험에서 구해진 중수로 핵연료봉에서의 핵분열 기체 방출량 평균값인 2.7 %에 비해 현저히 작은 값이다.

### (5) 피복관 및 변형도

시범장전 이후, 조사 거동 동안 피복관 중간부 (at mid-plane)와 끝단 (at ridge)에서 계산한 원주방향으로의 변형도 (total hoop strain) 결과를 그림 11과 12에 각각 나타내었다. 시범장전 후 6개월 지난 연소시점까지 피복관 중간부와 끝단에서의 원주방향 변형도는 KF0119 다발 외환봉의 경우 각각 -0.39%와 -0.26 %로 계산되었다. 이들 값은 지난 20년 동안 수집된 중수로용 핵연료봉 데이터 중 조사 후 건전성이 확인된 핵연료봉의 방출 후 소결체 변형도 최대값인 0.5 % 보다 작은 값으로, 이는 CANFLEX-NU 핵연료봉의 변형도가 기존의 건전한 중수로용 핵연료봉에 대해 구해지는 값들 범위 내에 위치함을 보여주고 있다. 이로부터 CANFLEX-NU 핵연료봉은 시범장전 후 현재 시점까지는 연료봉 건전성이 훼손되지 않는다는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

2002년 7월 10일 월성 1호기에 시범장전된 24개의 CANFLEX-NU 핵연료다발 중, 출력이 가장 큰 Q07 채널의 KF0119 다발과 재장전으로 인해 급격한 출력변화를 보이는 KF0121, KF0124 다발, 그리고 L-21 채널의 KF0115 다발에 대해 약 6개월 정도의 운전 자료를 수집하여 각 다발의 각 봉에 대한 선출력-연소도 이력을 구하였고, 이를 바탕으로 CANFLEX-NU 핵연료다발의 열 및 기계적 성능평가를 수행하였다. 성능평가는 ELESTRES 코드를 이용하여 수행되었으며, 실제 운전 조건으로부터 구한 데이터들이 해석조건으로 이용되었다. 해석결과, 현재 월성로에서 조사중인

CANFLEX-NU 핵연료는 핵연료봉 내압, 핵연료 온도, 피복관 산화, 핵분열 기체 방출량, 피복관변형 등에 대한 열 및 기계적 설계기준을 만족하고 있다는 것이 확인되었다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며, 노내자료 계산에 많은 도움을 주신 한양대학교 방사선안전신기술연구센터의 김순영 박사님께 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H.C. Suk, et al., "Basic Research and Industrialization of CANDU Advanced Fuel," KAERI/RR-2011/99, May 2000.
- [2] 석호천, 심기섭, 박주환, 전지수, 정창준, 정장환, "월성로(CANDU 6) 형 CANFLEX-NU 핵연료 설계 보고서," KAERI/TR-1220/99, 1997.
- [3] M.S. Cho, K-S. Sim, H.C. Suk, and S-K. Chang, "Static Strength Analysis of CANDU-6 Reactor Fuel Bundle," Nucl. Eng. & Design, 200 (2000), pp. 407-419.
- [4] 정창준, 석호천, 이영욱, "CANFLEX-NU 핵연료 재장전시 CANDU-6 원자로의 천이노심 분석," Proc. of the KNS Spring Meeting, 1997, 5.
- [5] 전지수, 석호천, 박주환, "크립된 압력관에서 CANFLEX-NU 다발의 Water CHF 시험," 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000, 5.
- [6] 전지수, 석호천, 박주환, "CANFLEX-NU 핵연료다발의 Water CHF 시험 자료 분석," 2000 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집, 2000, 5.
- [7] 오덕주, 석호천, "CANFLEX-NU 핵연료다발로 장전된 CANDU 원자로의 냉각재 상실 사고 시 핵분열 생성물 방출평가," Proc. of the KNS Spring Meeting, 1997, 5.
- [8] 오덕주, 석호천, "Fission Product Release Assessment for End Fitting Failure in CANDU Reactor Loaded with CANFLEX-NU Fuel Bundle," Proc. of the KNS Autumn Meeting, 1997, 10.
- [9] H.C. Suk, M.S. Cho, J.S. Jun, S.H. Lee, Y.B. Kim, "Status of the Demonstration Irradiation Program of the New Fuel Bundle CANFLEX-NU in Korea," 7th International CANDU Fuel Conference Proceedings, Sept., 2001.
- [10] 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, Feb., 1989.

