

## 4륜조향 자율주행로봇의 최적속도에 관한 연구

김 미 옥<sup>1)</sup> · 이 정 한<sup>1)</sup> · 유 완 석<sup>2)</sup>

부산대학교 메카트로닉스협동과정<sup>1)</sup> · 부산대학교 기계공학부<sup>2)</sup>

### A Study on the Optimum Velocity of a Four Wheel Steering Autonomous Robot

Miok Kim<sup>1)</sup> · Junghan Lee<sup>1)</sup> · Wansuk Yoo<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Interdisciplinary Cooperative Course of Mechatronics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2)</sup>School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Received 31 October 2008 / Accepted 16 March 2009)

**Abstract** : A driver-vehicle model means the integrated dynamic model that is able to estimate the steering wheel angle from the driver's desired path based on the dynamic characteristics of the driver and vehicle. Autonomous driving robot for factory automation has individual four-wheels which are driven by electronic motors. In this paper, the dynamic characteristics of several four-wheel steering systems with the simultaneously steerable front and rear wheels are investigated and compared by means of the driver-vehicle model. A driver-vehicle model is proposed by using the PID control to velocity and trajectory of control autonomous driving robot. To determine the optimum speed of a autonomous driving robot, steady-state circle simulation is carried out with the ADAMS program and MATLAB control model .

**Key words** : Four-wheel steering system(4륜조향시스템) Desired path(요구경로), PID controller(비례-적분-미분 제어기), Steady-state conering(정상원선회)

### 1. 서 론

지능형로봇이란 외부환경을 인식하고 스스로 상황을 판단하여 자율적으로 동작하는 로봇을 말한다. 이러한 지능형 로봇은 사무실이나 공장 그리고 국방산업분야에서 무인화의 일환으로 많이 사용되고 있다. 공장의 경우 일정단위의 제품을 한 장소에서 다른 장소로 운반하는 무인운반 시스템을 통해 생산단가증가 문제를 극복하고 생산성 향상을 위해 활용 된다. 이에 자율주행이 가능한 공장용 지능형 주행로봇에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 고령화와 노동력 부족에 따라 지능형 로봇에 대

한 사회 및 경제적 요구가 증대됨에 따라 지능형 로봇을 가능케 하는 기술은 그 중요성이 더욱 높아지고 있다.<sup>1)</sup>

공장용 무인자율주행로봇은 공장 내에서는 주어진 경로를 따라 이동하며, 공장 외부에서는 자율주행을 한다. 그리고 좁은 공장 내에서 자유롭게 이동할 수 있도록 전방향성 타입으로 설계되었다. 4개의 구동모터가 바퀴에 직접 연결되어 독립적으로 구동하고, 4개의 조향시스템이 바퀴를 조향하여 기동성을 향상시킨다. 공장 내의 좁은 주행경로와 로봇의 선회성능 향상을 고려할 때 4륜조향 시스템은 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 실제와 같이 운전자가 원

\*Corresponding author, E-mail: wsyoo@pusan.ac.kr

하는 경로를 자동차가 주행할 때의 특성을 해석하기 위해 공장용 자율주행로봇에 PID 제어 기법을 적용하여 로봇의 주행궤적 및 속도를 제어하는 운전자모델을 구성하였다. 이 로봇이 운전자의 요구경로를 주행할 때 선회반경과 주행속도에 따른 응답성과 안정성을 고려하여 로봇의 최적 속도를 검토하였다.

주행로봇은 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS<sup>2)</sup>와 MATLAB 제어모델의 co-simulation 을 통해 4륜조향 정상원 선회 시뮬레이션을 수행하였으며, 그에 따른 로봇의 주행특성들인 주행반경(radius), 조향각(steer angle), 롤각(roll angle), 횡가속도(lateral acceleration)를 비교, 검토하였다.

## 2. 로봇의 ADAMS 모델링

CATIA 프로그램을 이용하여 3D 모델링을 하고, 로봇의 거동을 확인하기 위해 범용 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS를 이용하여 해석을 수행하였다. 본 연구 대상인 주행 로봇을 Fig. 1과 같이 모델링하였다.

