

〈 논문 〉

배관공진에 의한 구조물 진동 분석

구동식* · 김효중* · 정한얼* · 김학은** · 최병근†
(2006년 7월 19일 접수, 2007년 1월 3일 심사완료)

Structural Vibration Analysis Caused by Piping Resonance

DongSik Gu, HyoJung Kim, HanEol Jeong, HakEun Kim
and ByeongKeun Choi

Key Words: Intake Station(취수장), Crack(균열), Reference(기준), Vane Passing Frequency(깃 통과 주파수)

Abstract

A few intake stations have vibration problems caused by pumps, motors and pipes. The vibration transferred from pumps, motors and pipes excites building severely. Therefore, the crack is generated on building wall and people who work at intake station are damaged. In this paper, the vibration has been measured and analyzed for pumps, motors, pipes and building at intake station. Also, the cause of vibration is identified. Finally, the solution of structural vibration is established using the results of measurement.

1. 서론

취수장은 강이나 저수지의 원수를 끌어들이어 정수장으로 보내는 역할을 하는 시설을 말한다. 이 시설은 수도물을 쓰는 지역에는 어디든 설치되어 있으며, 수도권에만도 20여 곳이 있다. 우리나라에 설치되어 있는 취수장은 약 810개소로, 그 시설용량은 하루 29,259kton을 생산할 수 있고, 한 취수장에서 하루 생산되는 취수량은 평균 약 36,000ton이다.⁽¹⁾ 하지만 소규모의 취수장이 많기 때문에 대규모의 취수장은 평균의 몇 배에 이르는 양을 생산한다.

취수장에는 원수를 취수하기 위해 10여기 이상

의 펌프 및 전동기가 설치된다. 그리고 펌프 및 전동기의 사양은 설치되는 취수장 담당지역의 소비량에 비례하여 결정되기 때문에 담당하고 있는 지역이 광범위한 경우 대형·대용량의 펌프 및 전동기를 사용할 수밖에 없다.

펌프 및 전동기와 같은 회전기기는 진동에 의해 발생하는 문제가 가장 심각하며, 완전히 제거할 수 없는 것 또한 진동 문제이다. 따라서 여러 회전기기로 구성되어 있는 취수장에서 진동에 의한 문제가 빈번하게 발생하고 있다.⁽²⁾

그리고 이들 펌프 및 전동기의 진동이 취수장 배관 시스템을 통해 건물로 전달되어 취수장 건물의 내외부에 균열을 발생시키는 등의 사례가 있고, 현재에도 같은 문제들이 진행되고 있다.⁽³⁾ 또한 진동으로 인한 소음은 열악한 작업환경을 조성하여 작업자의 인체에 수면장애, 물리적인 피해 및 혈압상승 등의 영향을 미친다.

따라서 본 논문에서는 대상 취수장의 전반적인 시스템인 펌프, 모터와 배관의 진동을 정밀하게

† 국립 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr
TEL : (055)640-3186 FAX : (055)640-3188

* 국립 경상대학교 대학원 정밀기계공학과

** 한국가스기술공사 통영생산기지사업부

측정하고 분석하였다. 그리고 건물진동의 가진원을 파악하기 위하여 펌프 및 전동기로부터의 진동전달 경로를 파악하였으며, 충격시험을 통하여 배관계의 고유진동수를 확인하였다. 또한 진동 분석결과를 토대로 구조물 공진회피에 대한 대책 방안과 피해방지 방안을 제시하였다.

2. 측정 장치 및 방법

2.1 측정 장치

본 논문에서 사용한 계측 장비로는 Pulse 3560(B&K SV), VIBRO- TEST 60(B&K Vibro)를 사용하였고, 사용된 센서(sensor)로는 펌프, 배관 및 건물의 진동을 측정하기 위한 속도계와 가속도계(Accelerometer), 건물 및 사무실 소음측정에 이용된 마이크로폰(Micro- phone)등이 있다. 그리고 주 배관 및 Pump casing, 베어링 하우징의 고유진동수를 측정하기 위해 임팩트 해머(Impact Hammer)를 사용하였다.

