

자율주행 트랙터의 조향제어에 관한 연구

- 목표점 설정 방식을 이용한 경로추종 -

Study on Steering Control for Autonomous Tractor

- Path Tracking with Setting a Target Point -

김상철*	박우풍*	차진팔*	정선옥*	정인규*
	정희원	정희원	정희원	정희원
S.C. Kim	W.P. Park	J.P. Cha	S.O. Chung	I.G. Jung

1. 서론

농업은 다양하고 비구조화된 동적 환경을 특징으로 하기 때문에 무인화나 자동화의 가능성에 대해 매우 회의적이었다. 그러나 기계, 전자 및 소프트웨어 기술의 발달로 시설농업의 정치식 자동화장치들을 비롯하여 노지 재배를 위한 자율주행형 로봇에까지 무인화, 자동화의 범위가 확대 되고 있으며 영상처리, GPS 등의 첨단기술을 이용한 방법들이 요소기술로 사용되고 있다. 무인화된 농기계가 작업을 잘 수행하기 위해서는 외부 환경을 파악할수 있는 능력과 인식한 환경을 참조하여 작은 오차를 가지고 계획된 경로를 추종할 수 있는 조향장치의 성능이 매우 중요하다.

일반적으로 조향장치란 운동체의 진행방향을 조작하기 위한 전기, 기계적인 요소들을 말하는데 농기계가 무인화되기 위해서 핸들로 수동 조작되던 조향 장치가 전기적 신호에 따라 제어될 수 있어야 한다. 본 연구에서는 전자제어형 트랙터 조향장치의 설계요인을 구명하고 시작기를 제작한 후 가상 시험 장치를 구성하여 조향성능을 시험함으로써, 조향장치의 경로추종 성능향상을 위한 제어 알고리즘을 제안하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 컴퓨터 시뮬레이션

조향장치의 제어속도와 적정 조향율을 결정하기 위하여 26PS급 트랙터의 기구적 운동부를 모델링하고 운동방정식에 따라 계획된 경로를 주행하도록 하였다. 주행 시뮬레이션은 2차원 평면을 사용했으며 다음과 같이 가정하였다.

- 1) 트랙터의 차동장치는 회전반경에 대해 이상적으로 동작한다.
- 2) 주행방향 및 측방방향의 슬립은 무시한다.
- 3) 최대 조향각도는 좌우 35°, 최대 주행속도는 23 Km/h로 제한했다.

이동체의 2차원 좌표변환은 최(1990)등이 제안한 트랙터의 운동방정식을 회전 매트릭스(Rafael C, 1993)에 적용하였으며 그 과정은 아래와 같다.

트랙터가 조향율 α (rad/m)로 z (m)만큼 주행했을 때, 트랙터 앞바퀴 중심의 x , y 축 방향으로 이동변위는,

$$\begin{aligned} x &= z \cos (0.5 \alpha z + \delta_i + \theta_i) \\ y &= z \sin (0.5 \alpha z + \delta_i + \theta_i) \end{aligned} \quad (1)$$

* 농업기계화연구소(National Agricultural Mechanization Research Institute, RDA)

모델링한 트랙터의 2차원 평면상의 X, Y좌표는,

$$\begin{bmatrix} X_{i+1} \\ Y_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & X_i \\ 0 & 1 & Y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

트랙터 중심축의 변위각은,

$$\theta_{i+1} = z(0.5\alpha z + \delta_i)/L + \theta_i \quad (3)$$

이므로, Z축을 중심으로 한 X-Y평면의 회전각은 식(4)로 구할 수 있다.

