

냉각재상실사고시 질량 및 에너지 방출량 감소를 위한 고찰

허재영, 이남호, 정재훈, 권영민, 이상중
한국원자력연구소

요 약

1000MWt 급 가압경수로의 질량 및 에너지 방출량을 감소시키기 위한 방안으로 울진 3,4호기를 기준으로 안전주입계통의 형태 및 용량을 변화시키면서 원자로냉각재펌프 토출관 및 고온관 파단에 대한 질량 및 에너지 방출량 계산과 격납건물 침투압력 및 온도의 민감도를 분석하여, 후속호기 설계에 활용하고자 한다. 분석한 여러 경우 중에서, 토출관 파단사고시 안전주입탱크 용량은 변화시키지 않고 고압안전주입펌프 용량을 175%로 증가시키면서 저압안전주입펌프를 제거하였을 경우가 격납건물 침투압력 및 온도가 61.98 psia (3.32 kg/cm²A), 288.03 °F (142.24 °C)로써 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 격납건물의 설계여유도를 기존보다 더 확보하므로 안전성이 향상될 뿐만 아니라, 저압안전주입펌프를 안전주입계통에서 제외함으로써 발전소 운전에도 큰 도움이 될 것이다.

1. 서론

1.1 배경 및 목적

울진 3,4호기 발전소는 미국 ABB-CE사의 SYSTEM 80 발전소를 기준으로 하여 설계하면서 노심 출력은 2871MWt로 SYSTEM 80 보다 약 75% 감소하였으나, 안전주입계통의 형태 및 용량은 변경시키지 않고 그대로 채택하였다. 이에 따라 본 논문에서는 울진 3,4호기의 안전주입계통의 형태 및 용량을 변화시키더라도 안전성에는 문제가 없을 것으로 판단하여, 냉각재상실사고시 질량 및 에너지 방출량을 감소시킬 수 있는 적절한 안전주입계통의 형태와 용량을 고찰하고 이를 후속호기 설계에 활용하고자 한다.

1.2 평가 모델

냉각재상실사고에 대한 질량 및 에너지 방출량 분석은 취출 (Blowdown), 재충수(Refill), 재관수(Reflood) 및 재관수후(Post-Reflood), 그리고 장기냉각(Long-term Cooling) 단계로 분류한다. 취출 단계의 질량 및 에너지 방출량 계산은 CEFLASH-4A 전산 코드[2, 3]를 사용하였다. CEFLASH-4A 전산 코드는 ABB-CE사에서 ECCS 성능 평가를 위해 개발한 전산 프로그램으로 냉각재상실사고의 취출 단계시의 열수력학적 현상을 모사하는 일차원적 계통과도해석 분석용 코드이다. 재충수 단계동안, 비상노심냉각수는 원자로용기 바닥에서부터 노심 하단까지 채워지게

되는데, 분석에서는 보수적인 관점에서 재관수 단계를 생략하였다. 재관수 및 재관수후 단계의 질량 및 에너지 방출량 계산은 FLOOD3 전산 코드[4]를 사용하여 수행하였다. 재관수 및 재관수후 단계에서, 토출관 파단사고의 경우에는 노심에서 생성된 증기가 증기발생기를 거쳐 파단부위로 방출되기 때문에 증기발생기의 2차측 에너지가 1차측으로 전달되는 효과를 고려한 계산을 수행하지만, 고온관 파단사고에서는 대부분의 안전주입수가 증기발생기를 통과하지 않고 파손된 고온관을 통하여 직접 격납건물로 방출되며 거의 증기화되지 않기 때문에, 격납건물의 압력을 상승시키는 기구 (mechanism)가 없으므로 재관수 및 재관수후 단계에서의 질량 및 에너지 방출량은 계산하지 않는 것이 전형적인 방법론이다. 또한 장기냉각 단계에서의 질량 및 에너지 방출량 계산은 본 논문에서는 고려하지 않았다. 격납건물의 압력 및 온도는 CEFLASH-4A와 FLOOD-3로 계산된 질량 및 에너지 방출량을 이용하여 CONTEMPT-LT 전산 코드[5]에서 계산하였다.

