2000년 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

사각단면 연료봉 및 등가 단순 보요소의 진동특성 평가

Vibration Characteristics of a twisted square rod comparing with that of a Equivalent Simple Beam Model

임정식, 손동성

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 유성우체국 사사함 105호

요 약

가늘고 긴 연료봉의 고유진동 특성을 해석할 경우 간단하고 손쉬운 등가 보요소를 이용하여 해석하는 것이 일반적이다. 원형 단면의 봉 이외에 사각 단면봉의 연료봉을 가상할 수 있고 이러한 단면은 기계적이고 열수력적인 성능의 향상을 위하여 사용될 수 있다. 이러한 사각 단면봉의 진동 특성을 해석할 경우 적절한 모사를 위한 모델링에 많은 노력과 시간이 들게되므로 3차원 모델링 대신 단순한 등가 보요소를 이용하여 해석 할 수 있다. 여기서는 비틀림 사각 단면봉을 가상하여 단순 등가 보 요소를 이용한 해석의 타당성을 검토하고 이들의 결과를 평가하고자 하였다. 결과 검토로부터 단순 보 요소를 이용하여 사각 비틀림 보의 진동해석에 사용할 수 있음을 확인하였고, 비틀림의 영향이 봉의 강성에 주는 영향은 무시할 만큼 작은 것으로 나타났다.

Abstract

It is general practice to use a simple beam model in the analysis of the vibration characteristics of a slender rod for the simplicity and easiness to get the results. Besides the circular cross-section, fuel rods may have twisted square cross section in order to enhance the mechanical and thermo-hydraulic performance. In this case the modeling for the analysis of the vibration takes much efforts to simulate it properly. Instead of the more complex solid modeling, a simple beam model can be used if the simulation is properly done. In this study, the validity of the use of a simple beam model for the twisted square rod are discussed and the results of the two calculations are evaluated. The results show that the simple equivalent beam model also can be applied for this type of the rod on the vibration analysis and the effect of the twisted form on the rigidity of the rod is negligibly small.

1. 서 론

경수로 핵연료 봉이나 CANDU 핵연료 봉과 같이 길이 방향으로 가늘고 긴 핵연료봉은 횡방향에서 진동을 억제하기 위하여 여러 곳에서 구속을 가하여 진동안정성을 갖도록 설계된다. 이러한 핵연료봉의 고유진동 특성해석은 간단한 보요소(beam model)을 이용하여 용이하게 해석할 수 있고 특히 횡방향 진동과 같이 자유도가 낮은 진동을 고려할 경우는 이 방법이 타당하여 대부분 보요소를 사용하여 진동해석하는데 무리가 없음이 알려져 있다.

원형의 단순한 단면 형상의 연료봉 이외에 또 다른 형상은 사각형의 단면을 가지고 길이 방향으로 회전하여 비틀린 형상의 연료봉을 고려할 수 있으며 이와 같이 비틀린 형상을 가지므로서 연료봉 자체의 강성을 높임을 물론 열수력적인 혼합 효율을 증대하고 진동특성을 개선할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 기존의 원형 단면의 연료봉 이 외에 사각 단면형상을 가지고 길이방향으로 비틀림을 갖는 가상 연료봉의 고유진동 특성을 수행하여 통상의 보 요소를 사용하여 해석한 결과와 비교하고, 이러한 봉의 진동해석에서 단순 보 요소를 이용하여 해석 할 수 있음을 평가하고자 한다.

해석방법은 기존의 해석방법인 보 요소의 해석과 함께 이종 물성을 갖는 연료봉의 물성치와 회전 사각 비틀림에 기인하는 강성의 변화를 수용하기 위하여 실제의 형상대로 3차원 모델링하여 상용의 ANSYS 코드를 이용하여 해석을 수행하며 필요한 입력 중 등가 강성은 시험에 의해 구하여 사용할 수도 있으나 여기서는 이러한 모델로부터 얻은 ANSYS 변위해석의 결과를 이용하였다. 이와 같이 실제형상의 해석과 보요소의 단순 요소를 이용하여 해석한 결과를 비교/평가하여 통상 사용하고 있는 단순모델의 사용에 따른 문제점을 파악하고 간단한 모델의 사용적합성에 대하여도 살펴보고자 한다.

