

최적 노심입구온도 분포모형을 이용한 고리 1호기 주증기관 파단사고 분석

엄길섭, 이병일, 김정진, 김희철

한국원자력연구소

박군철

서울대학교

요 약

주증기관 파단사고가 발생하여 서로 다른 온도 및 유속을 갖는 냉각재가 원자로 용기에 유입될 때 downcomer 및 lower plenum 에서의 혼합현상을 3차원 열수력 분석코드 COMMIX-1B[1]로 모사하여 노심입구에서의 온도분포를 결정하고, 결정된 온도분포를 이용하여 주증기관 파단사고에 대한 열적여유도를 분석하였다. 분석은 주증기관 파단사고시 노심입구온도의 비대칭성이 가장 큰 고리 1호기를 선택하여 수행되었으며, 15주기 교체노심 설계 결과와 비교하여 열적여유도가 다소 증가함을 확인하였다.

1. 서론

주증기관 파단사고는 주증기관 하나가 완전히 파단되어 일차측 증기가 파단부분을 통해 누출됨에 따라 일차측의 감압 및 감온을 야기시키는 사고이다. 일차측의 감온은 냉각재 밀도 부(-) 반응도계수에 의해 노심에 정(+) 반응도를 삽입시키며, 이에 따라 노심출력이 증가하여 핵연료봉의 건전성을 위협하게 된다. 일반적으로 발전소 보호계통은 주증기관 파단사고가 발생하면 이 사고로부터 노심을 보호하기 위해 신속히 원자로를 정지시키고, 안전주입수를 일차계통에 주입시키며, 주증기관 격리밸브를 폐쇄하여 건전한 증기발생기로부터 주증기관을 통해 누출되는 증기를 차단하게 된다. 이때, 안전주입수는 고농도 붕산수로서 충분한 부(-) 반응도를 노심에 삽입시켜 일차측 냉각재의 온도 감소에 따른 노심출력의 증가를 방지하게 된다. 한편, 주증기관 격리밸브가 폐쇄되면 파단된 증기발생기로부터는 증기가 파단부분을 통해 계속 누출되나, 건전한 증기발생기로부터는 더 이상의 증기누출이 없게 된다. 바로 이 주증기관 격리밸브의 작동이 일차계통을 비

대칭적으로 감온시켜 노심입구에 불균일한 온도분포를 유발시킨다. 불균일한 노심입구온도분포는 노심출력, 침투출력인자 및 축방향 출력분포 결정에 큰 영향을 미치며, 따라서 주증기관 파단사고 안전성 분석 측면에 있어서 정확한 노심입구 온도분포모형의 결정은 필수적이라 하겠다.

특히, 고리 1호기는 증기발생기가 두 개인 2루프 발전소이며, 더우기 증기발생기와 증기 유량 제한기가 서로 분리되어 있다. 따라서, 주증기관 파단사고가 발생할 때, 다른 3루프 발전소나 증기발생기와 증기 유량제한기가 서로 부착되어 있는 발전소에 비해 일차측의 비대칭성이 더욱 커지게 된다.

그러므로, 고리 1호기에서는 파단 위치 및 소외전원 가용 여부에 따라 아래와 같이 네 가지 경우로 나누어서 주증기관 파단사고 안전성 분석을 수행하게 되며, 본 연구에서도 이를 따랐다.

CASE A : 증기 유량제한기 하류관 파단 및 소외전원 가용

CASE B : 증기 유량제한기 하류관 파단 및 소외전원 상실

CASE C : 증기 유량제한기 상류관 파단 및 소외전원 가용

CASE D : 증기 유량제한기 상류관 파단 및 소외전원 상실

2. 고리 1호기 lower plenum 혼합현상 분석

2.1 고리 1호기 원자로용기 모델링 및 lower plenum 혼합현상 분석 방법

고리 1호기 주증기관 파단사고시 lower plenum 에서의 혼합현상을 3차원 열수력 분석코드 COMMIX-1B로 모의하기 위해, 원통 좌표계를 사용하여 반경방향 9개 노드, 축방향 24개 노드 및 방위각 16개 노드로 고리 1호기 원자로 용기를 구성하였다 (표 1). 이때, lower plenum에서 상세한 냉각제 혼합 거동모사가 필요하므로, downcomer에서 보다 lower plenum에서 촘촘한 노드 구조를 구성하였다. 저온관 입구노드는 축방향 노드번호 22, 방위각 노드번호 2, 10으로 할당하였으며, downcomer는 반경방향 노드번호 7-8, 노심내부는 반경방향 노드번호 1-5로 구성하였다. Lower plenum 부품중 tie plate는 축방향 노드번호 5, lower core support plate는 축방향 노드번호 10-11, diffuser plate는 축방향 노드번호 13, 그리고 lower core plate는 축방향 노드 16으로 할당하였으며, 각각의 내부구조물, support column 및 instrumentation guide tube는 해당되는 노드에서 다공도 (porosity)를 입력함으로써 처리하였다. 한편, 관심있는 결과는 노심입구에서의 온도분포이므로, 노심입구 (축방향 노드 17) 상부의 노심, upper plenum 및 고온관 모델링은 계산의 효율성을 위해 배제하였다.