1.3 안전주입계통의 용량 변화에 따른 해석

본 논문에서는 안전주입계통의 형태와 용량을 변화시킴으로써 질량 및 에너지 방출량을 감소시키고 이로 인한 격납건물의 압력, 온도변화를 분석하는데 주안점을 두었다. 수행된 해석은 표 1에 요약하여 기술하였다. 표 1에서 기술되어 있듯이, Case 1은 본 논문에서 기준으로 설정한 울진 3.4호기 토출관 파단사고의 결과이며, Case 2에서 Case 3은 Case 1의 토출관 파단사고에 대하여 저압안전주입펌프의 용량은 그대로 두고 안전주입탱크와 고압안전주입펌프의 용량을 감소시켰고, Case 4와 Case 5, 그리고 Case 6과 7은 Case 1의 토출관 파단사고에 대하여 각각 안전주입탱크 용량의 60% 및 100%에 대하여 저압안전주입펌프를 제거하고 고압안전주입펌프 용량을 175% 및 200%로 증가시킨 경우에 대하여 해석하였다. 그리고 Case 8에서 10까지는 고온관 파단사고에 대하여 안전주입탱크 용량을 변화시킨 경우에 대하여 계산하였다.

2. 평가 결과

2.1 토출관 파단사고

· Case 1 - Case 3

토출관 파단사고시 취출 단계에서는 그림 1에서 알 수 있듯이 질량 및 에너지 방출량에 거의 차이가 나지 않았다. 이는 질량 및 에너지 방출원은 각각 원자로냉각재계통 냉각수와 안전주입탱크로부터 방출되는 안전주입수의 유량과 에너지가 대부분을 차지하는데, 원자로냉각재계통의 냉각수 양이 안전주입탱크의 용량에 비해 월등히 많으므로 안전주입탱크의 안전주입수 유량에 의한 질량 및 에너지 방출량은 상대적으로 미미하기 때문이다. 그림 1에서는 파단유량을 비교하였는데 질량 및 에너지 방출률의 경향은 같으므로 그림 1에서 보여주고 있는 파단유량의 거동을 이용하여 에너지 방출률의 거동을 예측할 수 있다. 재관수 및 재관수후 단계에서 나타나는 거동은 그림 2와 3에서 보여 주듯이 예측한대로 안전주입탱크의 용량이 작아질 수록 격납건물로의 누적 질량 및 에너지 방출량은 다소 증가하는 경향을 보였다. 이는 증기발생기를 통과하면서 과열된 증기는 안전주입탱크로부터 유입되는 안전주입수에 의하여 응축되는데 안전주입탱크 용량이 작을수록 고갈시점이 빨라져서 응축되는 양이 작아지기 때문이다. 각 경우에 예측된 첨두압력은 표 1에 기술된 바와 같이 각각 63.04 psia (3.40 kg/cm²A), 63.59 psia (3.44 kg/cm²A), 64.29 psia (3.49 kg/cm²A)로 나타났으며 울진 3.4호기의 경우에 비해 약간 증가하였으나 설계압력 71.7 psia (5.04 kg/cm²A)을 만족하였다.

