

다중 구조체의 형태를 가지는 우주비행체의 제어설계

김진철

항공우주연구소 위성본체연구실

An Integrated Control and Modeling of Multi-Body Space Structures

Zeen-Chul Kim

Satellite Bus System Department
Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

An integrated control design and modeling method of multi-body space structures is presented as a tool to control and describe the large rotational motions of the space structures. The structures represented with three separated substructures have independent control systems but linked with joints interacting the dynamic motions of the substructures. The effect of the structural flexibility to the control performance was analyzed and the simulation results showed that effectiveness of the designed control logic in controlling the motions of the multi-body space structures.

1. 서론

지구의 궤도를 비행하는 물체는 설계 목적에 따라 궤도의 조정이나, 자세의 조종을 통하여 지구를 향하는 지향성을 유지하거나 주어진 범위 안에서 궤도를 선회하게 된다. 우주비행체의 형태가 1960년대의 초기 개발단계에서와 같이 소형이며 강체특성을 주요한 지배요소로 가질 때는 제어설계도 비교적 단순하게 수행되었으나 기술개발과 더불어 요구 목적에 따라 점점 그 형태가 대형화 되어 가고 있으며 단순한 한개 구조체로 특성 지울수 없는 복잡한 형태의 구조체가 나타나게 된다. (1) 간단한 예로 인공위성의 태양전지판 구조체가 크기가 증가됨에 따라 그 구조적 특성이 단순한 강체 특성만으로는 인공위성 제어설계에 사용될 수 없으며 구조적 특성의 기계적 구동장치에 의해 그 자체의 제어 시스템을 구성하게 되므로 위성본체와 별도의 독립 구조체를 형성하며 전 인공위성은 이러한 각각의 구조체가 결합된 다중 구조체를 형성하게 된다. 따라서 대형급의 인공위성을 비롯하여 우주정거장등과 같은 우주구조물등의 제어설계에 있어서 다중 구조체의 형태를 고려한 제어이론의 확립과 아울러 다중 구조체의 모델링 기법 개발이 주요 연구과제로 수행되고 있으며 (2) 본 연구의 주요 내용은 현재 미국에서 주도하여 개발되고 있는 우주정거장의 제어설계를 위한 연구과제이다.

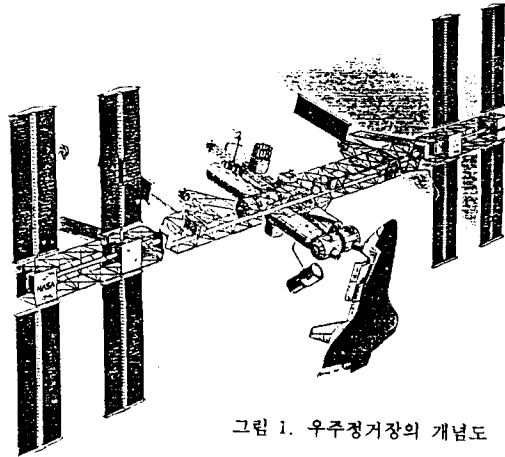


그림 1. 우주정거장의 개념도

그림 1에 보여지는 이러한 모델은 중심부에 주요기기를 장착하고 있는 본체 부분과 본체 부분의 좌우로 트러스 형태의 구조물이 외팔보 형태로 연결되어 있으며 좌우의 트러스 구조물에는 태양전지판이 부착되어 있어 트러스 구조물 형태와 본체의 종합으로 전 시스템을 구성하며 이러한 전시스템의 제어를 위하여 본체에 자세제어 시스템이 있으며 또한 트러스 구조물과 본체 연결부위에 트러스 구조물을 회전시키는 구동장치와 제어시스템이 있다.

이렇게 3개의 독립된 구조체는 각각의 제어설계에 의한 특성을 가지면서 동시에 카플링(Coupling)에 의해 상호 간섭작용을 일으키며 전체적인 성능 결정에 서로 영향을 미치게 된다. 본연구에서는 각각의 독립된 제어 회로설계에 의한 제어 계수의 결정과 종합적인 시스템의 구성과 성능을 시뮬레이션(Simulation)을 통하여 3개의 독립된 제어의 상호 작용성에 대한 연구와 구조체의 연성특성에 대한 연구가 수행되었다.

