

〈논 문〉 SAE NO. 953735

곡관내 자성유체 PLUG의 진동특성

The Oscillation Characteristics of a Magneticfluid Plug in Curved Tube.

전 운 학*, 이 행 남**
U. H. Chun, H. N. Lee

ABSTRACT

The aim of the present study is to provide fundamental informations for the development of magneticfluid actuator. To achieve the aim, oscillation characteristics of the magneticfluid plug are investigated by experiment for the various length and position of the magneticfluid plug and the frequency of magnetic field. The oscillation characteristics are obtained. Amplitude, natural frequency, phase shift and damping ratio, are compared with theoretical values. From the study, the following conclusive remarks can be made. The experimental equation for the magnetic field is obtained. The critical magneticfluid length exists and its value is about 70mm. The range of the damping ratio and fluid loss coefficient obtained by experiment are 0.1~0.2 and 30~100, respectively. Comparison between experimental and theoretical results of oscillation characteristics shows good agreement in the high frequency range. Meanwhile, in the low frequency range, there appears little discrepancies(5% in the frequency and amplitude and 10% in phase difference and damping ratio) with each other.

주요기술용어 : Magneticfluid plug(자성유체 플러그), Critical magneticfluid length(임계 자성유체 길이), Natural frequency(고유진동수), Phase shift(위상차), Damping ratio(감쇠비)

기 호 설 명

A : 액주의 진폭(mm)
 d : 관내경(mm)

F : 자성유체가 받는 자력
 F_r : 푸루우드수(V/\sqrt{dg})
 g : 중력가속도(9.8m/s^2)
 H : 자장의 세기(A/m)
 H_0 : 정상자장의 세기(A/m)
 ΔH : 변동자장의 세기(A/m)
 h : 액주높이(mm)

* 정회원, 국민대학교 기계공학과,

** 정회원, 조선대학교 선박해양공학과

- k : 볼츠만상수(1.38×10^{-23} J/K)
- l_f : 비자성 유체의 길이(mm)
- l_m : 자성유체의 길이(mm)
- $L(\xi)$: Langevin function
- M : 자화의 강도
- m : 입자의 자기 모멘트($A \cdot m^2$)
- n : 고유진동수(Hz)
- p : 레이놀즈수($\rho Vd/\eta$)
- Re : 절대온도
- K : 절대온도
- t : 시간(s)
- t^* : 무차원시간
- V : 속도(m/s)
- x : 플러그 변위(mm)
- x^* : 플러그의 무차원 변위
- X_{20} : 자성유체의 중심에서 상면까지의 초기 높이(mm)

그리스 문자

- ζ : 유체손실계수
- η : 동점성계수(pa·s)
- λ : 관마찰계수
- μ_0 : 진공중의 투자율($400\pi \times 10^{-9} H/m$)
- ρ : 밀도(kg/m^3)
- σ : 감쇠비
- ϕ : 위상차(deg)
- ω : 각진동수(Hz)

첨 자

- 0 : 초기값
- 1 : 플러그 하단표면
- 2 : 플러그 상단표면
- f : 비자성유체
- m : 자성유체

1. 서 론

자성유체는 1938년 Elmore가 그 제조를 시작한 후 Bozorth, 近角 등에 의해 개량되었고,

1965년 S. S. Papell¹⁾의 기계적 습식 분쇄법으로 고농도의 마그네타이트 미립자 콜로이드 자성유체를 제작하여 NASA의 아폴로 계획에 채택된 후 관련 부분에서 그 응용연구가 진행되었다.

1966년 일본에서는 동북대학의 下飯²⁾이 2분자 코팅이라는 새로운 제조법을 개발하여 그 제조원가가 종전의 1/10로 줄어들었으며, 물, 합성유에 입자를 분산시킨 자성유체도 가능하게 되었다. 자성유체 제조법의 발달과 더불어 이론분야에서도 활발한 연구가 진행되어 자성유체의 운동을 지배하는 방정식이 Neuringer와 Rosensweig³⁾, shliomis⁴⁾, Shizawa⁵⁾, Sano-Doi⁶⁾ Berkovsky⁷⁾ 神山⁸⁾ 등에 의해 확립되기 시작했다.

이와 같이 자성유체의 제 특성과 거동에 대한 이론적 규명이 점차 확대되자, 자성유체의 특성을 이용하고자 하는 응용기술의 개발 연구가 여러 분야에서 진행되어 오고 있다.

그러나 종래의 자성유체 연구는 정상자장에 의한 자성유체의 유지 혹은 유체에 작용하는 자기력의 정수력학적인 관점으로부터 이용을 주안점으로 했던 것이 많다. 자성유체의 관내유동특성 중 자장에 의해서 자성유체의 운동을 제어하는 비정상 유동특성의 이용은 댐퍼, 액추에이터, 자장에 의한 유체구동 등 중요한 연구분야 이지만 아직 충분한 해명이 이뤄지지 않고 있는 실정이다. 특히, 자성유체 액추에이터는 자장을 제어하여 자성유체의 계면 형상의 변형 또는 관내 비정상 유동 특성을 이용하므로 큰 에너지의 전달은 어렵지만, 구동부를 유체로 구성할 때 유체의 미소변위 혹은 운동을 외부로부터 전자기적으로 쉽게 제어할 수 있기 때문에 종래의 피스톤을 사용한 액추에이터의 문제가 되고 있는 고체간의 마찰저항이 거의 없고 피스톤과 실린더간의 누설이 거의 없어 실링 효과가 우수하며 마모가 거의 없는 장점이 있기 때문에 새로운 방식의 액추에이터⁹⁾로 그 개발의 기대가 커지고 있다.

神山 등은 자성유체 액추에이터 개발의 기초 연구로서 일련의 연구를 하였는바, 즉 자장이 부가된 자성유체의 관내 비정상 층류 문제를 취급하여 정상 비균일 수직 자장하에서 변동압력 구배가 주어졌던 경우의 이론해석과 변동유량이 주

어진 경우의 압력구배의 시간 변동을 조사하기 위한 기초적 실험과 관로에 자성유체를 봉입하여 변동자장에 의한 진동특성을 이론 및 실험적으로 연구하였다.^{9,10)} 하지만 神山의 이론 및 실험은 특정의 단일 직관 및 U자관을 선택하여 자성유체의 길이에 대한 특성의 규명에 한정되어 자성유체 액추에이터 개발에 적용하기에는 미흡한 점이 없지 않다. 따라서 본 연구에서는 이러한 액추에이터의 개발을 위한 기초적인 연구로서 외부로부터 주어지는 변동자장에 의해 자성유체의 자화 특성을 변하게 하여 자성유체 플러그에 왕복 운동을 생기게 한다. 이러한 진동운동의 이론적인 해석과 실험적인 검토를 하기 위해 유리관의 모형을 곡관으로 제작한 다음 자화의 강도가 커서 자장의 크기가 적을 때에도 안정된 자화 특성을 갖는 용매가 등유인 자성유체와 증류수가 유리관에 함께 봉입하여 자성유체는 구동체로, 증류수는 피구동체로 상정하고 자성유체 플러그 길이 및 위치를 변화시키고 아울러 피구동체로 상정한 증류수 길이를 적당히 변하시키면서 이 변화에 따르는 관내의 자성유체 플러그의 진폭, 고유진동수 및 위상차 등을 실험으로 구하여 그 결과를 이론값과 비교 분석하여 자성유체를 사용한 새로운 액추에이터 개발에 기초적인 자료 제공을 하고자 한다.

