

■ 論 文 ■

활주 직전과 제동 직전 속도의 상관관계 규명에 관한 연구

Relationships Between Pre-Skidding and Pre-Braking Speed

류 태 선

(도로교통공단 교통사고종합분석센터 연구원)

전 진 우

(서울시립대학교 교통공학과 석사과정)

박 흥 한

(도로교통공단 교통사고종합분석센터 팀장)

이 수 범

(서울시립대학교 교통공학과 교수)

목 차

I. 서론

- 1. 연구의 배경 및 목적
- 2. 연구의 범위 및 방법

II. 기존이론 고찰

- 1. 이론적 배경
- 2. 실험장비 소개
- 3. 외국의 제동 전후 속도 관련 문헌 고찰

III. 한국형 분석모형 개발

- 1. 실험개요 및 방법
- 2. 실험결과 및 분석
- 3. 소결론

IV. 결론 및 향후 과제

참고문헌

Key Words : 제동직전 속도, 활주직전 속도, 타이어-노면간 마찰계수, 스키드마크, 제동실험
 Pre-braking speed, Pre-skidding speed, Tire/roadway coefficient of friction, skid mark, Braking test

요 약

이 논문은 타이어-노면간 마찰계수(drag factor)와 노면에 발생된 스키드마크를 통해 제동직전 속도(pre-braking speed) 산정을 정확하게 하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

제동직전 속도(pre-braking speed)와 활주직전 속도(pre-skidding speed)간 어떠한 상관관계가 있는지 판단하기 위해 실차 주행 및 제동실험을 통해 데이터가 수집되었다. 두 대의 차량에 fifth wheel(오륜) 장비, 스피드건, vericom 2000 등 다양한 측정장비를 탑재하여 제동실험이 수행되었으며, 자동차 속도, 제동거리, 활주거리, 감속도 등이 정밀측정되었다.

실험자료의 분석을 통해 노면 마찰계수값과 활주직전 속도를 산정하고, 이후 활주직전 속도와 제동직전 속도를 비교하여 이들간의 상관관계를 규명하였다.

결과적으로 산정된 마찰계수값은 현재 일반적으로 적용되고 있는 0.8보다 높았으며, 제동직전 속도는 활주직전 속도보다 5~10km/h 정도 높은 것으로 나타났다.

향후에는 다양한 차종과 노면조건에 대한 후속실험을 통해 더욱 정교한 한국형 분석모형의 개발과 실무적용이 필요할 것으로 판단된다.

This paper investigates the accuracy of vehicle pre-braking speed estimates based upon tire/roadway coefficient of friction(drag factor) measurements and skid mark measurements.

Data for pre-braking and pre-skidding speeds were collected to determine if there were any correlations between pre-braking speeds and pre-skidding speeds.

Braking tests were performed on two vehicles using various measurement devices including a fifth wheel, a speed gun, and a vericom 2000. The vehicle speeds, braking distances, skid mark distances, and deceleration histories were recorded.

From these data, coefficients of friction and vehicle pre-skidding speeds for the tested road surface were calculated. The pre-skidding speeds were then compared to the actual pre-braking speeds of the vehicles in order to establish relationships between pre-skidding and pre-braking speed. A correlation between the pre-skidding speed and the actual pre-braking speed was established for the study data.

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

스키드마크(skid mark)는 자동차 운전자의 급제동 시 나타나는 물리적 흔적의 일종으로 현재까지 교통사고 조사 분야에서 속도분석 및 추정의 근거자료로 활용되고 있다.

그러나, 스키드마크는 운전자가 브레이크를 밟는 시점에서 0.2~0.4초간 제동력 전달과정 상의 기계적 지연과 불완전제동시간 후에 진하게 나타나는 흔적으로 통상 제동시점부터 이 시간동안 감소되는 속도의 변화량을 배제한 최소한의 제동 전 속도라 할 수 있다.

