

토질특성에 따른 이동차량의 거동

Behavior of Traveling Vehicle According to Soil Properties

박 영 호* ¹	방 성 진* ²
Park, Young-Ho	Bang, Sung-Jin
김 운 영* ³	김 명 모* ⁴
Kim, Oon-Young	Kim, Myoung-Mo

Abstract

The fullsized drawbar pull test is carried out in Yeog-gol area to find out the effect of test vehicle's trafficability with the variation of density and water content at the weathered granite soils and water content at the clayey soils.

According to the results, it is found that the behavior of optimum drawbar pull is effected not only by water content but also by density. This paper showed the method of determination of optimum points at a curve of drawbar pull varying with the conditons of soils. And it also showed the optimum drawbar pull coefficient and optimum slip varying with the density of the weathered granite soils.

요 지

화강풍화토지반(SP)의 밀도와 함수비 그리고, 점성토지반(ML)의 함수비 변화가 불도저 궤도 차량의 주행성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 강원도 춘천군 역골지역에서 실물크기의 견인력시험을 실시하였다.

시험결과로부터, 최적견인력거동은 함수비 뿐만아니라 밀도에도 크게 영향을 받음을 알았다. 또한, 본 연구에서는 지반상태에 따라서 변하는 견인력거동의 최적점 결정방법을 제안하였으며, 화강풍화토지반의 밀도에 따른 최적견인력과 최적슬립을 구하였다.

Keywords : Optimum drawbar pull behavior, Trafficability, Weathered granite soils, Clayey soils, Density, Water content

1. 서 론

외국에서는 수십 년 전부터 건설현장의 토질

특성에 적합한 건설기계의 선정, 작업능력의 향상, 새로운 건설차량개발 등에 필요한 자료를 얻기 위하여 견인력시험으로 차량의 주행성

*1 정희원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 책임연구원

*2 정희원, 대림산업 기술연구소 지반탐 연구원

*3 정희원, 육군사관학교 토목과 부교수

*4 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

평가를 하고 있다. 그러나 우리나라에서는 건설기계 생산기술의 자체 개발보다는 외국기술에 의존하여 건설기계를 생산하고 있는 실정이고, 지반상태에 따라서 어떤 종류의 건설기계를 투입해야 할지(주행성 판단), 투입된 건설기계의 작업능력(주행성 평가)은 어떠한지에 관한 연구가 거의 없는 실정이다.

지반강도가 충분한 곳에서 주행하는 차량일 지라도 지반상태에 따라서 갑작스런 주행력 감소가 발생할 수 있는데, 이를 알아보기 위해 미 육군공병단에서는 지반밀도 변화를 고려하지 않고 단지 모사강우(simulated rainfall)로 지반의 상태를 변화시키면서 각종 차량의 주행성능을 예측하기 위한 견인력-슬립(drawbar pull-slip) 관계를 연구하였다(Moore, 1989). 그러나 본 연구에서는 지반밀도와 함수비 변화가 이동차량의 주행거동에 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위하여, 강원도 춘천군 역골 지역의 화강풍화토지반(SP)에서는 밀도와 함수비를 그리고, 점성토지반(ML)에서는 함수비만을 변화시켰을 때 이들 지반에서 직선운동하는 시험차량(SD-20 불도저, 25.4톤, S사)의 주행성능시험을 행하였다. 그리고 이 시험 결과를 지반공학적 관점에서 분석하여 시험차량의 주행성능을 평가하고자 한다.

2. 지반-이동궤도차량의 상호작용 메커니즘

일반적으로 비포장도로(야지)에서 차량이

주행할 때 많은 양의 차량 에너지가 지반의 상태에 따라 다르게 손실된다. 궤도차량의 경우, 이러한 에너지 손실은 지반과 접촉하고 있는 궤도와 지반과의 역학적인 상호작용에 의해 발생하며 이러한 야지 주행 메커니즘은 다음과 같이 설명할 수 있다.

정지하고 있는 궤도차량에 시동을 걸면 차량의 엔진에서 발생하는 엔진출력은 변속기와 구동축을 통해 구동륜으로 전달되고, 구동륜에 전달된 에너지($F_e=r\omega$)는 궤도나 바퀴를 회전시킨다. 결국, 차량 자체에서 손실된 에너지를 제외한 잔여 에너지인 “주행력”(tractive effort, F)이 지반에 가해지며, 이 힘에 의해 지반이 파괴되는데, 이 때 파괴된 면에서 발생한 전단응력을 적분하여 구한 힘을 “토질추력”(soil thrust, H)이라 한다. 이러한 작용과 반작용의 원리에 의해 주행력과 토질추력은 같은 힘이 되고 관계식은 다음과 같다(Yong, 1984).

$$F=H=\int \tau_x dA=b \int_0^{\ell} (c+\sigma \tan \phi)(1-e^{-iKx}) dx \quad (1)$$

여기서 b : 궤도차량의 접지폭

c : 흙의 점착력

σ : 공칭접촉압

ϕ : 내부마찰각

τ_x : 전단응력,

ℓ : 접지길이,

i : 슬립

K : 흙의 변형계수

x : 접지 시작점으로부터의 거리

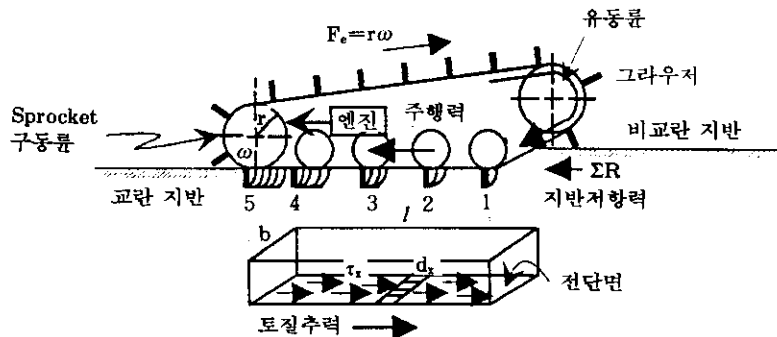


그림 1. 지반-이동 궤도차량의 상호작용에 대한 메커니즘

여기서 슬립(slip, i)은 식(2)와 같이 차량 주행시 비효율적인 차량이동의 백분율을 나타내며, 동력손실의 주원인이다(Wong, 1978).

