

'96 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 원자로 입구노즐에서의 원자로 냉각재 펌프에 의한 맥동압력 준위 예측

정종식, 양재영

한국원자력연구소

요 약

원자로 입구노즐에서 원자로 냉각재 펌프에 의한 맥동압력 준위를 원자로 하향통로와 저온관을 상관시켜 예측하는 방법에 관하여 분석하였다. 원자로 하향통로에서의 맥동압력은 원자로 내부구조물의 건전성 평가에 쓰이는 중요한 인자로 이 값을 정확히 구하기 위해서는 경계조건인 입구노즐에서의 맥동압력을 정확히 예측해야 한다. 이를 위해 원자로 하향통로와 저온관을 상관시켜 원자로 입구노즐에서의 펌프에 의한 맥동압력 준위를 계산하였으며 Palo Verde Unit 1의 실험치와 비교 분석하였다. 분석 결과, 제시된 맥동압력 준위 예측모델은 500°F의 경우 비교적 잘 일치하였으나, 565°F의 경우 상당한 차이가 있었으므로 추가적인 검토 및 수정 작업이 요구된다.

### 1. 개 요

원자로 냉각재 펌프(Reactor Coolant Pump; RCP)의 운전으로 인한 압력의 맥동이 발생하고 이 맥동압력이 저온관을 통하여 원자로에 전달된다. 원자로 하향통로에서의 맥동압력은

원자로 내부구조물의 건전성 평가에 입력으로 사용되는 중요한 인자이다. 또한 하향통로에서의 맥동압력의 세기는 원자로 입구노즐에서의 압력을 기준으로 계산되기 때문에 원자로 입구노즐에서의 압력을 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다. DPVIB 전산코드[1]는 맥동압력이 원자로 하향통로에서 어떠한 분포를 가지고 원자로 내부구조물, 특히 노심지지통(Core Support Barrel; CSB)에 작용하는가를 예측하는 프로그램이다. 원자로 입구노즐에서의 압력파동을 안다고 가정할 때, 원자로 하향통로에서의 압력분포를 Fourier coefficient로 나타낼 수 있다. 그러나, 이 코드는 원주방향 제로 모드를 무시하는 오류를 가지고 있어 개정한 바 있다[2].

원자로 하향통로와 저온관을 상관(coupling)시켜 원자로 입구노즐에서의 맥동압력을 예측하는 방법이 꾸준히 연구되어 왔다. 두 개의 구조물이 서로 연결되어 있을 때 acoustic transmission 측면에서 각각의 구조물이 서로 독립되어 있는 것으로 해석하는 것은 의미가 없다. 예를 들어 하나의 배관을 둘로 나누어 각각 독립된 구조물로 해석한다고 할 때, 한쪽에서는 공명(resonance)이 일어나는 조건이 있을 수 있으나 전체적으로 볼 때 이 공명은 아무 의미가 없다. 문제는 이 두 개로 나눈 상태에서 연결부분의 경계조건을 어떻게 줄 것인가에 달려있다.

참고문헌[3]에 기술되어 있는 바와 같이 이 문제를 해결하기 위한 시도가 있었으나 배관에서 Boundary Operator Method(BOM)를 적용하는데 오류가 있었다. 이 오류를 지적하고 수정한 후[4], 이 수정된 BOM을 바탕으로 저온관과 원자로 하향통로를 상관시켜 원자로 입구노즐에서의 압력준위를 결정하는 방법이 제시되었다[5]. 본 논문에서는 새로이 제시된 방법을 실제 원자로 내부구조물 설계에 적용할 수 있는지를 파악하기 위하여 새로운 방법을 근간으로 원자로 입구노즐에서의 맥동압력 준위를 예측하는 프로그램을 작성하였으며 실험치와 비교, 검증함으로써 적용 가능성을 검토하였다.

## 2. 본 론

이 새로이 개발된 방법을 설계에 적용하기 위하여 실제 플랜트로부터 얻은 자료를 이용하여 검증하는 작업을 수행하였다. 대상 플랜트는 Palo Verde Unit 1로서 이 발전소의 원

자로 내부구조물 진동평가시험(Comprehensive Vibration Assessment Program; CVAP)에서 원자로 입구노즐에서 압력을 측정된 자료를 이용하였다[6]. 이 방법을 검증하기 위해서는 같은 온도조건에서 원자로 냉각재 펌프 토출구에서의 압력과 원자로 입구노즐에서의 압력이 필요하다. 그 이유는 원자로 입구노즐에서의 압력을 계산하기 위해서 원자로 냉각재 토출구에서의 압력을 알아야 하기 때문이다.

