

오프로드차량의 슬립-견인력 관계의 평가에 사용되는 ASAE 제로조건에 관한 연구

A Study on Zero-Condition of ASAE for Estimating Slip-Traction Relationship of Off-Road Vehicles

박원엽	이규승	오만수	박준걸
정희원	정희원	정희원	정희원
W. Y. Park	K. S. Lee	W. S. Wu	J. G. Park

ABSTRACT

Traction performance of off-road vehicles is estimated using slip-traction relationships. Two zero condition accepted by ASAE have been used widely to obtain the slip-traction relationships of off-road vehicles. This study was carried out using the soil bin systems to investigate the characteristic of slip-traction curves obtained using two zero conditions defined by ASAE, which are driving and driven zero condition, and to present disadvantage of slip-traction relationship based on two zero conditions of ASAE. The results of this study are summarized as follows :

1. For the driving zero condition, the curve of slip-traction relationship shows some issues. The first question is that the slip is zero when the traction is zero. The second question is that the value of slip is smaller than that of corresponding real slip, as the rolling radius decreased for the setting zero condition with driving wheel.
2. For the driven zero condition, slip occurs when the traction is zero, which is more realistic results than driving zero condition. But when a zero condition is set, skid occurs and this result increased the rolling radius of tire and increased slip value for the specific traction value of whole slip range. This kind of trend was getting bigger as the soil is softer, or the tire inflation pressure is higher.
3. From the results of this study, it was found that slip-traction relationship obtained by two zero conditions of ASAE is not realistic in estimating the traction performance of off-road vehicles. And also slip-traction relationship obtained for the same experimental condition showed different result in accordance with chosen zero condition,

Keywords : Rolling radius, Off road vehicle, Zero condition, Slip-traction relationship.

The article was submitted for publication in October 2002, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2002. The authors are Won Yeop Park, Resaerch Assistant Professor, Kyou Seung Lee, Professor, Wan Shou Wu, Research Associate, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea and Joon GuI Park, Dept. of Agricultural & Biosystems Engineering, Konkuk University, Chungju, Korea. The corresponding author is K. S. Lee, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea. Fax:+82-31-290-7830. E-mail:<seung@skku.ac.kr>.

1. 서 론

오프로드(off-road)에서 운용되고 있는 차량의 성능, 특히 견인성능은 일반적으로 슬립에 따른 견인력 즉, 슬립-견인력(slip-traction) 관계를 이용하여 나타낸다. 따라서 오프로드차량의 견인성능을 정확히 평가하기 위해서는 견인력뿐만 아니라 특정 견인력값에 대한 정확한 슬립값의 측정이 필요하다. 두 가지 성능변수 중 견인력은 견인력 실험을 통해 정확한 측정이 가능하나 정확한 슬립을 측정하기 위한 방법은 현재까지 보고되지 않고 있다.

슬립은 타이어의 구름반경(rolling radius)을 측정 한 후 측정된 구름반경을 기준으로 한 차량의 이론적인 속도와 실제 속도와의 관계로부터 결정되기 때문에 타이어의 구름반경은 차량의 슬립에 크게 영향을 미친다.

온로드(on-road)에서 타이어의 구름반경은 주로 타이어공기압의 크기에 따른 타이어의 변형(deformation)에 크게 영향을 받는다. 그러나 오프로드에서 운용되는 차량의 경우에는 동일한 타이어공기압에 대해서도 토양상태에 따라 타이어의 변형량이 다르게 나타나고, 또한 토양의 압축, 파괴에 의한 토양의 이동 현상에 의해 구름반경은 타이어의 공기압뿐만 아니라 토양상태에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 오프로드 특히, 연약지에서 차량의 슬립을 평가하기 위한 기준으로 사용되고 있는 타이어의 구름반경은 타이어공기압뿐만 아니라 토양조건에도 영향을 받게 되어, 슬립은 동일한 견인력값에 대해서도 다르게 측정된다. 이러한 이유로 다양한 토양조건과 타이어공기압에 대해서도 차량의 슬립-견인력 관계의 평가를 위해 사용할 수 있는 표준화된 구름반경의 측정 기준 즉, 표준화된 제로조건(zero condition)이 필요하다(Shibusawa, 1996).

현재 오프로드에서 차량의 슬립-견인력 관계를 평가하기 위해 가장 일반적으로 사용되고 있는 제로조건 기준은 다음의 1), 2)와 같이 미국농공학회(ASAE)에서 정의하고 있는 두 가지 기준으로서, 현재까지 오프로드에서 차량의 슬립-견인력 관계를 평가하기 위한 표준으로 사용되고 있다(ASAE S296.4 JAN01).

1) A traction device supplied with an input torque to propel the device across the operating surface or nondeformable surface while delivering zero net

traction.

2) A traction device supplied with a force at the axle in the direction of travel while supplying zero input torque.

그러나 ASAE에서 정의하고 있는 위의 두 가지 제로조건을 이용하여 측정된 각각의 슬립-견인력 관계는 두 방법 모두 특정 견인력값에 대해 정확한 슬립을 나타내지 못하고, 동일한 토양조건과 타이어공기압 조건에 대해서도 각각 다른 슬립-견인력 관계를 나타내고 있다. 따라서 이들 방법에 의해 측정된 슬립-견인력 관계는 아직까지 오프로드차량의 성능을 평가하는데 있어 문제점이 있는 것으로 보고되고 있다(Upydhyaya, 1988, 1989, 1990; Freitag, 1990; Shibusawa, 1996; Ajay, 1996).

Upydhyaya 등(1988)은 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 관계의 회귀식에 포함된 상수를 수정한 새로운 방법의 슬립-견인력 관계를 제안하였고, Shibusawa 등(1996)도 슬립-견인력 관계의 측정치에 대한 회귀식을 수정한 방법을 제안하였다. 그러나 위의 방법들은 모두 슬립-견인력 측정치의 회귀식을 보완한 방법으로서 제로조건 기준의 근본적인 문제점을 해결한 방법은 아니다.