교통사고시 과속이라 함은 제한속도를 20km/h 이상 초과한 경우를 말하며, 현재 육안으로 판단되는 물리적 흔적을 통한 산출방법으로는 대다수 법정 과속의 범주를 벗어나게 되어 사고당사자들의 논란과 쟁점이 되고 있는 부분이기도 하다.

특히 자동차의 속도제어는 교통안전분야에서 인명피해를 줄이고 적절한 교통안전대책을 시행하기 위한 필수 요소로써 스키드마크 발생 직전과 제동 직전 속도의 적절한 상관관계 규명을 통해 교통사고 처리시 운전자 처벌을 강화하고 또한 운전자에게 경각심을 일깨우기 위한 연구가 필요할 것으로 판단되어 본 연구를 수행하게 되었다.

이 연구를 통해 향후 자동차 제동직전 속도분석과 관련하여 유용한 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 활주직전(Pre-skidding) 속도와 제동직전(Pre-braking) 속도간의 상관관계 규명을 통해 스키드마크를 통한 자동차 속도산출시 실제의 제동직전 속도(Actual speed)를 산출할 수 있도록 분석모형을 개발하는 데에 그 목적이 있으며, 연구방법으로써는 실차 주행 및 제동테스트를 실시하여 실험 결과치간의 통계적 분석을 통해 상관관계를 제시하고자 한다.

연구의 범위는 건조한 아스팔트도로에서 국산 승용차량 2대에 5th wheel Assembly set(담력인식장치 포함)을 장착하고 저속, 중속, 고속 주행상태에서 급제동하여 얻어진 실험결과치에 한하며, 제동직전(Pre-braking)

속도의 정밀측정을 위해 Vericom2000장비와 이동식단속카메라를 추가로 장착하여 보조장비로 활용하였다.

II. 기존 이론 고찰

1. 이론적 배경

스키드마크로부터 속도를 산정하기 위한 기본적인 분석 모형은 스키드마크가 발생되는 경우 자동차의 운동에너지(Kinetic energy) 변화와 자동차에 행해진 일(Work)이 같다는 전제하에 물리적 산출방법을 통해 얻어진다.

$$\frac{1}{2}mv^2 = F_f d \quad (1)$$

m : 자동차 중량(kg), v : 활주직전 속도(m/s)

F_f : 마찰력(frictional force)

d : 활주거리(skid distance)

$$F_f = \mu F_N = \mu mg \quad (2)$$

F_N : 가해진 힘(normal force)

μ : 타이어-노면간 마찰계수

g : 중력가속도(%)

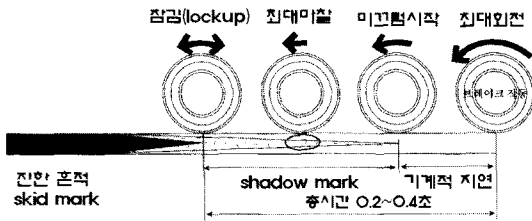
식(1), 식(2)식을 통해 활주직전 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = \sqrt{2\mu g d} \quad (m/s) \quad (3)$$

결국, 활주거리(skid distance)와 타이어-노면간 마찰계수값을 알고 있다면, 활주직전 속도를 산출할 수 있으나, 이 속도는 육안으로 확인되는 스키드마크만을 감안한 것이므로, 실제 제동직전 속도와는 다소 차이가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 운전자의 제동시점 속도를 측정하기 위해 브레이크페달에 담력인식장치를 부착시켰다.

자동차 운전자가 위험을 인지하고 급제동조치를 취하게 되면, 도로 상에 스키드마크를 남기며 최종 정지하게 된다. 이때 운전자의 제동시점과 활주시점간에는 불완전 제동구간이 존재하며, 식(3)과 같은 방법으로 속도를 산출할 경우에는 불완전제동구간의 속도변화를 배제한 최소한의 활주직전 속도가 산출된다(〈그림 1〉).



〈그림 1〉 스킨마크(skid mark)의 생성과정

본 연구에서는 〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 브레이크 작동시점의 속도와 활주직전 속도간의 상관관계를 규명하는 데에 그 목적이 있다.

