

자동 트랜스퍼 크레인의 위치보정 시스템

박경택, 박찬훈, 신영재, 강병수 (한국기계연구원)

Position Calibration System of Automatic Transfer Crane

K. T. Park, C. H. Park, Y. J. Shin (Research Dept. of IPM, KIMM)

ABSTRACT

Automatic Transfer Crane is needed for automation of container terminal. It requires the control capability of exact position for loading/unloading job in yard. But it has the limitation of improvement because it has the operational environmental and its structural problems.. It has the positioning errors caused by the deformation of rail, yawing motion of crane, wear of wheel, sliding motion between wheel and rail and so on. This study shows the calibration method of crane position by using the primitivity sensor and calibrating plate fixed on the ground.

Key Words : Automatic Transfer Crane (자동 트랜스퍼 크레인), Position Calibration (위치 보정), Encoder (엔코더), Primitivity Sensor (근접 센서), Ferrous Metal Sensor (페러스 메탈 센서), Photo Sensor (포토 센서)

1. 서론

자동화 컨테이너 터미널에서 무인운전을 하기 위해서는 기존에 운전자가 담당하였던 제어 작업에 관련된 시각적인 상대위치에 대한 정보수집을 센서들을 이용하여야만 하며, 자동화 크레인의 위치결정에서는 기존의 자동화 터미널에서 사용되고 있는 센서들을 개선하거나 혹은 새로운 센서의 사용을 통하여 ATC(Automatic Transfer Crane)에 적합한 시스템으로 개발하여야 한다. 또한, 자동화 터미널 야드에서 컨테이너의 적재 단수가 높아지고 ATC도 대형화가 되므로, 자동화에 사용되는 센서들은 측정범위가 확대되어야 한다. 이와 더불어 새롭게 발생하는 측정의 방해 요인도 극복할 수 있어야 하며, 기상 및 주야의 주변 작업환경 등에 영향을 받지 않는 시스템의 측정장치가 사용되어야 한다.

국내에서는 그 동안 많은 장비제작에 대한 경험을 많이 보유하고 있어 장비제작기술은 세계적인 수준을 갖고 있으나, 실외 측정 기술과 같은 자동화 관련 핵심기술의 확보는 부족한 상태이다. 또한, 무인으로 운전되는 ATC에 대한 개발 사례가 없어, 무인 운전되는 ATC의 위치결정에 관한 측정 기술도 전무한 상태이다. 따라서, ATC에 관련하여 무인운전을 위한 종합적인 기술의 확보를 위해서는

측정 및 보정 기술에 대한 연구가 요구되고 있다.

2. 시스템 구성

그림 1과 같이 주행 측정장치로 페러스 메탈 센서, 포토 근접센서와 로타리 엔코더를 이용하였고, 횡행 측정장치로 리니어 엔코더를 이용하였고, 권상·권하 높이 측정장치로 로터리 엔코더를 이용하였다. 측정장치들의 출력은 모터 제어와 연산기능을 가진 모터 드라이브인 T400으로 입력된다. 횡행 및 권상 정보는 T400에 입력된 측정장치의 출력을 그대로 크레인의 제어 시스템에 보내지만, 주행 정보는 T400에서 보정 알고리즘을 통해 보정한 후 ATC의 메인 제어 시스템에 보내어진다.

2.1 위치 보정 센서

2.1.1 Ferrous Metal Sensor

Ferrous Metal Detector는 어떤 페러스 메탈이 나타날 때마다 Low 레벨로 전환하는 디지털 출력을 제공한다. 출력은 내부 10 k Ω Pull Up 저항으로 NPN 트랜지스터를 낮추는 전류를 갖는 Open Collector이다. FM 디텍터는 센서 앞에서 자기장을 형성시키는 영구자석을 사용한다. 페러스 메탈이 센서의 자기장 안에 들어올 때, 디지털 출력은

낮아지고, 페러스 메탈이 제거 될 때 디지털 출력은 올라간다. 작동 및 출력 전원은 DC 8~24 V이다.



