

<논문> SAE NO. 943735

**궤도형 로외차량의 주행 및 견인 성능 예측
컴퓨터 시뮬레이션**
Computer Simulation for the Prediction of
Mobility and Tractive Performance of Tracked Vehicles

김 경 욱,* 신 범 수,* 김 채 주*
K. U. Kim, B. S. Shin, C. J. Kim

ABSTRACT

A computer program was developed for the simulation of mobility and tractive performance of tracked off-road vehicles. Input parameters for the simulation involve those characterizing track and power drive line of a vehicle and soil conditions upon which the vehicle operates. The simulation predicts tractive performance in terms of soil thrust and motion resistance of track device and mobility performance in terms of the maximum speed, time-distance and time-speed relations that a vehicle can obtain under the given soil conditions. It also determines whether or not the vehicle can move in those conditions.

An example of performing simulation was presented and its results showed that the performance prediction was reasonably in a good agreement with the published data.

주요기술용어 : Mobility(주행성능), Traction(견인성능), Tracked Vehicles(궤도 차량), Simulation(모의 실험), Off-Road Vehicles(로외 차량)

1. 서 론

도로가 아닌 자연 상태에서 사용되는 궤도 차량(Tracked Vehicle)의 주행 장치는 주어진 지형 조건에서 최대의 주행 성능과 견인 성능을 발휘하여야 한다. 궤도 장치의 성능은 궤도와 토양 사이의 접촉 부분에서 일어나는 상호 역학적인 현상에 따라 결정되는 것이므로, 궤도의 설계에 있어서 상호작용을 구명하여 토양 조건과 궤도의 설계 조건으로부터 그 성능을 예측하는 일은 대단히 중요한 일이다. 이는 곧 지형 조건에 따라 적절한 궤도를 설계함으로써 차량의 성능을 향

상시킬 수 있기 때문이다.

최근 우리나라에서도 건설 중장비, 군사용 차량, 콤팩트 등 궤도형 주행 장치를 채택한 로외 차량의 수요와 생산이 증가되고 있으나, 이러한 특수 차량을 설계하는데 필요한 엔지니어링 기술은 아직 후진성을 면치 못하고 있다. 설계 기술을 높이기 위해서는 무엇보다도 궤도 차량의 주요한 기능인 주행과 견인 성능을 종합적 평가할 수 있는 기술이 개발되어야 한다. 즉, 설계 과정에서 각종 설계 방안에 대한 상대적인 성능 비교를 가능하게 하고, 궤도의 설계 변수가 주행과 견인 성능에 미치는 영향을 구명할 수 있는 기

* 정회원, 서울대학교 농공학과

술적인 방법이 요구된다. 이러한 목적에 가장 적합하고 효과적인 방법은 토양 조건, 궤도 장치의 설계조건, 운전조건으로써 주행과 견인 성능을 예측할 수 있는 수학적 모형을 개발하고 이 모형을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 기법으로 각 변수의 영향과 성능을 종합적으로 평가하는 방법이다.

궤도 차량의 성능을 예측하기 위하여 개발된 컴퓨터 프로그램에는 NRMM¹⁾ (NATO Reference Mobility Model)과 NTVPM-86이 있다. NRMM은 미국과 대서양조약기구(NATO) 회원국이 군사용으로 개발한 시뮬레이션 프로그램이다. 이 프로그램은 탑재 엔진, 동력전달장치, 궤도의 설계 변수, 토양 조건, 장애물, 도로 조건, 운전자의 운전 시나리오 등을 입력하여 특정 지형에 대한 주행 가능/불가능을 판단하고, 주행할 수 있는 최대 속도와 주행 시간 등을 예측한다. 그러나 이 프로그램은 상용화되어 있지 않다. NTVPM-86²⁾는 캐나다의 차량시스템개발공사에서 개발한 프로그램으로서 지면을 기준으로 한 궤도의 형상을 곡선으로 수식화하고 이 궤도 곡선에 따라 접지압 분포를 예측하여 차량의 성능을 평가하는 프로그램이다. 그러나 프로그램의 기능과 구조에 대한 자세한 문헌은 입수하지 못하였다.