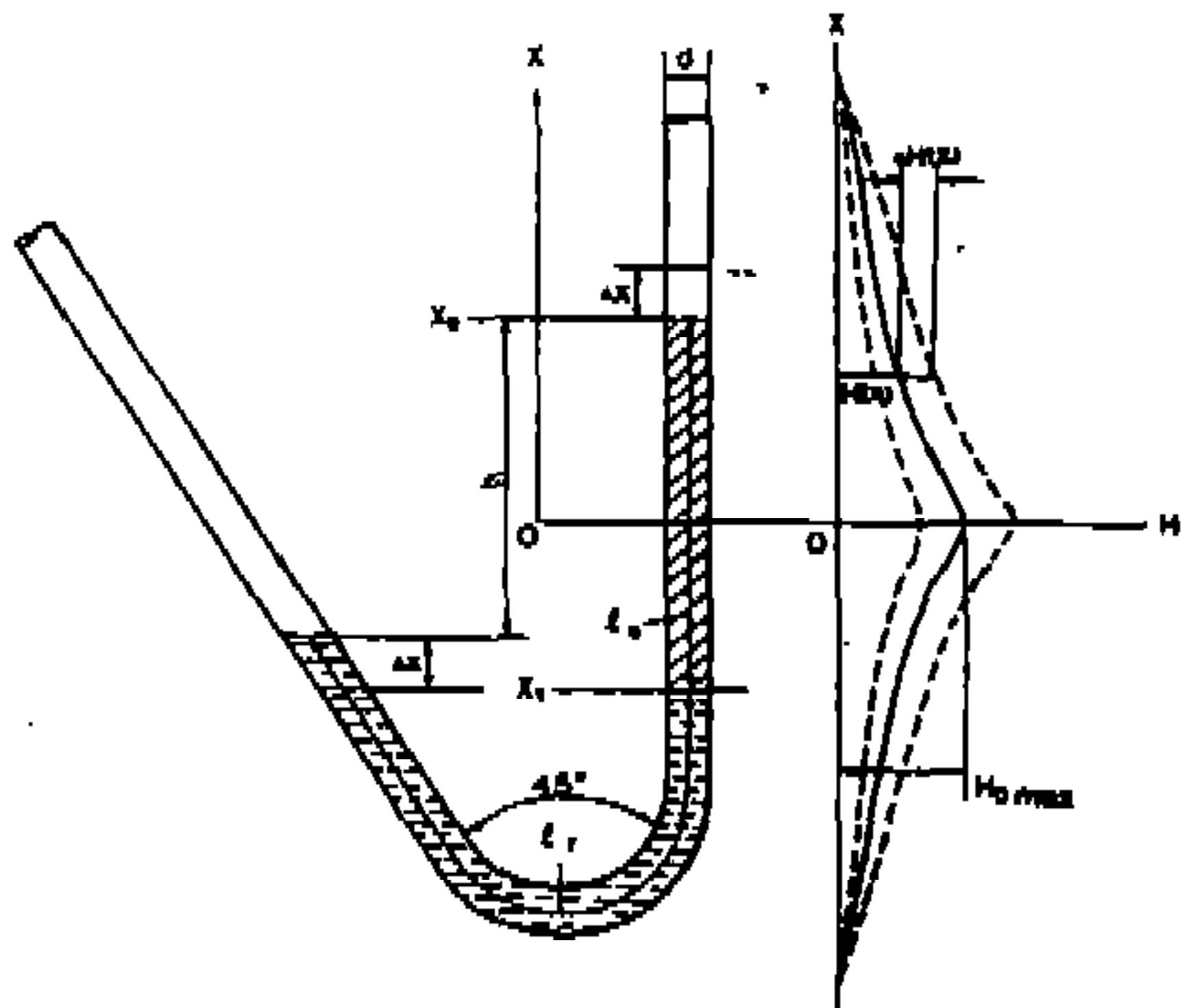


Fig. 1 Oscillation of a magneticfluid in tube due to the variation of the magnetic force.

2. 곡관 플러그의 무차원 진동 방정식

Fig.1과 같은 곡관내 진동류의 손실을 관마찰 손실과 기타 유체손실로 나눌 수 있고, 자성유체 부분 및 비자성유체 부분의 관마찰 계수를 각각 λ_m, λ_f 라하고, 기타 유체손실 계수를 자성유체 부분 및 비자성유체 부분에서 각각 ζ_m, ζ_f 라고 한다. 유체가 총류 영역에 있다고 가정하면 관마찰 계수 $\lambda_m = 64/R_{em}, \lambda_f = 64/R_{ef}$ 로 나타낼 수 있으며 이 경우 진동류의 지배하는 방정식은 수직관에서 플러그의 진동방정식 해석 방법^{9, 11, 12)}을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & (\rho_f l_f + \rho_m l_m) \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{32 \eta_m}{d^2} \left\{ \gamma \left(l_f + \zeta_f \frac{R_e d}{64} \right) + \right. \\
 & \left. \left(l_m + \zeta_m \frac{R_{em} d}{64} \right) \right\} \frac{dx}{dt} + g \{ \rho_m l_m - \rho_f (l_m - h - 2x) \} \\
 & - \mu_0 \int_{H_1}^{H_2} M dH = 0 \tag{1}
 \end{aligned}$$

여기서 $R_{ef} = \rho_f V d / \eta_f$: 비자성유체 R_e 수
 $R_{em} = \rho_m V d / \eta_m$: 자성유체 R_e 수
 $\gamma = \eta_f / \eta_m$

자성유체의 자화의 강도 M 은 Langevin의 상자성 이론에 의해

$$M = n \cdot m \cdot L(\xi)$$

여기서, Langevin 함수¹³⁾ $L(\xi) = \coth \xi - \xi^{-1}$,

$\xi = \mu_0 m H / k T$ 로 주어진다.

길이의 대표값을 d , 시간의 대표값을 $\sqrt{d/g}$ 로 놓고, 자화의 강도 M 은 Langevin 함수 $M = n \cdot m \cdot L(\xi)$ 로 대체하면, 무차원 진동 방정식(1)은 다음과 같다.^{9, 11)}

$$\begin{aligned}
 & \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + 2 \alpha_1 \frac{dx^*}{dt^*} + \frac{l_m^* (1 - \rho_f^*) + \rho_f^* (h^* + 2x^*)}{\rho_f^* l_f^* + l_m^*} \\
 & - \alpha_2 \ln \frac{\xi_2 \sinh \xi_2}{\xi \sinh \xi} = 0 \tag{2}
 \end{aligned}$$

가 된다. 여기서

$$\alpha_1 = \frac{16F_r}{R_{em}} \frac{\gamma l_j^* + l_m^* + \frac{\gamma \zeta R_{ef} + \zeta_m R_{em}}{64}}{\rho_j^* l_j^* + l_m^*} \quad (3)$$

단, $F_r = V/\sqrt{dg}$

$$\alpha_2 = \frac{nkT}{\rho_m g d (\rho_j^* l_j^* + l_m^*)} \quad (4)$$

또 초기조건 ($t^*=0, x^*=0$)으로 부터

$$\frac{l_m^*(1-\rho_j^*) + \rho_j^* h^*}{\rho_j^* l_j^* + l_m^*} = \alpha_2 \ln \frac{\xi_{10} \sinh \xi_{20}}{\xi_{20} \sinh \xi_{10}} \quad (5)$$

이 얻어지고 이 식을 (2)식에 대입하면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + 2\alpha_1 \frac{dx^*}{dt^*} + \frac{2\rho_j^* x^*}{\rho_j^* l_j^* + l_m^*} \\ = \alpha_2 \ln \frac{\xi_1 \xi_{20} \sinh \xi_2 \sinh \xi_{10}}{\xi_2 \xi_{10} \sinh \xi_1 \sinh \xi_{20}} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의 우변 $\sinh \xi$ 항은

$\xi \gg 1$ 의 경우에는 $\sinh \xi = \exp \xi / 2$ 로

$\xi < 1$ 의 경우에는 $\sinh \xi = \xi + \xi^3 / 3!$ 로 각각 근사하면 진폭 x^* 에 대한 식은 다음과 같다^{9, 11)}.

$$\frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + 2\alpha_1 \frac{dx^*}{dt^*} + \alpha_2 x x^* = F \sin \omega t^* \quad (7)$$

단, $\xi \gg 1$ 일 때 : {경우(1)}

$$\begin{aligned} x = \frac{2\rho_j^*}{(\rho_j^* l_j^* + l_m^*) \alpha_2} + \left(\frac{d\xi}{dx^*}\right)_1 (1 - \xi_1^{-1}) - \left(\frac{d\xi}{dx^*}\right)_2 (1 - \xi_2^{-1}) \\ F = \alpha_2 \{ \Delta \xi (\xi_1^{-1}) - \Delta \xi (\xi_2^{-1} - 1) \} \end{aligned} \quad (8)$$

이고,

$\xi < 1$ 일 때 : {경우(2)}

$$\begin{aligned} x = \frac{2\rho_j^*}{(\rho_j^* l_j^* + l_m^*) \alpha_2} - \left(\frac{d\xi}{dx^*}\right)_2 (1 - \xi_2^{-1}) \\ F = \alpha_2 \{ -\Delta \xi_2 (\xi_2^{-1}) - 1 \} \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서 ξ_{10} 와 ξ_{20} 은 초기조건에서 각각 ξ 와 ξ_2 의 값이다.

식(7)로 부터 일반해는

$$\begin{aligned} x^* = C_1 e^{-2\alpha_1 + \frac{\sqrt{2\alpha_1^2 - 4\alpha_2 x}}{2} t^*} + C_2 e^{-2\alpha_1 + \frac{\sqrt{\alpha_2 x - 8\alpha_1}}{2} t^*} \\ + \frac{F}{\sqrt{(2\alpha_1 \omega)^2 + (\alpha_2 x - \omega^2)^2}} \\ \sin(\omega t^* - \tan^{-1} \frac{2\alpha_1 \omega}{\alpha_2 x - \omega^2}) \end{aligned} \quad (10)$$

이 되고, (10)식에서

$$\begin{aligned} F / (p^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha_1^2 \omega^2 = \\ (F/p)^2 \{ 1 - (\omega^2/p^2) \}^2 + \{ 2\sigma(\omega/p)^2 = A \end{aligned} \quad (11)$$

라 하고,

$$\begin{aligned} \tan^{-1} \{ 2\alpha_1 \omega / p^2 - \omega^2 \} = \\ \tan^{-1} [2\sigma(\omega/p) / \{ (\omega/p)^2 \}] = \phi \end{aligned} \quad (12)$$

라 하여

$$p = \sqrt{\alpha_2 x} \quad (13)$$

라 놓으면, (10)식에 (11), (12), (13)식을 대입하고 우변 첫번째, 두번째항은 충분한 시간이 지나면 무시할 수 있으므로 3번째 항의 강제 진동성분의 변위는 다음과 같이 된다^{9, 11)}.