그림 1. Ferrous Metal Detector

2.1.2 Photo Primitivity Sensor

그림 8에서와 같이 근접센서는 페러스 메탈 센서가 갖는 자기장에 의한 단점을 보완하기 위해 대체 센서로 사용할 수 있다. Forked Photo Electric 센서는 PLC 어플리케이션을 위해 PNP 스위칭 출력으로 사용 및 출력 전압은 DC 10~30 V (200mA)이다. 주위 환경에 영향을 받지 않도록 보호하기 위해 단단한 금속과 Optics 덮개는 유리로 되어있다. LED를 통해 쉽게 작동상태를 알 수 있다. 센서의 응답시간은 0.2 ms이다.

2.1.3 Encoder

그림 2와 같은 엔코더를 크레인 주행 구동휠 축에 부착하여 주행거리를 계산하는데 사용한다. 휠의 회전운동에 의한 거리 계산은 휠과 레일 사이의 여러 가지 역학적 관계에 의해 오차 요인을 포함하고 있다. 그러므로, 휠의 회전운동에 의한 거리 계산은 오차에 대한 보정을 할 수 있는 기능이 필요하다. 24 bit Hollow-shaft Multi-turn Absolute Encoder 이며, 최대 8,192(13bit)의 1회전 Resolution을 갖으며 24 bit의 Multi-turn을 갖는다. 내장된 버튼이나 라인을 통해 Zero나 Setting Value로 값을 변환할 수도 있다. SSI (Synchronous Serial Interface)로 데이터를 출력하고 Encoder의 Configuration은 RS-422로 설정할 수 있다.

2.1.4 Encoder Data 보정 방법

Encoder의 Data를 RS-422 Configuration을 통해서 보정 및 셋팅 변경을 하기 위해서는 전용통신 프로그램을 이용하여 수정할 수 있다. 전용통신 프로그램을 통해서 미리 Zero나 Setting Value를 정해놓고 소프트웨어적으로 처리 할 수도 있고, 하드웨어적으로 버튼이나 신호선에 High 신호를 주어 처리 할 수 있다. 그러나, 현재 상황에서 통신 연결이 지속적으로 연결이 되는 것이 아니라 자주 끊기는 현상이 발생하고 있다. 이는 Encoder 공급업

체에서도 RS-422 통신이 불안정하다고 인정한 바이다. 전용 Configuration 프로그램을 사용하지 않고 Setting값을 바꿀 수는 있으나, 현재 통신 Command를 알 수 없는 상황이며 통신이 불안정하여 실험을 해볼 수도 없는 상황이다. 따라서, 만약 불안정한 통신을 해결되고 통신 Command들을 안다면 Encoder의 Data를 보정 혹은 리셋팅 하는 것은 어려운 일이 아니다.

Encoder의 통신속도는 9.6 kbps~38.4 kbps까지 지원한다. 1회전 최대 Resolution은 8,192($=2^{13}$)이다. Single Turn을 Setting(256~8,192)해서 원하는 위치에서 Encoder의 값을 입력받아 보정 및 수정함에 있어서 통신으로 데이터를 송신하려면 데이터 크기만 Single Turn 2 byte (high byte, low byte)와 Multi Turn 2 byte (high byte, low byte)가 필요하고, 통신 연결확인 Command 1 byte, Setting Value Change Address 1 byte, Check_Sum Command 1 byte로 총 7 byte가 필요하다. 이에 따른 전송시간은 최대 38.4 bps로 했을 경우 전송에 걸리는 시간은 1.46 ms이고 9.6 kbps로 했을 경우에는 5.83 ms이다. 그러나, 이것은 Encoder의 Return 신호를 무시한 수치이다. 수치상으로 보았을 때는 주행 중에 일정오차를 감수하고 Encoder의 값을 바꿀 수 있다.