타이어와 구동 모듈은 내측 실린더에 고정되고, 내측 실린더는 외측 실린더와 병진 조인트(translational joint)로 연결되어 상하 병진 운동을 한다. 외측 실린더는 메인 프레임 상부에 고정된 플랜지와 회전 조인트(revolute joint)로 연결되어 타이어를 조향하게 된다. 로봇이 원하는 속도로 주행할 수 있도록 4륜의 휠과 연결되어있는 조인트에 토크 입력을 통해 원하는 속도제어를 수행하였다. 모델은 13개의 강체로 이루어지고, 8개의 회전 조인트, 4개의 병진 조인트로 연결되어 있으며 각 휠의 조향각을 조

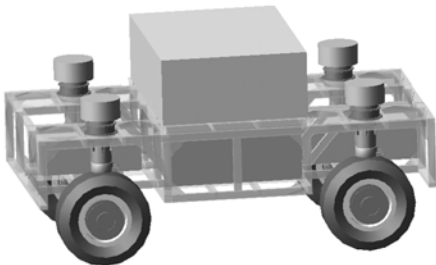


Fig. 1 자율주행 로봇의 ADAMS 모델링

종하는 motion을 입력하여 전체적으로 14 자유도를 가진다. 14 자유도는 차체의 6자유도와 각 타이어의 구름회전 자유도 및 상하 병진 자유도를 의미한다. 각 타이어 조립체의 질량은 구동모듈 870kg, 조향모듈 51kg, 타이어 15kg, 케이블 및 기타 구성품을 포함하여 주행로봇의 질량은 2442kg이고, 적재하중은 302kg으로 총질량은 2744kg 이다. 로봇의 크기는 길이 3200mm, 폭 1700mm, 높이 1300mm이고, 타이어의 직경은 708mm이며 최대주행속도는 30km/h이다. 로봇의 주행을 위한 구동 모터는 4바퀴에 각각 직접 연결되어 바퀴를 구동한다. 구동 모터는 최대 속도인 30km/h를 주행할 때 5kW 용량이 요구되고, 조향모터의 경우 6rpm으로 조향을 기준으로 180W의 용량이 요구된다. 이는 구름 저항 모멘트 이외의 저항력과 손실을 무시한 것이므로 실제설계에서는 요구되는 용량보다 높은 용량의 모터를 선정하였다. 본 논문에서 설계된 공장용 로봇의 경우 선회성능과 적재물의 안정성을 고려하여 스프링의 강성을 80,000N/m으로 선정하였다. 또한 전체중량이 크고 롤강성이 취약한 점을 보완하기 위해 40%의 감쇠비를 로봇에 적용하여 범프 통과 시뮬레이션과 정상원선회 시뮬레이션을 통해 이 값들을 검증하였다.<sup>3)</sup>

## 3. 제어기 설계

4륜조향 자율주행로봇에 PID 제어기를 첨가함으로써 공장로봇의 현실성 있는 주행을 구현 할 수 있다. 즉, 공장 내의 협소한 공간에서 로봇의 전륜뿐만 아니라 후륜도 능동적으로 조향하면 로봇의 선회반경을 줄여 저속에서 기동성이 향상된다. 따라서 본 연구에서는 로봇의 후륜능동조향이 가능하도록 운전자모델 (driver model)을 구성하였다.

### 3.1 제어설계를 위한 이론적 배경

#### 3.1.1 선형 로봇의 횡역학 모델

극한상황에서 로봇의 주행특성을 파악하기 위해서는 수학적으로 매우 복잡한 비선형 해석모델이 정립되어야 한다. 그러나 극한상황이 아닌 기본적인 주행특성만을 고려할 때, 단순화된 선형모델을 이용하여 해석할 수 있다. Fig. 2와 같이 각 차축에 연결된 바퀴들은 각 차축중심에 1개의 바퀴로 나타

