에너지공학, 제21권 제1호(2012)
Journal of Energy Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 75~80 (2012)
http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2012.21.1.075

원전 격실에 대한 최적 침수분석 방법

송동수† · 김상열*
한국수력원자력(주), *중앙연구원
(2011년 9월 23일 접수, 2012년 2월 10일 수정, 2012년 2월 10일 채택)

Optimized Flooding Analysis Method for Compartment for Nuclear Power Plant

Dong-Soo Song† and Sang-Yeol Kim*
Korea Hydro & Nuclear Power Company
**Central Research Institute*
(Received 23 September 2011, Revised 10 February 2012, Accepted 10 February 2012)

요 약

본 논문은 원자력발전소의 대형탱크 또는 배관파단에 따른 격실의 침수분석을 수행함에 있어 최적평가방법을 개발하여 원전에 실제로 적용하는 방법에 관한 논문을 작성하는데 목적이 있다. 주급수관파단사고 분석을 위해 RETRAN 전산코드를 사용하였다. 유출수 질량유량을 계산하는데 있어서 주급수제어밸브가 계통설계에 의거 원자로정지 후 5.0초 만에 닫히는 것으로 모델링하여 분석하였다. 출력 70% 운전시 방출유량이 가장 높은 것으로 나타났다. 방출 질량유량을 가지고 침수위를 계산한 결과 주급수관 격실의 최대 침수위는 1.43m로서 이는 안전성기기가 설치된 위치보다 낮아 원전의 안전정지에 미치는 영향이 없는 것으로 나타났다.

주요어 : 내환경기기검증, 질량/에너지방출, 침수, 격실

Abstract — In this paper a realistic bounding method for flooding analysis following rupture of large size of thanks and piping is defined. Mass and energy release during main feedwater line break accident is analyzed with RETRAN code. It is modeled that the main feed water control valve is closed in 5.0 seconds after reactor trip. In result of the analysis, largest mass and energy is discharged at 70% reactor power. The flood sources for main feedwater room are calculated when piping failure occurs in the high energy line and medium energy line. Based on the result of flood level (1.43m), it is investigated that all of the safety-related environmental qualification equipments are well located above the flood level.

Key words : Environmental Equipment Qualification, Mass/Energy Release, Flooding, Compartment

1. 서 론

원전의 원자로건물과 터빈건물 사이에 위치한 중간건물의 주급수배관격실에 대한 침수 분석을 위해 우선 주급수관 파단사고 분석 방법론 및 해석범위를 정의하였다. 주급수계통은 증기발생기 입구 노즐에서 주급수펌프 출구까지 모델링 하였으며 급수유량은 주급수펌프의 과유량 설정치를 사용하였다. 주급수배관 파단 사고는 역류방지밸브 후단과 전단 파단의 경우에 대해서 수행하나 본 논문에서는 역류방지밸브가 격납건물 내에 있기 때문에 역류방지밸브 전단 파단에 대한 사고해석만 수행하였다. 주급수관 파단에 따른 질량 및 에너지 방출 해석 결과 70% 원자로출력에서 가장 많은 질량 및 에너지가 방출되는 것을 확인하였다.

침수 사고를 내환경 기기검증 인자로 선정하여 고에너지배관과 중에너지배관의 배관파손시의 침수원을 조사하고, 바닥배수구 등의 배수로를 조사하였으며, 이를 기초로 격실의 침수위를 계산하였다. 안전성

†To whom corresponding should be addressed.
Korea Hydro & Nuclear Power Company, Central Research Institute, 305-343 70 1312-gil Yuseong-daero Yuseong-gu Daejeon, Korea
Tel : +81-42-870-5252; E-mail : dssong@khnp.co.kr

관련 기기를 포함하고 있는 지역에 대해 침수분석을 수행하였는데, 분석 기술기준은 주급수배관 격실에서 침수로 인한 수위가 안정정지에 관련이 있는 안전성 기기 설치 위치보다 낮아야 한다.

