

# 타이어의 동특성 분석을 위한 소프트웨어 개발

朴 贊 元 · 尹 大 遠\* · 朴 鍾 演 · 張 牧 淳\*\*

## Software Development for Analysis of Dynamic Characteristics on Tires

Chan-Won Park · Dae-Weon Yoon\* · Chong-Yeun Park · Mog-Soon Jang\*\*

### ABSTRACT

To analyze dynamic characteristics for a motorcar, the creation and the hammering test methods are introduced. This paper has studied the method of computing the natural frequency of the impulse wave on a tire, the decay constant which determines the absorption capability for the impulsive force. Moreover we have examined the reliability for the decay constant calculated, in this paper theoretical results are agreed with the simulated ones.

### 1. 서 론

타이어는 차량을 이동시키고 차체의 진동을 완화시켜주는 역할을 한다. 그러므로 타이어의 동특성은 차체 진동에 큰 영향을 미치며 또한 타이어의 동특성 메카니즘의 이해는 타이어의 회전속도 및 외력에 따라 반응하는 특성을 이해하는데 필수불가결하다. 이러한 타이어의 동특성연구는 현재까지 밝

혀진 것은 충격에 의하여 타이어의 고유진동 특성을 해석하는 것으로 간주되어 왔으며 명확한 理論이 정립되어 있지 않은 상태이다. 그런데 일반적으로 타이어의 동특성분석 및 시험장치실현을 위해서는 Fig. 1과 같은 세 부분으로 구분할 수 있다.

타이어의 동특성을 分析하기 위한 신호는 돌기(creation)에 의한 충격(impulse)을 가하여 발생시킨 진동을 센서를 이용하여 전후, 좌우에서 얻는 방법과 hammering에 의하여 타이어에 충격을 가했을 때 신호를 얻는 방법이 이미 개발되어 있다.

강원대학교 전기공학과 교수

\* (주)오토시스 대표

\*\* 강원대학교 대학원 전기공학과 석사과정

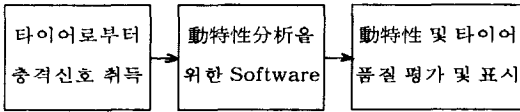


Fig. 1. Test equipment for the analysis of dynamic characteristics on tires

Fig. 1에서 타이어로부터 얻는 충격신호의 취득은 비교적 용이하다고 판단되어 본 연구에서는 취급하지 않고 참고문헌[1]과 같이 기존의 방법으로 이미 얻는 신호를 이용하여 動特性을 分析하고, peak-to-peak 값, 감쇠율, 고유진동수, 1차의 최대 peak값, 동탄성계수등에 관한 理論을 정립했으며, 이러한 理論을 이용하여 실제 타이어에서 발생하는 신호의 分析 프로그램을 개발하여 개인용 컴퓨터와 접합시켜서 그 分析결과에 의하여 타이어의 품질 평가 자료 및 결과를 개인용 컴퓨터의 화면으로 한눈에 볼 수 있도록 하였다.

본 연구에서 밝힌 타이어의 動特性 分析에 관한 사항은 타이어 및 차체의 진동 상태 分析과 소음 分析에 중요한 자료로서 활용될 수 있다. 즉 타이어의 충격에 관한 分析理論

은 충격이 타이어축에 전달되어서 차체에 전달되는 과정에서 차체의 소음 및 진동을 줄이는데 기본적 사항이 된다. 또한 본 연구에서 밝힌 타이어 품질의 종합평가 결과를 타이어제조 공정에 반영하여 타이어 품질향상을 위하여 활용될 수 있다.<sup>2)</sup>

## II. 타이어 動特性 分析 理論

타이어의 動特性은 정적 상태에서의 신호의 축출에 의하지 않고, 회전상태에서 시험이 수행되므로 속도에 따라 변동한다. 돌기 시험은 드럼의 주상 1개소에 설치된 돌기에 의해 타이어는 강제 회전하게 되고 이때 돌기 통과후 자유 진동하게 된다. 이때 타이어가 받는 힘을 타이어 축을 전후, 좌우방향에서 신호를 축출한다. 충격발생장치로부터 얻는 진동을 센서를 통하여 전기적 신호를 변환한다. 이때 타이어의 動特性은 타이어의 종류, 기하학적 제원, 회전속도(약 20km/hour - 120km/hour)와 공기압에 따라 다른 신호를 발생하여 여러번(32번) 측정하여 평균을 취한 신호를 취급한다.<sup>3)</sup>

