

노면상태, 타이어 공기압 및 축하중이 조향력에 미치는 영향

박원엽 김성엽 이충호 최달문 이상식 이규승

The Effect of Ground Condition, Tire Inflation Pressure and Axle Load on Steering Torque

W. Y. Park S. Y. Kim C. H. Lee D. M. Choi S. S. Lee K. S. Lee

ABSTRACT

In this study, a series of soil bin experiment was carried out to investigate experimentally the effect of the tire inflation pressure and axle load of tire on the steering torque for the off-road condition. The experiment was performed at the three levels of off-road conditions(ground I, ground II and ground III) and on-road condition(ground IV), four levels of tire inflation pressure(120 kPa, 170 kPa, 220 kPa and 270 kPa), and four levels of axle load(1470N, 1960N, 2450N and 2940N). The results of this study are summarized as follows:

1. Steering torque at the off-road conditions were higher than that on the on-road conditions for all levels of tire inflation pressure and axle load.
2. As the axle load increased, steering torque also increased for all experimental ground conditions.
3. For the axle load of 1470N the biggest steering torque was measured on the ground condition I, but as the axle load increased to the value of 2940N the biggest steering torque was measured on the ground condition III. From the above results, it was found that for the low axle load, steering torque gets higher on the soft ground condition, but for the high axle load, steering torque gets higher on hard ground condition for whole range of experimental conditions.
4. As the tire inflation pressure decreased, steering torque increased on the on-road condition, but no specific trend was not found at the off-road conditions.

Keywords : Steering angle, Steering torque, Ground condition, Tire inflation pressure, Axle load.

1. 서 론

동력 조향 장치(power steering system)는 조향시 운전자의 부담을 경감하는 것을 목적으로 1876년 미국에서 최초로 개발되었다. 동력 조향 장치는 단순한 기계식 동력 조향 시스템부터 전자 제어 유압식 조향 시스템(electrically controlled hydraulic power steering; EPS)이 개발되어 현재는 지능화, 편리화 되어 있으나 구조가 복잡하고 제작비용이 많이 드는 단점이 있다(윤, 2001). 이러한 이유로 최근 미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 무겁고, 복잡한 유압장치 대신에 전동모터로 직접 조타력(steering torque)을 발생시키는 보조 모터를 이용한 전동식 동력 조향 장치(Motor

Driven Power Steering system; MDPS)에 대한 연구는 물론 이미 개발되어 실용화 되고 있다.

MDPS는 복잡한 제어기구의 사용이 불필요하고, 동력 제어에 의한 조향 특성 설정의 자유도가 높으며 가격 및 중량 절감의 이점이 있기 때문에 미국, 일본, 독일 등에서는 MDPS에 대한 많은 연구가 수행되어 일부 소형차에 적용되어 이용되고 있으며 점차 중형차에까지 확대되고 있는 등 향후 MDPS 장치에 대한 연구가 더욱 증가할 것으로 보고되고 있다(Nakayama, 1990, 1994; Shimizu, 1991).

최근에는 MDPS의 성능 향상을 위해 많은 연구가 수행되고 있으나 대부분 on-road의 한정된 조건에서 승용차를 대상으로 이루어지고 있으며, 또한 실험적

This study was conducted by research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center. The authors are Won Yeop Park, Assistant Professor, Seong Yeop Kim, Researcher, Dept. of Bioresources Engineering, Hankyong National University, Ansung, Korea, Choong Ho Lee, Research Professor at the Technology Innovation Center, Jeonju University, Jeonju, Korea, Dal Mun Choi, Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, Suwon, Korea. Sang Sik Lee, Research Assistant Professor, Kyou Seung Lee, 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. Fax:+82-31-290-7830. E-mail: <seung@skku.ac.kr>.

