

자동화 컨테이너 터미널을 위한 컨테이너 트랜스퍼 크레인의 안티스웨이 시스템: Part II – 모델 크레인 및 실험 검증

Anti-Sway System for Container Transfer Crane for Automated Container Terminal: Part II – Model Crane Implementation and Verification

박경택*, 박찬훈, 김두형, 신영재
(KyoungTaik Park, ChanHun Park, DooHyung Kim, and YoungJae Shin)

Abstract : Automated container terminals have been being developed over the world for recent years and many countries are interested in it because the amount of containers exported or imported is rapidly increasing. The conventional container terminals were not designed to control this kind of heavily many containers. They would face many structural problems soon or later, although they have managed to do well so far. One of the most important things in developing automated container terminal is to develop the equipment able to handle many containers efficiently. Those are maybe automated transfer cranes, automatic guided vehicles, and automated quay-side cranes. The word “automated” means the equipment is operated without drivers and those equipments are able to work without any interruption in working schedule. Through the researches on the conventional transfer cranes, we decided that the structure of the conventional transfer cranes is not efficient in automated container terminal and it's not possible to handle so many containers in limited time. Therefore we have been studying on the proper structure of the automated container crane for past several years and a new type of transfer crane has been developed. Design concept and control method of a new type of transfer crane had been presented in the previous paper: Part I. Experimental features will be presented with a model transfer crane in this paper: Part II.

Keywords : automated container terminal, automated transfer crane, anti-sway system, sway sensor

I. 서론

저자 등은 문헌[1]에서 흔들림 방지 시스템을 트롤리 가속 조절형[2-7]과 강체 크레인 그리고 보조로프형 크레인[8]으로 분류한 후, 기존의 컨테이너 흔들림 제어 시스템의 장단점을 살펴보고, 새로운 개념으로 개발된 크레인의 기본적인 구조, 동역학적 모델링 그리고 제어알고리즘의 개발에 관하여 기술한 바 있다. 이 결과를 바탕으로 모형 크레인이 설계 및 제작되었고, 여기서 개발된 알고리즘을 실제로 트랜스퍼 크레인에 적용하여 그 유용성을 실험적으로 확인하였다. 본 논문에서 제안된 개념을 이용하여 제작된 모형 크레인을 소개하고, 실험결과를 바탕으로 새로운 개념의 크레인의 구조와 제어 방식이 매우 효과적임을 보이고자 한다.

II. 모형 크레인의 설계

1. 기본 구조

크레인은 컨테이너를 운반할 때 흔들림이 필연적으로 발생하게 된다. 이것은 컨테이너가 트롤리에 로프로 연결되어 움직이기 때문에 필연적으로 발생하는 현상이다. 그림 1의 좌측에는 기존 크레인의 개념도가 보인다. 이 경우 로프는 장력을 인가할 수 있지만 컨테이너의 진행 방향으로 힘을 인가할 수 없다. 이 때문에 흔들림을 억제 하기 위해서는 트롤리의 적절한 운전이 필요하게 된다. 그러나 하역작업을 위해서는 트롤리도 정해진 위치에 멈추어야 하기 때문에 이러한

방식의 흔들림 억제는 시간의 측면에서 효율적이지 못하다. 만일 수평방향으로 컨테이너에 힘을 인가할 수 있다면 컨테이너의 흔들림을 억제하기가 훨씬 쉬울 것이다. 이것이 기본적인 아이디어가 된다. 이를 위해서 그림 1의 우측에 보이는 구조처럼 메인 로프 이외에 보조로프를 추가로 설치하게 된다. 이 보조로프를 통하여 컨테이너에 수평방향의 힘을 인가할 수 있고 따라서 흔들림을 효과적으로 억제할 수 있게 되는 것이다. 보조로프에 힘을 인가하면 수평방향으로도 힘이 인가되지만 수직방향으로도 힘이 인가된다. 이때 수평방향의 힘은 컨테이너의 흔들림을 제어하는데 사용되지만 수직방향의 힘은 컨테이너를 들어올리게 되어 원하지 않는 결과를 가져온다. 극단적인 경우 보조로프의 장력에서 수직 분력의 합이 컨테이너의 하중보다 큰 경우 컨테이너의 권상 작업이 시작되는 것이다.

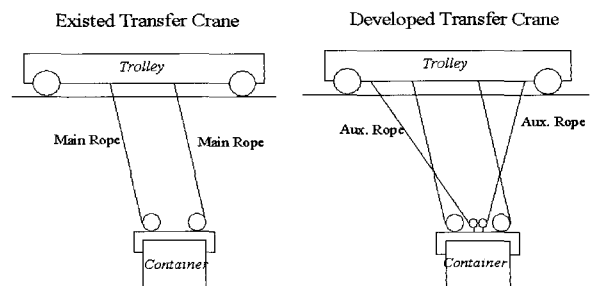


그림 1. 기존 트랜스퍼 크레인과의 비교를 위한 구성도.

Fig. 1. Schematic diagram for comparison between conventional transfer crane and developed one.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 10. 25., 채택확정 : 2004. 11. 11.