따라서 본 연구에서는 오프로드에서 차량의 성능 평가의 척도로서 사용되고 있는 슬립-견인력 관계를 측정하는데 있어 현재까지 가장 일반적인 기준으로 사용되고 있는 ASAE의 두 가지 제로조건 즉, 구동제로조건과 피구동제로조건을 이용하여 측정되는 슬립-견인력 관계의 분석을 통해 ASAE의 두 가지 제로조건에 의한 슬립-견인력 관계의 문제점을 구명하고, 향후 오프로드 차량의 슬립-견인력관계를 보다 정확하게 평가할 수 있는 새로운 제로조건 개발을 위한 지침을 제시하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장치

(1) 인공토조시스템

본 연구에서는 다양한 조건에서 타이어의 슬립-견인력 실험을 수행할 수 있고 신뢰성 있는 측정자료를 얻기 위하여 인공토조시스템(soil bin system)에서 실험을 수행하였다. 인공토조시스템은 토양조 및 레일시스템, 대차구동시스템, 실험대차, 토양가공대차 등으로 구성되었다. 토양조는 길이

12m, 폭 1m, 높이 0.7m로서 필요에 따라 토양의 수분 함량을 조절할 수 있도록 배수시설이 되어 있으며, 토양가공대차는 토양의 물리적 상태가 실험목적에 적합하도록 실험과 실험사이에 토양을 가공하는 대차로서 토양가공에 필요한 로타리틀러, 표면다짐틀러, 균평기 등을 포함하고 있다.

대차구동시스템은 대차를 이동시키는 장치로서 원치시스템을 이용하였다. 원치 시스템에 사용된 구동 모터는 10HP으로서 경운기 변속장치를 이용하여 대차의 속도를 0.08~0.77m/s의 범위 내에서 조정할 수 있으며, 전진 6단과 후진 2단계인 총 8 변속 단계로 구성되었다.

실험대차는 베이스 프레임, 측정 프레임, 차륜 프레임의 3개 주요 부분으로 구성되어 있다. 베이스 프레임은 레일 위에 지지되어 있으며 케이블에 의해 앞·뒤로 이동하는 프레임으로 실험차륜의 구동을 위한 유압시스템이 장착되어 있다. 측정 프레임에는 연직방향으로 연마봉이 지지되어 있으며 부착된 베어링이 토양상태와 차륜에 걸리는 하중에 따라 상·하로 자유롭게 운동할 수 있도록 되어 있다. 한편, 차륜 프레임은 타이어를 부착하는 프레임으로서 측정프레임에 부착되어 유압모터와 체인 전달방식에 의해 타이어에 동력을 전달할 수 있도록 구성되었다. 또한 무게 추(weight balance)에 의해 타이어에 작용하는 축하중을 조절할 수 있도록 구성되었다.

한편, 실험에 사용된 토조내의 토양은 미농무성법(USDA) 분류로 사질양토(sandy loam)로서 표 1에 실험토양의 조성 및 분류를 나타내었다.

Table 1 Texture and composition of test soil by USDA classification

Composition			Soil Texture
Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	
53.5	37.1	9.4	Sandy loam

(2) 타이어 구동 장치

구동륜의 성능 실험에 사용된 타이어는 국내 H사에서 생산되는 6.00 R14 LT인 타이어를 사용하였다. 타이어는 인공토조시스템의 측정대차에 장착된 차륜프레임에 부착되어 차륜프레임에 설치되어 있는 8마력 유압모터에 의해 구동된다. 타이어가 장착된 차륜프레임은 워기어와 미끄러짐 베어

링에 의해 좌·우 및 상·하 방향으로 자유로이 이동할 수 있도록 구성되었다. 유압모터로부터 발생된 토크는 스프로킷과 체인 연결방식을 통해 타이어로 전달되도록 구성하여 기어비가 다른 스프로킷의 교환을 통해 타이어의 회전속도와 토크를 쉽게 변환시킬 수 있도록 하였다(그림 1).

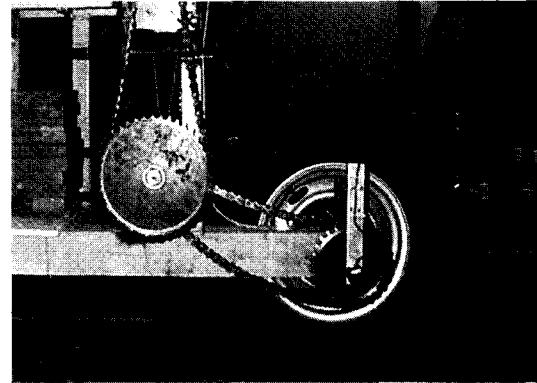


Fig. 1 View of tire driving system.

(3) 타이어 슬립 측정 장치

타이어의 슬립을 측정하기 위해 타이어의 이론 주행거리와 실제 주행거리를 측정할 수 있는 장치를 구성하였다.

타이어의 이론주행거리를 측정하기 위해 타이어의 축에 로타리엔코더를 부착하였고, 피구동륜의 축과 로타리엔코더와의 회전편심에 의한 손상을 방지하기 위하여 타이어의 구동축을 가공한 후 연성커플링(flexible coupling)을 통해 연결하였다. 로타리엔코더는 축이 1회전할 때마다 1,000개의 펄스를 출력하는 일본 NEMICON사의 OEW-10-2M을 사용하였다.

한편, 실제 주행거리를 측정하기 위해 측정대차의 후부에 5륜(fifth wheel)을 장착하였다. 5륜은 이론 주행거리 측정장치와 같은 방법으로 5륜의 축에 로타리엔코더를 부착하였고, 로타리엔코더는 5륜의 축이 1회전 할 때마다 1,024개의 펄스를 출력하는 NEMICON사의 OEW-1024-2M을 사용하였다. 그림 2는 타이어 구동장치와 5륜 및 자료수집 장치가 구성된 타이어 구동 시스템의 전체 모습을 보여주고 있다.

