

〈논 문〉 SAE NO. 953719

## 거리·시간 측정에 의한 고정도 타행시험법 : I. 관련이론 및 정밀도 향상방법 고찰

High-Accuracy Coastdown Test Method by Distance-Time Measurement :  
I. Theoretical Background and Discussions on Accuracy Improvements

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

### ABSTRACT

A coast down test method has been used to determine the resistance forces on running vehicle due to the aerodynamic drag, rolling resistance and driveline resistance. Most of the tests, however, are based on the Velocity-Time measurements, which require a sophisticated velocity measuring device and contain much error by nature. In the present study a coast down test method based on Distance-Time measurements is introduced, which contains the original idea of Russian scientist Prof. Petrushov along with the suggestions for improvement of the accuracy.

주요기술용어 : Coastdown Test(타행 시험), S-T Method(거리-시간 법), Drag Coefficient(항력 계수), Rolling Resistance(구름 저항), Coastdown Time(타행 시간)

### 1. 서 론

타행시험법(Coast Down Test Method)이란 동력없이 자동차를 자유로이 굴러가도록 했을때, 시간에 따른 속도나, 거리의 변화를 측정하여 자동차에 걸리는 힘을 계산하는 방법이다. 이 시험은 배기및 연료 소비율 실험을 수행할때 도로 주행시 자동차에 걸리는 힘을 다이내모미터에 재현하기 위하여 일정한 속도를 감속하는데 필요한 타행시간을 구하기 위해 널리 사용되고 있다.<sup>1)</sup> 또한 이 시험은 실제 자동차의 공기 항력 계수나 바퀴의 구름 저항, 변속기등의 기계적인

저항을 실제 자동차에서 구하기 위한 방법으로도 사용되어 지고 있다.

이러한 타행 시험법에는 두가지 방법이 있으며, 이에는 타행하는 자동차를 어느 시간 마다 속도를 측정하여 최적의 속도식을 얻는 V-T 방법과, 정해진 거리 마다 자동차의 통과 시간을 측정하여 최적의 거리식을 얻는 S-T 방법이 있다. 이 중 최근까지는 S-T 방법보다는 주로 V-T 방법에 의한 항력에 대한 연구가 주로 진행되어 왔다. 즉, White & Korst<sup>2)</sup>는 속도-시간 측정 데이터를 이용하여 처음으로 자동차 공기항력 계수의 측정에 이용 하였고, SAE<sup>3)</sup>에서 바람, 대기 온도,

\* 정희원, 한국과학기술연구원 터보기계연구팀

\*\* 한국과학기술연구원 터보기계연구팀

\*\*\* Aerodynamics Lab., NAMI, RUSSIA

대기 기압 등을 고려한 데이터 처리 방법을 제시하였다. 이후의 연구는 주로 타행시험의 정밀도를 높이기 위한 방향으로 진행되어 왔다. 즉, Morelli, Nuccio & Visconti<sup>4)</sup>는 자동차 가속도 타행식에서 상수항과 속도 제곱항만 있을 때 거리 타행식을 구했으며, 측정된 거리-시간 데이터를 거리 타행식에 맞추고, 롤러 벤치 데이터를 이용하여 풍동 데이터와 잘 일치하는 공기 항력 데이터를 얻었다. Roussillon<sup>5)</sup>은 타행 시험법으로 총 주행 저항을 구하고 롤러 벤치 시험으로 얻어진 구름 저항을 빼서 공기 저항을 구했으며, 경사진 곳에서 자동차가 저속으로 타행할 때 공기 저항을 무시하고 구름저항을 측정하는 방법을 제시하였다. Cha, Sloan & Blace<sup>6)</sup>는 가속도 타행식을 자동차 무게와 속도의 다차 방정식으로 가정하여 측정된 속도-시간 데이터를 맞추는 방식을 사용하였는데, 시험 및 계산이 복잡한 편이다. 속도의 측정에 의한 타행시험 방법은 항상 그 속도의 측정에 오차가 들어가게 되어 그 오차에 인한 측정결과의 정밀도가 상당히 떨어지므로, Youmin<sup>7)</sup>은 속도 타행식에서 초기 속도를 미지수로 하여 속도 타행식에 초기 속도를 미지수로 하여 속도 타행식에 맞추는 기법을 사용함으로써 데이터 처리의 정밀도를 향상시켰다. 또한, Evans & Zemroch<sup>8)</sup>는 거리 타행식에서 3개의 미지수의 비선형성이 크므로 일정 거리 마다 시간을 측정하여 가속도를 유한 차분법으로 계산하는 타행법을 개발하였다. Korst & White<sup>9)</sup>는 구름 마찰 손실에서 속도에 비례 및 속도의 제곱에 비례하는 계수는 타이어 실험 데이터를 쓰면 매우 우수한 공기 항력계수를 얻을 수 있음을 보여 주고 있다. Passmore & Jenkins<sup>10)</sup>는 일정 시간 마다 자동차 속도, 구동축 토크, 바람 방향 및 속도를 측정하고 풍동 데이터를 활용하여 속도 타행식에 맞추는 방식인데 순간 바람의 변화를 고려하고, 구동축의 손실을 직접 측정하는 방식을 채택함으로써 정밀도는 향상시켰으나 사용에는 불편한 점이 있다. 일본 자동차 기술회는 총 주행 저항 측정 개념에서 100m 또는 200m 시험 구간내에서 통과 시간을 측정 방식을 채택하고 있다.<sup>11)</sup>

지금까지 설명한 타행 시험법은 총저항을 각

종류별로 분리하는데 효과적이지 못했으나, Petrushov<sup>12, 13)</sup>는 총저항 중에 작은 부분을 차지 하는 구동축 저항은 단독으로 실시하여 정밀도를 높이고, 거리-시간 타행시험법을 사용하여 속도에 제곱에 비례하는 항에서 구름 마찰 저항과 공기 항력 저항은 자동차 무게를 달리하는 시험을 통하여 분리함으로써 항공용 풍동 실험값과 잘 일치하는 공기항력 계수를 구했으며, 구름 마찰 저항도 매우 좋은 결과를 주고 있다.

공기항력 계수의 측정/예측에는 크게 세가지 방법이 널리 쓰이고 있으며, 이는 풍동 실험과 수치계산과 타행시험에 의한 방법이 그것이다. 풍동 실험은 보편적으로 많이 사용되고 있으나, 조건이 실제로 자동차가 달리는 것과는 다르며 버스나 트럭 실차를 실험하려면 초대형 풍동이 필요하고, 모델차 풍동 실험시 공력 데이터에 상당한 오차를 보여 주고 있다.<sup>13, 14)</sup> 특히 주행시 도로조건을 풍동에서 정확히 처리하기가 어려우며 시험 비용이 많이 드나, 6분력 측정이 가능하고, 유동 관련 실험이 용이하며, 외란이 적고, 가장 신뢰할 수 있는 실험치를 주기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 또한 수치해석에 의한 방법은 최근의 컴퓨터의 발달과 수치해석 방법의 발전으로 연구가 활발히 진행되어 지고 있으며 자동차의 개념설계 단계에서 간단히 정성적인 경향을 이해하여 설계변경등에 이용하고는 있으나 난류 모델링 등의 문제로 실제 실험치와는 상당히 다른 값을 주기 때문에 실차의 항력예측에는 많이 사용되지 않고 있다. 타이어의 구름 마찰 계수를 얻기 위하여는 롤러 벤치에서 실험을 수행하고 있으나, 실제 도로의 조건과 롤러 드럼의 조건이 같지 않고, 또한 현가장치의 조건이 서로 같지 않기 때문에 그 결과가 실제 주행 상태에서 실험한 결과와는 상당한 차이가 있다. 타행 시험법은 자동차가 주행하는 실제상태로, 공기 항력과 바퀴 및 현가 시스템의 저항과 구동축의 저항을 동시에 측정하여 분리하는 방법이므로 각각의 독립된 측정방법으로 얻은 시험 데이터보다 자동차 주행 특성 연구에는 더 실질적인 것으로 생각된다. 본 논문에서는 새로히 각광을 받고 있는 S-T 방법의 타행시험법에 관한 관련

이론에 대하여 다음절에서 설명하고, 앞으로 다음 연구자의 향후 연구를 위하여 1년 동안의 연구 수행 경험을 바탕으로, S-T 타행법의 장·단점과 정밀도의 향상방법에 대해 제안하였다.

