

가압중수형 원자로의 주증기관 파단사고 대처를 위한 운전기법

권종수 · 박성훈 · 김성래
한국원자력연구소

요 약

가압중수형 원자로의 원자로건물내 주증기관 파단사고는 냉각재 상실사고와는 달리 핵연료 건전성이 유지됨에도 불구하고 파단 부위를 통한 과도한 증기 방출에 따른 일차측 급냉 및 감압에 의하여 경수를 수원으로 사용하는 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System: ECCS)의 작동으로 인하여 일차측 중수의 규정농도가 규정치 98% 이하로 저하되어 교체 또는 승급을 요하는 막대한 경제적 손실을 초래 할 수 있다. 원자로건물내 주증기관 파단사고시 비상노심냉각계통의 작동을 방지 또는 지연시키기 위한 운전기법으로 이차측 급수의 차단을 고려하였다. 주증기관 파단크기 50% 이하 범위에서는 원자로 정지후 급수 차단을 통해 비상노심냉각계통 작동을 막을 수 있음이 평가되었다.

1. 서론

일반적으로 비상운전절차서(Emergency Operating Procedures: EOP)는 발전소 시운전 단계에서 작성되어 운전 경험, 시뮬레이터를 통한 입증 및 확인을 통해 재수정되어 운전원의 훈련 및 교육용으로 사용된다. 그러나 비상운전절차서는 작성단계부터 난점이 많고 작성된 절차서를 입증 및 확인하는 데에도 많은 어려움이 따른다.^[1-4]

월성 2, 3, 4호기용 주증기 파단사고 비상운전절차서는 월성 1호기에는 적용하지 않고 있으며 캐나다내 일부 유틸리티에서만 보수적인 해석을 근거로 하여 작성되어, 대체 열제거원으로 비상노심 냉각계통을 사용하고 있다.^[5-7]

가압중수로 원자로의 비상 운전절차서중 하나인 원자로건물내 주증기관 파단사고(Main Steam Line Break : MSLB)는 과도한 증기발생에 따른 일차측계통의 과냉으로 인한 재고량의 급격한 수축을 초래하여 냉각재상실사고와 유사한 상황이 전개되어 냉각재상실사고와 연계된 비상노심냉각계통의 작동을 유발시킬 수 있다. 비상노심냉각계통의 주목적은 냉각재상실사고시 대체 열제거원 제공에 있

다. 그러나 원자로건물내 주증기관 파단사고시 핵연료 건전성에 문제가 없음에도 불구하고 냉각재로 중수를 사용하는 CANDU 원자로내 경수가 수원인 비상노심 냉각계가통이 원자로건물 고압력 (3.45 kPa(g)) 및 원자로 출구 모관 저압력 (5.52 MPa(g)) 조건부 신호에 따라 순간 주입됨으로써 냉각재가 규정 중수농도 98%이하로 떨어져 교체 또는 승급을 요구하는 막대한 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 주증기관 파단사고시 파단 부위를 통한 과도한 증기방출에 따른 일차측 급냉 및 감압에 의한 비상노심냉각계가통 작동을 방지 혹은 지연시킬 방안이 요구된다.

본 연구에서는 월성 2, 3, 4호기의 원자로건물내 주증기관 파단 사고에 대한 CANDU 열수력 전산코드인 CATHENA로 수행된 결과치를 분석하여^[8,9] 운전원 조치 사항에 대한 타당성을 평가한 후, 주증기관 파단사고 대처를 위한 운전기법으로 원자로 정지후 이차측 급수 차단에따른 일차측 압력거동 분석을 SOPHT 전산코드를 이용하여 수행하였다. 분석결과 주증기관 파단사고시 운전원 조치에 따라 파단크기 50% 이하의 경우 이차측 급수차단을 통한 비상노심냉각계가통의 작동을 막을수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

2. 본론

2.1 운전원 조치의 타당성 평가

CANTENA 전산코드로 수행된 주증기관 파단사고를 동반한 4급 전원 상실 사고 시에도 15분간 운전원이 대체 열 제거원을 기동하기 전까지도 핵연료 및 원자로 건물의 건전성이 보장되는 것으로 나타났다.^[9] 4급전원 상실시 냉각재 펌프 및 주급수 펌프는 정지되며 3분후 보조급수 펌프가 작동된다. 따라서 본 연구에서 고려한 운전원의 조치사항인 주증기관 파단사고시 이차측 급수 격리 시에도 핵연료 및 원자로건물의 건전성은 유지될 수 있을 것으로 판단된다..