2. 다중구조체의 제어회로

다중구조 제어회로는 동적특성을 가지는 몸체부분과 폐회로를 구성하는 피드백(Feedback) 구성과 제어 토크를 산출하는 제어상수 설계요소로 나눈다. 제어회로를 구성하는데 있어서 일차적인 과정으로 제어 개념을 도식화한 블록 다이어그램(Block Diagram)을 설정하며 제어하고자 하는 실제 시스템의 모델이 적절히 나타내어졌는지 검토가 요구된다. 이 과정에서 몇가지 가정이 설정되는데 각 구조체의 모델은 강성모델과 연성모델로 나누어지며 또한 각 모델은 선형화된다. 세부설계에서는 제어계의 구동장치를 나타내는 구동계의 전달함수가 1로 가정되었다. 기타 감지기와 주위의 잡음(Noise)은 무시되었으며 디지털타이제이션(Digitization)설계도 생략되었다. 이러한 가정들은 기본 설계 개념이 검토된후 추가적으로 검토되며 그 영향이 무시될 수 없을 경우는 제어 회로 설계의 주요 특성으로 고려되어야 하며 이러한 방법은 과거 구조체의 연성 특성을 무시하여 설계되었던 시기에서 지금은 반드시 검토되어야할 사항으로 고려되는 것과 같다. (3) 위의 가정에 의해 작성된 블록 다이어그램(Block Diagram)이 그림 2에 보여지고 있으며 그림 2의 블록 다이어그램(Block Diagram)의 핵심부분은 3개의 구조체로 형성된 다중 구조체를 나타내는 사각 점선안의 몸체 1, 2, 3. (Body 1, 2, 3)과 연결 부위 1, 2 블록(Joint 1, 2, Block)이다. 몸체 1 (Body 1)과 몸체 2 (Body 2)는 트러스 구조물을 나타내며 몸체 2 (Body 2)는 본체 구조물을 나타낸다. 이러한 구조체는 강성 특성과 아울러 연성특성도 가지는 구조 모델에 의해 표현되며 연결부위 1 (Joint 1)과 연결부위 2 (Joint 2)는 다중구조체를 연결시켜 주는 기능을 수행하는 구성요소들이다.

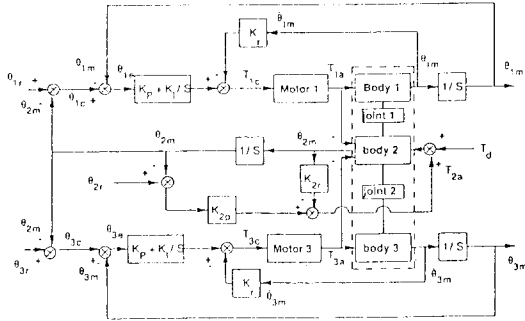


그림 2. 다중구조체 제어설계 회로도

연결부위(Joint) 구성요소들은 자체적으로 동적 특성이 없으나 자유도를 제한하거나 두 구조체의 연결 경계조건을 만족시켜주는 좌표 변환 기능을 담당하는 요소이다. 이 다중구조체의 입력은 두개의 모터에 의해서 토크로 입력되며 입력되는 토크는 몸체 1 (Body 1)에 입력되는 T_{1a} 와 반작용력을 나타내는 $-T_{1a}$ 가 몸체 2 (Body 2)에 입력되며 유사한 형태로 몸체 3 (Body 3)에 T_{3a} , 몸체 2 (Body 2)에 $-T_{3a}$ 가 작용한다. 몸체 2 (Body 2)에는 또한 자체의 구동장치와 제어회로에 의해서 생성되는 제어토크와 외부에서 발생하는 교란토크가 입력으로 작용하게 된다.

이러한 다중구조체의 제어회로가 구성된후 각 구성요소들의 특성을 모델링하는 세부모델링이 수행되며 이러한 모델링 과정이 다음에 보여진다.

