

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 트랙터와 트레일러의 선회운동

Turning Behavior of Tractor-Trailer System by Computer Simulation

金 鐘 勳*, 崔 昌 鉉**
J. H. Kim, C. H. Choi

Summary

Turning behavior of tractor-trailer system was studied to guide the tractor and trailer. Based upon kinematic relationship between the tractor and the trailer, a mathematical model was developed and analyzed by computer simulation. A field test was carried out to verify the mathematical model.

Following conclusions were drawn from this study.

1. A mathematical model and a simulation program for turning behavior of tractor-trailer system were developed.
2. The results of the field tests showed that the RMS errors were less than 0.33m and the mathematical model based upon kinematic relationship can be used for mapping guidance system for tractor and trailer.
3. As the steering angle was increased, the turning radius was decreased. When the tractor travelled at the low speed, the travel speed of the tractor did not affect turning radius but did affect running time and stability for steering.
4. When the tractor travelled under the critical velocity, the towed trailer followed smoothly. When the the tractor travelled faster than the critical velocity, the towed trailer oscillated. The critical velocity was determined from the specification of the tractor and the trailer.

I. 緒 論

트랙터는 트레일러나 여러 종류의 作業機를 부착하여 경지의 개간, 포장의 경운 및 정지작업,

비료 및 농약살포, 농작물의 운송수단 등에 사용되고 있다. 트랙터가 트레일러나 작업기를 달고 작업을 할 때 機械의 效率, 作業 效率, 그리고 安定性を 높이기 위하여 예정된 방향으로 운행하는 것이 要求되나, 現在 트랙터-트레일러 혹은

* 韓國食品開發研究院 技術管理部

** 成均館大學校 農科大學 農業機械工學科

트랙터-작업기의 주행위치操縱은 운전자의 능력에만 의존하고 있어 운전자의 능력에 따라 작업 효율이 다른뿐 아니라 운전자의 疲勞가 증가하여 안정성과 작업 능률이 떨어지고 있다.

트랙터 自動走行裝置의 개발은 初步 운전자도 트랙터와 트레일러 혹은 작업기의 位置制御를 容易하게 하고 운전자의 疲勞를 덜어 作業能率을 向上시킬 것이며 나아가서 농업용 로보트開發의 기초가 될 것이다. 산업용 로보트는 고정된 위치에서 일정한 공간을 움직이며 작업을 하므로 비교적 制御가 容易하나 포장의 크기, 경사, 토양상태 등이 다양한 圃場에서 주행하며 작업할 농업용 로보트는 자동주행장치의 개발이 필수적이며 이를 위한 自動走行裝置의 개발에는 많은 제한이 따른다.

농업용 차량의 자동주행장치는 美國, 日本 등 각국에서 트랙터, 콤파인, 과일 수확기 등에 사용할 목적으로 開發되었으나 대부분 작물 또는 포장에 미리 설치된 특정 표적을 감지하여 走行方向을 제어하는 표적감지식 自動走行裝置로 표적의 감지 여부에 따라 조향장치를 단순히 왼쪽 또는 오른쪽으로 조작하는 방법에 국한되고 있다. 이러한 조작방법은 표적물에 대한 차량의 현재의 위치오차를 최소화하는데 중점을 두었으므로 다음 표적을 감지할 때 車輛의 주행위치를 豫測할 수 없으며 미리 설치된 표적이나 작물이 없는 포장에서는 작업이 不可能한 단점이 있다.

주행하는 차량의 좌표를 측정하여 走行方向을 결정하는 좌표식 주행장치는 좌표측정을 위하여 高價의 장비가 요구되나 모든 농업용 차량과 일반 포장에서 使用할 수 있으므로 농업생산의 완전자동화를 위한 농업용 로보트에 가장 적합한 자동주행장치이다. 電子工學의 발달로 레이저, 초음파, 라디오신호 등을 利用한 위치감지장치의 개발은 좌표식 자동주행장치의 개발을 가능하게 하였으나 주행방향의 制御는 과거에 사용하던 조향장치의 단순조작에 依存하고 있다. 最近에는 차량의 주행방향을 미리 豫測하므로써 조향 각도, 조향 조정율을 변화시키며 조향장치를 제어하는 방법이 활발히 研究되고 있으나 車輛의 위치제어에 국한되었으며 견인되는 작업기

의 위치는 고려되지 않았다.^{5) 7) 9)} 보다 성능이 우수한 자동주행장치의 개발을 위해서는 트랙터와 트레일러 혹은 트랙터와 작업기 시스템의 운동학적 관계를 分析하여 이들의 旋回運動에 대한 研究가 必要하다.

