

지지격자 스프링/딴플의 특성시험 및 유한요소 해석

Characterization Test and Finite Element Analysis
of a Spacer Grid Spring/Dimple

윤경호, 송기남, 강홍석, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

지지격자 지지부(스프링 및 딴플)는 연료봉과의 마찰력으로 연료봉을 정해진 위치로 지지하는 기능을 갖고 있으며, 노내에서 연료봉의 지지조건이 변하게 되어도 연료의 수명 말까지 연료봉에 손상을 일으키지 않으면서 건전한 지지를 하여야 한다. 연료봉 지지상태의 건전성 평가를 위해서는 이들 스프링 및 딴플의 특성곡선인 하중 대 변위선도를 구하여야 하며, 이 특성곡선은 주로 특성시험을 통하여 구하여 왔다. 본 논문에서는 지지격자 지지부에 대한 특성시험 절차를 확립하고, 특성을 수치적으로 모사할 수 있는 유한요소 해석절차를 제안하였다. 지지격자 지지부의 특성은 경계조건에 아주 민감한 것으로 나타났으며, 본 해석모델 및 해석결과는 특성시험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 제안한 해석절차는 새로운 지지격자 형상개발 시 그 지지부에 대한 특성을 예측하기 위한 도구로 활용할 수 있을 것으로 보여진다.

Abstract

The spacer grid parts(spring and dimple) support the pre-decided positions of the fuel rods by friction force between spacer grid support part and fuel rod in the fuel assembly. These spacer grid springs intact support till the end of life of fuel in spite of the support condition change. In order to estimate the intactness of fuel rod support condition, it is necessary to obtain the characteristic curve of spacer grid spring, and then these data are obtained by characterization test. In this paper, the characterization test and finite element analysis of the spacer grid spring are presented. The behavior of the grid spring is very sensitive with its boundary condition, and the finite element model and analysis procedure are good agreement with test results. Therefore, the present analysis model and procedure for estimating the characteristic behavior of the grid spring seems to be useful tool for predicting the mechanical performance of it.

1. 서론

지지격자 스프링 및 덤플은 연료봉과의 마찰력으로 연료봉을 정해진 위치로 지지하는 기능을 갖고 있으며, 노내에서 연료봉의 지지조건이 변하게 되어도 연료의 수명 말까지 연료봉에 손상을 일으키지 않으면서 건전한 지지를 하여야 한다. 연료봉 지지상태의 건전성 평가에는 이들 스프링 및 덤플의 특성곡선인 하중 대 변위선도를 구하여야 하며, 이 특성곡선은 주로 시험에 의해 구하여 왔다[1, 2]. 본 논문에서는 지지격자 지지부에 대한 특성시험을 엄밀하게 수행할 수 있는 시험기술의 확립과 이 특성시험 결과를 수치적으로 모사할 수 있는 유한요소 해석절차를 제안하고자 한다. 고유모형 지지격자 지지부에 대해 시험을 통한 특성곡선(F- δ)을 만능인장시험기를 사용하여 지지부 시편을 적절한 고정치구로 고정하고 연료봉의 직경과 동일한 외경을 갖는 가중치구(load bar)로 하중을 가하고 그때의 해당변위를 ASCII형태로 저장하여 구하였다[3, 4]. 또한 이 특성시험 결과를 모사하기 위해 시편과 동일한 기하학적 형상을 갖는 유한요소 해석모델을 전처리 프로그램인 I-DEAS[5]로 작성하고 인장시험을 통하여 얻은 시편 재료의 탄·소성 물성을 적용하여 비선형 응력해석을 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard[6]로 해석하였다. 이러한 해석모델 및 해석절차에서 얻은 결과들을 시험결과와 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하여 새로이 도출되는 지지격자 지지부에 대한 특성 예측에 사용하고자 한다.

2. 지지격자 지지부에 대한 특성시험

2.1 개요

노내에서 지지격자 지지부는 탄성영역 뿐 아니라 소성영역에 이르는 변위 범위에서 거동하고 있으며, 이 거동을 정확히 예측하는 것이 어려워 주로 시험을 통하여 지지격자 지지부에 대한 특성곡선을 구하여 왔다. 본 연구에서는 우선 도출된 고유모형 형상의 지지격자 지지부에 대한 특성시험을 만능인장시험기를 사용하여 수행하였으며, 시험기의 개략을 그림 1에 나타내었다.

