驅動輪의 性能豫測에 적합한 土壤變數의 次元解析을 위한 車輪－土壤 시스템의 相似性 硏究(Ⅰ)

－牽引力 豫測 分析－

A Similitude Study of Soil－Wheel System for Identifying the Dimension of Pertinent Soil Parameter(Ⅰ)

－Pull Prediction Analysis－

李 揆 昇* 鄭 昌 柱**
K. S. Lee, C. J. Chung

Summary

This study was conducted to investigate the applicability of true model theory for pull prediction in a powered lugged wheel-soil system and to examine the possibility of using principles of similitude in investigating the dimensions of soil parameters pertinent to a powered lugged wheel-soil system concerning the pull prediction.

The following conclusions were derived from the study;

1) The pull of prototype wheels proved to be predicted by those of the model wheels for the range of the dynamic weight tested. The pull curves of models and prototype were respectively very similar in the shape. From this basic knowledge, it was enabled to apply the similitude theory to the performance prediction of the true model.

2) A conditional equation which can be used for the prediction of pull of prototype by model test was derived as follows.

$$n_f = n_l^{-b}$$

where n_f : force scale = w/w_m

n_l : length scale = ℓ/ℓ_m

b : exponent on the length dimension of the soil property α

The range of the numerical value of b, which was determined by the least square method, was fouhd to be -2.0 ~ -2.6.

3) Considering a relatively wide variation of b values in the pull prediction, b is considered to be a function of many variales. Thus it was concluded that there are several soil properties which are pertinent to the powered lugged-wheel-soil system concerning the pull prediction, and these soil properties may have the different effects on the pull of model and protytype wheels, to give the different dimension on the soil parameters.

*成均館大學校 農科大學 農業機械工學科
**서울大學校 農科大學 農工學科

1. 緒 論

牽引力學과 관련된 土壤의 물리적 특성을 연구하는데 있어서 相似性理論은 상당히 유효한 방법으로 인식되어 왔으며, 많은 농공학자들이 車輪-土壤 시스템에 대한 물리적 기본현상을 이해하기 위해 相似性理論을 이용한 연구를 수행하여 왔다. 이러한 相似性研究들은 車輪-土壤 시스템과 관련된 물리적 變數들의 영향, 크기 특성등을 이해하는데는 크게 도움이 되어왔다. 그러나 아직 車輪-土壤 시스템의 성능분석에 충분한 土壤變數의 적절한 선택이 이루어지지 않아 많은 연구의 필요성을 느끼고 있다.[4,11] 이와 같은 土壤變數들의 적절한 선택은 우선 車輪-土壤 시스템과 관련된 土壤變數들의 차원을 연구함으로서 그 가능성을 높일 수 있다. 따라서 본 연구의 目的은 다음과 같다.

(1) 러그가 있는 驅動輪의 牽引力豫測을 위해 驅動輪-土壤 시스템에 있어서 진모델 예측의 가능성을 검토한다.

(2) 러그가 있는 驅動輪-土壤 시스템의 견인력 예측에 적합한 土壤變數들의 次元을 연구하는데 있어서 相似性理論의 이용가능성을 검토하여, 이 시스템에 관련되는 土壤變數의 次元을 결정한다.

2. 相似法에 의한 車輪-土壤 시스템의 分析

가. 變數와 設計條件

표 1은 일반적으로 러그가 있는 驅動輪-土壤 시스템에 관련된다고 보고되고 있는 變數들 중 본 分析에 이용된 변수들을 보여주고 있다.

여기서 $i=1,2,\cdots P$; $j=1,2,\cdots q$

Young(3)에 의하면 현재까지 차륜-토양 시스템에 영향을 미치는 土壤變數는 확실히 알려져 있지 않다고 보고되고 있으나 토양변수들은 힘, 길이, 시간의 基本 次元으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 그러나 시간에 관계되는 토양변수는 車輪-土壤 시스템에 관계되는 모든 現象이 순간적이므로 제외시켜 토양변수를 α, α_i, β_j로 나타내었다. 시스템변수 중

Table 1. Lugged wheel-soil system parameters

Parameters	Symbol	Dimensions
	Dependent Parameters	
Pull	P	F
	Independent Parameters	
Soil:		
soil property A	α	FL^b
soil property A_i	α_i	FL^{bi}
soil property B_j	β_j	–
Wheel:		
Diameter	d	L
Width	b	L
Lug angle	θ	–
Other Length	l	L
System:		
Dynamic weight	W	F
Slip	S	–

에는 본 分析에 이용된 변수외 속도, 차륜-토양 마찰, 중력가속도 등을 들수 있다. 그러나 Clark(3)등에 의하면 속도는 0.15~1.5 m/s의 범위에서는 슬립이 일정한 경우 牽引力에 큰 영향을 미치치 않는 것으로 보고되고 있다. 따라서 실험속도를 砂壤土에서는 0.23 m/s, 砂土에서는 0.35 m/s로 고정하여 속도를 시스템변수에서 제외시켰다. 또한 차륜-토양 마찰력이나 중력가속도에 의한 힘은 다른 힘들에 비해 미미하다고 판단되어 시스템변수에서 除外시켰다. 性能을 나타내는 종속변수로는 牽引力, 沈下量, 走行抵抗등이 있으나 본 연구에서는 견인력만을 分析하였다.

표 2는 Buckingham의 Pi 정리에 의해 본 분석에 이용된 변수들로 부터 만들어진 Pi項과 각 변수들에 있어서 원형시스템에 대한 모델의 척도를 보여주고 있다.

위의 Pi항으로부터 러그가 있는 구동륜-토양 시스템에 있어서 견인력 예측에 관한 함수 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P}{W}=f(b/d,\ l/d,\ \theta,\ S,\ W/\alpha l^{-b},\ \alpha_i/\alpha l^{(bi-b)},\ \beta_i) \quad \cdots\cdots(1)$$

Table 2. List of Pi Terms and Scales

$\pi_1=P/W$	$\pi_5=S$	$\alpha/\alpha_m=n_\alpha$
	$\pi_6=W/\alpha l^{-b}$	$\alpha_i/\alpha_{im}=n_{\alpha i}$
$\pi_2=b/d$	$\pi_i=\alpha_i/\alpha l^{(bi-b)}$	$\beta_j/\beta_{jm}=n_{\beta j}$
$\pi_3=l/d$	$\pi_j=\beta_j$	$W/W_m=n_w$
$\pi_4=\theta$		$S/S_m=n_s$

모델이론에 의하면 모델이 原型의 性能을 정확히 예측하기 위하여는 표3의 설계 조건을 만족시켜야 하며, 만일 이 設計條件이 만족된다면 다음과 같은 예측식을 얻을 수 있다.

$$\pi_{1m}=\pi_1$$

牽引 시스템의 性能을 나타내는 특성힘 즉 牽引力(tractive force)을 얻기 위하여는 動荷重 W를 주어야 하고, 牽引力은 動荷重에 따라 변한다. 그러나 작업기 시스템의 性能을 나타내는 특성힘 즉 牽引力(draft)은 작업 깊이나 작업속도에 따라 변한다. 이와 같이 牽引 시스템은 일반적으로 작업기 시스템과는 다르다. 따라서 牽引시스템은 人力動荷重으로부터 계산된 힘의 척도를 이용해 土壤의 次元을 연구할 수 있는 가능성을 제시한다.

Table 3. Design conditions and similarity requirements in terms of scales.

