

## CANFLEX 핵연료다발의 압력강하특성

정장환, 정홍준, 장석규, 김복득, 석호천  
한국원자력연구소

### 요 약

중수로용 개량핵연료인 CANFLEX 핵연료다발 시제품을 고온/고압의 원자로 운전조건에서 시험하여 CANFLEX 핵연료다발의 압력강하 특성을 조사하였다. CANFLEX 핵연료다발의 최빈 압력강하량은 현재 월성발전소에 사용중인 CANDU 37봉핵연료봉다발의 값과 거의 동일하였으며 핵연료채널의 압력강하 설계기준을 만족하였다. CANDU 37봉핵연료다발이 장전된 핵연료채널에 새로운 CANFLEX 핵연료다발을 일부 교체하는 것을 모의한 천이채널에서의 실험결과도 압력강하 설계기준을 만족하였다.

### 1. 서 론

한국원자력연구소에서는 안전성 및 경제성이 높을 뿐만 아니라 개량핵연료주기까지 수용할 수 있는 중수로용 개량핵연료인 CANFLEX 핵연료다발을 캐나다원자력공사(AECL)와 공동으로 개발하고 있다.[1] 현재 개발중인 CANFLEX 핵연료다발은 노내의 시험을 통해 성능을 입증한 후에 국내 중수로용 원자력발전소에 사용하는 것을 최종 목표로 하고 있다. 새로이 개발되는 중수로용 핵연료다발은 원자로 운전중 핵연료 교체시에 발생하는 여러 종류의 하중에 대하여 건전성이 확보되어야 하며, 이 핵연료다발을 사용할 원자력발전소 일차계통의 열수력학적 설계기준을 만족하여야 한다. 따라서 핵연료 시제품은 원자로 운전조건에서 수행되는 노외실증시험을 통하여 핵연료다발의 기계 구조적 건전성과 열수력학적 성능 및 기존 원자로와의 양립성을 검증하게 된다. CANFLEX 핵연료다발의 개발과 관련된 열수력시험에는 핵연료다발의 수력학적 특성을 규명하기 위한 유체유동실험과 원자로의 운전여유도 계산에 필요한 임계열유속실험으로 크게 나눌 수 있다. 본 논문에서는 CANFLEX 핵연료다발의 수력학적 성능을 검증하기 위하여 원자력발전소의 운전 조건에서 수행된 핵연료다발 열 압력강하실험에 관하여 기술하였다. 핵연료다발 열 압력강하실험

험은 고온고압 유체유동시험시설인 CANDU Hot Test Loop 에서 수행되었으며, 원자력연구소에서 시험제작한 CANFLEX핵연료다발을 실험대상으로 하였다. 핵연료채널의 압력강하량은 원자로에 장전된 핵연료다발간의 정렬각도에 따라서 크게 변하므로, 핵연료다발간의 정렬각도를 변화시키면서 압력손실량을 측정하였다. CANFLEX핵연료다발의 설계는 그동안 열수력시험을 통하여 수차 변경되었으며, 최근 성능이 보다 개선된 모델 Mk4의 설계가 확정되었다. 본 연구에서는 CANFLEX-Mk4 핵연료다발 뿐만 아니라 기존원자로에 새로 개발된 핵연료를 장전할 때 발생하는 두 종류의 핵연료다발이 장전된 혼합장전 핵연료다발렬을 실험대상으로 하여 압력강하 실험자료를 생산하였다. 본연구에서 생산된 압력강하실험 결과는 CANFLEX핵연료다발이 장전된 원자로의 노심열수력해석시 입력자료로 활용된다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

핵연료다발렬의 압력강하실험은 월성원자력발전소 일차계통의 운전조건을 모의할 수 있는 CANDU Hot Test Loop 에서 수행되었다. 이 시험장치에는 월성발전소에 사용중인 것과 동일한 핵연료채널이 설치되어 있으며, 주순환펌프와 가압펌프 및 전기 가열기를 이용하여 실험조건인 유량, 압력 및 온도를 제어하며, pH, Turbidity 및 DO 등 수질을 제어할 수 있다.

