

# Offshore 선 Process 배관계의 밸브 소음/진동 평가 절차 Valve induced noise and vibration evaluation procedure for process piping of offshore production facility

이주헌† · 최충영\* · 김재홍\*\* · 권혁\*\*\*

JooHun Lee, ChoongYoung Choi, JaeHong Kim, Hyuk Kwun

**Key Words :** pipe, vibration, noise, fatigue, risk base evaluation, EI guideline.

## ABSTRACT

Recent year, the vibration induced fatigue and noise of piping work become critical in offshore hydrocarbon production facilities with increasing requests by major oil company. In this paper, the risk base piping vibration induced fatigue assessment of NORSOK L-002 standard and UK Energy Institute guideline have been introduced with real project application practice. Also the piping breakout noise evaluation by flow restriction devices of compressible and in-compressible flow are reviewed with its practical application on real project.

## 2.1 진동유발 배관피로손상의 특징

### 1. 서 론

세계 원유,가스 매장량의 75%가 해양에 존재하고, 2013~18 년 해양원유생산설비가 약 200 기 설치 예상된다. 해양설비는 30~40 년의 수명동안 높은 설비신뢰성과 엄격한 소음제어가 요구되나, 해저유정으로부터 생산된 고압,고온의 탄화수소(Hydrocarbon)처리과정에서 액체, 기체, 또는 다상유체를 이송하는 배관설비들은 관내유동유기 진동에 의한 배관피로손상과, 높은 배관투과 소음이 발생할 위험성을 내포하고 있다.

해양석유생산설비의 진동유발 배관피로손상은 잠재위험에도 불구하고, 문제발생 후 조치가 일반적이었다. 왕복동기기유발 맥동압과 thermo-well 의 와류유기진동같은 특정대상에 대해서는 API 와 ASME 절차에 따라 검토하여 왔다.

본고에서는 해양원유생산설비 배관설계 과정중 적용했던 배관피로손상 평가절차와, 소음원 특성이 유사한 음향유기 배관진동과 배관투과 소음 검토 및 평가절차를 설명하고자 한다.

1990 년대 북해의 영국해역 유정에 설치된 해양원유생산설비중 진동과 피로에 취약한 얇은 두께의 duplex 재질 배관이 널리 사용되면서 신규 설비 배관에서 진동유발 피로손상이 증가하였고, UK-HSE(Health&Safety Executive)에서 손상실태조사를 실시하였다. 2000~2001 년 해양생산설비 탄화수소 누설사례 조사결과, 진동유발 배관피로손상이 21%이고, 정상운전중 주로 소구경 분지관(small bore connection)에서 발생하는 것으로 확인되었다. 최근 육,해상 기준 플랜트에서도 프로세스, 운전조건이 변화하면 진동유발 배관손상이 증가한다고 알려진다.

## 2.유동유발 배관 진동 피로손상평가

진동유발 배관피로손상은 난류유동가진, 기계적가진, 맥동압, 음향가진, 과도유동가진등의 가진력에 의해 주배관과 소구경분지관에서 발생한다. 주배관 진동응답은 관직경, 관두께, 지지구조의 영향을 받고, 소구경분지관의

† 교신저자; 이주헌 삼성중공업 조선해양 연구소  
E-mail : joo.hun.lee@samsung.com

Tel : 055-630-5561 , Fax : 055-630-8086

\* 삼성중공업 조선해양 연구소

\*\* 삼성중공업 조선해양 연구소

\*\*\* 삼성중공업 조선해양 연구소

진동응답은 분지관 길이, 주배관과의 부착유형, 분지관의 밸브수, 관직경, 부착된 주배관두께, 설치 위치의 영향을 받는다.

배관의 진동관련 피로손상 문제는 일반적으로 가진력 유형에 따라 난류유발 저주파 가진력, 유동유발 맥동압 가진력, 원심압축기의 rotating stall 유발 가진력, 왕복동기기유발 맥동압 가진력, 기계적 가진력등 정상상태 가진력과, 밸브 개폐시 고주파 음향가진력, 플래싱, 캐비테이션, surge-momentum 의 과도상태 가진력으로 구분하고, 프로세스 운전조건과 배관유동상태가 변하면 가진력 크기도 매우 많이 변할 수 있다.

