

# 횡력발생 코일스프링 설계 및 제조에 관한 연구

권혁홍\*, 최선준\*\*

## A Study on the Development of the Side Load Coil Spring

H. H. Kwon\*, S. J. Choi\*\*

### Abstract

In the automotive suspension system, especially, Mcpherson strut type, if the resultant of the force through tire and the link reaction force is not coincident with the spring force, the side load against shock-absorber occur. The magnitude of side load is proportional to the difference between resultant force and spring force. To reduce side load, several method can be used, and one is to use the side load coil spring. This study summarize the development results of side load coil spring, i.e., how to design, analysis, manufacture, and test.

Keywords : Side Load(횡력), Coil Spring(코일스프링), Suspension(현가장치), Mcpherson (맥퍼슨)

### 1. 서론

자동차의 현가장치용으로 많이 사용되는 스프링의 종류는 겹판스프링, 코일스프링, 공기스프링 및 토션바스프링 등이 있는데, 이것들은 노면으로 부터의 진동을 절연하여 자동차 구조물을 보호하고 승객의 승차감을 향상시켜 궁극적으로 자동차의 속도 증가를 도모하는 것이 주기능이다.

코일스프링은 히스테리시스 현상이 거의 없어 동적특성

이 정적특성과 거의 같기 때문에 실차에서의 승차감이 좋아 승용차, 소형자동차 등 승차감이 중요시되는 차량에 많이 사용되고 있다. 그러나 횡방향의 하중을 지지할 수 없으므로 여러 종류의 링크 시스템이 필요하다.

코일스프링에 대한 연구동향을 살펴보면 코일스프링 설계에 대해서는 Wahl(1)과 SAE(2)가 필요한 재료, 수식 및 이론을 종합 정리하였으며, Chandler(3)가 응력수정 계수를 도입한 식을 이용하여 설계를 직접할 수 있는 방

\* 대전대학교 기계설계공학과, 생산기술연구소

\*\* (주)고려자동차

법에 대해 연구하였으며, Saynor(4)는 설계에 영향을 미치는 여러가지 인자에 대해 보고하였고, John(5)은 코일 스프링의 계산식을 조합하여 반복계산없이 직접 설계할 수 있는 방법을 연구하였다. Solomon(6)은 테이퍼 소재를 사용한 특수 형태의 비선형 코일스프링 설계에 관한 방법에 대해 개략적인 보고를 하고 있다. 반복하중에 사용되는 코일스프링의 경우에 있어 무한대의 내구수명을 갖는 코일스프링의 설계에 대해서는 Kock(7)이, 최소중량, 체적 및 길이를 갖는 코일스프링의 최적설계 방법에 대해서는 Erisman(8), Hinkle(9), Weiss(10) 등이 연구하였으며, 동적인 최적특성을 발휘할 수 있는 코일스프링의 컴퓨터 원용설계 방법에 대해서는 Lin(11)이 연구하였다. 코일스프링의 피치와 코일 반경의 효과가 특성에 미치는 영향을 Ancker(12~14) 등이 연구보고하였다. 코일스프링에 발생하는 응력을 정밀하게 계산하기 위해 해석적인 방법은 Shimoseki(15)가, 대변형의 비선형성을 고려한 유한요소해석(FEM) 방법은 Sawanobori(16)가 각각 연구하였으며 정적응력뿐 아니라 동적인 응력도 포함하여 계산하는 방법을 유한요소해석으로 Sawanobori(17)가 연구하였다.

비선형특성을 갖는 코일스프링의 설계 전반에 대해서는 Suzuki(18)가 보고하고 있으며 실제 설계에 필요한 식의 유도에는 Oguchi(19)가 연구하였다. 실제 시스템에 적용될 때의 코일스프링 설계에는 Chandler(20)가 보고하였다.

특수형 코일스프링의 설계에 관한 연구로 Votta(21)는 특수형 코일스프링의 종류와 일반적인 설계 접근방법에 대해 정리하였으며 Vondracek(22) 등은 테이퍼 소재의 코일스프링의 설계 및 제조방법에 대해, Kung(23)은 원추형 코일스프링 설계방법에 대해, Dore(24) 등은 사각단면 소재의 코일스프링의 설계식에 대해 각각 연구하였다. 파이프 소재로 코일스프링을 제작할 때의 설계이론 및 주의사항에 대해서는 Bert(25)가 보고하고 있고 난형단면 소재의 코일스프링의 장점 및 설계식에 대한 연구는 Fuch(26)와 Miyamura(27) 등이 수행하였다.

