

**CANDU 사용후핵연료 건식저장용량  
확장 방안의 열적 타당성 검토**  
**(Feasibility Study in Aspect of Thermal Integrity on the Dry  
Storage Expansion Options for CANDU Spent Fuel)**

이경호, 윤정현, 최병일, 이홍영, 송명재, \*조규성  
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원, 한국과학기술원  
대전광역시 유성구 덕진동 150

**요 약**

현재 운영중인 월성원자력발전소의 CANDU 건식저장시설의 용량을 확장하기 위하여 캐나다 AECL에서 개발한 기존 MACSTOR 방식을 이용한 대안들을 제시 하고 이에 대한 열적 건전성 측면에서의 적용가능성을 검토하였다. 기존 건식저장시설인 MACSTOR 모듈의 2열 저장실린더 배열을 3열 및 4열 두가지로 달리한 경우를 고려하였다. 정상운전조건하에서 저장모듈내의 자연대류에 의한 열유동해석과 저장실린더 내부 열전달 해석결과 핵연료 다발 최대 허용온도이내에서 저장모듈내에 저장실린더를 4열로 배열하는 것이 가능할 것으로 나타났으나 이에 대한 보다 세부적인 열해석이 필요할 것으로 판단되었다.

**Abstract**

In order to expand the capability of the CANDU spent fuel dry storage facilities of the at Wolsong, the alternative concepts based on MACSTOR are suggested to replace with existing concrete silo of Wolsong. For this, the feasibility of its design changes from original MACSTOR is examined in term of heat transfer and thermal hydraulic. In this study, the configuration of the module was conceptually changed from its original 2 rows to 3 and 4 rows for review. Under normal operation, the results of heat transfer and thermal hydraulic shows that storage module can feasibly accomodate four rows of storage cylinders within allowable range in terms of maximum allowable temperature of the fuel basket.

**1. 서 론**

1991년 이후로 한국수력원자력(주) (당시 한국전력공사)에서는 월성 1발전소내에 총 100,540개의 CANDU 핵연료 다발을 140개의 콘크리트 사일로에 저장하는 건식 저장시설을 성공적으로 운영 중에 있다. 현재 월성부지에는 가압중수로형 발전소 3기가 추가로 건설되고 있으며 부지내 원전 4기로부터 연간 20,000 다발 이상의 사

용후핵연료가 발생될 것으로 예상된다. 월성부지내에서 운영중인 콘크리트 사일로 방식의 저장시설은 소요면적을 고려할 때 제한된 부지의 이용효율 측면에서 새로운 고려가 필요하며, CANDU 사용후핵연료 건식저장방식의 주 개발자인 캐나다 AECL에서는 저장밀도와 열적 측면에서 기존의 콘크리트 사일로보다 훨씬 우수한 MACSTOR를 개발하여 실증 및 인허가를 거쳐 현재 Gentilly-2 발전소내 저장시설에 적용하고 있다. 이에 따라 국내에서도 이 방식에 대한 검토가 고려되고 있으며, 2006년 상반기까지의 건설을 목표로 최적 저장개념을 사용한 저장시설의 개발을 시도하고 있다.

사용후핵연료의 소내 건식 저장시설의 건설에 있어서 사용후핵연료의 붕괴열에 의한 열적손상의 방지는 사용후핵연료의 건전성과 관련하여 인허가 측면에서 중요하다. 즉, 사용후핵연료 저장시설에 대한 열설계/해석시 저장용기 내·외부에서의 열분포해석뿐 아니라 내부핵연료의 최대 피복관온도를 결정하는 것이 열적 허용기준 충족여부의 확인을 위해 필요하다.

본 논문에서는 현재 캐나다에서 인허가를 받은 기존 MACSTOR 모듈에 기존 MACSTOR 저장모듈내의 2열의 저장실린더 배열을 늘려 3열로 하는 방안(방안 1) 및 저장실린더 배열을 4열로 하는 방안(방안 2)에 대해 열해석을 수행하였다. 각 방안별로 저장시 핵연료봉 온도가 허용온도 범위 내에 있을 것인가를 검토함으로써 열적 건전성 측면에서 향후 CANDU 건식저장시설의 저장용량 확장 가능성을 살펴 보았다.

