JOURNAL OF AGRICULTURAL SCIENCE
Vol. 37, No. 1, pp.123-130, JUNE 2010, CHUNGNAM NATIONAL UNIVERSITY

자율 주행 트랙터 시스템의 성능 향상을 위한 CAN 기반의 조향제어시스템 개발

서동현[1] · 서일환[2] · 정선옥[3] · 김기대[3*]

Development of Steering Control System based on CAN for Autonomous Tractor System

Dong Hyun Seo[1] · Il Hwan Seo[2] · Sun Ok Chung[3] · Ki Dae Kim[3*]

ABSTRACT

A steering control system based on CAN(Controller Area Network) for autonomous tractor was developed to reduce duty of a central processing computer and to improve performance of steering control in terms of reduced control interval and error. The steering control system consisted of a SCU (Steering Control Unit), an EHPS system, and a potentiometer. The SCU consisted of an MCU (Micro Controller unit), an A/D converter, and a DC-DC converter, and a PID controller was used to control steering angle.

The steering control system was communicated with the computer by CAN-bus. Each actuator and implement was connected to a multi-function board interfacing with the computer through a USB cable. Without CAN, control interval of the autonomous tractor was 1.5 seconds. When the CAN-based steering control system was combined with the autonomous tractor, however, control interval of the integrated system was reduced to those less than 0.05 seconds. When the autonomous tractor was operated with 1.5-s and 0.05-s control cycles at a 0.63-m/s travelling speed, the trajectories were close to straight lines for both of the control cycles. For a 1.34-m/s traveling speed, tractor trajectory was close to sine wave with a 1.5-s control cycle, but was straight line with a 0.05-s control cycle.

Key words: CAN, GPS, Autonomous Tractor, Steering Control

Ⅰ. 서 론

트랙터는 농작업을 위해 가장 넓은 용도로 사용되고 있는 농업기계 중의 하나이며 현대 농업의 일꾼이라 할 수 있다. 트랙터를 자동화 하면 농업 생산성을 증대시키고 작업 안전성을 개선할 수 있으며 농작업 비용을 감소시킬 수 있다(Stentz 등, 2002). 트랙터를 이용한 농작업으로는 경운, 파종, 제초, 방제 등이 있는데 이러한 작업은 포장에서 작업이 이루어지는 특성 때문에 소음 및 진동이 심하고 반복적이고 규칙적인 작업이 많다. 따라서 트랙터를 이용하는 작업은 자동화에 따른 많은 장점이 있고 자동화하기에도 용이하다고 할 수 있다(김기대, 1986; 문희창, 2009; 최창현 등, 2001).

[1] 한국산업안전관리공단
[2] 강화군 농업기술센터
[3] 충남대학교 농업생명과학대학 바이오시스템기계공학과
* Corresponding author: 김기대
Tel.: +82-42-821-6716 Fax: +82-42-822-6716
E-mail : kdkim@cnu.ac.kr
2010년 4월 22일 투고
2010년 5월 27일 심사완료
2010년 6월 11일 게재확정

트랙터를 이용하는 작업을 자동화하기 위해서는 설정된 경로를 정확하게 추종하는 자율 주행이 가능해야 하는데 이를 위해서는 정확한 위치 측정에 따른 정밀한 조향 제어가 필요하다. 정밀한 조향 제어를 위해서는 실시간으로 트랙터의 위치와 진행 방향을 측정하여 조향각을 계산하고 조향시스템에 조향 명령을 내린 후 조향각을 측정하고 조향 오차를 보정하는 과정을 계속적으로 수행해야 한다. 이러한 조향 제어는 실시간으로 데이터를 받아서 짧은 시간 내에 처리해야하는 공정이다. 그러나 센서와 액추에이터의 수가 증가할수록 주 제어용 컴퓨터에서 처리해야할 데이터양이 증가하여 처리 속도가 느려지게 되고 이에 따라서 전체 시스템의 제어 주기와 함께 조향 제어 주기 또한 느려지게 된다.

시스템의 조향 제어 주기가 느려지게 되면 자율 주행 트랙터는 주행 시 적정 시점에서 조향 제어를 할 수 없게 되어 트랙터가 일정 속도 이상으로 주행할 경우에는 주행 경로를 이탈하는 등의 심각한 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제점은 최근에 많이 사용되고 있는 CAN(Controller Area Network)을 이용한 분산제어를 통해 해결이 가능하다.

CAN은 실시간 어플리케이션을 위한 2선식 시리얼 통신

규격으로서 분산 배치된 여러 센서나 조작기 등을 각각 또는 수 개씩을 하나의 마이크로 컨트롤러에 연결하여 필요한 데이터 통신을 하게 한다. 따라서 조향 제어 시스템과 같이 연속적으로 많은 데이터를 빨리 처리해야 할 부분에 별도의 마이크로컨트롤러를 설치하여 주 제어용 컴퓨터에서 처리해야 할 일을 분산시키면 조향 제어 시스템 뿐만 아니라 전체 시스템의 제어 주기도 향상시킬 수 있다. 또한 CAN 방식의 분산제어시스템을 이용하면 센서와 액추에이터를 추가할 때마다 증가하는 전선의 수와 배선 복잡성에 따른 문제점을 해결할 수 있어 시스템 확장이 용이하게 된다(신범수, 2005).