표 1 시범장전 채널의 각 다발별 최대출력치(2002. 7. 11~ 2003. 1. 9)

다발번호 채널	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L-21	98.6	259.1	422.7	552.6	610.1	637.3	636.7	603.3	520.7	400.1	254.3	100.0
Q-07	163.9	391.7	565.3	690	766.5	819.1	811.7	759.6	704.7	562.2	379.2	156.1

표 2 ELESTRES 코드 입력자료로 사용된 CANFLEX-NU의 설계변수

설계변수	내 환봉	외 환봉
Pellet diameter (mm)	12.66	10.71
Dish depth (mm)	0.22	0.20
Shoulder width (mm)	0.25	0.25
Fuel density (Mg/mm <sup>3</sup> )	10.6	10.6
Fuel grain size (μm)	10	10
Pellets per stack	28	32
Stack length (mm)	482.7	480.94
Axial gap (mm)	2.0	2.0
Diametral clearance (mm)	0.07	0.07
Filling gas pressure (MPa)	0.1013	0.1013
Filling gas - He fraction	0.8	0.8
Plenum void (mm <sup>3</sup> /K)	0	0
Enrichment (% U-235)	0.71	0.71
Canlub	Yes	Yes
Sheath surface finish (μm AA)	0.5	0.5
Pellet surface finish (μm AA)	0.8	0.8
Sheath thickness (mm)	0.39	0.36

- Fuel Channel: Q07 (A → C Refuelling)

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	37ELE	37ELE	37ELE	37ELE		

- Fuel Channel: L21 (C → A Refuelling)

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

**(a) First Fuelling (2002.07.10)**

- Fuel Channel Q07 (A → C Refuelling)

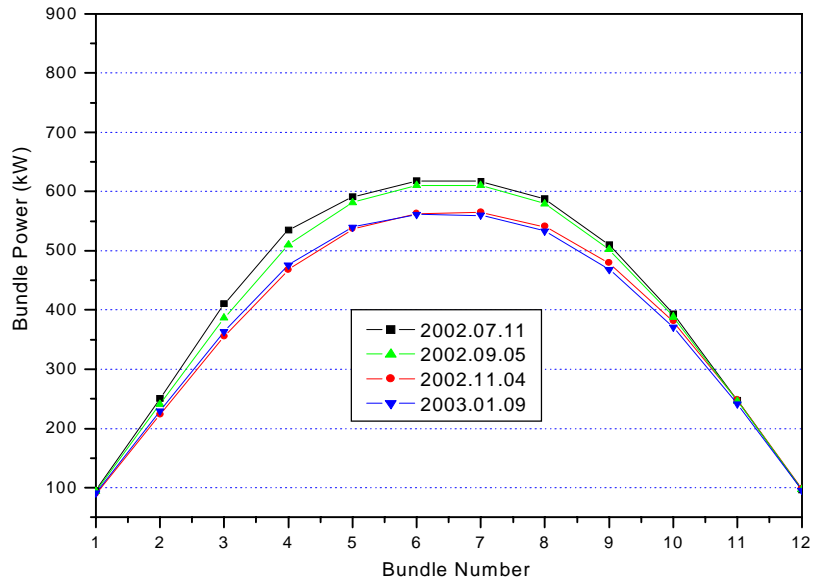
A-Side				Bundle Position in Q07 Channel								C-Side	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
KF0106	KF0107	KF0108	KF0109	KF0110	KF0111	KF0112	KF0113	KF0124	KF0123	KF0122	KF0121		

