

〈技術論文〉

# 판형 홀드다운 스프링 집합체의 강성해석

송기남\* · 임현태\*

(1991년 11월 19일 접수)

## Stiffness Analysis of Leaf Type Holddown Spring Assemblies

Kee-Nam Song and Hyun-Tae Lim

**Key Words :** Spring Stiffness(스프링 강성), Holddown Spring(홀드다운 스프링) Constraints (구속조건), Castigliano's Theory(카스틸리아노의 정리) Gauss-Legendre Integral (가우스-레젠드리 적분)

### Abstract

A general method is proposed for stiffness analysis of the leaf springs only using the geometric data and Young's modulus of the leaf springs. In this method, an engineering beam theory and Castigliano's theory are applied for the derivation of the stiffness of the leaf springs. To show reliability and effectiveness of this method, the stiffness from the proposed method is compared with the test results for various types of leaf springs. From these comparisons the proposed method has been proved to be effective and reliable to estimate the stiffness of the leaf springs.

### 기 호 설 명

- |                                  |                            |
|----------------------------------|----------------------------|
| $E$ : 탄성계수                       | $\xi$ : 임의의 위치 X까지의 각도     |
| $F$ : 판형스프링에 작용하는 외력             | $\gamma$ : 임의의 위치 X의 반경    |
| $F_i, F_R$ : 판형스프링에 작용하는 반력      | $d_s$ : 각 영역의 길이 방향의 미소 변수 |
| $I_i$ : 단면관성모멘트                  |                            |
| $K$ : 강성계수                       |                            |
| $M_i$ : 굽힘모멘트                    |                            |
| $U$ : 변형률 에너지                    |                            |
| $B$ : 판형스프링의 너비                  |                            |
| $h$ : 판형스프링의 두께                  |                            |
| $\delta$ : 판형스프링의 수직변위           |                            |
| $L$ : 판형스프링의 테이퍼된 길이             |                            |
| $a, b, c$ : 판형스프링의 끝단의 치수        |                            |
| $\alpha$ : 판형스프링 굽힘각도            |                            |
| $R_{1b}, R_i$ : 판형스프링 굽힘부위의 곡률반경 |                            |
| $b_0$ : 판형스프링 끝단 삽입부의 슬롯 너비      |                            |
| $d_0$ : 판형스프링이 삽입된 부분의 직경        |                            |

### 1. 서 론

핵연료집합체 상단에 부착된 홀드다운 스프링은 발전소 운전중에 원자로심내에서 냉각수 유동에 의해 핵연료집합체에 가해지는 수직항력으로부터 핵연료집합체를 지지하고 원자로 구조물과 핵연료집합체 구조물간의 열팽창차이 그리고 핵연료집합체의 증성자조사, 성장등을 수용하는 기능을 갖고 있다. 이러한 홀드다운 스프링의 기능을 핵연료 수명 기간 동안 유지하기 위해서 홀드다운 스프링은 충분한 강성(stiffness)과 복원력을 갖추도록 설계되어야 한다.

국내 원자력 발전소에 공급되는 대부분의 핵연료 집합체에는 Fig. 1과 같은 판형 홀드다운 스프링이 부착되어 있어서 판형 홀드다운 스프링의 강성을

\*정회원, 한국원자력연구소 원자력설계부

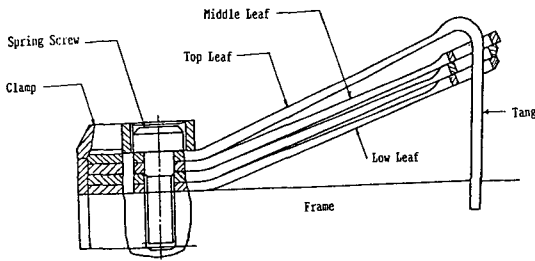


Fig. 1 Leaf Holddown Spring

파악하는 것은 스프링 설계에 매우 중요한 사항이다. 그러나 판형 홀드다운 스프링의 형상 및 구조가 Fig. 1에서 보듯이 기하학적으로 단순하지 않고 또한 3~4개의 판 스프링들의 집합으로 이루어져 있어서 판형 홀드다운 스프링의 강성을 해석적으로 구하는 것이 용이하지 않았고 주로 판 스프링의 특성시험을 통해 구해져 왔다.