현가장치에서 지면으로부터의 작용력과 링크 구속력의 합력방향이 현가장치 스프링의 작용방향과 일치하지 않으면 속업서버에 굽힘 모멘트가 작용하고 이는 피스톤과 실린더에 횡력으로 작용하여 속업서버의 마모와 승차감 저하의 직접적인 원인이 되는데, 특히 맥퍼슨식 현가장치에서는 중요한 문제가 된다. 이러한 현상을 감소시키기 위해서 여러방법이 사용 될 수 있는데 그 중 하나가 스프링 형상을 적절히 설계하여 스프링 자체에서 횡력을 발생시

키면 된다. 이를 횡력발생 코일스프링이라 한다.

코일스프링에서의 횡력문제에 대해서는 여러 가지의 형상이 특허로 발표되었으며, 이에 대한 본격적인 연구 결과는 최근에 발표되었다. Sato(28) 등은 자체에서 개발한 유한요소 해석 프로그램으로 일반적인 원통형 코일 스프링에서도 횡력이 발생함을 해석 및 실험으로 보였고, Suzuki(29) 등은 상용 FEM프로그램으로 같은 내용의 연구를 한 결과를 발표하였다. Muhr(30) 등은 횡력발생 코일스프링의 현가장치에서의 장점, 횡력 발생의 원리, 시험방법, 실차주행시 일반스프링에 비해 좋은점 등을 연구한 결과를 연구발표하였다.

본 연구는 횡력발생 코일스프링을 개발한 결과에 대한 것으로 현가장치에서의 횡력계산, 설계 및 해석 방법, 시험방법 및 시험기 개발, 제조방법 등에 관해 개발한 결과를 정리한 것이다.

## 2. 설계방법

### 2.1 현가장치에서의 횡력계산

현가장치에서의 횡력문제는 특히 맥퍼슨식에서 문제가 되는데 Fig. 1은 맥터슨식에서의 현가장치를 평면상으로 간단히 표현한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 이 장치에서는 타이어에 작용하는 힘  $F_A$ , 링크의 반력  $F_R$ , 스

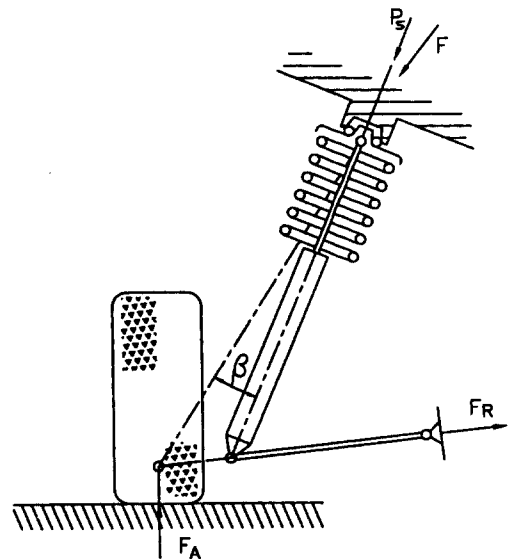


Fig. 1 Schematic of Mcpherson suspension

프링에 의한 반력  $F_S$ 가 작용하고 있는데 이를 힘의 벡터로 그려보면 Fig. 2(a)와 같이 표시된다. 여기에서 알 수 있듯이  $F_A$ 와  $F_R$ 의 합력인  $F$ 가  $F_S$ 와 일치하지 않을 때  $F_S$ 의 직각방향으로 횡력  $F_L$ 이 발생됨을 알 수 있다. 이 횡력은 Fig. 2(b)와 같이 속업서버에 작용하여 굽힘 모멘트를 발생시키며 이로 인해 피스톤과 로드 각각에  $F_P$ ,  $F_R$ 와 같은 횡방향 반력을 유발시킨다. 이 반력에 의해 속업서버는 마모가 촉진됨과 아울러 스틱 슬립현상의 발생에 의해 승차감이 저하되는 요인이 된다. 발생하는 횡력은 Fig. 2(a)에서와 같이 작용힘의 벡터 합성도에서 구할 수가 있는데 그 크기는 다음과 같다.