Design condition	Scales
1) $b/d=(b/d)_m$	1) $n_d=n_b=n_l$
2) $l/d=(l/d)_m$	2) $n_\theta=1$
3) $\theta=\theta_m$	3) $n_s=1$
4) $S=S_m$	4) $n_w=n_\alpha n_l^{-b}=n_f$
5) $W/\alpha l^{-b}=(W/\alpha l^{-b})_m$	5) $n_{\alpha i}=n_\alpha n_l^{(bi-b)}$
6) $\alpha_i/\alpha l^{(bi-b)}=[\alpha_i/\alpha l^{(bi-b)}]_m$	6) $n_{\beta j}=1$
7) $\beta_j=\beta_{jm}$	

즉 표3의 설계조건을 검토하여 보면 土壤變數 α, α_i의 次元을 연구할 수 있는 가능성을 제시하여 주고 있다. 만일 α의 次元이 α_i의 次元과 같다면 즉 bi=b라면 설계조건 (6)은 $\alpha_i/\alpha=(\alpha_i/\alpha)_m$이 된다. 따라서 $n_{\alpha i}=n_\alpha n_l^{bi-b}$는 $n_{\alpha i}=n_\alpha$가 된다. 또는 α가 다른 차원을 가진 여러 토양의 곱으로 나타나는 경우와 α가 αi의 함수인 경우에는 αi는 α에 포함되기 때문에 設計條件 (6)은 없어지게 된다.

이외에 차원을 가진 토양변수를 포함하고 있는 설계조건은 $n_f=n_\alpha n_l^{-b}$이다.

만일 모델과 原型이 같은 토양조건하에서 작동된다면 $n_\alpha=1$이 되며 $n_f=n\ n_e^{-b}$식은 $n_f=n^{1-b}$가 된다. 이식은 설계조건 $W/\alpha l^{-b}=(W/\alpha l^{-b})_m$이 만족되면 성립된다.

이러한 가정하에서 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\frac{P}{W}=f'(b/d,\ l/d,\ \theta,\ S,\ W/\alpha l^{-b},\ \alpha_1/\alpha,\ \beta_j) \quad \cdots\cdots(2)$$

이러한 식은 동일한 물리적 시스템에 의해 지배되는 모델에도 성립되므로 모델에 대한 식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{P}{W}\right)_m=f'[(b/d)_m,\ (l/d)_m,\ \theta,\ S_m,\ (W/\alpha l^{-b})_m,\ (\alpha_1/\alpha)_m,\ \beta_{jm}] \quad \cdots\cdots(3)$$

위의 두식으로부터 모델이 原型의 性能을 예측하기 위하여는 다음 설계조건을 만족시켜야 한다.

(1) $b/d=(b/d)_m$ (5) $W/\alpha l^{-b}=(W/\alpha l^{-b})_m$
(2) $l/d=(l/d)_m$ (6) $\alpha_1/\alpha=(\alpha_1/\alpha)_m$
(3) $\theta=\theta_m$ (7) $\beta_j=\beta_j$
(4) $S=S_m$

위의 설계조건을 검토하면 설계조건 (1)(2)는 모델과 原型의 모든 길이척도(length scale, n_l)를 n_d에 따라 제작하면 성립되며, 설계조건 (3)은 러그의 각도를 모델과 原型에 동일하게 제작하면 성립된다. 설계조건 (4)는 모델과 原型의 슬립을 동일하게 유지하면 성립되며, 설계조건 (6)(7)은 同一 土壤 상태하에서 실험을 하게 되면 성립된다.

이 외에 설계조건 (5)번이 남게되는데 이 설계조건이 성립되는지 여부는 실험을 통해서 증명이 되어야 한다. 만일 W를 변화 시켜가며 실험을 하였을 때 모델과 原型의 기본적인 거동이 같고 실험조건 (5)가 만족되면 $\frac{P}{W}=\left(\frac{P}{W}\right)_m$ 식이 성립된다. 즉 진모델이 성립한다. 그러면 앞의 가정으로부터 $n_f=n_l^{1-b}$가 성립되게 되며, 次元을 갖은 土壤變數의 길이次元의 지수 b를 구할 수 있다.

나. 實驗設計 및 分析方法

1) 實驗設計

앞절에서 牽引力 豫測式은 다음과 같이 주어졌다.

$$\frac{P}{W} = f(b/d,\ l/d,\ \theta,\ S,\ W/\alpha l^{-b},\ \alpha_1/\alpha,\ \beta_1) \quad \cdots(2)$$

윗식을 검토하여 보면 왜곡을 초래치 않고 pi 항의 값을 변화시킬 수 있는 독립변수는 $\pi_5 = W/\alpha l^{-b}$ 임을 알 수 있다. 여기서 α는 정의되지도 않고 측정되지도 않았기 때문에 π값을 구할수는 없어도 π_5의 값은 W를 변화시켜서 새로운 값을 얻을 수 있다. 만일 W를 변화시키면서 진모델 예측이 가능할 때 $\pi_5 = \pi_{5m}$ 임은 명백하고 $n_f = n_l^{-b}$도 성립한다. 이에따라 $n_f = n_l^{-b}$를 검토할 수 있도록 실험을 설계하였다. 동일토양 조건하에서 슬립과 속도를 일정하게 유지하면서 원형들과 모델들에 대한 동하중을 변화시키도록 하였다. 이의 실험결과 $P/W = (P/W)_m$의 진모델이 얻어지는 動荷重 값으로부터 힘의척도 (n_f) 즉 W/W_m 값을 구할 수 있다. 세개의 모델과 한개의 원형이 본실험에 이용되며, 이에 따라 길이척도와 힘의 척도의 관계를 로그-로그 그라프에 나타내어, $n_f = n_l^{-b}$ 식의 b값을 구할 수 있다. 실험을 수행하기 전에는 힘의척도를 알 수 없으므로, 각 車輪 크기에 따라 최대 動荷重을 결정할수가 없다. 그러나 기존의 일부 실험결과 (9)에 의하면 $n_f = n_l^2$으로 보고되고 있다. 이에 따라 기존 트랙터의 중량을 고려하여 原型車輪에 대한 動荷重을 결정하고 모델들에 대한 動荷重을 결정하였다.

2) 分析方法

우선 실험 데이타를 이용하여 牽引力과 動荷重의 관계를 나타내는 회귀방정식을 最小自乘化에 의해 구하였다. 이렇게 어느 특정한 土壤 조건하에서 구하여진 原型과 모델들에 대한 회귀방정식을 그림 1과 같이 한 그라프에 나타내었다. 이 그라프는 특정 조건하에서 진모델 예측이 가능한지에 대해 자료를 제공하게 된다.