2.2 전산모델

원자로건물내 주증기관 파단사고 해석을 위해 사용한 전산코드인 SOPHT는 주요 트립 유효 결정 해석에 이용되는 코드로 주로 원자로 정지시간, 원자로 출력변이, 일차측 열 수력적 거동을 모사할 수 있는 전산코드이다.^[10,11] 본 연구에서는 one-loop SOPHT 모델을 이용하여 2번 증기발생기 출구쪽 상단에서의 파단을 모사 하였다. 전 출력 103%에서 100% 완전파단, 80%, 50%, 30% 및 10% 파단의 경우를 분석하였다.

2.3 계산결과 및 고찰

각 파단 크기별 운전원 조치사항이 고려되지 않았을 경우와 운전원의 조치사항으로 시간별 이차측급수 격리시의 일차측 압력 변화는 그림 1, 2, 3, 및 4와 같다. 그림 1과 2에서 100% 및 80% 주증기관 대형파단사고시 비상노심냉각계통 작동 조건부 신호 도달시간은 수십초내 도달하였다. 원자로 정지후 5초후 운전원이 강제 주급수 유량 차단 시에도 100% 파단의 경우 16초, 80% 파단시에는 34초 지연됨을 알 수 있었다.

그림 3은 50% 주증기관 파단사고시 일차측 압력 거동을 나타낸 그림으로 사고시 ECC 작동 조건부 도달시간은 150초에 발생하였으며, 운전원이 원자로 정지 5초후 주급수 유량 격리시 일차측 압력을 7.0 MPa(g) 이상 유지하였다. 그림 4는 30% 주증기관 파단사고시 운전원 조치사항이 없는 경우와 운전원 조치사항 고려시 일차측 압력 거동을 모사한 그림으로 ECC 도달 조건부 압력 5.42 MPa(g)까지는 약 1080 초에 발생하였으며, 운전원이 원자로 정지후 600초후 주급수 유량 강제 차단시에도 일차측 압력이 ECC 작동 조건부 압력 이상 유지시킬 수 있었다.

원자로건물내 주증기관 파단크기에 따른 비상노심냉각계통 주입조건 신호 도달시간에 대한 계산 결과 비교는 표1과 같다. 100% 파단사고 및 80% 파단사고와 같은 대형 사고의 경우 운전원이 사건인지후 즉각적인 조치를 취할 경우 비상노심냉각계통의 작동 도달시간은 약간 지연되나, 막을 수 없음을 알 수 있었다. 50% 파단이하의 경우 이차측급수 차단을 통하여 비상노심냉각계통의 작동을 방지할 수 있으며 대체 열제거원으로 비상노심냉각계통 대신 정지냉각계통(Shutdown Cooling System:SDCS)을 이용할 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

3. 결론 및 토의

가압중수형 원자로의 주증기관 파단사고 대처를 위한 운전원 조치사항의 목적으로 비상노심냉각계통 작동 방지를 위하여 주급수 유량 강제 차단을 고려하였다. 50% 이하의 주증기관 파단사고시 운전원의 조치를 통하여 ECCS의 작동을 지연 또는 막을 수 있음을 알 수 있었다. 이를 위해서는 무엇보다도 운전원의 사고에 대한 판단능력이 향상되어야 할 것으로 생각된다. 본 논문에서는 고려되지는 않았으나 일차측 열 수송 펌프의 강제정지가 동시에 수행될 경우 ECCS 작동 지연에 보다 더 효과적일 것으로 판단된다.