박경택, 박찬훈, 김두형, 신영재 : 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부(ktpark@kimm.re.kr/chpark@kimm.re.kr/kdh649@kimm.re.kr/yjshin@kimm.re.kr)

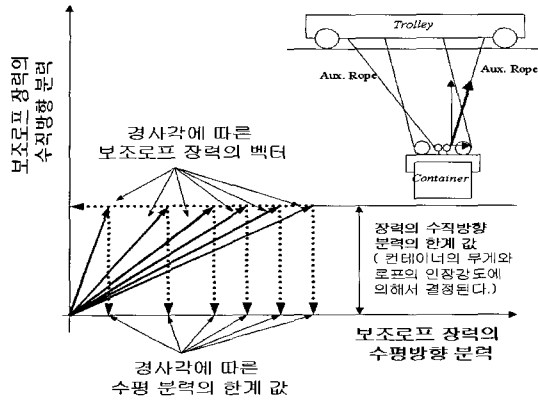


그림 2. 경사각, 보조로프와 보조로프 장력 관계.
Fig. 2. Inclination angles, auxiliary ropes and auxiliary rope tension.

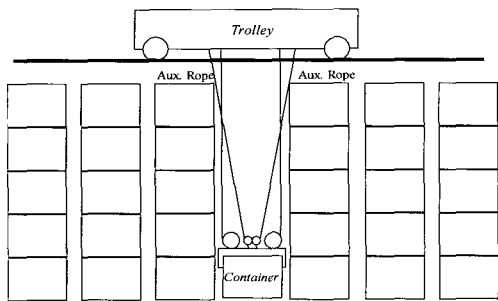


그림 3. 적재 컨테이너와 보조로프 사이의 간섭에 의한 보조로프 경사각 제한.
Fig. 3. Limit of the inclination angle of auxiliary ropes due to interference between stacked containers and auxiliary ropes.

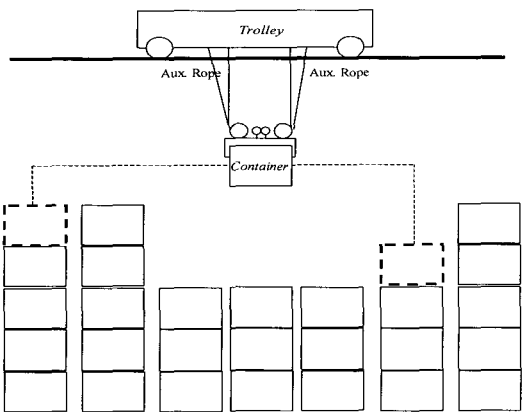


그림 4. 야드 트랜스퍼 크레인의 일반 궤적.
Fig. 4. General trajectory of yard transfer crane.

따라서 보조로프에 가할 수 있는 장력에는 한계가 있고 이 한계에 따라서 수평방향 분력의 크기에 한계가 존재하게 된다. 이 한계는 컨테이너의 무게, 보조로프의 인장강도에 의해 결정된다. 이 관계가 그림 2에 잘 나타나있다. 그림 2에서도 알 수 있듯이 보조로프의 경사각이 크게 설치될수록 보조로프를 통해서 제어할 수 있는 수평방향의 힘이 커지게 되므로 흔들림 제어가 용이하다.

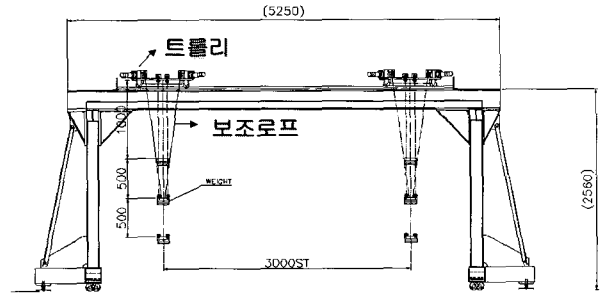


그림 5. 실험용 크레인의 구성도.
Fig. 5. Schematic drawing of experimental crane.

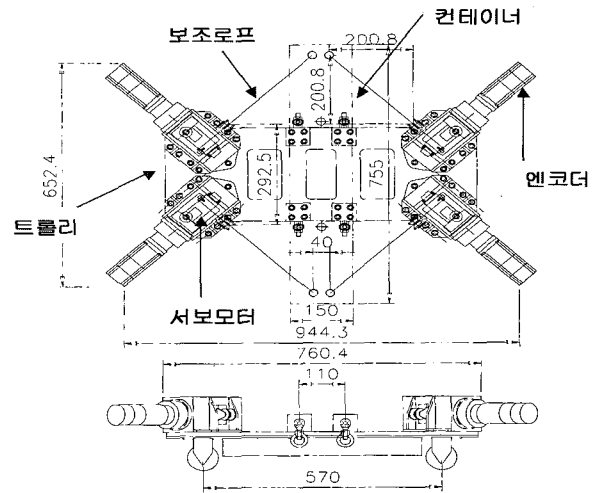


그림 6. 보조로프 제어를 위한 장치 구성도.
Fig. 6. Schematic drawing of apparatus for control of auxiliary ropes.

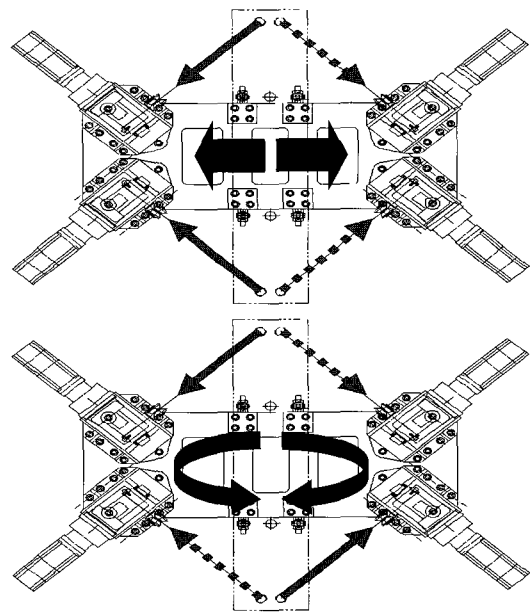


그림 7. 스웨이 제어 방식(상)과 스큐 제어 방식(하).
Fig. 7. Sway control method (upper), skew control method (lower).

