

# 고하중 이송 멀티 체인 호이스트 서버 시스템 개발

## Development of Multi-Axes Chain Hoist Servo Systems for Lifting Heavy Loads

박재환, 권오홍

한국생산기술연구원 휴먼문화융합연구그룹(CT융합연구센터)

Jaehwan Park(jaehwanv@kitech.re.kr), Ohung Kwon(ohung@kitech.re.kr)

### 요약

공연장의 거대한 무대 세트나 장치에 움직임이 부여되면, 다양한 극적 효과를 연출할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 프로그래밍 가능한 다축 체인 호이스트 서버 시스템은 이러한 연출의 자동화를 가능하게 한다. 본 시스템에는 PTP 기반의 임의 궤적 생성 방법, 다축 실시간 통신 제어 방법, 그리고 4 단계의 순차적인 안전 진단 알고리즘이 적용 되었으며, 호이스트들은 콘솔의 동기 제어에 의하여 시나리오의 연출 순서에 따라 자동적으로 움직인다. 12대 체인호이스트로 구성된 멀티 체인 호이스트 서버 시스템에 대한 1 ton 부하 및 대칭-비대칭 배치 부하에 대한 실험을 통해서 우수성을 검증하였다. 아울러 K-POP 공연에서 극적 효과를 연출하는데 성공적으로 적용되었다.

■ 중심어 : | 공연 | 자동화 장치 | 고하중 | 멀티 체인 호이스트 | 실시간 네트워크 | 궤적 생성 |

### Abstract

Most stage directors and designers make use of controlling and moving lots of stage set or device as a large automation device or machine to achieve dramatic effect in their performances. Specially, it is very important to use a programmable multi-chain hoist system which is able to move high speed as well as to lift heavy loads. This paper proposes a multi chain hoist servo system to lift or lower a heavy load of about 1 ton for public performances' stage. It is automatically operated, electrically driven by a control console with a PTP trajectory generation algorithm, a realtime network control algorithm, and 4 step sequential safety algorithm. The efficiency and performance of the developed system are verified through a series of experiments.

■ keyword : | Public Performance | Automation Device | Heavy Load | Multi Chain Hoist | Realtime Network | Trajectory Generation |

## 1. 서 론

최근 모든 무대 세트 및 장치가 하나의 거대한 자동화 기기로 묶여서 시나리오의 연출 장면에 따라 순차적으로 연동되어 움직이면서 환상적인 퍼포먼스를 만들어내는 공연을 볼 수 있다[1-4]. 이것은 단순한 이차원

적인 공연 무대가 아닌 삼차원적인 공연 무대가 만들어지기 때문이다. 삼차원적인 무대 연출을 위해서는 다양한 자동화 무대 장치나 기기들이 필요하다. 그중에서도 특히 트러스 시스템, 조명시스템, 음향시스템, 그리고 무대 세트 등을 들어 올리거나 내릴 수 있는 체인 호이스트가 사용된다.

접수일자 : 2015년 04월 17일

수정일자 : 2015년 05월 22일

심사완료일 : 2015년 06월 01일

교신저자 : 권오홍, e-mail : ohung@kitech.re.kr

기존에는 고하중의 무대 세트를 들어 올리거나 내릴 때 유선 조작기로 체인 호이스트를 작업자가 수동적으로 조작하였다. 이것은 많은 작업 인력을 요하며 아울러 시나리오의 연출 장면에 따른 동기화 및 복잡한 장면 연출이 어렵다. 따라서 공연 및 전시에서 사물이송을 위한 2개 이상의 호이스트를 단독으로 움직이거나 동시 자동 조작이 가능한 멀티 체인 호이스트 서버 시스템이 필요하다. 이에 대한 선행 연구로는 다축의 체인 호이스트를 연동해서 동시 제어를 수행할 수 있는 EtherCAT 기반의 체인호이스트 시스템의 설계 방법을 제안하였다[5]. KINESYS 사에서는 다축의 체인 호이스트를 운용할 수 있는 운용 소프트웨어를 개발하였다[6]. 하지만 다축 체인호이스트의 독립 구동 및 동역학 기반의 다축 동기 구동 시스템 제어에 대한 연구는 진행되지 않았다.