## 2. 타행시험 관련이론

### 2.1 타행 운동 방정식

자동차에 작용하는 각종 항력은 타이어의 구름 저항( $D_R$ ), 트랜스미션 등 구동축의 저항( $D_T$ ), 공기 항력( $D_a$ ) 등이 있으며 이 항력들에 의해 타행 시험 중인 자동차는 감속되어 정지하게 된다. 이 경우의 자동차의 운동방정식은 뉴턴의 제2법칙에 따라 아래와 같이 표현할 수 있다.

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

여기서

$$f = \frac{(nI_w + I_d)g}{WR^2}$$

$n$  : 바퀴의 총수

$I_w$  : 바퀴 한개의 관성 모멘트

$I_d$  : 바퀴를 제외한 동력 전달부 관성 모멘트

$R$  : 바퀴의 동하중 반경

$W$  : 자동차 무게(단위: kg중)

이며, 아래에서 각 항력을 모델링하는 방법을 설명하고자 한다.

먼저, 자동차에 작용하는 공기 역학적인 항력은 공기와 자동차 표면간의 점성 때문에 생기는 표면 마찰 항력과, 자동차 후미에서 흐름이 부착되지 못하고 박리되어 큰 후류영역이 형성되어 자동차 후미의 압력이 회복되지 못하기 때문에 생기는 압력 항력으로 나눌 수 있다. 그러나 일반적으로 압력에 의한 항력이 마찰항력보다 크기 때문에, 공기 항력 계수 정의시 특성 면적은 전면 면적이 되고, 항력 계수는 자동차 길이를 기준으로한 레이놀즈수가  $Re = 4 * 10^6$  이상일때(승용차일 경우 약 30km/h 이상) 공기 항력 계수는 일정하다고

가정할 수 있어서 아래와 같이 공기 항력을 표현할 수 있다.<sup>15)</sup>

$$D_a = FC_d \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2)$$

여기서

$F$  : 자동차 전면 면적

$C_d$  : 항력 계수

$\rho$  : 공기 밀도

$V$  : 자동차 속도

로 정의된다.

변속기 및 동력 전달 장치에 의한 손실은 점성 댐핑과 쿨롱 댐핑(coulomb damping)으로 나눌 수 있는데, 점성 댐핑은 속도에 비례하게 되고 쿨롱 댐핑은(coulomb damping) 속도에 무관함으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$D_T = W(\tau_0 + bV) \quad (3)$$

여기서  $W$ 는 자동차의 무게이다.

타이어의 구름에 의한 구름 마찰 손실은 저속에서 속도에 무관하게 거의 일정하나 고속이 되면 속도의 영향이 크게 발생됨으로 속도의 제곱항으로 속도의 영향을 고려하였다. 그런데 공기 항력 계수나 변속기 및 동력 전달 장치 관련 계수는 자동차가 변형만 되지 않으면 차량의 하중에 무관하나 구름 마찰 계수는 차량의 무게가 증가하면 타이어의 온도가 증가하여 결국 구름 마찰 관련 계수가 자동차 무게의 영향을 아주 미약하게 받게 된다.

$$D_R = W(f_0 + kV^2) \quad (4)$$

식 (2)-(4)를 식(1)에 대입하여 정리하면 아래와 같은 타행식을 얻게 된다.

$$-\frac{\delta}{g} \frac{dV}{dt} a + bV + cV^2 \quad (5)$$

여기서



$$\delta = 1 + f, \quad a = \tau_0 + f_0, \quad b = b, \quad c = k + \frac{\rho C_d F}{2W} \quad (6)$$

자동차가 타행할때 초기조건  $t=0$ 에서  $V=V_i$ 에 대하여 타행식(5)를 적분하면

$$\int_0^t dt = \int_{V_i}^V \frac{\delta}{g} \frac{-1}{a + bV + cV^2} dV$$

$$t = \frac{2\delta}{gA} \left[ -\tan^{-1} \frac{2cV + b}{A} + \tan^{-1} \frac{2cV_i + b}{A} \right] \quad (7)$$

여기서  $A = \sqrt{4ac - b^2}$ 이다.

윗식<sup>7)</sup>는 속도-시간 타행법의 기본식으로, 통상의 속도-시간 타행법은  $b$ 를 무시하고( $b$ 는 구동축 손실에 관련되는 변수로 구동축 손실이 여타 손실에 비하여 작기때문에 도로 시험에서 분리하기는 매우 어려우며,<sup>9)</sup> 측정된 속도 데이터에서 미지수  $a, b, c$ 를 동시에 계산하려는 물리적으로 상반되는 음수의  $b$ 가 발생되어서  $b$ 를 무시하는 것으로 사료됨), 속도-시간 측정 데이터에 가장 근접한 미지수  $a, c$ 를 최소 자승법으로 구한다.<sup>1)</sup> <sup>3)</sup> 다른 한편으로 초기 속도 측정 오차에 따른 영향을 줄이고자, 초기 속도  $V_i$ 는 미지수로하여 최소 자승법으로 미지수를 구하기도 한다.<sup>7)</sup>

이러한 V-T 타행법은 바람의 영향을 고려하기가 비교적 쉽고,<sup>16, 17)</sup> 측정방법, 수식, 계산면에서 비교적 간단한 방법이나, 측정 장비가 너무 커서 유동 자체를 교란하며, 속도 측정 장비가 고가이며, 공기 항력 계수를 예측하는데에는 속도 측정의 오차 때문에 아직까지 신뢰성이 부족한 편이다. 그러나, S-T 타행법은 약간의 항력 계수의 변화가 있을때(항력 계수는 가속도항의 계수에 해당되고, 속도는 가속도의 적분, 거리는 속도의 적분으로 얻어짐) 속도보다 거리가 더 민감하게 변하며(그림 1 참조), 정해진 거리를 자동차가 타행할때 속도 변화 측정 보다 통과 시간 측정을 더 정밀하게 할 수가 있으므로 더 정확한 측정 값을 줄 수 있을 것이다.