## 2. 전제조건

월성원전의 CANDU 건식저장시설의 용량 확장방안은 캐나다 AECL에서 개발한 기존 MACSTOR 방식<sup>[1]</sup>을 이용하는 것을 전제로 하였다. 방안 1에서는 배열간의 간격은 모두 동일하되 배열의 증가에 따라 모듈 크기가 증가하는 것으로 가정하였다(그림 1). 따라서 방안 1에서 3열 배열의 경우는 18,000 다발을 (60 Bundles/Basket, 10 Baskets/Cylinder, 30 Cylinders/Module), 4열 배열의 경우는 24,000 다발을 (60 Bundles/Basket, 10 Baskets/Cylinder, 40 Cylinders/Module)수납, 저장하게 된다. 열해석을 위해 각 CANDU핵연료 다발의 붕괴열량은 6 W/다발로 가정하였으며, 외기온도는 40℃로 가정하였다. 한편, 핵연료 다발 허용온도는 164℃<sup>[2]</sup>이하로 하였다.

## 3. 열해석 방법

사용후핵연료 건식 저장시설의 설계 및 인허가시 수행되는 열수력해석의 목적은 건식저장시설 내부의 유량 및 온도분포를 결정하고 핵연료봉의 최대온도가 규정된 설계치를 넘지 않는다는 것을 보증하기 위한 것이다. 따라서 건식시설의 열수력해석 범위는 크게 자연대류 공기냉각 계통의 열수력해석과 사용후핵연료로 부터 저장용기로의 내부 열전달 해석으로 나눌 수 있다. 일반적인 해석 방법은 먼저 시설내

부의 자연대류 냉각에 대한 다차원 해석모델(대부분은 2차원 모델)을 통해 저장용기 외부의 온도조건을 결정한 후 이를 입력으로 하여 저장용기 내부의 핵연료집합체에 대한 해석을 수행하는 것이다.

MACSTOR 저장방식에서는 핵연료 다발로부터의 붕괴열에 의해 콘크리트 모듈내의 공간온도가 상승하고, 이것이 기동력이 되어 소위 굴뚝효과(Stack effect)가 생기며, 또한 이 때의 핵연료 실린더 주위의 공기온도, 공기유속 등의 영향을 받아 핵연료 저장실린더 내부의 온도분포가 변화하게 된다. 본 논문에서는 저장모듈내의 자연대류 유동 해석에 의한 실린더 외벽 온도를 구한 후 이를 경계조건으로 하여 실린더 내부 바스켓과 핵연료 다발의 최대온도를 구하는 방법을 사용하였다. 한편, 각 단계별로 기존 2열 경우의 열해석 결과와의 비교를 통해 해석 모델과 입력자료의 불확실성을 가능한 한 줄일 수 있도록 입력 파라미터를 설정하였다.

### 가. 저장 모듈내부 자연대류 공기냉각 열유동 해석

자연대류의 이론적 해석에는 저장실린더 주위의 온도장과 속도장을 알기 위하여 주위 냉각공기의 운동방정식과 에너지 방정식을 동시에 푸는 보존방정식을 사용한 전산코드에 의한 해법이외에 저장 모듈내의 자연대류에 의한 유동 유발력을 이용한 간략해법을 사용할 수 있다. 저장 모듈로의 공기입구와 출구사이의 높이차와 온도차가 굴뚝효과를 생성하므로 환기량은 저장용기를 냉각시키기에 충분한 유량을 가져야 하며, 저장구역에서의 환기유로는 굴뚝효과에 기인한 압력차( $\Delta P_s$ )가 마찰, 환기구 형상변화, 바닥 지지대에서의 압력손실 및 유동방향 변화에 따른 압력손실( $\Delta P_f$ )보다 커지도록( $\Delta P_s \geq \Delta P_f$ ) 설계되어야 한다. 본 논문에서는 그림 1에서와 같이 기존 MACSTOR 모듈에 대해 방안별로 각각 6개 및 8개의 저장실린더를 포함하는 모델을 고려하였으며, 상기 간략해법을 사용하여 실린더 외벽의 온도를 추정하기 위한 전산 프로그램을 작성하였다. 열유동 해석 결과는 시설의 구조, 저장용기의 발열량 및 기하학적 배치에 따라 공기의 유동패턴(예를 들면, 난류 발생정도) 및 열저항이 달라지므로 인해 매우 큰 불확실성을 갖게 되며, 저장지역 내부의 유동 및 온도조건을 보다 정확히 예측하기 위해서는 광범위하게 모든 운전조건하에서의 축소모델을 사용한 열수력실험이 필요하다. 따라서 여기서는 실제 저장방식에서의 자연대류 냉각계통 설계시 중요한 파라미터인 입출구 덕트에서의 냉각공기의 유동저항에 관한 값을 실제 MACSTOR 시설에서의 저장실린더 벽면 온도 값에 접근하도록 가정하였다. 외기온도는 40°C로 고정하였으며, 저장실린더 외벽을 흐르는 공기에 대한 자연대류 열전달 계수는 다음과 같은 McAdams의 식<sup>[3]</sup>을 적용하였다.