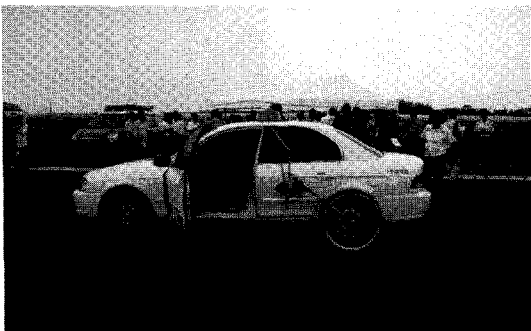
2. 각종 제동실험 관련 장비 소개

1) 5th Wheel Assembly set

5th Wheel Assembly set는 오류장비라고도 하여, 5th Wheel, Mounting Kit, Motion transducer, connection cable, DB print system, Pedal switch 등으로 구성되어 있다.

이 장비는 5th Wheel이라 부르는 특수제작된 휠을 차체에 부착하여 이 휠의 회전에 따른 Pulse generation 방식으로 차량의 속도 및 이동거리 등을 측정하게 된다.

휠 사이즈, Motion transducer 등에 따라 실험용도상의 차이가 있으며, 본 연구에서는 독일 파이슬러사의 28인치 Wheel과 1000pulse급 Transducer를 장착하여 실험을 수행하였다.



〈그림 2〉 5th Wheel 장착된 모습

2) "Bumper Detonator" with PACT timer

Bumper Detonator, Bumper Gun 또는 Pavement spotter라고도 한다. 자동차 운전자가 브레이크 페달을

밟는 시점에 노면에 페인트로 마킹을 하여 제동시점을 표시할 수 있고, PACT 타이머가 이동시간을 체크하여 속도를 산출한다.

3) Radar unit(police-type)

'Radar gun' 또는 'speed gun'이라고도 하며, 다가오는 자동차를 향해 발사된 레이더파가 다시 반사되어 되돌아오는 레이더파를 감지하여 속도를 나타내준다. 되돌아오는 레이더파는 도플러효과 때문에 최초 발사된 레이더파보다 파장은 짧아지고 주파수는 커지게 되는데 이러한 차이를 감지해서 속도를 결정하게 된다.

4) Vericom 2000

가장 흔한 "vehicle skid test instrument"로 알려져 있으며, 장비 내에 포함된 진자의 움직임 정도를 통해 속도, 이동거리, 가감속도 등을 측정한다.

5) g-Analyst

이 장비는 transducer와 display head 등 두 가지 모듈로 이루어져 있으며, Transducer에 내장된 3축 가속도계(accelerometer)를 통해 순간가감속도를 측정한다. 여기서 측정된 electronic-g data는 display head로 보내져 출력된다.

6) Drag Sled

콘크리트로 채워진 반쯤 잘려진 타이어를 끄는 힘을 측정하여 노면과 타이어간 마찰계수를 산출한다.

가격이 저렴하고 사용이 간편하다는 장점이 있으나 측정값이 마찰계수에 국한되고 자동차와 타이어의 다양한 종류를 반영할 수 없다는 단점이 있다.

7) GPS측정 장비

GPS방식에 의해 자동차 속도를 측정하며, 측정치를 기반으로 가감속도, 이동거리, 소요시간 등을 산출한다.

최근 이 장비의 제작기술이 발달함에 따라 다양한 유형과 종류의 제품이 출시되고 있다.

본 연구에서는 5th Wheel 장비를 주로 하고, VC2000, 이동식단속카메라를 보조 장비로 사용하여 제동전후 속도변화를 측정하였다.