그림 1에 나타난바와 같이 P/W = c인 직선을 그어서 이 직선이 두 그라프 이상을 통과하였다고 하면, 이 점들에 대해 $P/W = (P/W)_m$이 성립되며, 관계되는 車輪들 사이에는 진모델 예측이 가능하다. 즉, 만일 P/W = c 선이 직경 45cm와 75cm 車輪의 回歸方程式을 통과하였다면, 이는 45cm 車輪은 75cm 車輪의 성능을 왜곡없이 예측할 수 있는 진모델이 되는 것을 의미한다. 만일 P/W = c 선이 모든 車輪의 回歸方程式을 통과하였다면, 45, 60, 75cm 직경의 세모델車輪은 90cm 직경의 原型車輪의 牽引力을 예측할 수 있는 진 모델이 되는 것이다. 回歸方程式과 P/W = c 선이 교차하는 점은 $n_f = n_l^{-b}$式에서 힘의척도를 제시한다. 만일 기울기가 변하는 경우에도 계속해서 교차점이 나타나게 되면, 진모델 예측이 가능한 또 다른 힘의척도값을 구할 수 있게 된다. 그러나 그라프상에서 교차점을 구한다는 것은 부정확하므로 다음과 같은 방정식을 이용하여 계산하였다.

$$P/W = c \quad \cdots(4)$$

$$P = a_1 W + a_2 W^2 + a_3 W^3 \quad \cdots(5)$$

4式과 5式으로 부터

$$(a_1 - c) W + b_2 W^2 + b_3 W^3 = 0 \quad \cdots(6)$$

윗式으로부터 動荷重의 범위내에 있는 근만을 구하여 힘의척도 값으로 간주하였다. (5)式에서 牽引力과 動荷重의 관계를 3차 방정식으로 나타낸것은 실험 자료를 검토한 결과 가장 적합한 방정식으로 판명되었기 때문이다.

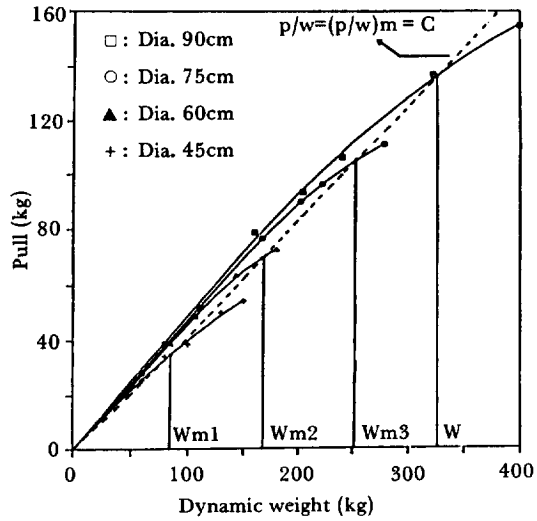

Fig. 1. Pull versus dynamic weight curves for computing force scales in pull analysis.

3. 材料 및 方法

가. 供試材料

1) 實驗車輪

모델車輪들은 原型車輪에 대해 완전한 모델이 될 수 있도록 기존의 車輪을 사용하지 않고 제작하여 사용하였다. 車輪의 접지면과 측면부는 철판으로 만들었으며, 접지면에는 국내에서 생산되고 있는 가장 보편적인 농용트랙터의 러그 형상을 고려하여 고무와 철판으로 만들어진 러그를 접착제와 볼트로 고정하였다.

Table 4. Design specification of test wheels.

Item / Dia. (cm)	Wheel width (cm)	Length scale	$\frac{D}{B}$	Lug length (cm)	Lug pitch (cm)	Lug angle (°)	Lug width (cm)	Lug height (cm)	Lug base (cm)
90	22.5	1	4	16.6	20.01	50	3.6	3.6	4.5
75	18.75	1.2	4	13.9	16.67	50	3	3	3.75
60	15	1.5	4	11.1	13.34	50	2.4	2.4	3.0
45	11.25	2	4	8.3	10	50	1.8	1.8	2.25

原型車輪의 직경은 90cm이고, 이에 대한 모델들의 직경은 75, 60, 45cm로 3개의 剛車輪을 제작하였다. 표 4는 각 車輪의 규격 및 치수를 보여주고 있다.

2) 實驗土壤

실험에는 砂土, 砂壤土의 두가지 土壤이 사용되었으며, 표 5는 각 토양들의 물리적 성질을 보여주고 있다.

나. 實驗裝置

圃場實驗의 문제점을 보완하고 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 人工土槽 시스템을 이용하였다. 人工土槽에서의 자료수집 시스템의 전체구성도는 그림 2와 같다.

Table 5. Test soil properties by USDA classification

Soil	Composition			Texture
	Sand(%)	Silt(%)	Clay	
A	54.4	36.8	8.8	Sandy loam
B	96.3	3.3	0.4	Sand

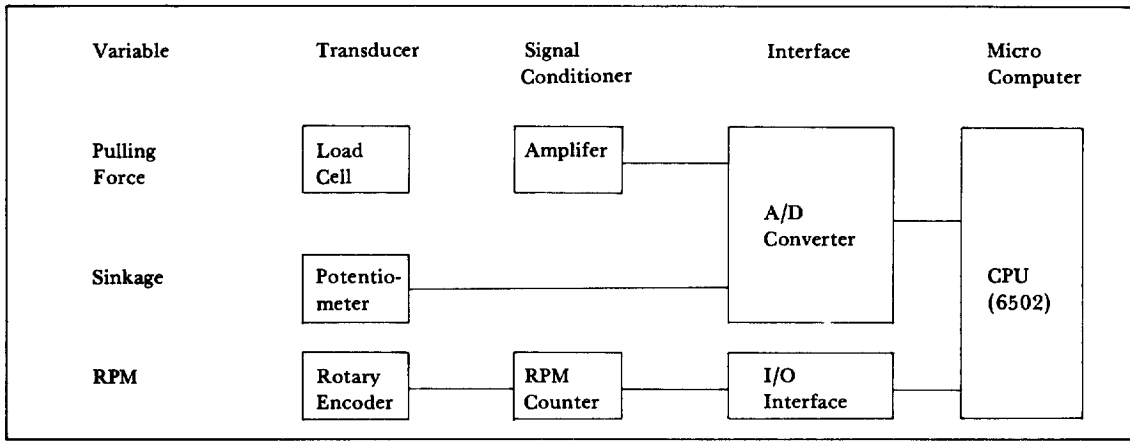

Fig. 2. Schematic diagram of data acquisition system for soil bin experiment

다實驗方法

1) 土壤加工

토양가공은 實驗사이에 필요한 土壤狀態를 만들기 위해 인공토조시스템의 일부인 토양가공 대차를 이용하였다. 토양가공의 순서와 횟수는 필요한 토양상태에 따라 임정하게 하였다.

2) 土壤物理性 測定

(가) 圓錐指數

圓錐指數는 SR-2 모델의 자동기록 콘페니트로미터를 이용하여 측정하였다. 이 콘페니트로 미터의 원추각은 30°이고 지면적이 6cm² 이었다. 원추지수는 토조에서 임의의 세곳을 선정하여 0, 5, 10, 15, 20, 30 cm 깊이에서 실험직전에 測定하였다.

(나) 車輪性能 測定

차륜의 슬립은 일반적으로 모래의 경우 40~70% 범위에서 그 외의 토양은 30~50% 범위에서 차륜의 견인력 증가에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있다[3]. 따라서 본 실험에서는 車輪의 속도와 測定臺車의 속도를 조정하여 砂壤土에서는 車輪의 슬립을 약 40%로, 砂土의 경우에는 약 60%로 하여 실험을 수행하였다.

實驗車輪에 대한 動荷重은 트랙터 또는 경운기 차륜의 크기와 실제 동하중을 고려하여 가장 큰 동하중을 구하였으며 이를 포함하여 이 보다 작은 여섯 수준의 동하중을 이용하였다. 90cm 直徑의 車輪을 原型으로 간주하였을때 세모델을 동하중은 실험 설계에 의해 $1/n^2$에 의해 구하였다. 여기서 n는 모델에 대해 原型의 길이 척도이다.

모든 實驗은 2 반복으로 수행되었다.

