

## 원전 정지냉각계통 배관 진동안전성 평가연구

### A Safety Evaluation Study by Vibration Analysis for Shutdown Cooling Piping System

이옥륜<sup>†</sup> · 이준신\* · 손석만\* · 김만희\*\* · 송승용\*\*

Wook-Ryun Lee, Jun-Shin Lee, Soek-Man Sohn, Man-Hee Kim and Seong-Yong Song

**Key Words** : 정지냉각계통(Shutdown Cooling System), 허용진동속도(Allowable velocity), 공진(Resonance), 진동속도(Vibration velocity)

#### ABSTRACT

Palo Verde Unit 1 nuclear power station which is located in Arizona, USA had been operating at reduced power levels around 25% since December 25, 2005 due to vibration in one of its shutdown cooling lines. During an outage from March 18, 2006 to July 7, 2006 the necessary work and modifications to remedy the situation were performed. It cost approximately \$46million to buy electricity to replace that lost as a result of this event. Therefore in this study, the vibration of shutdown cooling lines in the same nuclear power plant in Korea as Palo Verde Unit 1 should be measured by the operating condition of power plant. And it was evaluated using the expression for allowable velocity in ASME OM-S/G-2003. From the result of this study it is evaluated whether it is safe or not. If not the countermeasure should be considered in this study.

#### 1. 서 론

원자력발전소 배관계통의 건전성을 저해하는 요인들 중에서 배관 내/외부에서 발생하는 진동이 중요한 역할을 한다. 배관과 관련된 진동이 발생하는 것은 배관내의 유동현상과 밀접한 관계가 있다. 배관내의 유동현상은 배관의 굴곡부, 밸브 및 오리피스 등에 의한 유동 불안정과 펌프와 같은 회전기계체에 의한 맥동 발생 등에 의해 매우 복잡하다. 이러한 유동은 배관을 포함한 배관 지지 구조물 및 기계장치들을 가진하여 과다진동을 유발시키는 원인이 된다. 이러한 과다진동들은 배관재료의 피로 및 균열발생을 촉진시키며 내부 결함 성장을 가속화시켜 결과적으로 배관을 파손시킬 수도 있으며, 충격력을 유발하여 배관이 순간적으로 파단에 이르게도 한다. 또한 과도한 진동은 설계기준 사고시 안전기능

을 수행해야 하는 부속기기의 성능과 계통의 기능을 저하시킬 수도 있다.

미국의 팔로버디(Palo Verde)원자력 1호기가 2005년 12월과 2006년 3월에 잔열제거 흡입측 배관에서 고진동으로 25% 출력으로 운전하였으며, 해소방안으로 관련계통에서 문제되는 밸브의 위치 변경이 결정되어 2006년 3월부터 7월까지 약 4개월간 발전소 정지를 하였다. 이로 인해 발생한 총 손실액은 약 460억원으로, 진동으로 인한 배관 건전성 문제가 경제적으로 심각한 영향을 주었는지 알 수 있다.

따라서 팔로버디원자력 1호기와 유사한 국내 원자력발전소의 동일시스템에 관한 진동안전성 검토를 위해 본 연구를 실시하게 되었다. 본 연구의 대상은 원자력발전소 1차측 고방사선구역에 위치한 정지냉각계통(Shutdown Cooling System)의 후단에 위치한 16" 배관으로 다양한 공급계통을 통해 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System)과 연결된다. 관련 배관에는 오리피스와 각종 밸브, 지지물 및 밴드 등으로 구성된 복잡한 구조로써 현재까지 정밀한 진동측정 및 분석을 하지 않았다.