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서

- z: 조향기간중 트랙터가 주행한 거리(m)
- δ : 트랙터 중심축에 대한 앞바퀴의 조향각도(rad)
- θ : 트랙터 중심축의 각도(rad)
- α : 조향율(rad /m)
- 조향각도(rad/s) / 트랙터의 속도(m/s)
- L: 앞바퀴 중심에서 뒷바퀴 중심까지의 거리(m)

속도에 따른 최대조향각은 일정한 주행 속도에서 트랙터가 안정적으로 선회할 수 있는 최대 조향각이므로, 전도 모멘트(overturning moment)와 안정 모멘트의 관계로부터 구할 수 있다.

$$\frac{Wv^2y_s}{gr} \geq Wx_g \quad , \quad r = \frac{L}{\sin \theta} \quad (5)$$

여기서

- W : 트랙터의 重量(kg), g:重力加速度(m/s²)
- v : 트랙터 速度(m/s), r: 旋回半徑 (m)
- y_s : 地表에서 무게중심까지의 垂直方向거리(m)
- x_g : 바퀴접지면에서 무게중심까지의 水平方向거리(m)
- L : 앞뒤 차축간의 거리(m)

식 (5)를 이용하여 속도를 고려한 최대조향각을 구함으로써 주행중의 조향각을 제한하도록 했다.

$$\theta = \arcsin\left(K \frac{L}{v^2}\right) \quad (6)$$

경로의 오차범위는 센서의 RMS오차를 포함하여 5cm를 허용했으며 현재위치에서 경로 상의 최단거리로부터 일정거리 전방을 경로상의 목표점으로 하고 허용 오차범위 이상이면 최대조향각으로 경로상에 진입하도록 했고 조향율에 따라 조향각속도를 비례제어 하였다

나. 조향장치 작동부 설계 및 제작

1) 설계목표

- 조향각도 분해능 : $\theta = 0.2^\circ$
- 조향각: $(-35 \sim +35^\circ)$
- 풀 스티어링 시간 : 1.8초 이내

2) 설계상수

- 최대 조향토크 : $183.7 \text{ N} \cdot \text{cm}$

$$T_a = \frac{J_m + J_l}{g} \times \omega = \frac{J_m + J_l}{g} \times 2\pi \times \frac{f_i \times 1.8}{360} \times \frac{1}{t_a} \quad (7)$$

$$J_s \omega / g = (J_s + J_{g1} + J_{g2}) \omega / g + P_h = 184.8 \text{ N} \cdot \text{cm} \quad (8)$$

여기서

- | | |
|---|---|
| T_a : 조향 토크 ($\text{N} \cdot \text{cm}$) | ω : 모터의 각속도 (rad/s) |
| f_i : 모터 펄스 주파수 (Hz) | P_h : 유압류 배압 (N/cm^2) |
| J_m : 모터의 관성 모멘트($\text{N} \cdot \text{cm}^2$) | J_l : 부하축의 관성 모멘트($\text{N} \cdot \text{cm}^2$) |
| J_{g1} : 구동 기어의 관성모멘트($\text{N} \cdot \text{cm}^2$) | J_{g2} : 종동 기어의 관성모멘트($\text{N} \cdot \text{cm}^2$) |
| J_s : 스티어링 모터의 관성모멘트($\text{N} \cdot \text{cm}^2$) | |

풀 스텝의 2상 스테핑 모터에서 펄스 주파수(f_i)를 1 Kpps, 스텝각(θ)를 1.8° 로 설정하면 1펄스당 모터 회전각도는 0.18° 로 설계목표인 0.2° 이하이므로 적합하다고 판단되었다. 이러한 제원을 갖는 스테핑 모터의 회전수는 10 rps 로 3:1의 감속기 사용을 가정한다면 조향각도 1° 당 스테핑 모터의 펄스수는 150이고 $(t_r - t_a)f_i = 150$ 이므로 가감속 지연시간(t_a)는 0.019초 이었다.

3) 조향장치 및 모터 구동기 제작

조향액츄에이터는 스텝모터의 구동력을 풀리와 벨트를 통해 핸들 샤프트에 전달되도록 하고 로터리 엔코더를 통해 스티어링 밸브의 조작량을 검출할 수 있도록 그림 1과 같이 제작했다. 벨트 클러치를 조작함으로 핸들 또는 모터에 의한 구동을 선택할 수 있도록 하였다. 모터구동기는 4개의 파워 트랜지스터로 H브릿지 회로를 구성하고 논리 게이트를 이용하여 정·역신호에 따라 모터가 구동되도록 했으며 회로를 그림 2에 나타내었다.

