`2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

MELCOR 코드의 피복재 부풀음 모델 효과

Modeling of Clad Ballooning in MELCOR

김시달, 김동하, 박선희, 박수용
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

피복재의 부풀음과 이로 인한 피복재 파손 위치 및 파손 시간 그리고 수소 발생은 중대사고시 노심 손상 진행에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 본 논문에서는 피복재의 부풀음 모델이 포함된 기존 중대사고 해석 용 전산 코드인 MAAP4 코드 와 SCDAP/RELAP5 코드에 대한 피복재의 부풀음 모델을 검토 한 후 MELCOR 1.8.4 코드에 모델을 추가하여 사고경위를 분석하였다. 피복재의 부풀음 영향을 분석하기위해 피복재의 부풀음 모델 영향이 잘 나타나는 대표적인 사고 경위인 대형 냉각재 상실사고를 선정하였다. 분석결과 모델을 적용한 경우가 노심 노출 시간과 노심 파손시간 그리고 원자로 파손 시간이 빠르게 나타남을 볼 수 있었으나 수소 생성량은 거의 차이를 보이지 않았다. 모델의 영향이 예상외로 적게 나타난 이유로는 피복재 부풀음으로 인한 유량 재분배 효과를 고려하지 못했기 때문으로 추정되며, 유량 재분배에 대한 분석이 추후 요구된다.

Abstract

Clad ballooning may substantially decrease the flow of fluids through the affected core region and may expose the inner cladding surface to oxidation in the vicinity of rupture sites. The cladding ballooning model was not included in MELCOR 1.8.4. and consideration of incorporating the cladding ballooning model is scheduled as a post-1.8.4 release activity. The purpose of this paper is to analyze the effect of the clad ballooning model by the modified MELCOR 1.8.4 with this model. The typical accident sequence of a large LOCA scenario is selected. The clad ballooning model accelerates the accident progression compared to that without the ballooning model. The amount of hydrogen does not change much and it may be caused by ignoring the effect of flow area change. Future study is planning to analyze the flow redistribution.

1. 서론

피복재의 부풀음과 이로 인한 피복재 파손 (위치 및 시간)은 중대사고시 노심 손상 진행에 중요한 영향을 끼칠 수 있다. 연료봉의 붕괴열로 가열된 피복재는 온도 증가에 따라 부풀게 되고 연료봉 직경

의 증가로, 과열된 노심 냉각재 채널 안의 유로 직경 (hydraulic diameter) 축소로 유동 면적을 변경시킬 수 있다. 이것은 상대적으로 유로가 유지되는 덜 부풀은 채널로의 증기 유동 전환, 열 전달과 산화에 대한 국부 연료봉 면적 증가, 그리고 국부 유동 저항의 증가로 인한 upper plenum-core 자연 순환 유동 율을 감소시키는 효과를 갖고 있다. 현재의 MELCOR 1.8.4에는 피복재 부풀음 현상에 대한 모델이 고려되어있지 않으며, 앞으로 출시될 판에 추가할 항목으로 계획되어 있는 실정이다. 따라서 여기서는 MAAP4 [1]와 SCDAP/RELAP5 [2]에서 사용되고 있는 피복재 파손 모델을 검토한 후 이 모델이 없는 MELCOR 1.8.4 [3] 코드에 이 모델을 추가하여 사고경위를 분석함으로서 MELCOR 코드를 개선하였다. 피복재의 부풀음 모델 영향을 분석하기 위해 선정된 사고경위는 한국형 차세대원전의 대형냉각재 상실사고이며 이 사고는 피복재의 부풀음 모델 영향이 잘 나타나는 대표적인 사고경위이다.

