

천정 크레인의 자동화 연구 A Study on Automation of Crane Operation

박병석, 김성현**, 권달안***, 윤지섭****

* 한국원자력연구소(Tel : +82-42-868-8259; Fax : +82-42-868-2854; E-mail: nbspark@nanum.kaeri.re.kr)
 ** 한국원자력연구소(Tel : +82-42-868-2557; Fax : +82-42-868-2854; E-mail: hyun@nanum.kaeri.re.kr)
 *** 충남대학교(Tel : +82-42-868-8259; Fax : +82-42-868-2854; E-mail: s_kda91@hanbat.chungnam.ac.kr)
 **** 한국원자력연구소(Tel : +82-42-868-2855, Fax : +82-42-868-2854; E-mail: njsyun@nanum.kaeri.re.kr)

Abstracts Crane operation is manually accomplished by skilled operators. Recently, the concept of automation is widely introduced in shipping and unloading operation using the overhead crane for the enhanced productivity. In this regards, we designed an angle detector and 3D position detector which are key devices for this operation. As well as an intelligent control algorithm is developed for the implementation of swing free crane. The performance of the presented algorithm is tested for the swing angle and the position of the overhead crane. The control scheme adopts a feedback control of an angular velocity of swing in initial phase and then the fuzzy controller whose rule base is optimized by a genetic algorithm.

Keywords Crane, Angle detector, 3D detector, Genetic algorithm, Fuzzy control

1. 서론

원자력 및 산업시설의 중량물 이송작업에는 일반적으로 크레인을 많이 사용한다. 크레인의 운전은 운반물의 흔들림 때문에 매우 까다로우며, 작업자의 안전 및 작업 효율이 문제가 되고 있다. 특히, 원자력 시설에서의 중량물의 안전이송은 절대적이기 때문에 크레인의 가감속을 매우 작게 하고, 주행속도 또한 매우 낮게 한다. 산업시설에서는 일반적으로 생산성과 관계가 있기 때문에 가감속을 크게 하고, 주행속도 또한 높게 한다. 이 경우 운반물은 크게 흔들리게 되며, 이를 범추기 위해서는 숙련된 작업자에 의존하게 된다. 따라서, 약간의 방심이나 숙련되지 않은 작업자일 경우 안전 사고를 일으킬 수 있다. 최근의 크레인 연구에서는 작업자의 안전 사고와 주변물과의 충돌 방지, 작업효율 및 생산성을 높이기 위해서 크레인을 제어하는 알고리즘 개발을 활발히 진행하고 있으며, 또한 크레인 작업의 자동화도 꾀하고 있다. 본 연구에서는 크레인 작업의 자동화 연구를 수행하기 위해 기존 펜던트 조작방식의 산업용 3톤 천정크레인에 절대거리측정 레이저센서, AC 모터제어 벡터드라이버, 80196 CPU 내장 크레인 제어기, 이송물 각도측정기, 이송물 좌표인식장치를 추가로 장착하였으며 지상에는 슈퍼바이저 컴퓨터(PC 586)를 설치하였다. 크레인 거너위의 컴퓨터는 지상의 컴퓨터로부터 무선으로 이송지령 명령을 받으며, 80196 CPU는 각종 알고리즘을 수행하고 크레인을 제어한다. 이의 주된 알고리즘은 크레인의 이송위치 제어기술, 이송물 좌표인식기술, 부진동 제어기술이다. 본 논문에서는 크레인의 자동화를 위해 기존의 크레인에 부가적으로 추가된 장치와 각종 알고리즘을 소개하고, 제안된 크레인제어 알고리즘의 전산모사 결과를 기술한다.