해석 대상의 보는 길이 300mm 및 길이 400mm의 연료부 길이를 택하였으며 단순 보 요소에서는 냉각수에 의한 부가 질량을 포함하고 있다. 3차원의 Solid 모델링에서는 부가 질량의 효과를 무시하여 해석하고 그 결과를 등가 보의 부가질량의 효과를 적용하여 검토하기로 하였다.

해석 결과 기존의 단순 보 요소의 해석 모델링을 사용하여 해석할 경우 해석 결과는 사각 비틀림 보 및 사각 직선 보의 경우와 큰 차이를 보이지 않음으로서 단순 보 요소를 사용하여 해석할 수 있음을 확인하였고, 또 비틀림 사각봉과 직선 사각 단면보의 해석 결과는 큰 차이를 보이지 않음도 확인되었다. 이로부터 실제의 비틀림 사각봉을 사용하여 얻은 해석의 결과에 단순 보의 해석 결과에서 얻은 유체에 의한 부가 질량의 효과를 고려하므로서 단순 보 요소를 사용한 해석을 운전환경으로부터의 공진 방지 평가 등에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 고유진동 해석

2.1. 연료봉 형상 및 유한요소 모델

그림 1은 해석 대상인 길이방향 비틀림을 갖는 사각 단면봉의 Solid Model로부터 얻은 유한요소 모델을 보이며 그림 2는 이 사각봉의 상,하단 경계조건을 보이고 있다. 원형 단면을 갖는 경수로용 연료봉의 경우 고유진동 해석은 참고문헌[1,2,3]에서 볼 수 있고, 사각 단순 보 요소의 고유진동해석도 원형봉과 같이 하나의 절점에 2 DOF 자유도를 갖는 보 요소 고유진동 해석용 FEM 코드인 BEVIRA[4] 또는 ANSYS[5]를 이용하여 해석할 수 있다. ANSYS에서는 보 요소를 사용할 경우 입력자료로서 보의 물성과 단면(A), 관성 모멘트(Izz), 단위 길이당 부가질량(added mass)등 이 주요 입력으로 필요하며 이때 사용되는 요소는 ANSYS beam3 요소를 사용한다.

그림 3은 ANSYS의 유한요소 모델을 위한 Solid Modeling의 일부를 보이는 것으로서 회전하는 궤적을 따라 단면적을 Volume Extrusion(VEXT) 한 후 각 면을 2등분하여 얻은 유한요소를 나타내고 있다. 그림 4는 Solid Modeling에서 각 면의 모서리를 따라 4등분한 길이요소를 가지고 유한요소 모델링한 결과로서 이때 사용되는 ANSYS 요소는 Solid 45이다. 그림 5는 입력자료로 사용되는 봉의 강성을 계산하기 위한 상하단의 경계조건 및 봉 중앙에서의 하중점을 보인다.

사용된 유한요소 해석에서 사각 단면봉의 핀(fin)의 영향은 modeling의 복잡성 때문에 본 해석에서는 영향이 작다고 가정하여 무시하였다. 경계조건은 봉의 상단 고정 및 하단 횡방향 구속의 경계조건을 가하였다.

실제의 복잡한 사각 비틀림 단면봉을 모델링하여 해석하는 대신 단순한 등가 보 요소를 이용하여 해석할 수도 있고 이의 유한요소 모델을 그림 6에 경계조건과 함께 나타내었다. 경계조건은 상단 고정경계 및 하단 미끄럼 경계조건을 주었다.

그림 7은 비틀림 보보다 다소 단순하고 간단한 직선 사각 단면보를 해석하기 위한 유한요소모델을 보이고 있다.

