`2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중수로 원전 중대사고 해석코드 (ISAAC) 지역공기냉각기 모델 개선

Improvement of Local Air Coolers Model in ISAAC

김시달, 김동하, 박수용
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

월성발전소의 중대사고 해석 코드인 ISAAC 코드의 지역공기냉각기 설치 장소를 증가시켜 코드를 개선한 후 그 영향을 평가하였다. 대형 냉각재 상실사고와 증기발생기 급수상실사고에 대해 지역공기냉각기 설치 장소에 따른 영향 분석을 ISAAC 2.0 PC Version을 이용하여 월성2,3,4호기에 대해 수행하였다. 즉 기본경우는 연료교체실 107과 보일러 방에 6개씩 모두 12개, 비교 경우로는 연료교체실 107과 108에 각각 3개씩 그리고 보일러 방에 6개를 설치하였다. 비상 노심 냉각계통 (ECCS)과 감속재 및 차폐체 냉각계통이 고장난 상당히 보수적인 사고경위이며, 피동 계통인 격납건물 살수계통은 가용 하다고 모든 분석사고에 대해 가정하였다. 분석결과 주요 사고 시간은 비슷함을 알 수 있었고 개선된 코드는 사고경위와 관계없이 지역공기냉각기 설치 장소 증가에 따른 지역공기냉각기 효과를 정확히 모의함을 알 수 있었다.

Abstract

The purpose of this paper is to assess a new local air coolers (LACs) model in ISAAC 2.0, as ISAAC 1.0 could model LAC only at two locations. In the new model, LACs up to twelve locations could be handled. Large LOCA and Loss of Feed Water sequences were selected for the model comparison. Two cases were analyzed with ISAAC 2.0: one with 6 LACs in one of the fueling machine room and in the steam generator room, respectively, and the other with 3 LACs at both fueling machine room and 6 LACs in the steam generator room. The study assumes that the safety systems such as Emergency Core Cooling System, Shield Cooling System and Moderator Cooling System are unavailable. According to the results, the new LACs model showed almost no difference between two cases. Also it was found that as the location of LACs increased, the new model worked properly and the effect of LACs was consistent regardless the accident initiators.

1. 서론

기존의 중대사고 해석 기술이 경수로 중심으로 개발되어 있어 1차 계통 및 2차 계통, 그리고 안전 개념이 달리 설계된 CANDU 원전에서의 중대사고를 해석하기에 기존 경수로 전산코드는 적합하지 않다. 그래서 ISAAC (Integrated Severe Accident Analysis Code for CANDU Plant) [1] 전산코드가 월성 2,3,4호기에서의 확률론적 안전성 평가 (PSA)를 위해 1995년에 개발되었다. ISAAC 코드는 CANDU 원전의 중대사고 진행 특성을 모사할 수 있도록 월성 고유의 계통 및 현상들이 고려되고 있으나, 단기간 동안에 개발되었고 개발 이후에는 모델개선에 대한 연구가 거의 이루어지지 않아 코드 개선의 여지가 많이 있다. 현재 국내에서 운전중인 4기의 중수로에 대한 체계적인 사고관리 절차의 확보가 시급한 상황에서 ISAAC 전산코드의 필요성은 매우 증대되고 있다.

이로부터 ISAAC 전산코드의 개선을 위한 중장기 과제 (1단계: 2002년-2005년, 2단계; 2005년-2007년)가 과기부의 주도로 2003년부터 시작되었다. ISAAC을 이용하여 코드의 개선이 필요한 부분을 확인하던 중 현재의 지역공기냉각기는 두 군데만 설치 할 수 있어 여러 군데 설치되어 있는 실제 발전소를 정확히 모의 하는데 한계가 있음을 발견 하였다. 그러므로 지역공기냉각기 설치 장소를 증가시킬 필요가 있다고 판단하여 설치 장소 수를 12 군데로 증가시켜 코드를 개선한 후 그 영향을 ISAAC 2.0 PC Version을 이용하여 월성2,3,4호기에 대해 수행하여 평가하였다. 즉 기본경우는 연료교체실 107과 보일러 방에 6개씩 모두 12개, 비교 경우로는 연료교체실 107과 108에 각각 3개씩 그리고 보일러 방에 6개를 설치하였다. 비상 노심 냉각계통 (ECCS)과 감속재 및 차폐체 냉각계통이 고장난 상당히 보수적인 사고경위이며, 피동 계통인 격납건물 살수계통은 가용 하다고 모든 분석사고에 대해 가정하였다.

