

<기술논문>

너비감소 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도 평가

송 기 남*

(1996년 8월 8일 접수)

Estimation of the Elastic Stiffness of TW-HDS Assembly

Kee-Nam, Song

Key Words : Elastic Stiffness Formula(탄성강성도식), KOFA(Korean Fuel Assembly : 국산핵 연료 집합체), TW-HDS(Tapered-Width Holddown Spring Assembly : 너비 감소 홀다운스프링 집합체), Leaf Type Spring(판형스프링), Castigliano's Theorem(카스틸리아노의 정리)

Abstract

A formula for estimating the elastic stiffness of TW-HDS with a uniformly tapered width from w_0 to w_1 over the length, has been analytically derived based on Euler beam theory and Castigliano's theorem. Elastic stiffnesses of the TW-HDSs designed in the same dimensional design spaces as the KOFA HDSs have been estimated from the derived formula, in addition, a sensitivity study on the elastic stiffness of the TW-HDSs has been carried out. Analysis results show that elastic stiffnesses of the TW-HDSs have been by far higher than those of the KOFA HDSs, and that, as the effects of axial and shear force on the elastic stiffness have been 0.15~0.21%, most of the elastic stiffness is attributed to the bending moment. As a result of sensitivity analysis, the elastic stiffness sensitivity at each design variable is quantified and design variables having remarkable sensitivity are identified. Among the design variables, leaf thickness is identified as that of having the most remarkable sensitivity of the elastic stiffness.

1. 서 론

경수로용 핵연료집합체 최상단에 부착되어 있는 HDS는 핵연료가 노심내에서 연소되는 수명기간 동안에 중성자 조사에 의한 핵연료의 축방향 성장을 수용하고, 핵연료집합체 구조물과 노심구조물간의 축방향 열팽창차이 등을 수용할 뿐만 아니라 원자로 운전중에 노심내에서 핵연료에 작용하는 부력 및 냉각수 유동에 의한 수직 상승력으로부터 핵연료집합체가 하부노심판으로부터 들어 올려지는 것

을 방지하는 기능을 갖고 있다.⁽¹⁾ 만일 HDS의 스프링력이 충분하지 못하여 핵연료집합체가 하부노심판으로부터 들어 올려졌다 낙하할 경우 그 충격량으로 인하여 핵연료의 연료봉들이 낙하함으로써 연료봉을 손상시킬 가능성이 증대될 뿐만 아니라 핵연료집합체 구조물의 구조적 건전성을 저해할 수 있다. 따라서 HDS는 핵연료 수명기간 동안 내내 충분한 스프링력을 갖추어서 핵연료집합체의 수직 상승력을 억제할 수 있고 또한 핵연료집합체 구조물의 축방향 성장 및 축방향 열팽창을 수용하며 노심내에서 빈번하게 발생하는 하중하에서도 HDS에서 소성변형이 적게 발생하도록 하기 위해서는 HDS이 좋은 탄성거동을 갖도록 설계되어야 한다.⁽²⁾