$$\text{슬립}(i, \%) = \left(1 - \frac{\text{차량의 실제이동거리}}{\text{차량의 이론이동거리}}\right) \times 100 \quad (2)$$

비포장도로와 궤도차량의 상호작용에서, 외력인 주행력이 최대지반반력인 최대토질추력보다 크면 주행저항력인 다짐저항력(compaction resistance, R_c)과 불도징저항력(bulldozing resistance, R_b) 등과 같은 “지반저항력”(motion resistance, ΣR)으로 모두 소산되어 차량은 공회전(슬립 100% 상태)을 하게 된다. 그러나 주행력이 최대토질추력보다 작으면, 주행력에 의해 야기된 토질추력이 지반저항력을 극복하고 남은 힘 즉, “순 주행력”(net traction)으로 차량을 밀게 된다. 이러한 반복 과정으로 차량은 움직이게 된다(Kogure, 1982).

이러한 순 주행력은 차량 자체 주행시 필요한 힘의 의미로 볼 수 있고, 차량이 별도로 다른 차량이나 트레일러와 같은 것을 견인하고 주행할 때에는 견인 물체에 대한 추가적인 지반저항력을 극복해야 하며 이 때의 피견인차량을 끄는 견인차량의 힘을 견인력(drawbar pull, DBP)이라고 한다. 따라서 순 주행력과 견인력은 같은 식으로 표현할 수 있으며 단지, 지반저항력의 크기가 다를 뿐이다. 이러한 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다(Wong, 1989).

$$DBP = F - \Sigma(R_c + R_b) = H - \Sigma(R_c + R_b) \quad (3)$$

여기서, DBP : 견인력, H : 토질추력(지반관점), F : 주행력(차량관점), ΣR_c : 견인차량에서 발생하는 지반저항력, ΣR_b : 피견인차량에서 발생하는 지반저항력이다.

만약 피견인차량이 없이 견인차량이 움직이는 힘을 순 주행력이라고 하며 관계식은 다음과 같다(Yong, 1984).

$$NT = F - \Sigma R_c = H - \Sigma R_c \quad (4)$$

여기서, NT : 순 주행력, ΣR_c : 견인차량에서

발생하는 지반저항력

3. 현장 지반의 공학적 특성

지표면에서 움직이는 차량의 주행거동을 해석하려면 시험지역의 지반 물성치를 알아야 하는데, 시험지역인 화강풍화토지반과 점성토지반에 대하여 통일분류법에 의한 흙분류 결과, 화강풍화토지반은 SP($C_u=18.8$, $C_c=0.56$, $PL=20\%$, $LL=27\%$)로, 점성토지반은 ML($PL=34\%$, $LL=41\%$)로 분류되었다.

화강풍화토지반의 밀도변화에 따른 시험차량의 최적견인력거동 변화를 예측하기 위해 표준다짐시험(A-1방법)을 실시한 결과, 최적함수

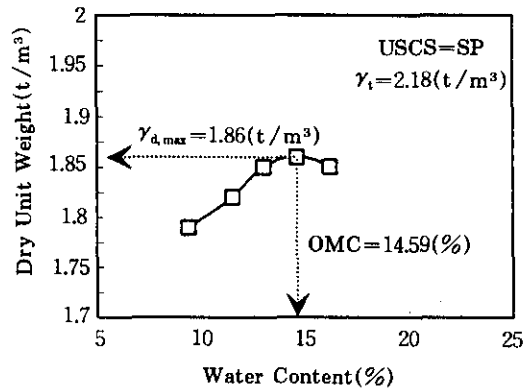


그림 2. 화강풍화토에 대한 다짐시험

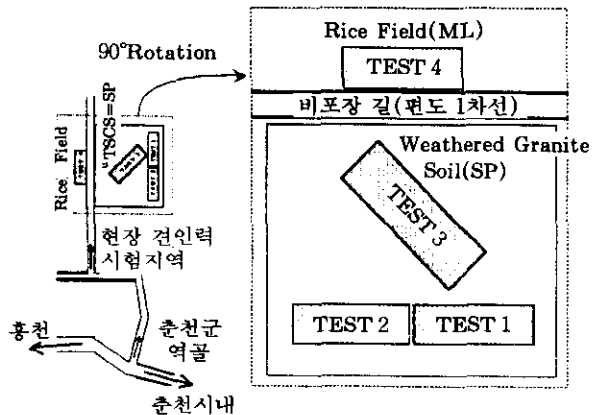


그림 3. 견인력 시험지역과 시험차선

비와 최대전조단위중량은 각각 14.59%와 1.86 (t/m³)이었으며, 이 때의 습윤단위중량은 2.13(t/m³)이었다.

현장 견인력시험지역에서 현장들밀도시험과 흙 분류를 하여 현장단위중량별로 시험지역 (TEST1=2.05(t/m³), TEST2=1.91(t/m³), TEST3=2.23(t/m³), TEST4=1.49(t/m³))을 나누면 그림 3과 같다.