本 研究는 좌표식 주행장치의 알고리즘 개발을 위한 기초연구로서 트랙터와 트레일러의 운동학적 관계를 究明하여 트랙터와 트레일러의 선회운동에 관한 數學的 모델을 開發하고, 컴퓨터 시뮬레이션에 통하여 모델을 檢討한 후, 圃場實驗을 통하여 檢證 하였다.

본 연구의 구체적인 目的은 다음과 같다.

첫째, 트랙터와 트레일러의 旋回運動에 대하여 운동학적 관계를 究明하여 數學的 모델을 開發한다.

둘째, 數學的 數式으로 표시된 트랙터와 트레일러의 運動學的 관계를 컴퓨터 시뮬레이션에 통하여 數學的 모델을 檢討, 分析한다.

셋째, 圃場에서 트랙터와 트레일러의 주행실험에 의해 理論과 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 檢討된 數學的 모델의 실제 적용 여부를 檢證한다.

II. 트랙터-트레일러 數學的 모델

트랙터의 조향각을 변화함에 따라 트랙터와 트레일러가 주어진 조건하에서 어떠한 經路로 주행하는지 究明하기 위하여 트랙터와 트레일러의 역학적 관계를 分析하여 트랙터와 트레일러의 위치를 절대좌표로 표시할 수 있는 數學的 관계식을 구하였다.

數學的 모델을 위한 전체적인 分析과정은 다음과 같다.

첫째, 트랙터가 일정한 操向角으로 旋回運動을 할 때 절대좌표로 트랙터의 운동경로를 나타낼 수 있는 數學的 관계식을 구한다.

둘째, 트랙터에 견인되는 트레일러의 시스템에서 트랙터 중심축과 트레일러 중심축이 이루는 각을 구하여 트레일러의 運動을 數學的 관계식으로 표시한다.

세제, 선회하는 트랙터와 트레일러의 주행 위치는 절대좌표계를 이용하여 나타낸다.

트랙터-트레일러 시스템의 操向運動을 구하기 위한 알고리즘에 사용된 假定은 다음과 같다.

첫째, 트랙터는 2륜구동, 前輪操向 트랙터이고, 트레일러는 트랙터 히치점에 연결된 단일축(single axle) 트레일러이다.

둘째, 트랙터와 트레일러는 평평한 지면에서 走行한다.

세째, 트랙터는 一定한 速度로 走行한다.

네째, 트랙터는 低速으로 주행하므로 바퀴의 橫슬립은 무시한다.

다섯째, 모든 角度는 시계반대방향일 때 양수이다.

1. 트랙터

트랙터 조향의 主要變數는 트랙터의 제원과 운전자가 조정 가능한 앞바퀴의 操向角과 트랙터의 走行速度이다. 그림 1은 一定한 走行速度와 操向角을 주었을 때 트랙터의 선회운동을 描寫한 것으로 트랙터 무게중심의 위치는 G_i 에서 G_{i+1} 로 變化된다. 그림 1에서 x-y좌표계는 포장의 絶對座標系이며, 트랙터의 진행방향을 p축으

로 하는 p-q좌표계는 x축에 대한 트랙터의 중심축 각도(θ)만큼 회전된 變換座標系이다. 회전 중심점에서 조향전과 조향후 사이의 각도로 표시되는 조향율(α)은 조향각, 조향중 주행거리, 그리고 앞바퀴와 뒷바퀴간의 거리로부터 구할 수 있다.⁷⁾ 트랙터의 操向狀態는 다음과 같이 表示할 수 있다.

$$\alpha = Z \delta / L \tag{1}$$

$$G_{xi+1} = G_{xi} + Z \cos(\alpha/2 + \theta_i) \tag{2}$$

$$G_{yi+1} = G_{yi} + Z \sin(\alpha/2 + \theta_i) \tag{3}$$

여기서,

α = 트랙터 조향율

δ = 트랙터 앞바퀴의 조향각 (rad)

Z = 트랙터가 조향중 주행거리 (m)

L = 앞바퀴와 뒷바퀴간의 거리 (m)

θ = 트랙터의 중심축 각도 (rad)

G_x, G_y = x-y좌표로 표시한 무게중심의 위치

i, i+1 = 조향전과 조향후의 상태

2. 트레일러

트랙터에 의해 견인되는 트레일러의 운동은 히치점에서 트랙터의 中心軸과 트레일러의 中心軸이 이루는 각(견인각, towing angle)의 變化를 구함으로써 나타낼 수 있다. 견인각을 구하기 위하여 그림 2와 같이 트레일러는 트레일러 바퀴에