따라서 외국의 핵연료 설계회사들은 다음과 같은 설계과정을 통해서 홀드다운 스프링을 설계하고 있다.

Westinghouse사는 풍부한 설계, 제조경험을 바탕으로 각각의 판스프링에서 강성을 구할 수 있는 경험식<sup>(2)</sup>을 개발하여 판형 홀드다운 스프링에 대한 스프링의 설계에 적용 하였으나 이 경험식은 Westinghouse 사에서 제조된 판 스프링에 대해서는 잘 적용되나, 타 회사에서 제조한 판 스프링에 대해서는 잘 적용되지 못하는 것으로 알려졌다. 또한 독일의 KWU사는 판스프링을 단순 외팔보로 판단하여 각각의 판스프링의 강성을 구하여 판형 홀드다운 스프링의 예비설계에 이용 하였으며, 근래에는 몇몇 연구자들이 유한요소법을 이용하여 판형 홀드다운 스프링의 강성해석을 수행 하였다.<sup>(4,7,8)</sup>

한편 국내에서는 KWU나 Westinghouse에서 얻은 경험식을 근거로 하여 국내 판스프링의 설계에 이용한 적이 있으나<sup>(1,2,3)</sup> 이러한 방법은 실제적인 스프링 강성을 얻기에는 너무 단순화 되어있고, 기하학적인 자료만을 가지고 설계변경이 요구되는 경우 그 특성을 예측 하는데 난점이 있다. 따라서 본 연구에서는 판 스프링의 길이가 두께에 비하여 비교적 큰 것을 고려하여 판스프링의 기하학적 치수와 물성치들을 이용하여 판스프링의 강성과 조립된 판 스프링 집합체의 강성을 예측할 수 있는 방법을 보 이론과 변형률 에너지이론을 적용하여 개발하였고 그 개발된 방법으로 구한 강성예측치와 특성실

험에서 얻은 강성치를 비교, 분석하여 판 스프링 강성해석 방법의 신뢰성을 보임과 동시에 독자적인 홀드다운스프링 집합체의 특성해석 방법을 제시 하였다.

## 2. 판 스프링의 강성을 구하기 위한 이론적 고찰

### 2.1 굽힘 모멘트에 의한 각 판의 전체변형률 에너지

조립된 판 스프링들에서 각 판들 간에 상호작용하는 마찰력을 무시하고 수직 반력만을 고려하면 각 판에 작용하는 하중은 Fig. 2와 같으며 이 때 각 판에서 굽힘모멘트에 의한 변형률 에너지(U)는 단위 변형률 에너지<sup>(6)</sup>를 적분하여 다음과 같이 표시되며 각 영역의 변형률에너지는 각 영역의 굽힘모멘트를 길이방향으로 적분하여 구할 수 있다.

$$U_{TOTAL} = U_I + U_{II} + U_{III} + U_{IV} = \sum_{i=I}^{IV} \int \frac{M_i^2}{2EI_i} ds \tag{1}$$

여기서, I, II, III, IV는 Fig. 2에 표시된 영역들을 나타낸다.

(1) 각 영역에서의 굽힘모멘트와 관성모멘트 판 스프링의 각 영역에서 굽힘모멘트 및 관성모

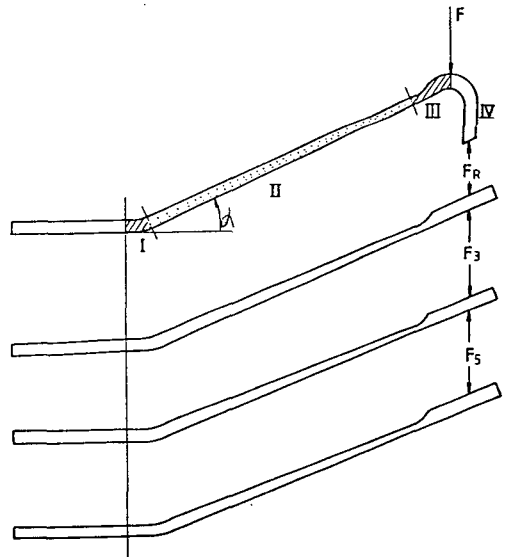


Fig. 2 Reaction Force acting on the each leaf

멘트는 판의 형상을 고려하면 평형조건에서 다음과 같이 구해지며 아래식들에 사용된 변수들은 Fig. 3에 제시되어 있다. (Fig. 4 참조)