*회원, 한국원자력연구소 핵연료집합체설계분야

판형 HDS는 판의 두께가 감소하는 두께감소 HDS(TT-HDS : Tapered-Thickness Holddown Spring Assembly)와 판의 너비가 감소하는 TW-HDS으로 나누어지고 있으며 판형 HDS의 특성인 탄성강성도를 설계변수들로 예측하는 것이 곤란하여서 세계의 각 핵연료 제조/설계회사들은 나름대로의 평가방법을 사용하여 왔다.⁽²⁾ 즉, 미국의 웨스팅하우스(W)사는 자사에서 제조/공급하는 TT-HDS의 시험결과에 근거하여 각 판스프링에 대한 탄성강성도 경험식을 고안하여서 핵연료집합체의 예비 홀다운력 평가에 이용하고 있으나 자사에서 제조한 TT-HDS에만 유용한 것으로 알려졌다.^(2~4) 한편 독일의 Siemens/KWU사는 각각의 판스프링을 직선형의 외관으로 가정하여 구한 각 판스프링의 탄성강성도를 이용하여 핵연료집합체의 예비 홀다운력 평가에 이용하고 있으나 TT-HDS의 특성 시험 결과와는 상당한 오차가 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁾ 따라서 이들 두 회사는 모두 핵연료집합체 설계 단계에서 홀다운력을 평가할 때에는 양산용 TT-HDS제품들에 대한 특성시험을 수행하여 얻은 특성시험 결과를 이용하고 있다. 한편 1986년 이래 국내 W형 발전소에 공급되는 핵연료를 국내에서 설계하고 제조한 이래 국산 TT-HDS의 특성을 신뢰할 만하게 평가하려는 노력이 경주되어 왔는데 그 동안의 연구성과를 살펴보면 다음과 같다. ADINA code를 이용한 유한요소해석을 통하여 HDS의 특성해석⁽⁶⁾ 비롯하여 Euler보 이론과 굽힘모멘트에 의한 변형에너지에 근거하여 HDS의 탄성강성도를 예측할 수 있는 방법을 개발하고 이 방법으로 평가한 탄성강성도가 특성시험에서 얻은 값들과 잘 일치하고 있음을 보였으며,^(7,8) 근래에는 ANSYS code의 접촉요소를 사용한 대변형 해석을 통해서 HDS의 특성해석과 최적설계를 수행하였고,⁽²⁾ Euler보의 모든 변형에너지를 고려하고 테이퍼 중점의 위치도 고려할 수 있도록 TT-HDS의 탄성강성도 평가식을 수정하고 확장하였다.⁽⁹⁾

한편 TW-HDS는 미국의 SPC사에서 제조한 연료에 사용되고 있는 것으로 알려져 있으나 그 특성 및 설계치수들은 알려진 바가 없고 근래에 국산 KOFA형 TT-HDS과 동일한 설계공간내에 있도록 KOFA형 TW-HDS이 고안되어⁽¹⁰⁾ 특성을 파악하려는 연구가 시도되었다. 본 연구는 KOFA형 TW-HDS의 탄성강성도 평가식을 Euler보 이론과 보의 모든 변형에너지를 고려하여 해석적으로 유도하

고 설계변수들에서의 탄성강성도 민감도 분석을 수행한 것으로서 2절에서 TW-HDS의 탄성강성도를 해석적으로 유도하는 과정을 기술하였고, 3절에서 탄성강성도 민감도 평가방법을 소개하였으며, 4절에서 탄성강성도 및 민감도 분석결과들에 대하여 논의하였으며, 5절에서는 본 연구에서 얻은 결론들을 정리하였다.

2. 탄성강성도 평가식 유도

2.1 각 Leaf에서 굽힘모멘트, 전단력, 축력

Fig. 1은 TW-HDS의 형상을 나타낸 것이며 Fig. 2는 설계변수들을 나타낸 것이다. Leaf에서 굽힘모멘트, 전단력, 축력에 의한 변형에너지를 구하기 위해 편의상 각 leaf를 4~5개의 구간 영역(region)으로 나누었는데 최상단 leaf에서의 하중(F) 및 반력(F_R), 그리고 하단 leaf에서의 반력(F_R*)에 의한 굽힘모멘트, 전단력, 축력 및 2차 관성모멘트는 Fig. 3에 있는 각 영역의 자유도에서 평형조건과 보 단면의 기하학적 형상 등을 고려하여 다음과 같이 표시된다.

2.1.1 최상단 Leaf

(1) 영역 I

$$M_1 = - \left\{ (L+a) \cos \alpha_0 + 2 R_0 \sin \frac{1}{2} (\alpha_0 - \theta) \cos \theta \right\} F + \left\{ (L+c) \cos \alpha_0 + 2 R_0 \sin \frac{1}{2} (\alpha_0 - \theta) \cos \theta \right\} F_R$$

