

토양 추진력

김 경 옥 교수 · 서울대학교 생물자원공학부 농업기계전공

차량의 주행 성능은 주행 장치에서 노면으로 전달할 수 있는 추진력에 의하여 결정되며, 이 추진력은 두 가지 요인에 의하여 제한된다. 하나는 차량의 엔진 성능이고 다른 하나는 노면의 강도이다. 노면의 강도가 충분한 경우에는 엔진 성능에 의하여 추진력이 결정된다. 즉 엔진의 출력을 모두 유용한 추진력으로 전환할 수 있다. 그러나 노면의 강도가 약한 경우에는 엔진의 출력을 모두 유용한 추진력으로 전환할 수 없으며, 전환할 수 있는 추진력은 노면 강도에 의하여 결정된다. 이러한 원리는 도로 주행 차량(on-the-road vehicle)과 비도로 주행 차량(off-the-road vehicle)에서 쉽게 이해될 수 있다.

단단한 포장 도로를 주행하는 도로 주행 차량의 경우에는 엔진 성능이 우수하면 우수할수록 주행 성능도 우수하다. 그러나 건설 중장비, 군용 차량, 농업용

트랙터등과 같이 자연 상태의 토양에서 운용되는 비도로 차량 즉, 로외 차량(路外車輛)의 경우에는 아무리 엔진 성능이 우수하더라도 주행 성능은 토양 상태에 따라서 변화된다.

로외 차량에서 최대 추진력을 얻기 위한 노력은 일찍부터 시도되었으며, 토양과 주행 장치 사이의 상호 작용의 현상을 구명함으로써 그 해결 방법을 찾고자 하였다. 2차세계대전 중에는 전차, 장갑차등 군용 차량의 야지 기동성이 작전 계획을 수립하는데 고려되는 가장 중요한 사항이 되었으며 이 분야에 대한 연구도 광범위하게 이루어지게 되었다.

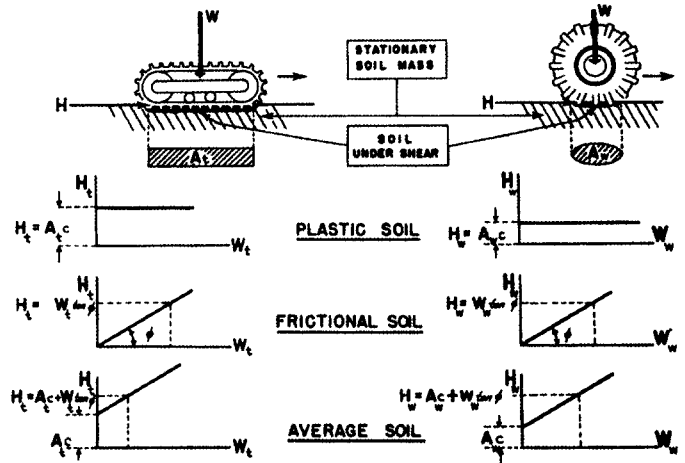
그 후 1950년대 중반부터 육상 주행(land locomotion)이란 이름으로 학문적인 체계를 갖추기 시작하였으며, 1957년에 출판된 육상 주행 이론(theory of land locomotion)은 오늘날 지형 역학(terramechanics), 토양-기계 시스템(soil-machine

system)등으로 불리는 학문 분야의 기초가 되었다. 그러나 일찍부터 이론과 학문적인 체계가 정립된 공기와 항공기, 물과 선박 사이의 상호 작용에 대한 해석에 비하면 토양과 차량의 상호 작용에 대한 해석에는 아직 많은 논란이 있으며 다양한 이론이 제시되고 있다. 이는 공기와 물에 비하여 토양의 성질은 불규칙하고 시간적으로 또 공간적으로 그 변화가 매우 심하기 때문이다.

주행 환경에 적합한 차량을 설계하기 위해서는 그 환경에 대한 물리적인 특성을 이해할 필요가 있다. 토양의 강도가 차량의 중량을 충분히 지지할 수 있고 또, 주행에 필요한 충분한 추진력을 낼 수 있다면 차량은 이 토양을 주행할 수 있을 것이다. 차량 주행의 관점에서 이러한 지면의 수직 반력과 수평 반력을 각각 차량의 지지력(floatation)과 추진력(traction)이라고 한다.

