

시뮬레이션에 의한 한국 논 토양의 경운저항 특성[†]

Draft Characteristics of Korean Paddy Field by Computer Simulation

이 규 승*

정희원

K. S. Lee

박 원 엽*

정희원

W. Y. Park

우 상 하**

정희원

S. H. Woo

ABSTRACT

A computer simulation was carried out to investigate draft characteristics of Korean paddy field for obtaining the basic reference to the selection of optimum moldboard type suitable for Korean paddy field conditions. Cylindrical, cylindroidal, semihelical moldboard plows, and one type of oriental Janggi were used for simulation. A series of soil bin experiments was conducted to compare the experimental results with the predicted drafts from computer simulation using the cylindroidal moldboard plow. The computer model predicted draft force with 1~12% error at 12~16cm plowing depth which is the most conventional plowing depth in the rural area in Korea. Thus, the computer model was considered to be good enough for simulation.

Due to the different plowing width of experimental plows, specific draft was selected for comparison by computer simulations. Specific draft of cylindrical moldboard plow was ranged from 3 to 6 N/cm² according to the soil conditions, plowing speed and plowing depth, 2.5~5.0 N/cm² for cylindroidal moldboard plow, 2.0~4.3 N/cm² for oriental Janggi and 1.5~3.0 N/cm² for semihelical moldboard plow.

주요용어(Key Words): 경운저항(Draft), 경운비저항(Specific draft), 플라우(Plow), 동양쟁기(Oriental janggi)

1. 서 론

최근 우리나라에서는 농촌 노동력의 부족, 농민들의 대형 농기계 선호 현상 등에 의해 트랙터의 출력이 점점 증가하고 있다. 이에 따라 심경이 가능하고 반전성능이 좋음에도 불구하고 소출력 트랙터에는 적합하지 않아 사용이 기피되어오던 모울드보드 플라우에 대한 수요가 크게 증가하고 있는 추세이다. 그러나 모울드보드 플라우는 서양에서 전작 중심의

대규모 포장의 밭토양에 적합하도록 설계되어 발달되어 왔다. 밭토양의 물리적 특성과 논토양의 물리적 특성은 두 토양에 대한 경작방법이 많은 차이가 있듯이 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 우리나라에서 모울드보드 플라우에 의한 논토양의 경기작업은 논토양의 물리적 특성 뿐아니라 모울드보드 플라우의 구조적 특성과 성능에 대한 깊이있는 기술적 평가를 거쳐 개발된 한국형 모울드보드 플라우에 의한 것이 바람직하다.

[†] 본 연구는 1994년도 성균관학술연구비에 의해 수행되었음.

* 성균관대학교 생명자원과학대학 생물기전공학과

** 현대중장비연구소

플라우의 설계는 플라우 형상의 비대칭성, 작업토양의 다양성 등 많은 설계요인에 의해 영향을 받기 때문에 과거에는 주로 경험적 시행착오적인 방법에 의해 설계 제작되어 사용되어져 왔다. 그러나 최근 컴퓨터의 발달에 의해 많은 변수와 연산을 동시에 처리할 수 있고, 설계 화면을 가시화할 수 있는 CAD 기법의 발달로 플라우의 경험적 시행착오적 설계기법의 개선이 가능하리라 판단된다.

따라서 본 연구의 목적은 우리 나라의 논토양의 경기작업에 적합한 한국형 모올드보드 플라우의 개발을 위해 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 이용하여 국내 논토양들의 경운저항 특성을 플라우 형태별로 분석하여 토양상태에 따른 적정 모올드보드의 형태를 선정하는데 필요한 기본 자료를 제시하는데 있다.

2. 견인저항 예측 모델

가. 2차원 견인저항 예측 모델

그림 1은 지면에 대해 일정한 각도로 경사져 있는 평판에 대해 Gill과 Vandenberg(1967)에 의해 개발된 2차원 평면에서의 경운작업기의 역학적 모델로서 경운날이 전진함에 따라 전단파괴되고 있는 토양블럭에 작용하고 있는 힘들을 보여주고 있다.

그림 1에서 힘 CF_1 과 μN_1 은 각각 토양전단면의 면적 F_1 에 대한 토양점착력과 내부마찰력으로, CF_1 은 토양의 전단파괴면이 형성될 때에만 존재한다. 힘 $\mu' N_0$ 은 토양과 경운날 사이의 마찰력이고, 힘 AF_0 은 부착력이다. 여기서 C , μ 와 A , μ' 은 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 의해 결정되는 토양변수로서 각각 토양의 점착력과 내부마찰계수, 그리고 토양-경운날면간의 부착력과 마찰계수이다. N_0 은 토양이 경운날면에 작용하는 법선방향의 힘이고 F_0 은 토양블럭과 경운날면 사이의 접촉면적이다. 힘 G 은 토양블럭의 중량이며, 힘 B 는 토양블럭이 경운날면

위를 상승 가속할 때 발생하는 힘이다. 각 β 는 토양의 전단면이 수평면과 이루는 각으로서 $\beta = 1/2(90^\circ - \phi)$ 이다.

경운날의 전진에 따른 토양의 파괴는 그림 2에서와 같이 연속적인 전단에 의한 작은 토양블럭군으로의 파괴로 볼 수 있다. 경운날 선단의 토양블럭이 경운날 위로 상승함에 따라 후단의 토양블럭은 지면으로 떨어진다. 경운날에서 토양블럭군에 작용하는 합력을 구함으로써 경운날 전진에 소요되는 견인저항을 구할 수 있다.

따라서 그림 3과 같이 하나의 토양블럭에 작용하는 힘의 평형관계로부터 경운날에 작용하는 법선방향의 힘 N_0 은 다음과 같이 구해진다.

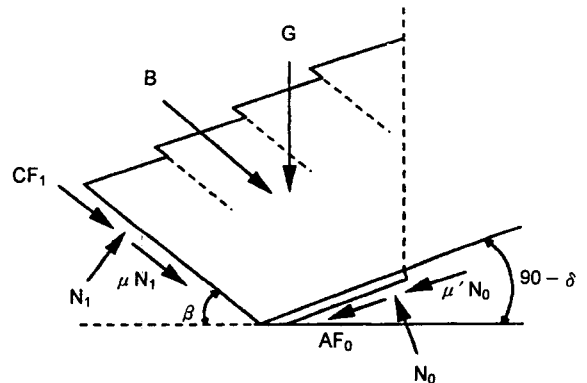


Fig. 1 Forces on a soil segment acting on an inclined plane of tillage tool.

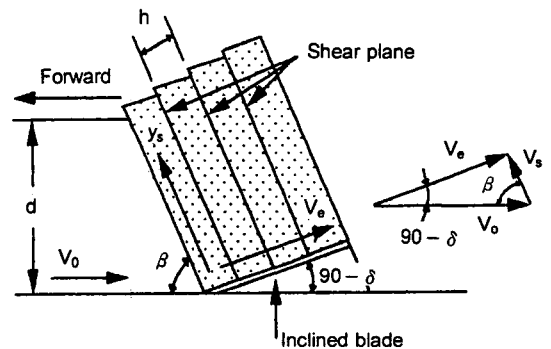


Fig. 2 Formation of soil blocks by repeated shear failure.

