

Off-road에서 타이어공기압에 따른 피구동륜의 구름 특성

박원엽 이흥주 홍종호 장영창 이상식 이규승

Rolling Characteristics of Towed Wheel with Tire Inflation Pressure on Off-Road

W. Y. Park H. J. Lee J. H. Hong Y. C. Chang S. S. Lee K. S. Lee

Abstract

This study was carried out to investigate experimentally the effect of the ground condition and tire inflation pressure on rolling characteristics of towed wheel, including the deformation, sinkage, effective rolling radius and motion resistance of tire. The experiment was performed at soil bin for the three levels of off-road conditions(ground-I, ground-II and ground-III) and a on-road condition(ground-IV), and for the four levels of tire inflation pressure which were 80 kPa, 160 kPa, 240 kPa and 320 kPa. The results of this study are summarized as follows:

1. As the tire inflation pressure of towed wheel increased, the tire deformation decreased exponentially, but the tire sinkage increased exponentially. This trend was getting bigger as ground condition was getting softer.
2. The increase of tire inflation pressure increased the effective rolling radius of towed wheel, and this kind of trend occurred greatly as ground condition was soft. As a result, the effective rolling radius for the off-road condition was always larger than that for on-road condition.
3. For the on-road condition, as the tire inflation pressure of towed wheel increased, the motion resistance decreased, but for the off-road condition, augmentation of tire inflation pressure increased the motion resistance. Also, the effect of inflation pressure on motion resistance appeared great as ground condition was soft. Therefore, in order to improve the tire performance by the control of inflation pressure, it is desirable to reduce the tire inflation pressure for off-road condition and to increase the tire inflation pressure for on-road condition.

Keywords : Rolling characteristics, Tire inflation pressure, Effective rolling radius, Motion resistance

1. 서론

차륜(wheel)의 운동저항(motion resistance)은 주행장치의 특성 즉, 타이어의 직경, 폭 및 공기압 등에 영향을 받으며, 직경과 폭이 동일한 타이어를 사용할 경우에는 타이어의 공기압에 크게 영향을 받는다(Park, 2002a, 2002b; Burt, 1982). 또한 공기압이 차륜의 운동저항에 미치는 효과는 차륜이 운용되고 있는 노면상태(ground condition) 즉, 도로(on-road)와

비도로(off-road) 조건에서 각기 다르게 나타난다(Wong, 2001).

도로에서 차륜의 운동저항은 타이어의 변형(deformation)에 따른 타이어의 회전저항으로 인해 나타나는데 이러한 변형은 타이어의 공기압에 크게 영향을 받는다. 그러나 비도로 특히 연약지에서 주로 운용되는 차륜의 운동저항은 타이어의 변형보다는 차륜의 침하가 주 원인으로서 침하의 증가는 차륜의 운동저항의 증가를 초래하게 된다.

차륜의 침하는 차륜이 운용되고 있는 노면상태와 타이어공

This article was submitted for publication in January 2005; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in April 2005. The authors are Won Yeop Park, KSAM member, Assistant Professor, Hong Joo Lee, KSAM member, Jong Ho Hong, KSAM member, Professor, Dept. of Mechanical Engineering, Hankyong National University, Ansong, Korea, Young-Chang Chang, KSAM member, Teaching Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Konkuk University, Chungju, Korea, Sang Sik Lee, KSAM member, Research Assistant Professor, Kyou Seung Lee, KSAM member, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea. The corresponding author is K. S. Lee, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea; E-mail : <seung@skku.ac.kr>

기압, 그리고 타이어-토양간의 상호작용에 의한 타이어의 변형 등에 영향을 받는다. 따라서 비도로에서 노면조건과 타이어 공기압에 따른 차륜의 운동저항 관계를 구명하기 위해서는 공기압에 따른 차륜의 운동저항 특성뿐만 아니라 운동저항 발생의 주요 원인인 타이어의 변형 및 침하 특성도 함께 구명되어야 한다.

한편, 타이어의 변형 및 노면의 상태는 차륜의 구름반경(effective rolling radius)의 변화를 초래한다. 구름반경은 비도로에서 차량의 견인성능 평가의 척도로 이용되고 있는 슬립-견인력 관계에서 제로 슬립(zero condition)의 기준으로 사용되기 때문에 비도로에서 차량의 성능을 정확히 평가하기 위해서는 노면조건 및 타이어 공기압에 따른 차륜 구름반경의 구명이 필요하다(Park, 2002c).

