

부분충수운전중 잔열제거상실시 종합반응 척도방법론 평가

오형수, 김성호, 하상준
한국전력공사 전력연구원

Evaluation of an Integral Response Scaling Methodology in Loss of RHR during Mid-Loop Operation

H. S. Oh, S. H. Ghyym, and S. J. Ha
KEPRI

1. 서론

경제적·기술적 문제점으로 인하여 실물 크기의 원자력발전소 계통을 제작하기에는 많은 어려움이 수반되므로 많은 척도 방법론들이 제안되고 있다. Larson, Ishii, Kocamustafaogullari, Ishii/Kataoka, Reyes, No 등이 제시한 척도 방법론이 있고, 원자력 발전소 계통을 모델링 하는데 가장 널리 쓰이는 척도 방법론으로는 선형 척도법[1], 체적 척도법[1], 그리고 Ishii에 의해 유도된 단상 및 이상 자연순환에 대한 척도 법칙[2,3]들이 있다. 그러나, 이 척도법칙들은 잔열제거 상실사고시 RCS 계통 내에 발생하는 현상을 모사하는데 한계가 있다. 선형척도법은 강제 대류나 취출과 같이 중력의 영향을 무시할 수 있는 경우, 체적척도법은 길이와 압력이 보존되는 경우에만 유효하다. Ishii의 척도법은 길이가 축척되고 압력을 줄일 수 있으나, 속도가 축척되어야 하므로 Pot-Boiling이나 Blowdown 등의 과도현상들에서 문제점을 야기시킨다.

그러므로, 잔열제거 상실사고시 RCS 계통 내에 발생하는 현상을 잘 모사하고 길이가 축척되는 종합반응 척도방법론을 개발하였다[4]. 이 논문에서는, 개발된 일반적 척도 방법론의 타당성 검증을 위하여 RELAP5/MOD3.2를 이용하여 표준원전과 축척모델에 대한 부분충수운전중 잔열제거 상실사고 분석을 수행하고 그 계산 결과를 비교하였다.

2. 개발된 종합반응 척도방법론

종합반응 척도방법론은 경계조건과 초기 조건을 가진 3차원 평균 미분방정식으로부터 출발한다. 평균화 과정은 경계조건들을 지배 방정식에 포함되도록 하고 유용하고 지배적인 정보들을 함유하지만 국부적인 정보들을 제거시킨다. 경계조건과 초기조건을 가지는

3차원 평균 미분방정식들이 유동의 단면적에 대해 적분이 되면 국부적인 벽면에서의 경계 조건과 초기조건은 1차원 평균 미분방정식에 포함된다. 여러 Component들로 이루어진 전체 시스템에 대한 스케일링을 위해서는 각 Component를 기초로 한 지배방정식들을 합해서 최종적인 적분과정을 거친다. 척도과정에 대한 우선 순위를 두어서 단계별로 중요한 척도 법칙들을 유도하고, 주요변수들에 대한 상사비를 제시하였다. 기존 척도방법론에서 제시한 주요변수들에 대한 상사비와 종합반응 척도방법론에서 제시한 주요 변수들에 대한 상사비는 표 1과 같다. 여기서, 높이 비(L_R)는 5:1, 면적비(a_R)는 411:1, 체적비(V_R)는 2055:1로 하였다[5].

3. 척도방법론의 평가

가. RELAP 모델링

KSNP와 축척모델은 동일하게 두 개의 Loop로 구성되어 있고, 60개의 Volume과 171개의 Junction으로 Nodalization하였다. 각 Loop에는 1개의 고온관(HL)과 증기발생기(SG) 1대, 2개의 흡입관, 2개의 원자로 냉각재 펌프(RCP), 그리고 2개의 펌프 방출관(CL)으로 구성되어 있다. 가압기는 Loop A에 설치되어 있다. 또한, 원자로 정지후 일차 냉각계통 냉각재의 온도는 거의 대기온도와 같으므로 대기로의 열 손실은 무시하고 핵연료봉과 증기발생기의 전열관을 제외한 다른 구조물들은 모델링에서 제외하였다. 가압기 보수용 출입구와 같은 RCS 개구부는 time dependent volume 및 single junction으로 모델링 하였으며, RHR 상실사고 이전의 정상 상태를 모의하기 위해 RHR 계통은 time dependent volume과 time dependent junction으로 모델링 하였다.