본 연구의 목적은 궤도-토양 사이의 상호 작용의 현상을 나타낼 수 있는 상호작용의 모형을 제시하고, 토양 조건과 궤도의 설계 조건으로부터 주행 성능과 견인 성능을 예측할 수 있는 독자적인 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하는데 있다. 이 프로그램은 연구의 목적에 적합한 기능과 구조를 구비하는데 초점을 두었으며 세부적인 장치의 성능이나 기능은 점차 보완할 수 있도록 하였다.

2. 시뮬레이션 프로그램의 개발

컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 그림 1에서 보는 바와 같이 각각 독립된 견인부(Traction)와 구동부(Mobility) 모듈로 구성하였다. 견인부 모듈에서는 토양 변수와 차량의 설계 변수를 이용하여 토양 추진력, 순견인력, 운동저항 등을 계

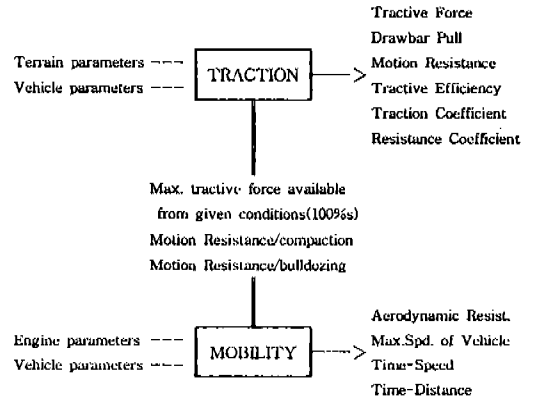


Fig.1 General structure of computer simulation program

산하여 견인 성능을 예측한다. 구동부 모듈에서는 엔진의 성능 곡선, 전동 장치의 감속비, 전동 효율 등 차량의 설계변수를 이용하여 주행 속도와 각 속도에서 최대 추진력 등을 결정한다. 차량의 실제 추진력은 구동부에서 결정된 추진력과 견인부에서 예측한 최대 토양 추진력을 비교하여 작은 값으로 하였으며, 최대 속도는 추진력과 운동저항이 평형을 이루는 곳에서 결정하였다.

2.1 견인부 프로그램

견인력을 예측하기 위한 견인부 모듈은 주모듈, 자료 입력 모듈, 결과 출력 모듈, 접지압 분포 선택 모듈, 구동부에서 사용할 계산치 출력 모듈 및 침하량, 운동저항, 토양 추진력을 계산하는 모듈로 구성하였다.

궤도의 접지압, 침하량, 운동저항, 토양 추진력은 다음에서와 같이 모형화하였다. 그림 2는 견인부 프로그램의 흐름도이다.

2.1.1 궤도의 접지압과 침하

궤도의 접지압은 궤도의 유연성, 궤도가 지지하는 차량의 무게와 중심의 위치, 현가 장치의 형태, 전륜의 수, 전륜의 간격 등 궤도의 구조와 접지면의 토양 성질에 따라서 변화된다. 일반적으로 정적 상태에서는 전륜(Roadwheel) 부분에서 접지압이 높고 전륜과 전륜 사이의 접지압이 낮다. 그러나 차량이 주행하는 동적 상태에서는 슬립과 하중 전이로 인하여 궤도의 전면(前面)

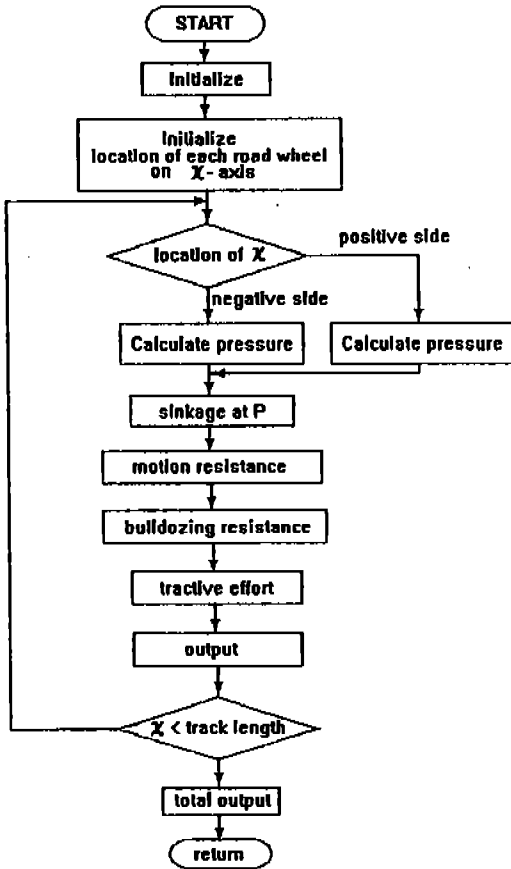


Fig.2 Flow chart for traction part simulation

에서는 정적 상태에서보다 접지압이 감소하고 후면에서는 접지압이 증가하는 경향이 있다.

