

# UNIST-DISNY 설비 피복관에 침적된 크러드의 열전달 모델링

유선오<sup>†</sup> · 김지용\* · 방인철\*

## Modelling Heat Transfer Through CRUD Deposited on Cladding Tube in UNIST-DISNY Facility

Seon Oh YU<sup>†</sup>, Ji Yong Kim\*, and In Cheol Bang\*

(Received 9 November 2023, Revised 12 December 2023, Accepted 15 December 2023)

### ABSTRACT

This study presents a CRUD modelling to simulate the thermal resistance behavior of CRUD, deposited on the surface of a cladding tube of a fuel assembly. When heat produced from fuels transfers to a coolant through a cladding tube, the CRUD acting as an additional thermal resistance is expressed as two layers, i.e., a solid oxide layer and an imaginary fluid layer, which are added to the experimental tube's heat structure of the MARS-KS input data. The validation calculation for the experiments performed in UNIST-DISNY facility showed that the center and surface temperatures of the cladding tube increased as the porosity and the steam amount inside pores of the CRUD got higher. In addition, the temperature gradient in the imaginary fluid layer was calculated to be larger than that in the solid oxide part, indicating that the steam amount inside the layer acted more largely as thermal resistance. It was also evaluated through sensitivity calculations that the cladding tube temperature was more sensitive to the CRUD porosity and the steam amount in pores than to the inlet flow rate of the coolant.

**Key Words** : CRUD(크러드), UNIST-DISNY(UNIST-DISNY), Heat transfer(열전달), Thermal resistance(열저항), MARS-KS code(MARS-KS 코드)

### 1. 서 론

CRUD(Chalk River Unidentified Deposit)는 가압경수로(PWR: Pressurized Water Reactor) 1차측 냉각재의 수화학조건에 의해 기기 및 배관계통 금속재료의 부식이 발생하고, 이로 인한 부식 생성물이 금속 산화물 형태로 냉각재 내에 포함되어 있다가, 노심 내 핵연료 피복관에서 발생하는 과냉각 비등 시 피복관 표면에 침적되어 성장한 다공성 미세 침적층을 의미한다.

CRUD는 Ni 금속 또는 NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>와 같은 금속의 고체 산화물(solid oxide)과 수십에서 수백  $\mu\text{m}$  크기 규모의 공극(pore)으로 구성되어 있고, 다공성 물질 내부에 수  $\mu\text{m}$  직경의 증기 굴뚝(steam chimney)이 있는 특징<sup>(1-3)</sup>이 있다. 이러한 CRUD는 금속 피복관에 비해 열전도도가 낮기 때문에 피복관 표면에 증착된 CRUD는 추가의 열저항으로 작용하여 핵연료에서 냉각재로의 열전달량 감소 및 핵연료와 피복관의 온도 상승 등<sup>(4)</sup> 피복관의 열전달 성능을 저하시킬 수 있다. 또한, CRUD는 정상출력 운전 조건에서 피복관의 표면 온도를 국부적으로 상승시켜 표면에서의 부식을 가속화하고<sup>(2,5)</sup> 냉각재 상실 사고와 같은 설계기준사고 조건에서 피복관의 첨두 온도를 증가<sup>(4,6)</sup>시킬 수 있다. 이와 같이 PWR형 원

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 유선오(Korea Institute of Nuclear Safety, Univ. of Science and Technology)

E-mail: k378yso@kins.re.kr

TEL: (042)868-0586, FAX: (042)868-0168

\* Ulsan National Institute of Science and Technology

전의 운전 환경에서 핵연료집합체 피복관 표면에서의 CRUD 침적과 성장 현상은 가동 중 원전의 안전성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 금속 고체 산화물과 공극으로 구성된 CRUD의 열물성 평가 모델, 열전달 특성 분석 등 안전성 확인에 필요한 상세 연구가 필요하다.

CRUD 침적 모의, 비등 열전달 성능평가와 관련하여 Westinghouse 사의 WALT (Westinghouse Advanced Loop Test)<sup>(2)</sup> MIT의 IHTEP (Internally Heated Test Loop for PWRs)<sup>(7)</sup>, KAERI의 CRUD Deposition Test Loop<sup>(8,9)</sup> 등의 실험 설비에서 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 실험은 PWR형 원전의 운전 환경보다 낮은 압력과 유속 조건에서 수행되었고, 설계기준사고 환경에서의 실험 자료는 부재하다는 한계를 갖는다. 또한 침적된 CRUD의 열물성 모델링과 CRUD가 침적된 표면에서의 열전달 분석에 필요한 실증실험 자료가 부족하여, 실제적인 물리현상을 충분히 반영한 실험적 검증과 CRUD 열물성 모델링에 대한 검증이 부족하다는 한계점이 있다. 이러한 CRUD 관련 선행 연구의 한계를 고려하여 국내에서는 PWR형 원전의 정상출력운전 환경에서 과냉각 비등에 의한 CRUD 침적층의 성장을 모의하고 CRUD가 침적된 피복관에서의 열전달 성능과 압력 강하 특성 등을 확인하기 위한 실험 설비를 구축하여 운

영 중<sup>(10)</sup>에 있다.

