

원자로내 핵연료봉 제거 로봇 구조물의 휨변형구조해석 Structural Deflection Analysis of Robot Manipulator for Removing Nuclear Fuel Rod in Nuclear Reactor Vessel

권영주* 김재희**
Kwon, Young-Joo Kim, Jae-Hee

ABSTRACT

In this study, the structural deflection analysis of robot manipulator for removing nuclear fuel rod from nuclear reactor vessel is performed by using general purpose finite element code (ANSYS). The structural deflection analysis results reported in this study is very required for the accurate design of robot system. The structural deflection analysis for the manipulator's structural status at which the gripper grasps and draws up the nuclear fuel rod is done. For this beginning structural status of robot manipulator's removing motion, the reaction forces at each joint have static maximum values as reported in the reference (6), and so these forces may cause the maximum deflection of robot structure. The structural deflection analysis is performed for selected four working cases of the proposed structural model and results on deformation, stress for the manipulator's solid body and the deflection at the end of robot manipulator's gripper are calculated. And further, the same analysis is performed for the slenderer manipulator with cross section reduced by one-fifth of each side length of proposed model. The analysis is performed not only for the nuclear fuel rod with weight load of 300kg but also for nuclear fuel rods with weight loads of 100kg, 200kg, 400kg and 500kg.

The static structural deflection analysis results show that the deflection value increases as the load increases and the largest value (corresponding to the weight load of 500kg in case 1) is much smaller than the gap distance between nuclear fuel rods, but the largest value for the slenderer manipulator is almost as large as the gap distance. Hence, conclusively, the proposed manipulator's structural model is acceptably safe for mechanical design of robot system.

1. 서 론

본 논문에서는 현재 한국원자력연구소에서 2010년 설계완료를 목표로 추진하고 있는 한국형 고속 증식로 (Fast Breeder Reactor) 개발에서 중요한 핵심기술의 하나인 원자로내의 핵연료봉 제거 로봇매니플레이터의 휨변형구조해석을 수행하였다. 로봇 매니플레이터의 휨변형 구조해석은 원자로의 안전설계를 위하여 매우 중요하다. 정확한 휨변형 구조해석을 통하여 로봇 매니플레이터가 핵연료봉을 제거할 시 핵연료봉들 사이의 충돌과 같은 안전사고를 미리 예방할 수 있기 때문이다. 유사한 구조물에 대한 유사한 해석(정확한 정적 구조해석이 아닌 해석)은 어느정도 문헌⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾에 존재하지만 본 논문에서 취급한 원자로내 핵연료

* 홍익대학교 기계설계학과

** 한국 원자력 연구소

봉 제거 목적의 로봇매니플레이터 구조물에 대한 구조해석은 국내에서는 지금까지 거의 취급되지 않았다. 본 논문에서는 300kg의 핵연료봉무게 하중에 의한 매니플레이터 구조물의 휨변형구조해석을 수행했을 뿐만 아니라, 제시된 모델(속이 차있는 10cm×20cm의 직사각형 단면모델)의 핵연료봉 제거 로봇매니플레이터로서의 구조적 안전성을 비교하기 위하여 매니플레이터 각 링크단면의 가로, 세로의 크기를 4/5로 축소한 매니플레이터구조물에 대한 정적휨변형구조해석도 수행하였다. 또한 핵연료봉의 무게를 300kg뿐만 아니라, 100kg, 200kg, 400kg, 500kg으로 바꾸어서 해석을 수행하여 핵연료봉무게의 변화에 따른 매니플레이터 휨변형처짐의 변화를 구하였다. 제안된 구조물이 Fig. 1에 표시된 것과 같이 비록 아주 복잡한 형상은 아니지만 정적휨변형상태를 지배하는 구조역학 평형방정식에 대하여 주어진 경계조건과 함께 수학적인 삼차원 해석을 수행하는 것은 매우 비경제적이며 시간낭비이다. 또한 각 매니플레이터링크들을 일차원 봉(bar) 및 보(beam)로 단순화하여 푸는 것은 정확한 해석을 요하는 핵연료봉 제거 로봇 매니플레이터의 정밀한 설계를 위하여 바람직하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 로봇매니플레이터의 정밀한 정적휨변형구조해석을 위해서 범용유한요소해석코드인 ANSYS를 이용하여 로봇매니플레이터의 그리퍼가 핵연료봉을 붙잡아 들어올리는 순간의 위치에 있는 로봇매니플레이터구조물상태에 대한 삼차원 휨변형구조해석을 수행하여 이 삼차원 고체 구조물의 변형 및 내부응력상태, 그리고 그리퍼 끝단에서의 최대 휨처짐양을 구하였다. 이를 위하여 제3절에서 설명되었듯이 핵연료봉 제거 로봇매니플레이터의 휨변형구조해석에 적합한 본 논문고유의 해석모델링 및 변위/하중구속조건을 제시하였다.