$$F_L = F \cdot \sin\alpha = F_S \cdot \tan\alpha \quad (1)$$

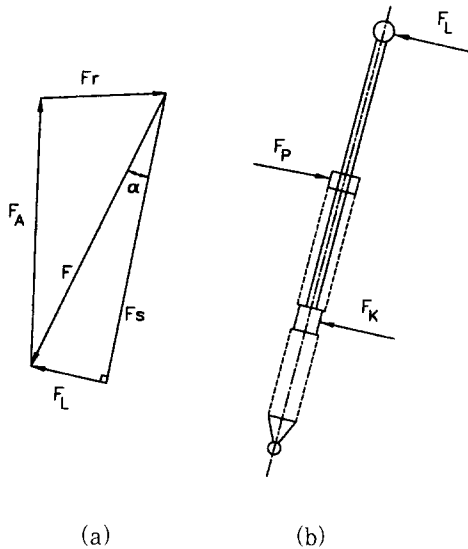


Fig. 2 Side load acting on the shock-absorber

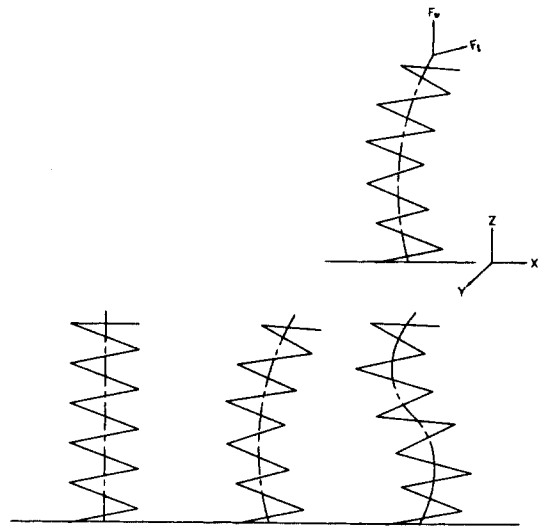
그러나 이경우는 현가장치를 평면상으로 근사해서 캠버 각 등을 고려하지 않았고 또한 현가장치가 작동할 경우 연속적인 횡력의 계산이 어렵기 때문에 정밀한 계산을 위해서는 현가장치의 3차원배치와 기구학적인 움직임이 연속적으로 계산 될 수 있는 수식이 포함되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 정밀한 횡력계산을 위해 이러한 요인을 고려할 수 있는 SSNAP라는 현가장치의 상용기구학 해석 프로그램을 사용하였다.

## 2.2 횡력발생 코일스프링의 설계 및 해석

### (1) 스프링 형상설계

현가장치에서 발생하는 횡력을 감소시키기 위해서는 코일스프링의 시트판을 편심시키는 방법등이 있으나, 설치공간 제한을 고려할 때 코일스프링의 형상을 적절히 설계하여 스프링 자체에서 현가장치의 횡력을 감소시킬수 있도록 하는 방법이 가장 바람직하다. 또한 큰 횡력이 필요시에는 시트판의 편심방법과 스프링 형상의 조합이 병행하여 사용될 수 있다.

횡력을 발생시킬수 있는 코일스프링의 형상도 여러 가지 형상이 있을수 있는데 크게 C형과 S형으로 나눌 수 있다. 일반적인 형상의 횡력발생 코일스프링은 Fig. 3과 같다.



(a) conventional coil spring (b) C type side load coil spring (c) S type side load coil spring

Fig. 3 Shape of side load coil spring

본 연구에서는 제조의 용이성을 고려하여 C형으로 설계하였다. 설계 초기단계에서 대략적인 형상결정, 특성 및 응력 계산은 코일 중심축이 굽은 것을 무시하고 일반적인 코일 스프링 설계식을 이용하여 수행한다. 즉, 스프링상수

$k$ 와 응력  $\tau$ 는 다음식으로 표시된다.

$$k = \frac{8 D^3 N}{G d^4}, \quad \tau = K \cdot \frac{8 F D}{\pi d^3} \quad (2)$$

여기에서  $D$ 는 코일경,  $d$ 는 소재경,  $N$ 는 유효권수,  $G$ 는 횡탄성계수,  $F$ 는 작용하중,  $K$ 는 Wahl계수로서

$$K = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c} \text{ 이며 } C = D/d \text{ 이다.}$$

일반적으로 설계조건으로는 장착공간, 스프링 특성, 하중조건, 목표회력, 내구사양이 주어지는데 이에대해 코일경, 선경, 자유고 등이 결정된다. 코일스프링의 중심축이 C형으로 되면 축방향의 특성, 회력, 응력 등의 값이 직선인 일반형과 차이가 나게 되며, 이의 정밀한 계산은 대략적인 형상이 설계된 후 유한요소해석을 통해 하게 된다.