나. 사고초기 조건 및 분석 수행

KSNP와 축척모델에 대한 기하학적 조건 및 정상적인 부분충수운전시 초기 조건은 표 2에 나타났다. RHR 상실사고시 정상 상태 초기조건을 얻기 위하여, 정상적인 부분충수운전 상태를 모사하여 1000초 동안 과도 계산을 수행하였다. 또한, 사고분석 계산시에는 계산 시간 및 질량 오차를 고려하여 최대 시간 구간은 0.05초로 선택하였다[6].

여기서는, 여러 상황의 부분충수운전시 RHR 상실사고중 가압기 상부에 위치한 가압기 보수용 출입구가 개방되어 있는 경우로 제한하였다. 이때, 사고는 원자로 정지후 3일에 발생하는 것으로 가정하고, SG 이차측으로의 열전달도 가능한 상태이다.

다. 계산 결과

가압기개구부 열린 상태에서 RHR 상실시 일어난 주요 사고 경위/상태는 표 3 - 표 4 등과 같다. 그림 1은 상부 노심에서의 액체 온도 및 포화 온도를 나타낸 것으로, 이 그림에서 보인 바와 같이 KSNP 및 축척모델의 상부 노심에 존재하는 냉각수는 각각 855초, 745초에 포화 상태에 도달하였다.

노심 상부 플레넘의 압력은 그림 2에서와 같이, 노심 비등 이후 서서히 증가하기 시작하여 KSNP의 경우 대략 2000초 이후에는 가압율이 감소하면서 압력 섭동이 시작되었다. 이 현상은 고온관에서 밀립관으로의 액체 견인 현상이 발생하지 않을 정도로 고온관의 수위가 낮아질 때까지 반복되지만, 축척모델은 이 같은 압력 섭동 없이 서서히 증가하였다. 그 이후, KSNP와 축척모델의 압력은 최대 압력치에 도달할 때까지 계속하여 증가하였으며, 최대압력 도달후, 증기 생성보다는 핵연료 피복재 가열에 대부분의 붕괴열이 소모됨으로 압력은 감소하였다.

고온관 및 저온관에서의 액적율을 나타내는 그림 3 및 4에서와 같이, 노심 비등 이후 RCS 수위가 증가하여 KSNP 및 축척모델의 경우 각각 약 1015초, 755초에 완전히 고온관을 채우는 반면, 저온관의 수위는 사고초기부터 감소하기 시작하여 약 2085초, 2040초에는 냉각수가 완전히 배수되었다. 또

한, 고온관의 냉각수는 1110초, 850초부터 가압기로 이동하기 시작하여 그림 5와 같이, 가압기 내에 축적되었다. KSNP의 경우, 그림 2와 같은 섭동이 발생하여 액체견인현상 종결과 함께 가압기의 수위도 준정상상태를 유지하다가 RCS 압력 감소로 인하여 다소 수위가 감소되었다. 감소된 수위에 해당되는 물은 다시 고온관으로 유입되어 그림 3에서와 같이, 완전히 배수된 고온관에 다시 출현하였다. 이에 반해, 축척모델은 수위 섭동 현상이 발생하지 않으며 사고초기 최대 수위에 도달하여 준정상상태를 유지하였다가 압력 감소로 수위가 다소 감소하였다. KSNP 및 축척모델의 가압기 최대 수위는 각각 4.50m, 6.35m로, 축척모델의 경우 많은 양의 물이 가압기로 유입되었다.

그림 6과 7은 각각 가압기 보수용 출입구를 통하여 방출되는 기체의 방출 유량 및 기체의 누적 방출량을 나타내고 있다. KSNP의 증기 방출 유량은 RCS 압력 변화에 의해 섭동 현상이 나타났지만, 축척원전은 이 같은 현상없이 대략 2000초 이후 많은 양의 증기를 방출하여 결과적으로는 그림 8과 같이, RCS 개구부를 통한 액체와 기체의 누적 방출량에 많은 차이를 나타냈다. 이로 인하여 전열관으로 가는 증기의 양이 감소하게 되어 그림 9의 SG 이차측으로의 열전달량에 차이를 나타냈으며, 대략적으로 축척모델의 열전달량은 KSNP의 50%에 불과하였다. 즉, KSNP는 총 붕괴열의 60% 이상이 두 대의 SG 전열관에서 제거되지만, 축척모델은 불과 30%만이 제거되었다.

가압기 보수용 출입구를 통한 연속적인 방출로 인하여 그림 10에서와 같이 RCS 재고량이 감소하는데, KSNP에 비하여 축척모델의 RCS 재고량이 더 많은 감소량을 나타냈다. 노심 노출은 11975초, 9400에 발생하였으며, 그림 12에서와 같이 KSNP 및 축척모델은 각각 12680초, 10195초 이후 피복재의 온도가 급격히 증가하였다.