3. 다중구조체 모델링

우주비행체의 구조 모델링은 일반적으로 유한요소법으로 처리되는 모델링에 의해 구조적 물성치로서 질량과 관성값을 동적 특성자료로 사용하며 구조의 고유진동수와 고유모드를 찾아내어 이러한 구조자료를 기본으로하여 구조체의 물리적 형상을 수학적 모델로 변환시키게 된다. 이러한 모델링 과정에서 유의하여야 할 점은 모델의 오차인데 이러한 모델링 과정에서 오차는 구조체가 복합체이며 크기가 증가됨에 따라 그 모델링 오차도 증가된다. 이러한 모델링 오차에 대한 실험적 규명기술도 활발히 개발되고 있으며 (4) 통상 10%의 오차를 감안한다

본 연구에서는 우주정거장의 그림 1에서 보여지는 스페이스 스테이션 프리덤(Space Station Freedom)의 구조체를 모델로 하였으며 이 우주정거장의 중앙부위에 실험실과 인간거주실등의 원통형 구조물이 밀집해 있으며 이를 중심으로 좌우로 길게 트러스(Truss) 구조물이 연결되어 있다. 이러한 트러스 구조물은 3개의 부분으로 되어있으며 중앙의 주 구조물과 좌우의 트러스 구조물은 회전 구동장치 구조물로 연결되어 있다. 좌우트러스에는 각각 2개씩의 태양전지판이 상하로 연결되어 있으며 구동장치에 의해 태양을 향해 회전하게 되어 있다.

이러한 구조체의 특징은 각각의 기본 트러스 바(Truss Bar)가 손쉽게 연결되도록 특수 설계되어 있어 우주인에 의해 조립이 가능하게 되어 있으며 가볍고 고강도의 재료로 그래파이트/에폭시(Graphite/Epoxy) 튜브재질에 단열 코우팅(Coating)과 포일(Foil)을 입혀서 사용하고 있다.

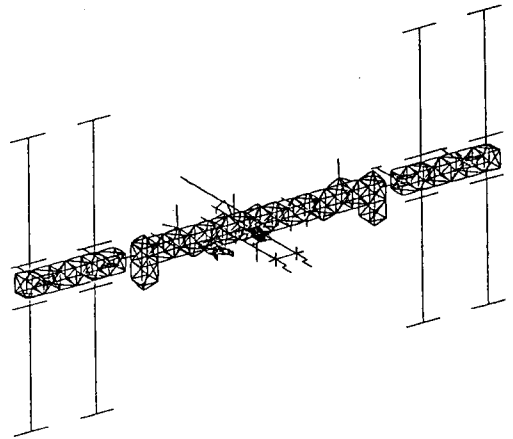


그림 3. Space Station Freedom 우주정거장의 유한요소 모델

그림 3은 그림 1의 구조모형을 유한요소 해석 프로그램인 NASTRAN을 사용하여 작성된 유한요소 모델을 보여주고 있으며 중앙부위의 실험실등은 집중질량 요소 모델로 태양전지판은 외팔보 요소 모델로 처리되었음을 알 수 있다. 좌우 끝부분의 트러스 (Truss) 구조물의 연결부위는 알파 조인트 (Alpha Joint) 라는 회전구동장치로 연결되어 있으며 이에 대한 세부 연결구조물의 형태가 그림 4에 나타나 있다.

	MB-1	MB-2	MTC	PHASE 1
MASS - (LBM)	25458	50205	173000	427000
CENTER OF MASS - (IN)				
X	-27	-43	-99	-198
Y	1038	-72	-5	-220
Z	18	+21	50	120
MOMENTS OF INERTIA (SLUG-FT ²)				
Ixx	3.63E+6	19.8E+6	31.1E+6	76.9E+6
Iyy	.452E+6	.918E+6	3.89E+6	16.5E+6
Izz	3.38E+6	19.2E+6	30.9E+6	82.7E+6