2. MELCOR 모델 개선

피복재의 부풀음은 잠재적으로 fuel pin 직경의 증가뿐만 아니라 과열된 노심 냉각재 채널 안에서 유로 직경과 유동 면적을 변경할 수 있다. 이것은 다음과 같은 많은 중요한 효과를 갖고있다. 즉, 덜 부풀은 채널로의 유동 전환, 열 전달과 산화에 대한 국부 fuel pin 면적 증가 그리고 국부 유동 저항의 증가는 upper plenum-core 자연 순환 유동 율을 감소시킨다. 결과적으로 피복재 부풀음은 손상된 노심 지역을 통과하는 유체의 흐름을 감소시키고 파손 부위 근처에서 내부 피복재 산화 표면적을 증가시킨다. 또한 연료봉의 피복재 부풀음은 LOFT LP-FP-2, PBF SFD 1.4, CORA-15, 그리고 TMI-2 원자로와 같은 저압실험에서 중요하게 초기 노심 손상과정에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 이러한 피복재 부풀음 모델은 MELCOR 1.8.4에 포함되어있지 않다. 기존 코드 중 MAAP에서는 피복재 부풀음 모델을 여러 가지 실험의 합성 결과를 나타내는 NUREG/CR-0497 [4]에 주어진 함수관계에 근거했으며 SELAP에서는 중대사고시 연료봉 안에서 발생하는 elastic-plastic deformation 을 계산하기 위한 mechanistic model을 이용하였다. 일반적으로 부풀음은 hoop stress가 burst stress를 초과하거나, 또는 피복재 온도가 사용자 지정온도 (예로 Zircaloy 용융온도) 보다 높으면 시작되며 축 방향의 임의의 노드의 피복재가 손상 될 때까지 계속되도록 모델 되어있다.

2.1 Burst Stress

tangential failure 또는 burst stress ($\sigma_{\theta B}$)에 대한 상호 관계는 참고문헌 [5]에 다음과 같이 나타나있다:

$$
\begin{aligned}
\sigma_{\theta B} &= 1.36\, K_A && T < 750K \\
\sigma_{\theta B} &= 46.86\, K_A \exp\left(\frac{-1.99 \times 10^6}{T^2}\right) && 750 \le T < 1050K \qquad (1) \\
\sigma_{\theta B} &= 7.7\, K_A && T \ge 1050K
\end{aligned}
$$

여기서 K_A 는 아래 식에 의해 주어지는 강도 계수이다

$$K_A = 1.18 \times 10^9 + T[4.55 \times 10^5 + T(-3.28 \times 10^3 + 1.73T)] \qquad T < 750K$$

$$K_A = 2.52 \times 10^6 \exp\left(\frac{2.86 \times 10^6}{T^2}\right) \qquad 750 \le T < 1090K \tag{2}$$

$$K_A = 1.84 \times 10^8 - 1.44 \times 10^5 T \qquad 1090 \le T < 1255K$$

$$K_A = 4.33 \times 10^7 + T[-6.69 \times 10^4 + T(37.58 - 7.33 \times 10^{-3} T)] \qquad T \ge 1255K$$

2.2 Hoop Stress

hoop stress 는 다음식에 의해 계산된다:

$$s_H = \frac{(P - P_{PS})\, r}{t} \tag{3}$$

여기서 P는 내부 가스 압력, P_{PS}는 일차계통 압력, t는 피복재 두께, 그리고 r 은 피복재 반경을 나타낸다.

변형 율을 고려한 피복재 두께(t) 및 피복재 반경(r)은 다음과 같이 구해진다:

$$t = \frac{t_o}{1 + e} \tag{4}$$

$$r = r_o (1 + e) \tag{5}$$

여기서 t_o 는 처음 두께, r_o 는 처음 반경, 그리고 ε 은 변형 율을 의미한다.

2.3 MELCOR 코드의 모델 현황

LOFT 평가 연구[5]는 MELCOR [3]의 부족한 점으로 부풀음 모델을 지적하였다. 이러한 피복재 부풀음 모델은 MELCOR 1.8.4이후에나 포함시키는 것으로 계획되어있다. 이 모델이 없는 경우 기존의 MELCOR 코드는 사용자가 지정한 온도보다 피복재 온도가 높아지면 피복재의 파손을 가정하며, 연료봉 갭에 있는 핵분열 생성물이 1차 계통으로 누출되기 시작한다. 각 노심 cell용 피복재 파손 온도는 RNGAPijj00 입력에 주어지며 default값은 1173K (900 C) [3] 이다. 간극으로부터 방출되는 핵분열 생성물은 파손이 일어나는 노심 cell과 연관된 channel control volume으로 전달되며, CORijj01 입력에서 정해진다.