4. 결론

축척모델은 KSNP의 압력 섭동 현상을 제대로 모사하지 못하였으며 이로 인하여 상당히 많은 양의 냉각수가 가압기로 유입되었

고 또 일부는 개구부로 방출되었다. KSNP에서 11.01kg이던 개구부를 통한 액체 누적 방출량이 축척모델에서는 8445kg이었고, 증기 누적 방출량 역시 KSNP는 42260kg, 축척모델은 43690kg로서 축척모델의 경우, 많은 양의 증기와 액체가 개구부로 방출됨을 알 수 있었다. 또한, 이로 인하여 SG로 유입되는 증기의 응축 효과도 다르게 나타났다. 사고동안 KSNP는 초기 붕괴열의 60% 이상의 열이 SG에서 제거되지만, 축척모델은 불과 30% 정도의 열만이 제거되었다.

결과적으로, 가압기 보수용 출입구를 통한 과도한 방출량에 의하여 KSNP에 비하여 축척모델에 대한 전반적인 사고가 빨리 전개되었다. 즉, KSNP 및 축척모델의 노심 노출 시간은 각각 11975초, 9400초 이었다.

5. 참고문헌

[1] A.N. Nahavandi, F.S. Castellana, And E.N. Moradkbanian, "Scaling Laws For Modeling Nuclear Reactor System," Nucl. Sci. Eng., 72, 75 (1979).

[2] M. Ishii And I. Kataoka, "Scaling Laws For Thermal-Hydraulic System Under Single Phase And Two-Phase Natural Circulation," Nucl. Eng. Des., 81, 411 (1984).

[3] M. Ishii, S.T. Revanka Et Al., "Scientific Design of Purdue University Multi-Dimensional Integral Test Assembly(Puma) For Ge Sbw,r," NUREG/Cr-6309 (March 1996).

[4] "열수력 실증실험 기초 연구", TM.97NJ25.M1998.612, 1998.

[5] "정지운전중 안전해석 실증 실험", TM.97NJ25.M1999.453, 1999.

[6] "Analysis of Loss of RHR Events During Mid-loop Operation of UCN3&4 Nuclear Power Plants," Korea Power Engineering Company, INC., KOPEC/NED/TR-1, February 1997.

표 1. 여러 척도 법칙에 대한 척도 변수들의 비교

변수	선형 축소법	체적 축소법	Ishii'의 방법론	현재 방법론
axial length	l_R	1	l_R	l_R
flow area	l_R^2	a_R	a_R	a_R
pipe diameter(H)	l_R	$a_R^{2/5}$	$a_R^{1/2}$	$a_R^{2/5}$
channel diameter(V)	1	1	1	1
heated fuel length	l_R	1	l_R	l_R
SG tube length	l_R	1	l_R	1
break area	l_R^2	a_R	$a_R l_R^{1/2}$	a_R
injection area	l_R^2	a_R	$a_R l_R^{1/2}$	a_R
velocity(V)	1	1	$l_R^{1/2}$	1
velocity(H)	1	1	$a_R^{1/4}$	$a_R^{1/4}$
flow rate	l_R^2	a_R	$a_R l_R^{1/2}$	a_R
core power	l_R^2	a_R	$a_R l_R^{1/2}$	a_R
power/volume	l_R^{-1}	1	$l_R^{-1/2}$	l_R^{-1}
no. of heated tubes	-	a_R	$a_R l_R^{-1/2}$	a_R
time	l_R	1	$l_R^{1/2}$	l_R

* H: Horizontal pipe
V: Vertical channel

표 2. KSNP 및 축척모델의 부분충수운전시 초기 조건

주요 변수	KSNP	축척모델
잔열 (MWth)	12.1617 (정상출력의 0.432%)	0.02959 (정상출력의 0.432%)
RCS 압력 (MPa)	0.1013	0.1013
RCS 고온관의 온도 (K)	324.7	324.7
RCS 저온관의 온도 (K)	316.0	316.0
RCS 수위 (m)	고온관의 중심선	고온관의 중심선
이차측 압력 (MPa)	0.1013	0.1013
이차측 온도 (K)	316.0	316.0
SG 수위 (m)	11.0 / Empty	2.2 / Empty
초기 냉각재 재고량(kg)	106485	60.73
RHR 펌프의 유량율 (kg/sec)	157	0.382
가압기 보수용 출입구 ID (m)	0.4064	0.02