2. 지역공기냉각기 모델

현재의 지역공기냉각기는 두 군데만 설치 할 수 있어 정확히 모의 하는데 한계가 있다. 사고시 지역공기냉각기의 성공기준은 핵연료교환기실 (R107)은 4대중 3대 이상 기동, 핵연료교환기실 (R108)은 4대중 3대 이상 기동, 보일러방 (R601)은 8대중 6대 이상 기동으로 16개중 12개가 가용하여야 된다. 그러므로 지역공기냉각기는 최소한 세 군데 이상에서 설치 되어야 한다. 지역공기냉각기 모델은 Air cooler, fan cooler, 그리고 chiller 의 다른 이름으로 사용되나 같은 기능을 갖고있다.

2.1 지역공기냉각기 (LOCAL AIR COOLER, LAC) [2]

원자로 건물 내에서 발생되는 열 부하는 배기계통 운전만으로는 내부냉각이 불충분하므로 공기-물 열교환기인 지역공기 냉각기로 강제 공기순환을 시켜서 건물이나 실내의 온도를 일정하게 유지시킨다.

지역공기냉각기는 다음 네 가지의 조건을 만족하기 위해 설치되었다:

1) 접근이 불가능하거나 어려운 지역에서의 대기 온도를 제한함으로 건물이나 기기에 손상을 주지 않기 위해

2) 격납건물살수계통이 단기간의 열침원인데 반하여 장기간의 열침원인 LAC는 냉각재 상실사고나 주증기 파단 사고시 응축에 의해 격납건물 압력과 온도를 낮추기 위해

3) 대형 냉각재 상실사고나 주증기 판단사고에서 격납건물 압력을 400 kPa(g) 미만으로 유지하기 위한 열제거 방편으로 충분한 열침원 역할을 하기 위해

4) 설계 지진사건에 이은 냉각재 판단사고에서 증기발생기 방과 연료교체실에서의 수소 분산을 위해

모두 35개의 LAC가 설치되어 있고, 이 중 16개는 class IV 전원이 공급되지 않는 경우 class III 전원에 의해 운전되도록 연결되어 있다. 다만 재순환 냉각수 (recirculation cooling water)가 가용하지 않은 경우에는 LAC를 사용할 수 없다. LAC 1번부터 8번까지는 증기발생기 방에, 9번부터 16번까지는 연료교체실인 F/M Room 7과 8에 동등하게 배치되어 있다 [3].

정상 운전 중에는 핵연료교환실과 보일러방에 존재하는 LAC 1번부터 16번까지 16대 중 50%를 사용하여 주제어실에서 수동 조절아래 적당한 수준의 방 온도를 유지하며, 나머지 LAC는 대기 상태로 유지된다. 냉각재 상실사고와 주증기 파단 사고 같은 극한 사고의 경우, 높은 격납건물 압력 신호에 따라 격납건물에 최대 냉각과 응축 능력을 제공하기 위해 모든 LAC 1-16가 자동으로 작동 된다. LAC 17-35는 안전 기능 역할을 하지 않으므로 사고시 요구되지 않는다. 사고시 지역공기냉각기의 성공기준은 핵연료교환기실 (R107)은 4대중 3대 이상 기동, 핵연료교환기실 (R108)은 4대중 3대 이상 기동, 보일러방 (R601)은 8대중 6대 이상 기동으로 16개중 12개가 가용하면 모두 33-66MWth의 열제거 범위를 갖는다. 이 열 제거량은 전출력의 약 1.6-3.2%에 해당되므로, 지역공기냉각기는 격납건물살수계통이 종료된 경우에도 장기간의 열침원으로 기능이 보장된다. 사고시 LAC 1-16의 열 제거율은 참고문헌[4]에 있으며 mission time 은 LOCA시 3개월이며 MSLB인 경우 1 주일이다.

2.2 개선된 지역공기냉각기 모델 [5]

기존 ISAAC에서는 fan cooler (FC)와 chiller (CH)라는 두 가지 형태의 공기 냉각기를 모의하고 있고, 격납건물의 한 장소에 공기냉각기를 한 종류밖에 설치할 수 없어 (물론 대수는 정의할 수 있음), fan cooler와 chiller를 따로 구분하여 다른 공간에 설치하며, 이를 위해 표 1에서처럼 두 가지의 입력 세트가 요구된다.

개선된 ISAAC에서는 fan cooler (FC)와 chiller (CH)라는 두 가지 형태의 공기 냉각기 외에 air coolers를 10군데 설치할 수 있게 하여 모두 12 군데에 설치할 수 있게 모델되어 있다. 따라서, ISAAC에서는 격납건물의 열 두 장소에 서로 다른 성능의 공기 냉각기를 설치할 수 있도록 고려하

고 있다. 월성 2,3,4호기에서의 설계 재원을 이용하여 지역공기냉각기의 입력을 표 1에 정리하였다.