3. 외국의 속도분석 관련 문헌 고찰

1) Bumper Gun Calculation Method(2001)

'98년식 현대 액센트, '98년식 스즈키 Swift, '99년식 도요타 Tercel 등 실험차량을 대상으로 범퍼건 장비를 통해 얻어진 데이터를 회귀분석하여 다음과 같은 실험식이 얻어졌다.

$$V_{Brake} = 0.89 V_{calc} + 11.6 \quad (4)$$

$$(R^2 = 0.89)$$

V_{Brake} : Pre-braking speed(km/h)

V_{calc} : 산출속도(km/h)

2) Accelerometer Average Calculation Method(2001)

실험차량은 1)항과 동일하며, 가속도계를 이용하여 제동구간 평균감속도를 측정하고 이를 통해 다음과 같은 실험식이 얻어졌다.

$$V_{Brake} = 0.91 V_{calc} + 12.3 \quad (5)$$

$$(R^2 = 0.90)$$

식(4), 식(5)의 V_{calc} 는 자동차 운전자의 제동시점에서 최종 정지하기까지 범퍼건 또는 가속도계를 통해 얻어진 평균감속도를 적용하여 활주 직전 속도를 산출한 것으로써, 자동차 특성 상 제동시점에서 활주시점까지의 불안전제동으로 인한 감속효과를 감안치 않았다.

3) 속도-마찰계수 관련 분석모형

제동 전 주행속도가 높아질수록 노면-타이어간 마찰계수 값은 감소하게 되며, 이에 대한 분석모형은 다음과 같다.

(1) Henry(1981)

$$\mu = ae^{-bV} \quad (6)$$

승용차 타이어는 $a = 0.874$, $b = 0.00393$ 를 적용한다(단, V 는 km/h).

(2) Limpert(1994)

$$\mu = \mu_0 - kV \quad (7)$$

μ_0 : 저속시의 마찰계수

k : 속도에 따른 마찰계수 감소율

(3) Keskin(1990)

자동차가 요잉(yawing)할 경우 마찰계수값의 변화를 다음과 같이 나타냈다.

$$\mu = \mu_p(1 - \epsilon_s V_s) \quad (8)$$

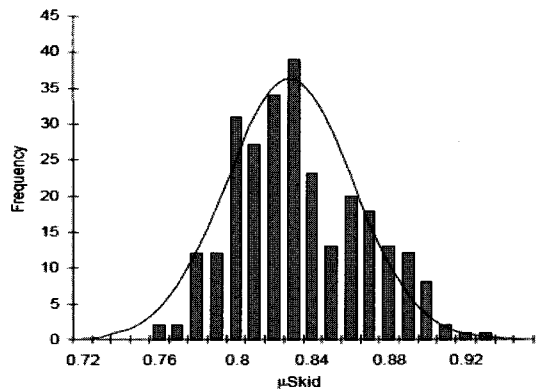
μ : 순간 마찰계수, μ_p : 마찰계수 최고치

ϵ_s : 속도 관련 민감도변수

V_s : 타이어 슬립 속도

4) 제동마찰계수의 빈도분포도

Goudie(2000)는 활주시 감속도를 세가지 종류의 타이어를 가지고 실험하였으며, 제동마찰계수(μ_{skid})값을 빈도분포도로 나타냈다. 평균값과 표준편차는 0.828 ± 0.033 로 나타났다(<그림 3>).



<그림 3> μ_{skid} 값의 빈도분포도

III. 한국형 분석모형 개발

1. 실험개요 및 방법

1) 실험차량

- 실험일자 : '08. 7. 22 09:30~18:00
- 중형 승용차량(기아, Optima) 2대
- 생산년도 : 2002년 11월, 2005년 9월
- 배기량 : 1,975cc

- 차량검사유효기간
 - 2002년식 : '08. 10. 31
 - 2005년식 : '08. 9. 26

〈표 1〉 차량제원

전장	4,745mm	전폭	1,815mm
전고	1,420mm	총중량	1,750kg
승차정원	5명	연료	LPG
정격출력	123/5500PS	형식	GDN92A, ~B

2) 실험장 조건

- 장소 : 전남 나주 비상활주로 구간
- 기상조건 : 맑음
- 노면 : 건조한 아스팔트 포장(많이 닳아진 도로)
- 경사 : 종단 +0.4%, 횡단 0.5%
(1% 미만의 비교적 평탄한 구간)