4. 結果 및 考察

가. 砂壤土

砂壤土에서의 실험은 수분함량을 두수준으로 하여 실시하였다. 건조한 사양토는 자연상태하에서 일정기간 건조하여 이용하였으며 습한 砂壤土는 건조土壤에서의 實驗이 끝난후 土壤가공대차의 살수기에 의해 土壤을 수분으로 포화시킨 다음 48시간이 지난후에 實驗을 실시하였다. 표 6은 實驗土壤의 물리적 상태를 나타낸 것으로 實驗直前에 측정된 값이다. 각 토양 조건은 편의상 표 6에 나타난 것처럼 土壤條件 A, B, C, D라고 칭하기로 한다.

그림 3은 토양 조건 A에 있어서 한개의 原型車輪과 세개의 모델車輪들에 대한 動荷重과 牽引力과의 관계를 동일 그라프상에 나타낸 것이다. 각 점들은 네차륜들로부터의 실험치를 나타낸 것이고, 실선으로 표시된 그라프들은 이 점들로부터 최소자승법에 의해 구한 회귀방정식의 그라프들이다. 이 그림에 의하면 P/W=c인 직선이 두개이상의 회귀방정식을 통과하는 c 값의 범위는 0.4와 0.47 사이인 것으로 나타났다. c 값이 0.4에서는 P/W=c인 직선이 原型車輪과 직경 75cm의 모델車輪의 性能曲線만을 통과하고 있다. 즉 직경 75cm의 모델車輪만이 原型車輪의 견인성능을 豫測하고 있음을 의미한다. c 값을 0.01단위로 세분하였을때 c 값의 범위가 0.41에서부터 0.43까지 P/W=c 직선은 原型車輪과 세 모델車輪의 性能曲線을 모두 통과하고 있으며, c값이 0.44에서는 원형차륜과 45cm, 77cm의 두 모델車輪들의 性能曲線을, 0.45와 0.47 사이에서는 원형차

Table 6. Physical properties of sandy loam before experiment.

Item / Soil condition	Passes of subsurface roller	Passes of surface roller	Mean moisture content (%)	Mean bulk density (g/cc)	Cone index (kg/cm²)	Remarks
Dry	2	2	7.42	1.38	3.90	soil condition A
	4	4	7.42	1.42	4.21	B
Wet	2	2	17.8	1.56	4.07	C
	4	4	17.8	1.57	4.89	D

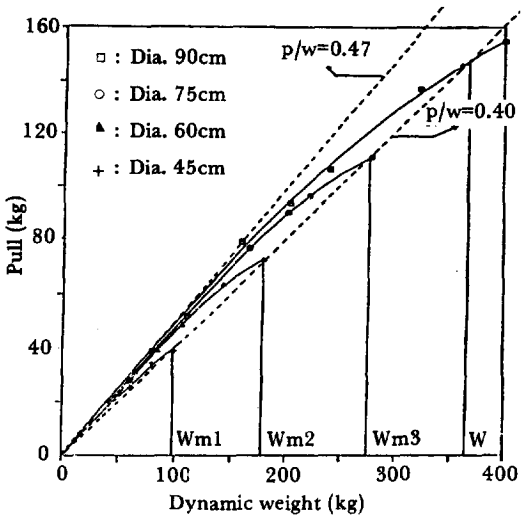

Fig. 3. Pull versus dynamic weight curves for computing force scales (n_f) in pull analysis on soil condition A

률과 75cm 모델車輪의 性能曲線만을 통과하고 있다. 이러한 교차점에서는 진모델 豫測이 가능하며 식 6에 의해 이점들이 나타내는 動荷重의 값을 구하였으며, 實驗치 범위내에 있지 않는 근은 모두 고려치 않았다. 표 7는 토양조건 A에 있어서 $\frac{P}{W}$값과 길이척도에 따라 진모델 豫測이 가능한 動荷重으로부터 구한 힘의척도의 분포를 보여주고 있다. 原型車輪은 그 자체가 완전한 모델이 되어 이 경우 힘의척도와 길이척도는 모두 1이 된다.

그림 4는 표 7에 나타난 데이타를 이용해 $n_f = n_l^b$ 식에서의 b값을 구하기 위해 힘의척도와 길이척도의 관계를 로그-로그 그라프에 나타낸 것이다. 각 점들은 진모델 豫測치로부터 구한 實驗데이타이고, 직선은 이 점들로부터 구한 회귀방정식을 보여주고 있다. 이 직선의 회귀방정식은 $n_f = n_l^{2.08}$로서 b의 값은 −2.08로 나타났다. 이것은 주어진 土壤狀態(토양조건 A)하에서 車輪-土壤시스템에 영향을 미치는 次元을 갖는 土壤變數의 次元이 동일하다고 가정했을때 또는 土壤變數들의 차원을 하나의 次元으로 나타낼 수 있다고 가정했을때 이 土壤變數가 갖는 길이 次元의 지수 값은 −2.08이 되는 것을 의미한다.

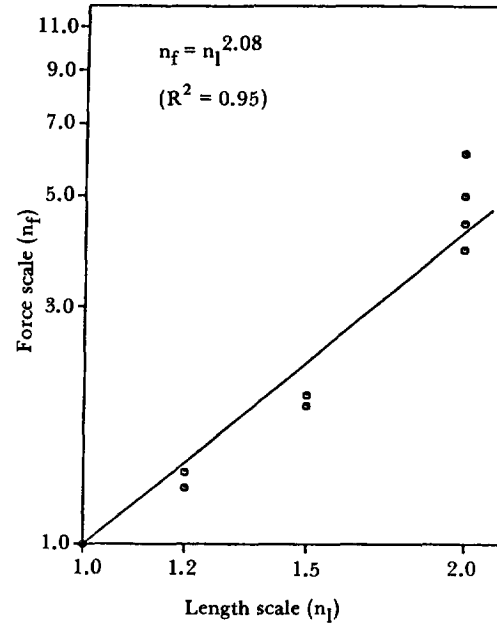

Fig. 4. Relationship between force scale and length scale in pull analysis on the soil condition A.

그러나 표 7로부터 알수 있듯이 길이척도가 1.2인 경우는 진모델 豫測이 가능한 여덟개의 점중 여섯점의 힘의척도값은 1.3이고 나머지 두점은 1.4이므로 그라프상에는 1.3과 1.4의 두점으로 모여서 나타났으며, 길이척도가 1.5인 경우는 세개의 점중 두점은 힘의척도 값이 2.0이고 1.9인 경우가 한

Table 7. Values of force scale showing true model prediction on the soil condition C.

n_l \ p/w	0.40	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.47
1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.20	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4
1.50	–	2.0	2.0	1.9	–	–	–	–
2.00	–	3.9	4.4	5.0	6.1	–	–	–

점으로 1.9과 2.0의 두점으로 모여 나타났으며 길이척도가 2.0인 경우는 네점에서 실모델 豫測이 가능한데 각각 3.9, 4.4, 5.0, 6.1의 서로 다른 힘의 척도값을 갖고 있다. 즉 길이척도가 커질수록 실모델 豫測이 나타나는 힘척도의 갯수가 적어지며 그 폭도 좁은 것으로 나타났다.