4. 견인력 시험

4.1 시험차량의 이론이동거리

본 실험에 사용한 시험차량의 이론이동거리는 스프라켓(sprocket)의 원주와 회전수의 곱과 그림 4의 구동륜 구조로부터 계산할 수 있으며, 그 결과 식은 다음과 같다(박영호, 1996).

$$\text{이론이동거리} = 0.5765 \times (\text{초}) \times (\text{rpm}), [\text{cm}] \quad (5)$$

여기서 초(sec)는 각 하중 단계별 소요되는 시간이고, rpm은 시험차량의 구동축 회전수이다.

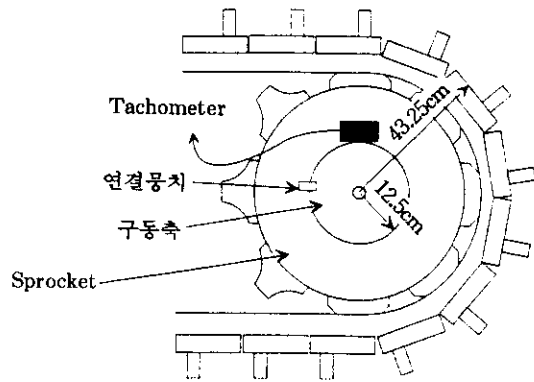


그림 4. 구동륜의 구조

식(5)를 검증하기 위하여 시험차량의 구동축 캡에 타코미터를 설치한다. 그리고 시험차량의 리퍼(ripper)와 브레이드(blade)을 지면에 박고, 시험차량의 본체를 띄운다(그림 5 참조). 시험차량의 본체 어느 한 부분과 이 부분에 일치하는 그라우저(grouser)에 각각 표시한 뒤, 임의의 시간 동안 적당한 회전수로 시험차량의 궤도를 회전시켜 궤도가 움직인 거리를 줄자로 측정한다. 이러한 방법으로 검증한 실험 결과는 표 1에 나타나 있다.

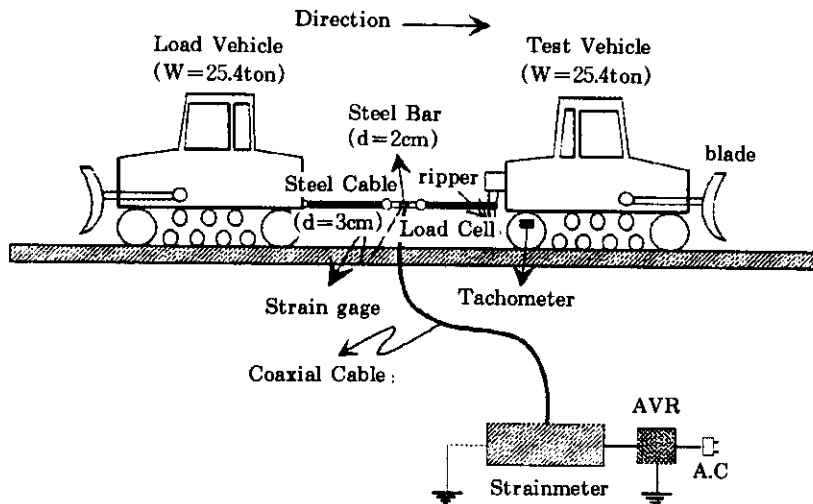


그림 5. 현장 견인력시험 Set-Up 모식도

표 1. 식(5)의 검증실험

	구동축 캡에 부착된 타코미터의 회전수(RPM)		
	71.5	91.8	150.8
측정시간(sec)	10.62	10.62	5.81
식(5)으로 구한 이론이동거리(m)	4.38	5.62	5.05
실측한 이론이동거리(m)	4.24	5.45	4.90
두 거리의 차이(m)	0.14	0.17	0.15

상기 표에서 보는 것처럼 시험차량의 이론이동거리 식으로 구한 거리와 실제 측정한 이론이동거리 사이의 오차는 약 3%이므로 식(5)에 의한 이론이동거리 산정은 타당하다고 판단된다.

4.2 시험 절차

견인력시험을 하는데 사용된 장비들은 직경 2cm, 길이 30cm인 강봉에 2~4개의 스트레인 게이지(5mm)를 부착한 로드셀, 구동축의 회전수를 측정하는 타코미터(tachometer), 스트레인미터(strainmeter), 줄자, 강선(직경=3cm, 길이=350cm:2개), 교류안정기(AVR), 현장 들밀도시험기, 시험차량과 하중차량, 측정시계 등이다. 여기서, 시험차량의 공칭접촉압은 차량의 중량에 궤도의 투영면적으로 나누어 구한 $0.82(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 이다(그림 5 참조).

두 차량을 시험차선으로 이동시킨 뒤, 시험차량의 후미견인고리와 하중차량의 후미견인고리에 강선을 걸고, 그 사이에 하중을 측정할 수 있는 로드셀을 설치한다. 그리고 시험차량의 이동거리를 고려하여 길이 50m 동축케이블을 스트레인게이지와 스트레인미터에 연결한다. 스트레인미터에 전압을 일정하게 공급하기 위하여 교류안정기를 설치한다. 또 노이즈(noise)를 제거하기 위하여 스트레인미터와 교류안정기를 접지시킨다. 그리고 시험차량의 구동축에 타코미터를 설치하여 하중차량의 제동력으로 야기하는 시험차량의 구동축회전수 감소를 측정하고, 이 값을 식(5)에 대입하여 시험차량의 이론이동거리를 구한다.

견인력시험을 하기 전에 하중차량을 약간 후진하여 강선을 팽팽한 상태로 만든다. 이 때 스트레인미터와 측정시계를 영점보정시키고, 하중차량은 중립기어상태로 둔다.