2.2 시험절차

지지격자 지지부들에 대한 특성시험은 지르칼로이-4로 제조된 단일 셀 시편을 시편의 양 에지들을 고정할 수 있는 고정치구에 고정하고 연료봉의 외경과 동일한 직경을 갖는 그림 2와 같은 가중치구를 통하여 시편에 변위를 가한다. 이때 시험기에 부착된 로드셀로부터 얻는 하중을 ASCII형태의 데이터로 수집하여 하중 대 변위선도를 구하게 된

다. 지지격자 지지부의 변위는 시편에 따라 최대 허용변위가 설정되었으며, 시험을 위한 파라미터들은 최대 변위를 허용하는 범위에서 설정하였다. 지지격자 지지부 시편의 고정을 위한 치구는 그림 3과 같으며, 이 고정치구는 단일 셀 시편의 양 에지들을 고정할 수 있도록 설계하였으며, 시편의 고정은 나사를 사용하여 고정하였다. 고유모형 지지격자의 스프링 특성시험 시편은 지르칼로이-4로 제조하였으며, 그림 4는 시험을 위한 단일 셀 시편의 형상을 나타낸 것이다. 시험에 소요된 시편의 개수는 10개를 사용하였다.

2.3 시험결과

지지격자 스프링에 대해 특성시험을 수행한 결과 스프링 강성의 범위는 271 ~ 315 N/mm로 나타났으며, 최대 하중은 약 130 N이었다. 그림 5에는 이 특성시험 결과를 나타내고 있으며, 시험을 통해 얻은 스프링 강성의 평균은 287 N/mm이었다. 또한 시편 간에 큰 특성차이를 나타내지 않고 비교적 균일한 거동을 갖는 것으로 보아 시편의 제조 및 시험은 잘 수행된 것으로 보인다.

3. 지지격자 지지부에 대한 유한요소해석

3.1 개요

지지격자 지지부에 대한 특성시험 결과를 모사하기 위해 상용 전처리 프로그램인 I-DEAS Ver. 7m1을 사용하여 유한요소 해석모델을 작성하고 지지격자 지지부의 변위가 탄·소성 영역에서 거동하므로 인장시편을 제조하고 이의 인장시험[7]을 통하여 시편 재료의 탄·소성 물성을 구하였다. 이를 표 1에 요약하였다. 또한 지지부 특성시험에서 시편이 처한 실제 경계조건을 모사하도록 경계조건을 적용하였고, 상용 유한요소 해석코드인 ABAQUS/Standard Ver. 5.8을 사용하여 비선형 탄·소성 응력해석을 수행하였다.

3.2 유한요소 해석모델 및 경계조건

지지격자 지지부에 대한 해석모델은 시편의 두께가 0.457 mm인데 비해 전체 지지격자의 높이는 35 mm 이상으로 되어 있어 이를 박판이라 가정하였다. 따라서 대변형 해석의 정확성이 높은 것으로 알려진 4-절점 쉘요소(S4R)를 사용하였고, 연료봉은 강체요소(R3D4)를 사용하여 연료봉의 직경과 동일한 곡률을 갖도록 모델링하였다. 해석모델의 절점 수는 661개이고, 요소의 수는 553개이며, 유한요소 해석모델을 그림 6에 나타내었다. 이 강체요소는 실제 연료봉과 접촉하는 스프링부와의 접촉을 정의하고 이 강체요소의 참조절점(reference node)에 적용되는 하중(변위)과 변위방향의 자유도를 구속한 양

에지에서의 반력 데이터를 특성시험에서와 마찬가지로 ASCII형태로 저장하였다[4]. 지지격자 지지부의 양 에지는 실제 특성시험시 한 에지에서 약 0.6 mm정도가 폭으로 전체 격자체 높이를 상하 고정치구에 물리게 한 후 고정치구의 뚜껑을 6개의 나사로 체결하기 때문에 변위뿐 아니라 기울기도 구속되게 된다. 따라서 이 경계조건을 단순한 의미의 고정 경계조건으로 간주할 수 있다. 연료봉으로 모델링한 강제요소는 이 시편에 변위를 가하게 되는 z-축 변위 자유도 외에는 모두 구속하였다.