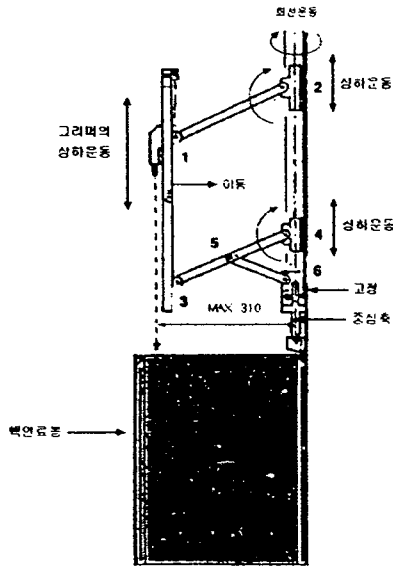


Fig. 1 Robot Manipulator Removing Nuclear Fuel Rod (1~6 : Joint Positions)

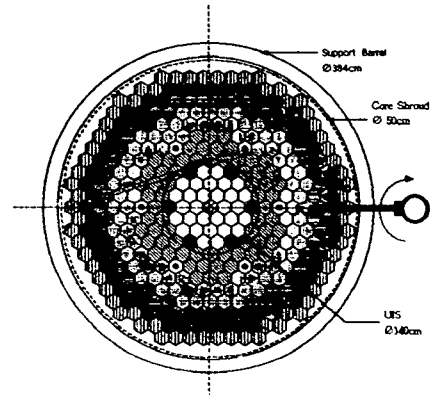


Fig. 2 Top View of the Nuclear Fuel Assembly

2. 문제의 개요

해석하고자 하는 원자로내의 핵연료봉 제거 로봇매니플레이터의 형상은 Fig. 1에 주어져 있다. 단지, 핵연료봉 제거 로봇매니플레이터의 최대 처짐을 구하기 위하여 핵연료봉들의 위치가 중심축에 대하여 대칭구조

(Fig. 2)이기 때문에 모든 핵연료봉 위치에 대하여 또 각 핵연료봉 교환동작 모두에 대하여 정적 휨변형구조 해석을 수행하는 대신 참고문헌 (6)에서 제시한 다음 네가지 해석모델경우에 대하여, 특히 각 네가지 해석모델 경우의 로봇매니플레이터 핵연료봉 제거 동작중 매니플레이터의 그리퍼가 핵연료봉을 들어올리는 순간의 매니플레이터 구조상태에 대한 정적 휨변형구조해석을 수행하였다.

본 논문에서 제안한 해석모델에 대하여 기술하면, 첫 번째는 매니플레이터의 중심에서 연료봉까지의 거리 (L)가 351.9cm이고, 중심축과 이루는 각도(θ)가 0° 인 모델이다. 두 번째는 거리가 321.3cm이고, 각도가 21.78° 인 모델이다. 세 번째는 거리가 198.8cm이고, 각도가 27.8° 인 모델이다. 네 번째는 거리가 119.5cm이고, 각도가 33.7° 인 모델이다.

이와같은 모델에 대한 매니플레이터의 그리퍼가 핵연료봉을 들어올리는 순간에 대한 휨변형구조해석의 타당성은 참고문헌 (6)의 동특성해석결과 얻어진 매니플레이터 링크 각 절점에서의 반력상태가 그리퍼가 핵연료봉을 들어올리는 순간부터 완전히 들어올려 매니플레이터의 중심축으로 움직이기 시작하는 순간까지에서 최대값을 가지며 또 크기가 일정한 정적인 하중상태를 유지한다는 결론에 근거를 두고 있다. 또한, 본 논문에서는 적용된 하중에 대하여 로봇매니플레이터 고체구조물이 미소변형을 일으킨다고 가정하고 해석을 수행하였다.

