

산업용 로봇의 소음/진동 저감 연구

A Study of Industrial Robot for the Noise and the Vibration Reduction

이광열*·정진태**·정두한*·임흥순***·김영환***

Kwangyal Lee, Jintai Chung, Duhan Jung, Heung Soon Yim and Young Hwan Kim

Key Words : industrial robot(산업용 로봇), noise reduction(소음저감), vibration reduction(진동저감), parametric study(매개변수 연구)

ABSTRACT

The object of this study is an examination of source of robot noise and reduction of the noise and the vibration for an industrial robot system. As the first step in our study, the noise and the vibration from the robot are measured by microphones and by accelerometers and the source of the noise and the vibration are proved to be from the gear, shaft, and housing from the experiments. The occurrence of the noise may be classified according into kinds, Finally base on the result of the experiments, we consider a countermeasure for reducing the noise and the vibration of robot system by the parametric study.

1. 서론

산업용 로봇의 소음 및 진동의 주요 발생 원인은 기어, 축, 베어링으로 구성된 내부 동력전달계의 요소품의 형상, 관성, 강성, 감쇠, 마찰, 가공공차, 조립공차 등 다양하다. 일반적으로 기어를 이용한 동력전달계 시스템에서는 기어 소음이 가장 문제시 되고 있다. 이러한 기어 소음은 기어치의 강성변화, 치형오차, 조립오차 등에 의해 생겨서 축과 베어링을 지나 하우징을 통해 외부로 구조전달 소음에 의해 주로 전달된다. 지금까지의 연구는 기어만을 모델링하여 치의 강성 변화나 치형오차를 고려한 운동방정식을 유도하여 진동과 소음을 평가하는 연구가 진행되었으나 최근에는 기어 소음뿐만 아니라 모터 소음, 회전축의 어긋남에 의해 발생하는 진동, 하모닉 가진 성분과 소음 경로 공진의 연성에 의한 가진원을 증폭시키는 구조 소음(structure-borne noise), 브랏켓의 공진 등은 축, 베어링, 하우징에 의한 영향이 고려되어야 정확한 평가가 가능하다는 것이 최근의 실험논문에서 발표되고 있다.

본 논문에서는 산업용 로봇에서 발생하는 소음을 원인별로 규명하고 축, 베어링 등에 대한 소음 저감 대책을 강구한 후 전체 로봇 시스템의 소음/진동을 저감하는 것이 본 연구의 최종 목적이다. 이를 위하여 로봇 손목 부위에서 발생하는 소음을

여러 가지 실험적인 방법을 통해 측정하고 측정된 시간영역 혹은 주파수영역의 데이터로부터 기어, 축, 베어링, 브랏켓, 하우징 등의 소음원을 규명할 것이다. 이들 각 부품이 로봇 시스템의 전체 음압에 끼치는 영향을 차등화하여 각 부품이 발생시키는 소음의 주파수 범위와 크기를 정량적으로 평가할 것이며, 동시에 기어소음이 로봇의 부하변동 및 회전축의 속도에 따른 전체 음압에 끼치는 영향을 평가할 것이다. 그 다음 단계로 소음의 발생요인을 기어소음, 축계 소음, 구조 소음 등으로 분류하고 소음을 줄일 수 있는 대책을 강구할 것이다. 특히 축계 및 베어링의 강성, 하우징 등이 기어소음에 주는 영향에 대한 연구를 수행하여 구조 소음에 대한 공학적인 모델을 정립할 것이다. 정립한 모델을 이용하여 소음을 발생하는 각 영향 인자에 대한 파라미터 연구(parametric study)를 수행하여 소음발생 메커니즘의 원리를 규명하고 이를 바탕으로 로봇의 소음 저감 대책을 강구할 계획이다. 마지막으로 로봇의 요소품에 대한 동특성 변화를 이용한 소음/진동의 저감 방안을 강구하고 고효율의 저소음 로봇을 개발하기 위한 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 소음 측정

운전중인 로봇에 소음을 객관적으로 판단할 수 있는 데이터를 얻기 위해서는 먼저 로봇 주위의 압소음을 측정해야 하므로 로봇의 선회축을 기준으로 양방향 3m 간격, 로봇을 기준으로 6m 까지 압소음 측정하였다.