2.2. 등가 강성계수 및 등가 영률

보 요소를 이용하여 고유진동 해석을 하기 위해서는 보의 단면이차 모메트를 입력하여야 하며 간단한 봉 형상에 대하여는 계산이 용이하지만 이종의 물성과 단면이 비틀림을 갖는 본 해석의 경우 계산으로부터 간단하게 구하기가 쉽지 않다. 이러한 경우 그림 5와 같은 해석 모델을 이용하여 ANSYS 정적 변위계산을 통해 전체 봉의 개략적인 등가 강성을 구할 수 있다. 즉, 가한 하중과 변위를 앎으로써 등가 강성(EI)를 구할 수 있고 이로부터 2차 관성모멘트를 구하여 사용하며 이러한 방법은 복잡한 형상과 비선형성을

가지고 있는 경수로 핵연료와 같은 구조물에서 통상 해석시 사용하는 방법이다. 그림 8 은 이런한 정적 변위 해석의 결과를 보인다. 여기서 양단 고정의 경계조건에서 봉의 중간에 하중을 가하고 이로부터 얻은 변위로부터 등가강성을 다음과 같이 구할 수 있다[6].

$$EI = \frac{P \cdot L^3}{192 \cdot U_x} \tag{1}$$

해석 대상 봉은 비틀림이 있는 봉이므로 변위해석을 할 때 하중방향은 사각봉의 모서리와 면의 중간에 작용시킬 수 있는 두 가지 경우가 있으며 각 각의 경우 해석으로부터 얻은 관성 모멘트는 길이 300mm와 400mm에서 다음과 같다.

가) 길이 300mm의 경우

하중을 모서리 절점에 가했을 때 변위로부터 얻은 등가 강성은

$$EI = \frac{10 \cdot 0.3225^3}{192 \cdot 0.73793 \cdot 10^{-3}} = 2.3674 \ \mathrm{Nm^2}$$

이다. 이로부터 Young's Modulus를 피복관의 것을 사용할 경우 관성 모멘트는 $I=3.23858563 \times 10^{-11}$을 얻는다.

한편 보의 관성 모멘트는 기하학적 제원에만 종속되므로 기하학적 제원으로 구한 관성 모멘트로부터 등가 Young's Modulus를 구하면 4.19926×10^{10} $\mathrm{N/m^2}$ 이다.

하중을 사각봉의 모서리가 아닌 면의 수직 절점에 가하여 변위를 얻고 이로부터 등가 강성 EI를 얻을 수 있으며 피복관 영률을 이용하여 구한 관성 모멘트 I는 $I=3.237800237 \times 10^{-11}$을 얻을 수 있다. 이들 물성들은 단순 보 요소의 고유진동해석의 입력으로 사용된다.

수직하중과 모서리 하중으로 구한 EI 값의 차이가 크지 않음을 보이며 이를 이용하여 계산한 고유진동수 결과도 큰 차이가 나지 않을 것으로 예상된다.

나) 길이 400mm의 경우

사각 봉의 모서리 절점에 하중을 가하고 변위를 얻어 피복관의 영률을 이용하여 계산된 단면계수는 $I=3.19663 \times 10^{-11}$을 얻는다. 또 봉의 단면제원으로부터 구한 관성 모멘트를 사용하여 얻는 봉의 등가 영률은 4.14536×10^{10} $\mathrm{N/m^2}$ 이다.

또 하중을 사각봉의 일면의 중앙절점에 가하고 얻은 변위로부터 피복관의 영율을 이용하여 구한 등가 관성 모멘트는 $I=2.78676 \times 10^{-11}$을 얻을 수 있다. 한편 봉의 단면 제원으로부터 구한 관성 모멘트를 이용하여 구한 등가 영률은 3.61384×10^{10} $\mathrm{N/m^2}$이다.

3. 결과 및 검토

사각 단면 보의 고유진동해석은 다음 식을 이용하여 해석적으로 구할 수 있다[7].

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \left[\frac{EI}{\rho \cdot A \cdot L^4} \right]^{1/2} \qquad (2)$$

여기서 양단고정의 경우 End Factor $(\beta_n L)$은 4.73004074, 7.85320462, 10.9956079, 14.1371655, 17.2787597이며[6], 사각 단면 보의 2차 관성 모멘트는 $I = b \cdot h^3 / 12$ 으로부터 구할 수 있다.