통제자의 실험 시작 신호에 의해 시험차량이 최적구동축 회전수상태(시험차량의 구동축이 일정하게 회전하는 회전수를 말하며, 시험차량의 최적구동축 회전수는 약 170~180rpm임)에 도달할 때까지 중립기어상태인 하중차량을 견인한다. 이 때 야기되는 힘을 견인시 지반저항력이라고 한다. 이 힘은 다짐저항력과 불도징저항력 등의 합이다.

어느 정도 차량을 이동시켜 견인지반저항력을 얻었다고 판단되면 바로 통제자의 신호에 의해 견인력시험을 행한다. 통제자의 신호가 내려지면, 한 사람은 견인력시험 시작점을 표시하고, 다른 한 사람은 시험시간을 측정하고, 나머지 두 사람은 타코미터의 회전수를 읽고 적는다. 그리고 하중차량의 운전사는 제동력장치를 일정하게 조금 밟는다. 이러한 상태로 시험차량은 하중차량을 어느 정도 견인한다. 그 후, 다시 통제자의 신호가 내려지면, 하중차량의 운전사는 전 단계보다 좀 더 큰 제동력을 견 상태로, 전과 동일하게 측정자료를 얻는다. 이러한 과정으로 시험차량이 공회전(100% 슬립)할 때까지 반복한다. 단, "100% 슬립" 상태에서 시험차량의 미소이동은 허용한다. 견인력시험이 끝나면, 각 하중 단계별로 시험차량의 슬립을 얻기 위하여 줄자로 시험차량의 실제이동거리를 측정한다.

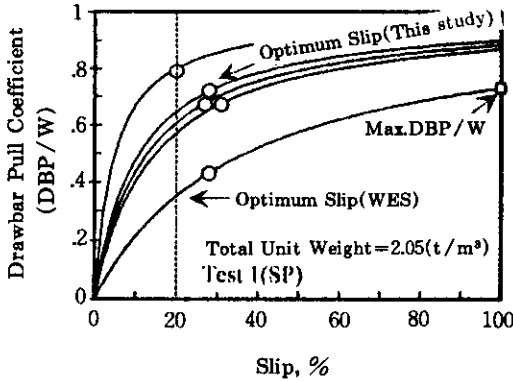
비가 내린 뒤, 약 24시간마다 지반상태가 건조될 때까지 지반밀도를 변화시키면서 시험지

역에서 견인력시험을 행한다. 이 때 시험차선의 여러 곳에서 흙을 채취하여 함수비를 측정한다. 견인력 시험방법은 시행착오를 통하여 최적의 방법으로 결정한 것이다.

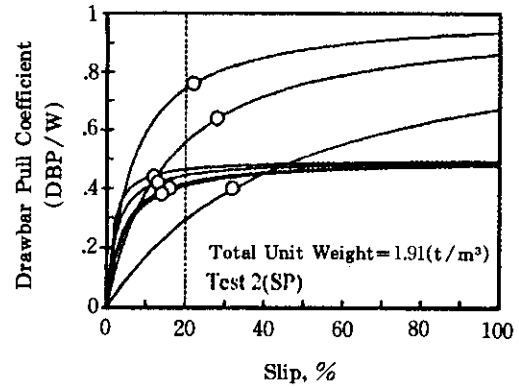
5. 시험 결과 및 분석

5.1 견인력거동 곡선

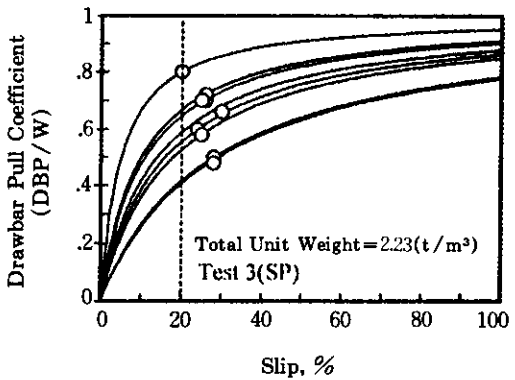
견인력시험에서 구한 견인력과 슬립 값을 쌍곡선 함수(Moore, 1989)로 회귀분석하여 구한 견인력거동 곡선들이 그림 6에 나타나 있다.



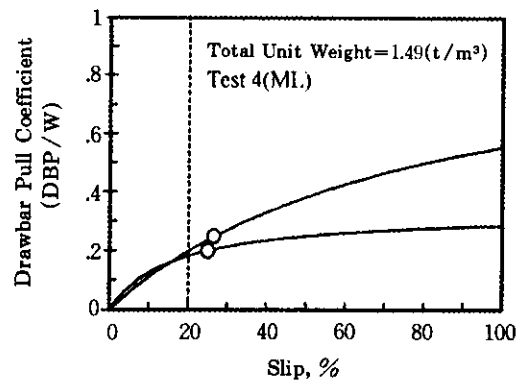
(a) 화강풍화토(SP, $\gamma_t=2.05 \text{ t/m}^3$)



(b) 화강풍화토(SP, $\gamma_t=1.91 \text{ t/m}^3$)



(c) 화강풍화토(SP, $\gamma_t=2.23 \text{ t/m}^3$)



(d) 점성토 (ML, $\gamma_t=1.49 \text{ t/m}^3$)

그림 6. 지반밀도 변화에 따른 견인력계수-슬립 관계 곡선

5.2 최적점의 결정 방법

100% 슬립에서 견인력은 최대견인력이 되나, 차량이 제자리에서 공회전을 하기 때문에 차량의 작업력(work output)은 0이 된다. 따

라서 차량의 주행성 평가에서는 차량의 작업력이 0인 상태의 최대견인력보다 지반에서 원활히 움직일 수 있는 차량의 “최적슬립”과 “최적견인력”을 찾는 일이 더 중요하다.