3.3 해석결과

그림 7은 강제(연료봉)의 변위가 0.3 mm에 도달했을 때의 스프링 변형 전·후의 형상을 나타낸 것이다. 또한 그림 8과 9에는 이 변위에서의 지지부 von Mises 등가응력 및 소성변형률의 분포를 나타내고 있다. 이 스프링의 형상은 외팔보의 형상을 갖고 있어 스프링이 시작되는 부위에서 등가응력 및 소성변형률의 집중(localization)이 나타나고 있다. 지지격자 스프링이 0.3 mm 이상 변형되게 되면 이 국부적인 영역에서는 재료의 항복응력 이상의 등가응력이 발생하게 되나 이것은 국부적 영역에 나타나는 응력이라 할 수 있으므로 이로 인한 스프링의 파손 가능성은 적다고 판단된다. 그러나 국부응력의 집중현상은 스프링의 반복하중에 의한 피로에는 취약할 수 있으므로 이 부분에 대한 검토는 이와는 별도로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 그림 7에 나타낸 바와 같이 변위가 증가함에 따라 연료봉과 지지격자 스프링간에는 미소한 횡방향의 미끄럼이 발생하는 것을 알 수 있으며, 이러한 미끄럼은 연료봉과 지지격자 지지부간에 프레팅 마멸의 한 원인이 될 수 있으며, 노내에서 연료봉의 지지조건이 불건전하게 될 가능성이 있을 것으로 보인다[8]. 해석을 통해 얻은 특성곡선에서 선형영역만을 선택하여 선형 보간(linear fitting)을 수행한 결과 스프링의 강성은 296 N/mm이었다. 해석을 통해 얻은 고유모형 지지격자 스프링의 특성곡선을 그림 10에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 지지격자 지지부의 특성시험 및 해석결과와의 비교

고유모형 지지격자 스프링에 대한 특성시험으로부터 얻은 스프링 강성은 287 N/mm로 나타났으며, 유한요소 해석을 통해 얻은 스프링 강성의 평균은 296 N/mm이었다. 따라서 시험결과와 해석결과와의 차이는 약 3 % 정도로 해석결과가 시험결과와 아주 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그림 10에는 이 스프링에 대한 특성시험 및 유한요소 해석결과를 중첩하여 비교한 것으로 스프링의 전 변위 구간에서 비교적 잘 일치하고 있

다.

4.2 연료봉 지지형태

특성시험에 사용한 지지격자 스프링 시편은 주지한 바와 같이 외팔보 형상의 스프링으로 되어 있다. 이러한 스프링에 대해 특성시험에서는 연료봉의 변위에 따라 스프링 내에 존재하고 있는 응력이나 변형률 분포를 파악하기가 어렵다. 따라서 유한요소 해석을 통한 스프링 내에 존재하는 등가응력 및 소성변형률을 고찰해보면 이러한 지지격자 스프링은 스프링을 형성하기 위한 지지부에 응력의 집중현상이 발생하게 되고, 또한 변위가 증가함에 따라 최대 등가 소성변형률 역시 크게 증가하는 것을 그림 11을 통해 알 수 있다. 연료봉의 변위가 약 0.3 mm에 이르게 되면 지지부내에 존재하는 최대 von Mises 등가응력은 재료의 항복응력에 근접하게 된다. 그리고 연료봉의 변위가 증가함에 따라 최대 등가응력은 커지게 되고 이 최대 등가응력이 나타나는 부위에서 소성변형률 역시 크게 나타나고 있다. 국부응력의 집중현상은 연료봉이 노내에서 온도의 변화, 조사에 의한 스프링 강성의 변화, 조사에 의한 연료봉 외경의 변화 및 냉각수 유동에 의한 연료봉의 진동 등에 따라 임의의 진동상태에 놓이게 되고, 이것은 스프링에 임의의 반복하중을 가하게 될 때 스프링의 피로현상을 일으키는 원인이 될 수 있다.