2.2절에서 얻은 관성 모멘트 및 물성과 제원을 이용하여 연료부의 길이를 300mm, 400mm의 단순 등가 보, 사각 직선봉, 사각 비틀림봉의 고유진동해석을 수행한 결과 표 1 및 표 2와 같은 고유진동수를 얻고 각 각에 대한 고유진동 모드형상을 얻었다. 표 1에는 고유진동수를 각 경우별로 나타내었다. 초기 모드의 기여도를 고려하여 4차 모드까지만 나타내었으며 x, y 횡방향 서로 다른 모드 수에서 동일한 진동수를 나타내는 것은 방향성을 고려하여 같은 모드로 여기서는 제외하였다. 해석적 방법인 식 (2)로 구한 등가보의 경우 물 속에서는 부가질량을 더하여 계산하였고 ANSYS의 경우, 보 요소에서는 부가 질량의 입력 항에 더하여 계산을 수행할 수 있으나, Solid 45 요소의 경우 부가질량 입력 항이 없으므로 사각보의 경우는 추가질량을 무시하였다. 이 경우는 단순 등가 보에서 얻은 부가질량의 영향을 간접적으로 고려하여 분석을 할 수 있다.

표 1에서 알 수 있는 것과 같이 보의 길이가 300mm일 경우 보 요소의 물에 의한 부가질량의 영향은 약 9% 정도의 진동수 감소를 가져옴을 보인다. ANSYS에 의한 등가 보의 해석의 경우는 식 (2)로부터 구한 해석적 방법의 결과보다는 다소 낮은 진동수를 얻었다. 또 피복관의 영률을 기준으로 하여 구한 단면보의 관성 모멘트를 사용할 경우와 반대로 봉의 관성 모멘트를 이용하여 구한 등가 영률을 사용하여 구한 경우의 진동수는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

사각보와 사각 비틀림 보의 Solid 요소를 사용하여 계산된 ANSYS 해석의 경우 사각 비틀림 보의 고유진동수가 미미할 정도로 크게 나오는 것을 보이며 이는 비틀림에 의한 기하학적 강성증가에 기인한 것으로 보이지만 그 차이는 약 1% 미만임을 보인다. 따라서 사각 비틀림 봉을 모델링하여 해석 할 경우 복잡한 비틀림 형상의 Solid 모델링을 사용하는 것보다는 단순 사각보을 사용하여 해석하는 것이 효과적일 수 있음을 알 수 있다.

사각 비틀림 보의 경우 단면의 각 모서리를 4등분하여 구한 것과 2등분하는 것의 차이는 약 15%의 차이를 보이므로서 비록 해석을 위한 계산 시간이 많이 소요되지만 가급적 작은 요소를 사용하여 해석할 것이 요구된다.

표 2는 보의 길이 400mm의 경우로서 각 각의 해석결과 진동특성은 길이 300mm의 경우와 유사함을 보인다. 여기서 보면 ANSYS 등가보를 사용한 해석의 경우에 있어 피복관

영률로부터 구한 관성 모멘트를 이용한 경우와 제원으로부터 구한 관성 모멘트를 이용하여 구한 영률을 이용할 경우에 진동수 결과는 큰 차이를 보이지 않고 더욱 등가보를 이용한 해석적 방법(식 (2))과 ANSYS 결과는 차이를 보이지 않음으로서 단순한 등가보를 이용한 해석의 타당성을 확인할 수 있다. 또 직선 사각봉과 비틀림 사각봉의 진동수 차이도 무시할 만하여 복잡한 비틀림 사각봉 해석 보다는 단순 직선 사각봉의 해석의 타당성도 확인할 수 있다. 길이 300mm의 경우나 길이 400mm의 경우 모두 사각 단면보의 ANSYS 해석 결과는 단순 보 모델에서 구한 고유진동수보다 낮은 값을 보인다. 이것은 사각 단면보의 ANSYS 해석에서 사용하는 경계조건은 실제와 유사한 3차원 경계조건을 적용하지만 단순 보 요소의 경계조건은 2차원의 변위 경계조건을 적용하는데서 오는 차이라고 생각된다. 3차원 Solid 모델에서는 부가질량의 영향을 무시하였지만 단순 보 요소의 결과를 토대로 볼 때 부가 질량을 무시하고 구한 진동수에 약 10% 정도 낮은 진동수를 보일 것으로 예상되어 운전조건의 공진 고려시 이러한 점을 감안하여 검토가 있어야 할 것으로 생각된다.

