

# 교량검사 굴절로봇 작업붐의 진동제어

## Vibration Control of Working Booms on Articulated Bridge Inspection Robots

황 인 호† 이 후 석\* 이 중 세\*\*

Hwang, Inho Lee, Hu-Seok Lee, Jong-Seh

(논문접수일 : 2008년 2월 13일 ; 심사종료일 : 2008년 9월 30일)

### 요 지

BIRDI(Bridge Inspection Robot Development Interface)에서 현재 개발된 첨단굴절로봇차는 기존의 굴절차에 비해 소형이며, 12m에 이르는 작업붐으로 인해 교량의 진동, 풍하중 등에 의해 쉽게 진동이 발생할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 첨단굴절로봇차의 머신비전 시스템을 통한 점검 성능 확보를 위해 작업붐에 액츄에이터를 장착하여 유해 진동을 제어할 수 있는 시스템을 제안하였으며, 성능 평가를 위해 수치적, 실험적 연구를 수행하였다. 제안된 제어시스템의 수치적 연구를 위해 현재 제작된 작업붐의 제원을 이용하여 모델링하였고, 적당한 주파수 특성을 가진 하중을 가정하였으며, 최적 제어이론인 LQ 조정기를 설계하였다. 수치해석 결과, 제안된 제어시스템은 작업붐에 발생하는 유해 진동을 저감시킬 수 있었다. 실험적 연구를 위해 작업붐의 축소 모형을 제작하였고 제어시스템을 구축하였다. 또한 실험결과 작업붐의 진동을 짧은 시간에 제어하는 우수한 성능을 보였다. 본 연구를 통해 제안된 시스템의 진동제어 성능을 입증하였으며, 실제 첨단굴절로봇차에 적용될 경우 점검 시스템의 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

**핵심용어** : 첨단굴절로봇차, 작업붐, 진동제어, 머신비전시스템

### Abstract

A robot crane truck is developed by the Bridge Inspection Robot Development Interface(BRIDDI) for an automated and/or teleoperated bridge inspection. This crane truck looks similar to the conventional bucket crane, but is much smaller in size and light-weight. At the end of the telescoping boom which is 12m long, a robot platform is mounted which allows the operator to scan the bridge structure under the deck trough the camera. Boom vibration induced by wind and deck movement can cause serious problems in this scanning system. This paper presents a control system to mitigate such vibration of the robot boom. In the proposed control system, an actuator is installed at the end of the working boom. This control system is studied using a mathematical model analysis with LQ control algorithm and a scaled model test in the laboratory. The study indicates that the proposed system is efficient for the vibration control of the robot booms, thereby demonstrating its immediate applicability in the field.

**Keywords** : *advaneced crane truck, working boom, vibration control, machine vision system*

## 1. 서 론

사회기반시설물의 유지관리는 "시설물의 안전관리에 관한 특별법"을 근거로 "시설물안전점검 및 정밀안전진단 세부지침"에 의해 시행되고 있다. 관련규정에서는 상태평가를 위한 외관조사의 수준을 각 점검의 종류에 따라 규정하고 있으며, 정기점검의 경우 육안 및 망원경, 보조기구 등을 이용하여

도보로 접근이 가능한 시설물의 전반적인 외관 상태를 조사한다. 정밀점검의 경우 비교적 정밀한 육안검사와 간단한 측정기구, 점검차 등을 이용하여 점검하도록 하고 있다. 이러한 점검 작업은 점검자의 접근이 가능한 일부구간에서만 한정적으로 수행되고 있으며, 점검자의 주관에 포함되므로 획득된 자료의 객관성과 신뢰성이 부족하다는 문제점이 있다.

이를 극복하기 위해 검사로봇을 이용한 자동화 시스템 개

† 책임저자, 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사 후 연구원

Tel: 031-416-7201 ; Fax: 031-400-4103

E-mail: hinho@hanyang.ac.kr

\* 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

말에 대한 관심이 날로 증대되고 있으며 다양한 건설 분야 로봇이 개발되고 있다. 건설 분야의 자동화 검사로봇 시스템에 대한 연구는 1980년대 Skibniewski(1988) 등의 연구자에 의해 시작되었으며, 1996년 Vanderbilt대학교의 인공지능연구실(Intelligent Robotics Laboratory)에서는 Robotic Inspector(ROBIN)를 개발하여 구조물의 유지관리에 이용하고자 하였으며(Pack 등, 1996), North Carolina대학교의 건설자동화 및 로봇 연구실(Construction Automation and Robotics Laboratory)에서는 4-자유도 로봇이 Peeper 크레인 트럭의 말단에 장착되어 교량의 보와 트러스의 페인트 제거 작업을 하는 Robotic Bridge Management System(RBMS)을 개발하였다(Lorenc 등, 2000). 국내의 교량검사 로봇 개발 연구단(Bridge Inspection Robot Development Interface: BIRDI)에서는 교량의 정기점검 및 정밀점검을 자동화하여 객관적이고 신뢰성이 높은 데이터를 획득하고 통합할 수 있는 첨단굴절로봇차를 개발 중에 있다(Lee 등, 2007).

