

외란 관측기를 이용한 모델 예견 기반의 전지형 크레인 자동조향 제어알고리즘 개발

Development of an Automatic Steering-Control Algorithm based on the MPC with a Disturbance Observer for All-Terrain Cranes

오광석¹ · 서자호^{2*}

Kwangseok Oh and Jaho Seo

Received: 08 Feb. 2017, Accepted: 30 Apr. 2017

Key Words : HModel predictive control(모델예견제어), Disturbance observer(외란관측기), Automatic Steering control(자동조향제어), Model error(모델오차)

Abstract: The steering systems of all-terrain cranes have been developed with various control strategies for the stability and drivability. To optimally control the input steering angle, an accurate mathematical model that represents the actual crane dynamics is required. The derivation of an accurate mathematical model to optimally control the steering angle, however, is difficult since the steering-control strategy generally varies with the magnitude of the crane's longitudinal velocity, and the postures of the crane's working parts vary while it is being driven. To address this problem, this paper proposes an automatic steering-control algorithm that is based on the MPC (model predictive control) with a disturbance observer for all-terrain cranes. The designed disturbance observer of this study was used to estimate the error between the base steering model and the actual crane. A model predictive controller was used for the computation of the optimal steering angle, along with the use of the base steering model with an estimated uncertainty. Performance evaluations of the designed control algorithms were conducted based on a curved-path scenario in the Matlab/Simulink environment. The performance-evaluation results show a sound reference-path-tracking performance despite the large uncertainties.

기호 설명

δ_i : i th steering angle, rad

K : observer gain

d : lumped disturbance

K_0 : correction gain

P : error weighting matrix

e_y : lateral error, m

e_ψ : yaw angle error, rad

T : sampling time, sec

$\delta_{1,opt}$: optimal steering output, rad

N : prediction step

a, b : weighting factors for output matrix

v_x : longitudinal velocity, m/s

L_{ab} : distance between a th and b th, m

* Corresponding author: seojaho@cnu.ac.kr

1 Department of Automotive Engineering, Honam University, 417 Eodeung-daero, Gwangsan-gu, Gwangju, 62399, Korea

2 Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, 99 Daehangno, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

Copyright © 2017, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

다축 전지형 크레인은 특수목적 차량으로 다양한 조향모드와 작업을 위한 기계장치가 있다. 일반 차량과 다르게 조향축이 많고 축간 거리가 길며 관성이

크기 때문에 주행 시 동적 반응성이 느린 것이 특징이다. 또한 주행과 함께 작업을 수행하는 중장비이고 60 kph 이상으로 주행이 가능하기 때문에 다양한 조향 전략이 적용되고 있고 일반주행 시 동적 안정성 확보를 위해 속도에 따라 다른 조향전략이 적용되기도 한다. 이런 크레인의 조향 특징은 운전자에게 주행 시 속도에 따라 적응하며 주행해야하는 부담을 줄 수 있고, 작업 시 크레인의 다양한 작업장치 자세 변화는 동적거동에 큰 영향을 주기 때문에 조향입력 결정에 불확실성이 존재하게 된다. 그러므로 운전자는 시변하는 크레인의 동적상태에 적응하며 주행해야하는 불편함과 이에 따른 주행안전 미확보로 치명적 사고를 발생시킬 수 있다. 이러한 치명적 사고를 줄이기 위해 크레인의 자동조향제어 시스템의 개발에 따른 상용화는 필수이며 운전 편의성과 주행안전성을 극대화하기 위해 자동조향제어 알고리즘의 최적화가 필요하다. 그러므로 크레인의 최적 자동조향제어 알고리즘 개발에 관한 다양한 연구가 수행되고 있으며 아래와 같다.