미육군공병단에서는 최적견인력이 슬립 20%

또는 이 근처에서 발생하고 또, 이 견인력은 100% 슬립 점에 해당하는 최대견인력의 80~90%에 해당한다고 하였다(Moore, 1989). 이 방법을 그림 6의 견인력거동곡선에 적용하여 최적점(점선과 견인력거동 곡선이 만나는 점)을 찾으면 견인력거동곡선 상에서 특정한 의미가 없는 점을 얻게 되어 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 사용하였다.

견인력계수-슬립 관계 곡선을 말뚝기초의 극한지지력 산정시(Crowther, 1988)와 같이 양대수 좌표축(log-log scale method) 상에 작도하면, 두 개의 점선이 교차하는 점(그림 6의 원형표시)을 구할 수 있는데, 본 연구에서는 이 점을 “최적견인력”(optimum drawbar pull :

슬립이 급속히 또는 갑자기 증가하기 시작하는 점의 견인력)과 “최적슬립”(optimum slip : 최적견인력에 해당하는 슬립)이라고 하고, 이 힘을 차량의 중량으로 나눈 값을 “최적견인력계수”(optimum drawbar pull coefficient, DBP/W)라고 하였다. 그리고 최적견인력 중에서 최대값과 최소값을 각각 “최대 및 최소 최적견인력”이라고 하였다.

5.2.1 지반의 밀도를 무시한 최적점의 범위

미육군공병단과 본 연구에서 제안한 최적점 결정 방법을 그림 6에 적용하여 구한 최적슬립과 최적견인력 값의 범위는 표 2에 나타나 있다.

표 2. 미육군공병단과 본 연구의 최적점 비교

		최적슬립	최적견인력
미육군공병단 실험	모든 흙	20%	최대견인력의 80~90%에 해당
본 실험	화강풍화토(SP)[지반밀도 무시]	12~32%	최대견인력의 57~90%에 해당
	점성토(ML)	25~27%	최대견인력의 46~76%에 해당

이 표에서 화강풍화토지반의 최적슬립(12~32%)과 최적견인력(57~90%)의 범위는 미육군공병단의 범위(20%, 80~90%)보다 넓게 분포하였고, 점성토지반의 최적슬립 범위(25~27%)는 미육군공병단의 최적슬립 범위(20%)보다 다소 크게, 최적견인력은 미육군공병단의 범위(80~90%)보다 적게 분포하였다. 이러한 차이를 보이는 이유는 지반상태(흙의 종류, 지반의 밀도, 함수비 등)에 따라서 최적점의 위치가 변하기 때문으로 판단된다.

5.2.2 지반의 밀도변화를 고려한 최적점의 범위

화강풍화토지반의 최적견인력 값을 결정하기 위하여, 미육군공병단에서 제안한 방법과 본 연구에서 제안한 방법을 그림 6(a~c)에 적용하여 구한 값의 범위는 표 3에 나타나 있다.

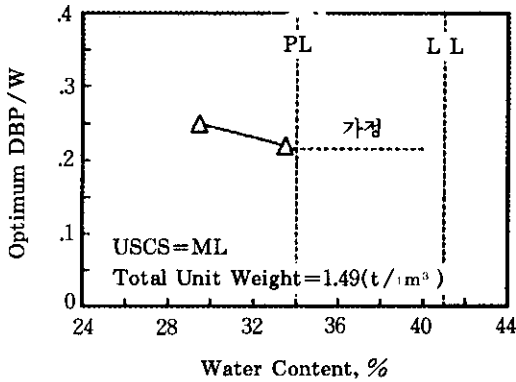
표 3에서 지반의 밀도별로 최적점의 분포를 살펴보면, 지반이 조밀할수록 최적점의 분포가 좁아짐을 알 수 있는데, 이는 지반이 조밀할수록 그라우저에 의해 파괴되는 지반 파괴면이

표 3. 미육군공병단과 본 연구의 최적점 비교

		최적슬립	최적견인력
미육군공병단 실험		20%	최대견인력의 80~90%에 해당
본 실험	화강풍화토(SP) [지반밀도 고려]	1.91(t/m ³)	최대견인력의 57~90%에 해당
		2.05(t/m ³)	최대견인력의 58~83%에 해당
		2.23(t/m ³)	최대견인력의 62~84%에 해당

거의 일정하여 토질주력 변화 폭(즉, 전단 파괴면의 크기와 이 면에서 발생하는 전단응력의 변화)이 적음을 의미한다. 그러나 미육군공병단에서 제안한 최적점의 분포와는 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

상기 결과로 부터, 지반의 밀도를 고려하지 않고 고려하지 않든 간에, 본 연구에서 구한 대부분의 최적슬립점(20% 슬립)점을 포함하면서 넓게 분포하고 있음 알았다. 이는 지반상태에 따라서 견인력거동 곡선 모양이 변하기 때문으로 판단된다. 따라서 다양한 견인력 거동 곡선에 20% 슬립점을 최적슬립으로 고려하는 것은 합당하지



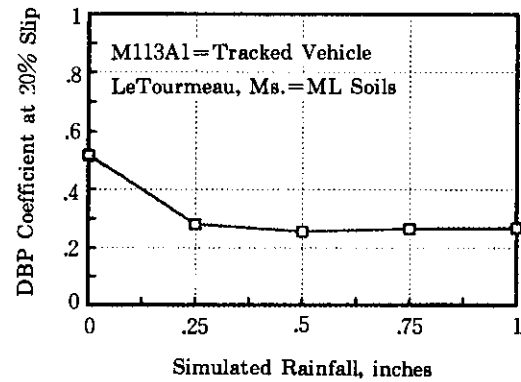
(a) 본 실험(점성토지반)

못하다고 판단되어 본 연구에서 제안한 방법대로 최적점을 구하면 견인력거동 곡선의 형태 변화에 따른 최적점을 일관성 있게 구할 수 있다.

