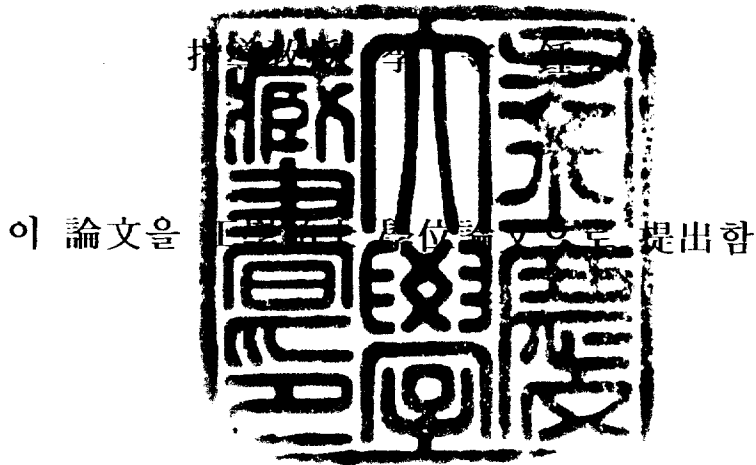


工學碩士學位論文

웨이브 와셔 스프링의
剛性에 대한 研究



2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機 械 設 計 學 科

李 相 基

이 論文을 李相基의 工學碩士
學位論文으로 認准함

2001年 12月 15日

主 審 金 亨 資



委 員 金 榮 大



委 員 李 守 鍾



목 차

List of Figures	i
List of Tables	ii
Nomenclature	iii
Abstract	iv
1. 서론	1
2. 이론적 배경	3
3. 재료 및 실험	7
3-1. 실험 재료 및 시편	7
3-2. 실험 장치 및 방법	10
3-2-1. 실험 장치	10
3-2-2. 실험 방법	13
4. 실험 결과 및 고찰	14
4-1. 실험에 의한 하중-변위 관계	14
4-2. 계산하중과 시험하중과의 비교 분석	16
4-3. 각종 구성인자가 강성계수에 미치는 영향	19
4-3-1. 스프링 두께의 영향	19
4-3-2. 스프링 폭의 영향	23
4-3-3. 스프링 지름의 영향	23
5. 결론	25
참고문헌	26

List of Figures

Fig. 1. Acting forces on wave washer spring with 4 waves	3
Fig. 2. Shape of wave washer spring with 4 waves	7
Fig. 3. General view of wave washer spring	9
Fig. 4. General view of spring testing machine	11
Fig. 5. Schematic diagram of spring testing machine	12
Fig. 6. Relation between load and displacement for specimen	15
Fig. 7. Comparison of experiment with theory for stiffness	17
Fig. 8. Comparison of experiment with theory for stiffness of practical use	18
Fig. 9. Relation between load and displacement when varying thickness	20
Fig. 10. Relation between load and displacement when varying width	21
Fig. 11. Relation between load and displacement when varying radius	22

List of Tables

Table 1. β Values	4
Table 2. Dimension of specimen	8
Table 3. Mechanical properties of material	8
Table 4. Chemical composition of material	9
Table 5. Model of the spring testing machine	10
Table 6. The Result of experiment	14

Nomenclature

E	: Young's modulus [kgf/mm ²]
G	: Shearing modulus [kgf/mm ²]
M_0	: Moment of reaction [kgf-mm]
M	: Bending moment [kgf-mm]
T	: Twisting torque [kgf-mm]
P	: Load [kgf]
R	: Average radius [mm]
φ	: Angular displacement
U	: Elastic strain energy
I	: Moment of inertia [mm ⁴]
J	: Coefficient
δ	: Displacement [mm]
k	: Spring constant [kgf/mm]
β	: Ratio of width vs thickness
b	: Width [mm]
t	: Thickness [mm]
D_o	: Outside diameter [mm]
D_i	: Inside diameter [mm]
H	: Free length [mm]
N	: Numbers of wave

A Study on the Stiffness of Wave Washer Spring

Sang-Gi Lee

Department of Mechanical Design

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

Wave washer spring used in valves of reciprocating air compressor because of simple form affects its life as well as performance because of repeated load. So when design a spring, it should be examined closely.

When the value of theoretical stiffness and experimental stiffness is shown some difference, it is important to make a little changes the geometrical form of wave washer spring-dimension of thickness, width, radius-to be able to approach into the expected value and make a decision accurate spring stiffness.

On this study, to make use as data on designing a spring in fields I got a conclusion as like following.

1. The stiffness of wave washer spring showed linear relations in use limit and the stiffness by experiment nearly approximated the stiffness by theory.

2. The case of specimen used this experiment, the stiffness by experiment showed an aspect comparatively higher than the value of stiffness by theory.
3. The value of stiffness showed an aspect nearly to approximate, in the case of thickness and radius they are mostly in an extent of error from 2.4 to 3.0% and showed a large deflection as degree 7.4~9.4% in the case of width.
4. It is estimated to be applied into actual spring design by making change of dimension of thickness or radius to make approximate the values of theory and experiment.

1. 서 론

기계장치에서 충격을 흡수할 경우라든가 또는 변형을 시켜야 할 경우에 스프링이 사용된다. 일반적으로 스프링은 하중을 받으면 하중에 따른 변위가 생기고 그 일은 탄성에너지로써 흡수, 축적되는데 스프링의 종류와 형상, 재료에 따라 진동의 절연 및 충격을 완화하고 탄성에너지를 흡수, 축적하는 능력은 다양하게 나타난다. 즉 스프링은 외부로부터 가해지는 하중의 작용을 받아 비교적 큰 값의 탄성 변형이 발생하도록 설계된 기계 요소이다. “변형은 하중에 비례한다”라고 하는 후크의 법칙(Hooke's Law)이 스프링 거동의 기초가 된다.¹⁾²⁾

웨이브 와셔 스프링은 유체의 밸브, 다판식 클러치와 같은 축대칭 회전체에서 회전요소의 간격조정용, 왕복식 공기 압축기의 흡입밸브와 토출밸브 및 소형기기의 기계요소 등 다방면에 널리 사용되고 있는 것으로서 형상이 간단하여 공간을 매우 효율적으로 이용할 수 있는 기계요소이다.³⁾

웨이브 와셔 스프링의 특징은 일반적으로 굽힘 변형에 의한 스프링 작용을 이용하는 것이 많고, 박판을 재료로 하므로 처짐이 큰 경우에도 굽힘 응력은 비교적 작게 된다. 스프링을 설계할 때 스프링에 대한 식들은 하중-변위 선도의 관계에서 일정한 선형관계를 유지함으로써 설계할 때 여러 가지 조건들을 감안하여 거기에 적합한 식을 적용하고 있다.¹⁾⁴⁾⁵⁾

반복하중을 받는 웨이브 와셔 스프링에 대하여 강성치를 구하는 일은 반복하중으로 인한 영향이 성능뿐만 아니라 수명에 큰 영향을 미치므로 스프링을 설계하는데 매우 중요하다.⁶⁾ 따라서 스프링 강성치를 이론적인 해석을 통하여 구한 다음 실험을 통하여 얻은 실험치와의 값이 어떠한 차이가 있는지 면밀히 검토하여야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 재질의 성분, 열처리 등의 방법에 의해서 필요한 상수 값을 얻기도 하지만 기하학적 형상이 스프링의 강성계수에 미치는 영향이 매우 크므로 주요인자인 두께, 폭, 반지름, 웨이브 수를 고려하여 스

프링 상수를 결정하기도 한다.⁷⁾

본고에서는 실험에 의한 실험치와 이론에 근거한 이론적 강성계수의 값이 약간의 차이를 나타낼 때 바라는 값에 근접할 수 있도록 웨이브 와셔 스프링의 기하학적 형상인 두께, 폭, 반지름의 치수를 약간 변화시켜 정확한 스프링 강성계수를 결정하고 이를 현장에서 스프링을 설계할 때 자료로써 이용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 프레임의 굽힘 및 비틀림 이론을 이용한 웨이브 와셔 스프링의 이론을 응용하였고 실험을 통한 강성계수의 실험치를 구하였다.⁸⁾