COMMIX-1B 코드로 모의하기 위해 사용된 모든 경계조건들은 고리 1호기 교체노심 설계 자료로부터 취했다(표 2). 이때, 유속 경계조건들은 저온관 유량, 냉각제 밀도 및 저온관 단면적으로부터 산출하였으며, 온도 경계조건들은 노심입구가 아닌 원자로용기 입구에서의 값들을 취했다.

마지막으로, 소외전원이 상실되어 노심유량이 감소될 때 lower plenum 에서의 혼합현상이 변화되는 양상을 조사하기 위하여, 증기 유량제한기 상류가 차단되고 소외전원이 상실되는 경우에 (CASE D) 대해 노심유량이 각각 사고초기 유량의 60% (CASE D-1) 및 40% (CASE D-2) 되는 시점에서 혼합현상을 조사하였다.

2.2 고리 1호기 lower plenum 혼합현상 분석 결과

고리 1호기 주증기관 차단사고시 가장 제한적인 두 경우에 대해 COMMIX-1B 코드로 모의된 노심입구 온도분포들이 그림 1 및 2 에 제시되어 있다. 여기서, 저온유체의 유입은 1시 반 방향, 고온유체의 유입은 7시 반 방향으로 나타냈다. 그림에서 관측되듯이 서로 다른 온도를 갖는 유체가 원자로 용기로 유입될 때, lower plenum에서 혼합이 거의 일어나지 않음이 관측되었다. 한편, 소외전원이 가용한 경우와 상실된 경우가 서로 다른 온도분포를 보여주고 있는데, 이는 inlet nozzle 로 유입되는 냉각재의 유속이 lower plenum에서의 혼합현상에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 이를 확인하기 위하여, 주증기관 차단면적이 최대이고 (4.6 ft²) 주 냉각재 펌프가 정지되는 경우에 대해서, 냉각재의 유량이 각각 사고 초기값의 60% 및 40% 되는 시점에서 혼합현상을 모의하였다. COMMIX-1B 모의계산 결과(그림 3, 4), 냉각재 유량이 60% 되는 시점에서는 노심입구 온도분포가 주냉각재 펌프가 운전 중인 경우와(그림 1) 매우 흡사하나, 40%인 경우에는 주냉각재 펌프가 정지된 경우에(그림 2) 얻어진 온도분포모형과 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 원자로 용기에 유입되는 냉각재의 유속이 감소하면 그에 따라 lower plenum에서의 혼합현상이 크게 변함을 확인할 수 있었다.

3. 고리 1호기 주증기관 차단사고 열적여유도 평가

고리 1호기 주증기관 차단사고에 대한 열적 여유도 평가시 사용될 노심입구 온도분포모형을 각 경우별로 COMMIX-1B로 결정한 노심입구 온도분포모형을 기본으로 하여 그림 1 및 2에서 도시된 바와 같이 각 집합체 별 대표값을 선정하여 결정하였다. 먼저, 각 경우에 대해 계통코드로 생산한 침투출력 시점에서의 상태변수값과 COMMIX-1B 코드로 결정한 노심입구 온도분포모형을 입력으로 하여, 핵연료 집합체 침투출력인자, 핵연료봉 침투 출력인자 및 축방향 출력분포를 결정하였다. 결정된 핵연료 집합체 침투출력인자, 핵연료봉 침투출력인자, 축방향 출력분포 및 침투출력 시점에서의 상태변수값을 입력으로 하여, 주증기관 차단사고 발생시 최소 핵비등이탈율을 계산하였다. 마지막으로, 계산된 최소 핵비등이탈율을 고리 1호기 15주기 교체노심 안전성 분석결과와[2] 비교하였다.