2.2 측정 방법

취수장의 펌프 및 전동기의 진동 품질을 평가하기 위해 가동 중인 2호기, 4호기, 5호기, 6호기 및 7호기를 대상으로 진동계측을 여러 차례에 걸쳐 수행하였다. 측정지점과 위치는 Fig. 1에서 보이는 것 같이 펌프, 전동기 각각에 대해 구동단(DE)의 수직방향(V)과 수평방향(H)(전동기는 구조상 제한으로 ± 45도 위치) 및 반구동단(NDE)의 수직, 수평 및 축 방향(A), 펌프 케이싱, 기초(base) 및 토출 배관의 진동을 측정하였다. Table 1은 펌프 및 전동기 사양을 나타낸다.

주 배관의 고유진동수 측정은 주요 가진원인 펌프의 깃 통과 주파수(Vane passing frequency, VPF)와의 공진 여부를 확인하기 위해, 충격 해머(Impact hammer)를 이용하여 주배관의 여러 개소에서 충격시험(Impact test)을 실시하였다.⁽⁴⁾ 가동 중인 펌프를 정지하여 펌프로부터의 어떠한 가진도 없는 조건에서 실시하여야 순수 배관만의 고유 특성을 파악할 수 있으나, 작동 중인 펌프를 정지할 수 없기에 가동 중에 타격시험을 실시하여 타격 전과 후의 스펙트럼을 비교 분석 하였다.

펌프 및 전동기에서 발생하는 진동이 건물에 전달되면서 발생하는 건물 진동을 평가하기 위해

건물 진동의 측정을 실시하고, 진동지도(Vibration map)를 작성하였다. 건물의 진동측정 지점으로는 Fig. 2와 같이 펌프장 각층(B3, B2, B1, 1층) 및 사무실이고, 여기서의 펌프장은 펌프 및 전동기 설비 옆의 철 구조물 위(측정 장비 셋업 장소)에서 측정한 진동데이터를 말한다.

그리고 작업장과 사무실의 소음레벨을 파악하기 위해, 마이크로폰을 이용하여 사무실에 4개소(중앙, 소파위치, 사무실 입구 및 지도 앞부분) 및 지하 작업장의 소음을 측정하였다.

본 논문에서 사용한 측정기준⁽⁵⁾은 Overall value의 경우 10Hz ~ 1000Hz, mm/s, rms로 하였으며, Spectrum은 0 ~ 5kHz, 1600 line 이상, Hanning, Averaging 4회 이상으로 하였다.

3. 측정 결과 및 분석

3.1 펌프 및 전동기

펌프의 진동은 기본적으로 임펠러 깃 통과 주

Table 1 The Specification of pump and motor

Pump	Motor
RPM: 880 rpm, (14.7 Hz)	RPM: 890 rpm,(14.8 Hz)
Bearing Type: Driven (#NU324) END(#6324)	Bearing Type: Driven(#NU326) END(#6330)
Capacity: 3,726 m ³ /Hr	No. of Pole: 8
Total Head: 66 m	Power: 1250kW(1676 Hp)