Wang은 중대형차량의 agility performance 향상을 위해 질량중심의 zero side-slip angle과 비례제어를 이용한 조향제어 기술을 새롭게 제안하였다.¹⁾ Li는 수송차량이 안정적으로 슬립 없이 정확한 조향제어가 가능하도록 networked control system(NCS)기반 multi-mode 조향제어 전략을 제안하였다.²⁾ Fei는 기존 ackerman steering과 skid steering 기법이 조합된 새로운 최적 조향모드를 제안하였으며 회전특성을 분석하였다.³⁾ Yang는 일반적인 예견 모델을 이용한 새로운 운전자 모델의 vehicle path-following strategy를 제안하였으며 실험적으로 검증하였다.⁴⁾

크레인의 자동조향제어 알고리즘을 개발하기 위해서는 수학적 모델이 필요하지만 동적반응성의 변화가 큰 크레인의 경우 고정된 수학 모델의 적용이 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 크레인의 자동조향제어를 위한 외란관측기 기반 모델 예견 조향 제어 알고리즘을 제안하였다. 외란관측기를 이용하여 대상 시스템과 조향제어를 위해 적용된 기본 모델의 오차를 추정하고, 추정된 오차와 기본 조향 모델을 이용하여 예견 제어 입력을 도출하였다. 제안된 제어알고리즘과 성능평가를 위한 제어 알고리즘과 크레인 모델은 Matlab/Simulink 환경에서 개발되었다. 평가결과 속도가 높은 주행조건에서 기본 모델과 대상 크레인 간의 큰 오차에도 제안된 조향제어 알고리즘은 강건한 경로추종 성능을 보여주었다. 본 논문의 구성은

다음과 같다.

2장에서는 연구 대상인 다축 전지형 크레인의 조향시스템에 대해 기술하고, 3장에서는 모델 예견 조향제어 알고리즘에 대해 기술한다. 4장에서는 성능평가 결과에 대해 분석하고, 마지막 5장에서는 요약 및 결론에 대해 기술한다.

2. 크레인 조향 시스템

본 연구의 대상 다축 전지형 크레인은 5축 조향 휠을 갖는 조향시스템이며 특수목적에 따라 road steering, crab steering, all wheel steering 등 다양한 모드가 있다. 본 연구에서는 일반 주행 시 사용되는 road steering 모드를 기준으로 알고리즘을 개발하였다. 2축 조향은 1축과 기계적으로 종속되어 있으며 road steering 모드에서 3, 4, 그리고 5축 조향은 종방향 속도가 증가함에 따라 단계적으로 조향이 고정되는 전략이 적용되었다. 크레인의 각 조향은 고정되는 조향을 제외하고 3축 선상에 순간중심이 위치하는 ackerman steering을 기반으로 결정된다. Fig. 1은 road steering 모드에서 크레인의 속도구간에 따른 조향전략을 보여준다.

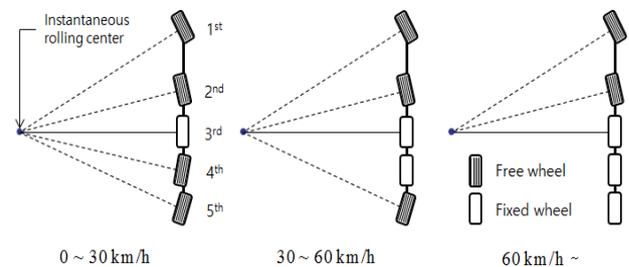


Fig. 1 Steering strategy: road steering mode

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 흰색 바탕의 휠은 고정된 휠을 의미하며 종방향 속도가 증가함에 따라 순차적으로 고정이 되는 전략을 확인할 수 있다. 이러한 전략은 속도가 높을수록 조향에 따른 횡방향 동적반응성을 상대적으로 낮게 만들어 동적반응성을 낮추는 것이다. 1축 조향과 기계적으로 연결되어 있는 2축 조향각은 운전자 입력인 1축 조향각과 선형적 관계가 있으며 아래 수식으로 표현될 수 있다.

$$\delta_2 = 0.5\delta_1 \tag{1}$$

$\delta_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 는 i 번째 축의 조향각을 나타내며

첫 번째와 두 번째 조향각은 정비례 관계에 있다. 다음 장에서는 모델 예견 조향제어 알고리즘에 대해 기술한다.

3. 모델 예견 조향제어 알고리즘

본 연구에서 제안한 전지형 크레인의 자동조향제어 알고리즘은 Model Predictive Control (MPC) 알고리즘을 기반으로 설계되었다. 크레인 전방에 있는 reference path와의 lateral error와 yaw angle error 그리고 크레인의 종방향 속도를 환경센서 및 내부센서를 이용하여 획득할 수 있다고 가정하였다. Fig. 2는 전방(preview point)에서의 오차를 나타낸다.

