

고압 LNG 펌프의 진동 진단 Vibration Diagnosis of High Pressure LNG Pump

최병근* · 김학은** · 최창립** · 이재명** · 방상수**

Key Words : Beat Vibration(울림 진동), LNG(액화천연가스), Slip Frequency(슬립주파수), Rotor Bar(회전자봉), Pole Passing Frequency(극통과주파수), RBPF(회전자봉통과주파수).

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 analysis have been performed. And high beat vibration of cryogenic pumps could be reduced due to the modification of motor rotor.

1. 서 론

우리나라에 도입되는 천연가스(Natural Gas)는 가스의 이송 및 저장의 용이성을 위하여 초 저온상태(-162℃이하)로 액화되어 이송 및 저장하게 된다.

해외에서 도입된 LNG(Liquefied Natural Gas)는 저장탱크 내에 설치된 저압 LNG펌프에 의하여 약 8.2kg/cm².g의 압력으로 1차 송압되고, 전국 천연가스 배관망으로 고압 송출되기 위하여 약 80kg/cm².g의 고압으로 2차 가압한 후 기화시켜 송출하게 된다. 이때 사용되는 고압 LNG 펌프는 인수기지의 가스 송출량을 결정하며, 천연가스 생산 공정에서 중요한 역할을 담당하게 된다. 따라서 LNG 고압펌프의 안정적인 운영을 위하여 진동 및 소음을 이용한 상태감시가 절실히 필요하다고 말할 수 있다.

그러나 LNG 고압펌프는 적용유체가 초 저온 상태이므로 LNG를 이용하여 자체 윤활하게 되어 있고 LNG점성은 약 0.16cp(centi-poise)정도로 윤활환경이 좋지 않은 상태로 운전하게 된다. 또한 고압의 송출

을 위하여 고속운전(3,600RPM)됨에 따라 펌프 이상 발생시 조기에 설비가 파손되는 경우가 많음으로 진동 및 소음을 이용한 실시간 상태 감시를 통하여 진동문제를 조기에 발견하는 것이 가장 중요하다 할 수 있다. 특히 초 저온 상태에서의 재료 특성변화는 진동거동에 대한 연구 및 분석에 제한이 많으며, 또한 잠액식(Submerged Type) 펌프인 경우, 초 저온 상태인 LNG내에서의 진동 감시센서 부착 그리고 펌프와 단일 축으로 되어 있는 전동기에 대한 정확한 진동감시 등의 어려움으로 인하여 설비 예측진단에 많은 시행착오와 노력이 필요하다.

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

2. 고압 LNG 펌프

고압 LNG 펌프는 미국 EBARA사의 Vertical Suction Vessel Mounted Type으로 펌프와 모터 전체가 Suction Vessel내에 설치되며 Fig. 1에서와 같이 Pump와 Motor가 일체형으로 Motor의 Upper 및

* 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소

E-mail : bgchoi@gsnu.ac.kr Tel. 055-640-3059

** 경상대학교 정밀기계공학과 대학원

Bottom Side에 설치된 Ball Bearing에 의해 전체 축이 지지 된다.¹⁾

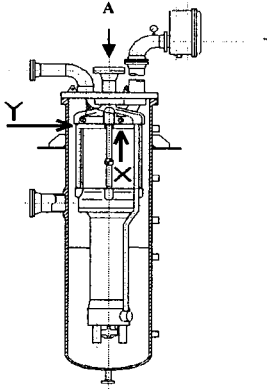


Fig. 1 Pump sketch & Vibration measuring point

펌프 Impeller는 총 9단으로 마지막 단의 Impeller는 펌프의 축 추력을 방지하기 위하여 TEM(Thrust Equalizing Mechanism) 방식의 Impeller가 설치되어 있다. Table 1, 2는 Pump 및 Motor의 주요 사양을 나타내며, Pump는 Turbine Multi Stage Axial Diffuser Type이고 전동기는 Induction motor 이다

Table 1 Pump Specification

Capacity	Dis' Pressure	Stage	Speed(rpm)
241.8m ³ /hr	88.7kg/cm ² .g	9단	3,585

Table 2 Motor Specification

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

Table 3 Evaluation Criteria of Vibration¹⁾

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

고압 LNG 펌프의 이상상태 감시를 위한 진동측정은 일반적으로 2가지 방법으로 실시된다. 그 하나는 Pump Vessel 내의 Motor Housing에 설치되어 있는 Radial 방향의 2개의 가속도계를 이용하는 On-line Monitoring System(Bently Nevada사)이고 다른 하나는 Pump Top Plate에서 휴대용 진동장비(ENTEK IRD사)를 이용하여 측정하는 방식이다.

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

3. 진동 사례 및 분석

3.1 진동발생 현상 및 분석

정기적인 펌프 Overhaul 이후 펌프 전체 진동치가 증가하는 양상을 보였으며, 현장에서는 펌프 운전 여건에 따라 차이는 있으나 전반적으로 "응용" 하는 이음이 발생하였다.