로봇의 소음측정은 소음 발생원과 각 성분에 기

* 한양대학교 공과대학 정밀기계공학과
E-mail : kwangyal@ihanyang.ac.kr
Tel : (031) 501-4590, Fax : (031) 501-4590

** 한양대학교 공과대학 기계정보경영공학부
*** 현대중공업 기계전기연구소

여도를 속도별, 하중별에 따라 고려 되어야 하므로 하중을 네 단계(0kg ~ 100kg)로 나누고 각 단계에서 속도를 여섯 단계(50% ~ 100%)로 나누어 일정한 하중에서 속도를 10%씩 증가시켜가며 측정 하였다. 소음 측정시 정속구간에서 측정을 해야 하나 로봇을 가감속이 포함된 등속구간을 1 사이클로 하는 운전구간의 소음을 측정하였다. 로봇의 자세 또한 소음발생 변수로 작용할 수 있으나 이번 실험에서는 소음이 가장 많이 발생하는 자세에서만 측정하였다. 로봇 소음을 측정하기 위해서 소음계(LARSON-DAVIS system 824)의 위치를 로봇을 기준으로 하여 정방향으로 3m 지점에 설치하였고 각 축에 따른 소음 발생 위치가 달라지므로 보다 더 정확한 측정을 위해 소음이 발생하는 축 높이에 따라 소음계의 위치를 조절하여 소음을 측정하였다. 측정된 소음은 BNC 케이블을 통해 노트북으로 전송하여 노트북에서 분석하고 저장하였다.

2.2 신호분석

신호분석은 일반적으로 알려지지 않은 어떤 가진 입력에 의한 시스템의 응답을 분석하여 동적 시스템의 거동을 예측하는 방법으로 이번 실험에서는 신호분석을 통해 로봇에서 발생하는 소음원을 규명하고, 자세별, 속도별, 하중별 소음 레벨을 비교 분석하여, 주 소음 발생 메커니즘을 추정하는 것이 목적이다.

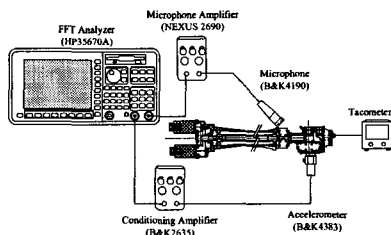


Fig 1. Experiment setup for the noise/vibration signal analysis of a robot arm

(1) Frequency analysis

로봇의 주파수 분석을 위해 각축에 특정한 자세에서 소음 측정과 동일한 방법과 조건으로 하중을 네 단계로 나누고 각 단계에서 속도를 여섯 단계로 나누어 하중과 속도의 영향을 고려하여 측정하였다. 마이크로폰(Cirrus Type MK224)의 위치는 각 축 운전시 소음이 가장 높게 발생하는 곳에 가능한 로봇에 근접하게 부착하였고 채집된 신호는 Preamplifier 를 통해 증폭이 되고 증폭된 신호는 BNC Cable 통해 FFT 에 전송되고 FFT 에서 분석하고 저장하였다. 로봇의 소음은 진동과

밀접한 관련이 있으므로 진동 신호를 같이 채집해야 한다. 진동 신호는 원칙적으로 하우징과 내부 구성품을 대해 동시에 측정이 되어야 하나, 회전축에 가속도계를 부착할 수 없고 Laser-sensor 도 로봇의 구조상 적용이 불가능하므로 외부 하우징에 부착하여 측정하였다.

(2) Order Tracking

주파수 분석 실험시 로봇을 정속구간에서 운전시켜 측정해야 하나 로봇을 정속으로 운전하기 불가능하기 때문에 일정한 사이클 동안 측정하였다. 그러나 이러한 방법으로는 관심구간에서 정확한 정보를 얻기가 쉽지 않기 때문에 보다 정밀한 신호를 얻기 위하여 측정하고 하는 특정 속도에서 신호를 채집하고 분석할 수 있는 실험기법인 order tracking 방법을 이용하였다. order tracking 실험을 하기 위해서 축에 대한 회전 속도가 필요하나 로봇의 구조상 축에서의 측정은 불가능하기 때문에 축 대신 제어기를 통해 모터에서 전달되는 속도를 측정하여 실험을 하였다. 제어기에서 신호를 검출할 때 연결 케이블 길이에 따라 심한 노이즈가 발생하므로 최대한 짧은 거리를 유지 하여 노이즈 영향을 최소화시켰다. 실험은 주파수 분석을 통해 소음이 가장 많이 발생되고 문제가 되는 5, 6 축에 대해서만 측정하였고, 실험 조건과 센서 부착위치는 주파수 분석 실험과 동일하게 실시 하였다.