(a) 영역 I

$$M_I = \{(L+a) \cos \alpha + R \sin \alpha + R \sin (\theta - \alpha)\} F - \{(L+c) \cos \alpha + R \sin \alpha + R \sin (\theta - \alpha)\} F_R \quad (0 \leq \theta \leq \alpha) \quad (2)$$

$$I_I = \frac{1}{12} B h^3$$

(b) 영역 II

테이퍼진 영역의 임의의 위치  $x$ 에서 굽힘모멘트 및 관성모멘트는 아래와 같이 표시된다. (Fig. 5 참조)

$$M_{II} = (a+x) F \cos \alpha - (c+x) F_R \cos \alpha$$

$$I_{II} = \frac{1}{96} B h^3 \left(1 + \frac{x}{L}\right)^3 \quad (3)$$

(c) 영역 III에서 임의의 위치  $x$ 에서 굽힘모멘트

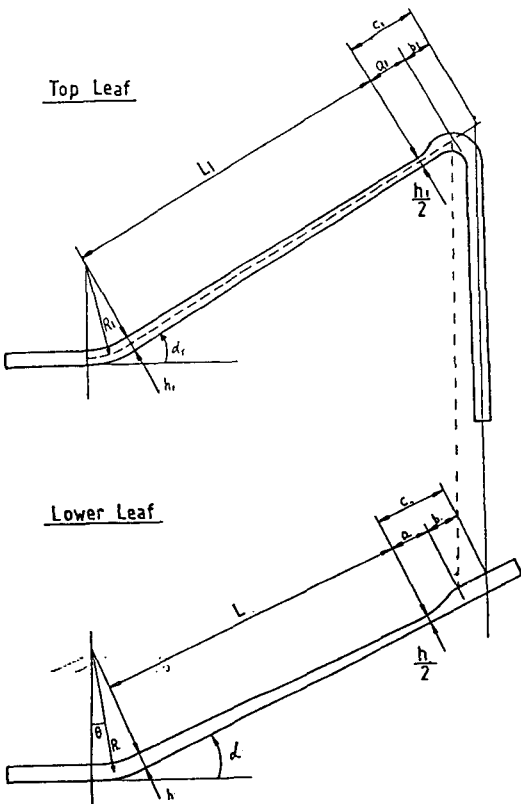


Fig. 3 Variables used in the analysis model



Fig. 4 Bending moment  $M_I$  for region I



Fig. 5 Bending moment  $M_{II}$  for region II

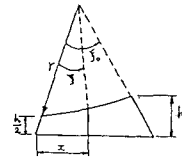


Fig. 6 Bending moment  $M_{III}$  for region III

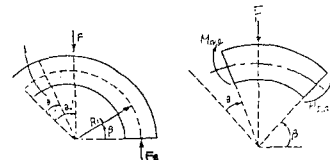


Fig. 7 Bending moment  $M_{IV}$  for region IV

및 관성모멘트는 아래와 같이 표시된다. (Fig. 6 참조)

$$M_{III} = F(a-x) \cos \alpha - F_R(c-x) \cos \alpha$$

$$I_{III} = \frac{1}{12} B \left( r(1 - \cos \xi) + \frac{h}{2} \right)^3$$

$$x = r \sin \xi \quad (0 \leq \xi \leq \xi_0)$$

(d) 영역IV

첫번째 판 : 임의의 위치  $\theta, \beta$ 에서 굽힘모멘트 및 관성모멘트는 다음과 같이 표시된다. (Fig. 7 참조)

$$M_{IV} = F_R R_{1b} \{1 + \sin (\theta_0 - \theta)\} - F R_{1b} \sin (\theta_0 - \theta)$$

$$M_{IV} = F_R R_{1b} (1 - \cos \beta) \quad (5)$$

$$I_{IV} = \frac{1}{12} B h^3$$

두번째 판 : 임의의 위치  $x$ 에서 굽힘모멘트 및

관성모멘트는 다음과 같이 표시된다. (Fig. 8 참조)

$$M_{IV} = F_R \cdot \cos \alpha \cdot (c - x)$$

$$I = \frac{1}{12} b^* h^3 \quad (6)$$

$$b^* \begin{cases} b, & r \sin \xi < x < (r \sin \xi_o + d) \\ b - b_o, & (r \sin \xi_o + d) < x \leq c \end{cases}$$