따라서 본 연구에서는 자율 주행 트랙터의 조향 제어 성능 향상을 위해 CAN 기반의 조향제어시스템을 개발하여 자율 주행 트랙터 시스템에 적용시키고 그 성능을 향상시키고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 자율주행 트랙터 시스템 개요

본 연구에서 사용된 자율 주행 트랙터 시스템은 위치 및 방위 측정 시스템, 조향 제어시스템, 각부 제어시스템 등으로 이루어진 차량제어 시스템과 제어용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다(그림 1).

자율주행 트랙터 시스템에 사용된 트랙터(Kukje Machinery, Model 5805)는 58마력급 트랙터이다. 트랙터의 위치관련 정보를 구하기 위하여 RTK GPS 안테나(NovAtel Inc., Model GPS-701GG), RTK GPS 수신기(NovAtel, Model OEM-V)와 무선인터넷 모뎀(LG, Model LM-629HU)을 사용하였으며 트랙터의 방향(heading angle)을 구하기 위해 전자나침반(Honeywell, Model HMR3500)을 장착하였다.

조향 제어 시스템은 본 연구에서 개발한 조향 제어기(SCU, steering control unit), EHPS(Electro-Hydraulic Power Steering), 조향각 측정용 퍼텐쇼미터(potentiometer) 등으로 구성하였고 CAN-bus를 이용하여 통신 및 제어가 가능하도록 설계·제작하였다.

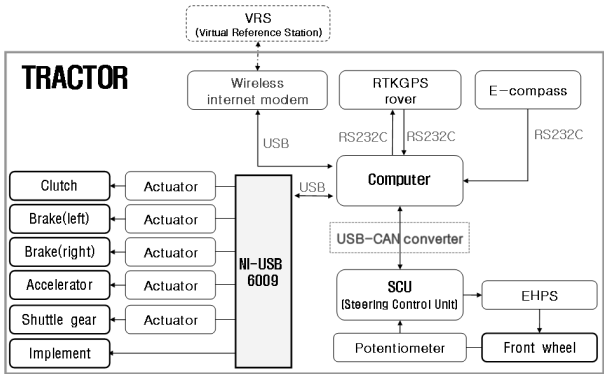


Fig. 1. Block diagram to describe components of the autonomous tractor system.

트랙터의 주행 관련 장치 및 작업기 등을 제어하기 위해 액추에이터를 설치하고 다기능보드(National Instruments, NI-USB 6009)를 이용하여 컴퓨터로 제어가 가능하도록 하였다. 시스템 제어용 프로그램은 비쥬얼베이직 6.0을 이용하여 개발하였다.

2. 조향 제어 시스템

본 연구에서는 자율 주행 트랙터 시스템의 제어대상 전체에 대해 CAN-bus를 적용하지 않고 주행 시 빠른 응답특성이 필요한 조향 제어 시스템 부분에만 적용하여 조향 제어 시간을 단축하고 제어성능을 향상시키고자 하였다.

조향 제어 시스템은 조향 제어기, EHPS, 퍼텐쇼미터로 구성하였고, PID(Proportional - Integral - Derivative) 제어 알고리즘을 이용하여 제어하였다.

가. 조향 시스템 모델링

트랙터는 일반적으로 자동차와 같은 현가장치를 갖추고 있지 않으며, 의자의 현가장치와 타이어가 그 역할을 수행한다. 트랙터의 조향장치는 그림 2와 같이 단순화 하여 병렬의 스프링-댐퍼 시스템으로 가정하면 식 (1)과 식 (2)를 유도할 수 있다.

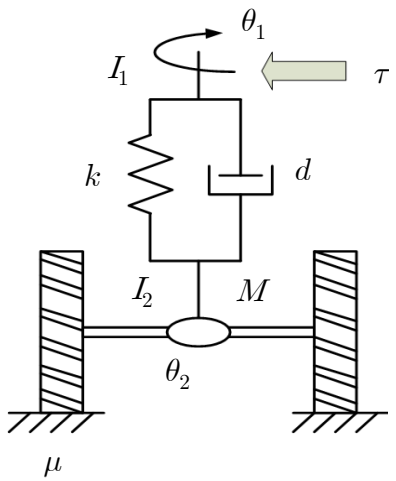


Fig. 2. Modeling of the tractor steering system.

$$I_1\ddot{\theta} = \tau - k(\theta_1 - \theta_2) - d(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \quad (1)$$

$$I_2\ddot{\theta} = k(\theta_1 - \theta_2) - d(\theta_1 - \theta_2) - \mu Mg\dot{\theta}_2 \quad (2)$$

여기서, θ_1: 조향 핸들의 각도
θ_2: 조향각
k: 각도 스프링 상수
d: 각도 감쇠 계수

τ: 조향 핸들 토크
I_1: 핸들의 관성 모멘트
I_2: 조향 휠의 관성 모멘트
μ: 표면의 마찰 계수
M: 트랙터 앞바퀴 부분의 질량
g: 중력 가속도

나. 조향 제어 알고리즘

농업용 차량은 종종 다양한 주행속도, 작동하중, 포장의 표면상태 등에서 작동하기 때문에 조향 제어기 설계 시에는 이러한 조건들을 충분히 수용해야 하며 그에 대한 방법으로 PID 제어기, FPID 제어기, 퍼지 제어기, 인공신경망 제어기 등 몇몇 조향 제어기들이 개발되어 있다(Edan 등, 2009).