2. 이론적 배경

Fig. 1의 (a)에서 A, C, E, G점은 마루이고 B, D, F, H는 골이다. 지금 마루 A, C, E, G에서 누르는 힘이 P 라고 할 때 그 반력은 골 B, D, F, H에서 받고 이 지점에서의 굽힘 모멘트는 $M_0 = \frac{PR}{2(1+\sqrt{2})}$ 이 된다.⁹⁾

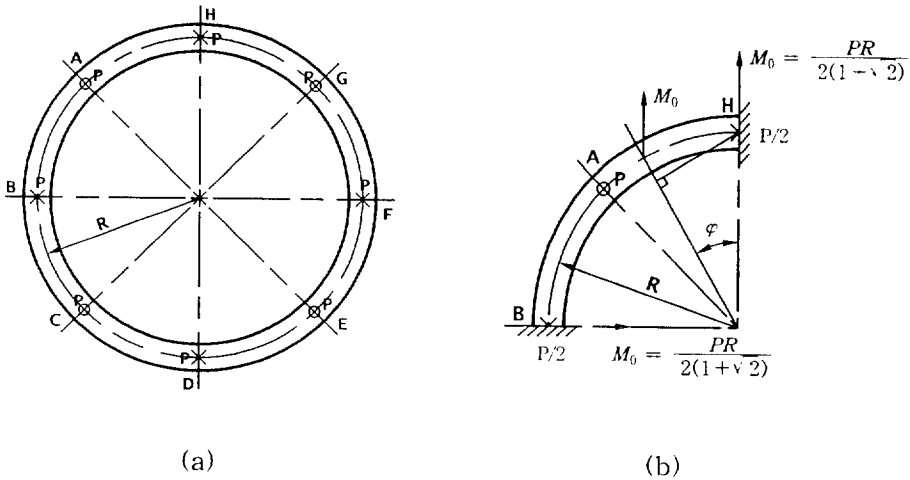


Fig. 1. Acting forces on wave washer spring with 4 waves

Fig. 1의 (b)에서 보인 바와 같이 B점과 H점을 고정단이라 간주하고 A점에서 P 라는 하중이 지면과 수직으로 작용할 때의 처짐 δ 를 구한다. 고정단 B와 H점에서의 반작용 모멘트는 $M_0 = \frac{PR}{2(1+\sqrt{2})}$ 이 되고, 반력은 $P/2$ 가 된다. H점에서 반시계 방향으로 중심각 φ 만큼 각변위한 점의 굽힘 모멘트 M 과 비틀림 모멘트 T 는 각각 다음과 같다.³⁾¹⁰⁾

$$M = \frac{PR}{2} \left(\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{1 + \sqrt{2}} \right) \quad (1)$$

$$T = \frac{PR}{2} \left(1 - \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{1 + \sqrt{2}} \right) \quad (2)$$

이 굽힘 모멘트 M 과 비틀림 모멘트 T 에 의한 탄성 변형 에너지 U 는

$$U = 2 \int_0^{\pi/4} \frac{M^2}{2EI} R d\varphi + 2 \int_0^{\pi/4} \frac{T^2}{2GJ} R d\varphi \quad (3)$$

가 되는데 여기서 EI 는 굽힘 강성계수이고, G 는 재료의 전단탄성계수이다. 그리고 J 는 직사각형 단면의 봉재를 비틀 경우에 발생하는 단위 길이당 비틀림 각을 계산할 때 사용되는 계수로서 $J = \beta b t^3$ 이다. 여기서 β 는 직사각형 단면의 장변 b 와 단변 t 의 비에 따라 Table 1을 이용하여 계산하면 된다.

Table 1. β Values

b/t	β
1.00	0.141
1.50	0.196
1.75	0.214
2.00	0.229
2.50	0.249
3.00	0.263
4.00	0.281
6.00	0.299
8.00	0.307
10.00	0.313
∞	0.333

Castigliano의 정리에 의하여 지점 A에서의 처짐 δ 는

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = 2 \int_0^{\pi/4} \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} R d\varphi + 2 \int_0^{\pi/4} \frac{T}{GJ} \frac{\partial T}{\partial P} R d\varphi \quad (4)$$

가 되고 식(1), 식(2)를 편미분하게 되면

$$\frac{\partial M}{\partial P} = \frac{R}{2} \left(\sin \varphi - \frac{\cos \varphi}{1+\sqrt{2}} \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial P} = \frac{R}{2} \left(1 - \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{1+\sqrt{2}} \right) \quad (6)$$

이므로 식(1), (2), (5), (6)을 식(4)에 대입하여 정리하면 δ 는

$$\begin{aligned} \delta = \frac{PR^3}{EI} & \left[\frac{\pi}{4} (1 + \tan^2 \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{8} \sin 2\pi (1 - \tan^2 \frac{\pi}{2}) \right. \\ & \left. - \frac{1}{4} \tan \frac{\pi}{2} (1 - \cos 2\pi) \right] \\ & + \frac{PR^3}{GJ} \left[\frac{\pi}{4} (3 + \tan^2 \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{8} \sin 2\pi (1 - \tan^2 \frac{\pi}{2}) \right. \\ & \left. - \sin \pi - \tan \frac{\pi}{2} \left(\frac{3}{4} - \cos \pi + \frac{1}{4} \cos 2\pi \right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

가 된다. 그런데 여기서

$$\begin{aligned} S_N = \frac{\pi}{4N} & \left(1 + \tan^2 \frac{\pi}{2N} \right) - \frac{1}{8} \sin \frac{2\pi}{N} \left(1 - \tan^2 \frac{\pi}{2N} \right) \\ & - \frac{1}{4} \tan \frac{\pi}{2N} \left(1 - \cos \frac{2\pi}{N} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q_N = \frac{\pi}{4N} & \left(3 + \tan^2 \frac{\pi}{2N} \right) + \frac{1}{8} \sin \frac{2\pi}{N} \left(1 - \tan^2 \frac{\pi}{2N} \right) - \sin \frac{\pi}{N} \\ & - \tan \frac{\pi}{2N} \left(\frac{3}{4} - \cos \frac{\pi}{N} + \frac{1}{4} \cos \frac{2\pi}{N} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

이라 놓으면

$$\delta = PR^3 \left(\frac{S_N}{EI} + \frac{Q_N}{GJ} \right) \quad (10)$$

웨이브 수 $N=4$ 를 (8), (9)에 대입하여 $S_N=0.02293102$, $Q_N=0.00141653$ 을
 얻고 처짐량 δ 를 구하면 다음과 같다.

$$\delta = PR^3 \left(\frac{0.02293102}{EI} + \frac{0.00141653}{GJ} \right) \quad (11)$$

따라서 스프링 상수 k 는

$$k = \frac{4P}{\delta} = \frac{1}{R^3 \left(\frac{0.005733}{EI} + \frac{0.000354}{GJ} \right)} \quad (12)$$

3. 재료 및 실험

3-1. 실험재료 및 시편

본 연구에 사용된 시편은 국내 D사에서 제작한 것으로 SK5M을 830℃에서 10분 정도 quenching 처리하고 다시 420℃에서 20분간 tempering 하여 Fig. 2와 같은 형상으로 만든 웨이브 와셔 스프링이다.