3. 개선된 지역공기냉각기 영향 평가

저압 사고인 대형 냉각재 상실사고 (LLOCA)와 고압 사고인 증기발생기 급수 상실사고 (LOFW)에 대해 LAC의 설치 장소에 따른 영향 분석을 ISAAC 2.0 PC Version을 이용하여 월성2,3,4호기에 대해 수행하였다. 비상 노심 냉각계통 (ECCS)과 감속재 및 차폐체 냉각계통이 고장난 상당히 보수적인 사고경위이며, 피동 계통인 격납건물 살수계통은 가용 하다고 모든 분석사고에 대해 가정하였다. ISAAC PC Version은 그동안 Workstation에서만 사용되었던 것을 개발한 것으로 PC의 성능 향상으로 계산속도에서도 전혀 불편함이 없으며 그 동안에 그림이나 결과정리를 위하여 Workstation과 PC 간의 파일전달 등으로 불편하고 번잡스러웠던 사항들이 해소되었다. 다음 표 2에서는 DEC Alpha Workstation과 PC에서 계산된 결과를 보여준다. 비교결과는 주요 사고 전개시간이 2% 이내의 차이를 보여주고 있으며 이는 중대사고 현상이 갖는 불확실성과 비교할 때 무시될 수 있는 차이로 판단된다.

분석에 사용된 ISAAC 전산 코드는 월성 원전에서의 중대사고 진행을 모사할 수 있는 기본적인 모델, 즉 냉각재 상실로 인하여 연료봉이 가열되고, 감속재 냉각 계통의 손실로 붕괴열에 의한 감속재 증발과 이로 인한 연료봉 노출, 그리고 이어지는 노심의 건전성 붕괴 등이 고려되어 있다. 또한, 칼랜드리아 내부로 이송되는 핵연료 물질과 이에 반응하는 칼랜드리아의 거동, 그리고 이와 동시에 격납건물에서의 가스, 냉각수, 핵연료 물질의 이송이 1차 계통과 연계되어 모사 되어 있다. 이외에도 ISAAC은 감속재 냉각 계통, 쉴드 냉각 계통, 정지냉각계통, 비상노심 주입계통, 격납건물 살수 계통, 그리고 지역공기냉각기 등 월성 2,3,4호기의 여러 안전계통의 작동 효과를 정량적으로 분석할 수 있도록 개발되었다. 따라서, 이 코드는 종합적으로 격납건물의 건전성을 평가하고, 여러 사고 경위에서의 중대사고 대처 전략과 사고 관리 방안을 제시하는데 유용하게 활용될 수 있다.

월성2,3,4호기에서의 중대사고를 모의하기 위해 발전소 자료를 종합하여 ISAAC 전산코드의 입력을 작성해야 한다. 입력은 크게 발전소의 기하학적 구조 자료와 중대사고 현상을 모의하는 모델 변수로 구성되는 parameter file과 사고 경위를 모의하는 input file로 구성된다. 발전소의 기하학적 입력은 크게 격납건물 부분과 일차계통, 이차계통, 칼랜드리아, 그리고 안전계통으로 나눌 수 있다 [6].

2장에 기술한 대로 사고시 지역공기냉각기의 성공기준은 핵연료교환기실 (R107)은 4대중 3대 이상 기동, 핵연료교환기실 (R108)은 4대중 3대 이상 기동, 보일러방 (R601)은 8대중 6대 이상 기동으로 16개중 12개가 가용하여야 된다. 그러므로 지역공기냉각기를 두 군데 설치한 경우 즉 핵연료교환기실(R107)에 6대, 보일러방 (R601)에 6대 설치한 경우와 세 군데 설치한 경우 즉 핵연료교환기실 (R107)에 3대, 핵연료 교환기실 (R108)에 3대, 그리고 보일러방 (R601)에 6대 설치한 경우에 대해 분석하였다.

상세한 ISAAC 입력은 참고문헌[4]에 있으며 중대사고 관점에서 사고 진행을 분석하기 위하여 사고 시작 후 72시간까지 계산하였다.

3.1 대형 냉각재 상실사고 (LLOCA) 경위 해석

대형 냉각재 상실 기본 사고는 원자로 출구모관 reactor outlet header 3 (ROH 3)에서 대형 파단 (파단 면적 0.2594 m^2)이 발생한 사고다. 증기발생기로의 주급수 계통은 원자로 정지 시점까지 가동되나, 정지 후에는 보조급수계통의 고장을 가정하여 더 이상 증기발생기로의 급수는 이루어지지 않는다. 원자로 트립 시점은 FSAR에서 계산된 결과를 이용하였고 0.87초에 수동 정지하도록 하였다.

