

<논 문> SAE NO. 943753

## 비석면 케블라 마찰재의 제동특성에 관한 연구

A Study on the Braking Characteristics for Some Non-Asbestos Kevlar Brake Pad Materials.

정 동 윤,\*      정 백 기\*  
D. Y. Chung,      B. K. Chung

### ABSTRACT

An optimal brake pad must have stable friction, low wear and least amount of squeal. In this study, the friction, wear and squeal behavior of some non-asbestos Kevlar materials have been evaluated experimentally. Four specimens with different formulations and a pin-on-disk machine were used for this study.

To determine the role of each component in friction and squeal of a brake pad, statistical correlations have been obtained and discussed. The components tested were : Kevlar, Steel Powder, Barium Sulfate and fillers combined by Resin.

주요기술용어 : 제동특성, 제동소음, 제동하중, 제동초기속도, 상관계수

### 1. 서    론

자동차 브레이크용 마찰재는 경제성과 아울러 안정된 마찰성능과 낮은 마모율 및 긴 수명 그리고 저소음 등을 동시에 만족시켜야 한다. 마찰재는 제품간에 차이는 있으나 약 10여가지의 성분으로 된 복합재료이며 일반적으로 강화제, 마찰조절제 및 filler 그리고 이들을 결합하는 결합제 등 4가지로 이루어져 있다. 강화제는 마찰재에 기계적 강도와 인성을 제공하며 대부분의 경우 내마모성도 증대시킨다. 결합제로는 주로 열경화성 수지가 사용되는데 마찰재를 구성하고 있는 다양한 재료들을 결합할뿐아니라 고온에서도 좋은 인장 강도 특성을 유지한다. 또한 다른 성분들의 함

유량과의 상대적이고 복합적인 관계가 있으나, 열경화성 수지의 함유량을 조절함으로써 열적 안정성 및 형상 안정성, 마찰성능, 내마모성 및 수명 그리고 고온에서 반복하여 사용함으로써 발생하는 fade 현상 등을 조정할 수 있다.

브레이크용 마찰재의 재료로서 석면의 사용이 금지되면서 지난 수년동안 석면 대체물질의 개발이 활발히 이루어져 왔으며 현재는 크게 비석면 유기질형(NAO), 준금속형(semimet), 소결금속형 및 탄소-탄소형 등이 개발되어 사용되고 있다. 그 중에서 비석면 유기질형과 준금속형이 자동차용 마찰재로 그리고 탄소-탄소형은 항공기 및 군용으로 많이 쓰이고 있다. 비석면 유기질형 마찰재의 강화제로는 아라미드 케블라, 유리섬유,

\* 육군사관학교 병기공학과

규회석(wollastonite), mineral wool 등의 fiber가 주로 사용된다. 한편 준금속형은 steel wool이나 철 분말(iron powder)등이 쓰인다.

석면 대체물질의 발전에도 불구하고 제동시 발생하는 소음문제는 여전히 해결되지 않은 문제로 남아있다. 더욱이 자동차 산업이 발달함에 따라 주행 중의 소음문제가 많이 개선됨으로 인하여 제동소음이 더욱 두드러지며 불편감을 줄 뿐만 아니라 경우에 따라서는 안전운전을 위협할 수도 있다. 그러나 불행하게도 제동특성(마찰, 마모 및 제동소음)중에서 한가지 성능을 향상시키기 위하여 어느 한 성분의 함유량을 증대시키면 다른 성능이 저하되는 결과를 초래하기도 한다.<sup>1)</sup> 따라서 각 성분이 제동특성에 미치는 영향은 마찰재를 구성하고 있는 다른 성분들과의 상대적 관계로 인하여 그 성분의 절대적 특성과는 다르게 나타날 수도 있어서 분석하기가 매우 어렵다.

대부분의 경우 제동소음은 재현성이 결여된 우발적인 현상이다. 똑같은 조건일지라도 소음이 발생할 때와 그렇지 않을 경우도 있다. 그러나 지금까지 알려진 것으로는 제동장치의 온도가 낮고, 저속에서 작은 제동하중이 작용할 때 더 잘 발생한다는 것이다.<sup>2)</sup> 제동소음의 해석을 위해 현재까지 Stick-Slip이론<sup>3)</sup>, 가변 동마찰계수 이론<sup>4)</sup> 및 Geometric Coupling 이론<sup>5)</sup> 등이 제시되었다. 이와함께 최근까지 많은 실험적인 연구결과가 발표되었으나<sup>6-8)</sup> 아직까지 소음기구의 정확한 이해는 물론 문제해결의 방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