〈그림 1〉에서와 같이 궤도와

차륜형 주행 장치가 낼 수 있는 추진력은 토양의 전단 강도에 의하여 결정된다. 궤도의 그라우즈와 차륜의 러그에 의하여 접지면의 토양이 전단 파괴될 때 차량은 최대 추진력을 낼 수 있다. 토양의 전단 강도에 의하여 얻을 수 있는 이 추진력을 토양 추진력(soil thrust)라고 하며, 차량의 중량과 접지 면적 및 토양의 점성과 내부 마찰각의 함수로써 나타낼 수 있다. 따라서, 중량과 접지 면적이 동일한 차량이라 하더라도 주행 성능은 차량이 주행하는 토양의 특성에 따라 변화된다. 점성이 크고, 마찰 성분이 적은 점토에서는 주로 주행 장치의 접지 면적에 의하여 토양 추진력이 결정되고, 점성이 적고, 마찰 성분이 많은 사질토에서는 주로 차량의 중량에 의하여 결정된다. 이러한 원리는 주행 장치를 설계하는데 적용되는 가장 기본적인 원리이며, 주어진 토양 조건에서 최대의 토양 추진력을 얻거나, 점토 또는 사막 지대에 사용될 차량을 개발하는 데에도 적용된다. 이러한 원리는 또한 주행 환경에 따라 차량의 주행 장치를 선택하는데에도 적용될 수 있다. 토양의 종류와 차량의 중량이 같은 조건에서 차륜이 궤도와 같은 토양 추진력을 얻기 위해서는 차륜의 접지 면적이 궤도의 접지 면적과 같아야 한다. 그러나, 차륜이 궤도의 접지 면적과 같은 접지 면적을 가지기 위해서는 차륜의 접지 길이 즉, 직경이 대단히 커야 하며, 이는



〈그림 1〉 토양의 전단 강도와 토양 추진력

실질적으로 채택하기 어려운 조건이 된다. 따라서, 일반적인 토양 조건에서는 궤도를 차륜으로 대체할 수 없다. 그러나, 사질토와 같은 특수한 토양 조건에서는 접지 면적의 영향이 무시될 수 있으므로 토양 추진력은 차량의 중량에 의하여 결정된다.

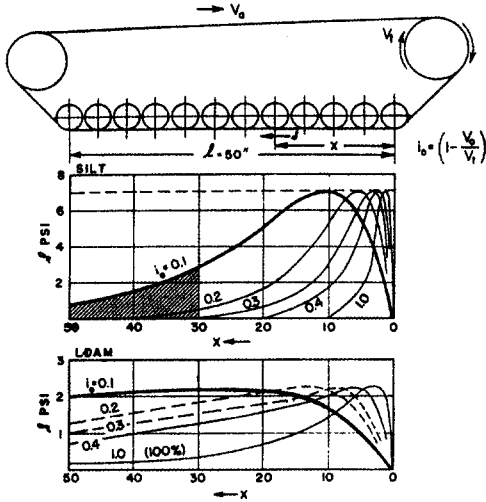
일반적으로 사질토는 하중 지지 능력이 크기 때문에 이러한 토양에서는 궤도를 차륜으로 대체할 수 있다. 사막용 차량의 대부분이 차륜형 주행 장치를 채택하고 있는 것도 이러한 이유 때문이다.

토양 추진력은 또한 슬립의 영향을 받는다. 일반적으로 최대 토양 추진력은 적정 슬립 상태에서 얻을 수 있으며, 슬립이 적정 슬립보다 크거나 작을 때는 토양 추진력이 감소된다. 적정 슬립은

주행 장치의 종류와 토양의 조건에 따라서 다르나 보통 15-20% 사이인 것으로 알려지고 있다.

슬립에 의한 토양 추진력의 변화는 특히 접지 길이가 긴 궤도형 주행 장치에서 현저하게 나타난다. 〈그림 2〉는 접지압이 일정할 때 실트와 양토에서 궤도의 접지 길이와 슬립에 따른 토양 추진력의 변화를 나타낸 것이다.

실트에서는 토양 추진력의 대부분이 궤도의 전반부에서 발생되며 후반부의 기여도는 낮다. 슬립이 증가할수록 후반부의 기여도는 더욱 낮아진다. 즉 실트 토양에서는 궤도의 길이를 증가시키는 것이 토양 추진력을 효과적으로 증가시키는 방법이 되지 못한다. 그러나, 양토의 경우에는 후반부의 기여도가 실트에서 보다는 훨씬 크다. 즉, 양토에서



〈그림 2〉 궤도의 슬립과 접지 길이에 따른 토양 추진력의 분포

는 궤도의 길이를 증가시킴으로써 토양 추진력을 효과적으로 증가시킬 수 있다. 〈그림 2〉에서와 같이 슬립 곡선의 면적으로 표시되는 토양 추진력을 비교함으로써 최대 토양 추진력을 얻기 위한 접지 면적의 폭과 길이를 결정할 수 있다.

차량이 주행할 때는 각종 운동 저항(motion resistance)이 발생된다. 이러한 운동 저항에는 동력 전달 과정에서 발생하는 내부 운동 저항과, 공기, 물, 토양 등 외적 요인에 의하여 발생하는 외부 운동 저항이 있다. 주행 장치에 의하여 토양이 침하됨으로써 발생하는 운동 저항과 주행 장치의 전면부에 토양이 쌓임으로써 발생하는 불도징(bulldozing) 저항은 모두 토양

여 구할 수 있으며, 차량의 중량, 궤도형의 경우에는 궤도의 폭과 길이, 차륜형의 경우에는 차륜의 공기압, 폭, 직경 및 점성과 마찰에 의한 토양 변형 계수, 토양 변형 지수의 영향을 받는다.