(2) 첫번째 판에서의 전체변형률 에너지  
첫번째 판스프링에서 전체변형률 에너지(total strain energy)는 식(1)과 (2), (3), (4), (5) 등을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$U_{1,TE} = \frac{6R\alpha}{EBh^3} (C_1 F - C_2 F_R)^2 - \frac{12R^2}{EBh^3} (1 - \cos \alpha) (F - F_R) (C_1 F - C_2 F_R)$$

$$+ \frac{6R^3}{EBh^3} C_3 \cdot (F - F_R)^2 + \frac{48L^3}{EBh^3} \cos^2 \alpha \cdot \alpha \{ C_4 (F^2 - 2FF_R) + C_5 F_R^2 - C_6 F \cdot F_R \}$$

$$+ \frac{6r \cos^2 \alpha}{EB} \{ F^2 \cdot \varphi_4 - 2F \cdot F_R \cdot \varphi_1 + F_R^2 \cdot \varphi_2 \} \quad (7)$$

여기에서

$$\varphi_1 = \int_0^{\xi_o} \frac{(a - r \sin \xi) (c - r \sin \xi) \cdot \cos \xi}{\{r(1 - \cos \xi) + h/2\}^3} d\xi \quad (8)$$

$$\varphi_2 = \int_0^{\xi_o} \frac{(c - r \sin \xi)^2 \cdot \cos \xi}{\{r(1 - \cos \xi) + h/2\}^3} d\xi \quad (9)$$

$$= \frac{(a - r \sin \xi)^2 \cdot \cos \xi}{\{r(1 - \cos \xi) + h/2\}^3} d\xi \quad (10)$$

$$C_1 = (L + a) \cos \alpha + R \sin \alpha \quad (11)$$

$$C_2 = (L + c) \cos \alpha + R \sin \alpha \quad (12)$$

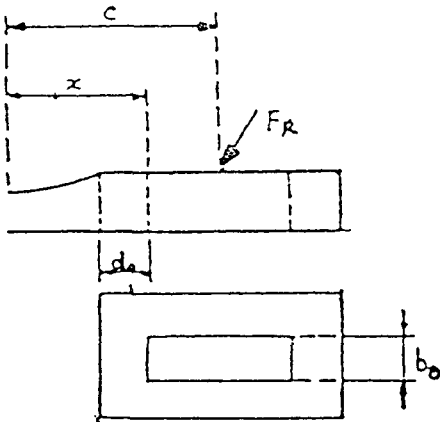


Fig. 8 Bending moment  $M_{IV}$  for region IV

$$C_3 = \frac{a}{2} \frac{\sin 2\alpha}{4} \quad (13)$$

$$C_4 = \frac{3a^2}{8L^2} + \frac{a}{4L} + (\ln 2 - \frac{5}{8}) \quad (14)$$

$$C_5 = \frac{3c^2}{8L^2} + \frac{c}{4L} + (\ln 2 - \frac{5}{8}) \quad (15)$$

$$C_6 = \frac{b}{4L} \cdot (\frac{3a}{L} + 1) \quad (16)$$

(3) 두번째 이하의 판스프링에서의 전체변형률 에너지

$$U_{n+1,TE} = \frac{6R\alpha}{EBh^3} (C_1 F - C_2 F_R)^2 - \frac{12R^2}{EBh^3} (1 - \cos \alpha) (F - F_R) (C_1 F - C_2 F_R)$$

$$+ \frac{6R^3}{EBh^3} C_3 (F - F_R)^2$$

$$+ \frac{48L^3}{EBh^3} \cos^2 \alpha \{ (C_4 (F^2 - 2F \cdot F_R) + C_5 F_R^2 - C_6 \cdot F \cdot F_R) \}$$

$$+ (\frac{6r \cos^2 \alpha}{EB}) F_R^2 \cdot \varphi_2 + \frac{2 \cos^2 \alpha}{EBh^3} F_R \cdot \{ (c - r \sin \xi)^3 - (c - r \sin \xi_o - d_o)^3 \}$$

$$+ \frac{2 \cos^2 \alpha F}{E(b - b_o) h^3} (c - r \sin \xi_o - d_o) \quad (17)$$