본 논문에서는 시나리오의 연출 장면에 따라 고하중의 물체를 원하는 궤적에 따라서 개별적으로 혹은 동기 로 들어 올리거나 내릴 수 있는 다축의 멀티 호이스트 서버 시스템을 제안한다. 실시간 통신으로 여러 대의 체인 호이스트를 동시에 연동 제어할 수 있다. 이것은 독립적으로 체인 호이스트를 움직이거나 2대, 4대, 8대를 묶어서 기구학과 동역학적인 수식에 의하여 동시에 움직이는 것을 가능하게 만든다. 또한 작동 시 발생할 수 있는 안전사고를 미리 방지할 수 있도록 시스템의 상태를 진단하고 차단하는 단계별 안전 진단 알고리즘을 적용하였다.

제안된 시스템은 공연이나 전시 등의 연출에 대한 한계를 제거하고 관객들의 몰입에 중요한 역할을 하게 된다. 아울러 다양한 콘텐츠의 개발 및 적용 범위를 확대시키는 기능을 담당하게 된다.

## II. 본 론

### 1. 체인 호이스트 서버 시스템의 모델

#### 1.1 체인 호이스트의 설계

체인 호이스트 서버 시스템은 [그림 1]에서 보이듯이 체인 호이스트, 체인, 후크, H빔, 그리고 부하로 구성된

다. 체인호이스트의 각 파트는 모터 및 모터드라이버, 체인 기어, 체인받이, 통신전자제어시스템, 케이스 등으로 구성되며 각각 분리 및 조립이 용이하도록 모듈별로 설계되었다. 그리고 빗물이 체인을 따라서 흘러 나갈 수 있도록 방수 설계를 하였고 방진이나 방열을 고려하여 환풍구를 체인 호이스트의 아래 부분에 설계하였다.

H빔에 체인호이스트를 연결하고서 정상적으로 아래에 부하를 연결하는 경우와 H빔에 체인호이스트를 연결하는 것이 아니라 체인 호이스트를 뒤집어서 부하에 체인 호이스트를 연결하고서 비정상적으로 체인 연결하는 경우를 모두 고려하여 이탈하지 않도록 체인 입출력의 허용 각도 범위를 90도 되도록 구조 설계하였다. 그리고 체인 기어 모듈에서 오일이 흘러나오는 것을 막기 위해서 오일 누수 방지 마개와 범용 호이스트 연결부 설계하였다.

오작동이나 고장에 대한 진단 및 조치 가능하도록 브레이크를 설치하였고 전원선이나 통신선은 방수 및 방진이 되면서 연결 및 분리가 용이하도록 설계하였다.

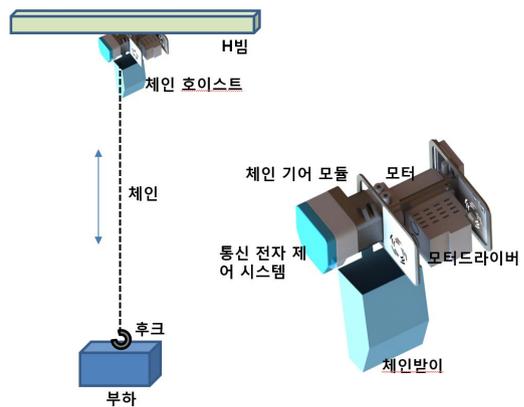


그림 1. 체인 호이스트 서버 시스템의 모델

### 2. 임의 궤적 생성 및 제어 알고리즘

#### 2.1 PTP기반의 궤적 생성 알고리즘

고하중의 이송 특성을 고려하여 PTP (Point to point) 로 궤적 생성하는 방법을 적용하였다[7]. 콘텐츠에 따른 장면별 이동 변위 및 이동 시간을 결정하게 되면 아래의 수식 (1)을 이용하여 궤적을 생성하게 된다.

