

DGPS를 이용한 농용트랙터 선회반경 측정 시스템 개발

김유용 임종국 신승엽 김혁주 김병갑 김형권

Development of a Turning Radius Measurement System using DGPS for Agricultural Tractors

Y. Y. Kim G. K. Lim S. Y. Shin H. J. Kim B. Kim H. G. Kim

Abstract

This study was carried out to develop turning radius measuring method and device using a DGPS speed sensor for agricultural tractors. The measurement system consisted of a DGPS speed sensor, a data acquisition device, a touch panel, a photo sensor, a radio modem and a notebook computer. Three methods were developed: average of turning speed-time method, integral of turning speed-time method, and speed-heading angular velocity method. Best method was average of turning speed-time method which could be used with a maximum error of 2.7 cm.

Keywords : Turning radius, DGPS speed sensor, Agricultural tractor

1. 서론

선회반경은 농업기계의 작업효율을 결정하는 주요한 요소 중의 하나이다. 최소선회반경은 조향각을 최대로 하여 외측 차륜의 접지면 중심이 그리는 원의 반경으로 농용트랙터 등 농업기계가 선회하기 위해 필요한 최소반경이다.

농업기계 제조업체는 좁은 장소에서 방향전환과 공간으로 진입이 가능하게 하여 작업능률을 높이기 위해 선회반경을 줄이려고 노력하고 있다. 또한, 시험자와 연구자들은 선회반경을 정확하게 측정하기 위해 많은 연구를 하고 있다.

애커만 장토의 원리에 의해 모든 바퀴는 동심원을 그리므로 구동륜의 속도를 적분하여 구하는 선회반경과 조향각에 의해 산출되는 선회반경과 같으므로 조향각을 이용하여 선회반경을 산출하는 방법을 제시하였다(Besselink, 2003). 농용트랙터와 같이 조향제동장치가 작동하여 후륜이 정지되어 회전하는 경우 후륜의 내측 차륜은 회전이 없이 미끄러짐이 발생하게 되어 후륜의 내측 차륜의 회전속도를 검출할 수 없는 문제가 있다고 하였다(Isao and Mikao, 2003).

이양기 선회반경과 조향각 사이의 관계를 정립하였으며 무인자율주행을 하기 위해서는 선회반경은 중요하다고 하였다(Weise et al., 2000).

차량의 선회반경은 5개의 연속적인 DGPS 위치 데이터를 이용하여 선회반경 5 m일 때 0.7 m, 10 m일 때 0.3 m, 13 m일 때 1.0 m 이내로 측정 하였다(Ayers et al., 2000).

선회반경은 저속의 이상적인 경우 이론적으로 구할 수 있으나 조향제동장치를 작동하였을 경우에는 이론적으로 구하기 어렵다. 이러한 이유로 OECD 농용트랙터 공인시험기관에서는 국제규격(ISO, 1993; OECD, 2009)을 적용하여 선회반경을 측정하고 있다.

국제규격에 의한 시험방법은 2 km/h 미만(ISO, 1993) 또는 2 km/h 근방(OECD, 2009)의 속도로 트랙터를 선회하면서 선회궤적을 그린 후 궤적위에 줄자를 이용하여 균등한 세 부분에서 지름을 측정하여 그 평균을 선회반경으로 한다. 이 방법은 측정하는 과정에서 시험자에게 위험을 초래할 수 있으며 재현성이 낮은 문제가 있다.

본 연구는 농용트랙터 등 주행용 농업기계의 최소선회반경

을 시험자가 안전하고 정확하게 측정할 수 있도록 DGPS를 이용하여 측정하는 장치 및 방법을 개발하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 선회반경 측정 장치

선회반경 측정 장치는 그림 1에서 보는 바와 같이 트랙터의 1회전을 검출하기 위한 포토센서와 반사판, 포토센서의 펄스신호를 입력 받는 디지털 입력 모듈, DGPS 속도센서로부터 주행속도와 방향각을 입력 받기 위한 CAN 통신 모듈, 데이터를 획득하여 연산하는 C-RIO 제어기, C-RIO 제어기와 무선모뎀을 호환하기 위한 RS-232 모듈, 데이터를 노트북으로 전송하기 위한 무선모뎀과 획득된 데이터로부터 선회반경을 연산하고 저장하기 위한 노트북으로 구성되었다. C-RIO 제어기는 Embedded Labview 8.1(National Instrument, Austin, Texas, USA)을 이용한 FPGA(Field Programmable Gate Array)로, 노트북은 Labview 8.1(National Instrument, Austin, Texas, USA)로 프로그램 되었다.