Fig. 2는 Pump의 Top Plate에서 DataPac 1500 장비를 이용하여 Radial 방향에서 측정한 넓은 주파수 대역의 Spectrum Data를 나타내며, 전반적으로 회전주파수(3,585rpm) 성분의 진동치가 9.175 mm/s. peak로 높게 발생하였다. 또한 현장에서 발생하는 Beat를 확인하고자 1X(회전주파수) 대역을 True-Zooming한 Spectrum Data와 Spectrum Trend를 Fig. 3에 나타내었고, 1X 성분 주위에 30 rpm (0.5 Hz) 간격으로 Side Band가 형성됨을 확인할 수 있었다. 이 성분이 2극 유도전동기에서 발생하는 극통과 주파수(F_p)라는 것은 다음의 식에서 쉽게 확인이 가능하였다.^{2,5)}

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

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

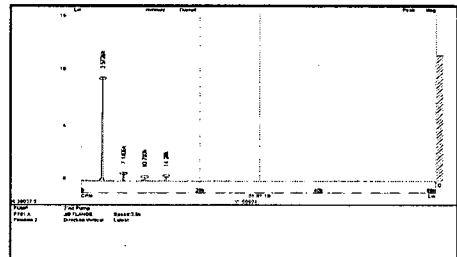


Fig. 2 Top plate spectrum data(Radial side)

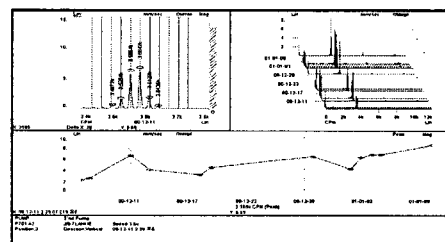


Fig. 3 True-Zooming spectrum trend(Top radial)

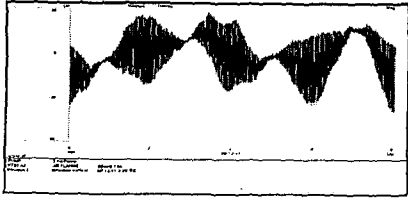


Fig. 4 True-Zooming TWF(Top radial)

Fig. 4는 True-Zooming한 Time Wave를 나타내고 있으며, 1X 성분과 Side 성분에 의한 진폭변조에 따른 Beat Vibration을 관찰할 수 있다. 이러한 진동 특성이 주로 Rotor의 전기적인 문제로 야기되는 사례^{3,4)}로 비추어 볼 때 고주파 대역의 RBPF(Rotor Bar Passing Frequency) 성분을 확인하고자 VMS의 Sensor와 DataPac 1500장비를 연결하여 진동을 측정하였으며, Fig. 5에서 나타낸 것과 같이 고주파수 영역의 RBPF 성분대역과 2배의 RBPF 대역에서 7,200rpm 간격의 Side Band들이 형성되고 진폭 값이 상대적으로 1X보다 탁월함을 확인하였다.

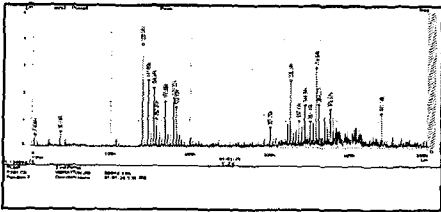


Fig. 5 VMS와 연결 측정된 고주파 대역 Data

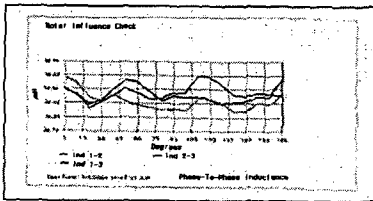


Fig. 6 Result of Rotor Influence Check(정지 중)

이상의 진동분석 결과를 통하여 Pump 전동기의 문제가 의심됨에 따라 전동기 문제를 재확인하기 위하여 펌프 정지 중 Rotor Influence Check와 운전 중 전류 분석을 실시하게 되었다.⁵⁾

Rotor Influence Check 결과를 나타내는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 3상간에 약간의 불일치가 존재함을 확인할 수 있었고, 일반적인 전동기의 부하상태(80%

이상)에서 Rotor Bar의 Crack 및 End-Ring의 단락 등의 전동기 문제가 검출된다는 사실에 비추어 전동기 부하 운전 중 전류분석을 실시하게 되었다.

Fig. 7은 전동기의 전류를 분석한 결과로 Current Spectrum상에 60Hz의 전원주파수 주변에 다수의 Side-Band가 관찰되며, $\pm 2F_s$ 와 F_L 간에 36~39 dB 진폭차를 확인할 수 있었다. 전류분석을 통해서도 Pump 전동기의 Rotor Bar 및 End-Ring의 단락이 진동문제의 원인으로 확인됨에 따라 진동문제를 개선하고자 전동기 수리를 실시하였다.