(2) 스프링의 유한요소 해석

회력발생 코일스프링의 축방향 하중-변위 특성, 축방향 하중에 따른 발생회력, 변형 형상, 응력 등의 계산을 위해서는 해석적인 방법의 적용이 어려우므로 유한요소 해석법을 적용하였다.

유한요소 해석을 위해서는 얻고자 하는 결과를 위해 적절한 해석모델을 선정하여야 하는데, 본연구에서는 Fig. 4와 같은 해석모델을 개발 및 사용하였다. 위아래 시트판은 강성이 아주큰 보요소로 모델링하고 하중의 증가에 따라 스프링이 시트판에 접촉되는 현상은 시트판과 스프링 요소 사이에 접촉요소를 사용하였으며 스프링은 보요소로 모델링하였는데 해석 정도를 고려하여 요소의 크기를 정하였다. 코일스프링의 반력을 구하기 위해 시트판의 중심에 강제 보요소를 더하여 이 끝부분에서의 각방향 반력을 구할 수 있도록 하였고 반대쪽 시트판은 강제변위를 여러 스텝에 나누어 자유시에서 최대 변위까지 주는 방법을 사용하였다. 또 시트판에 접촉되는 스프링 부분은 접촉요소의 작용을 확실히 하기 위해 적절한 강성의 보요소로 시트판과 스프링을 연결하여 주었다.

일반 코일스프링의 설계식을 이용하여 대략적으로 결정된 스프링 형상을 기본으로 임의의 코일중심축 곡률반경에 대해 정밀해석하여 요구되는 성능이 나올 수 있도록 코일스프링의 형상을 결정하게 된다.

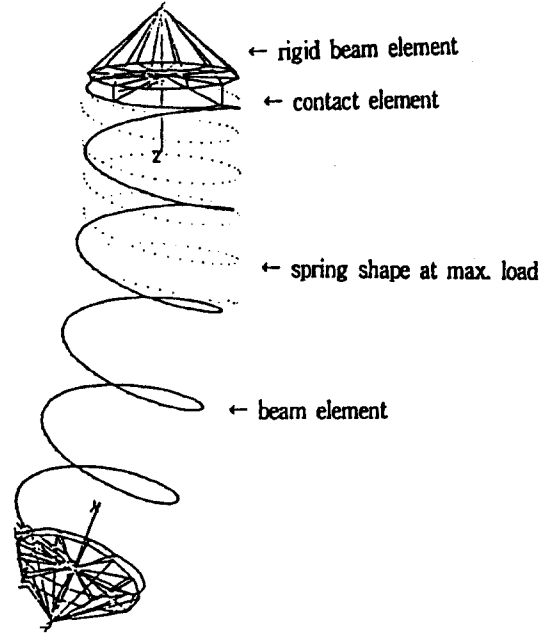


Fig. 4 FEM model of side load coil spring

### 3. 제조방법

회력발생 코일스프링의 제조방법은 일반스프링의 것과 거의 동일한 공정을 거치게 되는데 형상의 특이성때문에 일부 공정은 주의해야 한다. 제조공정의 순서는 Fig. 5와



Fig. 5 Manufacturing process of coil spring

같은데 먼저 재료로서는 코일중심축이 직선이 아니어서 열간성형이 어려우므로 냉간성형용 재료인 오일템퍼선이 많이 사용된다. 재료는 연속적으로 공급되어 성형기에서 코일스프링의 형상을 만드는 코일링 작업이 이루어 진다. 코일링이 완료되면 스프링이 하나씩 절단된다. 코일링 작업시 발생된 인장잔류응력은 내구수명에 악영향을 미치게 되므로 이를 제거하기 위하여 350~400℃정도에서 1.5 시간 정도 열처리 공정을 거치게된다. 이 공정에서 잔류응력의 풀림에 동반하여 코일스프링 형상변화가 발생하므로 이를 고려하여야 한다. 이후 강제적인 소성변형에 의해 항

복점을 높이며 압축잔류응력을 부여함과 동시에 재료에 내재된 히스테리 특성을 최소화시키기 위해 스프링이 사용되는 최고하중보다 더 높은 하중을 여러번 반복 작용시키는데 이를 셋팅이라 한다. 이 공정에서도 코일중심축의 형상변화가 발생하는데 초기성형 형상은 이때의 변화를 고려하여 결정되어야 한다. 스프링에 압축 잔류응력을 부여하여 내구수명을 높임과 동시에 표면의 결함을 없애기 위해 쇼트피닝을 실시한 후 표면의 보호를 위해 도장하는 공정을 거치게 되며 최종적으로 특성 등의 시험을 하게 된다.