$$h=0.19 \Delta T^{1/3} \quad (\text{난류영역}, 10^9 < Ra_L < 10^{12})$$

$$h=0.29 (\Delta T/L)^{0.25} \quad (\text{층류영역}, 10^4 < Ra_L < 10^9) \quad \text{----- (1)}$$

여기서,  $Ra_L$ 은 Rayleigh 수로서  $Gr_L Pr$ ,  $L$ 은 저장실린더의 수직길이

#### 나. 저장실린더 내부 열전달 해석

밀폐된 공간내에 핵연료 집합체 또는 핵연료봉이 배열된 경우 그 내부 온도분포를 예측하는 방법으로서 CANDU형 사용후핵연료와 관련해서는 2단계 해석방법이 개발되어 국내 월성1호기 부지내에 설치된 건식저장 콘크리트 캐니스터의 열적 안전성 평가에 적용된 바 있다. 이 방법은 먼저 저장 캐니스터에 장전되는 핵연료 바스켓과 바스켓 내부의 CANDU 핵연료다발을 동심원상의 다중 원통모델로서 단순화하고 건식저장시 열해석용으로 널리 사용되는 HEATING-5코드를 이용하여 각 부위의 평균 온도분포를 구한 후, 다음 단계에서는 앞서 구한 핵연료다발의 평균온도를 최외각 핵연료봉의 온도와 같다고 가정하고 핵연료다발내의 봉대봉 전도 및 복사를 고려한 2차원 해석모델을 작성하여 핵연료다발을 구성하는 핵연료봉의 최대온도를 계산하는 것이다<sup>[4]</sup>. 이러한 다중 동심원 모델에 의한 HEATING-5코드의 열해석 결과는 AECL에서 실시한 실물모형의 실험결과와 서로 잘 일치하고 있으므로, 본 논문에서는 다중 동심원 모델(그림 2)과 입력자료를 기존의 60다발 바스켓에 적용하였다. SCALE코드 팩키지내의 HEATING-7코드<sup>[5]</sup>를 사용하여 저장 모듈내부 자연대류 열유동 해석결과인 저장실린더 외벽의 온도를 경계조건으로 설정하여 정상상태에서의 핵연료다발의 최대온도를 계산하였다.

### 4. 해석 결과 및 분석

#### 가. 저장 모듈내부 자연대류 공기냉각 열유동 해석

자연대류 유동 프로그램에 의한 저장실린더 외벽온도 계산 결과를 표 1에 나타내었다. 표에서 기준 MACSTOR 모델은 AECL에서 제시하고 있는 온도보다 약간 높게 나타났으나 저장모듈내 공기 유로의 형상이나 유동 압력강하 및 모델링상의 불확실성으로 인한 오차를 고려하면 비교적 잘 재현하고 있음을 보여주고 있다. 방안 분석의 결과를 살펴보면 동일한 피치대 직경비를 가지는 방안 2의 경우에서도 예상되는 바와 같이 모델의 열출력이 커짐에 따라 벽면온도가 높아지는 경향을 보여주고 있다. 이러한 해석결과는 앞에서 설명한 바와 같이 단순 모델에 의한 개략적인 예측치이며, 보다 상세한 해석을 위해서는 보존방정식에 의한 해법을 사용해야 할 것이다.

#### 나. 저장실린더 내부 열전달 해석

정상조건하에서 앞에서 계산된 저장실린더 외벽온도를 경계조건으로 하여 핵연료 다발의 최대온도를 계산한 결과는 표 2와 같다. 먼저 HEATING-7에서 사용할 입력 파라미터의 타당성을 보기 위해 기존 콘크리트 사일로에 대해서 사일로 내부의 탄소강재 저장 실린더에 대한 모델(60다발 저장 바스켓\*9단 적재)을 구성하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 그 결과 핵연료 다발의 최대온도는 AECL의 Mock-up 시험 결과와 유사한 159.6 °C를 나타내고 있었으나, 모델내 각 부분의 온도는 그림 3에서 보는 바와 같이 내부와 외곽부위에서의 온도구배가 적게 나타나고