3. 매니플레이터의 휨변형 구조해석

3.1 해석 방법

본 논문에서는 범용유한요소해석코드의 하나인 ANSYS를 이용하여 휨변형구조해석을 수행하였다. ANSYS를 이용하여 구조해석을 수행하는 방법⁽⁶⁾은 이미 일반화 되어 있기 때문에 본 논문에서는 그 기술을 생략한다.

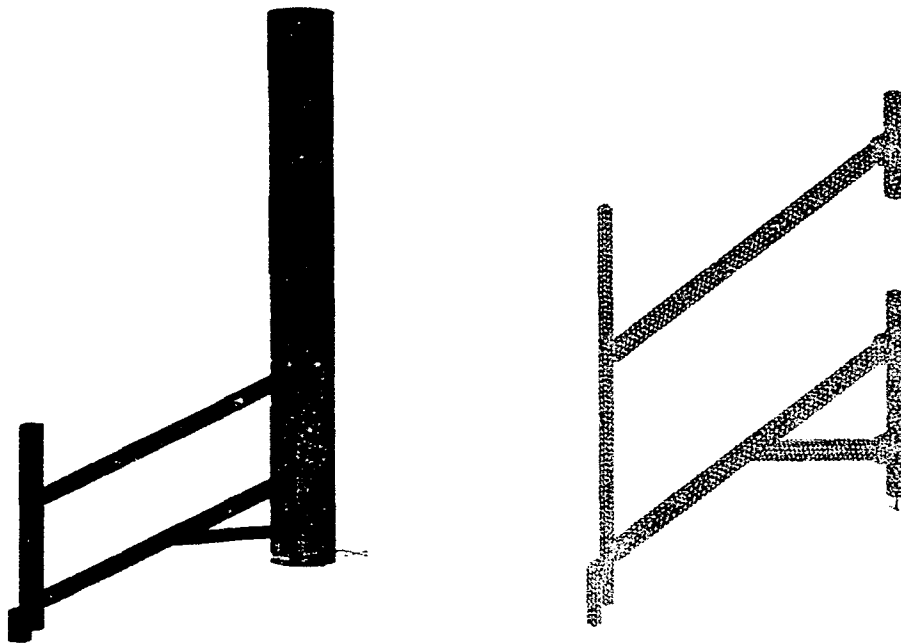


Fig. 3 Three Dimensional Solid Model and FEM Model of Manipulator

3.2 해석

3.2.1 해석 모델링

본 논문에서는 ANSYS의 그래픽기능을 이용하여 Fig. 1의 로봇매니플레이터 구조에 대한 삼차원고체모델을 생성하였다(Fig. 3 참조). 이 삼차원 고체모델을 이용하여 유한요소모델(FEM Model)을 만들었다. 유한요소모델생성시 유한요소형(element type)을 10개의 절점(node)을 갖는 삼차원사면체형(tetrahedron type, solid92 type)을 택하였다. 따라서 유한요소망은 ANSYS의 자동유한요소생성기능을 이용하여 자동생성하였다(Fig. 3참조). 그리고 로봇 구조물을 구성하고 있는 고체물질인 Stainless Steel에 대한 물성치는 SI단위로 밀도(ρ) = 7857kg/m^3 , 영률(E) = $1.9992E+11\text{Pa}$ 를 사용하였다.

3.2.2 변위 및 외력 구속조건

매니플레이터의 정적 휨변형구조해석을 수행하기 위해서는 적절한 변위 경계조건 및 외력 구속조건이 필요하다. 매니플레이터를 지지하고 있는 회전 중심기둥은 자체적으로 회전하면서 매니플레이터를 지지해야하므로 휘거나 구조변형이 일어나지 않아야 한다. 매니플레이터가 최대 휨변형을 일으키는 순간은 매니플레이터의 그리퍼가 핵연료봉을 붙잡아 들어올리는 정적 구조상태이기 때문에 회전중심기둥안에서 움직이는 세 개의 슬라이더도 회전기둥안에서 정지된 상태로 있어야 한다. 따라서 회전기둥안에 있는 매니플레이터의 세 개 슬라이더가 회전기둥과 접하고 있는 모든 면에서의 변위값은 0이되도록 구속되어야 한다(Fig. 4 참조). 하중은 핵연료봉을 붙잡고 있는 그리퍼의 끝부분에 분포하중으로 적용시켰다(Fig. 4참조). 이때 하중의 크기를 100kg에서부터 500kg까지 100kg씩 증가시켜 적용하였다