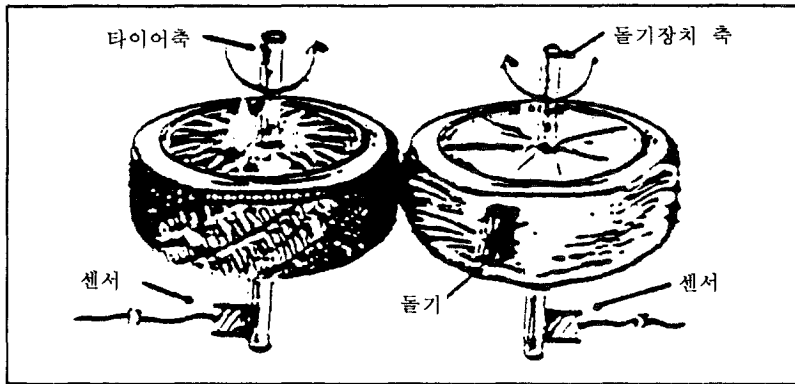


Fig. 2. Signal generation in creation test

Hammering 시험은 정지시의 타이어에 hammer로 impulse충격을 가한 후 그때 타이어축이 받은 힘과 타이어로부터 반력이

hammer에 주는 힘을 규준화하여 hammer가 받은 신호와 타이어축에 받은 신호를 축출한다.

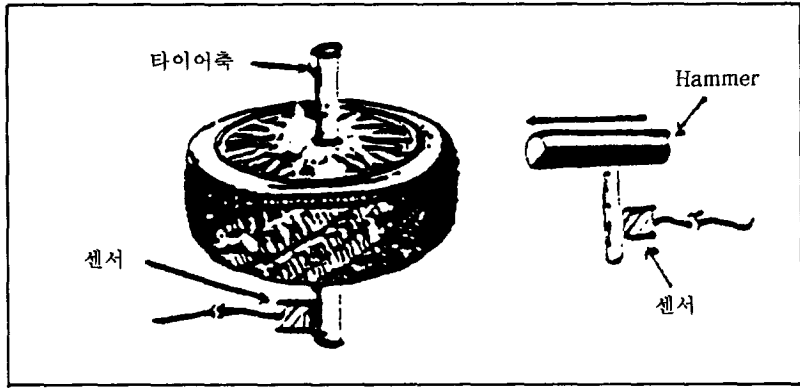


Fig. 3. Signal generation in the hammering test.

이러한 신호는 아날로그 저역통과필터 (analog low pass filter)에 의하여 잡음을 제거하며 저역통과필터는 낮은 차단 주파수를 사용하여 신호를 처리하였다.

타이어의 동특성 분석은 컴퓨터에 의존하기 때문에 A/D변환기(analog to digital converter)를 거쳐야 한다. 이때 A/D변환기의 sampling time과 A/D변환기의 bit수가 대단히 중요하다. sampling time이 작고 A/D 변환기의 bit수가 클수록 정확한 동특성 분석이 가능한 반면 처리속도가 느리며 시스템이 복잡해지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 hardware 제작이 용이하고 허용오

차를 만족할 수 있도록 sampling time은 0.0003sec, 특성 분석을 위한 samples의 갯수는 512개, A/D변환기의 bits는 8bit를 사용하였다.

디지털 신호는 A/D변환 과정에서 발생한 양자화 오차(quantization error)를 제거하기 위하여 디지털 저역통과필터(digital low pass filter)를 사용하였으며<sup>4)</sup> 디지털 저역통과필터를 통과한 신호로부터 타이어 동특성을 분석하였고 타이어의 성능평가를 위한 기본자료인 고유진동수, 감쇠율, 최대 peak 값, 동탄성계수등을 개인용 컴퓨터의 화면에 표시하였으며 그 개략은 Fig. 4와 같다.

