

차량에서 실시간 동반경 및 슬립율 측정

이 동 규 · 박 진 일 · 이 종 화*

이주대학교 기계공학과

The Real Time Measurement of Dynamic Radius and Slip Ratio at the Vehicle

Dongkyu Lee · Jinil Park · Jonghwa Lee*

Automotive Powertrain System Lab, Ajou University, Gyeonggi 442-749, Korea

(Accepted 16 February 2006 / Received 2 May 2006)

Abstract : The tire delivering power generated from engine to the ground pulls a vehicle to move. Radius of tires is changeable due to elasticity that depends on the speed of vehicle and traction force. The main objectives on this study are real time measurement of dynamic radius and slip ratio according to the speed and traction force. The dynamic radius is proportional to speed and traction force. According to measurement, the dynamic radius is increased about 3mm under 100km/h compared to stop. It is also increased about 1.5mm when a traction force is supplied as much as 4kN compared to no load state at low speed. There is no strong relationship between slip ratio and vehicle speed. The slip ratio is measured up to 4% under WOT at first stage gear. Through this research, the method of measuring dynamic radius and slip ratio is set up and is expected to be applied to the measurement of traction force in chassis dynamometer or accelerating and climbing ability.

Key words : Tire slip(타이어 슬립), Dynamic radius(동반경), Slip ratio(슬립율), Traction force(구동력)

Nomenclature

- D.R : dynamic radius, mm
- S.R : slip ratio, %
- α : camber angle, degree
- β : toe angle, degree
- FT : traction force, N

Subscripts

- T : traction

1. 서론

차량에서 타이어는 엔진에서 발생한 구동력을 최종적으로 지면에 전달하여 차량을 견인하는 역할을 한다. 따라서 슬립율이나 슬립각, 직진구동력과 횡구동력 등에 따른 타이어와 노면과의 특성에 따라서 주행성능이 크게 달라질 수 있다.^{1,2)}

타이어는 노면으로부터의 충격을 완화하기 위해서 탄성을 갖고 있는데, 이 때문에 노면의 성질이나 차속, 구동력에 따라서 동반경이 변하게 된다. 여기에서 동반경은 타이어 회전중심으로부터 노면과의 접점까지의 거리를 의미한다. 차량은 개발할 당시에 필요로 하는 차속과 구동력에 따라 적절한 엔진 회전속도에 맞춰서 설계되는데, 동반경이 변하게

*Corresponding author, E-mail: altair2@ajou.ac.kr

되면 차속과 구동력이 바뀌게 되어 양산차에서의 성능 오차를 가져오게 된다.

또한 실시간 동반경 측정은 바퀴의 슬립측정에 꼭 필요한 요소이다. 바퀴와 지면과의 속도차이에 의해 슬립이 생기게 되는데, 구동바퀴의 선속도를 측정하기 위해서는 바퀴의 각속도와 그 순간의 동반경이 필요하기 때문이다.³⁾ 본 연구에서는 차속이나 구동력에 따른 동반경 변화와 바퀴와 노면 사이의 슬립에 대한 실시간 측정방법을 제시하였다.

특히, 차량을 이용하여 차시 동력계상에서 구동력을 측정할 경우, 구동바퀴의 슬립이 매우 큰 인자로 작용하므로 슬립 및 동반경의 실시간 측정은 차량 구동력 분석방법의 체계화에 꼭 필요하다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치 및 이론

Fig. 1은 차량에서 구동바퀴의 속력과 실차속을 측정하기 위한 장치의 개략도이다.

시험차량은 1300cc급 수동변속기 차량이며, 175 65 R14 사양의 타이어를 장착하였다.

