

## 월성원자력발전소 비상노심냉각계통의 수격현상 해석

이중섭, 오광석, 김선철, 오종필, 김도현  
한국원자력연구소

### 요약

수격현상(Waterhammer)으로 인한 과도압력하중은 월성원자력발전소 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System : ECCS) 설계의 주요 고려사항이다. 비상노심냉각계통은 특수안전계통으로서 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident : LOCA)후 일차열수송계통을 다시 채워주고 핵연료 손상을 막기위해 노심으로부터 잔열 및 붕괴열을 제거한다. 일차열수송계통으로의 비상냉각수 주입은 고압주입, 중압주입, 저압주입 3 단계로 주입된다. 과도압력이 발생할 것으로 예상되는 고압주입과 중압주입에 대한 6가지 사례들이 ECCS의 배관과 지지대 설계를 위해 고려되었다.

모든 사례에 대한 비상노심냉각계통의 과도압력 현상은 PTRAN 코드에 의해 해석 되었고 해석된 최고과도압력은 설계압력보다 작음을 알게 되었다. 모든 사례의 최고압력과 최고차압은 비상노심냉각계통 배관 및 지지대 설계를 위한 응력해석 자료로서 사용될 것이다.

### 1. 서론

CANDU 6 (600 MW급) 중수로 발전소에는 4 개의 독립된 안전계통이 있으며, 이들은 냉각재상실사고(LOCA)시 원자로의 안전 정지 및 정지상태 유지, 사고 초기 핵연료 냉각과 사고후 장기간 잔열제거, 그리고 방사능 물질의 격납건물내 수용 등의 주요기능을 담당하고 있다. 네개의 안전계통이란 제 1 정지계통(Shutdown System #1; SDS#1), 제 2 정지계통(Shutdown System #2; SDS#2), 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System; ECCS), 그리고 격납계통(Containment System)을 말한다. SDS#1과 SDS#2는 원자로의 안전정지와 정지상태 유지 기능을 담당한다. ECCS는 LOCA시 경수로써 재고량 상실을 보충하며 사고후 장기간 동안 붕괴열과 잔열의 제거 기능을 한다. 격납계통은 사고후 손상된 핵연료로부터 격납건물내부로 누출된 방사능 물질을 대부분 격납건물내부에 수용함으로써 격납건물 외부로의 방사능물질 누출량을 허용치 이하로 제한한다.

본 논문에서는 위에서 간단히 설명한 4 개의 안전계통중 ECCS의 수격현상(Waterhammer)으로 인한 과도압력을 해석하는 것이다. ECCS는 LOCA시 고압, 중압, 저압 재순환의 연속적인 3 단계로 냉각수를 원자로 노심내로 주입한다. 고압주입단계에서는 가스압력을 이용하여 물탱크에 저장된 경수를 원자로 노심내로 신속히 주입시킨다. 고압물탱크 내의 물이 모두 주입되어 중압주입단계 시작을 위한 물탱크 저수위에 도달하면 중압주입단계가 자동으로 시작되는데, 중압주입단계에서는 살수탱크에 저장된 물이 중력에 의해 펌프 흡입구로 흘러 들어오면 ECC 펌프를 사용하여 물을 원자로 노심내로 공급한다. 살수탱크에 ECCS용으로 저장되었던 물이 고갈되면 저압주입단계가 자동적으로 시작된다. 저압주입단계에서는 원자로바닥에 고인 중수와 경수의 혼합물을 회수하여, 중압주입단계에서 사용되었던 동일한 ECC 펌프를 사용하여 열교환기를 통과시킨 후 원자로 노심내로 되돌려 보내어 노심내 잔열을 제거하는 장기간(3 개월) 재순환 노심냉각이 이루어진다. 경수와 중수의 혼합물에 포함되었던 열은 열교환기를 거치면서 제거된다.

본 논문에서는 과도압력이 발생할 것으로 예상되는 고압주입, 중압주입, 시운전동안의 가상 시나리오에 대해 수격현상이 발생할 시 각 배관에 걸리는 과도압력을 알아보고 이를 배관 및 지지대 설계를 위한 응력해석 자료로 사용하고자 한다.