고리 1호기 주증기관 차단사고에 대한 열적 여유도를 분석한 결과, 표 3에서 관측되듯이

COMMIX-1B 분포모형이 설계 분포모형보다 8% - 37% 정도 안전성 여유도를 더 갖는 것으로 나타났다. 그러나, 노심입구 온도가 달라지면, 그에 따라 냉각제 밀도가 달라지고 따라서 유량도 변하게 된다. 따라서 노심입구 온도분포 뿐 만 아니라 노심입구 유량분포를 주증기관 파단사고 안전성 분석시 사용한다면, 동 사고에 대해 보다 큰 열적 여유도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러, 소외전원이 상실되어 노심유량이 감소하는 경우에는 lower plenum에서의 혼합현상이 소외전원이 가용된 경우에 비교하여 크게 달라지므로, 보다 면밀한 분석을 통해 노심유량이 감소하는 경우에 적용할 수 있는 노심입구 온도분포모형을 정립해야 할 것이다.

4. 결 론

먼저, 서로 상이한 온도를 갖는 냉각제가 원자로 용기로 유입될 때 다른 연구결과들과[3, 4] 마찬가지로 lower plenum에서 냉각제의 혼합은 거의 이루어지지 않으며, 현저히 감소된 유속들을 갖는 냉각제가 원자로 용기로 유입되는 경우에 lower plenum에서의 혼합현상은 적정한 유속을 가질 때에 비해 매우 다른 양상을 보이고 있다.

한편, COMMIX-1B 코드로 결정된 노심입구온도 분포모형으로 고리 1호기 주증기관 파단사고에 대한 열적 여유도를 평가한 결과, 현재 적용되고 있는 교체노심설계 노심입구온도 분포모형에 비해 열적 여유도를 추가로 확보할 수 있음이 관측되었다.

참고 문헌

1. "COMMIX-1B : A THREE-DIMENSIONAL TRANSIENT SINGLE-PHASE COMPUTER PROGRAM FOR THERMAL HYDRAULIC ANALYSIS OF SINGLE AND MULTICOMPONENT SYSTEMS," NUREG/CR-4348, ANL, September 1985.
2. 교체노심 안전성 평가보고서 (고리 1호기 제 15주기), KAERI/TR-551/95, 한국원자력연구소, 1995. 10.
3. "Analysis of Oconee Unit 1 Downcomer and Lower Plenum Thermal-Mixing Tests Using COMMIX-1A," EPRI NP-3780, ANL, November 1984.
4. "Thermal Mixing in the Lower Plenum and Core of a PWR," EPRI NP-3545, B&W, May 1984.

표 1 Nodalization of COMMIX-1B for the Kori Unit 1

Node No	Radial Node (m)		Azimuthal Node (radian)		Axial Node (m)	
1	0.2803	inside annulus inner wall	0.3334	inlet (cold)	0.095	
2	0.2803		0.4154		0.2	
3	0.2803		0.4110		0.2	
4	0.2803		0.4110		0.2	
5	0.2631		0.4110		0.0762	tie plate
6	0.0453	inner wall	0.4110		0.197	
7	0.1248	downcomer	0.4154	outlet	0.197	
8	0.1219		0.3334	0.197		
9	0.3		inlet nozzle	0.3334	0.197	
10			0.4154	inlet (hot)	0.165	lower core support plate
11			0.4110		0.165	
12			0.4110		0.140	
13			0.4110		0.038	diffuser plate
14			0.4110		0.167	
15			0.4154	outlet	0.201	
16			0.3334		0.038	lower plate
17					0.105	core inlet
18					1.410	
19					1.410	
20					1.410	
21					0.583	
22					0.680	nozzles
23					0.563	
24					0.563	

표 2 고리 1호기 SLB시 COMMIX-1B 분석을 위한 경계조건

Case ID	Case A	Case B	Case C	Case D	Case D-1	Case D-2
저온유체온도, °C	210.974	205.525	179.455	164.049	237.676	197.261
고온유체온도, °C	260.527	256.255	263.930	256.711	264.515	252.494
저온유체유량, kg/s	4702.07	911.338	4895.38	1084.09	2460.84	1679.47
저온유체밀도, kg/m ³	853.177	847.446	888.277	892.478	793.881	849.663
저온유체유속, m/s	14.3822	2.8064	14.3818	3.1699	8.0891	5.1582
고온유체유량, kg/s	4287.96	782.087	4233.40	895.808	2314.23	1484.16
고온유체밀도, kg/m ³	790.123	797.605	789.249	802.364	771.088	796.938
고온유체유속, m/s	14.1622	2.5588	13.9975	2.9135	7.8321	4.8599
노심압력, bar	70.286	69.402	60.307	64.827	124.359	63.005