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

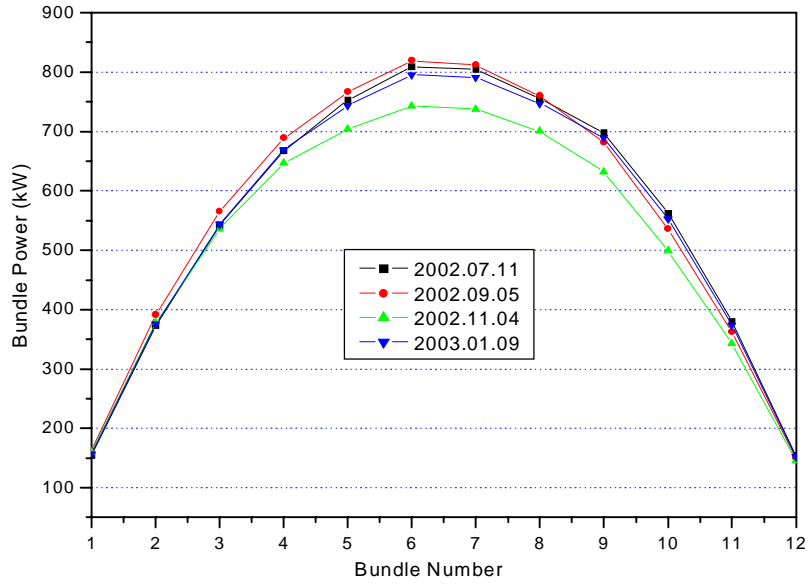
**(b) Second Fuelling (2003.01.06)**

그림 1 CANFLEX-NU 핵연료다발의 최초장전 및 재장전 전략





(a) L-21 채널



(b) Q-07 채널

그림 2 CANFLEX-NU 핵연료 장전채널의 일자별 축방향 출력분포

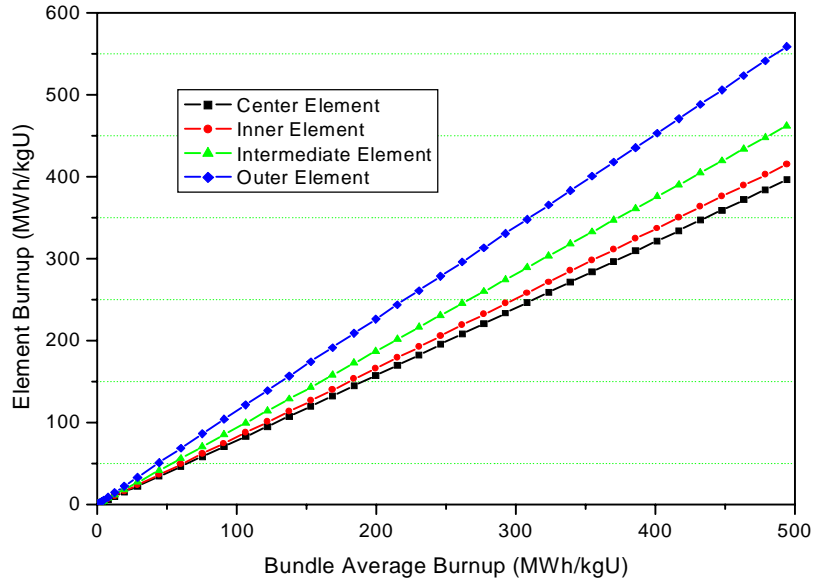