자동차가 타행하여 완전 정지할 때까지의 타행식은, 임의의  $t$ 와  $V$ 로부터  $t=T$ 일때  $V=0$ 까지, 즉 자동차가 정지할때 까지에 대하여 적분하여

다음 식과 같이 되며,

$$\int_{V_i}^T dt = \int_{V_i}^0 \frac{\delta}{g} \frac{-1}{a + bV + cV^2} dV \quad (8)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = V(t) = \frac{\delta}{gc} [B \tan(\tan^{-1}(h/B) + B(T-t)) - h]$$

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

자동차가 타행하여  $t$ 시간 동안 진행한 거리  $S(t)$ 는 식(8)을 한번 더 적분하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\int_0^{S(t)} dS = \int_{0gc}^t \frac{\delta}{gc} [B \tan(\tan^{-1}(h/B) + B(T-t)) - h] dt$$

$$S(t) = \frac{\delta}{gc} \left[ \ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B) + B(T-t))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT)} - ht \right] \quad (9)$$

윗식으로 부터 자동차가 T시간후 정지할때

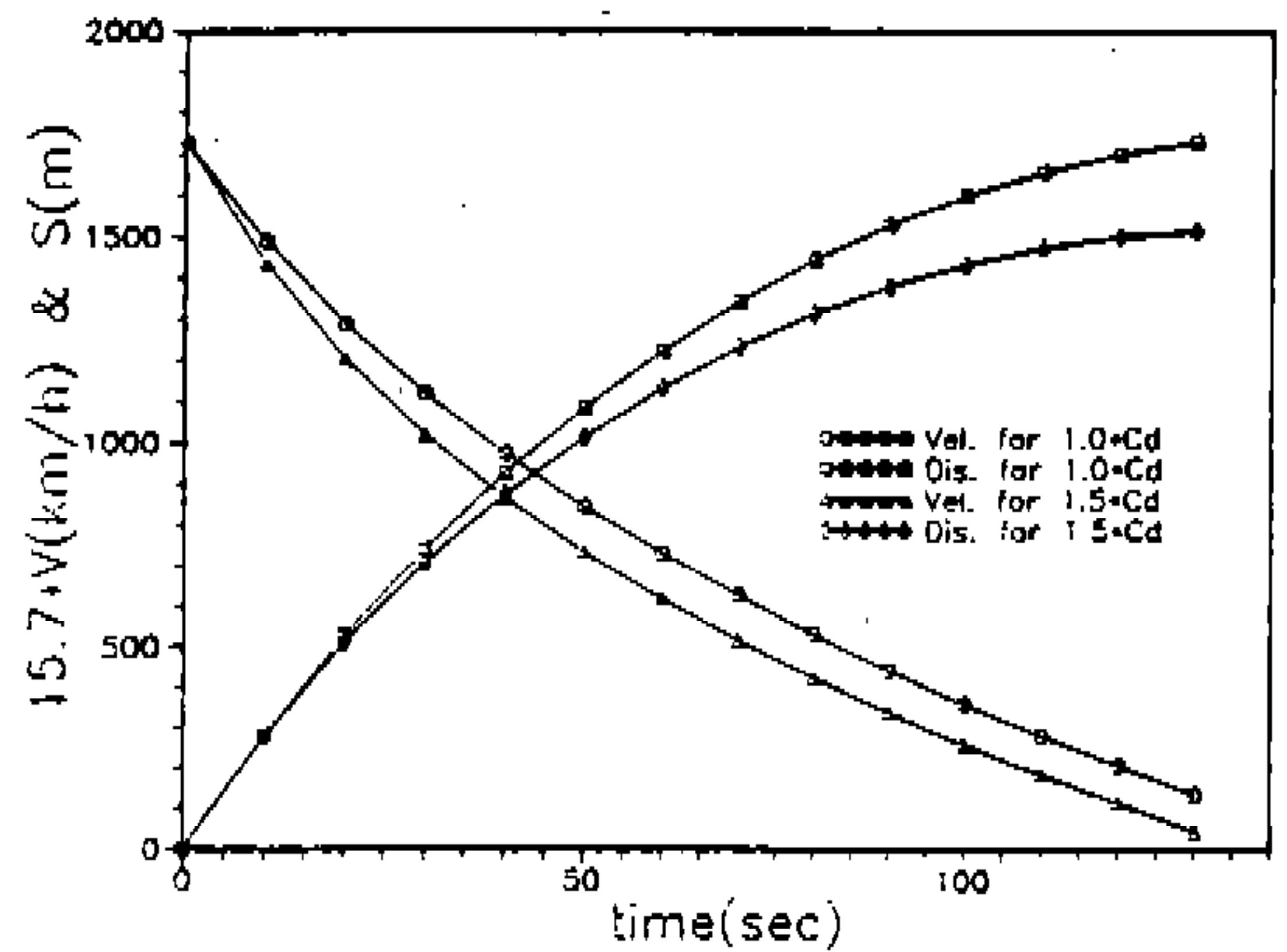


Fig.1 Comparison of sensitivity for "V-T" & "S-T" methods.

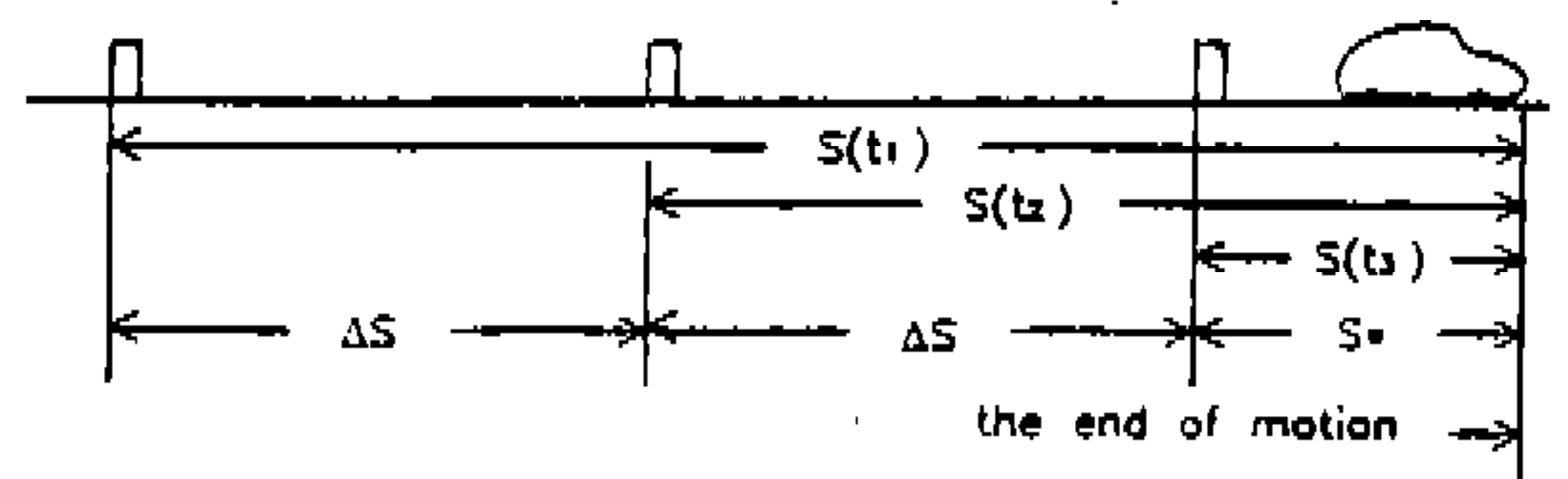


Fig.2 Time measurement positions for a long distance S-T method.

까지 타행한 거리는 아래식이 되며, 이식이 S-T 방법의 기본식이 된다.

$$S(T) = \frac{\delta}{gc} \left[ \ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT)} - hT \right] \quad (10)$$

위의 식을 사용하여 러시아의 Petrushov 교수는 그림 2에 나타난대로 3점의 거리-시간 데이터를 측정하여, 다음과 같이 3개의 식을 얻고

$$S(T_1) = 2\Delta S + S^*$$

$$= \frac{\delta}{gc} \left[ \ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_1)} - hT_1 \right]$$

$$S(T_2) = \Delta S + S^*$$

$$= \frac{\delta}{gc} \left[ \ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_2)} - hT_2 \right]$$

$$S(T_3) = S^*$$

$$= \frac{\delta}{gc} \left[ \ln \frac{\cos(\tan^{-1}(h/B))}{\cos(\tan^{-1}(h/B) + BT_3)} - hT_3 \right] \quad (11)$$

h는 다음에 설명하는 구동축의 타행시험으로부터 구하고 식(11)으로부터 S\*를 소거하여 B와 c를 구하고,

$$a = \frac{\delta^2}{g^2 c} (B^2 + h^2) \quad (12)$$

에 의하여 a를 구하여 타행식의 각각의 항의 계수를 모두 구하게 된다. 이 후에는 c의 값으로부터 구름저항계수와 공기항력계수의 분리만 이루어 지면 구하고자 하는 모든 값을 알게 되는 것이다.