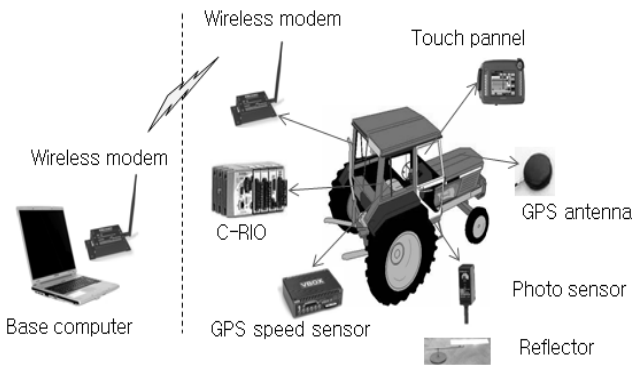


Fig. 1 Schematic diagram of measurement system.

주행속도와 방향각을 측정하기 위한 DGPS 속도센서(Racelogic, Buckingham, England, United Kingdom)는 광역보정시스템(Wide Area Argument System)을 이용하며 제원은 표 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of DGPS speed sensor

Item	Specification
Model	VBOX 3
Speed accuracy	0.1 km/h(average of 4 samples)
Sample rate	100 Hz
Speed resolution	0.01 km/h
Distance accuracy	0.05%
External input	16bit timer with 12 μ s resolution
Output	CAN bus(1 Mbps)

그림 2에서 보는 바와 같이 DGPS 속도센서 안테나는 트랙터의 재질에 관계없이 설치하고자 하는 위치에 설치할 수 있도록 고무 흡착판을 이용하였다.

획득된 데이터를 전송하기 위한 무선모뎀은 설치가 용이하도록 뒷면에 자석을 부착하였으며 제원을 표 2에 나타내었다.



Fig. 2 DGPS antenna mounted on a tractor.

Table 2 Specification of radio modem

Item	Specification	
Model	Compact RIO	XStream-PKG-R
	Notebook	XStream-PKG-U
Antenna	Compact RIO	2.1 dB dipole
	Notebook	High gain
Frequency range	2.4000~2.4835 GHz	
Baud rate	19,200 bps	

나. 선회반경 측정 방법 개발

선회반경은 ①선회속도의 평균과 선회시간을 이용하는 방법(속도평균-시간방법), ②선회속도의 적분과 선회시간을 이용하는 방법(속도적분-시간방법) 그리고 ③선회속도와 방위각을 이용하는 방법(속도-방위각속도 방법)으로 개발하였다.

먼저 DGPS 안테나 위치의 선회반경(r_{GPS})을 구한 후 조향 외측차륜의 선회반경은 에커만 장도(Ackerman-Jantoud type)의 조향원리와 r_{GPS} 를 이용하여 구한다. 에커만 장도의 조향원리는 조향 너클의 연장선이 후 차축 중심의 연장선상의 임의의 한 점에서 모든 바퀴가 동심원을 그린다는 것이다(Choi et al., 1999).

속도평균-시간방법과 속도적분-시간방법은 포토센서와 반사판을 부착하여 선회시간을 측정할 수 있을 때 사용하는 방법으로 개발하였다. 선회속도는 트랙터의 종 방향 중심선과 전륜차축 중심선이 만나는 점에 DGPS 안테나를 부착하여 측정된 속도이고, 선회시간은 트랙터를 1회전하여 트랙터에 부착된 포토센서와 외부 반사판이 첫 번째 만나는 순간(시작시점)부터 두 번째 만나는 순간(종료시점)까지의 시간이다.