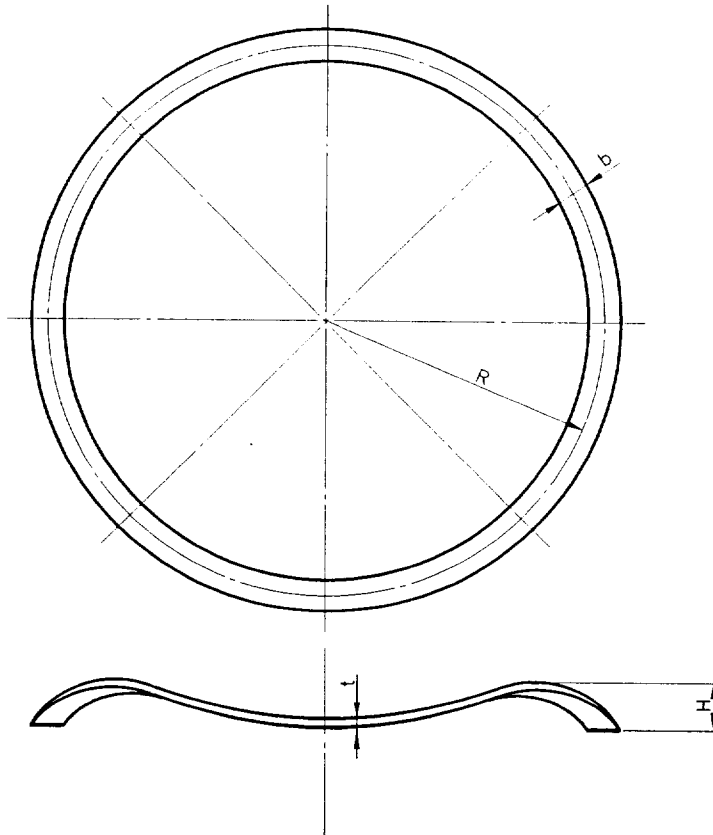


Fig. 2. Shape of wave washer spring with 4 waves

Table 2에는 본 실험에 사용된 시편의 각 부분 치수 등 제원을 나타내었고 Table 3은 시편의 재료에 대한 기계적 성질을 나타낸 것이다.¹¹⁾

Table 2. Dimension of specimen

Item	Specimens
Numbers of wave	4
Average radius (mm)	31.1875
Width (mm)	1.875
Thickness (mm)	0.3
Free length (mm)	4.5
Calculated spring constants (kgf/mm)	0.487476

Table 3. Mechanical properties of material

Item	Specimens
Material	SK5M
Tensile Strength (kgf/mm ²)	50 ~ 65
Hardness (Hv)	174
Elongation (%)	20이상
Young's modulus (GPa)	210
Shearing modulus (GPa)	80

Table 4는 시편의 화학적 조성을 나타내었고,¹¹⁾ Fig. 3은 실험에 사용된 웨이브 와셔 스프링의 외관을 나타낸 것이다.

Table 4. Chemical composition of material

Chemical composition	C	Si	Mn	P	S
	×100	×100	×100	×1000	×1000
Specification(%)	86	20	42	13	5

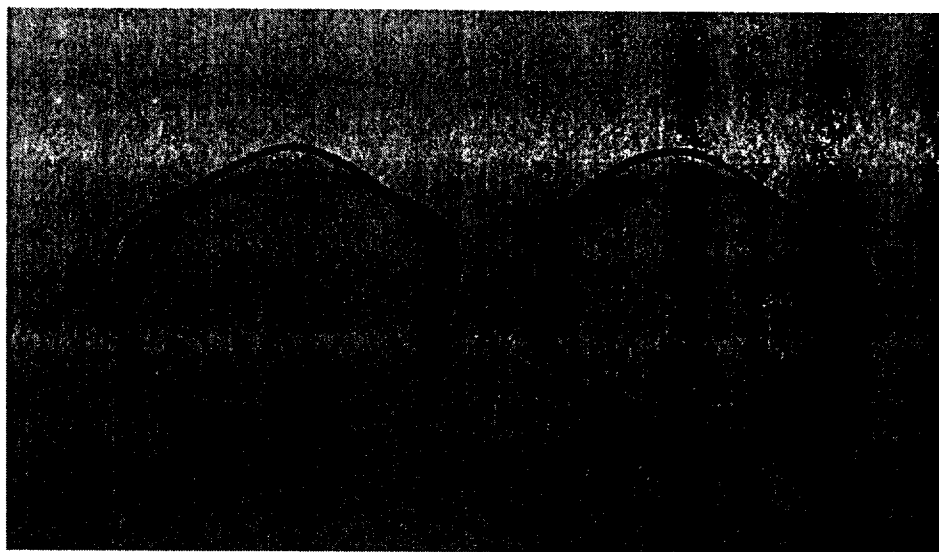


Fig. 3. General view of wave washer spring

3-2. 실험 장치 및 방법

3-2-1. 실험 장치

Fig. 4는 본 실험에 사용한 디지털 하중 시험기인 FMG-A200D의 외관도이며 Fig. 5는 이 시험기의 구성도를 나타낸 것이다. 그리고 Table 5에는 실험에 사용한 시험기의 사양을 나타내었다.¹²⁾

Table 5. Model of the spring testing machine

Model	Maximum working load(kgf)	Minimum working load(kgf)	Maximum displacement (mm)	Precision (g)	Manufacturing company
FMG-A200D	200	4	250	10	FUJII SEIKI

본 장치는 마이크로 컴퓨터 제어에 의한 시험 시스템으로 구성되어 높이의 설정 입력 자료에 의해 하중을 측정하며, 장치의 하중 검출부는 시편이 놓여지는 하단부에 로드셀(Load cell)을 부착시켜서 하중 값을 전압 값으로 변환한다.¹³⁾ 전압으로 변환하기 위하여 로드셀 증폭기를 사용하고 증폭기의 출력 전압을 디지털로 변환하기 위하여 AD변환기(Analog digital converter)가 사용되었으며 CPU 계측 제어부를 통하여 프린터 및 표시부로 하중의 값을 출력시킨다. 이 변위의 값은 입력부(키보드, 디지털 스위치)에서 인가한다. 모터의 변위는 자동과 수동으로 조작되며 수동조작의 경우 저속, 중속, 고속의 3단계로 구분되는데, 저속의 경우 약 1.2mm/min, 중속의 경우 약 50mm/min, 고속의 경우 약 1,000mm/min으로 시험 속도를 변화시킬 수 있다. 또한 자동의 경우 약 1,000mm/min의 시험 속도를 가질 수 있다. 변위의 검출은 펄스 엔코드(Pulse encoder)를 통하여 검출되며 최소 검출 변위는 0.01mm/pulse이며 최대 변위 측정 길이는 250mm이다.