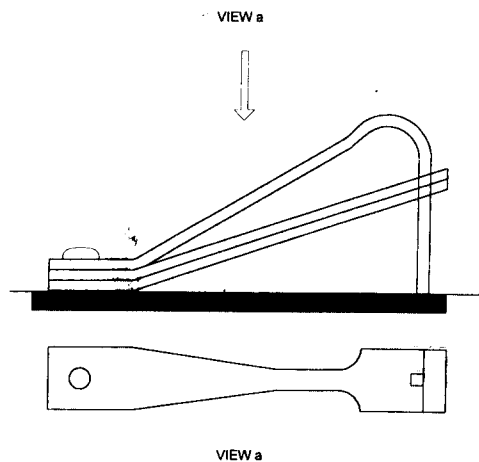
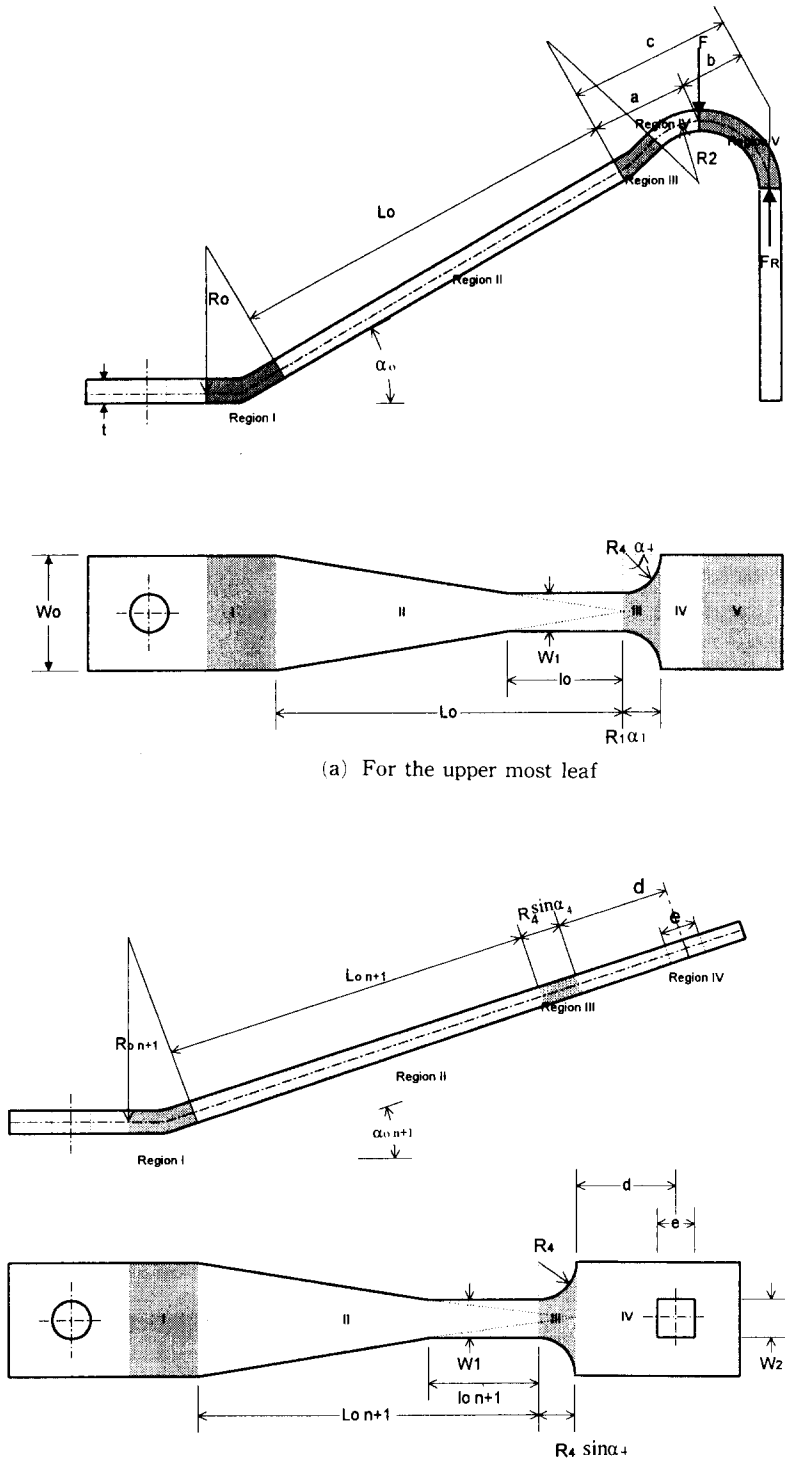


Fig. 1 Leaf type holddown spring assembly with tapered width (TW-HDS)