$$x^* = A \sin(\omega t^* - \phi) \quad (14)$$

3. 실험

3.1 실험 장치

Fig.2는 본 실험에 사용된 실험장치의 계략도

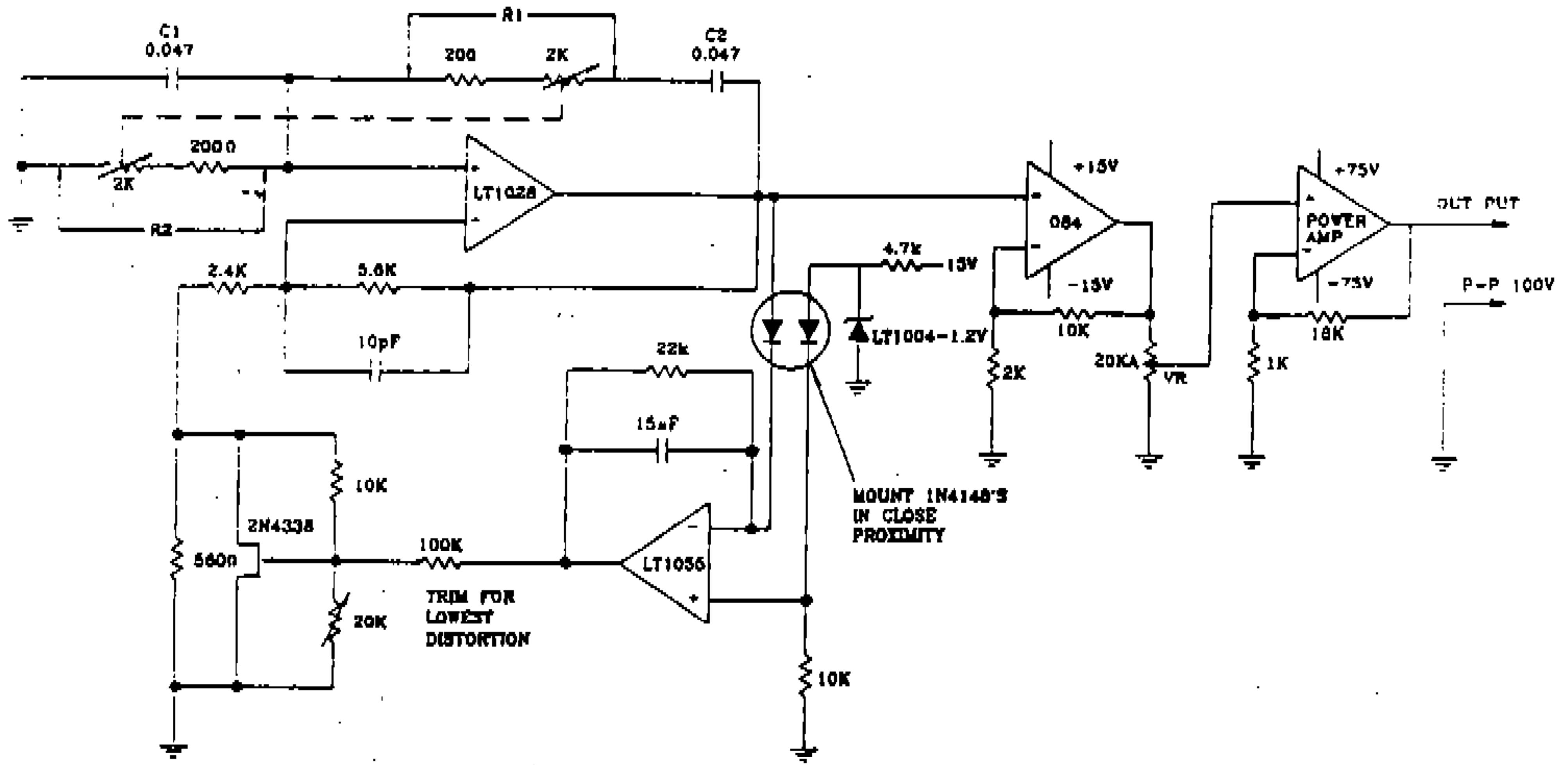


Fig. 4 Electric circuit diagram of function generator

이고 헬륨-네온 레이저(He-Ne Laser)를 이용하는 L.D.V.(T.S.I.Co. : 124B, U.S.A.)를 사용하였다. L.D.V는 신호처리기(T.S.I. Co. : 1948B, Counter type, U.S.A), 함수발생장치(자체제작), 주파수천이기(T.S.I. Co. : 1965, U.S.A) 및 싱크로스코프 등으로 구성되어 있다.

자성유체의 플러그 길이 및 플러그의 상단 높이 등의 인자가 자성유체 플러그의 진폭, 고유진동수 및 위상차 등에 미치는 영향을 규명하기 위해서 시험관은 유리관을 사용하였다. 사용된 유리시험관의 재질은 파이렉스(Pyrex)이고, 유리관은 Fig.1과 같은 모양으로 안지름이 7mm이고 두께가 0.5mm인 45° 경사 파이렉스유리 시험관을 사용하였다.

본 실험에 사용한 자성유체는 일본동북공업(주)의 HC-50(Kerosene base) 자성유체를 사용하였으며, 그 주요 물성치는 20°C에서 점도 $\eta = 4.582 \times 10^{-2} Pa \cdot s$, 밀도 $\rho = 1,390 kg/m^3$, 포화자화도 400×10^{-4} Teslar이다. 그리고 자성유체와 함께 사용한 외진력으로는 증류수를 사용하였다.

3.2 실험 방법

Fig.2와 같이 경사유리관 수직 부분을 솔레노이드 양극의 중앙에 수직으로 고정된 후 직류전원 공급장치의 전원을 연결하면 솔레노이드에 정

상자장이 형성된다. 이 때 최대 정상자장 H_{omax} 는 25kA/m가 된다. 이러한 상태에서 유리관 속에 자성유체를 주입하면 유리관의 수직부분에 길이 l_m 의 자성유체 플러그가 유지된다. 이 때 경사관의 경사된 부분에 비자성 유체로 증류수 길이 l_f 되게 주입하고 Fig.1과 같이 자성유체 플러그에 함수발생기에서 정현파의 여자전류($\Delta H_{max} = 25KA/m$)를 부가하여 자성유체를 강제 진동시킨다.

솔레노이드에서 발생된 정상자장과 변동자장의 세기는 가우스미터로 계측 기록하였다. 또 솔레노이드의 니크롬선에 공급되는 전원의 전류, 전압, 위상 및 주파수를 싱크로스코프와 유니버설 카운터를 이용하여 계측 기록하였다. 이 때 모든 계측은 싱크로스코프와 유니버설 카운터를 통해서 공급되는 전원의 상태가 정상 상태인가를 확인한 후 측정하기 시작했다. 자성유체 플러그의 진동상태인 진동수, 진폭 및 위상은 L.D.V와 주변기기로 계측 기록하였다. 레이저 빔이 진동하는 플러그내의 입자에 의해 산란되어 반사 빔으로 되돌아와 신호처리기, 함수발생장치 및 주파수 천이기를 지나 싱크로스코프에 파형이 나타나며 이것을 유니버설 카운터로 계측 기록하였고 입력파형과 출력파형의 위상차는 싱크로스코프에서 그 차이를 계측 기록하였다.

자성유체 플러그의 길이 및 자극중심의 위치의

플러그의 진동특성에 미치는 영향을 알기 위하여 먼저 내경 7mm의 경사 유리관내에 증류수의 길이 l_f 를 120.7mm로 고정한 후 자성유체 길이를 40mm로 하고 자극의 중심에서 형성된 플러그 상단높이를 15mm, 20mm, 25mm 및 30mm로 변화시키면서 플러그의 진동수, 진폭 및 위상차를 계측 기록하였다.

위의 실험이 끝나면 동일한 조건에서 자성유체의 길이를 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm로 변경시키면서 위와 같은 방법으로 실험을 반복하였다.

다음은 비자성 유체의 길이가 자성유체 플러그의 진동 특성에 미치는 영향을 알기 위하여 자성유체 플러그의 길이 l_f 를 50mm로 고정하고 자극 중심에서 형성된 플러그 상단높이를 15mm로 고정하고 증류수 길이 l_f 를 120.7mm에서 부터 9mm, 18mm, 27mm 및 36mm로 증가시키면서 자성유체 플러그의 진동수 및 진폭 등을 계측 기록하였다.

4. 실험결과 및 고찰

자성유체 진동 특성에 대한 고찰에 앞서 본 실험장치의 자속밀도 특성을 알아보기 위해 전압에 대한 변동자장하에서의 자속밀도 분포도(Fig.1 참조)를 측정하였다. 이 그림에서 실선은 정상 자장이고 점선은 변동자장을 표시한다. 변동자장하에서 자속밀도 분포는 자속중심을 0mm, 전압을 20볼트로 하여 자극 중심에서 밀어질 수록 적어짐을 나타내고 있다. 여기서 총 부과된 자장 H 를 구하기 위하여 실험치에 의한 실험값을 구하였다. 즉, 실험치에 의한 자장의 세기 분포는 $H(x) = a \text{Exp}^{-bx}$ 에 근사함으로서 미지수 a, b 를 최소장승법으로 구한 실험식은 다음과 같다.

$$H_0(x) = (250 \times 10^3) \text{Exp}^{-0.165x} \quad (15)$$

$$\Delta H(x) = (1.25 \times 10^3) \text{Exp}^{-0.165x} \cos \omega t \quad (16)$$