• Case 4 - Case 7

Case 4와 Case 5는 60%의 안전주입탱크 용량에 대하여 고압안전주입펌프의 용량을 각각 175%, 200%로 증가시키고 저압안전주입펌프를 제거한 경우이다. Case 4에서 Case 7까지의 취출 단계에서의 파단유량은 취출 단계에서는 안전주입탱크만 주입되고 고압안전주입펌프나 저압안전주입펌프는 고려되지 않으므로 그림 1에서 보여주고 있는 거동과 같다. 그림 4에서는 두 경우의 재관수 및 재관수후 파단유량을, 그림 5에서는 총 에너지 누적 방출량을 비교하였다. 이들 경우에, Case 4는 주입되는 고압안전주입계통의 용량이 Case 5보다 적음에도 불구하고 재관수후 단계 종료시점이 약 60초 정도 길기 때문에(표 1 참조) 총 질량 및 에너지 누적 방출량은 다소 많음을 보여준다. 그러나, Case 4의 질량 및 에너지는 Case 5보다 긴 시간동안 방출되어 질량 및 에너지 방출률이 작기 때문에 격납건물 침투압력과 온도는 더 낮게 계산된다. Case 6과 Case 7은 100%의 안전주입탱크 용량에 고압안전주입계통의 용량을 각각 175%, 200%로 증가시키고 저압안전주입계통을 제거한 경우이다. 그림 6과 7에서는 이 경우에 대한 재관수 및 재관수후 단계의 파단유량 및 총 에너지 누적 방출량을 비교하였다. 이들 경우도 위에서 기술한 Case 4, 5의 경우와 같은 경향을 보였지만 안전주입탱크의 용량이 60%로 감소하는 것보다는 100%일 경우에 노심에서 생성된 증기를 많이 응축시켜서 방출되는 증기를 감소시키기 때문에 격납건물 침투압력 및 온도가 더 낮게 계산되었다. 그림 8은 Case 1, 4, 6에 대하여 계산한 격납건물 압력 거동을 보여주고 있다.

2.2 고온관 파단사고

• Case 8 - Case 10

Case 8에서 10까지는 고온관 파단사고에 대하여 안전주입탱크 용량을 각각 100%, 75% 및 60%로 변화시켜서 취출 단계의 질량 및 에너지 방출량을 계산하였다[그림 9]. 안전주입탱크의 용량을 60%로 줄였을 경우에 분석된 취출 단계의 격납건물 압력은 기준 발전소의 압력보다 약간 높게 예측되었으나, 토출관 파단사고시 재관수 및 재관수후 단계에서 계산되는 침투압력 및 온도가 격납건물 설계에 제한적이기 때문에 고온관 파단사고에서 약간 높게 계산되더라도 문제가 되지 않는다. 고온관 파단사고에서는 대부분의 안전주입수가 증기발생기를 통과하지 않고 파손된 고온관을 통하여 직접 격납건물로 방출되어, 격납건물의 압력을 상승시키는 기구 (mechanism)가 없다. 즉, 취출 단계동안 격납건물 압력이 취출 종료시점 이전에 최대압력에 도달하고, 이 후 감소하는 경향을 보이면 격납건물 압력이 취출 종료시점 이후에 다시 상승하지 않는다고 판단하여 재관수 및 재관수후 단계에서의 질량 및 에너지 방출량을 계산하지 않는 것이 기존의 방법론이다. 그림 10에서 보여주듯이, Case 8, 9, 10 에서 예측된 격납건물 압력은 모두 취출 종료시점 이전에 침투압력에 도달하고 다시 감소하므로 안전주입탱크의 용량을 60%로 감소시키더라도 기존 방법론을 적용할 수 있으며 격납건물 설계에도 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 울진 3,4호기를 기준으로 안전주입계통의 형태 및 용량을 변화시키면서 원자로 냉각재펌프 토출관 및 고온관 파단에 대한 질량 및 에너지 방출량을 계산하고 격납건물 침투압력 및 온도의 민감도를 분석하여 질량 및 에너지 방출량을 감소시킬 수 있는 방안을 고찰하였다. 그 결과, 토출관 파단사고시 안전주입탱크 용량을 줄였을 경우에는 안전주입펌프의 용량을 변화시킨