첨단굴절로봇차는 비전시스템과 로봇플랫폼을 12m의 작업부에 장착하여 교량의 하부를 점검하는 특수차량으로 점검시 발생하는 작업부의 유해진동은 교량 하부 점검 결과의 신뢰성에 막대한 영향을 미친다. 이에 현재 개발 중인 첨단굴절로봇차는 이를 해결하기 위해 카메라의 초점 조절과 로봇플랫폼의 연직방향 이동 메커니즘을 통하여 해결하고 있으나 근본적으로는 작업부의 진동 제어가 요구된다.

본 논문에서는 작업부에 액츄에이터를 장착하여 기존의 설계를 최소한으로 변경시키고 발생하는 진동을 제어할 수 있는 시스템을 제안하였다. 로봇플랫폼의 반대편 끝단에 작업부의 진동 응답에 따라 제어력을 공급하여 진동제어가 가능한 액츄에이터를 장착한 시스템을 모델링하고, 상태공간방정식을 이용하여 시스템 행렬을 구하였다. 제안된 시스템의 제어성능 평가를 위해 수치해석과 축소모형 실험을 수행하여, 기존의 작업부와 진동 저감 효과를 비교하였다.

## 2. 작업부의 진동제어 시스템

현재 개발된 첨단굴절로봇차(그림 1)는 기존의 굴절차에 비해 소형으로 4관절 붐과 작업부의 말단부분에 장착된 로봇플랫폼 및 고성능 카메라로 구성되어 점검자를 대신하여 교량의 상태를 점검한다. 하부의 작업부의 길이는 최대 12m이고, 3단으로 길이 조절이 가능하며, 약 30kg의 로봇 플랫폼 및 카메라를 말단에 장착할 수 있다. 작업부는 정적 처짐이 약 15cm이내에 발생하도록 설계되어 있으나, 바람, 교량진동 등에 의한 작업부의 진동을 제어하기 위한 장치가 설계되어 있지 않다.

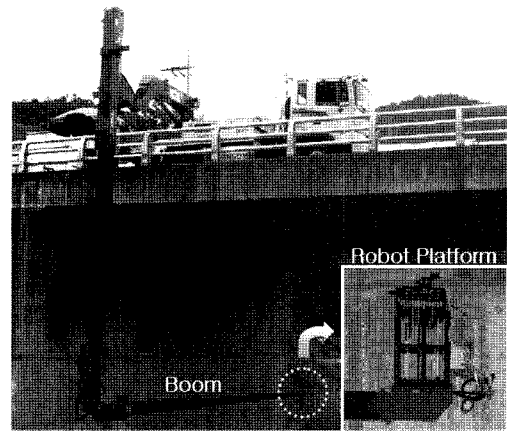


그림 1 첨단굴절로봇차

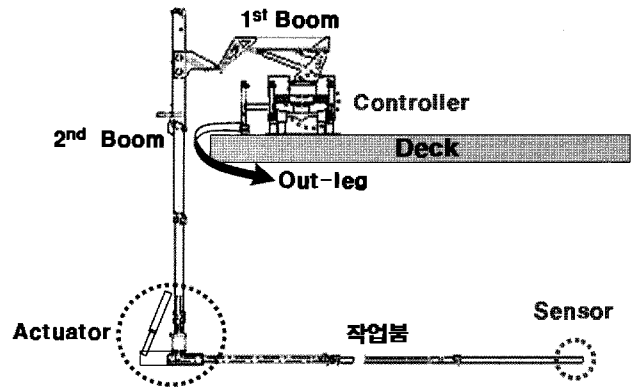


그림 2 첨단굴절로봇차 작업부의 진동제어 시스템

작업부의 진동은 비전시스템의 성능을 저하시켜 blur 현상이 발생하여 교량의 균열검출에 지장을 초래할 수 있다. 이를 해결하기 위하여 첨단굴절로봇차는 로봇플랫폼의 위치 제어시스템과 카메라의 Auto-focusing을 기능을 가지고 있으나, 작업부의 진동을 근본적으로 제어하지는 못한다. 이에 본 연구에서는 그림 2와 같이 로봇플랫폼이 장착된 작업부 끝단에 가속도 센서를 설치하고, 반대편 끝단에 액츄에이터를 장착하여 작업 중에 발생하는 진동을 저감할 수 있는 제어시스템을 제안하였다. 제안된 제어시스템은 센서를 통해 붐에 발생하는 가속도를 측정하고 컨트롤러에 신호를 입력시켜 제어 알고리즘을 이용하여 적절한 제어력을 결정한 후 액츄에이터를 통하여 제어력을 전해 작업부에 발생하는 진동을 제어하는 feedback 제어 시스템이다.

