

급경사지 산림작업을 위한 차량의 역학분석에 관한 연구^{1*}

— 차륜형 집재작업 트랙터를 중심으로 —

정주상 · 정우담²

A Study on Ground Vehicle Mechanics for Steep Slope Forest Operations^{1*}

— Rubber-Tired Log Skidding Tractor Operations —

Joo Sang Chung and Woo Dam Chung²

요 약

이 논문에서는 임업용 트랙터의 집재작업 분석에 요구되는 역학분석모델을 제시하고 사례분석을 통해 적용성을 검토하였다. 역학분석모델은 크게 견인목의 역학구조해석모델, 차량하중분석모델 및 주행중인 차량의 구동력과 저항력 분석모델의 3부분으로 구성되어 있다. 사례분석에서는 가상적인 집재작업 시나리오를 만들어 역학적으로 중요하거나 혹은 집재생산성에 중요한 인자들에 대한 영향력분석을 통해 모델의 적용성을 검토하였다. 사례분석은 1)당김줄을 견인목에 묶는 방법이 견인력에 미치는 영향, 2)주행속도 및 견인목 하중이 차량의 동력요구에 미치는 영향, 3)2륜구동과 4륜구동 트랙터의 견인작업 수행 성능 비교에 관한 내용을 포함한다.

ABSTRACT

In this paper, a mechanical analysis model for steep-slope log-skidding operations of a rubber-tired tractor is discussed and the applicability of the model is investigated. The model largely consists of mathematical analysis models for log drag, dynamic vehicle weight distributions and soil-vehicle traction. For the case study, a theoretical data set for log skidding operations is used in investigating the effect of the factors influencing the results of mechanical analysis or the productivity of skidding operations. The analyses include 1) the effect of log choking methods on tangential log-skidding force, 2) the effects of the change in travel speed and log load on the required input power to the wheels and 3) the log skidding performance of a two-wheel drive compared with that of a four-wheel drive.

Key words: mathematical analysis model, steep-slope log-skidding, rubber-tired tractor

I. 서 론

우리나라의 산림은 대부분이 험준한 산악지형

에 위치하고 있으므로 열악한 작업환경에서의 위험한 산림작업이 불가피하다. 특히 여러단계에 의해 진행되는 산림작업중 집재작업은 작업 생산

¹ 接受 1995年 3月 10日 Received on March 10, 1995

² 서울대학교 산림자원학과, Department of Forest Resources, Seoul National University, Suwon, Korea.

* 이 연구는 1994년 서울대학교 발전기금 대우학술연구비 지원에 의한 연구결과임.

성이 지형적 조건에 크게 좌우됨은 2물론 그 비용이 지대하여 임업경영의 합리화에 장애요인이 되고 있다. 이러한 집재작업의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 다량의 임도를 개설하여 산림의 접근성을 향상시키고 해외 선진임업국으로부터 집재기를 도입하는 등 집재작업의 기계화를 추진하고 있다.

기계화 집재작업의 생산성은 임지의 지형적 특성, 임상조건, 산림작업의 제반특성 등에 의해 크게 좌우됨은 물론 초기 투자비용이 지대하므로 기종선택 등에 세심한 배려가 필요하다. 여러가지 집재기종 중 차륜형 임업용 트랙터는 경사가 급하고 기복이 심한 국내의 임업 적용에 한계가 있을 것으로 판단되나 가선집재 작업에 비해 작업비용이 낮다는 장점이 있다. 따라서 임업용 트랙터를 도입하기 위해서는 집재작업 혹은 기계적 특성을 면밀히 파악하여 국내 임업실정에 적합한 기종의 선정 혹은 개발이 요구된다. 또한 이를 위해서는 트랙터 집재작업에 대한 공학적 이해가 우선적으로 요구되므로 작업차량 운용상의 역학적 성질을 규명하고, 이해할 필요가 있다.

이상과 같은 필요성에 의해 구미 등의 임업선진국에서는 습지나 산악지형 등에서의 트랙터 집재작업의 역학적 특성에 관해 많은 연구가 진행되어 왔다. 일례로 미국에서는 Stryker(1977)은 임업용 트랙터의 등판능력에 관한 연구를 하였고, Sessions 등(1986)은 이를 바탕으로 목재의 하중을 고려하여 수송차량의 등판능력을 도출하였다. 또한 Hassan(1977), Herrick(1955), Hetherington(1984) 등은 지면 특성에 따른 견인력 및 구름저항(rolling resistance)에 관한 연구를 수행하였고, Hassan 등(1983), Perumpral(1977) 등은 견인목 역학구조를 밝히기 위한 모델을 개발하였다. 또한 Wismer and Luth(1972), Ashmore 등(1985)은 임업용 트랙터의 견인력에 관한 예측 모델을 제시한 바 있다.