1차 계통에서 발생되는 파단 사고의 경우 비상 노심 냉각 계통을 일찍 작동시키기 위해 증기발생기의 안전밸브 (MSSV)를 열어 2차 계통을 급속하게 냉각 (crash cooldown)시키도록 설계되어 있다. 이를 모의하기 위하여 LOCA 신호가 접수되고 30초 후에 MSSV가 열리고, 계속 열린 상태를 유지하도록 하였다. 또한 LOCA 신호가 발생하면 가압기로 연결되어 있는 두 개의 폐회로는 가압기 격리 밸브를 잠금으로 서로 격리되도록 하였다. 이 사고의 경우, LOCA 신호는 1차 계통의 압력이 5.56 MPa 이하로 감소하는 3.3초에 발생하며, 가압기 격리밸브는 약 23초에 닫히고, 약 33초에 MSSV는 개방된다.

표 3은 대형 파단 사고 주요 사건 일지 (PC 계산결과)를 나타낸 것으로 두 군데에 LAC를 설치한 경우와 세 군데에 LAC를 설치한 경우 주요 사건 발생 시간은 큰 차이가 나지 않았다.

공기냉각기의 대기 감압 기능은 대기 중의 수증기를 얼마나 응축시켰는가와 제어체적에서 제거되는 열량에 비례한다. 그림 1 ~ 4에는 LLOCA시 연료교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서의 LAC로 인해 응축된 수증기량과 제거되는 열량을 비교한 것을 보여준다.

그림 1에 나타나듯이 응축된 수증기량은 연료 교체실 107과 108은 거의 같으며 보일러 방에서는 연료 교체실에 비해 3배 정도 많음을 보인다. 즉 세 군데 LAC 설치한 효과가 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 2는 연료 교체실 107과 보일러 방 두 군데에 LAC를 설치한 경우를 보이는데 연료 교체실 108은 LAC 설치를 안 했기 때문에 효과가 안 나타났으며 연료 교체실 107과 보일러 방에서의 LAC로 인해 응축된 수증기량이 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 3에 나타나듯이 LAC로 인해 제거된 열량은 연료 교체실 107과 108은 거의 같으며 보일러 방에서는 연료 교체실에 비해 3배 정도 많음을 보인다. 즉 세 군데 LAC 설치한 효과가 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 4는 연료 교체실 107과 보일러 방 두 군데에 LAC를 설치한 경우를 보이는데 연료 교체실 108은 LAC 설치를 안 했기 때문에 효과가 안 나타났으며 연료 교체실 107과 보일러 방에서의 LAC로 인해 제거된 열량이 잘 나타남을 알 수 있었다.

3.2 증기발생기 급수 상실사고 (LOFW) 경위 해석

주급수 공급이 상실되면서 시작되는 사고는 일차계통에서 이차계통으로의 전달되는 전출력 열량을 제거하지 못해 이차측의 압력 증가로 증기발생기의 안전밸브가 열리며 (약 3초), 또한 일차계통도 이차계통으로의 부족한 열 제거로 압력이 증가하여 Degasser Condenser Tank로 연결되어 있는 Liquid Relief Valve가 열림 (약 6초)으로 과압을 방지한다. 일차계통의 고압으로 원자로는 트립되며 (약 19초), 주급수에 이어 증기발생기로의 보조 급수도 상실되어 증기발생기는 고갈된다 (약 2,641초).

표 4는 증기발생기 급수 상실사고 주요 사건 일지 (PC 계산결과)를 나타낸 것으로 두 군데에 LAC를 설치한 경우와 세 군데에 LAC를 설치한 경우 주요 사건 발생 시간은 큰 차이가 나지 않았다.

그림 5 ~ 8에는 LOFW시 연료교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서의 LAC로 인해 응축된 수증기량과 제거되는 열량을 비교한 것을 보여준다.

그림 5에 나타나듯이 응축된 수증기량은 연료 교체실 107과 108은 거의 같으며 보일러 방에서는 연료 교체실에 비해 3배 정도 많음을 보인다. 즉 세 군데 LAC 설치한 효과가 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 6은 연료 교체실 107과 보일러 방 두 군데에 LAC를 설치한 경우를 보이는데 연료 교체실 108은 LAC 설치를 안 했기 때문에 효과가 안 나타났으며 연료 교체실 107과 보일러 방에서의 LAC로 인해 응축된 수증기량이 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 7에 나타나듯이 LAC로 인해 제거된 열량은 연료 교체실 107과 108은 거의 같으며 보일러 방에서는 연료 교체실에 비해 3배 정도 많음을 보인다. 즉 세 군데 LAC 설치한 효과가 잘 나타남을 알 수 있었다.