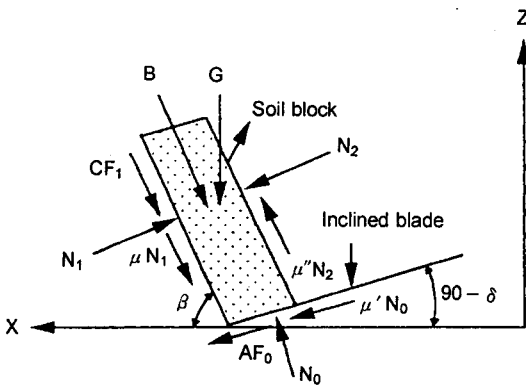


Fig. 3 Freebody diagram of a soil slice for 2-D model.

$$N_0 = (B + CF_1) \cos(\delta - \beta) + G \sin \delta \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, N_0 : 경운날에 대한 토양수직반력

B : 토양 가속력 ; $B = m \frac{dV}{dt}$

m, v : 가속 토양의 질량, 속도

F_1 : 토양 전단면의 면적 ; $F_1 = \frac{bd}{\sin \beta}$

b, d : 경폭, 경심

G : 토양블럭의 중량 ; $G = \frac{\gamma bhd}{\sin \beta}$

γ : 토양의 비중량

h : 토양블럭의 두께

토양의 전단파쇄는 주기적으로 발생하는 간헐적 현상이나 본 모델에서와 같이 연속적으로 발생한다고 가정하여도 전단면을 따라 토양을 가속시키기 위하여 공급된 총 일은 크게 변화되지 않는다. 따라서 수평력이 계산되어질 수 있고, 정지상태로부터 시간 t 까지 가속된 토양질량은 그 시간동안 움직인 토양의 질량과 같다고 가정하면 다음과 같다.

$$m = \frac{\gamma}{g} bdt V_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, g : 중력가속도, V_0 : 작업기 속도

그림 2에서 정지상태에 있던 토양이 t 시간 동안 전단면 방향으로 V_s 에 도달한다면, 이 때 토양의 가속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_s}{t} \quad \dots\dots\dots (3)$$

그림 2에서 작업기의 속도 V_0 는 다음과 같이 결정되고,

$$V_0 = V_s \cos \beta + V_c \sin \delta \quad \dots\dots\dots (4)$$

$V_s \sin \beta = V_c \cos \delta$ 이므로 V_c 를 소거하면 V_s 는 다음과 같이 결정된다.

$$V_s = V_0 \frac{\cos \delta}{\cos(\delta - \beta)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

식 (2), (3), (5)를 $B = m \frac{dV}{dt}$ 대입하면 토양가속력 B 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B = \left(\frac{\gamma}{g} \right) bdV_0^2 \frac{\cos \delta}{\cos(\delta - \beta)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

따라서 식 (1)에서 경운날면에서의 토양반력 N_0 가 계산되어지고, 그림 4의 경운날면의 자유체선도에서 식 (7)과 (8)과 같이 경운날의 수평견인저항 F_x 와 수직견인저항 F_z 를 구할 수 있다. 식 (7)과 (8)에서의 힘들은 하나의 토양블럭에 작용하므로 전체 경운날면에 작용하는 힘은 각각의 토양블럭에 작용하는 합력으로 나타내어질 수 있다.

$$F_x = (AF_0 + \mu'N_0) \cos \delta \quad \dots\dots\dots (7)$$

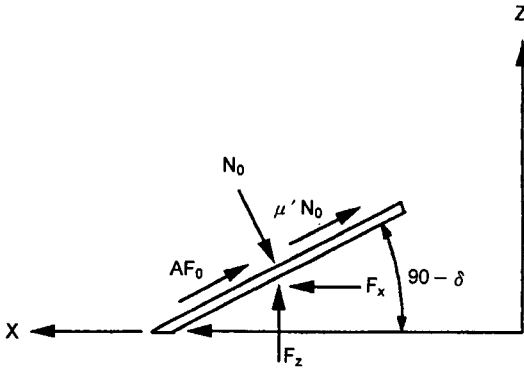


Fig. 4 Free-body diagram of an inclined blade.

$$F_z = (AF_0 + \mu'N_0) \sin \delta + N_0 \cos \delta \dots\dots\dots (8)$$

나. 견인저항 예측 3차원 모델

플라우, 쟁기 등의 경운작업기들은 경운날의 선단이 진행방향과 일정한 각도를 가지고 경사져 있다. 따라서 앞 절에서 유도된 2차원 모델은 3차원 모델로 수정되어야만 실제적으로 이용이 가능하다. 3차원 모델에서는 z축에 대한 경운날의 회전이 고려되어야 하고 경운작업기가 전진함에 따라 y축 방향으로 힘이 작용하게 된다. 그림 5는 경운날이 x축의 방향으로 진행할 때의 오리엔테이션을 보여주고 있다. 여기서는 3차원의 경운날을 나타내기 위해 두 개의 각이 정의된다. δ 는 경운날과 x-y 평면이 만나는 교선과 z축 사이의 각이고, α 는 경운날과 x-y 평면이 만나는 교선과 x축 사이의 각이다. 분석을 용이하게 하기 위하여 각 ϕ' 를 다음과 같이 각 α 와 각 δ 의 함수로 표시하였다.

$$\phi' = \tan^{-1}(\sin \alpha \tan \delta) \dots\dots\dots (9)$$

여기서 ϕ' 는 그림 6에서 선 CD와 선 CE 사이의 각이고, 선 CD는 경운날과 x-y 평면과의 교선에 수직인 경운날상의 선이다. 선 CE는 z축과 평행하다.

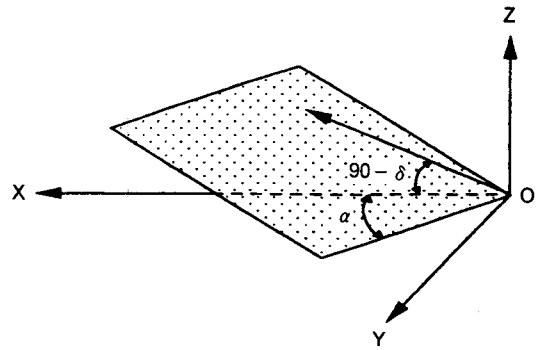


Fig. 5 The orientation of an inclined of tillage tool in 3-D space.

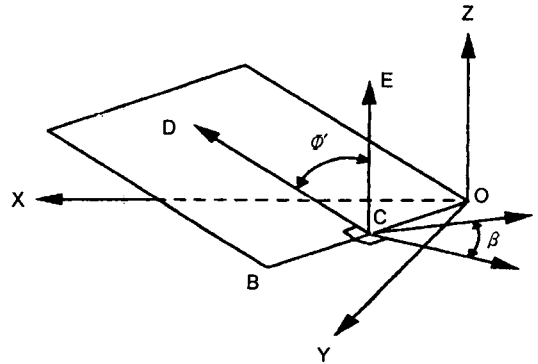


Fig. 6 3-D representation for an inclined plane of tillage tool.

