

# 고압 LNG 펌프의 이상 진동 진단 Abnormal Vibration Diagnosis of High Pressure LNG Pump

김학은 · 최병근  
H. E. Kim and B. K. Choi

**Key Words :** Vibration(진동), LNG(액화천연가스), Pump(펌프), Induction Motor(유도전동기), Slip Frequency(슬립 주파수), Rotor Bar(회전자 봉), Pole Passing Frequency(극통과 주파수), RBPF(회전자 봉 통과 주파수)

**Abstract :** Liquefied natural gas takes up six hundredths of the volume of natural gas, which makes storage and transportation much easier. To send out natural gas via a pipeline network across the nation, high-pressure LNG pumps supply highly compressed LNG to high-pressure vaporization facilities. The Number of high-pressure LNG pumps determined the send-out amount in LNG receiving terminal. So it is main equipment at LNG production process and should be maintained on best conditions. In this paper, to find out the cause of high beat vibration at cryogenic pumps, vibration and motor current signal analysis have been performed. High vibration of cryogenic pumps could be reduced due to the modification of motor rotor.

## 1. 서 론

해외에서 국내에 도입되는 천연가스(natural gas)는 가스의 이송 및 저장의 용이성을 위하여 초 저온 상태(-162℃ 이하)로 액화되어 이송 및 저장하게 된다. 액화천연가스(LNG, liquefied natural gas)는 저장탱크 내에 설치된 저압 LNG 펌프에 의하여 약 8.2kg/cm<sup>2</sup>.g의 압력으로 1차 승압되고, 전국 천연가스 배관망으로 고압 송출하기 위하여 약 80kg/cm<sup>2</sup>.g의 고압으로 2차 가압한 후 기화시켜 송출하게 된다. 이때 사용되는 고압 LNG 펌프는 인수 기지의 가스 송출량을 결정하며, 천연가스 생산 공정에서 중요한 역할을 담당하게 된다. 따라서 LNG 고압 펌프의 안정적인 운영을 위하여 진동 및 소음을 이용한 상태감시가 절실히 필요하다고 할 수 있다.

그러나 LNG 고압 펌프는 적용 유체가 초 저온 상태이므로, LNG를 이용하여 자체 순환하게 되어 있고 LNG의 점성은 약 0.16cp(centi-poise)정도로 순환환경이 좋지 않은 상태로 운전하게 된다. 또한 고압의 송출을 위하여 고속 운전(3,600RPM)됨에 따

라 펌프에 이상이 발생시 조기에 설비가 파손되는 경우가 많으므로 진동 및 소음을 이용한 실시간 상태 감시를 통하여 진동 문제를 조기에 발견하는 것이 가장 중요하다 할 수 있다. 특히 초 저온 상태에서의 재료 특성변화는 진동 거동에 대한 연구 및 분석에 제한이 많으며, 또한 잠액식(submerged type) 펌프인 경우, 초 저온 상태인 LNG내에서의 진동 감시센서 부착, 펌프와 단일 축으로 되어 있는 전동기에 대한 정확한 진동감시 등의 어려움으로 인하여 설비의 예측진단에 많은 시행착오와 노력이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 고압 LNG 펌프의 진동상태 감시를 통하여 진동문제를 감지하고, 진동분석과 전류분석을 통하여 진동문제의 원인을 규명하여, 이를 해결한 사례에 대하여 설명하고자 한다.

## 2. 고압 LNG 펌프

고압 LNG 펌프는 미국 EBARA사의 Vertical Suction Vessel Mounted Type으로 펌프와 전동기 전체가 Suction Vessel내에 설치되며, Fig. 1과 같이 펌프와 전동기가 일체형으로 전동기의 상부 및 하부측에 설치된 볼 베어링에 의해 전체 축이 지지된다.<sup>1)</sup>

접수일 : 2005년 3월 9일  
최병근(책임저자): 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소 E-mail : bgchoi@gsnu.ac.kr Tel : 055-640-3059  
김학은: 한국가스기술공업, 경상대학교 대학원