그림 8은 연료 교체실 107과 보일러 방 두 군데에 LAC를 설치한 경우를 보이는데 연료 교체실 108은 LAC 설치를 안 했기 때문에 효과가 안 나타났으며 연료 교체실 107과 보일러 방에서의 LAC로 인해 제거된 열량이 잘 나타남을 알 수 있었다.

4. 결론

저압 사고인 대형 냉각재 상실사고 (LLOCA)와 고압 사고인 증기발생기 급수상실사고 (LOFW)에 대해 LAC의 설치 장소에 따른 영향 분석을 ISAAC PC Version을 이용하여 월성2,3,4호기에 대해

수행하였다. 비상 노심 냉각계통 (ECCS)과 감속재 및 차폐체 냉각계통이 고장 난 상당히 보수적인 사고경위이며, 피동 계통인 격납건물 살수계통은 가용 하다고 모든 분석사고에 대해 가정하였다. 분석결과 주요 사고 시간은 비슷함을 알 수 있었고 개선된 코드는 사고경위와 관계없이 지역공기냉각기 설치 장소 증가에 따른 지역공기냉각기 효과를 정확히 모의함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

참고문헌

1. “Development of Computer Code for Level 2 PSA of CANDU Plant” KAERI, KAERI/RR-1573/95, December 1995.
2. “Wolsong NPP 2/3/4 FSAR, Volume IV Chapter 6,” KEPCO, March 1995.
3. “Wolsong NPP 2/3/4 Design Manual Reactor Building Cooling System,” AECL 86-73110/67311-DM-000 Rev.0, July 1995.
4. S.D.Kim, "Improvement of Local Air Coolers Model in ISAAC," KAERI, KAERI/TR-2707/2004, February 2004.
5. FAI/03-60 Rev.0,"ISAAC (Integrated Severe Accident Analysis Code) UPGRADE AND NEW FEATURES", October 2003.
6. S.D.Kim, "Effect of Local Air Coolers and Dousing System during Large LOCA at Wolsong Plants," KAERI, KAERI/TR-2350/2002, December 2002.

표 1. 지역공기 냉각기 ISAAC 입력 변수

Air Coolers 변수	Fan Cooler 변수	Chiller 변수	사용 값	정의
JNACD(i)	JNFCD	JNCHD		compt ID for cooler discharge line location
JNACS(i)	JNFCS	JNCHS		compt ID for cooler suction line location
NFNAC(i)	NFN	NCHILL		number of fan cooler (local air cooler)
	TDFAN		0	time delay for fan cooler (FC) (sec)
WVAC0(i)	WVFN0	WVCH0	15.1	FC inlet gas volumetric flow rate (m^3/sec)
NTAC(i)	NTFC	NTCH	96	number of cooling tubes per section (total of NREGFC sections are defined)
ATAC(i)	ATFC	ATCH	73.88	outside surface area of cooling tubes (m^2)
AFINAC(i)	AFINFC	AFINCH	1020.	fin surface area attached to the cooling tubes (m^2)
FFINAC(i)	FFINFC	FFINCH	0.5	FC fin efficiency
RGFLAC(i)	RGFLFC	RGFLCH	2.853x10-4	FC inside fouling factor
XDFNAC(i)	XDFNFC	XDFNCH	0.03518	FC fin diameter (m)
XTTAC(i)	XTTFC	XTTCH	0.001245	FC cooling tube thickness (m)
KTAC(i)	KTFC	KTCH	240.	FC cooling tube thermal conductivity (W/m^2K)
AFLMNA(i)	AFLMNF	AFMNCH	10.	minimum flow area through FC (m^2)
XIDTAC(i)	XIDTFC	XIDTCH	0.01339	FC cooling tube inner diameter (m)
NREGAC(i)	NREGFC	NREGCH	5	number of sections used to model FC
TCWAC(i)	TCWFC	TCWCH	279.	cooling tube cooling water inlet temperature (K)
WCWAC(i)	WCWFC	WCWCH	11.36	cooling tube cooling water flow rate (kg/s)

* Air Cooler 변수 i는 1 ~ 10

표2. 발전소 대형 파단 사고 주요 사건 일지 (Work Station 과 PC 계산결과 비교)