## 2.2 각 판스프링에서의 수직 변위

Fig. 2에서 보는 바와같이 판스프링에 작용하는 힘  $F$  및 판사이의 반력  $F_R$ 에 의한 각 판스프링들의 수직변위는 선형 탄성계에서 Castigliano의<sup>(5)</sup> 제2정리를 이용하면 다음과 같다.

(1) 판사이에 작용되는 반력에 의한 첫번째 판스프링의 수직변위

$$\delta_{1R} = \frac{\partial U_{1,TE}}{\partial F_R}$$

$$= \frac{1}{EBh^3} (AA_1 F + BB_1 F_R) \quad (18)$$

여기에서

$$AA = -12R\alpha C_1 C_2 + 12R^2 \cdot (1 - \cos \alpha) (C_1 + C_2)$$

$$- 12R^3 \cdot C_3 - 48L^3 \cos^2 \alpha (2C_4 + C_6)$$

$$- 12r h^3 \cos^2 \alpha \cdot \varphi_1 - 12R_1^3 b$$

$$\left( 1 + \frac{\theta_{o1}}{2} - \cos \theta_{o1} - \frac{\sin 2\theta_{o1}}{4} \right) \quad (19)$$

$$BB_1 = 96L^3 \cos^2 \alpha \cdot C_5 + R \{ 12\alpha C_2^2$$

$$- 24R (1 - \cos \alpha) \cdot C_2$$

$$+ 12R^2 \cdot C_3 \} + 12r h^3 \cos^2 \alpha \cdot \varphi_2 + 12R_1^3 b \cdot$$

$$\left\{ \frac{3}{4} (\pi + \theta_{o1}) - 2 \cos \theta_{o1} - \frac{\sin 2\theta_{o1}}{4} \right\} \quad (20)$$

(2) 판사이의 반력에 의한 두번째 이하의 판스프링의 수직변위

$$\begin{aligned} \delta_{n+1,R} &= \frac{\alpha U_{n+1,TE}}{\partial F_{Ri}} \\ &= \frac{1}{Eb^3} BB_{n+1} F_{Ri} \end{aligned} \quad (21)$$

여기에서

$$\begin{aligned} BB_{n+1} &= 96L^3 \cos^2 \alpha \cdot C_5 + R \{ 12C_2^2 \cdot \alpha \\ &\quad - 24C_2 \cdot R \cdot (1 - \cos \alpha) \\ &\quad + 12R^2 \cdot C_3 \} + 12rh^3 \cos^2 \alpha \cdot \varphi_2 \\ &\quad + 4\cos^2 \alpha \{ (c - r \sin \xi_o)^3 \\ &\quad - (c - r \sin \xi_o - d_o)^3 + \frac{b}{b - b_o} (c \\ &\quad - r \sin \xi_o - d_o)^3 \} \end{aligned} \quad (22)$$

(3) 외력(F)에 의한 첫번째 판스프링의 수직변위

$$\begin{aligned} \delta_{ass} &= \frac{\partial U_{1,TE}}{\partial F} \\ &= \frac{1}{EBb^3} [CC_1 F + AA_1 F_R] \end{aligned} \quad (23)$$

여기에서

$$\begin{aligned} CC_1 &= 12RaC_1^2 - 24R^2 \cdot (1 - \cos \alpha) C_2 + 12R^3 C_3 \\ &\quad + 96L^3 \cos^2 \alpha \cdot C_4 + 12rh^3 \cos^2 \alpha \cdot \varphi_4 \\ &\quad + 12R^2 b \cdot \left( \frac{\theta_{o1}}{2} - \frac{\sin 2\theta_{o1}}{4} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

### 2.3 각 판스프링에 대한 수직변위 구속 조건

조립된 판스프링이 하중을 받아 변형될 때 반력  $F_{Ri}$ 가 작용하는 각 판들 간의 접촉부위에서 판스프링의 수직변위는 동일하므로 반력  $F_{Ri}$ 에 의한 각 판들의 수직변위는 다음과 같이 구속된다.