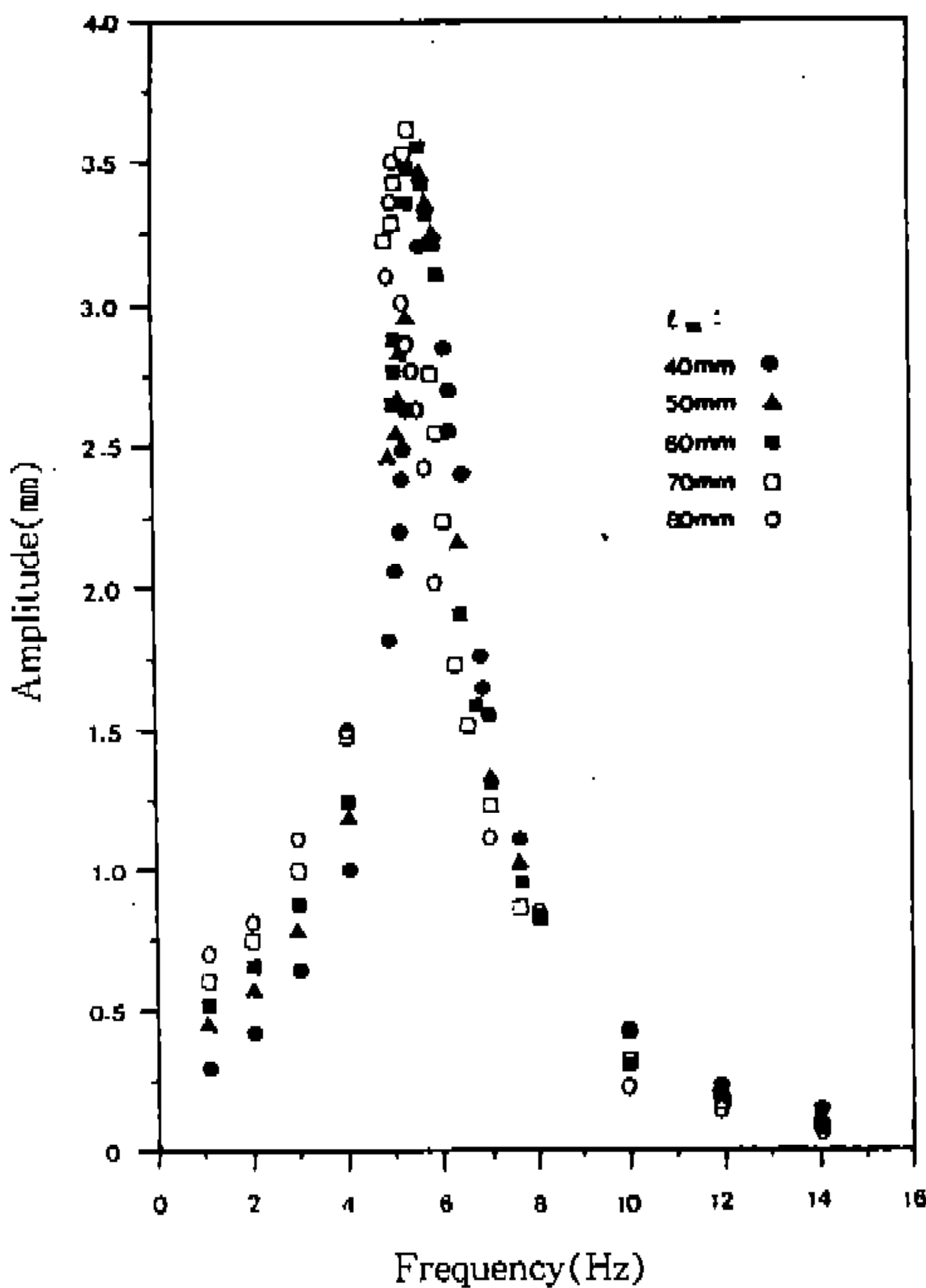


fig. 5 Amplitude vs. frequency for various plug lengths ($X_{20} = 15\text{mm}$, $l_f = 120.7\text{mm}$)

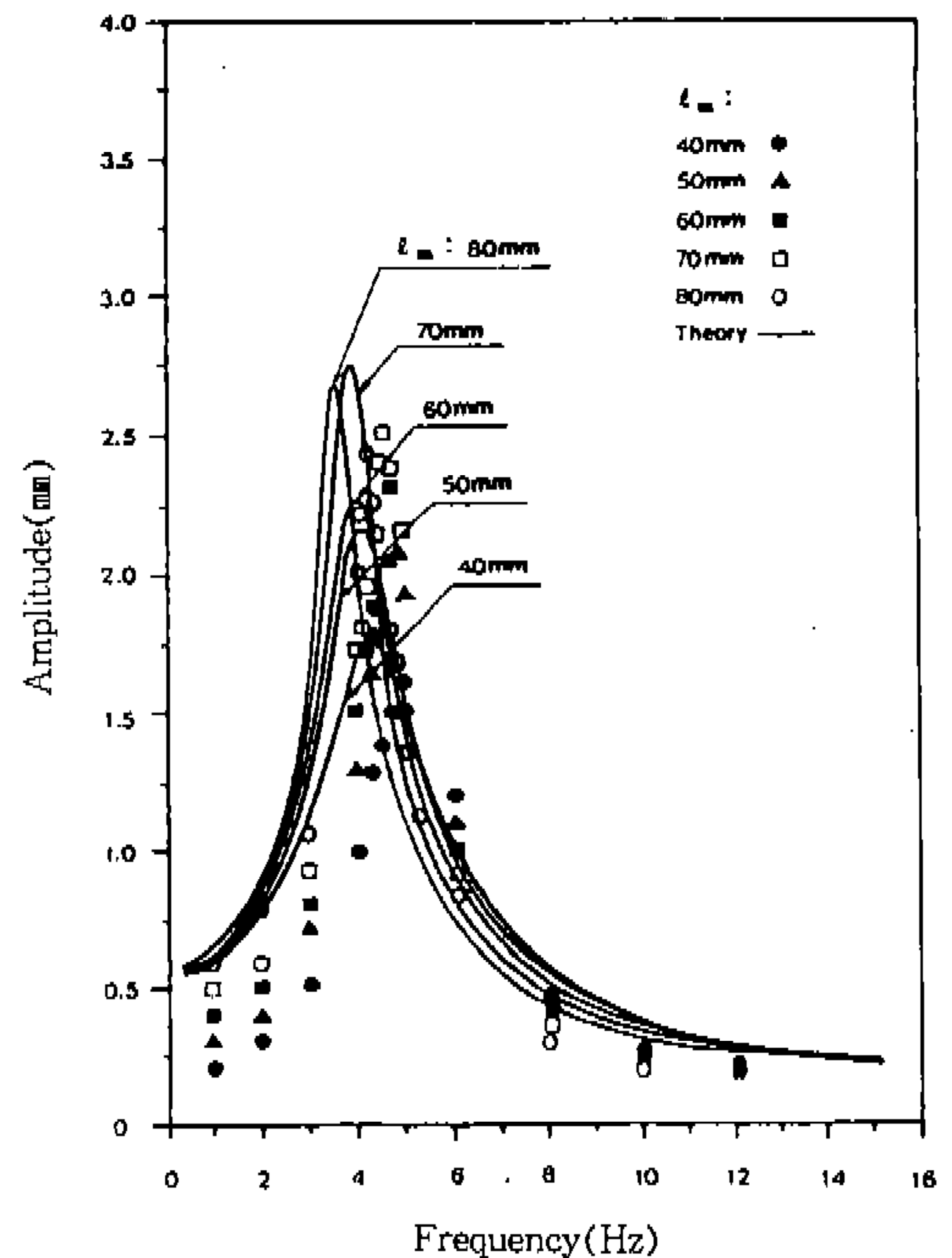


Fig. 6 Amplitude vs. theoretical and experimental value of frequency for various plug lengths ($X_{20} = 15\text{mm}$, $l_f = 120.7\text{mm}$)

이 실험식을 정상자장 및 변동자장 값으로 사용하여 이론해석에 사용하였다.

Fig.5는 증류수의 길이 l_f 를 120.7mm로 일정하게 하고 플러그 길이 l_m 을 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm인 경우에 대해 자극 중심에서 플러그 상단높이 X_{20} 값을 15mm로 하였을 때 변동자장의 진동수에 대한 자성유체의 진폭을 나타낸 것이다. 최대진폭은 플러그 길이가 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm로 커질 수록 그 크기는 각각 3.2mm, 3.48mm, 3.55mm, 3.6mm 및 3.5mm로 증가하다가 감소하며, 공진주파수는 플러그 길이가 커질 수록 그 크기는 각각 5.6Hz, 5.57Hz, 5.5Hz, 5.45Hz 및 5.2Hz로 감소하나 그 차이가 적다.

Fig.6은 플러그의 상단높이 X_{20} 이 20mm로 일정하게 하고 플러그 길이 l_m 을 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm로 증가시킬 때 변동자장의 주파수에 대한 플러그의 진동특성에 대하여 실험값과 식(14)에 의해 계산된 이론값을 나타낸 것이다. 실험값은 플러그의 길이가 증가하면 최대진

폭이 각각 1.6mm, 2.1mm, 2.3mm, 2.5mm 및 2.4mm로 증가하다가 감소하며 공진주파수는 5.0Hz, 4.9Hz, 4.8Hz, 4.7Hz 및 4.5Hz로 점차 감소한다. 계산결과도 시험결과와 정성적으로 비슷한 양상을 보이고 있으며, 이 실험결과는 $X_{20}=15$ mm와 같은 경향을 보인다.