표 1. 길이 300mm의 봉에 대한 고유진동수(Hz)

모드수	등가보 (해석적방법) C-C		등가보(ANSYS) C-C: 피복관 E로부터 계산된 I 사용		등가보(ANSYS) C-C: 제원에서 구한 I로부터 등가 E 값 사용		사각보 (LDIV=4)	사 각 비틀림보 LDIV=4,C-C	
	공기중	물속	공기중	물속	공기중	물속	공기중	LDIV=2	LDIV=4
1	143.9	135.1	124.6	116.5	124.6	116.3	96.3	112.3	96.98
2	396.8	370.8	343.5	320.9	343.2	320.7	330.9	378.3	332.0
3	777.9	726.9	673.3	629.1	672.5	628.4	721.6	872.0	872.4
4	1286.0	1201.6	1112.5	1039.4	1110.9	1037.9	1270.6	1669.1	1275.7

표 2. 길이 400mm의 봉에 대한 고유진동수(Hz)

모드수	등가보 (해석적방법) C-C		등가보(ANSYS) C-C: 피복관 E로부터 계산된 I 사용		등가보(ANSYS) C-C: 제원에서 구한 I로부터 등가 E 값 사용		사각보 (Ldiv=4)	사각 비틀림보 LDIV=4,C-C
	공기중	물속	공기중	물속	공기중	물속	공기중	LDIV=4
1	72.1	67.4	72.1	67.4	72.1	67.4	57.7	58.1
2	198.8	185.7	198.8	185.7	198.7	185.7	194.2	195.3
3	389.7	364.1	389.6	363.9	389.5	363.9	420.5	422.4
4	644.2	601.9	643.8	601.5	643.5	601.3	742.6	746.5

4. 결 론

통상의 원형단면 이 외의 가상 사각 비틀림봉을 갖는 연료봉의 경우에 대한 고유진동 특성을 해석하고 이러한 봉을 단순 보로 모델링하여 해석할 경우의 타당성을 검토하였다. 단순 사각봉을 이용하여 해석할 경우와 비틀림 사각봉을 사용하여 해석할 경우의 진동수 결과를 비교하여 해석결과에 큰 차이가 없음을 확인하고 또한 이러한 제원의 사각봉에 대하여 보다 단순한 등가 보 모델을 사용하여 해석할 수 있음을 보였다. 또 사각 단면봉의 비틀림으로 인한 사각 봉의 강성증가가 예상되지만 이의 영향은 1% 미만의 무시할 만 한 것으로 나타났다. 따라서 이상의 결과로부터 복잡한 사각 비틀림봉의 실제 모델을 사용하여 해석하기보다는 단순 보 요소를 사용하여 해석하는 것이 보다 효율적일 수 있음을 알 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음

(This project has been carried out under the nuclear R&D program by MOST)

참고문헌

1. 임정식, 구양현, 윤경호, 손동성, 경수로 핵연료봉 노내 건전성 해석, 한국소음진동공학회 1997년도 추계학술대회논문집, pp. 177-183
2. 강흥석, 윤경호, 송기남, 전태현, 정연호, 핵연료봉 내압 및 지지조건의 변화가 핵연료봉의 진동모드에 미치는 영향, 한국원자력학회 1998년 춘계 학술대회논문집, pp. 297-302
3. 강흥석, 송기남, 윤경호, 정연호, 임정식, 회전 및 굽힘 스프링 기구로 연속 지지된 핵연료봉의 진동 연구, 한국소음진동공학회 1998년도 춘계학술대회 논문집, pp454-460
4. 임정식, 연료봉 고유진동해석 프로그램 BEVIRA의 개발 및 응용, KAERI/TR-1168/98
5. ANSYS Inc., ANSYS User's Manual, Release 5.6, 1999
6 W.C.Young, ROARK's Formulars for Sttress & Strain, 6th ed. Mcgraw Hill Book Co.
7 R.D.Blevins, Formulars for Natural Frequencies and Mode Shapes, Van Nostrand Reinhold Co.