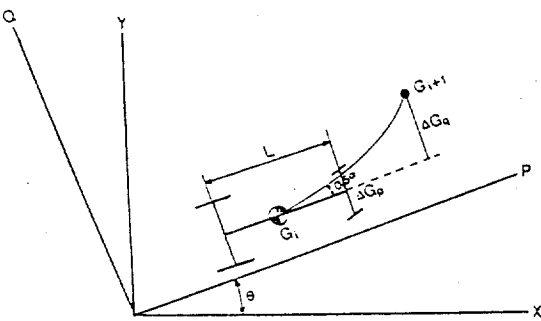


Fig. 1. Simplified tractor model for analysis of turning motion. The center of gravity moves, from G_i to G_{i+1} , depends upon front wheel angle(δ), interval angle(α), and tractor yaw angle(θ). The center of gravity moves ΔG_p in P direction and ΔG_q in Q direction.

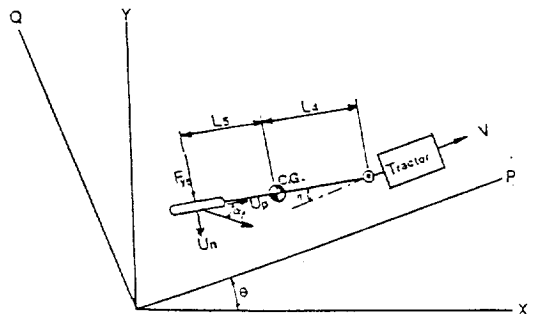


Fig. 2. Simplified trailer model for analysis of towed motion. Towing angle (η) depends upon trailer mass (M_t), yaw moment of inertia (I_t) about C.G., tire cornering stiffness (C_t), distance L_4 and L_5 .

比較하여 매우 큰 構造物인 트랙터에 의해 견인 되는 것으로 생각할 수 있다. 그림 2에서 트랙터에 견인되는 트레일러의 運動學的 關係는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha_i \cong -\eta - \frac{(L_4 + L_5)}{V} \dot{\eta} \quad (4)$$

$$F_{yi} = -C_i \alpha_i = C_i \left(\eta + \frac{(L_4 + L_5)}{V} \dot{\eta} \right) \quad (5)$$

여기서,

V = 트랙터 주행속도

η = 트랙터와 트레일러 중심축이 이루는 각 (견인각)

F_{yi} = 트레일러 바퀴의 橫力

L_4 = 트레일러 무게중심점에서 히치점까지 거리

L_5 = 트레일러 무게중심점에서 트레일러 바퀴까지 거리

C_i = 트레일러 바퀴의 코너링 스티프니스

α_i = 트레일러 바퀴의 橫 슬립각

히치점에서 모멘트 합을 구하면,

$$(I_i + M_i L_4^2) \ddot{\eta} = -(L_4 + L_5) C_i \left(\eta + \frac{(L_4 + L_5)}{V} \dot{\eta} \right) \quad (6)$$

여기서,

I_i = 트레일러 무게중심의 관성 모우멘트

M_i = 트레일러 질량

식 (6)을 정리하면 견인각(η)은 다음과 같이 2차 微分方程式으로 表示된다.

$$(I_i + M_i L_4^2) \ddot{\eta} + C_i \frac{(L_4 + L_5)^2}{V} \dot{\eta} + (L_4 + L_5) C_i \eta = 0 \quad (7)$$

식 (7)는 時間의 經過에 대한 견인각의 變化를 보여주고 있다. 트랙터에 견인되는 트레일러의 운동은 이 견인각으로 표시할 수 있다.

3. 트랙터-트레일러 시스템

트랙터의 中心軸이 계속 變化할 때 트레일러는 어떠한 경로로 견인되는지를 究明하기 위하여

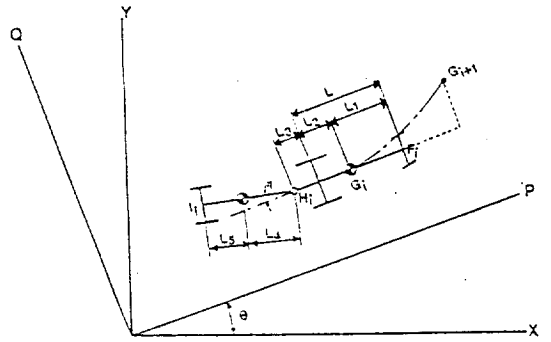


Fig. 3. Simplified tractor-trailer model for analysis of turning motion. The tractor-trailer movement depends upon tractor yaw angle (θ), towing angle (η), and trailer yaw angle (β).