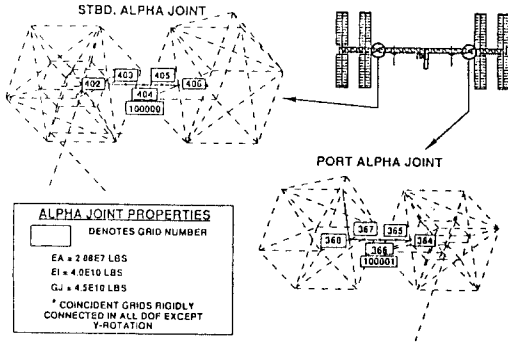


그림 4. ALPHA JOINT 연결구조 모델

NASTRAN에 의해 생성된 유한요소 모델을 이용하여 강체물성치 자료와 연계특성 자료가 산출되는데 표1은 NASTRAN에 의해 계산된 좌우 트러스 (Truss)의 강체물성치 자료로 질량과 질량중심, 각축의 관성을 나타내었다.

그림 5는 구조물의 대표적인 토션 (Torsion)모드로서 56번째 모드를 보여주고 있다. 이 그림에서 보여지듯 태양전지판 구조물의 모드형태와 양 끝의 트러스(Truss) 구조물의 회전모드가 복합되어 있으며 회전운동에 대한 영향력이 다른 모드에 비해 큼을 알 수 있다. 구조체의 총 모드는 약 100개정도까지 산출되었다. 이러한 구조 모드는 적절한 선정이 요구되며 많은 모드를 해석에 사용하면 정확성은 향상되나 계산시간의 증가로 실질적인 결과가 나오기가 어렵다.

선정되는 모드는 계산능력에 따라 한정되어지며 본과제에서는 5개의 모드가 선정되었다. 이러한 모델링에 의해 산출된 강체자료와 연계자료가 그림 2에 나와 있는 제어 블록 다이어그램 (Block Diagram)의 물체 블록 (Block)요소에 포함되게 된다.

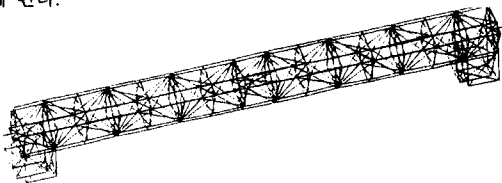


그림 5. 우주정거장 중앙 구조물의 56번째 진동모드

표1. NASTRAN에 의해 산출된 우주 정거장들의 구조 물성치

4. 제어 설계

제어설계는 각 물체에 작용하는 입력이 3절에서 기술된 물체 모델링에 의한 물체 운동특성을 통하여 나타나는 출력 (여기서는 회전각과 각속도)을 조정하는데 있으며 회전각과 각속도를 피드백 (Feedback) 시켜서 기준치와 비교한후 그 차이를 보정하기 위하여 제어상수를 설정하여 보정하는 토크를 생성하게 된다. 다중 구조체는 각각 독립된 구조체로 형성되어 있으며 동시에 상호 간섭에 의한 영향이 있기 때문에 각 물체의 회전각은 입력으로 연결되는 두 물체에 동시에 작용하게 된다. 제어설계의 기본 로직 (Logic)으로 회전하는 좌우 트러스 (Truss) 구조물에 대한 제어설계는 PID제어방식을 사용하고 중앙 주 구조물은 PD제어방식을 사용하였다. PD제어방식에 의해 속도 댐핑을 증가시키고 오차각을 줄이는 특성을 얻을 수 있으며 적분 제어방식으로 구조물의 연성특성에 의한 영향을 감소시키고자 하였다.

이러한 제어방식은 현대적인 최적제어 설계방식⁽⁵⁾등이 다중 구조체에 응용되는데에는 아직까지 이론적 문제점이 따름을 감안하여 비록 고전적 형태의 방식이나 우주정거장의 제어설계에 사용되는 실용적인 방식으로 자주 응용되고 있다.⁽⁶⁾ 이러한 기본방식을 근간으로 하여 시스템이 요구하는 규격을 만족시켜야 하며 이러한 요구조건을 만족시키는 제어설계 상수를 결정하게 된다.