앞에서 설명한 대로 먼저 구동축의 타행시험으로부터 b값을 얻어야 다른 계수들을 결정할 수 있으므로, 그 방법을 설명하면 다음과 같다.

즉, 자동차 전체의 타행식에서 바퀴 부분만 남기면

$$-\frac{\delta_0}{g} \frac{dV}{dt} = \tau_0 + bV \quad (13)$$

여기서  $\delta_0 = \frac{(mI_w + I_d)g}{WR^2}$ 으로 정의되며, m은 구동 바퀴의 총수이다.

자동차의 타행때와 같이 자동차 구동축과 바퀴가 타행할때에 대하여 적분하면 다음과 같은 관계식을 얻으며,

$$\int_t^T dt = \int_{v(t)}^0 \left( -\frac{\delta_0}{g} \frac{1}{\tau_0 + bV} \right) dV$$

$$V(t) = \frac{dS(t)}{dt} = \frac{\tau_0}{b} [e^{(T-t)h_0} - 1] \quad (14)$$

여기서  $h_0 = \frac{gb}{\delta_0}$ 이며, 바퀴만 타행시 t시간 동안 타행한 거리 S(t) 계산은 아래와 같다.

$$\int_0^{s(t)} ds = \int_0^t \frac{\tau_0}{b} [e^{(T-t)h_0} - 1] dt$$

$$S(t) = \frac{\tau_0}{b} \left[ \frac{-e^{(T-t)h_0} + e^{Th_0}}{h_0} T \right] \quad (15)$$

바퀴가 T시간후 정지할때 까지 타행한 거리는 아래식이 되며, 이식이 바퀴의 타행 실험의 기본식이 된다.

$$S(T) = \frac{\tau_0}{b} \left[ \frac{e^{Th_0} - 1}{h_0} - T \right] \quad (16)$$

도로에서의 타행 방법과 같이 타행 시작에서 부터 바퀴가 정지할때까지의 3개의 시간-거리 데이터를 측정하여 대입하면 3개의 아래식을 얻을 수 있다.

$$S(T_1) = 2\Delta S + S^* = \frac{\tau_0}{b} \left[ \frac{e^{h_0 T_1} - 1}{h_0} - T_1 \right]$$

$$S(T_2) = \Delta S + S^* = \frac{\tau_0}{b} \left[ \frac{e^{h_0 T_2} - 1}{h_0} - T_2 \right] \quad (17)$$

$$S(T_3) = S^* = \frac{\tau_0}{b} \left[ \frac{e^{h_0 T_3} - 1}{h_0} - T_3 \right]$$

윗식과  $b = \frac{h_0 \delta_0}{g}$  관계식으로 부터 미지수  $h_0$ ,  $\tau_0$ ,  $b$ 를 얻을 수 있으며, 이 값들은 자동차의 타행 시험에서 공기항력계수와 구름저항계수들을 구하는데 사용된다.

## 2.2 공기 항력 계수와 구름 마찰 손실 계수의 분리

전술한 바와 같이 타행 시험법을 통하여 얻는 값은 아래와 같이 공기 항력 계수와 구름 마찰 계수가 함께 포함된 값이다.

$$c_i(W) = k + \frac{\rho F C_d}{2W} \quad (18)$$

여기서 자동차의 공기항력은 자동차의 무게에 무관하고 구름저항은 무게에 비례한다는 사실로부터(윗식중  $k$ 는 자동차 무게에 무관하고,  $C_d$  관련항에는 자동차 무게의 변수가 있음), 자동차 하중을 달리하여 2번 실험하면 공기항력 계수와 구름 마찰 손실 계수를 분리할 수 있다. 이것이 본 타행시험법의 핵심이라고 할 수 있다. 사실 하중을 변화시키면 타행시 타이어의 온도가 변화하기 때문에, 구름 마찰 계수가 하중 변화에 아주 미약한 영향을 받으므로 정밀한 실험을 위해서는 하중과 구름 마찰 손실 계수 사이의 관계식이 필요하다. 또한 정밀 시험을 위하여 자동차 무게를 많이 변화시키면 공기 역학적인 형상이 많이 변하므로, 자동차 무게는 약 10% 정도 변화시키고, 무게 변화시 자동차 형상이 변화되지 않도록 완충 장치의 스프링에 고정 장치를 설치하면 더 정확한 실험 결과를 기대할 수 있다고 생각된다.

## 2.3 타행 시험법으로 얻어지는 결과

타행 시험을 통하여 미지수가 구해지면 아래와 같이 공기항력계수, 시간에 따른 자동차의 운동,

타행시간, 각각의 저항값, 총저항 및 소요동력 등을 구할 수 있다.

$$\text{- 공기항력 } C_x = \frac{2W_1}{\rho F} (C_i(W_1)) - k_1(W_1) \quad (19)$$

- T시간 후 자동차가 정지할 경우 초기 자동차 속도

$$V = \frac{\delta}{gc} \left[ B \tan(\arctg(\frac{h}{B}) + BT) - h \right] \quad (20)$$

- Coastdown Time(속도  $V_1$ 에서  $V_2$ 가 될때까지 걸리는 타행시간)

$$t_{12} = \frac{2\delta}{gA} \left[ \arctg(\frac{2cV_1 + b}{A}) - \arctg(\frac{2cV_2 + b}{A}) \right] \quad (21)$$

$$\text{- 구동축 저항 } D_T = W(\tau_0 + bV) \quad (22)$$

$$\text{- 구름저항 } D_{R1} = W_1(f_{01} + k_1V^2) \quad D_{R2} = W_2(f_{02} + k_2V^2) \quad (23)$$

$$\text{- 공기 저항 } D_a = C_d \frac{1}{2} \rho V^2 F \quad (24)$$

$$\text{- 총 저항 } D = D_T + D_R + D_a \quad (25)$$

$$\text{- 소요동력 Power} = (D_T + D_R + D_a)V \quad (26)$$

## 3. S-T 타행법의 신뢰성 검토

S-T 방법으로 얻어진 결과의 신뢰성을 점검하려면, 기존의 대형 풍동에서 실험한 실차의 항력 계수를 비교하거나 실차 형상이 약간 변경이 되었을때 항력 계수의 변화 민감도를 보면 된다. 이를 위하여 많은 수의 시험이 Russia의 NAMI 연구소에서 행해졌으며 이는 참고문헌 (18)에 잘 정리되어 있으며 본 논문에서는 그 결과중 일부를 발췌하여 설명하고자 한다.

Volzhsky Motor Works(VAZ) 자동차용 풍동과

Table 1 Comparison of technique sensitivity for the S-T coastdown test and the aeronautical Wind Tunnel T-104 TsAGI by the way of example Moskvich-2140 Cx measurements.