토양의 전단면은 선 OB에 수직하고 x-y 평면으로부터 β 의 각도로 형성된다고 가정한다. 따라서 토양의 가속도와 점착력은 이 전단면에 작용한다. 토양의 자중은 2차원 모델에서와 같이 계산될 수 있다.

$$G = \gamma h \frac{b}{\sin \alpha} \frac{d}{\sin \beta} \dots\dots\dots (10)$$

경운날 선단의 전단면 면적 F_1 은 다음과 같이 계산된다.

$$F_1 = \frac{b}{\sin \alpha} \frac{d}{\sin \beta} \dots\dots\dots (11)$$

토양가속력은 뉴우턴의 제 2법칙에서 다음과 같이 계산되고,

$$B = m \frac{dV}{dt} \dots\dots\dots (12)$$

가속된 토양의 질량은 다음과 같다.

$$m = \frac{G}{g} \dots\dots\dots (13)$$

시간에 따른 속도의 변화를 구하려면 토양의 경운날 위에서의 이동궤적이 고려되어야 한다. 토양의 절대운동은 선단의 전단면에서 이루어지고, 경운날에 대한 상대이동 거리는 경운날위의 토양에 작용하는 힘들이 알려지면 이론적으로 혹은 경험적으로 결정될 수 있다. 그림 7에서와 같이 토양은 경운날상에서 x축으로부터 각도 η 의 방향으로 이동하고, 경운날의 이동속도는 토양이 경운날을 가로지르는 속도와 같다고 가정하였다. 경운날을 가로지르는데 걸리는 시간 t 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \frac{d_p}{V_t} \dots\dots\dots (14)$$

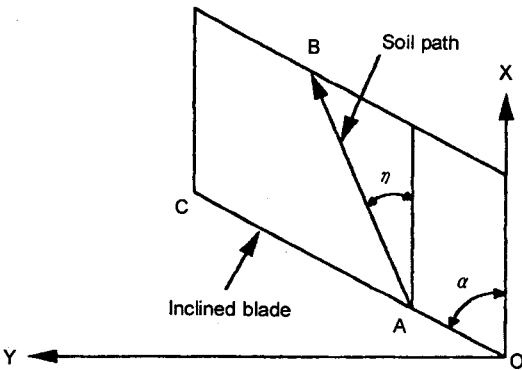


Fig. 7 Soil path on the surface of the inclined plane of tillage tool.

여기서, d_p : 경운날에서 토양의 이동 거리
 V_t : 경운날의 전진속도

따라서 절대속도 V_A 는 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$V_A = \frac{d_s}{t} \dots\dots\dots (15)$$

여기서, d_s : 토양의 전단면에서의 이동 거리
 t : 거리 d_s 를 이동하는데 걸리는 시간

그 가속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(V_A - V_0)}{\Delta t} \dots\dots\dots (16)$$

여기서, V_0 : 초기의 토양속도
 Δt : 속도 V_0 에서 V_A 까지 변화하는 시간

토양블럭이 초기에 정지상태에 있다고 가정하고 식 (13)과 (16)으로부터 토양가속력 B 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B = \frac{GV_A}{g\Delta t} \dots\dots\dots (17)$$

따라서, 식 (1)에서의 모든 변수들이 정의되어 경운날의 토양반력 N_0 가 계산될 수 있고, 앞의 2차원 모델에서와 같이 3차원 모델에서의 경운날의 수평견인저항(F_x), 횡방향견인저항(F_y), 수직견인저항(F_z)을 구할 수 있다.

$$F_x = -(AF_0 + \mu' N_0) \cos \eta \cos \delta + N_0 \cos \phi' \sin \alpha \dots\dots\dots (18)$$

$$F_y = -(AF_0 + \mu' N_0) \sin \eta + N_0 \cos \phi' \cos \alpha \dots\dots\dots (19)$$

$$F_z = -(AF_0 + \mu' N_0) \cos \eta \sin \delta + N_0 \sin \phi'$$

..... (20)

3. 재료 및 방법

가. 곡면 측정장치

본 연구에서 플라우의 형상 표현을 위하여 사용한 곡면측정장치는 포텐쇼미터, 스타일러스, 태엽, 3종류의 풀리로 구성된다. 이 장치에는 모두 3개의 포텐쇼미터(potentiometer)를 사용하였다. 스타일러스를 잡고 측정하고자 하는 임의의 점까지 이동을 하거나 놓으면, 태엽 주위에 감겨 있던 줄이 풀리거나 감기면서 포텐쇼미터를 회전시키게 된다. 한편, 포텐쇼미터는 각각 X축, Y축, 원점에 위치하도록 하여 포텐쇼미터의 회전변위에 따른 저항값의 변화가 직선적인 특성을 이용하여 측정하고자 하는 임의의 점까지의 거리를 측정한다. 측정된 세 거리로부터 임의의 점의 X, Y, Z 좌표가 구해진다. 형상측정장치의 구조는 그림 8과 같다.

나. 견인저항 예측 컴퓨터 모델

형상측정을 위한 프로그램은 C-언어로 작성되었으며, 풀-다운메뉴(pull-down menu)를 구성하여 자

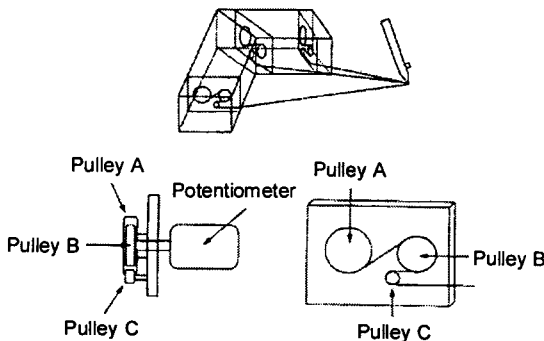


Fig. 8 Structure of a device for measuring plow shape.

료화일 관리에서부터, 형상측정시스템의 제어, 측정, 측정자료의 그래픽적 처리, 토양저항 예측에 이르기까지의 모든 과정을 통합시키도록 하였다. 그림 9에 형상측정 및 견인저항 예측을 위해 구성한 프로그램의 흐름도를 나타내었다.