2.3 시스템 분석

시스템 분석은 어떤 시스템의 고유한 특성을 알아내는 기법으로 측정 가능한 힘으로 가진 시키고 응답/입력의 비를 연구하는 방법이다, 대부분의 소음과 진동 문제들은 공진현상과 매우 밀접한 관계에 있고 이번 실험 대상인 로봇도 구조소음과 매우 밀접한 관계가 있으므로 기어에서 발생된 소음을 증폭시키는 부품을 규명하기 위해 가장 높은 소음이 발생하는 로봇의 5,6 축에 부품에 대한 동적 거동을 파악하는 하는 것이 목적이다.

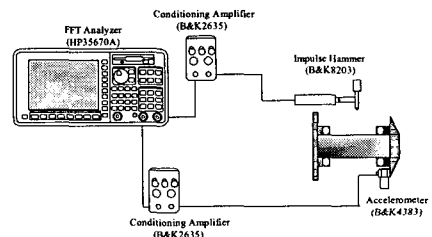


Fig 2. Experiment setup for the modal testing

(1) Modal testing

로봇을 구성하는 부품에 대한 고유한 특성을

파악하기 위해서는 로봇이 운전하고 있을 때 실험을 해야 하나 실제 로봇의 구조상 이러한 실험이 불가능하므로 관심이 되는 부분을 로봇에서 분리하여 실험을 하였다. 시스템을 가진하기 위해서 충격해머(B&K8202)와 shaker(B&K4808)를 이용하였고 shaker 로 가진 하기 위해서 스팅거를 제작하여 shaker 와 연결하고 스팅거 앞에 force sensor (B&K8202)를 부착하여 가진 하였다. 실험의 경계 조건은 free 와 fixed 두가지 경우에 대해서 다양한 실험을 하였다. 가진에 대한 응답 신호는 3 축 가속도계를 이용하여 각 방향에 대해 측정하였다.

3. 실험결과

3.1 소음측정

(1) 로봇 소음 측정 결과

Table 1. Measurement of robot noise (dBA)

	0kg	40kg	70kg	100kg
1 축	66	66	67	67
2 축	64	64	65	65
3 축	61	62	66	64
4 축	68	69	70	70
5 축	70	72	74	75
6 축	70	73	74	77

소음 측정결과 로봇 손목부(5 축, 6 축)에서 가장 큰 소음이 발생을 하고 또한 하중이 증가 할수록 로봇 손목부에 소음레벨이 증가하는 것을 알 수 있다. 하중이 증가 할수록 손목부에 소음이 증가하는 것은 하중을 지지하고 있는 부분이 손목 축이기 때문에 무부하 때보다 부하가 있을 때 5, 6 축을 구성하는 기어에 큰 하중이 걸리면서 소음이 증가 하는 것으로 추정할 수 있다. 소음 측정 결과로부터 로봇의 주 소음 발생 축이 손목축이라는 사실과 하중이 소음에 중요한 영향을 준다는 사실을 확인 할 수 있다. 실험실 주위의 암소음은 60dB 밑으로 로봇 소음 측정에 암소음의 영향은 없다

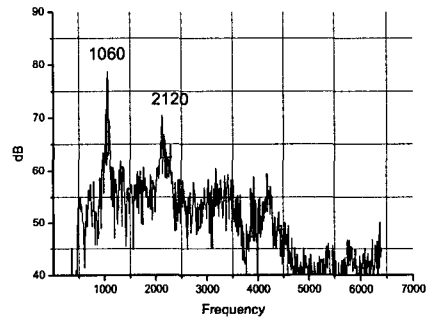
3.2 신호분석 결과

(1) Frequency analysis

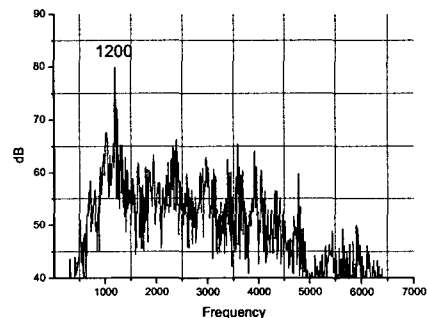
Table 2. Gear mesh frequency

	5 축		6 축	
	90%	100%	90%	100%
기어	GMF	GMF	GMF	GMF
Z1	3157	3551	2877	3236
Z2	3157	3551	2877	3236
Z3	1062	1195	672	759
Z4	1062	1195	672	759
Z5			1560	1755
Z6			1560	1755
Z7			1000	1125
Z8			1000	1125