여 트랙터와 트레일러 운동을 x-y좌표로 나타내었다. 그림 3은 조향각이 δ 인 트랙터-트레일러 시스템의 旋回運動을 보여주고 있다. 트랙터와 트레일러 위치좌표는 앞에서 구한 트랙터의 무게중심 위치 (G_x, G_y)와 견인각 (η)에 의하여 구하였다. 트랙터-트레일러 시스템의 操向狀態는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_{i+1} = (Z \delta / L) + \theta_i \quad (8)$$

$$F_{xi+1} = G_{xi+1} + L_1 \cos(\theta_{i+1}) \quad (9)$$

$$F_{yi+1} = G_{yi+1} + L_1 \sin(\theta_{i+1}) \quad (10)$$

$$\beta_{i+1} = \theta_{i+1} - \eta_{i+1} \quad (11)$$

$$I_{xi+1} = H_{xi+1} - (L_4 + L_5) \cos(\beta_{i+1}) \quad (12)$$

$$I_{yi+1} = H_{yi+1} - (L_4 + L_5) \sin(\beta_{i+1}) \quad (13)$$

여기서,

$i, i+1$ = 조향전과 조향후의 상태

L_1 = 트랙터 무게중심점에서 앞바퀴까지 거리 (m)

L_2 = 트랙터 무게중심점에서 뒷바퀴까지 거리 (m)

L_4 = 트레일러 무게중심점에서 히치점까지 거리 (m)

L_5 = 트레일러 무게중심점에서 트레일러 바퀴까지 거리 (m)

θ = 트랙터의 중심축 각도 (rad)

β = 트레일러 중심축 각도 (rad)

$F_x, F_y = x-y$ 좌표로 표시한 트랙터 앞바퀴의 위치

$I_x, I_y = x-y$ 좌표로 표시한 트레일러 바퀴의 위치

위 식은 트랙터와 트레일러가 旋回運動을 할 때 時間 變化에 따른 트랙터의 위치와 트레일러의 위치를 $x-y$ 좌표계로 表示함으로서 트랙터와 트레일러의 旋回運動을 나타낸다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션

개발한 트랙터와 트레일러 선회운동의 數學的 모델을 컴퓨터로 코드화하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 포트란 언어 (Fortran Language)로 作成되었고, 16비트 AT 컴퓨터를 使用하였다.

프로그램은 트랙터의 操向角, 走行速度, 그리고 時間間隔을 入力 자료(input data)로 使用하여 $x-y$ 좌표계를 이용하여 시간 변화에 따른 트랙터의 무게중심, 앞바퀴, 뒷바퀴, 히치점의 위치와 트랙터 中心軸 角度(yaw angle)를 구하여, 견인각(towing angle)을 구한 후 트레일러의 中心軸 角度와 트레일러 바퀴의 위치를 구하도록 하였다. 또한, 트랙터-트레일러 시스템이 旋回運動중 트랙터의 操向角이 변화할 때 트랙터와 트레일러의 旋回運動도 관찰할 수 있도록 작성되었다.

트랙터의 旋回運動을 관찰하기 위하여 트랙터의 操向角과 走行速度의 변화를 주며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 관찰하였다. 트랙터의 走行速度를 고정시키고 操向角을 변화시켰을 때 조향각이 커질수록 선회반경은 작아지는 反比例적 관계를 발견할 수 있었으며, 이 결과는 Wong (1987)의 선회 방정식과 一致하였다. 트랙터가 低速으로 旋回할 때 타이어에 발생하는 측방력은 매우 작아서 橫슬립을 무시하였으므로¹³⁾ 低速으로 선회하는 트랙터의 주행속도 변화에 따른 선회반경의 변화는 없었으며 旋回運動에 소

요된 時間(running time)에만 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

트랙터가 일정한 속도와 조향각으로 정상원을 旋回할 때 트랙터 走行速度가 限界速度를 벗어나지 않으면 트레일러는 트랙터의 회전반경 안쪽으로 트랙터에 一定하게 견인되지만, 限界速度를 넘어서면 不安定하게 견인되는 것을 알 수 있었다. 트랙터의 주행속도가 限界速度에 도달하기 전까지는 安定性을 가지고 견인각이 변화되었으며 트랙터의 주행속도가 빠를수록 트랙터의 中心軸과 트레일러는 빨리 일직선이 되었으나 限界速度를 넘으면 不安定하게 견인각이 變化됨을 알 수 있었다. 限界速度는 트랙터와 트레일러의 諸元에 의해 결정할 수 있으며 本研究에 使用된 트랙터-트레일러 시스템의 限界速度는 23.43km/h 이었다.