$$\begin{aligned} -\delta_{1R} &= \delta_{2R} \\ \delta_{2R} &= \delta_{3R} \\ \delta_{3R} &= \delta_{4R} \end{aligned} \quad (25)$$

### 2.4 조립된 판스프링들의 스프링 상수

조립된 판스프링들의 강성  $K_{ass}$ 는 수직변위 구속조건 식(18), (21), (23), (25) 등을 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$K_{ass} = \frac{F}{\delta_{ass}} = \frac{Eb^3}{CC_1 - \frac{AA_1^2}{BB_1} + \sum_{i=2}^n \frac{1}{BB_i}} \quad (26)$$

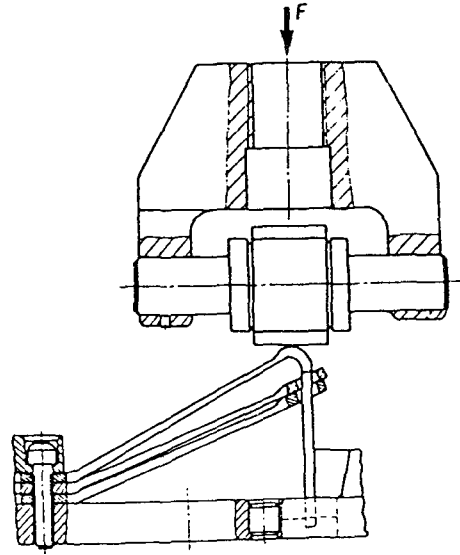


Fig. 9 Experimental equipments.

## 3. 실험장치 및 방법

현재 국내 원자력 발전소에서 사용되고 있는 판형 홀드다운 스프링은 14×14형, 16×16형 및 17×17형 세 종류 인데, 14×14형은 한 개의 상부 판과 두 개의 판으로 구성되고 17×17형은 한 개의 상부 판과 세개의 하부 판으로 구성되어 있다. 이 두가지 형태의 홀드다운 스프링은 판수와 기하학적인 재원이 서로 상이하어 그 특성이 다른 경향을 갖는다. 이들 두 종류 홀드다운 스프링은 모두 실험에 의해서만 그 특성이 파악되고 있는데 Fig. 9는 판스프링 특성시험 장치를 개략적으로 도시한 것으로 판형 홀드다운 스프링을 실제 핵연료 집합체에 장착된 것과 같은 방법으로 만능재료시험 기기에 고정된 후 홀드다운스프링 상단에 작용하는 수직방향의 하중은 마찰이 없는 고정하에서 수직방향으로 최대 4300 N까지 작용시키며 스프링변위를 5 mm단위로 변형 및 복원시키며 스프링이 상단고정체의 프레임에 접촉할 때 까지의 힘-변위 곡선을 나타내도록 하였다.

## 4. 해석결과 및 고찰

국내 원자력 발전소에 공급되는 핵연료집합체에는 3개의 판스프링들로 구성된 14×14형과 4개의 판스프링들로 구성된 17×17형의 홀드다운 스프링

**Table 1** Comparison of calculated values with experimental values for 14×14type leaf springs  
(Domestic Products)

Specimen #	Stiffness K (N/mm)		* ERROR (%)
	Calculated value	Experimental value	
1	174.67	162	7.8
2	174.56	161	8.4
3	175.31	160	9.6
4	174.72	156	12
5	175.157	157	12

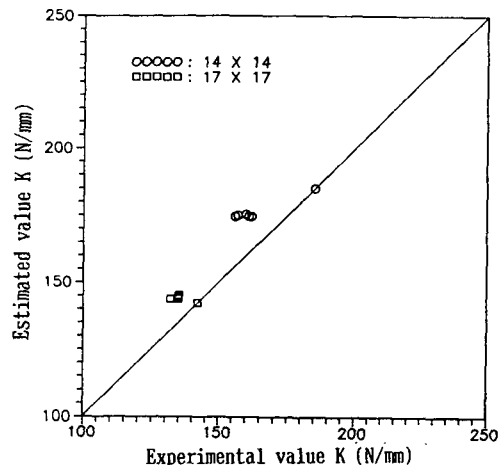
$$* \frac{\text{Cal.} - \text{Exp.}}{\text{Exp.}} \times 100$$