5.3 최적점의 거동

5.3.1 점성토지반의 최적견인력 거동

함수비가 변하는 점성토지반에서 수행하는 시험차량의 최적작업력 거동을 알아보기 위하여, 함수비 변화에 따른 그림 6(d)의 최적견인력계수(원형표시)를 나타낸 것이 그림 7(a)와 같고, 미육군공병단에서 실험한 결과는 그림 7(b)에 나타나 있다.



(b) 미육군공병단 실험(Moore, 1989)

그림 7. 점성토지반의 함수비 변화에 따른 최적견인력거동

미육군공병단의 실험 결과에 의하면, 모사강우량이 증가함에 따라 최적견인력은 감소하다가 일정해지는데, 이는 점성토 내의 세립분이 소성유동(plastic flow)을 일으키기 때문이다(Moore, 1989). 그리고 본 연구에서 실험한 점성토지반(PL=34%, LL=41%)에서는 함수비(29~34%) 증가에 따른 최적견인력이 감소하는 경향을 보이고 있고, 함수비가 더 증가하면 소성유동에 의해 미육군공병단의 실험 결과와 같은 최적견인력거동을 보일 것으로 판단된다.

따라서 점성토지반의 최적견인력거동은 함수비가 증가함에 따라 최적견인력이 감소하다

가 일정해지는 경향을 보임을 알았다. 이는 함수비에 크게 영향을 받음을 의미한다.

5.3.2 화강풍화토지반의 최적견인력거동

(1) 함수비 변화에 따른 거동

화강풍화토지반의 밀도별로, 함수비 변화에 따른 시험차량의 최적견인력거동을 해석하기 위하여 나타낸 것이 그림 8(a~c)와 같고, 본 실험과 비교하기 위하여 나타낸 것이 그림 8(d)와 같다.