IV. 檢證實驗

트랙터-트레일러 시스템의 數學的 모델과 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 檢討된 모델의 실제 적용 여부를 검토하기 위하여 檢證實驗을 하였다. 실험에 使用된 D社 제품의 2륜구동 트랙터와 I社 제품의 단일축 트레일러의 主要諸元은 표 1과 같다. 實驗은 지면이 평평한 成均館 大學校 自然科學 캠퍼스 運動場에서 트랙터와 트레일러가 旋回運動을 완료한 후 그 궤적을 약 16 등분하여 직각자를 이용하여 트랙터와 트레일러의 위치를 $x-y$ 좌표로 구하였다. 走行速度는 100 m를 주행한 시간을 測定하여 구하였으며 회전시에 操向角을 일정하게 유지하기 위하여 핸들을 끈으로 묶어 固定시켰다.

실험은 크게 트랙터의 선회운동과 트랙터-트레일러 시스템의 선회운동으로 나누어 각각 4회 반복하여 실험을 하였다. 트랙터의 선회운동을 檢證하기 위하여 트랙터의 走行速度가 3.31 km/h로 일정할 때 操向角을 15도, 20도, 30도로 변화하며, 트랙터의 操向角을 20도로 고정시키고 走行速度를 3.31km/h, 5.34km/h, 6.24km/h, 7.65km/h로 변화하며 트랙터의 좌표를 측정하였다.

Table 1. Specification of tractor and trailer used for experiment

TS 2810 TRACTOR	Total length	3100 mm
	Total width	1480 mm
	Total height	1990 mm
	Weight	1180 kg
	Wheelbase	1750 mm
IS-t1600 TRAILER	Total length	3543 mm
	Total width	1600 mm
	Total height	1300 mm
	Weight	620 kg
	Wheelbase	1400 mm

트랙터-트레일러 시스템의 선회운동을 檢證하기 위한 實驗은 트랙터가 일정한 走行速度 4.80km/h와 20도의 操向角으로 선회운동을 할 때, 그리고 트랙터가 최초 20도의 조향각으로 선회운동을 하다가 트랙터의 中心軸 角度가 기준축인 x축에서 90도가 되었을 때 트랙터의 조향각을 0도로 變化시켜 직선으로 주행할 때 각각 트랙터와 트레일러의 좌표를 측정하였다.

V. 結果 및 考察

트랙터와 트레일러의 旋回運動에 관한 數學的 모델을 檢證하기 위하여 시뮬레이션 결과와 실험 결과로부터 그래프와 RMS (Root Mean Squared) 오차를 구하여 比較·分析하였다. RMS 오차는 다음과 같이 구하였다.

$$\text{RMS error} = \sqrt{\sum e^2/N} \quad (14)$$

여기서, e는 시뮬레이션 결과와 실험값의 차이이고 N은 실험 자료의 수이다.

1. 트랙터 旋回運動

트랙터 旋回運動에 관한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션과 검증실험을 比較하여 그림 4, 5, 6에 나타내었다. 그림 4는 트랙터가 走行速度 3.31 km/h, 操向角 20도로 선회운동을 하는 경우로 트랙터 앞바퀴 위치에 대한 시뮬레이션 결과값

과 실험 결과값 사이의 RMS 誤差는 0.30m 이었다. 그리고 旋回運動에 소요된 時間(running time)은 시뮬레이션에서는 34.3초, 실험에서는 33.0초로 나타났다. 그림 5는 그림 4와 같은 走行速度인 3.31km/h일 때 操向角을 15도로 바꾸어 준 경우로 트랙터 앞바퀴 위치에 대한 RMS 誤差는 0.25m 이었으며 旋回運動에 소요된 時間은 시뮬레이션에서는 45.7초, 실험에서는 46.1초로 나타났다. 그림 6은 그림 4와 같은 操向角 20