#### 4. 시험방법

횡력발생 코일스프링의 특성을 측정하기 위해서는 스프링 시트에 작용하는 모든성분의 힘과 모멘트를 측정할수 있는 장치가 필요한데 이를 위해서는 Fig. 6과 같이 6개의 로드셀이 필요하게 된다. 각 로드셀의 측정값으로부터 횡력발생 코일스프링의 특성을 계산할 수 있는데 그 방법은 다음과 같다.

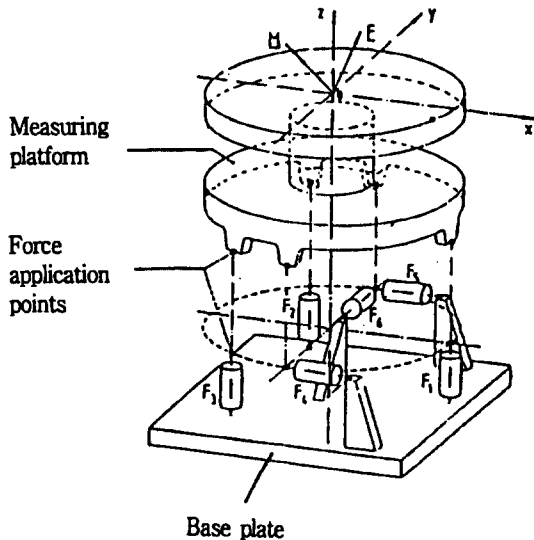


Fig. 6 Measuring device of side load coil spring

Fig. 6와 같이 3차원 직각좌표틀을 기준으로 6개의 로드셀을 각각 장착하여 Z축 방향으로 3개, X축 방향으로 2개, Y축 방향으로 1개를 배치하고 이를 각각

$F_1, F_2, \dots, F_6$ 라 한다면 이들로부터 얻어진 X, Y, Z방향의 힘을 조합하여 힘과 모멘트의 벡터  $\vec{F}, \vec{M}$ 을 구하고 이들 벡터로부터 횡력 및 스프링 상하 좌면의 하중 중심점을 구할 수 있다.

로드셀이 압축될 경우를 "+", 인장될 경우를 "-"라고 두고 X, Y, Z방향의 힘을 각각  $F_x, F_y, F_z$ 라 하면  $\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$  로써

$$\begin{aligned} F_x &= F_4 + F_5 \\ F_y &= -F_6 \\ F_z &= -(F_1 + F_2 + F_3) \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.

또 로드셀의 좌우반경을 r이라 하고 모멘트 성분을  $M_x, M_y, M_z$ 라 두면  $\vec{M} = (M_x, M_y, M_z)$ 로써

$$\begin{aligned} M_x &= r \sin 60^\circ (F_3 - F_2) \\ M_y &= 0.5r (2F_1 - F_2 - F_3) \\ M_z &= r (F_5 - F_4) \end{aligned} \quad (4)$$

가 됨을 알 수 있다. 사이드로드 스프링의 경우  $\vec{F}, \vec{M}$ 은 그 방향이 서로 일치하지 않는데 하중작용선과 축좌표가 동일하지 않기 때문에 실제하중 작용선이 통과하는 점의 위치벡터  $\vec{r}_A$ 를 구할 필요가 있는데 이는 다음과 같다. 모멘트  $\vec{M}$ 을  $\vec{F}$ 와 동일한 방향으로 작용하는 성분  $\vec{M}_A$ , 같은 평면상에서 직각으로 작용하는  $\vec{M}_B$ 로 분해하였다고 가정하면

$$\vec{M} = \vec{M}_A + \vec{M}_B \quad (5)$$

가 되고 다시  $\vec{M}_B$ 는 벡터  $\vec{r}_A$ 와 벡터  $\vec{F}$ 의 크로스 벡터로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{M}_B = \vec{r}_A \times \vec{F} \quad (6)$$