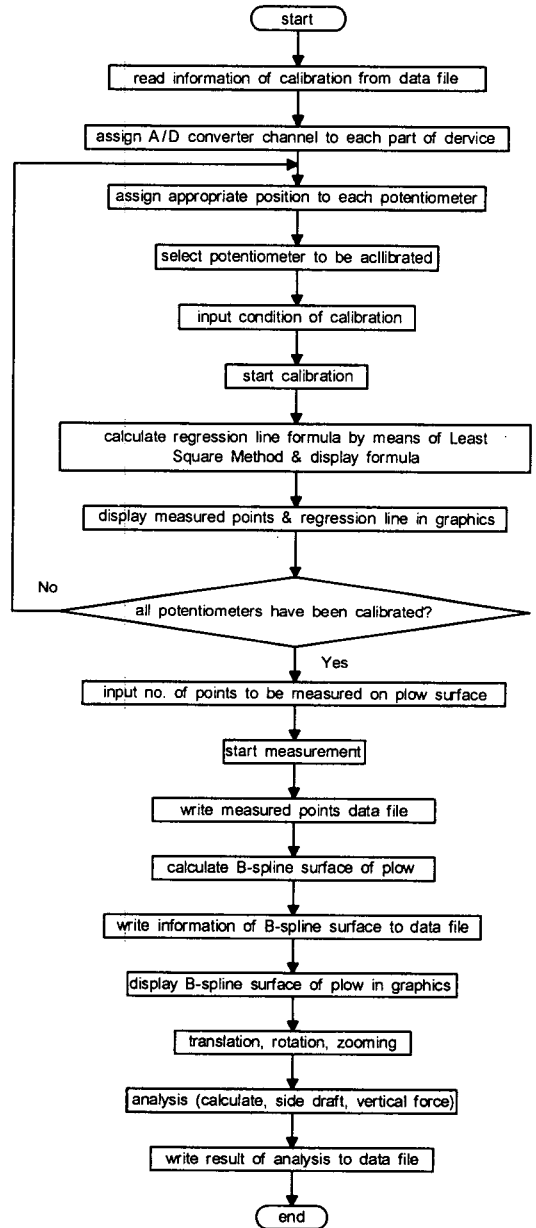


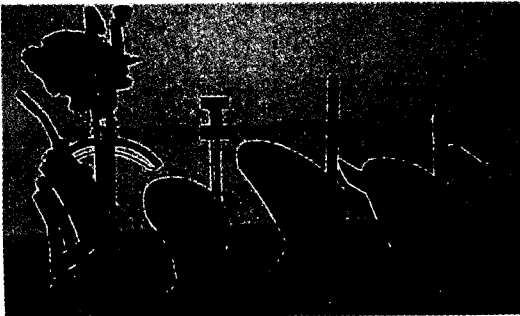
Fig. 9 Flow chart of simulation program.

다. 실험작업기

실험작업기로는 서로 다른 세가지 형태의 소형 모 울드보드 플라우와 8마력 동력경운기 부착용 동양쟁기가 사용되었다. 그림 10은 실험에 사용된 작업기들을 보여주고 있으며, 표 1은 실험작업기들의 규격 및 치수를 보여주고 있다.

라. 견인저항 예측 모델의 검증

작업기-토양간의 상호작용을 정확히 측정하고 신뢰성 있는 자료수집을 위하여 인공 토조시스템에서 모델의 검증실험을 수행하였다. 인공 토조시스템은 토양조 및 레일시스템, 대차구동시스템으로 구성되어 있으며, 토양조는 길이 12m, 폭 1m, 높이 0.7m로서 필요에 따라 토양의 수분 함량을 조절할 수 있



[a] Janggi [b] Plow I [c] Plow II [d] Plow III
Fig. 10 Experimental tillage implements.

도록 배수시설이 되어 있다. 토양가공대차는 토양의 물리적 상태가 실험목적에 적합하도록 실험과 실험사이에 토양을 가공하는 대차로서, 토양가공에 필요한 로타리틸러, 표면다짐롤러, 표층다짐롤러, 균평기, 살수장치 등을 포함하고 있다. 한편, 측정대차에는 수평견인력을 측정할 수 있는 견인력계가 설치되어 있다.

1) 토양가공

토양가공은 매회 실험사이에 필요한 토양상태를 만들기 위해 인공 토조시스템의 토양가공대차를 이용하였다. 우선 깊이 20cm로 로타리 경운작업을 하여 토양에 대한 작업기 실험의 영향을 없앴으며, 그 다음에는 균평기에 의해 토양의 균평작업을 하였다. 마지막으로 표면다짐 롤러를 이용해 지표면의 다짐작업을 2회 하였다. 토양가공의 순서와 회수는 모든 작업기의 실험에 대해 일정하게 하였다.

2) 토양의 물리성 측정

모델의 검증에 필요한 토양의 물리성은 토양채취관을 이용하여 토양가공이 끝난 직후에 표면의 토양을 걷어낸 후 약 8cm와 16cm의 두 깊이에서 임의의 네 곳을 선정하여 토양의 겉보기밀도를 측정하였고, SR-2 모델의 토양전단 측정장치를 이용하여 토조내에서 임의의 네 곳을 선정하여 토양의 점착력, 내부마찰각, 부착력 및 외부마찰각을 측정하였다. 표 2는

Table 1 Specification of tillage implements tested

Implements	Load angle (degree)	Setting angle		Cutting angle (degree)	H (mm)	L (mm)	L/H	Share length (l) (mm)	Moldboard Type
		Shear (degree)	Wing (degree)						
Janggi	45.5	73.0	60.0	48.6	-	-	-	235	5-fork
Plow I	24.0	42.0	53.8	28.0	252	246	0.98	190	cylindroidal
Plow II	31.3	37.4	46.3	46.5	315	250	0.79	260	cylindrical
Plow III	20.4	46.5	56.0	21.8	263	277	1.05	230	semihelical (shortened)

Table 2 Soil physical properties of expeperiment soil

Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
					Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
1,422	5.333	32.898	0.228	1.858	54.4	36.9	8.7	SL

모델검증을 위하여 인공토조에서 측정된 토양의 물리적 특성을 나타내고 있다.

3) 검증실험

검증실험에 사용된 작업기로는 위에서 언급한 세 타입의 플라우 중 첫번째 플라우(플라우 I)가 사용되었다. 검증실험에서는 작업기의 견인력에 영향을 미치는 인자 중 토양조건은 일정하게 유지한 상태에서 경속 세 수준(0.22m/s, 0.33m/s, 0.49m/s)과 경심 세 수준(8cm, 12cm, 16cm)으로 하여 각 처리별 3반복으로 실험을 수행하였다.

마. 모의 실험을 위한 토양 물리성 측정

토양물리성은 우리나라 수도재배의 대표적지역이라 볼 수 있는 이리, 평택, 아산만지역, 여주, 수원, 남양만지역 등지에서 경기작업이 주로 수행되는 3~5월과 10~11월에 걸쳐 SR-2 측정장치를 사용하여 토양점착력, 내부마찰각, 부착력, 외부마찰각 등을 측정하였다. 한편, 토양의 밀도는 표면의 토양을 걷어낸 후 약 2~8cm, 10~16cm의 두 깊이에서 측정하였으며 모든 측정은 3반복으로 하였다.