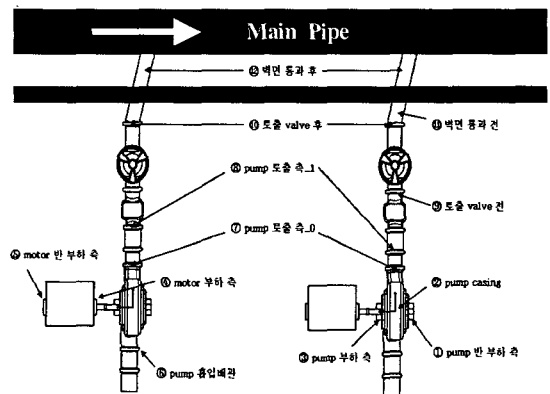


Fig. 1 Measurement points

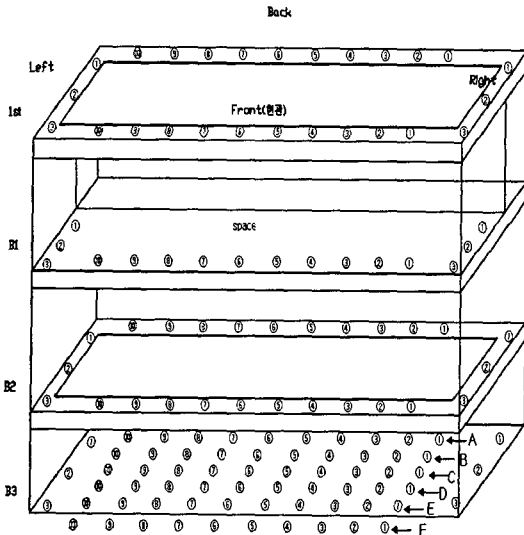


Fig. 2 Measurement points at building

파수(VPF) 성분인 104.7Hz 성분이 가장 탁월하고, 이들의 배수 성분(조화성분)들도 발생하고 있으나, 매우 진폭이 낮게 나타났다.

그리고 전체적으로 NDE측 수직 방향의 진동이 크게 나타났다. 그리고 일부 펌프에서는 캐비테이션으로 의심되는 진동이 발생하고 있다.

Fig. 3은 7호기의 펌프 NDE측 베어링 하우징에서 측정된 진동스펙트럼이다. Fig. 3에서와 같이 펌프에서는 수직방향(V)과 수평방향(H)에 대해서 1VPF(104.4Hz) 성분이 가장 강하게 나타나고 있다.

계측대상 설비의 경우에는 Fig. 4에서 나타나듯이 진동평가규격 "ISO 10816-3"에 대해서는 일부에서 영역 B와 C의 경계인 B/C 영역 경계 값 2.8mm/s를 초과하고 있으나, "ISO 10816-7(제정중)"을 적용하면, 모두 B/C 영역 이내로 양호한 편이다.⁽⁶⁾ 그리고 펌프 및 전동기의 진동은 전반적으로 펌프의 진동(1.3mm/s~3.9mm/s)이 전동기의 진동(0.3mm/s~0.9mm/s)에 비해 높은 상태임을 알 수 있다.

3.2 배관 진동

Fig. 5는 주 배관에서 측정된 진동스펙트럼을 나타낸다. 주 배관의 전체적인 진동속도스펙트럼은 임펠러 깃 통과 주파수(VPF)인 104.7Hz 성분만이 주로 탁월하게 발생하고 있으며, 배관 직경이 작은 2호기 측에서 최대 진폭을 나타내고 점차 감소하여, 디퓨저 통과 후에 속도에너지가 정압으로 바뀌는 영역에서 진폭이 약간 증가하였다