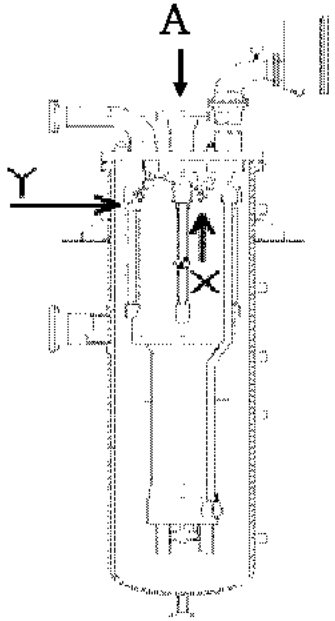


Fig. 1 Pump sketch & vibration measuring points

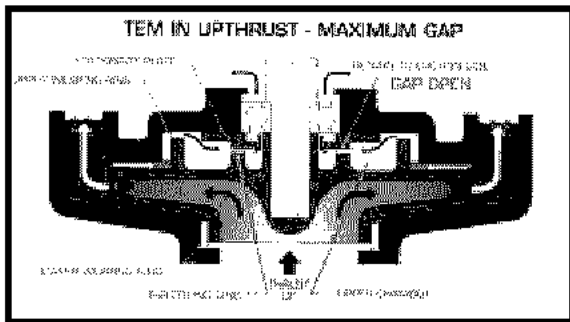


Fig. 2 Maximum gap of TEM impeller

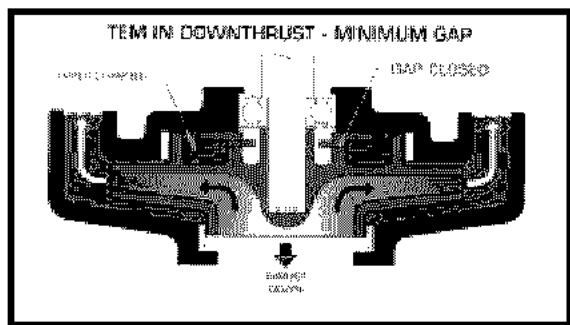


Fig. 3 Minimum gap of TEM impeller

펌프 임펠러는 총 9단으로 구성되고, 마지막 단의 임펠러는 펌프의 축 추력(axial thrust)을 방지하기 위하여 TEM(thrust equalizing mechanism) 방식의 임펠러가 설치되어 있으며, Fig. 2와 3은 TEM의 축 추력 방지의 원리를 나타낸다. 임펠러를 통과한 유체의 압력 불균형에 의해 생성된 추력은 TEM

임펠러와 추력판(thrust plate) 사이 챔버 내 밀폐 압력의 연동에 따라 추력을 보상하게 된다.

Table 1과 2는 펌프 및 전동기의 주요 사양을 나타낸다. 펌프는 Axial Diffuser를 가지는 단단 터빈 펌프이고, 전동기는 유도전동기이다

고압 LNG 펌프의 이상 상태 감시를 위한 진동측정은 일반적으로 2가지 방법이 이용된다. 그 하나는 Pump Vessel 내의 전동기 하우징에 설치되어 있는 반경방향의 2개의 가속도계를 이용하는 On-line 감시 시스템(Bently Nevada사)이고, 다른 하나는 펌프 상부 플레이트에서 휴대용 진동장비(ENTEK IRD사)를 이용하여 측정하는 방식이다.

Table 3은 고압 LNG 펌프의 진동관리 기준을 나타내었으며, 설비 중요도에 맞추어 엄격히 관리된다.

Table 1 Pump specification

Capacity	Discharge Pressure	Stage	Speed
241.8m <sup>3</sup> /hr	88.7kg/cm <sup>2</sup> .g	9단	3,585RPM

Table 2 Motor specification

Voltage	Rating	No. of Pole	Current
6,600V	746kW	2	84.5A

Table 3 Evaluation criteria of vibration<sup>1)</sup>

Model	VMS 3300	DataPac 1500
Alarm	10~15 mm/s. p	1.8~4.5 mm/s. p
Trip	Above 15 mm/s. p	Above 4.5 mm/s. p

### 3. 진동 발생현상 및 분석

정기적인 펌프의 분해검사(overhaul) 이후, 펌프 전체 진동치가 증가하는 양상을 보였으며, 현장에서 펌프 운전 여건에 따라 차이는 있으나 전반적으로 "응응" 하는 이상 음이 발생하였다.

Fig. 4는 펌프의 상부 플레이트에서 DataPac 1500 장비를 이용하여 반경 방향에서 측정된 넓은 주파수 대역의 스펙트럼을 나타내며, 전반적으로 회전주파수(1X) 성분의 진동치가 9.175mm/s. peak로 높게 발생하였다.