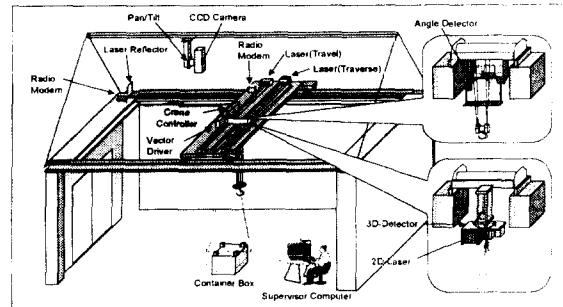


그림 1 자동화 크레인 개략도

크레인 자동화 연구를 위해 제작하고 설치한 개략도는 그림 1과 같다(사진은 상세하게 표현할 수 없어 개략도로 대신함). 산업용 3톤 크레인(40m x 20m x 7m)은 (주)반도 크레인에서 제작하였으며, 벡터드라이버(Vector driver)를 제어하기 위한 장치 및 컴퓨터 제어를 위한 장치는 공동으로 설계하였다. 또한, 부가적으로 본 연구에서 각도측정기(Angle detector), 이송물 좌표인식장치(3D detector), 크레인 제어기(Crane controller)를 설계하여 설치하였다. 크레인 시설의 천정에는 이송물의 위치를 파악하기 위해 CCD 카메라를 부착하였으며, 크레인의 주행방향과 횡행방향의 절대위치를 파악하기 위해 500m 까지 측정할 수 있는 장거리 레이저센서(독일 IBEO사)를 설치하였다. 거너위의 크레인 제어기와 지상 컴퓨터 사이의 데이터 전송을 위해 무선 모뎀(일본 동양전기, 최대 전송거리 150m)도 설치하였다. 크레인의 제어는 다음과 같은 방법으로 수행된다. 작업장의 좌표는 비디오 모니터 화면상의 최외각 네모서리의 픽셀과 그 픽셀에 해당하는 지상의 좌표를 대응시켜 이송시키고자 하는 물체가 모니터상에 나타나면 이송물의 중앙부분을 마우스로 클릭(Click)하여 지상의 좌표로 변환한다. 이 좌표값은 무선모뎀을 통해서 지상의 컴퓨터

2. 자동화 천정크레인

2.1 자동화 크레인 개요

로부터 거더위의 크레인 제어기에 전송된다. 크레인 제어기는 주변장치로부터 오는 정보(각도측정기, 장거리 레이저센서 등)와 크레인 제어 알고리즘을 이용하여 크레인을 구동시키고 파지기구의 흔들림, 크레인의 속도, 위치제어를 수행한다. 그러나, 모니터 화면상의 픽셀의 한계와 이송물의 중량을 정확히 클리크 할 수 없는 한계 때문에 이송물과 크레인의 좌표는 20cm 이내의 오차를 가진다. 따라서, 크레인이 일단 목표근방에 정지한 후에는 트롤리 하단에 장착된 이송물 좌표인식장치를 활용하여 이송물의 방향과 크레인으로부터 떨어진 3차원 좌표를 다시 계산한 후 후크에 매달린 파지장비를 정확히 이송물에 근접시켜 자동으로 파지하게 된다. 이후 다시 이송물의 흔들림, 크레인 속도, 위치제어를 수행하여 이송물을 원하는 지점에 하역시킨다. 이때, 거더위의 크레인 제어기는 실시간으로 운반물의 흔들림각, 크레인 속도, 위치정보등을 지상의 슈퍼바이저 컴퓨터에 전송하고 지상 컴퓨터는 이를 컴퓨터 모니터에 그래픽 및 데이터로 나타낸다. 크레인 제어기, 각도측정기 및 이송물 좌표인식장치는 아래에서 좀더 자세히 설명한다.

2.2 크레인 제어기

산업시설에서의 크레인의 조작은 크게 두 가지 방식이 있다. 첫째는 작업자가 지상에서 펜던트 조작기로 크레인을 구동시키는 방식이고, 둘째는 작업자가 크레인 거더위에 탑승하여 조작하는 방식이다. 두 방식 모두 전적으로 숙련된 작업자에 의존하므로 크레인 조작에는 많은 경험이 필요하며, 특히 작업자의 방심이나 피로 등으로 인한 안전사고가 우려된다. 본 연구에서는 이 두 가지 방식을 탈피하고, 원격지에서 크레인을 조작할 수 있게 함으로써 작업자를 보호하고, 또한 크레인 작업을 자동으로 수행하여 작업효율을 크게 높일 수 있도록 하기 위해 컴퓨터 제어를 개발하여 거더위에 탑재시켰다. 이의 사양은 표 1과 같다. 크레인에 설치된 제어기의 CPU는 Intel에서 생산되고 있는 micro controller인 80196KC를 사용하였다. 개발된 제어기는 80196이 갖고있는 기능외에 본 연구에 필요한 Counter, A/D, D/A, Digital I/O등의 외부 입출력장치를 설계 제작하였다. 제어 프로그램의 개발은 32K의 RAM에서 이루어지고 프로그램 개발이 완료되면 32K의 ROM에 저장하게 된다. 크레인 제어를 담당하는 프로그램은 지상의 컴퓨터에서 RS232-C 통신방식으로 무선모뎀을 통해서 전송되어 크레인 제어기의 RAM에 다운로드(download) 된다.