새로운 방법을 검증하기 위하여 전산 프로그램을 작성하였다. 저온관에서는 맥동압력 분포가 1차원 파동방정식으로 표현되며 원자로 하향통로에서는 3차원 파동방정식으로 표현된다. 1차 파동방정식의 경계조건으로 저온관의 끝을 piston-spring으로 가정하면 spring 상수  $K$ 와 펌프 토출구에서의 압력  $P_D$ 를 포함하는 저온관에서의 맥동압력 분포식을 구할 수 있다. 원자로 하향통로에서는 맥동압력 분포가 3차원 해로 구해지는데 저온관과 원자로 하향통로의 경계, 즉 원자로 입구노즐에서 맥동압력이 같아야 한다는 조건을 이용하면 서로 상관시킬 수 있다[5]. 전산 프로그램은 이 상관식을 풀기 위하여 먼저  $K$ 값을 가정하여 저온관에서의 맥동압력 분포를 구하고, DPVIB 전산코드를 수행하여 원자로 하향통로에서의 압력미분치를 입력으로 한다. 상관식에 DPVIB 수행결과를 적용하여 입구노즐에서의 압력미분치를 구해 같은 위치에서 구한 저온관 압력미분치와 같은지 비교한다. 즉 원자로 입구노즐에서 두 압력미분치가 연속하도록 하는  $K$ 값을 구하게 된다. 전산 프로그램 수행으로 얻은  $K$ 값을 저온관에서의 맥동압력 분포식에 적용하여 원자로 입구노즐에서의 압력을 구할 수 있는데 이 때 원자로 냉각재 펌프 토출구에서의 압력비로서 나타난다. 이 압력비를 이용하여 원자로 냉각재 펌프 토출구에서의 압력을 알 경우 원자로 입구노즐에서의 압력을 계산하는 것이다.

Palo Verde CVAP 시험으로부터 얻을 수 있는 자료는 500°F 조건의 자료와 550°F/565°F 조건의 자료로서 온도가 비슷하여 이용하였다. 측정치와 프로그램 계산을 통한 예측치를 표 1 및 표 2에 비교하였다. 500°F 조건에서 저온관 길이를 285인치로 두고 계산할 경우, 480Hz forcing frequency 경우를 제외하고는 계산 결과가 측정치와 근사함을 보였다. 그러나 565°F의 경우에는 계산 결과와 측정치가 잘 맞지 않았다.

상관식을 이용하여 냉각재 온도가 500°F일 때 원자로 입구노즐에서와 원자로 냉각재 펌프 토출구에서의 압력비가 저온관의 길이에 따라 어떻게 변하는지 알아 보았다. 그림 1에 보

인 바와 같이 120 Hz forcing frequency를 제외하고는 저온관의 길이에 매우 민감함을 알 수 있다. 이는 펌프에 의한 맥동압력을 해석할 경우 그 결과는 구조물의 기하학적 형태에 매우 민감하다는 것을 보여준다. 특히 DPVIB 코드에 사용된 기하학적 자료와 저온관의 길이 등이 중요하다. 실험자료가 충분히 있을 경우 각 조건을 만족시키는 저온관의 유효길이, 즉 저온관과 원자로 하향통로의 경계지점을 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

### 3. 결 론

원자로 입구노즐에서의 펌프에 의한 맥동압력을 예측할 수 있는 방안에 대하여 Palo Verde CVAP 시험 자료를 이용하여 검증작업을 수행하였다. 500°F에서의 실험자료와 비교한 결과, 480 Hz forcing frequency이외에서는 예측치와 잘 일치하여 실제 설계에의 적용 가능성을 보여 주었다. 그러나 565°F의 경우에는 계산결과와 잘 맞지 않았으며 실험자료의 부족으로 충분한 검증이 되었다고 볼 수 없다. 따라서 맥동압력 예측에 대한 모델의 수정이나, 추가적인 실험자료의 수집을 통한 검증 작업이 필요하다.