3) 실험장비

- 28" Fifth Wheel Assembly set
(DB print, 압력인식장치 포함)
- Vericom 2000
- 이동식 속도단속 카메라

〈표 2〉 Test Data

연번	단속카메라 (km/h)	FIFTH WHEEL			Pre-Skidding Speed (km/h)	Skidding Distance(m)	
		Pre-Braking Speed (km/h)	소요시간 (sec)	제동거리 (m)		(m)	μ_{Skid}
1	41	41	1.91	9.13	38.1	7.3	0.781
2	43	43	1.96	8.87	37.7	5.5	1.017
3	43	43	1.99	9.39	35.9	5	1.017
4	50	49.2	2.12	12.28	40.8	6.3	1.038
5	59	60.8	2.46	17.71	54.5	12	0.975
6	60	61.1	2.85	19.66	57.1	15.9	0.806
7	62	61.3	2.73	20.77	56.9	16.7	0.764
8	62	62.3	2.44	18.41	53.6	10.5	1.079
9	66	67.4	2.9	24.25	59.3	16.2	0.856
10	68	68	2.87	22.51	58.7	13.2	1.026
11	68.6	70.1	3.03	25.85	63.7	19.1	0.836
12	75	75.5	3.28	29.56	68.7	21.8	0.851
13	76	77.4	3.42	32.42	72.6	26.8	0.775
14	76	77.8	3.14	30.77	71.2	23	0.867
15	79	79.8	3.54	35.81	74.1	28.9	0.748
16	86	86.2	3.98	44.5	85.0	42.9	0.663
17	93	93.3	4.12	47.94	85.8	37.3	0.776
18	109	110.2	4.86	70.94	104.6	61.4	0.701
평균							0.865

4) 실험방법

실험차량에 운전자 및 장비운용자 등 2명을 탑승시키고 30~120km/h의 속도로 주행하다가 급제동 조치를 취하였으며, 제동시점의 속도를 5th Wheel과 이동식 속도단속카메라로 측정하였다.

운전자는 10년 내외 운전경력의 35세 이상 50세 미만의 남성으로 구성되었다.

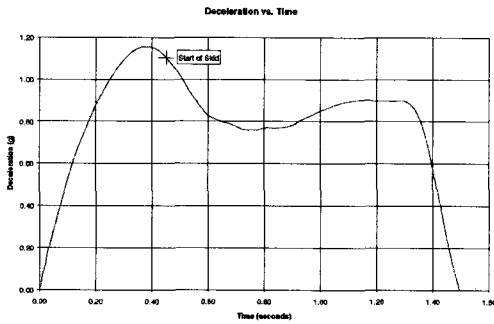
이렇게 구성된 실험을 총 26회 실행하였으며, 성공적으로 수행된 18회의 실험데이터를 추출하였다(〈표 2〉). 활주거리는 육안으로 확인되는 스키드마크의 길이를 측정하였으며, 제동거리는 브레이크 페달에 부착된 압력인식장치를 통해 5th Wheel과 DB print에서 출력되는 데이터로 얻어진다.

2. 실험결과 분석

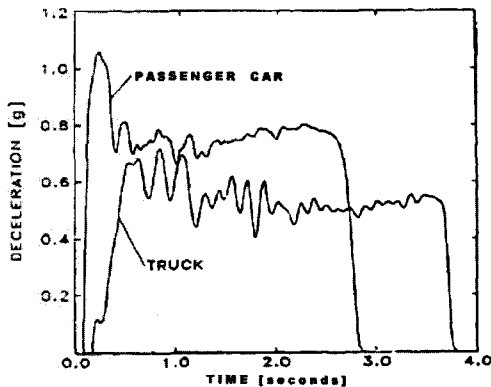
1) 평균미찰계수의 빈도분포(Distribution of Average coefficient of friction)와 활주직전 속도와 평균미찰계수의 비교

자동차가 활주(skidding)할 때와 브레이크를 밟아 활주하기 전까지의 감속도는 다르게 나타난다.