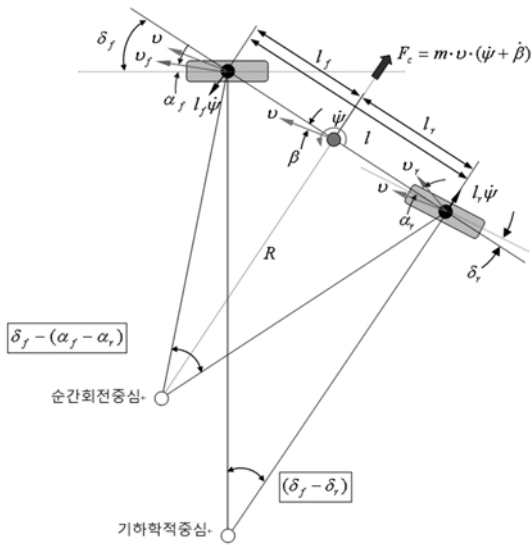


Fig. 2 단순화된 4륜조향 로봇의 횡역학 모델

내는 자전거모델(bicycle model)로 정의 할 수 있다.<sup>4)</sup>

무게중심에서 로봇의 속도  $v$  는 순간커브에 접선 방향으로 작용하며, 횡가속도  $a_y$  는 순간 회전중심을 향한다. 차량이 주어진 커브를 주행하는 경우 차량에는 원심력  $F_c$  이 발생하며, 타이어의 도로면 접촉영역에서 원심력과 평형을 이루는 횡력(lateral force) 또는 코너링력(coneering force)  $F_{yf}, F_{yr}$  이 발생한다. 따라서 횡력에 의한 바퀴의 횡속도(lateral velocity)  $v_y$  가 발생된다. 또한 무게중심에서의 속도  $v$  와 차체의 종축 방향 사이각을 차체 미끄럼각  $\beta$  라고 나타내며, 로봇은 무게중심을 중심으로 요속도(yaw velocity)  $\dot{\psi}$  를 갖고 회전한다. 차축에 이상화된 바퀴들은 중심면에 대하여 바퀴 미끄럼각(slip angle)  $\alpha_f$  와  $\alpha_r$  을 갖고 주행한다. 무게중심에서의 속도 방향에 수직선상의 순간회전중심(instantaneous center of rotation)이 존재하는데, 정상 커브주행(steady-state cornering)의 경우에는 주행커브궤적이 기하학적 중심과 일치한다. Fig. 2에서 힘과 모멘트의 평형에 관한 운동방정식은 Newton의 제 2법칙을 적용함으로써 차체 질량  $m$  과 요 질량 관성모멘트  $\Theta$  에 대하여 식 (1)과 같이 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} m \cdot v \cdot (\dot{\psi} + \beta) &= F_{yf} + F_{yr} \\ \Theta \cdot \ddot{\psi} &= F_{yf} \cdot l_f - F_{yr} \cdot l_r \end{aligned} \quad (1)$$

일반적인 4륜 조향시스템의 2개의 운동자유도, 즉 차체의 미끄럼각  $\beta$  와 요각속도  $\dot{\psi}$  에 대해서 매트릭스 형태로 정리 하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{\beta} \\ \ddot{\psi} \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{C_f + C_r}{mv} & -\frac{mv^2 + l_f C_f - l_r C_r}{mv^2} \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{\Theta} & -\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{\Theta v} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mv} & \frac{C_r}{mv} \\ \frac{l_f C_f}{\Theta} & -\frac{l_r C_r}{\Theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

### 3.1.2 선형 상태공간 모델

제어시스템을 시간역에서 해석하고 설계하기 위해서는 시스템의 상태공간 개념을 이용해야한다. 시스템의 상태공간이라는 것은 어떤 지정된 시간에서 시스템의 상태를 완전하게 서술하는데 필요한 임의의 최소변수의 집합이다. 상태변수에 대한 1차도함수를 선정된 상태변수와 시스템의 입력변수의 함수로 표시한다. 이를 상태 방정식이라고 한다. 또한 관심 있는 변수를 역시 상태 변수와 입력변수의 함수로 표시하고 이를 출력 방정식이라 한다. 이와 같이 상태방정식과 출력방정식을 유도함으로써 상태공간 모델링이 끝나게 된다. 일반적으로 선형 시불변 다변수 시스템에 대한 상태방정식과 출력방정식은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, t) \rightarrow \dot{x} = Ax + Bu \\ y &= g(x, u, t) \rightarrow y = Cx + Du \end{aligned}$$

- A: state matrix
- B: input matrix
- C: output matrix
- D: direct transmission matrix
- x: state vector
- u: input vector
- y: output vector

전륜조향각과 후륜조향각을 입력으로, 로봇의 측면 미끄럼각(body sideslip angle), 요오잉(yaw rate), 횡가속도(lateral acceleration)를 출력으로 보면, 아래 식 (3)과 같이 정의 된다.<sup>5)</sup>

$$x = \begin{Bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \end{Bmatrix} \quad u = \begin{Bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \end{Bmatrix} \quad y = \begin{Bmatrix} \beta \\ \dot{\psi} \\ a_y \end{Bmatrix} \quad (3)$$

