

〈논 문〉 SAE NO. 953730

거리·시간 측정에 의한 고정도 타행시험법 : II. 단거리 방법의 개발 및 시험

High-Accuracy Coastdown Test Method by Distance-Time Measurement : II. Development of a Short Distance Method and its Evaluation

허 남 건,* 안 이 기,** V. A. Petrushov***
N. G. Hur, I. K. Ahn,

ABSTRACT

In the companion paper of the present paper, a coast down test method to determine the resistance forces on running vehicle based on the distance-time measurement was explained along with the suggestions to improve its accuracy and testing methodology. In the present paper some of the suggestions discussed previously are implemented and actually road tested to see the applicability of the improved method(short distance method) in the field. From the results, it is shown that the short distance method which requires only 600m long proving ground road gives at least comparable results on the accuracy compared to the original S-t method which requires 2000m. It is hoped that the present method be further refined to give more accurate results.

주요기술용어 : Coastdown Test(타행 시험), S-T Method(거리-시간법), Short Distance Method(단거리법), Drag Coefficient(항력 계수), Rolling Resistance(구름 저항), Coast-down Time(타행 시간)

1. 서 론

본 논문의 전편 I.에서는 자동차의 공기 항력 등을 실제 도로상에서 측정하기 위한 타행 시험법²⁻⁶⁾인 S-t방법과 V-t방법에 대해 관련 이론 및 그 측정 성능을 고찰하였으며, 최근 러시아에

서 개발되어 사용되고 있는 S-t방법의 정밀도를 높이고 실험방법을 보완하기 위한 거리의 단축, 구동축저항 실험의 보완 등 몇가지 사항에 대하여 고찰하였다. 특히, 원래의 러시아의 거리-시간 방법은 승용차의 경우 약 2km의 평탄하고 직선인 측정도로를 필요로 하므로, 대형 직선시험 주행로를 보유하고 있지 않는 국내실정으로는 사용하기가 쉽지 않아 짧은 거리에서 측정가능한 타행시험법(단거리 방법)의 개발이 반드시 필요하다.

* 정회원, 한국과학기술연구원 터보기계연구팀

** 한국과학기술연구원 터보기계연구팀

*** Aerodynamics Lab., NAMI, RUSSIA

이 방법은 또한 버스, 트럭 등 대형 차량의 항력계수 측정 등에 유일하게 사용될 수 있을 것이다. 대형 차량의 경우 차체의 중량이 커서 타행 시험에 의해 정지할 때까지 소요되는 거리가 아주 길므로 전 세계적으로도 대형차량을 실험할 수 있는 도로는 많지 않을 것이며, 또한 풍동실험의 경우도 Blockage Ratio 등의 이유로 공기항력계수 등을 측정하기는 쉽지 않을 것이다. 이와 더불어, 최근 새로 개발되는 차량의 모양에 대한 정보를 개발업체들은 최고의 기밀로 취급하고 있는 현상황에서, 시제품을 타행 시험하기 위하여 시험주행로 등으로 이동할 경우 쉽게 노출되기 쉬우므로 단거리 방법의 타행시험법 개발이 꼭 필요하였다.

본 논문에서는 거리-시간의 데이터를 몇번의 시험을 통하여 구간별로 구하여 이를 중첩시키면 원래의 거리-시간 타행시험법과 같은 방법으로 공기항력계수, 구름저항, 구동축저항 등을 구할 수 있다는 점에 착안하여 단거리에서 측정가능한 거리-시간 타행시험법을 개발하였다. 즉, 개발한 단거리 방법은 시험결과 600m의 직선 주행로에서도 러시아의 2km를 필요로 하는 장거리 방법에 못지 않는 결과를 주었다. 다음에 오는 절들에서는 이 방법에 대한 설명과 함께 실제 도로상에서 측정한 결과에 대하여 설명하였다.

2. 단거리 S-T 타행식

타행식의 기본 형태는 전편 .I에서 설명한 것과 같이, 달리는 자동차에 작용하는 각종 항력(공기항력, 구름저항, 구동축 저항 등)을 모델링하여 뉴턴의 제 2법칙에 따라 수식을 세우면 아래와 같다.

$$-\frac{W}{g}(1+f)\frac{dV}{dt} = D_T + D_R + D_a \quad (1)$$

여기서

$$D_T = W(\tau_0 + bV) : \text{Transmission Loss}$$

$$D_R = W(f_0 + kV^2) : \text{Rolling Resistance}$$

$$D_a = FC_d \frac{1}{2} \rho V^2 : \text{Aerodynamic drag}$$

이며, 각각의 기호는 아래와 같이 정의된다.

$$f = \frac{(n \cdot I_w + I_d)g}{WR^2}$$

n : 바퀴 총수

I_w : 바퀴 한개의 관성 모멘트

I_d : 바퀴를 제외한 동력 전달부 관성 모멘트

R : 바퀴의 동하중 반경

W : 자동차 무대(단위 : kg중)

V : 자동차 속도

F : 자동차 전면 면적

ρ : 공기 밀도

C_d : 항력 계수

윗식을 정리하면 아래와 같은 타행식을 얻게 된다.