표 3. 가압기 보수용 출입구 개방시의 주요 사고경위

KSNP(초)	SDM(초)	주요 사건
0	0	잔열제거 상실사고 발생
855	745	노심 상부 플레넘의 냉각수 포화상태에 도달함
1015	755	고온관이 냉각수로 채워짐
1110	850	가압기에 냉각수 축적 시작됨
2085	2040	저온관 냉각수 배수
7630	4075	고온관에서의 액체건인현상 종결
8795	5840	고온관 냉각수 배수
11975	9400	노심노출 현상 발생
12680	10195	핵연료 피복재 온도 상승 시작
17095	14350	핵연료 피복재 온도 1743 K에 도달함

표 4. RELAP/MOD3 분석 결과

	노심비등 시간 (초)	최대 RCS 압력 (MPa)	최대 PZR 수위 (m)	노심노출 시간 (초)	노심가열 시간 (초)
KSNP/SDM	855/745	0.174/0.162	4.50/6.35	11975/9400	12680/10195

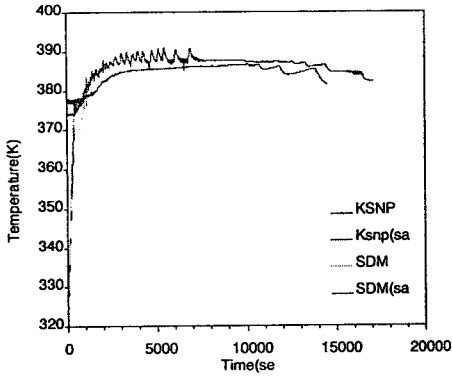


그림 1. 상부 노심에서의 온도 변화

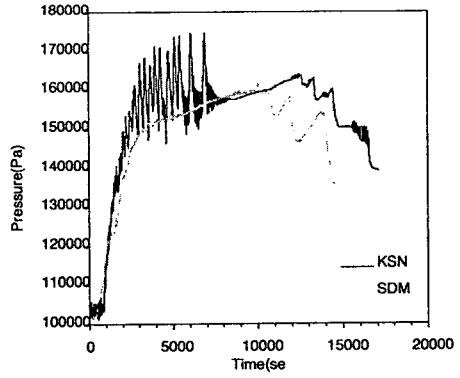


그림 2. 노심상부 플레넘에서의 압력 변화

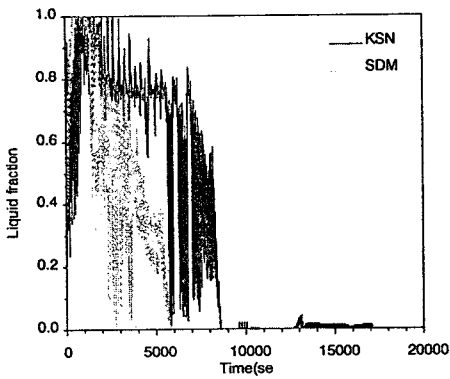