**Table 2** Comparison of calculated values with experimental values for 17×17type leaf springs  
(Domestic Products)

Specimen #	Stiffness K (N/mm)		* ERROR (%)
	Calculated value	Experimental value	
1	143.96	135	6.6
2	144.38	135	7.0
3	145.05	135	7.4
4	143.84	132	9.0
5	143.86	132	9.0

$$* \frac{\text{Cal.} - \text{Exp.}}{\text{Exp.}} \times 100$$

이 장착되어 사용되고 있다. 이들 2종류의 판형 홀드다운 스프링들에 대한 기하학적 치수들과 2. 절의 식(26)을 이용하면 판형 홀드다운 스프링의 강성을 구할 수 있고, 이를 특성시험에서 얻은 강성과 비교하여 2. 절의 식 (26)의 유용성을 검증할 수 있다. Table 1, 2는 국내업체에서 제작한 14×14형 및 17×17형의 판형 홀드다운 스프링 중에서 특성 시험에 사용되었던 판 스프링들의 기하학적 치수를 이용하여 2. 절의 식(26)으로 구한 강성과 특성시험에서 얻은 강성들을 비교한 것이다. Table 1에서 보듯이 14×14형의 판형 홀드다운 스프링은 2절의 식(26)으로 구한 강성(stiffness)이 특성시험에서 얻은 강성보다 7.8~12%정도 크며 Table 2에서 보듯이 17×17형의 판형 홀드다운 스프링의 경우 2 절의 식(26)으로 구한 강성이 특성시험에서 얻은



**Fig. 10** Comparison of spring constants with calculated values and experimental values for domestic leaf springs

강성보다 약 6.6~9.0%정도 크게 예측되고 있다. Fig. 10은 Table 1, 2의 결과들을 도식화한 것으로 모든 데이터들이  $K_{estimate} = K_{experimental}$ 인 라인 상부에 위치하고 있음을 보여주고 있다. 또한 Table 3에서 알 수 있듯이 14×14형의 관형 홀드다운 스프링의 경우 2절의 식 (26)으로 구한 강성이 특성시험에서 얻은 강성보다 13~20% 크며 17×17형의 관형 홀드다운 스프링의 경우 Table 4에서 보듯이 2절의 식 (26)으로 구한 강성이 특성시험에서 구한 강성보다 약 15~19% 정도 크게 예측되고 있다. Fig. 11은 Table 3,4의 결과들을 도식화 한것으로 모든 데이터들이  $K_{estimate} = K_{experimental}$ 인 라인 상부에 위치하고 있음을 보여주고 있다. 그러므로 Table 1,2의 결과와 Table 3,4의 결과들을 비교할 때 2절의 식 (26)은 국외에서 제조한 관형 홀드다

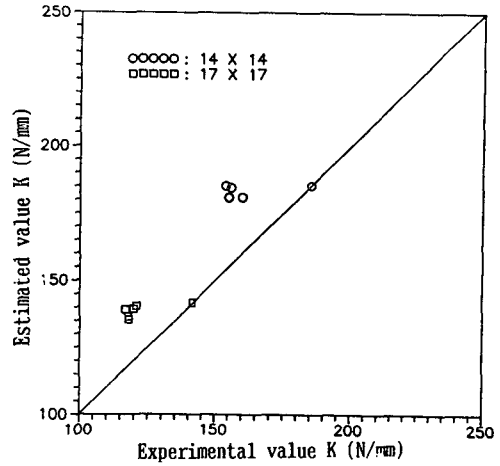


Fig. 11 Comparison of spring constants with calculated values and experimental values for foreign leaf springs

Table 3 Comparison of calculated values with experimental values for 14×14type leaf springs (Foreign Products)

Specimen #	Stiffness K (N/mm)		* ERROR (%)
	Calculated value	Experimental value	
K1	180.77	155	16.6
K2	185.17	154	20.2
K3	184.44	156	18.2
K4	180.91	160	13.1
K5	180.88	155	16.7

$$* \frac{\text{Cal.} - \text{Exp.}}{\text{Exp.}} \times 100$$

Table 4 Comparison of calculated values with experimental values for 17×17type leaf springs (Foreign Products)