UK-HSE 의 진동손상 빈도 조사결과에 따르면 난류유발진동(FIV, Flow Induced Vibration)으로 인한 손상이 53%이고, 왕복동기기유발 맥동압, 고주파 음향유기진동(AIV, Acoustic Induced Vibration), 기계적진동, 와류유기진동 순으로 발생한다. AIV 와 맥동압 유기진동은 발생 빈도가 낮지만, 손상예방조치들이 전체 프로세스와 배관계의 설계/생산에 큰 영향을 줄 수 있다.

AIV 는 주로 가스 배관계의 밸브, 배관에서 발생할 수 있고, 저감수단이 소음원 감소위한 유량, 유속 또는 밸브 모델 변경, 배관 크기와 두께 증가이므로, 설계 및 후행공정에 자재수급, 간섭, 배치등에 매우 큰 영향을 준다. 왕복동기기 맥동압유발 진동은 API 규격 절차에 따라 계산,평가하고, 맥동 감쇠기, 흡입관안정기등으로 방진조치한다. 해양생산 설비에서는 그 대상이 적고, 주로 기기제조사에서 배관진동 해석을 수행한다. FIV 와 기계적 진동은 배관 지지구조 개선으로 방진조치한다. 와류유기진동은 배관 삽입형 thermo-well 이 대상이고, 제조사에서 강도계산과 더불어 검토한다.

## 2.2 진동유발 배관피로 손상 위험도 평가

진동유발 배관피로손상 위험도 평가,진단 기법 (Risk base diagnosis)은 정상상태와 과도상태 가진에 대해, 영국의 MTD(Marine Technology Directorate, 1999 년)와 UK-HSE(2002)에서 각각 정립하였다. 영국 Energy Institute (EI)에서 2008 년 발행한 통합개정본은, 현재 해양생산 설비의 진동유발 배관피로손상 위험도평가에 널리 사용되고 있다.

EI 의 가이드라인에서는 다음과 같은 8 가지 유형의 배관 기진원에 대하여

- 1) Flow Induced Turbulence
- 2) Mechanical Excitation
- 3) Pulsation: Recip. Pumps & Compressors
- 4) Pulsation: Rotating Stall
- 5) Pulsation: Flow Induced Excitation
- 6) High Frequency Acoustic Excitation
- 7) Surge/Momentum Changes by Valve
- 8) Cavitation and Flashing

다음 3 단계로 배관진동 피로손상 위험도 (LOF, Likelihood Of Failure)를 계산,평가한다.

- 1.단계 (상세 검토 대상 주배관 선정 )
  - : 배관 배치, 기기 유형, 매질, 모멘텀 ( $\rho v^2$ ), 유동형태에 따라 상세 검토 대상 선정.
- 2.단계 (주배관 손상 위험도 평가)
  - : 프로세스 유동 정보와 배관 선도로부터 주배관에 대한 LOF 평가.
- 3.단계 (소구경 분지관 손상 위험도 평가)
  - : 주배관 LOF 평가 결과와 소구경 분지관 형상 치수로부터 소구경 분지관 LOF 평가.

## 2.3 음향 유기 배관 진동 평가

가스배관에서 블로다운 밸브, 오리피스, 릴리프 밸브, 압력감소밸브, 압축기 순환밸브 같이 높은 압력강하(pressure drop)가 발생하는 밸브에서는 매우 큰 고주파 음향 에너지가 발생한다. 특히, 다수의 감압밸브를 가진 플레이어 배관은 높은 압력강하에 따른 높은 AIV 가 발생하는 대표적 배관계이다.

음향파위는 밸브를 통과하며 발생하는 압력 강하, 유속과 질량유량에 따라 증가하며, 상류 압력, 매질온도, 분자량도 영향을 끼친다. 음향에너지는 일반적으로 1kHz 이상에서 가장 높고, 200~ 20kHz 의 광대역 특성을 보이고, 밸브 후류로 방사되며, 낮은 감쇠로 인해 대부분의 에너지가 배관을 따라 전파되면서, 배관벽의 진동을 유발한다. 음향파위가 관두께/직경비에 대해 실험적으로 결정된 기준보다 높을 경우, 진동유발 배관 피로손상이 예상된다고 평가한다 일반적으로 고주파 AIV 로 인한 피로손상은 수시간에서 수일내에 발생한다.

AIV 손상은 소구경분지관 (small bore branch, 2" 이하), tie-backs, support saddles, vents, drains, lug, pad, pipe shore, trunnion 등과 같이

주배관에 축비대칭이고, 용접부형상이 급격히 변하는 모든 배관 부착물의 설치 용접부에서 발생할 수 있다. 주배관과 분지관 접합부의 단면 형상이 매끄러울수록 피로손상 위험이 감소한다.