모든 경우에 격납건물 침투압력 및 온도가 기준발전소의 그것보다 상승하였지만 설계압력은 만족하는 것으로 예측되었다. 그리고, 안전주입탱크 용량은 변화시키지 않고 고압안전주입펌프 용량을 175%로 증가시키고 저압안전주입펌프를 고려하지 않았을 경우가 격납건물 침투압력 및 온도가 각각 61.98 psia (3.32 kg/cm²A), 288.03 °F (142.24 °C)로써 가장 낮게 나타났다. 또한, 고온관 파단시에도 안전주입탱크의 용량을 감소시키더라도 격납건물의 압력 및 온도가 상승하지만 격납건물 설계에 제한적인 토출관 파단시의 결과보다 낮게 계산되며 격납건물 압력 및 온도 거동이 취출 종료시점 이전에 최대압력에 도달한 후 다시 감소하므로 기존 방법론을 적용할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 이 결과를 후속호기 설계에 활용한다면 설계여유도가 기존보다 더 증가하므로 격납건물의 안전성이 향상되며, 저압안전주입펌프를 안전계통에서 제외함으로써 기술지침서의 요건을 완화시킬 수 있으므로 발전소 운전에도 큰 도움이 될 것이다.

4. 참고문헌

- [1]. NUREG-0800, Rev. 2, "Standard Review Plan," U.S. NRC, July 1981.
- [2]. CENPD-133P, "CEFLASH-4A : A FORTRAN-IV Digital Computer Program for Reactor Blowdown Analysis," ABB-CE, August 1974.
- [3]. NPSD-35-P, "CEFLASH-4A : A FORTRAN-IV Digital Computer Program for Reactor Blowdown Analysis," ABB-CE, April 1977.
- [4]. "Computer Code Description and Verification Report for FLOOD3," ABB-CE, 1988.
- [5]. NUREG/CR-0255, "CONTEMPT-LT/028 - A Computer Program for Prediction of Containment Pressure and Temperature Response to a LOCA," Idaho National Engineering Laboratory, February 1979.

표 1. 수행된 해석의 주요 결과

파단위치	Case	Description*	취출종료 시점, 초	재관수후단계 종료시점, 초	침투압력, psia (kg/cm ² A)	침투압력 시점, 초	침투온도, °F (°C)	침투온도 시점, 초
원자로냉각재 펌프 토출관	1	100S·100H·100L	17.20	398.40	63.04 (3.40)	385.0	289.9(143.3)	95.0
	2	75S·75H·100L	17.60	410.40	63.59 (3.44)	380.0	298.0(147.8)	95.0
	3	60S·60H·100L	17.80	402.90	64.29 (3.49)	385.0	302.0(150.1)	385.0
	4	60S·175H	17.80	608.40	63.09 (3.40)	550.0	291.2(144.0)	95.0
	5	60S·200H	17.80	548.90	63.34 (3.42)	500.0	293.0(145.0)	95.0
	6	100S·175H	17.20	575.20	61.98 (3.32)	520.0	288.0(142.2)	95.0
	7	100S·200H	17.20	522.90	62.30 (3.35)	475.0	288.0(142.2)	95.0
원자로냉각재 펌프 고온관	8	100 S	11.00	-	58.10 (3.05)	10.75	263.2(128.5)	10.75
	9	75 S	11.40	-	58.47 (3.08)	11.00	263.8(128.8)	11.00
	10	60 S	12.00	-	58.55 (3.08)	11.25	263.9(128.9)	11.25

* S: SIT (안전주입탱크), H: HPSI (고압안전주입펌프), L: LPSI (저압안전주입펌프), 기준발전소에 대한 % 용량.

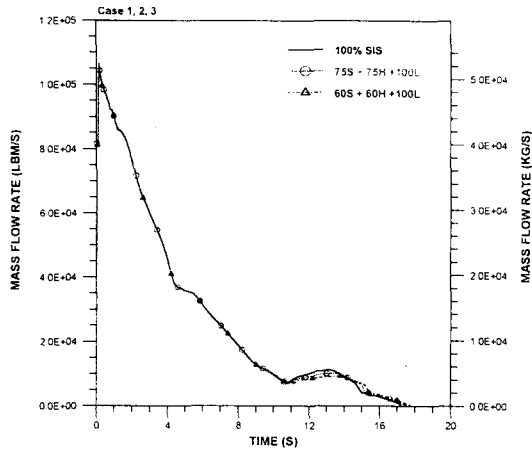


그림 1. DEDLS LOCA시 과탄유량 (권준단계)