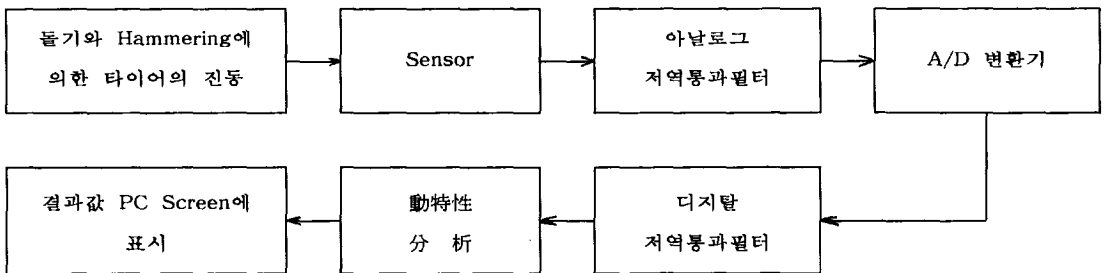


Fig. 4. Block-diagram for the research

디지털 저역통과필터를 통과한 신호로 타이어의 동특성을 분석하여 Fig. 5와 같이 돌기 시험에 얻은 파형으로부터 고유진동수와 감

쇠율을 구하고 hammering시험에서 얻은 파형으로는 coherence를 구하였다.

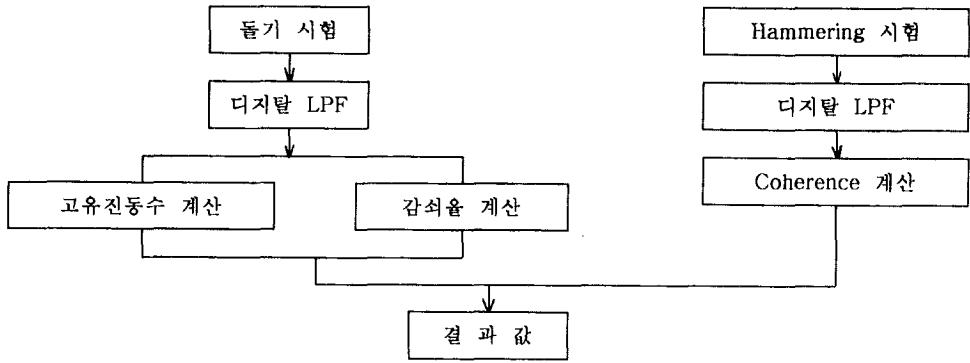


Fig. 5. Block-diagram to analysis of dynamic characteristics

### II - 1. 고유진동수

고유진동수는 시간축에서 얻은 신호로부터 주파수 분포를 구하여 얻을 수 있다. 타이어가 충격을 받은 직후의 반응은 타이어의 자체의 고유진동수와 충격을 가한 신호와 공진이 일어날 때 가장 큰 에너지를 가지며, 타이어의 감쇠특성에 의해 시간이 지남에 따라 타이어가 에너지를 흡수하여 소멸하게 된다.

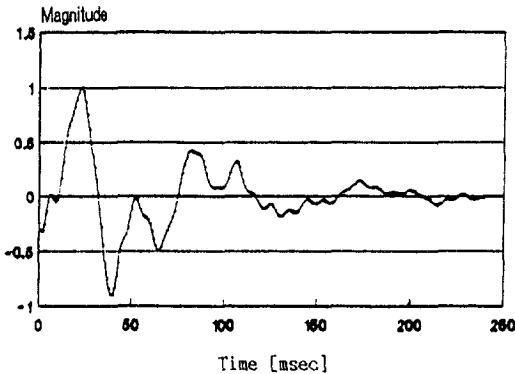


Fig. 6. Signal of impulse response in the tire

이때 얻은 시간축의 신호를 주파수 分析하여 최대 에너지를 갖는 주파수를 선택하면 그때의 주파수가 타이어의 고유진동수가 되며 고유진동수를 구하는 개략도는 Fig. 7과 같다.