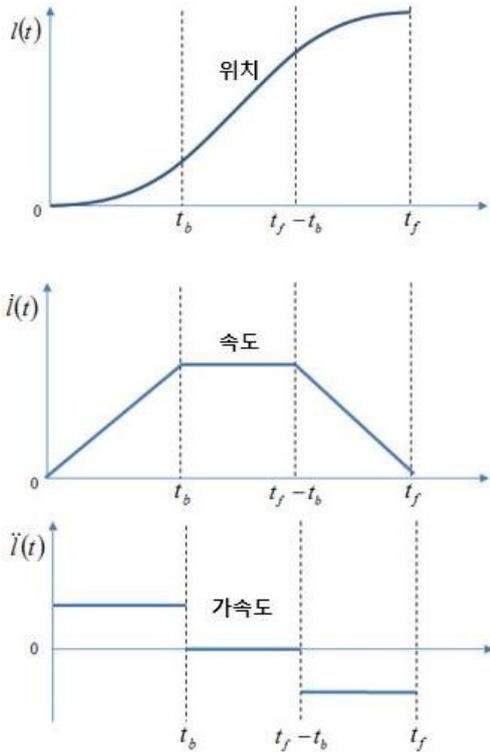


그림 2. PTP 기반의 위치, 속도, 가속도 그래프

$$l(t) = \begin{cases} l_0 + \frac{\dot{i}t^2}{2} \\ \frac{l_f + l_0 - \dot{i}t_f}{2} + \dot{i}t \\ l_f - \frac{\dot{i}t_f^2}{2} + \ddot{i}t_f t - \frac{\ddot{i}}{2}t^2 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $l_0$ 과  $l_f$ 는 각각 초기 위치 값과 최종 위치 값이다.  $\dot{i}$ 과  $\ddot{i}$ 은 각각 속도 값과 가속도 값이며  $t_b$ 와  $t_f$ 는 각각 일정 속도에 도달할 때까지의 시간과 총 이동에 필요한 시간을 말한다. [그림 2]는 임의의 시간에 대한 위치, 속도, 가속도의 그래프를 보인다.

고하중의 부하를 빠른 이송을 위해서 가속하는 경우에 가속도의 크기에 따라서 순간적으로 큰 토크가 필요하며 체인 호이스트의 허용 하중을 초과하게 된다. 따라서 부하의 크기에 따라서 가속도의 크기를 조절해야 한다. 수식 (1)로부터 속도의 크기는 다음의 수식으로