첨단굴절로봇차는 out-leg에 의해 교량 상판에 고정되어 있으며, 첫 번째와 두 번째 붐은 작업부에 비해 상대적으로 높은 강성을 가진다(그림 2). 이에 본 연구에서는 첨단굴절로봇차와 교량 상판 그리고 첫 번째·두 번째 붐이 일체 거동하여 그림 3과 같이 작업부의 두 번째 붐과 연결부분을 힌지로 가정하였다. 진동 제어시스템의 구성하기 위한 작업부

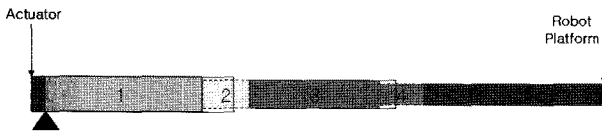


그림 3 작업부의 모델링

표 1 첨단굴절로봇차 붐의 단면제원

단면	길이(m)	단면적(m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트(m <sup>4</sup> )
0	0.3	4.952×10 <sup>-3</sup>	5.44259×10 <sup>-5</sup>
1	3.555	4.952×10 <sup>-3</sup>	5.44259×10 <sup>-5</sup>
2	1.035	7.844×10 <sup>-3</sup>	7.64088×10 <sup>-5</sup>
3	2.845	2.982×10 <sup>-3</sup>	2.19829×10 <sup>-5</sup>
4	0.99	4.587×10 <sup>-3</sup>	3.096325×10 <sup>-5</sup>
5	3.98	1.695×10 <sup>-3</sup>	8.98035×10 <sup>-6</sup>

은 현재 개발된 첨단굴절로봇차의 제원을 적용하고 진동에 가장 취약한 붐의 최장 구간을 고려하여 그림 3과 같이 5개의 단면을 가지도록 가정하여 모델링하였다(그림 3). 탄성계수 204GPa, 밀도  $\rho=7700\text{kg/m}^3$ 이고, 각 단면의 제원은 표 1과 같다.

작업부의 동적 거동은 다음과 같은 행렬 운동방정식으로 표현된다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Af - M1\ddot{x}_b \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 작업부의 질량행렬,  $C$ 는 작업부의 감쇠행렬,  $K$ 는 작업부의 강성행렬,  $x=[x_n \ \theta_n]$ 으로  $n$ 은 붐의 각 절점을 나타낸다.  $A=[1 \ 0]$ 로서 액츄에이터의 위치벡터를 나타내고,  $f$ 는 액츄에이터에 의한 제어력을 나타내며,  $\ddot{x}_b$ 은 외부하중에 의해 발생하는 교량의 절대 가속도를 나타낸다.

Euler-Bernoulli의 빔 이론을 적용하여 붐의 질량 행렬과 강성행렬을 구성하였으며, 이 때 필요한 경계조건으로 첨단 굴절로봇차와 작업부의 연결부분의 변위를 고정시키고 회전만 허용하여 액츄에이터와 작업부의 연결부분은 회전을 고정시키고 변위만 허용하였다. 또한, 제어를 위해 작업부의 감쇠 계를 가정하여야 하는데, 이를 위해 모드감쇠를 기초로 모드 감쇠율을 5% 가정하여 다음과 같이 감쇠행렬을 구성하였다.

$$C = \Phi^T \begin{bmatrix} 2\zeta_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\zeta_n\omega_n \end{bmatrix} \Phi^{-1} \quad (2)$$

여기서,  $\Phi$ 는 모드행렬이고,  $\omega_i$ 와  $\zeta_i$ 는 각각  $i$ 번째 모드의 고유 진동수(rad/sec)와 모드 감쇠율이다.

위의 식 (1)을 선형 상태공간방정식으로 유도하면 다음과 같다.

$$\dot{q} = Aq + Bf + E\ddot{x}_b \quad (3)$$

$$z = Cq + Df$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}A \end{bmatrix},$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M\Lambda \end{bmatrix}, \quad q = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} x \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

본 논문에서 제안된 제어시스템은 최적 feedback 제어 이론으로 LQ 조정기로 설계하였다. LQ 조정기의 2차 가격 함수  $J$ 는 LTI시스템(Linear Time Invariant System: 선형 시 불변시스템)으로 주어지는 상태 공간 모델을 통하여 식 (5)와 같이 얻어지며,

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + f^T R f) dt = J_1 + J_2 \quad (5)$$

LQ 조정기에서의 상태 피드백 제어법칙  $f$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$f = -Kx = -R^{-1}B^T P x \quad (6)$$

따라서 최소화 이득 행렬  $K$ 는 다음과 같이 되며,

$$K = R^{-1}B^T P \quad (7)$$

식 (8)의 대수 리카치 방정식(algebraic Riccati equation)을 풀이함으로써 해를 얻을 수 있다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

상태 가중 행렬  $Q$ 와 제어 가중 행렬  $R$ 을 시행착오를 통하여 적절히 선택하여 LQ 조정기의 성능과 제어 효과를 최적의 값으로 결정하였다.