5. 결론

고안된 고유모형 지지격자 지지부에 대한 하중 대 변위선도인 특성곡선을 구하기 위해 만능인장시험기를 사용하여 특성시험을 수행하였다. 특성시험은 지지격자 지지부들에 대한 노내 연료봉지지 건전성 평가를 위해 반드시 필요하며, 특성시험은 동일한 형상의 시편간에 큰 차이를 나타내지 않는 시험기술을 확립하였다. 또한 특성시험 결과를 수치적으로 모사할 수 있는 유한요소 해석절차를 확립하였고, 해석결과는 시험결과와 아주 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 유한요소 해석방법은 새로 도출될 지지격자 지지부들에 대한 특성을 예측하기 위한 도구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 송기남 외 4인, “핵연료 핵심구조부품의 개발현황 및 연구방향”, KAERI/TR-865/97,

- 한국원자력연구소, 1997.
2. K. N. Song et. al., "Fuel Assembly Mechanical Design and Engineering", KAERI, 1986.
 3. 윤경호 외 3인, "지지격자체의 기계/구조적 성능시험 기술개발," KAERI/TR-1598/00, 한국원자력연구소, 2000.
 4. H. K. Kim and K. H. Yoon, "Analysis of Fuel Grid Spring by Characterization Test and Finite Element Method", ICONE-8, 1999.
 5. "I-DEAS User's Manual", Ver. 7m1, Structural Dynamics Research Corporation, OH, USA, 1999.
 6. "ABAQUS User's Manual", Ver. 5.8, Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., RI, USA, 2000.
 7. ASTM E8M-99, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", 1999.
 8. 김형규 외 3인, "핵연료봉 프레팅마멸의 시험 분석", KAERI/TR-1702/2000, 한국원자력연구소, 2000.

표 1. 지르칼로이-4의 탄·소성 물성[7]

재질	탄성			소성	
	E(GPa)	σ_y (MPa)	ν	σ (MPa)	ϵ
Zircaloy-4	105.15	536.15	0.294	0	0.0
				536.148	0.0347
				595.724	0.0579
				617.168	0.0965
				595.724	0.1733
				581.425	0.1925
				477.764	0.2404