2. 주급수관파단 해석

2-1. 질량 방출량 해석방법

2-1-1. 해석개요

원전 열수력 계통 안전해석 코드인 RETRAN을 활용하여 원전 주급수관 파단에 따른 질량 및 에너지 방출량 분석과 격납건물 외부의 주급수밸브격실 침수 분석용 최대방출 유량을 계산한다. 주요 분석내용은 주급수관 파단사고 질량 및 에너지 해석방법 개발, 주급수계통 해석모델 입력 작성, 민감도 분석, 사고조건별 스펙트럼 분석, 파단 방출량 계산이다.

2-1-2. 설계 요구조건

주급수관은 최대 운전온도가 93.3℃(200°F)와 압력 18.96bar(275psig)를 초과하는 고에너지 배관으로 내환경 기기검증(Environmental Equipment Qualification, EEQ) 분석을 위한 부격실 내 구조물과 기기가 받는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서는 급수관 파단 질량 및 에너지(Mass and Energy, M/E) 방출량을 해석해야 한다. 현재 내환경 기기검증을 위한 설계기준사고 질량 및 에너지 방출량 분석은 NUREG-0588 [1]과 NUREG 1.89 Rev 1 [2]에 따라 수행되었다. 고에너지 배관파단 지점으로부터 방출되는 질량 및 에너지를 계산하여 중간건물 부격실의 온도 및 압력분석과 침수분석을 위한 입력 자료로 사용하였다.

2-1-3. 사용 전산코드

주급수관 파단사고 M/E 계산을 위해 RETRAN 코드를 사용하였다. RETRAN 전산코드는 미국의 EPRI (Electric Power Research Institute)가 경수로의 열수력계통 과도현상 분석을 목적으로 개발하였다.

2-1-4. 해석범위

주급수관 파단사고 시 방출되는 질량 및 에너지 사고해석을 위한 분석은 격납건물 외부 주급수배관격실에서의 최대 온도 및 압력 그리고 최대 파단방출유량이 계산될 수 있도록 모델링 한다. 주급수관 파단사고는 주급수관 역류방지밸브 전후의 파단위치와 출력별, 파단크기 및 형태로 경향이 달라진다. 따라서 이들 변수들에 대한 스펙트럼 분석을 수행한다. 발전소 출력별 초기값과 설정치들은 보수적 해석결과가 나올 수 있도록 최대 또는 최소값을 사용한다. 주급수배관 파단사고 전산해석을 위해 발전소 일차 및 이차계통