방법에 의해 이루어지고 있다. 그러나 트랙터가 운용되고 있는 off-road는 다양한 노면조건을 갖고 있기 때문에 on-road의 한정된 조건에서 승용차에 적용된 방법은 농용 트랙터에 적용될 수 없다. 즉, 트랙터에 MDPS를 적용하기 위해서는 다양한 토양조건에서 많은 실험을 통한 조향력 관계가 구명되어야 하나 이것은 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서 off-road에서 운용되는 트랙터에 MDPS를 적용하기 위해서는 트랙터의 특성과 토양특성을 고려한 조향력 예측 모델의 개발이 필요하며, 이를 위해서는 조향력에 영향을 미치는 요인들을 구명하기 위한 선행 연구가 필요하다.

따라서 본 연구의 목적은 off-road에서 운용되는 트랙터의 조향력 예측 모델을 개발하기 위한 기초 연구로서 off-road에서 타이어의 조향력에 영향을 미치는 요인으로 판단되는 노면상태, 타이어의 축하중 및 타이어 공기압에 따른 조향력 관계를 실험적으로 구명하는데 있다.

2. 재료 및 방법

가. 실험 장치

1) 인공토조 시스템

조향력 실험은 다양한 노면상태에서 조향력 변화를 측정하고, 동일 실험조건에서의 재현 및 신뢰성 있는 데이터를 얻기 위해 인공토조시스템(soil bin system)에서 수행하였다. 인공토조시스템은 토양조 및 레일 시스템, 대차구동시스템, 작업대차, 토양가공대차 등으로 구성되어 있으며, 인공토조내의 토양은 미농무 성분류법(USDA)상의 사질양토(sandy loam)로서 Table 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) 조향력 측정 장치

조향력 측정 장치는 국내 D사의 22마력 트랙터의 조향시스템을 이용하여 인공토조시스템용 단일 타이어 조향력 측정 장치로 개량 설계, 제작하였다. 단일 타이어 조향력 측정장치는 인공토조시스템의 측정대

차에 장착된 차륜프레임에 부착되고, 조향력 측정 장치가 부착된 차륜프레임은 웜기어와 피그립 베어링에 의해 좌·우 및 상·하 방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 제작하였다. 한편, 조향력 측정장치에 사용된 타이어는 러그 간섭을 배제하기 위해 러그가 없는 승용차용 타이어(P155/80R13)를 사용하였다.

단일 타이어 조향력 측정장치의 구동은 측정대에 장착된 1.5kW 용량의 유압모터에 의해 컬럼축(핸들축)에 회전토크가 전달되고, 컬럼축의 회전토크는 볼스크류 타입의 기어박스를 통해 감속되어 피트만 암에 회전토크를 전달한다. 피트만 암의 회전토크는 푸시바(push bar)를 통해 직선운동으로 변환되어 푸시바에 압축력(좌조향) 또는 인장력(우조향)을 전달한다. 푸시바의 압축력(인장력)은 킹핀축을 중심으로 트랙암에 회전토크를 발생시켜 타이어를 조향시키게 된다. 즉, 조향력 측정장치는 유압모터, 핸들축, 기어박스, 피트만 암, 푸시바, 트랙암의 순서로 구동하여 킹핀축을 중심으로 회전토크를 발생시켜 타이어를 조향하게 된다. Fig. 1은 인공토조용 조향력 측정장치의 개략도를 보여주고 있다.