따라서 다양한 노면상태에서 운용되는 비도로차량(off-road vehicle)의 성능 특성을 구명하기 위해서는 노면상태와 타이어 공기압의 변화에 따른 타이어의 침하, 변형량, 구름반경 및 운동저항 관계를 모두 포함하는 차륜의 구름특성(rolling characteristics)에 관한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 차륜의 운동저항은 구동륜(driving wheel)의 추진력과 견인력의 차로서 결정된다. 그러나 구동륜에 대한 정확한 추진력 및 운동저항의 측정은 현실적으로 매우 어렵기 때문에 현재 사용되고 있는 타이어의 성능 평가는 주로 타이어 공기압에 따른 구동륜의 슬립-견인력 관계의 측정을 통해 이루어지고 있으며, 운동저항의 측정은 피구동륜(towed wheel)을 이용하여 수행되고 있다.

그러나 피구동륜에 대해 수행된 기존의 연구는 주로 특정 노면조건에서 타이어의 공기압에 따른 운동저항 관계만이 보고되었을 뿐, 차륜의 운동저항에 영향을 미치는 타이어의 침하, 변형량, 구름반경 등에 관한 연구는 거의 수행되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 비도로에서 차량의 성능에 영향을 미치는 차륜의 구름특성을 구명하기 위한 기초 연구로서 노면상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 침하량, 변형량, 구름반경 및 운동저항 관계를 실험적으로 조사 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험장지

1) 인공토조시스템

피구동륜의 구름특성 측정은 인공토조시스템(soil bin system)에서 수행하였다. 인공토조시스템은 토양조 및 레일 시스템, 대차구동시스템, 작업대차, 토양가공대차 등으로 구성되어 있다. 한편, 실험에 사용된 인공토조내의 토양은 미농무성법

(USDA) 분류로 사질양토(sandy loam)이다.

2) 피구동륜 구름특성 측정 장치

실험에 사용된 타이어는 국내 H사에서 생산되는 타이어(6.00 R14 LT)로서 외경과 단면 폭은 각각 678 mm와 152 mm이고, 허용 최대 공기압과 최대하중은 각각 447.85 kPa과 7.36 kN이다. 타이어는 측정대차의 차륜프레임에 부착되고, 차륜프레임은 윌기어와 선형베어링에 의해 상하 및 좌우 방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 구성하였다. 한편, 피구동륜의 구름특성을 측정하기 위하여 차륜의 이론 주행거리, 실제 주행거리, 차륜의 축 침하, 차륜의 운동저항 등을 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 그림 1은 피구동륜의 구름특성을 측정하기 위해 구성한 전체 시스템의 모습을 보여주고 있다.

3) 데이터 수집 장치

피구동륜의 구름특성을 측정하기 위해 구성된 각각의 센서로부터 출력되는 모든 신호는 데이터 수집장치로 입력된다.

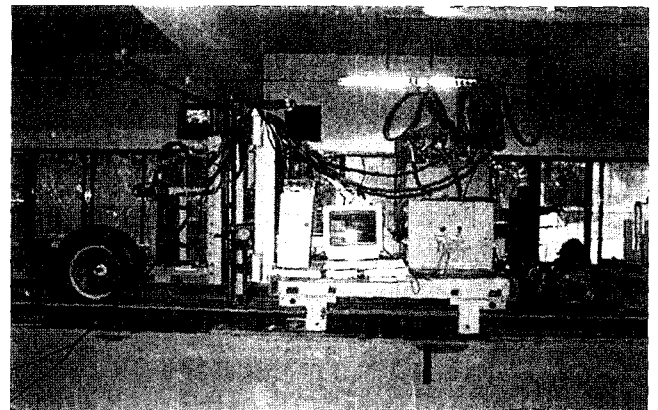


Fig. 1 Overall view of towed wheel system.