첫번째 요구사항으로 시스템의 밴드위드스 (Bandwidth)가 0.03HZ 이어야 한다. 이러한 구조의 설정은 구조체의 연성특성에 의한 고유진동수가 시스템 밴드위드스 (System Bandwidth)의 영향권 위에서 설정되게 함으로써 구조진동 영향을 배제하여 시스템의 안정성을 확보하고자 하는 이유이다.

둘째 요구사항으로 적분 절취 (Integral Cut-off) 주파수를 0.004HZ로 설정하였으며, 셋째 요구사항으로 속도 댐핑 항수가 0.707이 되도록 설정하였다. 이러한 요구사항은 결정적인 상수들이 아니고 시스템 설계시에 설정되는 항목들로서 상호 간에 서로 보정하게 되는 과정을 거쳐 설정된다. 이러한 항목을 정리하면 다음과 같다.

- $W_b = 0.03\text{HZ}$: 강성체 밴드위드스 (Bandwidth)
- $W_i = 0.004\text{HZ}$: 적분 절취 주파수
- $\xi = 0.707$: 댐핑 상수

PID 제어방식을 사용하는 좌우트러스 구조물의 설계회로 블록 다이어그램 (Block Diagram)에 의거하여 전달함수 (Transfer Function)를 구하면 다음과 같다.

$$T(s) = \frac{1}{S} \quad (1.1)$$

$$1 + \frac{1}{I_1 \cdot S} \frac{1}{1 + K_r \frac{1}{I_1 \cdot S}} \frac{1}{S} (K_p + \frac{K_i}{S})$$

$$= \frac{1}{S} \frac{1}{1 + \frac{1}{S(I_1 + K_r)}} \quad (1.2)$$

$$= \frac{K_p S + K_i}{I_1 S^3 + K_r S^2 + K_p S + K_i} \quad (1.3)$$

여기서 I_1 = 트러스 관성 모멘트
 K_p = 비례 제어 상수
 K_r = 각속도 제어 상수
 K_i = 적분 제어 상수
 S = 라플라스 미분 변환 기호 이다.

전달함수의 분모항으로 부터 제어 특성 방정식을 얻게 되며 다음과 같이 분해된다.

$$P(S) = (S^2 + 2\zeta \omega_b S + \omega_b^2) (S + \omega_i) \quad (2)$$

따라서, 식 (1.3)과 (2)식으로부터 다음식을 유도한다.

$$S^3 + \frac{K_r}{I_1} S^2 + \frac{K_p}{I_1} S + \frac{K_i}{I_1} = (S^2 + 2\zeta \omega_b S + \omega_b^2) (S + \omega_i) \quad (3)$$

이 식으로 부터 다음의 결과를 얻는다.

$$\frac{K_b}{I_1} = \omega_i + 2\zeta \omega_b \quad (4.1)$$

$$\frac{K_p}{I_1} = \omega_b^2 + 2\zeta \omega_i \omega_b \quad (4.2)$$

$$\frac{K_i}{I_1} = \omega_b^2 \cdot \omega_i \quad (4.3)$$

PD 제어 방식을 사용하는 중앙 주 구조물의 전달함수는 다음과 같다.

$$T(s) = \frac{1}{S} \frac{1}{1 + \frac{1}{I_2 \cdot S} \frac{K_p}{1 + \frac{K_r}{I_2 S}}} \quad (5.1)$$

$$= \frac{1}{S} \frac{1}{1 + \frac{1}{(I_2 S + K_r)} \frac{K_p}{S}} \quad (5.2)$$

$$= \frac{1}{I_2 S^2 + K_r S + K_p} \quad (5.3)$$

PD 제어 방식을 사용시 제어 특성 방정식은 다음과 같다.

$$P(S) = S^2 + 2\zeta \omega_n S + \omega_n^2 \quad (6)$$

여기서 ω_n 는 PD 제어 시스템의 밴드위드스 (Bandwidth)이다. 따라서 (5.3)식과 (6)식으로 부터 다음 결과를 얻는다.