따라서 위에서 언급했듯이 길이척도가 커질수록 실모델 豫測값이 나타나는 힘의척도의 폭이 커지고, b값이 거의 상수로 나타나지 않는 점으로 미루어 보아, 이 직선회귀식으로부터 구한 b값의 정확도와 $n_f = n_l{}^b$식의 타당성에 대해 좀더 검토해 볼 필요성을 느끼게 된다. 따라서 이 회귀방정식으로 부터 구한 힘의척도 값을 이용하여, 모델車輪들이 原型車輪의 牽引性能을 어느정도 정확히 豫測하는지 모델車輪들의 性能曲線을 다음과 같은 방법에 의해 확장(extension)하여 모델과 原型車輪의 性能曲線을 비교하여 실모델 豫測 가능성을 검토하였다.

原型車輪과 모델車輪들의 性能曲線은 다음식과 같이 나타낼수 있다(그림 5).

$$P = a_1W + a_2W^2 + a_3W^3$$

$$P_m = a_{1m}W_m + a_{2m}W_m^2 + a_{3m}W_m^3$$

그림에서 P/W=c인 직선과 두 性能曲線이 만나는 A, B점의 좌표는 (W, P) (W_m, P_m)이다. 이 경우 P/W=c이므로 $P_m/W_m = P/W = c$가 되어 A, B점을 실모델 豫測이 가능한 점을 나타내며 $W/W_m = P/P_m = n_f$가 된다.

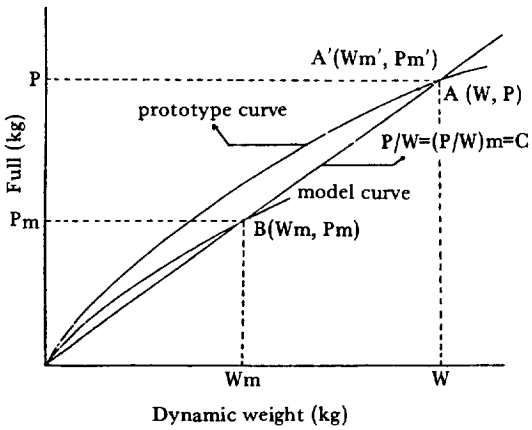

Fig. 5. Extension of model performance curve for pull analysis.

따라서 原型車輪의 性能을 나타내는 A점의 좌표 (W, P)는 B점의 좌표(W_m, P_m)에다 각각 힘척도의 값을 곱하므로서 정확히 얻을 수가 있다. 즉 原型의 性能豫測이 가능하다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 原型과 세개의 모델에 대해 여러개의 P/W=c인 직선을 구할 수 있었으며 이에 따라 힘척도 값도 길이척도에 따라 차이는 있으나 여러개를 얻었다.

그러나 각 모델車輪들이 原型車輪의 性能을 정확히 豫測하기 위하여는 각 모델에 따라 서로다른 P/W=c 직선에 대해서도 힘척도의 값이 일정하여야 한다. 따라서 힘척도의 분산정도가 모델車輪의 性能 豫測에 어느정도 영향을 미치는지 알아보기 위해, 회귀방정식에서 구한 힘의척도 값을 B점의 좌표(W_m, P_m)에다 각각 곱하여 새로운 豫測점 A' (W_m', P_m')을 구하였다. 여기서 $W_m' = W_m \times n_f$이고 $P_m' = P_m \times n_f$ 즉 $(a_{1m}W_m + a_{2m}W_m^2 + a_{3m}W_m^3) \times n_f$이다. 이렇게 하여 얻은 豫測點을 $0 \leq W_m \leq W_p$의 범위에서 각각 구하여 原型車輪의 性能曲線과 비교하기 위하여 동일 그라프에 확장하여 표시하였다.

그림 4에서 힘척도와 길이척도의 관계는 직경 90 cm의 車輪을 原型으로 하고 그외 직경 75, 60, 45cm의 車輪을 모델로 하여, 原型의 性能을 豫測하기위한 것이다. 그러나 모든 車輪들은 크기만 다를뿐 그의 기하학적 형태에 있어서 상사이므로 직경 75 cm 차륜을 원형이라고 간주하면 60, 45cm의 두 車輪이 모델이 될수 있고, 60cm 車輪을 原型이라고 하면 45cm 車輪을 모델이라고 간주할 수 있다. 이에 따라 직경 90cm의 車輪을 原型으로 하였을 경우에는 직경 75, 60, 45cm의 車輪을 모델로, 직경 75 cm의 車輪을 原型으로 하였을 경우에는 직경 60cm 45cm의 車輪을 모델로, 같은 방법으로 직경 60cm 車輪을 原型으로 하였을때는 직경 45cm 車輪을 모델로 하여, 모델의 性能曲線을 위에서 언급한 방법으로 확장하여 原型의 性能曲線과 동일 그라프상에 나타났다(그림 6). 이렇게 함으로서 길이척도에 따른 척도효과 (scale effect)의 검토도 가능한 것으로 판단되었다.

그림 6-c, 6-e, 6-f는 각각 직경 90cm의 車輪을 原型으로 하였을때 직경 75, 60, 45cm 車輪의 性

能曲線을 확장하여 동일 그라프상에 나타낸 것이다. 이 그라프들에 의하면 세 모델車輪들은 原型車輪의 性能을 큰 오차없이 잘 豫測하는 것으로 나타났다. 특히 그림 4에 의하면 길이척도가 2인 경우(직경 45cm)에 있어서는 힘의척도 값이 다른 두 길이척도의 값 즉 1.2, 1.5인 경우 보다 분산이 컸음에도 불구하고, 모델車輪은 原型車輪의 性能을 잘 豫測하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 이경우 모델과 原型의 性能曲線은 그 값에 있어서는 거의 비슷한 값을 보여주고 있으나, 두 그라프의 형태는 약간 다른 경향을 보여주고 있다. 즉 320kg 전후에서 교점이 생긴후 두 그라프가 약간씩 멀어져가고 있으며, 이 두 그라프를 더 큰 動荷重값까지 연장하였을 경우에는 그 값도 커질것으로 예상된다. 이 두 그라