그림 3 CANFLEX-NU 핵연료의 평균다발출력에 따른 각 환별 연소도

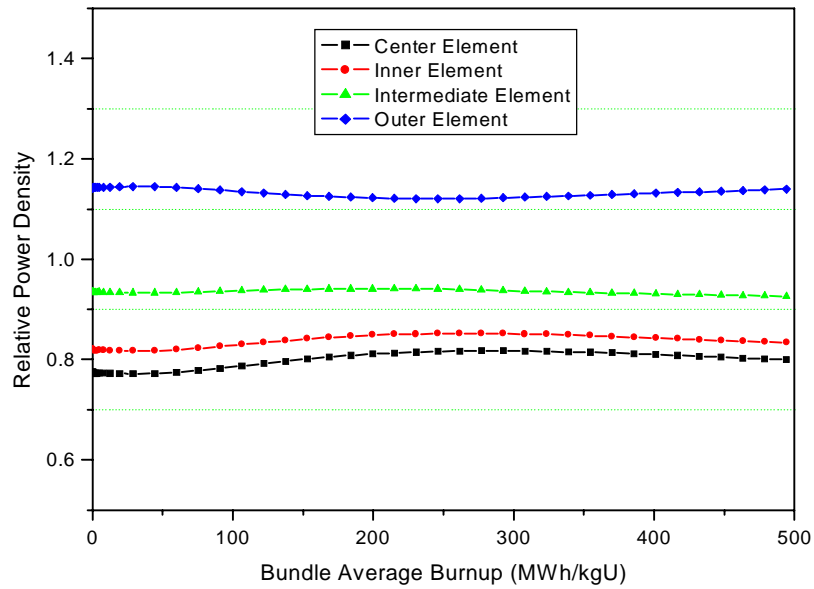


그림 4 CANFLEX-NU 핵연료의 평균다발출력에 따른 각 환별 상대출력분포

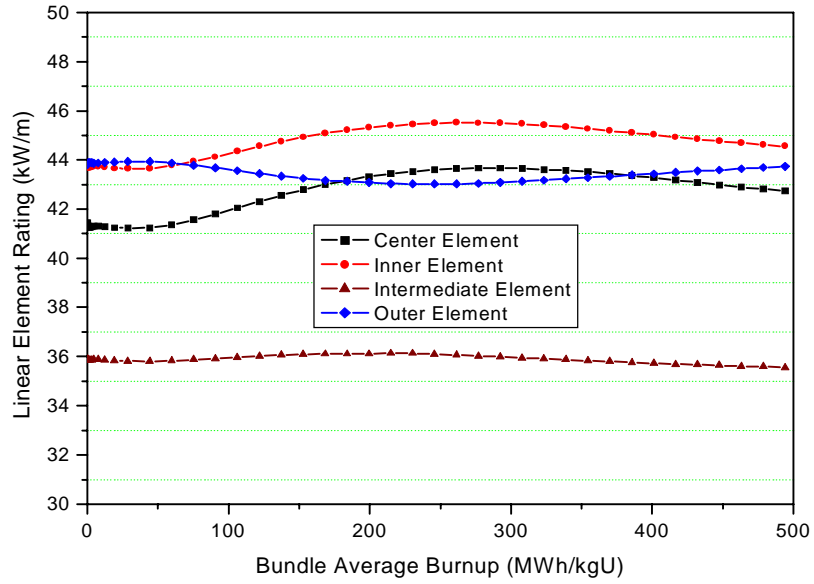
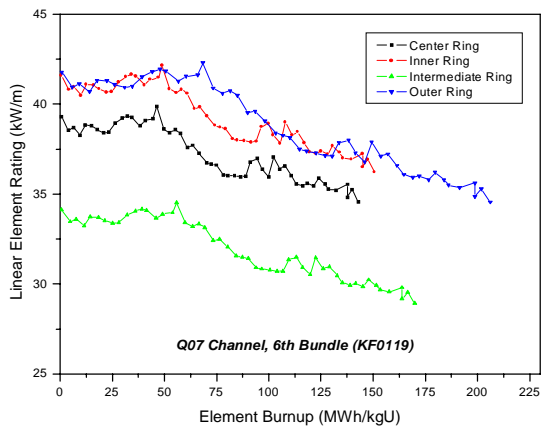
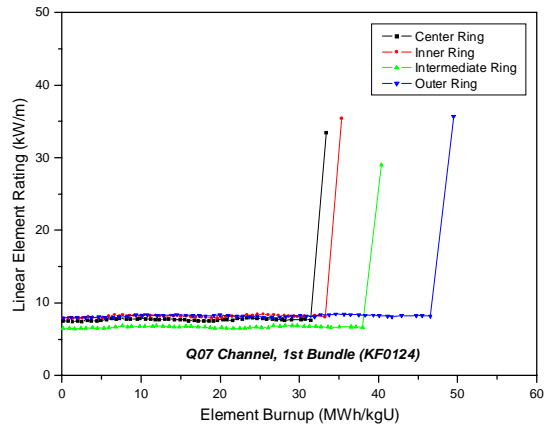