있다. 이는 수직방향의 저장 실린더에서 내부 핵연료집합체로부터 주위로의 자연대류 열전달과 복사열전달을 계산하기 위한 자연대류 열전달계수와 복사 열전달계수의 설정에 대한 불확실성에 의한 것이라 판단된다. 이어서 이 모델에서의 파라미터를 사용하여 60다발 저장 바스켓을 10단으로 한 경우에 대한 모델을 구성하였다. 그 결과는 표에서 보는 바와 같이 저장실린더를 4열로 배치한 방안 2의 경우 기존 MACSTOR 모델에 대한 AECL 자료와 비교해 약 10℃ 정도 높게 나타났으며, 허용기준인 164℃보다 낮은 값을 보이고 있다. 이 결과로 판단해 볼 때 모듈의 크기를 늘리는 방안 2의 경우는 가능성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 여기서의 해석 결과는 MACSTOR 모듈에 대한 자세한 정보없이 개략적인 계산에 의한 것이므로 향후 보다 상세한 기하학적, 열적 정보를 확보하여 3차원 혹은 실험자료등을 바탕으로 재해석해야 할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 5. 결론

현재 운영중인 월성원자력발전소의 CANDU 건식저장시설의 용량을 확장하기 위하여 캐나다 AECL에서 개발한 기존 MACSTOR 방식을 이용한 방안을 제시하고 이에 대한 열적 건전성 측면에서의 적용가능성을 검토하였다. 예비 열해석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 기존 MACSTOR모듈내의 저장 실린더 간격을 유지한 채로 배치를 2열에서 3, 4열로 늘리는 방안에 대해서는 4열까지 확장하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 본 논문에서는 열적 건전성 측면만을 고려한 확장 가능성을 검토한 것이므로 MACSTOR 저장모듈 내부의 공기유동 및 온도조건을 보다 정확히 예측하기 위해서는 광범위하게 모든 운전조건하에서의 축소모델을 사용한 열수력 실험 자료가 필요할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

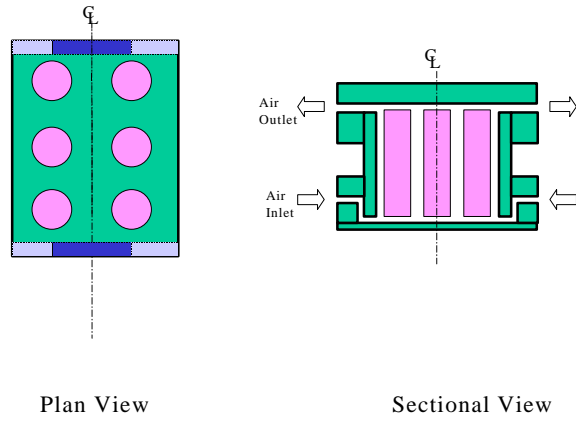
1. P.D. Stevens-Guille and F.E. Pare, "Development and Prospects of Canadian Technology for Dry Storage of Used Nuclear Fuel", The Prospects for Dry Fuel Storage, Institution of Nuclear Engineers, Nov. 1993, London, UK (1993)
2. J.H. Yoon, etc, "Evaluation of Maximum Allowable Temperature inside Basket of Dry Storage Module for CANDU Spent Fuel", Korea Atomic Energy Society, Autumn annual meeting, 2002, Yongpyung, Korea(2002)
3. McAdams, W. H., Heat Transmission, McGraw-Hill, New York, 1954
4. 류용호, CANDU 사용후핵연료 건식저장시설에 대한 열해석, 한국과학기술원 석사학위 논문 (1992)
5. K.W. Childs, HEATING 7.2 User's Manual, ORNL/NUREG/CSD -2/V2/R6 (1998)

표 1. 저장실린더 외벽온도 계산 결과

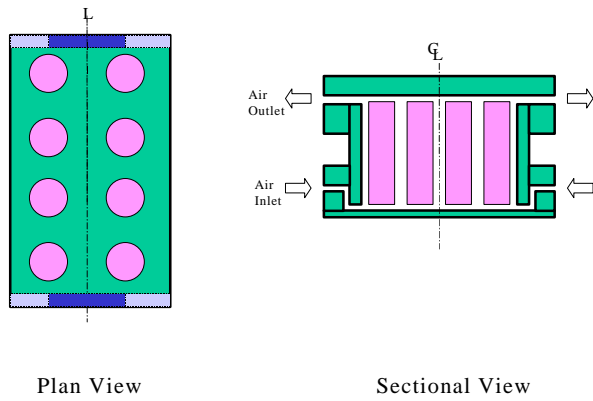
항목 \ 모델	모델	기준 MACSTOR 모델	방안 1	방안 2	비 고
모델 열출력(kW)		14.4	21.6	28.8	
입구 공기온도(°C)		40	40	40	자연대류 열유동해석 프로그램 사용
출구 공기온도(°C)		53.0	56.6	60.0	
저장실린더 외벽온도(°C)		82.8(82 <sup>a</sup> )	86.3	89.5	
모델내 저장실린더 갯수(개)		4	6	8	
배열 및 적재방법		2열, 60다발 10단 <sup>b</sup>	3열, 60다발 10단 <sup>b</sup>	4열, 60다발 10단 <sup>b</sup>	
주: a. AECL의 MACSTOR 해석 결과 b. 저장실린더 직경 : 1.27m, p/d ratio : 2.0/1.27=1.575					