## 2. 해석 사례

수격현상 해석을 위해 간략화된 비상노심냉각계통이 그림 1에 나타나 있다. 비상노심냉각계통을 크게 3 부분으로 나누어 각 해석마다 포함되는 부분을 명시하였다. A부분은 중압주입시만 사용되는 계통이고, B는 고압주입시만 사용되며, C는 중압주입 과 고압주입 공통으로 사용되는 계통이다. 저압주입은 중압주입과 계통을 공유하며 큰 과도압력이 발생되지 않기 때문에 해석에서 제외되었다. 고압주입과 중압주입의 다음 사례들에 대한 해석이 ECCS의 배관과 지지대 설계를 위해 수행되었다.

### 가. LOCA로 인한 고압주입 : CASE HP1

이 사례는 LOCA로 인한 정상고압주입을 해석한다. LOCA 발생으로 인해 열수송계통압력이 5.52MPa(a) (800 psia)로 떨어지고 격납용기 고압신호발생시 가스격리밸브 PV81/PV82는 자동적으로 열리고 ECC 고압물탱크는 4.14MPa(g)(600 psig)로 가압된다. 동시에 고압주입밸브 MV79/MV80이 열여 파열판이 터지도록 한다. 중수격리밸브도 LOCA 신호에 따라 열린다. 이 사례를 위한 초기조건은 다음과 같다.

- 물탱크 출구에서의 초기압력 40 psia + 10.5 m (W.H.)
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 800 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) B + C

### 나. 고압비상노심냉각계통(HPECCS)의 동특성시험 : CASE HP2

이 사례는 고압 ECCS의 시운전을 위해 해석된 것으로서 중수격리 밸브가 닫힌상태로 가스차단 밸브와 고압주입밸브 MV79/MV80이 열여 파열판이 터지도록 한다. 중수격리밸브는 막혀있는 관으로 해석한다. 이 사례를 위한 초기조건은 다음과 같다.

- 물탱크 출구에서의 초기압력 40 psia + 10.5 m (W.H.)
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 800 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) B + C

### 다. 고압비상노심냉각계통(HPECCS)의 가압시험 : CASE HP3

이 사례는 가스격리밸브가 갑자기 열리면서 고압물탱크와 닫혀있는 고압주입밸브 MV79/MV80의 상부에 있는 배관부를 가압하는 것이다. 중수격리밸브는 닫힌 상태이다. 이 사례를 위한 초기조건은 다음과 같다.

- 물탱크 출구에서의 초기압력 40 psia + 10.5 m (W.H.)
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 800 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) B + C

라. 고압주입밸브 MV79/MV80의 닫음 : CASE HP4

이 사례는 고압비상노심냉각주입의 말기부분을 해석한다. 파열판은 항상 열려있는 밸브로 대체되고 물탱크 저수위시에 고압주입밸브 MV79/80은 닫히고 중압중입밸브 MV31/50은 열린다(중압주입펌프 P1은 이미 기동되어 있다). 이 사례를 위한 초기 조건은 다음과 같다.

- 물탱크 출구에서의 초기압력 40 psia + 10.5 m (W.H.)
- 물탱크 출구에서의 말기압력 138 psia + 2.5 m (W.H.)
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 63 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) A + B + C

마. LOCA로 인한 중압비상노심냉각(MPECC) 주입 : CASE MPI

이 사례는 LOCA로 인한 정상 중압주입을 해석한다. LOCA 신호에 따라 ECC 살수탱크에서 ECC 펌프로 가는 두개의 흡입밸브 PV10/PV11은 자동적으로 열린다. 이 밸브들이 열리고난후 "자동" 상태에 있는 펌프는 기동한다. 중압주입밸브 MV31/MV50는 ECC 고압물탱크 저수위신호에 따라 열린다. ECC 펌프를 통해 원자로심으로가는 살수탱크로부터의 비상냉각수는 체크밸브 V76/V77의 하류쪽 압력이 펌프 출구압력보다 낮을시 공급되기 시작한다. 이 압력이 도달될때까지 ECC 펌프는 재순환배관을 통해 물을 재순환 시킨다. 이 사례를 위한 초기 조건은 다음과 같다.