### 3. 수치해석에 의한 제어성능 평가

작업부에 발생하는 진동은 차량 통행으로 인한 교량의 진동과 작업 중에 작용하는 풍하중 및 작업부의 작동에 따른 붐의 진동 등에 영향 받을 것으로 예상된다. 본 논문에서는 작업부의 진동원인들을 가정하여 가상의 분포하중을 만들어 수치해석을 수행하였다.

차량 운행 및 바람 등으로 교량에 동적변위 발생 시 교량 위에서 운행되는 첨단굴절로봇차는 교량과 일치하는 동적변위를 일으키게 된다. 이 때 발생하게 되는 변위의 주파수 영역대는 교량의 특성상 10Hz이하의 저주파수 영역대이다. 특히, 일반적인 교량의 고유진동수는 3~5Hz이며, 이의 영향으로 진동이 발생할 때 가장 큰 변위량을 보이므로(안상섭

등, 2002), 3~5Hz의 진동이 발생하는 분포하중을 가정하였다(그림 4).

또한, 모델링한 작업부의 고유치 해석을 통하여 작업부의 저차모드가 발생될 수 있는 0.1~3Hz의 진동이 발생하는 분포하중을 가정하였다(그림 5). 가정한 하중의 크기는 제어를 하지 않을 때 붐이 최대 30cm이상의 진폭이 발생되도록 하였으며, 이는 작업부에 장착된 머신비전시스템의 측정 성능을 고려하여 결정되었다.

수치해석을 통해 제안된 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 작업부에 제어시스템이 적용되지 않은 경우(Uncontrol)와 적용된 경우(Control)에 대하여 위에서 가정한 두 가지 하중(Case I, II)을 가하였을 때 발생하는 진동의 변위와 가속도를 비교·분석하였다.

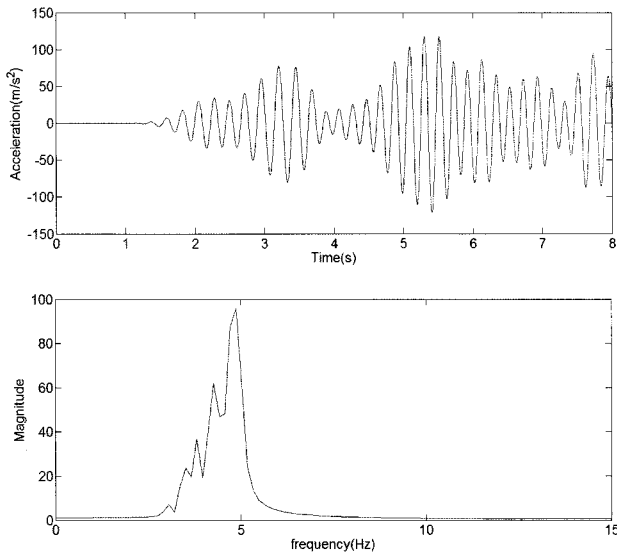


그림 4 가진하중 및 FFT(3~5Hz), Case I

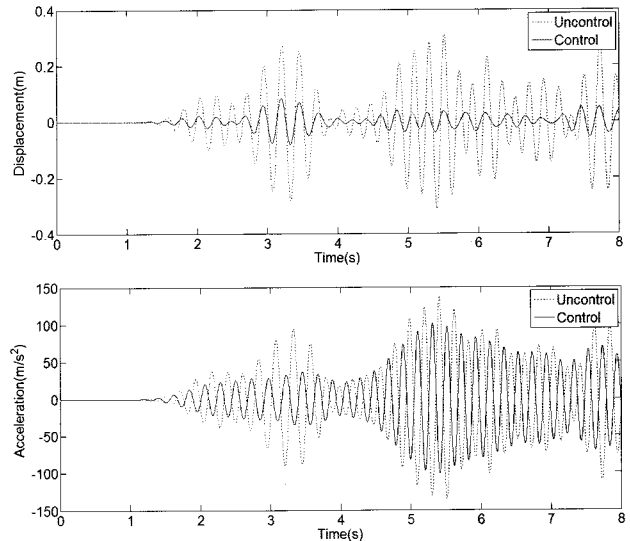


그림 6 3~5Hz 하중에서 작업부의 변위와 가속도(Case I)