표 2 는 5 축과 6 축에 대한 기어 번호와 주파수 분석을 하기 위해 필요한 기어 물림 주파수 정보를 나타내고 있다.

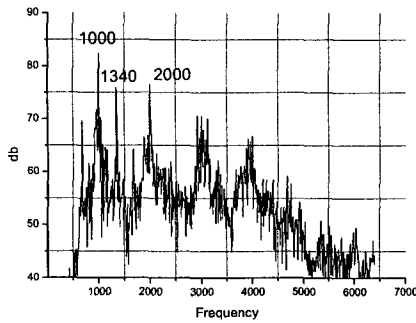


(a) Shaft rotation speed 90%

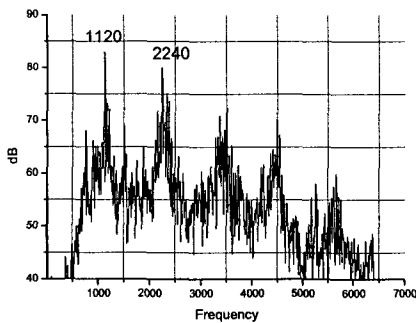


(b) Shaft rotation speed 100%

Fig 3. Frequency analysis according to speed of 5th-shaft



(a) Shaft rotation speed 90%

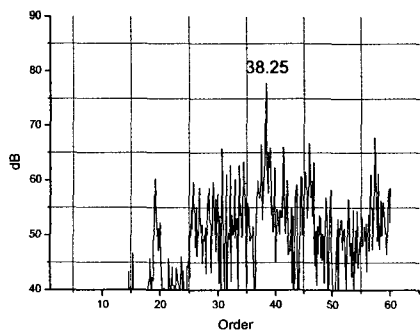


(b) Shaft rotation speed 100%

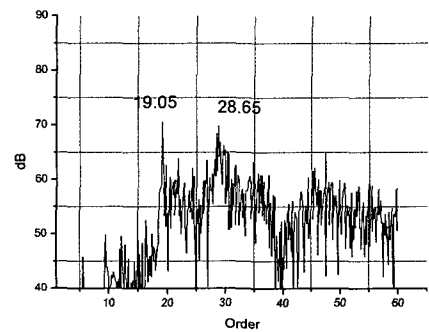
Fig 4. Frequency analysis according to speed of 6th-shaft

Fig 3 과 Fig4 는 각각 5 축과 6 축에 대해서 회전 속도가 90%, 100% 일 때 소음 스펙트럼을 나타낸다. 소음 스펙트럼 분석 결과 5 축은 3,4 번 기어 성분(GMF)과 일치하는 주파수가 높은 피크를 보이고 6 축은 7,8 번 기어 성분(GMF)과 일치하는 주파수가 높은 피크를 나타내고 있다. 위 주파수 분석 실험을 통해서 로봇에서 가장 큰 소음을 발생하는 손목부에 소음원은 기어임을 알 수 있다.