그러나 보조로프와 야드에 적재된 컨테이너 박스의 간섭을 고려할 때 경사각에는 한계가 발생한다(그림 3). 따라서 야드에 얼마나 많은 컨테이너를 수직으로 적재할 것인가에 따라서 보조로프의 최대 설치 경사각이 결정된다. 본 연구에서는 그림 3과 같이 5단적을 고려하여 실험장치를 설계하였다.

2. 기구부의 설계

야드에서 사용되는 트랜스퍼 크레인의 경우는 그 운전형태가 안벽크레인과 많은 차이를 보인다. 즉, 안벽크레인의 경우는 컨테이너가 약 25m 정도의 로프에 매달려 길게 느려진 상태로 운전하게 된다. 그러나 야드에는 컨테이너들이 불규칙한 높이로 적재되어 있기 때문에 이와 같은 형태의 운전을 할 수 없다. 따라서 일반적으로 가장 높이 쌓여진 컨테이너와 충돌하지 않을 수 있는 높이까지 컨테이너를 들어 올린 상태에서 운전하게 된다(그림 4). 5단적을 하는 야드에서 사용되는 자동화 크레인을 고려할 경우 컨테이너는 안전을 위해서 6단 높이로 운전되게 되며, 이 경우 트롤리와 컨테이너는 약 3 ~ 7m의 간격을 유지하게 된다(크레인의 설계 방식에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다).

이와 같은 점을 고려하여 실험장치를 설계하였다(그림 5). 단순히 5단적의 경우에 대한 보조 로프의 각도만 고려하였으며 길이 축척에 대한 질량비는 고려하지 않았다. 부하는 트롤리의 하단부에 고정된다. 주행방향 및 횡행방향의 흔들림을 모두 억제할 수 있도록 보조로프 구동 장치 설계하였다. 그림 6는 트롤리 상부에 부착된 보조로프 구동 기구부를 위에서 내려다본 그림인데 구체적인 설계형태를 보여주고 있다. 보조로프는 각각 AC servo motor에 의해서 제어된다. 가까이 인접한 한 쌍의 모터를 이용해서 보조로프의 쌍을 감아거나 풀어 줌으로써 부하의 흔들림을 제어할 수 있다. 뿐만 아니라 이 구조의 장점은 흔들림의 제어뿐만 아니라 부하의 skew motion 또한 제어할 수 있다는 것이다.

즉 서로 대각으로 마주보는 한 쌍의 모터를 이용해 보조로프의 쌍을 풀어주거나 감아주면 컨테이너의 회전 자세를 제어할 수 있다(그림 7).

3. 흔들림의 측정

흔들림을 적절히 제어하기 위해서는 적합한 센서의 선택이 매우 중요하다. 본 연구에서는 IR sensor를 이용한 센서를 채택하였다. IR 발광부를 부하에 설치하고 이것의 흔들림을 IR sensor를 이용해서 측정한다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 발광 LED는 2개가 쌍을 이루는데, 하나는 master, 나머지는 slave의 역할을 한다. 그림 6의 중앙에는 실제 장착된 LED의 사진이다. master가 발광한 후 시간 간격을 두고 slave가 발광할 뿐만 아니라 각각의 LED는 modulation되어있는 패턴을 가지고 발광하기 때문에 하나의 센서로 두개의 LED의 측정이 가능하게 된다. 또한 2개의 LED가 사용되기 때문에 sway 뿐만 아니라 skew도 측정할 수 있다. 반드시 그림 8과 같이 컨테이너의 trim center에 LED를 설치하여야 한다. 그렇지 않을 경우 container의 trim motion이 흔들림으로 인식될 수 있다. 측정 정밀도는 0.001도이고 측정 결과는 RS232를 통해서 DSP로 입력된다. 실험에서는 100Hz로 흔들림 데이터를 측정할 수 있었다.

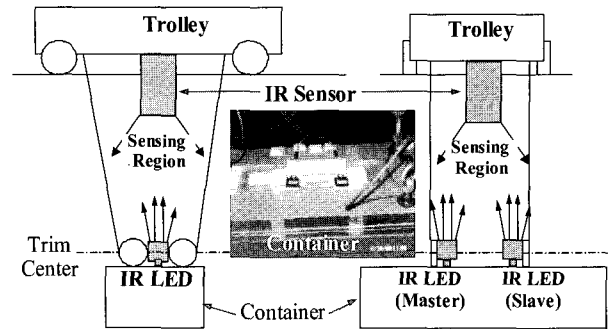


그림 8. LED와 IR 센서 장착 구성도.
Fig. 8. Schematic drawing of setting of pair of LED and IR sensor.