나. 실험방법

타이어의 슬립 견인력 관계는 제로조건인 설정



Fig. 2 Overall view of tire driving system.

방법에 따라 다르게 나타나며 이것은 제로조건의 설정방법에 따른 타이어의 구름반경의 차이에 기인한다. 따라서 본 연구에서는 제로조건에 따른 타이어의 슬립-견인력 관계를 평가하기 위하여 두 가지 독립적인 실험을 수행하였다.

첫 번째는 토양조건과 타이어공기압에 따른 피구동륜의 운동특성, 특히 타이어의 구름반경과 구름반경에 크게 영향을 미치는 타이어의 변형량(deformation)을 측정하는 실험이고, 두 번째는 토양상태와 타이어공기압의 변화에 따라 두 가지 제로조건의 설정방법에 따른 슬립-견인력 관계를 측정하는 실험이다.

(1) 피구동륜의 운동 특성 측정

노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 운동특성 즉, 타이어의 구름반경 및 변형량을 조사하기 위해 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 실험토양을 다짐정도가 다른 세 가지 노면상태로 가공하였다. 또한 오프로드에 대한 온도로 조건에서의 상대적인 운동특성을 비교하기 위해 합판(wood plate)을 이용하여 온로드 노면상태를 구현하여 총 4 수준의 노면상태(soil- I, soil-II, soil-III, on-road)에서 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa인 4 수준의 타이어공기압 조건을 이용하여 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 운동특성을 측정하였다.

(가) 노면가공

오프로드 노면은 토양가공대차의 로타리틸러, 균평기, 표면다짐롤러를 이용하여 노면을 다짐정도가 다른 세 종류의 노면상태로 가공하였으며 매 실험마다 동일한 노면상태를 만들기 위해 그 횟수와 순서를 일정하게 유지하였다. 또한 앞의 세 가

지 노면상태 외에 온로드 노면상태를 추가로 조성하였다.

토양-I 은 2회의 로타리작업으로 토양을 완전히 파쇄한 후 균평기로 균평작업을 1회 실시하였고, 토양-II와 토양-III은 로타리작업과 균평작업은 토양-I 과 동일하게 수행한 후 표면다짐롤러 작업을 각각 2회와 4회 실시하여 토양-I 에 비해 상대적으로 노면의 강도를 높게 가공하였다. 한편, 온로드 상태는 토양-I ~ III의 경우와 마찬가지로 로타리작업과 균평작업을 동일하게 수행한 후 표면다짐롤러로 롤러작업을 10회이상 실시하여 다짐작업을 충분히 수행한 후 그 위에 합판을 올려놓아 피구동륜의 통과시 노면의 변형이 발생하지 않도록 하였다(그림 3). 표 2에 각각의 노면상태에 따른 노면가공방법을 나타내었다.



Fig. 3 View of on-road condition.

Table 2 Ground Processing Method

Ground conditions	Processing method			Remarks
	Rotary	Grader	Surface roller	
Soil- I (soft)	2	1		
Soil- II (hard)	2	1	2	
Soil-III (very hard)	2	1	4	
On-road(no sinkage)	2	2	over 10	wood plate

(나) 실험토양의 물리성 측정

실험토양의 물리성은 토양 가공이 끝난 후 피구동륜의 운동특성 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기 밀도, 점착력, 내부마찰각, 원추시수 등을

측정하였다. 겉보기 밀도는 100cc 용량의 토양 채취관을 이용하여 인공토조내의 임의의 5곳에서 토양 샘플을 채취하여 구하였고, 토양의 점착력, 내부마찰각, 원추지수는 SR-2형 토양 경도측정기를 사용하여 토조내의 임의의 5곳을 선정하여 측정하였다. 한편 원추지수는 0~15cm 사이의 토양 깊이에서 5cm 간격으로 측정한 후 평균값을 이용하였다. 표 3에 각각의 노면상태에서 측정한 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 3 Physical properties of experimental ground

Parameters	Ground conditions			
	Soil-I	Soil-II	Soil-III	On road
Cone Index(CI) (kPa)	136	422	663	
Cohesion (kPa)	3.15	9.87	11.04	
Internal friction angle (degree)	30.05	33.75	35.35	
Bulk density (g/cm ³)	1.45	1.52	1.55	

(다) 피구동륜의 구름반경 측정

전술한 4 가지 노면상태 각각에 대해 타이어의 공기압을 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa인 4 수준으로 변화시켜 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 구름반경을 측정하였다. 구름반경은 피구동륜 1 회전당 이동거리를 2π 로 나누어준 값으로 결정하였다. 한편, 피구동륜의 축하중과 피구동륜을 당기는 속도(pulling velocity)는 각각 2.45kN과 0.08m/s로 일정하게 유지하였다. 표 4에 본 실험에서 사용한 각 변수들의 범위를 나타내었다.

Table 4 Experimental conditions

Ground conditions	Soil- I , Soil- II , Soil- III , On-road
Inflation pressure (kPa)	80, 160, 240, 320
Axle load (kN)	2.45
pulling velocity (m/s)	0.08

(라) 피구동륜의 변형량 측정방법

피구동륜의 변형량은 피구동시 발생하는 타이어 중심축의 연직하방 수직변위와 타이어의 토양침하량의 차로써 결정하였다. 타이어의 연직하방 수직변위는 측정대차 프레임에 랙기어를 장착하고, 측정대차에 부착되어 좌·우 및 상·하로 이동할 수 있는 차륜프레임에 로타리엔코더를 부착하여 측정하였고, 피구동륜의 토양침하는 타이어가 지나간 궤적을 자를 이용하여 측정하였다. 한편, 토양침하는 타이어 궤적상의 임의의 10곳에서 측정한 후 평균값을 이용하였다.

