2004 춘계학술대회논문집
한국원자력학회

설계기준사고시 소외전원상실에 따른 격납건물 팬쿨러내 응축유발 수격현상의 발생 가능성 평가 방법

A Method to Evaluate the Possibility of Condensation Induced Water Hammer in Containment Fan Cooler Following Loss of Offsite Power during Design Basis Accidents

방영석, 김인구, 설광원, 조상진, 김봉현
한국원자력안전기술원
305-338, 대전시 유성구 구성동 19

요 약

국내 가동원전에 대하여 USNRC Generic Letter 96-06에서 논의된 설계기준사고시 소외전원상실에 따른 격납건물 팬쿨러 배관내의 응축수격 현상의 발생 가능성을 평가하기 위한 방법을 논의하였다. 고리 3,4호기 설계 자료를 참조하여 해석 입력 모델을 개발하였고, RELAP5/MOD3.3 코드를 이용하여 배관 내의 과도 이상 유동을 분석하였다. 사고시 팬쿨러 운전에 사용되는 기기냉각수 재고량 및 초기 팬쿨러 입구 압력 등 불확실성이 있는 주요 변수에 대해서는 민감도 분석을 수행하였다. 해석 결과 주어진 기기냉각수 재고량에 대해 초기 입구 압력이 낮을수록 팬쿨러 코일내에 2상유동의 발생 가능성이 높아진다는 것을 확인하였다. 조사된 범위에서는 응축유발 수격현상은 예측되지 않았으나 초기 입구압력이 낮은 경우 기포 생성에 기인한 상당한 압력피이크가 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 이 결과에 근거할 때 본 해석 방법이 응축수격 발생가능성 평가에 적용될 수 있음을 확인하였다.

Abstract

A method is discussed to evaluate the possibility the Condensation Induced Water Hammer (CIWH) in the containment fan cooler following Loss of Offsite Power (LOOP) during Design Basis Accidents (DBA) for Korean operating nuclear power plants. The input model is developed by referring the Kori Units 3 and 4 design. The transient two-phase flow behavior in the fan cooler system is analyzed using RELAP5/MOD3.3 code. Sensitivity study is conducted for the important parameters such as the inventory of Component Cooling Water (CCW) associated with the fan cooler operation in accident condition and inlet pressure to the fan cooler coil which have uncertainties. The result of analysis shows the possibility of two-phase flow is increased as the inlet pressure decreases for a given CCW inventory. It is found the significant pressure peak can be occurred due to the void formation for the low inlet pressure, although the CIWH is not predicted within the investigated range. Based on the result, the applicability of the present method is confirmed.

1. 서 론

원자력발전소 냉각재상실사고 (Loss of Coolant Accident, LOCA), 주증기관파단사고 (Main Steam Line Break, MSLB), 주급수관파단사고(Main Feedwater Line Break, MFLB) 등은 고온 고압의 냉각재를

격납건물 대기에 방출함으로써 격납건물 온도와 압력을 상승시켜 격납건물의 건전성을 위협할 수 있어 격납건물의 설계기준사고으로 설정되어 있으며, 보수적인 분석을 위해 최악의 단일고장 및 사고 초기의 소외전원의 상실(Loss of Offsite Power, LOOP)을 가정할 것을 요구하고 있다 [1, 2].

사고 발생과 동시에 소외전원 상실을 가정할 경우 일반적으로 격납건물 열제거 기능을 담당하는 격납건물 팬쿨러 계통의 냉각수펌프는 전력을 수전하지 못하고, 비상전력이 공급될 때까지 정지하게 된다. 한편 격납건물의 대기를 순환시키는 팬은 서서히 감쇄 운전(Coastdown)을 하게 되어 팬쿨러의 코일은 계속적으로 격납건물 대기로부터 열을 받을 수 있고 이 결과 팬쿨러 코일 내부에 2상유동이 발생할 가능성이 있다. 이후 공학적안전설비 작동신호 (Engineering Safety Features Actuation Signal, ESFAS)에 따라 비상디젤발전기로부터 전력이 공급되어 기기냉각수 (Component Cooling Water, CCW) 펌프가 재기동하는 경우, 찬 물이 코일 내부로 유입되고 증기가 접하면서 응축 유발 수격현상 (Condensation Induced Water Hammer)을 일으킬 수 있다. 이러한 수격에 의한 하중은 팬쿨러 계통 배관의 손상 및 격납건물 열제거계통의 건전성에 대한 위협이 될 수 있다[3]. 미국 원자력규제위원회 (United States Nuclear Regulatory Commission, USNRC)는 본 현상의 발생가능성 및 그 위험도에 근거하여 Generic Letter 96-06 [3]을 발행하여, 모든 발전용 원자로 사업자에게 본 현안에 대한 평가 및 방지 조치를 취할 것을 요구한 바 있다. 이에 따라 미국내의 발전용원자로 사업자들은 격납건물 팬쿨러 수격현상 및 열적 과압 방지 등 일련의 평가 및 개선안을 제시해 왔다 [4].