- 살수탱크에서의 압력 40 psia
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 63 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) A + C

바. 중압비상노심냉각계통(MPECCS)의 동특성 시험 : CASE MP2

이 시나리오는 중압주입계통의 시운전을 해석한다. ECC 펌프로 가는 살수탱크흡입밸브 PV10/PV11이 열리고 두 펌프중의 한대는 최고속도로 운전되며 펌프 재순환배관을 통해 물을 재순환 시킨다. 그런뒤 중압주입밸브 MV31/MV50이 열려 중수격리밸브가 닫힌 상태에서 파열판이 디스크 사이에 차압이 75 psid에 도달할때 터질수 있도록 한다. 이 사례를 위한 초기 조건은 다음과 같다.

- 살수탱크에서의 압력 40 psia
- 닫힌 중수격리밸브 상류쪽 배관의 초기압력 14.7 psia
- 모관압력 63 psia
- 입력자료에 포함된 sections(참고 그림 1) B + C

### 3. 해석코드(PTRAN)

비상노심냉각계통의 수직현상해석은 PTRAN 코드를 사용하여 수행하였다. PTRAN 코드는 복잡한 수력학적 계통구조에서 발생하는 과도압력 해석을 위한 범용 코드로 캐나다원자력공사(AECL)에 의해 개발되었고 중수로 원전의 여러가지 복잡한 배관구조를 갖는 계통설계를 위해 광범위하게 사용되어 왔다. PTRAN 코드는 실험[1] 및 시운전 결과[2] 그리고 다른 입증된 과도압력 해석 코드[3]의 해석결과와 비교하여 검증되었다. PTRAN 코드의 이론적 배경은 Method of Characteristics (MOC)에 기초를 두고 있으며 FORTRAN language를 사용한 1 차원, 단상류에 대한 해석 프로그램이다[4]. PTRAN 코드는 배관, 밸브, 오리피스, 펌프, 상층가스가 존재하는 물

탱크, Air Pockets 과 Dead Ends를 갖는 계통에서 압력과 유량의 시간에 따른 변화를 계산할 수 있고 액주분리, 기포와해(void collapse)를 다루는 문제를 풀 수 있으며 유체의 압축성과 배관의 탄성변형을 모두 고려하여 계산한다. PTRAN 코드는 배관과 지지물의 정적 혹은 동적 응력해석용 자료로 사용되는 최고압력, 최대압력차, 과도압력과 시간에 따른 압력차등을 해석결과로 나타낸다.

#### 4. 결과 및 고찰

수직현상으로 인한 과도압력은 밸브의 개방이나 파열판의 터짐 등에 의한 유동의 갑작스런 변동에 의해 나타난다. 이와같은 과도압력현상을 알아보기위해 그림 2에 중압주입계통의 시운전동안 (CASE MP2) 파열판이 터지면서 나타나는 파열판 전, 후단에서의 압력변화를 나타내었다. 중압주입펌프가 기동후 중압주입밸브가 열리면서 파열판에 압력이 전달된다. 파열판 전, 후단에서의 초기압력은 14.7 psia 로써 파열판 상류쪽에서의 압력전파로 인해 차압이 75 psid에 도달하면 파열판은 터지면서 과도압력을 나타내기 시작한다. 갑작스런 파열판의 터짐으로 파열판 전, 후단에서는 초기에는 상류쪽보다는 약간 큰 과도압력이 생기지만 점차 진폭이 작아지며 파열판 상류쪽 압력과 같은 압력을 갖게 된다. 파열판의 갑작스런 터짐으로 인한 과도압력은 파열판이 열려있는 밸브로 해석된 정상중압주입보다는 약간 큰 과도압력을 나타내었다. 각 해석에 대한 최고압력과 최고차압의 크기는 아래와 같으며 이들이 발생하는 시간과 함께 표 1에 요약해서 나타내었다.

CASE HP1에서는 파열판의 상류쪽 설계압력과 하류쪽 설계압력은 서로 다르기 때문에 이들 부분에 대한 최고압력을 따로 나타내었다. 파열판 하류쪽 최고 압력은 927.3 psia로서 중수격리밸브가 열리기 시작할때 밸브 하류에서 발생한다. 파열판 상류쪽의 최고압력은 644.3 psia로서 물탱크가 가압되는 동안 탱크에 인접한 수직배관의 밑부분에서 나타난다. 최고 차압은 73.74 psid 로써 파열판이 파열될때 파열판 RD1을 포함하는 배관에서 발생한다.