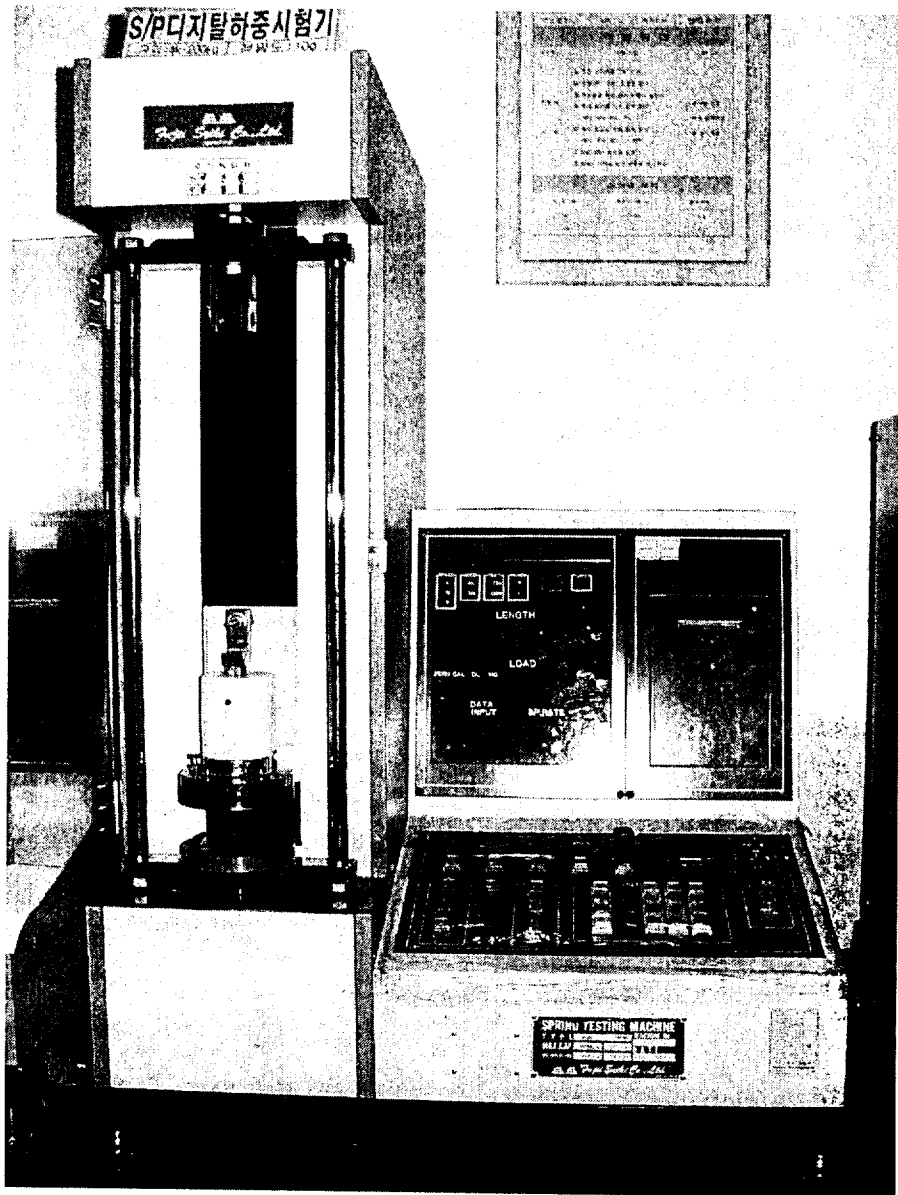
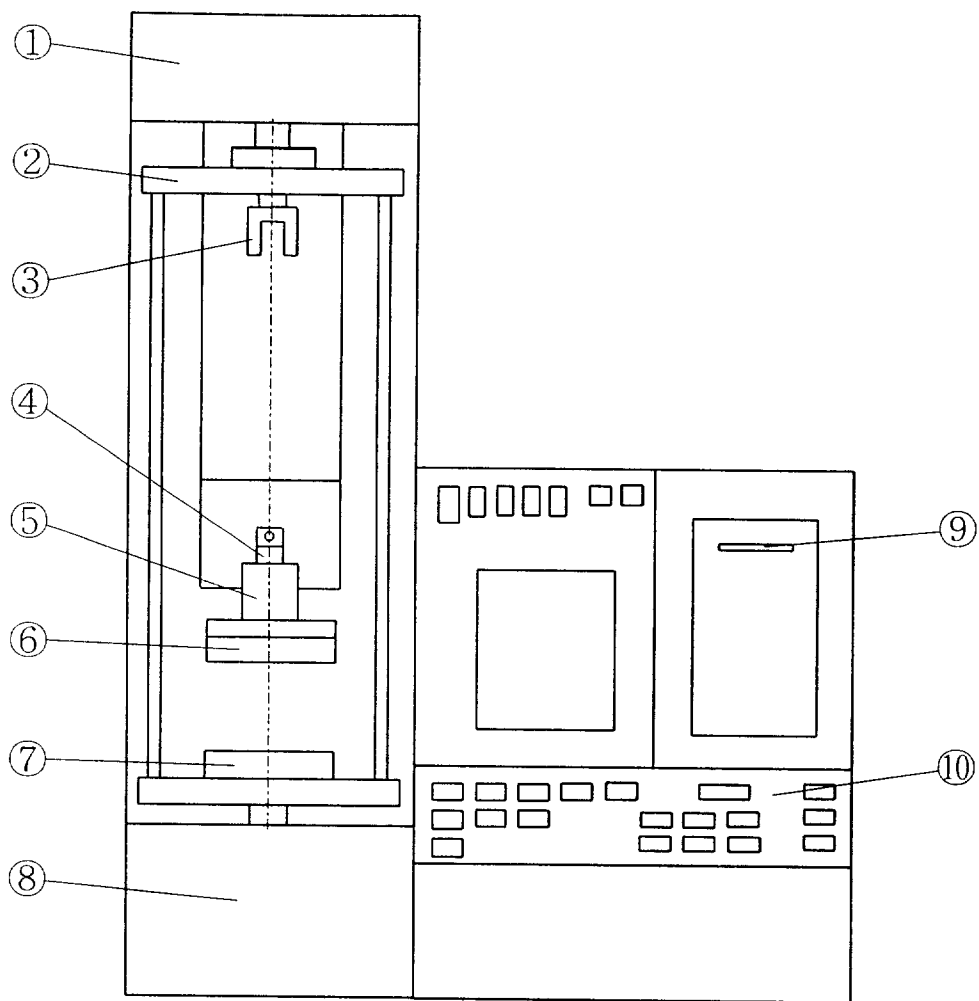


Fig. 4. General view of spring testing machine



- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| ① Encoder | ⑥ Upper compression plate |
| ② Suspension frame | ⑦ Lower compression plate |
| ③ Upper tension hook | ⑧ Plate |
| ④ Lower tension hook | ⑨ Printer |
| ⑤ Removing cross - head | ⑩ Control panel |

Fig. 5. Schematic diagram of spring testing machine

3-2-2. 실험 방법

실험에 사용된 FMG-A200D의 시험 조작 방법은 다음과 같다.

먼저 전원 스위치를 ON시키고, Length up 스위치를 작동시켜 하중 작동부를 상승시킨다. 그리고 Load를 0으로 맞추어 0점 조정을 한다. 그 다음에 측정물을 측정판 위에 올려놓고 하중 측정 범위를 입력시키는데, 측정물의 자유 길이를 감안하여 임의의 높이(30mm)를 설정하고 난 뒤에 1차 측정 높이(3.6mm), 2차 측정 높이(2.8mm), 3차 측정 높이(2.0mm)를 입력한다. 그 다음에는 출력 데이터 범위 결정(프린터 여부, 하중 포인트 결정, 피측정물의 시료수, 측정 속도, 측정 데이터의 통계값 산출, 상수 측정의 여부, 단위의 변경)을 지정 입력한다. 출력 데이터 범위의 결정이 완료되면 Load zero 스위치를 사용하여 로드셀 위의 피측정물의 하중치를 뺀 나머지 변위에 사용되는 하중을 측정한다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 실험에 의한 하중-변위 관계

Table 6은 스프링 하중 시험기에서 시편의 변위에 따른 하중 값을 구하여 나타내었고, Fig. 6은 이 시편의 하중-변위 선도를 나타내었다.

하중을 일시에 가하는 것이 아니고 각각의 변위에 대하여 어느 정도의 하중이 작용하였는지를 구하였다. 즉 스프링에 하중을 가하기 시작하여 0.4mm가 변위하였을 경우에 몇 kgf의 하중이 소요되는지를 구하고, 또 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm, 2.0mm 2.4mm, 2.8mm, 3.2mm, 3.6mm, 4.0mm 등이 변위하였을 때의 하중을 구하여 세로축에 나타내고 누적된 변위를 가로축에 설정하여 실험치로 정리하였다.

이 그래프에서 하중-변위의 관계를 보면 변위가 3.2mm까지는 어느 정도 선형을 이루고 있지만 그 이상의 변위를 하기 위해서는 이론치보다 훨씬 큰 하중이 필요하다는 것을 알 수 있다.²⁾¹⁴⁾

이것은 이 스프링의 특성상 어느 정도까지의 변위가 이루어지는 데에는 비례하여 하중이 증가하지만 그 이상의 변위가 이루어지기 위해서는 정도이상의 하중이 필요하다는 것을 나타내는 것이다. 그래서 일반적으로 스프링을 설계하여 현장에 적용하기 위해서는 전체 변위량중 20~80%의 가용 범위 내에서만 사용되어야 한다는 것을 알 수가 있는 것이다.