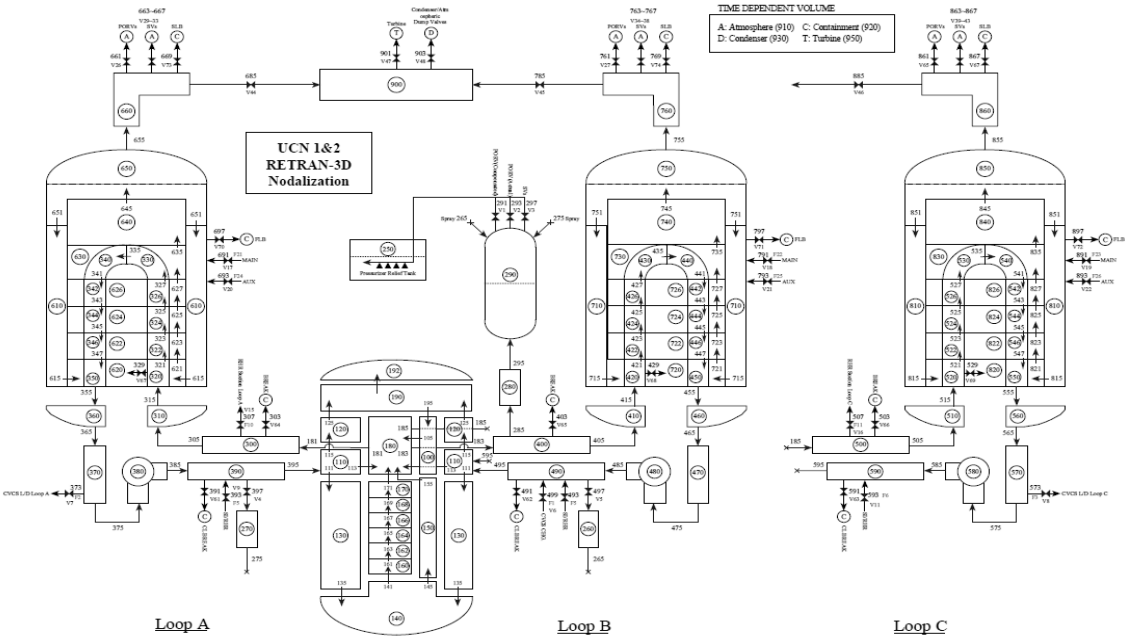


그림 1. RETRAN Nodalization

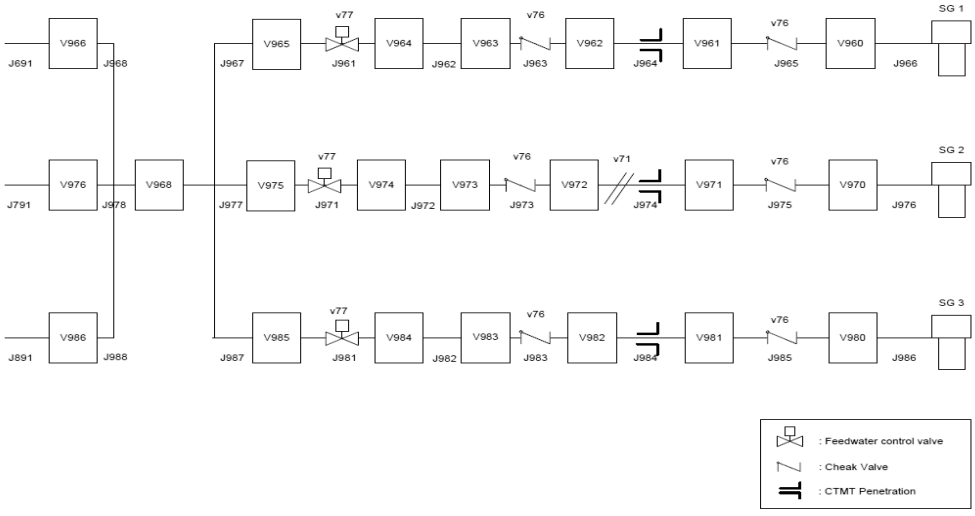


그림 2. RETRAN 코드 주급수 배관파단 Nodalization

표 1. 원자로 출력별 사고해석 초기조건

출력(%)	Tavg(℃)	가압기 수위(m^3)	주급수온도(℃)	증기압력(bar)	주급수 엔탈피(kJ/kg)
102	306.6	25.6	222.8	58.1	956.8
100	306.6	25.6	222.8	58.7	956.8
70	300.4	20.5	201.4	61.3	859.9
30	292.2	13.8	157.2	65.2	666.5

을 모델링 하였다. RETRAN 전산코드의 입력모델 범위는 반응도 모델, 증기발생기, 가압기, 원자로 제어계통, 원자로보호계통 그리고 공학적안전설비계통 등이 해당된다.

2-1-5. **초기조건 및 가정**

사고분석 주요 초기조건은 표 1과 같다 [3]. 가장 제한적 분석결과를 생산하기 위해 노심 출력별로 스펙트럼 분석을 수행한다. 노심출력별 주급수 펌프기동 대수에 해당되는 출력범위로 대표적으로 102%, 70%, 30% 로 가정한다 [4].