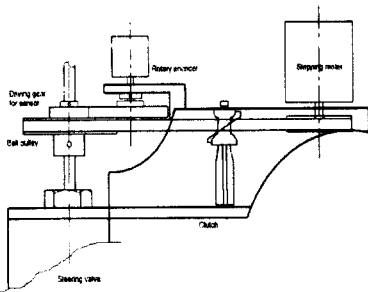


Fig. 1. Schematic diagram of steering actuator mechanism.

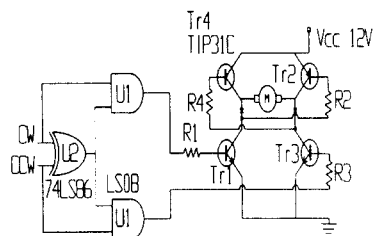


Fig. 2. Circuit diagram of steering motor driving.

다. 성능시험

1) 시험장치의 구성

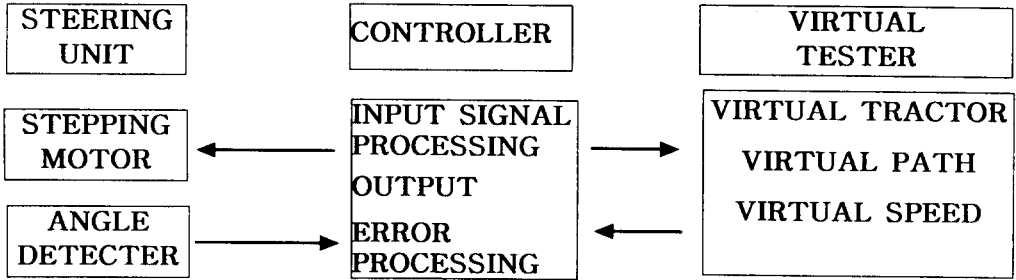


Fig. 3. Block diagram of virtual tester.

조향제어장치의 성능을 시험하기 위하여 그림3과 같이 가상시험장치를 구성하여 트랙터의 경로 및 속도를 가변할 수 있도록 제작한 소프트웨어에 시작기를 인터페이스 하였다. Sine 형태와 crank-shaped 형태의 가상경로(그림 4)를 따라 가상트랙터가 주행하는 동안 조향제어장치의 동작을 검출하기 위한 센서는 300 pulse/revolution의 로터리 엔코더를 사용했으며 컨트롤러는 Intel 8051 마이크로 프로세서와 입출력장치 및 드라이버로 구성되었다. 가상시험장치는 펜티엄 150MHz 개인용 컴퓨터를 사용하였다.

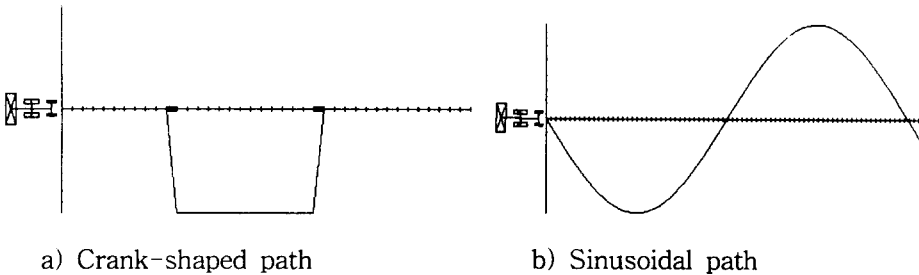


Fig. 4. Selected paths in the simulation.

2) 시험방법

모델링한 트랙터가 조향제어장치의 시작기를 통해 신호를 입출력하며 속도, 조향율, 목표점과의 거리를 변수로 하여 가상경로상을 주행하는 동안 입력된 경로와 트랙터가 주행한 실제 궤적과의 차이를 오차로 간주하였다. 제어 알고리즘은 경로상의 목표점 계산을 위한 피드 포워드(FFC, Feed Forward Control)제어와 센서신호를 이용한 오차의 보정과 경로의 수정을 위하여 피드 백 (FBC, Feed Back Control)를 같이 사용 하였다. 시험변수는 표 1의 범위에서 각각의 상태를 조합하여 사용하였다.