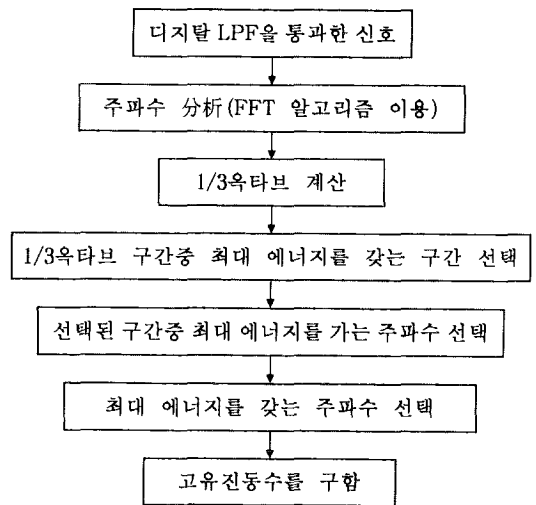


Fig. 7. Block-diagram of computing the natural frequency

이때 주파수 分析을 위해 Fast Fourier Transform (FFT)의 알고리즘을 사용한다.<sup>5)</sup> 그런데 FFT는 자체가 가지는 오차로 인해 최대에너지를 가지는 특정 주파수를 선택하기란 매우 어렵다. 그러므로 1/3 octave band개념을 도입하였다.<sup>6)</sup> 1/3 octave란 기준 주파수를 중심으로하여 기준주파수의  $\pm 11.5\%$ 내에 있는 신호의 합을 기준 주파수에서의 1/3 octave 값이라하며 기준주파수의  $\pm 11.5\%$ 의 구간을 1/3 octave band라 한다.  $X(f)$ 를 FFT한 신호,  $m$ 을  $\pm 11.5$ ,  $k$ 를 기준주파수,  $k$ 에서의 1/3 octave 값을

FOCT(k)라하면

$$\text{FOCT}(k) = \sum_{f=k-m}^{k+m} [x(f)] \dots\dots\dots (1)$$

이다.

1/3 octave 계산으로 신호의 주파수에 대한 에너지 분포를 알 수 있으며, 이렇게 구한 에너지 분포에서 최대 에너지를 갖는 구간을 선택하고 그 구간 내에서의 최대 에너지를 갖는 주파수를 선택하므로 고유진동수를 구할 수 있다.

## II - 2. Hammering 시험과 coherence

Hammering 시험은 정지시의 타이어에 hammer로 임펄스 충격을 주어 hammer로 타이어를 때릴 때의 힘 즉 타이어로부터 반력을 측정하고 그것을 입력으로했을 때 타이어 측에 전달되는 힘을 출력이라고 하고 이 출력과 입력을 fourier 변환하여 주파수 영역에서 입력과 출력의 coherence를 Fig. 8과 같이 구한다.<sup>7)</sup>

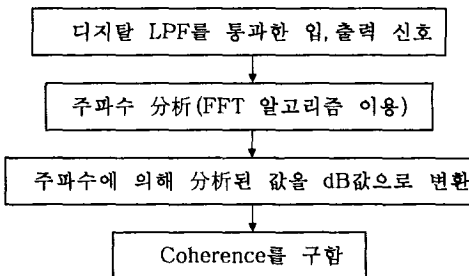


Fig. 8. Block-diagram of obtained the coherence factor

Coherence는 두 신호에 대한 선형 의존도(linear dependent degree)로 표시하며 주파수의 함수로 표시한다. coherence를 구하기 위하여 a(t)는 hammer가 받은 impulse 신호이고 b(t)는 타이어가 받은 impulse 신호라 할 때

이때  $A(f) = F[a(t)]$  단 :  $F(\ )$ 는  
fourier transform  
 $B(f) = F[b(t)]$

여기서

Auto-spectrum

$$A_{AA}(f) = A^*(f) \cdot A(f)$$

$$A_{BB}(f) = B^*(f) \cdot B(f) \dots\dots\dots (2)$$

Cross-spectrum

$$A_{AB}(f) = B^*(f) \cdot A(f) \dots\dots\dots (3)$$

단 :  $A^*(f)$ 는  $A(f)$ 의 conjugate

으로 표시되며 coherence는 다음과 같이 정의된다.<sup>7)</sup>

Coherence

$$r^2(f) = \frac{|G_{AB}(f)|}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)} \dots\dots\dots (4)$$

Coherence 함수  $r^2(f)$ 을 구하는 원인은 잡음에 대한 고유진동수의 보존상태를 파악하는데 목적이 있으며, 잡음이 가해지면  $G_{AB}(f)$ 의 image부분이 변하게 되어  $G_{AB}(f)$ 는 오차를 발생하게 된다.<sup>7)</sup>