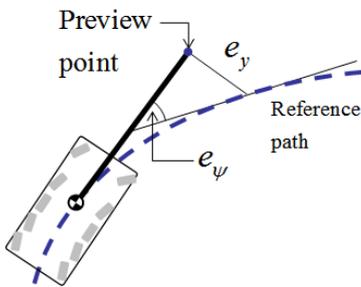


Fig. 2 Lateral and yaw angle errors

Mass center와 preview point까지의 거리($L_{preview}$)는 아래 수식과 같이 정의되며 t_p 는 preview time이다.

$$L_{preview} = t_p v_x \quad (2)$$

MPC는 대상시스템의 수학적 모델을 기반으로 예측을 통해 최적제어 입력을 도출하는 알고리즘이며 수학적 모델의 상태변수와 입력에 대한 제약조건을

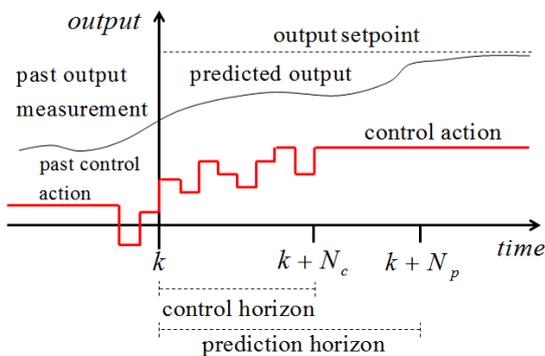


Fig. 3 Concept of model predictive control

고려한 최적제어 입력을 도출할 수 있다는 장점이

있다. 또한 대상 시스템의 동적 운동방정식 기반 예측을 통해 최적제어 입력을 도출하기 때문에 차량을 포함하는 다양한 기계시스템의 제어에 널리 사용되고 있다. Fig. 3는 사용된 MPC 알고리즘의 기본 개념도를 보여준다.

본 연구에서는 크레인의 첫 번째 조향입력 제어를 위해 MPC 알고리즘을 적용하였으며 대상 크레인의 실제 조향각 한계를 입력 제약조건으로 적용하였다. 사용된 대상 시스템의 추종오차에 대한 수학적 모델은 아래와 같다.

$$e_{k+1} = Ae_k + B\delta_1 + Fd \quad (3)$$

$$e = \begin{bmatrix} e_y \\ e_\psi \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & v_x T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ v_x T \\ L_{13} \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 \\ -T \end{bmatrix}$$

수식 (3)는 추종해야 할 reference path와 크레인의 preview point에서의 횡방향 변위와 선수각도의 오차를 상태변수로 사용하는 동적 상태공간 방정식이다. 일반적으로 경로추종에 사용되는 bicycle model 기반 error dynamics와는 다르게 ackerman steering 기반 크레인의 정상상태를 가정하여 도출되었다. 하지만 실제 크레인은 주행 시 정상상태가 아니기 때문에 수식에서 lumped disturbance term인 d는 본래 reference path의 요구 요 변화율(yaw rate)에 추가로 추종오차에 대한 불확실성을 포함한다. 그러므로 d는 수학적 모델과 실제 크레인 사이의 오차를 나타내며, 이는 본 연구에서 외란관측기를 이용하여 추정되었다. 다음 절에서는 MPC 알고리즘 설계에 대해 기술한다.