정밀성은 떨어지나 1회전 Resolution을 1,024나 256으로 줄여서 하면 오차값도 줄어든다. 그러나 현재 통신상태가 불안정하여 통신이 끊겼을 경우 통신연결 확인 절차가 필요하다. 통신이 안정된 상태에서는 1.46 ms~5.83 ms의 송신 시간이면 충분히 Encoder의 Data값을 바꿀 수 있다. 그러나 통신이 불안정한 상태일 경우 연결될 때까지 기다려야 하는 시간이 있다. 이것은 통신 연결이 한번에 연결되는 것이 아니라 때로는 여러 번의 Command를 보내도 응답이 없는 경우가 발생해서 Real Time 및 신뢰성에 있어서 문제가 된다.

2.1.5 SPA3를 이용한 위치 데이터 검출

다회전 코드 디스크들의 출력은 4 bit(16step) Gray Code이다. 3개의 Code Disc를 갖는 다회전 Absolute Encoder의 최대 분해능은 $4,096 \times 16 \times 16 \times 16 = 16,777,216$ Steps (24 bit = 2^{24})이다.

Encoder의 데이터 출력은 SSI (Synchronous Serial Interface)로 데이터를 출력하기 때문에 데이터를 일반 PC에서 받아들일 수 있는 데이터 변환장치가 필요하게 된다. 이 SPA3이라는 장치는 고속의 Serial 데이터를 Parallel 데이터 방식으로 변환시켜주는 역할을 하며, 변환된 이 Parallel 데이터는 PC에 장착된 Digital Input Board를 통해서 데이터를 얻을 수 있다.

2.2 주행 위치 보정 시스템

그림 2와 같이 종동휠에 장착된 절대 회전 엔코더를 사용하여 주행 위치값으로 변환하는 과정에서 표 1과 같은 주행 위치 측정 오차가 발생한다. 이러한 오차 요인에 의하여 크레인 위치값 결정시 엔코더의 출력값이 설정값과 다르게 된다. 표 1의 ③, ⑤, ⑥ 및 ⑦ 항목은 주행거리와 상관없이 크레인이 정지할 때에 항상 발생하는 오차이고, ②항은 주행거리와 상관없이 변화는 오차로 크레인 위치결정의 정도에 가장 큰 영향을 미치게 된다. ①항과 ④항은 장시간에 걸쳐서 미소하게 발생하는 오차이므로 크레인의 정기적인 보정에 의하여 제거할 수 있는 오차들이다. 따라서, 절대형 회전 엔코더만을 사용하는 경우, 임의의 크레인의 위치결정 오차가 요구사항의 위치결정 정도 $\pm 10\text{mm}$ 이상이 될 수 있으므로, 절대형 회전 엔코더만을 사용하여 주행 위치측정을 하기엔 곤란하다.

표 1. 위치오차의 요인 및 추정치

번호	오차 요인	오차 추정치
①	운영중의 레일 진식도 변화	1.0 mm/m/year
②	크레인의 요잉(Yawing)	0.1 mm/m
③	휠(Wheel) 진원도	0.7 mm/rev
④	휠 마모, 즉 휠 반경의 감소	1.2 mm/m/year
⑤	레일과 휠의 접촉부에서의 Lost Motion	1.0 mm
⑥	레일과 휠 접촉부에서의 미끄럼	2.0 mm
⑦	엔코더의 읽기 오차	0.6 mm

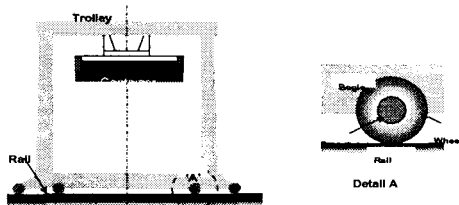


그림 2. 회전 엔코더 부착위치

에 설치되어 있는 보정판에 대해 초기 설치시 또는 정기적 보정시의 엔코더 절대 위치값(이하 설정값)을 할당한다. 그리고, 임의의 위치 결정점에서 크레인의 위치 보정은 다음과 같은 순서로 한다.