(b) For the n+1th leaf

Fig. 2 Design variables for each leaf of TW-HDS

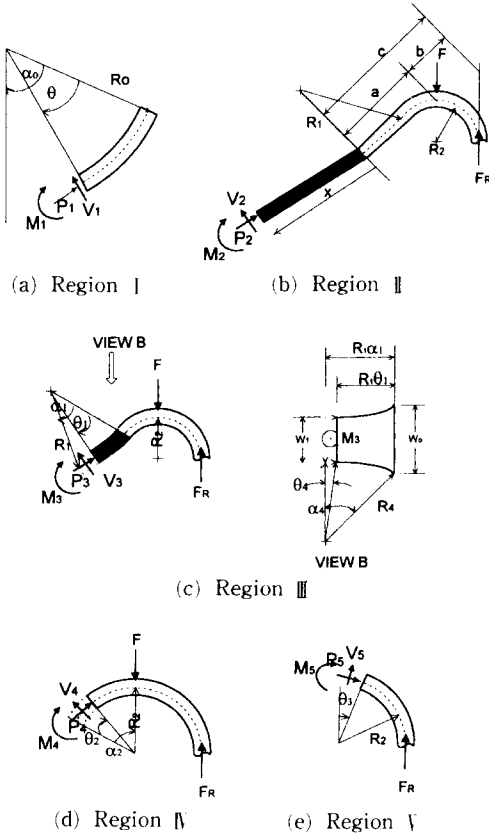


Fig. 3 Free body diagram in each region for upper most leaf of TW HDS

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{1}{12} w_0 t^3, \quad 0 \leq \theta \leq \alpha_0 \\
 P_1 &= (F - F_R) \sin(\alpha_0 - \theta) \\
 V_1 &= (F - F_R) \cos(\alpha_0 - \theta)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 (2) \text{ 영역 III} \\
 M_2 &= -(x+a)F \cos \alpha_0 + (x+c)F_R \cos \alpha_0 \\
 I_2 &= \frac{1}{12} w t^3 \\
 P_2 &= (F - F_R) \sin \alpha_0 \\
 V_2 &= (F - F_R) \cos \alpha_0
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $w = \frac{x + R_1 \alpha_1}{L + R_1 \alpha_1} w_0, \quad l_0 \leq x \leq L$
 $w = w_1, \quad 0 \leq x \leq l_0$

$$\begin{aligned}
 (3) \text{ 영역 IIII} \\
 M_3 &= -F \{ a - R_1 \sin(\alpha_1 - \theta_1) \} \cos \alpha_0 \\
 &\quad + F_R \{ c - R_1 \sin(\alpha_1 - \theta_1) \} \cos \alpha_0 \\
 I_3 &= \frac{1}{12} w t^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_3 &= (F - F_R) \sin(\alpha_0 + \alpha_1 - \theta_1) \\
 V_3 &= (F - F_R) \cos(\alpha_0 + \alpha_1 - \theta_1)
 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $w = w_1 + 2R_4(1 - \cos \theta_4), \quad 0 \leq \theta_4 \leq \alpha_1$
 $\theta_4 = \sin^{-1} \frac{R_1}{R_4} (\alpha_1 - \theta_1), \quad 0 \leq \theta_4 \leq \alpha_1$

$$\begin{aligned}
 (4) \text{ 영역 IV} \\
 M_4 &= -FR_2 \sin(\alpha_2 - \theta_2) + F_R R_2 \{ 1 + \sin(\alpha_2 - \theta_2) \} \\
 I_4 &= \frac{1}{12} w_0 t^3, \quad 0 \leq \theta_2 \leq \alpha_2 \\
 P_4 &= (F - F_R) \sin(\alpha_2 - \theta_2) \\
 V_4 &= (F - F_R) \cos(\alpha_2 - \theta_2)
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 (5) \text{ 영역 V} \\
 M_5 &= -F_R R_2 (1 - \sin \theta_3) \\
 I_5 &= \frac{1}{12} w_0 t^3, \quad 0 \leq \theta_3 \leq \frac{\pi}{2} \\
 P_5 &= F_R \sin \theta_3 \\
 V_5 &= -F_R \cos \theta_3
 \end{aligned} \quad (5)$$