위의 식(5)에 식(6)을 대입하여  $\vec{r}_A$ 와  $\vec{M}$ 의 관계식을 구하여 보면

$$\vec{M} = \vec{M}_A + \vec{r}_A \times \vec{F} \quad (7)$$

과 같이 됨을 알 수 있다. 그리고  $\vec{r}_A$  는  $\vec{F}$  와  $\vec{M}$  의 크로스 벡터이므로

$$\begin{aligned} \vec{F} \times \vec{M} &= \vec{F} \times (\vec{M}_A + \vec{r}_A \times \vec{F}) \\ &= \vec{F} \times \vec{M}_A + \vec{F} \times (\vec{r}_A \times \vec{F}) \end{aligned} \quad (8)$$

의 관계식이 성립한다. 식(7)과 식(8)을 정리하면

$$\vec{r}_A = \frac{\vec{F} \times \vec{M}}{\vec{F} \cdot \vec{F}} \quad (9)$$

가 된다. 앞서 사이드로드 스프링에 의해 발생하는 측면하중의 방향과 그것이 지나는 한 점의 위치를 구하였는데 이상의 결과를 바탕으로 스프링의 좌면에 존재하는 하중의 중심좌표를 구하여 보면 다음과 같다. 스프링의 좌면은 치구를 중심으로 한 직교좌표에 대하여 Z축으로 "z"만큼의 거리에 존재한다고 하면

$$\vec{r} = \vec{r}_A + (z - r_{AZ}) \times \frac{\vec{F}}{F_z} \quad (10)$$

가 됨을 알 수 있다.

식(10)의 변수 z의 값을 좌표원점으로부터 스프링의 상, 하 좌면까지의 거리로 설정하여 줌으로서 각 좌면의 하중 중심점을 구할 수 있다.

### 5. 결과 및 고찰

본연구에서 개발한 기술을 검증하여 보기 위하여 국내에서 생산되는 승용차모델을 하나 설정하여 횡력발생 코일스프링을 설계, 해석, 제조 및 시험을 행하여 보았다.

적용된 현가 형식은 맥퍼슨식이며 현가장치의 하드 포인트가 주어졌고 스프링설계를 위해 주어진 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Requirements of spring design

Content	Requirement
Coil out-dia.	<144 mm
Axial spring rate	19.0±4% N/mm
Load at height 200mm	3800±100 N
Solid height	<117.5 mm
Side load	Mim 50% reduction compared to conventional spring
Durability	200,000 cycle with 90% confidence

주어진 조건으로 이 현가장치에 작용하는 횡력을 유한요소적으로 정밀해석한 결과 362.8 N이었다. 따라서 스프링으로 감소시켜야하는 횡력의 목표는 157N이상이 된다. 이 조건을 만족시키는 횡력발생 코일스프링을 설계한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Shape of Designed side load coil spring

Content	Dimension
Wire diameter	12 mm
Coil diameter	128 mm
End Shape	open & pigtail
Free height	415 mm
Solid height	80 mm
Coil axis radius	900 mm

따라서 형상적으로는 공간의 제한조건, 최소높이 등의 설계요구 조건을 만족시킴을 알 수 있다.

이 형상의 횡력발생 코일스프링을 유한요소해석으로 정밀해석하여 특성값, 지정시 하중, 횡력을 계산하여 보았으며 견본을 제조하여 시험한 값과 비교한 결과는 Table 3에서 보여진다.

Table 3 Results of FEM analysis and experiments

Content	FEM Results	Experimental Results
Spring rate	19.3N/mm	18.64~18.74
Load at height 200mm	3850N	3755~3815
Side load	104.5N	120
Principal stress at working load	1093N/mm <sup>2</sup>	-
Fatigue life	-	210,000 cycles with 90% confidence

이 표에서 알 수 있듯이 FEM해석결과가 설계요구 조건을 모두 만족시킴을 알수있어 이 설계가 타당함을 알수 있다. 또한 FEM해석 결과와 시험값이 서로 잘 일치함을 알 수 있는데 이로부터 개발된 해석모델 및 방법의 유효성을 검증할 수 있다.