그림 5 CANFLEX-NU 핵연료의 평균다발출력에 따른 각 환별 선출력

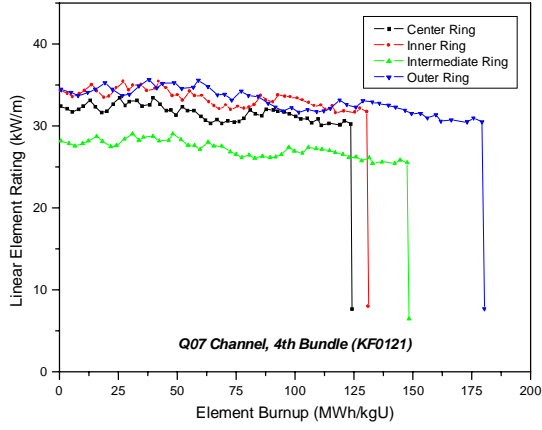


(a) Q-07 채널, KF0119 다발

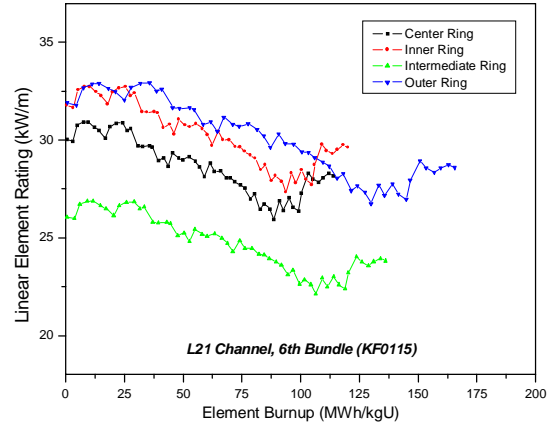


(b) Q-07 채널, KF0124 다발

그림 6 각 CANFLEX-NU 핵연료다발의 각 환별로 구한 선형 출력-연소도 이력



(c) Q-07 채널, KF0121 다발



(d) L-21 채널, KF0115 다발

그림 6 각 CANFLEX-NU 핵연료다발의 각 환별로 구한 선형 출력-연소도 이력 (계속)