국내의 고리 1호기에서 영광 3,4호기까지의 가동 원전에서는 격납건물 팬쿨러를 사고 완화 수단으로 사용하고 있으므로 설계기준 만족에 필요한 건전성 확보를 보장하기 위해서는 응축 수격 발생가능성 평가 등 Generic Letter 96-06에 대한 평가가 요구되나, 현재까지 이에 대한 평가가 이루어 진 바 없다.

본 연구는 국내 기동원전에 대하여 Generic Letter 96-06에서 요구하는 소외전원상실시 내관내의 응축수격 현상의 발생 가능성을 평가하는 방법을 제시하는 데 목적을 두고 있다. 이를 위하여 격납건물 팬쿨러 계통 배관내의 과도 2상유동을 RELAP5/MOD3.3 코드[5]를 이용하여 분석하였다. 해석 입력 모델의 개발을 위하여 고리 3,4호기 설계 자료를 참조하였고 RELAP5 코드 계산 결과을 통해 2상유동 및 응축유발 수격현상의 발생 가능성을 평가하였다. 또한 사고시 팬쿨러 운전에 사용되는 기기냉각수 재고량 및 팬쿨러 초기 입구 압력 등 불확실성을 갖는 주요 변수에 대한 민감도 분석을 수행하여 해석 방법의 신뢰성을 확인하였다.

2. 설계 검토

본 연구에서는 Generic Letter 96-06에 기술된 응축수격 발생 가능성을 평가하는 방법을 제시하기 위해 고리 3,4호기[6]의 설계를 참조하였다. 고리 3,4호기에서 본 현안에 관련되는 계통은 격납건물 팬쿨러계통 (Containment Fan Cooler System), 기기냉각수계통 (Component Cooling Water System, CCWS), 중앙냉방수 계통(Central Chilled Water System) 등이며, 관련되는 설비로는 팬쿨러 유니트, CCW펌프, CCW열교환기, CCW서어지탱크, 배관 및 밸브 등을 갖는다. 고리 3,4 호기에서는 설계기준사고 시 격납건물 열제거를 위하여 두 개의 안전등급 격납건물 팬쿨러 트레인를 설치하고 있으며 트레인당 2개의 팬쿨러 유니트를 갖고 있다. 각 팬쿨러는 냉각코일과 냉각팬으로 구성되어 있으며, 사고 시에는 냉각코일에는 기기냉각수만 공급된다. 표 1은 이들 관련 계통의 설계 특성을 요약해서 보여주고 있다.

그림 1은 격납건물 팬쿨러계통의 운전과 관련된 CCW계통을 보여 준다. 사고시 기기냉각수는 펌프로부터 체크 밸브 및 열교환기를 통해 CCW헤더를 거쳐 격납건물 외부 모터구동 밸브, 체크밸브 및 분기관을 거쳐 팬쿨러 코일에 공급된다. 팬쿨러 코일 출구의 기기냉각수는 모터구동

밸브와 분기관, 외부의 모터구동 밸브를 통해 펌프 흡입측으로 흐른다. 서어지 탱크는 흡입 분기관에 연결되어 있다. 유로상의 모든 밸브는 개방 고착되어 있고 두개의 트레인으로 되어 있어 단일고장에도 유로를 형성할 수 있다.