표 1 크레인 제어기 사양

CPU	- 80196KC, 20Mhz, 16bit (Embed Microcontroller) - 64KB Memory
A/D	- 8CH, 12bit Resolution - 입력전압 : +10V ~ -10V - Differential, single ended 입력 - Filter : 2Hz - Amplifier : 입력전압의 1 ~ 5배
D/A	- 4CH, 12bit Resolution - 출력전압 : +10V ~ -10V
I/O	- Output : 8CH, Relay output
	- Input : 16CH, TR input
Counter	- 32bit Counting, 4CH - Line Driver 입력
Serial	- RS 232C, 4CH - 19,200BPS

2.3 이송물 각도측정기

크레인 주행시 발생하는 이송물의 흔들림을 제어하는 데 필수적으로 요구되는 이송물 흔들림 각도측정기에는 여러 가지 방법들이 제시되고 있다. 첫째는 CCD 카메라, 초음파센서, 레이저 센서 신호들을 이용하는 비접촉식 방법으로 기계적인 구조가 단순하고 정밀한 장점은 있으나 고가인 단점이 있다. 둘째는 기계

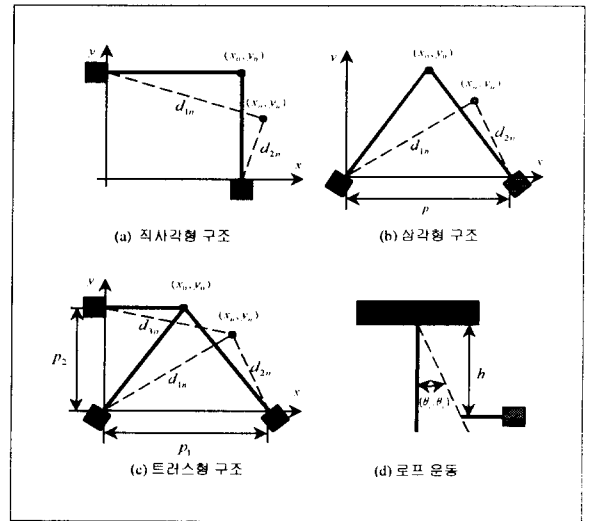


그림 2 다양한 각도측정기 구조

적인 구조와 센서의 조합을 통한 접촉식 방식이다. 여기에는 엔코더, 회전형 전위차계, 자기센서등을 사용하고 있으나, 기계적으로 좀더 복잡한 구조를 요구하며 정밀성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 그러나, 최근 정밀성이 높으면서 가격도 저렴한 센서가 생산되고 있기 때문에 센서와 기계적인 구조를 적절히 조합하면 가격도 저렴하고 정밀성이 높은 각도측정기를 개발할 수 있다. 각도측정기에는 단지 직교 x, y축 상에서만 이송물이 흔들린 각도를 측정하는 방식과 임의의 방향으로 흔들린 각도를 측정하는 방식이 있으나, 실제 크레인 작업에서는 운반물의 흔들림이 임의의 방향으로 흔들리기 때문에 이에 대한 각도측정장치가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 비교적 가격이 저렴하고 기계적인 구조도 단순하면서, 임의의 방향으로 흔들린 각도를 측정할 수 있는 장치를 고안하였다. 센서로는 회전형 전위차계(potentiometer)를 사용하였으며 로프의 움직임에 따라 전위차계에 부착된 와이어가 운동하도록 하고 그때의 이송변위에 비례한 센서 출력정보(전압)를 이용하여 운반물의 x, y축 방향 흔들림 각도를 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 그림 2는 전위차계의 배치에 따른 각도 측정기의 구조를 보여준다. 그림 2의 (a)는 두개의 전위차계를 서로 직교상에 배치한 경우로 계산식이 다소 복잡하여 정밀성이 떨어지는 단점이 있다. (b)는 두개의 전위차계가 일직선상에 있는 경우로 (a)보다는 계산식도 단순해지고 정밀성도 높아진다. (c)는 (a)와 (b)를 조합한 경우로 (a), (b)의 경우보다도 계산식이 단순하고, 정밀성도 가장 우수하다. 그러나, 본 연구에서는 (b)와 (c)의 계산식에 큰 차이가 없으므로 구조의 단순성 및 가격을 고려하여 단지 두개의 전위차계만을 이용하는 (b)의 방법을 택하였다. 제작한 각도측정기는 그림 1에서 보여주는 바와 같이 트롤리 하단에 설치하였다. 각도측정기 속에는 4개의 로프가 관통하도록 하였으며 그 중 고정된 로프의 한개에 두개의 회전형 전위차계에서 뺀어 나온 와이어를 연결하였다. 그림 2의 (d)에서 보여 주는 크레인의 로프운동은 상하운동도 수반하기 때문에 이송물의 실질적인 운동각도를 알기 위해서는 그림 3에서 보는 바와 같이 로프의 상하운동에 따른 길이 변화가 고려되어야 한다. 아래 식은 그림 2의 (b) 방식을 채택한 각도측정기의 로프 상하운동 까지를 고려한 실질적인 이송물의 운동각도를 계산하는 알고리즘이다.