주요 진행 상황	Spray On LAC Off WS (PC)	Spray On LAC On WS (PC)
	sec	sec
Large LOCA Initiates	0	0
ECCS Off, SG MSIV Closure	0	0
Moderator, Shield Cooling Off	0	0
Local Air Cooler Forced Off	0	0
Reactor Scram	0.87	0.87
Main/Auxiliary Feedwater Forced Off	0.87	0.87
LOCA Signal Received	3.3 (3.4)	3.3 (3.4)
Pressurizer Isolated	23.7 (23.4)	23.7 (23.5)
SG MSSV Manually Open for Crash Cooldown	33.3 (33.4)	33.3 (33.4)
Primary System Pump Off	134 (134)	134 (135)
Calandria Rupture Discs Fail	3225 (3235)	3254 (3263)
Loop 2 SG Dryout	3327 (3327)	3334 (3340)
Dousing Tank Water Depleted for Containment Spray	4150 (5311)	8050 (12745)
Loop 2 Liquid Relief Valve Open	6484 (6465)	6550 (6536)
Loop 1 Fuel Channel Rupture due to Creep	6810 (6580)	9466 (9937)
Loop 2 Fuel Channel Rupture due to Creep	9100 (9061)	9230 (9222)
Moderator Dryout	27993 (27667)	28344 (29241)
Loop 1 Unbroken / Broken SG Dryout	93055 (95206) 98493 (100840)	117608 (124062) 129145 (135888)
Calandria Failure	135857 (129820)	127065 (125558)
Containment Failure	135931 (130110)	No
Calculation Ends	259200	259200

표 3. 발전소 대형 파단 사고 주요 사건 일지 (PC 계산결과)

주요 진행 상황	Spray On LAC Off	Spray On LAC On (2)	Spray On LAC On (3)
	Sec (Hour)	Sec (Hour)	Sec (Hour)
Large LOCA Initiates	0	0	0
ECCS Off, SG MSIV Closure	0	0	0
Moderator, Shield Cooling Off	0	0	0
Local Air Cooler Forced Off	0	0	0
Reactor Scram	0.87	0.87	0.87
Main/Auxiliary Feedwater Forced Off	0.87	0.87	0.87
LOCA Signal Received	3.4	3.4	3.4
Pressurizer Isolated	23.4	23.7	23.6
SG MSSV Manually Open for Crash Cooldown	33.4	33.4	33.4
Primary System Pump Off	134	134	134
Calandria Rupture Discs Fail	3235 (0.90)	3245 (0.90)	3247 (0.90)
Loop 2 SG Dryout	3327 (0.92)	3329 (0.92)	3337 (0.93)
Dousing Tank Water Depleted for Containment Spray	5311 (1.5)	6958 (1.9)	6844 (1.9)
Loop 2 Liquid Relief Valve Open	6465 (1.8)	6502 (1.8)	6490 (1.8)
Loop 1 Fuel Channel Rupture due to Creep	6580 (1.8)	7481 (2.1)	6788 (1.9)
Loop 2 Fuel Channel Rupture due to Creep	9061 (2.5)	9098 (2.5)	9130 (2.5)
Moderator Dryout	27667 (7.7)	27136 (7.5)	27421 (7.6)
Loop 1 Unbroken / Broken SG Dryout	95206 (26.4) 100840 (28.0)	114855 (31.9) 123813 (34.4)	118038 (32.8) 124694 (34.6)
Calandria Failure	129820 (36.1)	122593 (34.0)	122859 (34.1)
Containment Failure	130110 (36.1)	No	No
Calculation Ends	259200 (72)	259200 (72)	259200 (72)

표 4 증기발생기 급수 상실 사고 주요 사건 일지 (PC 계산결과)

주요 진행 상황	Spray On LAC Off	Spray On LAC On (2)	Spray On LAC On (3)
	Sec (Hour)	Sec (Hour)	Sec (Hour)
LOFW (MFW + AFW) Initiates	0		0
ECCS Off, SG MSIV Closure	0		0
Moderator, Shield Cooling Off	0		0
Local Air Cooler Forced Off	0		0
SG MSSV First Open	2.8	2.8	2.8
LRV First Open	6.1	6.1	6.1
Reactor Scram	18.8	18.8	18.8
SG Dryout (Loop1&2, Broken & Unbroken Loop)	2641 (0.7)	2646 (0.7)	2648 (0.7)
Core Uncover Starts in Loop 1 & 2	4434 (1.2)	4444 (1.2)	4446 (1.2)
Dousing Tank Water Depleted for Containment Spray	5083 (1.4)	9153 (2.5)	8948 (2.5)
Core Empty in Loop 1 & 2	5414 (1.5)	5426 (1.5)	5432 (1.5)
Calandria Rupture Discs Fail	6681 (1.8)	6695 (1.8)	6705 (1.9)
Loop 1 Fuel Channel Rupture due to Creep	10546 (2.9)	9521 (2.6)	9306 (2.6)
Pressurizer Isolated	10581 (2.9)	9556 (2.7)	9341 (2.6)
Loop 2 Fuel Channel Rupture due to Creep	10546 (2.9)	9521 (2.6)	9306 (2.6)
Moderator Dryout	34339 (9.5)	30807 (8.6)	30707 (8.5)
Calandria Failure	138218 (38.4)	130219 (36.2)	129502 (36.0)
Containment Failure	138443 (38.5)	No	No
Calculation Ends	259200 (72)	259200 (72)	259200 (72)