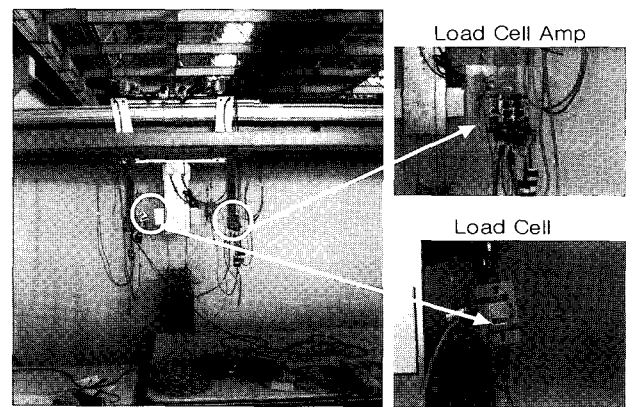


그림 9. 보조로프 장력 측정을 위한 로드 셀과 증폭기.
Fig. 9. Load cell and amplifier pair to measure auxiliary rope tension.

4. 보조로프 장력의 측정

흔들림을 효과적으로 제어하기 위해서는 보조로프의 장력을 정확히 측정할 수 있어야 한다. 이를 위해서 로드셀을 사용하였다. 보조로프를 절단하고 “ㄴ”자 형태의 로드셀을 절단된 보조로프의 양단에 연결한다(그림 7). 4개의 보조로프에는 모두 로드셀이 연결되어있다. 로드셀은 각각 2채널 Amp에 연결되어있는데, 각 로드셀의 측정 장력은 각각의 Amp는 0~10V의 출력으로 표현된다.

5. 제어시스템의 구성

9개의 서보모터와 5개의 엔코더, 4개의 로드셀, 1개의 IR 센서의 신호를 처리하기 위해서 PMAC을 사용하여 그림 10과 같은 구조로 제어기를 구성하였다. PMAC은 PC의 ISA슬롯에 장착되어 PC와 통신할 수 있다. 서보 모터의 제어는 PMAC에 내장된 엔코더 카운터와 D/A보드를 이용하였다. 4개의 로드셀 신호를 처리하기 위해서는 PMAC전용의 4채널 12bit A/D 보드를 이용하였다. IR센서는 RS232로 sway 및 skew 신호를 출력하기 때문에 PC에서 serial port를 사용해서 입력을 받는다. 이 신호들은 다시 PC에서 PMAC으로 ISA 슬롯을 통하여 전송된다. 따라서 IR센서로부터 PMAC으로 넘어가는 흔들림 정보는 실시간성을 보장할 수 없다. 따라서 IR센서의 최대 측정주파수가 200Hz이지만 실험에서는 100Hz이하로 사용하였고, 별다른 문제점이 발생하지 않았다.

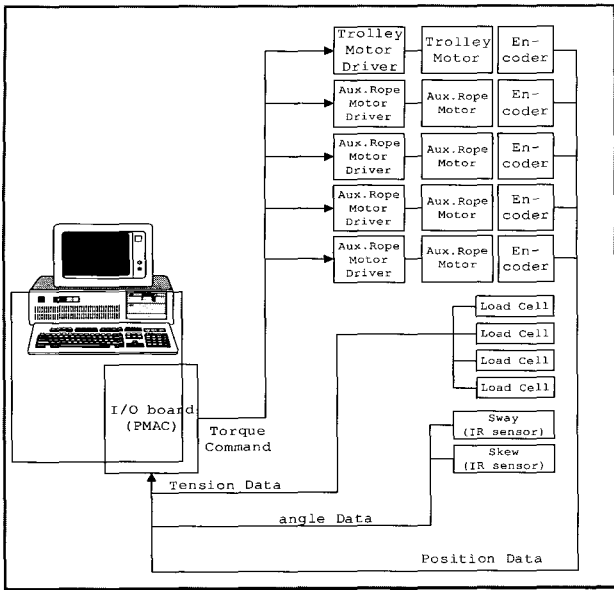


그림 10. 시스템 제어기 구성도.
Fig. 10. Schematic diagram of controller.

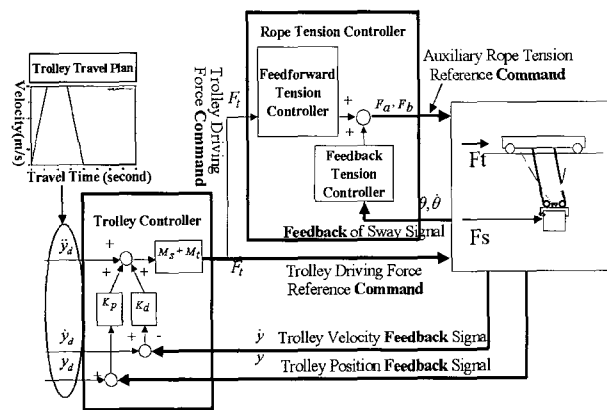


그림 11. 모델 크레인의 제어 알고리즘.
Fig. 11. Control algorithm for model crane.

제어알고리즘의 구조는 그림 11과 같다. 제어 알고리즘에 관한 상세한 내용은 PART II[1]에 기술되어있다. PMAC에서 그림11의 제어알고리즘을 구현하기 위하여 PLC프로그램이 사용되었다.

III. 실험 결과

이제 제작된 실험장치(그림 12)을 통하여 제안된 구조의 흔들림 방지 시스템의 유용성을 검토한다.