본 연구에서는 핵연료집합체의 피복관 표면에 침적되어 열저항으로 작용하는 CRUD의 열적 거동을 모의하기 위한 열물성 모델링과 CRUD의 피복관 침적을 모의한 실증실험에 대하여 계통열수력분야 최적 해석코드인 MARS-KS<sup>(11)</sup>를 활용하여 검증계산을 수행하였다. 그리고 주요 열수력 변수가 피복관 온도에 미치는 영향 분석을 위해 민감도 계산을 수행하였다.

## 2. UNIST-DISNY 실험 설비

UNIST-DISNY (UNIST-crud\_Deposition Simulator for Nuclear energy)<sup>(10)</sup>는 PWR형 원전 핵연료집합체에서 발생하는 CRUD 침적 현상의 모사와 열물성/열전달 특성 분석을 위한 UNIST 소재의 실험 설비이다. 설비는 OPR1000과 APR1400의 핵연료집합체 내부 단일 부수로를 모의대상으로 선정하였고, 원전의 정상출력운전 압력, 온도, 열유속 범위가 포함될 수 있도록 설계되었다. 그림 1과 같이 설비는 1) 원자로냉각재계통 모의를 위한 1차 계통, 2) 1차 계통의 작동 유체 냉각을 위한 2차 계통, 그리고 3) 1차 계통 수화학 환경 조절 및 작동 유체 재고량 조절을 위한 수화학 조절 계통으로 구성되어 있다.

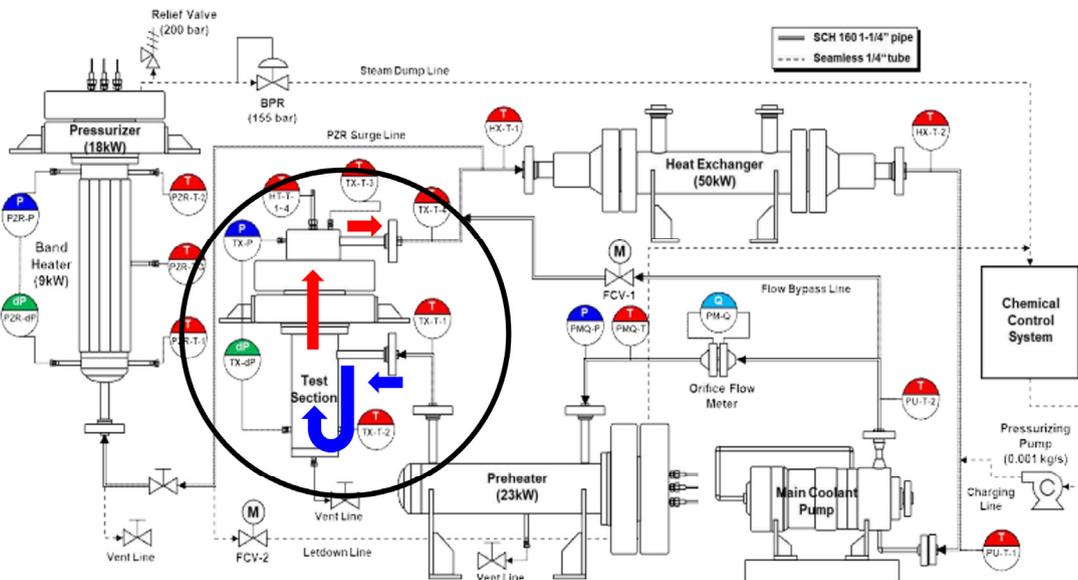


Fig. 1. Schematic diagram of primary system of UNIST-DISNY test facility.