$$\theta_x = \frac{x_n - x_0}{h} = \frac{p^2 + d_{1n}^2 - d_{2n}^2}{2p} - x_0 \quad (1)$$

$$\theta_y = \frac{y_n - y_0}{h} = \sqrt{d_{1n}^2 - \left(\frac{p^2 + d_{1n}^2 - d_{2n}^2}{2p}\right)^2} - y_0 \quad (2)$$

$$\Delta c_n = c_n - c_0 = \frac{b(l_n - h)}{l_n} - \frac{b(l_0 - h)}{l_0} = \frac{hb(l_n - l_0)}{l_n l_0} \quad (3)$$

$$y_n = y_n - \Delta c_n \quad (4)$$

여기서, Δc_n 은 로프길이 변화에 따른 와이어 길이 변화량, h 는 로프 힌지점부터 각도측정기 와이어까지 수직 거리, b 는 후크드럼 외경에서 수직으로 호이스트 드럼을 향하는 선과 로프힌지점에서 그은 수평선이 만나는 지점에서 힌지점까지 거리, l_0 는 리미트 지점에서 로프 힌지점 까지 수직거리, l_n 은 현재의 로프길이(l_0 +리미트 지점부터 하강거리), y_n 은 각도측정기 y방향 이동길이 이다.

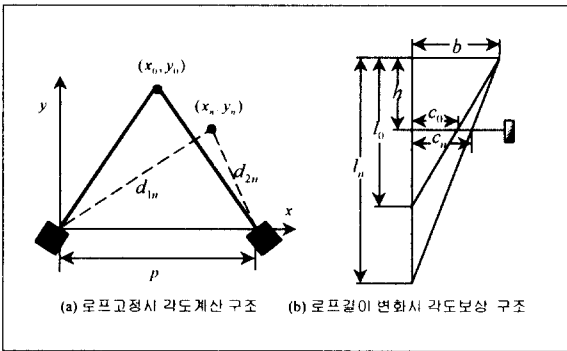


그림 3 로프길이 변화시 각도보상구조

2.4 이송물 좌표인식장치

크레인 작업장에는 정해진 지점에 놓여 있는 경우와 그렇지 못한 경우가 있다. 예를 들어, 차량을 통해서 이송물이 들어오는 경우 이송물이 있는 좌표(x,y,z)를 정확히 알아내기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 이와 같이 이송물의 좌표를 알아내기 어려운 경우, 2.1에서 언급한 바와 같이 크레인을 이송물에 접근시킨 후 정지한 상태에서 크레인과 이송물의 x, y 오차를 측정하여 재차 크레인을 구동시킨 후 파지장치를 이송물에 접근시킨다. 이를 위해 그림 1에서 보는 바와 같은 이송물 좌표인식장치를 제작하여 트롤리 하단에 부착하였다. 이 장치는 2차원 레이저 거리센서(독일 IBEOSA, 스캔각도 270도, 측정거리 50m)와 회전모터로 구성하였으며 공간상에 놓여있는 3차원 형상정보를 얻을 수 있다. 좌표인식장치는 이송물의 틀어진 각도와 장치의 중심으로부터 떨어진 x, y 좌표와 이송물까지의 z 거리를 찾아낸다. 그림 4는 이송물 형태에 따라 그의 좌표 및 틀어진 각도를 찾는 방법을 보여주며 아래 식은 이의 알고리즘이다.