그림 8에서 나타나 있는 최적견인력은 함수비가 증가함에 따라 증가하다가 최적함수비(OMC

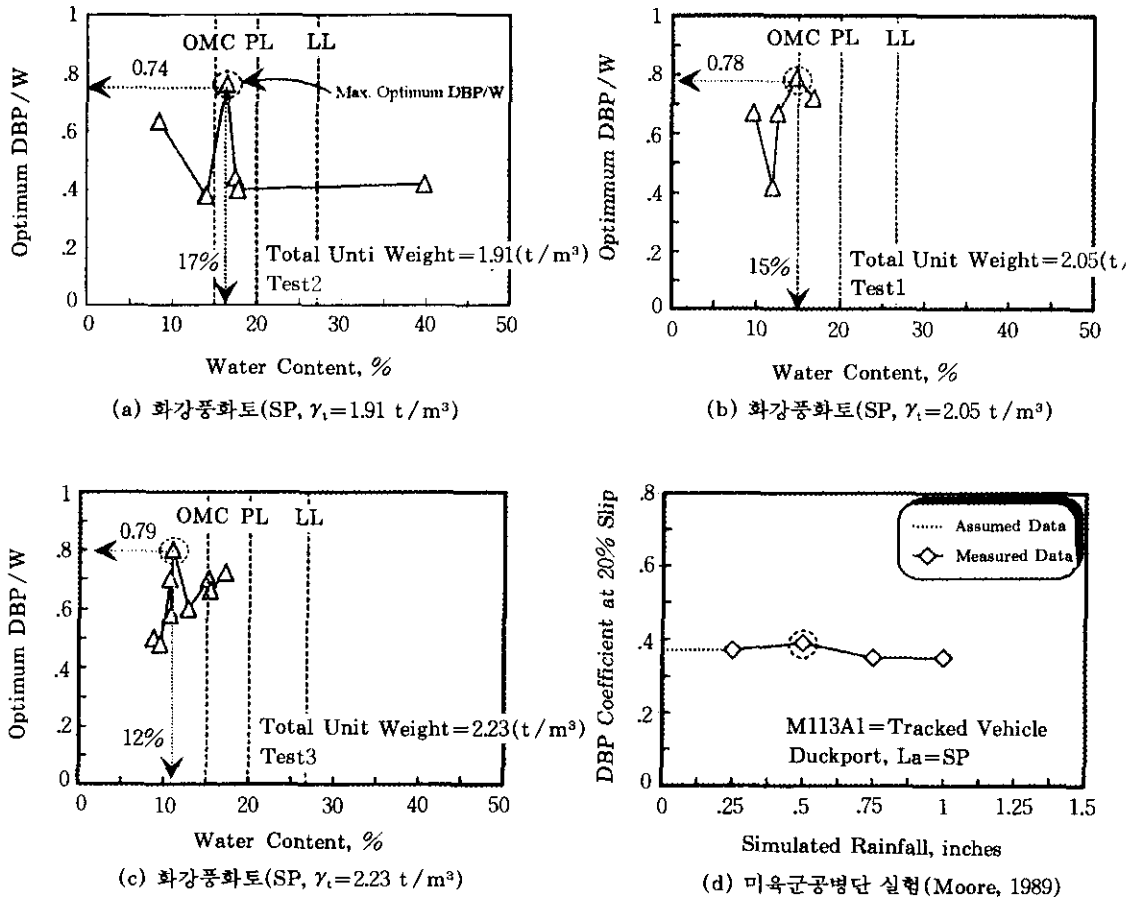


그림 8. 화강풍화토지반의 밀도별 시험차량의 최적견인력계수-함수비 곡선

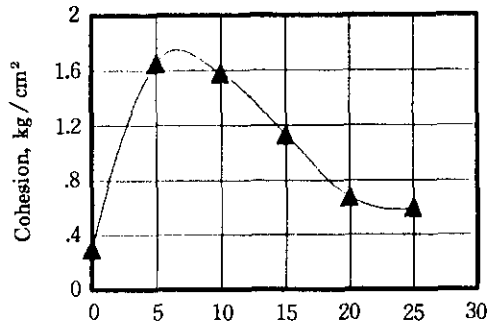
=14.6%, $\gamma_{d,max}=1.86 \text{ t/m}^3$, $\gamma_s=2.13 \text{ t/m}^3$ 근처에서 최대값을 나타내고, 이 함수비부터 소성한계 근처까지는 점차 감소하다가, 소성한계부터는 일정한 값을 보였다.

그림 8의 최적견인력거동 곡선모양을 정성적

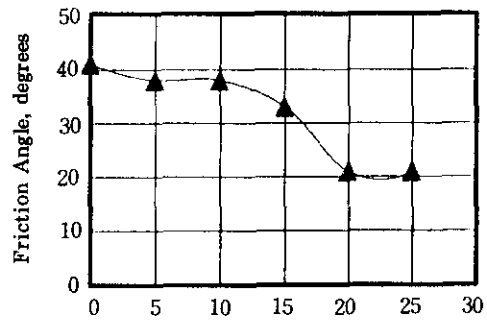
으로 알아보기 위하여, 화강풍화토의 건조단위중량($\gamma_d=1.58 \text{ t/m}^3$)에 함수비를 증가시키면서 직접전단시험 한 결과를 그림 9와 표 4에 요약 정리하였다.

표 4. 화강풍화토의 함수비 변화에 따른 전단강도정수 변화

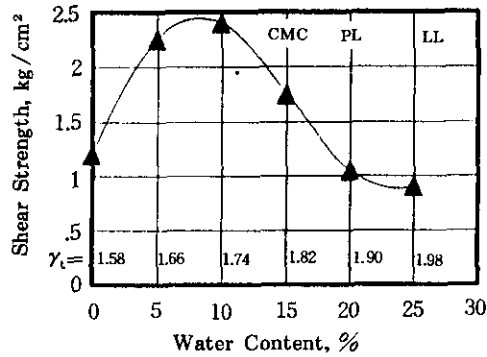
함수비	전단강도정수		전단강도(τ)
	점착력(c)	내부마찰각(ϕ)	
0~10%	겉보기 점착력이 증가	거의 일정함	전단강도가 증가하다가 최대값에 이룸
10~20%	감소하다가 최저값에 이룸	감소하다가 최저값에 이룸	최대 전단강도 값에서 점차로 감소하다가, 최저값에 이룸(세립분이 소성화되는 과정이기 때문)
20% 이후	최저값으로 일정	최저값으로 일정	최저값으로 일정(세립분이 소성화되었기 때문)



(a) C-W/C



(b) φ-W/C



(c) τ-W/C

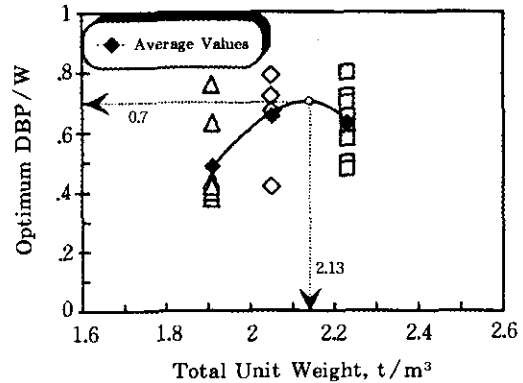
그림 9. 화강풍화토지반의 함수비 변화에 따른 전단강도정수 변화

그림 9와 표 4로부터, 그림 8의 조건조상태에서 최적함수비까지 최적전단강도가 증가하는 이유는 화강풍화토 내에 있는 세립분의 걸보기점착력이 증가하기 때문이고, 최적함수비 이후부터

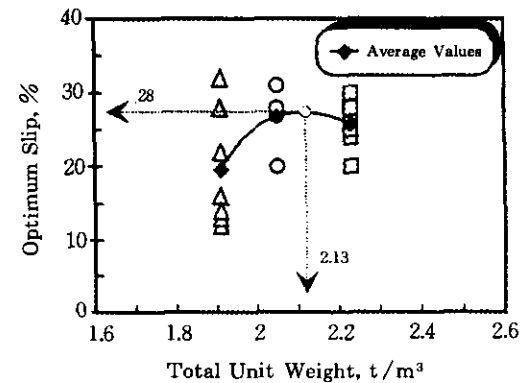
소성한계 근처까지의 최적전단강도는 점차 감소하다가, 소성한계 이후부터는 거의 일정한 값을 보인다. 따라서 화강풍화토지반에서 주행하는 차량의 최적전단강도와 최적슬립은 함수비에 영향을 받을 수 있다. 또한 미육군공병단의 전단강도 시험 결과에서도, 정량적으로는 차이가 있으나 정성적으로는 비슷한 경향을 보이고 있다.

(2) 지반의 밀도 변화에 따른 거동

화강풍화토지반의 밀도 변화에 따른 시험차량의 최적전단강도거동을 분석하기 위하여, 지반 밀도별로 최적전단강도와 최적슬립을 작도한 것이 그림 10에 나타나 있다. 이 그림에서 각 현장단위중량별로 측정자료(최적전단강도와 최적슬립)를



(a) 밀도에 따른 최적전단강도 변화



(b) 밀도에 따른 최적슬립 변화

그림 10. 화강풍화토지반의 밀도변화에 따른 시험차량의 최적점 거동

평균하여 회귀분석한 곡선은 실선으로 나타나 있다.