자동 운전과 수동운전에 대한 실험 결과가 소개된다. 자동 운전에서는 트롤리의 운전이 자동으로 수행되고, 수동운전에서는 운전자 임의로 트롤리를 운전하게 된다. 두 경우 모두에 있어서 rope tension controller(그림 11)는 IR 센서로 컨테이너의 흔들림을 감지해서 보조로프를 작동하여 흔들림을 자동으로 제어한다. 이와 같이 자동운전과 수동운전에 대한 결과를 모두 기술하는 이유는 제안된 방식의 흔들림 제어 구조

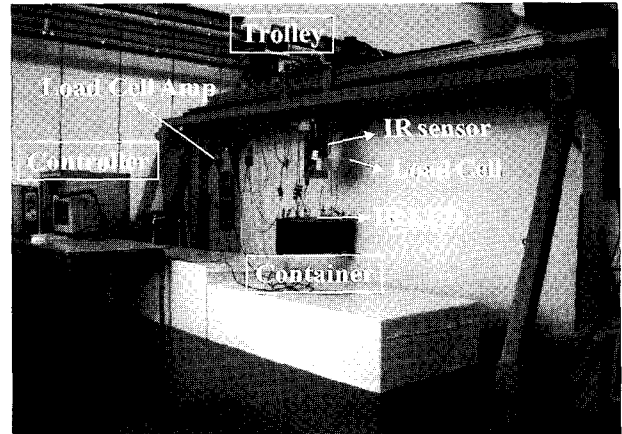


그림 12. 모델 크레인의 구조.
Fig. 12. Proposed structure of model crane.

가 매우 효과적이며 트롤리의 운전 패턴에 영향을 적게 받는다는 것을 보이기 위함이다.

1. 자동운전

자동운전에서는 1.5m를 3초 동안에 운전한다(그림 12). 이때 트롤리는 1.5초 동안 $0.67m/s^2$ 으로 가속하고 최고속도에 도착하자마자 다시 1.5초 동안 $0.67m/s^2$ 으로 감속하여 정지한다(그림 13). 실제 야드 크레인의 경우 일반적으로 최고 속도(항행속도)가 약2m/s까지 가능하도록 설계된다. 이때 실험장치와 동일한 가속도로 가속할 경우 3초 내에 최고속도에 도달할 수 있다. 그러나 야드에서는 부하를 권장하여 권장하기까지 트롤리가 운전되는 거리는 비교적 짧으며 따라서 실제로는 이와 같이 급격한 가속을 하는 경우는 드물다. 그림 13은 트롤리 위치를 보여준다. 트롤리가 위치 명령을 매우 우수하게 추종함을 볼 수 있다. 트롤리는 벨트 구동방식으로 구동되며 2개의 linear guide를 타고 움직이도록 설계되었는데 설치상의 문제로 이 linear guide가 직진성을 잃게 되어 매끄러운 움직임이 어렵게 되었다. 이 때문에 약 3초 이후에서 정지 에러가 발생한다. 그러나 이것은 단지 장비 제작 과정에서 야기된 문제임을 밝혀둔다. 그림 14는 트롤리가 주어진 속도 패턴을 잘 추종하고 있음을 보여준다. 그림 15는 트롤리의 진행방향 쪽의 2개의 보조로프에 걸리는 인장력을 보여주고 있다. 그림 16은 트롤리의 진행방향 반대쪽의 2개의 보조로프에 걸리는 인장력을 보여준다. 그림 17은 컨테이너의 흔들림 량을 meter단위로 보여주고 있다. 음의 부호는 트롤리 진행방향과 반대방향으로 컨테이너가 흔들리고 있음을 의미하며, 양의 부호는 반대의 의미이다. 흔들림 억제 과정을 정성적으로 표현하면 다음과 같다. 그림 15 ~ 17을 살펴보면 트롤리가 운전을 시작한 후 약 2초까지는 부하가 트롤리 진행방향과 반대방향으로 움직이기 때문에 트롤리 진행 방향쪽의 보조로프가 작동하여 부하의 흔들림을 줄인다. 2초부터 약4초까지는 부하가 트롤리의 진행방향으로 흔들리고 있으므로 트롤리 진행방향과 반대방향의 보조로프들이 작동하여 흔들림을 억제한다. 이후에는 잔여 흔들림이 남는데 이를 억제하기 위해서 약간의 장력의 변화가 나타난다.

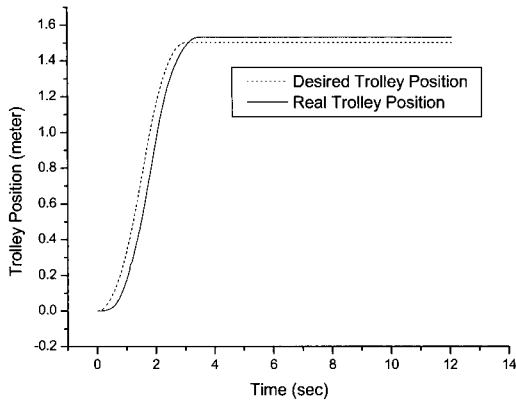


그림 13. 자동운전시 트롤리 위치 비교.
Fig. 13. Trolley position.