Fig.7은 플러그의 길이 l_m 을 70mm, 증류수의 길이 l_f 를 120.7mm로 일정하게 하고, 플러그상단높이 X_{20} 값을 15mm, 20mm, 25mm 및 30mm로 증가시킬 때 변동자장의 진동수의 변화에 대한 자성유체 플러그 진폭의 변화를 나타낸 것이다. 플러그 상단높이 X_{20} 의 크기를 15mm, 20mm, 25mm 및 30mm로 증가할 수록 공진주파수는 각각 5.4Hz, 4.7Hz, 4.25Hz 및 4.0Hz로 감소하고 진폭의 크기도 각각 3.6mm, 2.5mm, 1.7mm 및 1.0mm로 감소하였다.

Fig.8은 플러그상단 높이 X_{20} 을 15mm, 20mm, 25mm 및 30mm로 일정하게 하고 각각의 경우에 플러그 길이를 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm로 변경할 때 각각의 경우에 대하여 최대진폭

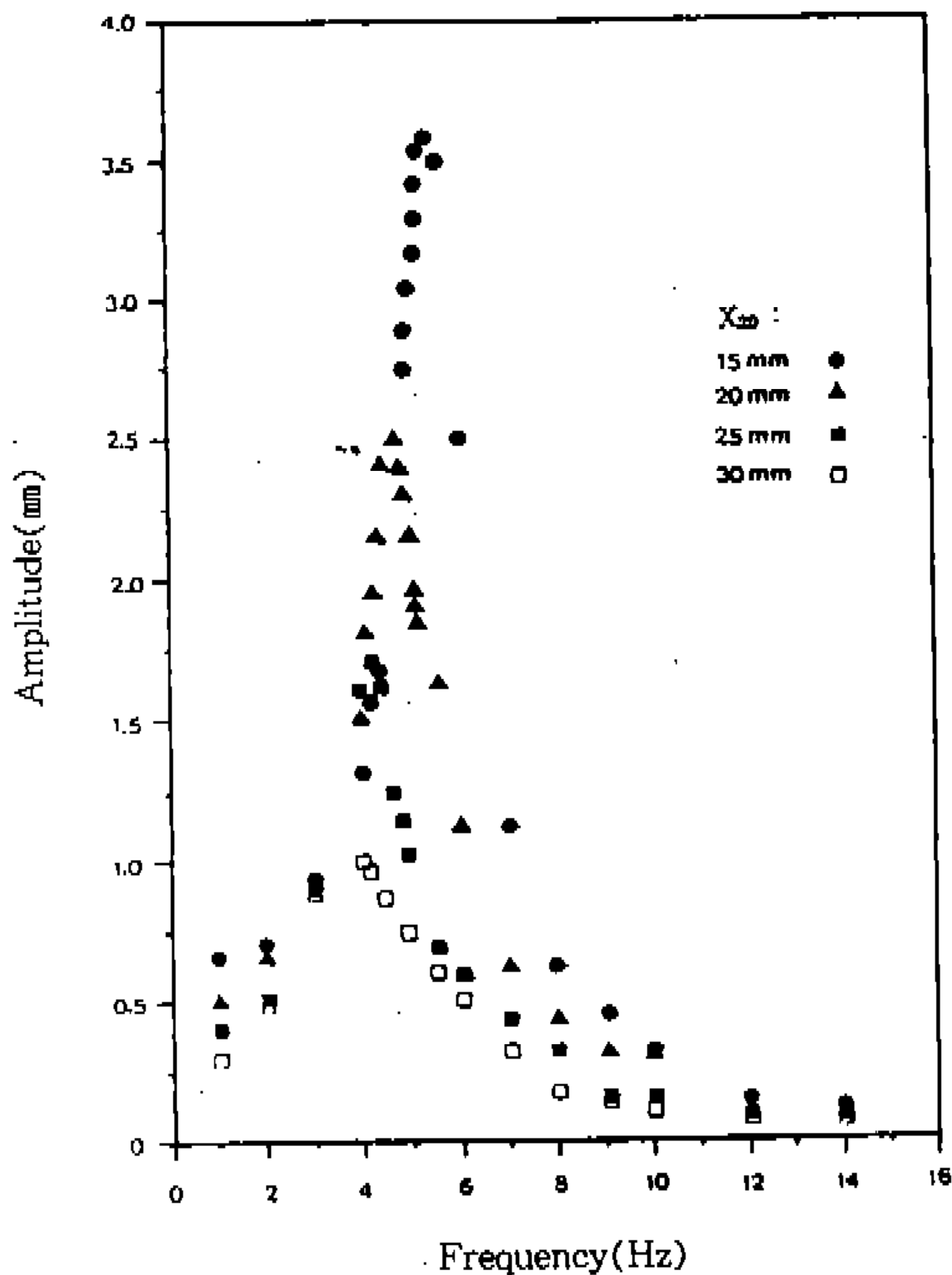


Fig. 7 Amplitude vs. frequency for various plug heights ($l_m=15$ mm, $l_f=120.7$ mm)

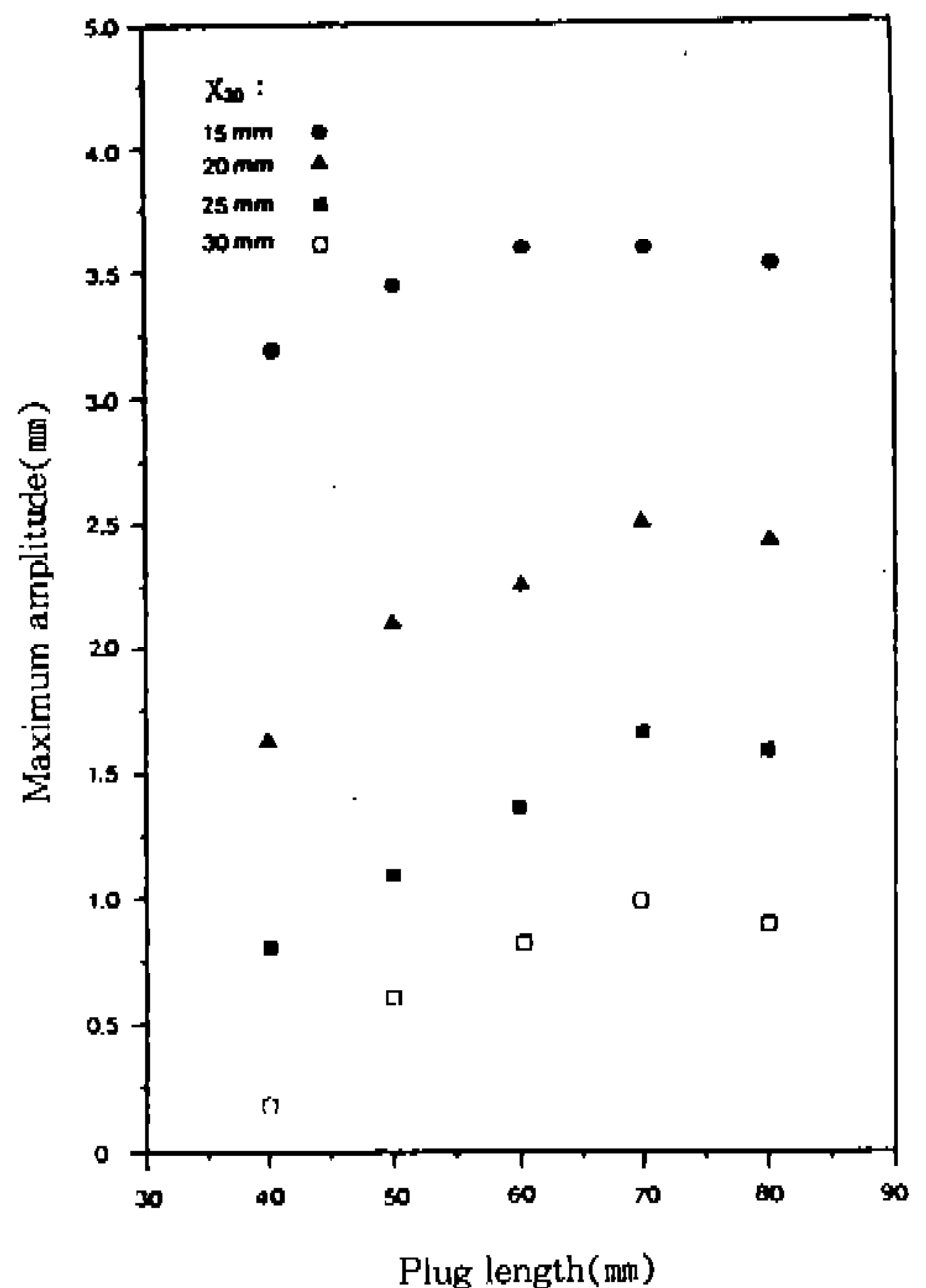


Fig. 8 Maximum amplitude vs. plug length

을 나타낸 것이다. 플러그 상단높이 X_{20} 이 적을 수록 진폭은 증가하여 플러그 길이 l_m 이 증가함에 따라 최대진폭은 X_{20} 의 값에 관계없이 증가하지만 플러그의 길이가 일정 이상 증가하면 반대로 최대진폭은 감소하였다. 임계 플러그 길이는 약 70mm 정도이다. 최대 진폭의 최고치는 자성유체 플러그 길이의 함수이다. l_m 이 증가하고 최대진폭이 증가하는 것은 l_m 이 짧을 경우에는 자성유체 플러그 하단에서 자성유체의 자기력이 작아지기 때문이다. 반면 l_m 이 더욱 증가하면 자기력의 값은 포화값에 이르고 자성유체 플러그 하단부의 일부가 자기력에 의해 유지되지 않고 이것이 부하로 작용하기 때문에 반대로 최대진폭은 감소한다. 따라서 최대진폭은 최대치가 존재하고, 이 때 공진주파수는 X_{20} 의 값에 관계없이 플러그 길이 l_m 이 증가해도 감소하는 경향이 있다.