상기 상태공간 모델을 식 (2)의 차량거동식에 적용하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} -\frac{C_f + C_r}{mv} & -\frac{mv^2 + l_f C_f - l_r C_r}{mv^2} \\ -\frac{l_f C_f - l_r C_r}{\Theta} & -\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{\Theta v} \end{bmatrix} \\
 B &= \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mv} & \frac{C_r}{mv} \\ \frac{l_f C_f}{\Theta} & -\frac{l_r C_r}{\Theta} \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -\frac{C_f + C_r}{m} & -\frac{(l_f C_f - l_r C_r)}{mv} \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{C_f}{m} & \frac{C_r}{m} \end{bmatrix} \quad (4)
 \end{aligned}$$

3.1.3 후륜 조향각 제어

4륜조향 제어의 물리적 기본개념은 운전자의 조향 핸들 작동에 의해 야기되는 앞 차축에서의 횡력이 발생하는 순간 동시에 위상차 없이 뒷 차축에서도 해당 횡력이 발생되도록 뒷바퀴 조향각을 제어함으로써 궁극적으로 차체 무게중심에서의 차체 미끄럼각을 줄일 수 있다는 점에 바탕을 두고 있다. 기본적인 후륜조향제어 이론은 전륜조향각  $\delta_f$ 와 주어진 속도  $v$ 에서의 차체 요속도  $\dot{\psi}$ 에 관계하여 후륜조향각  $\delta_r$ 을 결정하는 것이다. 이를 수식으로 표시하면 식 (5)와 같은 관계식을 갖는다.

$$\delta_r = C_1 \cdot \delta_f + C_2 \cdot v \cdot \dot{\psi} \quad (5)$$

목표로 하는 주행특성에 따라서  $C_1$  와  $C_2 \cdot v$ 를 결정함으로써 해당되는 4륜조향시스템 개념을 정립할 수 있다. 이에 대한 대표적인 예로서 네가지 주요 4륜조향시스템이 있다.<sup>4,5)</sup>

본 논문에서는 대표적 4륜조향시스템 중에서 시스템1을 사용하였다. 전륜조향각과 요속도 모두를 제어변수로 선정하여 정상상태에서 차체무게중심의 측면 차체 미끄럼각을 영( $\beta=0$ )이 되도록, 주어진 속도에서 후륜조향각을 제어하는 4륜조향 시스템이다. 이는 Table 1과 같다. 계수  $C_1$ 와  $C_2 \cdot v$ 가 모두 0인 경우에는 후륜조향이 없는 2륜조향시스템(시스템0)을 의미한다.

Table 1 4륜조향시스템의 제어특성함수

	$C_1$	$C_2 \cdot v$
시스템1	-1	$\frac{m}{l} \left( \frac{l_r}{C_f} + \frac{l_f}{C_r} \right) \cdot v$

3.2 PID 제어기 설계

로봇은 입력으로 주어진 속도로 등속 주행하며 지정된 주행경로로부터 현재 순간 로봇의 이탈 정도에 따라 입력조향각도가 정해지게 된다. 또한 3.2.2절과 같이 전륜조향각과 요속도 모두를 제어변수로 선정하여 정상상태에서 차체무게중심의 측면 차체 미끄럼 각을 영( $\beta=0$ )이 되도록 주어진 속도에서 후륜 조향각을 제어한다.

이와 같은 제어시스템에 PID 제어기를 적용하여 Fig. 3과 같이 설계하였다. PID제어에서 P게인 값은 과도상태 응답 속도에 영향을 주고, I게인 값은 정상상태의 오차에 관여하며 D게인 값은 시스템의 안정도를 향상시킨다.

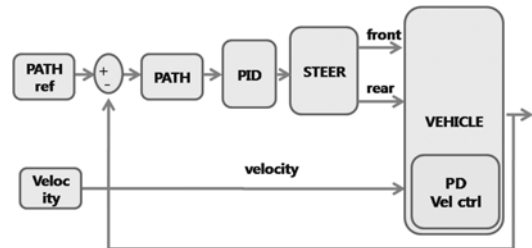


Fig. 3 4WS PID제어기 블록 다이어그램

본 연구에서는 안정 한계 법(marginally stable)을 통해서 제어 게인 값을 선정하였다.<sup>6)</sup> 단위피드백에 의한 비례제어시스템을 이용하는 방법이다.