EHPS를 이용한 조향 제어기의 성능은 밸브와 차량의 동적 특성에 따라 달라지기 때문에 조향 제어기는 EHPS 조향 시스템의 동적 특성에서 기인한 오차를 보정할 수 있어야 한다(Julian, 1971; Zhang 등, 2000). 따라서 조향각 계산 알고리즘에서 계산된 조향각에 대한 제어오차를 최소화하기 위해 PID 제어기를 설계하였다.

주행 제어 알고리즘에서는 트랙터의 현재위치와 설정된 경로와 오차 및 트랙터의 현재 진행 방향을 계산하여 조향각 오차를 계산하고 이 오차는 조향 제어 시스템에 CAN-bus를 이용하여 송신된다. 조향 제어 시스템에서는 조향오차만큼 트랙터의 전륜을 조향하고 변화된 조향각을 퍼텐쇼미터의 전압변화를 통해 확인하게 된다. 그림 3에 조향각을 결정하기 위한 흐름도를 나타내었고 그림 4에는 계산된 조향각을 이용하여 트랙터의 전륜을 조향하는 알고리즘을 나타내었다.

다. 조향 제어기

RTK GPS 및 전자나침반로부터 트랙터의 위치 값과 방향각이 제어용 컴퓨터에 입력되면 컴퓨터는 전륜의 조향각을 계산한 후 CAN-bus를 통해 조향 제어기에 송신하게 된다. 그림 5에 조향 제어기의 개략도를 나타내었다.

조향 제어기에는 Texas Instruments사의 TI320F2812 모델을 마이크로컨트롤러로 사용했다. 주제어용 컴퓨터에서 조향 제어기에 조향각을 송신하면 조향 제어기는 EHPS에 해당되는 전압 값으로 바꿔 조향을 제어할 수 있도록 했다. 퍼텐쇼미터의 접압값이 변하게 되고 전압값은 A/D 컨버터를 통해 MCU에 입력되어 조향각을 계산하게 된다.

EHPS를 정확하게 작동시키고 퍼텐쇼미터를 이용하여 정확한 조향각을 측정하기 위해서는 전압을 일정하게 유지하는 것이 필요하기 때문에 DC-DC컨버터를 사용했고, 전압은 5V로 설정하였다. 표 1에 조향 제어기에 사용된 MCU(Micro Controller Unit), DAC(Digital to Analog Converter), DC-DC 컨버터의 제작사 및 모델명을 나타내었다. MCU용 프로그램은 TI사에서 제공되는 개발 프로그램을 이용하여 개발하였다.

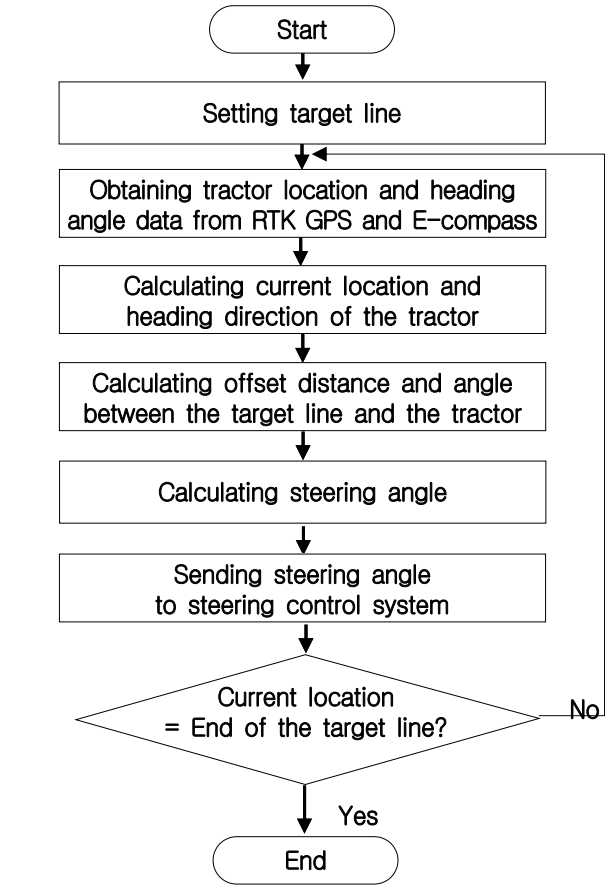


Fig. 3. Flow chart for steering angle control.

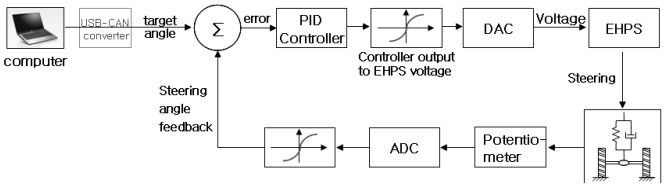


Fig. 4. Block diagram of the PID steering controller.

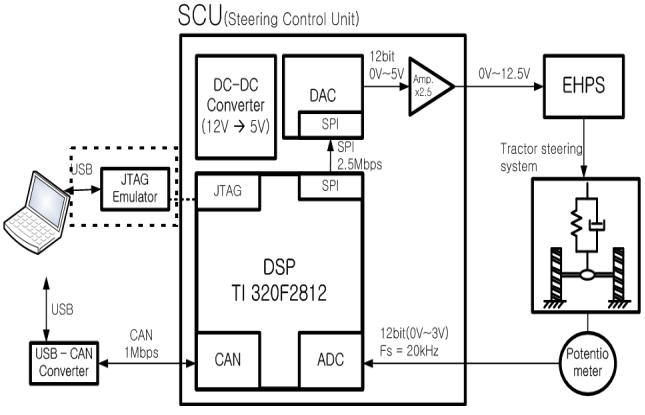


Fig. 5. Schematic diagram of the steering control system.