### 참고문헌

- [1] M. M. Cepkauskas, "DPVIB Computer Code Manual", ABB-CE, SP80-STA-20, 1977.
- [2] I. Y. Im, "Verification of DPVIB ver. 5 mod. 1", ABB-CE, 0000-NRE-024, 1994.
- [3] M. M. Cepkauskas, "Acoustic Pressure Pulsations in Pressurized Water Reactors", Trans. of the Int. Conf. on SMIRT(Structural Mechanics in Reactor Technology), vol F, Paper No F4/2, Berlin, 1979, pp. 1-9.
- [4] K. B. Lee et al., "Analytical Prediction on the Pump-induced Pulsating Pressure in a Reactor Coolant Pipe", Int. J. Pres. Ves. & Piping 52, 1992, pp. 417-425.
- [5] K. B. Lee and I. Y. Im, "An Analytical Study on the Pump-induced Acoustic Pressure in a Pressurized Water Reactor", Nuclear Eng. and Design 147, 1994, pp. 275-286.

- [6] "A Comprehensive Vibration Assessment Program for the Prototype System 80 Reactor Internals Palo Verde Nuclear Generating Station Unit 1", ABB-CE, CEN-202-(V)-P, 1984.

표 1 Comparison of Measured and Predicted Inlet Nozzle Pressure Ratios and Pressures for Palo Verde Reactors @ L = 285 in. ( Coolant Temperature = 500°F )

Pump Forcing Frequency	Inlet Nozzle Press.Ratio, $P_i/P_D$		Inlet Nozzle Pressure, $P_i$	
	Predicted	Measured	Predicted	Measured
Hz	-	-	psi	psi
120	0.615	0.63 - 0.84	0.126	0.14 - 0.16
240	1.074	0.74 - 1.80	0.752	0.63 - 0.99
360	1.233	1.07 - 1.77	0.135	0.14 - 0.16
480	1.040	4.31 - 5.6	0.177	0.82 - 0.84

표 2 Comparison of Measured and Predicted Inlet Nozzle Pressure Ratios and Pressures for Palo Verde Reactors @ L = 285 in.( Coolant Temperature = 565°F )

Pump Forcing Frequency	Inlet Nozzle Press.Ratio, $P_i/P_D$		Inlet Nozzle Pressure, $P_i$	
	Predicted	Measured	Predicted	Measured
Hz	-	-	psi	psi
120	5.96	1.16 - 2.05	1.43	0.28 - 0.39
240	1.92	2.83 - 4.14	1.00	1.56 - 2.03
360	1.51	1.50 - 3.00	0.24	0.15 - 0.24
480	1.00	2.25 - 3.41	0.32	0.79 - 0.99

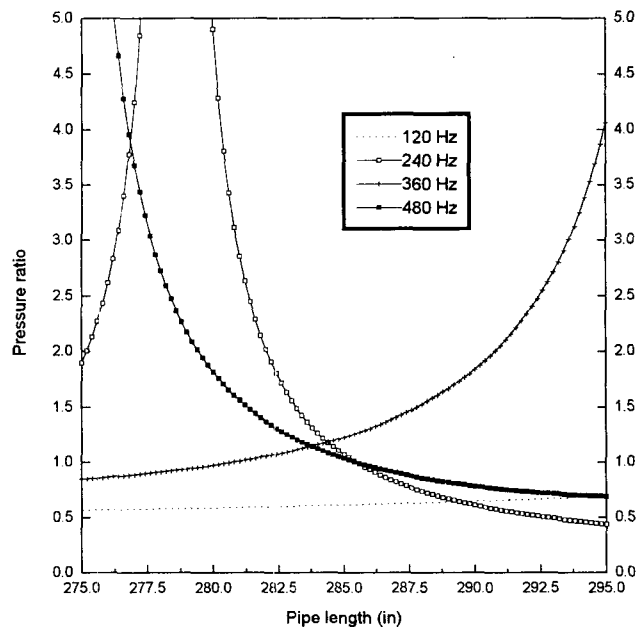


그림 1 Predicted Pressure Ratio  $P_i/P_D$  vs. Pipe Length