Table 6. The Result of experiment

	Displacement(mm)									
	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0
Load (kgf)	0.043	0.104	0.159	0.213	0.262	0.314	0.373	0.452	0.815	1.857

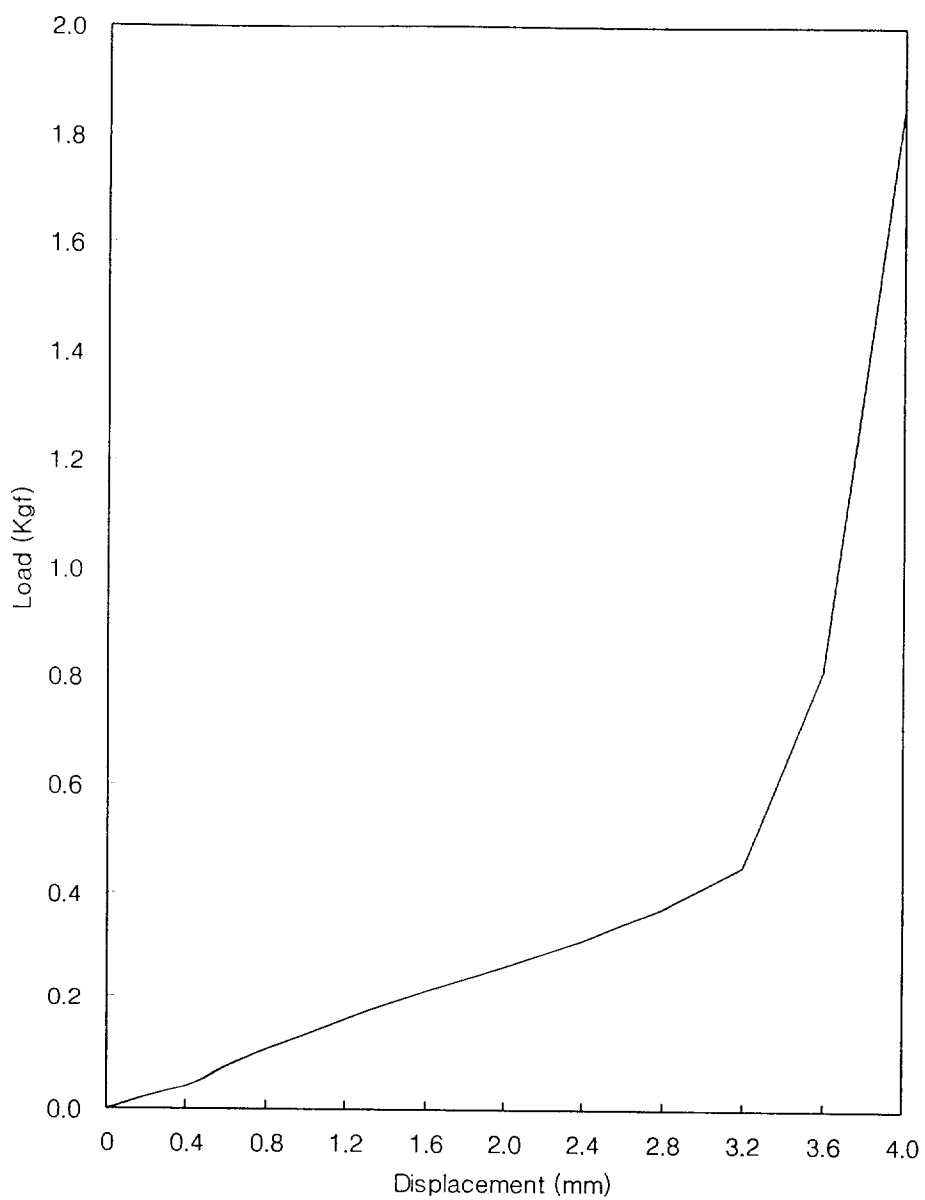


Fig. 6. Relation between load and displacement for specimen

4-2. 계산하중과 시험하중과의 비교 분석

시편을 디지털 하중 시험기(FMG-A200D)를 이용하여 압축 시험하면 스프링 시험기의 프린터로부터 시험하중과 변위가 출력된다. 이 때 각 시편의 변위에 따른 시험하중과 식 (12)에서 먼저 이 시편의 스프링 상수를 구하고 난 다음 각각의 변위에 따른 계산하중을 산출하여 변위의 변화에 따른 이론적인 계산하중과의 관계를 비교 검토하였다.¹⁵⁾¹⁶⁾ 이와 같이 시편을 시험한 결과 모두 변위가 증가함에 따라 비례하여 하중이 증가하는 것이 일반적인 스프링의 특성이라는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 시편에 대한 하중-변위 선도를 나타낸 것이다.

그러나 이 선도에서 변위가 증가할수록 실험에 의한 스프링 상수와 이론적인 스프링 상수의 차이가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 웨이브 와서 스프링의 특성상 어느 정도까지 변위가 이루어지고 나면 더 이상 변위가 나타나지 않게 되는데 그 경우에도 계속해서 하중을 가하기 때문에 어느 정도 가용 범위를 벗어나게 되면 급격하게 하중이 증가된다는 것을 알 수 있다. 그래서 일반적으로 현상에서는 탄성한계내의 총 변위량의 20%~80%정도의 변위 증분에 대한 평균하중 증분을 웨이브 와서 스프링의 상수로 취하여 설계하는 것이 바람직한 방법이라고 생각한다.¹⁷⁾

Fig. 8은 어느 정도 선형곡선이 나타나는 가용범위내의 시험하중 곡선과 계산하중 곡선을 비교한 것인데, 실험치의 경우 변위가 1.6mm부근에서는 비례하여 증가하는 하중-변위 선도보다 약간 큰 스프링 상수 값을 가지고 있으며 변위가 2.4mm부근에서는 오히려 약간 작게 나타나는 비선형 관계를 보이고 있다. 이 현상은 실험에 사용한 시편을 제작할 당시의 정밀도와 재질의 불균일 또는 가공 후에 시편의 기계적 성질이 변화하여 부분적으로 약간의 다른 결과가 나온 것으로 추정되지만 이 실험에서는 일반적인 오차 범위내에 있기 때문에 시험하중 곡선 모양에 결정적인 영향을 미치지 못한다.