- 그림 4 (a)의 경우 중심점 $C(x_c, y_c, z_c)$ 계산

$$x_c = x_p \quad (5)$$

$$y_c = y_p \quad (6)$$

$$z_c = z_a \quad (7)$$

$$x_p = (x_a + x_b)/2 \quad (8)$$

$$y_p = (y_d + y_e)/2 \quad (9)$$

- 그림 4 (b)의 $C(x_c, y_c, z_c), \phi, r, W$ 계산

$$(z_k - z_a)^2 + (x_k - x_a)^2 \cdot \cos^2 \phi = r^2 \quad (10)$$

$$x_a = (x_p + x_q)/2 \quad (11)$$

$$y_b = (y_d + y_e)/2 \quad (12)$$

$$W = (y_d - y_e) \cdot \cos \phi \quad (13)$$

$$\text{line 1 : } y = \tan \phi \cdot x + y_b \quad (14)$$

$$\text{line 2 : } y = -\tan \phi \cdot y + y_a \quad (15)$$

$$x_c = \cos^2 \phi (x_a - y_b \cdot \tan \phi) \quad (16)$$

$$y_c = \cos^2 \phi (y_b + x_a \cdot \tan \phi) \quad (17)$$

$$z_c = z_a \quad (18)$$

- 그림 4(c)의 $C(x_c, y_c, z_c), \phi, W$ 계산

$$x_a = (x_p + x_q)/2 \quad (19)$$

$$y_b = (y_d + y_e)/2 \quad (20)$$

$$\phi = \cos^{-1} (y_d - y_e)/W \quad (21)$$

; W 는 y 축 근방에서 scan후 최소가 되는 거리

$$\text{line 1 : } y = \tan \phi \cdot x + y_b \quad (22)$$

$$\text{line 2 : } y = -\tan \phi \cdot y + y_a \quad (23)$$

$$x_c = \cos^2 \phi (x_a - y_b \cdot \tan \phi) \quad (24)$$

$$y_c = \cos^2 \phi (y_b + x_a \cdot \tan \phi) \quad (25)$$

$$z_c = z_a \quad (26)$$

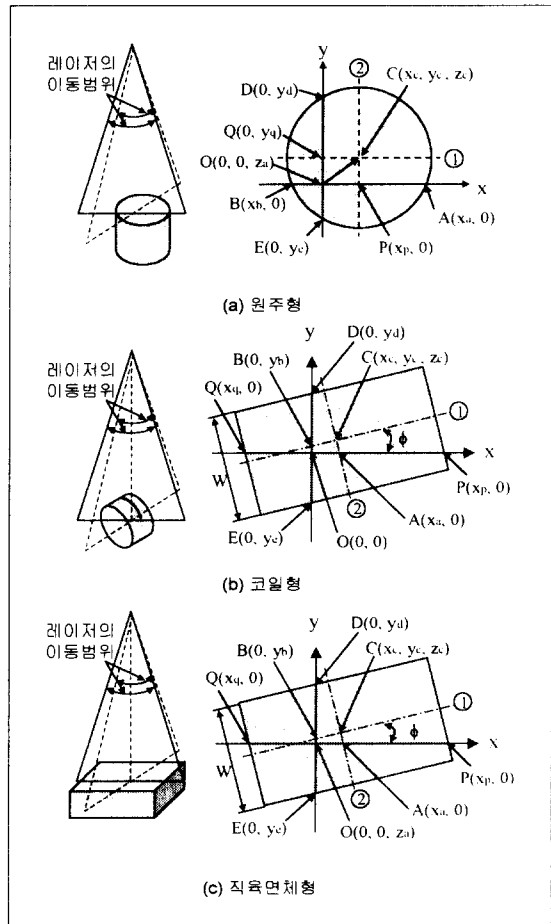


그림 4 이송물 형태에 따른 좌표인식 방법

3. 크레인제어 알고리즘

3.1 천정크레인의 수학적 모델링

크레인의 3차원 운동은 그림 5와 같이 도식적으로 나타낼 수 있으며, 이를 Lagrange equations를 사용하여 수학적으로 나타내면 아래 식과 같이 된다. 여기서, F_x 는 거너에 가하는 힘, F_y 는 트롤리에 가하는 힘, F_z 는 호이스트에 가하는 힘, m_C 는

거더의 질량, m_T 는 트롤리의 질량, M 은 이송물의 질량, x 는 거더의 이송거리, y 는 트롤리의 이송거리, l 은 로프의 길이, θ 는 이송물의 흔들림각, ϕ 는 거더와 트롤리 운동에 따른 이송물의 회전각, g 는 중력가속도이다.

$$(m_G + m_T + M)\ddot{x} + Ml\cos\theta\sin\phi\ddot{\theta} + Ml\sin\theta\cos\phi\ddot{\phi} + M\sin\theta\sin\phi\dot{l} + 2Ml\dot{\theta}\cos\theta\sin\phi + 2Ml\dot{\phi}\sin\theta\cos\phi + 2Ml\cos\theta\cos\phi\dot{\theta}\dot{\phi} - Ml(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2)\sin\theta\sin\phi = F_x \quad (27)$$

$$(m_T + M)\ddot{y} + Ml\cos\theta\cos\phi\ddot{\theta} - Ml\sin\theta\sin\phi\ddot{\phi} + M\sin\theta\cos\phi\dot{l} + 2Ml\dot{\theta}\cos\theta\cos\phi - 2Ml\dot{\phi}\sin\theta\sin\phi - 2Ml\dot{\theta}\dot{\phi}\cos\theta\sin\phi - Ml(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2)\sin\theta\cos\phi = F_y \quad (28)$$

$$Ml^2\ddot{\theta} + 2Ml\dot{l}\dot{\theta} - Ml^2\dot{\phi}^2\sin\theta\cos\theta = -Ml\dot{x}\cos\theta\sin\phi - Ml\dot{y}\cos\theta\cos\phi \quad (29)$$

$$Ml^2\sin^2\theta\ddot{\phi} + 2Ml\dot{l}\dot{\phi}\sin^2\theta + 2Ml^2\dot{\theta}\dot{\phi}\sin\theta\cos\theta = -Ml\dot{x}\sin\theta\cos\phi + Ml\dot{y}\sin\theta\sin\phi \quad (30)$$

$$(m_H + M)\dot{l} + M\dot{x}\sin\theta\sin\phi + M\dot{y}\sin\theta\cos\phi - Ml\dot{\theta}^2 - Ml\dot{\phi}^2\sin^2\theta - Mg\cos\theta = -F_l \quad (31)$$