N	completeness (step-by-step furnishing elements)	Cx (in road conditions) 1)		$\frac{Cx - Cx1}{Cx1}$ (%)	$\bar{C}_w$ (in wind tunnel) 2)		$\frac{ \bar{C}_w - Cw1 }{\bar{C}_w}$ (%)	$\frac{ \bar{C}_x - \bar{C}_w }{\bar{C}_w}$ (%)
		mean	error		mean	error		
1	Original	0.571	0.012	- 0.0	0.568	0.015	- 0.0	0.5
2	Linings of pillars body front	0.549	0.019	- 3.9	0.565	0.014	- 0.5	-2.8
3	Flat wheel caps	0.545	0.006	- 4.6	0.564 3)	0.014	- 0.7	-3.4
4	Front spoiler	0.519	0.007	- 9.1	0.539 3)	0.014	- 5.1	-3.7
5	Rear spoiler	0.491	0.007	-13.4	0.500	0.013	-12.0	-1.8

Notes : 1) 6-fold measurements for each configuration

2) 10-fold measurements for original configuration only

3) without linings of body front pillars

Central Aerohydrodynamic Institute(TsAGI) 항공용 풍동(시험단면 면적 : 38.5m<sup>2</sup>)을 이용한 실험과, 전술한 거리-시간 방법을 사용한 시험의 결과를 표1에 나타내었다. TsAGI 풍동은 경계층을 없애고, 유도된 유선이 자동차 타행시에 비슷한 형태가 되도록 하는 도로모사 스크린(road imitation screen)을 설치하여 실험하였으며, 레이놀즈 수 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup>정도에 대한 실차 실험을 행하였다. 도로 시험법은 러시아의 자동차 연구소(NAMI)의 자동차 종합 시험장(직선로 5km)에서 행해졌다. 표1은 Moskvich-2140 자동차에 대하여 필러, 휠갭, 전후 스포일러 등이 있을때 항력 계수의 변화 정도를 TsAGI 항공용 풍동의 실험 결과와 비교한 것이다. 타행법에서 얻은 항력 계수변화가 미소한 자동차 형상 변화를 감지하고 있음을 잘 보여 주고 있으며, 특히 항력 계수에 있어서는 매우 잘 맞음을 알 수가 있다.

그림3에는 항공용 풍동, 자동차용 풍동, 도로 시험법 등에서 얻은 항력 계수의 결과가 나타나

있는데, 일차식으로 표시하여 보면 도로 시험법 결과는, 항공용 풍동 시험결과와는 약 2% 내외의 오차로 같고, 자동차용 풍동의 결과보다는 약 3-4% 내외의 오차로 약 10% 정도 크다. 앞에서 언급했듯이 항공용 풍동은 경계층 및 유선의 방향을 고려한 결과로 여겨지나 많은 데이터가 실험되어 얻어진 결과인 만큼 앞으로 면밀히 검토할 문제로 여겨진다.

$$C_x = \bar{C}_w \pm 2\%, C_x = 1.1 C_w \begin{matrix} +4\% \\ -3\% \end{matrix} \quad (27)$$

그림 4에는 실차의 도로 시험 결과와 풍동에서 스케일 모델 결과를 나타낸 것이다. 여기서 두 계수 사이의 상관관계는 다음과 같다.

$$C_x = 0.9^8 \sqrt{C_d^5} \pm 0.11 \quad (28)$$

그림은 도로에서 실차 시험법의 결과와 풍동



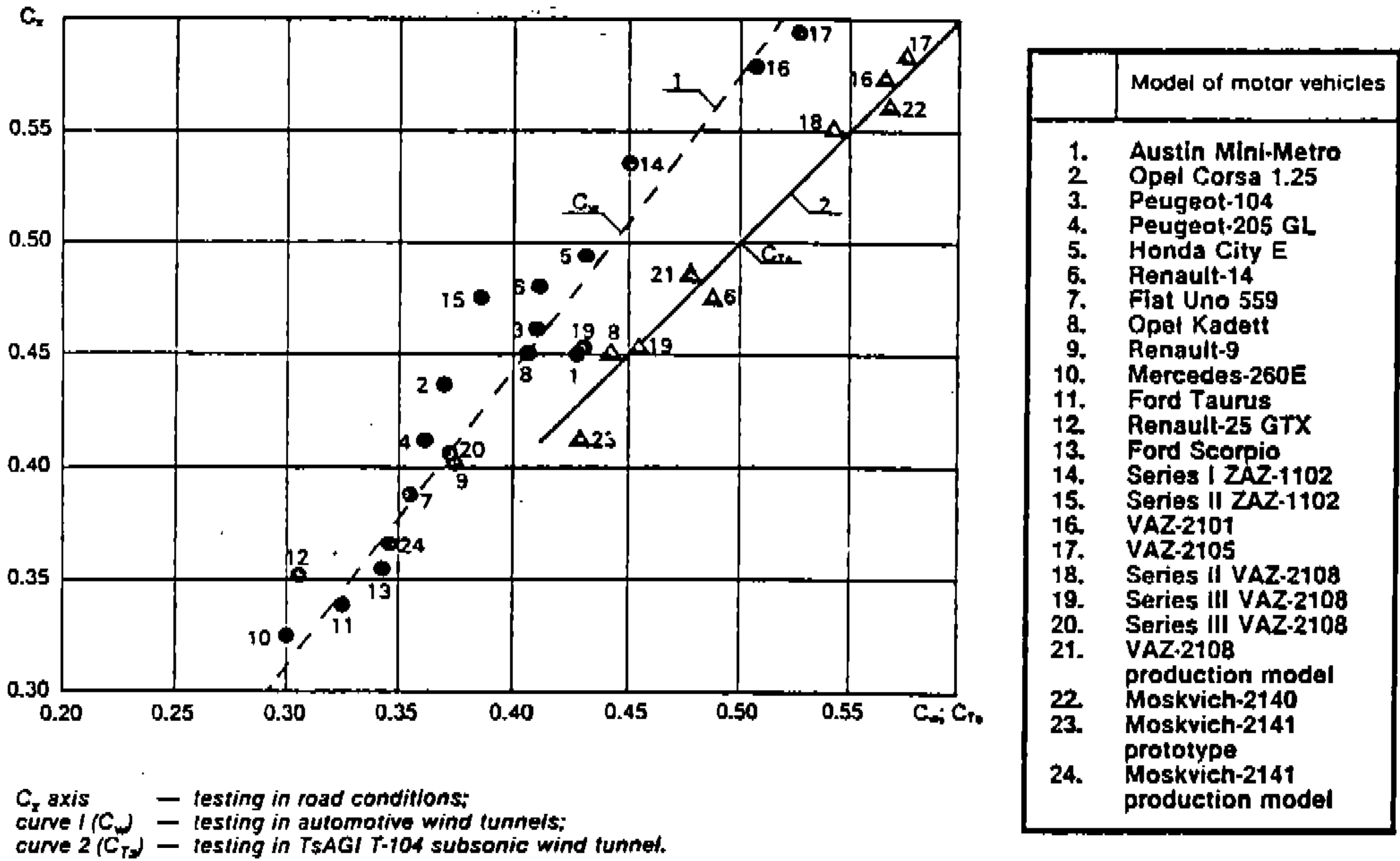


Fig.3 Correlations between aerodynamic drag coefficients of cars in road conditions  $C_x$  and in wind tunnels  $C_w$ .