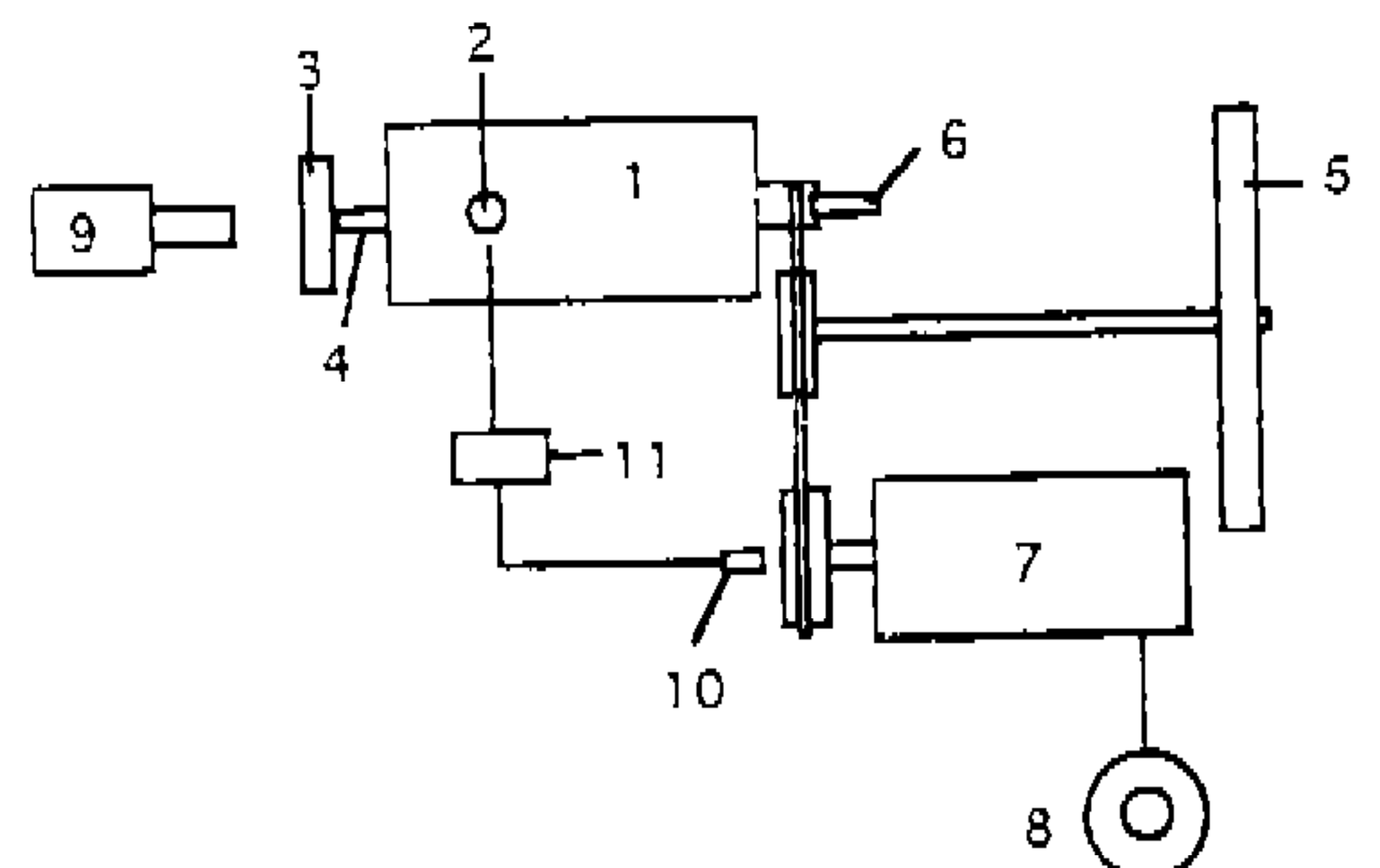
본 연구는 마찰재 성분의 함유량을 조합함으로써 최적의 제동특성과 아울러 조용한 마찰재의 성분을 실험적 방법으로 제시하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 마찰재 성분의 체적비 변화에 따른 마찰계수, 마모율 그리고 제동소음의 크기 등을 측정하였다. 그리고 마찰재의 각 성분이 제동특성의 각 요소에 대하여 어떤 영향을 미치는지를 분석하기 위하여 통계적인 기법을 도입하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig.1에 도식적으로 나타낸바와 같

이 pin-on-disk형의 마찰시험기에 관성질량을 장착하여 마찰계수와 소음의 크기 그리고 마모율 등을 측정하였다. 또한 실험조건과 시편 등을 변화시키면서 나타나는 결과를 분석하였다. 실험조건은 제동하중을 10N에서 25N까지 5N씩 증가시켰으며 초기제동속도는 1.95, 2.5 및 3.51 m/s로 변화시켰다. 이는 제동소음이 저속도에서 제동시 발생한다고 알려져 있기 때문이다.<sup>2)</sup> 동일한 실험조건을 유지하기 위하여 각 실험조건과 시편이 바뀔때마다 새로운 디스크를 사용하였으며 디스크는 일반 승용차용으로 쓰이는 회주철로서 직경 7.5cm, 두께 0.5cm로 제작하였다.

시편은 비석면 마찰재로서 Kevlar와  $Fe_2O_3$  및 Barium Sulfate를 주성분으로 하고, Resin을 이용하여 filler와 결합하였으며 Table 1에 나타난 바와 같이 각 성분의 체적비가 다른 4가지로 준비하였다. Kevlar는 아라미드 계열의 섬유재료로서 내열성과 강도가 매우 우수하여 최근들어 석면의 대체물질로서 많이 사용되고 있다. Barium Sulfate는 물에 녹지않으며 고온에서의 열저항성이 우수하여 1600°C까지 견디는 곱고 무거운 다결정형 고체로서 마찰재의 filler로 많이 사용되는 재료이다.<sup>9, 10)</sup>  $Fe_2O_3$ 는 마찰재에 필요한 열전도율과 기계적 강도를 제공한다. 또한 Resin은 대부분의 마찰재에 있어서 결합제로 사용



- |                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| ① Pin-on-disk machine  | ⑦ Motor             |
| ② Compressed gas inlet | ⑧ Speed controller  |
| ③ Cast iron disk       | ⑨ Sound level meter |
| ④ Pin specimen         | ⑩ Tachometer        |
| ⑤ Inertia mass         | ⑪ Valve controller  |
| ⑥ LVDT                 |                     |

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Specimen formulation(volume percentage)

Composition	A	B	C	D
Kevlar	20±3%	10±3%	20±3%	12±3%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20±3%	5±3%	5±3%	35±3%
BaSO <sub>4</sub>	5±3%	28±3%	25±3%	6±3%
Resin	30±3%	29±3%	19±3%	16±3%
Filler	25±3%	25±3%	31±3%	31±3%

되며 열저항성, 성형성 등이 우수하다. Filler로는 Graphite, MgO, Coke 등이 사용되었다. 시편의 형상은 직경 6mm의 봉형으로 제작하였으며 실험중 시편의 온도가 250°C를 유지할 수 있도록 시편 지지대 주위에 소형 전열기(heater)를 설치하였다.

마찰계수는 마찰력을 제동하중으로 나누어 계산하였으며 마찰력은 관성질량의 감속도를 이용하여 구하였다. 감속도는 Fig.2에 나타난바와 같이 시편과 디스크의 마찰에 의해 관성질량이 정지하기까지 속도가 선형적으로 감소한다고 가정하여 속도의 변화량을 시간의 변화량으로 나누어  $\Delta V/\Delta t$  결정하였다. 한편 제동하중은 압축가스를 이용하여 시편과 디스크에 가해지도록 하였다. 즉, Fig.1에 나타난바와 같이 디스크의 축에 부착된 타코메타로부터 측정된 관성질량의 속도가 초기 제동속도에 도달했을 때 가스조절밸브가 자동으로 열리고 압축가스가 디스크를 시편의 표면에 밀착시키면서 하중을 가하도록 제작하였다. 이와같은 방법을 이용해서 한가지 조건에 대하여 3회씩 실험한 결과를 평균하여 마찰계수를 결정하였다.

실험중 발생하는 제동소음은 디스크 앞에 설치된 정밀소음측정기(Larson-Davis Model 800B)를 이용하여 자료처리용 녹음기(B&K Model 7005)에 입력하였다. 주파수에 따른 제동소음의 크기는 FFT(B&K Model 2033)를 이용하여 1 kHz부터 20kHz까지 측정하였다.