또한 현장에서 발생한 울림을 확인하기 위해, 1X (회전주파수) 대역을 True-zooming한 스펙트럼과

스펙트럼 경향 치를 Fig. 5에 나타내었다. 1X 성분 주위에 30rpm(0.5Hz) 간격으로 측대역 성분(sidebands)이 발생함을 확인할 수 있다. 이 성분이 2극 유도전동기에서 발생하는 극통과 주파수( $F_p$ )라는 것은 다음의 식에서 쉽게 확인할 수 있다.<sup>2~5)</sup>

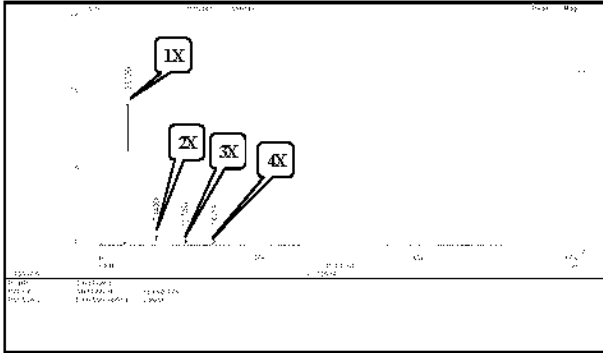


Fig. 4 Spectrum data(Top plate, radial)

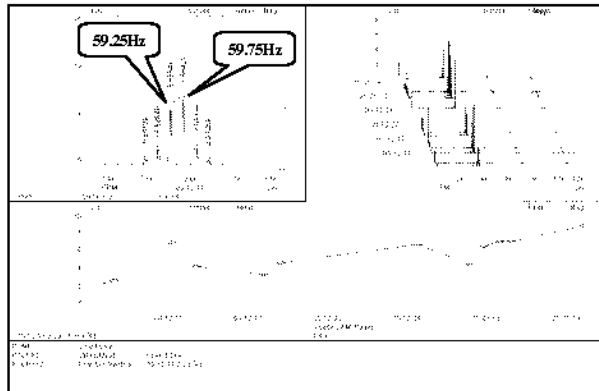


Fig. 5 True-zooming spectrum trend(Top plate, radial)

$$F_s = F_L - RPM = 60 - 59.75 = 0.25Hz \quad (1)$$

$$F_p = F_s \times P = 0.25Hz \times 2 = 0.5Hz \quad (2)$$

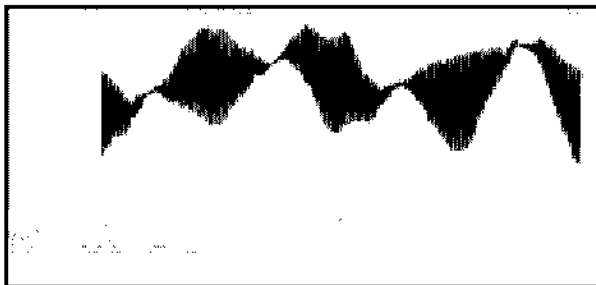


Fig. 6 True-zooming TWF(Top plate, radial)

Fig. 6은 True-zooming한 시간파형을 나타내고 있으며, 1X 성분과 측대역성분에 의한 진폭변조에 따른 진동을 관찰할 수 있다. 이러한 진동특성이 주

로 회전자의 전기적인 문제로 야기되는 사례<sup>3,4)</sup>로 비추어 볼 때, 고주파수 대역의 회전자봉 통과주파수(RBPF, rotor bar passing frequency) 성분을 확인하고자 VMS의 센서와 DataPac 1500 장비를 연결하여 진동을 측정하였다. Fig. 7에서 보이듯이, 고주파수 영역의 RBPF 성분대역과 이의 2배수 대역에서 7,200rpm 간격의 측대역 성분들이 형성되고 진폭 값이 상대적으로 1X보다 탁월함을 확인하였다.

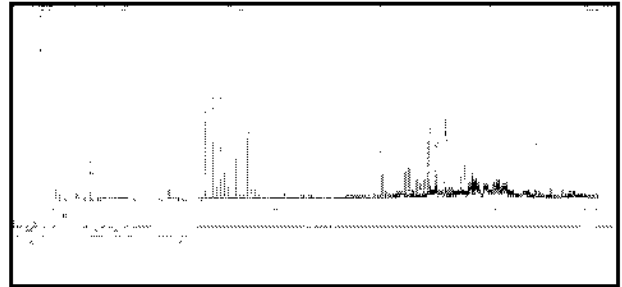


Fig. 7 Vibration spectrum of high frequency band

이상의 진동분석 결과를 통하여 펌프 구동용 전동기의 문제가 의심됨에 따라 전동기 문제를 재확인하기 위하여, 펌프 정지 중에 Rotor Influence Check와 운전 중에 고정자 전류 분석을 실시하였다.<sup>5)</sup>

Fig. 8의 Rotor Influence Check 결과에서 알 수 있듯이, 3상 전원사이에 약간의 불일치가 존재함을 확인할 수 있었고, 일반적인 전동기의 부하상태(80% 이상)에서 회전자 봉의 균열(crack) 및 엔드링(end-ring)의 단락 등의 전동기 문제가 검출된다는 사실에 비추어 전동기 부하 운전 중 전류분석을 실시하게 되었다.