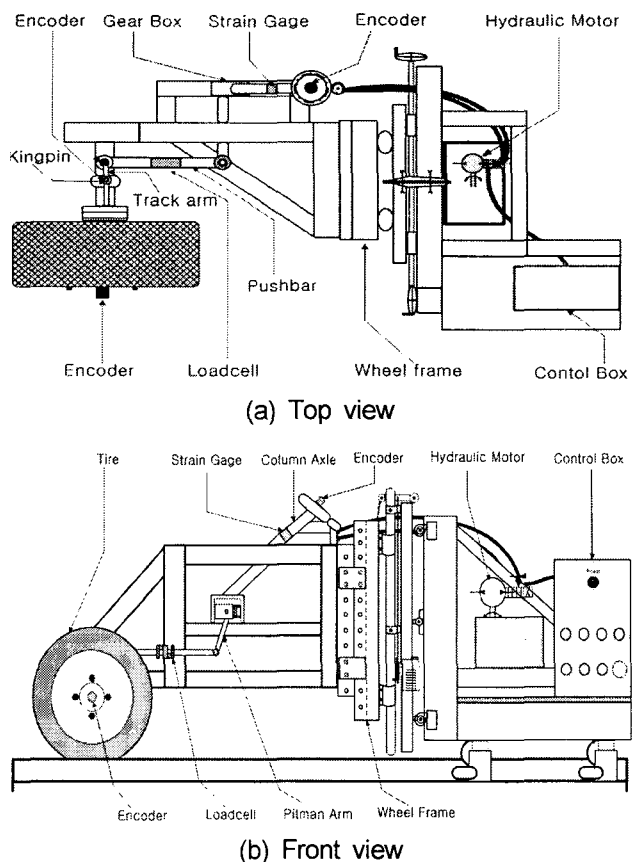


Fig. 1 Schematic view of steering system mounted on test carriage of soil bin system.

단일 타이어 조향력 측정장치의 측정 요소는 킥업축 토크(핸들 토크), 킥업축 회전각, 푸시바의 인장 및 압축력, 타이어 조향각 등이다.

킥업축 토크는 킥업축에 four-element full-bridge 타입의 스트레인 게이지(CEA-06-250us-350)를 부착하여 핸들 조향시 킥업축의 비틀림에 따른 스트레인 게이지의 출력 관계로부터 측정하였다. 푸시바의 압축력(인장력)은 푸시바의 중간을 절단한 후 그 사이에 로드셀을 부착하여 푸시바의 압축력(인장력)과 로드셀의 출력 관계를 이용하여 측정하였다. 한편, 킥업축의 회전각, 타이어 조향각 등은 모두 회전축에 로타리엔코더를 부착하여 로타리엔코더의 펄스 신호를 회전각으로 변환하여 측정하였다. Fig. 2는 본 연구에서 제작한 인공토조용 조향력 측정장치의 전체 모습을 보여 주고 있다.



Fig. 2 Overall view of the steering test device.

나. 실험 방법

1) 노면 가공

노면상태에 따른 타이어의 조향 특성을 조사하기 위해 인공토조내의 토양을 총 4 종류의 노면상태 즉, 비도로 노면(off road) 3 종류와 도로노면(on road) 1 종류로 가공하였다. 비도로노면은 토양가공 대차의 로타리틸러, 균평기, 표면다짐롤러를 이용하여 노면을 다짐정도가 다른 3 종류의 노면상태 (Ground-I, Ground-II, Ground-III)로 가공하였다. 한편, 도로 노면(Ground-IV)은 토양 가공 후 토양 위에 시멘트 블록을 올려 놓아 구성하였다. Table 2는 각각의 노면상태에 대한 토양가공 방법을 나타내고 있고, Table 3은 각각의 노면에서 측정된 토양의 물리적 특성을 나타내고 있다.

2) 조향력 측정 방법

단일 타이어에 대한 조향력 실험은 전술한 4 가지 노면상태(Ground- I ~IV)에서 4 수준의 타이어 축하중과 4 수준의 타이어 공기압에 대해 각각 수행하였다(Table 4).

핸들 조향은 타이어의 정렬상태를 기준으로 제자리에서 핸들 축을 우로 2회전, 좌로 4회전, 다시 우로 2회전하여 조향 시작점까지를 한 사이클로 조향 실험(제자리조향력 시험방법, JASO C705)을 실시하였다. 한 사이클의 조향이 이루어지는 동안 킥업축(핸들축)에 부착된 스트레인 게이지는 조향력(steering torque)을, 킥업축에 부착된 엔코더는 타이어의 조향