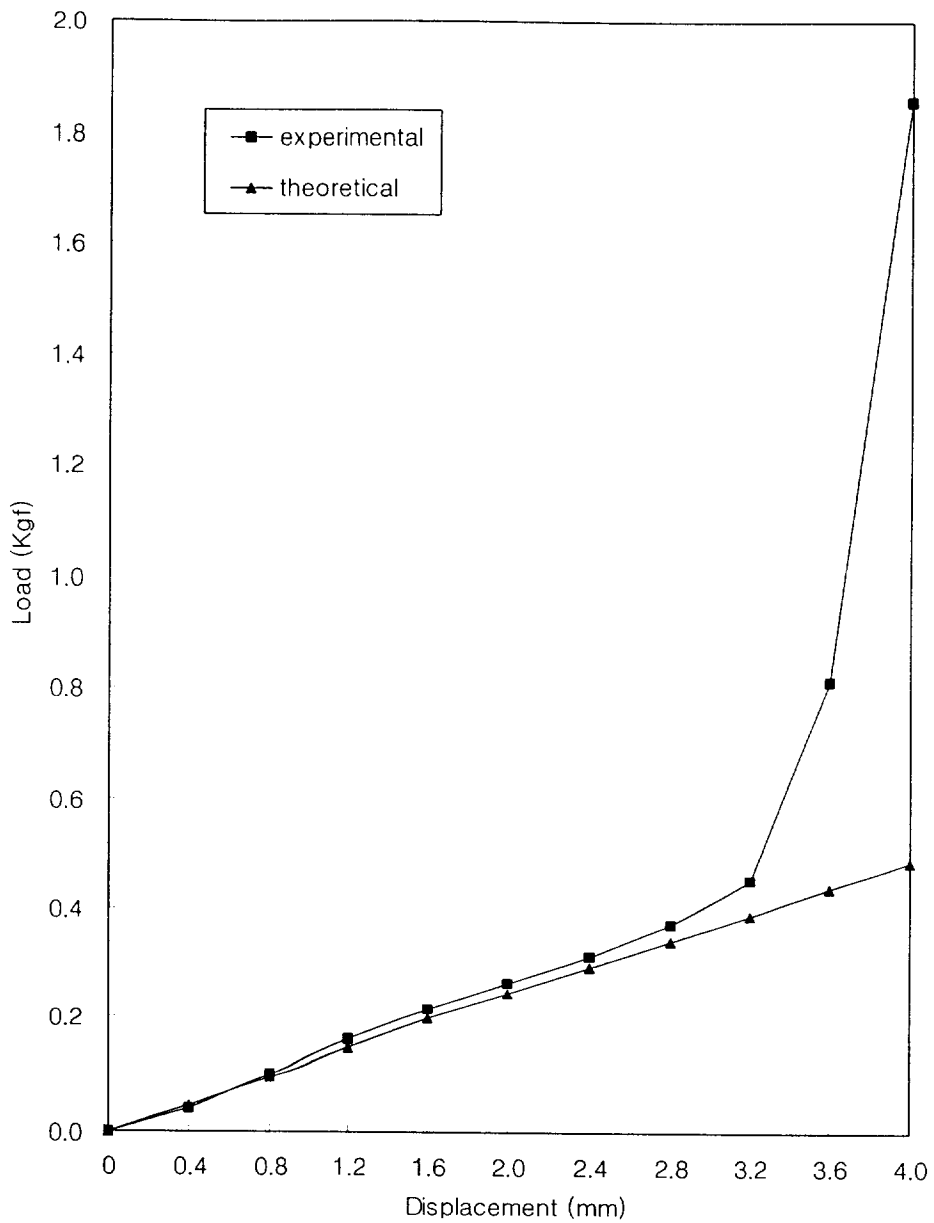


Fig. 7. Comparison of experiment with theory for stiffness

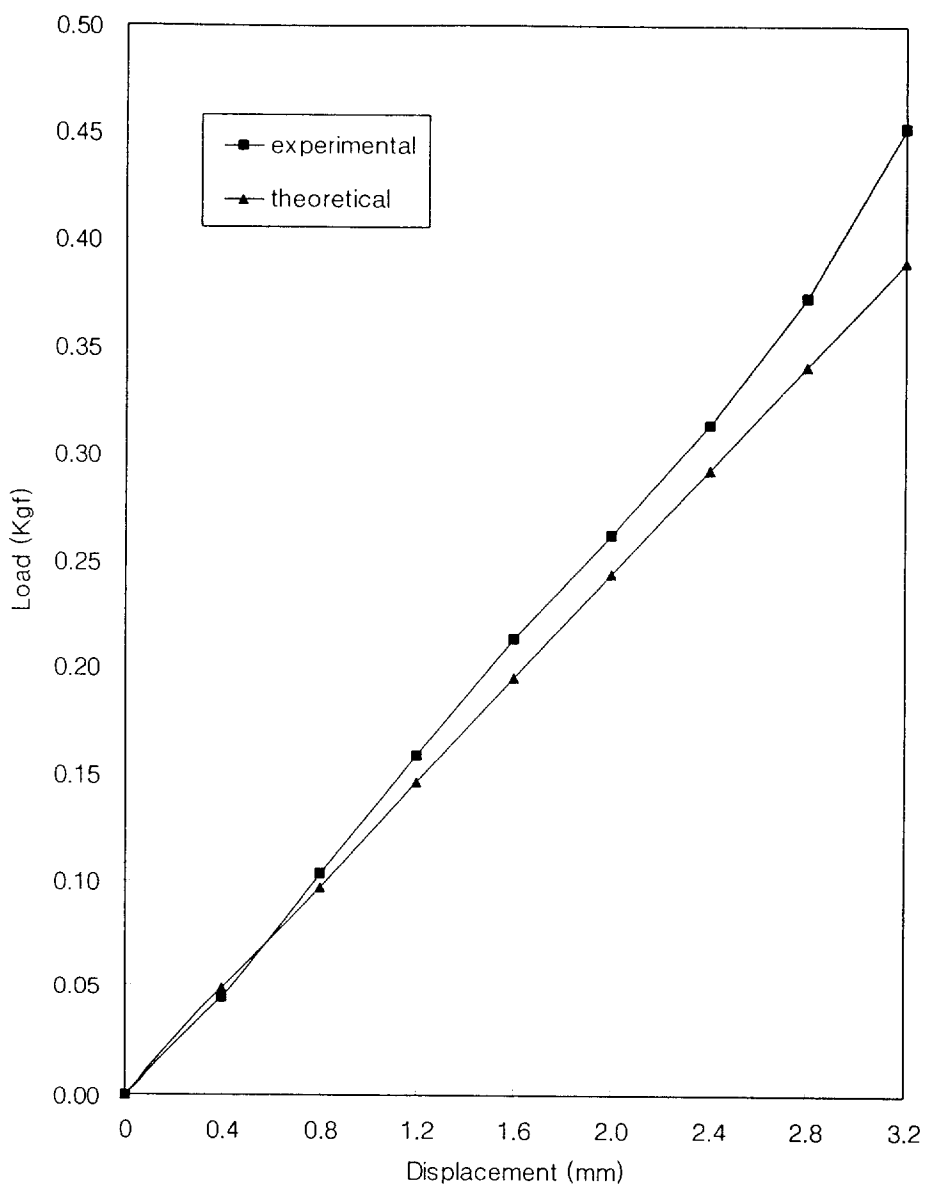


Fig. 8. Comparison of experiment with theory for stiffness of practical use

4-3. 각종 구성인자가 강성계수에 미치는 영향

4-3 1. 스프링 두께의 영향

실험을 통하여 웨이브 와셔 스프링의 강성계수는 이론적인 강성계수보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 웨이브 와셔 스프링의 직경과 폭을 일정하게 두고 두께를 시편보다 3.3% 작은 0.29mm와 이보다 큰 0.31, 0.32, 0.33mm로 변화시켜 하중-변위 선도를 나타낸 것으로 이론적 해석에서 구한 이론치와 시험에 의해 얻은 실험치와 비교하였다.

Fig. 9는 실제 현장에서 사용할 수 있는 가용 변위 구간에서의 하중-변위 선도를 나타내었는데, 이 시편의 강성계수는 평균 0.52 정도로 계산에 의한 강성계수 보다는 약 6.7% 높게 나타났으며 일반적인 허용오차 범위 $\pm 8\%$ 이내에 있기 때문에 신뢰성이 있다고 할 수 있겠다. 이 선도를 통해서 알 수 있는 바와 같이 변위가 1.2mm일 경우에는 계산에 의한 두께보다 2.74%, 2.0mm의 경우에는 2.41%, 2.8mm의 경우에는 3.04% 정도 크게 했을 경우의 이론적인 강성계수와 비슷한 강성계수를 나타내고 있다. 따라서 스프링 설계에 적용할 경우에는 계산에 의해 구한 두께보다 2.4~3.0% 정도 작은 값을 적용하므로써 이론치와 거의 비슷한 강성계수가 얻어질 것으로 사료된다.

즉, 변위가 2.0mm 정도에서 사용할 때에는 계산에 의해 구한 두께보다 약 2.4% 정도의 작은 값을 설계에 적용하면 이론치에 근접하는 실험치가 얻어질 것으로 판단되어진다.