2.4 독립 프로그램 개발

피복재 부풀음 현상을 모의하기 위하여 독립 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 MELCOR 1.8.4 subroutine CORRN1에 첨가함으로써 피복재 부풀음 현상을 고려하였다. 산화 표면적을 계산하기 위하여 다음처럼 원래의 표면적에 부풀음으로 야기되는 효과를 고려하였다. AHTOX(ICL,IA,IR) =

ASURC(ICL,IA,IR) * (1 + FECL(ij)) 여기서 FECL은 부풀음 때문에 생기는 Fuel Rod Strain Ratio이며, 피복재 부풀음 모델에 의해 산화면적 AHTOX가 증가하면 수소발생량이 증가하게 된다. 이 CORRN1 subroutine은 MELCOR에서 열의 생성과 전달, 산화, 노심 파편물의 형성과 방출, 노심의 용융과 재배치, 하부헤드의 가열과 파손등을 취급하는 COR package에 속해있으며 노심 열전달과 산화를 계산한다.

3. 피복재의 부풀음 모델 영향 평가

피복재의 부풀음은 고압사고 보다는 저압사고 때 영향이 크게 나타나므로, 이 모델의 영향을 분석하기 위해 한국형 차세대원전의 대형 냉각재 상실사고 (파단 크기 0.5 ft^2)를 선정하였다. 대형 냉각재 상실사고 분석에 사용된 초기조건 및 기본가정은 참고문헌 [6]에 나타나있다. 여기서는 피복재 부풀음 모델을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우에 대하여 주요 사고진행시간, 산화표면적 (AHTOX) 과 CLAD 파손시간 그리고 수소 생성량 등을 비교하여 모델의 효과를 분석하였다.

3.1 주요사고진행.

노심이 노출되는 시간은 피복재 부풀음 모델을 사용하지 않은 경우와 사용한 경우 모두 114초로, 피복재 부풀음으로 인한 영향은 없어 보인다. 노심 dryout 시간도 모델을 사용한 경우 (6030초) 와 사용하지 않은 경우 (6043초)가 거의 같으며, 노심 파손 시간은 모델을 사용한 경우 (7614초)가 사용하지 않은 경우 (7717초) 보다 103초 빠르며, 원자로 손상시간은 모델이 있는 경우 (7639초) 가 없는 경우 (7789초) 보다 150초 빠르게 나타나, 피복재 부풀음 모델이 사고진행에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다. (표1 참조)

3.2 산화 표면적

산화 표면적은 피복재의 변형 율 (FECL) 값에 비례하도록 모델 되어 있다. 차세대 원전의 노심에 대한 MELCOR 입력은, 노심을 반경 방향으로 3개의 채널과 축 방향으로 13개의 노드로 구성하였으며, 이중 제일 낮은 축 방향의 1,2,3 노드는 원자로 하부용기의 빈 공간을 나타내고 있다. 모두 30개의 노드 중 피복재 부풀음에 의한 영향을 비교하기 위한 대상을 선택하기 위해 우선 연료봉 전체 노드에 대한 피복재 변형 율 값을 비교하였다. 표 2는 4295초 때 피복재 부풀음 모델이 포함된 경우 피복재 변형 율의 값으로 (피복재 부풀음 모델이 없는 경우 피복재 변형 율 값은 0이다), 이 표에서 보듯이 11,12,24,25,36 그리고 37번 노드가 다른 노드에 비해 Peaking factor 영향으로 피복재 변형 율 값이 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 여기서는 11,24, 그리고 37번 노드를 선택하여 모델의 영향을 비교 평가하였다.

피복재 부풀음은 노심이 노출 될 때부터 시작하여 파손 될 때까지 계속되며, 그림 1에 나타났듯이 4295초에 피복재 변형 율 값이 최대가 되며 표 2에서처럼 산화표면적이 노드에 따라 입력 값으로 주

어진 36% 까지 거의 순간적으로 증가함을 알 수 있다.