Table 2 Processing method of experimental ground

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

Table 3 Physical properties of experimental ground

Ground parameters	Ground types			
	Ground-I	Ground-II	Ground-III	Ground-IV
Cone Index (CI), kPa	250	433	476	-
Cohesion, kPa	1.65	6.42	9.38	-
Angle of internal resistance (ϕ), degree	25.94	30.40	30.19	-
Moisture content (d.b), %	10.70	10.73	10.55	-
Bulk density (ρ), g/cm ³	1.44	1.48	1.51	-

Table 4 Experimental treatments

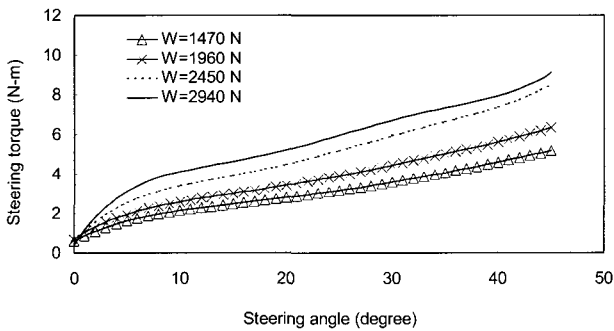
Variables	Treatments
Ground types	Ground- I (soft soil), Ground-II (hard soil), Ground-III (very hard soil) and Ground-IV (on road)
Tire inflation pressure, kPa	120, 170, 220 and 270
Axle load, N	1470, 1960, 2450 and 2940

각(steering angle)을 측정하며 조향각에 따른 조향력 변화를 실시간으로 수집하였다.

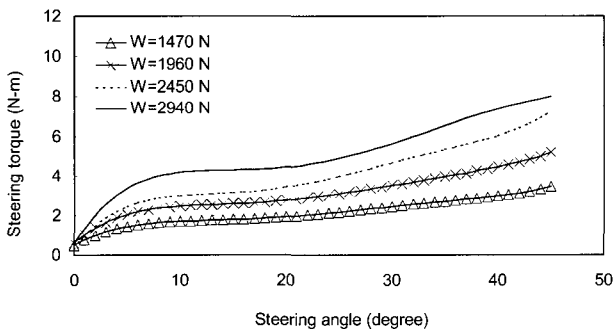
3. 결과 및 고찰

가. 타이어의 축하중에 따른 조향각-조향력 관계

Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 Ground- I(off road)과 Ground-IV(on road)에서 220 kPa의 일정 공기압 조건에 대해 타이어가 45° 조향하는 동안 4 수준의 축하중



(a) Ground- I



(b) Ground-IV

Fig. 3 Relationship between steering torque (handle torque) and steering angle(rotation angle of king_pin axle) with four different axle load for constant tire inflation pressure of 220 kPa.

조건하에서 측정한 조향각 - 조향력 관계를 나타낸 결과이다.

Fig. 3에 나타난 바와 같이, off-road와 on-road 조건에서 수행한 조향각 - 조향력 관계는 4 수준의 축하중에서 모두 조향각이 증가함에 따라 커지는 경향을 나타내었다.

한편, 축하중에 따른 조향력의 크기는 축하중이 증가함에 따라 전체 조향각 구간에서 조향력이 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 타이어의 축하중이 커질 경우 타이어 - 노면 접지면에서의 마찰력이 증가하게 되고, 또한 타이어의 변형량 증가로 인한 타이어 - 노면간의 접지면적의 증가로 타이어 중심축에 대한 모멘트팔의 길이가 증가하여 타이어의 조향시 접지면에서의 회전모멘트가 증가하기 때문이다.

나. 노면조건에 따른 조향각-조향력 관계

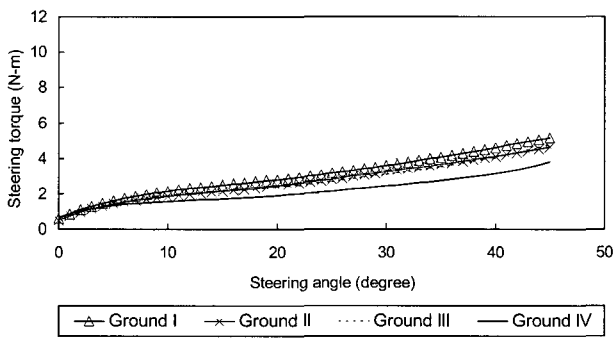
Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 220 kPa의 일정 공기압 조건에서 축하중이 각각 1470 N과 2940 N일 때 노면조건에 따른 조향각 - 조향력 관계를 나타낸 결과이다.