활주하기 전에는 운전자가 브레이크를 밟는 압력이 제동장치에 전달되고 이후 회전하는 바퀴가 완전히 잠김



〈그림 4〉 감속도 vs 시간 그래프(2001, Robert Overgaard)



〈그림 5〉 감속도의 변화그래프(1989, Walter S. Reed)

(locked)되기까지 지연시간이 있기 때문에 불안전제동 구간에서 제동력은 0~100%까지 변화하게 된다. 〈그림 4〉는 일반적인 감속도의 변화를 나타낸 그래프이다.

〈그림 4, 5〉에서 보는 바와 같이 스키드마크는 최초 바퀴가 잠김되어 감속도가 1.2g에 근접하는 정점에 이른 후 발생하기 시작하며, 이후 감속도는 안정화상태에 접어든다. 불안전제동구간은 최초 브레이크를 밟는 시점에서 스키드마크가 발생하기 전까지의 구간을 말하며, 이때의 평균감속도는 0.5g±α로 알려져 있다.

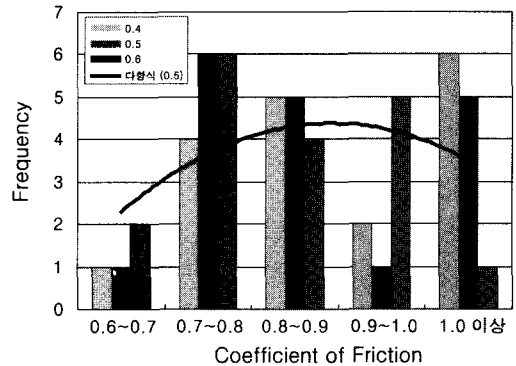
〈표 3〉은 불안전제동구간의 감속도를 0.4g~0.6g까지의 구간으로 확장하여 활주 후의 감속도와 비교한 것이다.

〈그림 6〉에 따르면 불안전제동구간의 감속도가 0.5g 일 경우, 〈그림 3〉의 경우와 유사하게 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 불안전제동구간의 평균감속도를 0.5g로 전제하여 제동 전후 속도변화를 추정하고자 하며, 향후에는 불안전제동구간의 평균감속도 변화에 대한 더욱 정교한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

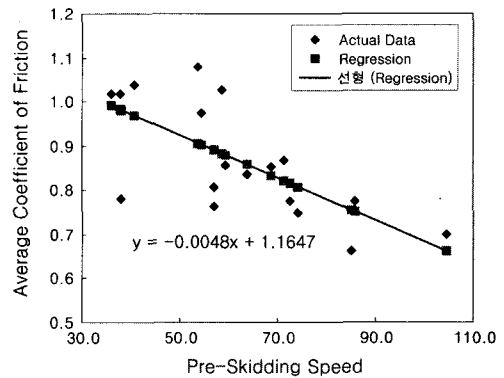
활주시의 평균감속도는 0.67~1.07g까지 다양하게 나타났으며 평균감속도는 0.865g로 나타났다. 일반적으

〈표 3〉 불안전제동구간 감속도별 μ_{Skid} 빈도

μ_{Skid}	불안전제동구간 감속도		
	0.4g	0.5g	0.6g
0.6~0.7g	1	1	2
0.7~0.8g	4	6	6
0.8~0.9g	5	5	4
0.9~1.0g	2	1	5
1.0g 이상	6	5	1



〈그림 6〉 μ_{Skid} 의 빈도분포



〈그림 7〉 활주직전 속도와 평균마찰계수의 관계

로 적용되는 0.8g값보다는 높게 나타났으며, 활주 직전 속도가 높을수록 활주시 평균감속도는 낮아지는 경향을 보였다(〈그림 7〉).

이를 회귀식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu_{ps} = -0.0048 V_{ps} + 1.1647 (R^2 = 0.48) \quad (9)$$

μ_{ps} : 활주시 평균마찰계수

V_{ps} : 활주직전 속도(km/h)

식(9)의 R^2 값이 0.48로 비교적 낮게 산출된 이유는 운전자들의 제동시 답력의 차이때문인 것으로 추정된다.