실 차량에서 동반경을 구하기 위해서 Laser Sensor(RIFTEK사, Rf600)를 이용하였다. Fig. 2는 Laser Sensor의 개략도이다. Laser Sensor는 센서에서 투사한 레이저가 물체에 닿아 반사되어 돌아오는 반사광선의 초점위치로 거리를 측정하며 0.05

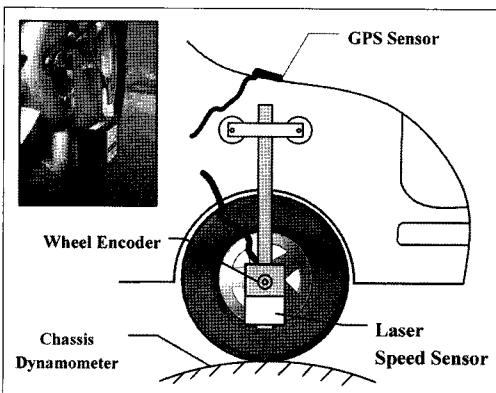


Fig. 1 Schematic diagram for measurement of vehicle speed and wheel speed

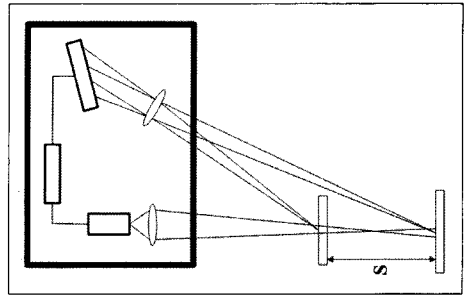


Fig. 2 Schematic diagram for measurement of dynamic radius

mm의 분해능을 가지고 있다.

요즈음 대부분의 차량이 캠버와 토우가 없거나 거의 미세하기 때문에 본 실험에서는 캠버와 토우가 0인 차량으로 실험을 하였다. 이에 따라 Laser Sensor에서 측정된 거리가 동반경이 된다.

캠버가 있는 경우에는 Fig. 3과 같고, 이 때 동반경 D.R은 식 (1)을 따른다.

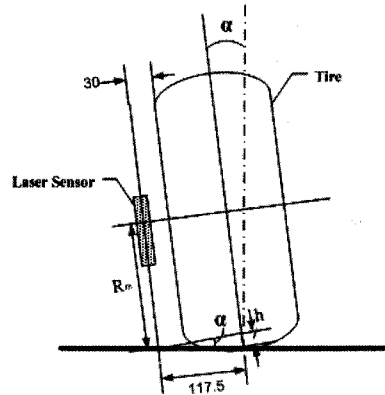


Fig. 3 Schematic diagram for measurement of dynamic radius considered with camber

$$D.R = R_m + h$$

$$h = 117.5 \tan \alpha \quad (1)$$

여기에서 R_m 은 레이저 센서에서 측정된 반경이며, h 는 캠버에 의해 생긴 측정 감소폭이다. 117.5는 타이어 중심으로부터 레이저 센서 측정부까지의 거리이다. 캠버가 0.2° 인 경우 h 는 0.41mm로 실험에 사용한 타이어 직경의 0.07% 정도가 된다.

토우가 있는 경우는 Fig. 4와 같으며 진행방향에 대한 횡방향의 슬립을 $S.R_i$ 는 식 (2)와 같다.

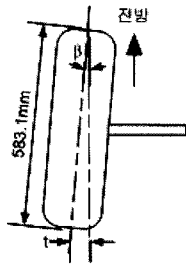


Fig. 4 Schematic diagram for measurement of slip ratio in lateral direction considered with toe-in

$$S.R_t = \tan \beta$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{t}{583.1} \right) \quad (2)$$

여기에서 t는 토우를 의미한다. 토우가 1mm일 때 S.Rt는 0.17% 정도임을 알 수 있다.

구동바퀴의 속력은 엔코더(metronix사, H40-8-0360ZV)를 사용하였으며, 도로에서의 실차속은 GPS Speed Sensor(RACELOGIC사, VB3SPS)를 사용하였다. GPS Speed Sensor의 sampling frequency는 100Hz이며, 분해능은 0.01km/h이다. 샤시 동력계에서는 차량이 정지상태로 동력계의 롤러가 회전하므로, GPS Speed Sensor 대신 동력계의 속도를 이용하였다.