Fig. 4의 (a)는 1470 N의 축하중 조건에서 4 수준의 노면조건에 대해 측정한 조향각 - 조향력 관계를 나타낸 결과로서, 노면조건에 따른 조향력의 크기는 on-road 노면보다는 off-road 노면에서 크게 나타났다. 또한 세 가지 off-road 노면간의 조향력의 크기는 Ground- I, Ground- II, Ground-III의 순으로 노면이 연약할수록 조향력이 증가하는 것으로 나타났다.

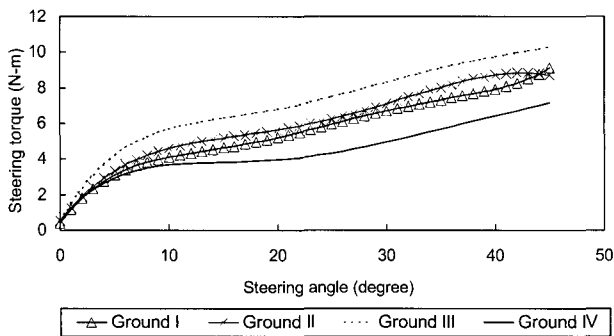
한편, 축하중이 2940 N인 Fig. 4의 (b)의 결과는 축하중이 1470 N인 (a)의 결과와 마찬가지로 off-road 노면에서의 조향력이 on-road 노면에 비해 크게 나타났다. 그러나 세 가지 off-road 노면간의 조향력의 크기는 Ground-III, Ground- II, Ground- I

의 순으로서 토양이 단단할수록 크게 나타나 1470 N의 축하중에서 측정한 (a)의 결과와는 상반되는 결과가 나타났다.

이와 같은 결과는 조향력에 영향을 미치는 타이어-노면 접지면에서의 회전모멘트는 동일한 노면조건에서 대해서도 축하중에 크기에 따라 다른 형태로 발생하기 때문이다. 즉, on-road에서는 타이어의 회전모멘트의 크기가 타이어-노면간의 마찰력과 타이어의 변형에 따른 모멘트팔 길이의 변화에 의해 결정된다. 그러나 off-road 노면에서는 on-road 노면과는 달리 타이어의 조향시 타이어의 침하가 발생하기 때문에 타이어의 조향력은 타이어-토양 접지면에서 발생하는 마찰력에 의한 회전모멘트와 전단력에 의한 회전모멘트가 복합적으로 작용하여 나타나게 된다.



(a) Axle load of 1470 N



(b) Axle load of 2940 N

Fig. 4 Relationship between steering torque and steering angle(rotation angle of king_pin axle) with different ground condition.

마찰력에 의한 조향력 성분은 타이어-노면 접지면에서의 마찰력과 타이어의 침하 증가에 따른 모멘트팔 길이의 변화에 따른 회전모멘트의 변화에 의해 나타나게 되고, 전단력에 의한 조향력 성분은 조향시 타이어의 측면에 위치한 토양을 전단시킬 때 나타나는 현상으로서, 이러한 현상은 타이어의 침하가 일정

수준 이상일 경우에 나타나며 일반적으로 토양이 단단할수록 크다.

따라서 축하중이 1470 N일 경우 Ground- I에서는 조향시 타이어의 침하가 크게 발생하나 Ground- II, Ground- III에서는 상대적으로 침하가 작게 발생한다. 그러므로 Ground- I에서는 타이어의 조향시 마찰력 성분과 전단력 성분에 의한 회전모멘트가 모두 작용하지만, Ground- II와 Ground- III에서는 전단력 성분에 의한 효과는 거의 없고 주로 마찰력 성분에 의한 조향력이 나타난다. 이러한 이유로 1470 N의 축하중에서는 조향력의 크기가 Ground- I, Ground- II, Ground- III의 순으로 토양이 연약할수록 조향력이 크게 나타난 것으로 판단된다.