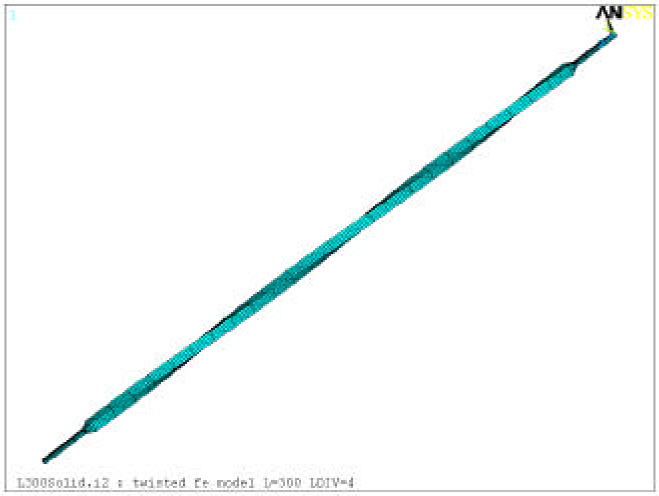

그림 1 Finite Element Model of the Twisted Rod

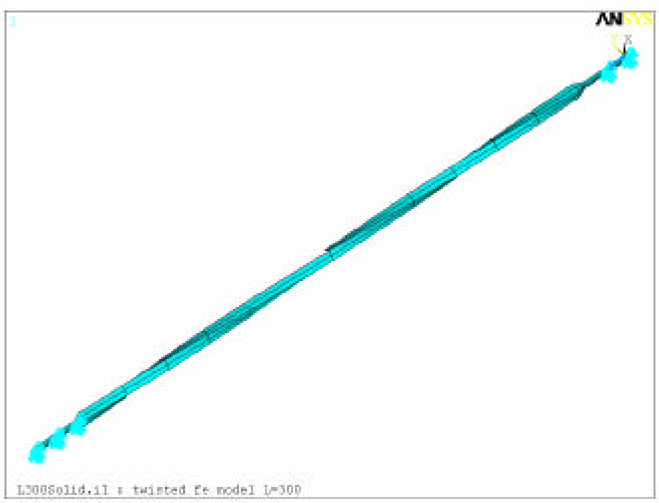

그림 2 Boundary Condition of the Twisted Rod

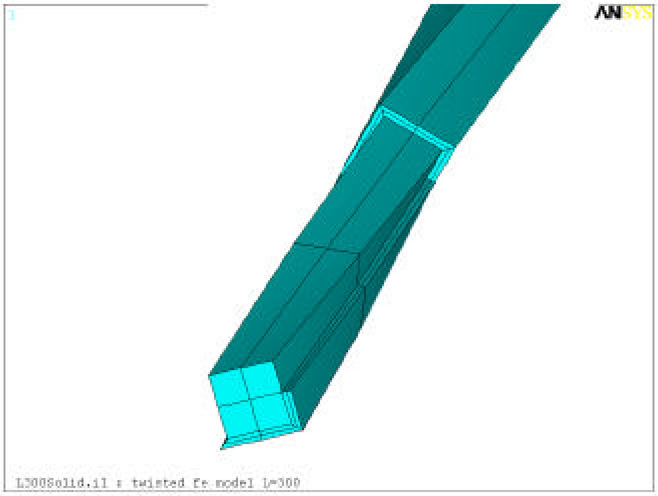

그림 3 Element View of the Twisted Rod(LDIV=2)

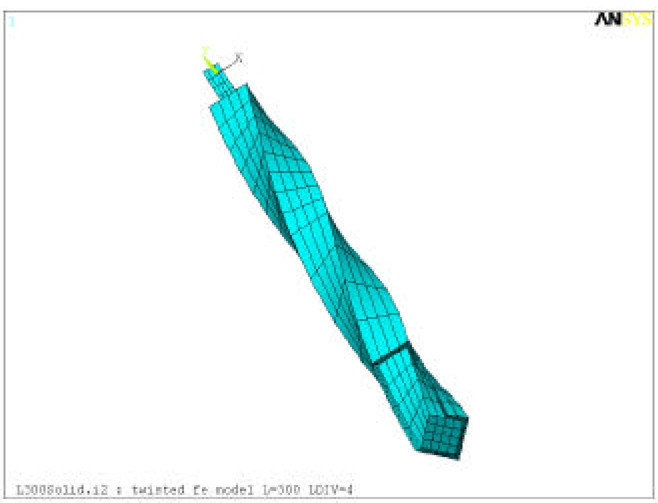

그림 4 Element View of the Twisted Rod(LDIV=4)