2.1.2 하단(n+1번째 : n ≥ 1) leaf

하단 leaf의 영역 I 및 II에서 굽힘모멘트, 전단력, 축력 및 2차 관성모멘트는 식 (1), (2)와 동일하게 표시되나 영역 II에서 leaf의 너비는 아래의 식(2)와 같이 표시된다. 또한 영역 III 및 IV에서의 굽힘모멘트, 전단력, 축력 및 2차 관성모멘트는 Figs. 2, 4의 설계변수와 자유도에서 평형조건과 보 단면의 기하학적 형상 등을 고려하여 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 (1) \text{ 영역 II} \\
 w &= \frac{x + R_4 \sin \alpha_4}{L + R_4 \sin \alpha_4} w_0, \quad l_0 \leq x \leq L \\
 w &= w_1, \quad 0 \leq x \leq l_0
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 (2) \text{ 영역 III} \\
 M_{3n+1} &= -F_R^* \{ d + R_4 (\sin \alpha_4 - \sin \theta_4) \} \cos \alpha_0 \\
 I_{3n+1} &= \frac{1}{12} \{ w_1 + 2R_4(1 - \cos \theta_4) \} t^3, \quad 0 \leq \theta_4 \leq \alpha_4 \\
 P_{3n+1} &= -F_R^* \sin \alpha_0 \\
 V_{3n+1} &= -F_R^* \cos \alpha_0
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 (3) \text{ 영역 IV} \\
 M_{4n+1} &= -F_R^* x \cos \alpha_0 \\
 I_{4n+1} &= \frac{1}{12} w t^3 \\
 P_{4n+1} &= -F_R^* \sin \alpha_0 \\
 V_{4n+1} &= -F_R^* \cos \alpha_0
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $w = w_0, \frac{c}{2} \leq x \leq d$

$$w = w_0 - u_2, \quad 0 \leq x \leq \frac{c}{2}$$

2.2 각 Leaf에서 전체 변형에너지

TW-HDS에서 각 leaf들 간에 작용하는 마찰력을 무시하였을 때 반력(F_R) 작용점에 수직력만이 존재한다고 가정할 수 있으며, 이 경우 각 leaf에서 전체 변형에너지는 Fig. 2에 표시된 각 영역에서의 굽힘모멘트, 전단력 및 축력에 의한 변형에너지를 합산하여 다음과 같이 표시된다.⁽¹¹⁾

$$U_n = \sum_{i=1}^V \left\{ \int \frac{M_i^2}{2E_i I_i} ds + \int \frac{P_i^2}{2A_i E_i} ds + \int \frac{\tau^2}{2G_i} dV \right\} \quad (9)$$

여기서, U_n : n 번째 판스프링에서 전체 변형에너지
 I, II, III, IV, V: Fig. 2의 각 구간영역을 나타냄

- M_i : 각 영역에서 굽힘모멘트
- E_i : 재료의 탄성계수
- A_i : 단면적
- P_i : 단면에서 축력(axial force)
- G_i : 횡탄성계수(shear modulus)
- I_i : 2차 관성모멘트
- τ : 전단응력(shear stress)

여기서, 직사각형 단면을 갖는 보에서 전단력에 의한 전단응력의 분포는 평면응력인 경우에 평행방정식을 풀면 다음과 같은 표시된다.⁽¹²⁾

$$\tau = \frac{V_i}{2I_i} \left[\left(\frac{t_x}{2} \right)^2 - y_i^2 \right] \quad (10)$$

- 여기서, V_i : 보의 단면에서 전단력
- t_x : 단면의 두께
- y_i : 중립축(neutral axis)에서 거리

2.3 하중에 의한 변위

2.3.1 최상단 Leaf

하중(F)과 반력(F_R) 작용점에서의 변위는 카스틸리아노의 정리⁽¹³⁾ 이용하면 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{iF} = \frac{\partial U}{\partial F} = AA_1 F - AB_1 F_R \quad (11)$$

$$\delta_{iF_R} = \frac{\partial U}{\partial F_R} = -AB_1 F + BB_1 F_R \quad (12)$$