$$-\frac{\delta dV}{g dt} = a + bV + cV^2 \quad (2)$$

여기서 각각의 기호는 아래와 같이 정의된다.

$$\delta = 1 + f, a = \tau_0 + f_0, b = b, c = k + \frac{\rho C_d F}{2W}$$

윗식을 전편에서 설명한대로 두번 적분하여 거리-시간 타행법의 기본식을 얻으면 아래와 같으며,

$$S(T) = \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT)} - hT \right] \quad (3)$$

$$A = \sqrt{4ac - b^2}, B = \frac{gA}{2\delta}, h = \frac{gb}{2\delta} \text{ 이다.}$$

식 (3)의 S-T방법의 기본식에서 실제 자동차가 정지할 때 까지의 T를 측정된 시간 T_s 와 측정후 정지할 때 까지의 T_R 를 사용하여 $T = T_s + T_R$ 로 가정하면 단거리 S-T의 기본타행식이 된다.

$$\begin{aligned}
 S(T) &= S(T_S + T_R) = S(T_S) + S(T_R) \\
 &= \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_S + T_R))} \right. \\
 &\quad \left. - h(T_S + T_R) \right] \\
 S(T_S) &= \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_S + T_R))} \right. \\
 &\quad \left. - hT_S \right] \tag{4}
 \end{aligned}$$

윗식을 사용하여 그림 1에 나타난대로 3개의 거리-시간 데이터를 측정하면 아래 3개의 식이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 3\Delta S &= \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S1}))} \right. \\
 &\quad \left. - hT_{S1} \right] \\
 2\Delta S &= \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S2}))} \right. \\
 &\quad \left. - hT_{S2} \right] \tag{5} \\
 \Delta S &= \frac{\delta}{gc} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S3}))} \right. \\
 &\quad \left. - hT_{S3} \right]
 \end{aligned}$$

위의 3식에서 ΔS , δ/gc 를 소거하면 B , T_R 의 2개식으로 되며, 이 두식을 풀어서 B , T_R 을 구한다.

$$c = \frac{\delta}{3g\Delta S} \left[1n \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S1}))} \right. \\
 \left. - hT_{S1} \right]$$

$$a = \frac{\delta^2}{g^2 c} (B^2 + h^2) \tag{6}$$

또한, 전편에서 설명한 바와 같이 b 는 구동축 저항 실험에서 얻어지기 때문에 저속에서 a 의 값을 구할 수 있다. 그림 2에서 보듯이 여기서 c 는 공기 항력의 기여가 적은 저속 영역에서 계산된 결과이기 때문에 의미가 없다.

한편 자동차가 약 600m의 도로를 타행하는 동안에는 바람, 도로, 기울기, 반사판간거리차, 운전사의 핸들 조작 등으로 항력 측정에 오차를 줄 여지가 있다. 이러한 조건에 대한 영향을 최소화하고자 자동차 타행중 여러 지점(예 100m 간격)의 시간을 측정하여, 각지점의 측정데이터에 가장 근사적인 a , c , T_r 을 최초 지승법을 이용하여 구할 수 있을 것이다. 이 경우 200, 400, 600m 3개의 데이터를 이용하여 기존 방법으로 근사적인 B , c , T_r 을 구하고, 구한값을 윗식의 초기치로 하여 100m 마다의 데이터에 가장 근사적인 B , c , T_r 을 구한다.

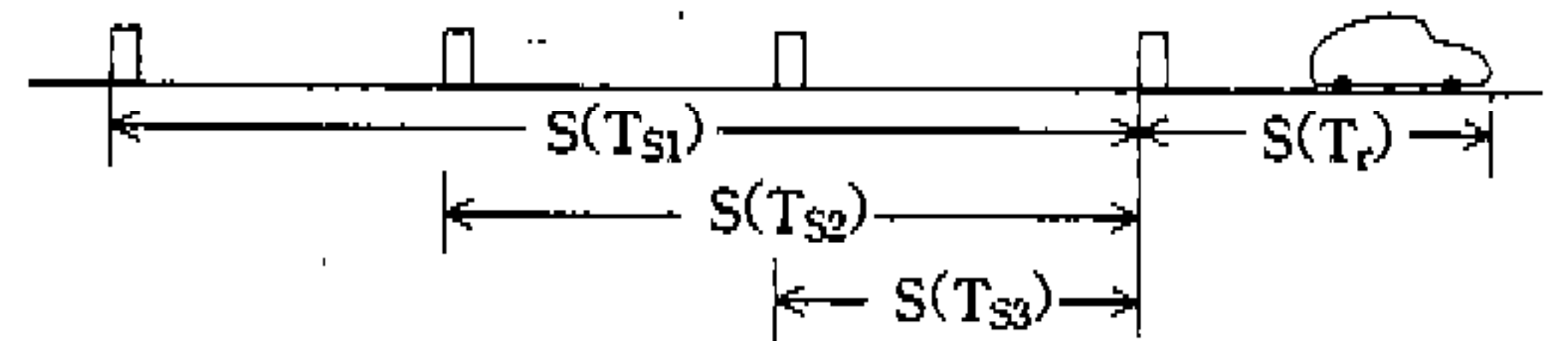


Fig.1 Time measurement positions for a short distance S-T method.