그림 1(왼 부분)과 같이 시험부(test section)로 유입된 1차측 작동 유체는 입구 플레넘 영역을 거쳐 가열 유로를 통해 상승하고 히터의 가열 영역에서 열을 전달받아 출구 배관을 통해 이동된다. 가열 유로는 환형관 내부 단일 가열봉을 갖는 방식으로 설계되었는데, 가열 유로 내부에 세라믹 구조물을 삽입하여 히터와의 전기적 절연 조건을 유지함과 동시에 냉각재의 유로를 형성하여 대상 노형과 동일한 수력 등가 직경을 가질 수 있도록 하였다. 시험부의 히터는 직접 발열방식을 적용하여 제작되었고, 300 mm의 유효 발열 길이를 가지며 고온 환경에서의 열팽창을 고려하여 입구 플레넘으로 한쪽 끝이 열려 있는 U자 형상으로 제작되었다. 히터는 핵연료 피복관과 동일한 Zircaloy-4를 사용하였고, 피복관의 벽면 온도 측정을 위한 k-type의 thermocouple이 설치되었다.

설비의 작동 유체는 PWR형 원전의 1차 계통 냉각재를 모의하기 위해 붕산수를 사용하고 작동 유체의 pH는 냉각재 저장 탱크에 추가되는 LiOH의 양에 의해 조절된다. CRUD 침적 모의를 위해 Ni 및 Fe 금속 이온을 펌프를 통해 1차 계통으로 주입한다.

실험은 PWR형 원전의 정상출력 운전환경과 유사한 계통압력, 온도 그리고 냉각재 유량 조건의 정상 상태에 도달한 후, 그림 2와 같이, 열유속을 고정하고 수화학 조절계통에 의한 CRUD 침적 조건을 형성하여 약 36시간 동안 유지함으로써 피복관 표면에 CRUD가 침적되도록 하였다(phase 1). 그리고 상기 열수력, 수화학 조건을 유지하면서 열유속을 0.0에서 1,300 kW/m<sup>2</sup>·s까지 단계적으로 증가시키면서 피복관의 온도를 측정하였다(phase 2).

그림 3은 피복관 표면에 침적된 CRUD의 단면을 보여준다. 실험 종료 후 피복관 표면에 형성된 CRUD를 분석한 결과, CRUD 내 공극률은 위치에 따라 26.7~30.8%로 분석되었다. 그리고 CRUD가 그림과 같이 두 부분으로 나뉜 것은 다음과 같이 분석된다: phase 1 기간 동안 수화학 조절계통의 운전을 통해 냉각재와 금속 이온이 혼합되어 계통을 흐르고 열유속이 인가되는 피복관 표면에서의 비등으로 인하여 CRUD가 안쪽 두께 만큼 생성되었다. 그리고 열유속을 단계적으로 올리는 phase 2 기간 이후 기존 생성된 CRUD 위에 추가로 침적물이 쌓여 그림과 같이 두 부분으로 구분되는 CRUD를 확인한 것이다.

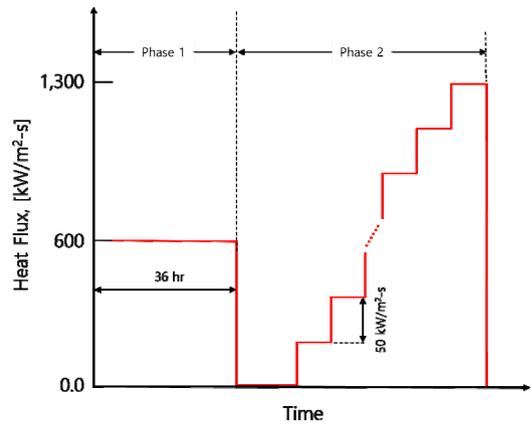


Fig. 2. Sequence of CRUD heat transfer test.

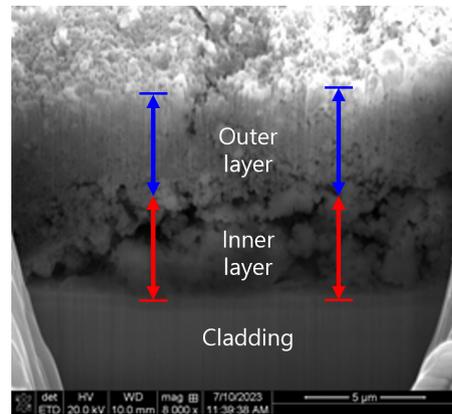


Fig. 3. Example of CRUD formed on the heater surface.

### 3. CRUD 열물성 모델링

열은 열원으로부터 반경 방향으로 피복관과 그 표면에 형성된 CRUD를 거쳐 냉각재로 전달된다. 본 연구에서는 CRUD를 추가의 열저장체로 고려하여 MARS-KS 입력자료 중 시험부 히터의 열구조물(heat structure)에 CRUD layer를 반영함으로써 CRUD를 통한 열전달을 모의하였다. 즉, 임의의 두께( $t_{CRUD}$ )와 공극률( $p$ )을 갖는 CRUD를 그림 4와 같이 피복관 표면으로부터 고체 산화물 층(solid oxide layer)과 포화 상태의 유체로 채워진 가상의 유체 층(imaginary fluid layer)으로 모델링하였다. 이때 각 layer의 두께는 각각  $(1-p) \times t_{CRUD}$ 와  $p \times t_{CRUD}$ 가 된다.