부터 구한다. 즉,

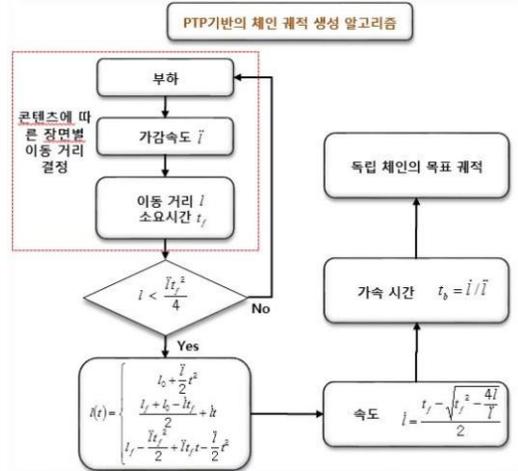


그림 3. PTP 기반의 위치, 속도, 가속도 그래프

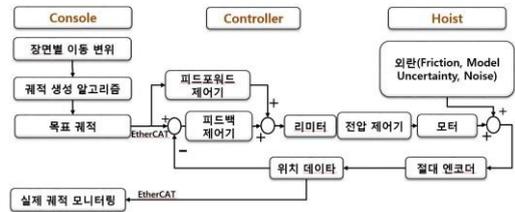


그림 4. 실시간 네트워크 기반의 위치 제어 순서도

$$\dot{i} = \frac{t_f - \sqrt{t_f^2 - \frac{4l}{\dot{i}}}}{2} \quad (2)$$

이때 수식 (2)로부터 다음의 수식이 만족되어야 한다. 즉,

$$l < \frac{\dot{i}t_f^2}{4} \quad (3)$$

이 수식을 만족할 때까지 부하에 따라서 가속도를 조절한다. [그림 3]은 콘텐츠에 따른 장면별 이동 거리와 소요시간을 입력하게 되면 PTP기반으로 궤적 생성하는 순서도를 보인다.

2.2 실시간 통신 기반의 위치 및 속도 제어 알고리즘

2.1절에서 얻어진 목표 위치 및 속도 궤적을 따라서 체인 호이스트를 제어한다. 이때 체인호이스트와 체인 호이스트 사이의 최대 거리는 100m 이다. 각각의 호이스트 모듈들은 실시간 통신으로 데이터를 주고받을 수 있어야 하며 동시 제어가 가능해야 한다. 본 연구에선 EtherCAT 실시간 통신 제어 기법을 사용하였다[8]. 장면별 이동 거리에 따라서 목표 궤적이 생성되면 각 체인호이스트로 궤적 데이터가 전송되고 피드백 피드포워드 제어기로 위치 및 속도 에러를 제어한다. 노이즈나 외력에 의한 영향은 피드백 제어기에서 고려하며 작용 부하에 대한 영향은 피드포워드 제어기에서 고려한다. [그림 4]는 실시간 통신 기반의 위치 및 속도 제어 알고리즘의 순서도를 보인다.

3. 다축 동기 제어 알고리즘

3.1 다축 동기 체인 호이스트의 동기제어 알고리즘

여러 대의 체인 호이스트를 동시에 움직이는 연동 제어는 [그림 5]에서 보이듯이 2대, 4대, 8대를 묶어서 기구학과 동역학적인 수식의 유도하고 각 체인호이스트에 요구되는 궤적 및 허용 하중을 계산함으로써 이루어진다. 먼저 다축 동기 체인 호이스트를 기구학적으로 분석한다. [그림 6]은 체인호이스트의 기구학적인 모델을 보인다. 고정 좌표계에서부터 기구부의 중심 좌표계에 대한 기하적인 관계를 이용해서 각 호이스트의 이동 변위,  $l_i$ , 에 대한 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$l_i = \sqrt{(p + Rr_i - h)^T (p + Rr_i - h)} \quad (4)$$

여기서  $\vec{p}$  와  $R$ 은 각각 고정 좌표계에서부터 기구부의 중심 좌표계까지의 위치 벡터와 방향 매트릭스이다. 수식 (4)의 양변을 미분하게 되면 이동 속도,  $\dot{l}_i$ , 를 얻을 수 있다.

$$\dot{l}_i = \vec{u}_i^T \vec{p} + (Rr_i \times \vec{u}_i)^T \vec{\omega} \quad (5)$$

여기서  $\vec{\omega}$ 은 고정 좌표계에서부터 기구부의 중심 좌표계까지의 각속도 벡터이다. 수식 (4)와 (5)로부터 각 체

인 호이스트에 작용하는 장력을 계산한다. 뉴턴의 법칙을 이용해서 운동 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$M\ddot{q} = G + \Phi\vec{\tau} \quad (6)$$

여기서  $\Phi$ 는 체인 호이스트의 힘의 작용 방향을 나타내는 매트릭스이다. 또한,

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_x \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \\ -\omega \times I\omega \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} p \\ \omega \end{bmatrix}$$