본 연구에서는 접지압 분포를 다음과 같은 형태로 가정하였다. 즉, 전륜 바로 아래에서 최대 접지압이 발생하고 전륜과 전륜 사이에서 최소 접지압이 발생하는 역삼각형 분포로서 전륜의 수만큼 역삼각형을 연속으로 결합한 형태로 하였다. 이 때, 최대 접지압은 평균 최고 압력(Mean Maximum Pressure)³⁾을 사용하였고 최저 접지압은 0으로 가정하였다. 최대 접지압, P_{mm} 은 다음 식으로 예측하였다.

$$P_{mm} = \frac{1.26W}{2RD_n b \sqrt{RD_d t_p}} \quad (1)$$

여기서, W = 차량의 하중[MLT⁻²]

- b = 궤도의 폭[L]
- t_p = 궤도의 피치[L]
- RD_n = 전륜의 수
- RD_d = 전륜의 직경[L]

궤도의 침하는 Bekker의 압력-침하 관계식⁴⁾을 이용하여 예측하였다. 즉,

$$z = \left(\frac{p}{k_c/b + k_o} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

여기서, k_c = 점성에 의한 토양 변형 계수[ML⁻¹T⁻²]

k_o = 마찰에 의한 토양 변형 계수[ML⁻¹T⁻²]

n = 토양의 변형 지수

z = 토양 침하량[L]

p = 접지압[ML⁻¹T⁻²]

식 (2)에서 궤도의 p 를 궤도 길이 x 의 함수 $p(x)$ 로 표현하면 임의의 궤도 위치 x 에서 궤도의 침하 z 는 길이의 함수 $z(x)$ 로써 나타낼 수 있다.

2.1.2 운동저항

궤도 차량에 작용하는 운동저항은 크게 궤도의 침하로 인한 운동저항, 불도징 저항, 공기 마찰에 의한 공기 저항과 경사지 주행시의 등판 저항으로 구별할 수 있다.

궤도의 침하로 인한 운동저항은 침하에 의하여 접지면 토양이 다져질 때 사용된 에너지와 운동저항이 한 일의 양은 같다는 이론을 적용하여 구하였다. 즉, 길이가 Δx 이고, 폭이 b 인 궤도가 깊이 z_0 만큼 침하하였을 때 접지 부분의 토양을 다지는데 한 일은

$$Work = b\Delta x \int_0^{z_0} p(x) dz$$

이고, 식 (2)를 대입하면

$$= b\Delta x \left(\frac{k_c}{b} + k_o \right)^{\frac{z_0^{n+1}}{n+1}} \quad (3)$$

가 된다. 접지면 전체에 대하여 한 일은 운동저항 R_c 가 길이 방향으로 접지면 길이 l 만큼 진행하였을 때 한 일과 같아야 하므로 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$R_c l = \int_0^l b \left(\frac{k_c}{b} + k_o \right) \frac{z_0^{n+1}}{n+1} \quad (4)$$

따라서, 궤도의 침하로 인한 운동저항은 식 (5)에서와 같이 표현된다.

$$R_c = 2b \left(\frac{k_c}{b} + k_o \right) \frac{1}{n+1} z_0^{n+1} \quad (5)$$

불도정으로 인한 운동 저항은 궤도의 폭과 같은 폭의 수직 칼날을 궤도의 침하와 같은 경심으로 밀 때 소요되는 힘과 같다는 Bekker의 이론을 적용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$R_b = 2b (cz_0 K_{pc} + 0.5z_0^2 \gamma_s K_{py}) \quad (6)$$

여기서, $K_{pc} = (N_c - \tan \phi) \cos^2 \phi$

$$K_{py} = \left(\frac{2N_y}{\tan \phi} + 1 \right) \cos^2 \phi$$

c = 토양의 점성 계수 $[ML^{-1}T^{-2}]$

γ_s = 토양의 비중 $[ML^{-2}T^{-2}]$

N_c 와 N_y 는 Terzaghi의 토양 지지력 상수(Soil Bearing Capacity)⁵⁾로서 토양의 내부 마찰각 ϕ 에 따라 결정된다.