4. 결과 및 고찰

가. 플라우 곡면 형상 결과

그림 11은 플라우 I에 대해 형상 측정장치로 플라우를 측정하여 그래픽으로 구현한 예와 사진과를 비교한 것이다. 그림 11의 결과로부터 형상측정장치는

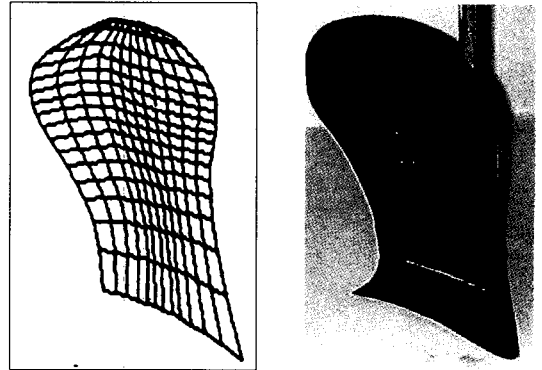


Fig. 11 View of a moldboard plow.

모우드보드 플라우의 형태를 비교적 잘 구현할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 형상측정장치로부터 구현한 모우드보드 플라우는 시뮬레이션 모델에 의한 경운저항예측에 사용할 수 있다고 판단되었다.

나. 경운저항 예측 모델의 검증

표 3은 타원주형(cylindroidal) 모우드보드 플라우의 모의실험 예측 결과를 인공 토조시스템에서의 실험 결과와 비교한 것이다. 실험시의 경속은 0.22, 0.33, 0.49m/s였으며, 경심은 8, 12, 16cm이었다. 경속과 경심에 따라 차이는 있으나 모의 실험 예측치는 실측치와 대략 1~32%의 오차율을 보이고 있으며 특히 세 경속(0.22, 0.33, 0.49m/s) 모두에서 경심이 제일 적은 8cm일 때 가장 큰 오차율을 보이고 있으며, 경속에 따라 약간의 차이는 있으나 50~70 N의 범위 내에 있었다.

Table 3 Comparison between experimental and predicted drafts of cylindrical moldboard plow

Plowing speed (m/s)	Plowing depth (m)	Experimental value (N)	Predicted value (N)	Error (%)
0.22	0.08	222.01	278.70	25.53
	0.12	407.53	403.39	1.02
	0.16	600.52	528.08	12.06
0.33	0.08	220.62	279.32	26.61
	0.12	371.20	404.32	8.93
	0.16	598.59	529.32	11.57
0.49	0.08	212.25	280.67	32.24
	0.12	375.24	406.34	8.29
	0.16	604.16	532.01	11.94

한편, 표 3에 의하면 컴퓨터 모의실험의 예측치는 경심이 낮은 곳에서는 실험치보다 높게, 그리고 경심이 증가함에 따라 그 오차가 점점 감소하여 12cm 전후에서는 실험치와 거의 유사하게, 그리고 12cm 이후에서는 실험치보다 낮은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 그 오차는 점점 커짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 경심이 낮은 곳에서는 실험치가 예측치보다 적으나 경심이 증가함에 따라 실험치의 증가율이 예측치의 증가율에 비해 커짐으로 해서 나타난 것이라 판단된다. 이러한 경향은 우⁽¹⁾ 등의 실험결과와도 거의 비슷한 것으로 판단된다. 표 2에서와 같이 경심이 증가함에 따라 모의 실험에 의한 경운저항의 증가율이 실험치의 증가율에 비해 낮아지고 있는 현상은 모델에 약간의 문제점이 있는 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 우리 나라에서 행하여지고 있는 경운작업의 경심은 12~18cm의 범위이며, 경심 16cm에서의 예측 오차는 약 70 N 정도로서 12% 전후의 오차율을 보이고 있다. 따라서 경심 12~16cm 범위에서는 컴퓨터 모의 실험에 의한 경운저항의 예측이 가능하다고 판단되었다.

다. 모의 실험에 의한 경운저항

1) 토양자료의 분석

컴퓨터 모의실험을 위해 측정된 토양물리성은 토

양밀도, 점착력, 내부마찰각, 부착력, 외부마찰각 등이었으며, 이외에 참고자료로 수분 함량과 토성을 조사하였다. 위의 토양물리성은 이리, 남양, 여주, 평택, 아산, 수원지역에서 경운작업이 주로 수행되어지는 10~11월과 3~5월에 걸쳐 수도포장을 대상으로 측정되었으며, 각 지역별로 1~6곳을 선정하여 각 3반복으로 측정하였다. 표 4는 측정된 토양물리성을 지역별로 정리한 것이다.

조사지역의 토성은 미사질양토(SiL)가 9곳으로 제일 많았으며 그 다음은 사질양토 (SL)가 5곳, 양토(L)가 4곳, 미사질식양토(SiCL)가 2곳 있었다. 이 지역에서 경운정지 시기의 토양 수분 함량은 주로 30~40%의 범위이었으며, 드물게 20% 범위의 지역과 50%가 넘는 지역이 한 두 곳 있었다. 겉보기 밀도는 대부분 1,500~1,700kg/m³의 범위이었다.

점착력은 대부분 지역에서 5~12kPa이었으며, 아산 한 지역에서만 약 0.5kPa로서 큰 차이를 보이고 있다. 내부마찰각은 지역과 토성에 따라 차이는 있으나 25~60°의 범위이었다. 토양-금속 마찰계수는 0.2에서 0.8까지 그 범위가 큰 편이었으며, 토양-금속 부착력은 0.2에서 1.8kPa의 범위이었다.

2) 경운저항의 분석

경운저항을 플라우타일별로 비교 분석하기 위해서는 동일 경심과 경폭으로부터 구하여진 값이어야

Table 4 Soil physical properties measured for predicting tillage implement draft from computer simulation model

Region	Moisture Content (%)	Bulk Density (wet) (kg/m ³)	Cohesion (kPa)	Internal frictional angle (deg.)	Soil-metal frictional coeff.	Soil-metal adhesion (kPa)	Composition			Texture
							Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	
Iri-1	34.940	1,633.5	8.016	41.337	0.381	0.995	11.4	62.8	25.8	SiL
Iri-2	51.480	1,502.0	10.408	24.530	0.249	1.608	12.9	61.3	25.8	SiL
Iri-3	44.297	1,643.0	10.65	32.329	0.318	1.30	8.4	62.7	28.9	SiCL
Namyang-1	27.165	1,748.0	11.660	37.864	0.347	0.646	4.1	69.0	26.9	SiL
Namyang-2	33.384	1,762.0	10.983	30.084	0.337	1.327	10.1	69.6	20.3	SiL
Namyang-3	23.037	1,547.5	8.456	43.602	0.587	0.273	5.1	74.6	20.3	SiL
Namyang-4	32.882	1,698.5	11.040	33.707	0.364	1.755	3.9	69.8	26.3	SiL
Yeosu-1	24.765	1,528.0	6.931	38.547	0.437	0.161	57.4	28.4	14.2	SL
Yeosu-2	21.035	1,547.5	6.799	40.141	0.465	0.365	53.8	30.7	15.5	SL
Yeosu-3	34.898	1,574.5	6.921	38.445	0.378	1.355	40.8	34.7	24.5	L
Yeosu-4	36.468	1,493.5	8.058	38.990	0.406	0.974	12.7	49.6	37.7	SiCL
Yeosu-5	32.672	1,525.0	6.485	40.782	0.417	0.616	36.5	37.3	26.2	L
Yeosu-6	37.972	1,640.5	6.348	42.140	0.427	0.644	58.5	32.5	9.0	SL
Pyeongtaek-1	32.168	1,697.5	5.804	50.12	0.403	0.562	56.7	32.0	11.3	SL
Pyeongtaek-2	36.030	1,604.5	5.989	49.810	0.424	0.572	37.2	47.4	15.4	L
Pyeongtaek-3	37.646	1,588.0	7.339	50.771	0.362	0.758	19.0	58.3	22.7	SiL
Pyeongtaek-4	37.187	1,644.5	5.60	53.406	0.413	0.495	0.8	83.7	15.5	SiL
Asan	27.489	1,525.0	0.49	50.627	0.402	0.42	2.2	80.0	17.8	SiL
Suwon-1	36.828	1,677.5	10.869	59.324	0.699	0.527	46.9	41.9	11.2	L
Suwon-2	30.133	1,762.0	10.215	57.733	0.750	1.124	59.4	31.4	9.2	SL