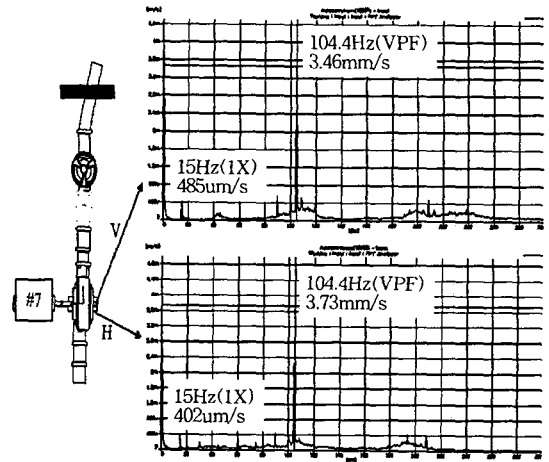


Fig. 3 The Vibration spectrum of No. 7 pump bearing

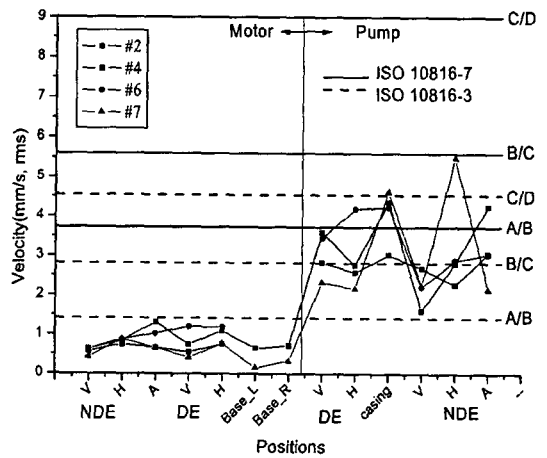


Fig. 4 The Vibration velocity of pump and motor

Table 2 The velocity and amplitude of main pipe

Point	Velocity (mm/s, p)	Amplitude (um, p-p)
No.2 out	2.69	8.178
No.4 out	1.42	4.317
Diffuser	1.07	3.253
No.6 out	1.26	3.831
No.7 out	0.641	1.949

가 다시 감소하는 특성을 보이고 있다.

Table 2는 주 배관진동의 속도 측정치를 변위

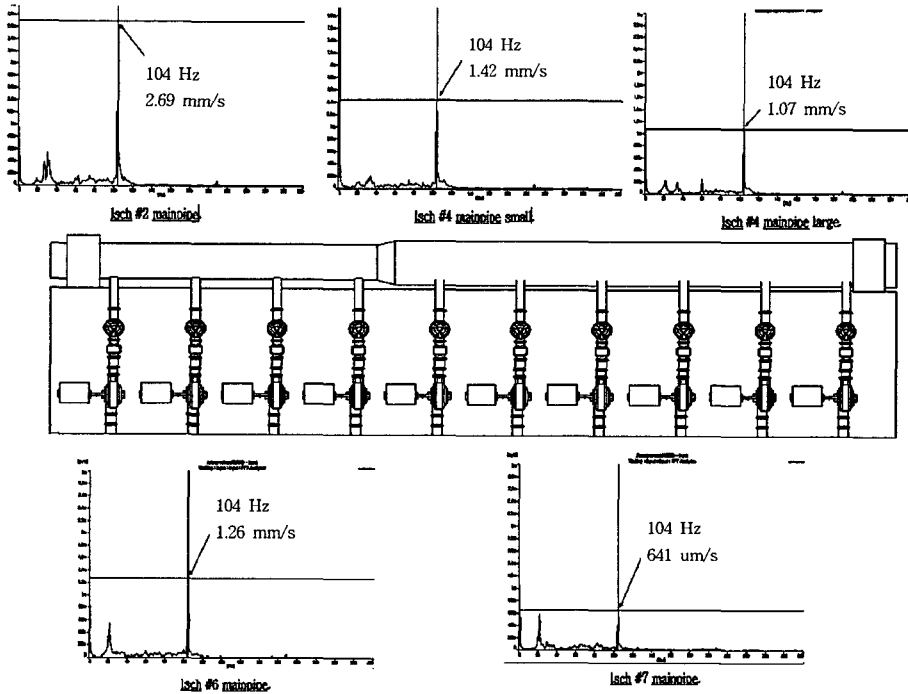


Fig. 5 The vibration measurement of main pipe

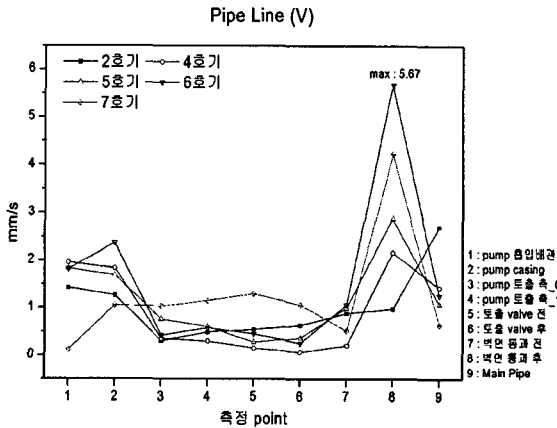


Fig. 6 The vibration velocity of pipe-line

로 환산한 결과를 타나내고 있다.