시험대는 Fig. 1 과 같이 압력관과 양단에 Rolled joint로 연결된 장전관으로 구성되며 압력관내에 12개의 핵연료다발이 장전된다. 또한 핵연료다발렬 전후에는 차폐마개가 설치되어 냉각수의 유로 형성과 핵연료 지지등의 기능을 하게 된다. 시험대에는 압력강하 측정을 위한 압력탭이 4개 설치되어 있다. 그림에 나타난 바와 같이 탭1과 탭4는 입구 및 출구 자관에 각각 위치하며, 탭2와 탭3은 핵연료다발렬의 압력강하 측정을 위하여 12개 핵연료다발렬의 상하류에 각각 설치되어 있다. 시험대에 흐르는 유량은 시험대 입구 배관에 설치된 설치된 오리피스 유량계에 의해 측정되며, 온도는 백금저항온도계로서, 압력은 용광형 차압발신기로서 측정하였다. 실험자료의 수집 및 처리는 HP 3054A 자료처리 장치를 이용하였다.

### 2.2 실험용 핵연료다발

압력강하실험에 사용된 핵연료다발은 Fig. 2 와 같이 CANFLEX 핵연료다발의 모델중의 하나인 CANFLEX-Mk4 와 월성원자력발전소에 사용중인 CANDU 37봉 핵연료다발이다.

중수로용 핵연료다발은 연료봉의 양단에 위치하여 개개의 핵연료봉을 다발로 결속하는 End Plate 와 연료봉간의 간격을 유지시키는 간격체 및 외각 연료봉에 위치하여 핵연료다발을 원자로에 장전할때에 원자로의 압력관으로 부터 격리시키는 기능을 하는 지지체 등으로 구성되어 있다. 압력강하실험에 사용된 CANDU 37봉핵연료다발은 원자력연구소에서 설계/제작한 것으로서 직경

이 13.08 mm 인 37개의 핵연료봉으로 구성되어 있다. CANFLEX핵연료다발은 원자력연구소와 AECL이 공동으로 설계하여 원자력연구소에서 제작한 시제품으로서 직경이 11.5 mm와 13.5 mm 인 2 종류의 총 43개의 핵연료봉으로 구성되어 있다. 특히 CANFLEX핵연료다발에는 열적 특성을 증대시키기 위해 CHF enhancement button이 연료봉에 부착되어 있다.[2]

### 2.3 실험 방법

유체유동실험은 상온/상압에서 측정하는 핵연료다발 압력강하특성 실험과 원자력발전소 운전 조건에서 측정하는 핵연료다발 열 압력강하실험으로 나누어서 수행하였다. 압력강하특성 실험에서는 두 핵연료다발간의 정렬각도를 바꾸면서 핵연료다발사이의 압력강하량을 측정하여 최대/최소/최빈 압력강하량이 발생하는 정렬각도를 조사하였다.[3] 핵연료다발 열 압력강하실험에서는 압력강하특성 실험으로 부터 구한 정렬각도로 핵연료다발을 시험대에 장전한후 고온고압조건에서 핵연료다발 열의 압력강하 특성을 조사하였다.

원자력발전소의 핵연료채널에는 12개의 핵연료다발이 장전된다. 발전소의 핵연료다발 교체는 원자로의 운전중에 이루어지며, 일반적으로 1회에 핵연료다발 8개를 새로운 핵연료로 교체한다. 그러므로 37봉 핵연료다발이 장전된 기존 운전중인 원자로에 CANFLEX핵연료다발을 장전하면 이 핵연료채널에는 8개의 CANFLEX핵연료다발과 4개의 37봉 핵연료다발이 장전된 혼합장전 핵연료채널이 형성된다. 따라서 본 연구에서는 기존 37봉 핵연료다발과의 압력강하 특성 비교 및 혼합장전 핵연료채널의 압력강하 특성 규명을 위하여 3종류의 핵연료채널, 즉, 12개의 37봉핵연료다발이 장전된 경우, 12개의 CANFLEX핵연료다발이 장전된 경우, 4개의 37봉핵연료다발과 8개의 CANFLEX핵연료다발이 시험대에 장전된 경우 각각에 대하여 압력강하실험을 수행하였다.