라. EHPS

자율 주행 차량의 조향 제어 시스템에 대한 연구의 초기에는 제어하기에 편리한 DC 모터를 사용하여 조향핸들을 직접적으로 제어하는 경우가 많았다. 그러나 이러한 경우는 외부 부하가 트랙터 부하의 변동이 잦게 되면 제어기의 제어 성능이 급격히 떨어지며 또한 DC 모터로 핸들 축을 제어하게 되므로 제어기와 부가장치들이 복잡하고 진동 및 충격에 약하다는 문제점이 도래된다. 또한 모터를 사용할 경우 모터를 제어하기 위한 장치가 추가로 소요되기 때문에 시스템이 복잡해지고 프로그램 제어가 어렵게 되는 단점이 있다(박우풍, 2001)

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해소하기 위해 조향실린더에 공급되는 유압을 EHPS 밸브를 이용하여 전기적 신호로 제어하는 방법을 채택하였다.

EHPS 밸브는 유압 조향장치에 의해 작동되는 것과 전기신호에 의해 작동되는 비례 밸브의 유압 유동을 조합하여 사용할 수 있다. 이것은 조향핸들을 작동할 때 전기적 신호를 이용해서 조향할 수 있음을 나타낸다. 따라서 조향핸들 대신에 컴퓨터에서 보낸 전기신호는 전기 작동 장치에 보내지는데 이것은 조향 핸들을 다양한 속도로 조작할 수 있게 한다.

그림 6에 EHPS를 연결하여 구성한 트랙터 조향시스템의 유압 회로도를 나타내었다. 유압회로에는 수동 및 자동으로 선택하여 조향이 가능하도록 선택스위치를 설치하여 운전자가 수동으로도 조작할 수 있도록 했다. EHPS에 의한 조향 시 전륜의 최대 조향가능 각도는 -40°에서 40°까지로 설정했다.

마. 조향각 측정 장치

조향각을 측정하기 위해 좌·우측 조향륜에 각각 퍼텐쇼미터를 장착하였다. 공시 트랙터의 조향각은 좌우 40°이므로 퍼텐쇼미터의 출력특성에서 직선 범위인 -50°~+50°를 이용하여 조향각을 검출하였다. 조향각(δ_f)은 트랙터의 전륜과 후륜 사이의 중심을 지나는 선에 대해 우측으로 향하였을 경우를 양(+)의 각으로, 좌측으로 향하였을 경우를 음(-)의 각으로 정하였다.

조향각 측정 장치의 측도설정을 위해 전자나침반을 조향륜 위에 고정시켜 놓고 핸들을 좌우로 돌리면서 조향각과 퍼텐쇼미터에서 측정된 전압 값을 비교 분석하였다.

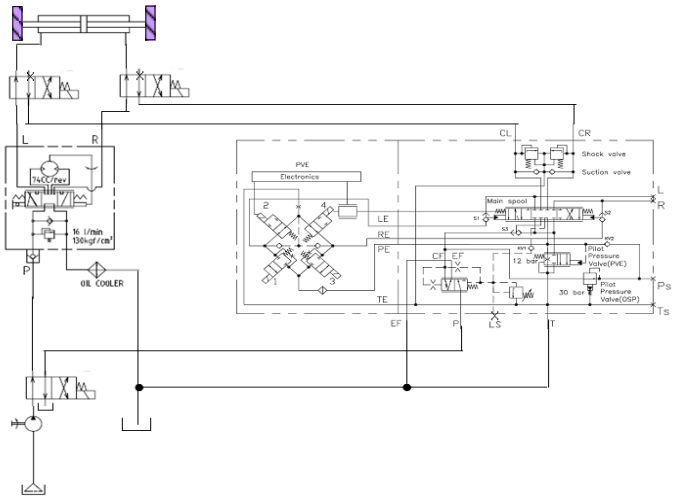


Fig. 6. Hydraulic Circuit Diagram of the Steering system of the autonomous tractor system.

3. 실험방법

가. 공시포장

자율 주행 트랙터의 성능실험은 충남대학교 농과대학 내에 위치한 운동장 및 농장에서 시행하였다. 시험 농장은 길이가 50 m, 폭이 30 m 이다. 그림 7에 농장 및 운동장의 위성사진을 나타내었다.

나. 직진주행 시 경로에 대한 오차 계산

트랙터의 주행 오차는 그림 8과 같이 트랙터의 위치좌표로부터 설정된 직선 주행 경로에 대한 수직거리를 계산하여 확인하였다. 오차는 직선주행 방향의 오른쪽에 있는 오차를 양수로, 왼쪽에 있는 경우를 음의 수로 정하였다.

Fig. 7. A satellite photograph of the field for tillage tests.

Table 1. Manufacturer and model names of the steering controller parts.

Component	Manufacturer	Model
MCU	Texas Instrument	TMS320F2812 DSP
DAC	Texas Instrument	TLV5638
DC-DC converter	Densei-Lambda	PSS6-12-5
USB-CAN converter	Kvaser	Leaf Light HS

RMS 값은 설정된 경로와 실제 경로와의 차이를 이용하여 식 (3)에 의해 계산하였다.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(deviation)^2}{number\ of\ data}} \quad (3)$$

여기서, *deviation*: 설정된 경로와 실제 주행 경로와의 차이
number: 수집된 데이터의 수

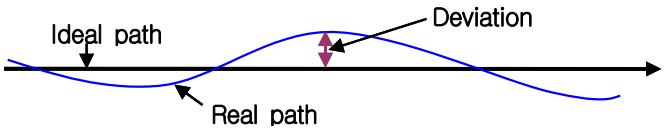


Fig. 8. Deviation to the ideal path.