시편의 마모량은 디스크의 축에 설치된 LVDT를 이용하여 측정하였으며 선형비례구간에서 LVDT의 1V 출력은 0.127mm의 시편마모를 나타내었다. 마모량을 측정하기에 전에 시편의

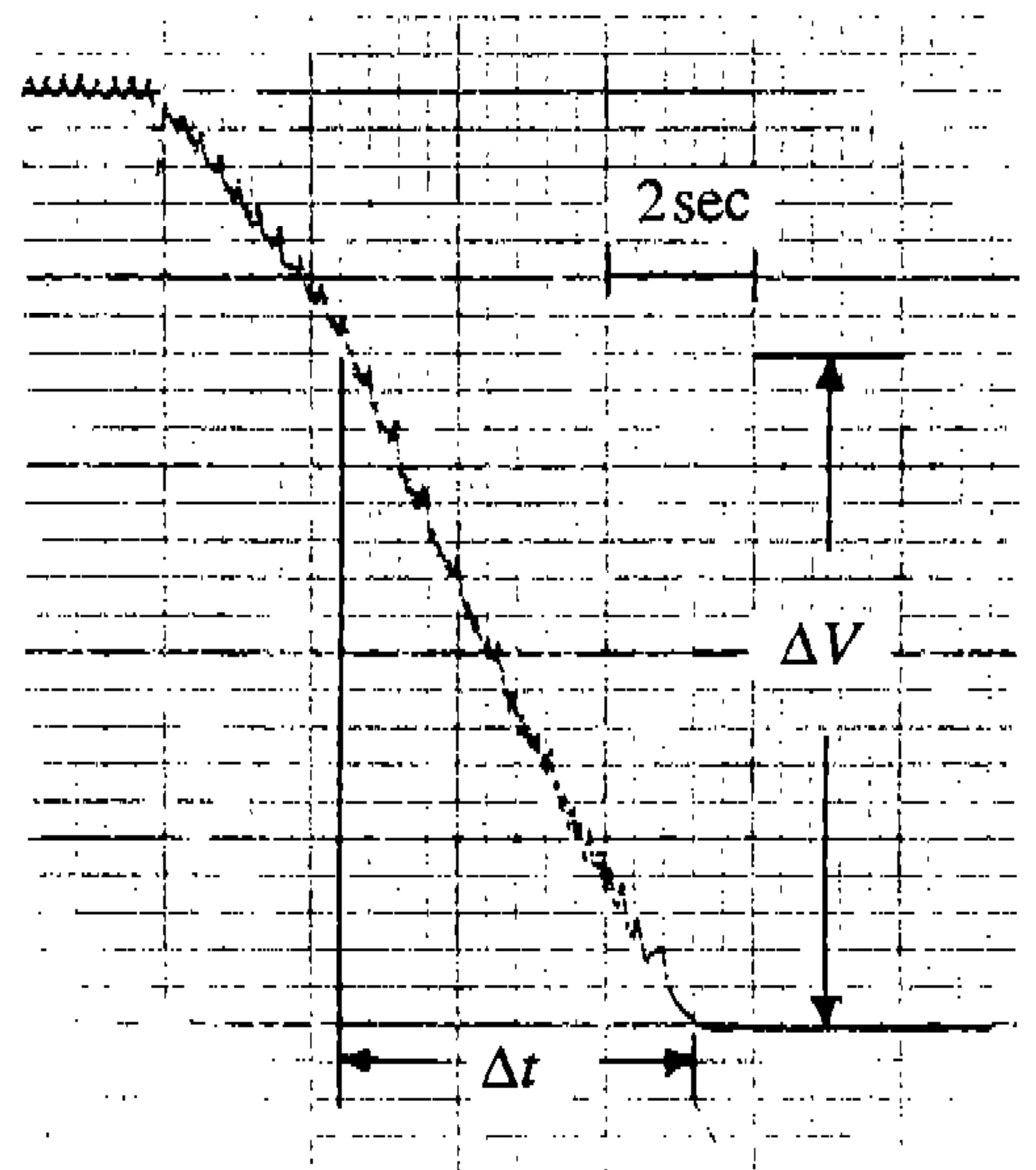


Fig.2 Deceleration measurement from a velocity change.

겉보기 마찰면이 완전히 디스크와 접촉할때까지 마찰하여 초기마모상태를 지나도록 하였으며 그 후 각 시편에 대하여 25N, 3.51m/s에 10분동안의 마모량을 측정하였다. 마모율은 2회씩 측정한 마모량의 평균치를 m<sup>3</sup>/m로 나타내었다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig.3-Fig.5는 제동하중의 변화에 따른 마찰계수의 변화를 각 초기제동속도 별로 나타낸 것이다. 각 시편의 마찰계수는 낮은 제동하중 영역에서 매우 높게 나타나고 있으나 제동하중이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소하여 안정되고