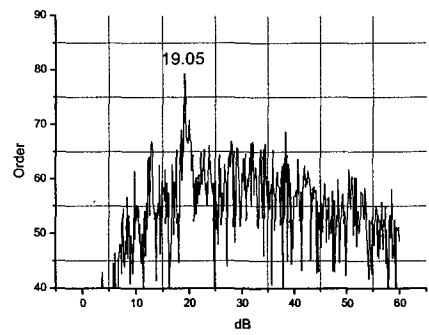
(2) Order tracking



(a) Shaft rotation speed 50%



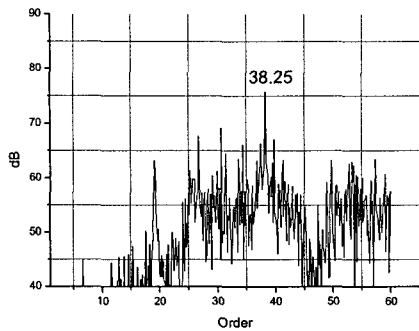
(b) Shaft rotation speed 75%



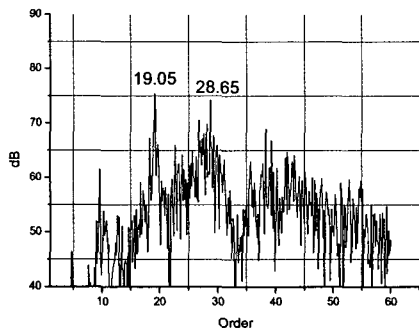
(c) Shaft rotation speed 100%

Fig 5. Order tracking according to speed of 5th-shaft

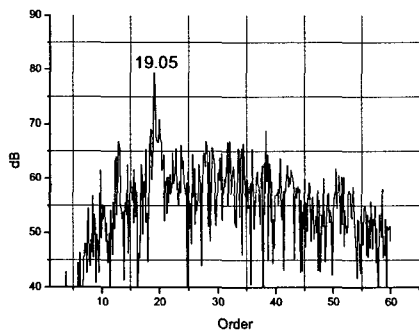
5 축에 대한 order tracking 데이터 분석 결과 회전 속도가 50%일 때는 38.25 차수 성분이 피크를 보이고, 회전속도가 75%로 증가하면서 28.65 차수 성분이 피크를 보이고, 속도가 100%로 증가 할 때는 19.05 차수가 높은 피크를 갖는 것을 볼 수가 있다. 특히 회전속도가 100% 일 때 가장 높은 소음을 방사 하는 것을 알 수 있다. 각 회전속도 대해 높은 소음을 나타내는 주파수 성분을 알기 위해 차수 성분을 주파수로 전환하면 ($\text{Hz} = \text{order} \cdot \text{rpm}$) 회전속도가 50%일 때 38.25 (1234Hz) 성분은 3,4 번 기어의 물림 주파수 2x(1200Hz) 성분과 일치하고 회전속도가 100%일 때 19.05(1229Hz)성분은 3,4 번 기어의 1x (1197Hz)성분임을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 로봇에서 발생하는 기어 소음 1200Hz 주파수 근처에서 발생하고, 특정한 주파수에서 소음이 크게 발생하고 있기 때문에 시스템 공진에 의해 소음이 증폭된다고 추정할 수 있다. 100%에서 가장 큰 소음이 방사하는 이유는 그 구간에서 문제 시 되는 기어 1x 성분과 공진 주파수가 일치하기 때문이다.



(a) Shaft rotation speed 50%



(b) shaft rotation speed 75%



(c) Shaft rotation speed 100%

Fig 6. Order tracking according to speed

6th-shaft

6 축 order tracking 데이터 분석 결과는 5 축 분석 결과와 비슷한 결과를 보이고 있다. 회전속도가 50%일 때는 38.25 차수 성분이 피크를 보이고, 회전속도가 75%로 증가하면서 28.65 차수 성분이 피크를 보이고, 속도가 100%로 증가 할 때는 19.05 차수가 높은 피크를 갖는 것을 볼 수가 있다. 6축도 5축과 마찬가지로 소음이 높게 발생하는 차수 성분을 주파수 성분으로 전환하면 38.25(1250Hz) 성분은 7,8 번 기어의 물림 주파수 2x(1244Hz)성분과 일

치하고 19.05(1120Hz) 성분은 7,8 번 기어의 1x(1194Hz)성분임을 알 수 있다. 위 실험 결과로부터 6 축도 1200Hz 근방에서 시스템 공진에 의해 기어 소음이 발생하는 것을 알 수 있다.

3.3 시스템 분석 결과

(1) 5 축

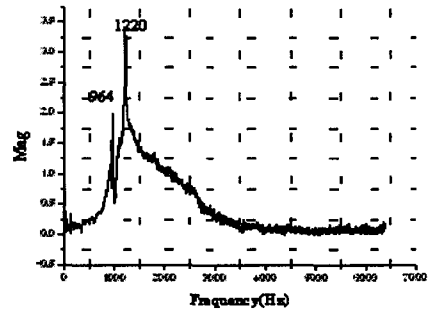


Fig 7. Modal testing for 5th-shaft

5 축 축방향에 대한 고유 진동수 측정 결과 1220Hz 부근에서 존재하는 것을 알 수 있고 이 주파수는 5 축 신호분석을 통해 신호를 증폭하는 주파수 범위와 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 이 축은 소음의 크기가 높은 기어와 같이 연결이 되어 있는 부분이다. 따라서 5 축에 대한 소음은 축계 시스템 공진에 의해 발생한다.