Table 1. Tested ranges of variables

Variable	Range
Target Point	0.5m ~ 4.5m
Steering Rate	0.08 ~ 0.40
Speed	0.2m/s ~ 6m/s

3. 결과 및 고찰

가. 컴퓨터 시뮬레이션

그림 5는 조향율을 변화시키면서 목표점 설정에 따른 주행궤적의 최대오차를 나타내고 있다. 횡축은 목표점까지의 거리를 나타내고 있으며 종축은 주행궤적과 예정경로간의 최대거리오차를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 1.5~2.0m의 범위에서 오차가 다소 줄어들고 있으나 목표점까지의 거리가 1.5m이하 일 경우는 약간의 진동주행이 포함되어 있으며 2.0m 이상에서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

트랙터의 경로추종 오차는 조향율과는 거의 무관하였으며 경로상의 목표점 위치에 따라 큰 차이를 보였다. 최(1990)의 시험에 의하면 조향율에 따라 위치오차가 큰 차이를 보였으나 이를 개선하기위해 주행 알고리즘이 속도에 따라 최대조향각을 제한하고 속도가 경로의 곡률반경에 의해서 결정되도록 했기 때문인 것으로 판단되었다. 최대오차와 rms오차는 목표점간의 거리가 짧을수록 감소하였으나 목표점이 너무 가까우면 조향 액츄에이터의 동작횟수가 증가하고 제어가 불안정하게되어 경로상에서 진동궤적을 나타내었다.

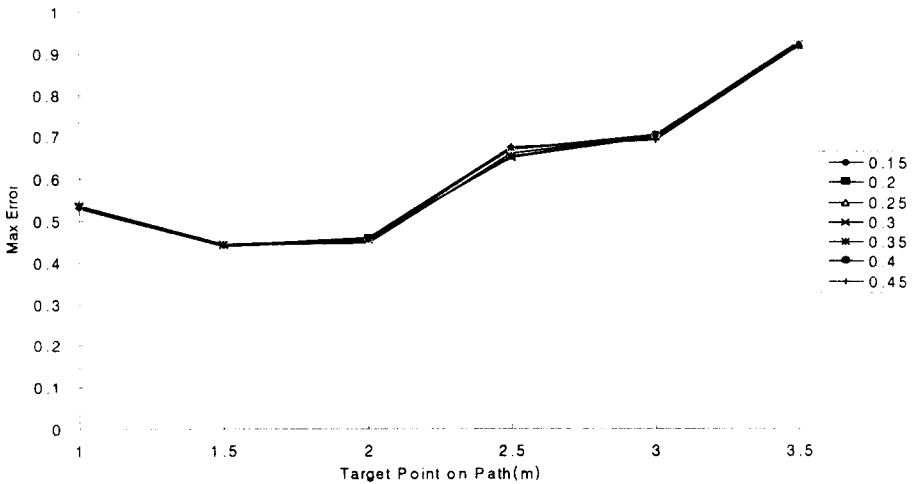


Fig. 5. Maximum error at each target point and steering rate on sinusoidal path.

그림 6은 조향율을 변화시키면서 목표점 설정에 따른 주행궤적의 rms 오차를 나타내고 있다. 목표점과의 거리가 2.0m 이하일 때 rms 오차는 조향율의 영향을 받고 있으나 목표점이 2.0m 이상일 때는 목표점과의 거리에만 영향을 받는 것을 관찰하였다. 또한, 목표점이 1.5m이하일 때는 진동주행의 영향으로 rms 오차가 증가함을 볼 수 있었다.

전기적 신호에 의해서 동작하는 조향 제어기는 제어계의 안정성 뿐만 아니라 경로 추종 성능이 매우 중요하다. 따라서 경로의 곡률반경을 고려하여 목표점을 설정하고 조향각은 속도와 연동하여 제어하는 것이 제어기의 경로추종 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