- ① 임의의 위치 결정점으로 크레인 감속 운전
- ② 크레인 서행 운전
- ③ 2개의 보정 센서 출력이 “ON”되면 크레인을 정지
- ④ 크레인 정지시 엔코더 출력값을 기존의 설정값으로 대체

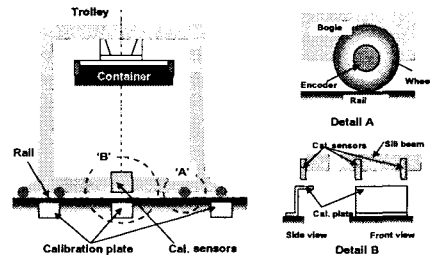


그림 3. 절대형 회전 엔코더와 주행 위치측정의 보정기기

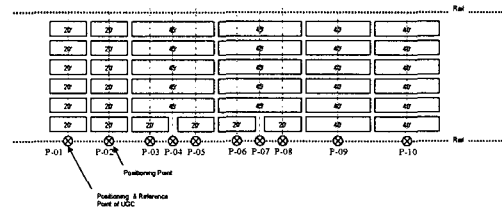


그림 4. 야드에서의 보정판 설치 위치

크레인이 서행 운전의 완료 시점에서 적어도 한 개의 보정 센서의 출력이 “ON”이 되도록 보정판의 길이를 설정하는 것이다. 표 2에서 정리하였듯이 대부분 실제 현장 상태와 운전 상태에 따라 나타나는 크레인의 요잉(즉 크레인의 스큐)에 의하여 주행 위치 측정 오차가 가장 크므로, 이론적으로 보정판의 크기를 설정할 수는 없다. 따라서, 보정판의 크기를 가능한 크게 하여 300 mm로 설정하고 현장 적용시 적정 치수를 선택하도록 한다.

3. 크레인 위치 보정 시스템 및 알고리즘

3.1 주행위치 보정 시스템 및 알고리즘

그림 3과 같이 보정 시스템으로는 크레인의 종동휠에 부착된 절대 회전 엔코더, 실빔(Sill Beam)에 부착된 보정 센서, 레일 근처의 야드의 크레인 위치 결정점에 설치된 보정판으로 구성된다. 그림 4와 같이 컨테이너 야드에서 크레인의 위치 결정점

4. Ferrous Metal 센서에 대한 실험장치 및 실험결과

4.1 실험장치 및 조건

보정 센서가 보정판을 통과할 때의 센서의 출력 특성을 시험하기 위하여 그림 5와 같이 보정판을 고정하여, 보정 센서가 보정판으로부터 일정한 거리로 떨어지면 보정 센서의 전원과 같은 크기의 출

력이 나오도록 하였다. 그리고, 일정한 거리 이하이면 0 볼트의 출력이 나오도록 하였다. 즉, 센서와 보정판 사이의 거리에 따라 디지털 출력이 나오도록 설정한 후, 센서를 X, Y 방향으로 이동시키면서 출력을 측정하였다. 측정실험 결과에 의하면, 보정판의 폭에 따라 출력의 전환되는 거리가 변하였다. 보정판의 폭이 40 mm 일 경우, 출력 전환점의 거리는 25 mm 이었고, 보정판의 폭이 70 mm 인 경우, 출력 전환점의 거리가 34 mm 이었다.

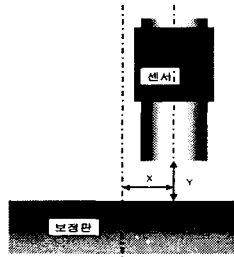


그림 5. 보정센서의 특성시험 장치

주행속도에 따른 보정 센서의 응답특성을 실험하기 위한 장치의 설치와 측정 시스템이다. 보정판을 회전원판 180° 간격으로 2곳에 설치하였으며, 보정판의 폭은 40 mm이다. 보정판과 보정 센서 간의 Y방향 거리는 20 mm 이다. 보정판의 회전속도는 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250, 300 m/min으로 변화시키면서 보정 센서의 출력을 측정하였다.