2.3.2 하단($n+1$ 번째; $n \geq 1$) Leaf

Fig. 4의 반력(F_R^*) 작용점에서 변위는 카스틸리아노의 정리⁽¹³⁾ 이용하면 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{2F_R} = \frac{\partial U_2}{\partial F_R} = BB_2(F_R - F_{R2}), \text{ 둘째 leaf에서} \quad (13a)$$

$$\delta_{3F_{R2}} = \frac{\partial U_3}{\partial F_{R2}} = BB_3(F_{R2} - F_{R3}), \text{ 셋째 leaf에서} \quad (13b)$$

$$\delta_{4F_{R3}} = \frac{\partial U_4}{\partial F_{R3}} = BB_4 F_{R3}, \text{ 네째 leaf에서} \quad (13c)$$

$AA_1, AB_1, BB_1, BB_2, BB_3$ 및 BB_4 는 Figs. 2, 3에 있는 설계변수들의 함수로 표현되며, F_R, F_{R2} 및 F_{R3} 은 Figs. 3, 4의 각 판스프링의 반력작용점에서 반력을 나타낸다.

2.4 각 판스프링에서 수직변위에 대한 구속조건

TT-HDS가 외력(F)을 받아 변형될 때 반력 작용점에서 leaf들간의 마찰을 무시하면 각 판스프링들이 수직변위는 다음과 같이 구속된다.

$$\delta_{1FR} = -\delta_{2FR}, \text{ 첫째 및 둘째 leaf 사이에서} \quad (14a)$$

$$\delta_{2FR} = \delta_{3FR2}, \text{ 둘째 및 셋째 leaf에서 사이에서} \quad (14b)$$

$$\delta_{3FR2} = \delta_{4FR3}, \text{ 셋째 및 네째 leaf에서 사이에서} \quad (14c)$$

2.5 TW-HDS의 탄성강성도식

TW-HDS에서 탄성강성도(K_{ass})는 식 (11),

- $F_R^* = F_R - F_{R2}, \text{ for 2nd leaf}$
- $F_R^* = F_{R2} - F_{R3}, \text{ for 3rd leaf}$
- $F_R^* = F_{R3}, \text{ for 4th leaf}$

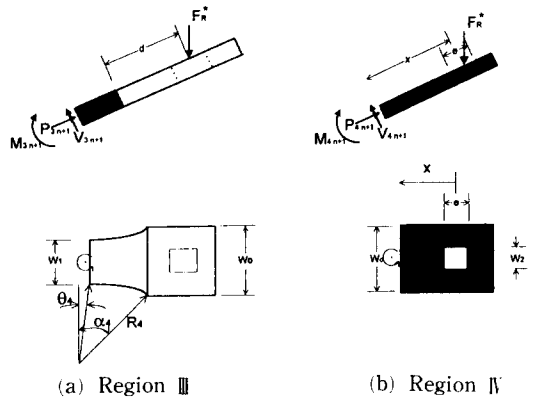


Fig. 4 Free body diagram in region III & IV for $n+1$ th leaf of TW-HDS

(12), (13)의 변위식과 식 (14)의 변위 구속조건을 이용하여 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$K_{ass} = \frac{1}{\delta_{1F}} = \frac{1}{AA_1 - \frac{AB_1^2}{BB_1 + \frac{1}{\sum_{i=2}^n \frac{1}{BB_i}}}} \quad (15)$$

3. 탄성강성도 민감도 분석

앞의 탄성강성도 평가식 (15)는 각 계수들이 설계변수들의 복잡한 함수형태로 표현되고 있어서 해석적으로 탄성강성도의 미분값(gradient)을 구하여 민감도 분석을 수행하기가 용이하지 않다. 따라서 설계변수들의 변화에 따른 탄성강성도 미분값은 수치 미분을 이용하고 민감도 분석은 다음과 같이 수행한다.

3.1 탄성강성도에 대한 수치미분

설계변수(b)들의 함수인 탄성강성도 $K_{ass}(b)$ 의 설계점(b_0)근처에서 수치 미분은 수치오차가 작은 중앙점 공식(midpoint formula)을^{14,15)} 사용한다.

$$\frac{\partial K_{ass}(b_0)}{\partial b_i} = \frac{K_{ass}(b_0+h) - K_{ass}(b_0-h)}{2h}$$

여기서, 설계변수들의 섭동간격(h)은 0.001과

0.01을 사용하였는데 두 경우에서 $\frac{\partial K_{ass}(b_0)}{\partial b_i}$ 의 차이가 거의 없어서 본연구에서는 0.01을 사용하였다.