(2) 견인력 실험방법

(가) 견인력 측정

견인력 실험은 전술한 세 가지 토양상태(토양-I, 토양-II, 토양-III)에서 타이어의 공기압을 각각 120kPa, 240kPa, 360kPa의 세 수준으로 변화시켜 슬립에 따른 견인력 측정을 수행하였다. 또한, 슬립은 0~80% 범위로 조정하였고, 타이어에 작용하는 축하중은 2.45kN으로 일정하게 유지하였다(표 5).

견인력 측정은 타이어 구동장치와 토양가공대차 사이에 강선을 연결하여 그 사이에 하중변환기를 부착한 후 타이어를 구동하였을 때 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 구하였고, 구동륜의 속도에 변화를 주어 구동륜의 슬립을 조절하여 슬립의 변화에 따른 견인력을 측정하였다(그림 4).

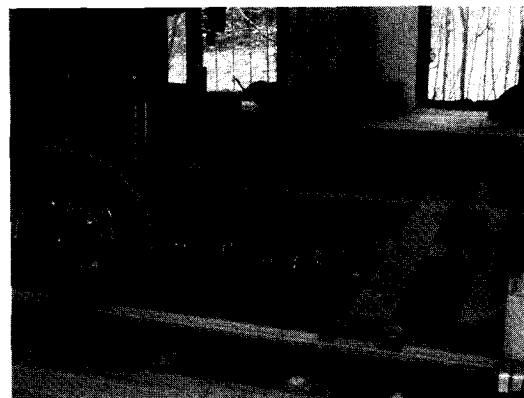


Fig. 4 View of wire rope and loadcell.

Table 5 Experimental conditions for tractive performance test

Ground conditions	Soil- I , Soil-II , Soil-III
Inflation pressure (kPa)	120, 240, 360
Slip range (%)	0 ~ 80
Axle load (kN)	2.45

3. 결과 및 고찰

가. 토양상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 운동 특성

그림 5는 강도가 다른 4가지 노면상태에서 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 변형량을 측정 한 결과이다.

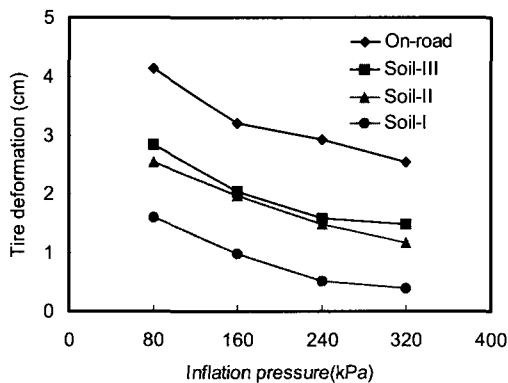


Fig. 5 Relationships between the deformation and the inflation pressure of tire on four different ground conditions.

그림 5에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 변형량은 토양-I의 경우 각각 1.60cm, 0.98cm, 0.52cm, 0.40cm이고, 토양-II의 경우에는 각각 2.55cm, 1.97cm, 1.50cm, 1.18cm, 토양-III의 경우에는 각각 2.83cm, 2.04cm, 1.59cm, 1.49cm, 그리고 온로드 노

면의 경우에는 각각 4.13cm, 3.20cm, 2.92cm, 2.55cm로서 피구동륜의 변형량은 4가지 노면상태에서 모두 타이어의 공기압이 증가할수록 감소하였다. 또한 노면의 강도에 따른 피구동륜의 변형량의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 온로드, 토양-III, 토양-II, 토양-I의 순서로서 노면이 단단할수록 피구동륜의 변형량이 크게 나타났다.

한편, 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형량의 절대적인 감소량은 4수준의 노면조건에 대해 큰 차이를 나타내지는 않았으나 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형량의 감소경향은 4 수준의 노면 조건에서 모두 공기압이 증가할수록 변형량의 절대적인 감소량이 작아지는 지수곡선 형태의 감소 경향을 나타내었다.

위와 같이 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 변형량이 감소한 이유는 타이어공기압의 증가에 따른 타이어 강도의 증가 때문으로 판단된다. 한편, 같은 공기압에 대해 노면의 강도가 약할수록 피구동륜의 변형량이 감소하였는데 이러한 결과는 노면이 연약할 경우 타이어의 침하 증가로 인한 토양-타이어간의 접지면적의 증가로 접지압이 감소하였기 때문이다.

그림 6은 강도가 다른 4가지 노면상태에서 타이어공기압에 따른 피구동륜의 구름반경을 측정 한 결과이다.

그림 6에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160

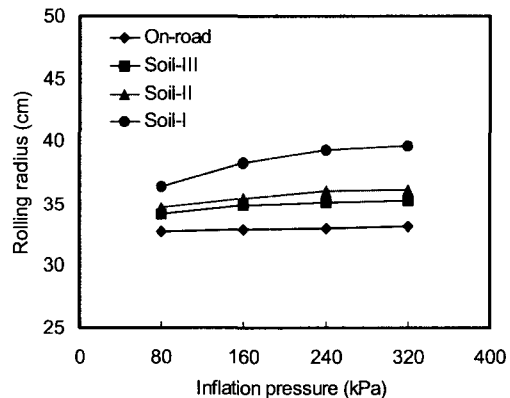


Fig. 6 Relationships between the rolling radius and the tire inflation pressure on four different ground conditions.

kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 구름반경은 토양-I의 경우에는 각각 36.41cm, 38.29cm, 39.30cm, 39.60cm, 토양-II의 경우에는 각각 34.72cm, 35.51cm, 36.09cm, 36.15cm, 토양-III의 경우에는 각각 34.15cm, 34.91cm, 35.15cm, 35.31cm, 그리고 온로드의 경우에는 각각 32.70cm, 32.87cm, 32.99cm, 33.11cm로서 4 가지 노면 모두에 대해서 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 구름반경은 증가하는 것으로 나타났다

또한, 동일한 타이어공기압에 대해 노면의 강도에 따른 피구동륜 구름반경의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 토양-I, 토양-II, 토양-III, 온로드의 순서로서 노면의 강도가 약할수록 구름반경이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 그림 5에 나타난 바와 같이 공기압의 증가에 따른 타이어 변형량의 감소현상과 토양의 강도 저하에 의한 타이어접지압의 감소에 따른 타이어변형량의 감소 때문이다.