MARS-KS 코드에서 CRUD의 고체 산화물 층을 열구조물로 모델링할 때에는 열전도도(thermal

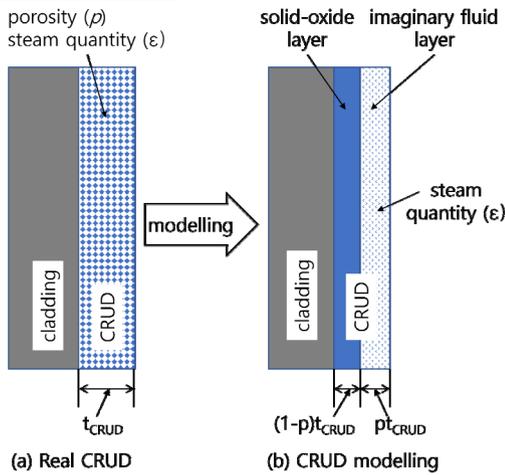


Fig. 4. CRUD layer modelling.

conductivity)와 열용량(heat capacity)에 대한 정보가 요구된다. 고체 산화물의 열전도도는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$k_{solid} = \alpha k_{NiO} + \beta k_{NiFe_2O_4} + \gamma k_{Fe_3O_4}$$

이때,  $\alpha, \beta, \gamma$ 는 CRUD를 구성하는 고체 산화물인 NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>이 차지하는 분율을 나타내고, 총합은 1.0이다. 그리고  $k_{NiO}, k_{NiFe_2O_4}, k_{Fe_3O_4}$ 는 각 고체 산화물의 열전도도이다. 고체 산화물의 열용량

은 아래와 같다.

$$(\rho C_p)_{solid} = \alpha(\rho C_p)_{NiO} + \beta(\rho C_p)_{NiFe_2O_4} + \gamma(\rho C_p)_{Fe_3O_4}$$

이때,  $(\rho C_p)_{NiO}, (\rho C_p)_{NiFe_2O_4}, (\rho C_p)_{Fe_3O_4}$ 는 각 CRUD의 고체 산화물의 열용량이다. 그리고 각 고체 산화물의 열전도도와 열용량은 표 1의 상관식을 사용하였다.

그리고 CRUD의 공극 부분을 포화상태인 물(1- $\epsilon$ )과 증기( $\epsilon$ )가 혼재된 가상의 유체 층으로 가정하였고, 열전도도와 열용량은 아래와 같이 정의하였다.

$$k_{fluid} = (1 - \epsilon)k_{l,sat} + \epsilon k_{s,sat}$$

$$(\rho C_p)_{fluid} = (1 - \epsilon)(\rho C_p)_{l,sat} + \epsilon(\rho C_p)_{s,sat}$$

이때,  $\epsilon$ 는 공극 내 증기의 양(기포율)이고, 아래첨자 (l,sat)은 포화상태의 액체, (s,sat)는 포화상태의 증기를 나타낸다.

## 4. 전산해석코드 결과

### 4.1 검증계산 분석

피복관 표면에 형성된 CRUD의 열전달 현상을 모의하기 위하여 MARS-KS 코드를 활용하여 시험부 히터의 열구조물에 CRUD layer를 추가하였다. 실험 검증계산은 phase 2 실험에 대해 수행되었고, 표 2

Table 1. Empirical correlations of thermal conductivity and heat capacity for CRUD oxides

Component	Thermal conductivity	Heat capacity		
NiO	$k = aT^3 + bT^2 + cT + d, [W/m\cdot K]^{(12)}$ $a=1.04301 \times 10^{-8}, b=3.82596 \times 10^{-5},$ $c=0.04839, d=25.54537$	$C_p = a + bT + cT^2 + dT^{-2} + eT^{-1} + fT^{0.5}, [J/mol\cdot K]^{(15)}$ $a=514.27, b=0.39759, c=3.4982 \times 10^{-5}, d=5,035,500, e=-68,525, f=-24.001$		
NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	$k = 1/(aT + b), [W/m\cdot K]^{(13)}$ $a=4.371 \times 10^{-4}, b=2.751 \times 10^{-2}$	$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4, [J/g\cdot K]^{(10)}$		
		range	298~823 K	923~1,373 K
		a	-1.206	-6.567
		b	$1.141 \times 10^{-2}$	$3.254 \times 10^{-2}$
		c	$-2.495 \times 10^{-5}$	$-5.058 \times 10^{-5}$
		d	$2.461 \times 10^{-8}$	$3.330 \times 10^{-8}$
		e	$-8.873 \times 10^{-12}$	$-7.914 \times 10^{-12}$
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	$k = 1/(aT + b), [W/m\cdot K]^{(14)}$ $a=3.40021 \times 10^{-4}, b=0.14474$	$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 + e/T^2, [J/mol\cdot K]^{(16)}$		
		range	298~900 K	900~3,000 K
		a	104.2096	200.8320
		b	178.5108	$1.586435 \times 10^{-7}$
		c	10.61510	$-6.661682 \times 10^{-8}$
		d	1.132534	$9.452452 \times 10^{-9}$
		e	-0.994202	$3.186020 \times 10^{-8}$