이다. 그리고  $\vec{\tau}$ 는 체인호이스트의 모터 토크 벡터이다.  $m$ 과  $I$ 는 각각 부하의 질량 및 관성 매트릭스를 의미한다.  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

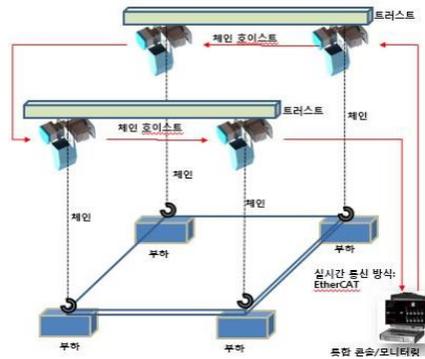


그림 5. 4대 체인 호이스트 동기 모델

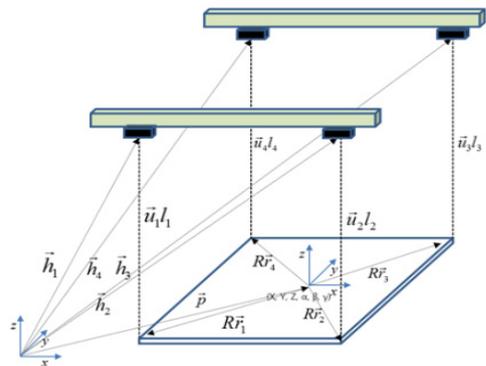


그림 6. 4대 체인 호이스트의 기하적인 모델

수식 (6)으로부터 각 체인 호이스트에 필요한 토크 값을 계산하게 된다. 즉,

$$\vec{\tau} = \Phi^\# (\vec{M}q - G) \quad (7)$$

여기서  $\Phi^\#$ 는 pseudo-inverse 매트릭스를 의미한다. 이때, 수식 (7)로부터 얻어진 각 체인 호이스트의 필요 토크 값과 각 체인 호이스트 별 허용 토크를 비교하게 하여 허용 토크를 벗어나게 되면 궤적을 변경한다.

본 논문의 동기 제어 알고리즘은 먼저 콘텐츠에 따른 장면별 동기 체인호이스트의 부하 기구부의 중심에 대한 이동 변위 및 소요 시간을 정의한다.

다음으로 PTP기반으로 기구부 중심에 대한 궤적을 생성하여 수식 (5)와 (6)의 기구학 모델과 동역학 모델로부터 유도한 수식을 이용하여 각각 체인 호이스트 목표 위치 및 속도를 구하고 수식 (7)의 동역학 수식으로부터 각 체인호이스트에 요구된 허용 토크 범위 내에 있으면 다축 동기 제어를 하게 된다. [그림 7]은 다축 동기 제어 알고리즘에 대한 순서도를 보인다.

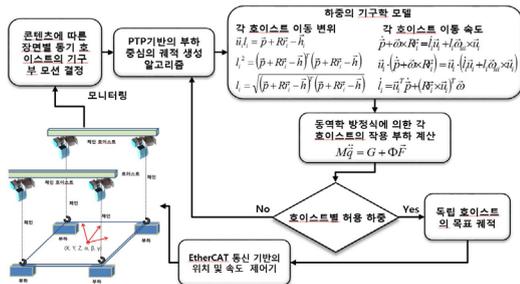


그림 7. 다축 동기 제어 알고리즘의 순서도



그림 8. 개별 체인 호이스트 연동 제어 실험

### 3.2 단계별 안전 진단 차단 알고리즘

고하중의 물체 이송 시 발생할 수 있는 안전사고를 예 미리 예측하고 방지할 수 있도록 시스템의 상태를 진단하고 차단하는 4단계의 안전 진단 알고리즘을 제안한다.