3.1 MPC 알고리즘 설계

MPC알고리즘을 이용하여 최적 조향입력을 도출하기 위해 아래와 같은 목적함수와 수식 (3)의 관측행렬을 정의하였다.

$$J = Y^T Y + r\delta^T D^T D \delta \quad (4)$$

$$y = C[e_y e_\psi]^T, C = \text{diag}([a, b], 0) \quad (5)$$

수식 (4)의 Y, D, r 는 각각 predictive output, difference matrix, weighting factor이다. 수식 (3)의 시스템행렬(A), 입력행렬(B), 외란행렬(F)을 이용하면 predictive output를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$Y = Qe + HU + F\delta_1 + MW + Pd \quad (6)$$

Q, H, U, F, M, W, P 는 수식 (3) 기본 모델의 A, B, C, F 로 구성된 예측된 결과값으로 구성된 행렬이며 아래와 같이 도출된다.

$$Q = [CA \ CA^2 \ \dots \ CA^N]^T$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-2}B & CA^{N-3}B & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$U = [\delta_{1,k+1} \ \delta_{1,k+2} \ \dots \ \delta_{1,k+N}]^T$$

$$F = [CB \ CAB \ \dots \ CA^{N-1}B]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ CF & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-2}F & CA^{N-3}F & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = [d_{k+1} \ d_{k+2} \ \dots \ d_{k+N}]^T$$

$$P = [CF \ CAF \ \dots \ CA^{N-1}F]^T$$

도출된 predictive output을 정의된 목적함수 J 에 적용하고 목적함수에서 상수로써 의미 없는 값들을 제거하면 아래와 같이 quadratic 형태로 정리될 수 있다.

$$J = \frac{1}{2} U^T G U + f^T U \tag{7}$$

수식 (7)의 G 와 f 는 아래와 같이 정의된다.

$$G = rD^T D + H^T H \tag{8}$$

$$f = H^T(Qe + F\delta_1 + MW + Pd) \tag{9}$$

Quadratic 형태로 도출된 목적함수의 최적해를 도출하기 위해 J 를 예견입력 U 에 대해 미분하면 N 개의 예측된 해(조향입력)가 도출되며 MPC 알고리즘에서는 첫 번째 해를 최적 조향각로 사용하였다. 최적해를 구할 때 입력에 대한 구속조건으로 조향각의 물리적 제한 각도를 적용함으로써 현실적인 조향각도가 도출될 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 제어 알고리즘은 Matlab/Simulink 환경에서 구성되었으며 설계된 MPC 알고리즘의 최적해는 Matlab의 quadprog 함수를 이용하여 도출될 수 있도록 설계하였다. 다음 절에서는 수식 (3)에서 정의된 외란 d 를 추정하기 위한 외란관측기에 대해 기술한다.

3.2 외란 관측기 설계

합리적인 제어성능 확보를 위해 수식 (3)에서 정의된 lumped disturbance d 를 외란 관측기를 이용하여

추정하였다.⁹⁾ 설계된 외란 추정기는 disturbance observer와 state observer의 두 가지 요소로 구분되며 disturbance estimation correction 단계를 통해 최적의 추정결과를 도출하게 된다. 외란 추정을 위해 정의된 관측기의 형태는 아래와 같다.

$$\dot{e} = Ae + B\delta_1 + F\hat{d} + K(e - \hat{e}) \tag{10}$$

수식 (10)와 수식 (3)를 이용하여 error dynamics를 도출하면 아래와 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{e}_o = A_k e_o + B e_d \tag{11}$$

수식에서 e_o 는 $\hat{e} - e$, e_d 는 $\hat{d} - d$, 그리고 A_k 는 $A - K$ 이며 observer gain K 는 A_k 를 Hurwitz가 되도록 선택하였다. 다음의 수식은 precorrection과 estimation correction 두 가지 단계로 구분된 외란 추정단계를 나타낸다.

$$\dot{e}_{d_0} = \dot{\hat{d}}_0 = -B^T P e_o \tag{12}$$

$$\hat{d}(t) = \hat{d}_0(t) - K_0 e_o \tag{13}$$

첫 번째 단계인 수식 (12)는 외란이 상수임을 가정하여 외란을 precorrection하는 과정을 나타내며, 두 번째 단계인 수식 (13)은 동적 외란에 대한 correction 과정을 나타낸다. 두 가지 correction 단계를 거쳐 추정된 외란은 MPC 알고리즘에서 단순화된 모델과 실제 크레인 모델과의 오차로 적용되었다. 다음 장에서는 개발된 모델 예견 조향제어 알고리즘의 경로추종 성능평가 결과에 대해 기술한다.