## II - 3. 감쇠상수

타이어의 動特性은 충격에 대한 빠른 흡수에 이루어져야만 사고 발생시 차체에 미치는 영향을 최소화할 수 있다. 따라서 충격에 대한 충격흡수의 지표로서 감쇠율의 대소에 의하여 판별할 수 있다.<sup>8)</sup> 이를 위하여 입력신호의 극치를 구하고 이 값들에 의하여 감쇠율을 구하고 여기서 구한 감쇠상수를 가지는 곡선과 입력신호에서 극치와의 상관계수를 구하고 상관계수로부터 결정계수를 구하여 신뢰도를 구하였다.

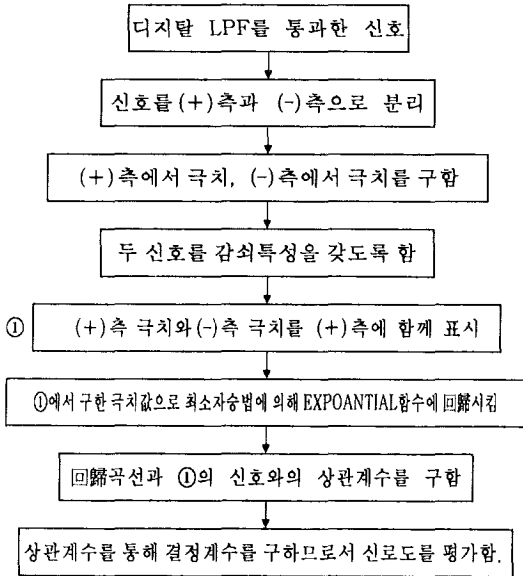


Fig. 9. Block-diagram for decay constant

#### II - 4. 최소자승법에 의한 回歸分析

回歸分析이란 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 특정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 分析 방법을 말한다. 여기서 데이터는 선택된 최종극치값이 되고 추정된 回歸곡선의 함수는 최소자승법에 의하여 구하였다.<sup>9)</sup>

선택된 최종극치값은 수학적 모형  $Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x}$  에 回歸시킨다.  $Y$ 는 신호의 크기로 하고  $X$ 는 시간이라 할때

$$Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x} \dots\dots\dots (5)$$

$$\ln Y = \ln Y_1 - \ln Y_2 \dots\dots (6)$$

여기서  $Z = \ln Y$ ,  $C_1 = \ln k_1$ ,  $C_2 = k_2 \cdot X$ 라 할때

최소자승법에 의한  $C_1$ ,  $C_2$ 를  $(X_i, Y_i)$ 로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

$$\left| \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right| \cdot C_1 + \left| \sum_{i=1}^n (Y_i^2 \cdot X_i) \right| \cdot C_2 = \sum_{i=1}^n (Y_i^2 \cdot \ln Y_i) \dots\dots\dots (7)$$

$$\left| \sum_{i=1}^n (Y_i^2 \cdot X_i) \right| \cdot C_1 + \left| \sum_{i=1}^n (Y_i^2 \cdot X_i^2) \right| \cdot C_2 = \sum_{i=1}^n (Y_i^2 X_i \cdot \ln Y_i) \dots\dots\dots (8)$$

식 (7), 식 (8)로부터  $C_1$ 과  $C_2$ 를 구할 수 있으며 이것으로부터

$Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x}$ 를 구하여 감쇠율  $K_2$ 을 구할 수 있다.

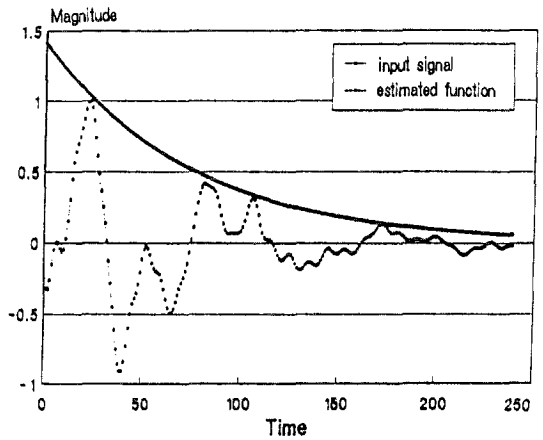


Fig. 10. Input signal and regression curve  $Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot x}$

