

해양 구조물 배관계의 음향유기진동(AIV) 평가 및 제어기술

Acoustic-Induced Vibration Assessment and Control Method for the Piping system of Offshore plant

이성현† · 김희원* · 주원호**

Seong-Hyeon Lee, Heui-Won Kim and Won-Ho Joo

1. 서 론

해양 플랜트 고압 프로세스라인에 설치되는 PSV(Pressure Safety Valve)의 작동 시, 밸브 전후단의 큰 압력 강하는 높은 음향 에너지를 발생시키고 이는 배관 하류부에 전달되어 심각한 배관 진동과 응력을 유발하게 된다. 이와 같이 음향 가진(acoustic excitation)에 의해 진동이 발생하는 현상을 AIV(Acoustic-Induced Vibration)라고 부르며 이는 Figure 1 과 같이 심각한 배관 파괴를 일으킬 수 있다.

본 논문에서는 이러한 AIV 에 의한 배관 파손을 예방하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 AIV 평가 절차에 대한 소개 뿐만 아니라, 배관의 진동 특성을 고려하여 음향 에너지에 의한 배관의 동적 응력 해석 기법을 개발하였고 이를 이용한 AIV 제어 사례를 소개하고자 한다.



Figure 1 Gas flare header rupture

2. AIV 평가 기법

Carucci와 Muller는 배관계 내의 소음 수준을 계산하기 위한 다음과 같은 경험식을 제시하였다.

$$PWL = 10 \log \left[\left(\frac{p_1 - p_2}{p_1} \right)^{3.6} \cdot W^2 \cdot \left(\frac{T_1}{m} \right)^{1.2} \right] + 126.1 \quad (1)$$

여기서,

- p_1 : upstream pressure (Pa)
- p_2 : upstream pressure (Pa)
- W : Flow rate (kg/s)
- T_1 : upstream temperature (K)
- m : molecular weight

위 경험식을 이용하여 계산된 sound power level(PWL)과 Exxon사의 각종 배관의 설계인자, 운전조건, 파손 여부 등을 비교하여 Figure 2와 같은 도식적인 설계 가이드를 제시하였다.

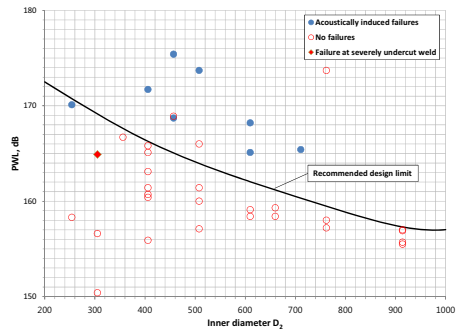


Figure 2 AIV failure guidance proposed by Exxon

† 현대중공업 동역학연구실
E-mail : shyi@hhi.co.kr
Tel : (052)203-4905, Fax : (052)202-5495
* 현대중공업 동역학연구실

MTD/EI는 복수 소음원을 고려하여 전체 배관계의 LOF(Likelihood Of Failure)라는 지표를 사용하여 배관의 안정성을 평가한다.

F.L. Eisinger는 배관 내 소음 수준과 배관의 내경(D₂)과 배관 두께(t₂)의 상관관계(D₂/t₂)를 이용한 Dt method를 제안하여 AIV에 대한 방진 설계안을 Figure 3과 같이 제안하였다.

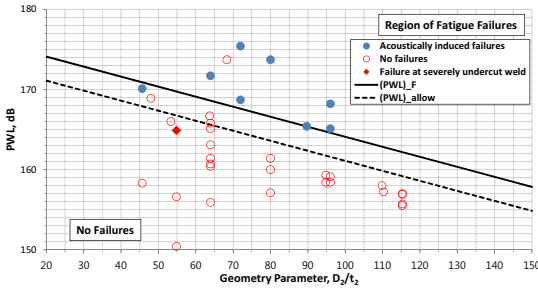


Figure 3 Dt method guidance

3. AIV에 의한 동적 응력 평가 기법

3.1 동적 응력 계산

AIV는 배관계에 과도한 진동을 발생시키고 연결 부위에 높은 응력이 집중되어 파손을 유발시킨다. 본 연구에서는 배관내의 음향 가진을 고려한 배관계의 응력 평가 기법을 개발하였으며 그 절차는 다음과 같다.

- 배관내 소음 수준 계산
- 배관의 고유진동수 계산
- 음압에 의한 배관의 진동 수준 계산
- 배관의 응력 계산

일반적으로 AIV는 배관의 원주방향 고유 진동수에서 발생하며 원주 방향 고유 진동수 v_{mn} 은 식 (2)와 같다.

$$v_{mn}^2 = \beta^2 K^4 + \frac{(1-\nu^2)K_m^4}{K^4} \quad (2)$$

일반적으로 배관의 가속도 응답과 배관 내 압력의 관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\langle G_{aa}(\omega) \rangle}{\langle G_{pp}(\omega) \rangle} = \frac{8}{\rho^2 h^2} \sum \frac{\omega^4 j_{2\alpha}^2(\omega)}{\omega_{\alpha 0}^4 \frac{1}{Q_{\alpha}^2}} \quad (3)$$

그리고 배관 내부의 압력에 의한 배관 진동 가속도와 변형률과의 관계는 식 (4)와 같이 나타낼 수

있으며, 계산된 변형률로부터 동적 응력을 구할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{2.3}{c_L} \cdot \frac{a}{2\pi f} \quad (4)$$

제안된 AIV 동적 응력 계산 방법을 검증하기 위하여 Figure 2의 피로파괴가 발생한 배관을 대상으로 계산을 수행하였다. Figure 4와 같이 피로 파괴가 발생한 배관은 상대적으로 높은 동적 응력이 발생함을 알 수 있었고, 그 반대의 경우 낮은 응력이 발생함을 확인하여 그 경향이 잘 일치함을 알 수 있었다.

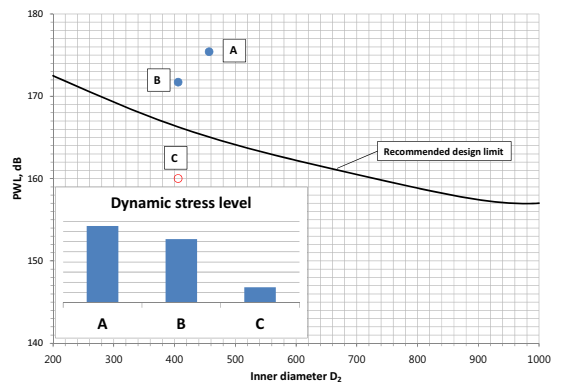


Figure 4 Dynamic stress level of failure case

본 연구를 통해 개발된 동적 응력 해석법을 사용하여 실제 프로젝트의 문제가 되는 배관계에 적용하여 응력 집중 부위에 구조 보강을 적용한 방진 설계안을 제시 하였다.

4. 결 론

기존 AIV 평가 방법은 경험 data에 기반하여 AIV에 의한 배관의 파손 가능성 유무를 제시하고 있지만 AIV에 의한 배관 피로파괴 메커니즘을 설명하지 못하는 한계가 있다. 본 논문에서는 기존 평가 방법의 한계를 보완하기 위해 음향 에너지에 의한 배관계의 동적 응력 해석 기법을 개발하였다.

개발된 동적 응력 해석 기법은 기존 시험 결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하였으며 동적 응력 해석을 통해 배관계의 방진 설계가 가능함을 검증 하였다.