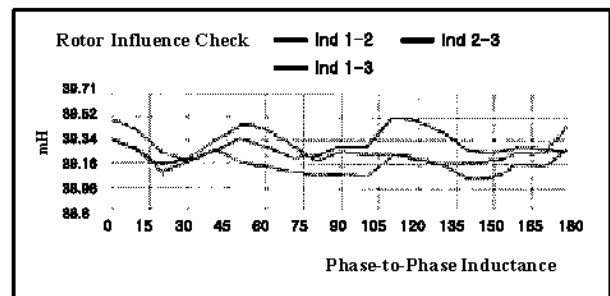


Fig. 8 Result of rotor influence check

Fig. 9는 전동기의 고정자 전류를 분석한 결과로 전류 스펙트럼 상에 60Hz의 전원주파수( $F_L$ ) 주변에 다수의 측대역성분이 관찰되며,  $\pm 2F_s$ 와  $F_L$  간에 36~39 dB의 진폭차를 확인할 수 있었다. 전류분석

을 통해서도 전동기의 회전자 봉 및 엔드링의 단락이 진동문제의 원인으로 확인됨에 따라 진동문제를 개선하고자 전동기 수리를 실시하였다.

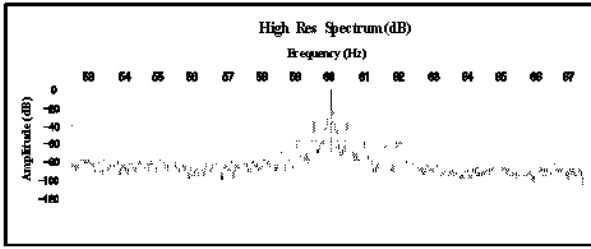


Fig. 9 High resolution spectrum of current signal

#### 4. 진동 원인 개선

##### 4.1 전동기 회전자의 수리

진동분석 및 전류분석 결과 회전자봉과 엔드링의 단락이 진동문제의 원인으로 결정됨에 따라 전동기 수리를 실시하였다.

고압 LNG 펌프용 전동기의 회전자봉과 엔드링은 알루미늄 합금 재질로 국내에서 보수하기에는 어려움이 있어서 순도 99.9%의 Cu 합금으로 재질을 변경하여 수리를 하였으며, 동합금에 대한 성분분석과 초 저온에서의 기계적 성질 시험을 거쳐 Fig. 10에서 보는 것과 같이 보수를 실시하였다. 또한 전동기 회전자를 수리한 후, 육안 검사 및 Weight Balancing을 실시하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

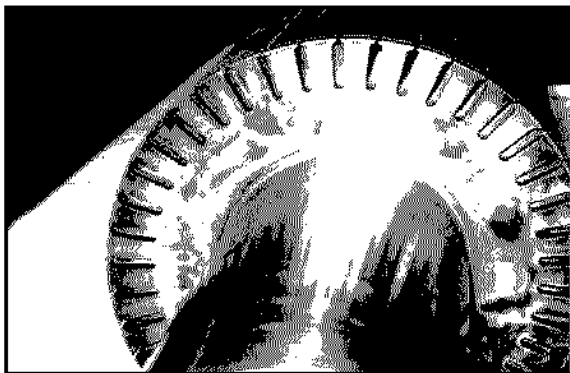


Fig. 10 Al alloy rotor bar

Table 4 Weight balancing data

	Before correction		After correction	
	P1	P2	P1	P2
Unbalance weight(gr)	85.96	74.49	0.79	0.99
Angle(deg)	55.1	27.4	122.8	257.1

##### 4.2 개선 후의 진동특성

Fig. 11의 진동 스펙트럼에서 보이는 바와 같이 회전자의 수리 후에 전체 진동 값이 감소하면서 회전주파수 성분(1X)의 진폭 피크 값이 약 1.5mm/s로 약 80% 정도 현저히 감소하였음을 확인할 수 있다.