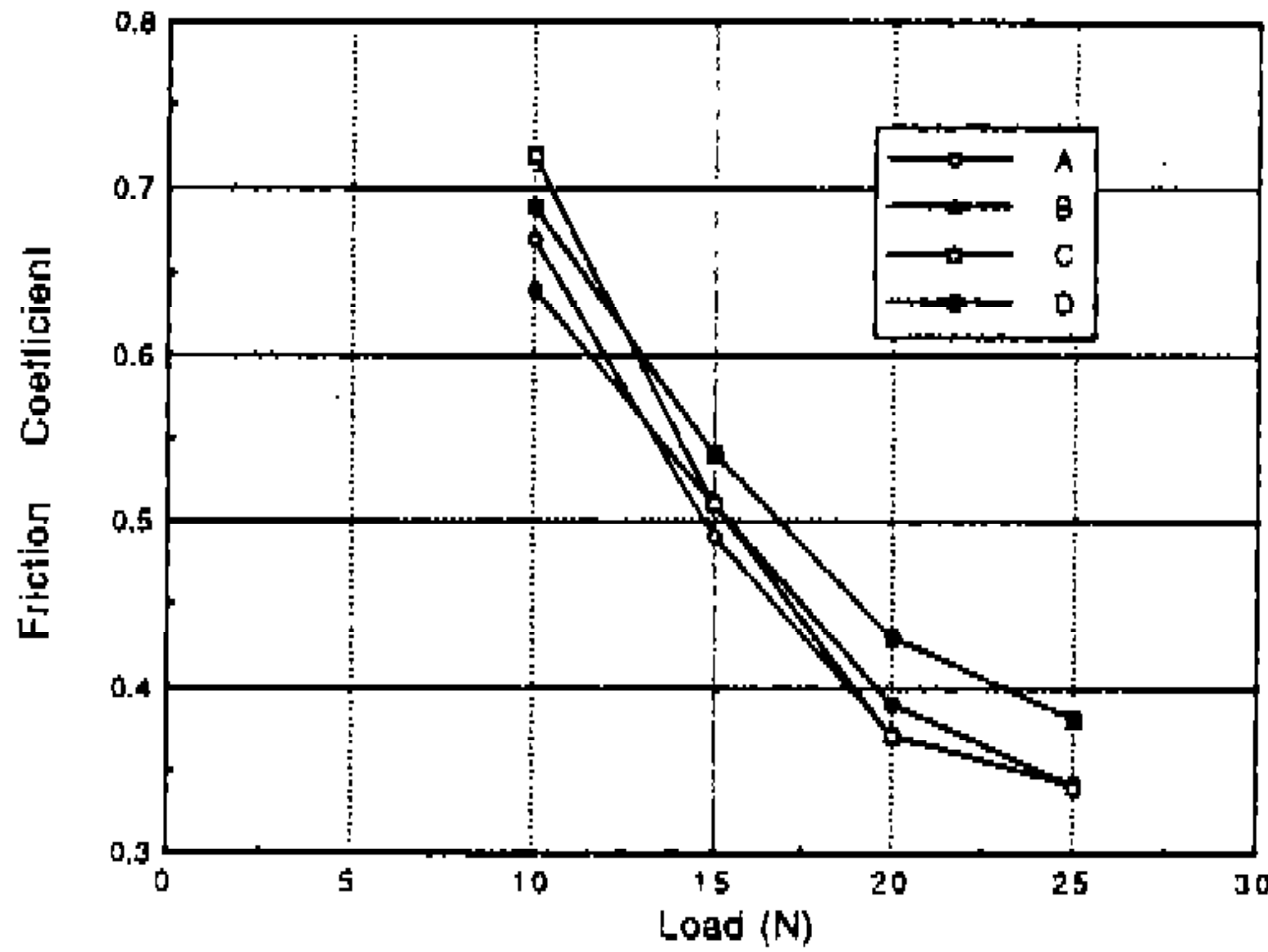


Fig.3 Friction coefficient vs. load at 1.95m/s.

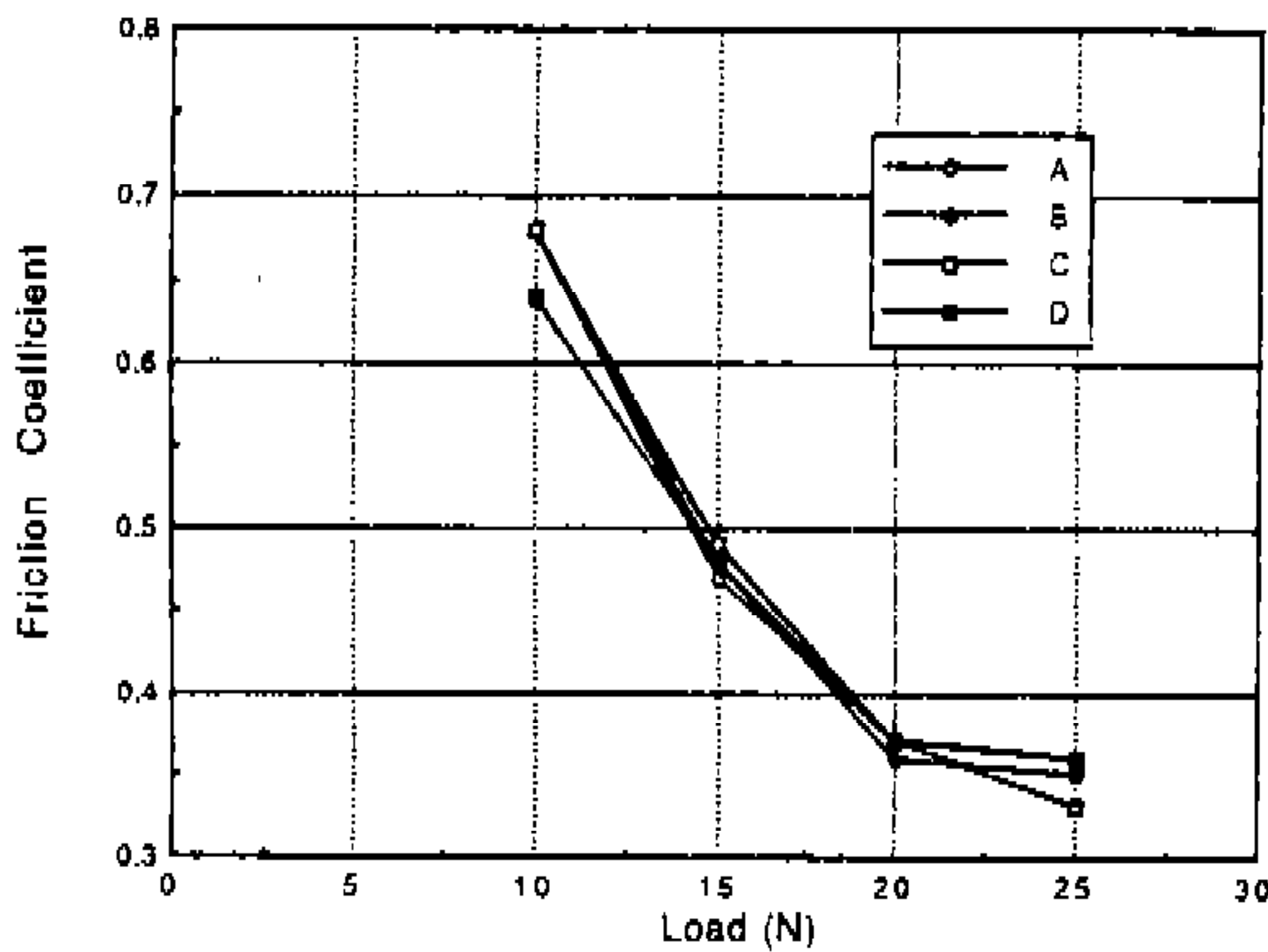


Fig.4 Friction coefficient vs. load at 2.5m/s.