비례 게인을 제어시스템이 안정한계에 도달할 때까지 증가시켜 그때의 게인 값인 임계 게인과 시스템의 진동주기를 얻은 후 Table 2와 같은 Ziegler-Nichols 조정을 이용하여 대략적 설계파라미터들을 선정했다. 그리고 나서 이 값들을 수동적으로 미세 조정하여 만족스러운 제어시스템을 설계하였다.<sup>7-10)</sup>

Table 2 안정한계에 기초한 Ziegler-Nichols 조정

제어기	제어 게인
PID	$K_p = 0.6K_c, T_i = 0.5P_c, T_d = 0.125P_c$

## 4. 정상원 선회 해석

### 4.1 로봇의 주행안전 제한조건

PID제어기법이 적용된 4륜조향 자율주행로봇이 주어진 경로를 주행 할 때의 횡가속도, 횡력, 물각 응답특성을 검토하여 로봇의 최적속도를 선정하였다. 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS와 MATLAB 제어모델의 Co-simulation 을 통해 정상원 선회 시뮬레이션을 수행하였다.

로봇의 주행 안전제한조건에는 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 물각, 횡 가속도, 횡하중을 이용하여 안전제한 조건을 정하였다.

물각은 로봇의 수직하중과 관련이 있고 압의 강도를 고려하면 제한된 수직하중의 값은 10157N이고, 이 값을 이용하여 물각을 구하면 3.7°이다. 횡 가속도는 로봇에 실려 있는 적재물이 차량의 주행중에 미끄러지지 않는 상황을 안전제한조건으로 두었고, 적재물이 미끄러지지 않을 횡가속도를 마찰계수 실험을 통하여 0.4 G값을 얻었다. 횡하중은 선회에 대한 구동 압의 강도와 관련이 있고 압의 강도측면에서 제한된 최대횡하중은 7753N이다. 안전계수 1.39를 고려하면 횡하중 제한조건은 5580 N이다.<sup>3)</sup>

Table 3은 물각, 횡 가속도, 횡하중의 안전제한 조건을 나타낸다.

Table 3 로봇의 안전제한조건

물각(°)	3.7°
횡 가속도(G)	0.4 G
횡하중(N)	5580 N

### 4.2 선회반경 주행 시뮬레이션

로봇은 주어진 반경 5, 7, 10m을 따라 5~20km/h의 다른 속도로 선회하도록 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 로봇은 운전자 요구경로인 일정 선회반경에 잘 수렴하고 있다.

Fig. 5, 6은 로봇의 주행방향의 속도와 전.후륜의 조향입력을 나타낸 것으로 주행방향의 속도와 조향각이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

Fig. 7, 8은 주행로봇의 선회시 물각, 횡 가속도값을 나타낸 것이다. 이 값들은 과도응답과 정상상태 응답으로 나누어진다. 과도상태의 응답은 제어기의