핵연료채널 압력강하실험 조건은 표1 과 같이 온도 288 °C, 압력 11.2 MPa, 유량은 12.0 ~ 30 kg/s 에서 핵연료다발 열과 입출구 장전관에서의 압력손실량을 측정하였다. 시험대에 유입되는 유량은 Orifice 양단에서 발생하는 압력차를 이용하여 ASME Fluid Meters 에서 추천하는 유량 산출식을 이용하여 구하였으며, 이때 시험유체의 온도변화에 따른 밀도 및 점성계수 값을 고려하였다. 측정변수는 온도, 압력, 유량 및 핵연료다발에서 발생하는 차압등이며, 측정에 사용된 압력 발신기와 차압 발신기는 표준계기로서 교정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

중수로형 원자로의 핵연료채널들은 입구 모관(Header)과 출구 모관사이에 병렬로 연결되어 있으며 핵연료채널에서 흐르는 유량은 장전된 핵연료다발과 입출구 자관의 압력강하 특성에 의해 결정되어 진다. 따라서, 특정한 원자력발전소에는 이 원자로에 장전할 핵연료다발에 대한 허용 압력강하량이 원자로 설계시에 설정된다. CANDU-6 원자로에서는 핵연료다발에 대한 압력강하

test criteria 를 보면 경수를 사용한 노외실증실험에서 유량 23.9 kg/s, 밀도 781 kg/m<sup>3</sup> 일때 핵연료채널에 임의로 장전된 12개 핵연료다발렬의 압력강하량은 718 kPa 이하 이어야 하는 것으로 규정하고 있다.

압력강하 실험자료는 유량에 대한 압력강하량으로 나타내었으며, test criteria 의 적용과 다른 종류의 핵연료다발렬의 실험치와의 비교를 쉽게하기 위하여 기준조건, 즉, 압력 11.2 MPa, 밀도 781 kg/m<sup>3</sup> 조건으로 변환하여 표시하였다. 실험값을 기준조건으로 변환할 때에는 다음식이 이용되었다.

$$\Delta P_R = \Delta P_T \left( \frac{\rho_T}{\rho_R} \right) \left( \frac{\mu_T}{\mu_R} \right)^\eta \left( \frac{M_R}{M_T} \right)^{\eta+2}$$

where,  $M$  = mass flow rate (kg/s)

$R$  = subscript of reference condition

$T$  = subscript of test condition

Fig. 3 은 CANFLEX핵연료다발의 다발간 정렬각도가 41° 의 경우, 즉, 최대압력강하량 발생 정렬각도에서의 CANFLEX핵연료다발의 압력강하량을 유량에 대하여 나타낸 것이며, 그림에서 실선은 실험치를 앞에 기술된 기준조건으로 변환한 후에 curve fitting 한 것이다.