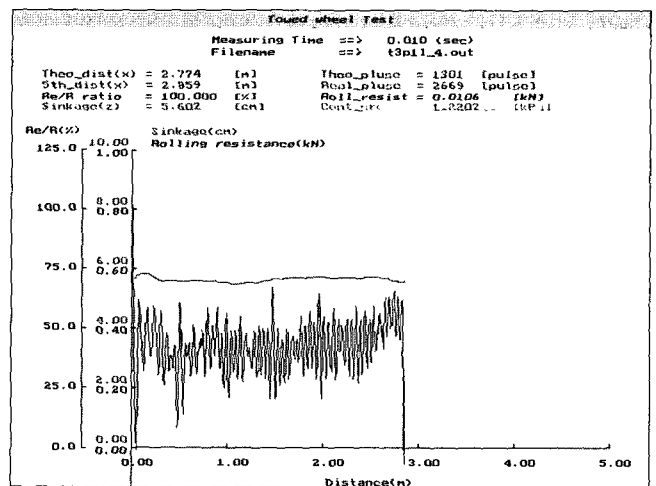


Fig. 2 View of real time output on monitor.

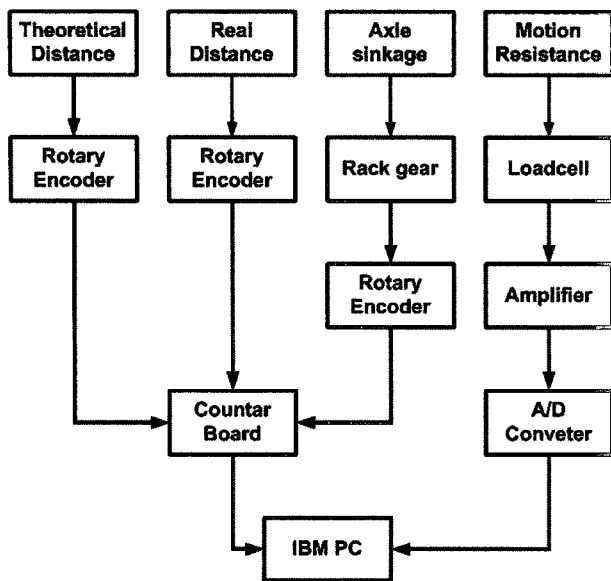


Fig. 3 Block diagram of data acquisition system.

데이터 수집장치로 입력되는 피구동륜의 구름특성에 관한 모든 측정 결과는 컴퓨터에 파일로 저장되며 동시에 측정 결과가 실시간으로 모니터 상에 그래픽으로 출력되도록 구성하였다(그림 2). 그림 3은 본 연구에서 구성한 데이터 수집장치의 전체 흐름도를 보여 주고 있다.

나. 실험방법

1) 노면가공

노면상태에 따른 피구동륜의 구름특성을 조사하기 위해 인공토조내의 실험토양을 총 4 종류의 노면상태 즉, 비도로 노면(off road) 3 종류와 도로 노면(on road) 1 종류로 가공하였다.

Table 1 Ground processing method.

Ground types	Processing equipment		
	Rotary	Grader	Compaction roller
Ground-I (soft)	2	1	-
Ground-II (hard)	2	1	2
Ground-III (very hard)	2	1	4

Table 2 Physical properties of experimental ground.

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

비도로 노면은 토양가공대차의 로타리틸러, 균평기, 표면다짐롤러를 이용하여 노면을 다짐정도가 다른 세 종류의 노면상태(Ground-I, Ground-II, Ground-III)로 가공하였으며 매 실험마다 동일한 노면상태를 만들기 위해 가공횟수와 순서를 일정하게 하였다(표 1). 한편, 도로 노면(Ground-IV)은 표면다짐롤러 작업을 충분히 수행하여 노면을 최대한 단단하게 가공한 후 노면 위에 합판을 올려놓아 피구동륜의 통과 시 침하가 발생하지 않도록 하였다(그림 4).

2) 실험 노면의 물리성 측정

실험 노면의 물리성은 비도로 노면에 대해서 노면 가공이 끝난 후 피구동륜의 구름특성 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기 밀도(bulk density), 점착력(cohesion), 내부마찰각(internal friction angle), 원추지수(cone index) 등을 측정하였다(표 2).