그림 9. 1톤 부하 체인호이스트 제어 실험



그림 10. 대칭 부하 실험



그림 11. 비대칭 부하 실험

첫째는 통신 케이블 리던던시(redundancy)로 연결하여 페루프(closed-loop)를 형성하여 통신 신호선을 실시간으로 체크하여 통신선의 끊어짐이나 통신 레이턴시(latency) 및 통신 장애를 진단 및 해결한다.

둘째는 모터 및 모터드라이버의 이상 동작을 체크하고 이상 동작 시 E-stop 기능으로 모터 및 모터드라이버를 차단한다.

셋째는 고하중 및 하중 제로를 체크하는 방법이다. 모터에 실제 작용하는 전류를 측정하여 작용 토크가 허용 토크를 초과하거나 하중 제로가 발생하게 되면 동작을 차단한다.

마지막으로는 사용자가 시스템의 이상 유무를 판단하여 이상 발생 시에 모터 드라이버의 E-stop 기능에 의하여 시스템을 강제 중단한다.

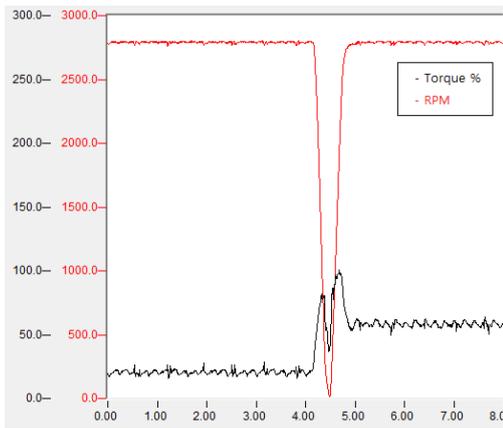


그림 12. K-POP RPM, Torque 데이터

## 4. 실험

### 4.1 체인 호이스트 서버 시스템의 실험

체인 호이스트 서버 시스템의 성능을 검증하기 위해서 체인 호이스트, 체인, 후크, 트러스, 그리고 부하로 구성된 독립 호이스트 서버 시스템을 제작하였다. 6대의 체인 호이스트를 개별적으로 움직이도록 제어 테스트를 수행하였다. [그림 8]은 6대의 체인호이스트를 개별적으로 바닥에서부터 높이 3m까지 움직이는 장면이다. 모터에 부착된 각도센서로부터 1mm이하의 제어 오차를 가지고 원하는 이동 범위와 가속도에 따라서 움직이는 것을 확인하였다. [그림 9]는 1톤의 부하를 매달고서 상하 이동 테스트를 수행하는 것을 보인다. 실시간 허용 하중에 대한 모니터링을 통해서 성능을 검증하였다.

### 4.2 다축 동기 체인 호이스트 서버 시스템의 실험

4대의 체인 호이스트를 동기 구동 성능 테스트를 수행하였다. 호이스트와 호이스트 사이의 거리는 최대 100m까지 가능하나 6m로 하였다. 6m\*6m 정사각형 부하 기구부의 중심에 대하여 목표 궤적을 구하고 기구부의 회전범위 피칭과 롤링을 -60도에서부터 60도로 하였고 실시간 통신 기반의 동기 제어 주기는 1ms로 하였다.

첫 번째는 기구부의 모든 모서리에 400kg의 부하를 매달고서 대칭 부하에 대한 테스트를 수행하였다. [그림 10]는 대칭적인 부하를 가지고서 롤링과 피칭 동작을 구현하는 것을 보인다. 엔코더 피드백 정보를 통하여 1mm이하의 오차 범위 내에서 상하 6m의 이동 범위와 가속도에 따라서 움직이고, 허용 하중 범위 내로 운용되는 것을 확인하였다.