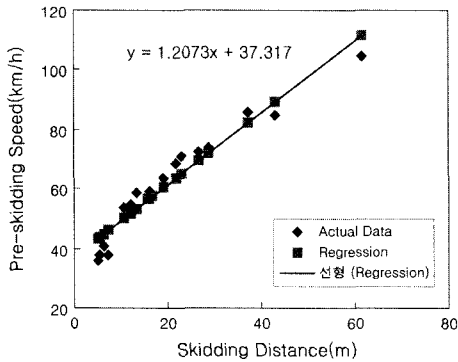
2) 활주거리(skidding distance)와 활주직전 속도(Pre-skidding Speed)간의 관계

활주직전 속도가 높아짐에 따라 활주거리도 비례하여 증가했으며, 이에 대한 회귀식은 다음과 같이 나타났다 (<그림 8>).

$$V_{ps} = 1.2073 d_s + 37.317 (R^2 = 0.93) \quad (10)$$

V_{ps} : 활주직전 속도(km/h)

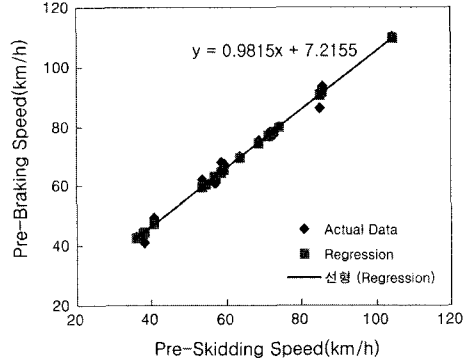
d_s : 활주거리(m)



<그림 8> 활주거리와 활주직전 속도간의 관계

4) 활주직전 속도(Pre-skidding Speed)와 제동직전 속도(Pre-Braking Speed)간의 관계

활주직전 속도와 제동직전 속도는 5~10km/h의 차이가 발생했으며, 이에 대한 회귀식은 다음과 같다(<그림 10>).



<그림 10> 제동직전 · 활주직전 속도간의 관계

$$V_{pb} = 0.9815 V_{ps} + 7.2155 (R^2 = 0.98) \quad (12)$$

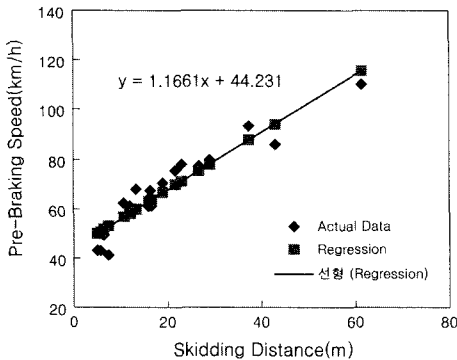
식(12)에 의하면, 제한속도 60km/h인 지점에서 스키드마크 길이로 계산된 속도가 78km/h인 경우, 제동직전 속도는 약 83.8km/h로 산출되어 제한속도를 20km/h 이상 초과함에 따라 법정 과속의 범주에 포함되게 된다.

3) 활주거리(skidding distance)와 제동직전 속도(Pre-Braking Speed)간의 관계

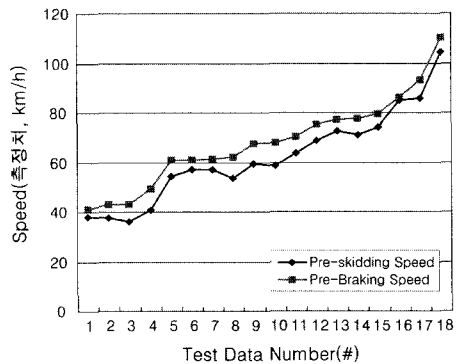
활주거리가 길어짐에 따라 활주직전 속도보다 다소 큰 폭으로 제동직전 속도가 증가했으며, 이에 대한 회귀식은 다음과 같다(<그림 9>).

