

## 스마트 제어봉집합체의 낙하시간 평가

김경련\*\* · 장기종\* · 박진석\* · 이원재\*

### Drop Time Evaluation for SMART Control Rod Assembly

Kyoungh Rean Kim\*\*, Ki Jong Jang\*, Jin Seok Park\*, Won Jae Lee\*

*Key Words* : SMART(일체형원자로), Fuel assembly(핵연료집합체), Control rod assembly(제어봉집합체), Guide tube(안내관), Wall shear stress(벽 전단응력), Friction drag(마찰저항), Adverse pressure gradient(역 압력구배), Boundary layer separation(경계층 박리), Pressure drag(압력저항)

#### ABSTRACT

The control rod assemblies do freely fall into the reactor core by the gravity from the control rod drive mechanism. In order to achieve a rapid shutdown and control the reactor power, it is required to insert control rod assemblies as soon as possible. In this paper, we evaluated the drop time and flow characteristics caused around guide tube for SMART(System-integrated modular advanced reactor) control rod assembly. Numerical analyses are carried out with FLUENT program of computational fluid dynamics. This study results show that the drop time of the control rod assembly in the operating condition of SMART is more 20 percent rapidly than the drop time of the room temperature and ambient atmosphere condition.

#### 1. 서 론

스마트(System-integrated Modular Advanced Reactor)는 한국원자력연구원에서 한국 독자 모델로 개발중인 중소형의 일체형원자로이다. 스마트원자로는 핵연료집합체(Fuel assembly)부터 발생된 중성자의 핵분열로 전력을 생산한다<sup>[1]</sup>. 스마트원자로의 장착된 제어봉집합체(Control rod assembly)는 원자로의 출력을 제어하는 목적으로 사용된다. 제어봉집합체는 원자로의 비상사고로 인해 원자로를 신속하게 정지할 필요가 있을 시 중성자 흡수물질인 제어봉집합체를 원자로 노심에 신속히 삽입함으로써 원자로를 안전하게 정지시킨다<sup>[2]</sup>.

제어봉집합체는 원자로 상단에 위치한 제어봉구동장치(Control rod drive mechanism)에 의해 상하로 이동된다. 제어봉집합체는 제어봉구동장치로부터 낙하신호를 전달받으면 중력에 의해 원자로 노심에 자유낙하 된다.

제어봉집합체의 낙하시간은 스마트원자로를 안전하게 운영하기 위해 반드시 평가 및 수행하여야 한다. 따라서, 제어봉집합체의 낙하시간은 스마트원자로의 안전운전 측면에서

최소화 하는 것이 좋다.

본 논문은 전산유체역학 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 제어봉집합체의 낙하시간과 유동현상을 분석한다. 제어봉집합체의 낙하시간은 스마트원자로의 운전조건과 상온·상압 조건에서 수행되었다. 아울러, 원자로냉각재의 유속변화가 제어봉집합체의 낙하시간을 지연시키는지 파악하였다.

#### 2. 스마트원자로의 제어봉집합체

##### 2.1. 기본형상

제어봉집합체는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 핵연료집합체의 안내관에 삽입되도록 배열된 24개의 제어봉과 스파이더(Spider) 집합체로 구성되어 있다. 제어봉은 거미발 모양의 구조물에 의해 제어봉구동장치의 구동축과 연결된다<sup>[3]</sup>.

본 논문에 사용된 계산영역은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 제어봉 1개와 핵연료집합체의 안내관 및 충격흡수관이다. 제어봉집합체 및 핵연료집합체는 형상이 매우 복잡하기 때문에 전부 모델링하여 계산하기에는 현실적으로 불가능하다. 따라서, 제어봉 1개가 핵연료집합체에 삽입되는 조건으로 계산영역을 설정한다. 핵연료집합체의 안내관은 제어봉집합체