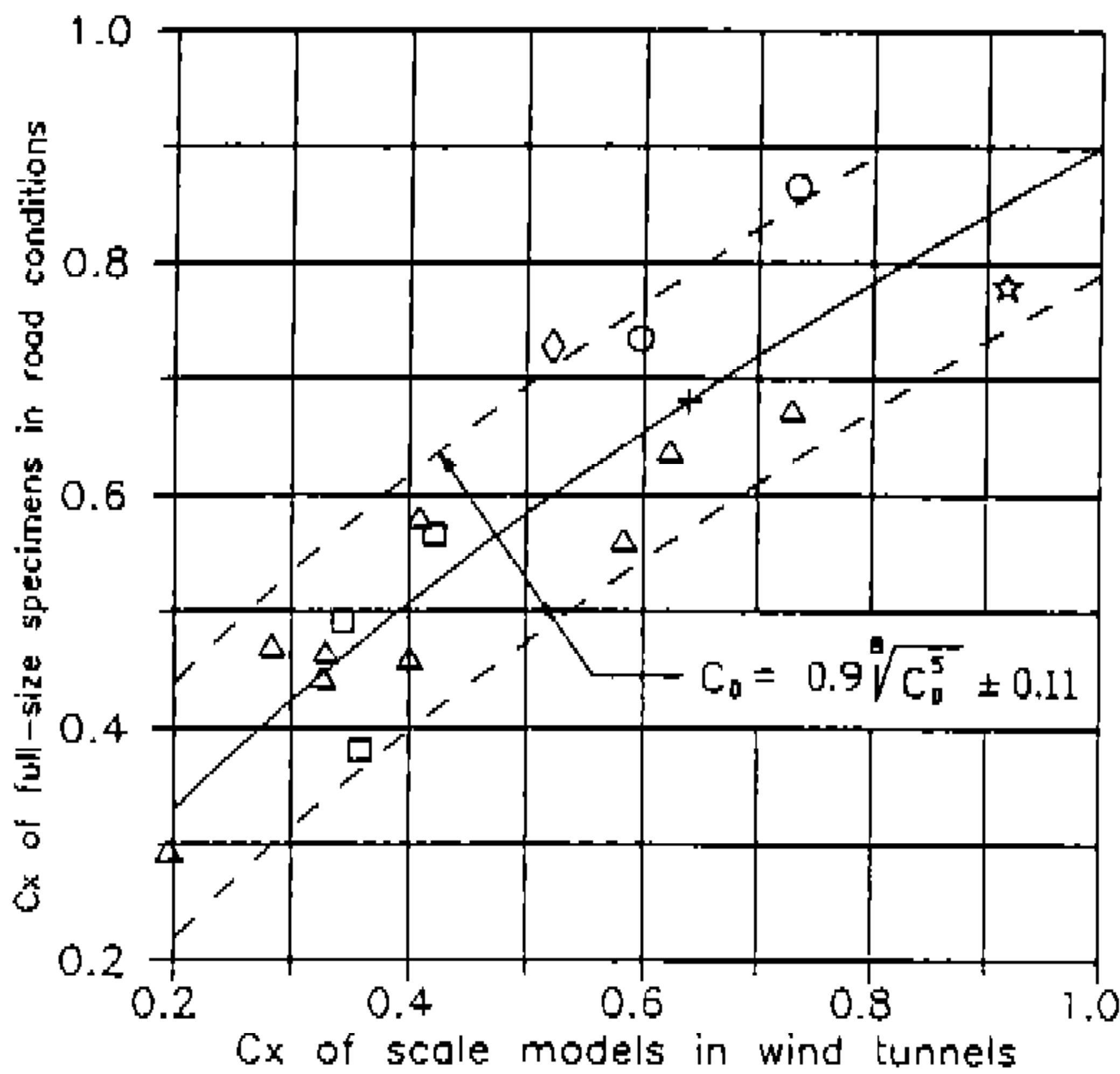


Fig.4 Correlations between aerodynamic drag coefficients  $C_x$  of full-size vehicle and  $C_d$  of their scale models. (Scale :  $\circ$  1 : 2 ;  $\square$  1 : 4 ;  $\triangle$  1 : 5 ;  $\diamond$  1 : 7 ;  $\star$  1 : 8 ; + 1 : 10)

에서 스케일 모델 시험 사이에 많은 차이가 있음을 보여 주고 있는데, 이는 크기 변화의 영향이 고려된 유사한 실험이 어렵다는 것을 의미 한다.

식(28)은 항력 계수에 있어서 0.11 정도의 오차 범위내에서 상관관계의 식이기 때문에 실제적으로는 이용될 수 없는 식이다.

지금까지의 결과로 보아 공기 항력 계수는 현재까지 타측정 방법과 경쟁할 수 있는 수준의 결과를 주었으며, 특히 대형 버스나 트럭인 경우는 기존의 방법으로는 측정이 불가능하기 때문에, 도로 S-T 타행법이 유일한 대안이라고 여겨진다.

#### 4. 정밀도 향상방법 고찰

기존의 실차에 대한 공기항력 측정방법은 대형 자동차용 풍동이 없는 국내실정으로 대부분 외국에 의존해야 하기 때문에 장기간의 소요, 디자인 정보 누출, 과도한 경비 지출등 많은 문제성을 갖고 있는데 반하여, 새로운 S-T 타행법은 기존의 여타 측정 방법과 견줄 수 있는 수준의 결과를 주고 있고, 국내 기존 시설로의 시험이 가능하므로 앞으로 국내 실정에 맞게 개발하면 유용하게 사용할 수 있으므로, 1년 동안의 연구 경험을 바탕으로 앞으로 연구자에게 도움을 주



고자, 여기에 그 측정방법 향상 및 정밀도 향상 방법에 대해 고찰하고자 한다.

#### 4.1 지배 방정식

자동차가 타행할때 걸리는 손실은 공기항력 손실, 구름 마찰 손실, 트랜스 미션 손실(구동축 손실)로 크게 3부분으로 나누고 있으나 대부분의 사람이 공기 항력 손실에 대해서는 일치된 견해를 가지고 있으나, 구름 마찰 손실, 트랜스 미션 손실 등에 대해서는 측정 속도 구간이나 측정 방법 및 데이터 처리 방법 등에 따라 약간씩 차이를 보이고 있으므로 심도 있는 고찰이 있는 년후에 지배 방정식을 결정함이 바람직하다.

#### 4.2 새로운 측정법 개발을 위한 기본 개념

S-T 타행 시험법의 기본식은 식(10)이다. 만약에 오차를 포함하지 않은 시험구간내 거리, 시간 데이터를 3세트 이상만 갖고 있다면 정확한 미지수 a, b, c를 구할 수 있다. 그러나 측정 속도 구간에 따라 각각 손실이 차지하는 비율이 다르게 나타나기 때문에(그림 5참조) 각손실의 노이즈 레벨이 달라서 일부 손실은 시험 노이즈 레벨보다 작을때도 있으며, 또한 거리, 시간 계측에 기본적으로 오차를 갖고 있다.

기본적으로 각종 손실의 민감도 및 요구정밀도를 고려하여 거리 및 시간 측정에 합당한 장비를

사용하여야 하며, 실험 조건내에서 가능한한 상대적으로 손실의 비율이 큰 영역에서 시험을 수행하고 관련 미지수를 구하여야 한다.