원자로 냉각재계통의 유량은 열설계유량(thermal design flow)값을 사용하며, 초기 원자로냉각재계통의 평균온도는 최대값을 사용한다. 가압기의 초기압력은 공칭값인 155.1bar(2250psia)을 사용하며, 가압기 수위는 해당 출력값을 사용한다. 증기발생기 압력은 출력별 초기 압력값을 사용하며, 증기발생기 재순환유량은 각 출력에 해당되는 순환율값을 사용한다. 증기발생기 초기수위는 각 출력에 해당하는 초기 질량값을 사용하며, 열전달 향상을 위해 증기발생기 관막음율은 0% 관막음율을 가정한다. 급수의 엔탈피는 최대값을 사용하였으며, 주급수 유량은 각 출력에 해당되는 최대 주급수 유량값을 사용한다.

2-1-6. **파단위치**

역류방지밸브와 주급수 격리밸브 사이의 주급수 배관에 양단 파단이 발생하는 경우에는 역류방지밸브가 파단 증기발생기로부터 부격실로 냉각재 방출을 방지하므로 증기발생기 압력은 급격히 감소되지 않는다. 주급수 펌프에 의해 공급되는 급수유량의 대부분이 파단부로 방출되므로 증기발생기로의 급수 공급이 중단된다. 이로 인해, 증기발생기 수위는 저수위 설정치까지 감소되어 원자로가 정지된다. 원자로 정지로 원자로냉각재 온도가 저 평균온도 설정치 이하로 감소되면 모든 주급수 밸브들이 차단되어 주급수 격리가 이루어져 격실로 방출이 종료된다.

2-1-7. **원자로보호계통**

원자로 정지는 다른 신호가 먼저 발생하더라도 증기발생기 저-저수위에 의해 발생하는 것으로 가정한

다. 증기발생기 저-저수위 설정치는 원자로 정지를 지연시키기 위해 최소값을 사용한다. 저-저수위 설정치는 0%로 가정하였다.

주급수관 역류방지밸브 후단에서 주급수관 파단이 발생하면, 주증기 격리밸브(Main Steamline Isolation Valve, MSIV)가 닫히기 전까지는 파단 측의 증기발생기 뿐 아니라 건전한 측 증기발생기의 재고량은 주급수관을 통해 역류하여 파단 부위를 통해 방출된다. 그러나 본 사고해석에서는 주급수관 역류방지밸브 전단에서의 파단을 고려하기 때문에 증기발생기 재고량이 주급수관을 통해 역류하여 파단 부위로 방출되지는 않으므로 주증기관 격리는 사고해석에 큰 영향을 끼치는 않는다.

주급수 격리 신호는 원자로 정지발생 및 원자로냉각재 저-온도 신호, 안전주입 신호, 증기발생기 고-고수위 신호에 의해 발생한다. 주급수 격리 신호가 발생하면 모든 주급수펌프가 정지하고 주급수제어밸브가 닫힌다. 주급수 닫힘 시간은 5.0 초를 가정하였다. 주급수 격리 신호 발생 후 주급수제어밸브가 닫힘으로써 주급수 주입이 중지 된다.

2-2. 질량/에너지 해석결과

그림 3과 같이 주급수관 파단에 따른 질량 및 에너지 방출 해석 결과 70% 출력에서 가장 많은 질량 및 가장 높은 에너지가 방출되는 것을 확인 하였다. 파단면적이 작은 경우 주급수 유량이 파단측으로 모두 방출되지 않고 증기발생기로 주입이 되기 때문에 방출 유량이 작다. 또한 일차측 냉각재계통과 이차측 증기발생기계통의 압력과 온도변화는 파단부위로 방출되는 양에 따라 상이하게 나타났으며, 이와 관련하여 안전계통 신호발생 시간도 달라졌다.

3. 격실의 침수분석

3-1. 침수분석 방법

일반적으로 침수구역내로 유입된 물은 여러가지 배수통로를 통하여 다른 구역으로 확산된다. 배수통로에는 계단, 개방형해치, 바닥관통부, 벽에 설치된 공기조화계통 개구부, 바닥배수배관, 비상배수통로, 문 그리고 문과 바닥사이의 틈새 등이 있을 수 있다. 이러한 통로들이 얼마만큼 효율적으로 물을 배수하느냐는 배수통로의 형태와 침수위에 따른 배수량의 변화율에 달려있다. 즉, 침수위는 시간에 따른 유입량의 변화와 침수구역의 침수가능 체적에 따라 결정된다.