3) 피구동륜의 구름특성 측정

피구동륜의 구름특성을 구명하기 위하여 전술한 4 가지 노면상태와 4 수준의 타이어공기압 조건(80 kPa, 160 kPa, 240 kPa, 320 kPa)에서 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 변형량, 침하, 구름반경 및 운동저항 등을 측정하

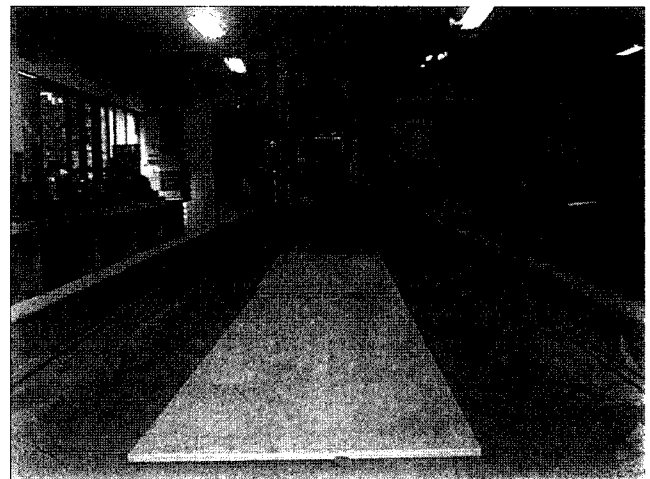


Fig. 4 View of on-road condition.

였으며 각각의 인자들의 측정방법은 다음과 같다.

가) 피구동륜 침하 측정

피구동륜의 침하는 타이어가 지나간 궤적상의 임의의 5곳에서 자를 이용하여 측정된 후 평균값을 이용하였다.

나) 피구동륜 변형률 측정

피구동륜의 변형률은 축침하 측정장치로부터 피구동륜의 축침하를 측정된 후, 피구동륜의 축침하량과 피구동륜의 침하량으로 결정하였다.

다) 피구동륜 구름반경 측정

피구동륜의 구름반경은 피구동륜 1회전당 이동거리를 측정된 후 피구동륜 1회전당 이동거리를 $2\pi r$ 로 나누어 줌으로서 결정하였다.

라) 피구동륜 운동저항 측정

피구동륜의 운동저항 측정을 위해 먼저 측정대차에 부착된 차륜프레임에서 차륜을 제거한 후 측정대차의 후부와 토양가공대차 사이에 하중변환기가 부착된 강선을 연결하여 토양가공대차로 측정대차를 견인할 때 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 측정대차의 순수 운동저항을 측정하였다. 그 다음으로 차륜프레임에 피구동륜을 장착한 후 피구동륜을 노면에 놓은 상태에서 토양가공대차로 측정대차를 견인하여 하중변환기에 나타나는 피구동륜과 측정대차의 전체 운동저항을 측정하였다. 따라서 피구동륜의 운동저항은 피구동륜의 운동저항과 측정대차의 순수운동저항을 포함한 전체 운동저항에서 측정대차의 순수운동저항의 차로써 결정하였다.

한편, 피구동륜에 작용하는 축하중과 피구동륜의 속도(pulling velocity)는 각각 2.45 kN과 0.1 m/s로 일정하게 유지하였다. 표 3에 본 실험에서 사용한 각 변수들의 수준을 나타내었다.

Table 3 Experimental conditions.

Items	Conditions
Ground conditions	Ground-I (soft)
	Ground-II (hard)
	Ground-III (very hard)
	Ground-IV (on road)
Inflation pressure (kPa)	80, 160, 240, 320
Axle load (kN)	2.45
Pulling velocity (m/s)	0.1

3. 결과 및 고찰

가. 타이어 공기압과 노면상태에 따른 피구동륜의 변형

그림 5는 4 가지 노면상태(Ground-I, Ground-II, Ground-III, Ground-IV)에서 타이어공기압의 변화(80 kPa, 160 kPa, 240 kPa, 320 kPa)에 따른 피구동륜의 변형률(타이어직경에 대한 타이어 변형률의 비)을 측정된 결과로서 피구동륜의 변형률은 4 가지 노면상태에서 모두 타이어의 공기압이 증가할수록 감소하였다.

또한 동일한 타이어공기압에 대해 노면의 강도에 따른 피구동륜의 변형률의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 Ground-IV, Ground-III, Ground-II, Ground-I의 순서로서 노면이 단단할수록 피구동륜의 변형률이 크게 나타났다.