4.2 실험 결과

4.2.1 보정 센서와 보정판 폭 사이 간격에 대한 실험

그림 6은 보정판의 폭이 70 mm 인 경우이다. 보정 센서를 Y방향으로 20 mm 떨어져서 보정판 쪽으로 이동시키면 보정 센서의 중심이 보정판의 중심으로부터 X 방향으로 약 51 mm 떨어진 지점에서 출력이 변환됨을 알 수 있다. 출력 변환의 기울기가 보정판의 중심으로 떨어지면 떨어질수록 급경사를 이루고 있다. 실제 크레인에 보정 센서를 탑재한 경우에 발생하는 보정 센서의 Y방향 흔들림에 의하여 출력 전환점의 위치가 변동할 수 있으므로, Y 방향으로 높게 설치된 보정 센서의 경우에는 X방향에서의 출력 전환점 변동이 크게 나왔다. 그리고, Y 방향으로 낮게 설치된 보정 센서의 경우에는 X방향에서의 출력 전환점 변동이 작게 됨을 알 수가 있었다. 따라서, 보정 센서와 보정판의 충돌이 없는 범위 내에서 가능한 보정 센서와 보정판이 근접할 수 있도록 낮게 설치하여야 한다.

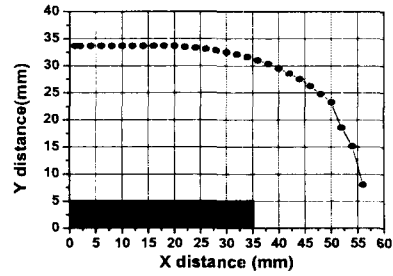
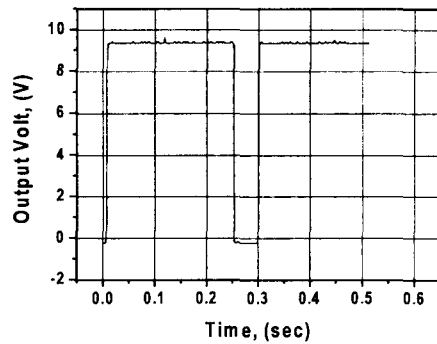


그림 6. X, Y 거리에 따른 보정센서의 출력결과

4.2.2 주행속도 변화에 따른 보정 센서의 출력 변화에 대한 실험

그림 7은 각각의 주행속도에서의 보정 센서의 출력을 나타낸 것이다. 주행속도 200 m/min 시험한 결과를 보면 보정 센서의 출력이 70% 수준에 도달하는 시간이 0.0005 sec 이하로 되어, 보정 센서 응답특성에 의한 위치오차는 무시할 수 있다.



- Start Time Delay : ≤100ms

자동 트랜스퍼 크레인의 최대 주행 속도가 180 m/min (3 m/s)의 사양을 가지므로 이에 대한 센서의 응답 및 시스템 Processing의 실시간 응답에 대한 실험을 하였다. 그림 8과 같이 두 보정판의 간격이 360mm를 갖는 원판을 회전속도 변화와 보정판의 폭을 변화시켜 실험을 하였다.

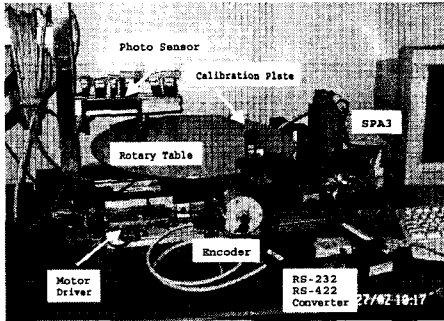


그림 8. 포토 센서 응답성 실험장치

5.2 실험 결과

5.2.1 포토 센서와 보정판 폭 사이의 실험

포토 센서의 신호검출을 위해 사용할 시편의 폭 크기를 결정하기 위해 사용한 시편의 폭을 10 mm, 20 mm, 30 mm 및 40 mm로 잘라서 사용하였다. 로타리 스테이지의 회전모터의 감소비 기어비(36:1)를 사용하였다. 실험에 사용된 회전속도는 7 rpm, 14 rpm, 21 rpm 및 28 rpm이고, 이 이상의 회전 속도에 대해서는 본 실험장치에서는 물리적 제한 때문에 할 수가 없었다.