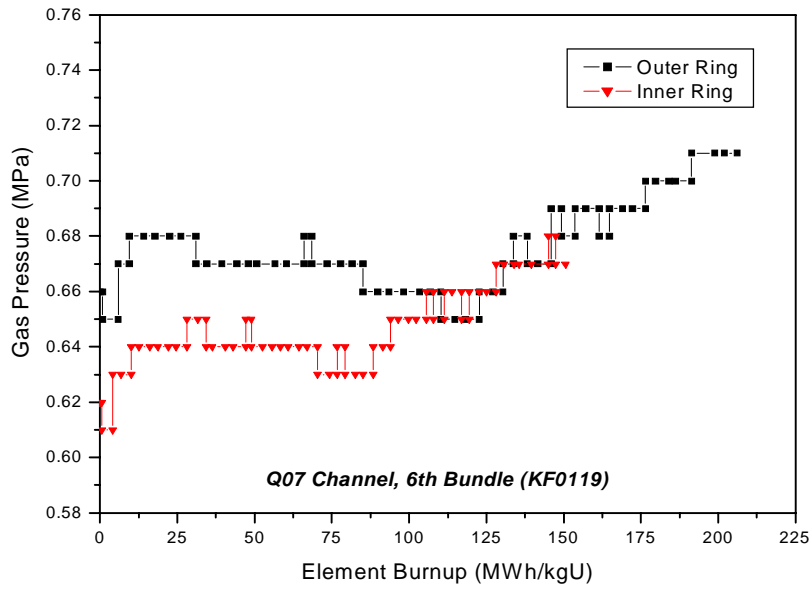


그림 7 Q-07 채널 KF0119 다발의 외환봉과 내환봉의 내압 비교

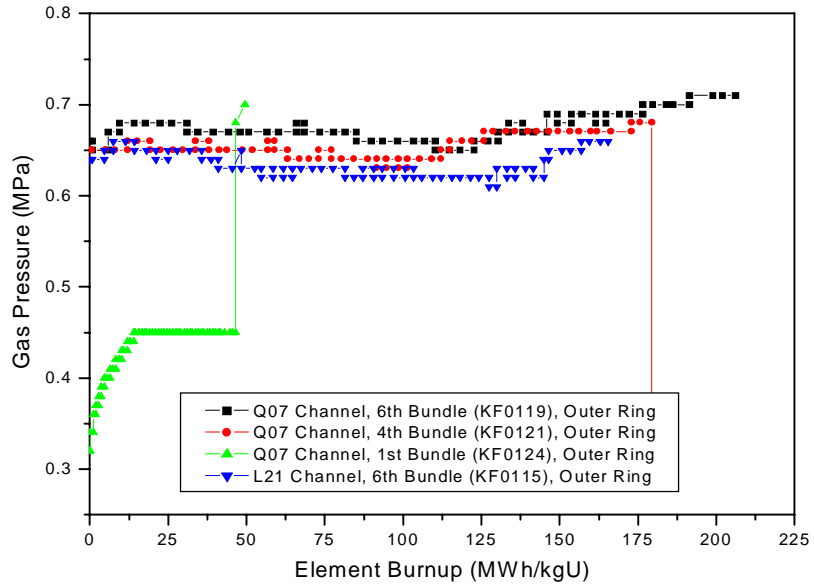


그림 8 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 내압 결과 비교

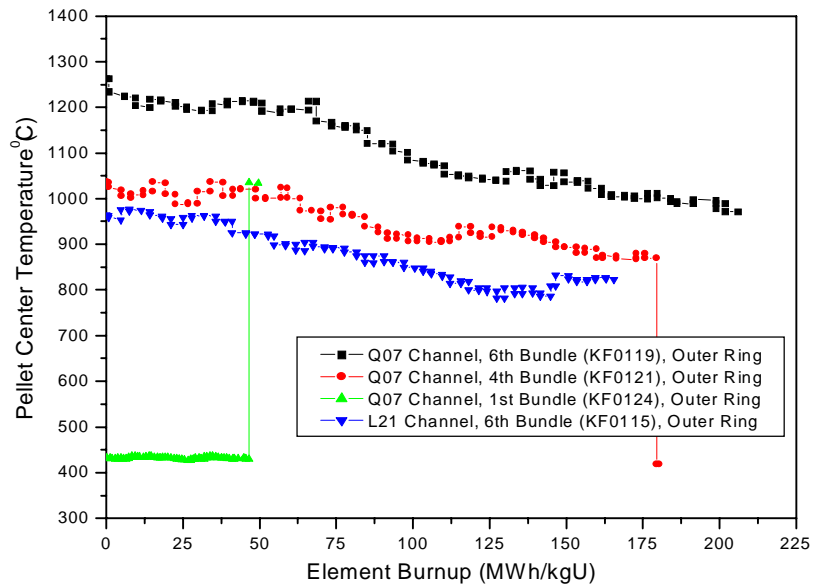


그림 9 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 소결체 중심온도 결과 비교