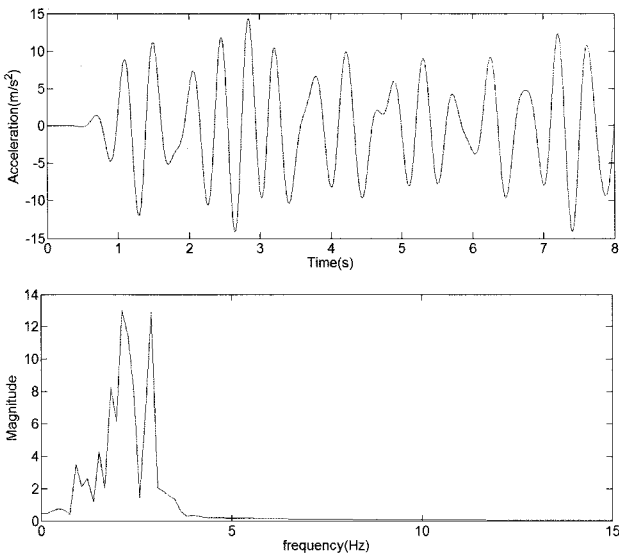


그림 5 가진하중 및 FFT(0.1~3Hz), Case II

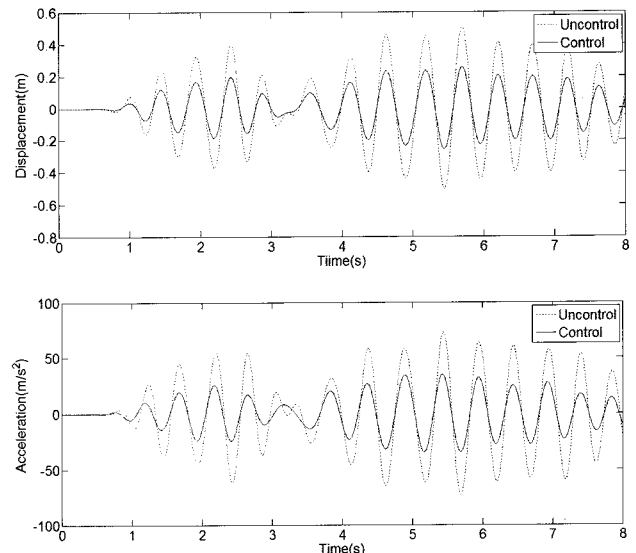


그림 7 0.1~3Hz 하중에서 작업부의 변위와 가속도(Case II)

그림 6과 7은 각각의 하중(Case I, II)을 가해 작업물에 발생하는 변위와 가속도를 그린 그래프이다. 그림에서와 같이 제안된 시스템은 기존 시스템 보다 최대진폭은 50~73%, 최대 가속도는 26~52%의 저감 효과를 보여 효과적으로 작업물의 진동을 제어할 수 있음을 보였으나, 필요한 제어력이 각각 11500kN, 1355kN으로 실제 적용하기 다소 높은 액츄에이터의 용량이 요구된다.

위의 해석 결과 제어력이 가해지는 액츄에이터의 위치가 작업물의 회전을 위한 힌지와 너무 근접하여 설계되어 있어 과도한 제어력이 요구된다. 이에 기존의 설계를 최소한으로 변경 하는 범위에서 작업물의 길이를 증가시켜 액츄에이터의 위치를 100cm로 변경시켰다. 그림 8과 9는 액츄에이터의 위치를 100cm로 변경 시킨 시스템에 각각의 하중(Case I, II)을

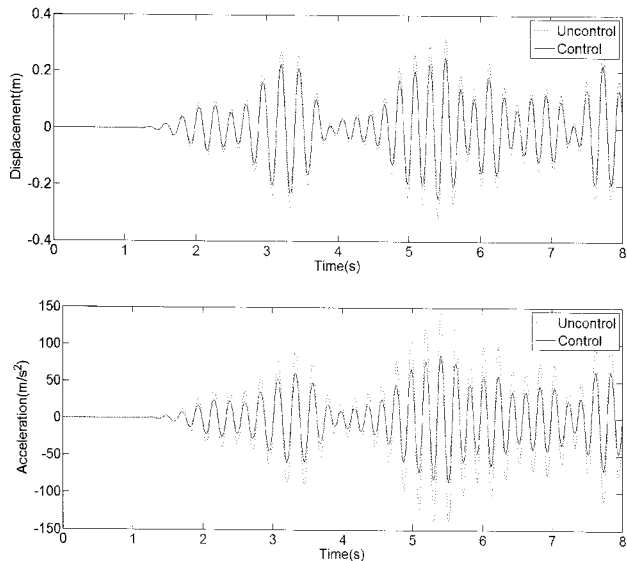


그림 8 3~5Hz 하중에서 작업물의 변위와 가속도(Case I)