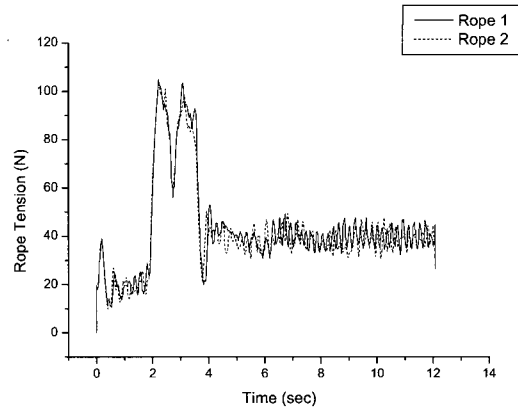


그림 16. 자동운전시 보조로프 장력 비교.
Fig. 16. Auxiliary rope tension.

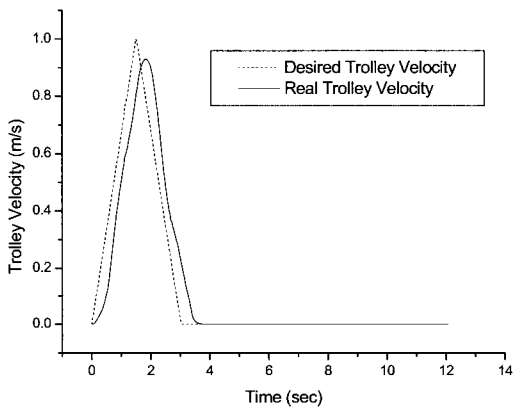


그림 14. 자동운전시 트롤리 속도 비교.
Fig. 14. Trolley velocity.

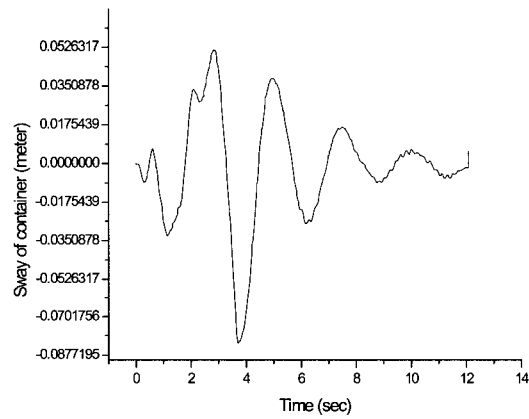


그림 17. 자동운전시 컨테이너의 스웨이.
Fig. 17. Sway of container.

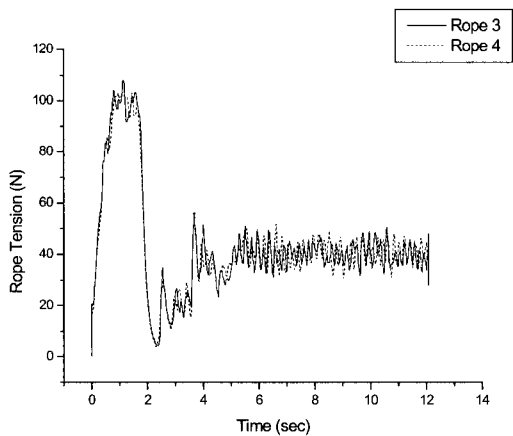


그림 15. 자동운전시 보조로프 장력 비교.
Fig. 15. Auxiliary rope tension.

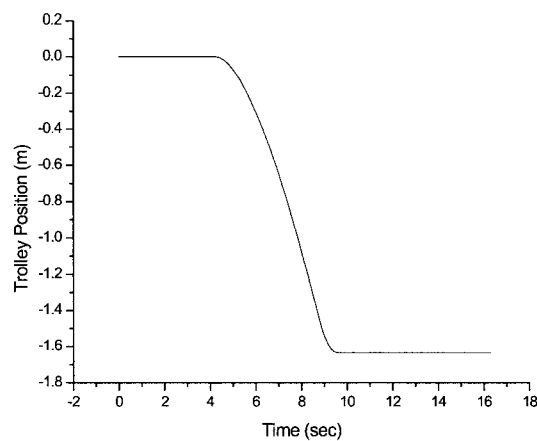


그림 18. 수동운전시 트롤리 위치.
Fig. 18. Trolley position.

그림 17을 보면 트롤리 움직임이 정지된 후(약 3.5초 지점) 한 주기 안에 흔들림이 급속히 감소됨을 알 수 있다.

2. 수동운전

자동화 항만에서 사용되는 크레인이라 할 지라도 수동운전이 필요한 경우가 발생 할 수 있다. 비규격 컨테이너를 취급해야 한다든지 비상상황이 발생한 경우 등에서는 수동운전이 필요하며 이때에도 흔들림 제어 장치가 작동할 수 있어야 할 것이다. 그림 18은 수동운전에 의해서 트롤리를 약 6초 동안 1.6m를 움직인 경우의 트롤리 위치의 궤적이다.

그림 19를 트롤리의 속도 궤적을 보여 주는데 약5초 동안 가속하고 약 0.5동안 급격히 감속하여 정지함을 의미한다. 그림 20, 21은 흔들림을 억제하기 위해 트롤리의 진행방향과 반대방향에 장착된 각각의 보조로프 쌍에 발생하는 장력을 보여준다. 그림 22는 컨테이너의 흔들림 량을 meter단위로 보여준다. 트롤리 정지 후 한 주기의 흔들림 후 흔들림이 급격히 감소 됨을 알 수 있다.