여기에서 계산하고자 하는 주급수배관격실에 대한 최대 침수위는 다음과 같은 방법으로 계산된다 [5].

$$h = (Q_i - Q_o)\ \triangle t/A$$

단, h = 침수위, m

Q_i = 유입 유량, m^3/sec

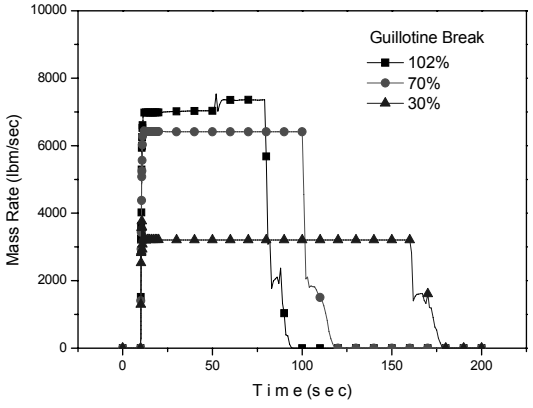
Q_o = 배수 유량, m^3/sec

$\triangle t$ = 유입시간, sec

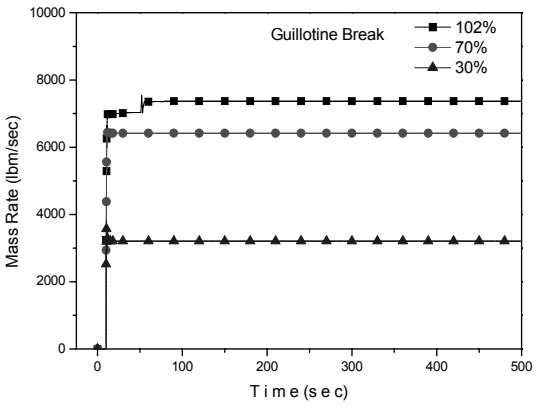
A = 침수가능 면적, m^2

3-2. 침수대상 격실

주급수배관격실 즉, 고도 +11.5 m에 위치한 격실들 즉 2번 증기발생기 급수배관 격실(W530), 1번 증기발생기 급수배관 격실(W531), 3번 증기발생기 급



(a) 주급수제어밸브 격리시



(b) 주급수제어밸브 격리 불가시

그림 3. 주급수배관 파단시 주급수격실의 유입 유량

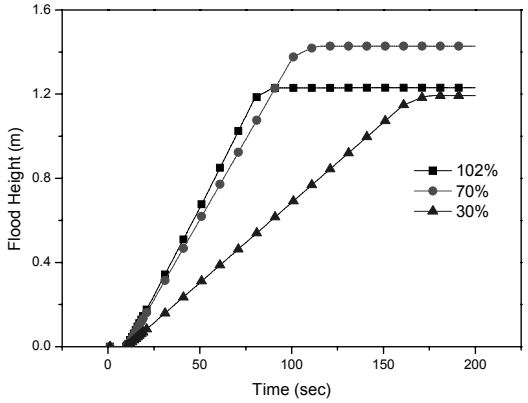
그림 4. 주급수배관격실 내부

수배관 격실(W532)에는 증기발생기 주급수배관이 지나가며, 이 격실들은 위층으로 통하는 외부출입문을 통해서만 출입이 가능하다. 즉, 격실 W530, W531, W532는 침수전파도 외부출입문만을 통하여 가능하고, 배수 설비도 전혀 없는 밀폐된 격실에 해당된다. 그림 4는 주급수배관격실의 내부를 보여주고 있다. 참고로, 주급수배관 격실의 높이는 약 3.5m에 해당된다.