다. 엔진 회전속도에 따른 작동 지연시간 및 조향 각속도 측정

본 연구에서 사용하는 조향시스템은 엔진에 부착된 유압모터를 이용하여 EHPS를 작동하기 때문에 엔진의 회전속도에 따라 조향각속도가 변화할 것으로 판단된다. 따라서 엔진 회전속도에 따른 작동지연시간 및 조향각속도를 분석하여 주행 시 조향 조건을 변화시키고자 하였다.

로터리를 부착한 트랙터를 콘크리트 바닥 위에 올려놓고 엔진 회전속도를 1000, 1500, 2000, 2500 rpm으로 변화시키면서 조향 각도를 -40°에서 40°, 40°에서 -40°까지 작동시키면서 조향각의 변화 값을 저장하였다. 각 엔진 회전속도에 따른 조향각속도의 변화와 조향 명령이 내려진 후에 실제로 조향작동이 되기까지의 지연시간도 확인하였다. 조향각속도는 조향 명령을 내린 이후부터 매 0.05 초마다 조향각을 저장하여 조향각도에 따른 조향시간을 구할 수 있도록 하였다. 또한 조향 명령 이후 실제로 조향이 이루어지기까지의 지연시간은 측정된 데이터를 확인하여 조향각의 변화 값이 발생하는 시점까지의 시간으로 하여 계산하였다.

라. 조향 제어시스템의 조향 성능

PID 제어기를 이용하여 개발된 조향 제어 시스템의 제어 성능을 확인하기 위하여 트랙터를 콘크리트 바닥에 정지시킨 상태에서 트랙터의 조향각 추종성능을 실험하였다. 실험은 트랙터 엔진 회전속도를 1000 rpm으로 설정한 상태에서 사인파(sine wave)를 조향각도로 주었다. 사인파의 주기는 120 초, 진폭은 40°로 설정하였으며 조향각 신호는 10 Hz의 속도로 조향 제어 시스템에 보내지도록 하였다.

마. 전체 시스템 제어 주기 측정

CAN-bus를 이용하는 조향 제어장치를 부착하기 전과 후의 트랙터 주행제어 성능을 파악하기 위하여 자율 주행 트랙터에 조향 제어장치를 부착하여 제어 주기 측정실험을 수행하였다.

조향 제어 주기를 측정하기 위해 제어용 컴퓨터에서 매번 조향각을 계산하여 제어명령을 내릴 때마다 조향각 계산 및 송신관련 데이터를 시간 데이터와 함께 파일로 저장하도록 하였다. 제어 주기는 저장된 파일의 데이터를 분석하여 하여 실제로 제어가 이루어진 시간을 계산하여 확인하였다. 충남대학교 농장에 30 m의 직선구간을 설정하고 이 직선구간을 1.34 m/s의 속도로 주행하면서 시간, 위치좌표, 트랙터 진행 방향각 등을 저장하였으며 출발점 10 m 이후의 구간 10 m 부분에 대한 값을 확인하였다. 제어 주기는 일정 시간 내에 저장된 데이터의 개수를 확인하여 계산하였다.

사. 시스템 제어 주기에 따른 직진주행 성능

시스템 제어 주기에 따른 자율 주행 성능을 분석하기 위해 시스템의 제어 주기를 1.5 초와 0.05 초로 설정한 상태에서 자율 주행 실험을 하였다. 실험은 충남대학교 운동장에 길이가 35 m인 두개의 직선 경로를 설정해 놓고 하나의 직선경로에서는 1.5 초의 제어 주기로 설정한 상태에서 주행을 하고 다른 경로에서는 0.05 초의 제어 주기 상태에서 경로를 따라 자율 주행하도록 하였다. 엔진은 2300 rpm으로 설정하였고, 주행속도는 해당트랙터의 주행변속단수를 A3과 B1로 변속하면서 실험하였다. 엔진 회전속도가 2300 rpm일 때 변속단수 A3의 주행속도는 0.63 m/s, B1의 주행속도는 1.34 m/s였다.

실험결과는 주행 경로의 10 m에서 35 m 구간을 분석하였으며 오차값 분석 시 오차의 평균을 계산하여 오프셋 값을 보정한 후 오차를 계산하였다. 실험 결과는 평균 오차, RMS 오차, 주행 거리에 따른 오차값을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 엔진 회전속도에 따른 작동 지연시간 및 조향 각속도 측정

표 2에는 엔진회전속도에 따른 지연시간 및 조향각속도를 나타내었다. 조향 명령이 내려진 후 실제로 전륜이 작동하기까지 0.2 초에서 0.25 초의 시간지연이 발생하였다. 조향 각속도는 엔진이 회전속도에 따라 33.6 °/s에서 44.5 °/s의 범위를 나타내었고, 1500 rpm 이상에서는 조향 각속도의 값이 큰 차이를 나타내지 않았다.