Fig. 6은 Fig. 1에 나타낸 측정지점을 기준으로 흡입 측 배관에서 주 배관까지 측정한 각 펌프의 배관진동을 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 2호기를 제외한 다른 호기의 경우 펌프 케이싱에서 발생한 진동이 펌프의 배관 라인을 따라 전달되면서 점차 감소하다가 건물의

Table 3 The ratio of vibration value with natural frequency (%)

N	Curve-pipe		Main piping	
	Natural Frequency (Hz)	VPF/Natural	Natural Frequency (Hz)	VPF/Natural
2	83	126.1%	93	112.6%
4	88.75	118%	88.5	118.3%
6	100	104.7%	86	121.7%
7	99.69	105%	82.5	126.9%

벽면을 통과 후(8) 증가하여 최대가 되고 주 배관(9)에서 다시 감소함을 알 수 있다. 벽면 통과 후 나타나는 갑작스런 진동 증가의 원인을 알아보기 위하여 충격시험을 실시하였고, 그 결과 연결곡관의 고유진동수가 VPF부근(공진영역)에 존재하여 진동이 증폭된다는 것을 확인하였다.

3.3 충격 시험

연결곡관과 주 배관에서 측정한 고유진동수와 및 통과 주파수(VPF)의 비율을 %로 하여 Table 3

Table 4 The sound level of work area & office

Measuring Point		Sound Level (dBA)
Office	center	51.8
	sofa	51.3
	enter door	51.8
	map front	52.2
Work Area	pump floor	88.2

에 나타내었다.

Table 3에서 알 수 있듯이 2호기의 경우 VPF가 연결곡관보다는 주 배관의 고유진동수에 더 근접하여 공진영역(80%~120%)에 속하므로, 주 배관에서 진동이 연결곡관에서 진동보다 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 다른 호기의 경우 주 배관에서는 VPF가 공진영역에서 속하지 않으며, 4호기의 경우도 공진영역의 가장자리에 들어 진폭의 증가율이 그다지 크지 않았다.

하지만 4, 6, 7호기 배관라인을 따라 감소 또는 그대로 전달되어오던 VPF 성분이 연결곡관에서 진동이 크게 증가하는 경향을 나타내었고, 특히 6호기의 경우 고유진동수에 가장 근접하고 있어 진동이 가장 크게 증가하였다.

이러한 배관의 진동 증가가 벽면을 통하여 건물로 그대로 전달되어 건물을 가진 하는 것으로 사료된다.

3.4 소음

대상 취수장의 작업장과 사무실의 소음 레벨을 파악하기 위해, 마이크로폰을 이용하여 사무실 4개소(중앙, 소파 위치, 사무실 입구 및 지도 앞부분) 및 지하 작업장의 소음을 측정하고 1/3 옥타브 분석을 실시하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 작업장 및 사무실 중앙에서 측정된 소음의 1/3 옥타브 분석 결과를 나타내고, 소음의 음압레벨을 Table 4에 표시하였다. 펌프장의 경우는 진동 및 소음의 맥놀이 유무를 확인하기 위하여 약 2초 간격으로 4시간에 걸쳐서 소음을 측정하였다. 측정된 결과에 의하면 맥놀이 현상은 발생하지 않았으며 펌프장 소음레벨은 매우 높은 상태인 88.2dBA로 측정되었고 사무실 내부의 소음은 51~52dBA로 측정되었다.