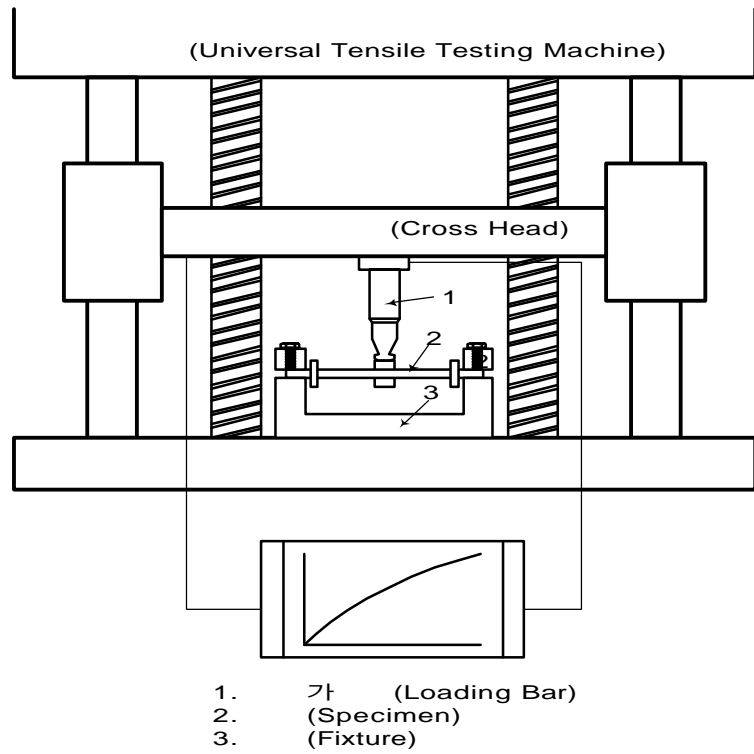


그림 1. 만능인장시험기 개략도

Unit : mm

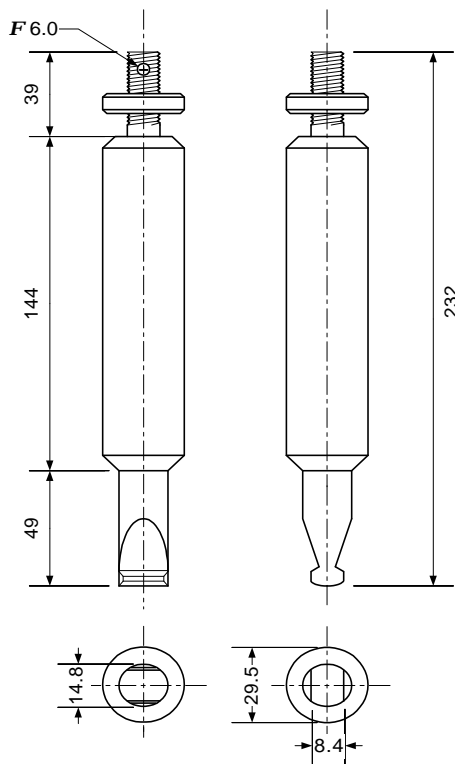


그림 2. 가중치구



그림 3. 시편 고정치구



그림 4. 지지격자 단일 셀 시편

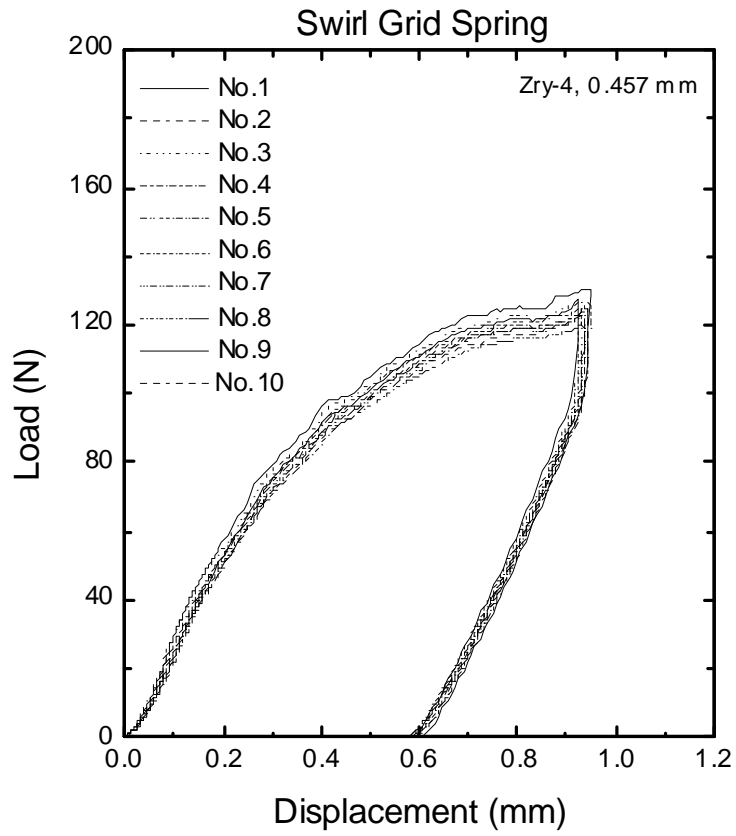


그림 5. 회전유동 지지격자 스프링의 특성시험 결과