한편 국내에서의 연구실적은 매우 미미한 실정이다. 문헌고찰에 의하면 산림작업 기계화와 관련된 대부분의 논문은 집재시스템의 작업생산성 규명을 위한 시간연구와 집재작업의 생산성을 고려한 임도강 등에 대한 연구로 한정되어 있다. 다만 정주상(1993), 정주상과 정우담(1994)이 집재시스템의 역학구조 해석에 관한 연구결과를 발표한 바 있을 뿐 임업용 트랙터 운용에 대하여

기초역학적 접근을 통한 분석연구는 전무한 실정이다.

이 연구에서는 고무바퀴가 부착된 임업용 트랙터(rubber-tired tractor for skidding operation)의 제원, 지형특성, 작업방법 등에 의해 차량 구동력 및 견인력을 분석하는 방법을 제시하고 실험전산모델을 작성하여 작업생산성에 영향을 미치는 인자들에 대한 감도분석을 수행하였다.

II. 임업용 트랙터 집재작업의 역학 해석 모델

견인목 및 당김줄의 역학구조

Fig. 1에는 트랙터에 의해 견인되는 통나무에 작용하는 힘의 역학구조가 나타나 있다. 그림에서 견인목의 제원과 하중이 당김줄에 미치는 장력의 크기와 방향은 힘의 평형방정식과 모멘트의 원리에 의해 유도할 수 있다. 연구 편의상 1)견인되는 통나무는 휘어짐이 없는 강체로 가정하고, 2)통나무의 앞쪽 끝부분은 지면에서 들어올려진 채 일정한 속도로 견인되며, 3)한번에 2개 이상의 통나무를 견인하는 경우 전체무게에 해당하는 단목으로 가정하여 당김줄의 장력과 힘의 방향을 분석하기 위한 평형식을 유도하면 다음과 같다.

$$T \cdot \cos \alpha = \mu \cdot \cos \theta + N \cdot \sin \theta \quad (\text{eq. 1})$$

$$T \cdot \sin \alpha = W - N \cdot \cos \theta - \mu N \cdot \sin \theta \quad (\text{eq. 2})$$

이 식에서 T는 당김줄에 미치는 장력, α 는 장력의 방향, μ 는 견인목과 지면의 마찰계수, N은 지면이 견인목을 받치는 수직력, θ 는 지면경사각을 의미한다.

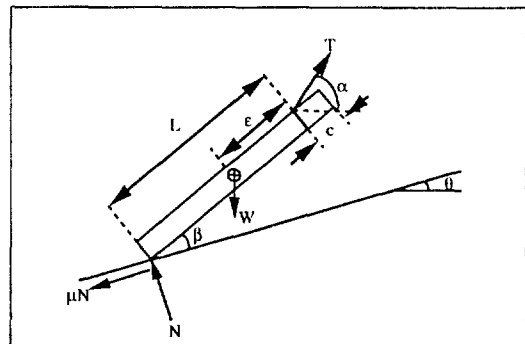


Fig. 1. Free body diagram of a skidded log

당김줄이 묶인 위치에서 무게중심까지의 거리를 ϵ , 당김줄이 묶인 위치부터 지면에 끌리는 부분까지의 통나무 길이를 L , 나머지 길이를 c , 통나무 무게를 W , 지면경사각을 θ , 견인중인 통나무와 지면간의 각을 β 라고 하면 위식에서 견인목에 작용하는 수직력 N 은 모멘트원리에 의해 다음과 같이 구해진다.

$$N = \frac{\epsilon \cdot W \cdot \cos(\theta + \beta)}{L \cdot \cos \beta + L \cdot \mu \cdot \sin \beta} \quad (\text{eq. 3})$$