2.2 실험 방법

샤시 동력계에서 구동바퀴의 동반경은 차속과 구동력을 변화시키면서 측정하였다. 또한 실도로에서는 정속주행이나 급발진, 코스트다운 실험을 하였으며 동시에 구동바퀴의 속도와 실차속을 측정하여 슬립율을 계산하였다.

슬립율은 차량의 전방향 속도에 대한 타이어 접측면의 미끄럼 속도의 비율로 정의된다.

식 (3)은 슬립율의 계산식이다.³⁾

$$S.R = \frac{r\omega - V_{vehicle}}{V_{vehicle}} \quad (3)$$

여기에서 S.R은 슬립율을 의미하며, r은 타이어 동반경, ω 는 구동바퀴의 각속도, $V_{vehicle}$ 은 차량의 전방향 속도로 실도로에서는 GPS Speed Sensor의 측정값이고, 샤시 동력계에서는 동력계의 롤러회전속도를 의미한다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 차속과 구동력에 따른 동반경 측정 결과이다.

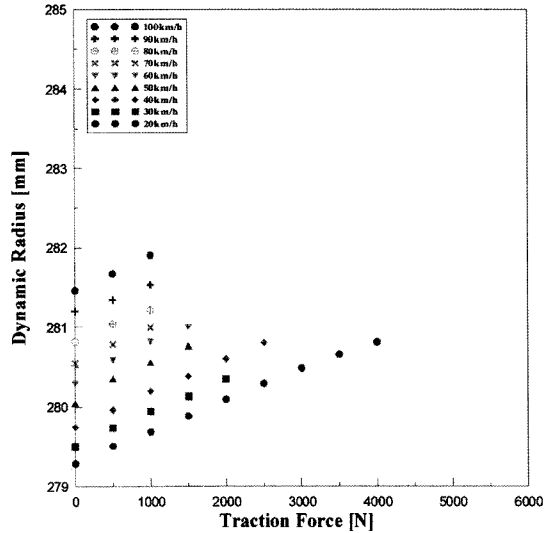


Fig. 5 Dynamic radius variation correspond to vehicle speed and traction force

차속과 구동력이 클수록 동반경이 증가함을 알 수 있다. 특히 구동력이 커질수록 지면과의 큰 마찰에 의한 타이어의 찌그러짐 현상으로 동반경은 상대적으로 감소할 것으로 예상했으나, 구동력 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.

Fig. 5에서 차속에 따른 동반경 변화를 알기 위해 무부하 상태에서의 동반경 변화(ϕ_0 , 타원으로 표시)를 보면 Fig. 6과 같다. Fig. 6은 ϕ_0 를 2nd order polynomial로 fitting한 것이다.

Fig. 6에서 동반경은 정지상태에 대해 100km/h의 속도일 때 약 2.5mm 정도 증가함을 알 수 있는데, 속도의 제곱에 비례해서 증가하는 타이어의 원심력 때문으로 보인다. ϕ_0 를 2차 fitting 했을 때 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 차량 하중에 의해 변형된 타이어 형태가 원형에 가까워지면 복원력이 약화되고, 더 나아가 반대로 작용하게 되어 계속 증가하지는 않을 것으로 예상된다.