표 2. 핵연료 다발 최대온도 계산 결과

항목 \ 적재방법	60다발 9단		60다발 10단		비 고	
	모델	기준 콘크리트 사일로 모델	기준MACSTOR 모델	방안 1		방안 2
모델 열출력(kW)	3.24		3.60		6W/다발	
저장실린더 외벽온도(°C)	(96 <sup>a</sup> )		(82 <sup>b</sup> )	86.3		89.5
핵연료 다발 최대온도(°C)	159.6(159 <sup>a</sup> )		148.3 (145 <sup>b</sup> )	151.9	154.5	SCALE 코드팩키지 HEATING-7 사용
주: a. 콘크리트 사일로에 대한 AECL의 Mock-up 시험 결과 b. AECL의 MACSTOR 해석 결과						



(a) 저장실린더 3열 배열의 경우



(a) 저장실린더 4열 배열의 경우

그림 1. MACSTOR 저장모듈의 자연대류 열유동 해석 모델

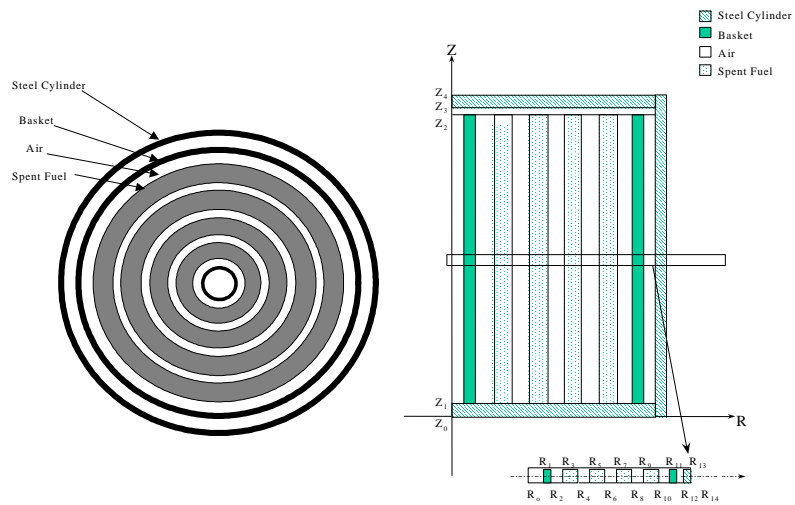
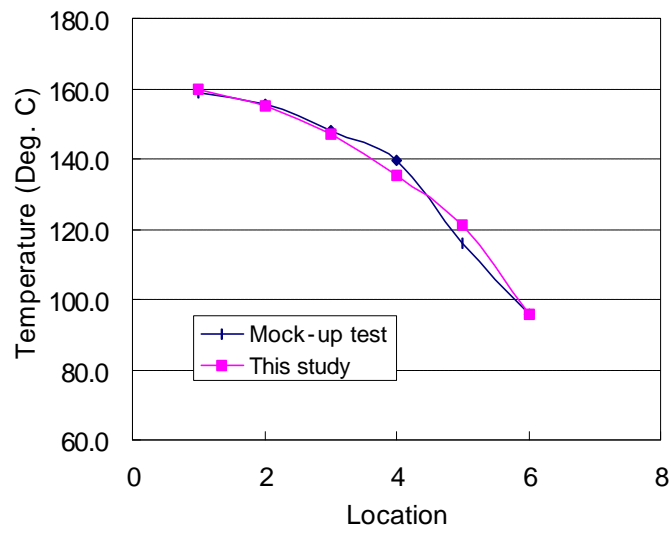


그림 2. 저장실린더 내부 열전달 해석을 위한 동심원 모델



Location	Temperature ( )	
	Mock-up test	This study
Fuel ring #1	159.0	159.6
Fuel ring #2	155.5	155.1
Fuel ring #3	147.8	147.1
Fuel ring #4	139.5	135.5
Basket wall	116.0	121.3
Steel liner	96.0	96.0

그림 3. 콘크리트 사일로내 저장실린더 내부 열전달 해석결과 비교