3. 개발 알고리즘의 실제 크레인에 적용

지금까지 개발된 알고리즘을 광양항 철송장에 설치된 실제 트랜스퍼 크레인에 장착하여 자동 적재 프로그램으로 5단적재 작업 및 5단 적재 사이에 컨테이너의 이동 작업, 실제 AGV 상에 컨테이너의 상하차 작업, 컨테이너 트레일러 상에 컨테이너의 상하차 작업, 컨테이너 상호 이동 작업 등 실제 컨테이너 터미널에서 요구하는 여러 작업동작에 대한 검정 시운전을 공동 개발한 현대중공업(HHI) 플랜트 사업부와 2003년도 11월 공동으로 시행하였다. 이 때 작업 환경은 악천후 조건으로 강풍 16m/s 하에서, 작업 동작에 대한 검정이 이루어졌으며, 시운전 결과로는 정확한 동작으로 작업에 조금의 오차도 발생하지 않았다. 이 때 국내 항만 관계자 300여명의 관중이 지켜보는 가운데서 이루어졌으며, 강풍 하에서도 완전 무인으로 5단 적재작업을 자유 자재로 하는 것이 세계적인 것으로 알려졌다. 강풍과 같은 외란에 의해 흔들림을 제어하는 데는 보조로프 제어가 아주 유용하게 사용될 뿐만 아니라 미세 위치 조정에도 아주 유용하게 사용되었고, 그리고 고단적 적재나 AGV적재에는 스프레더의 자동 랜딩 기능이 아주 유용할 뿐만 아니라 필수적이었다.

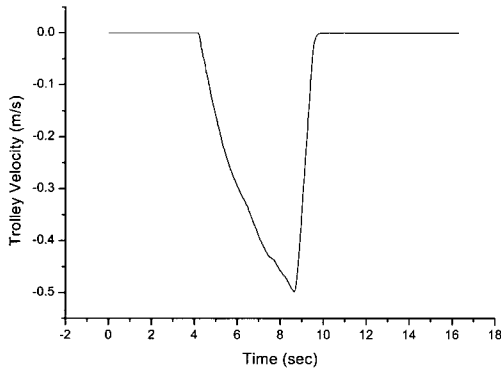


그림 19. 수동운전시 트롤리 속도.
Fig. 19. Trolley velocity.

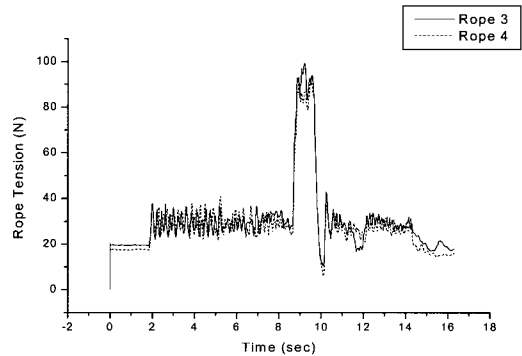


그림 21. 수동운전시 보조로프 장력.
Fig. 21. Auxiliary rope tension.

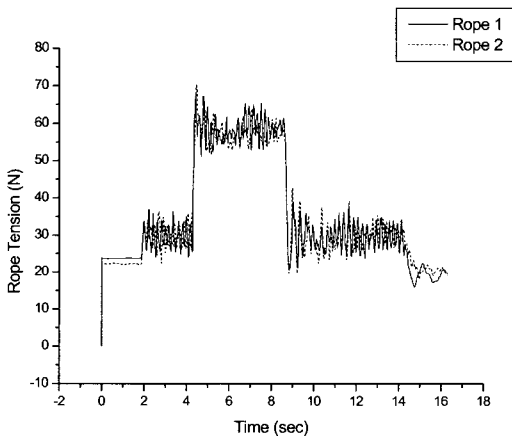


그림 20. 수동운전시 보조로프 장력.
Fig. 20. Auxiliary rope tension.

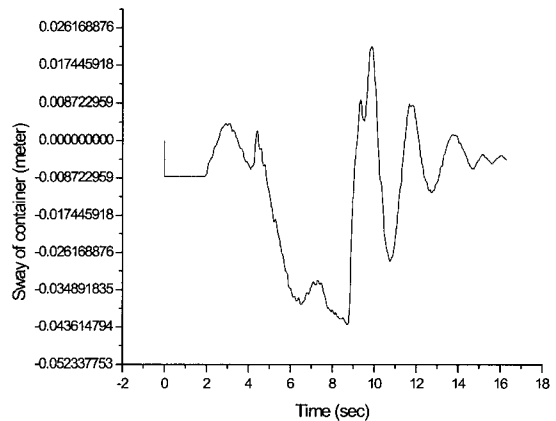


그림 22. 수동운전시 컨테이너 스웨이.
Fig. 22. Sway of container.

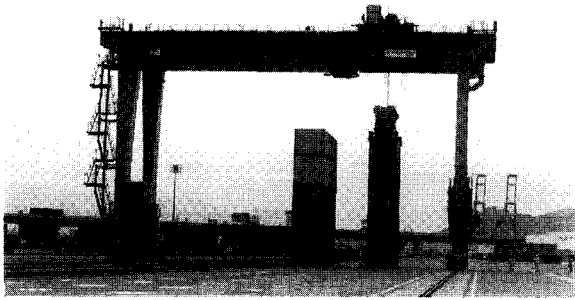


그림 23. 무인모드에서 5 단 적재작업.
Fig. 23. Stacking job of five tiers in unmanned process mode.