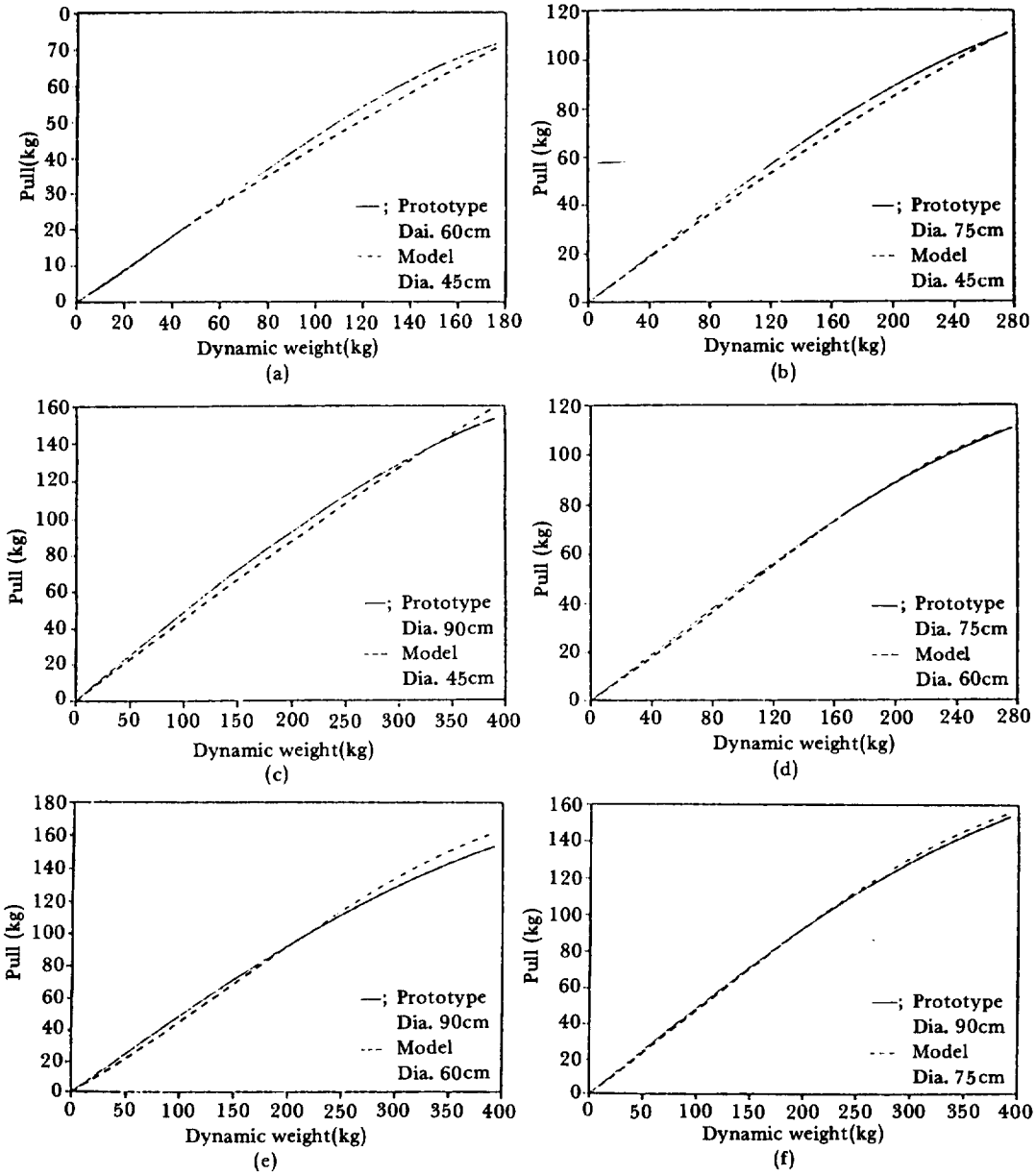

Fig. 6. Pull versus dynamic weight curves of prototype and model prediction on the soil condition A.

프의 서로 다른 형태가 길이척도가 2인경우 힘척도의 분산을 크게한 것으로 판단된다. 이러한 교점은 그림 6-e에서도 나타나고 있으나 210kg 전후에서 교점이 나타난 후에도 두 그라프의 형태는 거의 유사함을 보여주고 있다. 그러나 세모델은 모두 實驗 動荷重 범위내에서는 정도의 차이는 있으나 진모델 豫測이 가능한 것으로 판단되었다. 그림 6-b 6-d는 직경 75cm의 車輪을 原型으로 하였을때 직경 60cm, 45cm 모델車輪의 性能曲線을 확장하여 동일 그라프상에 나타낸 그라프이다. 직경 60cm의 車輪의 性能曲線은 직경 75cm 車輪의 性能曲線과 거의 일치하여 진모델 豫測이 가능한 것으로 나타났다.

그림 6-a는 직경 60cm의 車輪을 原型으로 하고, 직경 45cm 車輪을 모델로 하여 얻은 曲線으로 두曲線이 거의 일치하는 것으로 나타났으며 曲線의 형태도 거의 비슷하여 진모델 豫測이 가능한 것으로 판단되었다. 위의 여섯개의 그라프를 종합 검토하면 모델車輪의 길이척도가 적을수록 原型의 車輪의 性能을 좀더 정확히 豫測하는 것으로 나타났으나, 본 實驗에서 이용된 길이척도 2 이하의 모델車輪들은 實驗 動荷重 범위내에서 原型車輪들의 性能을 잘 豫測하는 진모델로 판단되었다. 따라서 $n_f = n_l^b$이 성립하며 土壤조건 A에 있어서 b값은 유의성 있는 값으로 판단되었다.

土壤條件 B, C, D에 대해서도 토양조건 A에서와 같은 방법으로 分析한 결과 각 토양조건 모두에 대해서 진모델 豫測이 가능한 것으로 나타났다. 위의 결과로 미루어 사양토에 있어서는 $n_f = n_l^b$식이 성립함을 알수 있었으며, 이경우 토양조건에 따른 b값은 표 8에 나타난 바와 같다.

Table 8. Distribution of b values of the equation $n_f = n_l^{-b}$ in accordance with soil condition for pull analysis.

Soil condition	b	R^2
Dry sandy loam I(A)	−2.08	0.95
Dry sandy loam II(B)	−2.00	0.96
Wet sandy loam I(C)	−2.18	0.96
Wet sandy loam II(D)	−2.37	0.96

나. 砂 土

砂土에서의 實驗도 수분함량이 거의 없는 건조한 경우와 수분함량이 약 5%인 두 토양상태 하에서 수행되었다. 수분함량이 거의 없는 砂土는 자연상태에서 완전히 건조한 것이며, 습한 砂土는 土槽내에서 土壤加工 대차에 의해 살수된 물이 배수장치에 의해 스며나올 정도로 포화시킨 다음, 48시간 경과후에 實驗을 수행하였다

표 9는 實驗 土壤의 물리적 상태를 나타낸 것으로 實驗직전에 측정된 값이다.

사토에 있어서도 각 土壤條件은 편의상 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ로 칭하기로 하였다.

표 10은 土壤條件 Ⅲ에 있어서 P/W값과 길이척도에 따라 진모델 豫測이 가능한 動荷重으로 부터 구한 힘척도의 분포를 보여주고 있다.

진모델 豫測이 가능한 P/W = c 값의 범위는 0.25에서 0.37까지이며 이전범위에 걸쳐 직경 75cm 모델車輪의 힘척도의 값은 1.2에서 1.9까지 분포하고 있으며, 대부분의 값들은 1.3과 1.4에 집중하여 나타나고 있다. 직경 60cm 모델車輪에 있어서 힘척도의 분포는 P/W값 0.24에서 0.32의 범위내에 있으며 한점을 제외한 대부분의 힘척도의 값들

Table 9. Physical properties of sand before experiment.

Item / Soil condition	Passes of subsurface roller	Passes of surface roller	Mean moisture content (%)	Mean bulk density (g/cc)	Cone index (kg/cm^2)	Remarks
Dry	2	2	0.29	1.5	4.36	soil condition I
	4	4	0.29	1.53	4.55	" II
Wet	2	2	4.93	1.4	9.71	" III
	4	4	4.93	1.47	10.08	" IV

Table 10. Values of force scale showing true model prediction in pull analysis on the soil condition III.

n_l \ P/W	.24	.25	.26	.27	.28	.29	.30	.31	.32	.33	.34	.35	.36	.37
1.00	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
1.2	1.7	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2
1.50	2.3	2.2	2.1	2.1	2.1	2.2	2.3	2.8	–	–	–	–	–	–
2.00	.0	3.4	3.6	3.7	4.0	4.3	4.9	–	–	–	–	–	–	–

은 2.1과 2.3사이에 집중되어 있다. 그러나 직경 45cm 모델의 척도의 값은 P/W 값이 0.25에서 0.30의 범위에서 나타나며 여섯개의 서로 다른 값을 보여주고 있다.