#### II-3-3. 상관계수 및 신뢰도

상관계수는 두 신호 사이에 어떠한 관련성이 있는가를 보여주는 요소이다.<sup>10)</sup> 또한 상관계수는 두 신호의 공분산(covariance)과 표준편차의 곱의 비율로 정의된다.<sup>10)</sup>

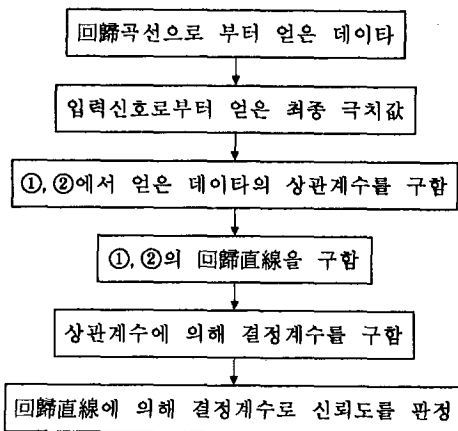


Fig. 11. Evaluation procedure of the regression

돌기시험에서 얻은 신호를  $X_i$ 라 하고 回歸分析에 의해 구한  $Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot X}$ 를  $Y_i$ 라 할 때  $X_i$ 와  $Y_i$ 사이의 상관계수를  $\rho$ 라 하면 상관계수는 식 (9) 과 같다.

$$\rho = \frac{S_{XY}}{\sqrt{S_{XX} \cdot S_{YY}}} \quad (9)$$

$$\text{단 : } S_{XX} = \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - \bar{X})^2$$

$$S_{YY} = \sum_{i=0}^{n-1} (Y_i - \bar{Y})^2$$

$$S_{XY} = \sum_{i=0}^{n-1} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

여기서 상관계수  $\rho$ 의 제곱을 결정계수 (coefficient of determination)이라하며 이것은 총변동 중에서 回歸선에 의하여 설명되는 변동이 차지하는 비율을 말하며 결정계수를  $\phi^2$ 로 표시할때  $\phi^2$ 의 범위는  $0 \leq \phi^2 \leq 1$ 로써 만약 측정값들이 모두 回歸선상에 위치한다면  $\phi^2 = 1$ 이 되고 이와 반대로  $X_i$ 와  $Y_i$ 사이의 回歸관계가 전혀 없을 경우에는 回歸선상에 하나도 위치하지 않으며  $\phi^2 = 0$ 이 된다. 또한  $\phi^2 * 100\%$ 는 回歸에 의하여 설명되는 변동이므로  $\phi^2 * 100\%$ 의 신뢰도를 가진다고 할 수 있다.

### III 動特性 해석 결과 및 검토

#### III-1. 속도별 고유진동수

속도별 고유진동수는 Fig. 12. 와 같다. 고유진동수는 전후방향에서는 110Hz-130Hz, 좌우방향에서는 90Hz-100Hz로 나타났다.

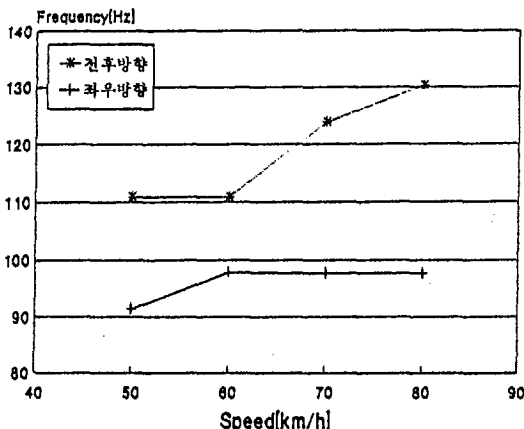


Fig. 12. Natural frequency of front and rear direction or right and left direction

#### III-2. Hammering 시험에 의한 coherence

Coherence의 Fig. 13에서 고유진동수에서는 잡음 (noise)에 의한 변화가 거의 없음을 볼 수 있다. 따라서 잡음이 가해지더라도 고유진동수에서는 신호가 보존됨을 볼 수 있다.