속도평균-시간방법은 일정한 속도로 선회하는 경우에 사용되며 식 (1)과 같이 속도의 평균을 구하고 구한 속도의 평균에 선회시간을 곱하여 원주거리를 구하였다.

$$S = V \times (t_N - t_0) \quad (1)$$

Where, V : Average of turning velocity ($= \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N v_i$) (m/s)
 t_0 : Time at start
 t_N : Time at end

속도적분-시간방법은 속도가 일정하지 않은 경우에 사용되며 1회전 하는 선회시간 동안의 선회속도($v(t)$)를 적분하여 식 (2)와 같이 원주거리를 구하였다.

$$S = \int_0^T v(t) dt \quad (2)$$

안테나 위치 선회반경(r_{GPS})은 식 (3)과 같이 식 (1)과 (2)에서 구한 원주거리를 2π 로 나누어 구하였다.

$$r_{GPS} = \frac{S}{2\pi} \quad (3)$$

속도-방위각속도 방법은 그림 1의 측정 장치에서 포토센서를 사용하지 않고 DGPS 속도센서의 선회속도와 방위각속도만을 이용하는 방법으로 그림 3에 나타난 바와 같이 DGPS 속도센서에서 획득된 선회속도(v)의 평균과 Δt 시간 동안 방위각의 변화량($\Delta\phi$)을 이용하여 식 (4)와 같이 r_{GPS} 를 구하였다.

$$r_{GPS} = \frac{v}{\dot{\phi}} \quad (4)$$

Where, $v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$

$$\dot{\phi} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

방위각을 이용하는 경우 특정 방위각 구간으로 1회전하기 어렵고 0°에서 360°로 변화하거나 360°에서 0°로 변화하는 경우에 많은 떨림이 발생하므로 2회전하여 방위각이 50°에서 300°(우선회) 또는 300°에서 50°(좌선회)인 구간의 데이터를 이용하여 r_{GPS} 를 구하였다. 이상의 3가지 방법에서 구한 r_{GPS} 를 이용하여 선회반경은 식 (5)에 의하여 구하였다.

$$r = \sqrt{r_{rearaxle}^{center^2} + H^2 - 2r_{rearaxle}^{center} \times H \times \cos(\theta + \frac{\pi}{2})} \quad (5)$$

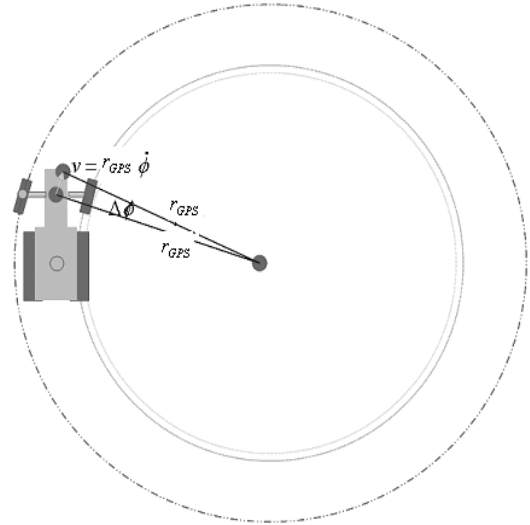


Fig. 3 Diagram using speed-heading angular velocity method

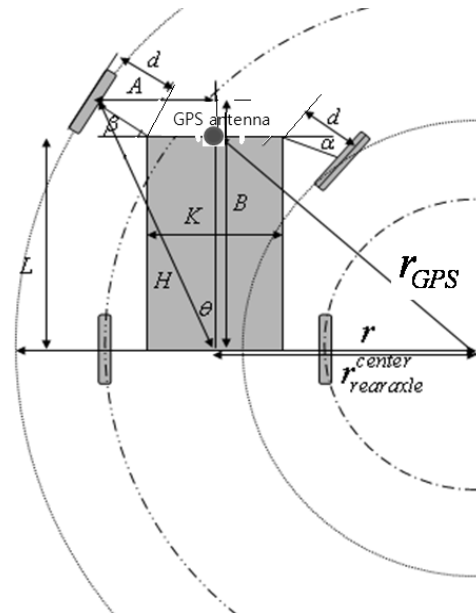


Fig. 4 Diagram for calculating turning radius of steering outer wheel.