한다. 그러나 본 실험에 사용된 플라우들은 모두 서로 다른 형태와 경폭을 갖고 있음으로서 경심의 조절은 가능하나 경폭의 조절은 불가능하였다. 따라서 본 분석에서는 경운저항값 대신 경운 비저항값을 이용하기로 하였다. 위의 토양자료를 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 입력하여 각 지역별, 경심별, 경속별, 플라우 형태별로 구한 경운 저항값으로부터 구한 경운 비저항값을 정리한 것이 표 5에 나타나 있다. 이 표에 의하면 원통형 모울드보드 플라우의 경운 비저항값은 토성과 경심, 경속에 따라 3~6N/cm², 타원주형 모울드보드 플라우에서는 2.5~5.0N/cm², 동양쟁기에서는 2.0~4.3N/cm², 반나선형 모울드보드 플라우의 경우는 1.5~3.0N/cm²의 범위이었다. 동일조건 하에서 플라우 형태에 따른 경운 비저항값의 차이는

뚜렷하게 나타났으며 그 크기는 원통형, 타원주형, 동양쟁기, 반나선형 모울드보드 플라우의 순서로 나타났다. 각 플라우 형태에 따른 경운 비저항값들은 경속별, 경심별, 토성별로 다음과 같이 분석키로 하였다.

(1) 경속에 따른 경운비저항

그림 12는 미사질양토에 있어서, 그리고 그림 13은 미사질 식양토에서 각각 경심이 12cm일 때 각 플라우 형태별로 경속과 경운 비저항과의 관계를 나타낸 그래프이다.

두 토성 모두에서 경운 비저항값들은 경속에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으나 증가율은 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그러나 플라우 형태별로

Table 5 Predicted specific draft from simulation model at plowing depth of 8cm, 12cm and 16cm