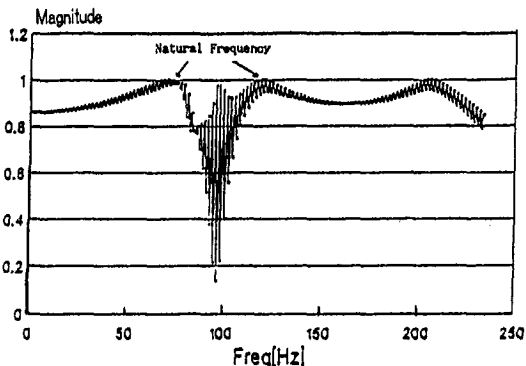


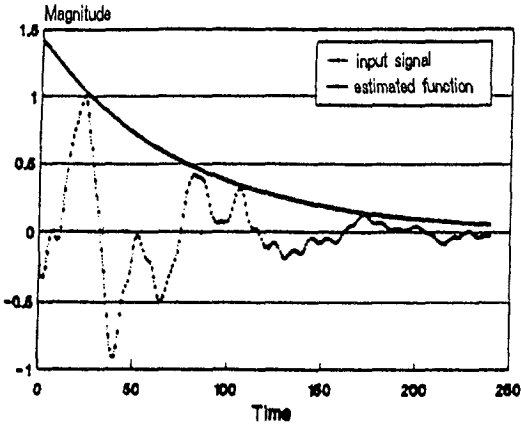
Fig. 13. Coherence

III-3. 回歸分析에 의해 구한 속도별 곡선

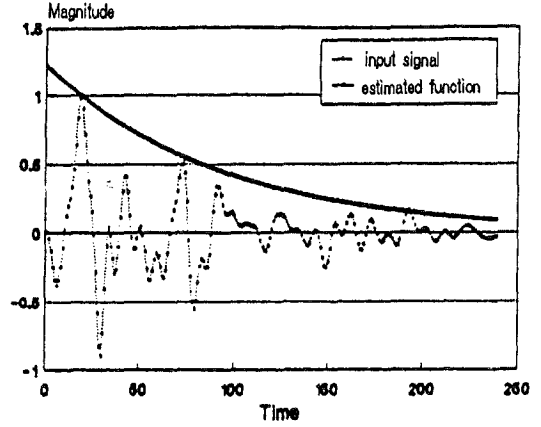
회귀분석에 의한 감쇠상수는 Table. 1. 과 같으며 실측치와 비교한 곡선은 Fig. 15. 와 같다.

Table. 1. Curve Fitting results for  $Y = k_1 \cdot e^{-k_2 \cdot X}$

계수	km/h방향		좌우 방향	
	전 후 방향	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>
50	1.417	45.07	1.096	47.61
60	1.349	45.80	1.107	37.68
70	1.174	41.69	1.160	32.00
80	1.218	36.17	1.118	32.90