두 번째는 기구부의 두 변에 400kg의 부하 두 개를 매달고서 비대칭 부하에 대한 테스트를 수행하였다. [그림 11]은 비대칭적인 부하를 가지고서 허용 하중 내에서 원하는 이동 범위와 가속도 따라서 1mm 이하의 제어 오차 범위 내에서 잘 움직인다는 것을 보인다. [그림 12]를 통해서 페이로드의 속도에 대한 모터 토크 데이터를 확인할 수 있으며, 이를 통해 시스템이 정격 하중 내에서 안정적으로 작동하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

세 번째는 멀티 체인 호이스트 서버 시스템의 성능 검증을 위해서 [그림 13]에서 보이듯이 K-POP의 공연 무대에 실제 적용하였으며, 정격 하중 (체인 호이스트 당 1 ton)이하의 작동 환경에서 2시간 정도의 공연 시간 동안 다양한 연출이 안정적으로 구현 가능함을 확인하였다.





그림 13. K-POP 공연 무대 적용

### III. 결 론

공연이나 전시 등에 사용되는 트리스 시스템, 조명시스템, 음향시스템, 그리고 무대 자동화 장치 등을 들어 올리거나 내릴 수 있는 멀티 체인 호이스트 서버 시스템을 제안하였다. 이것은 1톤 이상의 고하중을 매달고서 최대 12m/min의 속도로 PTP기반의 위치, 속도, 가속도 제적을 1mm이하의 오차로 제어할 수 있다. 또한, 개별적으로 여러 대의 체인 호이스트를 제어 하거나 2대, 4대, 8대의 체인 호이스트를 묶어서 동기로 허용 하중을 벗어나지 않는 범위 내에서 롤링 및 피칭, 그리고 상하 이동을 제어 할 수 있다. 시스템의 성능 테스트를 위해서 실제 K-POP 공연 적용하여 다양 공연 시나리오에 따라서 연출 가능성을 확인하였다.

향후 100축 이상의 체인 호이스트 운용 시뮬레이션 기술과 실시간 통신 제어 기술의 연구를 통해서 멀티 체인 호이스트 서버 시스템은 K-POP 공연과 전시 분야에서 공연 콘텐츠의 다양화를 유도하고 아울러 CT, IT 및 RT의 융합을 통하여 영화, 엔터테인먼트, 문화예술 공연분야에도 적용할 예정이다.

### 참 고 문 헌

[1] 한국콘텐츠진흥원, “첨단 공연 기술의 동향과 사례”, 문화기술(CT) 심층리포트, 2011.  
 [2] 현대경제연구원, “첨단 융합 판타지 공연 크러스터 조성 방안”, 발간등록번호 53-6270000-000482-0.

[3] 박중호, 권오홍, 정관영, “재구성 가능한 공연 무대를 위한 전자 마루 블록 시스템”, 한국콘텐츠학회논문지, 제11권, 제12호, pp.504-510, 2011.  
 [4] <http://livedesignonline.com/projects/u2-360-tour>  
 [5] 박재환, 이상원, 권오홍, “멀티체인호이스트 제어를 위한 EtherCAT기반 시스템 구축”, 한국정밀공학회춘계학술대회, p.1080, 2014.  
 [6] <http://www.kinesys.co.uk/>  
 [7] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Prentice Hall, 1993.  
 [8] <http://www.beckhoff.com/>

### 저 자 소 개

#### 박 재 환(Jaehwan Park)

정회원



- 2010년 2월 : 한양대학교 기계공학부(공학사)
- 2012년 2월 : 한양대학교 기계학과, 지능형로봇공학과(공학석사)
- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국생산

기술연구원 휴먼문화융합연구그룹(CT융합연구센터) 연구원

<관심분야> : 동역학 제어, 보행 로봇, 케이블 구동 매니플레이터

#### 권 오 흥(Ohung Kwon)

정회원



- 1999년 2월 : 한양대학교 기계공학부(공학사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과(공학석사)
- 2009년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학박사)

• 2009년 2월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 휴먼문화융합연구그룹 (CT융합연구센터) 수석연구원

<관심분야> : 고하중 이송 시스템, 동역학 제어, 보행 로봇, 케이블 구동 시뮬레이터