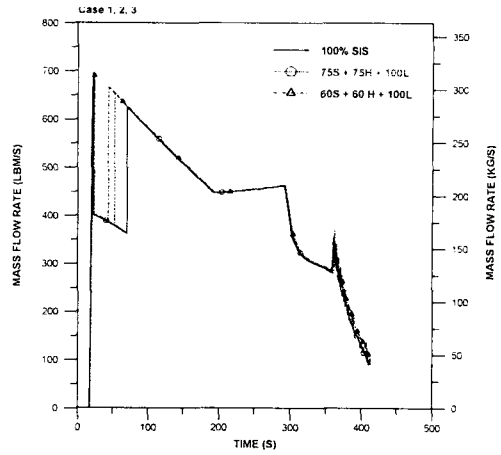


그림 2. DEDLS LOCA시 과탄유량 (재관수 및 재관수후 단계)

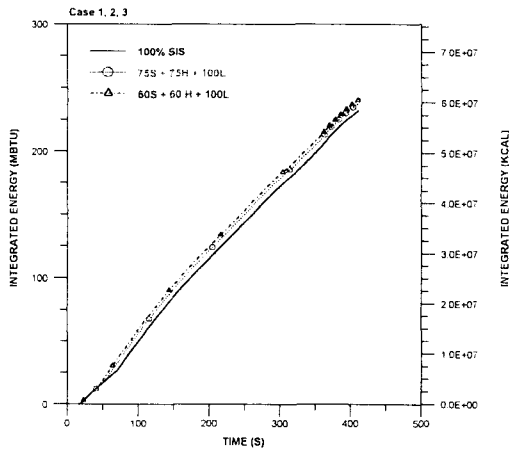


그림 3. DEDLS LOCA시 누적 에너지 방출량 (재관수 및 재관수후 단계)

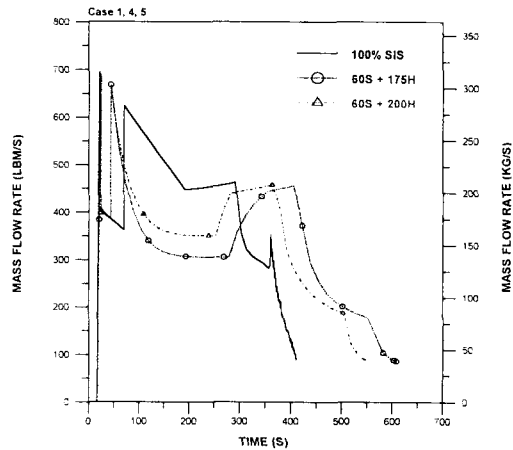


그림 4. DEDLS LOCA시 과탄유량 (재관수 및 재관수후 단계)

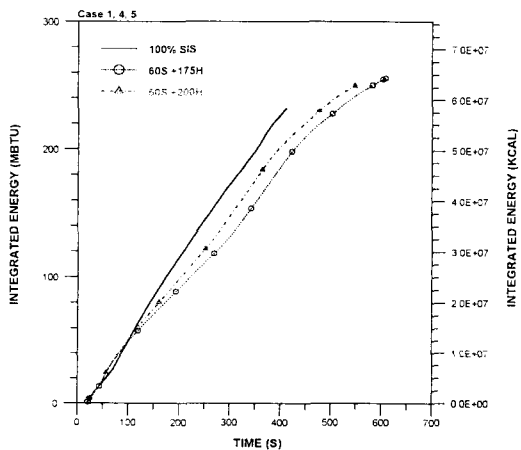


그림 5. DEDLS LOCA시 누적 에너지 방출량 (재관수 및 재관수후 단계)