예를 들어 트랜스 미션 손실(구동축 손실)과 관련이 있는 b를 구할때, 도로 시험에서는 노이즈 레벨 수준이어서 따로 분리하여, 여타 실험에서 가져온다.<sup>9)</sup>

#### 4.3 단거리 측정법 개발

러시아의 측정법은 약 2km 정도의 시험구간이 필요한데, 국내에는 이정도 되는 직선 주행로를 자동차 3사가 보유하고 있지 않으므로, 자동차가 완전히 정지하는 데까지의 시간을 측정하는 방법(장거리 방법)보다는 짧은 거리에서 측정할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 장거리 방법은 항력 계수가 일정하다는 가정이 깨지는 초저속 구간을 포함할 뿐 아니라 자동차 정지의 판단을 사람이 함으로 오차가 포함될 여지가 있는 방법인 만큼 단거리 방법으로 보완되면 측정오차가 많이 줄어들 수 있을 것이다. 이 경우 여러번의 실험으로 인한 중첩법을 사용한다면 가능할 것이며, 수학적으로는 미지수가 3개가 되므로 3개 이상의 구간에서 시간을 측정하면 될 것이다. 또한 단거리 측정을 수행하면 시험 구간 동안은 단지 고속, 중속, 저속중 단지 좁은 속도 영역에서만 실험하게 되는 만큼 각 실험 속도 구간을 잘

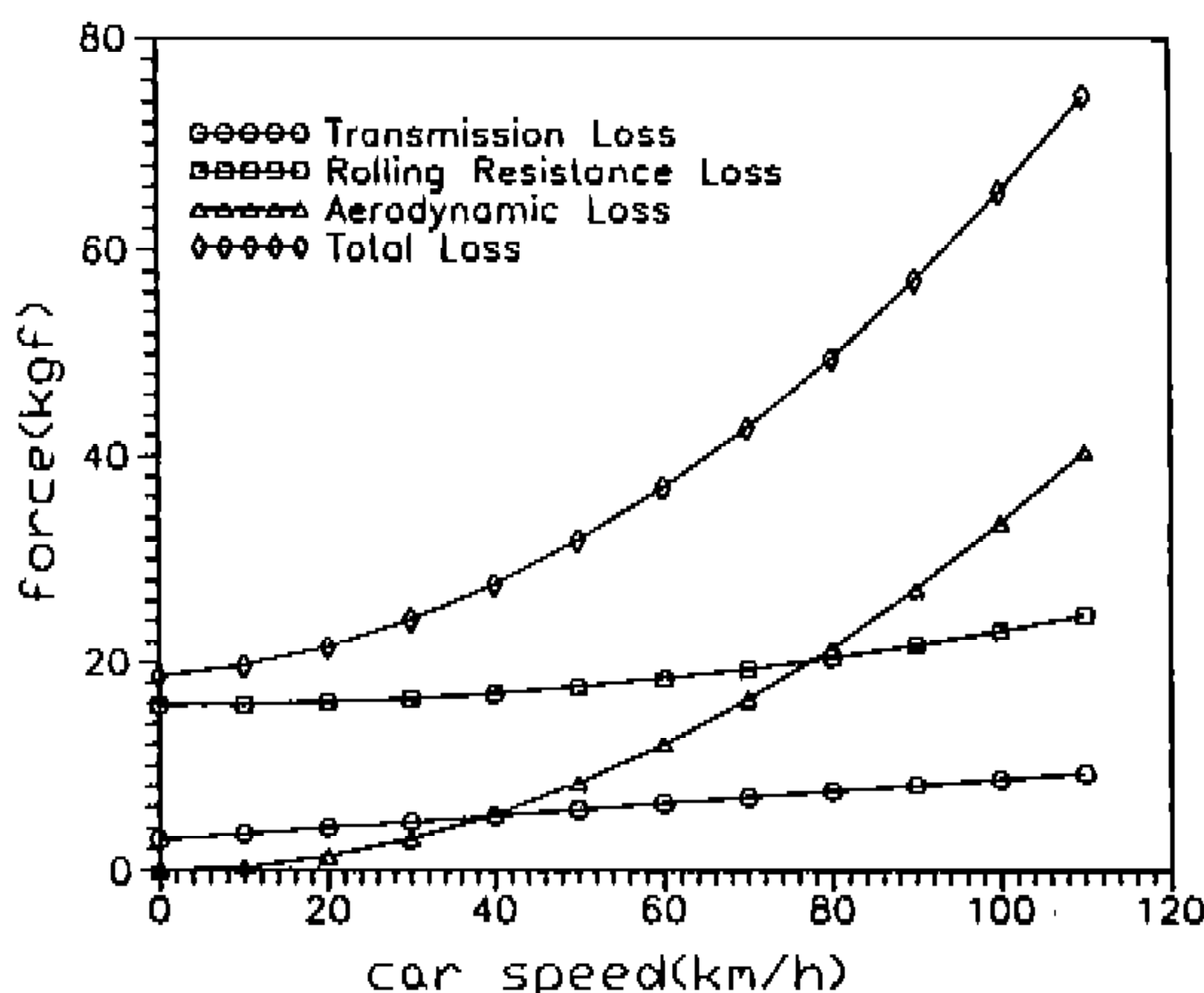


Fig.5 Load distribution of a coast down test car.

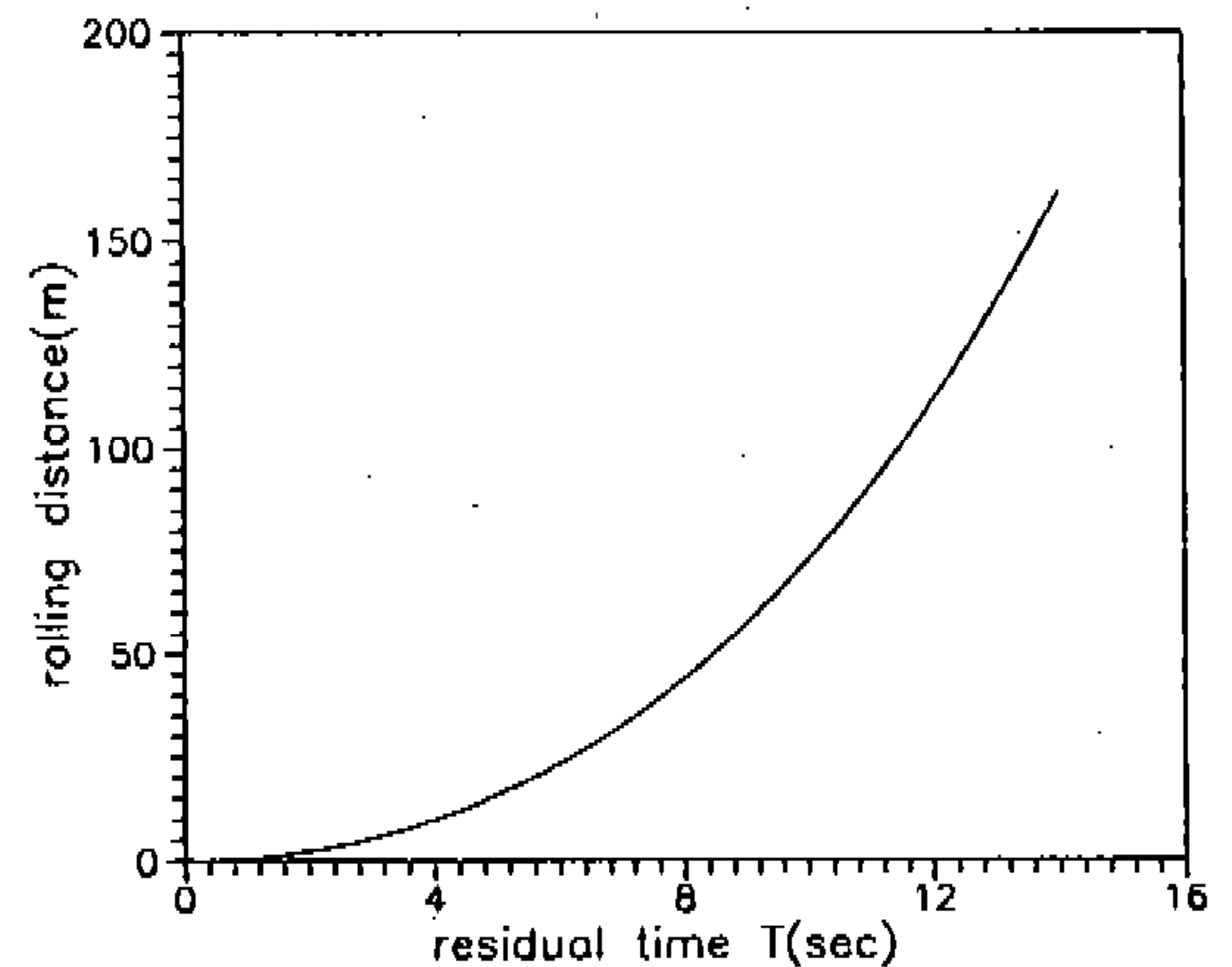


Fig.6 Typical curve for the rolling distance of wheel.

