한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 868~869

원자력 주증기 배관 안전 릴리이프 밸브의 음향파 산출

A Computation of acoustic wave for safety relief valve in nuclear main steam pipe line

한혁재† · 김태완* · 박누가* · 윤태준* · 김동훈*

Hyukjae Han, Taewoan Kim, Luke Park, Taejun Yun and Donghun Kim

1. 서 론

비등경수로(BWR, Boiling water reactor)를 사용하는 Quad Cities Unit2 원자력 발전소에서 2002년과 2003년 용량격상(Extended Power Uprate) 운전 조건에서 유체 유발 음향 진동에 의한 고주기 피로에 의해 드라이어 (Dryer)가 파손되는 현상이 발생하였다. 파손 원인은 주증기 배관의 안전 릴리이프 밸브(SRV, Safety relief valve)에서 발생한 음향파(Acoustic Wave)로 인한 가진이 원인으로 밝혀졌다. 안전 릴리이프 밸브에서 발생한 와류방출(Vortex Shedding)로 인해 발생하는 음향 공진은 주변에 높은 압력 맥동을 발생시키고 이 때 발생하는 음향파가 주증기 배관을 타고 증기발생기 내부 구조물인 드라이어(Dryer)에 손상을 발생시킨 것이 파손의 메커니즘이다.(Fig.1 참조) [1]

증기 발생기 내부 구조물인 드라이어의 손상원인 및 구조적 건전성 여부를 정량적으로 평가하기 위해서는 운전조건하에서 드라이어의 손상 가진원인인 안전 릴리이프 밸브에서 발생하는 음향맥동 및 음향파를 산출하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 가압수형 경수로(PWR, Pressurized Water Reactor)를 사용하는 APR1400 증기발생기 내부 구조물인 드라이어(Dryer)의 구조적 안전성 평가를 위한 전 단계로서 전산유동해석 기법을 활용하여 유체 유동에 의한 주증기 배관의 안전 릴리이프 밸브에서 발생하는 압력맥동 및 음향파를 산출하고자 한다 .

† Corresponding Author; Doosan Heavy Industries & Construction Co., LTD R&D Institute
E-mail : hyukjae.han@doosan.com
Tel : +82-42-712-2148 , Fax :+82-42-712-2299
* Doosan Heavy Industries & Construction Co., LTD R&D Institute

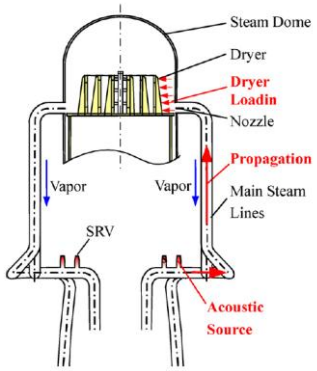

Fig.1 BWR Steam dome & Main steam pipe line

2. 음향파 산출을 위한 전산 유동 해석

2.1 해석 모델 및 조건

안전 릴리이프 밸브에서 발생하는 음향파를 전산유동해석 프로그램(CFX 14.0)을 활용하여 계산하였다. APR1400 의 주증기 배관에는 5개의 안전 릴리이프 밸브가 있으며 이에 대한 해석 모델은 Fig.2 에 나타나 있다. Table 1에 제시되어 있듯이 밸브를 지나는 증기의 물성은 Water real gas 이며 NRC 의 Regulatory Guide1.20 에 따라 LES 난류 모델을 사용하였다[2].