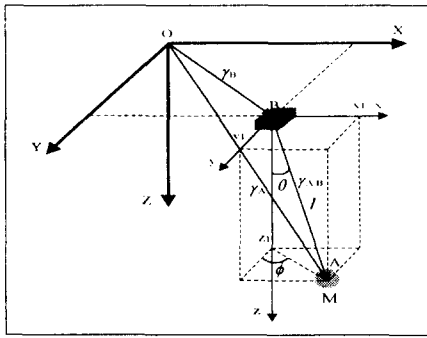


그림 5 크레인의 3차원 운동 개략도

3.2 운반물 흔들림각 제어

크레인은 3.1의 수학적 모델에서 보는 바와 같이 여러개의 수식으로 표현할 수 있으나, 크레인의 가속도를 제어한다면 식 (29)와 식 (30)으로 가능하다. 또한, 트롤리 혹은 거더 중 하나의 운동과 흔들림각도가 작다(5도 이내)고 가정하고 비선형항을 무시하면 다음과 같은 식으로 단순화 된다.

$$l\ddot{\theta} + g\theta = -\ddot{x} \quad (32)$$

식 (32)에서 보는 바와 같이 크레인에 가속도가 인가되면 이송물의 흔들림이 조화운동을 하게됨을 알 수 있다. 그러나, 가속도에 식 (33)과 같이 흔들림 각속도($\dot{\theta}$)를 피드백(Feedback)하면 이송물의 운동에는 감쇄가 있게 된다. 즉, 감쇄계수(k_d)를 적절히 조절함으로써 이송물의 흔들림이 제어된다.

$$\ddot{x} = k_d\dot{\theta} \quad (33)$$

3.3 속도제적 추종 흔들림각 제어

크레인 작업에서 운반물을 목표지점에 안착시키기 위해서는 일반적으로 가속(가속구간), 정속(정속구간), 감속(정지구간)을 하게 되는데 이때 가감속의 형태가 중요한 변수로 작용한다. 즉, 급격한 가감속은 모터뿐만 아니라 구조물에 나쁜 영향을 미치며 이송물을 크게 흔들리게 한다. 크레인의 가속형태로는 경사가속, 단계 경사가속, S형을 들 수 있으나 빠른 가속형태이면서도 비교적 이송물의 흔들림에 영향을 적게 미치는 S형을 본 논문에서는 택한다. 그러나, 이송물의 흔들림을 고려하지 않는 S형을 사용하고 있기 때문에 이의 형태로 가속을 하면 크레인 주행중에 이송물이 흔들리게 된다. 이송물의 흔들림을 제거하는 S형을 생

각할 수 있으나 이렇게 되면 크레인의 수학적인 모델에 의존하게 되며(로프길이 변화도 고려해야됨) 외란이 인가된다면 의미가 없게 된다. 따라서, 본 논문에서는 크레인의 수학적 모델에 의존하지 않는 S형 가속을 하며 가속과 정속구간에 식 (33)의 흔들림각 제거기를 부가시킨다.