그림 9는 시편 20 mm에 스테이지 회전수가 28 rpm일 때 32.5 ms의 출력 응답시간을 보여준다.

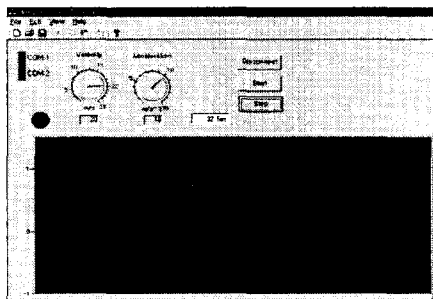


그림 9. 시편 20 mm 회전수 28 rpm

5.2.2 보정판 폭과 주행속도에 대한 응답시간의 실험결과

실험 결과는 그림 10과 같이 나타났다. 실험에 있어 사용한 모터의 성능이 최대 3m/s를 낼수 있는 토크가 부족하여 최대 2m/s로만 실험하였다. Y축은 보정핀으로 포토센서에서 발산하는 빛을 차단시키는 시간을 나타내고 있고, X축은 그때의 속도를 나타낸다. 보정판 12 mm를 사용하여 얻은 실험 결과에서 2 m/s 경우 약 7.9 ms이므로 응답 특성은 충분한 것으로 나타났다.

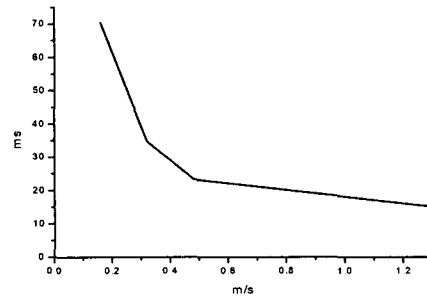


그림 10. 보정판의 폭 12 mm

표 3. 보정판의 폭 12 mm

V(m/s)	t(ms)
0.16	70.4
0.32	34.8
0.48	23.4
1.04	17.7
2	7.92857

6. ATC의 위치 보정 방법

포토 센서의 Switch Frequency가 2.5 Hz로 0.4 ms의 간격으로 800 ns 동안 신호를 발생시킨다. 따라서, 이론상 보정판의 폭을 결정하기 위해서는 0.4 ms 이상의 시간동안 신호를 차단하면 포토센서에서 이벤트 발생 신호를 출력할 수 있다.

- 차단시간 $t = 0.4 \text{ ms}$
- 최대 이동속도 $v = 300 \text{ m/min}$
- 보정판의 폭 $h = t \cdot v$
 $= 0.4 \text{ ms} * 300 \text{ m/min} = 2 \text{ mm}$

보정판의 폭이 최소 2 mm 이상이면 신호발생이 가능하나, 현재 포토 센서의 발광부의 렌즈의 크기가 4 mm이므로, 2mm의 보정판으로는 빛을 완전히 차단할 수가 없다. 렌즈의 크기를 고려

하여 현장 상황에 맞게 4 mm이상의 보정판을 사용하면 된다. 그러나 4 mm의 보정판도 빛의 발산이 0.4 ms 시간 지연을 갖기 때문에 최소 보정판의 폭과 렌즈의 크기를 고려하여 보정판을 6 mm 이상 되어야 한다.