(*) 저온관 단면적 = 0.3832 m²

표 3 고리 1호기 SLB 열적어유도 비교

mDNBR/Case	설계 노심입구온도 분포		COMMIX-1B 노심입구온도 분포	
	Typical Cell	Thimble Cell	Typical Cell	Thimble Cell
Case A	3.634	3.130	4.024	3.436
Case B	5.293	5.716	6.425	6.779
Case C	1.667	1.612	1.866	1.749
Case D	3.105	3.087	4.263	3.945

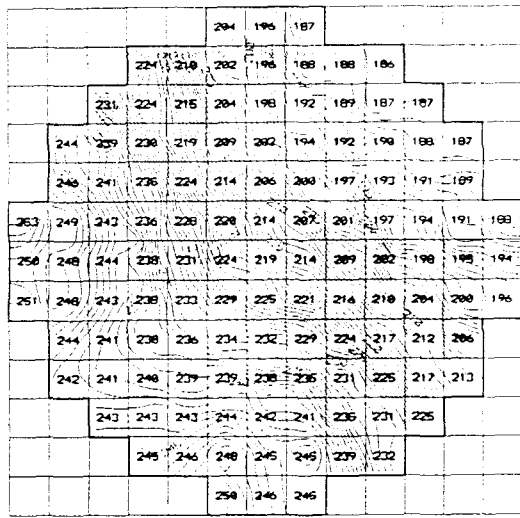


그림 1 노심입구온도 분포모형
고리 1/SLB/CASE C

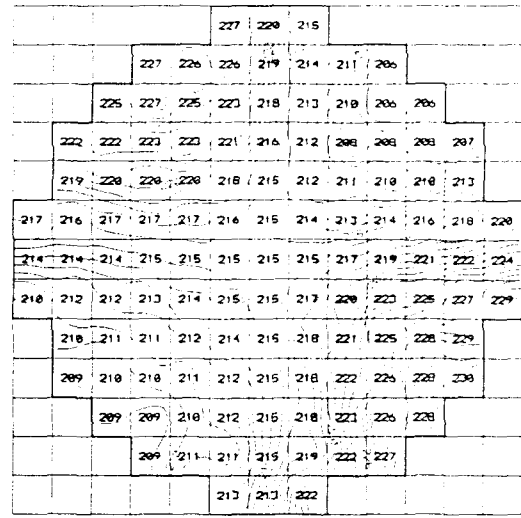


그림 2 노심입구온도 분포모형
고리 1/SLB/CASE D

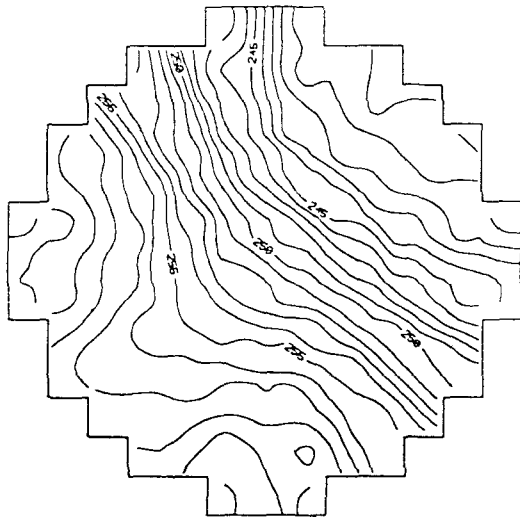


그림 3 노심입구온도 분포모형
고리 1/SLB/CASE D-1

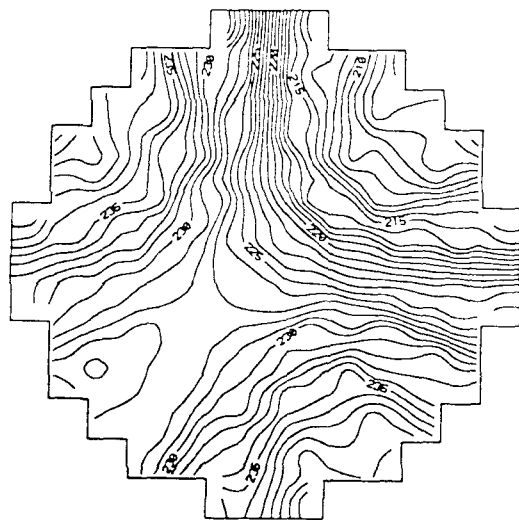


그림 4 노심입구온도 분포모형
고리 1/SLB/CASE D-2