3.3 피복재 파손시간

중대사고가 발생하여 노심이 노출 될 경우 핵연료 피복재인 지르카로이는 수증기와 산화 반응을 일으켜 많은 수소를 발생시킨다. 동시에 이 반응은 매우 많은 열을 발생시키는 발열 반응이므로 사고진행을 촉진시켜 핵연료 용융 및 재배치, 그리고 원자로파손에 크게 영향을 미친다. 피복재 부풀음을 고려하면 표면적이 증가하여 반응열이 더 발생하기 때문에 노드 온도가 올라간다. 그림 2 ~ 4는 노드번호 11, 24, 37에 대해 피복재 부풀음 모델의 유무에 대한 피복재 온도를 나타낸다. 그림에서 보여 주듯이 세 노드에서 피복재 부풀음 모델이 있는 경우의 온도가 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 피복재와 연료 펠릿 사이의 핵분열 생성물은 피복재 손상 후 1차 계통으로 방출되므로 gap release 관점에서 피복재 파손시간은 중요한 의미를 갖는다. 기존 모델에서는 피복재 온도가 1173K에 도달하면 파손되는 것으로 가정하였고, 링별 손상 시간은 표 3에 정리되어 있다. 피복재 파손 모델이 포함되면, 표에서 보듯이 온도 기준 시점보다 링별로 55초, 105초, 그리고 130초 빨라지고, 모델이 없는 경우에 비하면 65초, 113초, 그리고 138초 빨리 파손됨을 알 수 있다.

3.4 수소 생성량

수소 생성량을 비교해 보면 모델에 의한 수소 발생량 차이는 거의 없음을 알 수 있다. (표1 참조)

4. 결론 및 추후 연구 내용

피복재 부풀음 모델을 MELCOR에 추가하여 한국형 차세대원전의 대형 냉각재 상실사고에 적용한 결과 모델을 적용한 경우가 노심 노출 시간과 노심 파손시간 그리고 원자로 파손 시간이 빠르게 나타남을 알 수 있었으며 모델에 의한 수소 발생량 차이는 거의 없음을 확인하였다. 모델의 영향이 예상외로 적게 나타난 이유로는 피복재 부풀음으로 인한 유량 재분배 효과를 고려하지 못했기 때문으로 예상되며, 따라서 유량 재분배에 대한 모델 보완의 필요성이 확인되었다.

참고문헌

1. “MAAP4 (Modular Accident Analysis Program for LWR Plants Code) Manual,”EPRI, May 1994.
2. “SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, Volume4: MATPRO-A Library of Material Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis,” NUREG/CR-5273,EG&G-2555,Vol.4 R3, February 1990.
3. R.M. Summers,et al., “MELCOR Computer Code Manuals (Version 1.8.4),” SNL, NUREG/CR-6119, SAND97- 2185, July 1997.
4. D. L. Hagman, G. A. Reymann, and R. E. Mason, MATPRO - Version 11 (Revision 1) - A Handbook of Material Properties for Use in the Analyses of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior. NUREG/CR-0497, TREE-1280, February 1980..
5. L.N.Kmetyk, MELCOR 1.8.1 Assessment: LOFT Integral Experiment LP-FP-2, SAND92-1373, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM(December 1992).
6. S.Y.Park, "Accident Analyses on TMLB' and LOCA for KNGR using MELCOR Code," KAERI, KAERI/TR-

1677/2000, November 2000.

표 1. LOCA시 주요사건 발생 시간 및 발생된 수소량

주요시간대	Without Ballooning Model		With Ballooning Model	
	Time(sec)	Integrated H2 mass (kg)	Time(sec)	Integrated H2 mass (kg)
- LOCA Initiation	100		100	
- Core Uncovery				
Top of fuel (-1.592 m)	114	0	114	0
Half core (-3.49 m)	180		180	
Core dryout (-5.40 m)	6043		6030	
- Initiation of Zircaloy cladding oxidation	3860	9.07E-2	3860	9.07E-2
	4100	5.60	4100	6.01
	4300	54.13	4300	58.86
	4600	261.54	4600	265.46
	4840	363.74	4840	363.50
	6000	363.74	6000	363.50
- Core collapse / Core support Plate Failure	7717	395	7614	390
- Vessel Failure	7789	395	7639	390