3.2 민감도 분석

설계변수들의 미소변화에 따른 탄성강성도의 민감도는 다음과 같이 구한다.

$$\partial K_{ass}(b_0) = \frac{\partial K_{ass}(b_0)}{\partial b_i} h_i$$

4. 계산결과 및 토의

앞에서 유도한 TW-HDS의 탄성강성도 평가식 (15)는 TT-HDS에서의 탄성강성도 평가식⁹⁾과 비교할 때 평가식에 사용된 각 계수들의 표현형태만 다를 뿐 식의 구조 및 형식이 동일하다. 이것은 HDS의 형상만 다를 뿐 적용한 이론이 동일하기 때문이다.

KOFA HDS과 동일한 설계공간내에서 고안된 KOFA형 TW-HDS의 설계치수들을 이용하여¹⁰⁾ 탄성강성도를 평가하고 탄성강성도 민감도를 분석하였다. Table 1과 2는 고안된 KOFA형 TW HDS의 설계치수들이며 이들을 이용하여 평가한 탄성강성도는 Table 3에 나타나 있다. Table 3을

Table 1 Dimensional data of TW-HDS (14×14 type)

Unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	30.0	17.35	81.0	19.0	4.3	11.0	8.0	19	10	7.15	42	4.75	9.5	5.2	38.125	0	0
Leaf #2	28.5	22.15	77	19.0	4.3	9.0	8.0	17	0	0	0	4.75	9.5	5.2	38.125	10.0	8.0
Leaf #3	28.5	27.15	75	19.0	4.3	9.5	8.5	18	0	0	0	4.75	9.5	5.2	38.125	10.5	8.0

Table 2 Dimensional data of TW-HDS (17×17 type)

Unit : (mm or degree)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	α_0	R_0	L	w_0	t	a	b	c	R_1	R_2	α_2	R_4	w_1	w_2	l_0	d	e
Leaf #1	30.0	17.35	97.0	19.0	4.3	14.6	7.4	22	23.7	7.15	62.5	4.75	9.5	5.2	46.125	0	0
Leaf #2	26.5	22.15	92	19.0	4.3	15.0	8.0	23	0	0	0	4.75	9.5	5.2	43.625	15.5	8.0
Leaf #3	26.5	27.15	88.5	19.0	4.3	14.5	7.5	22	0	0	0	4.75	9.5	5.2	41.875	15.0	8.0
Leaf #4	26.5	32.15	86.5	19.0	4.3	14.5	8.5	23	0	0	0	4.75	9.5	5.2	40.875	15.0	8.0

Table 3 Comparisons of elastic stiffnesses for TW-HDSs and KOFA HDSs

Unit : (N/mm)

Type	KOFA type TW-HDS			KOFA TT-HDS
	In the case of only considering the bending moment (A)	In the case of considering all strain energies (B)	(A-B)/B×100 (%)	
14×14 type	235.800	235.299(156.495)*	0.21	174.347
17×17형	177.702	177.443(132.554)	0.15	133.006

* In the case that number of leaves are reduced by one

살펴보면 다음의 2가지 사항을 관찰할 수 있다. 첫째, TW-HDS에서 전단력 및 축력이 탄성강성도에 미치는 영향은 약 0.15~0.21% 정도로서 그 영향이 미미한데 이것은 판의 두께가 길이에 비해 매우 작은 경우, 즉 세장비가 매우 큰 경우, 전단변형이 굽힘변형에 비해 매우 작다는 공학보 이론과 합치하고 있음을 알 수 있으며, 따라서 TW-HDS의 탄성강성도는 주로 굽힘모멘트에 기인됨을 알 수 있다. 둘째, KOFA형 TW-HDS의 탄성강성도는 KOFA TT-HDS에 비하여 약 32~33% 정도 높으며 판의 개수를 1개씩 줄인 경우에 탄성강성도도 KOFA TT-HDS의 그것과 비견되고 있다. 이것은 TW-HDS이 TT-HDS에 비하여 충분한 강성을 갖고 있기 때문에 KOFA형 TW-HDS을 KOFA에 사용할 경우 판의 개수가 1개씩 줄어들 수 있어서 경제적으로 이점이 있을 것임을 시사해 준다. Fig. 5는 KOFA형 TW-HDS에서 각 설계변수들에 의한 탄성강성도 민감도를 도식적으로 나타낸 것으로 그림5에서 보듯이 탄성강성도 민감도가 현저한 설계변수들은 ω_0 , R_0 , L , w_0 , t , a , w_1 등 7개의 설계변수들로 분류할 수 있다. 이들중 ω_0 , w_0 , t , w_1 은 양의 민감도를 R_0 , L , a 은 음의 민감도가 되게 하고 있다. 상기 7개의 설계변수들중에서도 탄성강성도에 가장 민감하게 영향을 주는 설계변수는 판의 두께로서 판의 너비에서 보다 최소 15배의 민감도를 갖고 있음을 보이고 있다.