2. 조향 제어시스템의 조향 성능

조향 제어 시스템의 성능 시험 결과를 그림 9에 나타내

었다. 사인파 형태의 조향각 신호가 조향 제어 시스템에 보내졌을 때 1° 이내의 오차범위 내에서 정상적으로 조향 신호에 반응하는 것으로 나타났다. 단 조향각 변화가 거의 없는 사인곡선의 상하 변곡점 부분(조향 휠이 최대로 왼쪽 또는 오른쪽으로 돌아가 있는 부분)에서는 퍼텐쇼미터의 출력 값에 잡음(noise)이 발생하는 현상을 나타내었다.

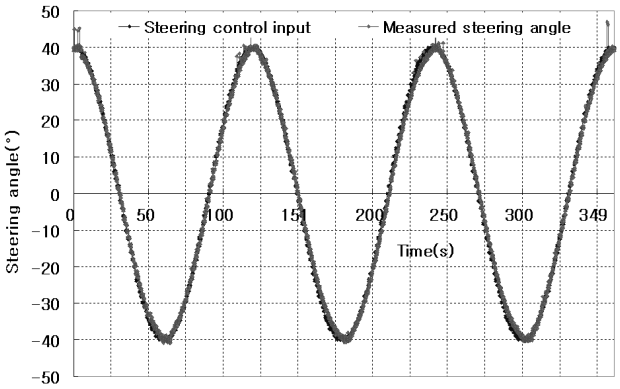


Fig. 9. Steering response characteristics for sine wave input.

3. 시스템 제어 주기

자율 주행 트랙터에 CAN-bus를 이용한 조향 제어시스템을 부착하기 전에는 주행 제어 주기가 평균 1.5 초였으나 개발된 조향 제어 시스템을 사용하여 제어한 경우에는 제어 주기가 0.05 초로 향상되었다. 그 이유는 조향 제어 시스템을 사용하지 않고 제어할 경우 주 컴퓨터에서 트랙터의 전륜의 조향각 측정, 조향각 계산 등 명령된 각도로 조향될 때까지 많은 시간이 소요되기 때문인 것으로 판단되었다. CAN-bus를 이용한 조향 제어시스템을 사용할 경우에는 주제어컴퓨터에서 조향각을 조향 제어 시스템에 전송하면 조향 제어 시스템 내부에서 전륜이 정해진 각도로 회전할 때까지 계속적으로 확인하고 보정하게 된다. 때문에 주제어 컴퓨터에 조향명령을 내린 이후에는 다음 단계의 조향각만 계산하면 된다.

자율 주행 트랙터의 조향 제어 주기가 크게 되면 자율 주행 트랙터의 주행속도가 증가함에 따라 주행 오차 에러가 커질 수 있으나 본 연구에서 개발한 조향 제어 시스템을 사용한 경우 제어 주기가 0.05 초 이내가 되어 트랙터의 고속 주행 시에도 제어가 가능한 것으로 판단되었다. 표 3에 제어 주기를 나타내었다.

4. 시스템 제어 주기에 따른 직진주행 성능

그림 10과 11에 시스템 제어 주기별로 주행실험을 한 결과를 나타내었다. 그림 10은 트랙터의 주행속도가 0.63 m/s이고 제어 주기가 1.5 초와 0.05 초인 경우의 주행 궤적을 나타내었다. 이 경우 두 제어 주기 모두에서 직선에 가까운 경향을 나타내었다.

그림 11은 트랙터의 주행속도가 1.34 m/s이고 제어 주기가 1.5 초일 때의 주행 궤적과 0.05 초일 경우의 주행 궤적을 나타내었다. 제어 주기가 1.5 초일 경우 트랙터는 sine 곡선과 유사한 궤적을 그리며 진행하는 것으로 나타났다. 그러나 제어 주기가 0.05 초일 경우에는 직선에 가까운 주행을 하는 것으로 나타났다.

그림 12와 13에서 트랙터가 설정된 경로를 따라 자율 주행할 때 제어 주기에 따라 설정된 경로에 대해 벗어나는 경로 오차 값은 제어 주기가 느릴수록 커지는 것을 확인할 수 있다. 트랙터가 0.63 m/s의 속도로 주행할 경우에는 제어 주기가 1.5 초일 경우에도 오차의 표준편차 값과 RMS 값이 각각 -0.06 m과 0.59 m로 크지 않지만 트랙터의 주행 속도가 1.34 m/s로 빨라지면 제어 주기 1.5 초의 상태에서는 오차의 표준편차 값과 RMS 값이 각각 0.7 m과 0.72 m로 커지는 것을 확인할 수 있다.

평균값이 0.7 m 커지고 주행경로는 sine곡선 형태로 주행함을 알 수 있다. 이러한 현상은 제어 주기가 느려서 나

Table 2. Steering characteristics by engine speed.

Engine speed(rpm)	Time delay (s)	Steering time(s) (steering 80°)	Steering angular velocity (°/s)
1000	0.2~0.25	2.38	33.60
1500	0.2~0.25	1.89	42.26
2000	0.2~0.25	1.85	43.35
2500	0.2~0.25	1.80	44.50

Table 3. System control cycle with and without the CAN-bus steering control system.

Item	System control cycle (s / Hz)
Without the CAN-bus steering control system	1.5 / 0.67
With the CAN-bus steering control system	0.05 / 20

타나는 현상으로 새로운 조향각 명령을 송신하기 전에 이미 트랙터가 다른 방향으로 진행하였음을 나타낸다.