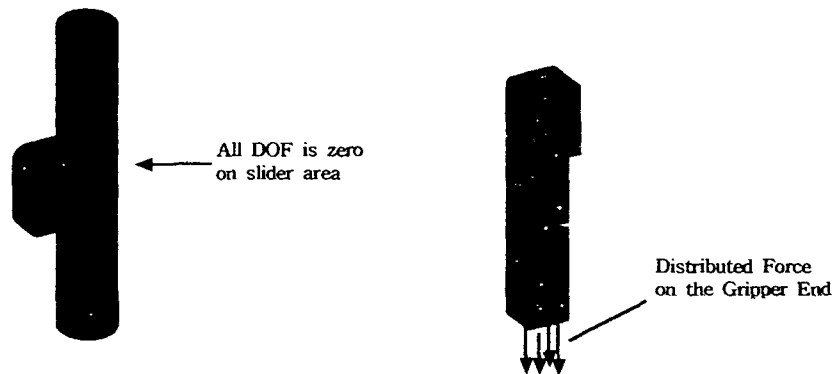


Fig. 4 Displacement Constraint Condition on Sliders and Force Condition on Gripper End

4. 해석결과 및 검토

ANSYS를 이용한 로봇매니플레이터에 대한 정적 휨변형구조해석결과 우선 해석을 수행한 네가지 해석모델중 첫 번째 해석모델의 경우 핵연료봉의 무게에 의해 발생한 휨변형을 관찰하면 Fig. 1에 표시된 관절 1 과 2를 연결하는 링크와 관절3 과 4를 연결하는 링크의 끝단에 많은 휨변형이 발생하여 결과적으로 관절 1 과 3을 연결하는 링크 끝에 붙어있는 그리퍼 끝단에 최대처짐이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 관절1 과 3을 연결하는 링크도 약간 휨변형이 발생한 것을 알 수있다(Fig. 5참조). 최대처짐이 발생할 때 매니플레이터 고체구조내의 응력분포도 역시 구하였다(Fig. 5참조). 이에 의하면 관절5에서 최대응력이 발생하여 응력집중(stress concentration)현상이 발생함을 알 수 있다. 이때 그리퍼 끝단의 휨변형크기(처짐양)는 그리퍼 끝단에 있는 모든 절점의 변형도를 구하여 평균값을 취하여 구하였다(Fig. 6 (a)참조). 같은 방법으로 다

큰 해석모델의 경우(두번째, 세번째, 네번째 경우)들에 대해서도 휨변형크기를 구하였다(Fig. 6 (b)-(d)참조). 링크단면의 가로, 세로의 길이가 4/5로 축소된 매니플레이터에 대해서도 같은 해석을 수행하여 그리퍼 끝단의 휨변형크기(치짐양)를 구하였다(Fig. 7(a)-(b)참조). 이 값을 비교하면 제안된 모델보다 휨변형크기(치짐양)가 약 1.5~1.6배 더 크다는 것을 알 수 있다. 지금까지의 해석결과를 검토해보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째로 그리퍼에 적용된 하중의 크기를 증가시킴에 따라 매니플레이터의 휨변형크기도 비례하여 증가하였다. 둘째로 제안된 네가지 해석모델경우에 대한 휨변형크기를 비교해보면 첫 번째 해석모델경우가 제일 큰 휨변형크기를 가지며 중심축에 가까운 핵연료봉을 제거하는 해석모델일수록 휨변형크기가 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 그리퍼가 중심축에 가까운 모델일수록 매니플레이터는 구조적으로 견고해지는 것으로 생각된다. 셋째로 모든 경우에 있어서 관절5에 최대응력(응력집중현상)이 발생하여 이부분이 구조적으로 취약한 것으로 나타났다. 넷째로 링크단면의 크기가 감소된 매니플레이터의 휨변형크기는 제안된 모델보다 훨씬 증가하였다. 이는 제안된 모델보다 매니플레이터의 링크두께를 얇게하면 구조적으로 안전에 문제가 있음이 예상된다.

결론적으로 본 연구를 통하여 구조해석을 수행한 제안된 로봇매니플레이터 모델이 링크의 단면이 감소된 매니플레이터와 비교했을 때 비교적 정성적으로 안전한 것으로 생각되어지며, 또 제일 큰 휨변형크기가 1.7mm(핵연료봉하중이 500kg인 첫 번째 해석모델 경우)인 것으로 보아 핵연료봉사이의 간극이 3mm인 것을 감안할 때 정량적으로도 제어 가능한 안전한 구조물로 결론지어진다.