4. 조향 제어기 성능평가

외란관측기 기반 모델 예견 조향제어 알고리즘의 성능평가를 위해 curved path 시나리오에서 상대적으로 큰 오차를 갖는 높은 속도에서 경로추종 오차를 비교 및 평가하였다. 속도조건은 MPC 알고리즘에서 사용된 기본 모델과 오차가 가장 큰 속도로 65 kph로 정의하여 성능평가를 수행하였으며 Fig. 4은 사용된 curved path와 preview point에서의 횡방향 오차와 각도오차를 나타낸다. Preview point는 조향제어 속도에 따른 일정한 앞부분으로 고정된 값으로 정의하여 성능평가를 수행하였다.

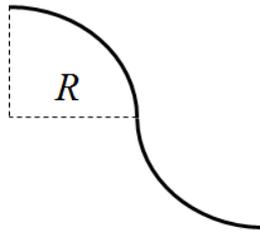


Fig. 4 Curved path

R 은 curved path의 선회반경으로 40 m이다. Fig. 5는 성능평가를 위해 구성된 모델 구성도이다.

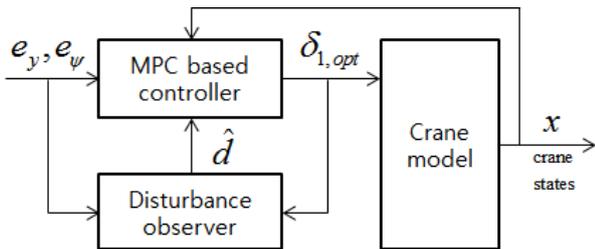


Fig. 5 Model schematics: performance evaluation

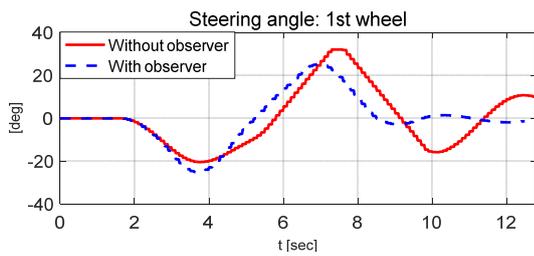
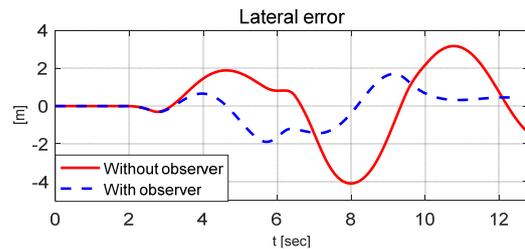
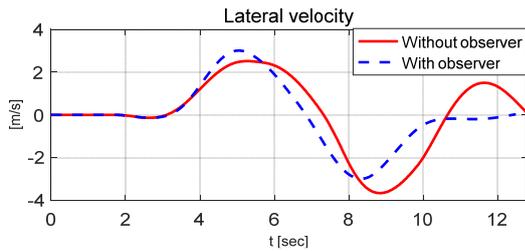


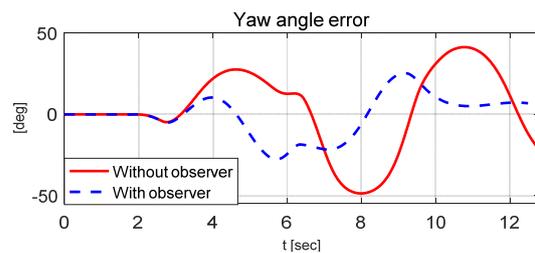
Fig. 6 Results: Steering angle - 1st wheel



(a) Lateral error

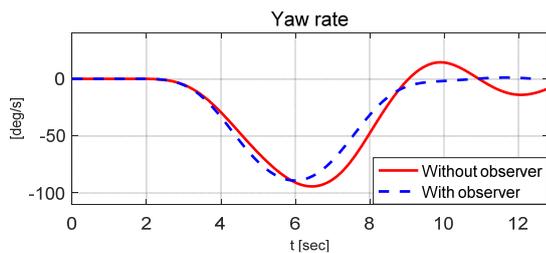


(a) Lateral velocity



(b) Yaw angle error

Fig. 8 Results: errors



(b) Yaw rate

Fig. 7 Results: dynamic behavior

성능평가를 위해 사용된 crane model은 bicycle model을 기반으로 도출된 선형 수학적 모델이며 60톤 급 실제 다축 전지형 크레인의 물성치가 적용되었다.⁶⁾ MPC 알고리즘의 prediction step N 은 15로 설정되었으며 0.1초 마다 최적해를 도출할 수 있도록 제어기를 설계하였다. Fig. 6, 7, 8, 9, 10은 조향제어 알고리즘의 성능평가 결과(조향각, 동적거동, 오차, 추종경로)에 대해 나타낸다.