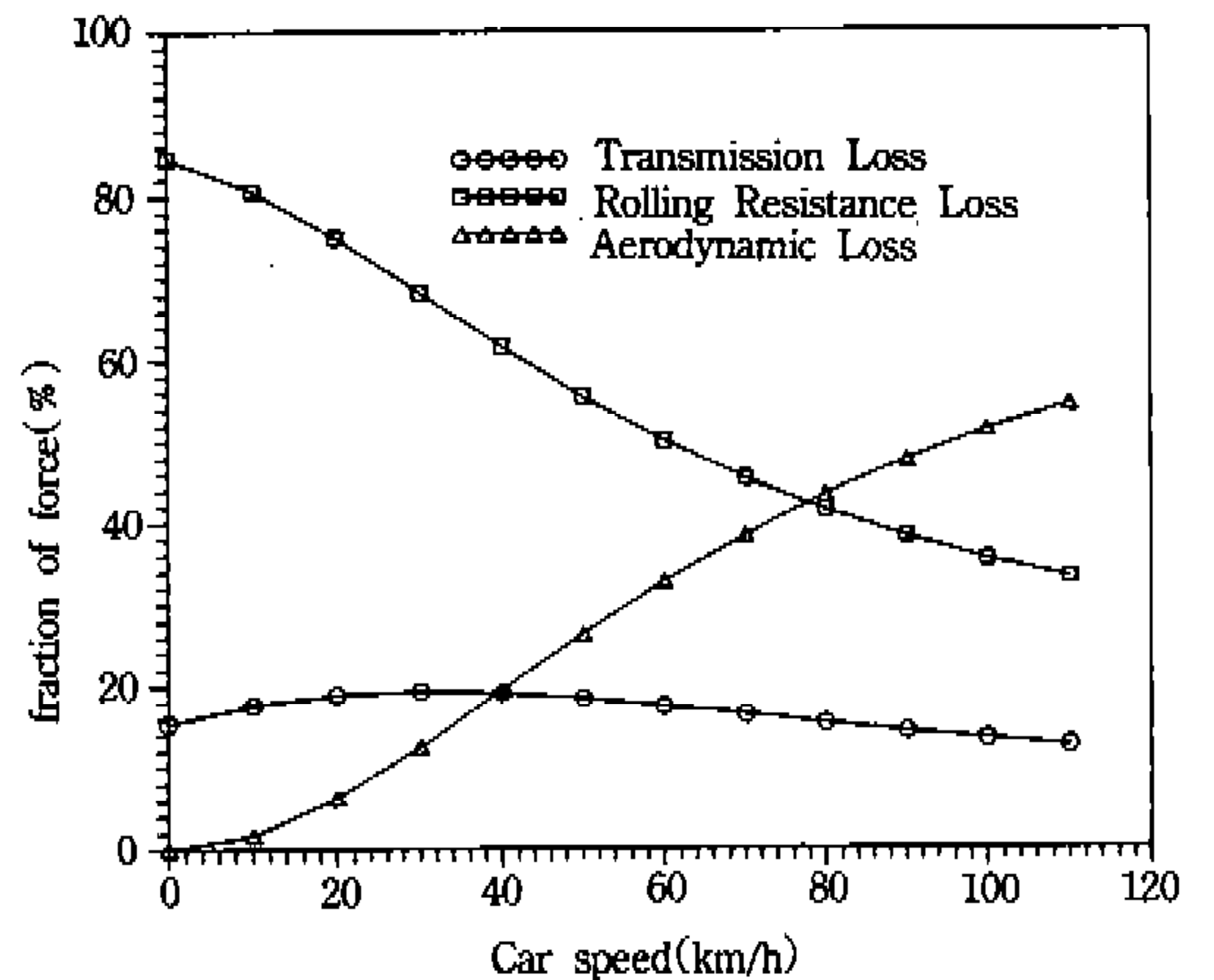


Fig.2 Load fraction of a coast down test car.

표 1 초기 타행 속도에 따라 각 100m 구간동안 타행 시간(단위: 초, 차량: 승용차, 측정장비: 타행 시험용 레이저 장비)

m	100km/h	80km/h	60km/h
100	3.651	4.506	6.108
200	3.895	4.842	6.773
300	4.146	5.222	7.620
400	4.431	5.681	8.754
500	4.750	6.223	10.407
600	5.119	6.883	13.181
700	5.552	7.731	20.432
800	6.070	8.884	
900	6.709	10.595	
1000	7.516	13.603	