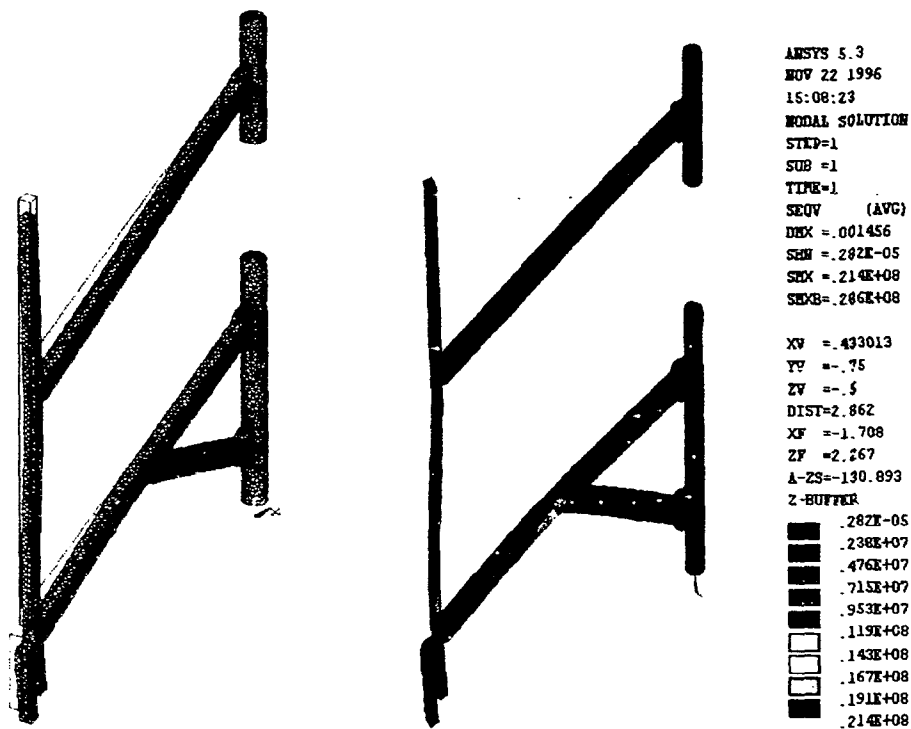
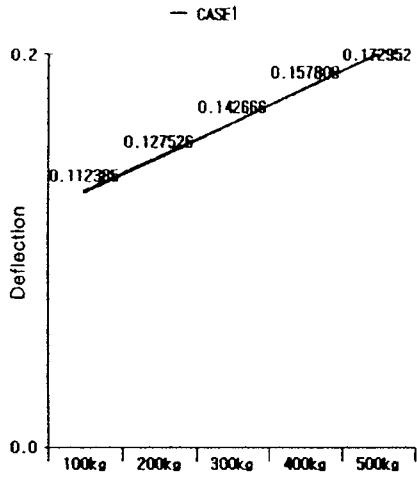
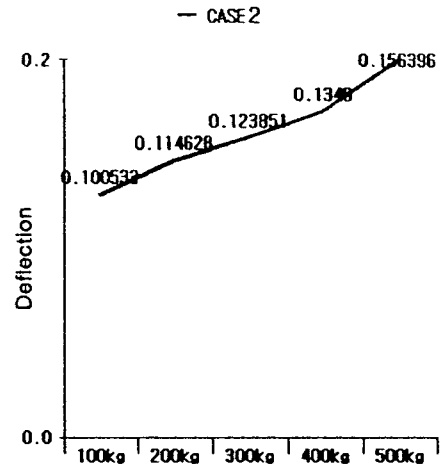


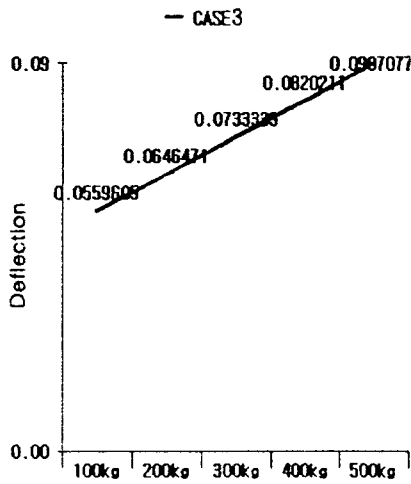
Fig. 5 Deflected Shape and Stress Contour for Solid Structure of Manipulator for Case1