2.1.3 토양 추진력

토양 추진력은 궤도가 토양으로 추진력을 전달할 때 이를 지지할 수 있는 토양의 능력으로서, 토양 추진력 F 는 접지면 토양의 전단 강도로부터 구하였다. 즉,

$$F = b \int_0^l \tau(x) dx \quad (7)$$

이다. 여기서, $\tau(x)$ 는 Mohr-Coulomb 식과 Janosi-Hanamoto식⁶⁾을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\tau(x) = (c + p(x) \tan \phi) (1 - e^{-\alpha x}) \quad (8)$$

여기서, s = 슬립율

c = 토양 점성 계수 $[ML^{-1}T^{-2}]$

ϕ = 토양 마찰각

K = 토양 변형 계수 $[L]$

$p(x)$ = 접지압 $[ML^{-1}T^{-2}]$

2.2 구동부 프로그램

구동부 시뮬레이션 프로그램은 주모듈, 변속기 모듈, 차량의 주행 시간-속도-거리 모듈, 공기 저항 모듈과 데이터를 입력하기 위한 자료 입력 모듈로 구성하였다. 자료 입력 모듈에는 엔진 성능, 변속기, 최종 구동축 자료를 입력하기 위한 모듈과 견인부에서 출력되는 자료를 입력하기 위한 모듈로 구성하였다. 주모듈은 구동부 시뮬레이션의 출력 모듈로서 주행 속도에 따라 차량의 최대 추진력을 예측하고, 추진력과 주행

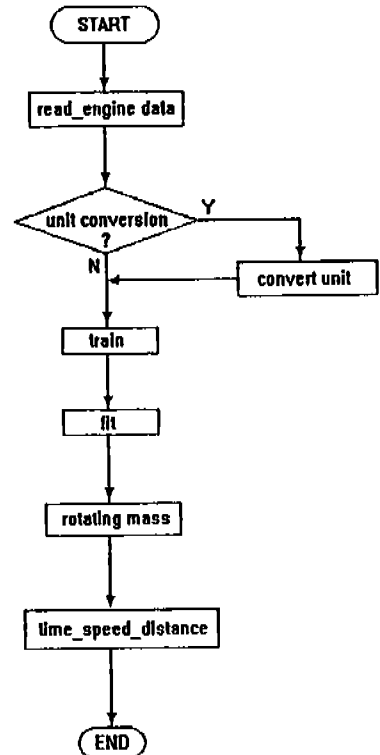


Fig.3 Flow chart for main module in mobility part simulation

시간, 주행 속도와 주행거리의 관계를 결정한다. 그림 3은 구동부 프로그램에서 주모들의 흐름도이다.

2.2.1 변속기 모듈

변속기는 차량에 작용하는 부하에 따라 주행 속도를 조절하여 추진력을 증감시키는 장치이다. 따라서, 변속기 모듈은 주행 속도와 추진력의 관계를 구하는 모듈이다. 이 모듈은 NRMM의 동력 전달계 모듈(Power Train Subroutine)의 일부를 변형하여 변속기의 형태에 따라 엔진 출력속도로부터 차량의 주행 속도와 이 속도에서 전달할 수 있는 최대 추진력을 출력하도록 하였다. 차량의 주행 상태는 직진 상태로 국한하였으며, 변속기의 형태는 자동과 수동으로 구별하였다.

2.2.2 FIT 모듈

이 모듈은 변속기 모듈에서 구한 추진력과 주행 속도의 관계를 1차식, 즉 $F=av+bv^2$ 로 표현하고 상수 a, b 를 결정하는 모듈이다.