CASE HP2에서 최고압력은 637.85 psia로서 물탱크가 가압되는 동안 탱크에 인접한 수직배관의 밑부분에서 발생한다. 최고차압은 73.74psid로서 파열판이 파열될때 파열판 RD1을 포함하는 배관에서 나타난다.

CASE HP3에서 최고압력은 636.65 psia로서 물탱크가 가압되는 동안 탱크에 인접한 수직배관의 밑부분에서 발생한다. 최고차압은 14.45 psid로서 물탱크가 가압되는 동안 고압주입밸브 상류에 있는 수직배관의 밑부분에서 발생한다.

CASE HP4에서 최고압력은 168.26 psia로서 고압주입밸브가 닫히고 난 직후 물탱크에 인접한 수직배관의 밑부분에서 발생한다. 최고차압은 106.59 psid로서 고압주입밸브 MV'80이 완전히 닫히는 순간 이 밸브 양단에서 발생한다.

두 중압주입 CASE MP1, MP2에서 최고 압력은 각각 248.08 psia, 249.84 psia로서 같은 위치에서 발생하는데 펌프 P1이 기동후 펌프 P2 출구배관에서 발생한다.

CASE MP1에서 최고 차압은 64.35 psid로서 펌프 P1이 최고 속도에 도달하고난후 펌프 우회배관에서 발생한다. CASE MP2에서 최고차압은 71.28 psid로서 파열판 RD1이 파열될때 이 파열판을 포함하는 배관에서 발생한다.

#### 5. 결론

고압주입, 중압주입, 시운전과 관련하여 ECCS 배관에 걸리는 최고과도압력을 알게됨으로서 배관 설계를 위한 기초 자료로서 사용할수 있게 되었다. 해석결과로부터 얻은 최고압력과 실제 배관 설계압력을 비교하면 다음과 같다.

PTRAN에 의해 계산된 파열판 하류쪽의 최고압력은 927.3 psia (CASE HP1)로서 이는 이부분

의 설계압력 1885 psia보다 작다.

PTRAN에 의해 계산된 파열관 상류쪽 고압주입계통의 최고압력은 644.30 psia (CASE HP1)로서 이는 이부분의 설계압력 915 psia보다 적다.

PTRAN에 의해 계산된 중압주입밸브 상류쪽 중압주입계통의 최고 압력은 249.84 psia (CASE MP2)로서 이는 설계압력 265 psia보다 적다.

이상의 결과로 고압주입, 중압주입, 시운전과 관련하여 비상노심냉각계통에 걸리는 과도압력은 설계압력보다 낮음을 알게 되었다. 모든 사례의 최고차압은 계통 배관 지지대 설계를 위한 배관 응력 해석의 기초 자료로 사용될 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] A.Lai, K.F. Hau, M.L. Goel and E.J. Mistele, "Experimental and Analytical Studies of Waterhammer in a Piping Network", paper presented at the 16th Annual Nuclear Simulation Symposium, Saint John, New Brunswick, 1991 August 26.
- [2] M.L. Goel and J.M. Francisco, "Transient Pressure (Waterhammer) Loads in CANDU Emergency Coolant Injection (ECI) System", paper presented at the International Symposium on Multi-Phase Fluid Transients, The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, CA, 1986 December 7-12, published in ASME FED-Vol. 41.
- [3] SURNAL(SURGE NETWORK ANALYSIS) User's Manual, Canadian System Group, Ontario.
- [4] C.W. So, "PTRAN Program Description", TDAI-336 Volume 1, 1984.

표 1 모든 해석에 대한 최고압력과 최고차압

CASE	최고압력 (Pmax)		최고차압 (PDIFmax)	
	pressure (psia)	time (sec)	dif.pressure (psid)	time (sec)
HP1	927.30*	0.06660	73.74	1.31760
	644.30**	3.17070		
HP2	637.85	2.91165	73.74	1.31760
HP3	636.65	3.57570	14.45	5.21190
HP4	168.26	27.07785	106.59	27.0045
MP1	248.08	2.24820	64.35	2.2554
MP2	249.84	2.35305	71.28	0.29070

\* : 파열관 하류쪽    \*\* : 파열관 상류쪽.