Where, $A = \frac{K}{2} + d \times \cos\beta$

$$B = L + d \times \sin\beta$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A}{B}\right)$$

$$r_{rearaxle}^{center} = \sqrt{r_{GPS}^2 - L^2}$$

$$H = \sqrt{A^2 + B^2}$$

r : Turning radius (m)

$r_{rearaxle}^{center}$: Horizontal distance from turning center to rear axle center (m)

K : Horizontal distance between kingpin centers (m)

d : Horizontal distance from kingpin center to the ground point coinciding with the center of the tyre-to-ground contact area of the outermost wheel (m)

β : Steering angle of outer front wheel (radian)

L : Wheel base (m)

H : Horizontal distance from rear axle center to the ground point coinciding with the center of the tyre-to-ground contact area of the outermost wheel (m)

θ : An angle between longitudinal center line and center line of front axles (radian)

다. 선회반경 측정의 정확도 검증

DGPS 안테나 위치의 선회반경 측정 정확도 검증은 그림 5와 같이 정확도 검증 장치를 제작하여 수행하였다. 이 장치는 DC 모터, 감속기, 전원 공급 장치(배터리 및 충전기), PID 방식 모터 속도 제어기, 모터 회전속도 원격 제어기(원격에서 DC 모터의 속도 조절 및 ON/OFF 가능), 속도 표시기, 거리 조절이 가능한 기구부로 구성되었다. 검증장치 중심으로부터 DGPS 안테나 중심까지 거리를 레이저 거리측정기(Leica Disto™ A2, Leica Geosystems AG, Gallen, Switzerland)에 의해 4단계(2, 3, 4, 5 m)로 설정하고, 모터 회전속도는 4단계(1, 1.5, 2, 2.5 rpm)로 조절하여 개발한 3가지 방법에 대하여 성능평가를 수행하였다.

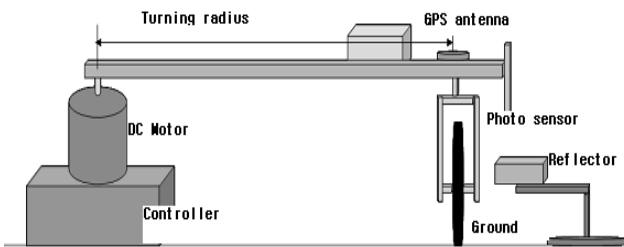


Fig. 5 Accuracy test device.

라. 트랙터 적용시의 성능평가

트랙터에 부착하여 사용할 수 있는지를 평가하기 위해 정확도 검증결과에서 오차가 가장 작은 것으로 평가되는 방법을 최적의 방법으로 선정하고, 선정된 방법으로 20개 모델의 트랙터에 측정 장치를 부착하여 정밀도 검증을 수행하였다. 정밀도 검증은 전륜차측 중심에 안테나를 부착하여 조향제동장치 미사용시(좌선회, 우선회)와 사용시(좌선회, 우선회) 각각에 대하여 검증을 수행하였다.

2개의 모델에 대하여 조향제동을 사용하지 않았을 때 3회 반복 시험하여 평균과 표준편차를 구하여 ISO 방법과 개발한 DGPS 방법을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 정확도 검증 장치를 이용한 선회반경 측정의 정확도 검증 결과

그림 6에서 보는 바와 같이 속도평균-시간방법 시험결과는 모터 회전속도에 관계없이 결정계수(R^2)는 0.9999이상이었으며 설정거리 2 m에서 최대오차는 2.7 cm, 표준편차는 최대 1.7 cm이었고, 설정거리 3~5 m에서 최대오차는 1.3 cm, 표준편차는 최대 1 cm이었다.

그림 7에서 보는 바와 같이 속도적분-시간방법 시험결과는 모터 회전속도에 관계없이 결정계수(R^2)는 0.9985이상이었으며 최대오차는 9.5 cm, 표준편차는 최대 7.7 cm이었다.