표 1. 격납건물 팬쿨러 관련 계통 설계 특성

관련 계통 및 항목	설계수치
격납건물 팬쿨러 - 수량 및 형식 - 열부하/유니트(정상/사고) - 공기유량/유니트(정상/사고) - 설계압력/온도, - 사고시 입/출구 공기온도, 압력 강하 - 코일 재질 및 코일 재원	 4, Draw-through, Finned Tube 방식 > 50×10^6 Btu/hr 66,000/33,000 ft^3/min 150 psig /250 °F 280°F /275°F, 0.45 psia ASME SB-75 Alloy 122 Cu 5/8-in OD 0.049 thickness
팬쿨러 코일측 기기냉각수계통 - 냉각수 유량/유니트 - 냉각수 온도 입/출구, 압력 강하	 1050 gpm 101/201°F, 10 psia
기기냉각수 펌프 - 수량 및 형식 - 용량/차압수두, 펌프출구 운전압력	 4, 수평원심형 13,000 gpm /181 ft, 144 psia
기기냉각수 열교환기 - 수량, 형식, 튜브/쉘측 유체 - 열부하 및 유효전열면적, - 전체열전달계수, - 튜브/쉘측 입출구 온도, - 튜브/쉘측 압력강하, 유량, - 튜브/쉘측 설계압력, 설계온도,	 2, 쉘-튜브 방식, 해수/기기냉각수 70 x 10^6 Btu/hr, 21676 ft^2 245 Btu/h-ft^2/°F, 82.4/92.1°F, 105.8/95°F 10/10 psia, 15000/13000 gpm 75/ 150 psia, 150/200°F
기기냉각수 서어지 탱크 - 수량 및 형식 - 용량, 운전압력, 온도	 2, 수직형 5000 gal, 20 psia, 120°F

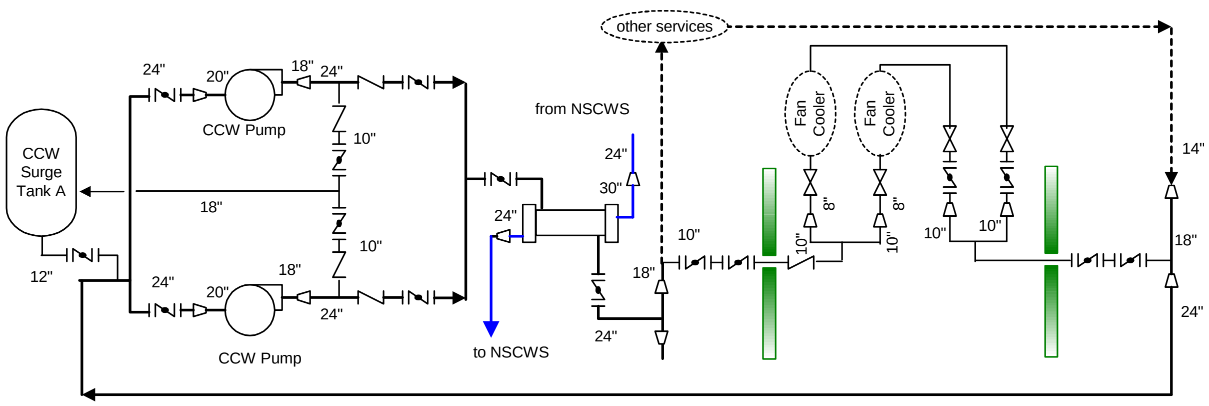

그림 1. 격납건물 팬쿨러계통 및 기기냉각수계통

기기냉각수 펌프는 단일고장에도 대비할 수 있도록 충분한 용량을 가지고 있으며 팬쿨러를 포함한 배관에 대해 충분한 NPSH를 확보하도록 설계되어 있다. 계통 배관에는 압력방출 밸브가 설치되어 있어 과압화를 방지한다. 소외전원상실시 CCW 펌프는 약 27초에 비상디젤발전기로부터 동력을 공급받아 기동할 수 있다. 팬쿨러와 CCW펌프는 각각 격납건물 166 ft 및 100 ft위치에 있고 CCW서어지탱크는 148 ft위치에 바닥이 있다 이들 주요 기기 사이에는 체크밸브, 동력구동밸브, 유량조절밸브 등이 8인치~24인치 배관으로 연결되어 있다.