Fig. 7은 동반경 변화를 무부하에서의 동반경($\phi_0(V)$)으로 normalize한 후 구동력에 따라서 나타낸

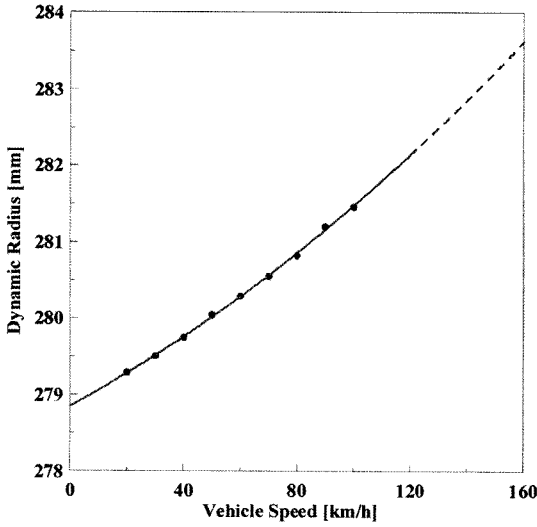


Fig. 6 Dynamic radius variation at no load

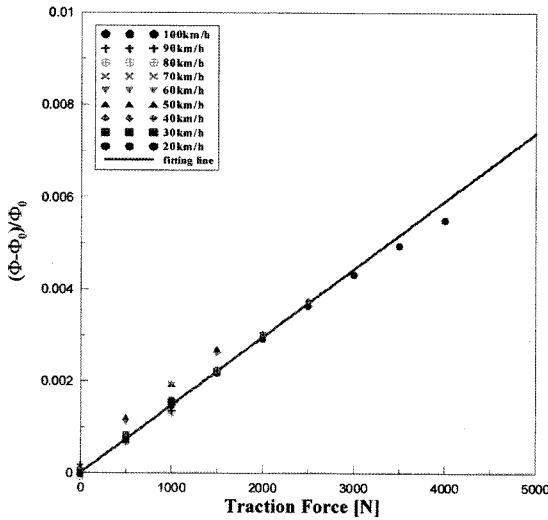


Fig. 7 Dynamic radius variation ratio correspond to traction force

그래프이다. 차속과 독립적으로 구동력 증가에 따라 동반경이 거의 선형적으로 변함을 알 수 있다. 그러나 아래 그래프에서 보듯이 3000N 이상의 경우 동반경이 커짐에 따라서 타이어 복원력의 약화로 증가율은 감소한다.

D.R은 차속과 구동력에 대한 동반경을 의미하며, ϕ_0 는 무부하에서의 동반경, V 는 차속, F_T 는 구동력이다.

식 (4)는 Fig. 7에서 동반경 변화를 차속과 구동력에 대해 하나의 식으로 나타낸 것이다. 식 (4)에서 차

속과 구동력은 동반경에 각각 독립적임을 나타낸다.

$$D.R = (\phi_0 + 0.02V + 6 \times 10^{-5}V^2) \times (1 + 1.48 \times 10^{-6}F_T) \quad (4)$$

Fig. 8은 차속과 구동력에 따른 슬립을 변화를 나타낸 그래프이다. 구동력이 증가함에 따라서 슬립율이 선형적으로 증가함을 보인다.

아래 그래프에서는 4000N에서 약 2.5% 정도의 슬립이 생기는데, 이를 통해 토크가 큰 저속영역에서 슬립의 영향이 큼을 알 수 있다. 반면에 차속은 슬립율과 큰 관계가 없음을 알 수 있다.

Fig. 9는 무부하 상태에서의 차속에 따른 슬립율을 나타낸다. 차속에 의한 슬립율은 최대 0.4% 내외로 구동력의 영향에 비해 미세하다. 슬립율은 차속이