위 식에서 견인목의 무게중심 위치는 통직성에 따라 달라진다. 즉, 견인목의 형태가 통직한 원기둥일 때 무게중심이 견인목의 정중앙($\epsilon=L/2$)에 위치하게 되지만 일반적으로 견인목은 원뿔절두체(cone frustrum)의 형태를 지니므로 원구직경(R_1)과 말구직경(R_2)에 따라 무게중심이 달라지게 된다. 원뿔절두체의 무게중심 공식을 응용하여 당김줄을 묶는 위치에서 무게중심까지의 거리(ϵ)를 구하는 공식을 유도하면 다음과 같다.

$$\epsilon = \left(\frac{L+c}{4} \right) \cdot \left(\frac{R_1^2 + 3R_2^2 + 2R_1R_2}{R_1^2 + R_2^2 + R_1R_2} \right) - c \quad (\text{eq. 4})$$

차축에 미치는 수직 하중

차축에 미치는 하중(axle load)은 차량 중량과 무게중심의 위치, 지면경사, 견인목의 무게 혹은 당김줄에 작용하는 장력의 크기와 방향의 역학적 관계로부터 구할 수 있다. 차량의 중량을 M , 당김줄의 장력의 크기를 T , 장력의 방향각을 α 라고 할 때 앞뒤의 차축(front axle, rear axle)에 미치는 하중의 수직력(N_f, N_r)을 힘의 평형과 모멘트원리에 의해 유도하면 다음과 같다(Fig. 2 참조).

$$N_r = \frac{PY_p + VX_p + MX_c \cdot \cos \theta + MY_c \cdot \sin \theta}{D} \quad (\text{eq. 5})$$

$$N_f = M \cdot \cos \theta + V - N_r \quad (\text{eq. 6})$$

(위 식에서

$$P = T \cdot \cos(\alpha - \theta), V = T \cdot \sin(\alpha - \theta))$$

위의 식들에서 P 와 V 는 각각 지면경사에 대한 수평분력과 수직분력을 의미한다.

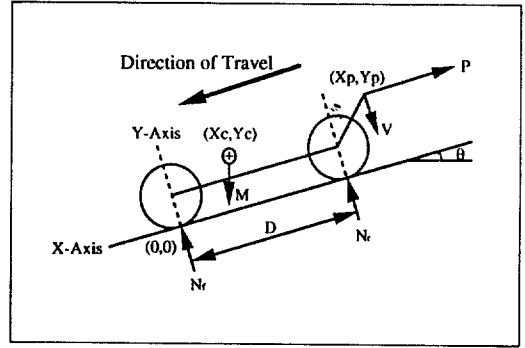


Fig. 2. Free body diagram of a skidding tractor

트랙터의 구동력과 저항력 및 평형관계식

견인중인 차량의 주행은 엔진출력이 차량내 동력전달장치를 통해 차륜까지 전달되어 torque를 발생시킴으로써 가능하다. 이 torque에 의해 발생하는 차륜의 구동력을 추정하는 방법은 여러가지가 있겠으나 이 연구에서는 역학적 해석에 충실한 Wismer and Luth(1972)의 모델을 사용한다. 즉, 차륜 하나가 낼 수 있는 차량의 구동력(gross thrust of a single tire; F)은 다음과 같이 토양경도 및 고무타이어의 제원에 의해 결정될 수 있다.

$$F = \frac{Q}{r} = 0.75 N_v (1 - e^{-0.3 C_n S}) \quad (\text{eq. 7})$$

이 식에서 Q 는 차륜의 torque, r 은 주행중인 바퀴의 반지름, N_v 는 eq. 5 혹은 6에서 구한 해당 차축의 하중(N_f 혹은 N_r)을 의미한다. CI 를 토양경도지수, b 와 d 는 고무바퀴의 폭과 너비라고 할 때 C_n 은 $(CI b d) / M_v$ 로 나타나는 상수가 되고, S 는 다음 항에 설명되는 주행중인 차륜의 미끄러짐 계수가 된다.