3. 해석 모델

본 연구의 해석을 위해서는 RELAP5/MOD3.3 [3] 코드가 사용되었다. 본 코드는 불응축성 가스 거동을 고려하여 원자로계통 과도 이상 유동을 1차원적으로 해석할 수 있으며 다양한 코드 평가를 통해서 그 적용성이 입증되어 왔다 [3].

팬쿨러 및 관련 배관내의 응축수격 발생 가능성을 평가하기 위해서 팬쿨러 코일, 냉각수 공급 및 회수 배관, 기기냉각수펌프 및 기기냉각수 열교환기 등을 포함하는 폐쇄형 루프(closed loop)를 구성하였다 (그림 2 참조). 이러한 해석모델은 개방 루프 모델에 비해 사고 시이퀀스를 묘사하는 경계조건을 처리하는 데 매우 편리하지만 전체 계통의 기하학적 정보를 모두 모델링해야 하는 어려움을 가진다. 본 연구는 해석 방법을 제시하는 데 목적을 두고 있으므로 발전소의 팬쿨러 계통 배관 및 기기 전체를 그대로 모델링하지 않고 팬쿨러 코일, 기기냉각수펌프, 기기냉각수 열교환기 등의 주요 부품과 연결 배관을 단순화시켜 묘사하였다. 그림 2는 본 연구에서 개발한 RELAP5 해석 모델을 보여준다. 이 모델은 전체 158개의 수력학적 체적, 156개의 Junction, 47개의 열구조물로 구성되어 있다. 주요 부품의 모델링 특징은 다음과 같다.

1) 팬쿨러 모델링

격납건물 팬쿨러는 코일 부분과 격납건물 대기의 팬 영역으로 구성된다. 팬 영역은 단일체적으로 모델하였으며, 팬쿨러에 유입/유출되는 대기의 상태는 사고 후 불응축성 가스에

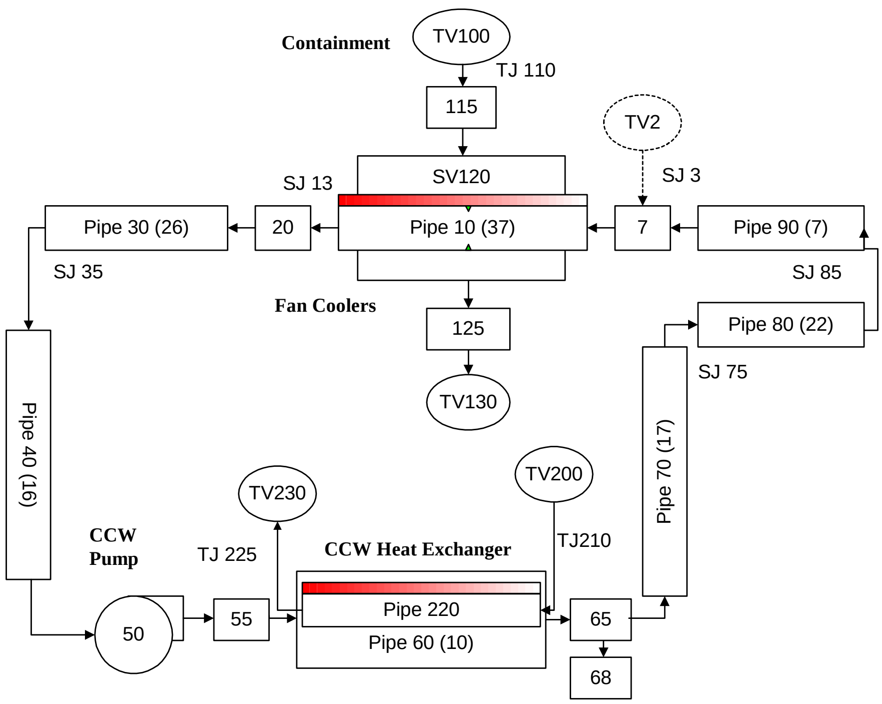

그림 2. 격납건물 팬쿨러 RELAP5 해석 모델

습분이 포함되어 있는 것으로 고려하였다. 대기 유량, 온도 등은 표 1에 제시된 바와 같이 사고 조건을 포괄하는 설계값으로 하였다. 한편 사고시의 최대 온도 280°F는 순간적으로 발생되지만 본 연구에서는 보수성을 위해서 과도기간 동안 이값으로 유지된다고 가정하였다. 코일 내부의 유로는 팬쿨러 코일 유니트의 설계자료를 참조하여 37개의 수평 체적으로 설정하였다. 열전달이 이루어지는 코일벽은 37개의 열구조물로 묘사하고 RELAP5의 기본 강제대류열전달 상관식을 사용하도록 하였다. 코일 열구조물의 열전달 면적은 주어진 유입/유출 조건에서 표 2에 제시된 사고시의 열부하(50×10^6 Btu/hr)를 수용할 수 있도록 결정하였다.