한편 축하중이 2940 N인 경우에는 Ground- I뿐만 아니라 Ground- II 및 Ground- III에서도 침하가 크게 발생하기 때문에 타이어의 조향시 나타나는 조향력은 마찰력뿐만 아니라 전단력 성분이 복합적으로 나타나게 된다. 그러나 전술한 바와 같이 전단력 성분에 의한 회전모멘트는 토양이 단단할수록 크게 나타나기 때문에 타이어 조향시 나타나는 조향력의 크기는 Ground- III, Ground- II, Ground- I의 순으로 토양이 단단할수록 크게 나타난 것으로 판단된다.

결국 본 실험 범위 내에서는 Off-road 조향시 조향력의 크기는 차량이 가벼울 경우에는 연약한 토양에서 크게 나타나나, 차량의 무게가 일정 수준 이상일 경우에는 단단한 토양에서 더 큰 조향력이 요구될 것으로 사료된다.

다. 타이어 공기압에 따른 조향각-조향력 관계

Fig. 5의 (a), (b), (c)와 (d)는 각각 off-road(Ground- I, Ground- II, Ground- III)와 on-road(Ground- IV)에서 축하중이 2450 N일 때 타이어 공기압의 변화에 따른 조향각-조향력 관계를 나타낸 결과로서 두 경우 모두 모든 공기압 조건에서 조향각이 커짐에 따라 조향력이 증가하는 것으로 나타났다.

타이어 공기압의 변화에 따라 off-road 노면과 on-road 노면에서의 조향력의 크기를 살펴보면, on-road 노면인 Ground- IV의 경우에는 공기압이 낮을수록 전체 조향각 구간에서 조향력이 크게 나타났지만, off-road 노면인 Ground- I, Ground- II, Ground- III의 경우에는 타이어 공기압에 따른 조향력의 차이가 명확하게 나타나지 않았다.