한편, 위의 결과에서 온로드조건에서는 피구동륜의 구름반경은 4 수준의 공기압에 대해 모두 실측구름반경(타이어의 변형이 발생하지 않도록 타이어를 지면과 분리시킨 후 줄자를 이용하여 측정된 타이어의 원주길이를 2π 로 나눈 타이어의 실제 반경으로서 33.93cm)보다 작게 나타났으나 오프로드노면 즉, 토양-I, 토양-II, 토양-III의 경우에는 구름반경이 모두 실측구름반경보다 크며, 토양이 연약할수록 실측구름반경과의 차가 크게 나타났다.

이러한 결과는 온로드와 같이 단단한 노면인 경우에는 피구동륜의 구름반경이 타이어의 변형량에 주로 영향을 받지만, 오프로드에서는 타이어의 변형뿐만 아니라 피구동륜의 회전시 나타나는 토양의 파괴현상에 의해 나타나는 타이어의 미끄러짐(skid) 효과가 복합적으로 발생하기 때문이다. 즉, 타이어의 변형은 피구동륜의 구름반경을 감소시키는 효과가 있는 반면, 토양의 파괴에 따른 타이어의 미끄러짐 현상은 피구동륜의 구름반경을 증가시키는 효과가 있다. 이러한 이유로 온로드 조건에서는 4수준의 공기압 조건에서 모두 타이어의 변형에 의해 구름반경이 실측구름반경보다 작게 나타났지만, 오프로드에서는 타이어의 변형에 따른 구름반경의 감소량보다는 타이어의 미끄러짐에 의한 구름반경의 증가량이 상대적으로 크기 때문

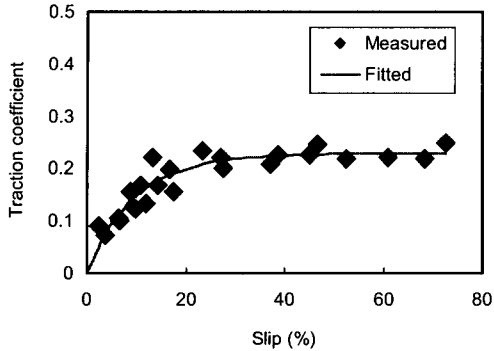
에 피구동륜의 구름반경이 실측구름반경 보다 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 타이어의 회전시 발생하는 토양의 파괴현상은 토양의 강도가 약할수록 크고, 또한 토양이 약할수록 미끄러짐이 크게 나타나기 때문에 토양이 연약할수록 피구동륜의 구름반경이 작게 나타난 것으로 판단된다.

한편, 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때의 토양-I, 토양-II, 토양-III 및 온로드에서 피구동륜의 구름반경의 증가율은 토양-I의 경우에는 각각 5.16, 7.94, 8.76%, 토양-II의 경우에는 각각 2.28, 3.95, 4.12%, 토양-III의 경우에는 각각 1.16, 2.93, 3.40%, 그리고 도로의 경우에는 각각 0.52, 0.89, 1.25%로 나타났다. 즉, 4가지 노면상태에서의 구름반경은 모두 공기압이 증가함에 따라 함께 증가하였고, 공기압의 증가에 따른 구름반경의 절대적인 증가량은 토양-I, 토양-II, 토양-III, 도로의 순서로서 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.

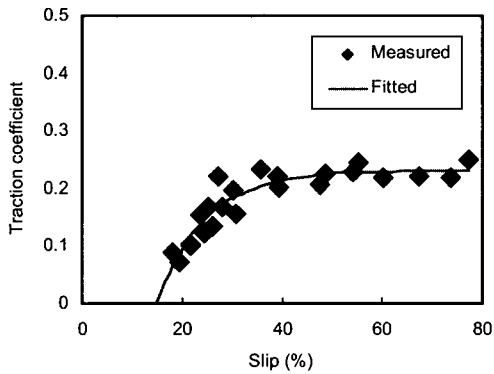
이러한 결과는 공기압의 증가는 타이어의 침하량을 증가시키게 되고, 침하량의 증가는 타이어의 미끄러짐 현상을 증가시키기 때문에 타이어의 공기압이 증가함에 따라 피구동륜의 구름반경이 증가한 것으로 판단된다. 또한 노면상태가 연약할수록 공기압의 증가에 따른 구름반경의 절대적인 증가량이 크게 나타난 것은 토양이 연약할수록 공기압의 증가에 따른 미끄러짐 현상이 크기 때문이다.

나. ASAE의 두 가지 제로조건을 이용하여 토양상태와 타이어공기압에 따라 측정된 구동륜의 슬립-견인력 관계의 분석

그림 7의 (a)와 (b)는 각각 토양 I에서 360kPa의 타이어공기압에 대해 ASAE에서 정의한 두 가지 제로조건 즉, 차량이 자체 주행하는 상태에서 측정된 구름반경을 기준슬립(0슬립)으로 설정하는 방법(이하 구동제로조건; driving zero condition)과 피구동상태에서 측정된 구름반경을 기준슬립으로 설정하는 방법(이하 피구동제로조건; driven zero condition)을 이용하여 측정된 슬립-견인력 관계를 나타낸 결과로서, 그림 7에서 점은 측정치를 나타내고 있고, 실선은 측정치로부터 유도된 회귀식에



(a) driving zero condition



(b) driven zero condition

Fig. 7 Slip-traction coefficient curves measured using two different zero conditions defined by ASAE for the tire with inflation pressure of 360 kPa at soil-I.

