

비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 접촉거동 해석

Contact Behavior Analysis of a Non-conformal Shape Spacer Grid Spring

윤경호, 강홍석, 김형규, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

허성필

현대자동차 선형해석팀
경기도 화성시 장덕동 772-1번지

요약

비등각 접촉형상을 갖는 지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉에 의한 접촉해석을 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 연료봉은 지지격자 스프링에 비해 상대적으로 강성이 크므로 강체라 가정하여 연료봉의 변위에 의해 발생하게 되는 지지격자 스프링의 접촉압력 윤곽(configuration), 접촉력의 크기, 접촉형상 및 접촉길이 변화를 구하였다. 지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉은 접촉압력이 변하는 임계변위가 존재하며, 지지격자 스프링의 노내거동 변위에서는 이들 접촉이 헤르츠 접촉이 아닌 일반적 접촉상태가 되었다. 이러한 접촉상태에서는 연료봉과 스프링 사이의 접촉에 의한 프레팅 마멸량이 연료봉의 축방향 미끄럼 변위에 의한 영향보다는 수직력에 더욱 큰 영향을 받으며, 수직력이 커질수록 마멸량은 감소하는 것으로 나타났다.

Abstract

The contact stress analysis of a non-conformal shape spacer grid spring due to the contact between a fuel rod and a spacer grid spring is executed by finite element method. The fuel rod is regarded as a rigid body because it has the higher stiffness than that of the spacer grid spring, and the spring as a deformable body. In this analysis, the contact pressure, contact configuration by contact pressure, contact force magnitude, contact shape, and contact length are obtained. The contact between two bodies exist the critical amplitude, which mean the point to abruptly increase the fretting wear volume. When the displacement of the spring in the core condition is not Herzian contact but general contact condition. The fretting wear volume under this general contact condition is much governed by the normal force than that of the axial direction amplitude. And the normal force is higher, the fretting wear volume is more decrease.

1. 서론

지지격자 스프링은 초기 연료봉이 장입되어 발생하는 스프링력으로 연료봉을 핵연료의 수명 말까지 지지하는 기능을 갖고 있다. 따라서 지지격자 스프링과 연료봉은 연료봉의 장입에 의해 접촉을 하게 되며, 이러한 스프링과 연료봉 사이의 접촉은 그 곡률 반경의 중심이 동일선상에 위치하느냐 그렇지 않느냐에 따라 등각 혹은 비등각 접촉형상 [1]을 이루게 된다. 스프링과 연료봉 사이의 접촉은 초기 지지격자 스프링에 따라 접촉압력의 윤곽, 접촉력의 크기, 접촉형상 및 접촉길이가 달라지게 되며, 이러한 접촉거동의 변화를 유한요소법을 사용하여 해석하고자 하였다. 해석모델은 스프링의 특성을 구하기 위한 3차원 유한요소 모델을 사용하였고, 해석코드는 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS/standard[2]를 사용하였다. 접촉해석은 요소망 크기의 변화에 따라 상이한 해석결과를 나타내므로 가능한 작은 요소망을 구성하여 해석의 정확성을 기하였다. 스프링에 비해 상대적으로 큰 강성을 갖는 연료봉은 강체(rigid body)라 가정하였고, 스프링은 변형체(deformable body)로 가정하여 모델을 작성하였다. 지지격자 스프링은 연료봉의 변위(displacement)에 의해 변형이 발생하게 되며, 일정한 변위에 의해 발생하는 접촉 윤곽(configuration), 접촉압력, 접촉형상 및 접촉길이를 구하였고, 이들 접촉 특성들과 프레팅 마멸시험 결과[3]와의 비교를 통해 접촉거동과 프레팅 마멸특성과의 관계를 규명하고자 하였다.

2. 지지격자 스프링의 접촉해석

2.1 비등각 지지격자 스프링의 기하학적 형상

본 해석에 사용한 비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 이러한 지지격자 단일셀 네 개를 직각방향으로 두르게 되면 하나의 연료봉 셀을 이루게 된다. 비등각이란 스프링의 역할을 감당하기 위해 모재로부터 일정한 곡률 반경을 가지고 변형시킨 돌출부의 곡률 중심과 연료봉의 곡률 중심이 서로 대치되는 기하학적 형상을 갖는 것을 의미한다. Fig. 2에 나타낸 지지격자 단일셀 측면의 형상을 살펴보면 z-방향의 곡률 중심이 약간 아래쪽으로 치우쳐 비대칭 형상을 가지고 있다.

한편, 이 지지격자 스프링은 스프링의 강성을 최적화하기 위해 모재로부터 돌출된 굴곡부 양 측면에 지지격자 높이방향으로 슬릿이 형성되어 있다. 이 슬릿 역시 전체 지지격자 높이의 중앙과 슬릿의 중앙이 서로 일치하지 않는 비대칭 형상을 갖고 있다. 굴곡부 양 측면에 형성한 슬릿은 격자판 가공 시 굴곡부 변형 전에 슬릿을 가공하고 중앙

굴곡부를 형성하게 되므로 잔류응력 해제로 인해 소성변형이 발생하게 되나 이를 해석모델에 엄밀하게 적용키는 어려워 단일셀 격자판 시편을 비접촉식 3차원 측정기로 실측하여 이를 해석모델 작성에 적용하였다. 해석모델의 작성은 3차원 CAD 프로그램인 I-DEAS[4]를 사용하여 지지격자 스프링은 4절점을 갖는 쉘요소로, 연료봉은 스프링에 비해 상대적으로 강성이 크므로 강체요소로 해석모델을 작성하였다. 해석모델 및 적용된 경계조건 개략을 Fig. 3에 나타내었으며, 접촉해석은 요소망의 크기에 민감하므로 해석모델을 Table 1과 같이 세 종류의 해석모델을 작성하였다. Mesh I은 연료봉과 접촉을 일으킬 것으로 예측되는 가로 0.5mm, 세로 10mm의 쉘 표면을 가로 3개, 세로 40개의 요소로 분할하여 총 120개 요소로 모델링하였고, Mesh II는 동일한 쉘 표면을 가로 5개, 세로 80개로, Mesh III는 가로 10개, 세로 200개로 총 2000개의 요소로 모델을 작성하였다.

해석을 위한 경계조건은 지지격자 스프링의 특성해석을 위한 것과 동일하며, 이는 끝단의 y-방향 변위자유도 및 x와 z-방향 회전자유도를 구속하였고, 끝단으로부터 0.4mm 떨어진 에지의 y-방향 변위자유도 및 z-방향의 회전자유도를 구속하였다[5].

2.2 접촉해석 방법

해석방법 및 절차는 기본적으로는 지지격자 스프링의 특성해석을 위한 절차와 동일하다. 즉, 강체로 모델링한 연료봉과 변형체로 모델링한 지지격자 스프링 사이의 접촉이 발생할 것으로 판단되는 스프링부의 돌출부에 접촉면을 정의하고 앞서 기술한 바와 같은 경계조건 하에서 강체인 연료봉의 참조 절점(reference node)에 수직방향의 변위를 가한다. 그러면 강체의 변위에 의해 지지격자 스프링은 변형을 일으키게 되고 강체와의 접촉으로 인해 접촉압력이 발생한다. 이들간의 접촉은 강체인 연료봉이 지지격자를 침투(penetration)할 수 없도록 강체의 요소 크기는 크게, 그리고 변형체의 요소 크기는 작게 모델을 작성하여 접촉조건을 정의해 준다.

지지격자 스프링의 경우 연료봉의 변위에 의해 국부적으로는 소성영역에서 거동하게 되므로 재료의 물성을 탄성영역에 국한시키지 않고 격자판을 제조하기 위한 지르칼로이 판재를 사용하여 인장시편을 제조하고 이를 ASTM[6]에 따라 인장시험을 수행하여 재료의 진응력-진변형률 곡선을 구하여 이를 해석에 사용하였다. 이 시험으로부터 구한 지르칼로이 판재의 응력-변형률 곡선을 Fig. 4에 나타내었다.

해석으로부터 얻는 결과들은 구조물 응력해석과는 달리 접촉압력, 접촉압력으로 인한 전체 접촉력, 접촉면적 및 접촉길이를 구할 수 있도록 입력파일을 작성하였다.

2.3 접촉해석 결과

접촉해석 결과를 구하기 이전에 해석방법 및 절차의 타당성을 검증하기 위해 시험을 통해 얻은 하중 대 변위 선도와 유한요소해석을 통해 얻은 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 연료봉에 의한 변위는 초기 연료봉이 삽입됨으로 인해 발생하는 0.15mm의 변위를 고려하여 0.25mm까지의 하중 대 변위선도를 비교한 결과 해석결과와 시험결과가 아주 잘 일치함을 알 수 있었다. 이는 지지격자 스프링의 특성해석을 위한 유한요소 해석방법 및 절차가 타당함을 입증하고 있다. 지지격자 스프링의 접촉해석은 특성해석과 그 방법 및 절차상의 차이는 없는 것으로 가정하여 동일한 해석모델 및 방법을 적용하여 접촉해석 결과를 얻었다.

비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 접촉해석을 통해 구한 접촉압력의 윤곽을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림은 접촉면이라 선정된 상부 접촉면(top surface contact area)의 접촉압력(CPRESS)을 변위별로 도시한 것이다. 여기서 $z=0$ 은 스프링의 최고점(highest position)을 나타내며, 접촉압력의 윤곽(contact pressure contour)이 x -방향 요소의 크기인 0.05mm에 z -방향으로만 접촉길이가 성장하는 것을 알 수 있다. 이것은 초기 스프링을 설계할 때 연료봉의 변위에 따라 면접촉이 될 것으로 예상하였으나 연료봉이 지지격자에 삽입됨에 따라 발생하는 실제 접촉은 면접촉에 가까운 선접촉인 것을 알 수 있다. 즉, 연료봉에 의한 y -방향 변위 0.15mm일 때 접촉면적은 x -방향으로 0.1mm이었고, z -방향으로는 약 3mm인 것으로 나타났다. 또한 접촉압력의 윤곽이 z -방향으로 비대칭인 것은 스프링의 기하학적 형상이 원점을 중심으로 대칭을 이루지 않는 구조를 가졌기 때문인 것으로 보인다.

Fig. 7에는 연료봉에 의해 발생하는 변위의 증가에 따른 접촉길이의 증가를 나타내고 있다. 변위가 0.08mm 까지는 접촉길이가 선형적으로 증가하나 변위가 0.11mm 이상에서는 접촉길이가 급격하게 증가하는 경향을 보인다. 이 변위 이상의 조건 하에서는 접촉길이가 증가함에 따라 연료봉과 스프링의 접촉이 헤르츠 접촉상태를 유지하지 못하고 중앙부에서의 접촉압력이 양 가장자리의 접촉압력보다 작아지게 된다. 연료봉에 의해 발생하는 변위의 증가에 따른 접촉면적의 증가는 접촉길이와 마찬가지로 변위가 0.08mm 까지는 접촉면적의 증가가 선형적이거나 변위가 0.11mm 이상에서는 접촉면적이 접촉길이와 마찬가지로 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 8에는 연료봉 변위에 따른 접촉압력의 크기를 비교하여 나타내었고, 이 접촉압력의 절대값은 해석모델에 따라 달라지게 되므로 이를 무차원화하였다. 이것은 접촉길이 및 접촉면적 결과에서도 알 수 있듯이 연료봉에 의한 변위가 0.11mm 이상에서는 접촉압력의 윤곽이 헤르츠 접촉상태를 벗어나게 된다.

3. 프레팅 마멸시험

3.1 시험 개요

비등각 접촉형상을 가진 지지격자 스프링에 대해 프레팅 마멸특성 및 저항성을 분석하기 위해 격자판 단위의 프레팅 마멸시험 수행하였다. 이 시험은 지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉형상에 따른 프레팅 마멸 저항성을 분석하는 시험으로서 시험시간을 일정하게 하고 접촉하중과 미끄럼 변위를 여러 조합으로 시험[3]하여 피복관 시편에 발생하는 마멸의 특성 및 마멸량을 분석함으로써 스프링 형상의 마멸 저항성을 분석/평가하였다. 이 시험은 수직력의 크기를 10N 및 30N을 적용하였고, 미끄럼 변위는 10, 30, 50, 80, 100 μ m로 하였다. 접촉력과 미끄럼 변위 각 하나씩 조합하여 시험조건으로 사용하였고, 미끄럼 진동수는 단일 연료봉의 진동시험 결과로부터 얻은 기본진동수인 30Hz, 반복회수는 1×10^5 사이클로 하였다.

프레팅 마멸 저항성을 평가하기 위해서는 마멸형상, 마멸의 깊이 및 마멸량 등을 전체적으로 평가하여야 하나 여기서는 피복관에 발생한 마멸량(wear volume)만을 기술하였고, 다른 마멸특성들은 언급하지 않았다.

3.2 시험결과

비등각 지지격자 스프링의 프레팅 마멸특성 시험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 마멸 시험의 조건 중 하나인 미끄럼 변위를 증가시킬 때 마멸량이 현저히 증가하는 변위가 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 마멸량이 현저히 증가하는 변위를 임계진폭이라 하며, 수직력의 변화만으로 국한하여 살펴보면 수직력이 증가할수록 마멸량은 현저히 감소하는 것을 알 수 있다. 본 시험에 작용된 지지격자 스프링은 초기 연료봉 장입에 의해 약 0.15mm의 변형을 일으키며, 이는 약 30N의 반력을 발생시키는 것으로 나타났다. 따라서 이 30N의 수직력을 작용시킨 상태에서는 50 μ m 이상의 진폭에서 프레팅 마멸량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 이 임계진폭 이하로 연료봉의 진동이 제어될 수 있으면 지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉에 의한 프레팅 마멸량은 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[3].

Fig. 10에는 격자판 단위의 프레팅 마멸시험을 통한 비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 마멸흔적을 나타낸 것이다. 지지격자 스프링의 마멸 흔적은 연료봉과의 접촉과 밀접한 관계가 있는 것으로 보여지며, 이 스프링의 경우 마멸의 시작이 스프링의 중앙에서 발생하여 연료봉과 스프링 사이의 진폭이 증가함에 따라 마멸 길이의 증가가 나타나며, 이는 마멸량 증가의 주원인[7]이 되는 것으로 나타났다.

4. 결과 및 고찰

비등각 접촉형상을 갖는 지지격자 스프링의 연료봉 변위에 의한 접촉해석을 유한요소 해석방법을 사용하여 수행하였다. 이 지지격자 스프링의 경우 연료봉 변위에 의해 면접촉 형상을 가질 것으로 예측하였으나 해석결과 면접촉에 가까운 선접촉 형상을 갖는 것으로 나타났다. 또한 연료봉 변위에 의한 스프링간의 접촉은 연료봉의 변위에 의해 접촉상태가 달라지며, 미소한 변위에서는 연료봉과 스프링 사이의 접촉이 헤르츠 접촉윤곽을 유지하였으나 연료봉 삽입에 의한 초기 스프링 변위 하에서는 헤르츠 접촉이 아닌 일반적 접촉윤곽으로 전개되는 것으로 나타났다.

지지격자 스프링과 연료봉 사이의 접촉은 초기 마멸 흔적 형상에 영향을 주며, 접촉압력의 윤곽은 프레팅 마멸 흔적과 아주 유사한 형상을 나타내었다.

5. 결론

비등각 접촉형상을 갖는 지지격자 스프링의 접촉해석을 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 이 지지격자 스프링의 접촉은 연료봉의 변위에 의해 면접촉이 아닌 엄밀한 의미의 선접촉 형상으로 전개되었다. 또한 변위가 커질수록 연료봉과의 접촉은 헤르츠 접촉에서 일반적인 접촉형상으로 발전하였으며, 이 접촉압력의 윤곽은 프레팅 마멸의 초기 흔적과 유사한 경향을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 지지격자 스프링의 접촉해석은 프레팅 마멸에 대한 저항성을 제고하기 위한 지지격자 스프링의 형상을 설계하는데 적용할 수 있을 것으로 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구 개발사업 중 “경수로용 신형핵연료개발”(대과제) “고성능지지격자 구조기술개발”(세부과제)에서 과제업무의 일환으로 수행되었음.

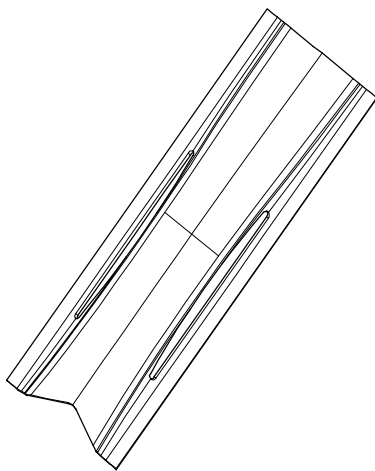
참 고 문 헌

1. 강홍석 외 7인, “원자로의 핵연료집합체 이중관 노즐형 냉각제 혼합 지지격자”, 대한민국 특허등록 제0265027호, 2000.
2. ABAQUS/standard Users' Manual, Ver. 6.2, ABAQUS Inc., 2001.
3. 송기남 외 11인, “고성능지지격자 구조기술 개발”, KAERI/RR-2308/2002, 한국원자력연구소, 2002.

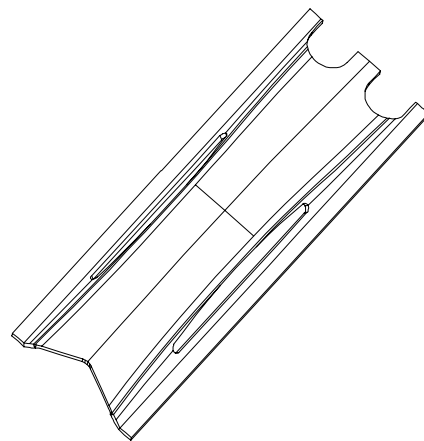
4. I-DEAS Users' Manual, Ver. 8m3, Structural Dynamics Research Corporation, 2000.
5. 김형규 외 4인, “얇은 판 구조물의 비등각 접촉해석”, 대한기계학회 2002 춘계 학술대회, 2002.
6. ASTM E8M-99, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 1999.
7. H.K. Kim et al., Investigation of wear evolution on nuclear fuel tube affected by the edge shape of grid spring, International Tribology Conference, 2002.

Table 1 해석모델에 사용된 각 메쉬의 절점 및 요소의 수

	No. of node of whole model	No. of element	
		whole	Contact region
Mesh I	2138	1970	40×3
Mesh II	4389	4119	80×5
Mesh III	12140	11609	200×10



(a) 기본 단위셀 가형



(b) 기본 단위셀 나형

Fig. 1 비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 개략도

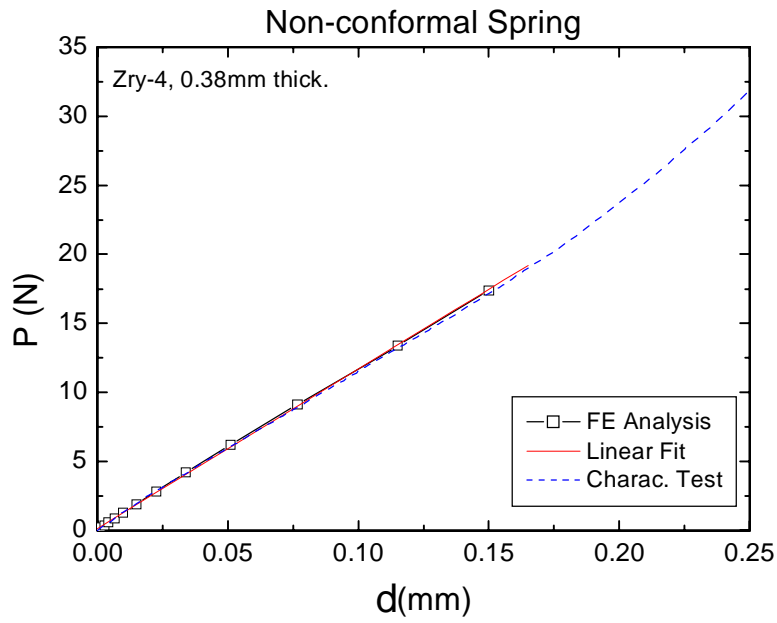


Fig. 5 비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 유한요소 해석결과와 특성시험 결과와의 비교

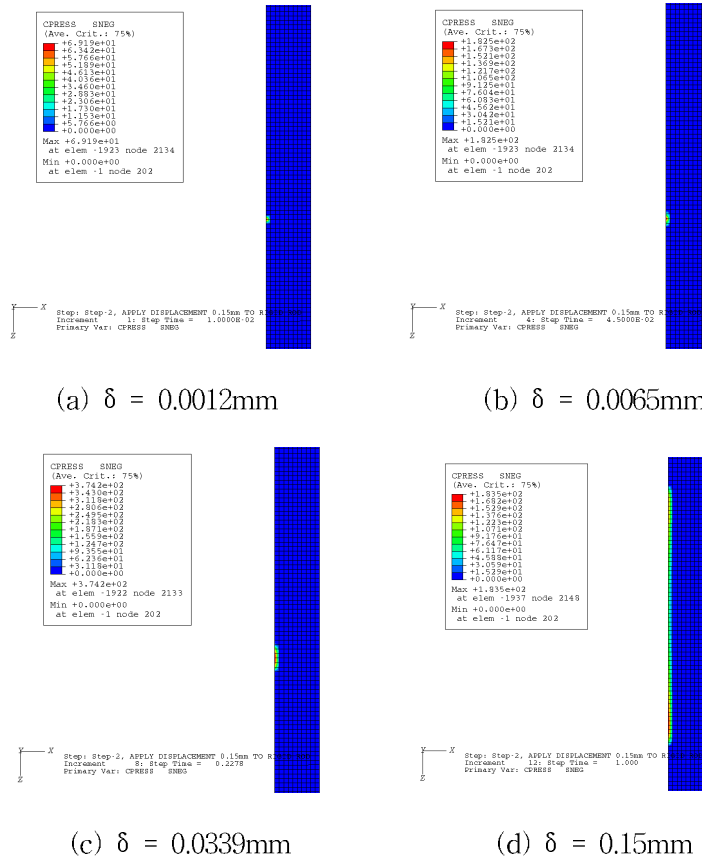


Fig. 6 연료봉 변위에 따른 스프링 접촉면의 접촉압력(CPRESS) 윤곽

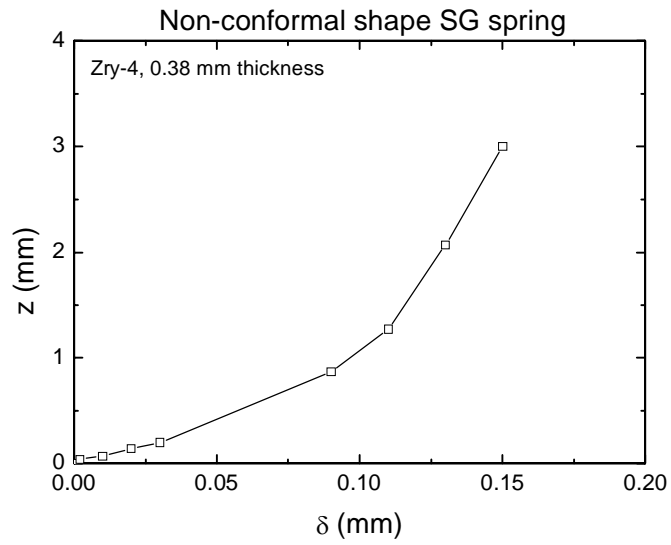
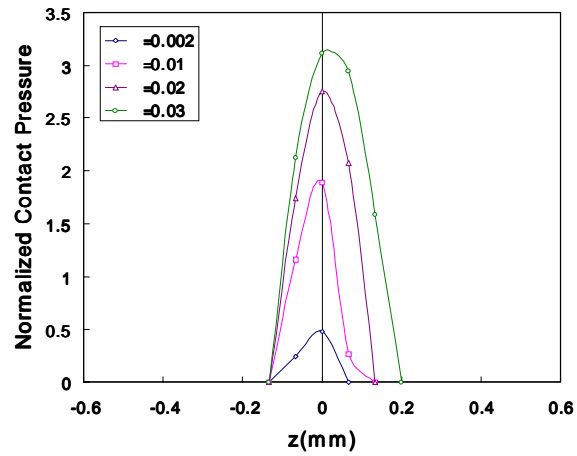
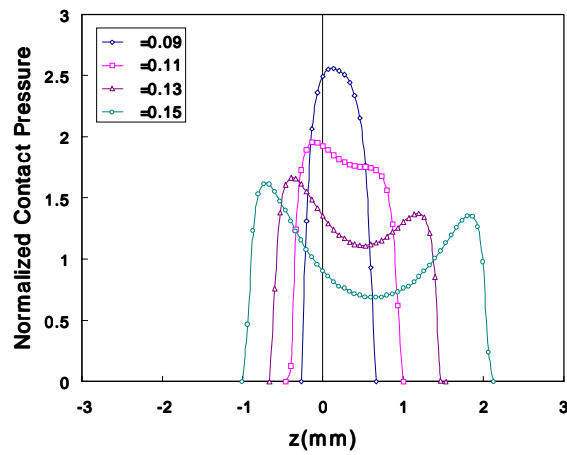


Fig. 7 연료봉 변위에 따른 스프링 접촉길이의 변화



(a) $\delta \rightarrow 0.002 \sim 0.03\text{mm}$



(b) $\delta \rightarrow 0.009 \sim 0.15\text{mm}$

Fig. 8 연료봉 변위에 따른 스프링 접촉면의 접촉압력 윤곽

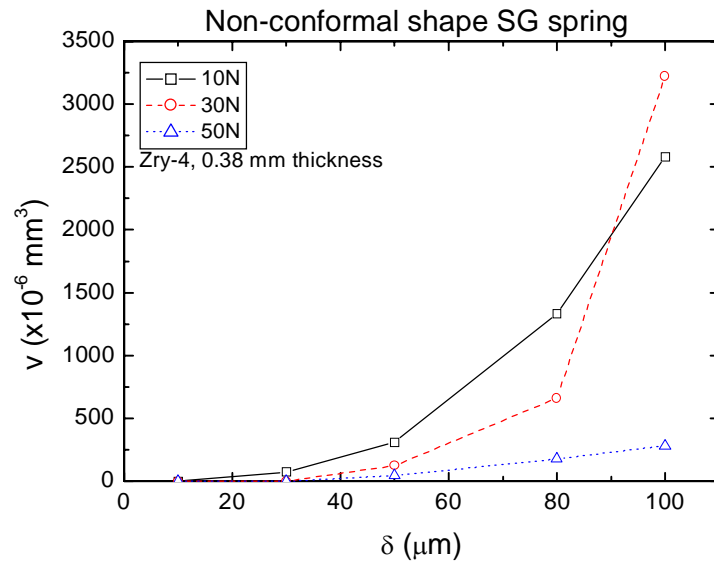


Fig. 9 프레팅 마멸시험으로부터 얻은 스프링력에 따른 마멸량 변화



(a) 30N, 80 μm

(b) 30N, 100 μm

Fig. 10 비등각 접촉형상 지지격자 스프링의 프레팅 마멸시험을 통한 마멸흔적