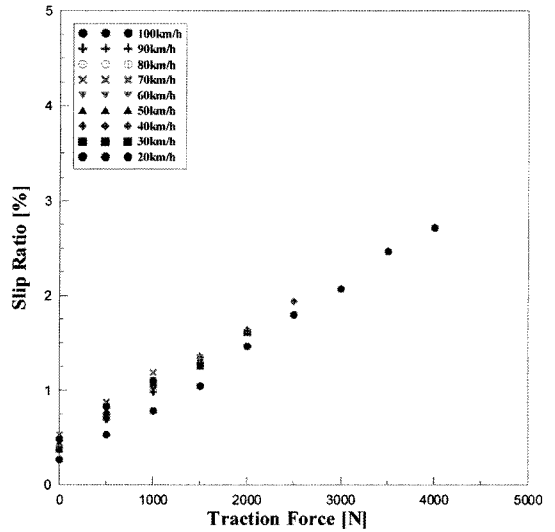


Fig. 8 Slip ratio correspond to traction force

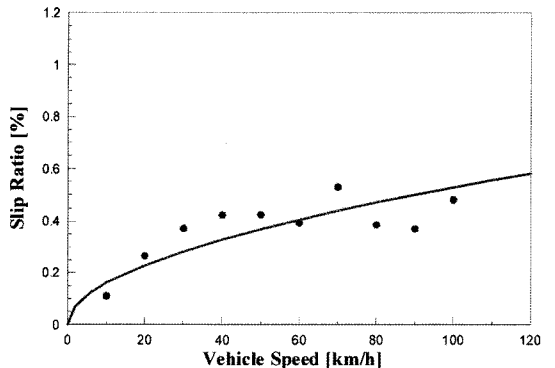


Fig. 9 Slip ratio correspond to vehicle speed at no load

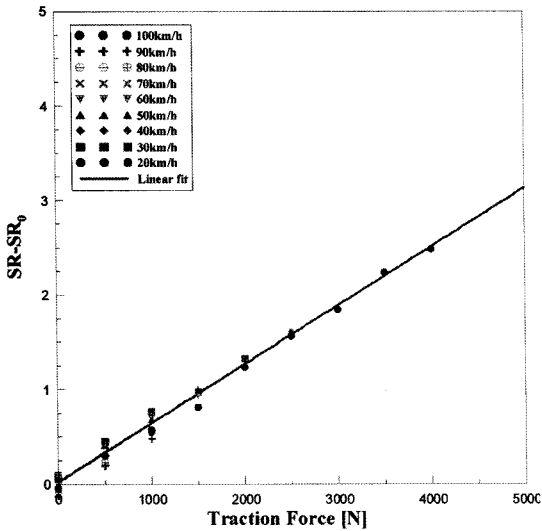


Fig. 10 Slip ratio correspond to traction force

증가함에 따라서 지수함수로 수렴함을 알 수 있다.

Fig. 10은 슬립율을 구동력과 차속에 대한 하나의 식으로 나타내기 위해 Fig. 8을 무부하에서의 슬립율(SR₀)로 정규화한 그래프이다.

이에 대한 정규식은 식 (5)와 같다.

$$SR = SR_0 + 0.62 \times 10^{-4} F_T + 0.023 \quad (5)$$

$$SR_0 = 0.0486 \times V^{0.5182}$$

Fig. 10은 저슬립 영역에서 구동력이 슬립율에 선형적임을 나타내며, 고슬립(약 20% 이상) 영역에서는 지수곡선 형태로 비선형적이다.⁴⁾

Table 1은 차속과 구동력에 따라 실시간 동반경을 고려하여 계산한 슬립율과 일정한 동반경을 가정하여 계산한 슬립율을 나타내고 있다. 고정 동반경으로 계산하였을 경우 최대 약 1%의 슬립오차를 보였다. 측정 슬립율이 3% 이내인 점을 감안하면 무시할 수 없는 큰 수치이다.

Fig. 11은 각 단수별로 전부하에서 차속에 따른 동반경과 슬립율을 측정된 결과이다. 저단의 큰 구동력 하에서 타이어 슬립율이 크다는 것을 알 수 있다. 특히, 1단 5000N의 전부하 상태에서 최대 약 4%의 슬립이 발생했다.