Fig.9는 Fig.8과 같이 플러그 상단높이 X_{20} 을 15mm, 20mm, 25mm 및 30mm로 일정하게 하고 각각의 경우에 플러그 길이를 40mm, 50mm, 60mm, 70mm 및 80mm로 변경할 때 각각의 경우에 대하여 공진주파수를 실험값과 식(8) 또는 식(9)를

식(13)에 대입하여 계산한 이론값을 나타낸 것으로 일점쇄선 및 실선은 x 의 값에 각각 식(8) 및 (9)를 대입한 경우의 계산결과이다.

식(8)의 경우 ξ 값은 1보다 훨씬 클 때이므로 자성유체 플러그 길이 l_m 이 너무 큰값은 곤란하므로 60mm까지만 계산했고, 식(9)의 경우 ξ 값은 1보다 작을 때이다. 실험결과와 비교해서 이론값이 적게 나타나지만 정성적으로는 비슷한 형태로 나타나고 자성유체 플러그 길이 l_m 이 증가함에 따라 공진주파수는 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig.10은 플러그 상단높이 X_{20} 이 20mm와 25mm로 일정하고 플러그 길이 l_m 이 각각 30mm에서부터 10mm씩 증가할 때 각각의 경우에 대하여 플러그 길이에 대한 감쇠비 σ 를 실험값과 식(12)에 의해 계산한 이론값을 나타낸 것이다. 경우(1)은 ξ 이 1보다 매우 클 때의 이론값이고 경우(2)는 ξ 이 1보다 작을 때의 이론값이다. 실험값과 이론값이 차이는 있지만 정성적으로는 비슷한 양상을 보이고 있다. 자극 중심에서 플러그 상단높이가 증가할 수록 플러그 길이가 증가