주행중인 경사지 집재작업 차량의 차륜이 받는 저항은 지면의 토양적 성질과 상태에 의해 영향을 받게 되는 구름저항(rolling resistance)을 들 수 있다. 구름저항(RR)은 지면과 접촉하는 차륜이 접촉부 토양의 변형 등에 의해 나타나는 것으로 Wismer and Luth(1972)에 의한 구름저항 추정모형은 다음과 같다.

$$RR = N_v \left(\frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right) \quad (\text{eq. 8})$$

따라서 차륜의 실제 구동력(wheel pull 혹은

net thrust, F_p)은 eq. 7에서 계산된 구동력에서 구름저항을 뺀 값이 된다. 즉,

$$F_p = 0.75 N_i (1 - e^{-0.3 C_n S}) - N_i \left(\frac{1.2}{C_n} + 0.04 \right) \quad (\text{eq. 9})$$

한편 주행중인 경사지 집재작업 차량에 적용되는 힘의 평형관계식은 eq. 7에서 계산된 차량의 구동력의 합을 구름저항, 차체하중에 의한 경사저항 및 지면과 평행한 당김줄의 장력의 함수로 나타낼 수 있다. 즉, i 를 해당 차량의 번호라고 할 때 역학적 평형관계식은

$$\sum F_i = \sum RR_i + M \sin \theta + P \quad (\text{eq. 10})$$

이 식을 적용할 때는 해당 작업차량이 2륜구동 혹은 4륜구동인지를 고려하여야 한다. 즉, 위 식에서 F_1 과 F_2 를 트랙터의 전륜에서 전달되는 구동력이라 하고 F_3 과 F_4 를 후륜의 구동력이라고 할 때 후륜구동 차량의 경우 $F_1=F_2=0$, $F_3=F_4>0$ 가 된다. 반면 4륜구동 차량의 경우에는 4바퀴의 구동력이 모두 양수의 값을 가진다. 또한 차동장치(differential)의 잠금유무에 따라 parameter의 값들이 달라질 수 있으나 이 연구에서는 편의상 트랙터 진행방향의 지형경사만을 고려한다. 즉, 트랙터 진행방향의 횡경사는 0%라고 가정하였다.

차륜의 미끄러짐(wheel slip)

주행중인 차량은 접촉하는 토양의 변형으로 인해 미끄러지게 되므로 실질적인 차량속도(V_a)는 구름저항을 고려하지 않은 이론적인 속도(V_t)에 미치지 못하게 된다. 따라서 차륜의 미끄러짐 계수(S)는 다음과 같이 이론적인 주행속도와 실질적인 주행속도의 함수관계로 나타낼 수 있다.

$$S = 1 - \frac{V_a}{V_t} \quad (\text{eq. 11})$$

한편 실질적인 주행속도가 주어지면 차량의 각 속도와 주행중인 차륜반경(r)의 곱으로 표현되는 이론적인 차량속도 V_t 는 차량의 torque와 미끄러짐의 관계로부터 구할 수 있다. 즉, 미지변수를 차량의 torque(Q)와 미끄러짐(S)이라고 했을 때 2개의 관계식(eq. 7과 10)을 이용하여 S 와 Q

를 구하고 eq. 11에 의해 V_t 를 추정할 수 있다.

동력요구량의 산출

경사지에서 일정한 주행속도(V_a)를 유지하기 위해 필요한 차량의 동력(HP_w)은 eq. 9에서 구한 구동력(F_p)과 주행속도(V_a)의 곱으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$HP_w = F_p V_a \quad (\text{eq. 12})$$

한편 차축을 통해 해당 차량에 제공하는 동력을 HP_a 라고 할 때 동력전달의 효율성(tractive efficiency, TE)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$TE = \frac{HP_w}{HP_a} = \frac{F_p V_a}{Q \left(\frac{V_t}{r} \right)}$$

이 식에 eq. 7, 9 및 11을 적용하면

$$TE = \left[1 - \left\{ \frac{\frac{1.2}{C_n} + 0.04}{0.75 (1 - e^{-0.3 C_n S})} \right\} \right] (1 - S) \quad (\text{eq. 13})$$

따라서 j 를 차축번호라고 했을 때 임업용 트랙터가 주어진 속도(V_a)로 벌도목을 견인하기 위해 차량에 전달되어야 하는 총동력(THP)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$THP = \sum \left\{ 2 \left(\frac{F_{Pj} V_a}{TE_j} \right) \right\}$$

III. 사례분석에 의한 모델의 적용

전산 simulation 모델

차륜형 임업용 트랙터 작업에 대한 역학분석을 위해서는 1)견인목과 당김줄의 역학구조 및 하중, 2)차축 및 차량에 미치는 수직하중, 3)차륜구동에 대한 저항력과 견인력의 분석 등이 필요하다. 역학분석에 필요한 입력인자들은 트랙터 집재방법, 지형조건, 트랙터 및 벌도목의 제원 등으로 구성되어 있다. 자료가 입력되면 벌도목 견인작업이 견인목과 당김줄의 역학구조 및 견인저항과 관련된 parameter 값들이 계산된다. 연속되는 일련의 계산과정을 통해 차축의 수직하중,