한편, 공기압의 증가에 따른 타이어 변형률의 절대적인 감소량은 4 수준의 노면조건에 대해 큰 차이를 나타내지 않았으며, 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형률의 감소경향은 모든 노면조건에서 공기압이 증가할수록 변형률의 절대적인 감소량이 작아지는 지수곡선 형태의 감소경향을 나타내었다.

나. 타이어 공기압과 노면상태에 따른 피구동륜의 침하

그림 6은 4 가지 노면상태에서 4 수준의 타이어공기압에 따른 피구동륜의 침하량을 측정된 결과이다.

그림 6에서 4 수준의 타이어의 공기압에 대한 피구동륜의 침하 경향을 살펴보면, 비도로 노면인 Ground-I, Ground-II, Ground-III의 경우에는 전술한 타이어의 변형률과는 반대로 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 노면의 강도에 따른 피구동륜의 침하량의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서

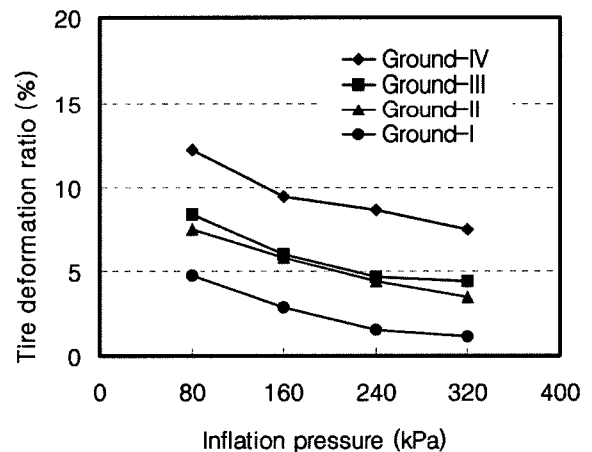


Fig. 5 Relationships between tire deformation ratio and tire inflation pressure on four different ground conditions.

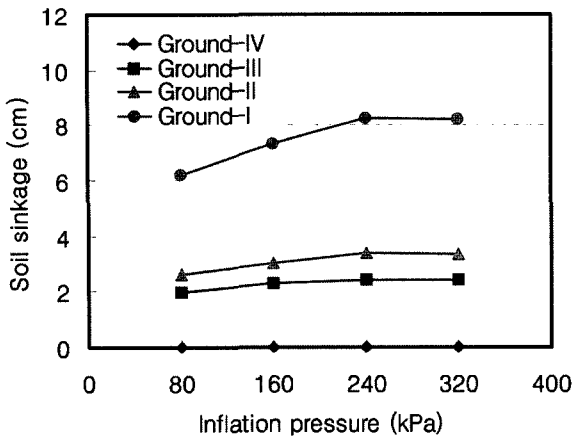


Fig. 6 Relationships between sinkage and tire inflation pressure on four different ground conditions.

Ground-I, Ground-II, Ground-III의 순서로 노면이 연약할수록 피구동륜의 침하가 크게 나타났고, 공기압의 증가에 따른 피구동륜 침하량의 절대적인 증가량은 Ground-I, Ground-II, Ground-III의 순서로서 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 피구동륜 침하량의 증가경향은 세 수준의 노면상태에서 모두 공기압이 증가할수록 침하량의 증가폭이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

위와 같은 결과는 타이어의 공기압이 감소할 경우 타이어 변형량의 증가에 따라 토양-타이어간의 접지면적이 증가하게 되고, 이러한 접지면적의 증가가 타이어의 접지압을 감소시켜 피구동륜의 침하량이 감소된 것으로 판단된다.