전부하 상태에서 차속에 따른 동반경은 90km/h 이상의 고속영역을 제외하고는 전반적으로 정지 상태에 비해 비슷하게 증가한 것을 알 수 있다. 이는

Table 1 Slip ratio correspond to dynamic radius

Vehicle Speed [km/h]	Traction Force [N]	Real D.R.		Fixed D.R.		
		D.R. [mm]	S.R. [%]	D.R.:279.29 S.R. [%]	D.R.:280.29 S.R. [%]	D.R.:281.46 S.R. [%]
20	0	279.29	0.27	0.27	0.62	1.04
	4000	280.81	2.71	2.18	2.53	2.94
30	0	279.50	0.37	0.30	0.65	1.07
	2000	280.35	1.61	1.23	1.58	1.99
40	0	279.74	0.42	0.26	0.62	1.03
	2500	280.80	1.94	1.40	1.76	2.17
50	0	280.04	0.42	0.16	0.51	0.93
	1500	280.76	1.37	0.85	1.20	1.61
60	0	280.29	0.39	0.04	0.39	0.81
	1500	281.00	1.34	0.73	1.09	1.50
70	0	280.55	0.53	0.08	0.44	0.85
	1000	281.00	1.19	0.58	0.94	1.35
80	0	280.82	0.39	-0.16	0.20	0.61
	1000	281.22	1.01	0.33	0.69	1.10
90	0	281.20	0.37	-0.31	0.05	0.46
	1000	281.53	0.98	0.18	0.54	0.95
100	0	281.46	0.48	-0.29	0.05	0.48
	1000	281.91	1.10	0.17	0.54	0.94

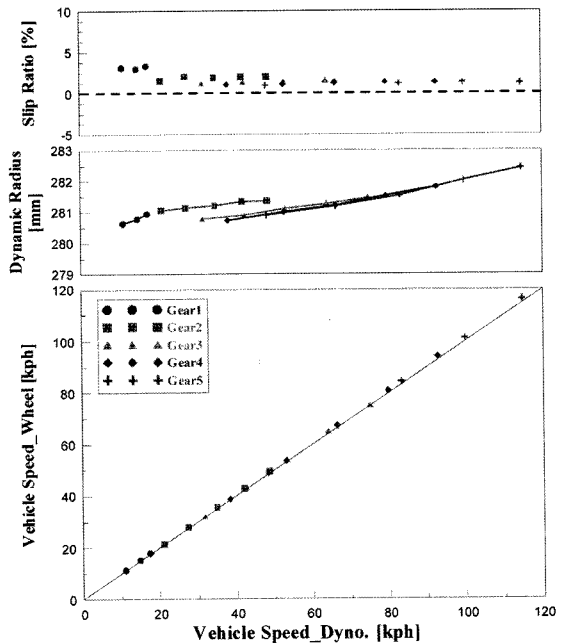


Fig. 11 Slip ratio & dynamic radius correspond to vehicle speed

저속주행 시에는 상대적으로 큰 구동력에 의해 동반경이 증가했고, 고속으로 갈수록 상대적으로 차속에 의한 영향이 커졌다는 것을 알 수 있다. 이는 실제 운전 시 급가속 주행의 경우와 비교될 수 있다.

Fig. 12는 실도로에서 급발진 시의 실시간 동반경과 슬립율 변화를 보여준다. 초기에 차량 관성에 의해 바퀴의 속도와 차량 속도의 큰 차이로 슬립이 크게 발생함을 알 수 있다. 이때 슬립은 최대 90%까지 발생한다. 또한 빠른 휠속도와 큰 구동력에 의해 동반경은 약간 증가하는데, 일반 도로에서는 노면이 불규칙하고 요철이 많아서 레이저의 반사가 불규칙