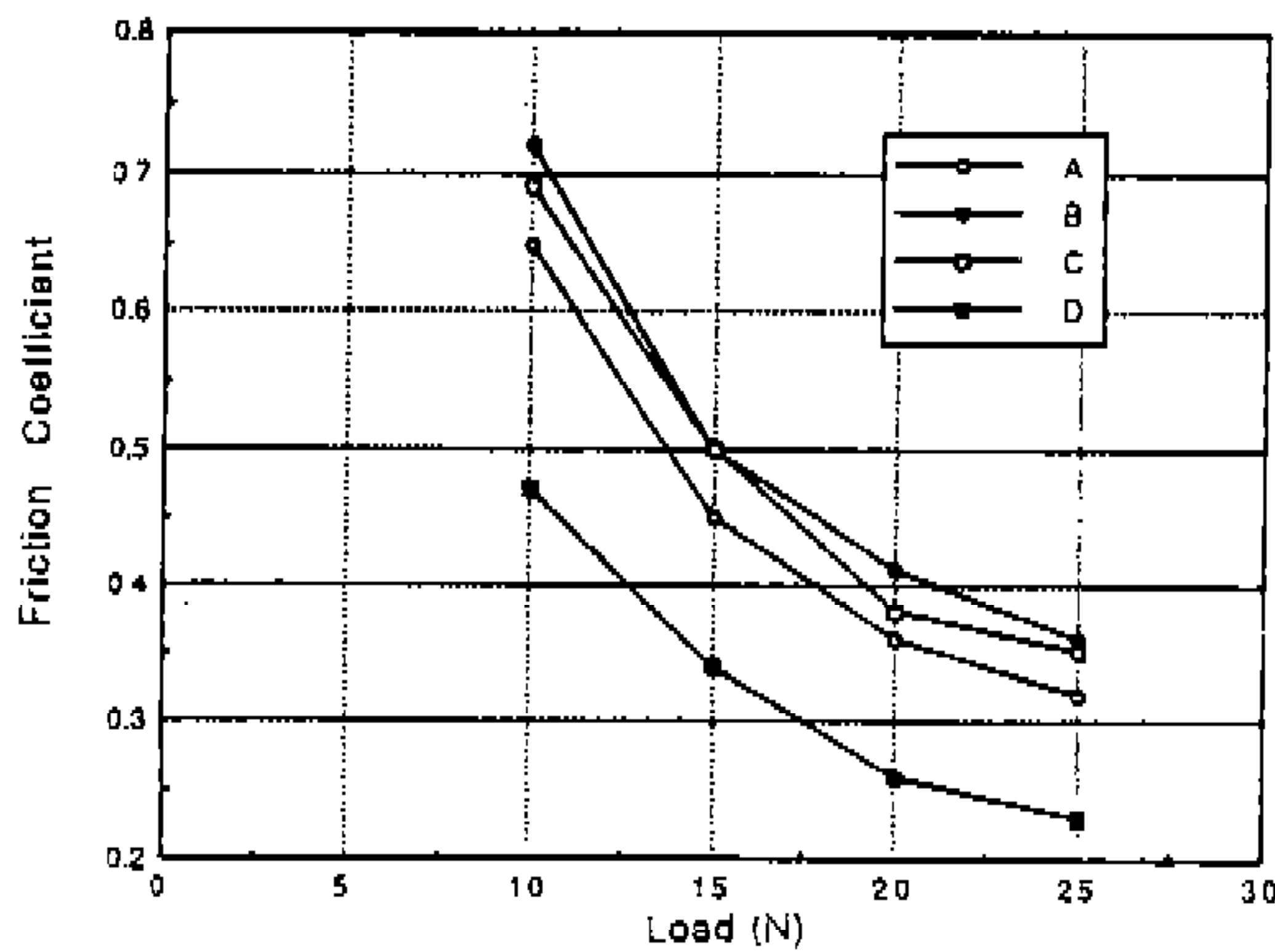


Fig.5 Friction coefficient vs. load at 3.51m/s.

있으며 시편 D를 제외한 나머지 시편들은 25N의 제동하중에서 0.32~0.36으로 승용차에 적절한 값을 나타내고 있다.<sup>10, 11, 14)</sup> Fig.3과 Fig.4에 나타난 바와 같이 낮은 초기제동속도에서는 각 시편의 마찰계수가 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 시편 D의 경우 Fig.5와 같이 초기제동속도가 3.51m/s에 이르면 다른 시편에 비하여 일관되게 낮은 마찰계수를 보이고 있다. 각 시편은 동일한 성분으로 구성되어 있으나 체적비가 각각 다르므로 원인을 직접 규명하기란 용이하지 않다. 따라서 상관계수를 이용하여 마찰계수에 대한 각 성분의 영향을 분석한 결과를 Table 2에 제시하였다. 그 결과 Kevlar는 낮기는 하지만 양(+)의 값을 그리고 Barium Sulfate와 Resin은 비교적 높은 양(+)의 값을 보이고 있어 이들 성분이 많이 포함되어 있을 수록 마찰계수가 높게 나타남을 알 수 있다.<sup>10)</sup> 한편 분말상태의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 filler는 음(-)의 값을 보이고 있으며 따라서 이들 성분의 마찰계수를 저하시키는 원인을 제공하고 있는 것으로 보여진다. 실험결과에 있어서도 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 가장 많이 함유한 시편 D가 가장 낮은 마찰계수를 보이고 있으며 시편 A도 다른 시편에 비하여 다소 낮은 마찰계수를 보이고 있다. 또한 filler의 성분으로는 고체윤활제로 많이 사용되는 흑연가루 등이 포함되어 있으므로 filler의 상관계수가 음(-)으로 나타나는 것은 타당하다고 생각된다.

Fig.6과 Fig.7은 각 주파수에 대한 제동소음의 크기를 나타낸 것으로서 각 시편의 최고 제동소음이 모두 가청주파수 범위내에서 발생하고 있음을 보여주고 있다. 또한 각 시편에 의한 제동소음이 실험장치 자체의 소음보다는 훨씬 높게 나타남을 알 수 있다. Fig.6은 15N-3.51m/s에서 각 시편의 제동소음을 측정된 것이다. 시편 D는

Table 2 Correlation coefficient of friction(load vs. composition).