Fig. 6과 7에서 볼 수 있듯이 외란 관측기를 적용한 조향제어기가 조향제어 입력을 적게 사용하면서 크레인의 lateral velocity와 yaw rate의 진동특성을 상대적으로 안정화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 lateral velocity의 최댓값은 외란관측기를 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 4초~6초 사이에서 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 MPC 조향제어 알고리즘에서 상태변수의 가중치 적용에 따라 달라지는 결과이므로 향후 상황에 따라 가중치를 최적화 할 계획이다.

경로추종 오차의 경우 외란추정기가 적용되지 않은 모델 예견 조향제어 알고리즘 대비 적용된 외란추정기 기반 예견 조향제어 알고리즘이 적용된 추종 오차의 결과가 (lateral error 및 yaw angle error의 최대 절댓값) 약 50% 감소하는 것을 확인할 수 있다. (Fig. 8과 Table. 1 참조)

Table 1 Summary of path tracking errors [max]

Errors	Absolute Max value	
	without observr	with observr
Lateral [m]	3.18 m	1.71 m
Yaw angle [deg]	41.37 deg	25.30 deg

또한 진동특성 또한 안정화되며 보다 정확한 경로추종이 가능하였음을 확인하였다. 아래 Fig. 9과 10은 추정된 외란 값과 성능평가 시나리오에 따른 크레인의 추종경로를 reference path와 보여준다.

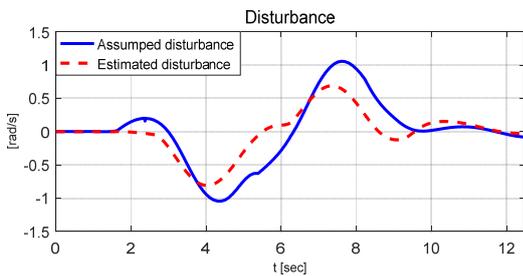


Fig. 9 Results: estimated disturbance

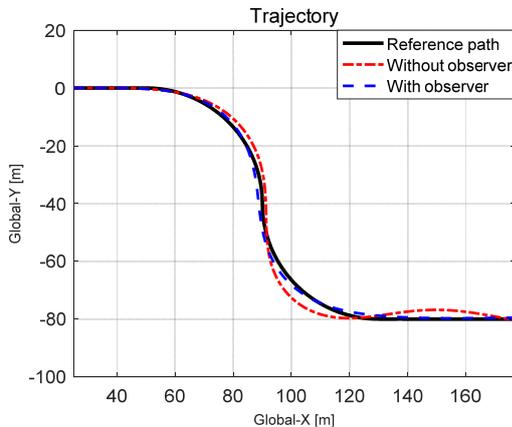


Fig. 10 Results: trajectory

외란관측기가 적용된 경우와 적용되지 않은 알고리즘의 성능비교결과 크레인의 curved path에 대한 경로추종 결과 외란관측기가 적용된 모델 예견 조향 제어 알고리즘이 적용되지 않은 알고리즘에 비해 추종오차가 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이는 추정된 외란이 MPC 알고리즘에서 사용한 기본 수학 모델과 크레인 모델의 오차를 합리적으로 추정하여 최적 조향각을 도출하였다는 것을 의미한다. 속도가 빠를수록 크레인의 3,4,5축 조향각이 고정되면서 조향입력에 따른 동적 반응성이 느려지고 적용된 기본 모델과의 오차가 커지지만 설계된 외란 관측기

에 의해 합리적으로 MPC 알고리즘 기반 최적 조향각이 결정되었기 때문에 경로추종 성능을 향상시킬 수 있었다. 하지만 개발된 모델 예견 조향제어 알고리즘은 curved path에서만 성능평가가 이루어졌으며 고정된 preview time을 이용하여 전방의 오차정보를 획득하여 제어알고리즘이 설계되었기 때문에 향후 다양한 시나리오 기반 성능평가와 최적 preview time을 실시간으로 결정하는 알고리즘을 개발하고 적용하는 것을 계획하고 있다. 다음 장에서는 본 논문의 향후 계획과 함께 결론을 기술한다.