그림 10에서 지반의 밀도가 증가함에 따라 최적견인력과 최적슬립은 증가하다가 최대건조밀도에서 최대값을 보인 뒤, 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 이 그림에서 알 수 있듯이, 우리나라 화강풍화토지반에서 주행하는 시험차량의 최대최적슬립은 28%이고, 이 점에 해당되는 최대최적견인력은 17.8톤(=0.7×25.4톤)이다. 이 최대최적점에 해당하는 지반밀도가 최대건조밀도와 일치하고 있는데 이는 잘다져진 지반조건에서 시험차량의 최적견인력이 최대로 발생함을 의미한다. 따라서 화강풍화토지반에서 주행하는 차량의 최적견인력과 최적슬립은 지반밀도에 영향을 받음을 알 수 있다. 그리고 그림 10에 대한 회귀분석 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{최적견인력계수 } (DBP/W)_{opt} = & -4.14\gamma_i \\ & +17.61\gamma_i - 18.02 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{최적슬립 } (i_{opt}, \%) = & -179.09\gamma_i \\ & +760.85\gamma_i - 780.30 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\gamma_i(t/m^3)$ 는 현장들밀도시험에서 구한 습윤단위중량이다.

6. 결론

지반의 밀도와 함수비가 이동차량의 주행거동에 미치는 영향을 정량적으로 알아보기 위하여, 강원도 춘천군 역골지역의 화강풍화토지반(SP)에서는 밀도와 함수비를 그리고, 점성토지반(ML)에서는 함수비만을 변화시켰을 때 이들 지반에서 직선운동하는 볼도저 건설중장비 케도차량의 주행성능시험을 하였다. 이 시험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이동차량의 견인력계수와 슬립 관계 곡선은 쌍곡선함수와 일치함을 확인하였다.
2. 지반의 상태에 따라서 변하는 최적점을 일관성 있게 그리고, 공학적 의미가 있게 구하기 위하여, 본 연구에서 견인력계수-슬립 관계 곡선을 양대수 좌표축 상에 나타내어

곡선의 기울기가 변하는 점을 최적점으로 제안하였다.

3. 지반의 밀도를 고려하는 고려하지 않은 간에, 본 연구에서 구한 대부분의 최적슬립점은 미육군공병단에서 제안한 최적슬립(20% 슬립)점을 포함하면서 넓게 분포하고 있다. 이는 지반상태(흙의 종류, 지반의 밀도, 함수비 등)에 따라서 견인력-거동 곡선이 변하기 때문으로 판단된다.
4. 점성토지반에서 주행하는 시험차량의 최적 견인력-거동은 소성한계(PL=34%)까지 함수비가 증가함에 따라 최적견인력이 감소하다가, 이 한계 이후부터는 일정한 잔류상태의 거동을 보일 것으로 판단된다.
5. 함수비 변화에 따른 화강풍화토지반의 최적 견인력-거동은 노건조에서 최적함수비(OMC=14.6%) 근처까지는 화강풍화토 내에 있는 세립분의 겔보기 점착력이 증가하기 때문에 최적견인력은 증가하고, 최적함수비부터는 최적견인력이 점차 감소하다가, 소성한계부터는 일정한 거동을 갖는다.
6. 화강풍화토지반의 밀도가 증가함에 따라 최적견인력과 최적슬립은 증가하다가 최대건조밀도에서 최대값을 보인 뒤, 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 최적견인력-거동이 함수비 뿐만아니라 밀도의 영향을 받기 때문이다.
7. 화강풍화토지반에서 주행하는 시험차량의 최적견인력과 최적슬립은 각각 식(6)과 (7)로 제안하였고, 이 차량의 최대최적슬립과 최대최적견인력계수는 각각 28%와 0.7(0.7×25.4톤=17.8톤)이었다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 95년 핵심연구과제(KOSEF 951-1202-010-1 : “화강풍화토지반에서 케도차량의 주행성에 관한 연구”) 연구 지원으로 이루어졌고, 견인력시험에 많은 도움을 주신 강원대학교 유남재 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박영호(1996), 지반-궤도차량의 상호작용에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교, pp.196~251.
2. Bekker, M.G.(1956), *Theory of Land Locomotion*, The University of Michigan Press. pp.183~185, 250~273.
3. Bekker, M.G.(1960), *Off-the-Road Locomotion*, The University of Michigan Press, pp.32~57, 49~57.
4. Bekker, M.G.(1969), *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, The University of Michigan Press, pp.139~145.
5. Crowther, C.L.(1988), *Load Testing of Deep Foundations*, John Wiley & Son, pp.8-15.
6. Kogure, K.(1982), "A Simplified Method for the Estimation of Soil Thrust Exerted by a Tracked Vehicle", *Terramechanics*, Vol.19, 3, pp.165~181.
7. Moore, D.M.(1989), *The Influence of Soil Surface Conditions on the Traction of Wheeled and Tracked Military Vehicles*, Technical Report GL-89-6, WES, pp.16~43.
8. Wong, J.Y.(1978), *Theory of Ground Vehicles*, John Wiley.
9. Wong, J.Y.(1989), *Terramechanics and Off-Road Vehicles*, Elsevier.
10. Yong, R.N., Fattah, E.A., and Skiadas, N. (1984), *Vehicle Traction Mechanics*, Elsevier.

(접수일자 1996. 11. 11)