그림 8에서 보는 바와 같이 속도-방위각속도 방법의 시험결과는 모터 회전속도 1 rpm일 때 설정거리 2 m와 3 m에서는 선회반경을 측정할 수 없었으며 상기 이외의 모터 회전속도와 설정거리에서 결정계수(R^2)는 0.9988이상이었으며, 최대오차는 12 cm, 표준편차는 최대 7 cm이었다. 선회속도가

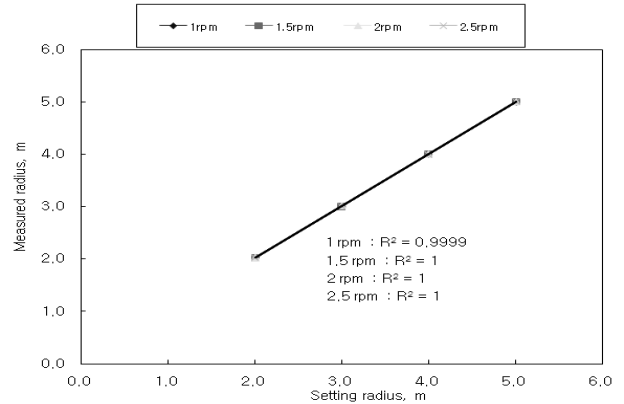


Fig. 6 Test result using average of turning speed-time method.

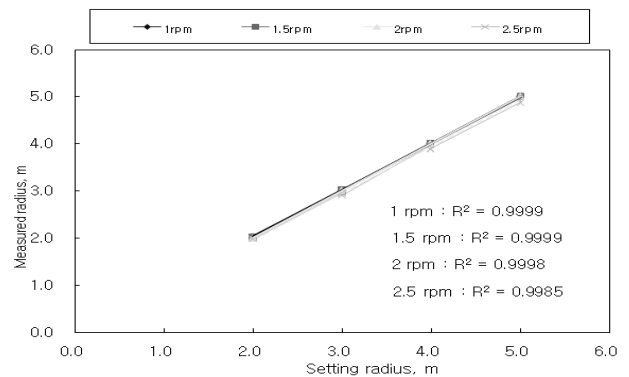


Fig. 7 Test result using integral of turning speed-time method.

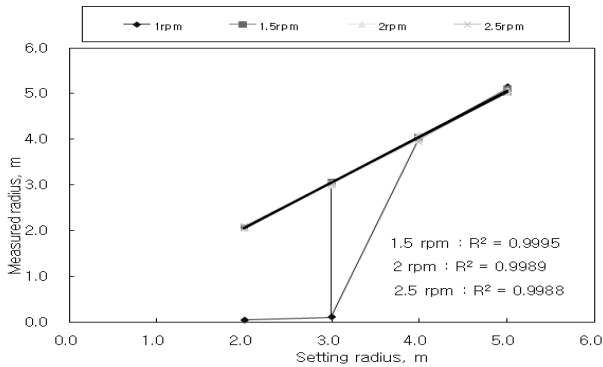


Fig. 8 Test result using speed-heading angular velocity method.

최소 1.5 km/h 이상일 때만 측정할 수 있으며 속도평균-시간 방법이나 속도적분-시간방법보다 편차가 큰 단점이 있으나 반사판을 사용할 수 없는 실제 논, 밭 등에서는 유용할 것으로 판단된다.

나. 트랙터 적용시의 성능평가

조향제동 미사용시 20개의 트랙터 모델에 대한 선회반경은 그림 9에서 보는 바와 같이 2.45 m~5.89 m이었으며, 결정계수(R^2)는 0.9999이고, 표준편차는 최대 3.1 cm, 평균 0.9 cm 이었다.

조향제동 사용시 20개의 트랙터 모델에 대한 선회반경은 그림 10에서 보는 바와 같이 2.16 m~4.93 m이었으며 결정계수(R^2)는 0.9994이고 표준편차는 최대 3.4 cm, 평균 1.5 cm 이었다.

ISO 방법과 GPS 방법의 비교 결과는 표 3에 나타난 바와 같이 모델 1의 경우 평균값에서 최대 5 cm, 모델 2의 경우 1.8 cm의 차이를 보였으나 정밀도는 높은 것으로 나타났다.

따라서 개발된 선회반경 측정 장치 및 방법을 이용하여 선회반경을 최대 3.4 cm 정밀도 이내로 측정할 수 있어 트랙터의 선회반경 측정에 사용이 가능한 것으로 판단되었다.