Load	Kevlar	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaSO <sub>4</sub>	Resin	Filler
10	0.28	-0.95	0.71	0.68	-0.54
15	0.31	-0.97	0.75	0.62	-0.47
20	0.20	-0.94	0.74	0.71	-0.58
25	0.30	-0.96	0.74	0.63	-0.49

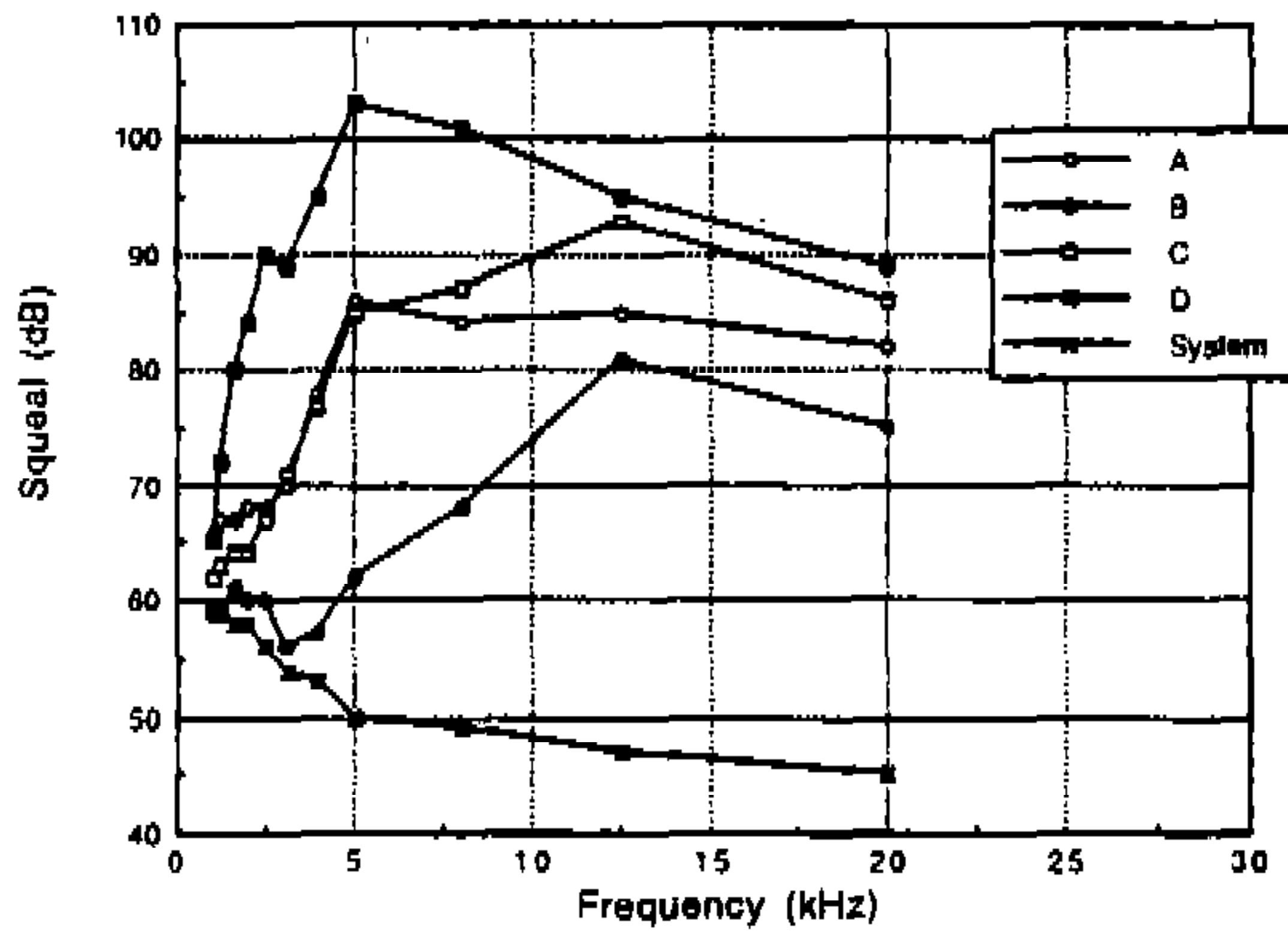


Fig.6 Squeal level vs. frequency at 15N and 3.51m/s.