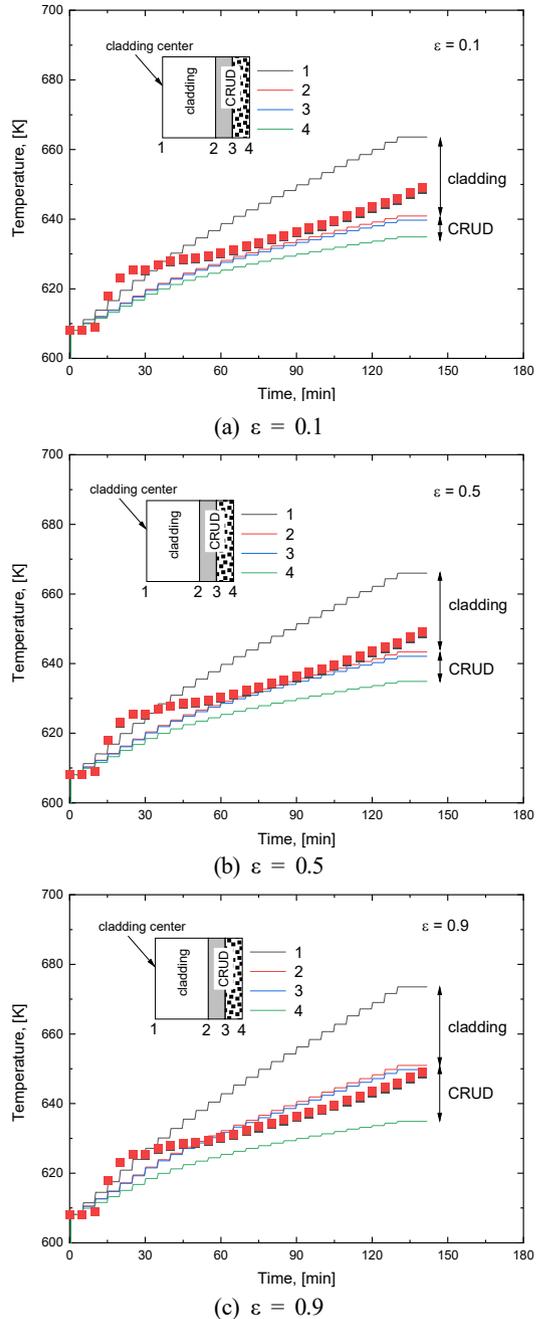
**Table 2.** Parameter values for validation calculation

Experimental variable	value
Pressure	15.5 MPa(a)
Inlet temperature	608.15 K
Inlet flowrate	1.1 kg/s
Heat flux	0.0 ~ 1,300 kW/m <sup>2</sup> -s
CRUD thickness ( $t_{CRUD}$ )	5.0 $\mu$ m
Porosity ( $p$ )	0.3
Steam quantity in the pores ( $\epsilon$ )	0.1 ~ 0.9
Fraction of solid oxide component	NiO : NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> : Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> = 0.75 : 0.1

는 검증계산을 위한 주요 열수력 변수의 입력값을 보여준다. Phase 1 동안 피복관 표면에 생성된 CRUD 두께와 CRUD 안쪽과 바깥쪽의 공극률은 일정하다고 가정하여 실험 종료 후 측정된 값을 사용하였다. CRUD의 고체 산화물은 NiO, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>로 구성되며 각각의 분율은 표와 같이 가정<sup>(6)</sup>하였다. 그리고 모델에는 CRUD 공극 내 유체의 정보( $\epsilon$ )가 필요하나, 이는 실험에서 확인하기 어렵기 때문에  $\epsilon$ 값을 표와 같은 범위에서 계산하였다.