의해 모형화된(fitted) 결과를 나타내고 있다.

그림 7에 나타난 바와 같이, 두 가지 제로조건을 이용하여 측정된 슬립-견인계수 관계는 두 경우 모두 슬립이 증가함에 따라 견인계수가 지수곡선의 형태로 증가하는 경향을 나타내었지만 동일한 견인력값에 대해 측정된 슬립값은 두 가지 제로조건에 대해 각각 다른 결과를 나타내었다.

즉, 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 관계에서는 견인력이 0일 때 슬립도 0으로 나타났지만 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 관계에서는 견인력이 0일 때 슬립 값은 0보다 큰 값 나타났다.

구동제로조건에서 견인력이 0일 때 슬립이 0이 나타나게 된 이유는 구동제로조건은 차량 주행부(타이어)에서 발생하는 추진력이 차량 자체의 운동저항을 극복하여 움직이는 순간 즉, 주행부의 추진력과 운동저항이 같은 순간을 제로조건으로 설정하였기 때문에 이러한 조건에서는 견인력이 0일 때의 슬립은 항상 0으로 나타나게 된다.

그러나 실제의 경우에 있어서 차량이 운동저항을 극복하여 움직이는 순간 즉, 견인력이 0인 상태에서는 차량의 구동륜에는 운동저항을 극복하기 위한 추진력(구동륜의 토크와 반경간의 비)이 발생하고, 이러한 추진력은 토양의 파괴 및 변형을 유발하여 구동륜의 슬립을 발생시키게 된다.

즉, 견인력이 0인 조건에서는 슬립이 0보다 커야 하며, 슬립이 0이 되기 위한 조건은 토양의 변형이 발생하지 않는 상태 즉, 타이어가 회전을 시작하는 순간으로서 추진력이 0인 상태(토크가 0인 상태)이어야 한다.

따라서 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 곡선은 견인력이 0일 때 슬립이 0으로 나타나기 때문에 차량의 실제 슬립-견인력 관계를 정확히 표현할 수 없는 것으로 판단된다.

한편, 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 관계에서는 견인력이 0일 때 슬립이 0보다 큰 값이 나타나 전술한 바와 같이 견인력이 0일 때 슬립은 0보다 커야 한다는 조건을 만족하고 있다. 그러나 피구동제로조건에서는 전술한 그림 6에 나타난 바와 같이 차량을 끌 때 피구동륜과 토양간에 나타나는 타이어의 미끄러짐 현상에 의해 타이어의 구름반경이 증가하고, 이러한 현상은 토양이 연약할수록 크게 나타났다. 따라서 피구동제로조건에서는 구름반경의 증가에 의해 특정 견인력값에 대해 측정되는 슬립값이 실제 슬립보다 크게 나타나고, 이러한 경향은 토양이 연약하거나 타이어의 공기압이 클수록 크게 나타날 것으로 판단된다. 이러한 이유로 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 곡선은 전체 슬립구간에서 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 곡선에 비해 동일한 견인력값에 대해 상대적으로 슬립이 크게 나타났다.

그림 7의 결과로부터 슬립-견인계수 관계는 제로조건 설정기준에 따라 다른 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 토양조건과 타이어공기압의

변화는 타이어의 구름반경에 영향을 미치는 것으로 나타나 이 두 기준에 의한 슬립-견인력 곡선의 상대적인 차이는 토양조건과 타이어공기압에 따라 다르게 나타날 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 토양상태와 타이어공기압의 변화가 두 가지 제로조건에 대해 측정된 각각의 슬립-견인력 관계에 미치는 효과를 구명하기 위하여, 세 가지 토양상태와 세 수준의 타이어공기압 조건에 대해서 두 가지 제로조건에 따른 슬립-견인력 관계를 비교, 분석하였다.

그림 8의 (a), (b), (c)는 토양-I에서 타이어의 공기압이 각각 120kPa, 240kPa, 360kPa인 조건에서 두 가지 제로조건에 대해 측정된 슬립-견인력 관계를 비교한 결과이다.

그림 8의 (a), (b), (c)의 결과는 세 수준의 공기압에서 모두 견인력이 0일 때 피구동제로조건과 구동제로조건에서의 슬립값이 차이를 나타냈으며 이러한 경향은 공기압이 높을수록 크게 나타났다. 또한 동일한 견인력값에 대해 측정된 슬립값은 전체 슬립구간내에서 피구동조건에서 측정된 슬립값이 구동조건에서 측정된 슬립값에 비해 크게 나타났다. 한편, 구동제로조건과 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 관계는 저슬립 영역에서 그 차이가 크게 나타났다.

이러한 결과는 전술한 바와 같이 제로조건 설정방법에 따른 구름반경의 크기에 기인하는 것으로 판단된다.

구동제로조건과 피구동제로조건에서의 슬립 S_D 와 S_T 는 각각 식 (1)과 (2)에 의해 측정되기 때문에 각각의 슬립의 크기는 타이어의 구름반경의 크기에 영향을 받게 된다.

$$S_D = \left(1 - \frac{V_R}{V_D}\right) \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$S_T = \left(1 - \frac{V_R}{V_T}\right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

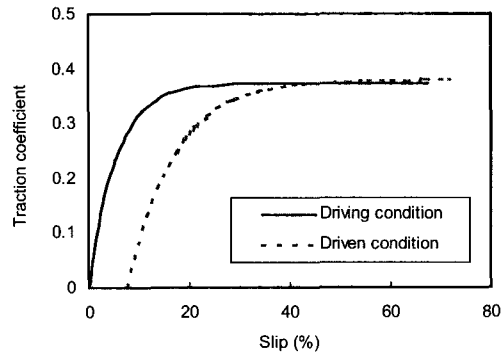
여기서, V_R : 차량의 실제 속도 (m/s)