시스템 제어 주기를 1.5 초와 0.05 초로 설정하고 자율주행 실험을 한 결과를 표 4에 나타내었다. 주행속도가 1.34 m/s일 경우 제어 주기가 1.5 초인 경우에 RMS 오차와 오차의 표준 편차가 제어주기 0.05 초인 경우보다 크게 나타났다. 따라서 제어 주기가 빨라져 고속 주행 시에도 제어가 가능함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 CAN-bus 기반의 분산제어 방식을 이용한 조향제어 시스템을 개발하여 시스템에 장착함으로써 시스템의 제어주기를 단축하고 시스템의 제어성능을 향상 시킬 수 있었다.

1) CAN-bus 기반의 분산제어가 가능한 조향 제어 시스템을 개발하였다. 조향 제어 시스템은 조향 제어기와 조향 액추에이터인 EHPS, 조향각을 측정하기 위한 퍼텐쇼미터 등으로 구성하였다. 조향 제어기는 MCU, DAC, A/D 컨버터, DC-DC 컨버터 등으로 구성하였으며 PID 제어를 이용하여 조향각을 제어하도록 개발하였다.

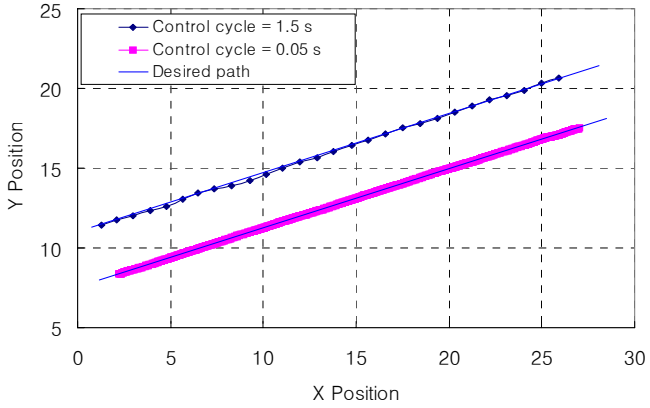


Fig. 10. Traveling trajectory at a 0.63-m/s speed.

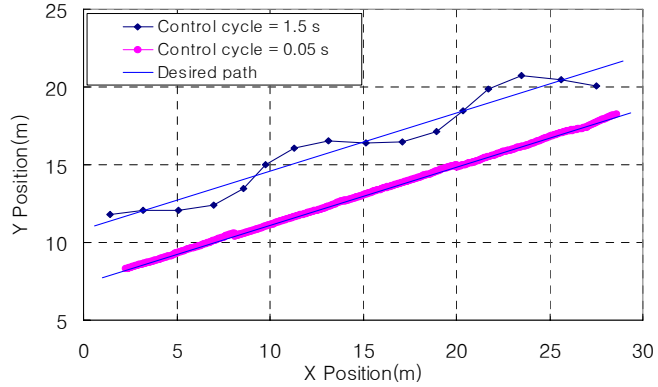
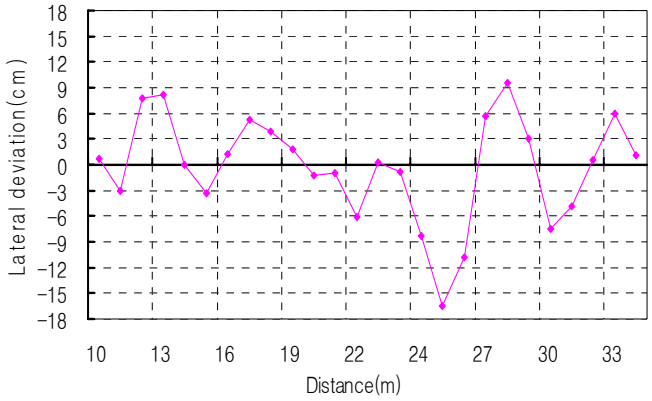
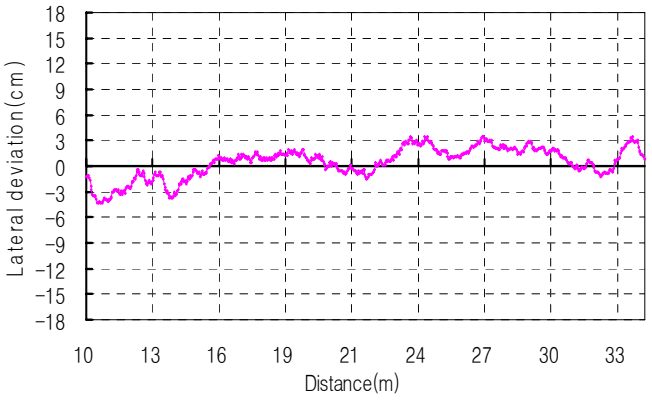


Fig. 11. Traveling trajectory at a 1.34-m/s speed.



(a) System control cycle = 1.5 s.

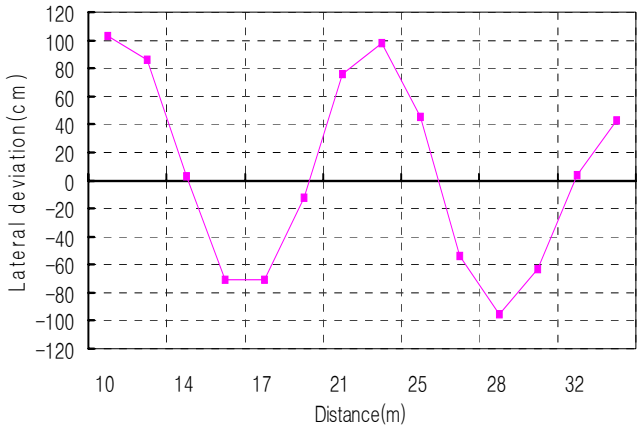


(b) System control cycle = 0.05 s.