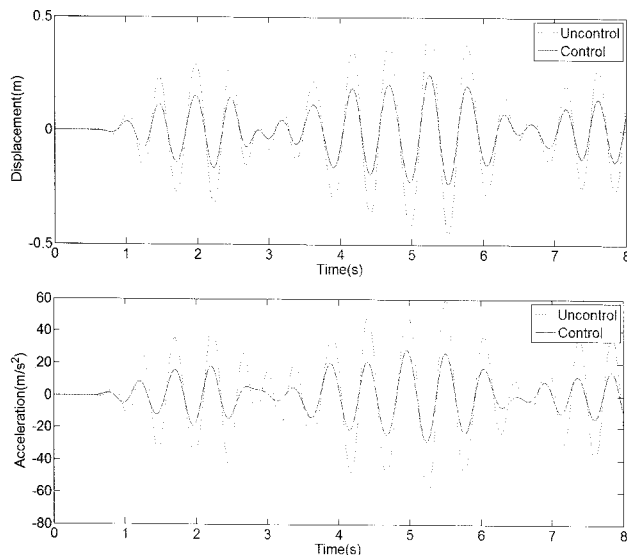


그림 9 0.1~3Hz 하중에서 작업물의 변위와 가속도(Case II)

가했을 때의 해석 결과이다. 최대 진폭의 경우 각각의 하중에 대하여 Case I은 316.5mm에서 250mm로 약 21%, Case II는 473mm에서 246.3mm로 약 48%감소하였다. 또한 최대 가속도는 143.5m/s<sup>2</sup>에서 86m/s<sup>2</sup>로 약 40%, 60.5m/s<sup>2</sup>에서 28.6m/s<sup>2</sup>로 약 52%감소됨을 보였다. 그리고, 필요한 제어력은 각각 275kN, 134.4kN으로 적절한 액츄에이터의 용량을 보였다.

수치해석의 결과 제안된 시스템은 작업물에 생기는 진동을 효과적으로 제어하였으며, 액츄에이터가 장착될 작업물의 길이를 적절히 변경하여 첨단굴절로봇차에 실제 적용함이 가능할 것으로 사료된다. 비록 본 연구에서는 고려되지 않았으나, 작업물의 길이 변화가 어려울 경우 counterweight를 두면 적절한 제어력을 선정할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 작업물의 진동 제어를 위한 축소모형실험

수치해석을 통하여 나타난 제안된 시스템의 제어 성능을 검증하기 위하여 그림 10과 같이 1/8 축소 모형을 제작하여 진동 제어 실험을 실시하였다. 제작된 축소모형의 작업물은 POM(polyacetal)을 사용하였으며 길이는 1.5m이고 액츄에이터는 힌지로부터 0.2m위치에 장착하였다. 실험에 사용된 작업물의 고유진동수는 2.8Hz이고 감쇠율은 1.4%이다.

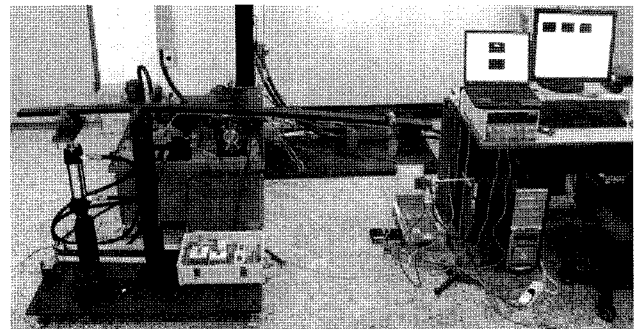


그림 10 축소모형 실험

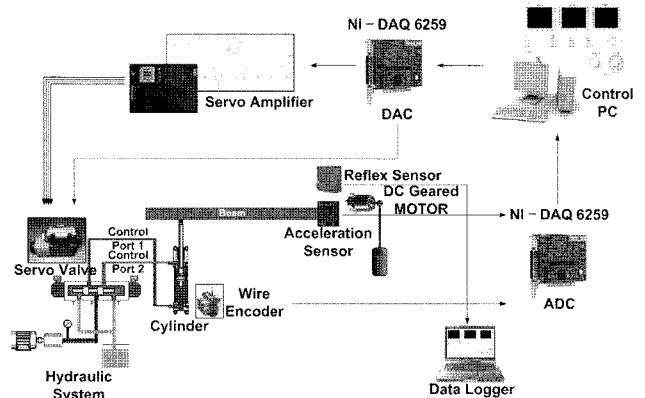


그림 11 시스템 구성도

표 2 실험장치의 구성

Hydraulic System	유압 펌프, 유압 모터, 유압 탱크, 필터, 체크 밸브, ACC, 실린더
IPC	수직제어 시스템 제어기, 알고리즘 수행, Wire Encoder signals 처리/위치 지령
Interface	DAQ Card(ADC, DAC)
Servo Amplifier	유압 서보밸브를 제어하기 위한 제어보드
Power Supply	유압 모터(단상 220V), Servo Amp(24VDC)
Wire Encoder	Position Sensing(range : 1250mm)
Acceleration Sensor	Acceleration Sensing(frequency response : 10 kHz / sensitivity : 167mV/g)
Reflex Sensor	Displacement Sensing(range : 660mm)
Working Boom	POM(Young's modulus : 26.4 ~ 28.8×10 <sup>3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
DC Geared MOTOR	Speed : 397.9rpm / Toque : 448.56mNm) / Gear(24 : 1)