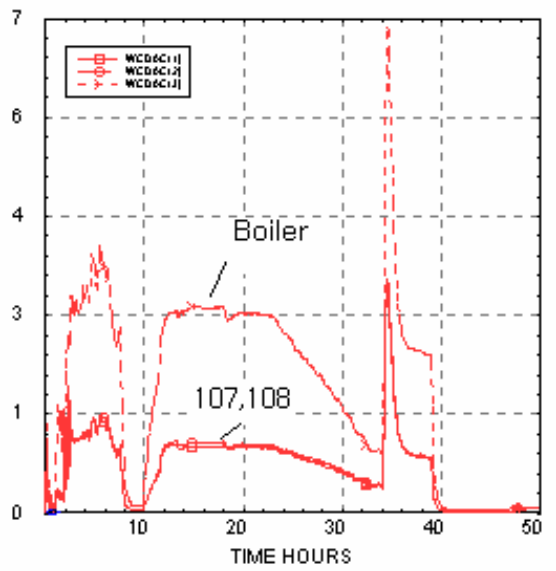

그림 1. LLOCA시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 응축된 수증기량 비교 (kg/sec)

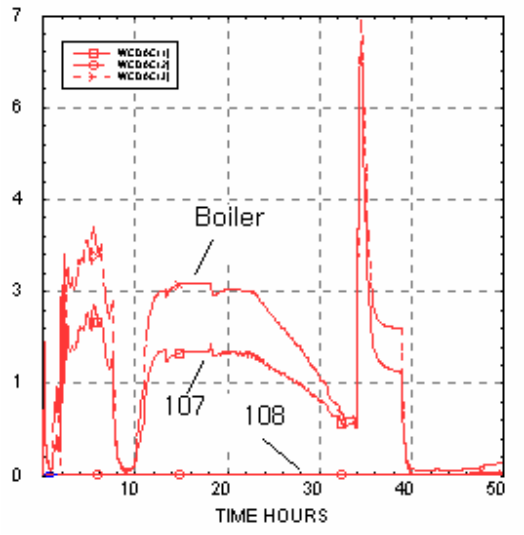

그림 2. LLOCA시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 응축된 수증기량 비교 (kg/sec) (2군데 설치)

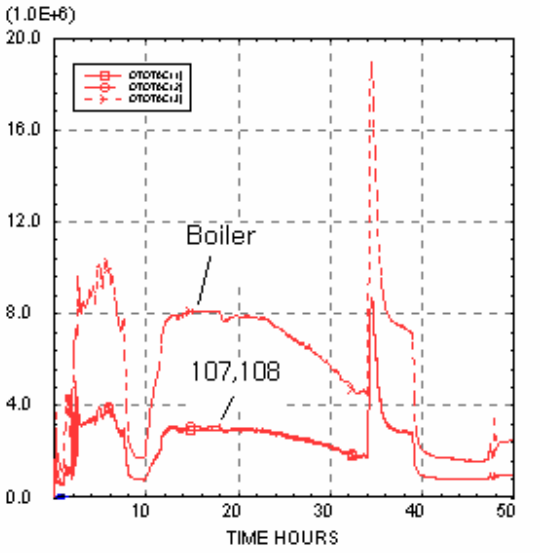

그림 3. LLOCA시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 제거된 열량 비교 (W)

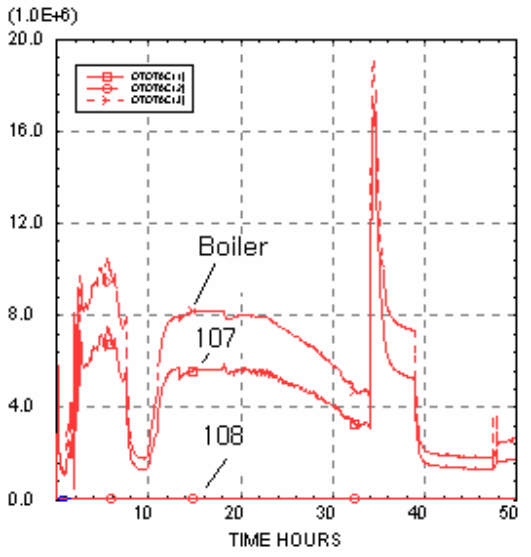

그림 4. LLOCA시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 제거된 열량 비교 (W) (2군데 설치)