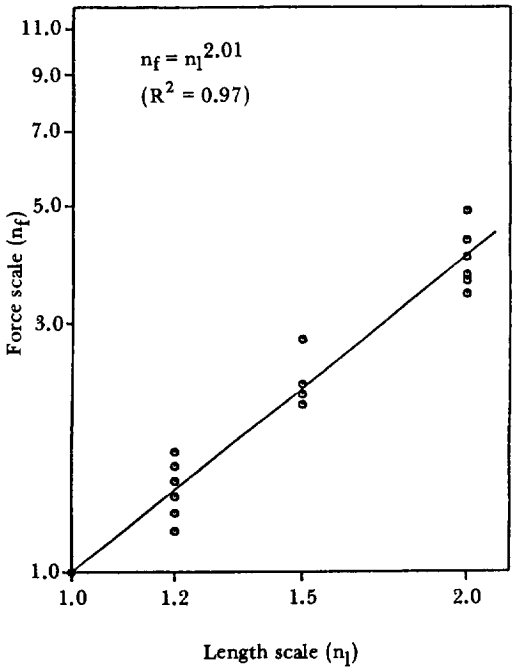

Fig. 7. Relationship between force scale and length scale in pull analysis on the soil condition III.

그림 7은 土壤상태 Ⅲ에 있어서 힘의척도와 길이 척도의 관계를 로그-로그 그라프에 나타낸 것이다. 이 그라프에 나타난 직선의 회귀방정식은 $n_f = n_l^{2.01}$로서 土壤變數의 길이 次元의 지수를 나타내는 b값은 −2.01로 나타났다.

그림 8은 그림 7의 회귀방정식으로부터 구한 힘 척도의 값을 이용하여 모델들의 性能曲線을 확장하여 原型들의 性能曲線과 각각 동일 그라프상에 나타난 것이다. 그림 8의 a, b, c 그라프는 직경 45cm의 車輪을 모델로 하고 직경 90, 75, 60cm의 車輪들을 原型으로 하였을때 얻은 그라프들로, 모델車輪의 性能豫測曲線과 原型車輪들의 性能曲線은 그 모양을 약간 달리하여 모두 교점을 갖고 있음을 알 수 있다.

이 그라프들을 검토하여 보면 각 경우에 있어서 모두 原型과 모델車輪의 性能곡선이 교차하기 전까지는 비교적 모델車輪이 原型車輪의 性能을 잘 豫測하고 있으나, 교차점 이후부터는 모델의 性能豫測곡선이 原型車輪의 性能曲線으로부터 멀어짐을 알 수 있다. 그러나 實驗 動荷重 범위 내에서는 직경 45cm 모델車輪에 의해 직경 90cm까지의 原型車輪들의 性能豫測이 가능한 것으로 판단되었다.

그림 8의 d, e, f는 직경 75, 60cm 車輪들을 모델로 하였을때 原型車輪의 性能을 豫測하기 위한 그라프들로서, 모델에 의해 原型車輪의 性能이 잘 豫測되고 있음을 보여주고 있다. 따라서 土壤條件 Ⅲ에 있어서는 모든 경우에 있어서 實驗 動荷重 범위 내에서는 진모델 豫測이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 土壤條件 Ⅲ에 있어서도 $n_f = n_l^{-b}$식이 성립함을 알 수 있다.

토양조건 Ⅰ, Ⅱ, Ⅳ에 대해서도 토양조건 Ⅲ에서와 같은 방법으로 分析한 결과 각 토양조건 모두에 대해서 진모델 豫測이 가능한 것으로 나타났다. 위의 결과로 미루어 砂土에 있어서도 $n_f = n_l^{-b}$식이 성립함을 알수 있었다. 砂土에 있어서 토양조건에 따른 b값의 분포는 표11과 같다.

표 8과 11을 종합 검토하여 보면 b값은 토양타입과 조건에 따라 −2.00에서 −2.62의 범위에 있음을 알수 있다. 이와같이 b값이 토양조건에 따라

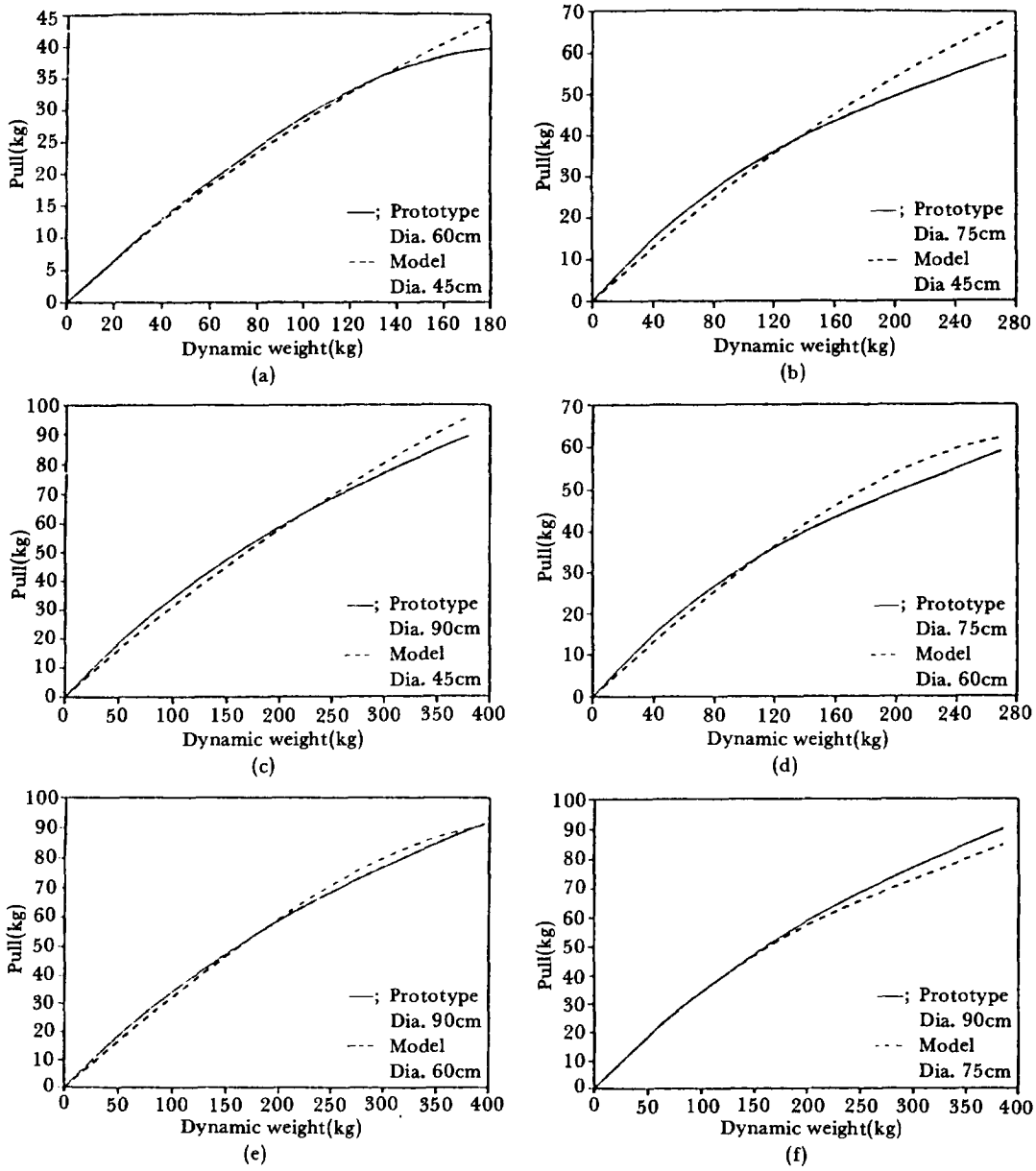

Fig. 8. Pull versus dynamic weight curves of prototype and model prediction on the soil condition III.