그림 11에서와 같이 유압장치는 유압탱크, 유압펌프 유압 모터를 하나로 구성한 유압유닛 그리고 이물질 제거용 필터와 냉각기, 제어 밸브인 서보밸브로 구성하였으며, 액추에이터는 단축 실린더로 설계하였고, rod 길이는 ±50mm로 제작하였다. 제어기는 PC기반의 제어시스템으로 구성하였으며 Data Logger를 위해 AD/DA변환이 가능한 NI DAQ 6259를 사용하였다. 액추에이터의 위치를 Sensing하기 위하여 Absolute Encoder Type의 Wire Sensor와 가속도를 Sensing하기 위하여 서보 타입의 가속도계를 사용하였다. 또한, 작업부 말단부분에서 발생하는 변위를 측정하기 위해 Reflex Type의 Laser Sensor를 사용하였다. 각 센서로부터 측정된 변위와 가속도 정보는 NI DAQ 6259로 입력되고 AD/DA 변환되어 제어 PC에서 제어 알고리즘을 통해 제어력을 산정하게 된다.

이렇게 산정된 제어력은 액추에이터를 작동시키기 위해 NI DAQ 6259에서 DA/AD변환하여 servo amplifier로 출력하게 되고, servo valve의 개폐를 조절하여 작업부에 발생하는 진동을 제어하게 된다. 여기서, 작업부에 진동을 유발시키기 위한 장치로 작업부의 말단으로부터 10cm 떨어진 부분에 DC Geared Motor를 설치하였다. 실험에 사용된 장치의 구성은 표 2와 같다.

진동제어를 위한 축소모형 실험은 제어시스템이 적용되었을 경우(Control)와 적용되지 않았을 경우(Uncontrol)를 비교하였으며, 자유진동과 강제진동에 대하여 발생하는 진동의 변위와 가속도를 각각 측정하였다. 자유진동의 경우 초기 변위를 10cm설정하여 실험을 실시하였고, 강제진동의 경우 수치해석상 가정한 하중을 고려하여 80g의 질량체를 각각 130rpm(case I)과 200rpm(Case II)의 속도로 회전운동을 발생시켜 실험을 실시하였다.

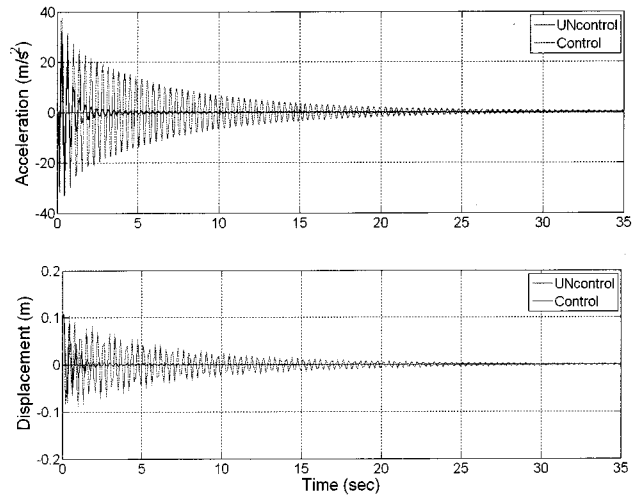


그림 12 자유진동에서 축소모형실험 결과(가속도, 변위)

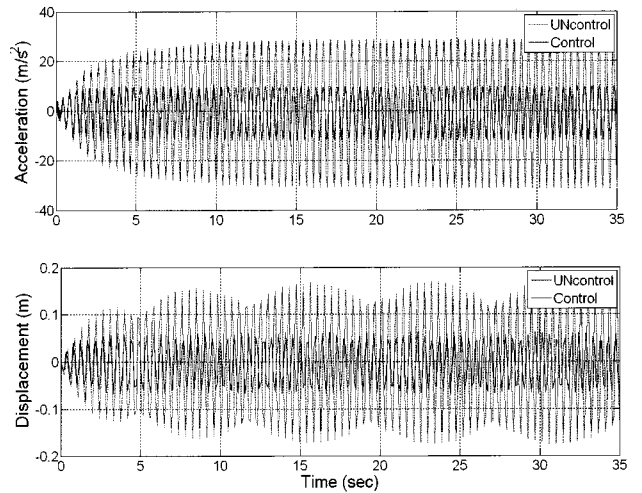


그림 13 Case I 하중에서 축소모형 실험결과(가속도, 변위)

실험결과 자유진동과 강제진동 모두 제안된 시스템이 적용된 경우 효과적으로 작업부의 진동을 저감할 수 있음을 보였다. 먼저 그림 12는 초기변위를 10cm로 설정한 자유진동의 가속도와 변위 결과이다. 그림에서와 같이 제안된 시스템은 5초 이내의 빠른 시간 안에 작업부에 발생하는 진동을 저감할 수 있음을 보였다.