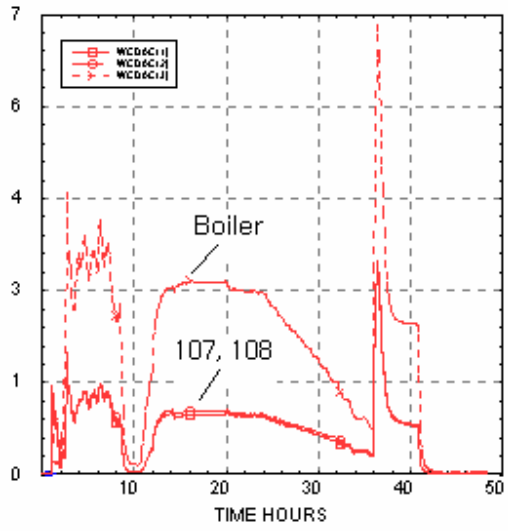

그림 5. LOFW시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 응축된 수증기량 비교 (kg/sec)

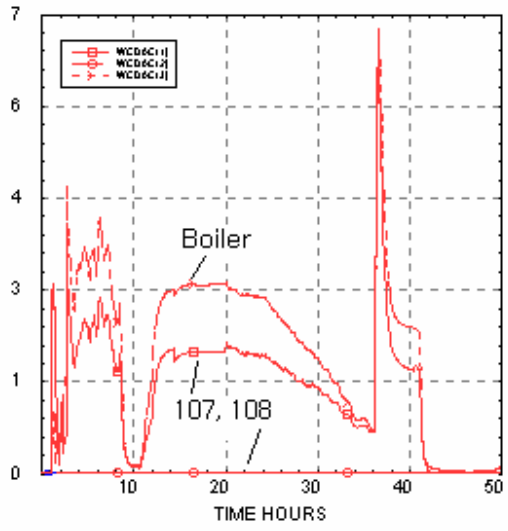

그림 6. LOFW시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 응축된 수증기량 비교 (kg/sec) (2군데 설치)

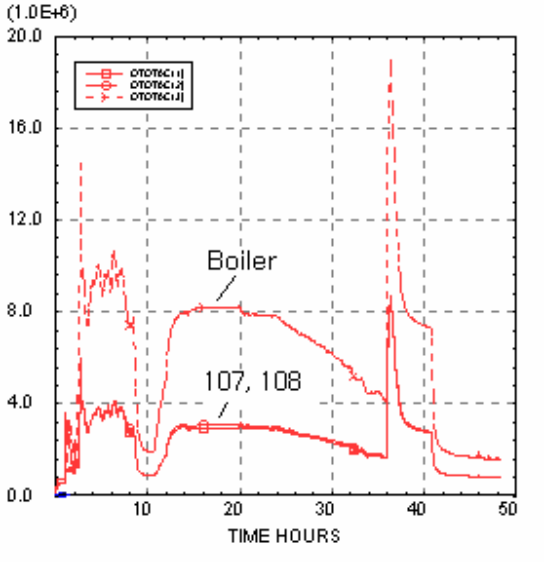

그림 7. LOFW시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 제거된 열량 비교 (W)

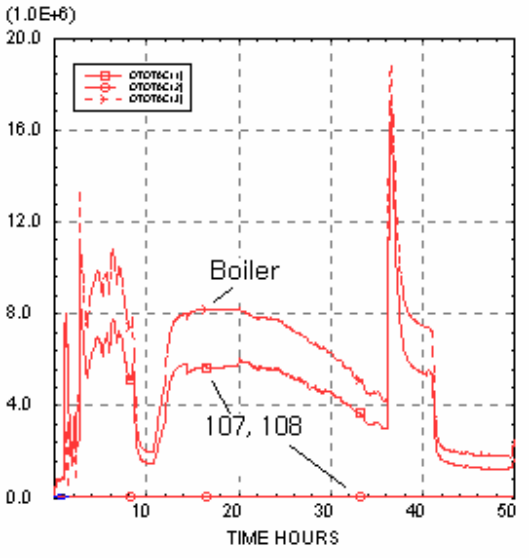

그림 8. LOFW시 월성 2,3,4호기 연료 교체실 107과 108 그리고 보일러 방에서 LAC로 인해 제거된 열량 비교 (W) (2군데 설치)