그림 3. 고온관에서의 액적율

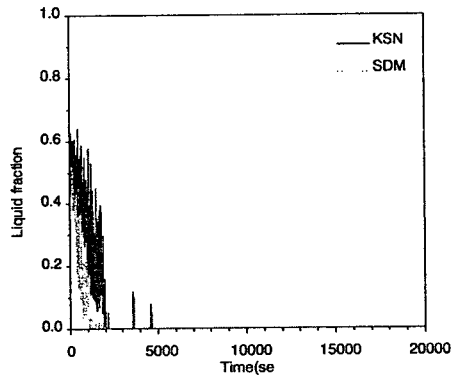


그림 4. 저온관에서의 액적율

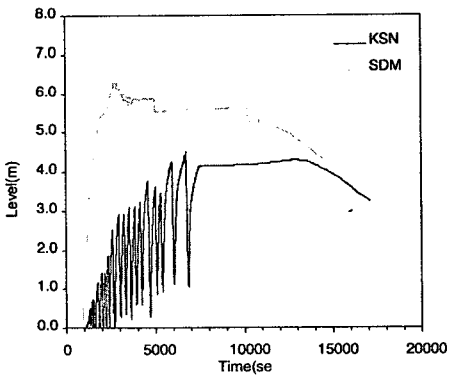


그림 5. 가압기의 응축수위

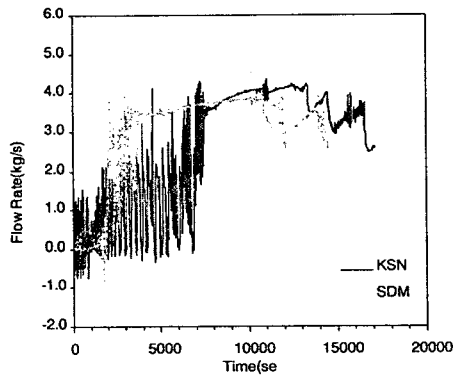


그림 6. 개구부를 통한 증기 방출유량

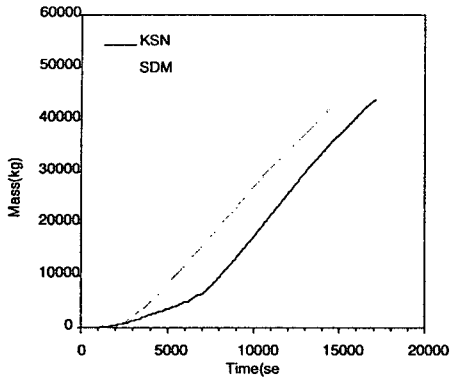


그림 7. 개구부를 통한 증기의 누적 방출량

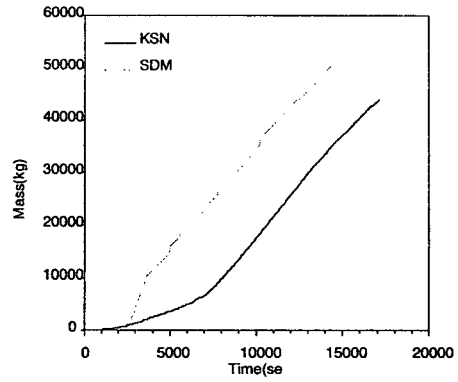


그림 8. 개구부 통한 증기와 물의 누적 방출량

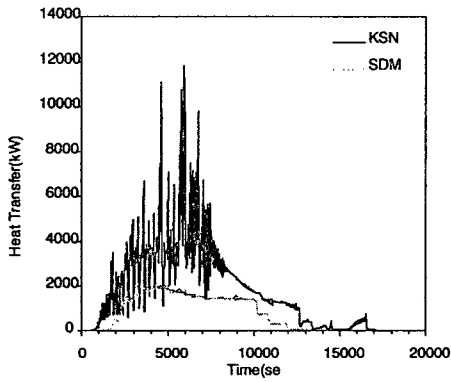


그림 9. SG 이차측으로의 열전달

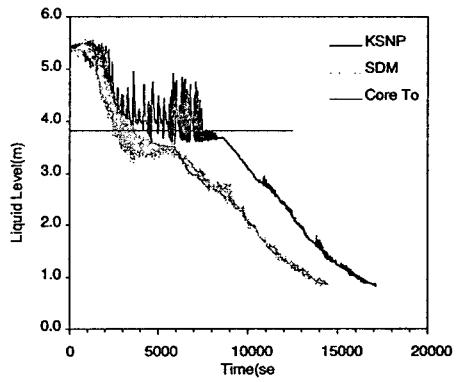


그림 10. 원자로 용기 내에서의 응축 수위

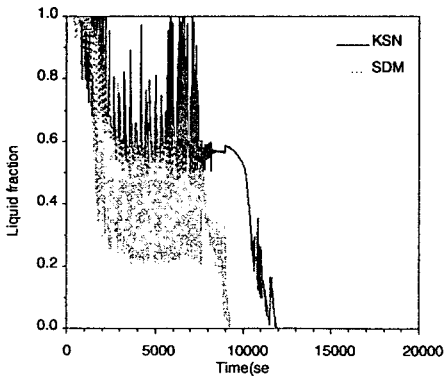


그림 11. 노심 상부 플레넘에서의 액적율

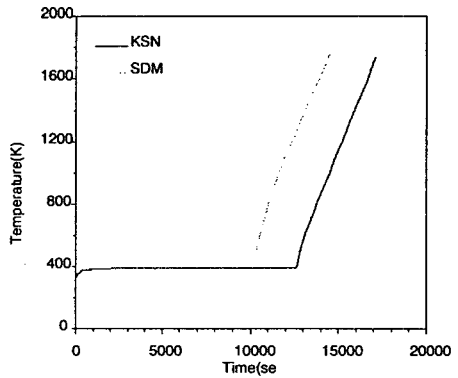


그림 12. 핵연료 피복재의 온도변화