그림 5는 CRUD layer를 반영한 MARS-KS 계산값과 UNIST-DISNY의 phase 2 실험값과의 비교를 보여준다. CRUD 공극 내 증기의 양이 증가함(그림 5(a)에서 (c) 방향)에 따라 피복관의 중심온도와 표면온도는 증가하였고, 고체 산화물 부분보다는 가상의 유체 부분에서의 온도 구배가 더 커짐을 볼 수 있다. 이는 CRUD를 순수한 고체 산화물 층과 가상의 유체 층으로 모델링하였고, 공극을 모의하는 가상의 유체 층에서 증가하는 증기의 양이 열저항으로 크게 작용하고 있음을 보여준다. 이때 phase 2 실험 동안 냉각재 온도는 약 1.28°C 증가하였고 계산은 1.41°C 상승을 예측하였는데, 이는 CRUD의 열저항 영향이 냉각재에 의한 피복관 냉각 효과보다 더 큰 것으로 분석되었다.

그림 5(a)와 (b)와 같이  $\epsilon$ 값이 0.1~0.5까지의 조건에서는 측정된 온도가 계산된 피복관 내 온도 범위 내에 있으나, 그림 5(c)와 같이 증기의 양이 많은 0.9인 경우에는 피복관 내 온도 범위가 측정값보다 높게 계산되었다. 즉,  $\epsilon$ 값이 0.5까지의 조건에서는 CRUD layer 모델에 의한 예측값은 적절한 것으로 보여, 공극 내 증기의 양은 약 0.5 이하였던 것으로 유추할 수 있다. 그러나 이는 실험 과정에서 확인이



**Fig. 5.** Temperature variation with CRUD model.

어려운 정보이므로, 만일 계통의 압력, 냉각재의 온도와 유량 등의 주어진 열수력 조건과 CRUD의 공극 내 유체의 정보와의 상관관계가 정량적으로 확인된다면, CRUD layer 모델에 의한 피복관 온도 예측값의 신뢰도는 제고될 수 있을 것으로 사료된다.

### 4.2 주요 변수에 대한 민감도 분석

실험과 동일한 계통 압력과 냉각재 온도의 조건에서 표 3과 같이 CRUD의 공극률, 공극 내 증기의 양 그리고 입구유량 변화가 피복관 중심온도에 미치는 영향을 분석하였다. 이때 앞 장의 CRUD 열물성 모델링 유무의 뚜렷한 영향을 확인하기 위하여 CRUD의 두께를 100  $\mu\text{m}$ 로 설정하고, 시험부 히터에 인가된 열유속은 600  $\text{kW/m}^2\text{-s}$ 으로 고정하였다.

**Table 3.** Calculation matrix for sensitivity calculations

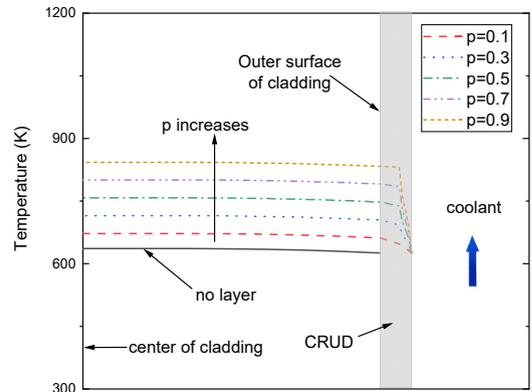
Variable	Range	Base case
Porosity, [-]	0.1~0.9	0.5
$\epsilon$ value, [-]	0.1~0.9	0.5
Inlet flowrate, [kg/s]	0.7~1.5	1.1

그림 6은 CRUD의 공극률, 공극 내 증기의 양 그리고 입구유량에 대한 피복관 온도 계산 결과를 보여주며, CRUD의 추가 열저항 모델링 유무에 대한 비교를 위해 CRUD layer를 미반영한 경우도 포함하고 있다.