다. 타이어 공기압과 노면상태에 따른 피구동륜의 구름반경

그림 7은 강도가 다른 4 가지 노면상태에서 4 수준의 타이어

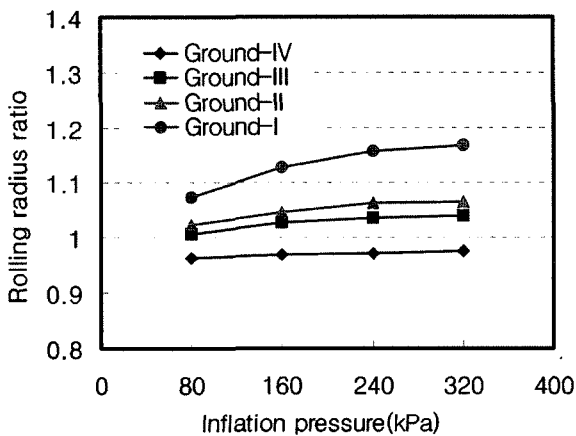


Fig. 7 Relationships between rolling radius ratio and tire inflation pressure on four different ground conditions.

어공기압에 따른 피구동륜의 구름반경비(rolling radius ratio)-타이어 반경에 대한 구름반경의 비(ratio of effective rolling radius to radius of tire)-를 측정된 결과로서 피구동륜의 구름반경비는 4가지 노면에서 모두 타이어의 공기압이 높을수록 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 모든 공기압 수준에서 피구동륜의 구름반경비의 크기는 Ground-I, Ground-II, Ground-III, Ground-IV의 순서로 노면이 연약할수록 증가하는 것으로 나타났고, 타이어공기압에 따른 구름반경의 증가경향은 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

또한 Ground-I, Ground-II, Ground-III 및 Ground-IV에서 타이어의 공기압을 각각 80 kPa에서 320 kPa로 300% 증가시켰을 때 구름반경비의 증가율은 각각 9.4%, 4.2%, 3.5%, 1.2%로서 공기압의 증가에 따른 구름반경비의 증가율은 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.

위의 결과에서 도로노면인 Ground-IV에서는 구름반경비가 4 수준의 공기압에 대해 모두 1보다 작게 나타났으나 비도로 노면인 Ground-I, Ground-II, Ground-III의 경우에는 구름반경비가 모두 1보다 크며, 그 경향은 노면이 연약할수록 크게 나타났다.

이러한 결과는 도로와 같이 단단한 노면인 경우에는 피구동륜의 구름반경이 타이어의 변형량에 크게 영향을 받아 구름반경이 감소하게 되나 연약한 노면에서는 타이어의 변형에 의한 구름반경의 감소효과뿐만 아니라 피구동륜의 회전시 토양의 파괴에 의해 나타나는 토양-타이어 접촉면에서의 미끄러짐(skid)에 의한 구름반경의 증가효과가 복합적으로 나타나기 때문으로 판단된다. 즉, 연약한 노면에서는 타이어의 변형에 의한 구름반경의 감소효과에 비해 미끄러짐에 의한 구름반경의 증가효과가 상대적으로 크고, 그 경향은 노면이 연약할수록 더욱 크게 나타나기 때문이다.

라. 타이어 공기압과 노면상태에 따른 피구동륜의 운동저항

그림 8은 강도가 다른 4 가지 노면상태에서 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 운동저항계수를 측정된 결과로서, 도로 조건인 Ground-IV에서는 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 운동저항계수는 감소하였다. 그러나 비도로 조건인 Ground-I, Ground-II, Ground-III에서는 도로의 경우와는 반대로 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 운동저항계수는 증가하였다.

그림 8과 같이 도로조건과 비도로조건에서 타이어 공기압에 따른 운동저항의 변화가 반대로 나타난 이유는 두 노면간에 운동저항의 발생 원인이 다르기 때문이다. 즉, 도로에서 피구동륜의 운동저항은 타이어의 변형에 의한 회전저항이

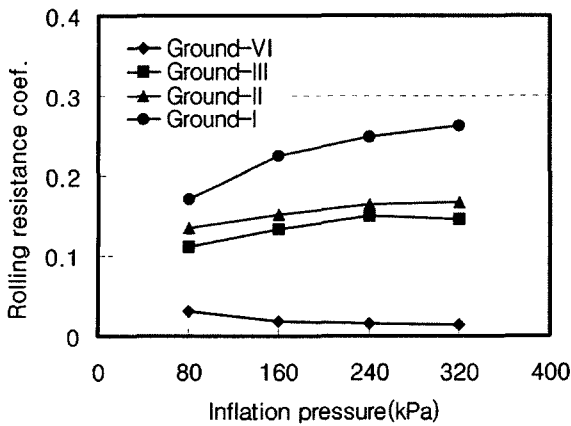


Fig. 8 Relationships between rolling resistance coefficient and tire inflation pressure on four different ground conditions.