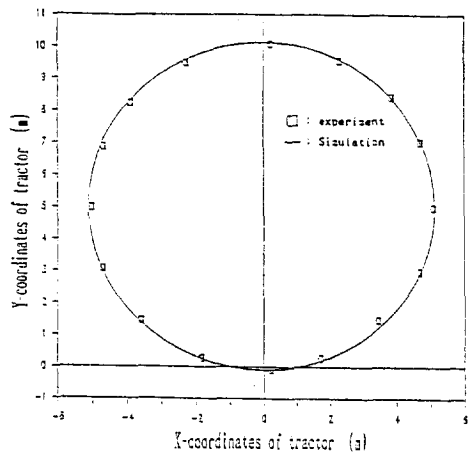


Fig. 4. Simulation and experimental result of tractor turning behavior when steering angle of tractor is 20 deg. and forward velocity is 3.31 km/h. RMS error between experiment and simulation is 0.30 m.

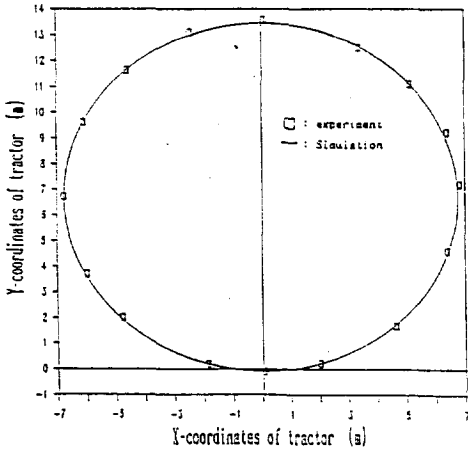


Fig. 5. Simulation and experimental result of tractor turning behavior when steering angle of tractor is 15 deg. and forward velocity is 3.31 km/h. RMS error between experiment and simulation is 0.25 m.

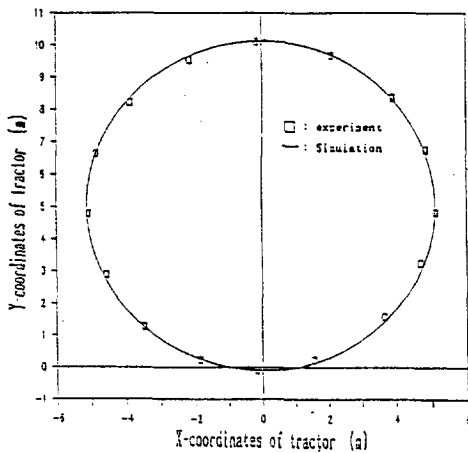


Fig. 6. Simulation and experimental result of tractor turning behavior when steering angle of tractor is 20 deg. and forward velocity is 5.34 km/h. RMS error between experiment and simulation is 0.26 m.

도일 때 走行速度를 5.34km/h로 變化시켜 준 경우로 트랙터 앞바퀴 위치의 시뮬레이션 결과값과 실험 결과값 사이의 RMS 誤差는 0.26m 이었

다. 그리고 旋回運動에 소요된 時間은 시뮬레이션에서는 21.2초, 실험에서는 20.5초로 나타났다.

트랙터 旋回運動時 선회반경, 조향각, 주행속도의 관계를 一般의인 車輛의 代表性인 操向理論인 Wong(1978)의 操向理論式, 시뮬레이션 결과, 그리고 실험결과를 比較하였다. 그림 7은 트랙터 선회운동시 旋回半徑과 操向角과의 관계를 나타낸 것으로 트랙터의 走行속도가 3.31km/h로 一定할 때 조향각의 變化를 주어 旋回半徑을 구하였다. 이때 Wong의 理論式값과 시뮬레이션 결과값 사이의 RMS 誤差는 0.06m 이었고, Wong의 理論式값과 실험값 사이의 RMS 誤差는 0.12m 이었다. 또한 트랙터의 조향각이 20도로 一定할 때 走行속도의 變化에 따른 선회반경을 구하였다. 이때 Wong의 理論式값과 시뮬레이션 결과값 사이의 RMS 誤差는 0.05m 이었고, Wong의 理論式값과 실험값 사이의 RMS 誤差는 0.11m 이었다.