가장 효과적인 AIV 대책은 밸브, 오리피스 같은 압력감소 장치의 유동경로를 나누어 병렬로 설치, 다수의 밸브를 적층하여 밸브당 부가되는 압력감소량을 단계적으로 감소, 또는 압력감소 밸브 트림의 단계적인 압력감소로 음향파위의 크기를 저감하는 것이다. 현실적으로는 배관벽 두께를 증가하거나, 축 비대칭 불연속 부를 제거한다. 음향 파워 초과량이 허용기준대비 10dB 이하이면 관두께 증가, 모든 분지관 접합부를 weld-o-let 대신 full-wrap encirclement, sweep-o-let, forged tee 사용, 소구경 vent, drain 제거등의 조치로 저감 가능하지만, 10dB 를 초과하면 프로세스를 변경하여 음향파위 크기를 줄여야 한다.,

음향유기 배관전동의 피로손상 위험도 평가 방법은 1980 년대 Carucci and Mueller 가 얇은 두께 배관 손상현상을 분석하여 관직경(D)에 대한 음향파위 허용기준을 제시하면서 정량적인 평가가 정립되었고, Eisinger 가 음향파위와 관직경/두께비 (D/t)로 허용기준을 개선하였다. 근래 주요 정유회사에서 수집한 배관 손상 분석 결과를 토대로 더욱 향상된 평가기준이 제기되고 있다

### 1) D/t 평가 방법

D/t (Eisinger)평가법은 NORSOK L-002 표준에 도입되어, 해양설비 배관의 AIV 위험도 평가에 널리 사용되고 있으며, D/t 방법은 강관을 대상으로한 실험, 경험을 기반으로 하므로, 재질특성이 현저히 다른 배관에는 적용할 수 없다.

밸브유발 음향파위는 다음 준경험식으로 계산한다.

$$PWL = 10 \times \log \left[ \left( \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right)^{3.6} \times \left( \frac{W}{3600} \right)^2 \times \left( \frac{T_1 + 273}{M} \right)^{1.2} \right] + 126.1$$

where

PWL is the sound power level in dB  
 P<sub>1</sub> is the upstream pressure of pressure letdown source in bar  
 P<sub>2</sub> is the downstream pressure of pressure letdown source in bar  
 T<sub>1</sub> is the upstream temperature of pressure letdown source in °C  
 W is the gas flow in kg/h  
 M is the molecular weight

여기에 다수 소음원 증가분과 거리 감쇠를 추가로 반영할 수 있다. 낮은 감쇠로 50x 배관 직경에 해당하는 거리당음향파위는 3dB 감소한다.

배관내 불연속부(branch, bend, tee, reducer etc) 또는 배관 의장품을 통과하면서 발생하는 음향파위 감소량은 관내 마찰유동손실 계산과 같이, 등가거리로 환산후 거리감소량으로 치환하여 계산한다. AIV 계산은 밸브로부터 용적이 큰 용기까지, 밸브 후류관을 대상으로 한다.

배관계의 허용 음향파위는 다음 식으로 계산하고, 밸브유발 음향파위와 비교 평가한다.

$$PWL_A = 173.6 - 0.125 \times \left[ \frac{D_i}{t} \right]$$

where

t is the pipe wall thickness in mm

D<sub>i</sub> is the inside diameter of pipe in mm

이 허용값은 3dB 여유를 포함하고, 2" 이상 분지관이 contoured O-let 으로 부착되거나, forged tee, 또는 배관외경 전체를 감싸는 형태의 보강일 경우 허용값을 5dB 상향한다.

### 2) UK - EI (Energy institute) 방법

EI 평가절차에서는 관내 음향파위를 D/t 계산법과 동일식으로 계산하지만, 분지관, 지지대, lug, pads, pipe shoes, trunnions 등 축비대칭 용접부착물에 대한 손상위험(LOF)을 평가한다. 계산된 관내 음향파위가 155dB 를 초과할 경우, 계산된 기본피로수명 주기에 주배관/ 분지관 직경비, weld-o-let 적용, duplex 재질 사용여부에 따라 감소계수를 곱하여 LOF 를 평가한다.