2.2.3 회전체 모듈

차량의 운동 방정식에서 차량의 질량은 차량 자체의 질량뿐만 아니라 전동 라인의 회전체에 대한 관성 모멘트의 영향을 포함하여야 한다. 회전체 모듈은 이 관성 모멘트의 영향을 고려한 회전체 질량 계수(Rotating Mass Factor)를 결정한다. 궤도 차량의 각 변속 단수에 대한 회전체 질량 계수는 다음과 같이 모형화하였다.

$$\gamma m = 1 + MF_1 + MF_2 GR^2 \tag{9}$$

여기서, $MF_1 = 0.14$

$$MF_2 = \frac{0.008 CID^{1.68} N_{eng}}{N_{oi} W}$$

$$GR = \frac{(T.F. at medium speed on each gear) RR}{\eta Q_{max}}$$

GF = 궤도의 추진력 $[MLT^{-2}]$

CID = 엔진의 총 배기량 $[L^3]$

N_{eng} = 엔진의 수

N_{oi} = 엔진당 실린더의 수

RR = 구동 스포크의 반경 $[L]$

Q_{max} = 엔진의 최대 토크 $[ML^2T^{-2}]$

η = 0.7

γ = 회전체 질량 계수

2.2.4 주행 시간-속도-거리 모듈

주행 성능을 예측하기 위하여 주행 시간과 속도, 주행 시간과 거리의 관계를 모형화하였다. Newton의 운동 법칙으로부터 각각 시간과 속도, 시간과 거리의 관계를 구하면

$$t = \gamma_m m \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{F_{net}(V)} dV \tag{10}$$

$$s = \gamma_m m \int_{V_1}^{V_2} \frac{V}{F_{net}(V)} dV \tag{11}$$

이다. 여기서, $F_{net}(V)$ 는 견인력으로서 최대 추진력으로부터 공기저항과 운동저항을 뺀 값이다. γ_m 은 회전체 질량 계수이며 회전체 모듈에서 결정된다.

2.2.5 공기저항 모듈

공기저항 모듈은 차량에 작용하는 공기저항을 결정하며 공기저항, R_{ad} 는 다음 식으로 모형화하였다.

$$R_{ad} = \frac{1}{2} \rho C_d A_f V^2 \tag{12}$$

여기서, ρ = 공기 밀도 $(1.22kg/m^3)$

C_d = 공기 마찰 계수

A_f = 차량의 앞 투영면적 $[L^2]$

V = 주행 속도 $[LT^{-1}]$

2.3 최대 주행 속도

주어진 토양 조건에서 차량의 최대 추진력은 엔진에서 얻을 수 있는 최대 추진력과 토양이 지지할 수 있는 최대 토양 추진력 중에서 작은 값으로 결정하였다. 최대 토양 추진력은 슬립이 100%일 때 얻을 수 있으며 일정하다. 그러나 엔진에서 얻을 수 있는 최대 추진력은 속도의 증감에 따라 변화한다. 따라서, 차량이 주행할 수 있는 최대 속도는 위의 조건으로 결정된 최대

추진력과 모든 운동저항의 합이 평형을 이룰 때 즉, 순전인력이 0일 때의 주행속도로 하였다.

2.4 시뮬레이션 프로그램의 검증

시뮬레이션 프로그램의 검증은 Kogure와 Sugiyama의 연구 결과⁸⁾를 이용하여 실시하였다. 검증에 사용된 토양과 궤도 차량의 데이터는 표 1에서와 같다. 표 1의 데이터를 이용하여 시뮬레이션한 전인력과 Kogure의 실험 결과는 그림 4에서 보는 바와 같이 잘 일치하였다. 이 결과로써 시뮬레이션의 결과는 유효할 것으로 판단하였다.

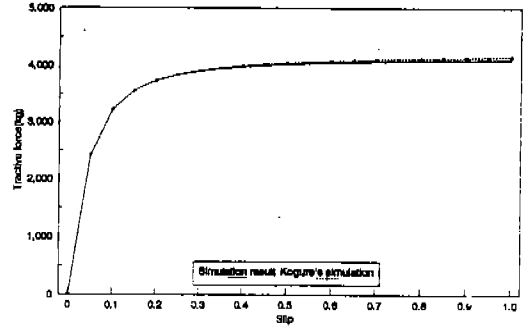


Fig.4 Comparison of simulation results with kogure and Sugiyama's data.

3. 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션 프로그램의 활용 예로서, 문헌에 발표된 특수 차량과 토양 조건⁹⁾을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

차량은 자동 변속기를 채택한 M60A1 탱크와 수동 변속기를 채택한 M151A1 Jeep를 이용하였으며, 토양은 Hope Valley snow, Clayey soil, Medium soil, Clay soil을 대상으로 하였다. 각 토양의 데이터는 표 2에서와 같다.