Table 11. Distribution of b values of the equation $n_f=n_l^{-b}$ in accordance with soil condition for pull analysis.

Soil condition	b	R^2
Dry sand I(I)	−2.62	0.91
Dry sand II(II)	−2.21	0.93
Wet sand I(III)	−2.01	0.97
Wet sand II(IV)	−2.18	0.96

르게 변하고 있는 것은 車輪－土壤 시스템에 영향을 미치는 土壤變數의 次元이 同一하다고 가정할 수 없음을 보여주고 있는 것이다. 따라서 車輪－土壤 시스템에 영향을 미치는 次元을 갖는 土壤變數들을 α, α_i라고 했을때 α는 α_i들의 곱 또는 함수로 나타남을 알수 있다.

즉 b가 bi의 합 또는 함수임을 알 수 있다.

5. 結　論

본 연구는 러그가 있는 驅動輪－土壤 시스템에 있어서 견인력의 진모델 예측 가능성을 검토하고, 견인력과 관련해 구동륜과 土壤과의 상호작용을 해석하는데 필요한 土壤變數의 次元을 연구하는데 있어 相似性理論의 이용가능성을 검토하여 이 시스템에 관련되는 土壤變數의 次元을 결정하기 위해 수행되었다. 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 세모델車輪은 실험 동하중 범위내에서 原型車輪의 牽引力을 잘 예측할 수 있었으며, 원형차륜의 性能曲線과 모델차륜의 性能 豫測曲線 의 형태도 유사하였다. 이로부터 原型車輪과 모델車輪의 擧動이 상사함을 알 수 있었으며 진모델 예측이 가능한 것으로 판단되었다.
2. 모델車輪에 의해 原型 車輪의 牽引力을 예측할 수 있는 조건식은 다음과 같이 구해졌다.

$$n_f = n_l^{\,b}$$

여기서, n_f : 힘의 척도 $= W/W_m$

n_l : 길이 척도 $= l/l_m$

b : 特性 土壤變數의 길이次元의 指數

b값의 범위는 土壤의 종류, 수분함량, 다짐정도에 따라 −2.0～−2.6 사이로 나타났다. 따라서 牽引力에 주로 영향을 미치는 土壤變數는 서로 다른 것으로 생각되며, b값은 土壤의 상태에 따라서도 서로 틀린 값을 갖는 것으로 나타났다.

3. b값이 이와 같이 넓은 범위에서 각각 변하고 있는것은 이 指數가 단순 변수가 아니라 복합변수 또는 變數의 함수인 것으로 판단된다. 즉 車輪－土壤 시스템에 영향을 미치는 土壤變數는 여러개 있으며 이 여러개의 變數는 土壤 상태에 따라 車輪의 견인性能에 서로 다른 효과를 미치며, 이 土壤變數들은 동일한 次元을 갖지 않는다고 판단할 수 있었다.

參 考 文 獻

1. Burt, E.C., R.L. Schafer and J.H. Taylor. 1974. "Similitude of a Model Traction Device: Part 1. Prediction of the Dynamic Traction Ratio." Trans. of the ASAE 17:658-661.
2. Burt, E.C., R.S. Schafer and J.H. Taylor. 1974. "Similitude of a Model Traction Device: Part 2. Prediction of Wheel Sinkage." Trans. of the ASAE 17:662-665.
3. Clark, S.J. and J.B. Liljedahl. 1969. "Model Studies of Single, Dual and Tandem Wheels." Trans. of the ASAE 12:240-245.
4. Donald, F. Young. 1968. "Similitude of Soil – Machine Systems." Trans. of the ASAE 11:653-657.
5. Freitag, D.R. 1968. "Dimensional Analysis of Performence of Pneumatic Tires on Sand." Trans. of the ASAE 11:669-672.
6. Henry, H. Hieks, Jr. 1961. "A Similitude Study of the Drag and Sinkage of Wheels Using a System of Soil Values Related to Locomotion." Proceedings of the 1st International Conference On the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. No. 41:636-645.
7. Murphy, Glenn. 1966. "Application of Similitude to Agricultural Engineering Research." Trans. of the ASAE 9:637-640.
8. Murphy, Glenn. 1972. "Identifying Soil dynamic Parameters for Soil - Machine Systems." Trans. of the ASAE 15:8-13.
9. Nuttall, C.A., R.P. Mcgowan. 1961. "Scale Models of Vehicles in Soil and Snows." Proceeding of the 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. No.42:656-677.
10. Pierrot, V.C. and W.F. Buchele. 1968.

(114페이지에 계속)

험을 한 결과 과실의 3차원 위치 검출 오차가 다소 큰 편이어서 앞으로 계속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

參 考 文 獻

1. 류관희, 노상하, 김동우. 1988. 과실 수확 로보트에 관한 연구(I) —머니퓰레이터와 제어시스템 개발—. 한국농업기계학회지 13(2) : pp. 9-17.
2. 이상욱 외. 1987. "형상 인식 및 추적 기술 개발 연구" 과학 기술처.
3. A. Gran d'Esnon. 1985. "Robotic Harvesting of appels, In: Proceeding of Agrimation 1", published by the ASAE and SME, ASAE, St. Joseph, MI., pp.210-214.
4. Fu, K.S., R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee. 1987. "Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence", New York: McGraw-Hill. pp.296-327.
5. ITEX PC plus Programmer's Manual. 1987. Imaging Technology Inc.
6. Kawamura, N. et al. 1985. "Measurement of Fruit Location by MOS Type Color TV Camera and Fundamental Experimental of Fruit Harvesting", JASM 47(2), 177-182.
7. Kawamura, N. and N. Kondo. 1985. "Fruit Detecting Experiment and Simulation by Computer", JASM 47(1): 60-65.
8. Otsu, N., 1979. "A Threshold Selection Method from Gray Level Histograms", IEEE Trans. Syst., Man, and Cyborn., Vol. SMC-9, No. 1, pp.62-66
9. Parrish, E.A., Jr. and A.K. Goksel. 1977. "Pactorial Pattern Recogintion Applied to Fruit Harvesting", TRANSATIONS of the ASAE 20(5): 822-827.
10. Slaughter, D.C. and R.C. Harrell. 1987. "Color Vision in Robotic Fruit Harvesting", TRANSACTIONS of the ASAE 30 (4): 1144-1148.
11. Whitter, A.D., G.E. Miless, O.R. Mitchell, and L.D. Gaultney. 1987. "Fruit Location in a Partially Occluded Image", TRANSATIONS of the ASAE 30(3): 591-596.

(79페이지에서 계속)

"A Similitude of an Unpowered Pneumatic Tire." Trans. of the ASAE 11: 673-676.

11. Schafer, R.L., D.R. Freitag and R.D. Wismer. 1970. "Similitude Studies of Soil-Machine System." Journal of Terramechanics, Vol.7, No.2:25-59.
12. Schafer, R.L., D.R. Freitag and R.D. Wismer. 1973. "Distortion in the Similitude of Soil-Machine Systems." Journl of Terramechanics, Vol.9, No. 2:33-63.