따라서 이번 연구는 관련계통 배관의 진동에 관한 안전성을 평가하는 것은 물론이고, 문제점이 발생되었을 시에는 그 후속조치에 관한 내용도 함께 포함할 것이다. 추가적으로 본 연구에서 실시된 자료취득은 방사선 피폭에 최소화를 위해 구상한 시나리오를 통해 실시되었다. 따라서 보수적인 방법으로 자료를 취득하였으며, 결과에 관한 평가들도 최대

† 한국전력연구원 원자력발전연구소  
E-mail : maerong@kepri.re.kr  
Tel : (042) 865-5663, Fax : (042) 865-5604

\* 한국전력연구원 원자력발전연구소

\*\* 한국수력원자력주식회사

한 보수적인 방법으로 접근하였다.

## 2. 팔로버디(美)원전 배관 고진동 사례

1986년 최초 상업운전을 실시한 미국의 팔로버디원자력 1호기는 정지냉각계통의 배관진동에 관한 문제가 2001년에 최초 제기되었다.

해결책으로 2005년 가을 계획예방정비기간 중에 원자로 냉각배관과 정지냉각배관 사이에 격자판을 설치했으나 공기 유입증상에 따른 운전 건전성 확보를 위해 격자판을 발전소 가동 전에 제거하였다. 2005년 12월에 정지냉각계통 A측 배관에서 진동 제한치에 도달하여 25% 출력을 유지하면서 2006년 3월까지 운전하였다.

진동저감 방안으로 질량부과, 지지대 추가, 배관온도 증가 및 유동격자판 등을 설치하였으나 완전히 성공하지는 못하였다. 최종적으로 관련 배관을 재해석하고, 진동을 줄이기 위해 밸브(SI-HCV651)의 위치 변경을 포함한 설계변경을 실시하였다. 2006년 3월 17일부터 간이에방정비를 위해 발전 정지하였고 설계변경 후 그해 7월 12일 발전소가 100% 출력에 도달하였다.

이 배관 고진동으로 인해 약 7개월 동안 발전소의 전력생산에 영향을 주었으며 경제적 피해는 약480억원으로 추산되었다.

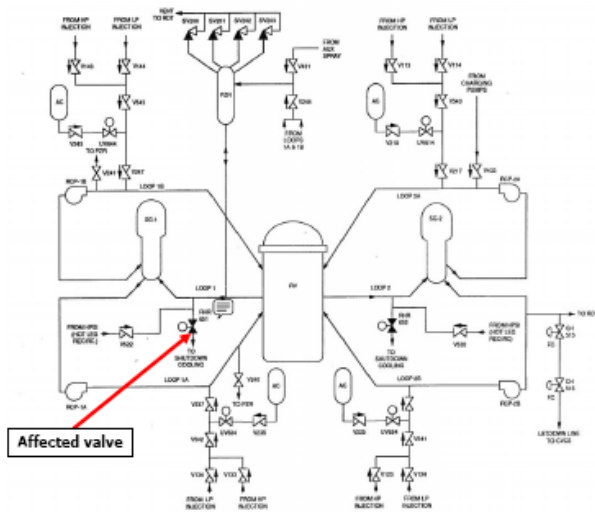


그림 1, 관련 계통도면(팔로버디원자력 1호기)

## 3. 정지냉각계통 개요

정지냉각계통(Shutdown Cooling System)은 원자로 노심의 잔열제거 수단으로 설계된 계통이다. 원자로는 정지후에도 노심에 잔열(Residual Heat) 및 붕괴열(Decay Heat)이 존재하여 적당한 냉각수단을 확보하지 않으면 노심의 온도가 상승하여 연료 및 구조물의 건전성을 위협하게 되므로 그 잔열을 제거하는 목적으로 사용되는 계통이다. 주요 기

능으로는 원자로가 정지된 후 원자로냉각재계통이 176.7℃, 28.8 kg/cm<sup>2</sup> 이하로 냉각되면 기기냉각수에 의한 잔열제거운전을 수행하여 연료 재장전 온도까지 냉각시킨다. 또 발전소 주증기관 파열이나 원자로냉각재 파열사고 후에 다른 열제거 기기들과 연계되어 원자로를 냉각시키고 상온정지 운전이 가능하도록 하는 기능이 주요 기능이다.