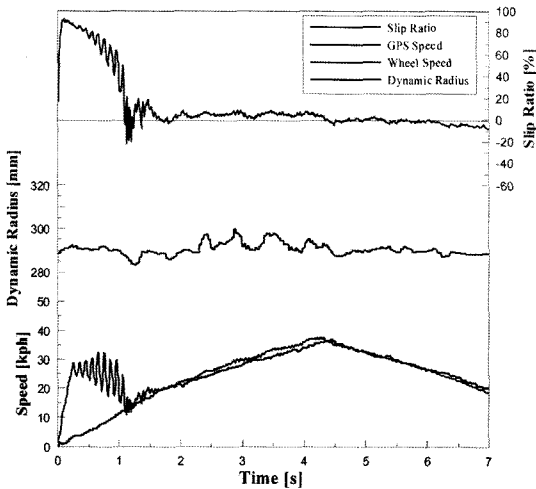


Fig. 12 Tire slip & dynamic radius at kick down

하게 일어나 동반경 측정에 오차가 많이 발생했다. 하지만, 급발진 시와 같이 불안정한 경우 외에는 노면에서도 일관성 있는 데이터를 얻을 수 있다.

위의 그래프를 보면 가속구간에서는 구동바퀴의 속력이 실제 차속보다 크기 때문에 슬립율이 양의 값을 가졌으나, 반대로 감속구간에서는 슬립율이 음의 값이 나옴을 알 수 있다.

3. 결론

차량에서 실시간 동반경 및 슬립을 측정을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 본 연구를 통해 실제차량에서 부하와 속도에 대한 바퀴에서의 실시간 동반경 변화와 슬립율의 측정방법을 확립하였다. 요즘 차량이 경량화 되고 고출력이 되면서 슬립에 의한 구동력의 차이가 더욱 큰 비중을 차지할 것으로 보이는데, 이를 통해 슬립을 고려한 보다 정확한 차량 성능을 측정할 수 있을 것으로 기대된다.
- 2) 실시간 동반경을 고려하지 않을 경우 슬립율이 최대 2배 이상의 차이를 보였다. 이로써 실시간 동반경의 측정이 슬립율의 측정에 꼭 필요한 인

자임을 알 수 있다.

- 3) 레이저 변위센서를 활용하여 타이어 동반경 측정 방법을 개발하고 샤시 동력계 구동력 측정 시험 조건 및 발진가속 조건에 적용하여 데이터를 취득하고 분석하였다. 샤시 동력계 상에서 측정된 결과로부터 동반경은 차속과 부하의 영향을 받으며 각 인자의 영향을 합수로 나타낼 수 있었다.
- 4) 슬립에 의한 구동력 발생 차이는 바퀴와 동력계 사이의선속도 차이에 의해 발생한다. 이 때 바퀴에서의 슬립은 타이어의 종류, 샤시 동력계의 직경이나 마찰계수 등의 계측환경에 따라 달라질 수 있겠으나, 차량속도보다는 구동력에 따라 상대적으로 크게 영향을 받는다. 본 시험에서 정속의 경우 바퀴에서의 슬립은 1단 전부하 상태에서 최대 4% 정도 나타났다.
- 5) 실시간 동반경 및 슬립을 측정방법은 샤시동력계를 이용한 구동력 측정 결과해석에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 아울러, 실도로에서의 발진가속 및 동판성능 시험결과 데이터의 분석에도 개발된 동반경 및 슬립측정기술이 활용될 것으로 기대된다.

References

- 1) K.-J. Woo, "A Study on the Estimation of Friction Coefficient between Tire and Road Surface Using Running Car Data," Transactions of KSAE, Vol.7, No.6, pp.207-213, 1999.
- 2) J. H. Park and C. Y. Kim, "Optimal Wheel Slip Control for Vehicle Stability During Cornering," Transactions of KSAE, Vol.5, No.4, pp.190-198, 1997.
- 3) Translated by S. S. Kim and S. T. Park, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Pearson Education, Korea, pp.309-331, 2002.
- 4) W. Park, "Effect of Slip on Tractive Performance of Driving Wheel," Transactions of KSAE, Vol.10, No.1, pp.234-243, 2002.