Table 1. Theoretical parameter values for log skidding rubber-tired tractor operations

Tractor				Log			
Xc	92 cm	Xp	340 cm	W	2,000 kg	L	15 m
Yc	107 cm	Yp	230 cm	Rs	40 cm	Rb	6 cm
D	290 cm	M	8,000 kg	c	50 cm		
CI	8.4 kg/cm ²	d	150 cm	Log-to-ground angle			5°
b/d	0.3	r/d	0.475	Log-to-ground friction coefficient			1.0
No. of drive axles				Skidding butt first			
Design speed				100 m/min.			

(The symbols of parameters in the table are defined in the previous section.)

구름저항, 차륜의 미끄러짐 계수, 동력전달의 효율성 등이 단계별로 계산되어 견인작업에 요구되는 엔진출력을 도출하게 된다. 계산과정중 차륜의 미끄러짐 계수의 산출은 수치해석법(numerical method)의 일종인 Secant기법(정주상, 1993)을 적용하였고, 프로그램은 BASIC 언어로 작성하였다.

결과 및 고찰

Table 1에는 사례분석에 요구되는 가상적인 입력자료들이 나타나 있다. 아치형 입엽용 트랙터는 4륜구동형으로서 견인중에 1분당 100m의 평균속도로 주행한다고 가정한다. 집재작업은 벌도목의 초두부를 제거한 후 전간집재를 하고 당김줄은 원구에서 50cm 떨어진 곳을 묶는다. 견인목이 지면경사와 이루는 각을 평균 5°가 되게 하여 상향집재를 하고 지면과 견인목의 마찰계수는 1.0을 적용한다.

Table 2에는 Table 1에 제시된 집재작업을 수행하는 경우 주행중인 차륜의 미끄러짐과 각 차륜에 필요한 구동력 그리고 차륜에 입력되는 동력이 지면경사의 함수로 나타나 있다. 표에서 지면경사가 급할 수록 미끄러짐이 급속하게 증가하고 있고, 그에 대응하는 차륜의 구동력과 동력

요구도도 증가하는 경향을 보인다. 다만 전륜에 나타나는 구동력은 경사가 급해짐에 따라 증가하는 속도가 감소하면서 약 40%의 경사에서 가장 높은 구동력을 나타내고 이 후 점차 낮아지고 있다. 이것은 견인되는 벌도목과 차량의 무게중심점의 상대적위치가 지면경사가 변함에 따라 달라지는 것에 기인한다. 즉, 경사가 증가하면서 무게중심이 후륜쪽으로 이동하기 때문이다.

한편 이 집재작업에 요구되는 엔진출력은 차륜에 필요한 동력으로부터 추정할 수 있다. 엔진에서 생성된 출력은 torque converter, transmission, rear end, final drive 등 동력전달장치(power train)를 통해 차륜까지 전달되어 작동하므로 Table 2에 나타난 차륜입력 총동력을 각 부위별 동력전달 효율성으로 나누어 주면 요구되는 트랙터의 엔진출력(단, PTO에 필요한 엔진출력은 제외)을 구할 수 있다.

Fig. 3에는 당김줄을 각각 원구에서 50cm 거리에 묶었을 때와 말구에서 50cm 거리에 묶었을 때 당김줄에 발생하는 견인력(tangential log skidding force)을 분석하여 비교한 결과가 나타나 있다. 원구를 묶는 경우 상당부분의 견인목 중량을 차량이 지지하므로써 견인목에 대한 지면으로부터의 수직응력이 낮아진다. 따라서 벌도목

Table 2. The wheel slip, the required wheel pull and input power to wheels as a function of ground slope for the skidding operation in Table 1.