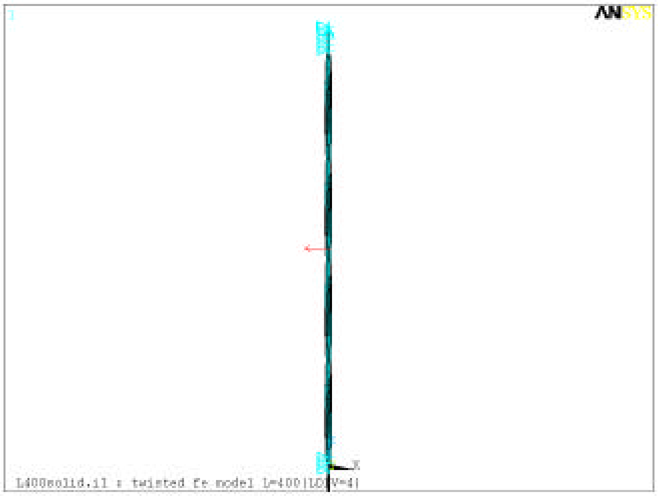

그림 5 Load and Boundary Condition of the Twisted Rod

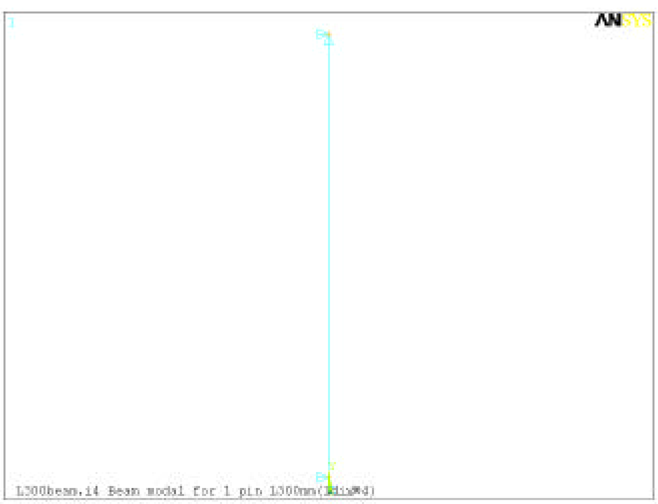

그림 6 FEM of the Beam Model

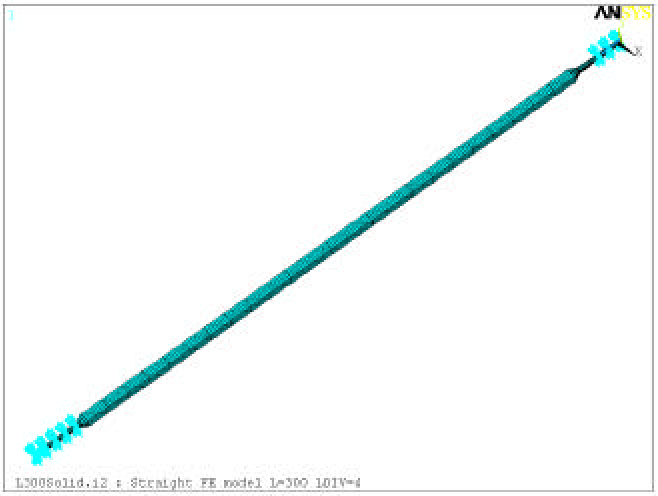

그림 7 Boundary Condition of the Straight Rod(LDIV=4)