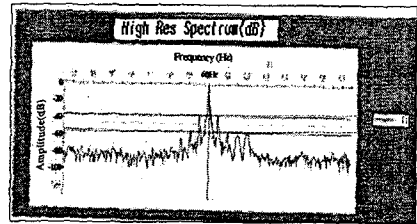


Fig. 7 Current High Resolution Spectrum(운전 중)

3.2 진동원인개선

진동분석 및 전류분석 결과 Rotor Bar와 End-Ring의 단락이 진동문제의 원인으로 결정됨에 따라 전동기 수리를 실시하였다. 고압 LNG 펌프 전동기의 Rotor Bar와 End-Ring은 Al 합금 재질로 국내에서 보수하기에는 어려움이 있어서 순도 99.9%의 Cu 합금으로 재질을 변경하여 수리를 하였으며, 동합금에 대한 성분분석과 초 저온에서의 기계적 성질 Test를 거쳐 보수를 하였다. 또한 전동기 Rotor를 수리한 후, 육안 검사 및 Weight Balancing을 실시하였으며 그 결과를 Table. 4에 나타내었다.

Table 4 Weight Balancing Data

구 분	교정 전		교정 후	
	P1	P2	P1	P2
Unbalance(gr)	85.96	74.49	0.79	0.99
각 도(Deg)	55.1	27.4	122.8	257.1

Fig. 8의 Spectrum Data에서 보이는 바와 같이 Rotor 수리 후 전체 진동 값이 감소하면서 회전주파수 성분(1X)의 진폭 Peak값이 1.5 mm/s 정도로 약 80% 정도 현저히 감소하였음을 확인할 수 있었다.

전동기 수리 후, 고주파대역의 Spectrum Data를 확인한 결과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 1배의 RBPF 성분과 Side-Band 성분들은 수리전과 동일하게 발생을 하였지만 2배의 RBPF와 Side-Band 성분들은 대부분 사라지고 진폭이 상당히 감소한 것을 확인하였다.

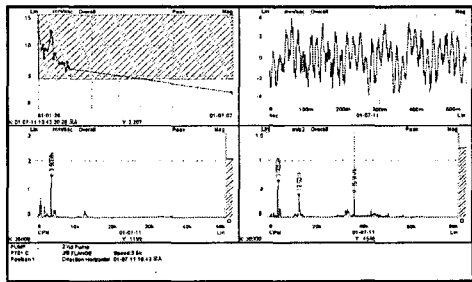


Fig. 8 Top Plate Radial Trend & Spectrum Data

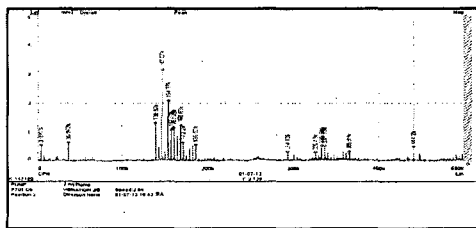


Fig. 9 고주파대역 Spectrum Data(수리후)

Fig. 13과 같이 1X 부근을 Zooming한 Spectrum Data에서는 극통과 주파수(F_p)의 성분인 30rpm 간격의 Side Band 성분은 사라지고 20rpm 간격의 적은 진동 값을 가지는 Side Band 성분만이 관찰되었다. 또한 1X 성분 진폭이 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었으며, TWF Plot에서는 주기적인 맥동의 Beat 파형이 사라지고 Random한 저주파수대 파형만이 관찰되었다.

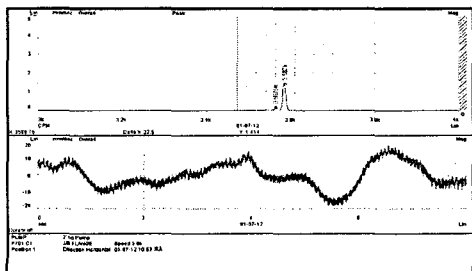


Fig.13 Zooming Spectrum & TWF(Top Plate Radial)

5. 결 론

본 연구에서는 초 저온 상태에서 운전되는 고압의 LNG 펌프의 전동기 결함을 진동분석을 통하여 1차적으로 확인하고, 전류분석을 통하여 최종 전동기 Rotor와 End-Ring의 결함을 확인함으로써 진동문제의 원인을 개선할 수 있었다. 또한 초 저온 펌프 전동기의 Rotor를 수리함에 있어서 국내기술의 어려움으로 부득이 재질을 변경하여 수리하여야 하는 위험성이 있었지만 외국기술에만 의존하여 오던 초 저온 펌프에 대하여 국내기술로 개선할 수 있었던 값진 기회가 되었다.

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

후 기

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

참 고 문 헌

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