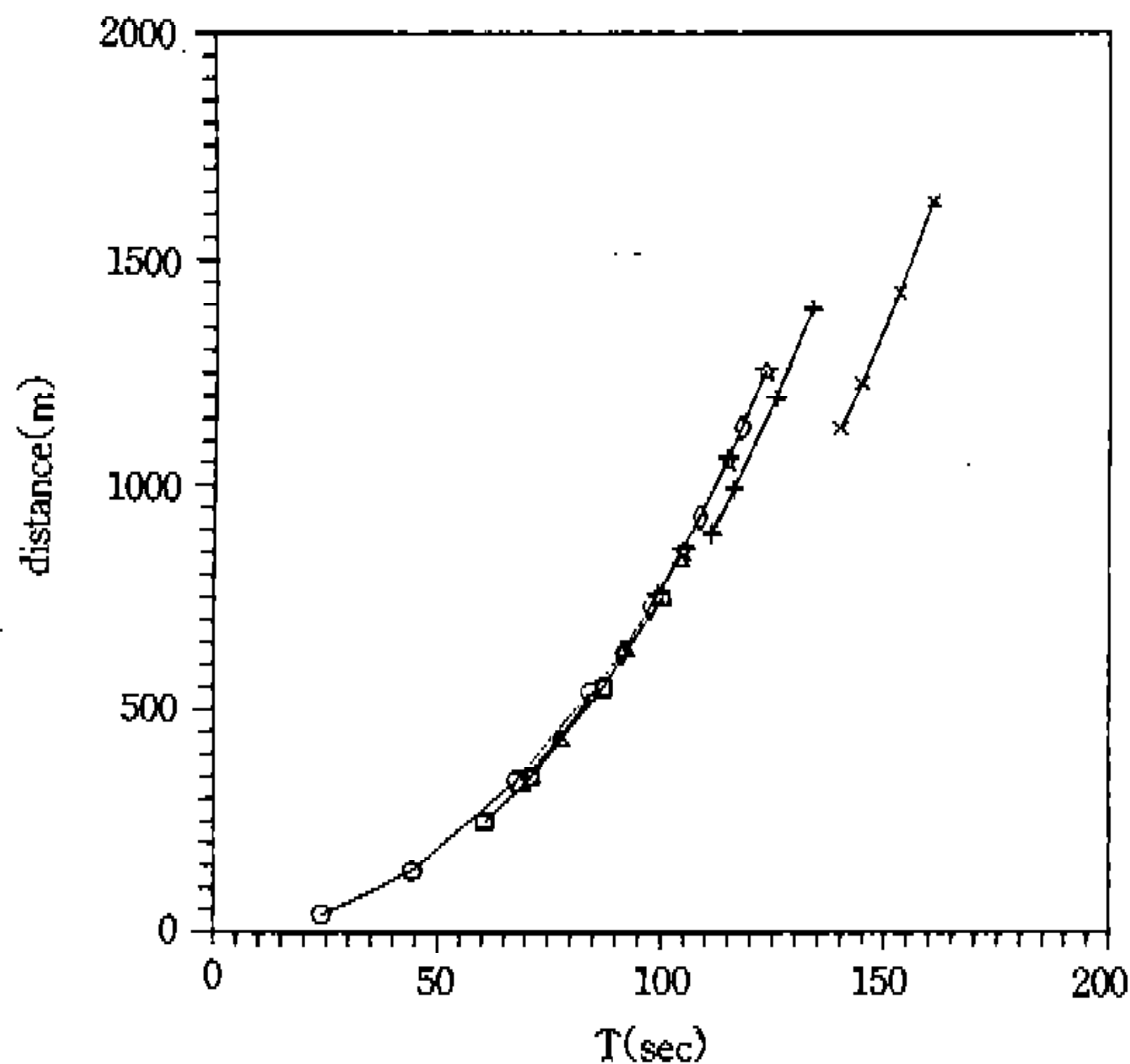


Fig.3 Result of data processing with low speed method.
(Each symbol means a four-point data set of 500m distance in Table 1.)

위의 단거리 거리-시간 타행식은 시험구간의 길이를 줄이는데 한계가 있다. 이를 보기 위하여, 타행 시험용 레이저 측정 장비로 측정된 승용차의 타행 거리-시간 데이터(표 1)를 단거리 타행 시험 방법으로 처리한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림으로부터, 짧은 거리(시험구간 500m, 가변 구간에 대한 시험 가능성을 보기 위

하여 200, 400, 500m의 데이터를 사용하였음)에서 실험을 하면 저속 구간에서는 실험의 결과가 한곡선상에 잘 모여 있으나, 80-100km/h 근처에서는 실험의 결과가 많이 분산되어 있음을 알 수 있다.

이는 위에서 설명한 단거리 타행방법이 a, c, T, 3개의 미지수를 동시에 구하기 때문에 오차가 많이 발생하는 데 기인한다. 그러므로, 자동차의 저항은 고속영역에서는 공기항력이 지배적이며 저속에서는 구름저항이 지배적이라는 점에 착안하여, 먼저 초기 타행 속도가 60km/h일 때(저속일 때) a의 값을 구하고, 100km/h 근처에서(고속일 때) c, T_R 2개의 미지수를 구하면 예측 성능을 훨씬 향상시킬 수 있을 것이다. 이 개념은 그림 2에 나타나 있듯이 구름 저항이 우세한 속도 영역에서 구름 저항 관련 계수를 구하고, 다시 항력 계수가 우세한 영역에서 항력 계수 관련 미지수를 구하는 것이다. 즉 a의 값은 위에서 설명된 타행식에서 구하고, c, T_R를 구할 때는 아래 두 수식을 쓴다.