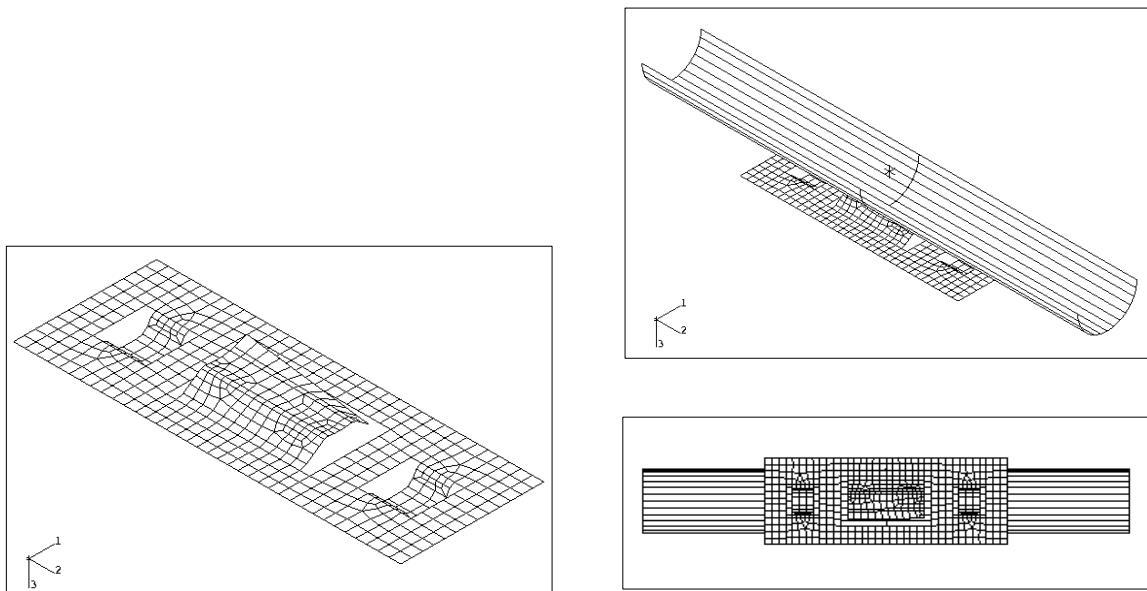


그림 6. 유한요소 해석모델

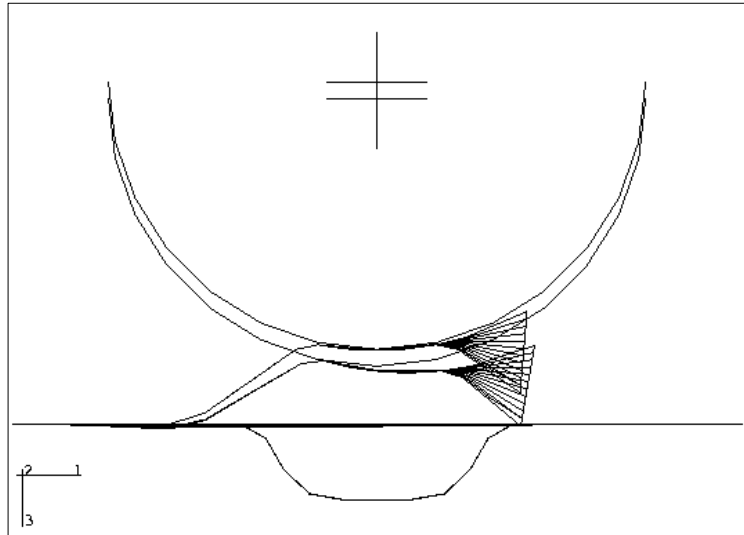


그림 7. 0.3 mm 변위를 가한 상태에서의 스프링 변형형상

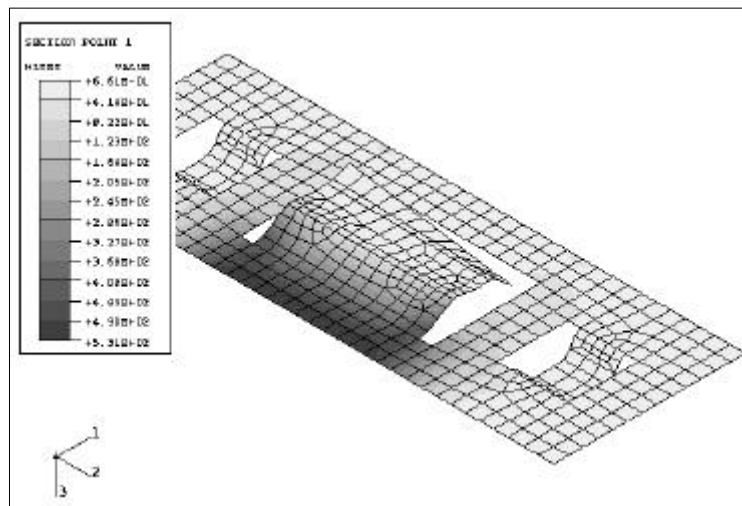


그림 8. 0.3 mm 변위를 가한 상태에서의 von Mises 등가응력 분포

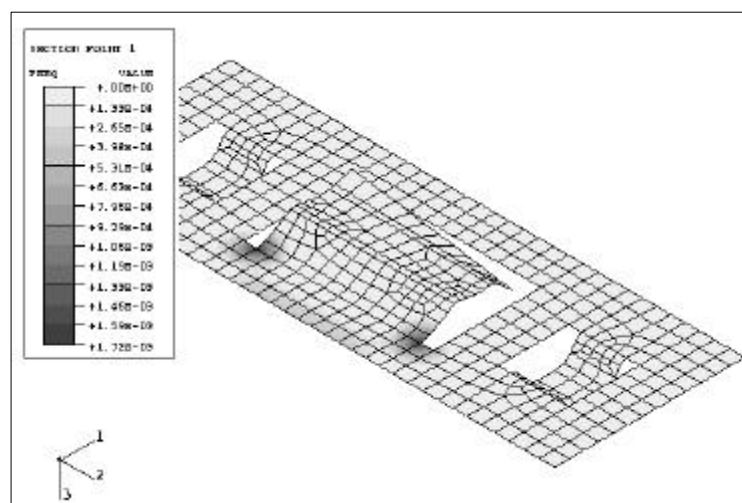


그림 9. 0.3 mm 변위를 가한 상태에서의 등가 소성변형률 분포

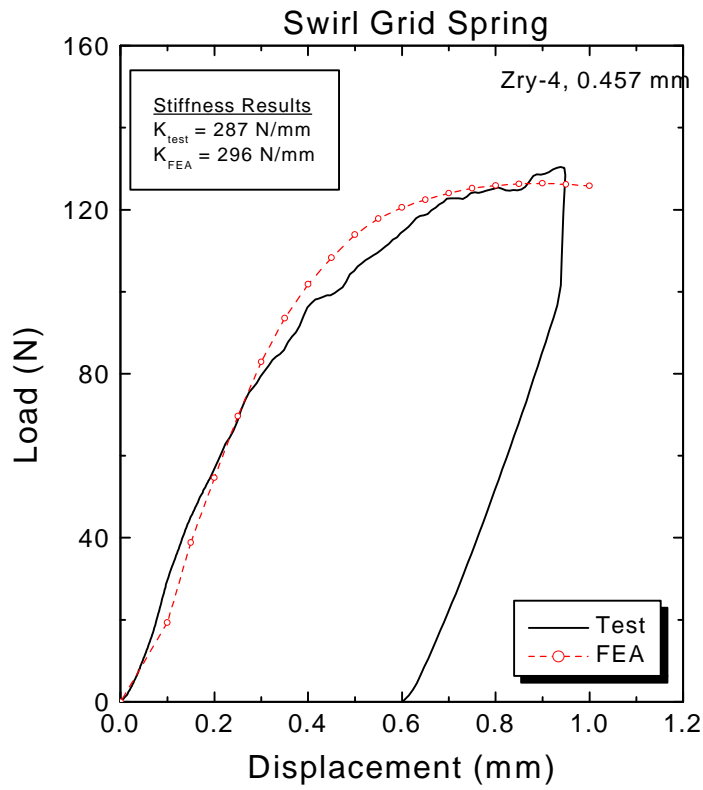


그림 10. 지지격자 스프링의 특성시험 및 유한요소 해석결과 비교

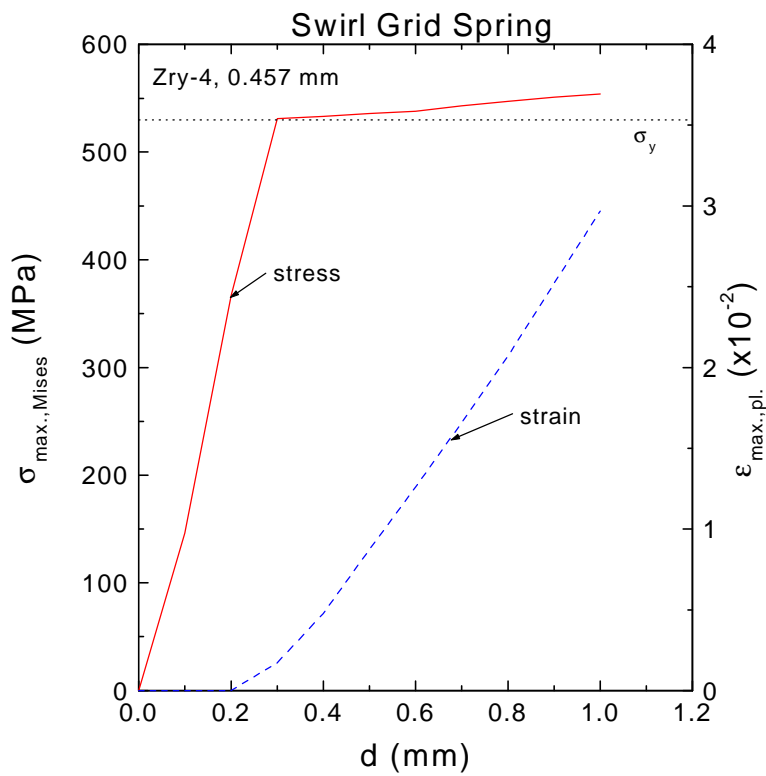


그림 11. 지지격자 스프링의 변위에 따른 최대 등가응력 및 소성변형률