3.1 추진력 예측

M60A1 탱크와 M151A1 Jeep의 추진력을 시뮬레이션한 결과는 그림 5와 그림 6에서와 같다.

그림에서 곡선이 불연속인 곳은 변속 단수가 바뀌는 지점을 나타낸 것이다.

3.2 차량 주행성

비교적 단단한 Clay soil에서 M60A1 탱크의 주행성을 시뮬레이션한 결과는 그림 7에서와 같다. 토양이 지지할 수 있는 최대 추진력이 약 197 kN이므로 低速에서는 토양 추진력에 의하여 차량의 최대 추진력이 결정되며, 속도가 6km/h 이상에서는 엔진의 추진력에 의하여 주행 성능이 결정된다. 차량의 최고 주행 속도는 주어진 토양 조건에서 토양 추진력과 총 운동저항이 같은 점에서 결정되며, 그림 7에서 보는 바와 같이 약 48km/h가 되는 지점이다.

Table 1. Vehicle and soil parameters for simulation validation

Vehicle	$W(kg_f)$	$b(cm)$	$l(cm)$	RD_n	$RD_d(cm)$	$t_p(cm)$
		7500	25	232	5	47
Soil	$\phi(deg)$	$c(kg/cm^2)$	$k_o(kg/cm^{n+2})$	$k_c(kg/cm^{n+1})$	n	$K(cm)$
	18	0.08	3.9	0.1	1.1	6

Table 2. Soil parameters used in computer simulation

	$k_o(kN/m^{n+2})$	$k_c(kN/m^{n+1})$	n	$\phi(deg)$	$c(kPa)$	$K(m)$
Hope Valley snow	149.35	6.16	1.53	23.2	0.76	0.0424
clayey soil (m.c. : 185% d.b.)	814.3	20.68	1	11	3.45	0.0254
medium soil	2083	29.76	0.8	22.5	8.62	0.0254
clay soil	499.7	38.08	0.6	14	7.58	0.0254

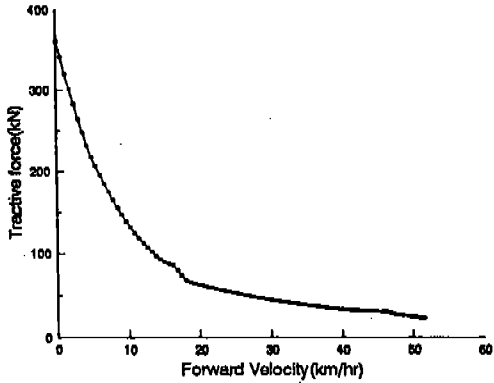


Fig.5 Output of Mobility part simulation on M 60A1 Tank(Automatic T/M)

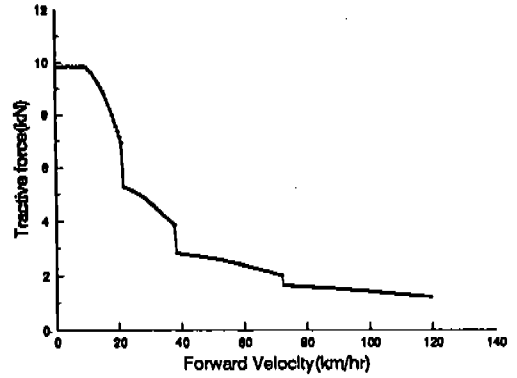


Fig.6 Output of Mobility part simulation on M 151 Jeep(Manual T/M)