% slope	Wheel slip	Required wheel pull		Required input power to wheels (hp)
		Front wheel (kg)	Rear wheel (kg)	
10	0.06	389	352	54
20	0.09	624	594	79
30	0.13	794	872	105
40	0.20	859	1,219	136
50	0.35	779	1,667	193

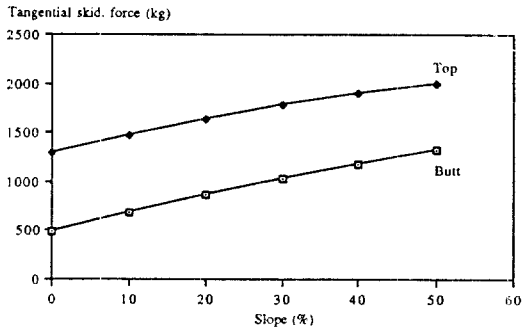


Fig. 3. The required tangential log skidding force as a function of ground slope associated with butt first and top first.

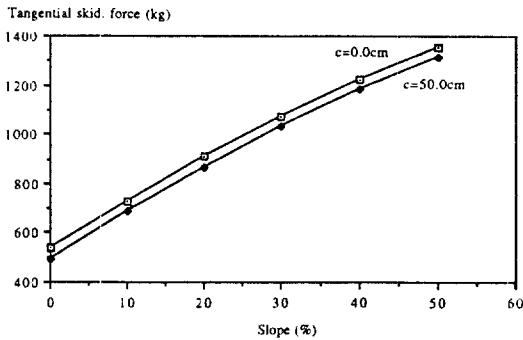


Fig. 4. The required tangential log skidding force as a function of ground slope associated with the distance of choking point from the leading end of the log.

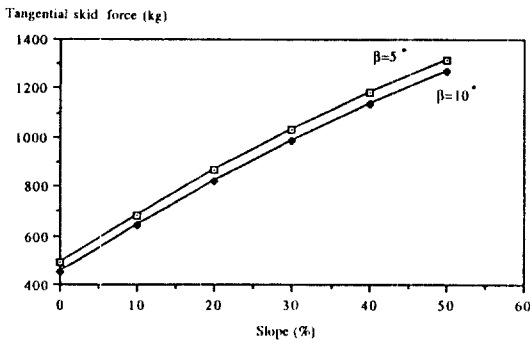


Fig. 5. The required tangential log skidding force as a function of ground slope associated with the log to ground angle.

과 지면사이의 마찰저항이 감소하므로 요구되는 견인력이 낮아지는 반면 말구를 묶는 경우는 그

반대의 경우로 해석된다. Fig. 4는 당김줄을 원구 끝부분에 묶는 것과 원구로부터 50cm 떨어진 곳을 묶는 두 방법에 대한 견인력을 비교한 것으로 두 방법에 의한 차이가 크지 않음을 알 수 있지만 역학구조상 묶는 위치가 원구에서 멀어질수록 다소나마 견인작업에 유리한 것으로 판단된다. 또한 견인되는 벌도목이 지면경사와 이루는 각이 커질 수록 견인력에 대한 요구도가 낮았다 (Fig. 5).

Table 3은 Table 1에서 주어진 기본 조건에 대하여 벌도목 하중 및 견인중인 차량의 주행속도를 변화시켰을 때 차륜에 전달되어야 하는 총 동력의 변화 추이를 보여준다. 견인목 하중과 주행속도를 증가시킬 경우 동력에 대한 요구도가 현저하게 증가함을 알 수 있다.

Table 4에서는 집재작업에 사용되는 트랙터가 후륜구동인 경우와 4륜구동인 경우를 비교하였다. 후륜구동의 트랙터는 전륜에 torque가 걸리지 않으므로 주행에 요구되는 구동력을 지원할 수 없는 반면 차축에 수직하중을 받게되어 구름저항을 발생시키게 된다. 따라서 표에서 나타난 바와같이 차륜의 미끄러짐이 증가하여 4륜구동에 비하여 등관능력이 상대적으로 떨어짐을 알 수 있다. 특히 동일한 조건에서 집재작업을 하는 경우 지면의 경사가 급할수록 미끄러짐 계수의 차이가 커지고 있다. 이러한 경향은 차륜에 요구되는 동력에 직접적인 영향을 미치게 되므로 4륜구동은 후륜구동에 비해 동일한 조건에서 동력 이용 효율이 높다고 할 수 있다.