$$3\Delta S = \frac{\delta}{gc} \left[\ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S1}))} - hT_{S1} \right]$$

$$\Delta S = \frac{\delta}{gc} \left[\ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_R)}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T_R + T_{S3}))} - hT_{S3} \right] \quad (7)$$

이 경우에도 위에서 설명한 것과 같이 측정된 전체 데이터에 가장 근사한 미지수를 구하기 위하여 최소 자승법을 쓴다. 즉, 200, 600m 2개의 데이터를 이용하여 기존의 방법으로 근사적인 c, T_R을 구하며, 이 구한 값을 위의 초기치로 하여 100m 마다의 데이터에 가장 근사적인 c, T_R을 구한다. 이렇게 처리한 데이터를 그림 4에 나타내었으며, 이는 그림 3과 비교하여 아주 좋은 상관관계를 보여준다.

3. 구동축 저항 측정방법

전편 I에서와 같이 자동차 전체의 타행식에서 구동축 부분만 남긴 식을 두 번 적분하면 구동축의 저항에 대한 기본적인 타행식을 얻을 수 있다.

$$S(T) = \frac{\tau_0}{b} \left[\frac{e^{Th_0} - 1}{h_0} - T \right] \quad (8)$$

여기서 $\delta_0 = \frac{mI_w + I_d}{WR^2}$, $m =$ 구동바퀴수, $h_0 = \frac{gb}{\delta_0}$ 이다.

도로 타행법에서와 같이 타행 시작에서부터 일정 회전수 간격마다 시간을 측정하면 전편에서 설명한 구동축 타행시험법이 된다. 여기서는 구동축의 회전이 정지되는 부분의 오차를 줄이기 위해, 구동축 타행 시험의 기본식에서 단거리 타행식과 같이 $T = T_s + T_r$ 로 대치하면

$$S(T) = S(T_s + T_r) = S(T_s) + S(T_r)$$

$$= \frac{\tau_0}{b} \left[\frac{e^{(T_s + T_r)h_0} - 1}{h_0} - (T_s + T_r) \right]$$

$$S(T_s) = \frac{\tau_0}{b} \left[\frac{e^{T_s h_0} (e^{T_r h_0} - 1)}{h_0} - T_s \right] \quad (9)$$

가 되며, 이 식이 단거리 구동축 타행식의 기본식이 된다.

이제 측정된 3개의 거리와 시간을 대입하여 얻은 식에서 τ_0 , T_r 을 소거하고 그 식으로부터 h_0 를 구한다음 다음 식들에 의해 구동축 관련계수들을 구할 수 있다.

$$T_r = \frac{1}{h_0} \log \left(\frac{h_0 T_s(1) - D_1 h_0 T_s(3)}{e^{T_s(1)h_0} - D_1 e^{T_s(3)h_0} + D_1 - 1} \right)$$

$$\tau_0 = \frac{h_0 b (2\Delta S + S^*)}{e^{T_s h_0} (e^{T_s(1)h_0} - 1) - 1 h_0 T_s(1)} \quad (10)$$

$$b = \frac{h_0 \delta_0}{g}, \quad D_1 = \frac{2\Delta S + S^*}{S^*}$$

S^* : $2\Delta S$ 이후 바퀴 정지 직전까지 거리.

이 방법은 단거리 도로 타행시험법과 같이 바퀴의 멈춤을 사람이 판단하지 않으므로 측정 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 그러나 트랜스미션에 의한 손실은 매우 작으므로, 측정시 저속영역이 많이 포함되어야 좋은 측정 결과가 나온다. 그러므로 측정 장비에 마지막 회전의 시간을 측정하는 기능이 있으면 좀 더 좋은 결과를 줄 수 있을 것이다.

이렇게 단거리 타행 시험법을 통하여 얻는 계수들은 공기 항력 계수와 구름 마찰 계수가 함께 포함된 값이므로 전편에서 설명한 바와 같이 두 개의 값을 분리하면 원하는 공기항력계수와 구름 마찰저항을 얻을 수 있을 것이다. 여기서는 자세한 설명은 생략하고 이제 앞에서 설명한 방법으로 실제 측정하는 방법을 설명하고자 한다.

4. 시험 방법

실제 시험은 다음 순서에 따라 행해진다.