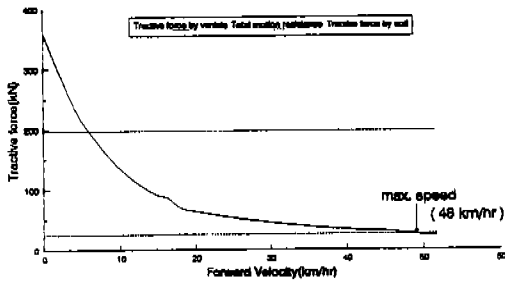


Fig.7 Determination of Maximum forward velocity of M60A1 Tank on clay soil

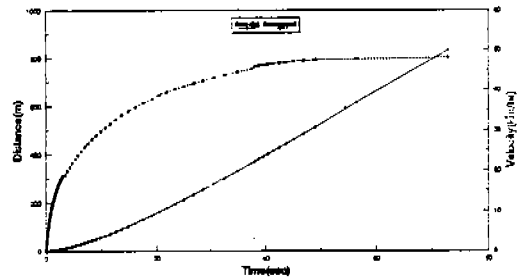


Fig.8 Time-Distance and Time-Speed relationships of M60A1 Tank on clay soil

이 때, 총 운동저항은 공기저항 약 1.5kN을 포함하여 25kN 이었다. 따라서 이 차량은 장애물이 없고 평평한 Clay soil에서 최고 48km/h의 속도로 주행이 가능하다.

차량의 주행 속도-시간과 주행 거리-시간의 관계는 그림 8에서와 같다. 이 차량은 약 70초가 경과한 후 최고 속력을 낼 수 있으며, 이때까지 주행한 거리는 약 750m이었다.

Hope Valley snow와 Clayey soil에서는 M60A1 탱크의 경우 485kN의 하중 때문에 각각 122, 25cm 이상의 침하가 일어났으며, 최대 토양 추진력은 각각 260kN과 140kN이었다. 그러나 Hope Valley snow에서는 침하로 인한 운동저항이 증가하여 견인력이 0 이하로 나타났다. 즉, 주행이 불가능한 상태임을 나타낸다. Medium soil과 Clay soil에서는 각각 5.6, 21.3cm의 침하가 일어났으며 이때의 최대 추진력은 각각 304, 197kN이었다. 토양 다

짐에 의한 운동저항은 Hope Valley snow, Clayey soil, Medium soil, Clay soil 조건에서 각각 55.5, 16.8, 2.9, 14.3kN이었으며, 불도정으로 인한 운동저항은 각각 746.8, 11.5, 2.4, 9.6kN이었다.

4. 요약 및 결론

주어진 토양 조건에서 궤도형 로외차량의 견인 및 주행 성능을 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 견인 성능 지수로서 궤도의 침하, 운동저항, 토양 추진력을 예측하며, 주행 성능 지수로서 주행 가능 여부, 최고 주행 속도, 주행 시간-거리, 주행 시간-속도의 관계를 예측한다. 본 연구에서 개발된 프로그램은 궤도 차량의 성능을 예측하기 위한 것이기 때문에 이러한 목적에 적합한 프로그램을 구성하는데 주안점을 두었으며 부분적으

로는 아직 보완과 개선이 필요하다. 프로그램을 보다 개선하기 위해서는 다음과 같은 연구가 계속되어야 한다.

- 1) 보다 정확한 접지압 분포의 예측
- 2) 선회 혹은 조향시의 성능
- 3) 경사지 주행시의 등판 저항

참 고 문 헌

1. P.W.Harley, M.P.Jurkat and P.M.Brady, Jr., "Nato Reference Mobility Model-Users Guide Vol.I", Technical Report No.12503, U.S.Army Tank-Automotive Research and Development Command, Warren, MI, 1979.
2. J.Y.Wong and J.Preston-Thomas, "Parametric analysis of tracked vehicle performance using an advanced computer simulation model", Proc. of Inst. of Mechanical Engineers, V.200(60), pp. 101-114, 1986.
3. D.Rowland, "Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance", Proc. of the 4th Int. Conf. of the ISTVS, V.1, Stockholm, Sweden, pp.353-384, 1972.
4. M.G.Bekker, "Introduction to Terrain-Vehicle Systems", The Univ. of Michigan Press, pp.64, 1969.
5. K.Terzaghi, "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley&Sons, New York, NY, pp.124-128, 1943.
6. J.Y.Wong, "Theory of Ground Vehicles", John Wiley&Sons, New York, NY, pp.136, 1978.
7. J.Y.Wong, "Terramechanics and Off-Road Vehicles", pp.502-508, Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York, NY, 1990.
8. K.Kogure and N.Sugiyama, "A study of soil thrust exerted by a tracked vehicle", J.Terramechanics 12(3/4), pp.225-238, 1975.
9. 김경욱 "궤도형 로의차량의 주행 및 견인 성능 예측 모형 개발", KOSEF 921-0090-002-2, 한국과학재단 연구보고서, 1994. 2