그림 13은 하중(Case I)을 가해 작업부에 발생하는 변위와 가속도를 그린 그래프이다. 그림에서와 같이 제안된 시스템은 기존 시스템에 비해 최대 가속도는 63%, 최대 진폭은 62%의 저감 효과를 보여 효과적으로 작업부의 진동을 제어할 수 있음을 보였다.

그림 14는 하중(Case II)을 가해 작업부에 발생하는 변위와 가속도를 그린 그래프이다. 그림에서와 같이 제안된 시스템은 기존 시스템에 비해 최대 가속도는 52%, 최대 진폭은 74%의 저감 효과를 보여 효과적으로 작업부의 진동을 제어할 수 있음을 보였다.

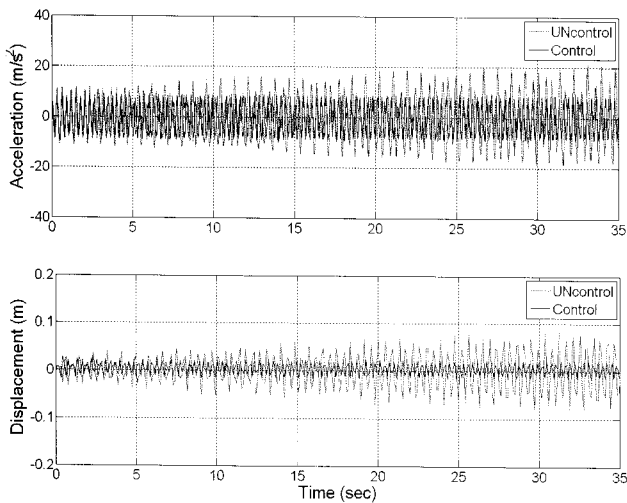


그림 14 Case II 하중에서 축소모형 실험결과(가속도, 변위)

모형실험 수행결과 제안된 제어시스템은 수치해석에서 가정한 각각의 하중(Case I, Case II)에 대해서 뛰어난 제어 성능을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 시스템을 현재 제작되어진 첨단굴절로봇차의 작업부에 적용시킬 경우 발생하는 진동을 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 첨단굴절로봇차의 교량검사 작업부에 발생하는 진동을 제어하기 위한 시스템을 제안하였으며, 성능 평가를 위해 수치적, 실험적 연구를 수행하였다. 제안된 시스템의 수치적 연구는 현재 개발된 첨단굴절로봇차의 제원을 적용한 모델링을 바탕으로 일반적인 교량의 고유진동수를 가지는 하중을 가정하여 최적 제어 이론인 LQ 알고리즘을 적용하여 해석하였다. 성능 검증을 위해 축소모형을 제작하여 실험적 연구를 병행하였다. 수치해석 결과 본 연구에서 제안한

시스템이 작업부 말단에 발생하는 최대 변위와 최대 가속도를 각각 21~48%, 40~52%의 저감됨을 보였다. 또한, DC모터로 5Hz이하의 진동을 발생시켜 축소모형 실험을 한 결과 최대 변위는 62%~74%, 최대 가속도는 52%~63% 정도 저감시킬 수 있음을 확인하였다. 이상의 수치적, 실험적 연구 결과로부터 제안된 시스템이 현재 개발된 첨단굴절로봇차에 적용될 경우 작업부에 발생하는 진동을 짧은 시간 안에 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 사료되며, 점점 시스템의 성능 향상도 기대된다.

### 참 고 문 헌

안상섭, 이일근 (2002) 교량 휨진동 방지 장치의 개발 및 실용화 연구, 연구보고서, 한국도로공사 도로교통기술원.

Kwon, Y.W., Bang, H. (2000) *The Finite Element Method Using MATLAB*, CRC Press, Boca Raton, p.518.

Lee, J.S., Hwang, I., Lee, H.S. (2007) Development of Advanced Robot System for Bridge Inspection and Monitoring, *IABSE REPORT*, 93, pp.248~249.

Lorenc, S.J., Handlon, B.E., Bernold L.E. (2000) Development of a Robotic Bridge Maintenance System, *Automation in Construction*, 9, pp.251~258.

Nicolas Rizet, Michel Brissaud, Paul Gonnard (1999) Modal control of beam flexural vibration, *J. Acoust. Soc. Am.*, 107, pp.2061~2067.

Pack, R.T., Iskarous, M.Z., Kawamura, K. (1996) Climber Robot, US patent No. 5551525.

Skibniewski, M.J. (1988) *Robotics in Civil Engineering*, Computational Mechanics Publications, New York, p.233.