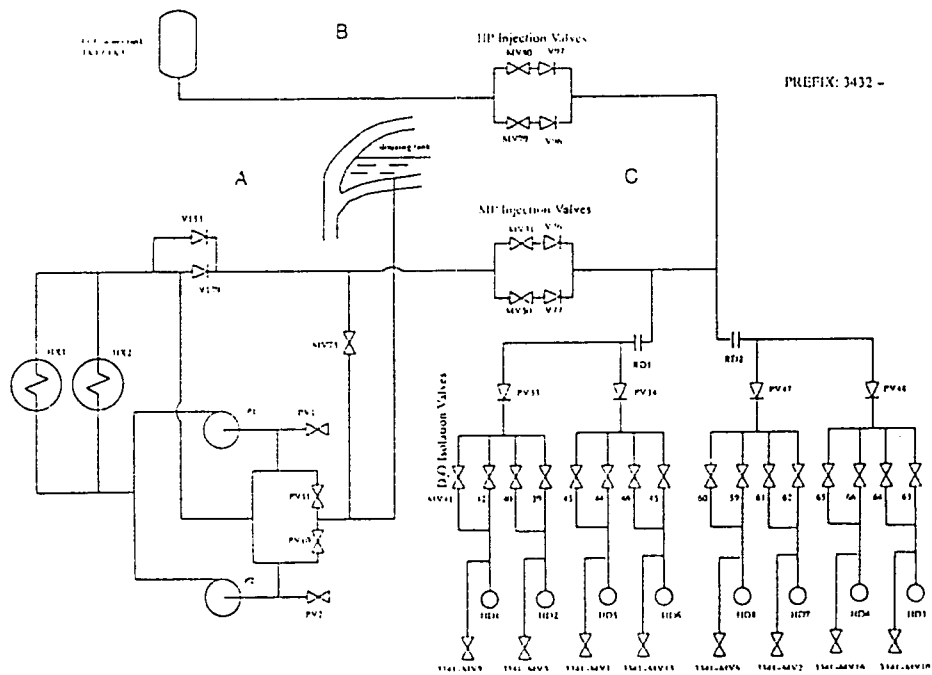
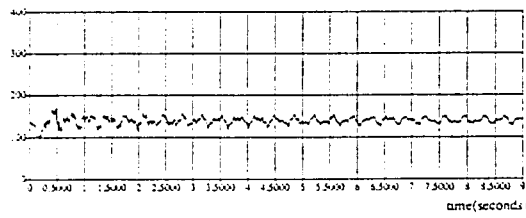
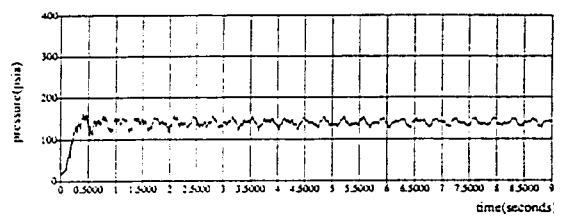


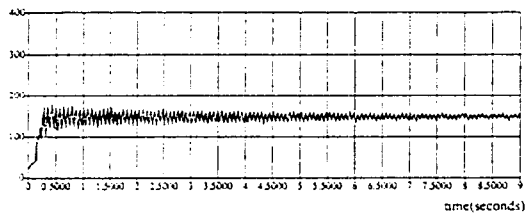
그림 1. 수격현상 해석을 위해 간략화된 비상노심냉각계통



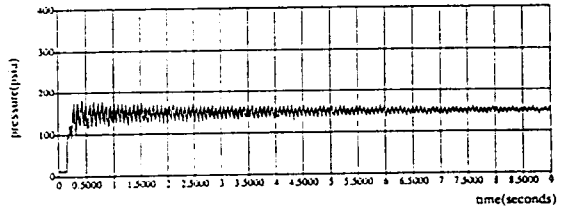
(a) 중압주입밸브 전단



(b) 중압주입밸브 후단



(c) 파열판 전단



(d) 파열판 후단

그림 2. 중압주입계통의 시운전(CASE MP2)시 압력변화