본 연구에서 수행된 5 종류의 압력강하실험자료를 기준조건으로 변환한 값을 Fig. 4 에 나타내었다. CANFLEX핵연료다발렬의 최빈압력강하량은 모든 유량값에서 37봉핵연료다발렬의 최빈압력강하량과 거의 동일하게 나타났다. CANFLEX 핵연료다발은 접수길이가 37봉 핵연료다발보다 상대적으로 크기 때문에 연료봉의 표면 마찰에 의한 압력손실이 커지나 CANFLEX핵연료다발의 유로 면적이 37봉 핵연료다발보다 크므로 유속이 감소되어 동일한 유량에서는 핵연료다발렬 압력강하량은 거의 동일하게 발생되었다. 두 종류의 핵연료다발이 장전되는 혼합장전 핵연료채널의 경우에는 5종류의 압력강하실험중에서 가장 큰 압력강하가 발생되었으나 압력강하 설계기준을 만족하였으며, 이는 CANFLEX핵연료다발과 37봉핵연료다발 사이의 봉단접합판에서 유로의 급격한 변화로 인한 압력손실의 증대에 기인한것이다. 핵연료다발렬의 최대압력강하량은 CANFLEX핵연료다발렬이 37봉핵연료다발렬보다 크게 나타났는데 이는 CANFLEX핵연료다발을 구성하는 핵연료봉의 개수가 37봉핵연료다발보다 늘어남에 따라서 봉단접합판에서의 압력손실이 증대 되었기 때문이다. 그림에서 나타난 바와 같이 5종류 핵연료다발렬의 압력강하실험 결과는 유량 23.9 kg/s, 밀도 781 kg/m<sup>3</sup> 의 기준조건에서 718 kPa 보다 작게 발생하여 CANDU-6 용 핵연료다발의 압력강하 기준을 모두 만족하였다.



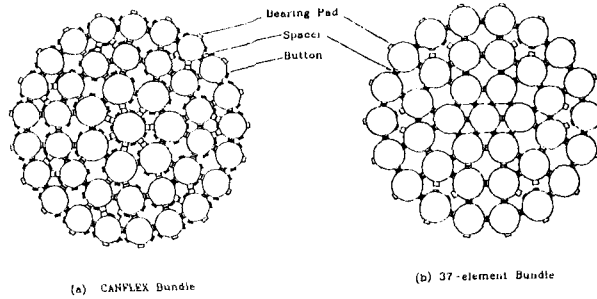


Fig.2 End View of the CANFLEX and CANDU 37-element Fuel Bundles

Table 1 Pressure Drop Test Matrix

Junction Alignment	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Flow Rate (Kg/s)
o CANFLEX Bundle	288	11.2	12.0
- 33° Misalignment			18.0
- 41° Misalignment			20.0
			22.7
o CANDU Bundle			23.9
- 12° Misalignment			25.0
- 33° Misalignment			27.5
			30.0
o MIXED Bundle			Max.

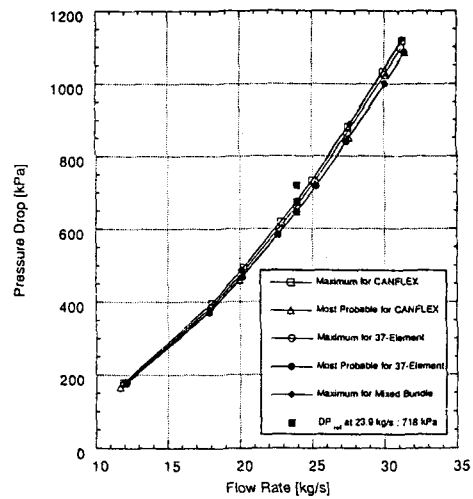


Fig.4 Comparison of Pressure Drop between 37-element, CANFLEX, and Mixed Bundles (at 288°C, 11.2MPa)

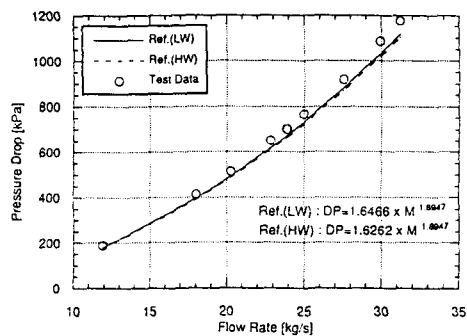


Fig.3 Conversion of Pressure Drop Data to Reference Conditions (CANFLEX Bundle String 41° Misalignment)