(2) 6 축

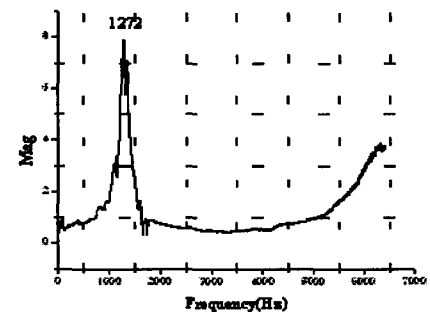


Fig 8. Modal testing for 6th-shaft

6 축 축방향에 대한 고유 진동수 측정 결과 1272Hz 부근에서 존재하는 것을 알 수가 있고 이 주파수는 6 축 신호분석을 통해 신호를 증폭하는 주파수 범위와 일치하는 것을 알 수 있다. 그리고 이 축은 소음의 크기가 높은 7, 8 번 기어와 같이 연결이 되어있는 부분이다. 따라서 6 축소음도 축계 시스템 공진에 의해 발생한다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실험적 방법을 이용하여 산업용 로봇에서 발생하는 소음을 원인별로 규명하고, 저감하는 것을 목적으로 신호분석 실험과 시스템 분석 실험을 실시 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론은 도출할 수 있다.

- (1) 산업용로봇은 동력전달계가 복잡한 손목 5,6 축에서 주로 소음이 발생하며, 부하가 증가할수록 로봇의 손목축을 구성하는 기어에 하중이 가해져 소음 레벨이 무부하로 운전할 때 보다 5dB~7dB 정도 증가 한다.
- (2) 5,6 축에서 발생하는 소음은 베어링, 스프링으로 구성된 축계 시스템의 공진과 동력전달계의 수단이 되는 기어 물림 주파수와 일치하여 기어 물림 주파수 1x 와 2x 성분이 높은 소음을 발생시킨다는 것을 알 수 있다.
- (3) 산업용 로봇의 소음과 진동을 저감하기 위해서는 문제시 되는 기어 물림주파수 성분과 축계 시스템에 대해 고유 진동수를 피할 수 있도록 설계 해야 한다.
- (4) 설계 개선 방향으로 기어의 잇수를 변경하여 가진 성분을 낮추는 방법과 베어링이나 스프링 등 시스템을 구성하는 부품에 대해 축방향 강성을 증가 시켜 시스템에 고유 진동수를 증가시키는 방법이 있다.

후 기

이 연구는 현대 중공업 산학협력 과제로 수행되었음

참고문헌

- (1) Özgüven, H. N. and Houser, D.R., 1988, "Mathematica Models Used in Gear Dynamics-A Review," Journal of Sound and vibration, Vol. 121, No.3, pp. 383 ~ 411.
- (2) 박찬일, 이장무, 1996, "치형오차를 가진 헬리컬 기어의 진동특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A) 제 20 권 제 5 호, pp.1534~1542.
- (3) Park, c.I and Lee, J.M. 1996, "Vibration Transmission Characteristics of Helical Gear System with Lead Error," ASME International Mechanical Engineering Congress, Georgia, Atlanta USA, pp. 109~116.
- (4) 박찬일, Karl Grosh, 1998, "축방향력에 의한 축 플레이트계의 방사 소음," 한국소음진동학회지 제 8 권 제 5 호, pp. 908~913
- (5) 최창완, 임상규, 1999, "자동차 조향 유압 시스템의 주파수분석 및 음향인텐시티 측정을 통한 소음원 분석에 관한 연구," 한국소음진동공학회지 제 9 권 제 4 호, pp. 761~768

- (6) K. W. NGAI, C. F NG. 2001. "Structure-borne Noise and Vibration of Concrete Box Structure and Rail Viaduct," Journal of Sound and Vibration, Vol. 255, No. 2, pp. 281-297