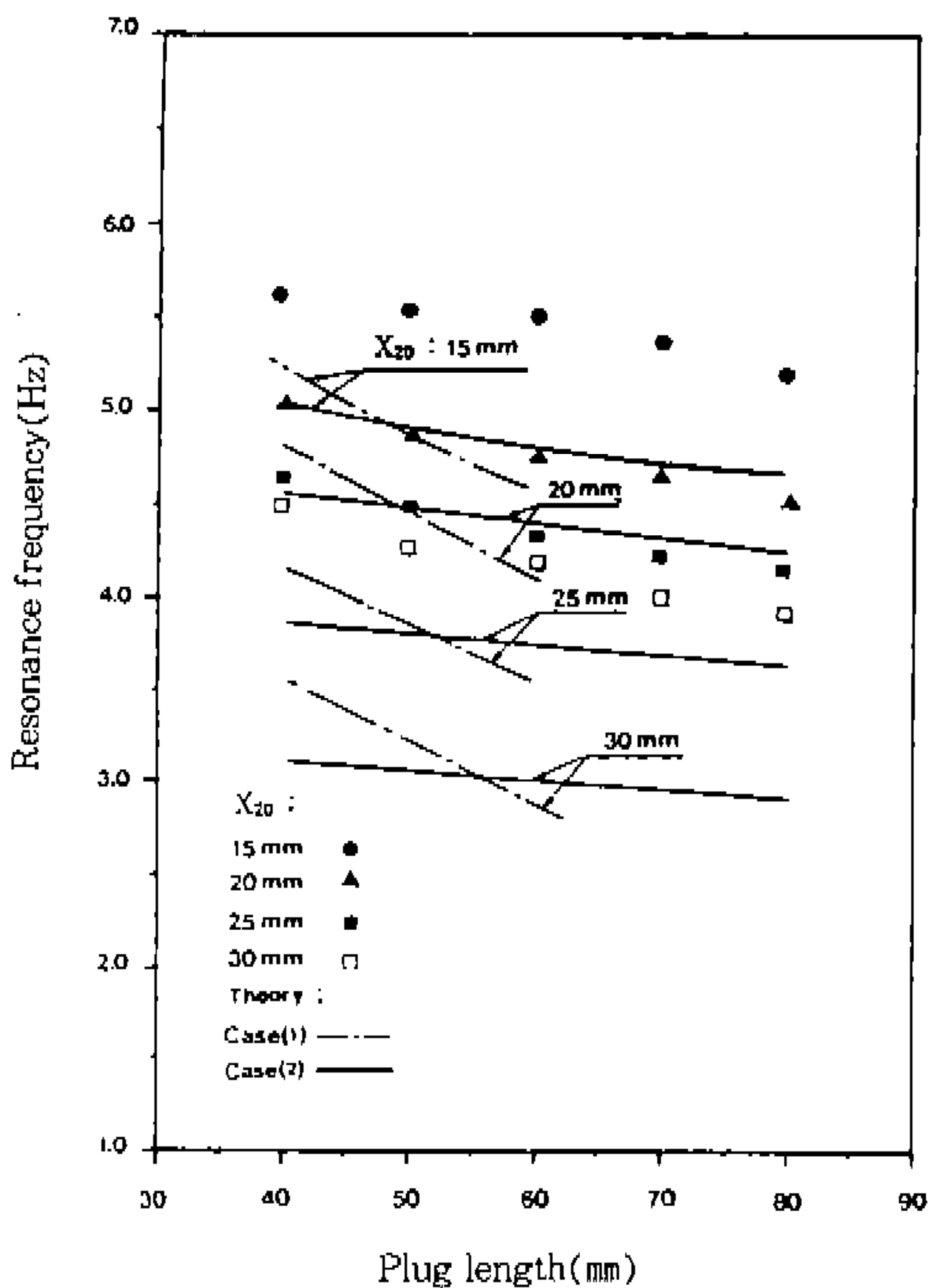


Fig. 9 Resonance frequency vs. plug length

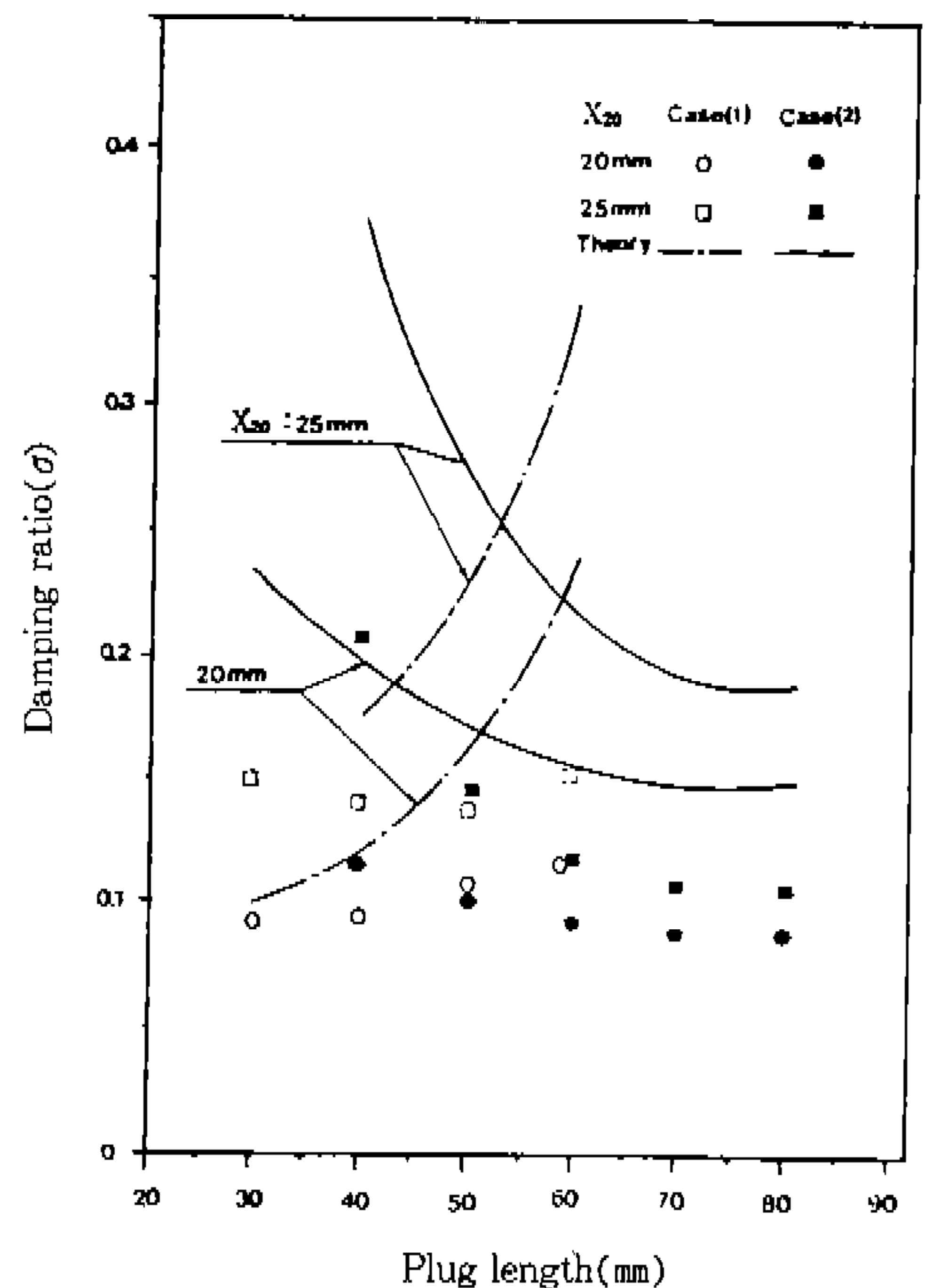


Fig. 10 Damping ratio vs. plug length

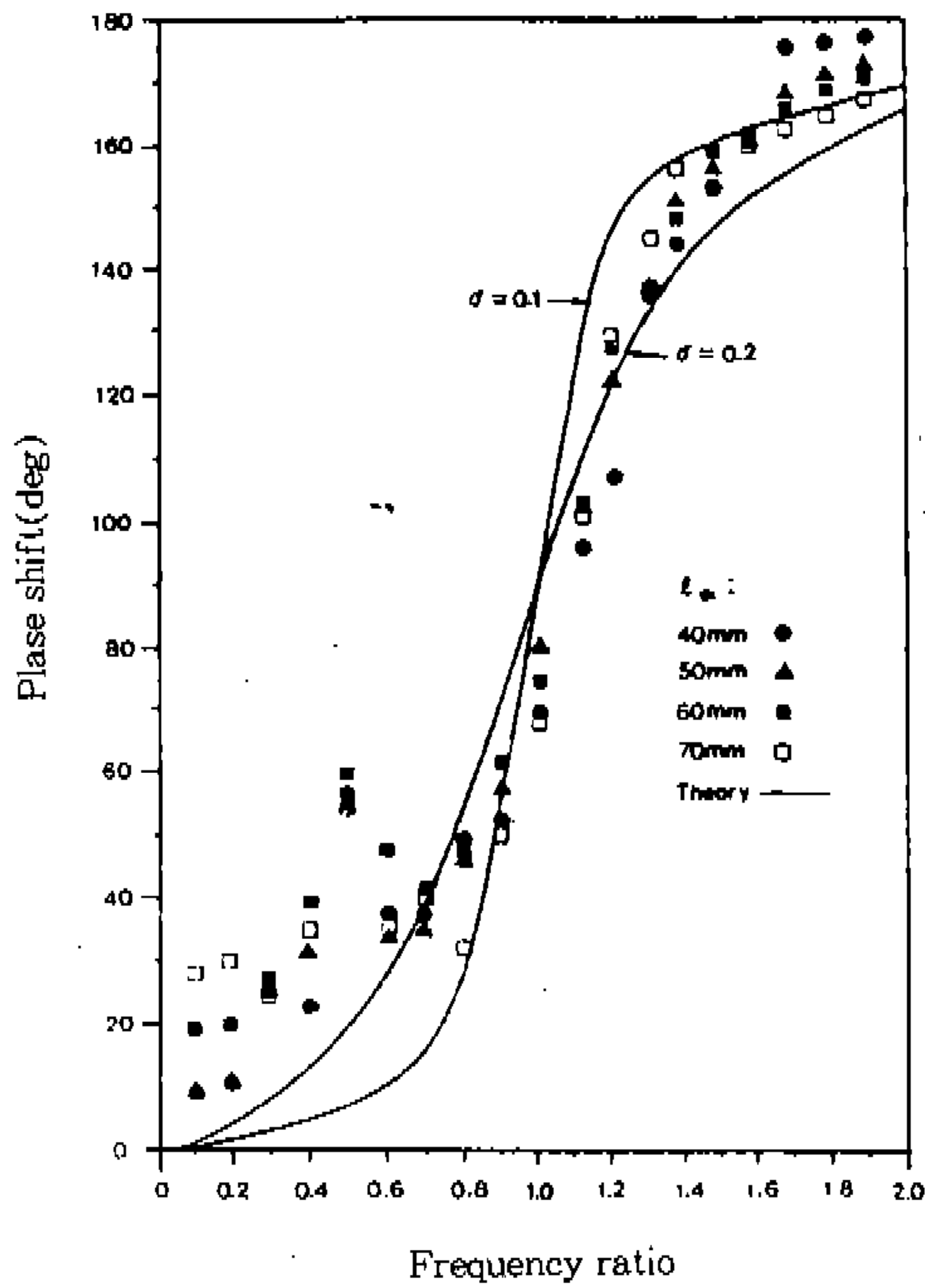


Fig. 11 Phase shift vs. frequency ratio

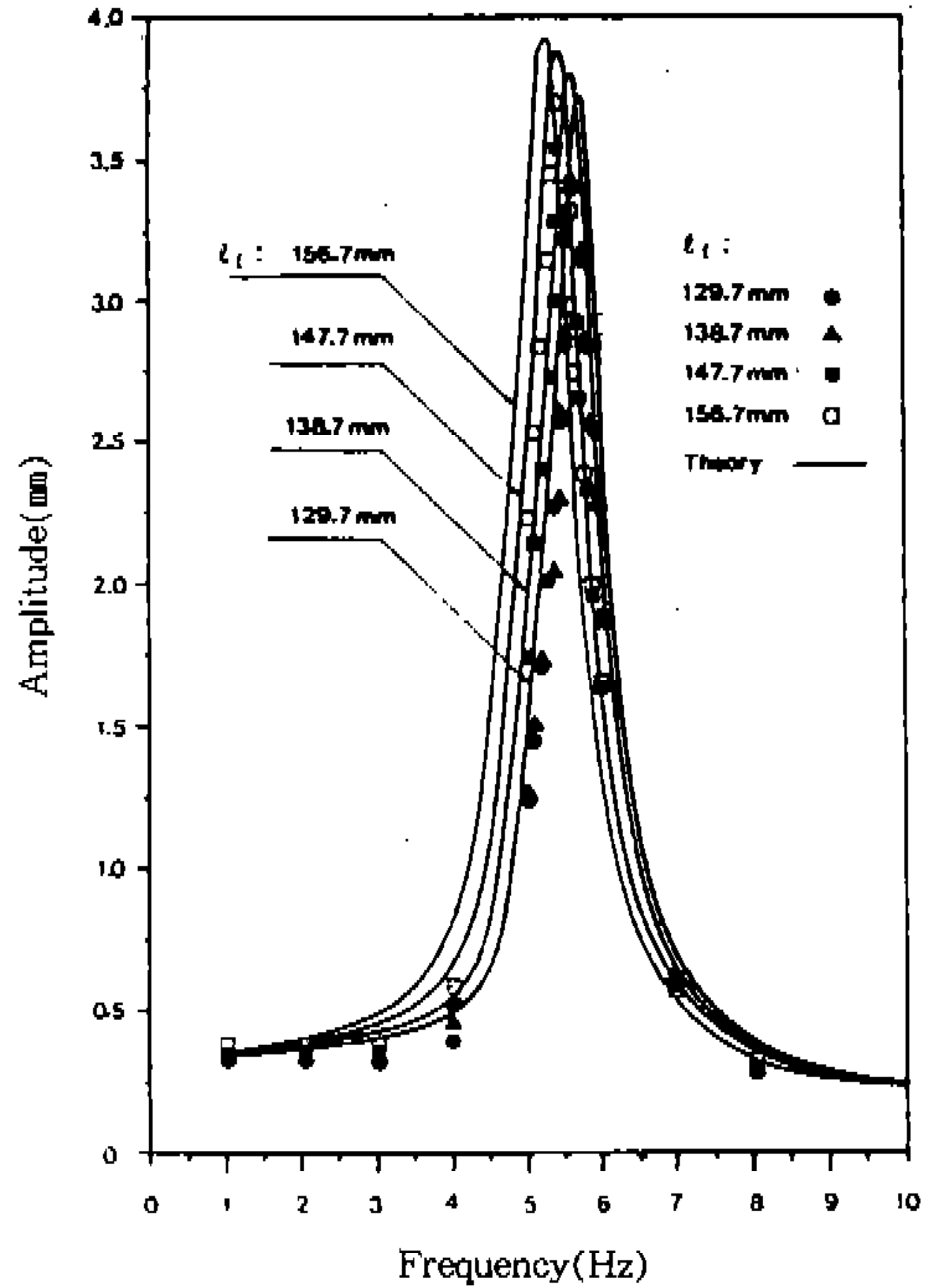


Fig. 13 Amplitude vs. frequency for various magnetic fluid lengths ($X_{20}=15\text{mm}$, $l_m=50\text{mm}$)