주 원인으로서는 공기압의 증가는 타이어 변형량을 감소시키기 때문에 공기압의 증가가 피구동륜의 운동저항을 감소시키게 된다.

그러나 비도로 특히 연약한 노면에서 운용되는 타이어의 운동저항은 타이어의 변형에 따른 회전저항과 타이어의 침하에 의해 나타나는 타이어의 토양다짐저항(compaction resistance)의 합으로 나타난다. 즉, 연약한 노면에서는 공기압의 증가에 따른 회전저항의 감소량보다는 공기압의 증가에 따른 토양다짐저항의 증가량이 상대적으로 크기 때문에 공기압의 증가가 피구동륜의 운동저항을 증가시키게 된 원인으로 판단된다. 또한 이러한 경향은 토양이 연약할수록 크게 나타났다.

한편, 타이어공기압의 증가에 따른 운동저항계수의 증가 경향은 도로조건에서는 지수적 감소 경향, 그리고 비도로 조건에서는 지수적 증가 경향을 나타내었다.

이상의 결과로부터 공기압의 조절을 통해 타이어의 운동저항을 줄이기 위해서는 도로 노면에서는 공기압을 크게, 그리고 비도로 노면에서는 공기압을 작게 하는 것이 효과적인 것으로 나타났다. 또한 비도로 노면에서 공기압의 감소에 따른 운동저항의 감소 효과는 노면이 연약할수록 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 노면상태와 타이어공기압의 변화가 피구동륜의 구름특성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 강도가 다른 4 가지 노면 조건(Ground-I, Ground-II, Ground-III, Ground-IV)과 4 수준의 공기압 조건(80 kPa, 160 kPa, 240 kPa, 320 kPa)하에서 노면조건과 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 변형량, 침하, 구름반경 및 운동저항 관계를 실험적으로

조사하였다. 실험은 인공토조내의 사양토에서 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 피구동륜의 변형량은 노면이 단단할수록 크게 나타났으며, 4가지 노면상태에서 모두 공기압이 증가함에 따라 변형량은 감소하였다. 또한 공기압의 증가에 따른 변형량의 변화는 지수곡선 형태의 감소경향을 나타내었다.
- (2) 피구동륜의 침하량은 노면이 연약하고, 타이어공기압이 높을수록 크게 나타났으며, 공기압의 증가는 피구동륜의 침하량을 지수곡선 형태로 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, 공기압의 증가에 따른 침하량의 증가폭은 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.
- (3) 공기압의 증가는 도로와 비도로 조건에서 모두 피구동륜의 구름반경을 증가시키는 것으로 나타났다. 한편, 도로 조건에서는 모든 공기압 수준에서 구름반경비가 1보다 작게 나타났으나, 비도로 조건에서는 타이어의 미끄러짐 현상에 의해 구름반경비가 1보다 크게 나타났다. 또한, 공기압의 증가에 따른 구름반경의 증가경향은 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.
- (4) 피구동륜의 운동저항은 도로 조건에서는 공기압이 높을수록 감소하였다. 그러나 비도로 조건에서는 도로 조건과는 반대로 공기압의 증가가 운동저항을 증가시키는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따른 운동저항의 증가 효과는 노면이 연약할수록 크게 나타났다.

참고문헌

1. Burt, E. S., P. W. L. Lyne, P. Meiring and J. F. Keen. 1982. Ballast and Inflation Effect on Tire Efficiency. Transaction of the ASAE 25(4):1352-1354.
2. Park, W. Y and K. S. Lee. 2002a. Effect of Slip on Tractive Performance of Driving Wheel. Transactions of Korea Society of Automotive Engineering 10(1):234-243.
3. Park, W. Y and K. S. Lee. 2002b. The Effect of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction and Tractive Performance of Tractor. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 27(6):491-500.
4. Park, W. Y and K. S. Lee. 2002c. A Study on Zero-condition of ASAE for Estimating Slip-Traction Relationship of Off-Road Vehicles. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 27(6):501-512.
5. Wong, J. Y. 2001. Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons.