

마찰력을 고려한 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성 평가

Estimation of the Elastic Stiffness of a Leaf Type Holddown Spring Assembly Considering Friction Forces between Leaves

송기남, 강홍석, 윤경호, 김형규, 임정식

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

기존의 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성식은 스프링 집합체를 구성하는 판 스프링 개수가 증가할 수록 스프링 집합체의 탄성강성이 시험결과와 차이가 커지는 것으로 보고되었다.[1] 이것은 기존의 탄성강성식이 판 스프링 사이의 경계면에서 마찰력을 무시한 결과로 보이며 본 연구에서는 이를 개선하기 위해 경계면에서 마찰력과 수직 반력을 적절하게 고려할 수 있도록 탄성강성식을 확장하고 여러 종류의 판형 홀다운스프링 집합체 시편에 대한 시험결과들과 비교/분석하였다. 분석결과 확장된 탄성강성식은 판형 홀다운스프링 집합체를 구성하는 판 스프링 개수에 무관하게 스프링 집합체의 탄성강성을 탄성강성 해석모델에 내재된 오차범위($\sim 10\%$)로 평가하고 있다.

Abstract

Recently, it was reported[1] that the elastic stiffness of leaf type holddown springs from the previous formula deviated much from the test results as the number of leaves increased. In order to resolve such an increasing deviation as the number of leaves increased, the formula has been extended to be able to consider normal forces and friction forces acting on interfaces between the leaves. The elastic stiffness analysis on specimens of leaf type holddown springs has been carried out using the extended formula and the results are compared with the test results. As a result of comparisons, it is found that the extended formula is able to estimate the elastic stiffness of leaf type holddown springs within an error range of 10%, apart from the number of leaves.

1. 서 론

웨스팅하우스(W)형 경수로에 장전되는 핵연료집합체의 최상단에는 여러 개의 판 스프

링들이 중첩되어 이루어진 판형 홀다운스프링 집합체가 부착되어 있다. 이 부품은 중성자 조사(Neutron Irradiation)에 의해서 핵연료집합체가 성장하는 것과 스테인레스 강으로 이루어진 노심 구조물 및 지르칼로이-4로 이루어진 핵연료집합체 구조물간의 열팽창 차이 등을 수용하면서 노심 운전중에 냉각수 유동력에 의해 핵연료가 원자로 하부 노심판으로부터 부양되는 것을 방지할 수 있도록 충분한 힘으로 핵연료집합체를 누르는 기능을 갖고 있다.[2] 그런데 판형 홀다운스프링 집합체는 판 스프링들의 형상이 기하학적으로 다소 복잡함으로 인하여 스프링의 거동, 특히 탄성강성을 해석적으로 평가하는 것이 용이하지 않아서 외국의 주요 핵연료 설계회사들은 원자로 하부 노심판으로부터 핵연료 집합체가 부양되는 것을 억제하는 힘, 즉 홀다운력을 평가하는데 있어 가장 중요한 파라미터인 홀다운스프링 집합체의 탄성강성을 스프링 특성시험에 근거한 경험식으로부터 얻어서 판 스프링 예비설계 및 핵연료 홀다운력 예비평가에 이용하고 있다.[3] 그러나 판 스프링의 형상이 바뀔 경우에는 이러한 경험식으로 탄성강성을 신뢰성 있게 평가하는데는 제한이 있었다. 따라서 판 스프링 집합체의 탄성강성을 신뢰성있게 평가할 수 있는 해석적인 방법을 개발하는 것은 판형 홀다운스프링 집합체의 설계, 설계변경 그리고 핵연료의 홀다운력 평가에 매우 유용할 것으로 판단된다.

근래에 변형률 에너지법에 근거하여 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성을 예측할 수 있는 방법이 제안되었으나[4] 스프링 집합체를 구성하는 판 스프링의 개수가 증가할수록 시험결과와의 차이가 심화되는 것으로 보고되었다.[1] 이것은 판 스프링 사이의 접촉 경계면에 작용하는 수직 반력과 수평 마찰력을 과도하게 단순화한 것에 기인하는 것으로 추정된다.

본 연구에서는 판 스프링들의 경계면에 작용하는 수직 반력과 수평 마찰력을 적절하게 고려할 수 있도록 예전의 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성식 유도과정을 수정/확장하였고 여러 종류의 너비감소 및 두께감소 판형 홀다운스프링 집합체 시편에 대한 시험 결과들과 확장된 탄성강성식으로부터의 탄성강성을 비교하고 분석하였다.

2. 탄성강성 평가식의 유도

그림 1은 스프링 길이방향으로 스프링의 두께가 균일하게 감소하는 두께감소 판형 홀다운스프링 집합체(TT-HDS)와 너비가 균일하게 감소하는 너비감소 판형 홀다운스프링 집합체(TW-HDS)의 형상 개략도를 나타낸 것이고 그림 2와 그림 3은 각각 TT-HDS 및 TW-HDS의 탄성강성식을 해석적으로 유도하기 위해 편의상 분할한 판 스프링의 각 구간 영역에서의 자유도와 설계변수들을 나타낸 것이다.

2.1 각 판 스프링에서 전체 변형률 에너지

판형 홀다운스프링 집합체가 외부하중(F)을 받아 변형될 때 판 스프링들 사이의 접촉

경계면에는 경계면에 수직인 방향으로의 수직반력과 경계면에 수평(접선)인 방향으로의 마찰력이 작용하고 있다. 외부하중, 수직반력(F_R) 그리고 마찰력 등에 의한 평형조건으로부터 판 스프링 내부에서의 굽힘 모멘트(M_i), 축력(P_i) 및 전단력(V_i) 등의 분포를 구하고 이를 이용하면 각각의 판 스프링에서 전체 변형률 에너지는 다음과 같이 표시된다.[5]

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

여기서 판 스프링 단면(직사각형)에서의 전단응력은 다음과 같이 표시된다.[5]

$$\tau = \frac{V_i}{2I_i} \left[\left(\frac{t_x}{2} \right)^2 - y_1^2 \right] \quad (2)$$

2.2 하중에 의한 변위

2.2.1 최상단 판 스프링

외부하중과 수직반력 작용점에서 하중 방향으로의 변위(δ)는 카스틸리아노의 정리[5]를 이용하면 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{1F} = \frac{\partial U_1}{\partial F} = AA_1 F - AB_1 F_R \quad (3.a)$$

$$\delta_{1F_R} = \frac{\partial U_1}{\partial F_R} = -AB_1 F + BB_1 F_R \quad (3.b)$$

여기서 계수 AA_1 , AB_1 , BB_1 등은 최상단 판 스프링의 기하학적 형상과 스프링 재질의 물성치들의 함수로 표현된다.

2.2.2 하단(n 번째; $n \geq 2$) 판 스프링

판 스프링 집합체가 4개의 판 스프링으로 구성된 경우에 그림 2와 그림 3의 수직반력 작용점에서 하중 방향으로의 변위는 다음과 같이 표현된다. (판 스프링 집합체가 3개의 판 스프링으로 구성될 경우에는 BB_4 , F_{R3} 등을 '0'으로 놓으면 된다.)

$$\delta_{2F_R} = \frac{\partial U_2}{\partial F_R} = BB_2 (F_R - F_{R2}) \quad , \text{둘째 판 스프링에서} \quad (4.a)$$

$$\delta_{3F_{R2}} = \frac{\partial U_3}{\partial F_{R2}} = BB_3 (F_{R2} - F_{R3}) \quad , \text{셋째 판 스프링에서} \quad (4.b)$$

$$\delta_{4F_{R3}} = \frac{\partial U_4}{\partial F_{R3}} = BB_4 F_{R3} \quad , \text{넷째 판 스프링에서} \quad (4.c)$$

여기서 계수 BB_2 , BB_3 , BB_4 은 각각 둘째, 셋째, 넷째 하단 판 스프링의 기하학적 형

상과 스프링 재질의 물성치들의 함수로 표현된다.

2.3 각 판 스프링에서 수직변위에 대한 구속조건

판형 홀다운스프링 집합체가 외부하중을 받아 변형될 때 수직반력 작용점에서 각 판 스프링들의 상대 변위가 없다고 가정하면 수직반력 방향으로의 변위들은 다음과 같이 구속된다.

$$\delta_{1 F_R} = -\delta_{2 F_R}, \text{첫째 및 둘째 판 스프링 사이에서} \quad (5.a)$$

$$\delta_{2 F_R} = \delta_{3 F_R}, \text{둘째 및 셋째 판 스프링 사이에서} \quad (5.b)$$

$$\delta_{3 F_R} = \delta_{4 F_R}, \text{셋째 및 넷째 판 스프링 사이에서} \quad (5.c)$$

2.4 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성식

판형 홀다운스프링 집합체에서 탄성강성(K_{ass})은 식(3.a,b), (4.a,b,c)의 변위식과 식(5.a,b,c)의 구속조건을 이용하여 정리하면 다음과 같이 표시된다.

$$K_{ass} = \frac{1}{\delta_{1F}} = \frac{1}{AA_1 - \frac{AB_1^2}{BB_1 + \sum_{i=2}^n \frac{1}{BB_i}}} \quad (6)$$

여기서 δ_{1F} 는 최상단 판 스프링의 외부하중 작용점에서 스프링 변위, 즉 판형 홀다운스프링 집합체의 변위를 나타낸다.

한편 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성을 상기 (6)식으로부터 구하는 대신에 각 판 스프링에 대한 탄성강성을 합산하여 평가하는 방법이 사용될 수 있으며[1,3] 이 방법을 적용하면 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성은 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$K_{ass} = \frac{1}{AA_1 + \sum_{i=2}^n BB_i} \quad (7)$$

3. 판형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성 해석 및 평가

3.1 TW-HDS

그림 4와 그림 5는 각각 16x16형 및 17x17형 TW-HDS 시편에 대하여 시험결과와 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성을 비교한 것이다. 그림 4에서 보면 최상단 판 스프링으로만 스프링 집합체가 구성된 경우(그림 4에서 시험결과가 $\sim 40 N/mm$ 근처인 부위)

예전의 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 시험결과와 약 14% 정도 벗어나고 있고 (이 경우는 판 스프링 사이의 마찰력 영향이 없으므로 시험결과와의 차이는 해석모델에 내재된 오차로 볼 수 있음) 중첩된 판 스프링 개수가 증가할 수록 시험결과와는 약 26% 정도까지 벗어나고 있다. 그러나 수정/확장된 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 ‘공기중에서 steel on steel 상태의’ 마찰계수(0.39)를[6] 사용할 경우에 시험결과와의 차이가 약 16% 정도로서 기존 방법보다 오차가 약 10% 정도 줄어들고 있다. 또한 그림 5에서 보면 최상단 판 스프링으로만 스프링 집합체가 구성된 경우(그림 5에서 시험결과가 ~30 N/mm 근처인 부위) 예전의 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 시험결과와 약 6% 정도 벗어나고 있으나 중첩된 판 스프링의 개수가 증가할 수록 시험결과와 약 21% 정도까지 벗어나고 있다. 그러나 수정/확장된 탄성강성식은 마찰계수 0.39를 사용할 경우에 시험결과와 약 12% 정도 벗어나고 있어서 기존 방법보다 오차가 약 9% 정도 줄어들고 있다. 여기서 예전의 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 판 스프링이 중첩될 수록 시험결과와 차이가 커지는 데 비하여 판 스프링들간의 접촉 경계면에서 수직반력과 마찰력을 고려한 수정/확장된 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 시험결과에 보다 더 근접함을 알 수 있다. 이것은 예전의 탄성강성식이 판 스프링 접촉 경계면에서의 마찰력을 무시하고 반력을 과도하게 단순화하여 유도되었음을 보여주는 것이다. 또한 수정/확장된 탄성강성식은 스프링 집합체를 구성하는 판 스프링 개수에 무관하게 시험결과와의 약 12~16% 정도의 범위로 탄성강성을 추정하고 있다.

그림 6은 16x16형 및 17x17형 TW-HDS 시편에 대하여 식 (7)로부터 추정된 탄성강성과 시험결과들을 비교한 것으로서 스프링 집합체를 구성하는 판 스프링 개수에 무관하게 시험결과와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 각 판 스프링의 탄성강성을 합산하여 구하는 스프링 집합체의 탄성강성 평가방법이 물리적인 근거를 갖고 있지 않아도 현실적으로 매우 유용하게 설계에 적용될 수 있는 방법임을 시사해 준다.

3.2 TT-HDS

그림 7은 TT-HDS 시편에 대하여 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성과 시험결과를 비교한 것이다.[7,8,9] 그림 7에서 보면 스프링 집합체에서 예전의 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 시험결과와 약 30% 정도 벗어나고 있으나 수정/확장된 탄성강성식으로부터 추정된 탄성강성은 마찰계수 0.39를 사용할 경우에 시험결과와 약 11% 정도로서 기존 방법보다 오차가 약 19% 정도 줄어들고 있다. 이것은 예전의 탄성강성식이 판 스프링 접촉 경계면에서의 반력을 과도하게 단순화하여 유도되었음을 보여주고 있으며 수정/확장된 탄성강성식은 스프링 집합체를 구성하는 판 스프링 개수에 무관하게 스프링 집합체의 탄성강성을 탄성강성 해석모델에 내재된 오차범위로 평가하고 있다. 또한 식 (7)으로부터 평가한 탄성강성들이 시험결과들과 약 8%정도 차이를 보이고 있어서 이 식은 현실적으로 매우 유용하게 설계에 적용될 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

관형 홀다운스프링 집합체에서 관 스프링들의 경계면에 작용하는 수직인 반력과 경계면에 수평인 방향으로 작용하는 마찰력을 고려할 수 있도록 예전의 탄성강성식을 확장하였다. 여러 종류의 스프링 집합체 시편에 대한 시험결과들과 확장된 탄성강성식으로부터 평가한 탄성강성을 비교/분석한 결과는 다음과 같다.

1. 관 스프링 사이의 접촉 경계면에 수직인 반력과 수평인 방향으로의 마찰력을 고려할 수 있도록 확장한 탄성강성식은 기존 방법에 비해 시험결과에 약 9~19% 정도 더 접근하고 있다.
2. 관 스프링의 탄성해석 모델에 내재된 오차는 약 6~14% 이내이며 이는 관 스프링을 Euler 보로 가정하고 관 스프링 기저부를 완전 구속조건으로 가정함으로써 기인된 오차로 추정된다.
3. 확장된 탄성강성식은 스프링의 기하학적 형상자료와 스프링 재료의 물성치만으로 관형 홀다운스프링 집합체의 탄성강성을 탄성강성 해석모델에 내재된 오차범위 이내로 평가할 수 있는 식이다.
4. 각각의 관 스프링 탄성강성을 예전 방법으로 구한 뒤 이를 단순 합산하여 스프링 집합체의 탄성강성을 추정할 경우 특성시험 결과와 10% 이내로 일치하고 있어서 설계현장에서 간편하게 이용할 수 있는 유용한 방법으로 생각된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 송기남외 4인, 1998, 한국원자력학회 '98 춘계학술대회 논문집(II), pp. 169~174.
2. Song Kee-Nam and Kunz, 1987, *Fuel Assembly Mechanical Design Manual*, KWU Work Report, U6 312/87/e326, Kraftwert Union, Erlangen, Germany.
3. 임정식의 1인, 1995, 원자력학회지, 제 27권, 제 5호, pp. 803~810.
4. K. N. Song and K. S. Seo, 1996, *J. of KNS*, Vol. 28, No. 4, pp. 583 593.
5. Crandall, S. H. *et al.*, 1972, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, 2nd ed. McGraw-Hill, Tokyo, pp. 21~25, pp. 108~119, pp. 432~443, pp. 545~550.
6. Fuller, D. D., 1987, *Standard Handbook for Mechanical Engineers, section 3-2: Friction*, McGraw-Hill, New York, 9th ed., edited by E. A. Avallone and T. Baumeister III.
7. Gartner, KWU Work Report U 9 213/87/103, 05. 10. 87.
8. Gartner, KWU Work Report KWU/R413/85/76, 6. 20. 85.
9. 송기남외 3인, 1998, KAERI/TR-1130/98.

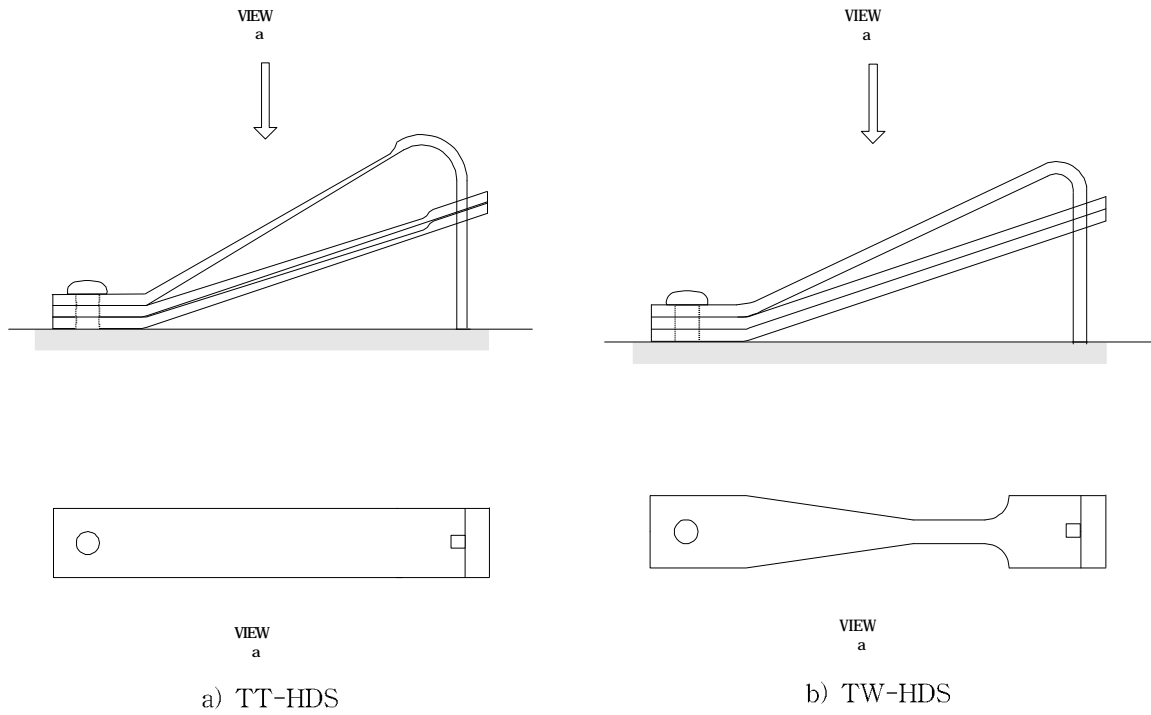


Fig. 1 Leaf type holddown spring assembly

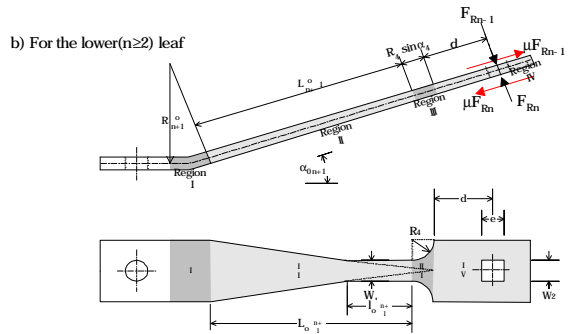
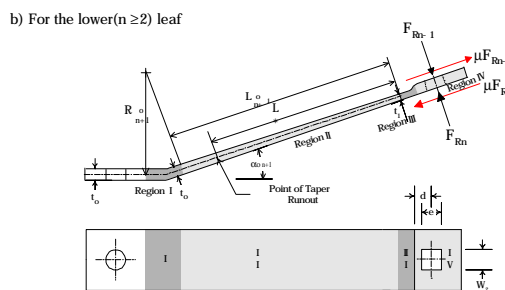
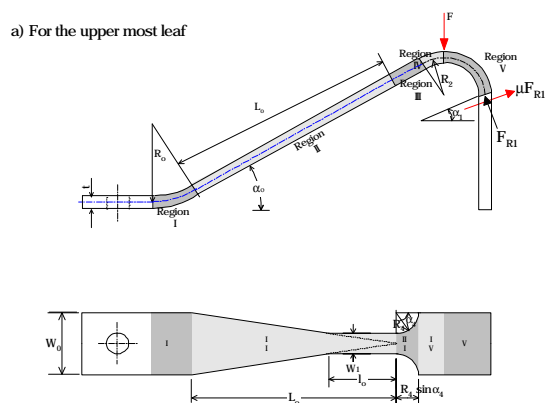
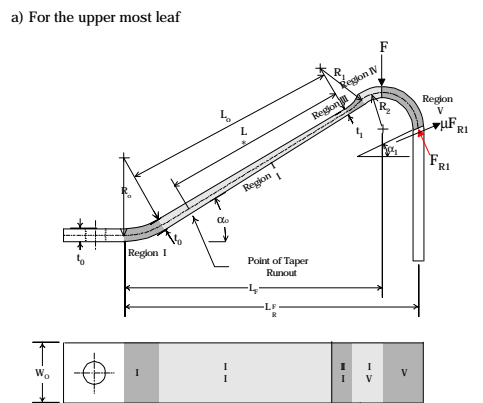


Fig. 2 Design variables for each leaf of TT-HDS

Fig. 3 Design variables for each leaf of TW-HDS

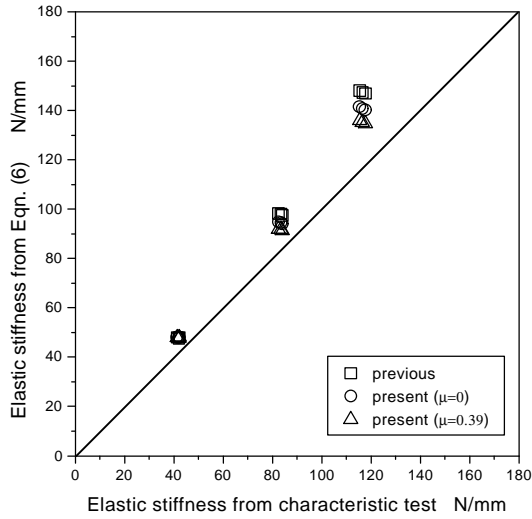


Fig. 4 Comparison of elastic stiffness from Eqn. (6) and characteristic test (16x16 type TW-HDS)

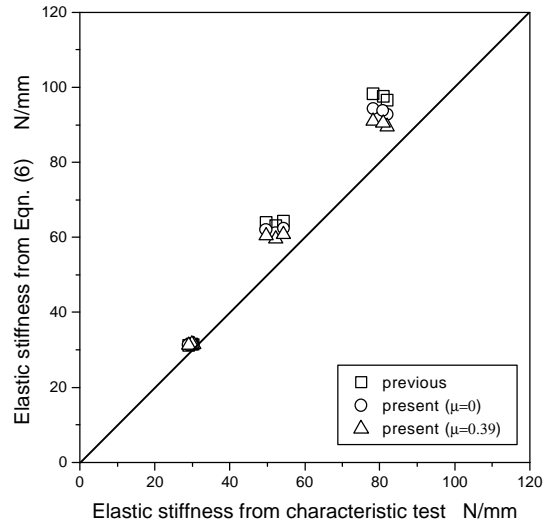


Fig. 5 Comparison of elastic stiffness from Eqn. (6) and characteristic test (17x17 type TW-HDS)

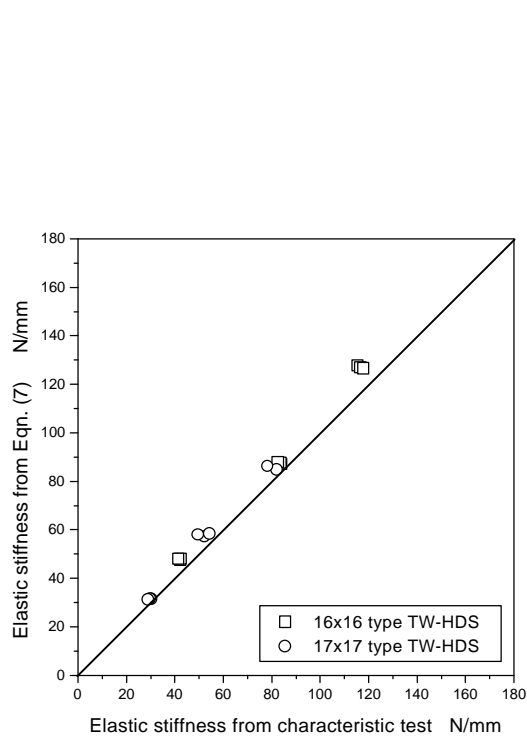


Fig. 6 Comparison of elastic stiffness from Eqn. (7) and characteristic test of TW-HDS

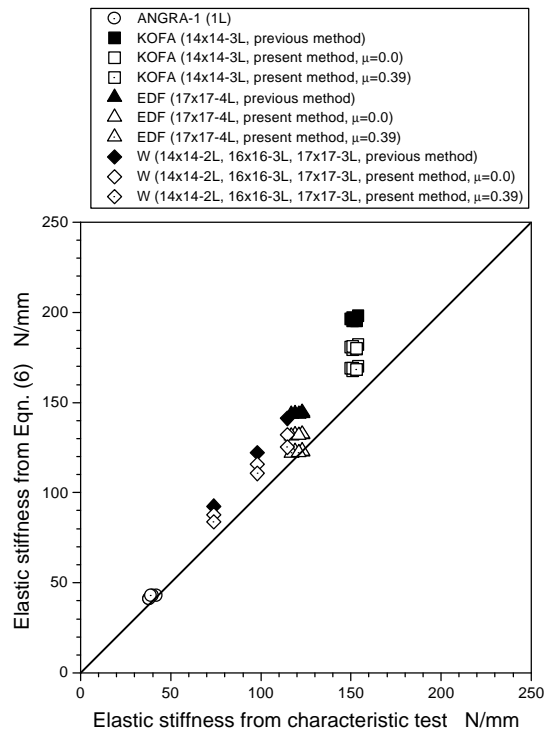


Fig. 7 Comparison of elastic stiffness from Eqn. (6) and characteristic test of TT-HDS