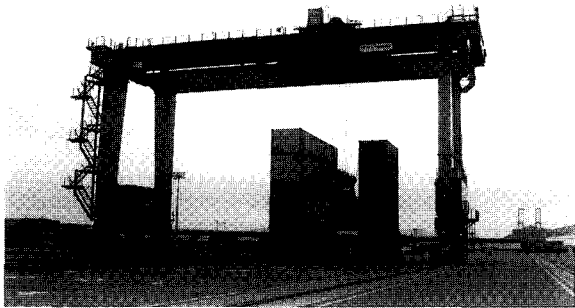


그림 24. 무인모드에서 5 단 컨테이너 사이에 컨테이너 적재 작업.
Fig. 24. Stacking job between five container tiers.

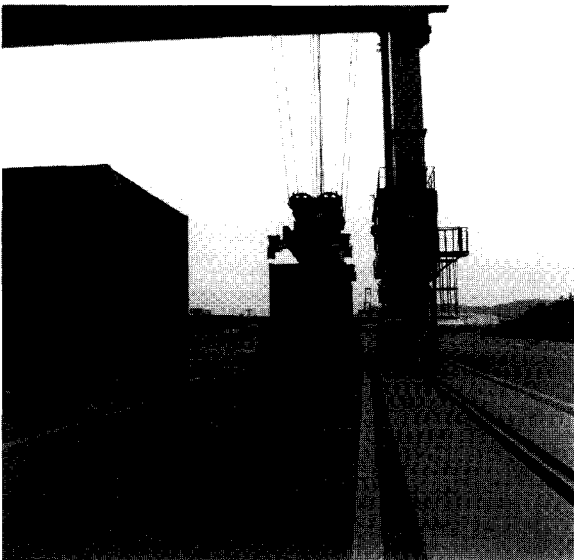


그림 25. 무인모드에서 AGV 상에 컨테이너 적재작업.
Fig. 25. Landing job on AGV in unmanned process mode.

IV. 결론

저자들은 문헌[1]에서 소개된 새로운 개념의 흔들림 억제 방식을 제안하고 크레인의 기본적인 구조, 동역학적 모델링 그리고 제어알고리즘의 개발에 관하여 기술한 바 있다.

본 논문에서는 이 결과를 바탕으로 모형 크레인을 실제로 구현하고 실험을 통하여 이의 유용성을 입증하였다. 자동운전과 수동운전에 관한 실험이 모두 이루어졌으며 매우 효과적인 흔들림 억제가 이루어 짐을 확인하였다. 개발된 알고리즘을 실제 컨테이너 터미널에 적용한 결과, 완전 무인으로 컨테이너 트랜스퍼 크레인과 AGV, 트레일러 등과 상호 협조 작업뿐만 아니라 약천후 하에서도 고단적재 작업이 흔들림 없이 완벽하게 이루어졌다.

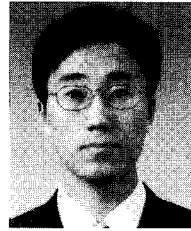
참고문헌

- [1] 박찬훈, 박경택, “무인 겐트리 크레인,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 696-699, 1999.
- [2] Moustafa, K. A. F. and edeid, A. M., “Nonlinear modeling and control of overhead crane load sway,” *J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Trans. of ASME*, vol. 110, pp. 266-271, 1988.
- [3] 이태영, “퍼지이론을 이용한 Overhead crane의 anti-sway 제어,” 경북대학교 기계공학과, 석사학위논문, 1995.
- [4] Shirai, “Development of electronic sway control system for container crane,” *Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, vol. 59, no. 561, pp. 113-117, 1993.
- [5] Date, T., Okawa, T., Yamaguchi, O., Nagai, H., Hakajima, T. and Matsumoto, N., “Anti-sway control system for container handling cranes,” *NKK Technical Report*, no. 150, pp. 56-60, 1995.
- [6] Y. Okubo, H. Hoshina, I. Murata, T. Monzen, and T. Toyohara, “Development of anti-sway control system for container cranes,” *MHI Technical Review*, vol. 32, no. 2, pp. 61-65, 1995.
- [7] M. Nakajima, O. Ume Fuji, K. Takeuchi, I. Murata, and A. Kuwabara, “Automatic control system of container cranes,” *MHI Technical Review*, vol. 27, no. 2, pp. 87-91, 1990.
- [8] 조대승, “컨테이너 크레인의 헤드블록 횡동요 해석,” 한국소음진동학회지, vol. 7, no. 5, pp. 765-772, 1997.
- [9] Z. Shiler and S. Dubowski, "Time optimal paths and acceleration lines of robotic manipulators," *Proc. of the 26th Conf. Decision and Control*, pp. 98-99, 1987.



박경택

1989년 신시내티 대학교 기계공학과 졸업(박사). 1991년~현재 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 책임연구원, 주요 업무는 로봇 및 자동화기술개발, 나노메카트로닉스.



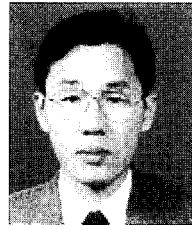
박찬훈

1996년 포항공과대학교 기계공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 선임연구원, 주요 업무는 로봇 및 자동화 기술 개발, 초정밀 위치 결정기구.



김두형

2003년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(박사). 1982년~현재 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 책임연구원, 주요 업무는 로봇 및 자동화기술개발, PDP 및 반도체 생산장비개발연구.



신영재

1987년 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사). 1987년~현재 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 책임연구원, 주요 연구개발 분야는 나노 메카트로닉스 기술 및 특수가공기술.