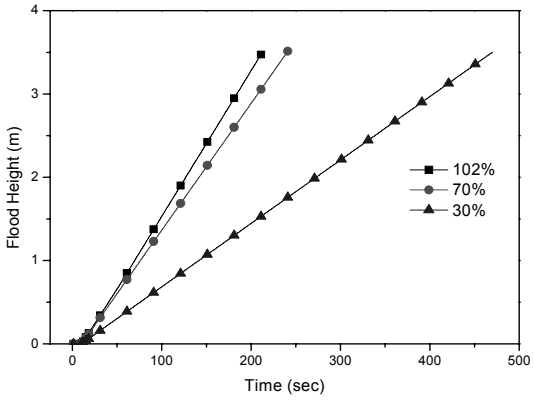
3-3. 분석결과 및 고찰

그림 3의 a)에서 알 수 있듯이, 주급수배관 파단사고에 의해 최대 약 317,514kg_m(700,000lb_m)의 물이 주급수배관격실로 유입되며, 격실 바닥의 구조물 등이 차지하는 면적을 30%로 가정하면 최소 바닥 면적은 193.3m^2(2081ft^2)이므로, 격실의 최대 침수위는 70% 출력 운전에서 약 200초에 1.43m(4.7ft) 침수위에 도달된다. 그림 3의 a)에 제시된 102%, 70%, 30% 출력 운전에 대한 파단 방출 유량 각각에 대한 격실의 침수위 분석 결과는 그림 5 (a)에 제시되어 있다. 주급수배관격실에는 Limit Switch 등 안전등급기기 6개가 2.2m 높이에 설치되어 있으며, 비안전등급 기기는 1.6m 이상에 설치되어 있다. 이와 같이 최대 침수위 이상에 안전성 및 비안전성 기기가 설치되어 있어서 배관 파단시의 방출 유량에 의해 침수될 가능성은 없다. 즉, 주급수배관격실에서의 주급수배관 파단 사고에 의해 침수되는 안전성 관련 기기가 없으므로 침수가 발전소 안전 정지에 미치는 영향이 없다.

그러나, 만일 주급수배관 파단시 주급수제어밸브의 잠김이 보장되지 않을 경우에는 그림 3 (b)에서 알 수 있듯이 주급수배관 파단 부위를 통해 유량이 지속적으로 방출되므로 급수배관격실은 결국 102% 출력 운전의 경우 213초에 완전히 잠기게 된다. 즉, 그림 5



(a) 주급수제어밸브 격리시



(b) 주급수제어밸브 격리 불가시

그림 5. 주급수배관격실의 침수위

의 (b)에서 알 수 있듯이, 격실에 설치되어 있는 안전성 및 비안전성 기기가 102%, 70%, 30% 출력 운전시 약 213~470초에 완전히 침수되므로 발전소의 안전 정지를 보장할 수 없다.

4. 결 론

주급수배관격실에 대한 침수위를 계산하기 위해 침수유량을 전산코드 (RETRAN-3D) 모델을 사용하여 질량방출량을 계산하였다. 주급수관파단사고시 최적 유출유량 계산을 위해 개발된 최적침수분석방법을 적용하였다. 최적침수분석방법을 적용하여 침수위를 분석한 결과 1.43m로 나타났다. 이 값은 원자로정지와 함께 주급수제어밸브가 닫히지 않는다고 가정하는 기존 방법과 비교한다면 현저히 줄어 든 침수위이다. 이러한 침수위는 발전소 안전정지에 사용되는 기기들의 위치보다 낮은 것으로 나타나 침수분석 기술기준에 만족하며 모든 원전에 적용할 수 있다.

참고문헌

1. US NRC, Interim Staff Position on Environmental Qualification of Safety-Related Electrical Equipment, NUREG -0588, Rev.1, (1981).
2. US NRC, Environmental Qualification of Certain Electric Equipment Important to Safety for Nuclear Power Plants, REG Guide 1.89 Rev 1, (1984).
3. Ulchin 1&2 Final Safety Analysis Report, Chapter 3, 4, 6, 9, 11, 15.
4. Standard Review Plan, 6.2.1.4 Mass and Energy Release Analysis for Postulated Secondary System Pipe Ruptures, NUREG-0800, (1981).
5. 이희도 외, "침수환경 평가보고서", 액트, (2011).