트랙터의 旋回運動時 조향각은 선회반경과 반비례적이며, 低速으로 선회운동을 하는 트랙터의 走行속도는 선회반경에는 영향을 주지 않고 旋回運動에 소요된 時間(running time)에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 트랙터가 旋回할 때 트랙터의 位置誤差는 0.30m 미만으로 매우 잘 一致하므로 트랙터 선회운동에 관한 數學的

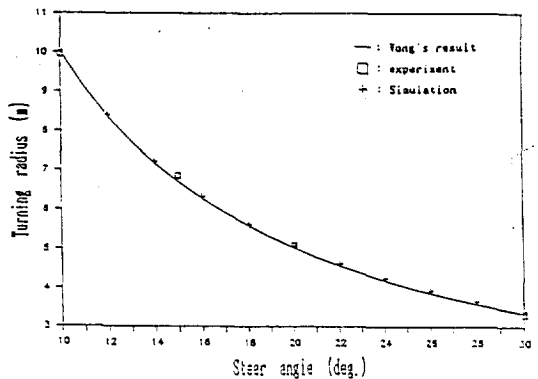


Fig. 7. Relationship between steer angle and turning radius. RMS error between Wong's result and simulation data is 0.06 m. RMS error between Wong's result and experiment data is 0.12 m.

모델은 有用하게 사용되어질 수 있을 것으로 판단된다. 시뮬레이션 결과와 실험결과 사이에 나타난 誤差는 圓場實驗時 트랙터의 조향각을 測定하여 固定시키는 과정과 트랙터의 위치좌표를 測定하는 과정에서 발생한 것으로 판단된다.

2. 트랙터-트레일러 시스템 旋回運動

트랙터와 트레일러의 旋回運動에 관한 검증실험의 결과를 컴퓨터 시뮬레이션과 比較하여 그림 8, 9에 나타내었다. 그림 8은 트랙터-트레일러 시스템이 4.80km/h의 주행속도와 20도의 조향각으로 旋回할 때 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 포장실험 결과를 比較한 것으로 시뮬레이션 결과값과 실험 결과값 사이의 RMS 誤差는 트랙터에서 0.25m 이었고, 트레일러에서는 0.27m 이었다. 旋回運動에 소요된 時間은 시뮬레이션에서는 23.6초, 실험에서는 24.1초로 나타났다.

그림 9는 트랙터가 走行速度 4.80km/h와 操向角 20도로 선회하다가 트랙터의 中心軸이 기준 축인 x축을 기준으로 90도가 되면 조향각을 0도

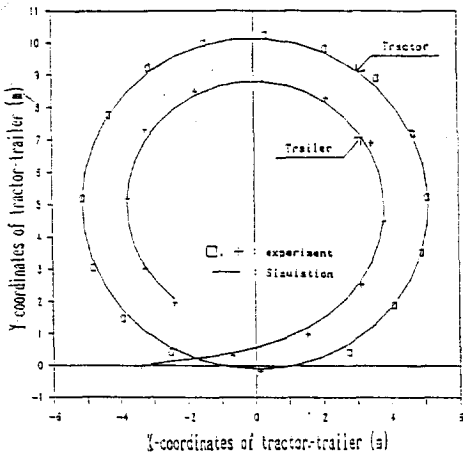


Fig. 8. Simulation and experiment result of tractor-trailer system turning behavior when steering angle of the tractor is 20 deg. and forward velocity is 4.80 km/h. RMS error for tractor between experiment and simulation is 0.26 m. RMS error for trailer between experiment and simulation is 0.27 m.

로 바꾸어 직진하였을 때 트랙터와 트레일러의 운동을 나타낸 것이다. 이 경우 시뮬레이션 결과값과 실험 결과값 사이의 RMS 誤差는 트랙터의 경우 0.13m 이었고, 트레일러 경우는 0.33m 이었다.

트랙터가 일정한 속도와 조향각으로 정상원을 旋回할 때 트레일러는 트랙터의 회전반경 안쪽으로 건인되어 시뮬레이션의 결과와 동일함을 알 수 있었다. 포장실험에서 구한 RMS 오차는 트랙터에서 보다 트레일러에서 크게 나타났으나 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 트랙터-트레일러 시스템의 旋回運動에 관한 數學的 모델은 작업기의 주행방향 제어에 有用하게 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

VI. 要約 및 結論

트랙터-트레일러 시스템의 走行方向 制御를 하기 위한 기초연구로서 트랙터-트레일러 시스템의 旋回運動에 관한 연구를 遂行하였다. 트랙

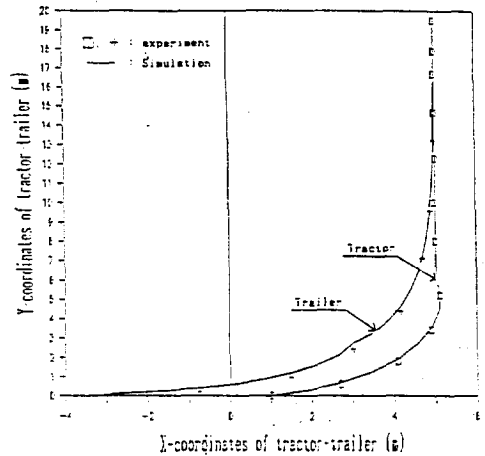


Fig. 9. Simulation and experiment result of tractor-trailer system turning behavior when tractor travels straight after 20 deg. turning. RMS error for tractor between experiment and simulation is 0.13 m. RMS error for trailer between experiment and simulation is 0.33 m.