일반적으로 운동 저항은 접지면의 길이와 폭, 차륜의 직경이 증가될수록 감소된다. 그러나 폭의 영향은 길이와 직경의 영향보다 적다. 따라서, 운동 저항을 감소시키는데는 접지압이 일정한 경우, 접지면의 폭을 제한하고 길이 또는 직경을 증가시키는 것이 보다 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 접지면의 길이와 차륜의 직경도 무한히 증가시킬 수는 없으며, 실제적으로는 운전의 편의와 차량의 생산비등에 의

하여 제한될 수밖에 없다.

과 차량의 상호 작용에 의하여 발생하는 외부 운동 저항이다. 이러한 운동 저항은 차량의 주행 성능을 저하시키며, 이를 극복하는 데는 토양 추진력의 일부가 소모된다.

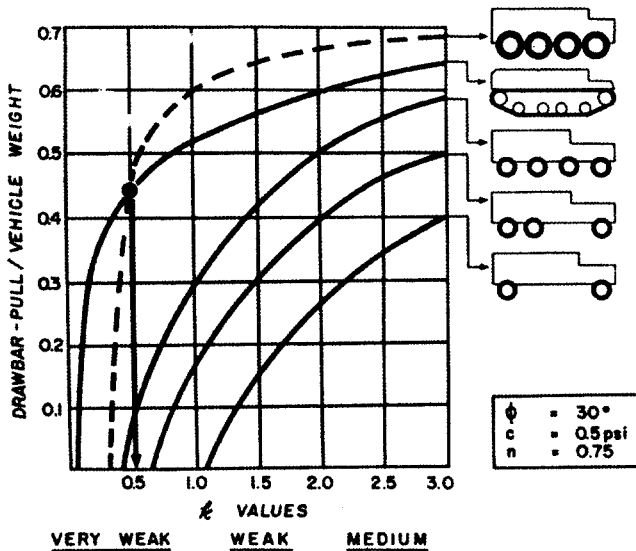
토양 침하에 의한 운동 저항은 토양 다짐으로 소모된 일과 운동 저항을 극복하는 데 소모된 일은 같다는 원리를 적용하

불도징에 의한 운동 저항은 주행 장치의 전면에 쌓이는 토양의 반력으로서 주로 표토가 깊고 연약한 지면에서 크게 발생된다. 불도징 저항은 대단히 복잡한 현상으로서 이론적인 구명보다는 대부분 실험에 의한 경험식으로 근사적으로 예측할 수 있으며, 일반적으로 접지면의 폭이 증가되면 급격히 증가된다. 따라서 동일한 조건에서는 폭이 좁고 길이가 긴 궤도형 주행 장치가 폭이 넓고 길이가 짧은 궤도형 주행 장치보다 불도징 저항이 적다. 차륜형 주행 장치에 있어서도 접지압이 같을 때는 폭이 좁고 직경이 큰 차륜이 폭이 넓고 직경이 작은 차륜보다 불도징 저항이 적다.

엔진의 출력이 충분하면 모든 토양 조건에서 차량의 주행 성능은 토양 추진력, H 와 운동 저항, R 의 차이 즉 $DP = H - R$ 에 의하여 결정된다. 이 DP 를 추진력(tractive effort) 또는 견인력(drawbar pull)이라고 한다.

추진력은 주어진 토양 조건에서 실질적으로 차량을 가속시키고, 경사지를 오르고, 하중을 견인하는데 사용할 수 있는 힘이다. 따라서, 추진력이 크면 클수록 차량의 주행 성능과 견인 성능은 증가된다. 그러나 추진력이 0이면 차량은 주행할 수 없는 주행 불능 상태가 된다.

차량의 성능을 나타내는 데는 차량의 중량, W 에 대한 견인력의 비 즉, $(H - R)/W$ 가 널리 사



〈그림 3〉 견인 계수를 이용한 차량의 성능 비교

용되며, 이를 견인 계수(traction coefficient)라고 한다. 견인 계수는 다양한 토양 조건에서 각종 형태의 차량 성능을 상대적으로 비

교할 때 가장 널리 사용되는 성능 지수이다.

〈그림 3〉은 견인 계수를 이용하여 각종 차량의 성능을 비교하

기 위한 도표의 한 예를 나타낸 것이다. 4륜 차량은 6륜 차량보다 견인 성능이 우수하며, 궤도형 차량은 8륜 차량보다 견인 성능이 우수하다는 것을 나타낸 것이다.

즉, 견인 계수를 사용함으로써 특정 주행 환경에서 각종 차량에 대한 상대적인 성능 비교가 가능해진 것이다.

이상에서와 같이 차량의 성능은 주행 장치와 토양의 상호 작용에 의한 토양 추진력과 운동 저항에 의하여 결정된다.

따라서 차량, 특히 로의 차량을 설계할 때는 주어진 주행 환경에서 토양 추진력을 최대화하고 운동 저항을 최소화하여야 한다. 이는 토양-기계 시스템 분야에서 관심이 집중되어 온 과제 하나이다.

〈김경욱교수:kukim@plaza.snu.ac.kr〉