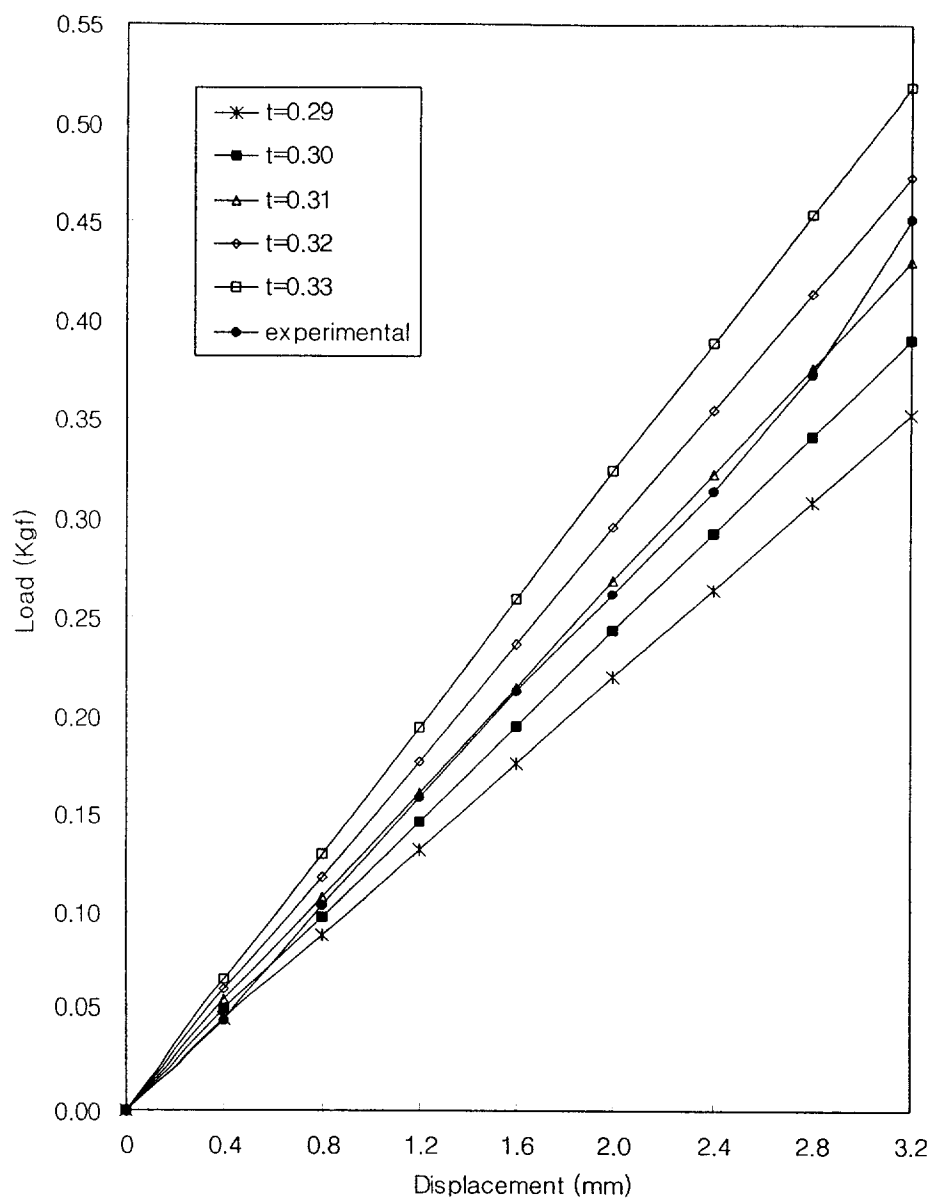


Fig. 9. Relation between load and displacement when varying thickness

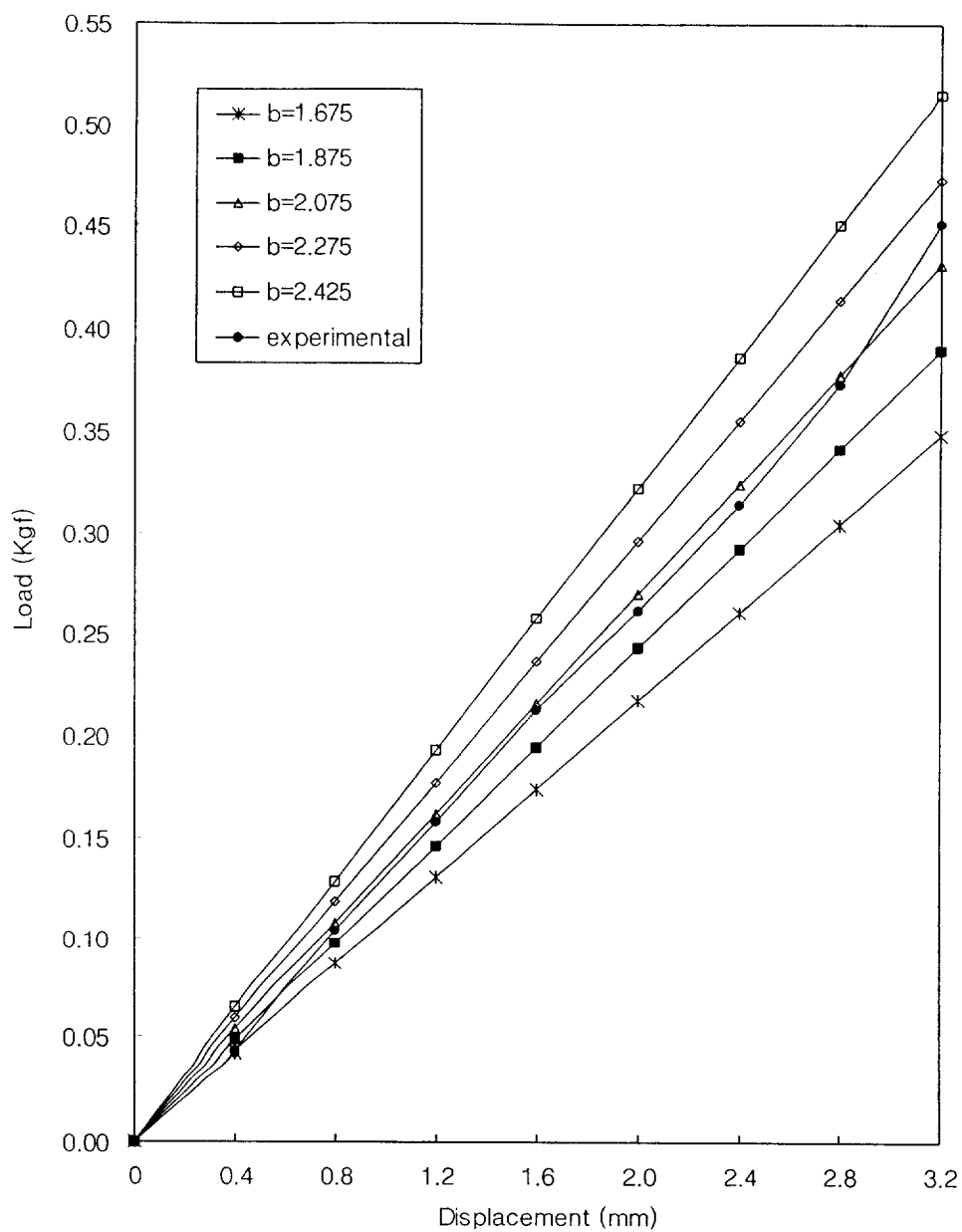


Fig. 10. Relation between load and displacement when varying width

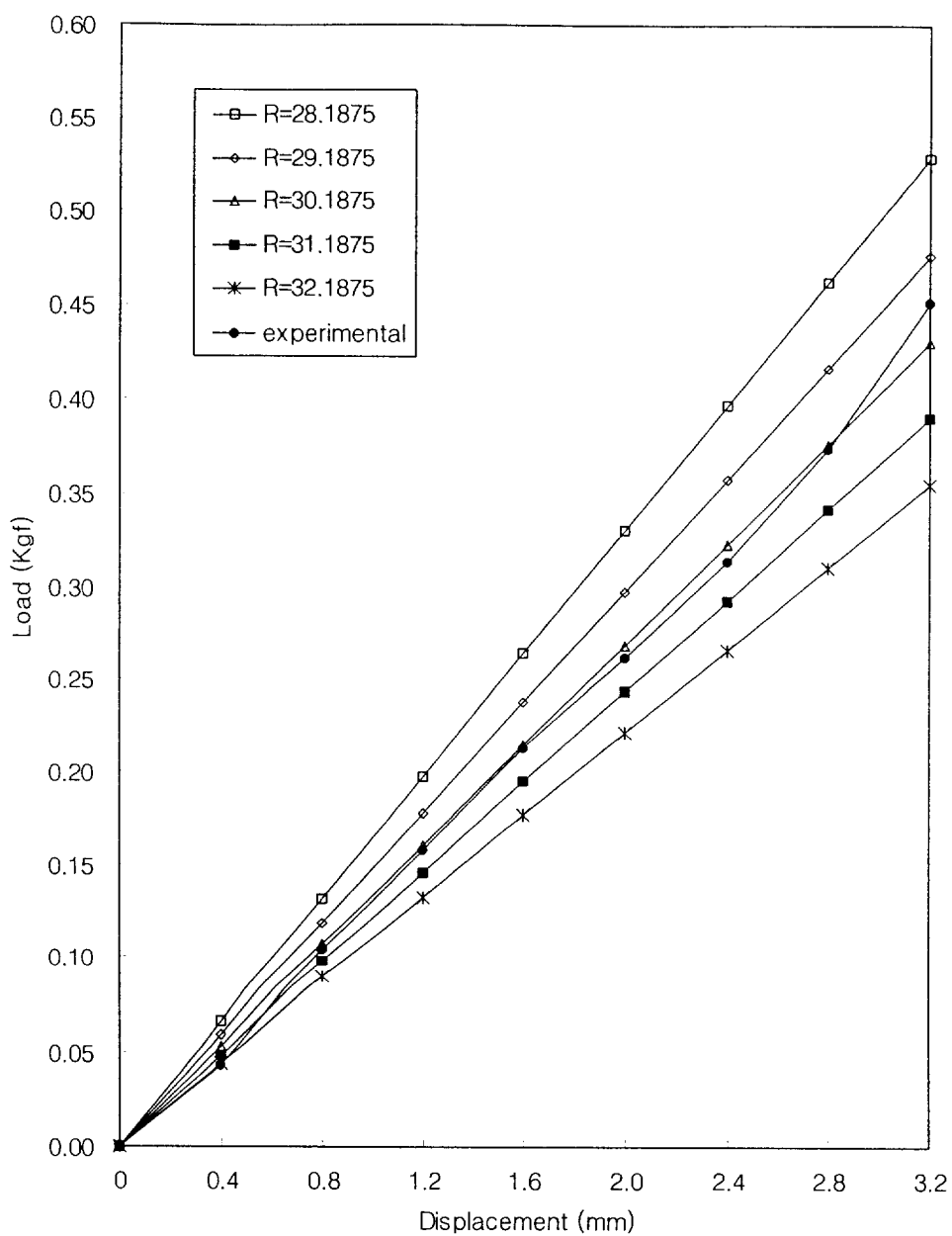


Fig. 11. Relation between load and displacement when varying radius

4-3-2. 스프링 폭의 영향

Fig. 10은 웨이브 와서 스프링의 직경과 두께를 일정하게 두고 폭이 시편보다 0.2mm 작은 1.675mm와 0.2mm씩 증가시킨 2.075mm, 2.275mm, 2.475mm일 때의 이론적인 강성계수와 시험에 의한 강성계수와의 변화를 비교하여 나타낸 것이다.

이 선도에서는 실제 현장에서 사용할 수 있는 가용 변위 구간을 하중-변위 선도로 나타내었는데 이 그래프를 분석해보면 실험에 의한 강성계수는 변위가 1.2mm일 경우에는 계산에 의한 스프링 폭보다 8.43%, 2.0mm의 경우에는 7.42% 그리고 2.8mm의 경우에는 9.41% 정도 크게 했을 경우의 이론적인 강성계수와 거의 일치한 것을 알 수가 있다. 따라서 실험치에 의한 결과는 식 (12)에 의해 구한 계산 값보다는 약 7.4~9.4% 정도 작은 값을 적용하므로써 이론적인 강성계수에 근접하는 값을 얻을 수가 있다.

따라서 변위가 2.0mm 정도의 경우에는 이론적으로 구한 폭보다 약 7.4% 정도의 작은 값을 적용하여 스프링 설계에 이용하여야 할 것이다.

4-3-3. 스프링 지름의 영향

Fig. 11은 웨이브 와서 스프링의 폭과 두께를 일정하게 두고 반지름을 1mm씩 변화시켜 시편의 반지름보다 작은 28.1875mm, 29.1875mm, 30.1875mm와 큰 32.1875mm일 때의 이론적 강성계수와 실험에 의한 강성계수를 비교, 검토하여 나타낸 것이다.

Fig. 11에서는 실제 스프링 설계에 사용할 수 있는 변위 구간만 하중-변위 선도로 나타내었는데 이 선도를 보면 실험에 의한 강성계수는 변위가 1.2mm일 경우에는 이론치보다 2.7%, 2.0mm의 경우에는 2.4%, 2.8mm의 경우에는 3.0% 정도 지름을 작게 적용했을 때의 이론적인 강성계수에 근접하는 것을 알 수 있다. 스프링 설계에서 계산에 의해 구한 지름보다는 2.4~3.0% 정도 큰 지름 값을 적용해야 이론치와 거의 비슷한 강성치를 얻을 수가 있다.

따라서 변위가 2.0mm 정도에서 사용하고자 하는 경우에는 계산에 의해 구한
지름보다 2.4% 정도의 큰 값을 적용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

5. 결 론

웨이브 와셔 스프링의 강성을 구하기 위하여 이론적인 해석을 하고 실험에 의하여 실제의 강성을 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 웨이브 와셔 스프링의 강성계수는 사용한도 내에서 선형적 관계를 나타내었으며 실험에 의한 강성계수의 값은 이론에 의한 강성계수의 값에 거의 근접하였다.
2. 본 실험에 사용된 시편의 경우에서 이론적인 강성계수보다 실험에 의한 강성계수가 비교적 크게 나타나는 양상을 보였다.
3. 강성계수의 값은 두께와 반지름의 경우는 대개 2.4~3.0%의 오차 범위내에 있으므로 거의 근접하는 양상을 보였으나 폭의 경우에는 약 7.4~9.4% 정도의 큰 편차를 보였다.
4. 이론적인 값과 실험치의 값이 근접하도록 하기 위하여 두께 또는 반지름의 치수를 수정함으로써 실제 스프링 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 鄭善模, 韓東哲, 標準機械設計學(新版), 東明社, 서울, pp.499~506 (1991).