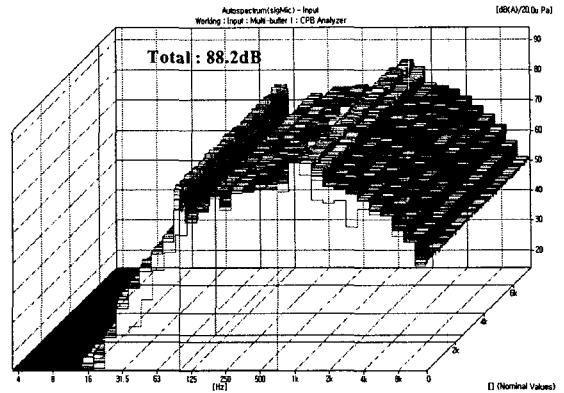


Fig. 7 The sound level of pump floor

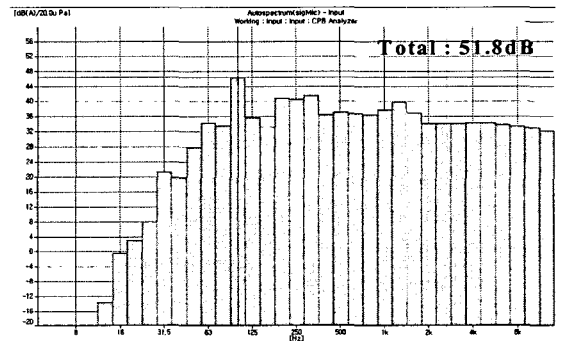


Fig. 8 The sound level of office center point

Table 5 The standard of noise for factory

Area	Time	05:00~08:00	08:00~18:00	22:00~05:00
		18:00~22:00		
Residential		low 50 dBA	low 55 dBA	low 45 dBA
Business Industry		low 60 dBA	low 65 dBA	low 55 dBA

Table 5는 최근 소음 규제법으로 공장에 의한 소음진동규제법, 환경관리법 등에서 공장소음을 제한하고 있는 공장소음기준을 나타내고 있으며, 측정치는 주간에 측정된 값으로 허용기준을 만족하고 있으나, 조석 및 야간에는 초과하므로 과도한 소음레벨에 장시간 노출되면, 대화에 장애를 가져오고, 난청 현상을 일으킬 수 있어 장기적으로는 근무자의 환경 개선을 위한 펌프장내부와 사무실의 방음 설계가 필요할 것으로 생각된다.

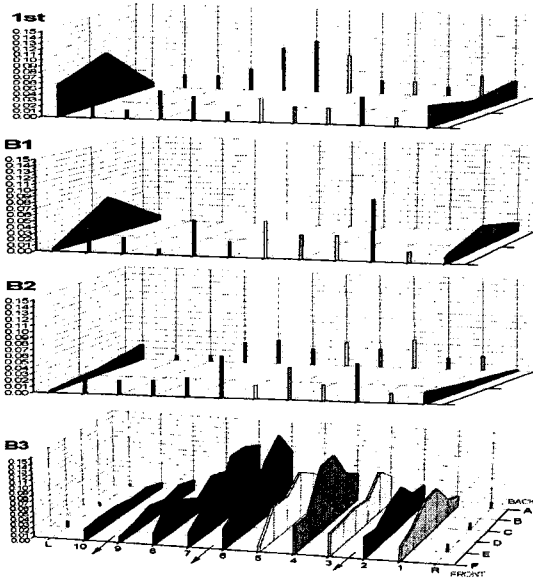


Fig. 9 The vibration map of each floor in building

3.5 건물 진동

Fig. 9에서 지하 3층(B3)의 1호기에서 8호기까지 바닥의 진동레벨이 높고, 특히 주 배관과 흡입배관 밑 부분의 진동이 매우 크게 발생하며, 펌프 및 배관진동에 기인한 건물바닥진동이 위층으로 전달되면서 진동이 감소하지 않고 건물진동의 모드에 따라 그대로 전달되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 계측된 건물 진동의 결과 중 주 배관(Front)과 흡입측(Back)의 벽면을 층별로 나타낸 것이다. 대부분 펌프 및 통과주파수인 104.7Hz 성분이 탁월하다는 것이 확인되었고, 진동이 Fig 10에서와 같이 건물 벽을 타고 전달되어 지하 2층(B2), 지하 1층(B1) 및 1층으로 그대로 전달되고 있음을 알 수 있었다.

그리고 6호기와 7호기의 경우 흡입측에서는 B3의 진동이 B2에서는 감소하였다가 지상층에서 다시 증가하고 있으며, 2호기의 경우에는 주배관의 진동이 B1까지는 지속적으로 증가하여 최대가 되었다가 지상층에서는 감소하는 경향을 보인다.