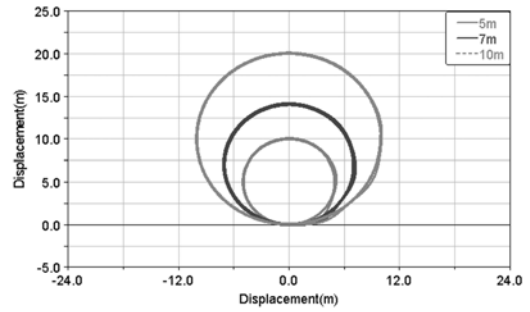


Fig. 4 Radius of rotation

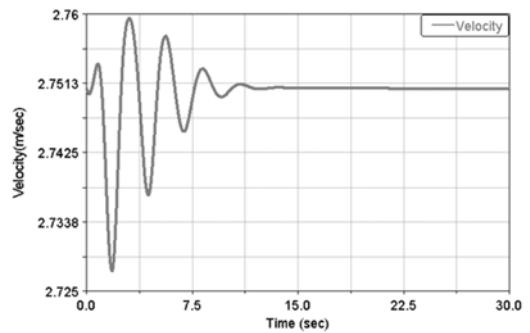


Fig. 5 Velocity input

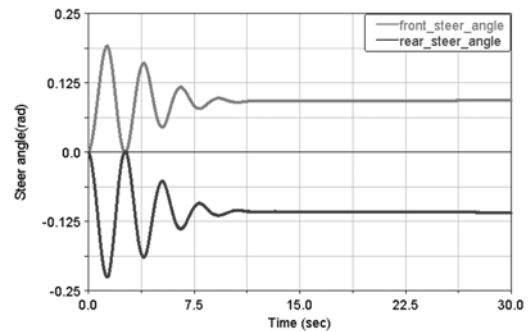


Fig. 6 Steering angle input

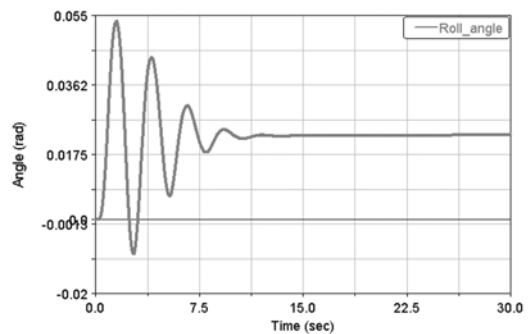


Fig. 7 Roll angle

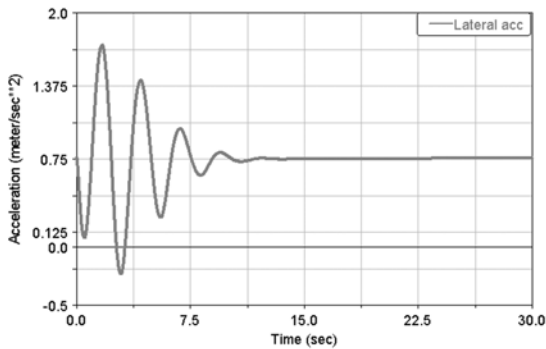


Fig. 8 Lateral acceleration

종류와 제어기 계수의 값에 따라 차이가 나기 때문에 본 논문에서는 정상상태에서 롤각, 횡 가속도, 횡 하중 반력의 값을 비교, 분석하였다.

각 회전반경에 대한 속도별 롤각, 횡 가속도, 횡 하중 반력의 값을 Table 4, 5, 6에 나타내었다.

이 결과와 안전제한조건을 고려하면, 로봇의 최적속도에 영향을 주는 인자가 횡 가속도와 횡 하중 반력보다 롤각이 지배적인 것을 알 수 있다.

회전반경이 5 m일 경우 11 km/h 이상의 속도로

Table 4 선회 반경 10m에 대한 특성

	Rolll angle (°)	lateralacc. (m/sec^2)	laterforce (N)
5 km/h	10.33	0.19	839
10km/h	1.3	0.76	1260
15km/h	2.95	1.72	1937
16km/h	3.36	1.96	2120
17km/h	3.78	2.2	2321
18km/h	4.23	2.47	2560
19km/h	4.7	2.75	2840
20km/h	5.18	3.04	3178

Table 5 선회 반경 7m에 대한 특성

	Rolll angle (°)	lateralacc. (m/sec^2)	laterforce(N)
7 km/h	0.89	0.5	948
8km/h	1.31	0.76	1955
10km/h	1.87	1.09	2146
11km/h	2.26	1.32	2286
12km/h	2.72	1.58	2443
13km/h	3.18	1.85	2609
14km/h	3.76	2.14	2791
15km/h	4.22	2.46	3013

Table 6 선회 반경 5m에 대한 특성

	Rolll angle (°)	lateralacc. (m/sec^2)	laterforce(N)
5 km/h	0.6	0.35	929
7km/h	1.28	0.75	3262
8km/h	1.68	0.98	3386
9km/h	2.11	1.23	3483
10km/h	2.57	1.53	3598
11km/h	3.16	1.84	3712
12km/h	3.78	2.2	3832
13km/h	4.42	2.58	3968

주행하게 되면 롤각의 안전제한 조건을 넘어서기 때문에 회전반경이 5m인 경우에는 최대안전주행속도는 11 km/h이다. 회전반경이 7m인 경우 13 km/h 이상의 속도로 주행하게 되면 롤각의 안전제한 조건을 넘어서기 때문에 회전반경이 7m인 경우에는 최대안전주행속도는 13km/h이고, 회전반경이 10 m인 경우도 마찬가지로 16 km/h 이상의 속도에서 롤각의 안전제한 조건을 넘어가기 때문에 최대안전주행속도는 16km/h임을 알 수 있다.