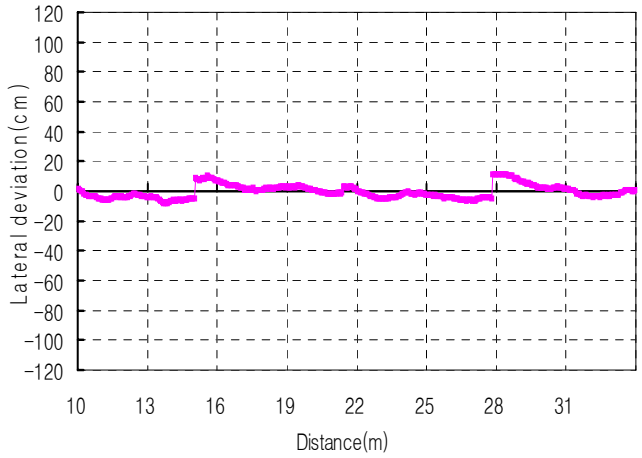
Fig. 12. Lateral deviation by system control cycle at a 0.63-m/s speed.

Table 4. Offset error of the autonomous tractor by travel speed and system control cycle after bias compensation.

Traveling speed (m/s)	System control cycle(s)	Error(m)		
		Average	Standard deviation	RMS
0.63	1.5	0	0.06	0.06
	0.05	0	0.02	0.02
1.34	1.5	0	0.70	0.68
	0.05	0	0.05	0.05



(a) System control cycle = 1.5 s.



(b) System control cycle = 0.05 s.

Fig. 13. Lateral deviation by system control cycle at a 1.34-m/s speed.

2) 조향 제어 시스템의 성능시험 결과 EHPS에서는 0.2 초에서 0.25 초 정도의 작동시간 지연이 발생하는 것으로 확인되었다. 엔진 회전속도가 빨라짐에 따라 조향각속도 빨라지는 경향을 나타냈으며 엔진 회전속도가 1500 rpm 이상이 되면 조향각속도의 변화폭은 줄어드는 경향을 나타내었다. 조향각속도는 엔진의 회전속도가 1000 rpm일 때 33.6°/s를, 2500 rpm일 때 44.5°/s를 나타내었고, 80° (-40°~40°)를 회전하기 위한 시간은 각각 2.38 초에서 1.80 초를 나타내었다.

3) 조향 제어 시스템에 사인파 형태의 조향각 제어 신호를 보냈을 때 1° 이내의 오차범위 내에서 정상적으로 조향 신호에 반응하는 것으로 나타났다.

4) 조향 제어시스템을 자율 주행 트랙터에 탑재한 후 전체 제어시스템의 제어 주기를 측정한 결과 시스템 제어 주기를 1.5 초에서 0.05 초 이내로 단축할 수 있었으며 다른 센서들의 측정 주기를 고려하여 전체 제어 주기를 20 Hz로 설정하였다.

5) 시스템 제어 주기에 따른 자율 주행 성능을 분석하기 위해 시스템의 제어 주기를 1.5 초와 0.05 초로 설정하고 두 가지 속도로 주행 실험을 하였다. 주행속도가 0.63 m/s였을 때는 두 제어 주기 모두 직선에 가까운 궤적을 나타내었으나 주행속도가 1.34 m/s이고 제어 주기가 1.5 초일 때는 사인 곡선과 유사한 궤적을 그리며 진행하는 것으로 나타나 제어 주기가 느릴 경우에는 빠른 주행 속도에서 제어가 어려운 것으로 나타났다.

이 논문은 2007년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음

참고문헌

1. 문희창. 2009. 무인자율주행차량을 위한 분산제어시스템 설계 및 자율주행 알고리즘 개발. 박사학위논문. 국민대학교 자동차공학전문대학원. 서울.
2. 박우풍. 2001. 인공지능형 자율주행 트랙터 개발. 농업기계화연구소 연구보고서. 농촌진흥청. 수원.
3. 신범수. 2005. CAN 기반의 농업기계 무인화 기술 개발. 농림부. 과천.
4. 최창현, 황헌, 조성인, 김종민, 남궁만준. 2001. DGPS와 자이로 센서를 이용한 콤바인의 무인 자율주행 시스템 개발. 한국농업기계학회 2001년 동계 학술대회 논문집 413-419.
5. Edan Y., S. Han and N. Kondo. 2009. Automation in agriculture. Springer Handbook of Automation. Part G/63 : 1095-1128.
6. Julian, A. P. 1971. Design and performance of a steering control system for agricultural tractors. J. Agric. Eng. Res. 16 : 324-336.
7. Stentz, A., C. Dima, C. Wellington, H. Herman and D. Stager. 2002. A system for semi-autonomous tractor operations. Autonomous Robots 13 : 87-104. Netherlands.
8. Zhang, Q., J. F. Reid and D. Wu. 2000. Hardware-in-the-loop simulator of an off-road vehicle electrohydraulic steering system. Transactions of the ASAE 43(6) : 1323-1330.
9. 金基大. 1986. トカクタロータリ耕耘部の設計理論研究とCADへの應用. 九州大學 博士學位論文. 日本福岡.