$$V_{pb} = 1.1661 d_s + 44.231 (R^2 = 0.89) \quad (11)$$

V_{pb} : 제동직전 속도(km/h)



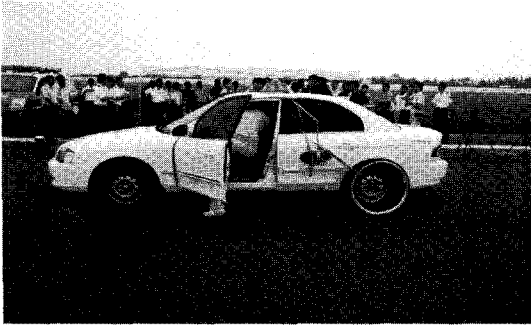
<그림 9> 활주거리와 제동직전 속도간의 관계



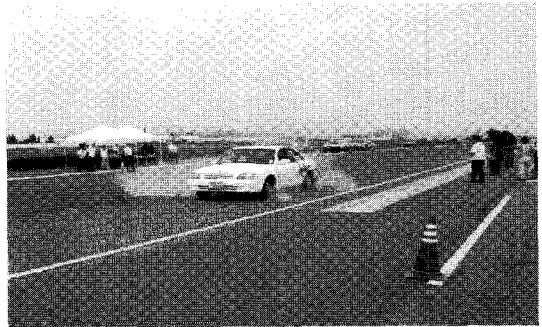
<그림 11> 활주직전과 제동직전 속도

3. 소결론

1) 국산 중형 승용차량 2대로 총 26회의 제동테스트를 수행하였으며, 그 중 성공적으로 수행된 18회의 실험 데이터를 추출하여 제동전후 속도변화를 분석하였다.



〈그림 12〉 5th Wheel 장비 장착모습



〈그림 15〉 Skid Test 장면



〈그림 13〉 DB print 및 VC2000 장착모습



〈그림 16〉 활주거리 측정모습



- 2) 실험차량이 활주(skidding)하는 동안 감속도는 0.67~1.07g로 다양하게 나타났으며 제동직전 속도가 높을수록 감속도가 낮아지는 경향을 보였다.
- 3) 활주시 평균감속도는 0.865g로써 기존 적용 0.8g 보다 다소 높게 나타났으며, 이는 제동장치, 타이어 등 자동차의 성능 향상에 기인한 것으로 추정된다.
- 4) 제동직전 속도는 활주직전 속도보다 5~10km/h 높게 나타나 불완전제동구간의 속도변화를 감안할 경우, 교통사고시 법정 과속에 해당되는 경우가 증가할 것으로 판단된다.

N. 결론 및 향후 과제

교통사고시 속도분석은 사고재현에 있어 매우 중요한 부분 중 하나이다. 특히 사고당사자에게는 과속여하에 따라 교통사고처리특례법에 의거 가중처벌되므로, 사고처리과정에서 종종 쟁점의 대상이 되기도 한다.

본 연구의 목적은 현재 일반적으로 적용되고 있는 승용차의 제동감속도 0.8g의 검증과 활주직전(pre-skidding)·제동직전(pre-braking)간의 속도변화 관계를 규명하는 데에 있다.

국산 중형승용차량 2대로 26회의 Skid Test를 거쳐 유의한 18 set의 실험데이터를 추출하였으며, 이를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

제동 전 속도가 높을수록 제동마찰계수(μ_{Skid})값은 낮아지게 되며, 제동마찰계수값은 최저 0.67, 최고 1.07에 이르고 평균값은 0.865로써 현재 일반적으로 적용되고 있는 0.8보다는 높게 나타났다.

이러한 제동마찰계수 값의 상향은 제동장치 및 타이어 등 자동차의 성능향상에 기인된 것으로 판단된다.

또한 활주직전 속도(Pre-skidding Speed)와 제동직전 속도(Pre-Braking Speed)간에는 불완전제동구간에서의 감속으로 인해 제동직전 속도가 5~10km/h 높