4.1 대기 상태 측정

대기압, 대기온도, 평균 풍속 측정, 평균 풍향 측정

4.2 차량 상태 측정

- 차량 하중 측정
- 타이어 압력 측정
- 타이어 온도 측정
- 차량의 전면 면적값
- 바퀴의 동하중 반경
- 바퀴 한개의 관성 모멘트
- 동력 전달축 관성 모멘트
- 스프링 고정용 장치 준비
- 차높이 측정

4.3 MARKER 설치

- MARKER 크기 6cm×60cm
- 0, 200, 400, 600m 지점에 설치
- 구동축 바퀴에 1개의 MARKER 부착

4.4 도로 시험

- 1) 차량의 하중 측정(dummy weight 유무에 따라)
- 2) 평균 속도, 평균 풍향 측정
- 3) 대기압, 대기 온도 측정
- 4) 시험차의 Warm-Up(100km 정도)
- 5) 직선 주로에서 타행 시험 실시
 - 60km/h에서 : 6회 실시(좌에서 우 3회, 우에서 좌 3회)
 - 100km/h에서 : 6회 실시(좌에서 우 3회, 우에서 좌 3회)
- * 매회 평균 풍향 및 평균 풍속 측정
- 6) 스프링 간격 조정
- 7) 시험차의 Warm-Up(10km 정도)
- 8) dummy weight를 추가한 후 직선 주로에서 타행 시험 실시
 - 60km/h에서 : 6회 실시(좌우에서 우 3회, 우에서 좌 3회)
 - 100km/h에서 : 6회 실시(좌에서 우 3회, 우에서 좌 3회)
- * 매회 평균 풍향 및 평균 풍속 측정
- 9) 차량의 타행 시험 실시
- 10) 타이어 압력

4.5 Transmission 시험

도로 시험후 워밍업된 상태에서 구동축 타행 시험을 실시한다.

- 1) 구동축 바퀴를 공중에 띄운다.
- 2) 타행시와 동일하게 바퀴축의 방향을 지지대로 교정한다.
- 3) 6차레에 걸쳐 속도 100km/h에서 타행을 실시한다.

5. 측정 장비

본 연구에서는 타행시험전용의 적외선 측정장

치를 설계, 제작하여 측정하였다. 즉, 측정을 원하는 지점의 도로상에, 적외선 센서에 감응하는 반사테이프를 붙이고, 자동차 번호판에 소형 적외선 센서를 장착하여, 자동차가 지나갈때 마다 전기 펄스 신호가 발생되도록 한다. 이 신호를, 마이크로프로세서를 이용한 측정 장비로 처리하여 반사판간 시간을 측정하고 장비내 기억 소자에 저장하였다가 시험이 종료된후 컴퓨터로 보내진다. 보내진 결과는 자동차 관련 데이터가 추가된 후 곧바로 계산되어 결과를 볼 수 있도록 하였다.

사용된 적외선 센서는 Omron사 E3S-R2E4이고, 크기 21×15.4×45mm, 응답시간 1msec 이하이며, 사용된 마이크로프로세서 Intel 8032 AH, 측정장비 정밀도 0.1msec이다.

6. 시험 결과

타행 시간을 구하기 위해서 자동차 회사에서 사용되고 있는 레이저 거리, 속도, 시간 측정기를 이용하여, 승용차에 대해 얻어진 거리-시간 데이터로부터 새로 개발된 타행법을 적용한 결과 모든 데이터가 한곡선상에 있음을 이미 그림 4