\* 한국원자력연구원 스마트개발본부 기술검증부

† 교신저자, E-mail : Kimkr1@kaeri.re.kr

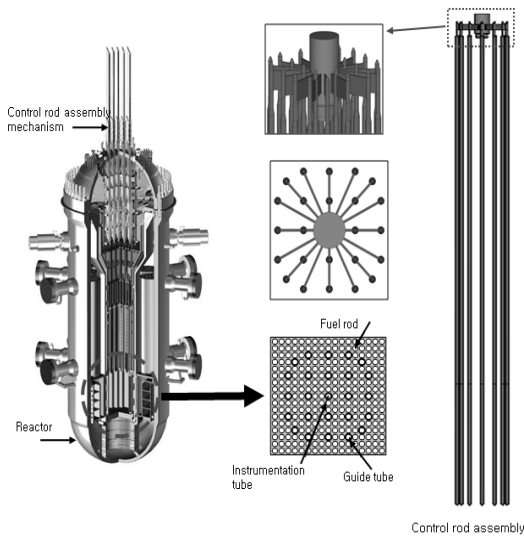


Fig. 1 Schematic diagram of SMART control rod assembly

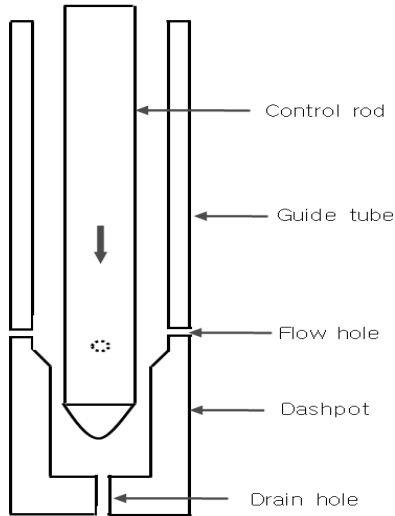


Fig. 2 Domain region for SMART control rod

가 안전하게 삽입될 수 있도록 안내역할을 한다. 충격 흡수관은 제어봉집합체와 핵연료집합체를 보호하기 위해 중력에 의해 낙하되는 제어봉집합체의 낙하속도를 감소시키는 역할을 한다<sup>[4]</sup>.

## 2.2. 해석방법 및 경계조건

제어봉집합체의 낙하시간에 사용된 코드는 FLUENT 12.0을 사용하였으며, 격자생성 프로그램은 Hypermesh 8.0이 사용되었다. 격자는 약 100,000개이며, 난류모델은 Standard  $k-\epsilon$ 이다. CFD 해석을 수행하는데 사용된 경계조건은 안내관의 벽면 경계, 입구 경계 및 출구 경계로 구분할 수 있다. 입구 경계는 유동이 균일한 것으로 가정하여 원자로냉각재 유체의 속도(2.0 m/s)로 설정한다. 출구 경계는 Pressure outlet으로 설정하였으며, 제어봉의 낙하 및 핵연료집합체의

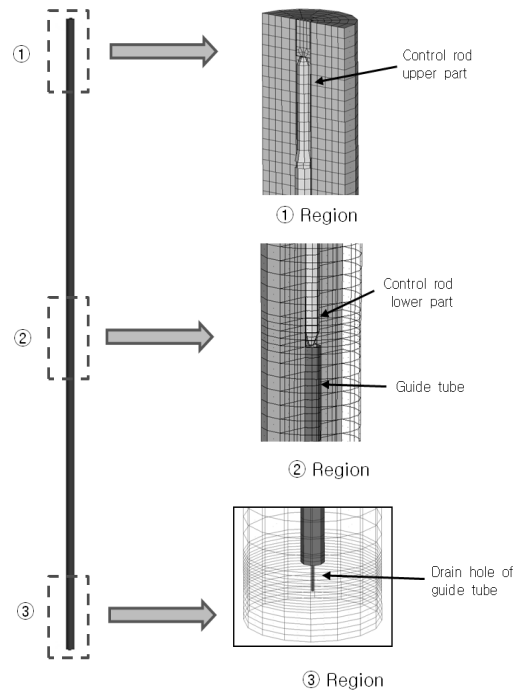


Fig. 3 Computational meshes for SMART control rod

안내관의 벽면 경계는 Dynamic Mesh를 사용한다.

제어봉의 낙하에 대해 비정상 상태(Unsteady condition)의 해석을 수행하기 위해서는 움직이는 부분의 경계면의 변화를 고려할 필요가 있다. 이러한 기능에 대해 유한체적법의 상용 유동해석 프로그램인 FLUENT는 Dynamic mesh method를 제공하여 경계면의 변위 조건을 모사한다. 원자로 냉각재의 운전조건은  $P=15 \text{ MPa}$ ,  $T=323 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\rho=670 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=7.887 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{S/m}^2$  이다.