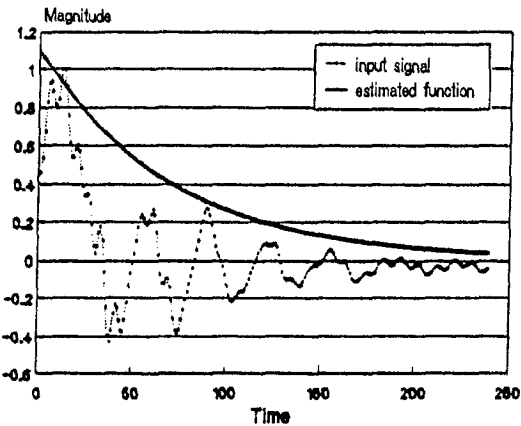
(a) 50km/h



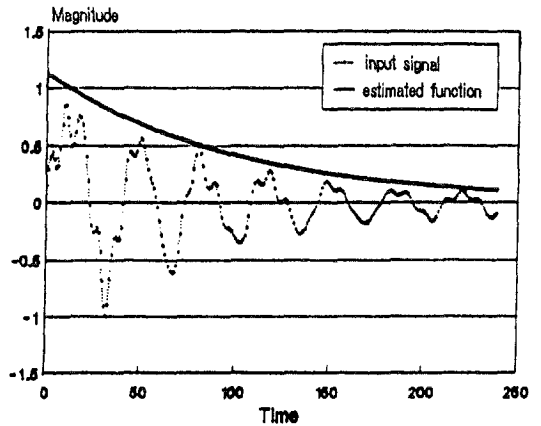
(b) 80km/h

..... 입력신호, ——— 回歸곡선

Fig. 14. Regression curve for speed of front and real dir



(a) 50km/h



(b) 80km/h

..... 입력신호, ——— 回歸곡선

Fig. 15. Regression curve for speed of front and real dir



### III-4. 상관계수

回歸分析에 의해 구한 속도별 곡선과 시험 장치로부터 얻은 신호와의 상관계수

Table. 2. 상관계수 ( $\rho$ )

km/h방향	전 후 방 향	좌 우 방 향
50	0.989774	0.915094
60	0.975621	0.966665
70	0.958378	0.967928
80	0.980421	0.948107

### III-5. 결정계수

回歸分析에 의해 구한 속도별 곡선과 시험 장치로부터 얻은 신호와의 결정계수는 Fig. 16과 같다. Fig. 16과 같이 본 연구에서 얻은 감쇠상수는 84% 이상의 신뢰도를 가진다고 볼 수 있다.

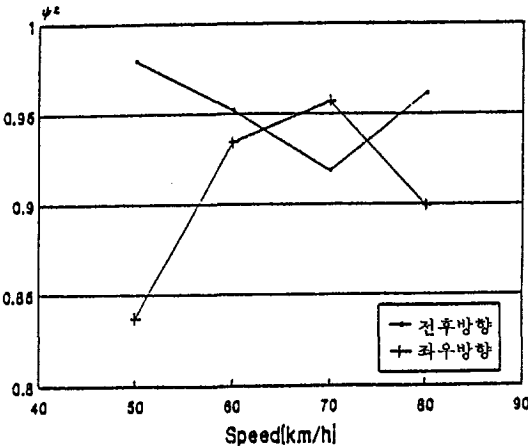


Fig. 16. Determination factor  $\psi^2$  of front and rear dir.

## IV. 결 론

승용차 타이어의 동특성을 파악하기 위해

서 돌기에 의한 충격시험과 hammer에 의한 충격시험 방법을 도입하여 分析하였다. 돌기시험에서는 타이어의 고유진동수를 파악하기 위한 방법, 타이어의 충격흡수능력을 표시하는 충격파의 감쇠상수 및 감쇠상수를 구하여 타이어의 성능을 分析하였다. 또한 hammer에 의한 충격시험에서는 coherence를 구하여 타이어의 동특성을 비교할 수 있으므로 향후 타이어의 품질평가 및 제조공정에 반영함으로써 타이어의 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### <後 記>

본연구는 산학협동재단의 1993년도 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 연구수행에 적극적인 협조를 해준 (株)오토시스의 관계자 여러분과 산학협동재단의 관계자 여러분에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. "Tire 돌기승월 試驗機 立會檢査 要領書", 文化製衡 株式會社 産機製造課, (1990)
2. 손찬석, "돌기승 시험장치", 한국타이어 번연본, (1992)
3. "Tire 돌기승월 시험기 개발 계획서", 한국표준연구소 음향연구실, (1988)
4. G.R. Cooper and C.D. Mcgiller, "Probabilistic methods of signal and system analysis", p. 81, Holt Rinehart and Winston Inc., (1971)
5. E. Oran Brigham, "The Fast Fourier Transform", pp. 163-169, Prentice-hall, (1971)
6. Bruel and kjar, "Frequency Analysis", pp. 81, 115-119, Prentice-Hall Company, (1988)

7. Bruel and kjar, "Frequency Analysis", pp. 228-238, Prentice-Hall Company, (1988)
8. A. A. Girgis and Brown, "Application of Kalman Filtering in Computer Relating", IEEE Trans. Power App. and Syst. vol. PAS-100, No. 7, pp. 3387-3391, July (1981)
9. M. L. James and G. M. Smith and J. C. Wolford, "Applied numerical methods for Digital computation", pp. 315-327, Harper & Row, (1984)
10. 朴聖炫, "現代實驗計劃法", pp. 269-297, 民英社, (1982)