EI 평가법은, duplex 재질배관은 탄소강 배관 대비 기감소 두께와 재질에 대한 2 중 잔여 피로수명 감소로, 위험성이 과도하게 평가된다고 판단된다. 또한, 분지관 설치시 weld-o-let 외 다른 부속(sweep-o-let, T-branch, latrolet 등)적용에 대한 고려 방법이 결여되어 있다.

## 3. 밸브 유발 배관 소음

밸브에서 발생하는 소음은 1) 기계적인 소음과 2) 액체,기체 유동소음으로 구분된다.기계적

소음은 밸브 부품간 기계적 접촉에 의해 1.5kHz 미만 100dBA 이하의 rattling 소음의 형태로 발생하고, 밸브운전상태의 건전성을 나타낸다. 일반적으로 액체유동에 의한 난류, 케비테이션과 플래싱에 의한 소음은 110dBA 이하지만, 기체 유동에 의한 공력학적 소음은 150dBA 이상 발생할 수 있다. 밸브 발생 배관투과 소음은 밸브 후류 1m, 배관표면부터 1m 위치를 기준으로 평가하며, 110~115dBA 를 초과하면 배관 크기에 따라 피로손상도 유발할 수 있다.

제어밸브에서 밸브를 통과하는 고속 가스 난류, 초음속 충격파로부터 생성되는 공역학적 소음은 120dBA 를 초과할 수 있는 주요 소음원이고, 액체의 난류유동유발 소음은 케비테이션 같은 이상유동 상태를 제외하면 무시할 수 있다.

기본적으로 유동유발 밸브소음계산은 IEC 60534-8-3 의 가스유동, IEC 60534-8-4 의 액체유동에 대한 소음원 레벨, 배관투과손실, 관외방사소음 계산절차에 따른다. IEC 계산절차는 밸브의 내부 형상정보와 상세 유동조건들이 요구되므로, 밸브 설계와 크기에 대한 경험적인 특정자료에 의존하지 않고 계산할 수 있다. 단, IEC 60534-8-4 의 1/3 octave 스펙트럼 계산식 오류로, 계산된 각 스펙트럼 레벨에서 5dB 를 일률적으로 감소시켜야 한다.

업계 선도 밸브 제조사들은 열역학적,공역학적 이론들과 경험정보들로 구성된 IEC 60534-8 계산절차로 소음계산을 할 수 있지만, 실제 현장 배관설계 단계에서 밸브소음 계산시 입수할 수 있는 정보로는 IEC 60534-8 을 이용한 밸브 소음원을 계산하기가 현실적으로 어려우므로, 밸브특성계수, 배관치수와 일반 유동 인자등을 이용하여 경험식으로 배관투과소음을 계산한다. 널리 알려진 일반밸브에 대한 경험식들로 케이지, 트림등이 변형된 특수 저소음밸브의 방사소음을 계산할 수 없으므로, 저소음 밸브에 대해서는 제조사에 계산을 의뢰할 수밖에 없다.

#### 4. 결 론

해양원유생산설비 배관계의 진동유기 피로손상 평가는 NORSOK규격과 영국 Energy Institute의 해양생산 설비배관손상 연구조사결과를 바탕으로

개발된 위험성 평가방법이 널리 사용된다. 이중 특히 음향유기배관진동(AIV)은 배관 설계/생산에 미치는 영향이 크므로 설계 초기단계에 선행하여 검토해야 한다.

밸브유발 배관소음은 IEC 60534-8-3과 IEC 60534-8-4에 계산절차가 잘 정립되어 있지만, 밸브와 유동에 대한 상세정보를 입수하기 어려워, 실용적으로 사용하기 어렵다. 또한, IEC 60534-8-4로 1/3octave 레벨 계산시 5dB 오차를 보정해야 한다. 따라서, 설계단계에서 소음검토시 일반밸브는 경험식으로 계산하고, 저소음밸브는 제조사 계산결과를 사용한다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Standards Norway, 2009, NORSOK L-002, Piping system layout, design and structural analysis, pp. 31~33.
- (2) Energy Institute, 2008, Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework.
- (3) Robert D. Bruce, Arno S.Bommer, Thomas E. LepPage, Solving Acoustic-Induced Vibration problems in the design stage, Sound and vibration control megazine,2013
- (4) IEC 60534-8-3,2010, Industrial process control valves-Part 8-3 Noise considerations-control valve aerodynamic noise prediction method
- (5) IEC 60534-8-4,2005, Industrial process control valves-Part 8-3 Noise considerations-prediction of noise generated by hydrodynamic flow.