2. 平修二, 現代彈力性, オーム社, 東京, pp.213~223. (1989).
3. S. J. Lee and J. S. Wang, "A study on the stiffness of wave washer spring", 한국박용기관학회지, Vol.20, No.3, pp.206~213, (1996).
4. 이원평, 기초기계요소설계, 청문각, 서울, pp.526~536, (1998).
5. 劉憲一, 機械設計工學, 東明社, 서울, pp.474~475 (1988).
6. 鄭善模, 標準機械設計學合本, 東明社, 서울, pp.282~288 (1979).
7. 송윤섭, 이희원, 주석재, 황시원, 황평, 기계설계, 북스힐, 서울, pp.634~636, (2000).
8. S. J. Lee and J. S. Wang, "A study on the non-linearity of wave washer spring", 한국박용기관학회지, Vol.21, No.3, pp.246~255, (1997).
9. ばね技術 研究會, ばね, 丸善社, 東京, pp.292~296, (1982)
10. G. Wempner, Mechanics of solids with application to then bodies, (1981).
11. 한국산업규격 특수 마대강, KS D 3551, 한국표준협회, 서울, (1997).
12. 金秉洛, "Belleville spring의 剛性에 대한 基礎的 研究", 釜慶大學校, pp.12~14, (1998).
13. 최재진, 전찬기, 김기형, 구조 재료 실험법, 원창출판사, 인천, p.78, (1997).
14. W.C.CARPENTER, "Analysis of plate on elastic foundation", Department of engineering science, University of Durhaam.
15. M. F. 스포트, 機械設計解析, 大韓教科書株式會社, 서울, pp.101~111, (1982).
16. 宋地復, 金進郁, 新機械設計, 普成閣, 서울, pp.643~644 (1994).
17. 朴載春, 李重鎬, 最新機械設計, 東明社, 서울, pp.535~536 (1994).

감사의 말씀

이 논문이 완성되기까지 부족한 저를 아낌없는 지도와 격려로 이끌어 주시고 삶의 교훈을 주신 이수종 지도교수님께 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

아울러 바쁘신 중에도 높은 학식으로 저의 논문을 다듬어 주신 김형자 교수님과 김영대 교수님, 그리고 오늘이 있기까지 많은 관심과 가르침을 주신 기계설계과의 여러 교수님께도 감사를 드립니다.

또 정말 바쁘신 중에도 저의 논문 실험을 위하여 물심 양면으로 걱정해주시고 스프링 분야에 대해서 아낌없는 조언을 주신 (주)대동스프링의 박상형 부장님께도 지면을 빌어 감사의 말씀을 올립니다.

처음에 같이 시작하였다가 자칫 중도에 포기하였을 뻔한 저를 함께 이끌어 준 이정복, 오동영 동료에게도 진심으로 감사를 드리며, 중간중간 저의 논문을 위하여 충고와 격려를 해준 부산공업고등학교 조상근 동기에게도 정말 감사를 드립니다. 또한 저의 논문을 마무리하는데 적극 도움을 준 서부산공업고등학교 백영종 고종사촌에게도 감사드리며, 오늘이 있기까지 많은 격려를 주신 부산기계공업고등학교의 김형섭 부장님과 김병락 선생님, 그리고 여러 동료 선생님께도 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 늘 자식의 건강을 걱정해주시고 사랑을 베풀어주신 어머니, 깊은 이해와 관심으로 보살펴 주신 장인, 장모님, 그리고 항상 나의 건강과 학문을 위해서 사랑으로 감싸주고 격려해 준 아내 영지와 믿음직한 아들 정훈이에게 고마움을 전하고 이 결실의 기쁨을 함께 하고자 합니다.

2002년 2월

李 相 基