터가 旋回할 때, 트랙터와 트레일러의 運動學的 관계를 究明하여 數學的 모델을 개발하였고, 數學的 모델을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 분석한 후 실제 적용 여부를 檢證하기 위하여 圃場實驗을 遂行하였다.

研究結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 트랙터-트레일러 시스템의 旋回運動에 관한 數學的 모델과 시뮬레이션 프로그램을 開發하였다.
2. x-y 절대좌표계로 나타나는 트랙터-트레일러 시스템의 數學的 모델은 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 圃場實驗 결과 사이의 RMS 誤差가 0.33m 미만으로 트랙터와 트레일러 혹은 트랙터와 作業機 시스템의 좌표식 自動走行裝置에 이용 가능할 것으로 判단 되었다.
3. 트랙터-트레일러 시스템의 操向時 가장 중요한 변수는 트랙터의 操向角과 走行速度로서 조향각은 선회반경과 반비례하며, 低速으로 旋回運動을 하는 트랙터의 주행속도는 선회반경에는 영향을 주지 않으나 旋回運動에 소요된 時間(running time)과 安定性에 영향을 미치는 것으로 나타났다.
4. 트랙터-트레일러 시스템의 旋回運動時 트랙터에 견인되는 트레일러는 한계속도 범위에서는 安定性있게 트랙터에 견인되지만, 한계속도를 넘어서면 불안정하게 견인되는 것을 알 수 있었다. 이 限界速度는 트랙터와 트레일러의 諸元에 따라 달라지며, 本 研究에 사용된 트랙터-트레일러 시스템의 限界速度는 23.43km/h 이었다.

參 考 文 獻

1. 金應瑞. 1987. 自動車工學 시리즈(2)-새시(I). 집현사.
2. 金應瑞. 1987. 自動車工學 시리즈(2)-새시(II). 집현사.
3. 鄭昌柱, 金成玉, 金水成. 1988. 콤바인의 自動制御에 관한 연구(I)-自脫型 콤바인의 走行方向 制御-. 韓國農業機械學會誌 13

- (2) : 38-45.
4. 崔昌鉉. 1988. 농업용 차량의 操向裝置 自動化. 韓國農業機械學會誌 13(4) : 56-58,63.
5. 崔昌鉉. 1990. 位置 測定裝置를 이용한 트랙터의 自動 走行 裝置. 韓國農業機械學會誌 15(2) : 79-87.
6. Bundorf, R. T. 1967. Directional control dynamics of automobile-travel trailer combinations. SAE Paper No.670099
7. Choi, C. H., D. C. Erbach and R. J. Smith. 1990. Navigational tractor guidance system. Transactions of the ASAE 33(3) : 699-706.
8. Eke, F. O. and T. R. Kane. 1981. A nonlinear study of the steady-state turning behavior of car-trailer system. SAE paper 800156.
9. Ge, J. 1987. Simulation of automatic control for tractor guidance. Unpublished M.S. thesis. Library, Iowa State University, Ames, Iowa.
10. Julian, A. P. 1971. Design and performance of steering control system for agricultural tractors. J. Agric. Engng. Res. 16(3) : 324-336.
11. Rehkugler, G. E. 1982. Tractor steering dynamics simulated and measured. Transactions of the ASAE 25(6) : 1512-1515.
12. Smith, L. A., R. L. Schafer and R. E. Young. 1985. Control algorithms for tractor-impement guidance. Transactions of the ASAE 28(2) : 415-419.
13. Wong, J. Y. 1978. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons, Inc., New York.
14. Xie, L. 1984. Simulation of tractor-trailer system stability. Unpublished M.S. thesis. Library, Iowa State University, Ames, Iowa.
15. 昭, 傳通. 1989. 트럭의 旋回特性에 關する 研究(第一報) - 콘크리트 路面上における 旋回特性-. 日本農業機械學會誌 51(6) : 45-53.