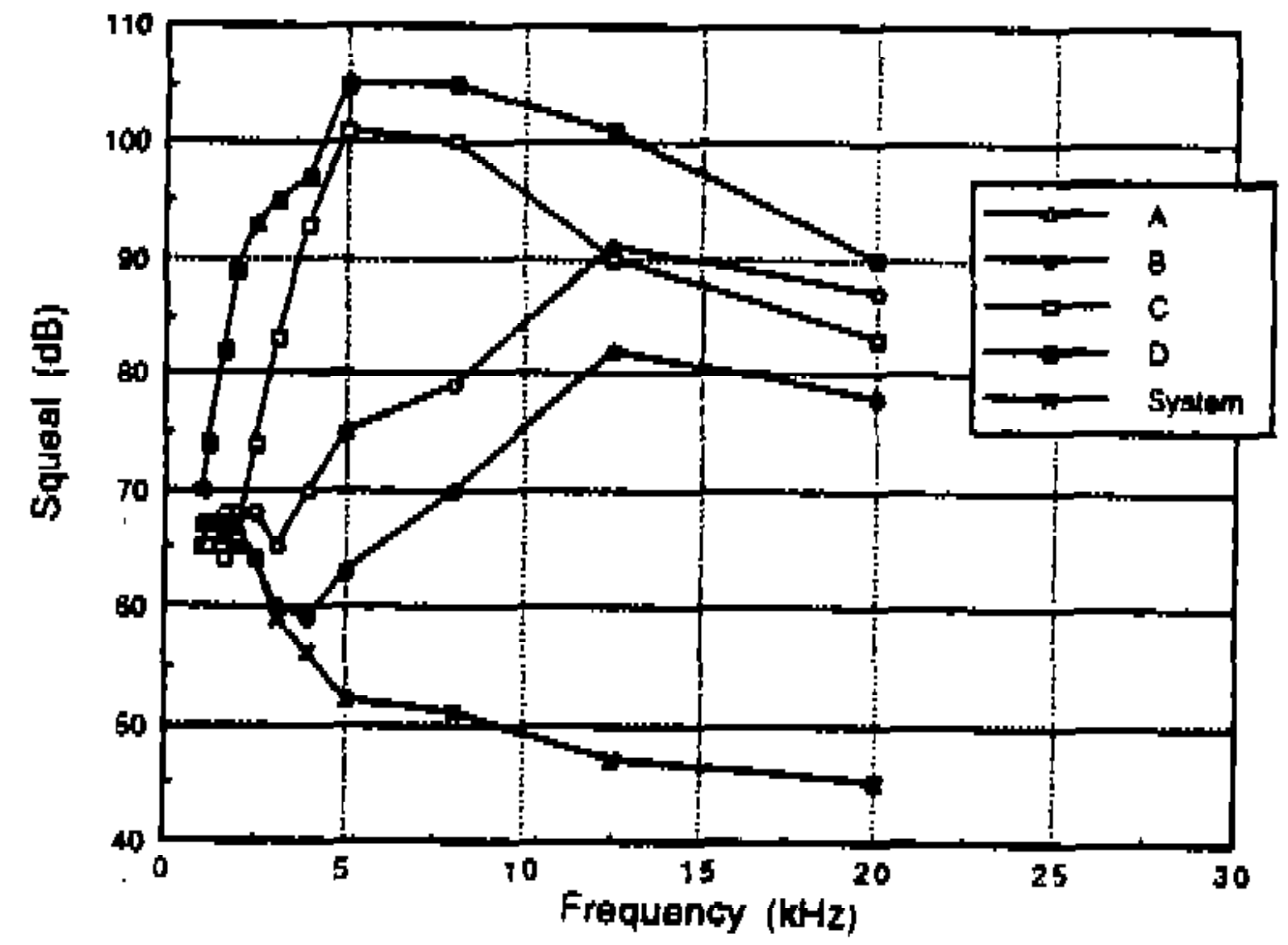


Fig.7 Squeal level vs. frequency at 25N and 3.51m/s.

Table 3 Correlation coefficient of squeal at 5kHz(PV vs. composition)

Load	Kevlar	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaSO <sub>4</sub>	Resin	Filler
29.3	0.42	-0.37	-0.27	-0.95	0.97
48.8	0.53	-0.38	-0.37	-0.88	0.92
52.5	0.23	-0.81	-0.78	-0.74	0.69
87.5	0.36	-0.44	-0.32	-0.96	0.96

Table 4 Correlation coefficient of squeal at 5N and 3.51m/s(frequency vs composition).

Frequency	Kevlar	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaSO <sub>4</sub>	Resin	Filler
4.0	0.19	0.83	-0.77	-0.75	0.69
5.0	0.23	-0.81	-0.78	-0.74	0.69
8.0	0.21	-0.78	-0.70	-0.82	0.77
12.5	0.33	-0.48	-0.35	-0.96	0.96

Table 5 Correlation coefficient of squeal at 25N and 3.51m/s(frequency vs composition).

Frequency	Kevlar	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaSO <sub>4</sub>	Resin	Filler
4.0	0.36	0.45	-0.33	-0.96	0.97
5.0	0.36	0.44	-0.32	-0.96	0.97
8.0	0.31	0.47	-0.32	-0.97	0.97
12.5	0.06	0.88	-0.77	-0.96	0.97

Table 6 Wear rate of each specimen at 25N and 3.51m/s

Specimen	Wear volume (10 <sup>-10</sup> m <sup>3</sup> /m)	Wear rate (10 <sup>-10</sup> m <sup>3</sup> /m)
A	5.03	12.6
B	2.51	6.2
C	4.20	10.5
D	6.11	15.2

5kHz에서 최고 103dB로서 매우 높은 소음치를 보이고 있으며 시편 A와 B 그리고 C는 12.5 kHz에서 최고 85dB와 81dB 그리고 93dB로서 상대적으로 낮은 소음치를 나타내고 있다. 한편 Fig.7은 25N-3.51m/s에서 각 시편의 제동소음을 측정하는 것이다. 시편 C와 D는 5kHz에서 최고 100 dB와 105dB의 매우 높은 소음치를 보이고 있는 반면 시편 A와 B는 12.5kHz에서 최고 82dB와 92 dB로 상대적으로 낮은 소음치를 나타내고 있다. 따라서 시편 C와 D가 제동소음을 많이 내는 시편으로 나타났다.

Table 3은 각 성분이 제동소음에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제동하중과 초기제동속도를 곱한 값(PV)의 증가에 따른 상관계수를 나타내고 있으며, Table 4와 Table 5는 최고 제동소음이 발생한 4kHz부터 12.5kHz까지의 주파수에 대한 각 성분의 상관계수를 보이고 있다. 그 결과 공통적으로 Kevlar, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 filler등이 양(+)의 값을 Barium Sulfate와 Resin등의 음(-)의 값을 나타내고 있다. Filler는 저소음 재료인 흑연<sup>2)</sup>의 예도 산화마그네슘, 고무, 코우크스 등을 포함하고 있는데 이들 성분들이 소음을 내는 원인으로 여겨진다.

좋은 마찰재의 성능은 마찰계수와 제동소음 외에도 내구성을 지녀야 한다. 마모율은 마찰재의 온도, 차량의 중량, 마찰계수, 마찰재 성분 등 여러 요인에 의해 변하나 일반적으로 브레이크 패드의 경우 정상 마모율은 패드의 두께가 20,000km 주

행당 약 1-3.5mm(약  $2.3-10.7 \times 10^{-13} \text{m}^3/\text{m}$ )로 알려져 있다.<sup>12)</sup> 각 시편의 마모율을 측정한 결과 모든 시편이 Table 6에 나타난 바와 같이 시편 B가 가장 좋은 결과를 보이고 있다. 마모율은 Fig. 8에서와 같이 함유성분 중 Barium Sulfate와 Resin의 양에 따라 반비례함을 알 수 있다. Barium Sulfate는 비유기질 filler 재료로 많이 쓰이며 고온에서 마모를 줄여주는 재료로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 또한 Resin이 마찰재의 마모율과 소음을 낮추는 기능을 하는 것은 Shibata<sup>8)</sup>, Yamashita<sup>13)</sup>의 연구 결과와도 일치한다. 따라서 Barium Sulfate와 Resin은 소음을 줄여주고 마찰계수를 증대시킬뿐만 아니라 마찰재의 수명을 연장시켜주는 좋은 성분임을 알 수 있다. 그러나 이들 재료가 상대면의 마모에 대하여 미치는 영향에 대해서는 더 연구할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

비석면 마찰재의 제동특성을 분석하기 위하여 pin-on-disk형의 마찰시험기를 이용한 마찰, 마모 및 소음 시험과 통계적인 분석을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 마찰재 성분 중에서 아라미드 계열의 Kevlar 섬유는 마찰계수를 유지시켜주는 반면 제동소음과 마모율을 높이는 결과를 나타내었다.
- 2) Barium Sulfate와 Resin은 제동소음을 줄여주고 마찰계수를 증대시킬뿐만 아니라 마찰재의 수명을 연장시켜주는 좋은 성분임을 알 수 있다.
- 3) 분말상태의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 마찰, 마모 및 제동소음 등에 있어서 모두 부정적인 결과를 나타내고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Seong K. Rhee, Michael G. Jacko, and Peter H.S. Tsang : "The Role of Friction Film in Friction, Wear, and Noise of Automotive Brakes" SAE Paper 900004, pp.29-36.