5. 결 론

Euler보 이론과 변형에너지에 기초한 카스틸리아노의 정리를 이용하여 TW-HDS의 탄성강성도 평가식을 해석적으로 유도하였으며, 현재 국내 원자력발전소에 공급되고 있는 KOFA TT-HDS과 동일한 설계공간내에 있도록 고안된 KOFA형 TW

-HDS의 설계치수들을 사용하여 탄성강성도 및 민감도 분석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) TW-HDS의 탄성강성도 평가식은 TT-HDS의 탄성강성도 평가식과 비교할 때 식의 계수들의 표현형태만 다를 뿐 식의 모양과 구조가 동일하다.
- (2) TW-HDS에서 전단력 및 축력이 탄성강성도에 미치는 영향은 약 0.15~0.21% 정도로서 탄성강성도의 대부분이 굽힘모멘트에 기인한다.
- (3) KOFA형 TW-HDS의 탄성강성도는 KOFA TT-HDS에 비하여 약 32~33% 정도 높으며 KOFA에 TW-HDS이 채택할 경우 판스프링의 개수를 1개씩 줄일 수 있다.
- (4) TW-HDS의 탄성강성도 민감도가 가장 현저한 설계변수는 판의 두께이며 다른 설계변수들의 민감도보다 최소 15배 이상 높았다.

참고문헌

- (1) Song and Kunz, 1987, "Fuel Assembly Mechanical Design Manual," Erlangen, KWU Work Report, U6 312/87/e326.
- (2) 임정식의 1인, 1995, "핵연료집합체 Holddown spring 특성해석," 한국원자력학회지, Vol. 27, No. 5, pp. 803-810.
- (3) Paul J. Sipush, 1984, "PWR Fuel Rod Design and Fuel Assembly Design," KAERI, Dae-Jeon, Lecture Notes.
- (4) Westinghouse Mechanical Design Manual, 1988. "Fuel Assembly, Chapter 7 : Fuel Assembly Holddown Springs and Screws," Rev. 03.
- (5) KWU CRT on Fuel Assembly Mechanical Design and Engineering, 17. Feb. - 16. Apr. 1986, KAERI, Daeduk.
- (6) 김형구 외 3인, 1990, "기하학적, 재료적 비선

- 형성을 갖는 중첩된 판스프링의 특성해석에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제14권, 제1호, pp. 12~22.
- (7) Song et. al., 1991, "Leaf 형 holddown spring 집합체의 강도해석," KAERI/TR-209/91.
- (8) 송기남 외 1인, 1993, "판형 홀드다운 스프링 집합체의 강성해석," 대한기계학회논문집, 제17권, 제1호, pp. 215~222.
- (9) 송기남, 1996, "두께감소 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성도 평가식 유도," 대한기계학회논문집 기고중.
- (10) Song et al., 1996, "Parametric Study of Elastic Stiffness for the Leaf Type HDS Assembly with Uniformly Tapered Width," KAERI/TR-658/96.
- (11) Crandall, S. H. et al., 1972, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, 2nd ed. McGraw-Hill, Tokyo, pp. 545~550.
- (12) *ibid*, pp. 432~443.
- (13) *ibid*, pp. 108~119.
- (14) Carnahan, B. et al., 1969, *Applied Numerical Methods*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 128~131.
- (15) Conte, S. D. and Carl de Boor, 1972, "Elementary Numerical Analysis, an Algorithmic Approach," 2nd ed., pp. 274~283.