### 4.3 로봇의 최적 주행속도

4륜조향 자율주행 로봇의 선회시 발생하는 롤각, 횡 가속도, 횡하중 반력을 고려하여 로봇이 최적의 상황을 유지하며 주어진 반경을 선회하도록 하는 최적속도를 검토할 수 있다. 선회반경이 5 m를 주행하는 로봇의 한계속도는 11km/h이고, 선회반경 7 m인 경우 한계속도는 13km/h, 선회반경이 10 m인 경우 16km/h이다. 각 회전 반경에 대한 최대안전주행속도를 Table 7에 나타내면 다음과 같다.

Table 7 선회 반경에 따른 로봇의 최대안전주행속도

선회반경	5m	7m	10m
주행속도	11km/h	13km/h	16km/h

## 5. 결론

본 연구에서는 PID제어기법이 적용된 4륜조향 자율주행로봇이 주어진 선회반경을 주행 할 때 속도변화로 인한 선회특성을 알아보았다. 다물체 동역학 프로그램인 ADAMS와 MATLAB 제어모델의 Co-simulation을 통해 정상원선회 시뮬레이션을 수

행하였고 선회반경에 대한 안전주행속도를 검토하였다. 전륜조향 시스템의 경우 선회반경이 작을수록 안정적으로 주행할 수 있는 속도범위는 줄어든다. 따라서 작은 선회반경을 안정적으로 주행할 수 있도록 후륜조향을 통해 로봇의 안정성과 기동성을 향상시킬 수 있는 4륜조향시스템이 필요하다.<sup>11,12)</sup>

즉, 전륜뿐만 아니라 후륜도 능동적으로 조향하면 로봇의 선회반경을 줄여 저속에서 기동성이 향상된다. 본 연구에 언급된 5m 반경을 선회할 때 2륜조향 시스템의 경우 아주 낮은 주행속도만이 로봇의 선회궤적추적이 가능하다. 이러한 문제의 궁극적인 해결책으로서 능동적 4륜 조향시스템을 이용한 후륜 조향을 통해 로봇의 안정성과 기동성을 향상시킬 수 있다.

## 후 기

본 연구는 지역산업 중점기술 개발사업 (과제번호:10017510)과 국방무인화기술 특화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원으로 이루어 졌으므로, 지원기관에 감사드립니다.

## References

- 1) W. K. Moon, H. W. Kim, W. S. Yoo and N. Huh, "ADAMS Simulation to Determine Spring Damper for an Omnidirectional Robot," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.57-61, 2007.
- 2) ADAMS 2005 User Manual, MSC. Software Inc, USA, 2005.
- 3) H. W. Kim and W. K. Moon, "Statics and Dynamics Analysis for the Robot of Mathematical Model," Wia Report, 2007.
- 4) T. D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, SAE, 1992.
- 5) B. Y. Pack, Vehicle Dynamics an Introduction, Moonwoodang, 2001.
- 6) J. S. Kim, M. C. Lee, M. C. Han and J. W. Choi, Control System Design, Chungmoongack, 2006.
- 7) Y. S. Kim, MATLAB Introduction, High & Depth, 2005.(in Korean)
- 8) S. Jung, SIMULINK Fundamental, A-jin, 1997.
- 9) J. H. Lee and W. S. Yoo, "Predictive Control of Vehicle Ttrajectory by Using a Coupled Vector with the Vehicle Velocity and Side Slip Angle," Int. J. Automotive Technology, Vol.10, No.2, pp.211-217, 2009.
- 10) J. H. Jang, W. S. Jeong and C. S. Han, "Modeling & Dynamic Analysis for Four- Wheel Steering Vehicles," SAE 953737, 1995.
- 11) J. H. Jang, W. S. Jeong and C. S. Han, "Development of the Dynamic Model and Control Logic for the Rear Wheel Steering in 4WS Vehicle," SAE 96370118, 1996.
- 12) J. Y. Hoe, T. W. Pack, S. H. Lee, D. G. Kim and K. H. Moon, "Development of the All-Wheel-Steering Algorithm using Dynamic Analysis of the Bi-modal Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.16, No.1, pp.144-151, 2008.