따라서 원자로건물내 대형 주증기 파단시에는 비상노심냉각계통을 열흡수원으로, 소형 파단시에는 정지냉각계통을 열흡수원으로 이용하는 운전 기법을 비상운전 절차서 작성에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) M. Joyce, "The Licensing Process for Nuclear Power Reactors," AECB-1139, Atomic Energy Control Board, Ottawa, Canada, 1979.
- 2) INPO, "Emergency Operating Procedures Verification Guideline", INPO-83-004, March 1983.
- 3) U.S NRC, "Clarification of TMI Action Plan Requirements", NUREG-0737, June 1982.
- 4) IAEA, "Developments in the Preparation of Operating Procedures for Emergency Conditions of NPPs", IAEA-TECDOC-341, IAEA, 1985.
- 5) R. Colqhoun, "The Emergency Operating Procedures at Point Lepreau," unpublished paper, 1989.
- 6) Fax Communication with R. Jaitly of AECL on "Pickering AIMs"
- 7) C.W. Gordon, "Darlington NGS A Operator Response Guidelines Overview," Darlington NGS A Operator Response Guidelines, 1985.
- 8) KEPCO, "Final Safety Analysis Report for Wolsong 2,3,4", Chapter 14, 1995.
- 9) J.W.D. Anderson, "Steam Main Break for Wolsong NPP 2/3/4 Analysis Report", 86-03500-AR-028, Rev. D1, September 1994.
- 10) K. Hau, L. Morris, B. Zhai and R. F. Dam, "Documentation manual for SOPHT-600-XX.AP000.00/SOPHT-600-XX.AP01.00", TTR-340, Vol. 1, March 1992.
- 11) A. Ranger, "SOPHT Control Model and Data for Wolsong NPP 2/3/4 Trip Coverage Analysis", 86-03500-AR-002, Rev. 2, March 1994.

표 1. ECC 작동 조건부 도달시간 비교

과단크기	운전원 조치사항이 없는 경우	급수유량 격리시
100%	54 초	70 초
80%	70 초	104 초
50%	150 초	ECC 작동 조건부 압력 이상 유지
30%	1080 초	ECC 작동 조건부 압력 이상 유지
10%	ECC 작동 조건부 압력 이상 유지	

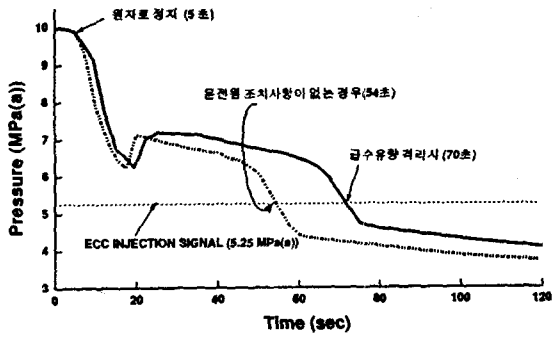


그림 1 100 % 파단사고시 일차측 압력거동 비교

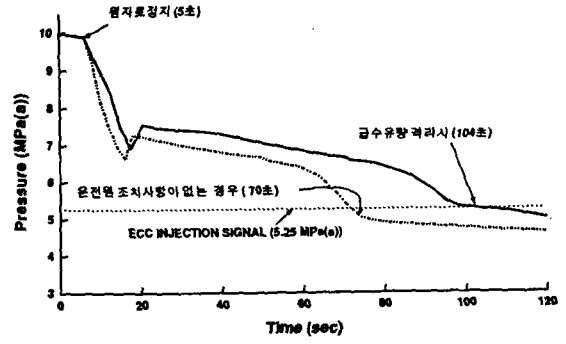


그림 2 80% 파단사고시 일차측 압력거동 비교

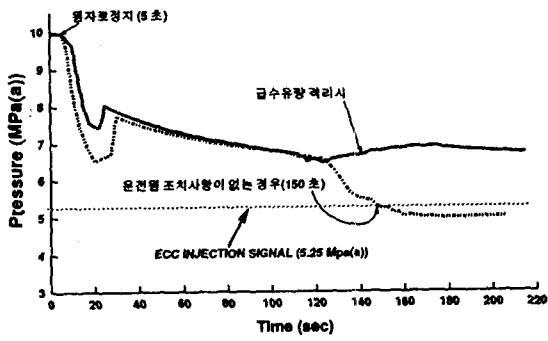


그림 3 50 % 파단사고시 일차측 압력거동 비교

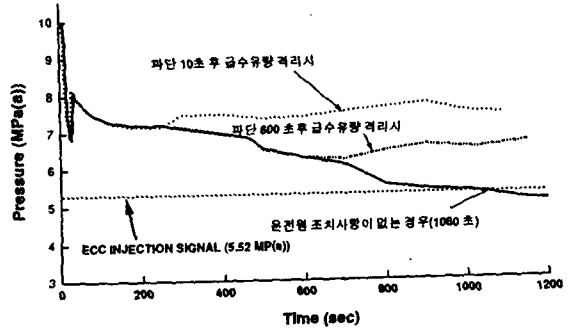


그림 4 30% 파단사고시 일차측 압력거동 비교