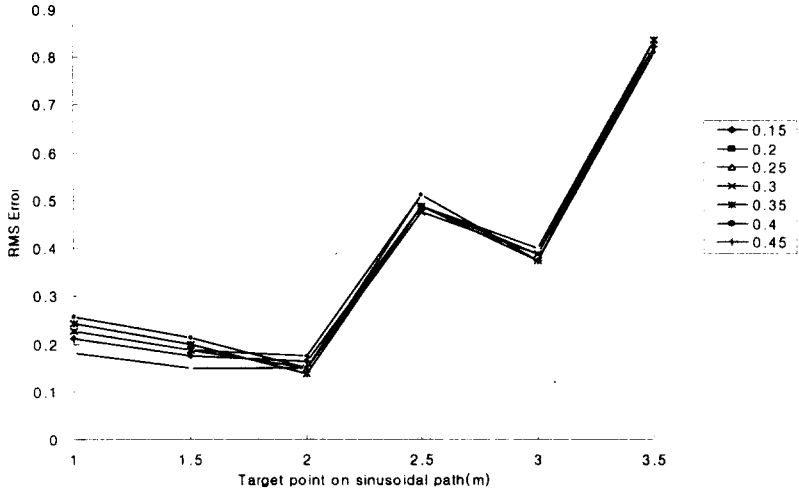


Fig. 6. Rms error at target object point and steering rate on sinusoidal path

나. 성능시험

가상시험장치는 소프트웨어적으로 모델링된 트랙터와 주행경로를 사용하여 조향제어기의 경로 추종성능을 시험했기 때문에 실제경로에서 일어날 수 있는 진행방향이나 측방향으로의 미끄러짐, 전자계나 진동환경에서의 센서오차등에 기인한 조향특성의 변화를 구명하기에는 한계가 있었다. 조향제어기의 초기화 시간은 약 3.6sec 였고, 신호에 따른 액츄에이터의 시정수 도달시간은 23.8×10^{-3} sec 정도였다. 풀 스티어링($-35 \sim +35^\circ$) 시간은 스텝모터 구동기의 입력클럭을 변화시키는 것에 의해 $180N \cdot m$ 의 토크를 유지하며 1.6sec에서 9.4sec 까지 제어하는 것이 가능했다.

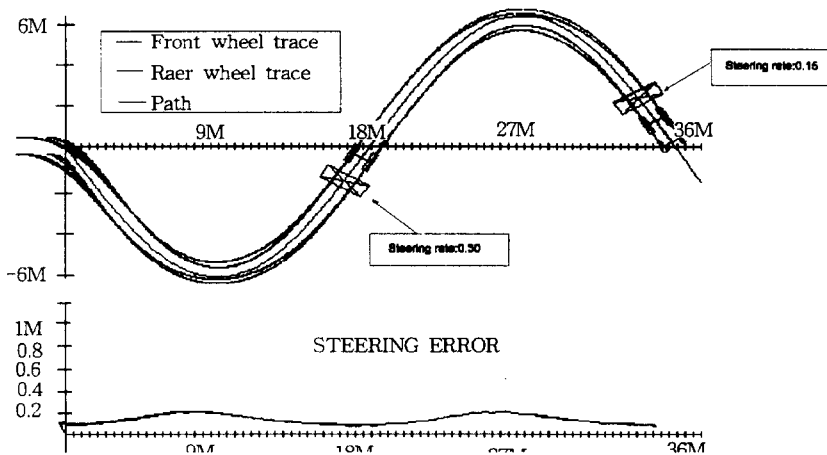


Fig. 7. Tractor trace on sinusoidal path of virtual tracing tester.

그림 7은 진폭 6m의 사인경로를 3.6Km/hr로 주행할 때 전·후륜의 궤적과 경로와의 오차를 보여주고 있다. 경로추종 오차는 2차원 모델의 지면에 대한 트랙터 면적투영 도심과 경로상의 통과 예측점과의 거리로 구하였다. 경로의 곡률반경이 급속히 변화하면 보다 많은 오차를 가지고 경로에 접근하고 있으며 전륜보다 후륜의 오차가 더욱 커지는 것을 볼

수 있다. 경로로부터 오차는 7~22cm 범위였다. 그림 8은 같은 조건에서 크랭크형의 경로를 주행할 때 전·후륜의 궤적과 경로와의 오차를 보여주고 있다. 경로의 곡률반경이 트랙터의 최소 회전반경 이하가 되는 부분에서는 오차가 급격히 증가하고 있다. 직각 경로에서 위치오차는 최대 128cm로 최소 선회반경과 유사하게 나타났다.