## 6. 결론

코일스프링을 사용하는 현가장치 특히 맥퍼슨식 현가장치에서는 노면으로부터의 작용힘과 링크의 작용력과의 합력과 스프링의 작용력이 서로 일치하지 않으면 그 차이만큼 속업서버에 횡력이 작용하는데 이를 없애기 위한 방법의 하나로 횡력발생 코일스프링이 사용되는데 본 연구에서는 이의 개발에 대한 연구를 하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 현가장치의 배치에 따라 발생하는 횡력의 계산을 간 이식과 상용프로그램으로 계산하였다.
- (2) 주어진 설계요구조건을 만족시키는 횡력발생 코일스프링의 설계 및 해석하는 방법을 개발하였다.
- (3) 횡력발생 코일스프링의 제조기술을 정립하였다.
- (4) 횡력발생 코일스프링의 시험방법을 정립하고 이에 필요한 장치를 개발하였다.
- (5) 위에서 개발 및 정립된 이론이 시험값과 잘 일치함을 검증하였다.

## 참고 문헌

1. Wahl A.M., "Mechanical springs", McGraw-Hill Book co., 1966.
2. SAE, "Manual on design and application of helical and spiral springs", HSJ795, 1992.
3. Chandeler. R. V. "Direct procedure for helical spring design", Machine design, pp 131, 1961.
4. Sayhor, D. "Helical coil spring design", Engineering, June, 1986.
5. John, R. C. "Short cut for designing helical springs", Machine design, November 22, pp 92, 1979.
6. Solomon, A. R. "Coil spring design, an analytical view", SAE paper 790410, 1980.
7. Kock, R. W. "Designing Springs for infinite life", Machine design, October.16, 1975.
8. Erizman. R. J. "Optimum design of helical compression springs", Journal of Engineering for industry, pp 227, 1961.
9. Hinkle, R. T. et al, "Design of helical springs for minimum weight, volume, and length" J. of Engineering for industry, pp 37, 1959.
10. Weiss, K. "How to design helical compression springs for Minimum weight, Minimum volume, or minimum length", Machine design, December 6, pp 173, 1962.
11. Lin, Y. "Computer-aided design of helical springs for optimal dynamic performance", May, pp 82, 1992.
12. Ancker. C. J. et al, "Pitch and curvature corrections for helical springs", J. of applied mechanics, December, pp 466, 1958.
13. Ancker. C. J. et al, "Theory of pitch and curvature corrections for the helical spring-I (tension)", J. of applied mechanics, December, pp 471, 1958.
14. Ancker. C. J. et al, "Theory of pitch and curvature corrections for the helical spring-II (torsion)", J. of applied mechanics, December, pp 484, 1958.
15. SHimoseki. M. et al, "원통코일스프링의 응력해석", 日本機械學會 論文集, Vol. 48, No. 435, pp 1774, 1982.
16. Sawanobori. T. "The analysis of static stress in coil springs with nonlinearity", Bulletin of JSME, Vol. 29, No. 253, pp 2306, 1986.
17. Sawanobori, T. et al, "코일스프링의 정적 및 동적 응력의 해석", 日本機械學會 論文集, Vol. 50, No. 456, pp 1512, 1983.
18. Suzuki, K. et al, "비선형 특성의 코일스프링에 대하여", ばね論文集, pp 47, 1973.
19. Ognchi, S, "비선형 특성을 갖는 코일 스프링의 설계", ばね論文集, pp 75, 1974.
20. Chandler. R. D. "A direct method for designing compression springs", Machine design, August 13, pp 159, 1964.

21. Votta, F. A. "Special spring forms", Machine design, March 7, pp 106, 1957.
22. Vondracek, M. et al, "Design and manufacturing of helical coil springs with variable diameters of coils and wires", SAE paper 820162, 1983.
23. Kung, W. C. "Deflection of conical springs", machine design, August 15, pp 159, 1968.
24. Dore, A. "Design of springs of rectangular wire coiled edge wire", J. of Engineering for industry, pp 147, 1975.
25. Bert, C. W. "Helical springs of hollow circular cross section", J. of Engineering for industry, pp 30, 1959.
26. Fuchs, H. O. "Ovate cross sections make better coil spring", Mechanical design power transmission, January 27, pp 86, 1969.
27. Miyamura, N. et al, "Design and testing of ovate wire helical springs", SAE paper 932891.
28. Sato S., et al., "FEM analysis of side load in cylindrical coil spring", JSSR Meeting, 1995.
29. Suzuki I., et al., "Side load analysis of cylindrical coil spring in suspension and application to suspension design", JSSR Meeting, 1995.
30. Muhr, K. H., Karl, B., Leo, S., "Side load Springs as a solution to minimize adverse side load acting on the Mcpherson strut", SAE 940862.