이러한 결과는 on-road 노면에서는 타이어 공기압이 낮을수록 타이어의 변형이 커져 타이어와 노면간

노면상태, 타이어 공기압 및 축하중이 조향력에 미치는 영향

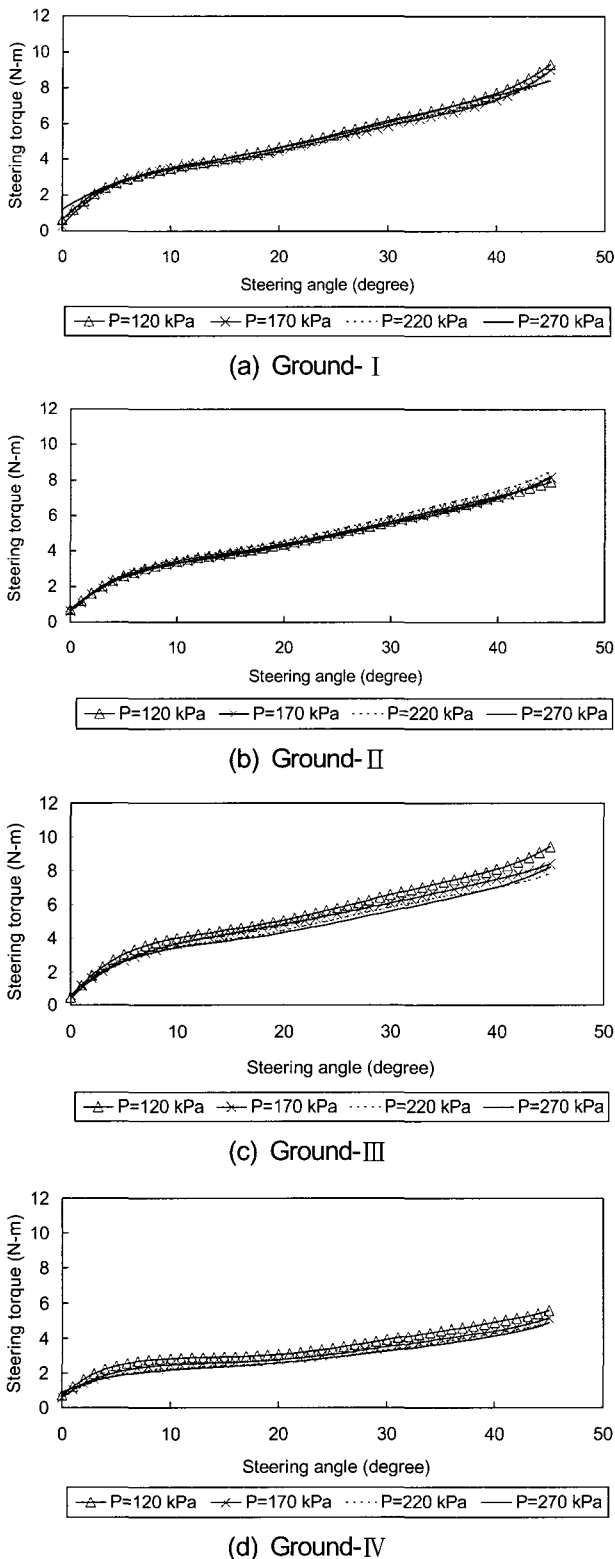


Fig. 5 Relationship between steering torque and steering angle(rotation angle of kin_pin angle) with different tire pressure.

의 마찰력에 의한 회전 모멘트의 증가로 인해 타이어의 조향력이 증가하게 되나, off-road 노면에서는

토양과 타이어의 변형이 복합적으로 일어나기 때문에 공기압의 변화에 따른 조향력 차이가 명확하게 나타나지 않은 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 off-road에서 운용되는 트랙터의 조향력 예측 모델을 개발하기 위한 기초 연구로서 off-road와 on-road에서 타이어의 공기압과 축하중이 조향력에 미치는 영향을 실험적으로 구명하였다. 실험은 인공토조용 단일 타이어 조향시스템을 설계, 제작하여 인공토조에서 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 타이어의 축하중의 증가는 실험이 수행된 모든 토양조건에서 타이어의 조향력을 증가시키는 것으로 나타났다.

(2) 조향력은 모든 축하중과 공기압 조건에서 off-road의 경우가 on-road에 비해 크게 나타났다.

(3) 토양상태에 따른 조향력의 크기는 축하중이 1470 N일 경우에는 Ground-I에서 가장 크게 나타났지만, 축하중이 2940 N으로 증가했을 경우에는 Ground-III에서 조향력이 가장 크게 나타났다. 즉, off-road에서 토양조건에 따른 조향력은 본 실험에 설정된 인자들의 범위 내에서 축하중이 작을 경우에는 연약한 토양에서 조향력이 크게 나타나지만, 축하중이 일정수준 이상으로 증가했을 경우에는 단단한 토양에서 더 큰 조향력이 필요한 것으로 나타났다.

(4) 타이어 공기압의 변화에 따른 조향력은 on-road에서는 공기압이 낮을수록 증가하였지만 off-road에서는 명확한 경향이 없었다.

참고 문헌

1. 윤석찬. 2001. 볼 스크류형 전동식 동력 조향 장치의 제어 성능에 관한 연구, 한양대학교 박사학위 논문.
2. Nakayama, T. and Suda, E. 1990. Present and Future of Electric Power Steering, Automotive Technology, Vol.44, No.1, pp. 106-111.
3. Nakayama, T. and Sude, E. 1994. The Present and Future of Electric Power Steering, Int. J. of Vehicle Design, Vol.15, Nos 3/4/5, pp. 243-254.
4. Shimizu, Y. 1991. Electric Power Steering. Automotive Technology, Vol.45. No.10. pp. 53-60.(In Japanese)