본 논문에서 사용된 격자는 Fig. 3과 같으며 계산의 수렴성을 높이기 위해 약 90% 정렬격자를 사용하였다.

## 3. 해석결과 및 고찰

### 3.1. 제어봉집합체의 낙하시간

Fig. 4는 시간의 변화에 따른 제어봉집합체의 낙하시간이다. 제어봉집합체는 제어봉구동장치에서 신호가 분리되면 중력에 의해 자유낙하 된다. 제어봉집합체가 중력장 내에서 자유낙하 할 경우 중력장이 제어봉집합체에 힘을 가하여 양(+)의 일을 해주고 결과적으로 제어봉집합체의 운동에너지가 증가 된다.

제어봉집합체의 수중 낙하운동은 안내관(Guide tube) 내부의 경로에 의해 발생하는 핵연료집합체의 안내관 및 충격 흡수관(Dashpot)의 벽면과의 마찰력과 수중 낙하에 의한 유체간의 항력에 의해 수력저항을 받는다.

제어봉의 낙하는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 충격흡수관 이전까지는 시간의 변화에 따라 가속운동을 한다. 그러나 제어

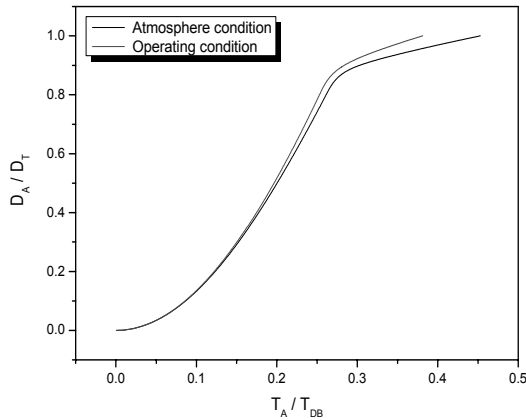


Fig. 4 Drop time of control rod with operating condition

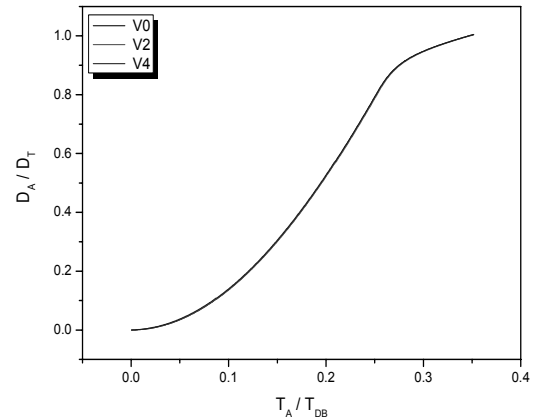


Fig. 5 Drop time of control rod with reactor coolant velocity

봉이 충격흡수관에 진입한 순간 간극이 감소하여 유체의 수력저항력 증가로 인한 낙하시간 지연효과가 발생하게 된다. 즉, 제어봉에 작용한 수력저항은 핵연료집합체의 안내관, 충격흡수관 및 제어봉의 표면에서의 벽 전단응력(Wall shear stress)에 의한 마찰저항(Friction drag)과 역 압력구배(Adverse pressure gradient) 하에 있는 경계층의 박리(Boundary layer separation)로 인한 압력저항(Pressure drag)이 발생된다. 마찰저항이나 압력저항은 경계층 내의 유동 상태에 좌우된다.

경계층 내의 유동이 층류인 경우에 비해 난류인 경우 레이놀즈 응력(Reynolds stresses)의 생성으로 벽 전단응력이 커져 마찰저항이 증가한다. 제어봉 표면에서 발생하는 마찰저항을 저감하는 방안 중의 하나가 경계층 내의 유동을 층류화시켜 벽 전단응력을 줄이는 것이다. 하지만, 핵연료집합체의 기하학적인 조건과 유동조건에서 경계층 내의 난류운동을 완전히 층류유동으로 제어하는 일은 유체의 속도와 레이놀즈 수 및 구조물의 형상 때문에 매우 어려운 일이다.

상온·상압 운전조건에서 제어봉집합체의 낙하시간은 유체의 밀도 증가로 인해 벽면에서 작용한 전단응력과 압력저항이 크게 작용하여 제어봉집합체의 낙하시간이 지연된다. 상온·상압 운전조건에서 제어봉집합체의 낙하시간은 스마트원자로의 운전조건에 비해 약 20% 지연되었다. 여기서, 실제 낙하거리  $D_A$ 이며, 총 낙하거리  $D_T$ 이다. 실제 낙하시간  $T_A$ 는 설계기준인  $T_{DB}$ 로 무차원화 하였다.

원자로냉각재의 유속은 펌프의 유량 및 운전조건에 따라 변한다. 따라서, 스마트원자로를 안전하게 운영하기 위해서는 원자로냉각재의 유속의 변화가 제어봉집합체의 낙하시간에 미치는지 파악할 필요가 있다.

Fig. 5는 원자로냉각재의 유속의 변화에 따라 제어봉집합체의 낙하시간이다. 원자로냉각재의 유속조건은 0 m/s, 2.0 m/s, 4.0 m/s이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 제어봉집합체의 낙하시간은 원자로냉각재의 유속변화에 영향을 미치지 않았다. 즉, 원자로냉각재가 유입되는 유동구(Flow hole)의

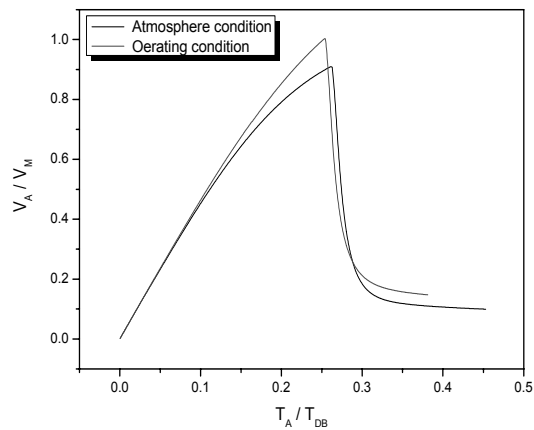


Fig. 6 Drop velocity of control rod with time

직경과 배수구(Drain hole)의 직경은 매우 작아 지중에 의해 낙하되는 제어봉집합체의 영향을 미치지 못한다.

### 3.2. 제어봉집합체의 낙하속도

Fig. 6은 핵연료집합체 안내관에서 제어봉집합체의 낙하속도를 나타낸 것이다. 제어봉집합체의 최고 낙하속도는 충격과 무게로 인한 제어봉집합체의 가속운동으로 충격흡수관 이전에서 발생된다. 여기서, 실제 낙하속도  $V_A$ 는 최대 낙하속도  $V_M$ 로 무차원화 하였다. 제어봉집합체의 최고 낙하속도는 유체의 점성과 밀도의 감소로 인해 스마트원자로의 운전조건에서 나타났다. 제어봉집합체의 낙하속도는 충격흡수관에서 간극이 감소하여 벽 전단응력과 압력저항의 증가로 인해 급격히 감소한다. 아울러, 제어봉집합체의 종단속도(Terminal velocity)는 2가지 조건에서 발생되지 않았다.

### 3.3. 유동구에서 토출유량

핵연료집합체의 안내관 측면에는 유동구가 설치되어 있다. 유동구는 핵연료집합체에서 발생한 열량 제거와 제어봉의 낙하속도를 지연시키는 목적으로 사용된다.