$$\frac{K_r}{I_2} = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \quad (7.1)$$

$$\frac{K_p}{I_2} = \omega_n^2 \quad (7.2)$$

5. 제어운동 특성 분석

성능 분석은 제어 분석 프로그램, DADS (7) 를 사용하여 시뮬레이션을 통하여 그 결과를 얻었다. 다중 구조물 시뮬레이션 프로그램인 DADS는 많은 유사한 프로그램중에서 각각의 독립된 구조물의 구조 특성을 NASTRAN에서 생성된 자료를 사용하여 입력시킬 수 있는 기능이 있으며 제어 회로의 설계에 따른 제어 설계 상수와 입력력의 피드백 (Feedback) 회로를 구성할 수 있는 기능을 가지고 있다. 특히 각 독립된 구조물의 연결을 위하여 연결 요소 (Joint Block) 를 가지고 있어서 본 연구의 시뮬레이션을 위하여 적절한 프로그램으로 선정되었다. 중앙 주 구조물의 회전각이 그림 6에 보여지고 있는데 회전각의 운동이 주어진 90° 회전 입력에 따라 0° 에서

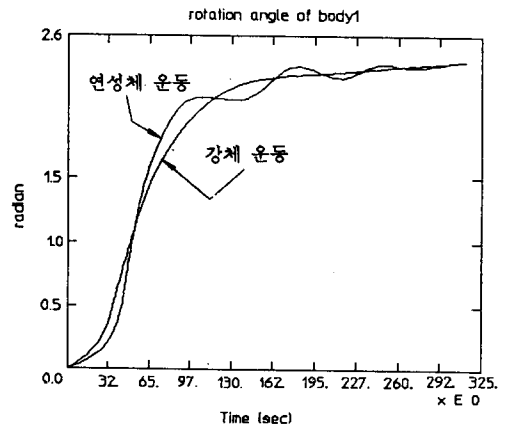


그림 6. 중앙구조물의 회전운동

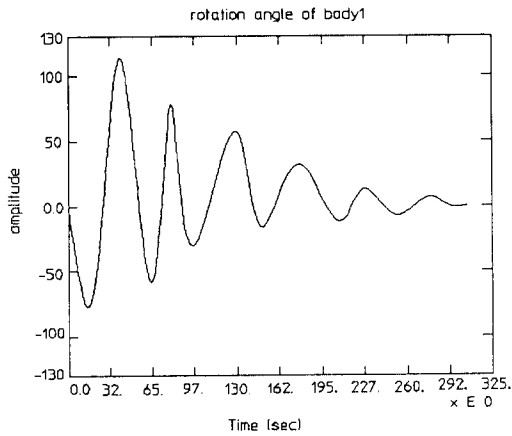


그림 7. 중앙구조물의 구조진동만의 운동

90°로 접근되어 가고 있으며 아울러 강체 운동과 병행하여 구조진동운동도 명확히 보여지고 있다. 이러한 구조진동 운동은 그 구조물의 연성특성에 따른 것으로 그림 7에서는 연성특성에 의한 구조진동만의 운동이 보여지고 있다. 중앙 구조물이 90°의 회전 입력에 의해 회전하는 동안 좌우의 트러스(Truss) 구조물들의 운동이 그림 8에 보여지고 있다. 초기에는 중앙 구조물의 회전 영향에 의해 같은 방향의 회전 운동을 보이다 독립된 제어 시스템에 의해 반대 방향의 회전 운동을 시작하며 시간이 경과한후 원래 위치로 돌아감을 보여주고 있다. 이는 중앙 구조물이 어떤 방향으로 회전 하더라도 태양전지판을 부착하고 있는 좌우 트러스 구조물들은 항상 태양을 향하도록 독립적으로 제어 되고 있음을 나타낸다. 그림 8에서는 구조체의 연성특성에 의한 구조진동운동이 더욱 명확히 보여지고 있는데 이는 트러스 구조물의 연성특성이 중앙 구조물의 연성특성보다 더 큼을 알수 있다.