2) 배관 모델링

CCW 펌프에서 열교환기, 열교환기 출구에서 격납건물 관통부 및 팬쿨러 입구, 팬쿨러 출구에서 CCW 펌프 입구 까지의 배관을 단순화시켜 모델하였다. 배관의 전체 높이는 설계와 동일하게 묘사하였으며, 관마찰 손실, 엘보우, 분기관 등 배관형상에서 생기는 수두 손실은 손실계수로써 고려하였다. 한편 사고시 팬쿨러 운전에 사용되는 CCW재고량을 정확히 파악하기 어려우므로 열교환기 출구에 사체적 (Dead Volume)을 두고 예상되는 범위에서 물의 체적을 변화시키면서 민감도를 분석하도록 하였다. 또한 기기냉각수 출구에서 팬쿨러 입구까지의 높이 차이는 주어져 있지만 및 배관 형상 등에 따른 압력 강하를 정확히 평가할 수 없었으므로 모든 조건을 유지하면서 팬쿨러 전방의 압력을 변화시킬 수 있도록 하였다 (그림 2 참조).

3) 기기냉각수 펌프 모델링 및 기기냉각수 열교환기 모델링

RELAP5의 펌프 부품을 사용하여 모델하였다. 본 연구에서는 단일 팬쿨러 유니트만을 고려하였으므로 CCW펌프 설계유량 대신 팬쿨러 단일 유니트당의 유량(1050 gpm)을 사용하였으며 수두는 설계값인 181 ft로 하였다. 펌프는 소외전원상실후 1초내에 완전 정지하고 재기동하는 경우에도 동일하게 적용하였다. CCW 열교환기는 팬쿨러 코일을 통해 전달된 열과 같은 양의 열을 해수로 전달할 수 있도록 모델하였다.

4) 정상상태 계산

설계기준사고 발생 이후 소외전원 상실이 발생하기 전의 상황을 묘사하기 위한 계산을 수행하였다. 이 계산을 통해서 설계에서 가정한 열제거 성능을 예측하는 데 적합하도록 단순화된 모델의 손실계수 등을 조정하였다. 계산 결과 본 연구에서 개발한 모델이 표 2에 제시된 사고시의 열제거 성능을 예측할 수 있음을 확인하였다.

4. 해석 결과

앞서 수행된 정상상태 입력 모델을 이용하여 과도 해석을 수행하였다. 과도 상태에서는 50초에 소외전원 상실이 발생하여 CCW 펌프가 정지하고 공학적안전설비 작동신호에 의해 80초에 CCW 펌프가 재기동하는 것을 가정하였다. 본 연구에서 해석된 경우는 표 2에 제시되어 있다.

표 2. 이상유동 및 응축 유발 수격 현상 발생 가능성 평가 결과 요약
(아냉각여유도 및 기포발생여부)

냉각수 재고량, gal	팬쿨러 입구 압력, MPa (psia)				
	0.2(35)	0.272(40)	0.34(50)	0.408(60)	0.68(100)
37,000	9.8 K	12.7 K	17.9 K	22.6 K	38.1 K
75,000	2.2 K (기포)	2.6 K (기포)	8.7 K	14 K	31.8 K
150,000	0.5 K (기포)	0.9 K (기포)	3.8 K (기포)	8.9 K	28.4 K

냉각수 재고량과 팬쿨러 입구 압력에 대해 여러가지 경우를 해석한 것은 앞서 언급된 바와 같이 이들 인자가 이상 유동 형성 및 응축 유발 수격 현상에 중요한 영향을 미치지만 이에 대한 상당한 불확실성이 있기 때문이다. 이 표에 제시된 0.2 MPa은 CCW펌프 정지시 CCW서어지탱크에 의해 유지될 수 있는 팬쿨러 입구 최소압력이고, 0.68 MPa은 최소 압력손실을 가정하였을 때 가질 수 있는 최대 압력이다. CCW 재고량은 문헌 [6] 등을 기초로 하여 추정한 최대 및 최소값이다.