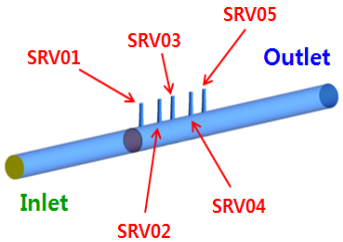

Fig.2 SRV Modeling for CFD Analysis

Table 1 The CFD Analysis Condition

Analysis Condition	Type
Analysis Type	Unsteady state
Material Property	Water real gas
Energy Model	Total energy model
Turbulent Model	LES Model

2.2 해석 결과

CFD 해석 결과인 Fig.3에서 유동이 안전 릴리이프 밸브를 지나면서 발생되는 Vortex Shedding 이 관찰됨에 따라 이는 해석계에 가진력으로 작용함을 알 수 있었다. Fig.4 는 안전 릴리이프 밸브 SRV01의 상단에서 구하여진 강제 응답 해석 결과이며 5개의 안전 릴리이프 밸브에서 발생하는 음향파의 주파수는 Table 2 와 같이 SRV01 기준 최대 0.8% 편차 이내로 거의 동일하게 나타난다.

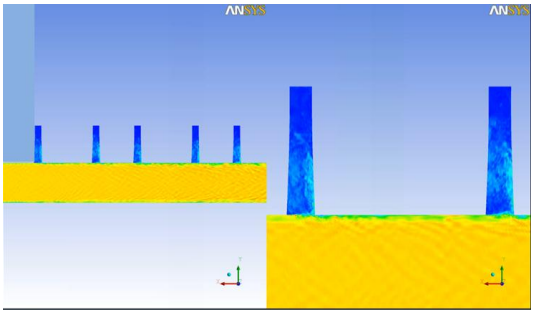

Fig.3 Vortex Shedding in SRVs at Operating Condition (Time vs. Pressure)

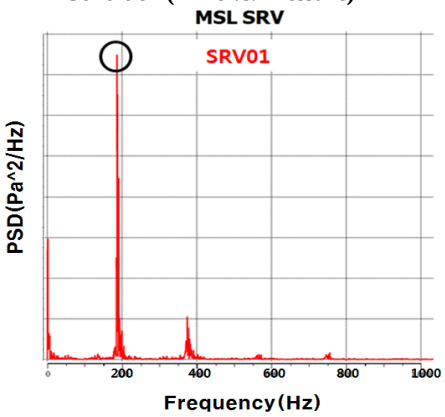

Fig.4 Forced Response Analysis Result of SRV01 at Operating Condition(Frequency vs. PSD)

Table 2 The 1st Acoustic response Frequencies of each SRV at the operating condition

SRV	SRV 01	SRV02	SRV03	SRV04	SRV05
Frequency(Hz)	186.5	187.3	187.3	186.5	188.0

해석 모델링의 안전 릴리이프 밸브 Cavity에 대한 음향 고유 주파수는 다음과 같은 수식에 의해 계산될 수 있다.[3]

$$f = \frac{(2n-1)c}{4l}$$

f : Acoustic Natural Frequency

c:Speed of Sound n: Acoustic Mode

l: Stand Pipe Length

상기 수식에 의해 구한 1차 음향 고유 주파수는 178.6Hz로 계산되었으며 이는 앞서 구하여진 값에 최대 5.1% 오차 이내로 근접함을 확인하였다. 따라서 해석된 5개의 안전 릴리이프 밸브 모두 동일하게 1차 고유 주파수가 주로 가진되어 나타난 것임을 확인 하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 전산유동해석을 활용하여 APR1400 증기 발생기 주증기 배관의 안전 릴리이프 밸브에서의 발생한 음향파의 주파수 및 압력을 산출하였다. 추후 연구로 주증기 배관 및 증기 발생기에 대한 음향 전파 해석 및 구조응답해석을 수행하여 드라이어에 가해지는 음향파에 대한 구조 건전성을 평가할 예정이다.

참 고 문 헌

(1) Keita Okuyama , Akinori Tamura , Shiro Takahashi , Masayu Ohtsuka and Masaaki Tsubaki, 2011, Flow induced acoustic resonance at the mouth of one or two side branches, Nuclear Engineering and Design 249(2012), pp.154~158

(2) U.S. NRC, Regulatory Guide 1.20, 2007, Comprehensive Vibration Assessment Program for Reactor Internals during Preoperational and Initial Startup Testing.

(3) AREVA NP, Inc, 2013, Comprehensive Vibration Assessment Program for U.S. EPR Reactor Internals Technical Report, Appendix A.2.1