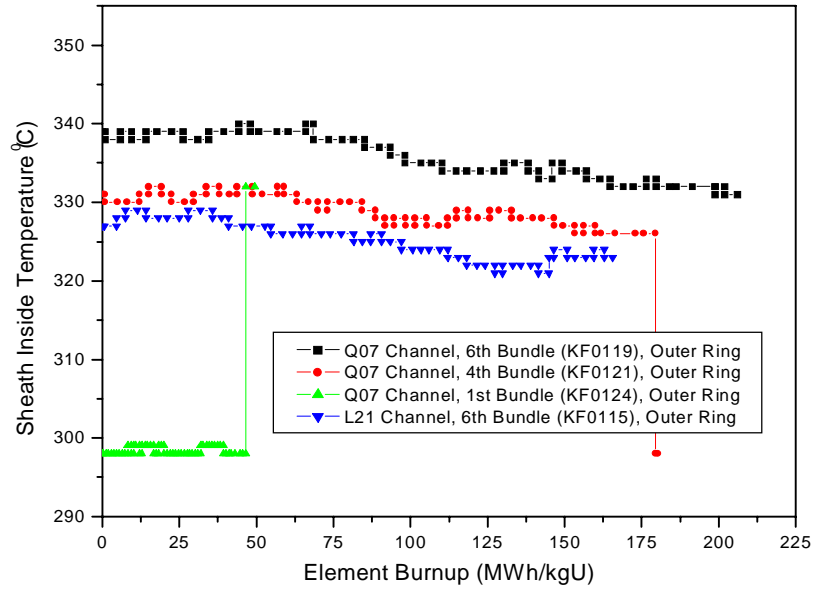


그림 10 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉에서 구한 피복관 내면온도 결과 비교

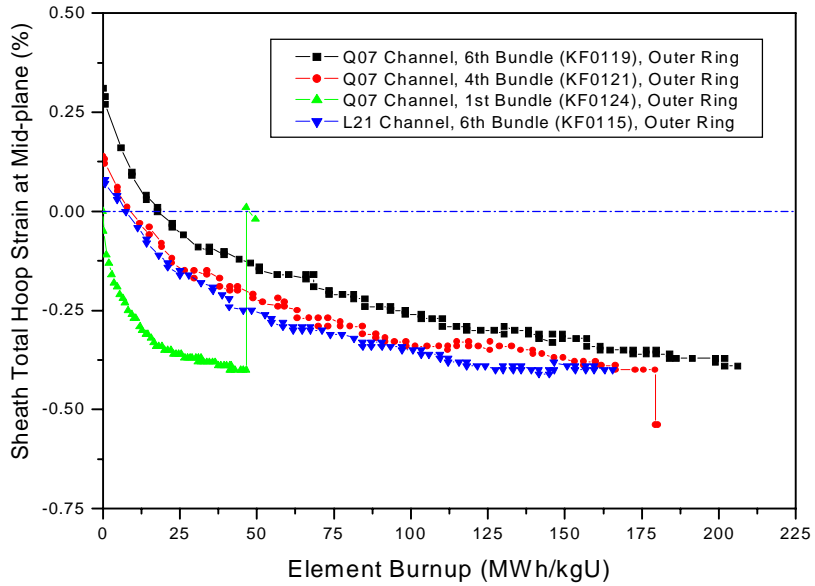


그림 11 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉 중간부에서 구한 피복관 변형률 결과 비교

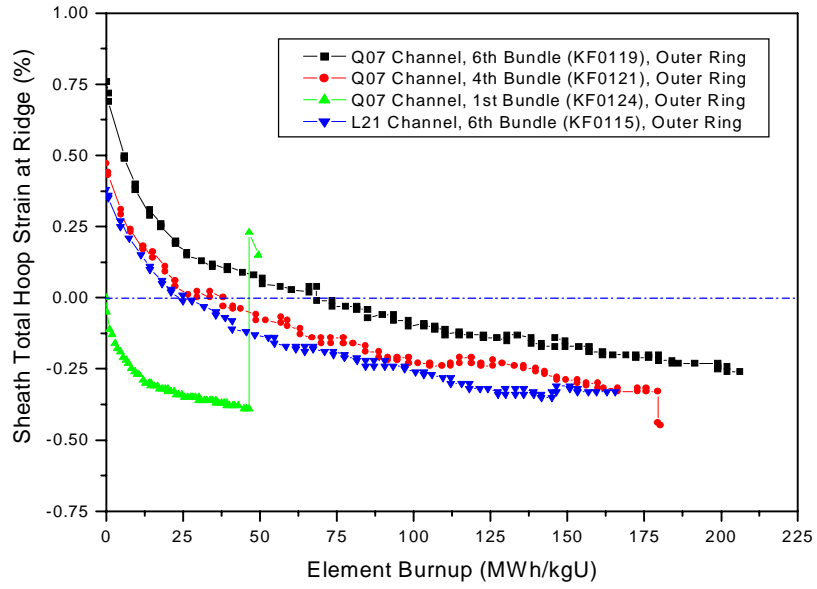


그림 12 CANFLEX-NU 핵연료다발 외환봉 끝단에서 구한 피복관 변형률 결과 비교