Specimen #	Stiffness K (N/mm)		* ERROR (%)
	Calculated value	Experimental value	
K1	140.60	121	16.2
K2	139.47	120	16.2
K3	139.20	117	19.0
K4	135.43	118	14.8
K5	136.56	118	15.7

$$* \frac{\text{Cal.} - \text{Exp.}}{\text{Exp.}} \times 100$$

운 스프링 보다 국내에서 제조한 판형 홀드다운 스프링에서 스프링의 강성이 실험치에 더 근접하게 예측된다고 판단 할 수 있다. 한편 국외업체인 SIEMENS/KWU사에서 제조하여 국내 원자력 발전소에 공급했던 14×14형 판형 홀드다운 스프링과 France EDF에 공급했던 17×17형 판형 홀드다운 스프링 중에서 특성시험에 사용되었던 판 스프링들의 기하학적 치수를 이용하여 2절의 식(26)으로 구한 판 스프링의 강성들과 특성시험에서 얻은 강성들을 비교한 것이 Table 3,4에 제시되어 있다. 이와같이 국외에서 제조한 판형 홀드다운 스프링의 강성(Stiffness)이 크게 예측되는 이유는 국외업체 제조는 그 동안의 설계, 제조 경험을 근거로 고안한 경험식을 예비설계 및 최종설계에 사용하고 있으나 이러한 경험식은 홀드다운 스프링의 형상 및 치수가 다를 경우 경험식을 적용할 수 없는 경우가 발생되고 또한 판스프링에 대한 제조자가 상이함에 따라 판 스프링의 강성도에 영향을 주는 치수들에 대한 가공능력이 다르기 때문에 이와같은 경험식을 국내에서 제조한 판스프링에 적용할때 강성 예측치에 대한 오차가 클 것으로 판단되기 때문이다.

## 5. 결 론

핵연료집합체에 사용되는 판형 홀드다운스프링들에 대한 기하학적 치수들이 알려질 때 홀드다운 스프링의 탄성 강성을 신뢰할 수 있는 범위내로 예측할 수 있는 방법을 보 이론과 변형률 에너지 이론을 이용하여 개발하였다. 판 스프링들에 대한 특성 시험 결과와 본 연구에서 개발한 방법으로 예측한 판 스프링의 강성을 비교한 결과 본 연구에서 개발한 방법으로 예측한 강성이 시험결과와 잘 일치하고 있어서 판 스프링의 예비설계에 본 연구에서

개발한 방법은 유용하게 사용할 것으로 기대되고, 판형 홀드다운 스프링의 최종설계시 소요되는 비용과 시간을 크게 절감 할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) 김형구, 1989, "가압경수로 핵연료의 판형 홀드다운 스프링 집합체의 특성해석에 관한 연구," 한국에너지연구소 선임급 승격 심사 논문.
- (2) Paul J. Sipush, 1984, "PWR Fuel Rod Design and Fuel Assembly Design," Lecture Notes, KAERI, Dae Jeon,
- (3) KWU CRT on Fuel Assembly Mechanical Design and Enginerring, KAERI DAE-DUK KOREA, 17 Feb. -16 Apr. 1986.
- (4) 김형구, 임정식, 김일곤, 손동성, 1990, "기하학적, 재료적 비선형성을 갖는 중첩된 판 스프링의 특성해석에 관한 연구," 대한기계학회 제14권 제1호, pp. 13~22.
- (5) Dym, C.L. and Shames, I.H., 1973, "solid Mechanics ; A Variational Approach," McGraw-Hill, New York, pp. 145~150.
- (6) Carnahan B., Luther H.A. and Wikes J.O, 1969, "Applied Numerical Methods," John Wiley & Sons, New York, pp. 101~112.
- (7) Gartner and Gerscha, 1987, "Dtermination of Spring Characteristics and Fatigue Test on FA Hold-down Leaf Spring," KWU Work Reprot U9/213/87/103.
- (8) Gesinski, L., 1974, "Mechanical Test and Evaluation of the 17×17 Fuel Assembly," WCAP 8286.