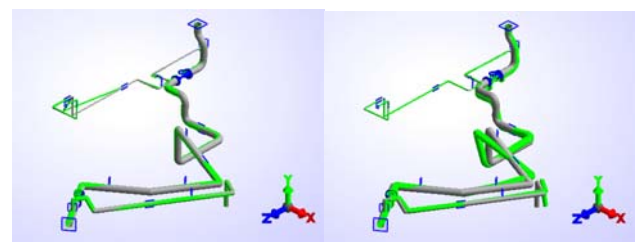
## 4. 배관 건전성 평가

배관계통의 진동허용기준은 ASME OM-S/G-2003 Part 3인 “원자로발전소 배관계통의 가동전 및 초기 시운전 진동 시험에 관한 기준”을 따른다. 이 기준에 따르면 정지냉각계통 배관은 VMG (Vibration Monitoring Group) 2의 ASME/ANSI B31 배관에 해당되며 건전성 평가 기준은 정상상태(Steady-state)의 허용진동변위(Allowable deflection limit) 또는 허용진동속도(Allowable peak velocity)로 평가할 수 있다. 본 연구에서는 해당 배관의 건전성 평가 기준으로 허용진동속도를 선정하였다. 전체 배관은 16” 및 3” seamless pipe(SCH. 160)이고, 배관의 재질은 ASTM-A106-GR.B로 구성되어 있다.

### 4.1 모델을 통한 진동 모드 및 고유주파수 분석

배관진동해석프로그램을 통해 고진동 발생우려가 높은 지역을 선정하였고, 관련 고유진동수를 계산하여 실제측정값과의 비교를 통한 실제 측정값의 신뢰성을 가지고자 하였다. 특히 실제 측정지역이 고방사선구역이고, 원자력발전소 출력 증가에 따른 진동데이터 취득이므로 장시간동안 측정하여야 하므로 정확한 측정 위치 선택이 필요하였다.

따라서 미국 Algor사에서 개발한 Pipeplus(Version 9.10)를 이용하여 그림 2 와 그림 3과 같이 배관의 고유진동수와 진동 측정위치를 선정하였다.



(a)

(b)

그림 2. A발전소 진동모드 해석 결과:(a)8.5Hz, (b)11.3Hz

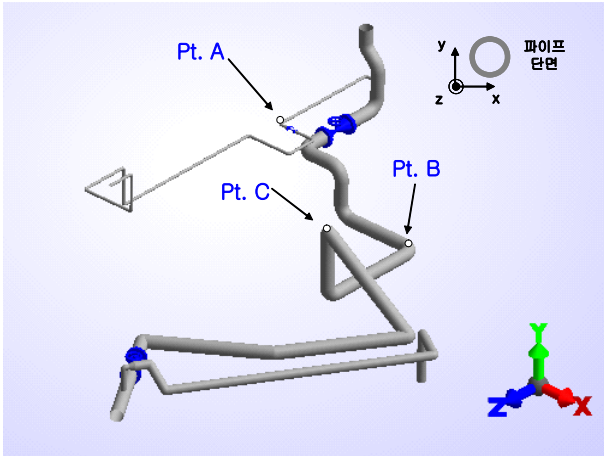


그림 3. 배관계 해석 모델 및 진동 측정 위치

#### 4.2 진동 허용 기준

ASME OM-S/G-2003 Part 3 기준에 따르면 배관계통의 건전성을 유지하기 위해서는 측정된 최대 진동속도가 다음 식으로 계산되는 허용진동속도보다 작아야 한다.

$$V_{allowable} = \frac{C_1 C_4}{C_5 C_3} \frac{3.64 \times 10^{-3} S_{el}}{C_2 K_2 \alpha} \quad (\text{inch/sec} : 0-p) \quad (1)$$