3.4 유전알고리즘과 퍼지이론을 합성한 정지구간 제어

이송중인 크레인이 목표지점에 정지하기 위해서는 일연식으로 감속을 하여야 한다. 이때의 감속은 이송물의 흔들림에 크게 영향을 미친다. 크레인 작업의 자동화를 위해서는 정지시에 이송물의 흔들림이 없어야 하고 또한 목표지점에 정확히 도달하여야 한다. 3.3에서 설명한 바와 같이 속도제적 추종 흔들림각 제어 방식을 사용하면 흔들림각도를 정지시까지 제어할 수 있으나 위치제어는 할 수 없다. 위치를 제어하는 알고리즘도 추가할 수 있으나 이 경우 크레인 속도, 위치, 이송물 흔들림각도를 동시에 제어하여야 하기 때문에 완벽한 제어는 기대할 수 없다. 그러나 숙련된 크레인 조작자는 이와 같은 제어를 그동안의 경험에 의해서 능숙하게 수행하고 있기 때문에 본 논문에서는 정지구간에 대해서 퍼지제어(Fuzzy control) 방법을 도입한다. 퍼지제어의 주된 부분은 IF ~ THEN ~ 으로 구성되는 제어규칙을 어떻게 잘 계획하느냐가 관건이 되고 있는데, 이 경우 전문가의 경험에 전적으로 의존하고 있다. 따라서, 비전문가는 제어규칙을 생성하는데 많은 어려움을 겪는다. 본 논문에서는 비전문가라도 퍼지제어 규칙을 생성할 수 있도록 하기 위해 유전알고리즘(Genetic algorithm)을 도입한다. 유전알고리즘은 최근 최적화 분야에 많이 활용되고 있으며 염색체군(Population)을 생성하여 선택, 교배, 돌연변이, 성능평가 등을 통해서 좋은 염색체군이 생성되도록 하는 방법이다. 정지구간에서의 크레인의 속도, 위치와 이송물의 흔들림 각도를 제어하는 알고리즘은 다음과 같다. 퍼지 알고리즘의 입력변수로는 크레인의 정지속도 오차, 정지위치 오차, 이송물의 흔들림 오차, 흔들림 오차의 변화율로 정하였으며, 출력변수로는 크레인의 가속도로 하였다. 입력변수들의 퍼지변수는 NB(Negative Big), ZE(Zero), PB(Positive Big)로 선정하였다. 퍼지변수에 대한 멤버십함수(Membership function)는 삼각형, 추론과정은 sub-min 방식, 비퍼지화는 무게중심법을 사용하였다. 퍼지규칙은 초기에 난수를 발생시켜 생성하는데 4개의 입력변수에 3개의 퍼지변수 경우의 수($3^4=81$) 만큼 염색체(Chromosome) 열(퍼지규칙의 출력변수)를 생성한다. 이때 염색체 열의 값은 0(NB), 1(ZE), 2(PB) 중 하나로 나열된다. 똑같은 방법으로 염색체를 생성하여 다수의 염색체군을 구성한다. 다음에는 크레인의 초기 상태변수(속도, 위치, 이송물 각도, 이송물 각속도)를 활용하여 Runge-Kutta 알고리즘을 수행하여 새로운 상태변수를 출력한후 첫번째 염색체(퍼지규칙)를 사용하여 퍼지 추론을 거쳐 다음단계에 인가할 크레인의 가속도를 구한다. 퍼지 추론은 매 샘플링마다 일정시간 동안 반복하며, 샘플링 시간마다 얻어지는 정지속도오차, 위치오차, 흔들림 오차 및 오차의 변화율 자승의 합의 역수가 염색체 집단을 개선시킬 적합도 함수로 사용된다. 일정시간 후에는 두 번째 염색체에 대해서도 똑같은 방법으로 적합도를 생성하며, 모든 염색체에 대해서 적합도를 생성한 후에는 적합도가 높은 확률로 염색체를 두쌍씩 선택한 후 교배와 돌연변이를 거쳐 새로운 염색체군을 생성한다. 만족하는 적합도가 나올 때까지 이와 같은 과정을 반복한다.

4. 모의실험

자동화 크레인을 구현하기 위해 설치한 각종 장치들에 대한 시험이 모두 끝나지 않은 관계로 본 논문에서는 앞의 3절에서 제시한 크레인제어 알고리즘에 대해 전산모사를 수행하였다. 크

라인이 목표지점에 도달하기 위해 감속하는 구간 전까지는 3.3에서 제시한 속도제적 추종 흔들림각 알고리즘을 적용한다. 즉, 초기 가속구간에 S형 속도 프로파일(Profile)로 크레인을 구동하며 이때 이송물의 각속도를 크레인의 가속도에 피드백시켜 흔들림을 제거한다. 이렇게 되면 정속구간에는 거의 흔들림이 없게 되어 크레인은 정속주행을 하게 된다. 크레인이 가속하기에 앞서 로프가 먼저 상승하며 로프가 정속도를 유지하면 크레인이 가속하도록 하였다. 이는 실제 크레인 작업과 유사하게 전산모사하기 위함이다. 정지구간에서 감속하는 시점은 목표거리로부터 S형 가속구간의 거리만큼 남는 지점이며 3.4에서 제시한 유전알고리즘으로 최적화된 퍼지규칙을 사용하여 퍼지제어 알고리즘을 수행한다. 전산모사에서 사용한 변수와 조건은 실제 산업용 크레인(본 연구에서 제작한 크레인 포함)과 유사하게 사용하였다. 즉, 지금까지 AC 모터를 제어하기 위해 개발된 것중 가장 우수한 성능을 지닌 벡터인버터와 크레인의 동특성을 고려하여 샘플링 시간은 0.3초로 하였으며, 가속구간과 정지구간에서 로프가 상하운동을 하도록 하였다. 또한, 바람등의 외란의 경우를 고려하여 외란의 영향이 가장 크게 미치는 정지구간에 외란이 발생한 것으로 하였다. 유전알고리즘을 사용하여 퍼지규칙을 최적화 할 때 외란이 없는 경우로 최적화 하였으며, 최적화된 퍼지규칙을 사용하여 외란이 있는 경우에 대해서도 성능을 평가하였다. 전산모사에 사용한 변수들은 표 2와 3에 보여주며, 전산모사 결과는 그림 5와 6에서 보여준다. 크레인이 가속하기 전에 로프가 1.2초 동안 먼저 가속되고, 로프가 정속에 이르면 크레인이 가속하게 된다. 이 때 흔들림이 신속하게 제거되며, 정속중에는 흔들림이 거의 없는것을 볼 수 있다. 정지구간에서도 감속에 따른 흔들림을 신속하게 제거함을 볼 수 있으며, 이 구간에서 0.5도의 외란을 인가하면 다소 느리게 흔들림이 감소되나 결국에는 제거되는 모습을 보여준다. 정지시에 가장 중요한 잔류속도도 거의 없는(0.1 cm/s 이내) 것으로 나타났으며 이송오차도 외란이 있는 경우나 없는 경우 불과 0.5 cm 이내로 나타났다. 또한, 로프의 길이도 가속과 정지구간에 변화시켰으나 제어 성능에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다.