그림 3은 루프의 유량 및 CCW 펌프 회전속도의 변화를 보여주고 있다. 50초에 CCW 펌프가 정지한 후에도 루프 유량은 관성 효과에 의해 약 3초간 유동이 존재함을 보여 준다.

그림 4는 격압건물 대기에서 팬쿨러로 유입되는 열 및 기기냉각수 열교환기를 통해 해수로 제거되는 열을 비교해서 보여 준다. 정상상태 이후 유동 감소에 의해 열전달이 현격히 감소하지만 이후의 자연순환에 의해 약간 열전달량이 증가한다. 그러나 해수측으로 제거되는 열량이 작아서 그 차이 만큼의 열은 코일 내부의 물을 가열시키게 된다. 80초에 유동이 재형성되면 열공급과 열제거간의 평형이 회복된다. 이러한 현상은 입구압력 및 CCW 재고량에 무관하게 모든 경우에 공통적으로 발생한다.

그림 5는 팬쿨러 입구 초기압력 0.2 MPa의 경우 3가지 재고량에 대해 계산된 팬쿨러 코일 말단 압력을 비교하고 있다. 그림 6은 팬쿨러 입구 초기압력 0.34 MPa의 경우 재고량 150000 gal 시의 코일 출구부분의 온도분포와 에당되는 포화온도를 비교하여 보여 준다.