V_D : 구동조건에서의 차량의 이론속도

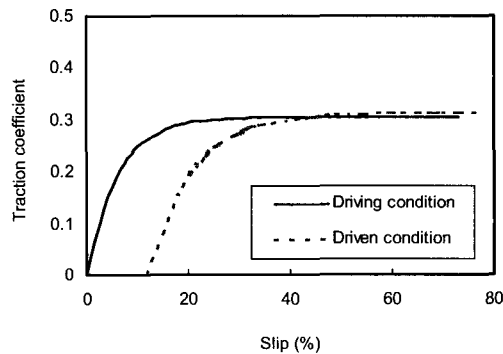
$$V_D = R_D \times \omega_D \text{ (m/s)}$$

V_T : 피구동조건에서의 차량의 이론속도

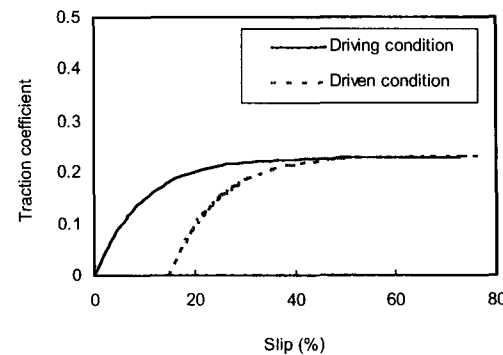
$$V_T = R_T \times \omega_T \text{ (m/s)}$$



(a) Inflation pressure of 120 kPa



(b) Inflation pressure of 240 kPa



(c) Inflation pressure of 360 kPa

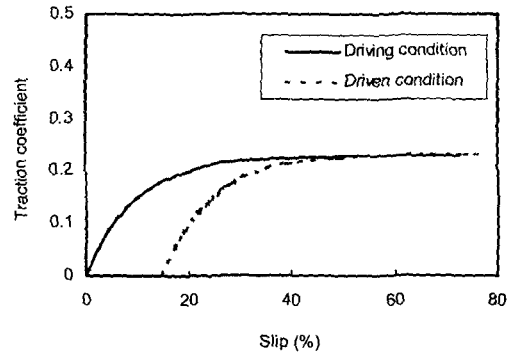
Fig. 8 Slip-traction coefficient curves on two different zero conditions for the tire with various inflation pressure (120, 240 and 360 kPa) at soil-I.

R_D : 구동제로조건에서의 구름반경
 R_T : 피구동제로조건에서 구름전반경
 ω : 타이어의 각속도 (rad/s), $\omega_D = \omega_T$

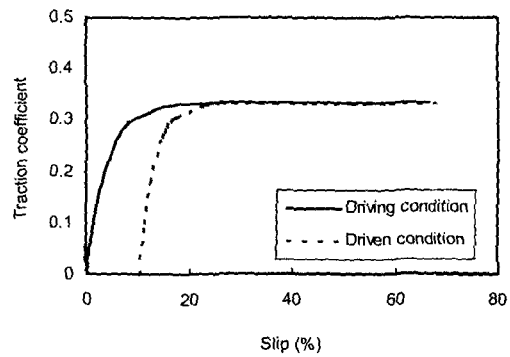
즉, 구동제로조건에서는 자체구동시 발생하는 슬립현상에 의해 구름반경(R_D)이 감소하지만 피구동제로조건인 경우에는 타이어의 미끄러짐 현상에 의해 구름반경(R_T)이 증가하게 된다. 따라서 구동제로조건과 피구동제로조건간의 구름반경 및 이론속도의 관계는 각각 $R_D < R_T$ 및 $V_D < V_T$ 로 나타나기 때문에 식 (1), (2)에 의해 피구동제로조건에서의 슬립 S_T 가 구동조건에서의 슬립 S_D 보다 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 타이어의 공기압이 클수록 구동조건에서의 슬립과 피구동조건에서의 미끄러짐 현상이 크게 나타나기 때문에 공기압이 증가할수록 S_T 가 S_D 보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

그림 9의 (a), (b), (c)는 360kPa의 일정 타이어공기압에서 세 수준의 토양조건에서 두 가지 제로조건을 이용하여 측정된 슬립-견인력 관계를 비교한 결과로서 그림 8의 결과와 유사한 경향이 나타났다. 즉, 세 수준의 토양조건에서 모두 견인력이 0일 때 피구동제로조건과 구동제로조건에서의 슬립값은 차이를 나타내었고, 전체 슬립구간내에서도 동일한 견인력 값에 대해 피구동제로조건에서 측정된 슬립값이 구동제로조건에서 측정된 슬립값에 비해 크게 나타났으며, 그 경향은 토양이 연약할수록 크게 나타났다. 또한 구동제로조건과 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 관계는 슬립이 작을 경우에는 두 가지 제로조건에 대해 측정된 견인력 값의 차이가 크게 나타났으나 슬립이 증가함에 그 차이가 감소하였다. 즉, 구동제로조건과 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 관계는 저슬립 영역에서 그 차이가 큰 것으로 나타났다.

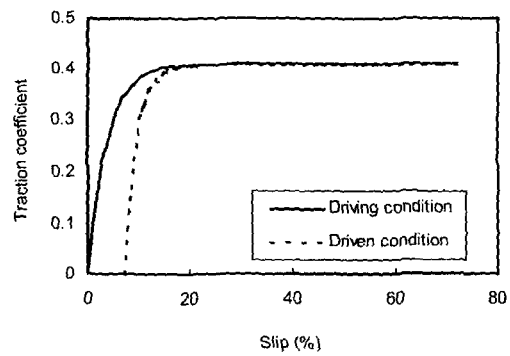
이러한 결과는 앞의 그림 8의 원인과 마찬가지로 제로조건의 설정방법에 따른 구름반경의 크기에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 토양이 연약할수록 구동제로조건에서의 슬립현상과 피구동제로조건에서의 미끄러짐 현상이 증가하기 때문에 토양의 강도가 약할수록 S_T 가 S_D 보다 크게 나타난



(a) Soil- I



(b) Soil- II



(c) Soil- III

Fig. 9 Slip-traction coefficient curves on two different zero conditions at various soil conditions(soil-I, soil-II and soil-III) for the tire with inflation pressure of 360 kPa.