5. 결 론

다축 전지형 크레인에는 다양한 조향모드가 있으며 일반적으로 주행 시 속도가 높아질수록 안정성 확보를 위해 휠이 고정되는 특징이 있다. 이는 크레인의 동적 반응성을 느리게 하며 동적거동에 영향을 주기 때문에 운전자가 크레인의 동적상태 변화에 따른 적응이 필요하다. 이는 운전자에게 불편함과 그에 따른 주행안전 미확보로 치명적 사고를 유발할 수 있기 때문에 운전 편의성과 안전성 확보를 위해 조향성능을 향상시킬 수 있는 자동제어 알고리즘 개발이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 자동조향제어를 위한 기본 모델과 외란관측기를 이용하여 기본 모델과 실제 크레인 모델과의 오차를 추정하였고 추정된 값을 모델 예견제어 알고리즘에 적용하여 최적 조향각을 도출하였다. 자동조향제어 알고리즘의 성능평가를 위해 bicycle model 기반 크레인의 수학적 모델을 이용하였고, 실제 60톤 급 대상 크레인의 물성치를 적용하여 현실적인 평가를 수행하였다. 조향제어 알고리즘과 성능평가는 Matlab/Simulink 환경에서 개발되고 수행되었으며 평가결과 외란추정기 기반 조향제어 알고리즘이 외란추정기가 적용되지 않은 조향제어 알고리즘에 비해 상대적으로 최적조향입력을 적게 사용하면서 좋은 경로추종 성능을 확보할 수 있었다. 경로추종 오차 절대값의 최대값은 약 50% 감소하였으며 동적거동의 진동특성이 안정화되었음을 확인하였다. 성능평가는 40 m 회전반경의 curved path에서 상대적으로 수학적 모델의 오차가 큰 높은 속도 65 kph에서 수행되었다. 본 연구에서 개발된 알고리즘은 고정된 preview time이 적용되었기 때문에 향후 경로추종 성능 최적화를 위한 실시간 최적 preview time을 결정하는 알고리즘 개발을 계획하고 있으며 다양한 시나리오에서의 성능평가와

실차실험 준비를 계획하고 있다. 본 연구에서 제안된 모델 예견 조향제어 알고리즘은 향후 다양한 특수목적 중장비의 특수목적 수행과 동시에 주행이 가능한 완전 자율주행을 위한 경로추종 알고리즘으로 확대 적용이 가능할 것으로 예상된다.

References

- 1) S. Wang et al. "Steering performance simulation of three-axle vehicle with multi-axle dynamic steering", IEEE Vehicle power and propulsion conference, pp. 1-5, 2008.
- 2) Y. Li et al. "Network-based coordinated motion control of large-scale transportation vehicles", IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 12, No.2, pp. 208-215, 2007.
- 3) G. Fei and L. Xue-yuan, "Turning characteristic study of multi-axle compound steering vehicle", Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), IEEE Conference and Expo, pp. 1-5, 2014.
- 4) C. Yang et al, "A new vehicle path-following strategy of the steering driver model using general predictive control method", Proc IMechE Part C: J Mechanical Engineering Science, pp. 1-10, 2016.
- 5) C. Liu and H. Peng, "Disturbance observer based tracking control," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 122, No. 2, pp. 332-335, 2000.
- 6) K. Oh et al, "LQR-based Adaptive Steering Control Algorithm of Multi-Axle Crane for Improving Driver's Steering Efficiency and Dynamic Stability", 16th International Conference Control, Automation and Systems, Oct 16-19, 2015 in HICO, Gyengju, Korea, pp. 792-796, 2016.