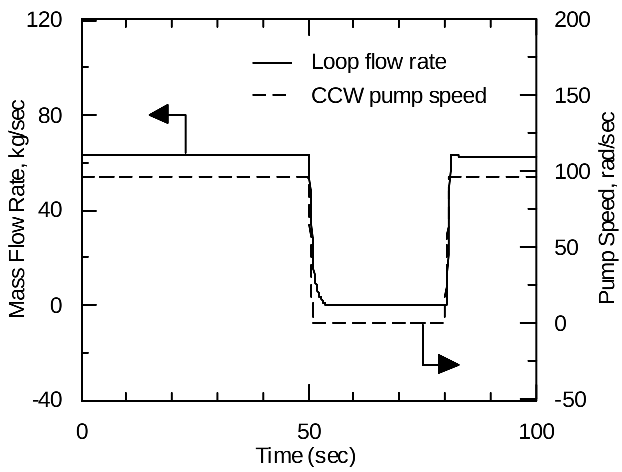

그림 3. 루프 유량 및 펌프 속도

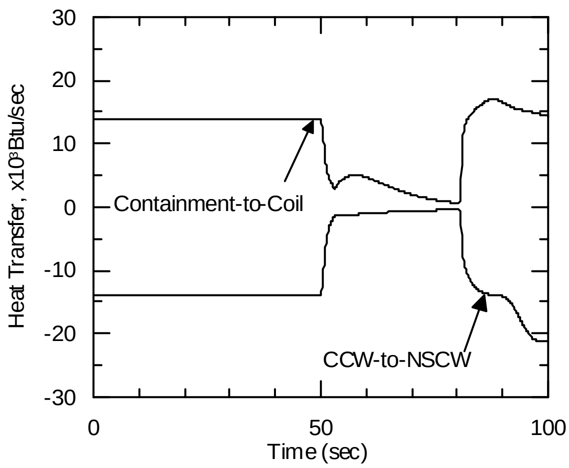

그림 4. 팬쿨러 코일 및 기기냉각수 열교환기 열전달

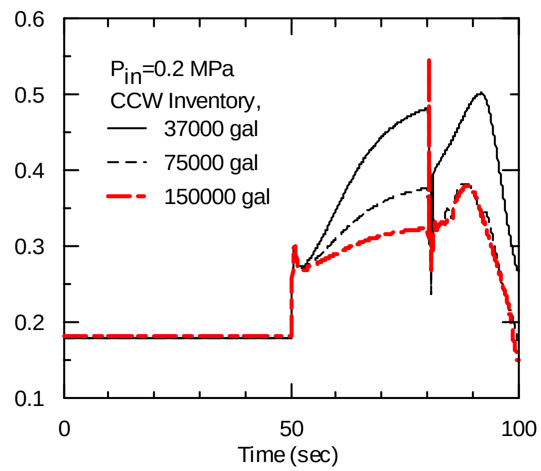

그림 5. 팬쿨러 코일 출구 압력

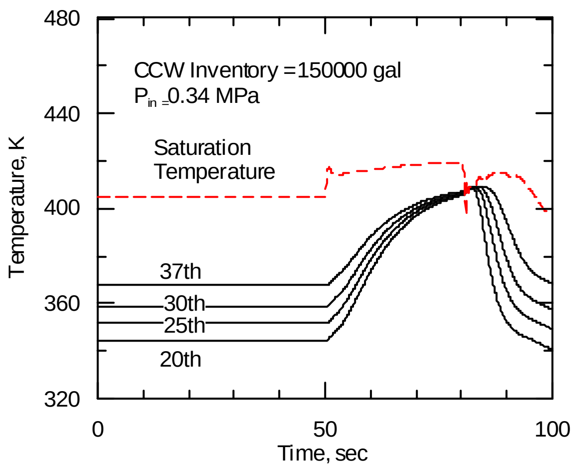

그림 6. 팬쿨러 코일 온도

해석 결과에서 알 수 있듯이 CCW 재고량이 클수록, 초기 입구압력이 작을수록 코일 내부의 압력 상승이 적게 된다. 이 결과 포화 온도와 유체의 온도 차이가 적어져 2상유동 발생의 가능성이 커지게 된다. 초기 입구압력 0.2 MPa의 경우 75000 및 150000 gal의 경우 모두 CCW 펌프 재기동 시점에서 순간적인 압력 피이크를 보인다. 이것은 기포 발생 및 찬물과의 접촉에 의한 응축에 기인한 압력 변동으로 볼 수 있다.

그림 7과 8은 CCW재고량 150000 gal에서 기포가 발생한 세가지 경우 (0.2, 0.27, 0.34 MPa)에 대해 팬쿨러 코일 출구부분에서의 기포율 거동 및 이에 해당하는 압력 거동을 비교해서 보여준다. 이들중 0.2 및 0.27 MPa의 경우에 급격한 압력 피이크가 관찰되는데 이들은 모두 기포 발생에 의한 급격한 압력 증가에 해당된다. 기포의 발생은 3-4초 이내이며, 발생 범위도 코일 출구쪽 일부에 국한되어 있다. 따라서 기포 발생의 정도가 크지 않아 팬쿨러 입구에 미치지 못하여 증기와 차가운 냉각수가 직접 접촉하여 발생되는 응축유발 수격현상은 관찰되지 않았다.