이는 장기적으로 콘크리트 구조물의 피로 균열을 발생시킬 위험이 있으며, 이미 대상 취수장에서는 이를 경험하여 개수 공사를 실시한 적이 있다. 현재 피크 진동속도는 약 0.03 cm/s 정도로 일반적으로 많은 사람이 진동을 느끼는 정도의

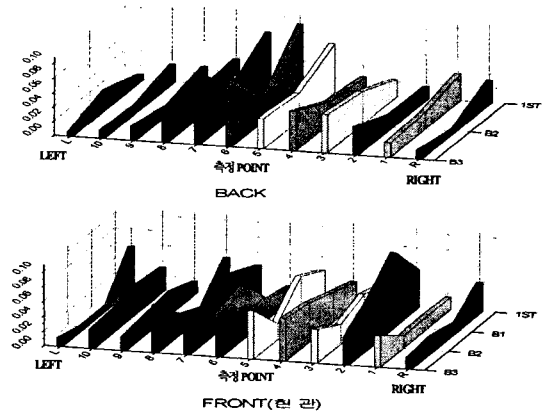


Fig. 10 The vibration transform of front & back

수준이며, 근본적인 대책을 강구하지 않으면 건물 벽의 균열 현상은 향후 지속적으로 나타날 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 확인한 펌프, 전동기, 배관계 및 건물의 진동·소음측정 결과와 그에 대한 대책 및 피해방지 방안은 다음과 같다.

(1) 펌프 및 전동기의 진동레벨은 비교적 낮고, ISO규격과 비교하여 양호하며, 펌프의 진동은 펌프의 구조적 특성으로 인해 발생하는 깃 통과 진동수(VPF) 성분이 탁월하였다.

(2) 주 배관(main pipe)의 진동은 펌프에서 발생한 깃 통과 진동수 성분의 압력맥동이 주 가진원으로 작용하고 있다. 그러나 배관이 콘크리트 기초 위에 올려져 있는 상태로 이 진동이 취수장 건물에 그대로 전달되고 있다.

(3) 더욱이 충격시험 결과 VPF 성분이 연결곡관 및 주 배관의 고유진동수에 접해있거나 공진영역 가장자리에 위치하고 있어 벽면 통과 후의 배관 진동이 급격하게 증가하였다. 그러므로 향후 배관과 콘크리트 기초 사이에 진동 절연용 패드 등을 설치하여 진동전달을 차단하고, 주 배관의 부분 또는 전체를 콘크리트로 완전히 둘러싸서 기초에 완벽하게 고정시켜 배관의 진동을 억제할 필요가 있다.

(4) 사무실의 소음 측정결과, 공장소음기준 중

주간의 허용기준을 만족하고 있으나, 조석 및 야간에는 초과하므로 과도한 소음레벨에 장시간 노출되면, 대화에 장애를 가져오고, 난청 현상을 일으킬 수 있어 장기적으로는 근무자의 환경 개선을 위한 펌프장내부와 사무실의 방음 설계가 필요할 것으로 생각된다.

(5) 펌프장 건물의 진동레벨은 건물의 허용진동 속도 기준과 비교할 때, 일반적으로 많은 사람이 진동을 느끼는 정도의 수준이지만, 매우 양호한 레벨임을 알 수 있었다. 그러나 장기간 운전 시 피로누적으로 건물 벽에 균열을 일으킬 가능성이 있으므로, 주 배관 부분의 진동절연이 필요하다.

후 기

본 연구는 2단계 BK21 사업단, 첨단기계산업 기술혁신 인력양성 사업단(NURI) 및 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- (1) Choi, H. W., 2003, "Waterworks Figure," *Ministry of Environment*.
- (2) Lee, B. G., Lim, B. D., Jung, T. G. and Hwang, J. H., 2002, "Engineering Vibration," *Pearson Education Korea*, pp. 533~550.
- (3) KOWACO researcher, 2004, "KOWACO Yeosu administration group diagnosis report," *Daejeon KOWACO*.
- (4) Yang, B. S., 1994. "Actuality of Equipment Diagnosis by Vibration's Row," *Il-o publishing company*, pp. 36~41.
- (5) Rabdall, R. B., Tech, B. and B. A., 1987, "Frequency Analysis," *B&K*.
- (6) Yang, B. S., 2002, "Vibration of Rotating Machines," *Intervision publishing company*, pp. 559~603.