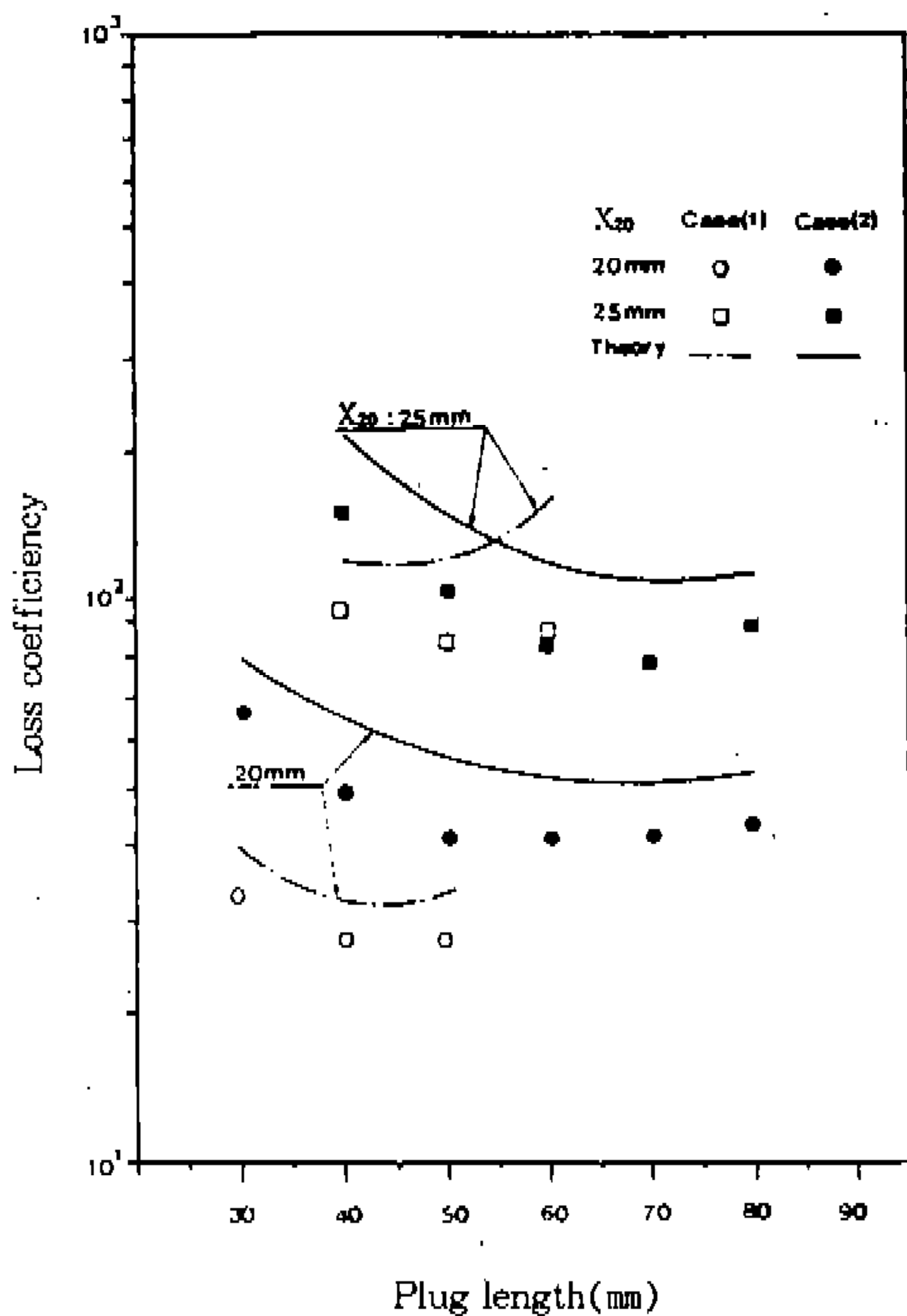


Fig. 12 Loss coefficient vs. plug length

하면 감쇠비는 경우(1)인 경우에는 증가하나 경우(2)인 경우는 감소한다. 이는 l_m 이 증가하여 커질 경우에 플러그의 하단면이 자장중심에서 멀어지므로 ξ 의 값이 작아지기 때문에 오히려 l_m 이 부하로 작용하기 때문이다.

Fig.11은 중류수의 길이 l 가 120.7mm이고 자성유체 플러그 길이 l_m 이 40mm, 50mm, 60mm 및 70mm일 때 함수발생기에서 발생하는 변동자장의 강제 진동수와 자성유체 플러그의 고유진동수의 비에 대한 변동자장의 위상과 플러그의 고유진동수와 위상차에 대하여 실험값과 이론값을 나타낸 것이다. 위상차에 대한 이론값 식(14)를 구하기 위하여 실험에서 구간 감쇠비 0.1과 0.2를 사용하였으며 실험값에 거의 근접함을 보여주고 있으나, 고진동 영역은 비교적 잘 일치하고, 저진동 영역에서는 약간 차이(10%정도)를 보이고 있다. 이것은 플러그의 저진동 영역에서는 플러그가 완전강체처럼 유동하지 않고 내부유동이 있기 때문인 것으로 생각되나 정확한 원인은 앞으로 규명해야 할 것으로 사료된다.

Fig.12는 플러그상단 높이 X_{20} 을 20mm와 25mm로 일정하게 하고 플러그 길이를 변경하였을 때 플러그 길이에 대한 기타손실 ξ_m 을 나타낸 것이다. 여기서 기타손실이란 유동에 의한 관마찰 손실을 제외한 유체손실로서 곡관부 때문에 생기는 유체손실 및 기타 다른 원인의 유체손실을 말한다. 곡관부에서 유체손실은 D_e (Dean수)에 의해 좌우되며, 유동이 층류라 하면 $De = Re(a/R)^{1/2}$ 가 된다. 여기서 a 는 관의 반경이고 R 는 곡관의 곡률 반경이다. 본 실험범위에서는 De 가 20~160의 범위에 있는 것으로 계산 되었으며 이 범위의 De 에서 관마찰계수는 직관위 경우보다 1.1~1.7배에 해당된다. 이와 같은 값을 고려하면 식(3)에서 자성유체 부분의 관마찰 손실 이외의 유체손실인 기타손실 ξ_m 을 구할 수 있다. 이때 자성유체의 유동 레이놀즈수(Re_m)를 구할 경우는 플러그의 평균유속으로 구한다. 또 식(3)에서 ξ_m 의 값은 고유 진동수의 이론값과 실험값을 대입하여 구할 수 있다. 고유진동수의 실험값을 사용할 경우 X_{20} 이 20mm경우 평균유속이 0.015~0.08m/s의 범위이므로 ξ_m 의 값은 대부분 27~45범위이며 자극 중심에서 플러그 상면높이가 증가하면 ξ_m 의 값이 큰 값을 보이는데 이것은 실험 때 자장 중심부에서 자성입자의 응집 때문에 교축부가 형성되어 이것 때문에 유체손실이 증가했다고 생각된다.

Fig.13은 자성유체 플러그 길이를 50mm, 플러그 상단 높이 X_{20} 을 15mm로 일정하게 유지하고 비자성 유체인 증류수의 길이 l_f 를 129.7mm, 138.7mm, 147.7mm 및 156.7mm로 9mm씩 증가시킬 경우에 변동자장의 주파수에 대한 자성유체 플러그의 진폭의 크기를 실험값과 이론값으로 나타낸 것이다. 비자성유체의 길이의 증가에 따라 최대진폭은 조금씩 증가하고 공진주파수는 감소하는 경향을 나타내고있다. 그러나 자장의 크기의 제한 때문에 비자성 유체의 길이를 무한히 크게 할 수 없었으며, 실험값의 변화와 식(14)에 계산한 이론값이 거의 비슷한 경향을 갖고 있으며 그의 오차범위는 약 2~5%이다.

5. 결 론

자성유체를 이용한 액추에이터 개발에 대한 기초적인 연구로서 구동체로 자성유체 플러그와 피구동체로서 비자성 유체(증류수)를 주입하여 플러그 길이 변화와 비자성 유체의 길이 변화에 따르는 진동특성을 실험으로 구하여 이론값과 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 총부과된 자장의 세기는 정상자장과 변동자장의 합으로 이에 대한 실험식을 구했다.
2. 자성유체 플러그의 증가에 따라 최대진폭은 증가하다가 감소하는 임계 자성유체 길이(70mm)가 존재하며, 비자성 유체의 길이가 증가하면 최대진폭은 증가하고 고유진동수는 감소하나 그 증가폭과 감소폭은 매우 적으며, 실험으로 구한 감쇠비와 유체 손실계수의 범위는 각각 0.1~0.2 및 30~100이다.
3. 진동수, 진폭, 위상차 및 감쇠비 등의 실험값과 이론값은 고주파 영역에서는 잘 일치 하였으나 저주파 영역에서는 진동수와 진폭은 약 2~5% 정도의 오차를 나타냈고, 위상차와 감쇠비는 10% 정도의 실험적 오차를 나타냈다.

후 기

이 논문은 1993년도 조선대학교 학술 연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Papell, S.S., U.S.Patent No.3, 215572, 1965
2. 下飯 : 53-4078, 1966.
下飯 : 53-17118, 1966.
下飯 : 54-40069, 1967.
3. Neuringer, J. L., and Rosenzweig, R. E., Phys. Fluids, PP. 7, 12, 1964, 1927.
4. Shliomis, M. I., Sov. Phys. JETP, 34-6, 1291, 1972.

5. Shizawa, K., and Tanahashi, T., Bull, JSME, 28-243, 1942, 1985.
6. Sano, K., and Doi, M., J. phys. Soc. Jap., 52, 2910, 1983.
7. Berkovsky, B. M. et al, J. Mag. Mag. Mag., 65, 191, 1987.
8. 神山, 佐藤, 機論, 53-494, 13, 3009, 1987.
9. 神山, 佐藤, 渡邊, “磁性流體をし移用したアダコエエタ의 基本特性”, 日本機械學會論文集, vol. 57-537, pp. 1623~1628, 1991
10. 神山, Jessie, 小池, 小山, “磁性流體の管内振動特性”, 日本機械學會 論文集, vol. 53-494, pp. 3014~3017, 1987.
11. 李行男, “磁性流體 PLUG의 振動特性에 관한 研究”, 國民大學校 博士學位論文, 1992.
12. 李行男, “直管内 磁性流體의 振動特性에 관한 研究”, 朝鮮大學校 動力資源研究所 論文集, vol.14, No.2, pp.55~62, 1992.
13. B. M. Berkovsky, “Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids”, Hemisphere publishing Co., pp. 8~34, 1982.