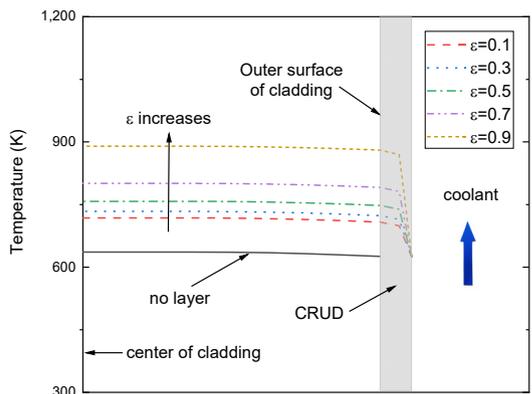
모든 계산 경우에서 CRUD layer가 반영된 모델의 경우(그림 내 점선)가 그렇지 않은 경우(그림 내 실선)보다 피복관 온도를 더 높게 예측함으로써, CRUD가 열저항으로써 피복관 온도에 미치는 영향을 정량적으로 확인할 수 있었다. 주어진 계산 범위 내에서 공극률과 공극 내 증기의 양이 증가할수록 피복관의 온도는 증가하는 결과를 보여준다. 특히 그림 6(b)와 같이 공극 내 증기의 양이 많아져 지배적인 열저항으로 작용함에 따라 피복관 중심온도의 증가폭이 더 커지는 것으로 계산되었다. 그리고 냉각재의 입구유량이 증가할수록 피복관 온도는 감소하는 경향을 보이고 있으나, 상기 두 변수에 비해 그 영향은 매우 작은 것으로 평가되었다. 즉, CRUD의 공극률과 공극 내 증기 양의 변화에 따른 큰 열저항 영향으로 피복관 온도가 민감하게 반응하는 반면, 냉각재 유량에 의한 피복관의 냉각 효과는 매우 작아 피복관 온도는 냉각재 유량에 상대적으로 덜 민감한 것으로 분석되었다.

## 4. 결 론

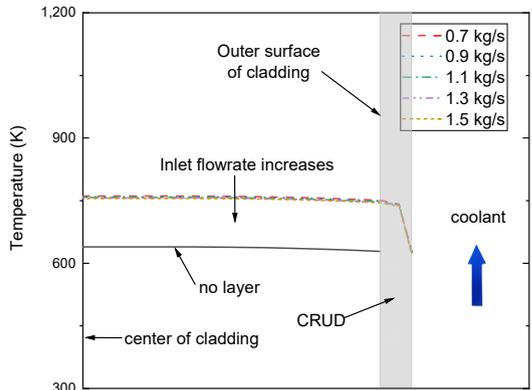
본 연구는 핵연료집합체 피복관 표면에 침적되어 열저항으로 작용하는 CRUD의 열전달 거동을 모의



(a) Effect of porosity ( $\epsilon=0.5$ ,  $\dot{m} = 1.1 \text{ kg/s}$ )



(b) Effect of steam quantity ( $p=0.5$ ,  $\dot{m} = 1.1 \text{ kg/s}$ )



(c) Effect of inlet flowrate ( $p=0.5$ ,  $\epsilon=0.5$ )

**Fig. 6.** Results of sensitivity calculation.

하기 위한 열물성 모델링과 UNIST-DISNY 실험에 대하여 MARS-KS 코드를 활용한 검증계산, 그리고 주요 열수력 변수가 피복관 온도에 미치는 영향 분석을 위한 민감도 계산을 수행하였다.

열원으로부터 냉각재로 열이 전달될 때, 피복관

표면에 침적된 CRUD를 추가의 열저항으로 고려하여, 피복관 표면으로부터 고체 산화물 층과 가상의 포화 유체 층으로 모델링하였고, 이를 MARS-KS 입력자료의 시험부 히터 열구조물에 CRUD layer를 반영하였다.

실험은 PWR형 원전의 정상출력 운전환경의 계통 압력, 냉각재 온도 및 유량 조건에서 피복관 표면에 CRUD를 침적시켰고, 열유속을 증가시키면서 피복관 온도를 측정하였다. CRUD layer을 반영한 모델의 검증계산 결과, CRUD 내 공극이 많아지거나 공극 내 증기의 양이 많아짐에 따라 피복관 중심온도와 표면온도는 증가하였고, 고체 산화물 부분보다는 가상의 포화 유체 부분에서의 온도 구배가 더 커지는 경향을 확인하였다. 주요 변수에 대한 민감도 계산 결과, 피복관 표면에 침적된 CRUD의 열저항 영향이 냉각재의 피복관 냉각 효과보다 상대적으로 큰 것으로 평가되어, 피복관 온도는 냉각재의 입구유량보다는 CRUD의 공극률과 공극 내 증기의 양에 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다.

실험 검증계산과 민감도 계산을 통해 CRUD의 공극률과 공극 내 증기의 양은 피복관 온도 계산에 대한 민감변수로 작용하는 것을 확인하였다. 그러나 본 연구의 CRUD layer에 대한 열물성 모델은 CRUD 산화물의 구성비와 주어진 열수력 환경에서 두께, 공극률, 공극 내 증기의 양 등 CRUD의 주요 특성에 대한 정량적인 정보를 필요로 한다. 따라서 열수력 조건과 CRUD 특성 정보와의 상관관계 규명을 위한 상세 연구는 본 연구의 CRUD 열물성 모델에 의한 피복관 온도 예측값의 신뢰성 제고에 기여할 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구 원자력안전규제기술개발 사업의 연구결과입니다 (No. 2106022).