IV. 결 론

이 연구에서는 지형경사, 당김줄 및 견인방법의 역학관계를 밝히는 견인목 분석모델과 차량의 역학적 평형관계를 밝히는 차량하중분석모델을 제시하고 두 모델을 주행중인 차량과 경사지 토양의 역학적 관계를 도출하는데 연계시켜 견인중인 입업용 트랙터의 역학분석 모델을 제시하였다. 또한 이 모델의 응용성을 검토하기 위한 사례분석에서는 가상적인 시나리오에 의해 트랙터 집재작업의 주요 인자들에 대한 감도분석을 실시한 바 그 계산과정이 복잡하여 전산 프로그램을 작성하여 이용하였다.

이 모델은 simulation 분석을 통해 트랙터 기

Table 3. The required input power to wheels to skid logs as a function of log loads, travel speeds and ground slopes.

% slope	Log loads (travel speed=100 m/min)			Travel speeds (log load=2,000 kg)		
	0 kg	1,000 kg	2,000 kg	50 m/min	100 m/min	150 m/min
(Unit: horse power)						
10	33.5	43.3	54.1	27.0	54.1	81.2
20	51.5	64.3	78.8	39.4	78.8	118.1
30	69.5	85.9	105.0	52.5	105.0	157.5
40	87.7	108.7	136.2	68.1	136.2	204.3
50	107.0	137.0	192.8	96.4	192.8	289.2

Table 4. Comparisons of log skidding performance between a two-wheel drive and a four wheel drive in terms of the required input power and the wheel slip(log load=2,000kg; travel speed=100m/min.)

% Slope	Required input power (hp)		Wheel slip coefficient	
	Two-wheel	Four-wheel	Two-wheel	Four-wheel
10	59.5	54.1	0.14	0.06
20	96.7	78.8	0.26	0.09
30	198.3	105.0	0.54	0.13

종 및 집재작업에 대한 공학적 이해를 증진시킬 수 있음은 물론 기종의 선택, 작업분석 등의 목적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이 연구에서 제시된 모델은 주로 역학분석에 중점이 두어졌으므로 이용상의 제한이 있을 것이다. 따라서 차후의 연구에서는 이 모델을 트랙터 집재작업의 생산성 및 비용분석을 위한 모델과 연계시켜 실용성을 증진할 필요가 있다. 이를 위해서는 국내에 도입된 기종별 생산성 및 비용분석에 관한 연구가 동시에 수행되어 기초자료를 확보해야함은 물론이다.

인 용 문 헌

1. 정주상. 1993. 가선집재시스템 역학구조 해석에 관한 연구. 한국임학회지 82(1): 34-43.
2. 정주상·정우담. 1994. 유동식 가선집재시스템 Live Skyline의 역학분석에 관한 연구. 한국임학회지 83(3): 357-364
3. Ashmore, C., E.C. Burt and J.L. Turner. 1985. Predicting tractive performance of log-skidder tires. ASAE paper No. 85-1597.
4. Hassan, A.E. 1977. Trafficability study of a cable skidder. Transactions of the ASAE 20(1): 26-29.
5. Hassan, A.E. and D.L. Sirois. 1983. Weight distribution characteristics of semi-suspended trees. Transactions of the ASAE. 26(5): 1291-1297.
6. Hassan, A.E. and D.L. Sirois. 1984. Rolling resistance of a cable skidder - Effect of inflation pressure and tire sizes. ASAE Paper No. 84-1050. ASAE, St. Joseph, MI 49085.
7. Hassler, C.C., S.A. Sinclair and D.J. Ferguson. 1983. Skidlog - An interactive skidding model. Journal of Forestry.
8. Herrick, D.E. 1955. Tractive effort required to skid hardwood logs. Forest Products Journal 5(4): 250-255.
9. Hetherington, J.G. and I. Littleton. 1984. The rolling resistance and sinkage of towed dual wheel combination in sand. Proceedings of the 8th International Conference, International Society for Terrain-Vehicle Systems. Vol. I, pp.81-86.
10. Perumpral, J.V. 1977. Skidding forces of tree length logs predicted by a mathematical model. Transaction of the American Society

- of Agricultural Engineers. 20(6): 1008-1012.
11. Sessions, J., R. Stewart, P. Anderson and B. Luo. 1986. Calculating the maximum grade a log truck can climb. *Western Journal of Applied Forestry*. 1(2): 43-45.
 12. Stryker, E. 1977. Gradeability of log trucks. M.F. paper, Oregon State University, Corvallis. 68p.
 13. Wismer, R.D. and H.J. Luth. 1974. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Transactions of the ASAE* 17(1): 8-10.