Region	Implement type Plowing speed (m/s)	Cylindrical moldboard plow			Cylindroidal moldboard plow			Semiherical moldboard plow			Janggi		
		Plowing depth (cm)											
		8	12	16	8	12	16	8	12	16	8	12	16
Iri-1	0.49	4.686	4.550	4.482	3.796	3.613	3.521	2.147	2.048	1.999	3.495	3.051	2.830
	1.00	4.752	4.617	4.549	3.896	3.712	3.620	2.203	2.104	2.054	3.540	3.097	2.875
	1.50	4.866	4.731	4.663	4.071	3.887	3.796	2.343	2.244	2.195	3.608	3.165	2.943
Iri-2	0.49	3.128	2.985	2.913	2.640	2.446	2.348	1.578	1.473	1.421	2.794	2.324	2.089
	1.00	3.192	3.049	2.977	2.749	2.554	2.457	1.687	1.582	1.529	2.802	2.332	2.097
	1.50	3.310	3.167	3.095	2.957	2.762	2.665	1.929	1.824	1.771	2.784	2.314	2.079
Iri-3	0.49	4.016	3.866	2.791	3.283	3.079	2.978	1.915	1.805	1.750	3.288	2.797	2.551
	1.00	4.082	3.931	3.856	3.386	3.182	3.081	1.987	1.878	1.823	3.314	2.823	2.578
	1.50	4.199	4.049	3.974	3.582	3.378	3.302	2.188	2.078	2.023	3.339	2.848	2.602
Yeosu-1	0.49	4.170	4.085	4.042	3.398	3.283	3.225	1.928	1.865	1.834	2.801	2.523	2.384
	1.00	4.237	4.152	4.109	3.500	3.385	3.327	1.983	1.921	1.890	2.853	2.575	2.435
	1.50	4.352	4.267	4.224	3.680	3.565	3.508	2.135	2.073	2.042	2.933	2.654	2.515
Yeosu-2	0.49	4.503	4.381	4.321	3.718	3.554	3.472	2.092	2.004	1.959	3.276	2.879	2.681
	1.00	4.571	4.449	4.389	3.821	3.657	3.574	2.148	2.059	2.015	3.331	2.934	2.736
	1.50	4.687	4.566	4.505	4.002	3.837	3.755	2.292	2.203	2.159	3.417	3.020	2.822
Yeosu-3	0.49	4.019	3.884	3.816	3.347	3.164	3.073	1.920	1.822	1.772	3.132	2.690	2.469
	1.00	4.084	3.949	3.881	3.447	3.264	3.172	1.976	1.878	1.828	3.174	2.732	2.511
	1.50	4.197	4.062	3.994	3.625	3.442	3.350	2.134	2.036	1.986	3.236	2.794	2.573
Yeosu-4	0.49	4.398	4.258	4.188	3.598	3.408	3.313	2.033	1.931	1.880	3.700	2.934	2.705
	1.00	4.461	4.321	4.251	3.694	3.505	3.410	2.087	1.984	1.933	3.748	2.978	2.749
	1.50	4.570	4.430	4.360	3.866	3.676	3.581	2.237	2.135	2.084	3.820	3.044	2.815
Yeosu-5	0.49	4.229	4.106	4.044	3.482	3.315	3.232	1.973	1.883	1.838	3.145	2.743	2.542
	1.00	4.293	4.170	4.108	3.578	3.411	3.328	2.026	1.936	1.892	3.192	2.790	2.589
	1.50	4.402	4.279	4.218	3.747	3.581	3.497	2.162	2.072	2.027	3.263	2.861	2.660
Yeosu-6	0.49	4.556	4.429	4.366	3.781	3.609	3.524	2.137	2.045	1.999	3.334	2.920	2.713
	1.00	4.626	4.499	4.436	3.886	3.714	3.628	2.194	2.102	2.056	3.389	2.974	2.767
	1.50	4.745	4.619	4.555	4.068	3.897	3.811	2.333	2.240	2.194	3.474	3.060	2.853
Pyeongtaek-1	0.49	5.505	5.386	5.326	4.399	4.239	4.158	2.441	2.354	2.311	3.778	3.390	3.196
	1.00	5.573	4.454	5.395	4.497	4.336	4.255	2.497	2.411	2.367	3.832	3.444	3.250
	1.50	5.688	5.569	5.510	4.665	4.504	4.423	2.599	2.512	2.469	3.917	3.529	3.335
Pyeongtaek-2	0.49	5.363	5.236	5.172	4.263	4.090	4.004	2.358	2.265	2.219	3.788	3.372	3.164
	1.00	5.428	5.300	5.237	4.354	4.181	4.095	2.411	2.319	2.272	3.837	3.421	3.213
	1.50	5.535	5.408	5.344	4.512	4.339	4.253	2.509	2.416	2.369	3.914	3.498	3.290
Pyeongtaek-3	0.49	5.754	5.623	5.557	4.423	4.246	4.158	2.431	2.335	2.287	4.035	3.608	3.394
	1.00	5.814	5.683	5.618	4.508	4.331	4.243	2.482	2.386	2.339	4.078	3.650	3.437
	1.50	5.916	5.785	5.720	4.656	4.479	4.390	2.573	2.478	2.430	4.143	3.716	3.502
Pyeongtaek-4	0.49	6.117	5.994	5.933	4.754	4.588	4.505	2.596	2.507	2.462	4.160	3.758	3.557
	1.00	6.182	6.059	5.998	4.844	4.678	4.594	2.650	2.560	2.515	4.210	3.808	3.608
	1.50	6.290	6.167	6.106	4.999	4.833	4.749	2.743	2.653	2.608	4.290	3.888	3.687
Namyang-1	0.49	5.366	5.249	5.191	4.210	4.052	3.973	2.374	2.289	2.246	3.717	3.336	3.145
	1.00	5.438	5.321	5.263	4.320	4.162	4.083	2.436	2.351	2.308	3.765	3.383	3.193
	1.50	5.564	5.341	5.389	4.518	4.360	4.281	2.613	2.527	2.485	3.833	3.452	3.261
Namyang-2	0.49	4.168	4.023	3.951	3.471	3.275	3.177	2.027	1.921	1.869	3.297	2.824	2.588
	1.00	4.244	4.099	4.027	3.592	3.396	3.298	2.118	2.013	1.960	3.334	2.862	2.625
	1.50	4.379	4.235	4.163	3.820	3.624	3.527	2.354	2.248	2.196	3.376	2.903	2.667
Namyang-3	0.49	6.283	6.177	6.124	4.964	4.821	4.750	2.673	2.596	2.558	4.158	3.813	3.640
	1.00	6.356	6.250	6.197	5.073	4.929	4.858	2.730	2.653	2.614	4.228	3.883	3.710
	1.50	6.479	6.373	6.320	5.258	5.115	5.044	2.855	2.778	2.739	4.342	3.997	3.824
Namyang-4	0.49	4.767	4.593	4.506	3.926	3.691	3.573	2.247	2.120	2.057	3.862	3.294	3.010
	1.00	4.839	4.665	4.578	4.039	3.803	3.685	2.320	2.193	2.130	3.904	3.336	3.052
	1.50	4.967	4.793	4.706	4.248	4.012	3.895	2.525	2.398	2.334	3.961	3.393	3.108
Asan	0.49	2.859	2.742	2.684	2.680	2.522	2.443	1.606	1.521	1.478	2.277	1.895	1.704
	1.00	2.920	2.803	2.745	2.767	2.609	2.530	1.656	1.571	1.528	2.322	1.940	1.749
	1.50	3.022	2.905	2.847	2.917	2.759	2.680	1.751	1.665	1.623	2.393	2.011	1.820
Suwon-1	0.49	6.120	6.091	6.077	4.710	4.672	4.653	2.550	2.530	2.520	3.411	3.319	3.273
	1.00	6.192	6.164	6.150	4.813	4.775	4.756	2.609	2.588	2.578	3.476	3.384	3.338
	1.50	6.314	6.286	6.272	4.991	4.953	4.933	2.711	2.691	2.681	3.581	3.489	3.443
Suwon-2	0.49	5.905	5.845	5.815	4.728	4.646	4.605	2.592	2.548	2.526	3.523	3.326	3.228
	1.00	5.984	5.924	5.894	4.841	4.760	4.719	2.654	2.610	2.588	3.596	3.400	3.301
	1.50	6.116	6.056	6.026	5.036	4.955	4.914	2.768	2.724	2.702	3.716	3.519	3.421

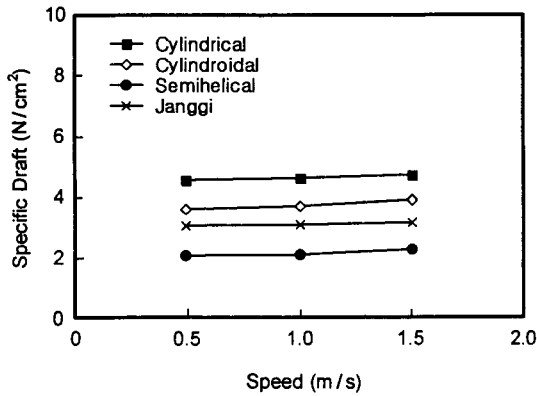


Fig. 12 Relationships between plowing speed and specific draft of 4 different types of plows for silty loam at plowing depth of 12cm.

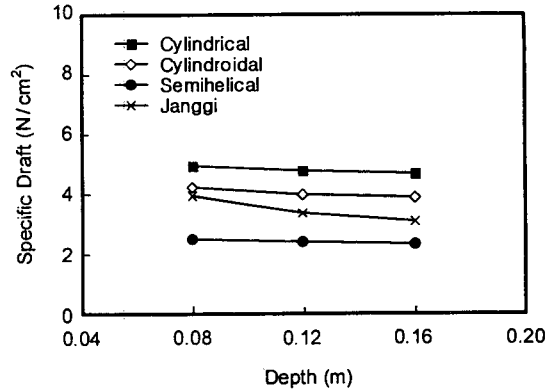


Fig. 14 Relationships between plowing depth and specific draft of 4 different type of plows for silty loam at plowing speed of 1.5m/s.

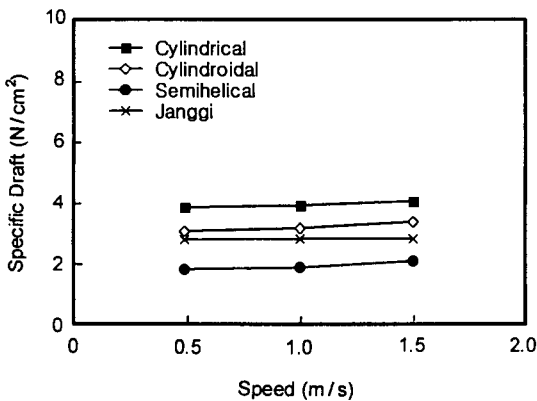


Fig. 13 Relationships between plowing speed and specific draft of 4 different types of plows for silty clay loam at plowing depth of 12cm.