## 참고문헌

- (1) Deshon, J., 2006, "Evaluation of Fuel Cladding Corrosion and Corrosion Product Deposits from Callaway Cycle 14," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1013425.
- (2) Deshon, J., 2011, "Simulated Fuel Crud Thermal Conductivity Measurements Under Pressurized Water Reactor Conditions," Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1022896.
- (3) Yeon, J. W., Choi, I. K., Park, K. K., Kwon, H. M., and Song, K., 2010, "Chemical Analysis of Fuel CRUD Obtained from Korean Nuclear Power Plants," *J NUCL MATER*, Vol. 404, No. 2, pp. 160-164. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.07.024>
- (4) Hu, R., Kazimi, M. S., and Leyse, M. E., 2009, "Considering the Thermal Resistance of CRUD in LOCA Analysis," *T AM NUCL SOC*, Vol. 101, pp. 590-592.
- (5) Yeo, D. and NO, H., 2017, "Modeling Heat Transfer Through Chimney-Structured Porous Deposit Formed in Pressurized Water Reactors," *INT J HEAT MASS TRAN*, Vol. 108, pp. 868-879. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.046>
- (6) Lee, J., Jeong, H., and Bang, Y., 2018, "Thermal Resistance Effects of CRUD and Oxide Layers to the Safety Analysis," *Proc. of Annual Topical Meeting on Reactor Fuel Performance*, Prague, Czech Republic.
- (7) Dumnernchanvanit, I., Zhang, N. Q., Robertson, S., Delmore, A., Carlson, M. B., Hussey, D., and Short, M. P., 2018, "Initial Experimental Evaluation of CRUD-resistant Materials for Light Water Reactors," *J NUCL MATER*, Vol. 498, pp. 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.10.010>
- (8) Baek, S. H., Shim, H. S., Kim, J. G., and Hur, D.H., 2018, "Effect of Chemical Etching of Fuel Cladding Surface on CRUD Deposition Behavior in Simulated Primary Water of PWRs at 328 °C," *ANN NUCL ENERGY*, Vol. 116, pp. 69-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.030>
- (9) Baek, S. H., Shim, H. S., Kim, J. G., and Hur, D. H., 2019, "Effects of Heat Flux on Fuel CRUD Deposition and Sub-cooled Nucleate Boiling in Simulated PWR Primary Water at 13 MPa," *ANN NUCL ENERGY*, Vol. 133, pp. 178-185. doi:<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.05.022>
- (10) Kim, J. Y., Lee, Y., Kim, J., and Bang, I. C., 2022, "The DISNY Facility for Sub-cooled Flow Boiling Performance Analysis of CRUD Deposited

- Zirconium Alloy Cladding Under Pressurized Water Reactor Condition: Design, construction, and operation,” *NUCL ENG TECHNOL*, Vol. 55, No. 9, pp. 3164-3182. doi:<https://doi.org/10.1016/j.net.2023.06.006>
- (11) KINS, 2021, “MARS-KS Code Manual,” Korea Institute of Nuclear Safety, Daejeon, *KINS/RR-1822*.
- (12) Kingery, W. D., Francl, J., Coble, R. L., and Vasilos, T., 1954, “Thermal Conductivity: X, Data for Several Pure Oxide Materials Corrected to Zero Porosity,” *J AM CERAM SOC*, Vol. 37, No. 2, pp. 107-111.
- (13) Nelson, A. T., White, J. T., Anderson, D. A., Aguiar, J. A., McClellan, K. J., Byler, D. D., Short, M. P., and Stanek, C. R., 2014, “Thermal Expansion, Heat Capacity and Thermal Conductivity of Nickel Ferrite ( $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ ),” *J AM CERAM SOC*, Vol. 97, No. 5, pp. 1559-1565. doi:<https://doi.org/10.1111/jace.12901>
- (14) Noda, Y. and Naito, K., 1978, “The Thermal Conductivity and Diffusivity of  $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$  ( $0 \leq x \leq 1.5$ ) from 200 to 700K,” *NETSUSOKUTEI*, Vol. 5, No. 1, pp. 11-18.
- (15) Prostakova, V., Chen, J., Jak, E., and Decterov, S.A., 2012, “Experimental Study and Thermodynamic Optimization of the CaO–NiO, MgO–NiO and NiO–SiO<sub>2</sub> Systems,” *Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, Vol. 37, pp. 1-10. doi:<https://doi.org/10.1016/j.calphad.2011.12.009>
- (16) NIST Chemistry WebBook, 2023, “<https://webbook.nist.gov/>”, Chemistry WebBook, *SRD 69*.