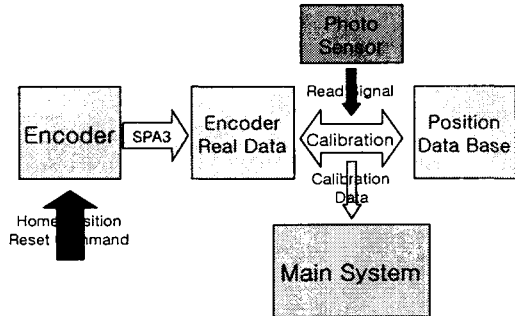


그림 11. Encoder Data Calibration

신호의 사용레벨은 포토센서의 경우 방해 장애물이 없을 경우 사용전압을 출력(실험에서는 24V를 사용)하나 방해 장애물 검출시 0V를 출력한다. 따라서 Falling Edge의 신호를 검출하여 Encoder의 값을 보정하면 보다 정확한 보정을 할 수 있다. Encoder의 데이터 출력측 통신은 문제가 없으나 Encoder의 값을 설정치로 보정 또는 변화시키기 위한 통신상태가 불안정하기 때문에 이것을 보완하기 위한 방법으로 Encoder의 데이터를 DB화하여 보정하는 방법을 제시한다. 크레인의 Home Position에서 Encoder를 리셋(Resetting) 시키고(하드웨어적으로 가능함, 소프트웨어적으로는 그에 맞는 하드웨어가 필요함) 그 외의 위치에서는 정지 상태에서 데이터를 읽고 DB와 비교하여 오차만큼 보정하면 된다.

Encoder에 자체 리셋 입력단자가 있기 때문에 신호(작동전원)를 입력하면 Encoder는 초기값으로 리셋이 된다. 하드웨어적으로 릴레이 스위치를 부착해서 사용할 수도 있고 만약 소프트웨어적으로 하게 된다면 Digital 출력이 가능한 보드를 사용하여 Digital 보드의 출력단자와 Encoder의 리셋 단자를 연결하여 Digital 출력보드를 제어하면 리셋이 가능하다. 소프트웨어적으로 사용하게 되면 부가적으로 Digital 출력보드가 필요하게 된다. 또한 보드의 출력이 Encoder의 리셋을 시키기 위한 전원 출력이 부족할 경우 전원을 증폭 또는 공급 가능한 장치가 필요하게 된다. 현재의 시스템 구성에 있어서 시스템을 간편화하기 위해서는 통신상태가 우수한 Encoder로 대체하여 시스템을 간편화 할 수 있고 프로그램도 단순화가 가능하다.

7. 결론

ATC 위치에 대한 보정은 시스템 구성에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있으나 현실적인 제약 조건을 고려하여야 한다. 주행의 경우 궤과 레일 사이의 관계에 따라 오차가 생기므로 이에 대한 보정은 지면에 절대 위치를 표시할 수 있는 보정판을 이용한다. 보정판을 통과할 때 엔코더의 위치 데이터를 보정을 하여야 한다. 크레인의 주행 위치 데이터를 보정하기 위해 엔코더 데이터를 변경하여야 하는데 이때 반드시 크레인이 정지되어야 한다. 동작 중에 엔코더 데이터를 변경할 시 엔코더 데이터 변경이 불안하게 이루어진다. 그리고 고속 주행 시 데이터 보정은 실시간으로 이루어져야 보정 오차가 적게 된다. 데이터 검출 시간과 통신 시간을 고려할 때 보정 시 주행 속도는 제한을 받을 수밖에 없다. 평행 시 보정은 리니어 스케일에 의한 위치 데이터를 검출하기 때문에 거의 필요가 없는 것으로 사료되지만, 항상 홈 위치에 대한 보정은 이루어져야 한다. 그리고, 이것은 과도한 동작이 많이 이루어지기 때문에 신뢰성을 갖는 홈 위치 보정이 이루어져야 한다.

후기

본 연구는 해양수산부/과학기술부의 지원으로 이루어진 첨단항만기술 개발사업의 일부입니다.

참고문헌

- [1]KIMM, HHI, "자동 트랜스퍼 크레인 설계 및 제어기술 개발," 해양수산부/과기부, 첨단항만핵심기술 개발사업, 3차년도 보고서, 2001.10.
- [2]KIMM, HHI, "자동 트랜스퍼 크레인 설계 및 제어기술 개발," 해양수산부/과기부, 첨단항만핵심기술 개발사업, 2차년도 보고서, 2000.10.