실험결과, 기계적 성능에 좌우되는 조향속도나 조향을 보다는 목표점을 설정하고 경로의 곡률반경에 따라 속도와 조향각을 제어하는 알고리즘으로 경로 추종 오차는 더욱 감소될 수 있는 것으로 판단되었다.

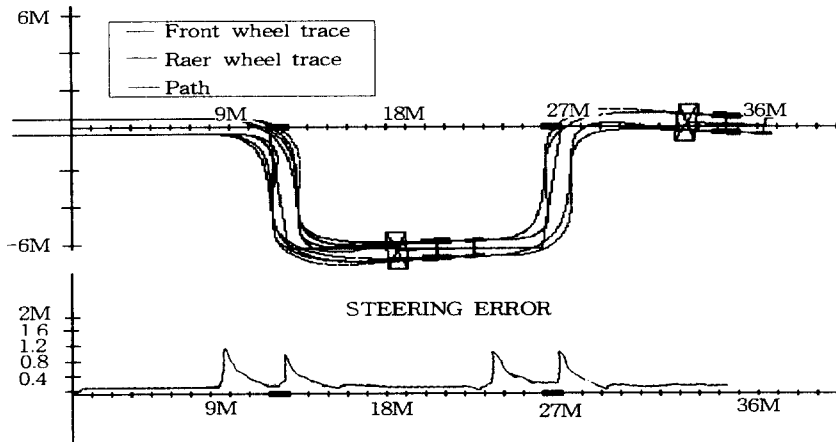


Fig. 8. Tractor trace on crank path of virtual tracing tester.

4. 요약 및 결론

전자제어형 트랙터 조향장치는 트랙터의 무인 주행을 위하여 전기적 신호에 따라 조향장치가 제어될 수 있도록 개발되었다. 적정 설계를 위하여 26마력급의 트랙터를 모델링하고 트랙터의 운동방정식을 적용하여 컴퓨터에서 시뮬레이션 하였다. 제어 알고리즘은 경로의 곡률반경에 따라 속도와 조향각을 결정하였으며 경로상의 계산된 목표점을 향하여 주행하도록 했다. 조향제어장치는 시뮬레이션 결과를 기초로 조향각도 분해능을 0.2° , 최대 조향각($-35^\circ \sim +35^\circ$)를 1.8 sec 이내에 제어할 수 있도록 설계했다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 목표점을 2m로 설정한 진폭 6m의 사인형 경로에서 rms 위치오차는 11~14cm였다.
2. 제작된 조향제어기로 가상시험장치를 구성하여 사인형 경로와 크랭크형 경로에서 시험하였을 때, 진폭 6m의 사인경로를 3.6Km/hr로 주행할 경우에는 경로로부터 오차는 7~22cm 범위였으며 직각경로 주행의 경우에는 위치오차는 최대 128cm로 최소 선회반경과 유사하게 나타났다.
3. 기계적 성능에 좌우되는 조향속도나 조향을 보다는 목표점을 설정하고 경로의 곡률반경에 따라 속도와 조향각을 제어하는 알고리즘으로 경로 추종 오차를 줄일 수 있는 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

1. 巖崎浩一. 1996. 農作業機械の位置検出に 研究-GPS 利用による 側衛精度について-. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 301~302.
2. 並河 清. 1996. 晝像處理による 無人追從方式の 研究. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 299~300.
3. 최창현. 1990. 위치측정장치를 이용한 트랙터의 자동주행장치.한농기지Vol.15.
4. 村住勝彦. 1996. 晝像處理による 農用車輛の 位置計測. 第55回 日本農業機械學會 年次大會 講演要旨.pp. 299~300.
5. Matthew A. Turk, David G. Morgenthaler and Mattin Marra. 1988. VITS-A Vision System for Autonomous Vehicle Navigation. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. vol. 10. no. 3. pp.342~361
6. Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods. 1993. Digital Image Processing. Addison Wesley Pub. Co. pp. 51~61.