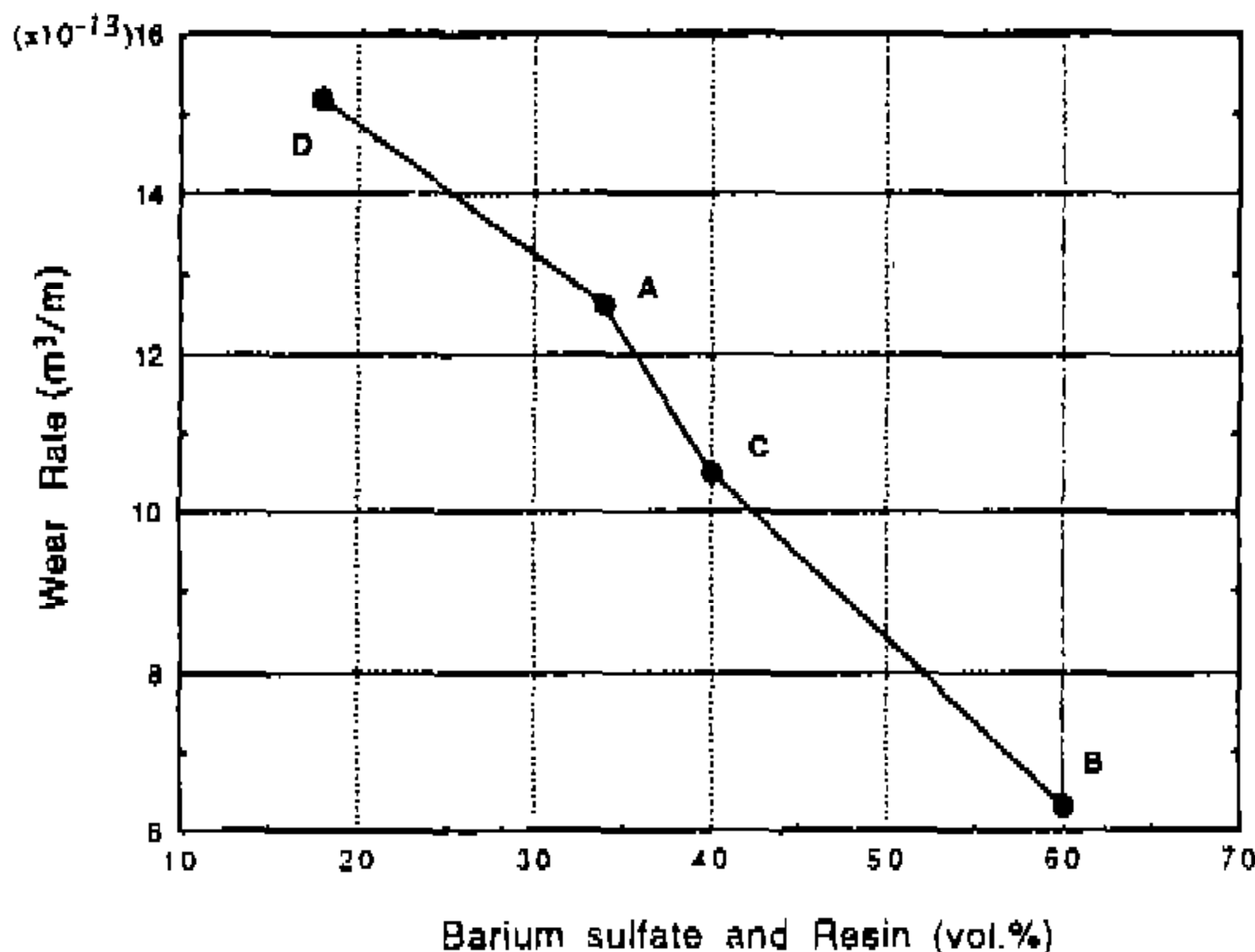


Fig.8 Wear rate vs. volume percentages of Barium sulfate and Resin.

2. A. Felske, G. Hoppe, and H. Matthai : "Oscillations in Squealing Disk Brakes-Analysis of Vibration Modes by Holographic Interferometry" SAE Paper 780333, pp.1576-1595.
3. A. Boszany : "Dynamics of a model of Stick Slip" Acta Technica Academiae Scientiarum Hungaricae 69, 1970.
4. E. Rabinowicz, Proc. Symp. Friction and Wear, Elsevier Publishing, 1969.
5. R.P. Jarvis, and B.Mills : "Vibrations induced by Dry Friction" Mech.E.Proc.178, Part I, 1963/64, pp.847-866.
6. Y.Ichiba, and Y.Nagasawa : "Experimental Study on Disk Brake Squeal", SAE Paper 930802, pp.103-110.
7. M.Matsuzaki, and T.Izumihara : "Brake Noise Caused by Longitudinal Vibration of the Disk Rotor" SAE Paper 930804, pp.125-132.
8. K.Shibata, A.Goto, S.Yoshida, Y.Azuma, and K. Nakamura : "Development of Brake Friction Material" SAE Paper 930806, pp.149-161.
9. Merck Index 10th ed., 994, 1983, pp.142.
10. Y.Yamaguchi : Tribology of Plastic Materials, Elsevier Publishing, 1990, pp.258-283.
11. R.G. McLellan : "Requirements of Friction Material in Commercial Vehicle Disc Brake Applications", 1988, pp.9-13
12. H. Mineguishi, H.Shimizu, H.Wakamatsu, and Y. Yoshino : "Prediction of Brake Pad Wear/Life by Means of Brake Severity Factor as Measured on a Data Logging System" SAE Paper 840358, pp.823-828.
13. Y.Yamashita, H.Asano, M.Kawase, and K.Iwata, "High Performance Asbestos-Free Friction Material for Disc Brake Pads with 'The Controlled Grain Structure'", SAE Paper 890861, pp.962-969.
14. 한국산업규격, 자동차용 브레이크 라이닝 및 패드(KS-R-4024), 1994.