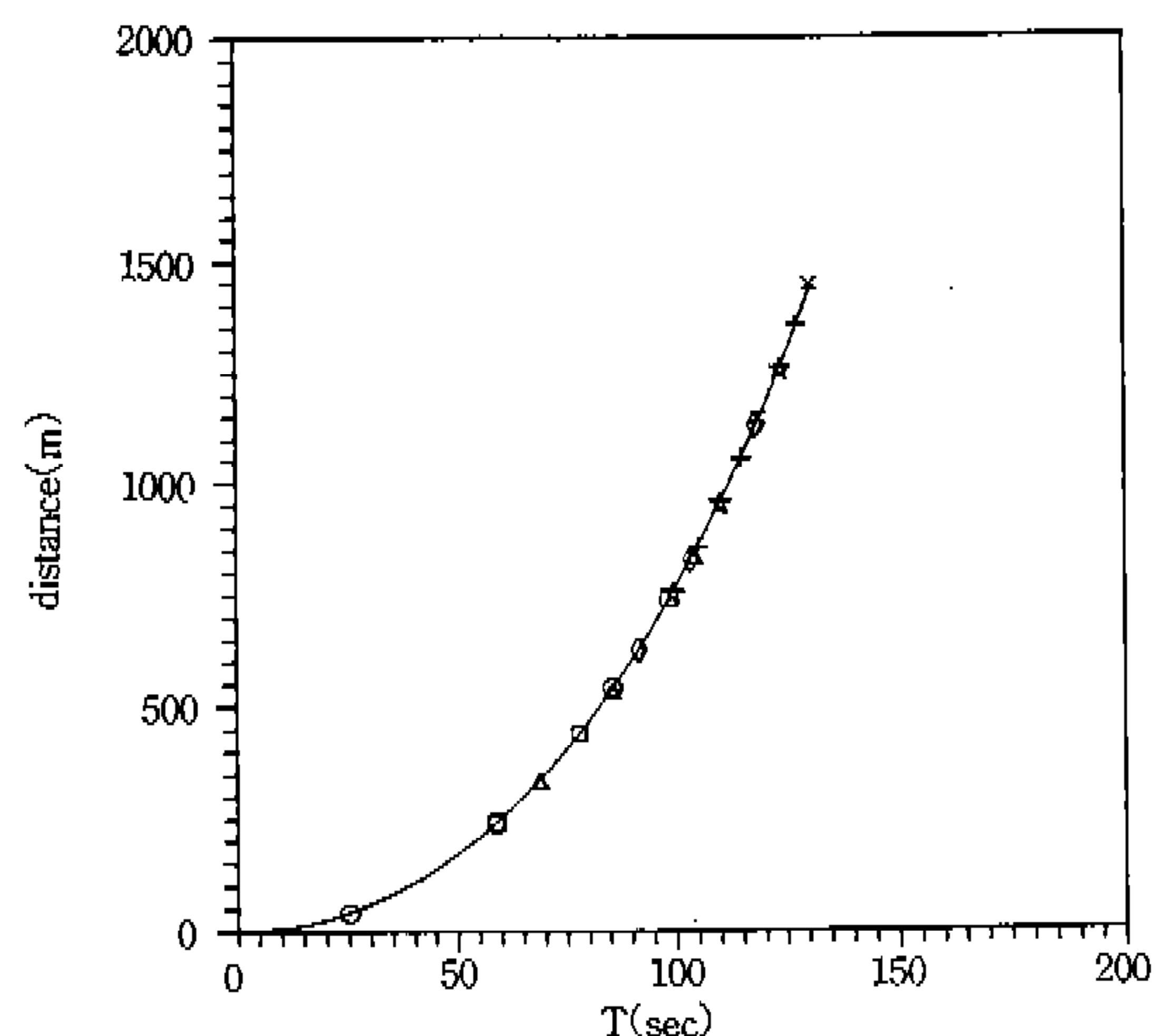


Fig.4 Result of data processing with low & high speed method.
(Each symbol means a four-point data set of 500m distance in Table 1.)

표 2 타행 시험 상태 및 결과

차 종	승용차1	승용차2
무게 변경 정도	8.2%	18.7%
측정거리	600m	600m
항력계수(풍동결과)	0.32	0.32
항력계수(새타행법)	0.320	0.310
데이터 갯수	3개	3개
라디오 안테나	유	부
도로상태	최적의 상태	좌우로 약간 경사 도로에 작은돌 유

시간 데이터만 이용하였으며, 특별히 풍속을 고려하는 계산하지는 않았다. Petrushov 교수는 자동차 무게 변경을 약 10%내외로 하도록 추천하고 있는데¹⁾, 승용차 2는 18.7%로 매우 많이 초과하였으며, 표 2에서 보듯이 도로 상태도 최적의 조건은 아니었다. 항력 계수에 있어서 새로운 단거리 타행법과 풍동 시험 결과를 보면 승용차 1은 완전히 일치하고, 승용차 2는 3.1%의 오차를 보이고 있다. 실험 조건을 고려할 때 매우 만족스러운 결과를 주고 있으나 풍동 실험 자체도 오차가 있을 수 있는 만큼 앞으로 많은 실험을 통해서 새로 제시된 방법을 모든 조건에 대하여 충분히 검증하여야 한다.

그림 5는 자동차 속도에 따라 각각의 저항곡선을 계산한 결과이다. 이 결과는 알려진 데이터와 상당히 잘 일치함을 알 수 있다.

7. 결 론

새로운 단거리 거리-시간 타행법을 개발하여 기존의 장비로 측정된 거리-시간 데이터를 처리한 결과, 저속, 중속, 고속에서 모든 데이터가 한 곡선으로 표시되는 결과를 통하여 새 방법의 타당성을 입증하였으며, 실제 2대의 자동차에 대한 항력 계수 예측을 통하여 매우 우수한 결과를 주고 있음을 확인하였다. 본 방법은 아주 긴 직선 시험주행로와 자동차용 대형 풍동이 없는 국내실정에는 이상적인 방법이며, 또한 트럭 버스 등 대형차량에도 응용가능한 방법이므로 향후 본 방법에 대한 다각적인 검토가 진행되어 널리 사용되기를 기대된다.

후 기

본 연구는 한·러 과학기술 협력센터의 “기계 기술관련 한·러 콘소시움” 사업의 일환으로 과제번호 J02220에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 사의를 표한다. 또한 본 사업의 참여 기업체인 기아자동차, 대우자동차, 현대자동차의 관계자 여러분께도 사의를 표한다.