연결하는 중첩방법도 생각해야 한다. 여러 가지 방법이 가능한데, 본논문의 후편에서 채용하여 한가지 방법을 개발하였는데 좋은 결과를 얻었으므로 이를 참고하기 바란다.

#### 4.4 구동축 손실 실험의 보완

구동축 저항은 타 저항에 비하여 매우 적은 만큼 타실험과 동시에 수행하게 되면 타저항의 손실의 오차속에 정보가 숨어 있어서 원하는 구동축 손실 정보를 얻을 수가 없다.

그림 6은 어느 시점에서 바퀴가 정지 할때까지 타행한 거리를 나타내고 있는데, 이 곡선에 잘 합치되는 미지수를 구하려면 바퀴가 정지하기 직전의 데이터가 정확히 측정되어야 한다. 그러기 위해서는 이 방법은 바퀴의 정지를 사람이 판단해서는 안되고 측정장비가 자동적으로 정지 직전의 데이터를 측정하여야 한다.

#### 4.5 측정 장비의 보완

측정 방법이 회사별로 표준화되면 시험장에 레이저 거리 측정기를 이용하여 100m당 0.5cm 오차의 정밀도로 정확하게 위치를 표시할 필요가 있다. 적외선 센서는 기존 제품의 응답 특성이 1msec 이하임으로 1% 오차를 허용한다면, 현재 방법으로는 충분하나 앞으로 초단거리 측정법을 개발하려면 외관광에 대한 안전도를 희생하더라도, 한단계 빠른 0.1msec 수준의 적외선센서가 필요하다. 또한 구동축 실험시 정지 직전의 시간을 측정하려면 별도의 기능을 추가 시킬 필요가 있다. 앞으로 바람의 영향을 고려하려면 순간의 풍속 및 풍향의 변화를 측정하여 저장할 수 있는 새로운 장비의 개발이 요구된다.

#### 4.6 바람의 영향을 고려한 시험법

좀더 정밀하고 반복성이 우수한 데이터를 얻으려면 외란에 해당되는 바람의 영향을 고려하여야 한다. 기본적으로 육지풍은 돌풍형태임으로 순간 풍속의 변화를 고려한 S-T 타행법을 개발하여야 한다. 차량에서 본 바람의 순간의 방향과 풍속을 모니터링한다면 반복 계산을 시간이 많이 걸리므로, 정밀한 데이터를 얻고자 할때만 수행할

수 있는 방법이다. 한번의 타행 동안 바람의 방향과 속도가 어느 정도 비슷하다면 바람 속도의 영향을 손쉽게 보정할 수가 있다. 그러므로 매 타행시험마다 바람의 평균 방향과 평균 속도를 측정하여 평균 풍속이 최소한 3m/sec이하에서는 어느 정도 합리적인 값을 줄 수 있도록 방법을 고안하여야 한다. SAE에서 추천하는 방법과 S-T 타행법을 적절히 혼합하면 가능할 것으로 생각된다. 그런데 앞에서 언급한 순간 풍향 및 풍속의 측정을 현재는 삼배 풍속계와 Wind Vane형 풍향계를 자동차 앞에 설치하여 사용하고 있으나 응답 특성면에서 장치의 크기를 고려할때 새로운 측정 장비의 개발이 필요하다고 본다.

#### 4.7 표준 상태로 데이터 변환

도로 타행시 대기 조건은 항상 다르므로 기준 온도, 기준 기압으로 측정 데이터를 수정할 필요가 있다. 이 방법은 SAE 추천 방법을 따르면 될것으로 본다.

#### 4.8 항력 계수와 구름 마찰 계수의 분리방법 개선

Petrushov 교수는 많은 실험 데이터를(장거리 S-T 타행 시험법으로 얻은 결과임) 바탕으로 제안한 방법이 있으나, 무게 변화에 따른 타이어 마찰력 변화에 대한 물리적 검토가 더 이루어져서 새로운 관계식이 정립되고 실험적으로 미지수를 얻는 연구를 수행할 필요가 있다.

### 5. 결 론

이상과 같이 본논문에서는 S-t 방법은 V-t 방법에 비해 상당히 정밀한 결과를 줄 수 있음을 보았으며, 정밀도를 높이고 실험방법을 보완하기 위한 거리의 단축, 구동축저항 실험의 보완 등 몇가지 사항에 대하여 고찰하였다. 대형 자동차용 풍동을 보유하고 있지 않는 국내의 실정에 비추어 본 논문의 후편에서와 같이 개선된 방법은 향후 많이 사용될 수 있으리라고 생각된다. 앞으로 언급한 개선 방안이 계속적으로 연구되어 완벽한 S-t 타행 시험법이 개발되기를 기대한다.

## 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.

## 참 고 문 헌

1. “EPA recommended practice for determination of vehicle road force”, Attachment I.
2. R.A. White and H.H. Korst, “The determination of vehicle drag contributions from coast-down tests., “SAE paper 720099.
3. “Road load measurement and dynamometer simulation using coastdown technique, “SAE Recommended Practice, SAE J1263 May 1984.
4. A. Morelli, P. Nuccio and A. Visconti, “Automobile aerodynamic drag on the road compared with wind tunnel tests”, SAE paper 810186.
5. G. Roussillon, “Contribution to accurate measurement of aerodynamic drag on a moving vehicle from coast-down tests and determination of actual rolling resistance”, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 9, 1981, pp.38-48.
6. S. Cha, R.L. Sloan and F.M. Black, “Study of models for the prediction of average road load of in-use delivery trucks”, SAE paper 831799.
7. Ni Youmin, “Coastdown method of vehicle testing and study of data processing”, SAE paper 852269.
8. 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.
9. H.H. Korst and R.A. White, “Coastdown tests : determining road loads versus drag component evaluation., “SAE paper 901767.
10. M.A. Passmore and E.G. Jenkins, “Measuring vehicle drag forces using an on-board microcomputer”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, J. of Automobile Engineering, Vol.204, 1990.
11. 심재용, “타행 실험에 의한 주행저항의 측정에 대한 이해”, 아세아 기보 1992/1 통권 13호.
12. Russia Patent A.c. SU1150512 A
13. V.A. Petrushov, “Improvement of vehicle aerodynamic drag and rolling resistance determination from coast down tests”, private communication, 1994.
14. S. Fanger-Vexler, J. Katz and A.foux, “Full-scale, on-road study of the effect of automobile shape on its aerodynamic characteristics, and comparison with small-scale wind tunnel results”, SAE trans. paper 850287.
15. W.H. Hucho, “Aerodynamics of road vehicles.” Butterworths, pp.468-470, 1987.
16. F.T. Buckley, Jr., C.H. Marks and W.H. Walston, Jr., “Analysis of coast-down data to assess aerodynamic drag reduction on full-scale tractor-trailer trucks in windy environments”, SAE paper 760850.
17. W.H. Walston, Jr., F.T. Buckley, Jr., and C.H. Marks, “Test procedures for the evaluation of aerodynamic drag on full-scale vehicles in windy environments”, SAE trans. paper 760106.
18. V.A. Petrushov, “Vehicle Cx Measured on the Road”, Avtoexport, Vol.99, pp.10-15, 1990.