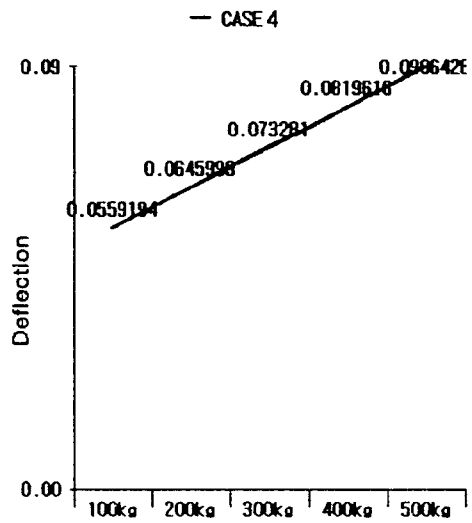
(a) Case 1 단위(cm)



(b) Case 2 단위(cm)



(c) Case 3 단위(cm)



(d) Case 4 단위(cm)

Fig. 6 Deflection at the end of Robot Manipulator's Gripper

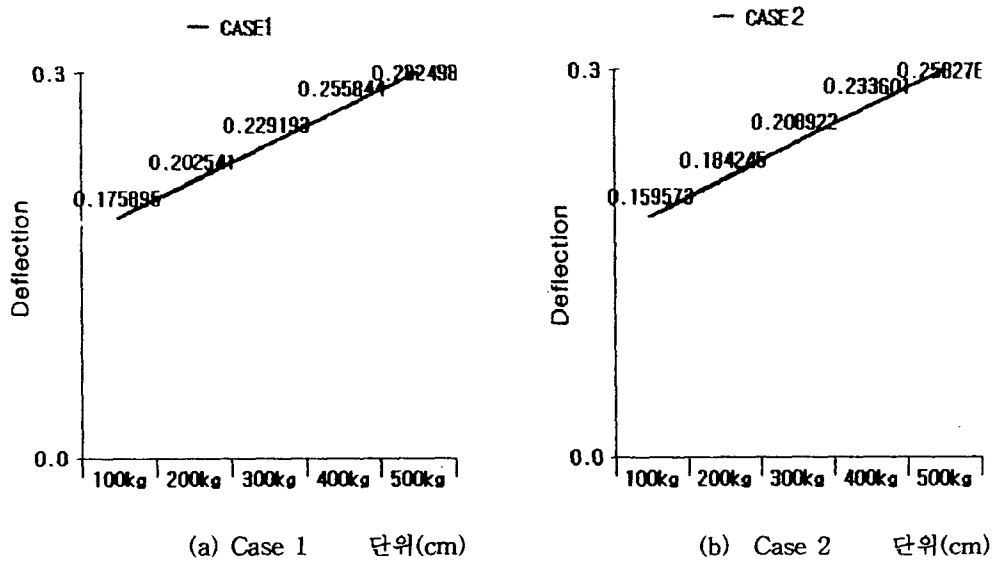


Fig. 7 Deflection at the end of Gripper of Robot Manipulator with reduced cross section

5. 참고문헌

1. Sunda. W. and Dubowsky. S., "The Application of Finite Element Methods to the Dynamic Analysis of Flexible Spatial and Co-planar Linkage Systems," ASME J. Mech. Design. Vol. 103, pp. 643-651, 1981.
2. Usoro. P.B., Nadira. R. and Mahil. S. S., "A Finite Element/Lagrange Approach to Modeling Light Weight Flexible Manipulatoes," ASME J. Dynamic Systems, Measurement and Control. Vol. 108, pp. 198-205, 1986
3. Simo, J. C. and Vu-Quoc, L., "On the Dynamics of Flexible Beams under Large Overall Motions- the Planar Case: Part 1 and 2," ASME J. Appl. Mech, Vol. 53, pp. 849-863, 1986.
4. Avello, A, DE Jalon, J. G., and Bayo, E., "Dynamics of Flexible Multibody Systems Using Cartesian Coordinates and Large Displacement Theory," Inter. J. Numer. Meth. Engng, Vol.32, pp. 1543-1563, 1991.
5. ANSYS User's Manual, Version 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., 1997
6. 최준규, "MCAE를 활용한 산업용로봇의 구조해석," 석사학위논문, 홍익대학교, 1999.