는 경운 비저항값의 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 원통형 모듈드보드 플라워의 경운 비저항이 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 타원주형 모듈드보드 플라워, 동양쟁기, 반나선형 모듈드보드 플라워의 순서였으며, 대체적으로 타원주형 모듈드보드 플라워와 쟁기의 경운 비저항값은 비슷한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 토성과 경심에 따라 약간의 차이는

있으나 거의 모든 지역에서, 그리고 세 경심(8, 12, 16cm)의 범위 모두에서 비슷한 경향을 보이고 있다 (표 5참조). 위의 결과로부터 조사지역에서 현재 많이 사용되고 있는 동양쟁기의 경운비저항은 상당히 낮은 편으로 나타났으나 반나선형보다는 높게 나타났음을 알 수 있다. 따라서 우리나라에서 반나선형 모듈드보드 플라워의 사용 가능성을 경운저항의 측면 뿐 아니라 토양반전, 토양파괴의 측면에서 좀더 심도있는 연구를 통해 검토할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

(2) 경심에 따른 경운 비저항

그림 14는 미사질양토에 있어서, 그리고 그림 15는 양토에서 각각 경속이 1.5m/s일 때 플라워 형태 별로 경심과 경운 비저항과의 관계를 나타낸 그래프이다.

두 토성 모두에 있어서 경심에 따른 경운 비저항의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 미사질양토에서의 경운 비저항값은 원통형 모듈드보드 플라워에 있어서 5N/cm² 전후, 타원주형 모듈드보드 플라워의 경우 약 4N/cm², 동양쟁기의 경우 약 3N/cm²,

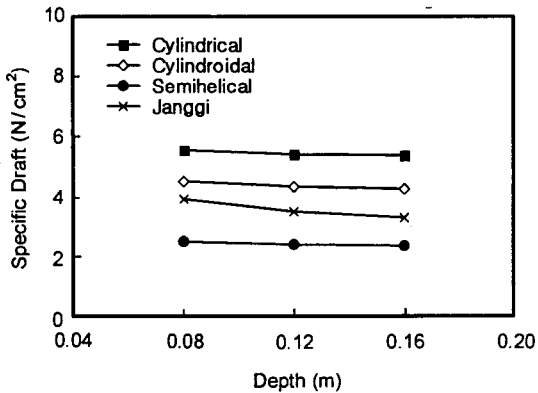


Fig. 15 Relationships between plowing depth and specific draft of 4 different types of plows for loam at plowing speed of 1.5m/s.

반나선형 모울드보드 플라워의 경우 약 2N/cm²이었으며, 양토에 있어서는 각 플라워 형태별로 미사질 양토에 비해 약 0.5N/cm² 정도 높음을 알 수 있다. 경심에 따른 경운 비저항값도 플라워 형태별로 뚜렷한 차이를 보이고 있음을 위의 두 그림으로부터 알 수 있다. 경심에 따른 경운 비저항값도 원통형 모울드보드 플라워에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 타원주형 모울드보드 플라워, 동양쟁기, 반나선형 모울드보드 플라워의 순서였다. 이러한 현상은 토성과 경속에 따라 약간의 차이는 있으나 거의 모든 지역에서, 그리고 세 경속(0.5, 1.0, 1.5m/s)의 범위 모두에서 비슷한 경향을 보이고 있다(표 5 참조).

5. 요약 및 결론

본 연구는 국내 논토양의 경운작업에 적합한 한국형 모울드보드 플라워의 개발을 위해 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 이용하여 플라워의 비저항을 중심으로 토양상태에 따른 적정 모울드보드의 형태를 제시하기 위해 수행되었다. 본 연구결과는 다음과 같다.

측정된 토양 물리성은 토양밀도, 점착력, 내부마찰각, 부착력, 외부마찰각 등이었으며, 이리, 남양, 여주, 평택, 아산, 수원지역에서 측정되었다. 이외에 수분 함량과 토성이 참고자료로 측정되었으며, 경운 정지작업이 주로 수행되는 10~11월과 3~5월에 걸쳐 수도포장을 대상으로 측정되었다. 조사지역의 토성은 미사질양토(SiL)가 9곳으로 제일 많았으며, 그 다음은 사질양토(SL)가 5곳, 양토(L)가 4곳, 미사질 식양토(SiCL)가 두 곳이었다. 이 지역에서 경운정지 시기의 토양 수분 함량은 주로 30~40%의 범위이었다. 겉보기 밀도는 대부분 1,500~1,700kg/m³의 범위이었으며 점착력은 대부분 지역에서 5~12kPa이었다.

컴퓨터 모델에 의한 모의 실험의 가능성을 검토하기 위해 타원주형 모울드보드 플라워를 이용하여 컴퓨터모델에 의한 예측결과와 인공토조 시스템에서의 실험결과를 비교하였다. 일반적으로 우리나라에서 수행되어지고 있는 경운작업의 주요 경심 범위인 12~16cm에서 예측치는 대략 1~12%의 오차범위내에서 실험치를 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 모의 실험결과를 플라워 비저항을 중심으로 적정 플라워 타임을 선정하는 데 이용할 수 있는 것으로 판단되었다.

토양자료를 컴퓨터 시뮬레이션 모델에 입력하여 각 지역별, 경심별, 경속별, 플라워 형태별로 구한 결과 원통형 모울드보드 플라워의 비저항은 토성과 경속에 따라 3~6N/cm², 타원주형 모울드보드 플라워에서는 2.5~5.0N/cm², 동양쟁기에서는 2.0~4.3N/cm², 반나선형 모울드보드 플라워의 경우는 1.5~3.0N/cm²의 범위이었다. 동일조건하에서 플라워 형태에 따른 플라워 비저항값의 차이는 뚜렷하게 나타났으며 그 크기는 원통형, 타원주형, 동양쟁기, 나선형 모울드보드 플라워의 순서로 나타났다.

참고 문헌

참고 문헌

1. 박준걸. 1992. 쟁기의 경운저항력 측정 및 예측에

- 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
2. 우상하. 1993. 몰드보드 플라우에 작용하는 토양 저항 예측시스템 개발. 서울대학교 대학원석사학위논문.
 3. Emmett, W. T. Jr. 1983. Computer-Aided performance predictions of coated moldboard plow. M. S. Thesis, Cornell Univ., Ithaca, NY.
 4. Gill, W. R. and G. E. Vanden Berg. 1967. Soil Dynamics in Tillage and Traction. U.S.D.A.
 5. Nichols, M. L. and I. F. Reed. 1934. Soil Dynamics : VI. Physical reactions of soils to moldboard surfaces. Agric. Engng. 15(6):187-190.
 6. Richey, S. B. 1987. The Computer-Aided Design of moldboard plow surfaces using three dimensional graphic techniques. M. S. Thesis, Michigan State Univ.