것으로 판단된다.

그림 8과 9의 결과로부터 ASAE에서 정의된 두 가지 제로조건에 의한 슬립-견인력 관계는 오프로드차량의 견인성능을 정확히 평가하는데 문제점이 있는 것으로 나타났고, 또한 동일한 실험조건에 대해서도 제로조건에 따라 다른 견인성능을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 오프로드에서 운용되는 차량의 성능을 보다 정확히 평가하기 위해서는 슬립-견인력 관계를 보다 정확히 평가할 수 있는 유일한 제로조건이 필요한 것으로 나타났고, 이러한 유일한 제로조건에 의한 슬립-견인력 곡선은 구동제로조건과 피구동제로조건에서 측정된 각각의 슬립-견인력 곡선의 사이에 존재할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 오프로드차량의 성능 평가의 척도로서 가장 일반적으로 사용되고 있는 슬립-견인력 관계를 측정하는데 있어 현재까지 가장 일반적인 기준으로 사용되고 있는 ASAE의 두 가지 제로조건 즉, 구동제로조건과 피구동제로조건을 이용하여 측정되는 각각의 슬립-견인력 곡선의 특성을 조사하고, ASAE의 두 가지 제로조건에 의한 슬립-견인력 관계를 이용하여 오프로드 차량의 성능을 평가하는데 있어 당면한 문제점을 제시하기 위해 수행되었다.

두 가지 제로조건에 의한 슬립-견인력 관계의 평가는 인공토조시스템에서 단일 타이어 구동시스템을 이용하여 세 수준의 토양상태와 세 수준의 타이어공기압 조건하에서 측정된 슬립-견인력 관계를 분석함으로써 수행되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 곡선에서는 모든 타이어공기압과 토양조건에서 구동륜의 견인력이 0일 때 슬립도 0으로 측정되어, 차량의 견인력이 0일 때 슬립이 0보다 커야 한다는 조건에 위배되는 결과를 나타내었다. 또한 구름반경의 설정시 구동륜의 슬립 현상에 의한 구름반경의 감소로 인해 특정 견인력값에 대해 측정되는 슬립

은 전체 슬립구간에서 실제 슬립보다 작은 것으로 나타났다.

2) 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인력 곡선에서는 견인력이 0일 때 슬립이 발생하여 구동제로조건에 비해서는 현실적인 결과를 나타내었다. 그러나 제로조건에 설정시 피구동륜을 끌 때 발생하는 토양의 파괴 및 변형에 의한 타이어의 미끄러짐 현상에 의해 구름반경이 증가하기 때문에 피구동제로조건에서 측정된 슬립은 전체 슬립구간에서 실제 슬립보다 크게 측정되는 것으로 나타났다.

3) 두 가지 제로조건에 의해 측정된 슬립-견인계수 관계를 비교한 결과, 동일한 토양조건과 타이어공기압에 대해서도 제로조건에 따라 측정되는 슬립-견인력 관계는 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 피구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 곡선은 전체 슬립구간에서 구동제로조건에서 측정된 슬립-견인계수 곡선에 비해 동일한 견인력값에서 상대적으로 슬립이 크게 나타나고, 또한 두 가지 제로조건에 대해 측정된 슬립-견인계수 곡선간의 차이는 토양이 연약하거나 타이어의 공기압이 높을수록 크게 나타났다.

4) ASAE의 두 가지 제로조건에 의한 슬립-견인력 관계는 오프로드차량의 성능을 평가하는데 문제점이 있는 것으로 나타났고, 또한 차량의 견인성능은 제로조건에 대한 기준에 따라서도 다른 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 오프로드에서 운용되는 차량의 성능을 보다 정확히 평가하기 위해서는 슬립-견인력 관계를 보다 정확히 평가할 수 있는 유일한 제로조건이 필요한 것으로 나타났고, 이러한 유일한 제로조건에 의한 슬립-견인력 곡선은 구동제로조건과 피구동제로조건에서 측정된 각각의 슬립-견인력 곡선의 사이에 존재할 것으로 판단되었다.

이상의 연구 결과로부터 오프로드에서 운용되는 차량의 성능을 보다 정확히 평가하기 위해서는 ASAE에서 제안하고 있는 전통적인 두 가지 제로조건을 보완한 새로운 형태의 유일한 제로조건을 구명하기 위한 연구가 지속적으로 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Ajay, K. S. and K. P. Pandey. 1998. Traction Data Analysis in Reference to a Unique Zero Condition, *Journal of Terramechanics* 35(3): 179-188.
2. ASAE. 2002. General Terminology for Traction of Agricultural Tractors, Self-Propelled Implements, and Traction and Transport Devices. ASAE Standards S296.4 JAN01.
3. Freitag, D. R. 1990. Discussion. *Journal of Terramechanics* 27(2):159-159.
4. Shibusawa, S. and A. Sasao. 1994. Traction Data Analysis with the Traction Prediction Equation, *Journal of Terramechanics* 33(1):21-39.
5. Upadhyaya, S. K., W. J. Chancellor, D. Wulfsohn and J. L. Glancey. 1988. Sources of variability in traction data, *Journal of Terramechanics* 25(4): 249-272.
6. Upadhyaya, S. K., D. Wulfsohn and G. Jubbal. 1989. Traction prediction equations for radial ply tyres, *Journal of Terramechanics* 26(2):149-176.
7. Upadhyaya, S. K. 1990. Authors's reply, *Journal of Terramechanics* 33(1):161-165.