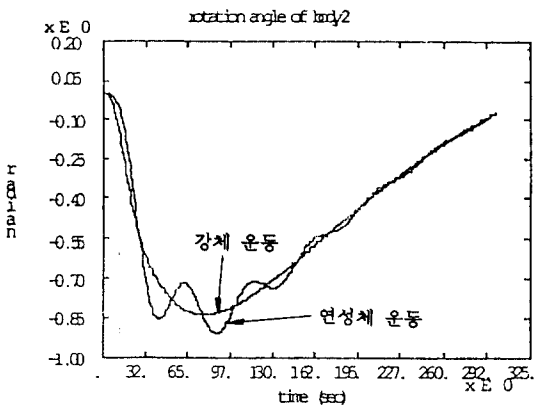


그림 8. 좌우 Truss 구조물의 회전운동

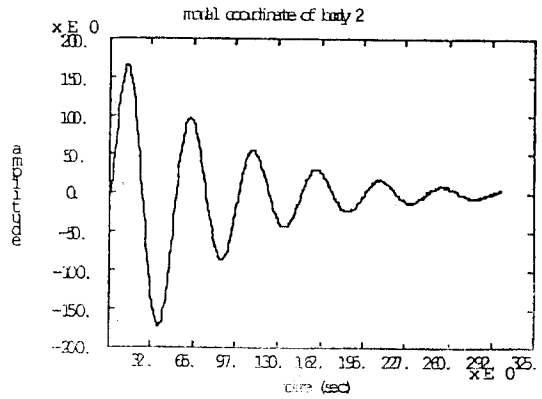


그림 9. 좌우 구조물의 구조진동만의 운동

좌우 구조물의 구조진동운동이 그림 9에 보여지고 있으며 좌우 구조물은 대칭되는 동일 구조물로서 같은 구조진동 운동을 갖는다. 좌우 트러스 구조물에 부착되어 있는 태양전지판의 상단의 x축의 좌표와 z축 좌표의 운동이 그림 10과 그림 11에 보여지고 있으며 회전이 시작됨에 따라 x축 좌표는 회전 운동의 영향으로 빠르게 위치 변화를 보이다가 서서히 운동의 감소를 보여주고 있으며 z축 좌표 운동에 비교하여 초기에 약간 느린 상태로 위치의 변화를 타나내다가 운동의 감소를 보여주고 있다.

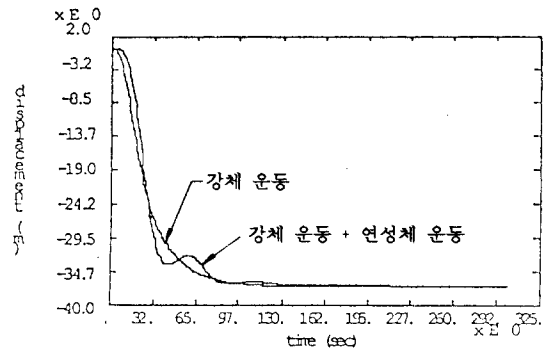


그림 10. 태양전지판 상단의 x축 좌표 변위

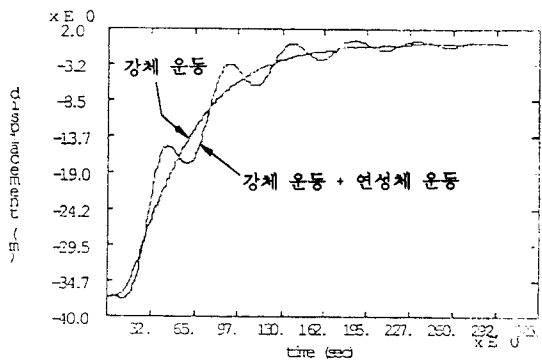


그림 11. 태양전지판 상단의 z축 좌표 변위

x축 좌표와 z축 좌표의 위치변화는 회전의 강제 특성과 아울러 구조물의 연성특성에 의한 영향에 의해서 운동 형상이 결정됨을 볼수 있으며 그림 12는 이러한 x축 좌표의 상관 운동을 보여 주고 있다. 초기의 큰 x 좌표 변위에 이어서 후기에 z 축 좌표의 변위가 증가하는데 z축 좌표의 변위에는 구조 진동에 의한 변위량이 상대적으로 큼을 알 수 있다.