표 2 전산모사에 사용한 변수값

구분	크레인	로프
이송거리(m)	10	1.5
정속도(m/s)	0.4	0.15
가속시간(s)	3	1.2
감속시간(s)	퍼지규칙에 관계	1.2
로프길이(m)	6	
외란(deg.)	0.5	
샘플링 시간(s)	0.3	

표 3 유전알고리즘에 사용된 변수값

염색체 개수	염색체열의 개수	교배율	돌연변이율	세대수	부모선정법	교배방법
20	81	0.9	0.1	100	roulette wheel	다점교배

5. 결론

본 논문에서는 원자력 산업 및 일반 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 크레인의 자동화를 위해 부가적으로 요구되는 장치 및 알고리즘들에 관해서 논하였다. 특히, 제한한 크레인 제어 알고리즘을 전산모사하여 성능을 평가한 결과 가속 및 정속 구간에서 크레인에 무리가 없는 비교적 부드러운 속도형태를 나타내면서 이송물의 흔들림을 제거함을 알 수 있었으며 목표지점의 오차도 거의 없음을 알 수 있었다. 외란이 인가되더라도 외란이 없

는 경우의 감속형태와 매우 유사하였으며, 이 경우에는 이송물의 흔들림을 제거하는데 약간의 시간이 추가적으로 소모되었으나 결국에는 흔들림을 제거시키는 성능을 나타내었다. 또한, 이송오차도 0.5cm 이내였다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 향후 좀 더 보완하고, 특히 AC 모터제어 기술의 발전이 따른다면 크레인 작업에도 무인화까지 가능하리라 여겨진다.

참고문헌

- [1] A. F. Moustafa and G. Abou-el-yazid, "Load Sway Control of Overhead Cranes with Load Hoisting via Stability Analysis", JSME, series C, vol. 39, no. 1, pp. 34-40, 1996.
- [2] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [3] E. Ohnishi, et al., "Automatic Control of an Overhead Crane", '84 IFAC, no. 66.3, pp. XIV-37 ~ XIV-42, 1984.
- [4] J. S. Yoon, B. S. Park, J. S. Lee, and H. S. Park, "Fuzzy Anti-Swing Crane", ANS, vol. 2, pp.35-43, 1994.
- [5] J. S. Yoon, B. S. Park, J. S. Lee, and H. S. Park, "Various Control Schemes for Implementation of the Anti-Swing Crane", ANS, vol. 2, pp. 472-479, 1995.
- [6] Yamada, Shin-ichi, et al., "Fuzzy Control of the Roof Crane", IECON Proceedings, vol. 4, pp. 709-714, 1989.

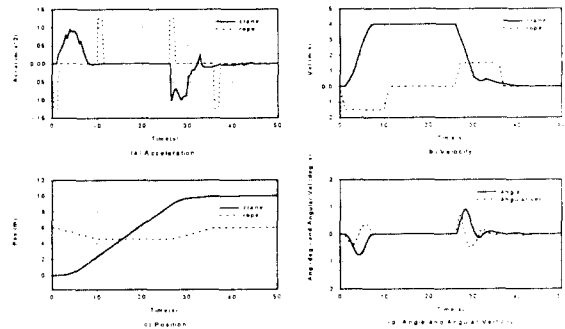


그림 6 최적화된 퍼지규칙을 활용한 크레인 주행 전산모사 (외란이 없는 경우, 가속과 정지구간에 로프 상하운동)

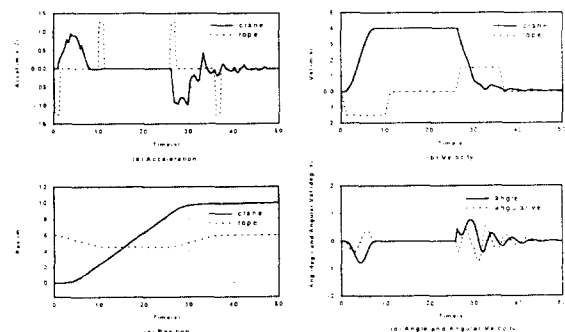


그림 7 최적화된 퍼지규칙을 활용한 크레인 주행 전산모사 (외란 0.5도 인가, 외란없이 최적화된 퍼지규칙 사용)