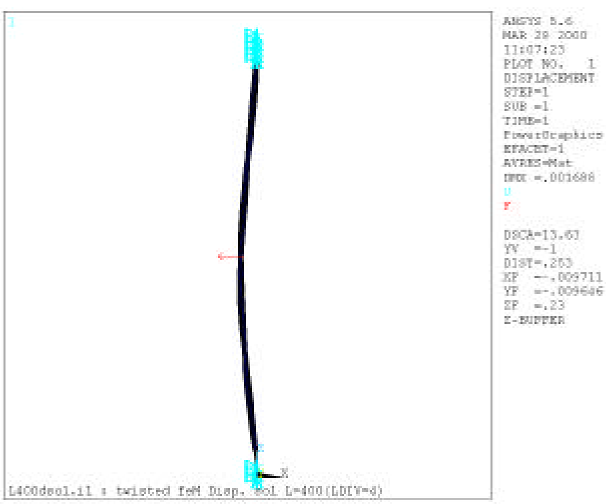

그림 8 Displacement of the Twisted Rod

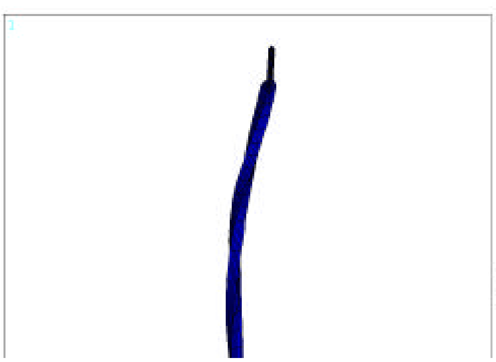

그림 9 Mode Shape 1

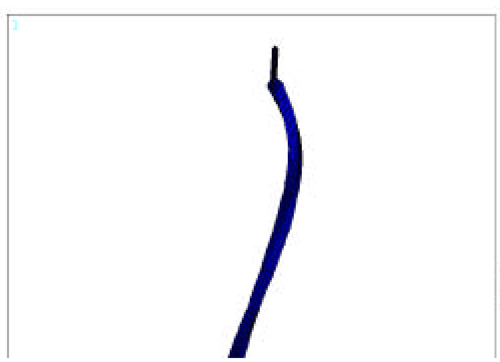

그림 10 Mode Shape 2

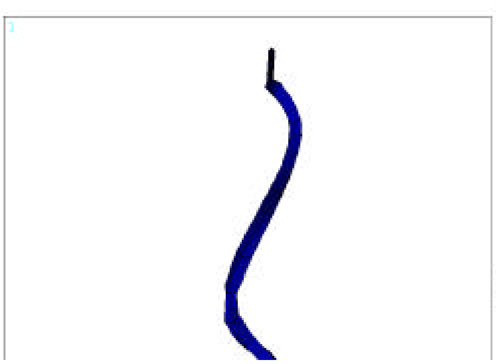

그림 11 Mode Shape 3

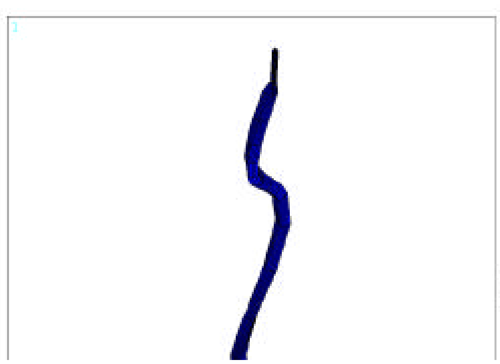

그림 12 Mode Shape 4

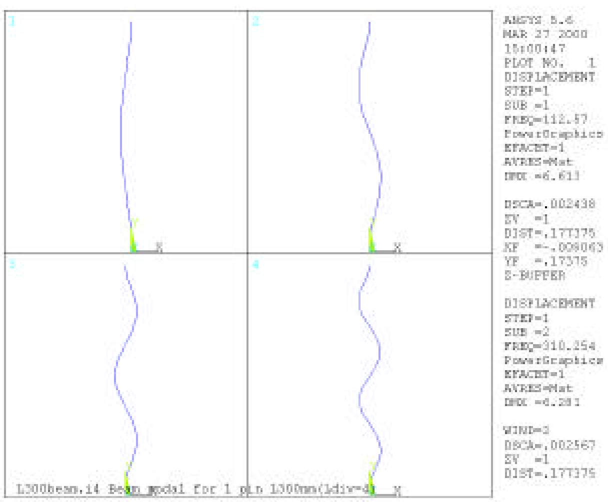

그림 13 Mode Shapes of the Beam Model