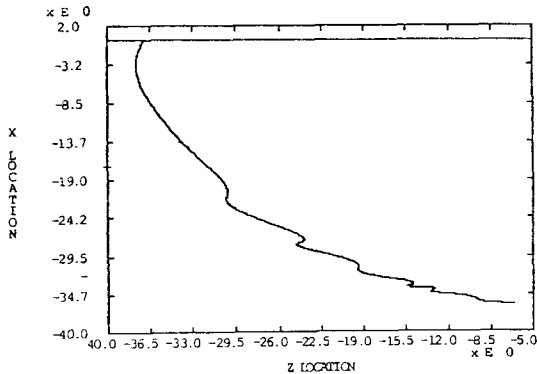


그림 12. 태양전지판 상단의 x축과 z축 위치의 상관 변위

그림에서 보여지는 시뮬레이션 결과들은 다중구조체의 운동을 제어하기 위한 제어설계가 독립된 제어계에 의해 상대적 운동을 가능하게 함과 동시에 효과적으로 제어 운동이 진행됨을 보여 주고 있으며 강성체 운동외에 구조물의 연성체 특성에 의한 진동 운동도 다중구조체의 모델링 기법에 의해 그 특성에 따른 영향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

다중구조체의 운동을 기술하기 위한 모델링 기법과 이 구조체의 운동을 독립적으로 제어하기 위한 제어 설계가 수행되었다. 이러한 모델링과 제어설계는 다중구조체의 독립적인 운동은 우주정거장이나 위성체의 태양전지판과 같은 구조계에서 전 구조물의 자세운동과 무관하게 태양전지판이 항상 태양을 향하도록 독립적으로 운동을 제어하는데 응용되고 있다.

이러한 다중구조체의 제어를 위하여 본 연구에서는 독립된 구조체의 상대 운동이 가능하도록 설계되었을 뿐만 아니라 상호 간섭효과에 의한 입력과 출력의 교차와 가능하게 설계되었다. 기본적인 제어설계에 따른 운동 특성이 강제운동과 아울러 구조물의 연성체 특성에 의한 진동운동도 함께 기술됨으로써 우주 비행구조물의 주요 특성인 연성체 운동에 의한 영향이 분석되었으며 시뮬레이션을 통하여 다중구조체의 운동을 제어하기 위한 모델링과 효과적인 제어설계 방식이 제시되었다.

참고 문헌

1. Sutter, Thomas R. ; Cooper, Paul A ; Young John W., ; and McCutchen, Don K., "Dynamic and Attitude Control Characteristics of an Internation Space Station," AIAA Dynamics Specialist Conference, Monterey, CA, April, 1987, AIAA Paper No 87 - 0931 - CP
2. Cooper, Paul A. ; Alan E. Stockwell ; Zeen C. Kim, "Interdisciplinary Analysis Procedures in the Modeling and Control of Large Space-Based Structures," ASME Symposium on Engineering Data Management : Critical Issues Computers in Engineering Conference NewYork City, August. 10-14, 1987
3. NASA Conference Publication 2447, edited by Robert L. Wright, "NASA/DoD Control / Structures Interaction Technology", Norfolk , Virginia, November 18-21, 1986
4. Uesoy Galip, "Experimental Results in Modeling, Analysis, and Control of Flexible Multi-Body Systems," 5th Annual NASA Spacecraft Control Laboratory Experiment (SCOLE) Workshop, NASA LaRC, Hampton, VA, December 1990
5. Young, John W. et al, "Control/Structures Interaction study of Two 300KW Dual-Keel Space Station Concepts," Langley Research Center, Hampton, VA. May 1986
6. Lim K.B. ; Juang J-N, and Kim Z.C., "Design of Optimally Normal Minimum Gain Controllers by Continuation Method", Presented at American Control Conference Pittsburgh, Pennsylvania, June 21-23, 1989
7. Hwang H. Y. ; Kim S. S., Haug, E. J. and La, H. J., "Theoretical Cross Verifications, and Comparative Studies of Multi-body Simulation Codes (DADS, DISCOS, And CONTOPS)", Thechnical paper R-66 The Unniversity of Iowa, Iowa City, IA, January 1990.