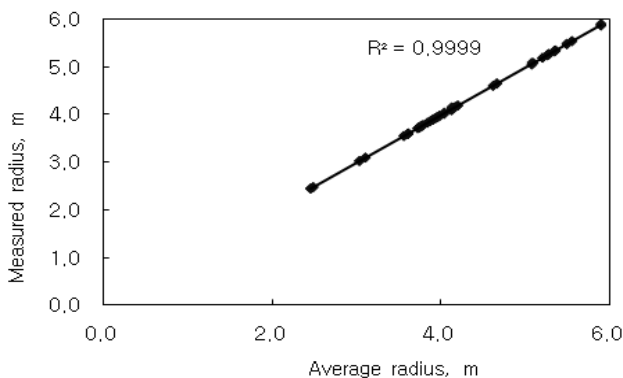


Fig. 9 Test result when turning without steering brake.

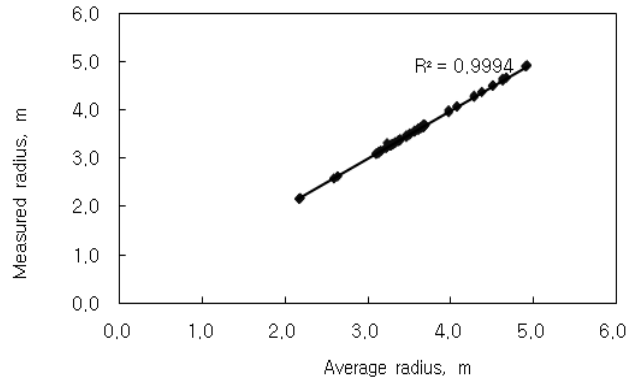


Fig. 10 Test result when turning with steering brake.

Table 3 Comparison DGPS method and ISO

Item		Calculated turning radius			
		Model 1		Model 2	
		DGPS	ISO	DGPS	ISO
Left turn	Average(m)	3.438	3.386	4.044	4.043
	Standard deviation(m)	0.001	0.025	0.003	0.003
Right turn	Average(m)	3.403	3.383	4.015	3.997
	Standard deviation(m)	0.001	0.007	0.002	0.008

4. 요약 및 결론

DGPS 속도센서, 무선모뎀, 터치패널, 데이터 획득 장치 (C-RIO), 반사식 포토센서, 반사판 등으로 구성된 선회반경 자동 측정 장치를 개발한 다음 측정 장치를 이용하여 선회반경을 측정할 수 있는 3가지 방법을 개발하였다.

- (1) 개발한 3개의 방법에 대하여 정확도 검증을 수행한 결과 오차가 가장 적은 방법은 속도평균-시간방법으로 최대오차는 2.7 cm이고 표준편차는 최대 1.7 cm이었다.
- (2) 개발된 측정 장치를 20개 모델의 트랙터에 적용하여 조향제동장치 미사용시와 사용시에 대하여 속도평균-시간방법으로 정밀도 검증을 수행하였으며 검증결과 표준편차는 최대 3.4 cm이고 평균 1.5 cm이었다.

참고 문헌

1. Ayers, P., M. Vance, L. Haugen and A. B. Anderson. 2000. An evaluation of DGPS-based continuously operating vehicle monitoring systems to determine site-specific event severity factors. ERDC/CERL TR-00-43, pp 23-30. US Army Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi, USA
2. Besselink, B. C. 2003. Computer controlled steering system for vehicles having two independently driven wheels. Computers

- and Electronics in Agriculture 39:209-222.
3. Choi, M. I., Chun, Y. S. and Lim, S. H., 1999. New Vehicle Chassis Engineering. pp. 122-124. (In Korea). Hanjin, Seoul, Korea.
 4. Isao, I. and N. Mikao. 2003. Method and Device for Calculating Turning Radius Considered Weight Transfer of Vehicle. Patent Number : 10-0387292. (In Korea)
 5. ISO. 1993. ISO 789-3: Agricultural Tractors-Test procedures-Part 3: Turning and Clearance Diameters. ISO, Geneva, Swiss.
 6. OECD. 2009. OECD Standard Code 2 for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance. OECD, Paris, France.
 7. Weise, G., Y. Nagasaka and K. Taniwaki. 2000. An investigation of the turning behaviour of an autonomous rice transplanter. Journal of Agricultural Engineering Research 77 (2):233-237.