표 2. 모델 적용 시 4295 초때 노심 노드별 FECL값

노드 번호	FECL 값	노드 번호	FECL 값	노드 번호	FECL 값
13	2.08 E-6	26	7.92 E-6	39	2.21 E-6
12	3.60 E-1	25	3.60 E-1	38	1.64 E-1
11	3.60 E-1	24	3.60 E-1	37	3.60 E-1
10	4.41 E-2	23	1.87 E-2	36	3.60 E-1
9	2.08 E-6	22	7.94 E-6	35	2.21 E-6
8	2.08 E-6	21	7.94 E-6	34	2.21 E-6
7	2.08 E-6	20	7.94 E-6	33	2.21 E-6
6	2.08 E-6	19	7.93 E-6	32	2.21 E-6
5	2.08 E-6	18	7.93 E-6	31	2.21 E-6
4	2.08 E-6	17	7.92 E-6	30	2.21 E-6
3	0	16	0	29	0
2	0	15	0	28	0
1	0	14	0	27	0

표 3. Clad 파손시점 시간

모델 / 노드 번호	Without Ballooning Model (온도 기준 *)	With Ballooning Model (온도 기준 *)	With Ballooning Model (Stress 기준)
	Time (sec)	Time (sec)	Time (sec)
11 (1st Ring)	3960	3950	3895
24 (2nd Ring)	3908	3900	3795
37 (3rd Ring)	4233	4225	4095