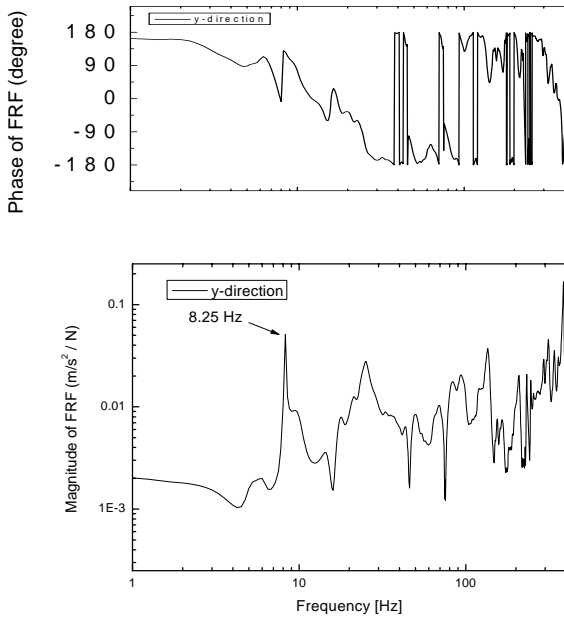
여기서, 식 (1)의 각 변수에 해당하는 정지냉각계통 관련 배관의 값들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 전체 배관에서 밸브 부위를 제외하면 하중에 따른 집중질량의 영향이 없으므로  $C_1$ 은 1.0의 값을 가진다.
- ASME B31인 경우  $C_2 K_2$  는 응력집중계수  $2i$  로 다음 표와 같은 값을 갖는다.

표 1. 정지냉각계통 관련배관 응력집중계수 계산치

$D_0$	$t$	$r$	$R$	$h = \frac{tR}{r^2}$	$2i = \frac{1.8}{h^{2/3}}$
16"	1.593"	7.2035"	16"	0.49	2.90
3.5"	0.438"	1.531"	3"	0.56	2.65

- $C_3$



(b) y 방향

그림 4. 공진시험 주파수 응답곡선



그림 5. 진동측정 위치

운전 중 배관의 진동측정은 운전조건에 따라 진행되어야 하고 방사선 피폭을 최소화하여야 하므로 약 17일간, 30초 간격으로 데이터 저장을 하고 일정값 이상일 때 저장하는 기능(Trigger)을 사용하여 자동계측을 실시하였다.

측정 3개소에 대해 3축으로 측정하였으며, 그에 대한 각 방향의 진동측정 결과 진동속도 과도값은 표 1과 같다. 좌표 설정은 그림 3에 표시된 바와 같이 유체가 흐르는 축 방향을 z-방향으로, 연직 방향을 y-방향으로 하고 right-hand rule에 따라 x-방향을 정하였다. 표 1은 정지 냉각계통 관련배관 각 측정점에서의 진동 측정치로, x-, y-, z-방향의 3방향에 대한 진동레벨의 벡터 합을 취한 결과이다. 이 결과를 보면 비정상 신호(외부요인으로 인한 오신호로 그 시점은 계통의 운전상태가 아니었음)를 제외하면 표2와 같이 최대진동속도가 진동허용속도 이내로써 현 상태의 정지냉각계통 관련배관의 진동에 관한 건전성에는 별 문제 없음을 알 수 있다. 따라서 팔로버디원자력 1호기와 같은 조치는 별도로 요구되지 않아도 될 것으로 판명된다.