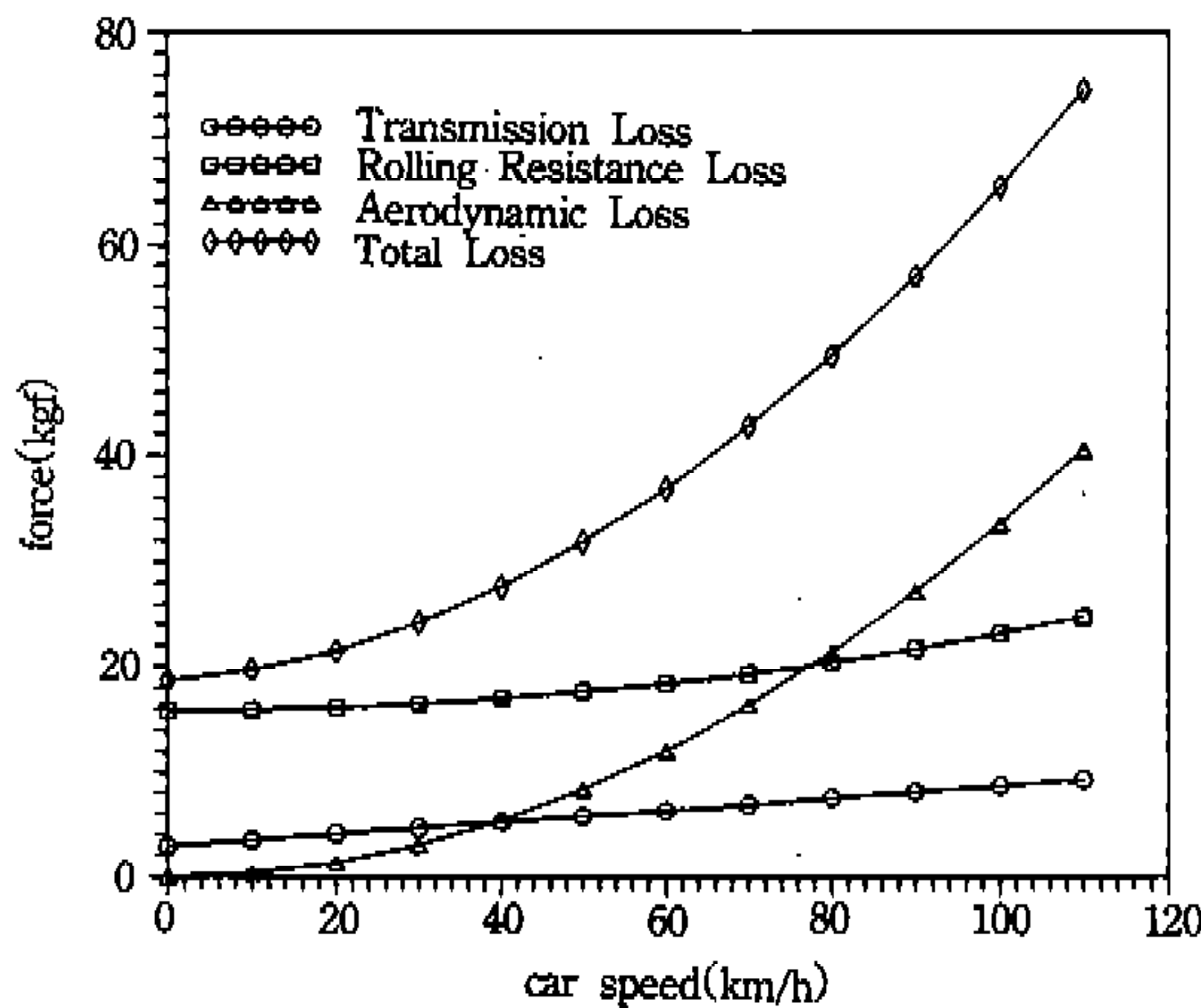


Fig.5 Load distribution of a coast down test car.

에서 보였다. 이 결과는 저속 실험 결과와 고속 실험 결과를 연결하는데 새로 제시된 방법이 타당함을 의미한다.

국내 2개 자동차 회사의 자동차 직선 주행시험로를 사용하여 2대의 차종에 대하여 시험을 실시하였다. 대기상태는 거의 무풍상태인 오전 9시경에 시험을 실시하였으며, 도로 주행시험시 하중을 변경시켰을 때 자동차의 변위를 수정하기 위한 어떠한 장치도 사용하지 않았고, 또한 트랜스미션 시험 때도 자동차 바퀴의 변위를 수정하기 위한 어떠한 장치도 사용하지 않았다.

데이터 처리는 200, 400, 600m 지점의 3개

참 고 문 헌

1. 허남건, 안이기, V.A. Petrushov, “거리·시간 측정에 의한 고정도 타행시험법 : I. 관련 이론 및 정밀도 향상방법 고찰”, 한국자동차 공학회 논문집 제 3 권 제 2 호, pp.51~61, 1995.
2. “EPA recommended practice for determination of vehicle road force”, Attachment I.
3. R.A. White and H.H. Korst, “The determination of vehicle drag contributions from coast-down tests.,” SAE paper 720099.
4. “Road load measurement and dynamometer simulation using coastdown technique”, SAE Recommended Practice, SAE J1263 May 1984.
5. A. Morelli, P.Nuccio and A. Visconti, “Automobile aerodynamic drag on the road compared with wind tunnel tests”, SAE paper 810186.
6. E.M. Evans and P.J. Zemroch. “Measurement of the aerodynamic and rolling resistances of road tanker vehicles from coast-down tests”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Transport Engineering Vol. 198, No.11, pp. 211-218, 1984.
7. V.A. Petrushov, “Improvement of vehicle aerodynamic drag and rolling resistance determination from coast down tests”, private communication, 1984.
8. Russia Patent A.c. SU1150512 A