전동기 수리 후, 고주파대역의 스펙트럼을 확인한 결과, Fig. 12에서 알 수 있듯이 1배의 RBPF 성분과 측대역성분들은 수리 전과 동일하게 발생을 하였지만, 2배의 RBPF와 측대역성분들은 대부분 사라지고 진폭이 상당히 감소한 것을 확인하였다.

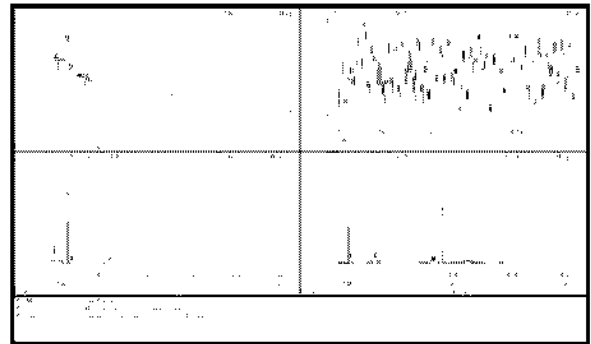


Fig. 11 Radial trend and spectrum at top plate

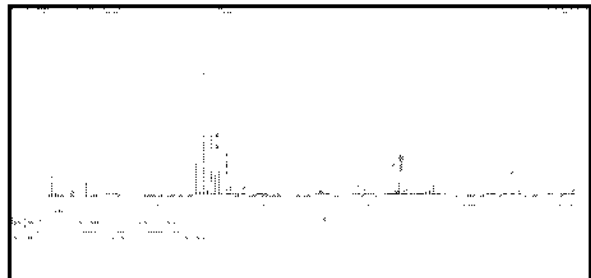


Fig. 12 Spectrum of high frequency band after repair

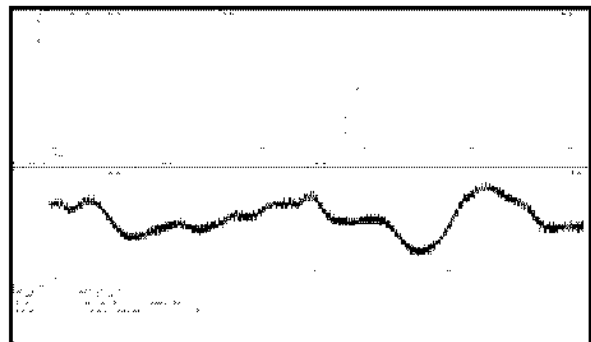


Fig. 13 Zooming spectrum and TWF plot at top plate

Fig. 13과 같이 1X 부근을 확대분석(zooming)한 스펙트럼에서는 극통과 주파수( $F_p$ )의 성분인 30rpm 간격의 측대역성분은 사라지고, 20rpm 간격의 적은

진동 값을 가지는 측대역성분만이 관찰되었다. 또한 1X 성분 진폭이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, TWF 선도에서는 주기적인 맥동의 시간파형이 사라지고 Random한 저주파수대 파형만이 관찰되었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 초 저온 상태에서 운전되는 고압 LNG 펌프에서 발생한 전동기 결함을 진동분석을 통하여 1차적으로 확인하고, 고정자 전류분석을 통하여 최종 전동기 회전자와 엔드 링의 결함을 확인함으로써 진동문제의 원인을 개선할 수 있었다. 또한 초 저온 펌프 전동기의 회전자를 수리함에 있어서 국내 기술의 어려움으로 부득이 재질을 변경하여 수리하여야 하는 위험성이 있었지만, 외국 기술에만 의존하여 오던 초 저온 펌프에 대하여 국내 기술로 개선할 수 있었던 값진 기회가 되었다.

고압 LNG 펌프의 초기 결함진단의 중요성에 비추어 볼 때 진동감시를 통한 결함 진단과 전류분석으로 초 저온 펌프의 상태감시 및 진단의 효율성을 높일 수 있음을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

### 후 기

본 연구는 BK21 지역대학육성사업단 및 지방대학혁신역량강화사업(NURI)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 이병준, 1998, "회전기계 진동 및 정비 핸드북" 제1편 진동의 기본 기술 pp. 543-560.
2. 양보석, 2002, "회전기계의 진동", 인터비전, 서울
3. 양보석 "진동법에 의한 설비진단의 실제", 효성출판사, 부산
4. James. E. Berry, 1994, "IRD Advancement Training ANALYSIS II", Technical Associates of Charlotte, Inc.
5. 양보석, 1998, "기계건강진단 사례집", 효성출판사, 부산