표 1. 관련 배관의 진동속도 과도값 (mm/sec, 0-p)

No.	측정 시간 (일/시:분:초)	측정 레벨 (mm/sec)			비고
		A	B	C	
1	20일/23:49:02	121.74	7.68	7.99	비정상 진동 으로 추정
2	21일/06:09:03	62.94	7.75	7.93	
3	22일/21:49:06	25.66	7.60	6.98	중간값
4	24일/14:09:09	42.89	6.13	7.62	순간 Peak 값
5	29일/10:09:18	29.12	7.74	9.32	정상 상태
최대 값		42.89	7.74	9.32	비정상 제외

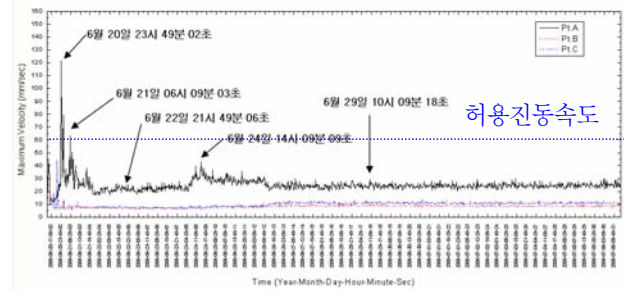
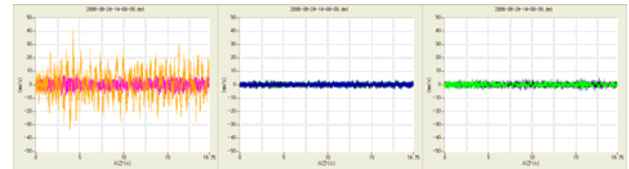


그림 6. 측정된 진동속도레벨



(a) Pt. A, (b) Pt. B, (c) Pt. C  
(x-빨강, y-핑크, z-오렌지) (x-초록, y-파랑, z-남색) (x-보라, y-흑색, z-시안)

그림 7. 최대진동속도 기록(24일 14시09분)

표 2. 최대진동속도 및 진동허용속도 비교(mm/sec, 0-p)

측정위치	측정 레벨 (mm/sec)			허용레벨 (mm/sec)
	A	B	C	
최대 값	-	7.74	9.32	60.67 (16 inch 배관)
최대 값	42.89	-	-	66.26 (3 inch 배관)

#### 4. 결론

“원전 정지냉각계통 배관 진동안전성 평가연구” 결과를 중

합해 다음과 같다.

- (1) 본 연구는 미국 팔로버디원자력발전소 1호기 사례를 통해 국내 유사 발전소 정지냉각계통 관련배관에 관한 진동안전성 평가를 실시하기 위해 추진되었다.
- (2) 본 연구의 안전성 평가는 해당배관에서 진도가 가장 클 것으로 예상되는 지점을 계측점으로 선정하였다. 선정된 계측점에서 측정된 진동속도는 허용진동속도에 비해 매우 작게 계측되었다.
- (3) 따라서 해당 배관계는 출력상태와 관계없이 진동측면에서 매우 건전한 것으로 판단되며, 같은 배관형상으로 운전되는 동일 발전소의 열 호기도 진동안전성이 동일 할 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

- (1) Nucleonics Week Vol. 47, No.14, April 6, 2006.
- (2) ME-2006-013/OED 2006-03(INPO) “기기진동사례 모음”, 한국수력원자력 기술정보검토서
- (3) URC. May 30, 2006. "Tools Used to Collect, Screen, Communicate and Analyze Operating Experience Data"
- (4) ASME OM-S/G-2003, Part 3, Requirements for Pre-operational and Initial Startup Vibration Testing of Nuclear Power Plant Piping Systems.
- (5) ASME BPV Code, 1995 Section III, Division 1, Appendix 1, "Design Stress Intensity Values, Allowable Stress, Material Properties, and Design Fatigue Curves"
- (6) ASME B31.1-2001, "Power Piping"
- (7) “배관지지설계”, 機電硏究社, 1974.
- (8) KEPRI, 2006, "중수로 기기냉각수 배관계의 유동유발진동에 의한 손상대책 개발 (중간보고서)"
- (9) KEPRI, 2005, "월성2발 고압급수가열기 배수계통 고진동 해소 기술지원 보고서"
- (10) 한국수력원자력, “영광 5,6호기 실무반 계통설명서 (상)” p369-388