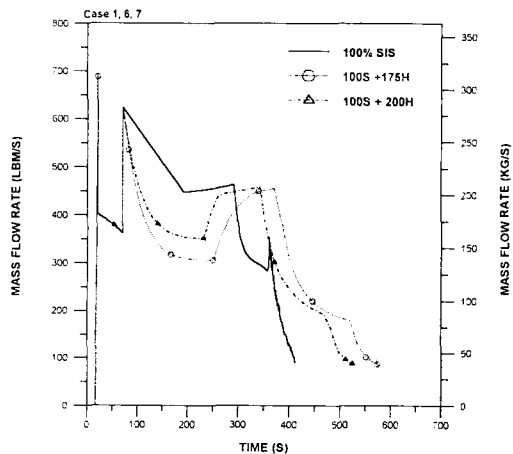


그림 6. DEDLS LOCA시 과탄유량 (재관수 및 재관수후 단계)

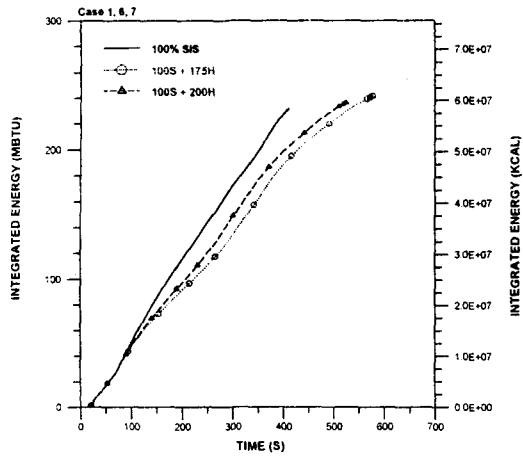


그림 7. DEDLS LOCA시 누적 에너지 방출량
(재관수 및 재관수후 단계)

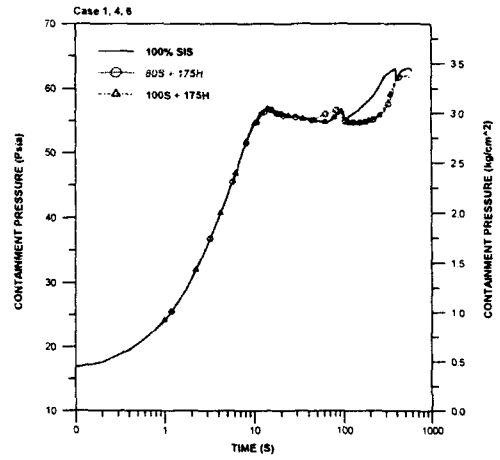


그림 8. DEDLS LOCA시 격납건물 최대압력
(재관수 및 재관수후 단계)

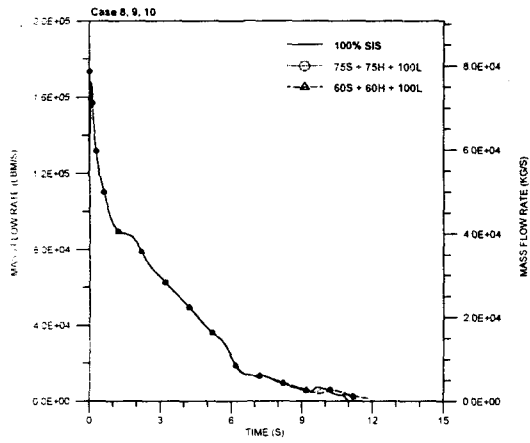


그림 9. DEHLS LOCA시 과관유량 (최종단계)

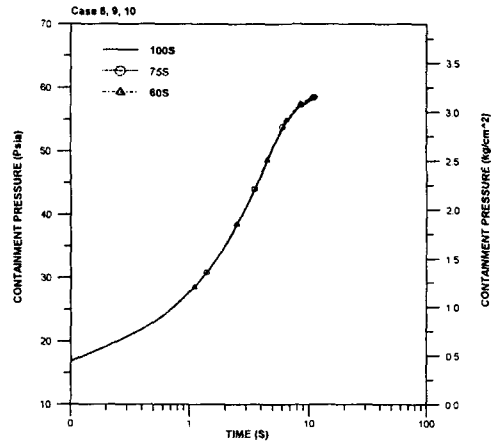


그림 10. DEHLS LOCA시 격납건물 최대압력 (최종단계)