따라서, 유동구는 핵연료집합체와 제어봉집합체를 설계하

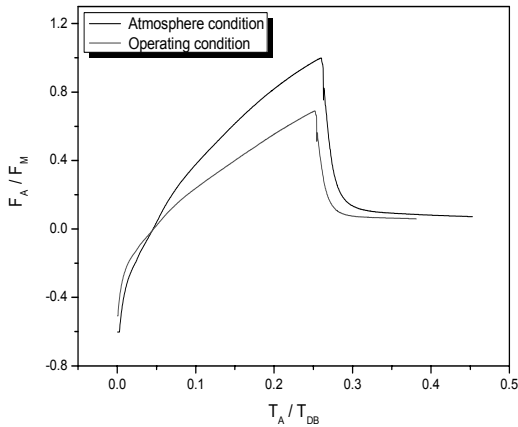


Fig. 7 Mass flow rate in the flow hole with time

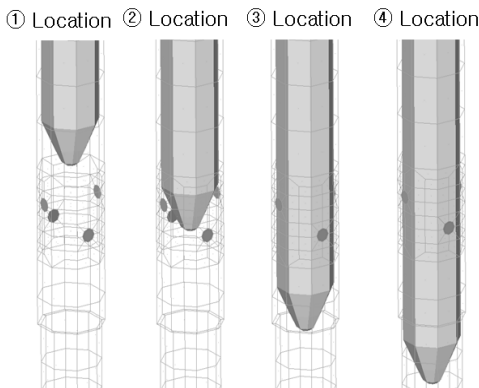
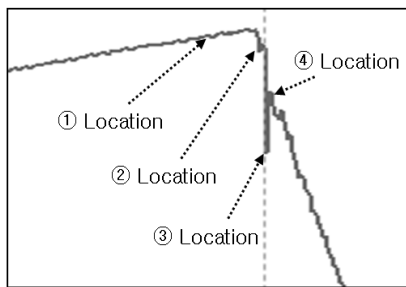


Fig. 8 Flow phenomenon near flow hole

는데 참고자료로 사용될 수 있다.

Fig. 7은 제어봉집합체의 낙하시간에 대한 유동구에서 토출유량을 나타낸 것이다. 제어봉집합체의 낙하초기의 유량은 원자로냉각재의 유입속도 영향으로 유동구에서 음(-)의 값을 나타낸다. 안내관의 유량은 압력증가로 인하여 유동구의 출구로 선형적으로 토출된다. 여기서, 실제 토출유량  $F_A$ 는 최대 토출유량  $F_M$ 로 무차원화 하였다.

Fig. 8은 제어봉집합체가 충격흡수관에 진입한 순간 유동패턴의 형태를 보여주고 있다. 제어봉집합체의 낙하 ① 지점은 유동구의 도달하기 이전의 상태로 제어봉집합체의 낙하

가속으로 인해 선형적으로 토출유량이 증가한다. 제어봉집합체의 낙하 ② 지점은 유동구에 도달한 순간을 보여주고 있으며 토출 유량이 가볍게 출렁거리는 것을 볼 수 있다. 제어봉집합체의 낙하 ③ 지점은 충격흡수관에 진입한 순간으로 제어봉집합체의 낙하속도가 급격하게 감소함으로서 토출유량도 크게 출렁거린다. ④ 지점은 제어봉집합체가 충격흡수관에서 시간의 변화에 따라 낙하되어 유동구로 토출유량도 급격하게 감소되는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 스마트원자로의 출력을 제어 및 정지시키기 위해 반드시 필요한 제어봉집합체의 낙하시간 평가와 유동현상에 대해 분석하였다. 상온·상압운전 조건에서의 제어봉집합체의 낙하시간은 유체의 밀도와 점성의 영향으로 인해 스마트원자로의 운전조건에 비해 약 20% 늦게 낙하되었다. 따라서, 스마트원자로의 낙하시간은 상온·상압 운전조건에서 평가하는 것이 보수적인 결과를 얻을 수 있다. 아울러, 원자로냉각재의 유속은 제어봉집합체의 낙하시간에 영향을 크게 미치지 않았다.

#### 후 기

본 연구는 교육과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 관련부서에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Kyeong-Lak Jeon., 2010, "Technical Verification for SMART Fuel," KAERI-CM1186-2010, pp. 8~10.
- (2) Kyoung-Rean Kim, and Yeong-Garp Cho., 2005, "An Experimental Study on the Factors for the Performance of a Shutoff Unit in the Half-Core Test Loop of HANARO," transactions of KNS autumn meeting.
- (3) Kyoung-Rean Kim., 2010, "Drop Time of Control Rod Assembly," KAERI 130-TC301-002.
- (4) Ki-Seong Choi, and Li-Kon Kim., 1994, "Development of a Couputer Program for Drop Time and Impact Velocity of the Rod Cluster Control Assembly," Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 26, No. 2, pp. 197~204.
- (5) Merle C. Potter, David C. Wiggert, and Midhat Hondzo., 2002, "Mechanics of Fluids," Third Edition, Prentice-Hall, Inc, California.