* : 1173 K에 도달한 시간

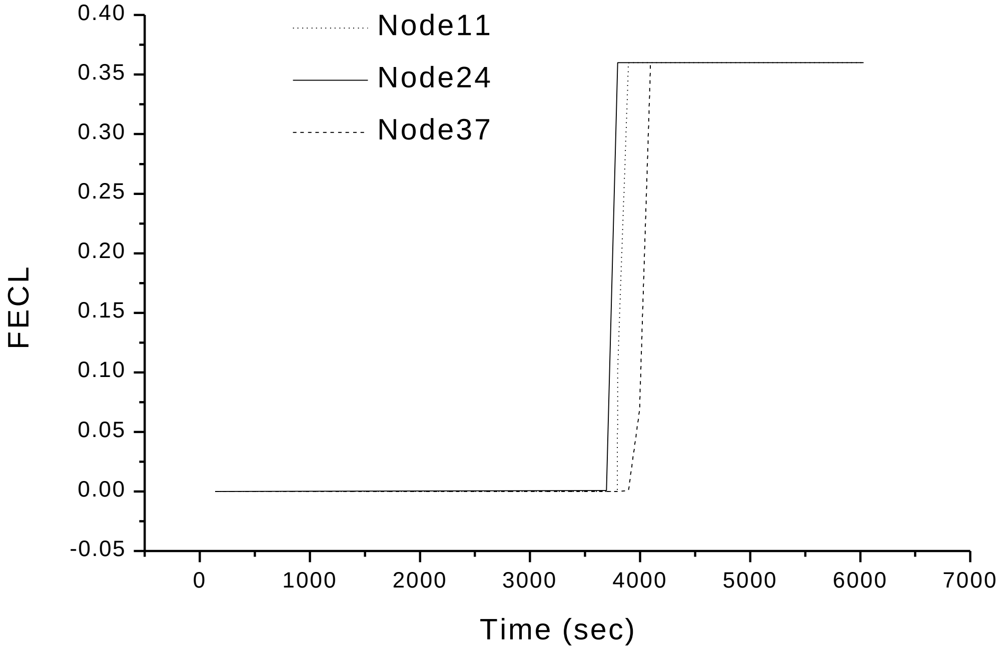

그림 1. **시간에 따른 노드** 11,24, **그리고** 37**번에서의** FECL **값 변화**

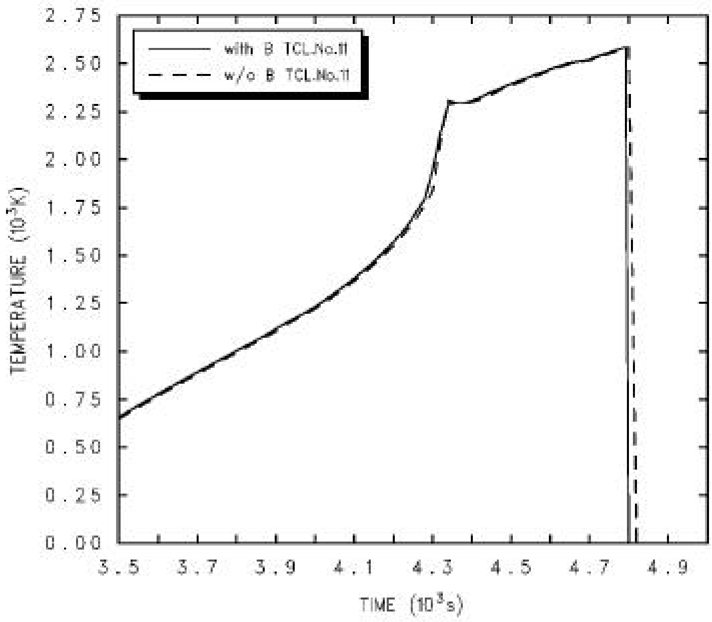

그림 2. 11**번 노드의** Cladding **온도**

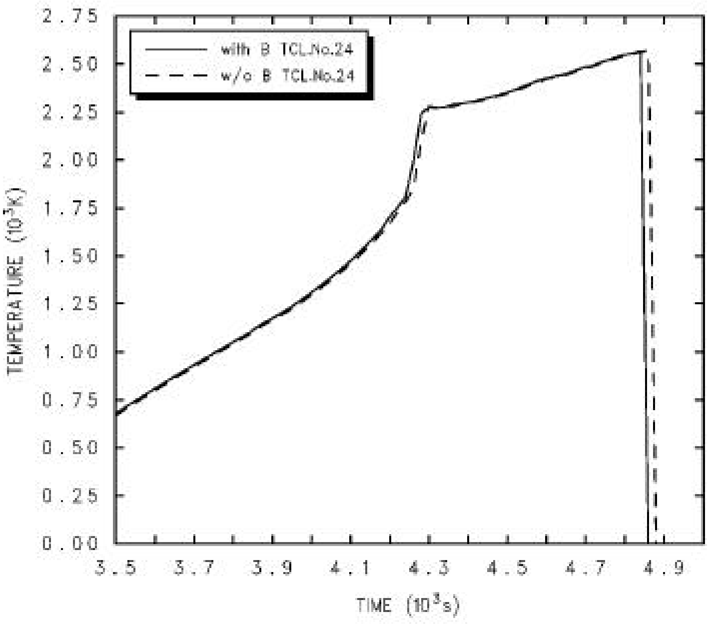

그림 3. 24**번 노드의** Cladding **온도**

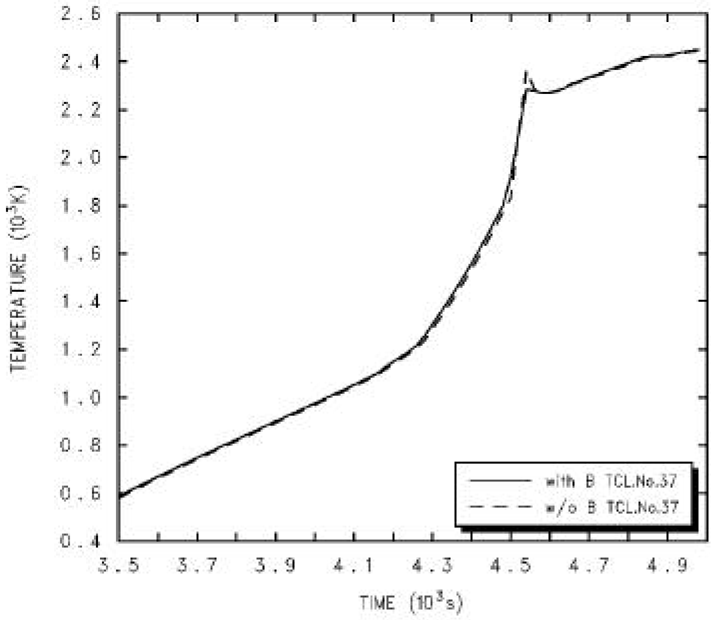

그림 4. 37**번 노드의** Cladding **온도**