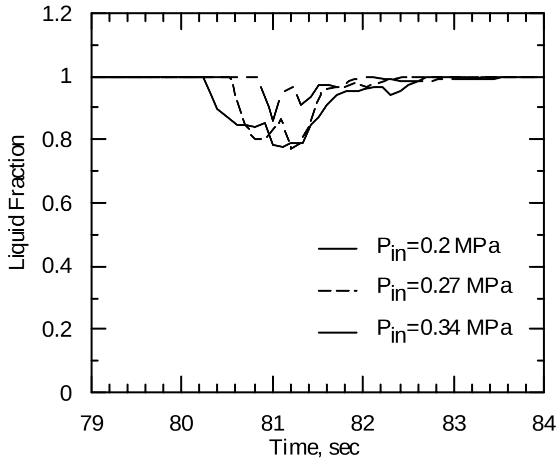

그림 7. 기포율 생성 비교

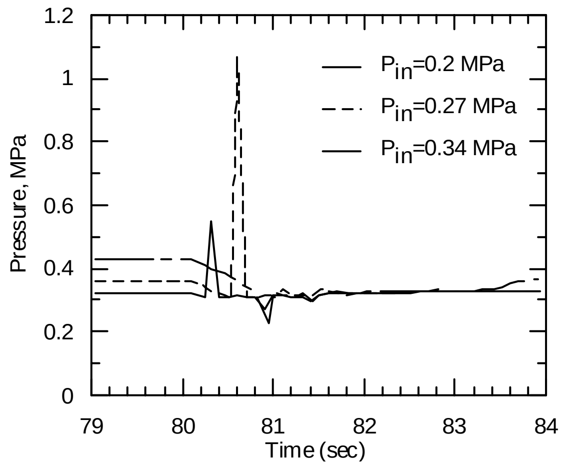

그림 8. 압력 피이크 비교

이 결과에 의하면 코일 내부에 증기발생 및 이상 유동에 의한 압력 피이크도 1 MPa 이상일 수 있음을 알 수 있다. 본 연구의 결과 2상유동이 발생하는 경우를 표 2 및 그림 9에 제시하였다. 이 결과에서 아냉각 여유도 5K를 2상유동 발생 기준으로 할 때 팬쿨러 입구 압력이 0.35 MPa 이상에서는 2상유동 및 응축유발 수격현상 발생을 피할 수 있음을 알 수 있다. 더 작은 CCW 재고량인 경우에는 더 낮은 압력에서도 이상 유동 발생 가능성은 작아진다는 것을 알 수 있다.

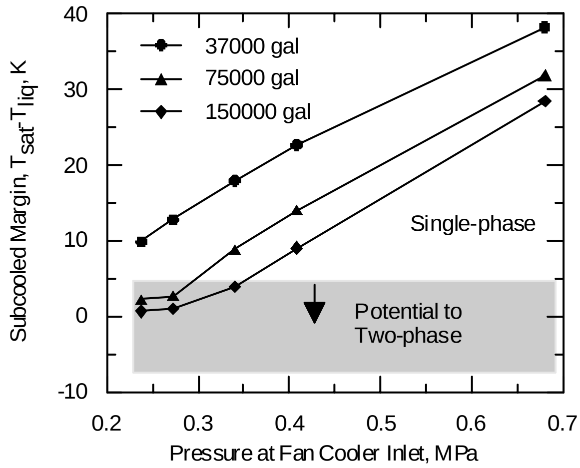

그림 9. 입구압력 및 재고량에 따른 이상유동 발생 영역

5. 결 론

본 연구는 국내 가동원전에 대하여 USNRC Generic Letter 96-06에서 논의된 설계기준사고시 소외전원상실에 따른 격납건물 팬쿨러 배관내의 응축수격 현상의 발생 가능성을 평가하기 위한 방법을 제시하기 위한 목적으로 수행되었다. 고리 3,4호기 설계 자료를 참조하여 해석 입력 모델을 개발하였고, RELAP5/MOD3.3 코드를 이용하여 배관 내의 과도 2상유동을 분석하였다. 사고시 팬쿨러 운전에 사용되는 기기냉각수 재고량 및 입구 압력 등 불확실성을 갖는 주요 변수에 대해서는 민감도 분석을 수행하였다. 해석 결과 주어진 기기냉각수 재고량에 대해 초기 팬쿨러 입구 압력이 낮을수록 코일내의 2상유동의 발생 가능성이 높아진다는 것을 확인하였다. 조사된 범위에서는 응축 유발 수격현상은 예측되지 않았으나 초기 입구압력이 낮은 경우 기포 생성에 기인한 상당한 압력피이크가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이 결과에 근거할 때 본 연구의 해석방법이 응축유발 수격 발생가능성 평가에 적용될 수 있음이 확인되었다.

참고문헌

[1] 과학기술부, 원자로시설의 기술기준에 관한 규칙, 과학기술부령 제31호, 대한민국, (2001)

[2] US Nuclear Regulatory Commission, General Design Criteria for Nuclear Power Plant, Appendix A to 10 CFR Part 50, Washington D.C, USA (1987)

[3] USNRC, Generic Letter 96-06, “Assurance of Equipment Operability and Containment Integrity Under Design Basis Accident Condition”, D.C, USA, September (1996)

[4] EPRI, “Resolution of Generic Letter 96-06 Waterhammer Issues,” EPRI Report, TR-113594, July (2001)

[5] Information System Laboratory Inc., RELAP5/MOD3.3 Code Manual, NUREG/CR-5535, Rev.1, USNRC, December (2001)

[6] KEPCO, Final Safety Analysis Report for Korean Nuclear Units 5 and 6, Sept (1983)