

탄성체를 포함하는 마운트계의 동역학 해석 프로그램 개발

이병훈* · 김경우** · 정우진***
(1999년 1월 18일 접수)

Development of a Computer Program for the Dynamic Analysis of Mount System with Flexible Bodies

Byung Hoon Lee, Kyung Woo Kim and Woo Jin Jeong

Key Words: Mount System(마운트계), Flexible Body(탄성체), Dynamic Analysis (동역학 해석), Static Equilibrium Analysis(정적평형 해석)

Abstract

A computer program for three dimensional dynamic analysis of a mount system composed of rigid or flexible bodies and mount elements is developed. Cartesian coordinates and Euler parameters are used to specify the positions and orientations of the bodies. The equations of motion are formulated using Lagrange equation and Lagrange multiplier technique. The developed program includes routines for inclined mount elements, several kinds of driving constrains, and external forces. The static equilibrium analysis routine is also developed using iterative method.

1. 서론

여러 가지의 장비들을 주어진 공간에 설치하고자 할 때에는, 장비들의 형상 및 중량등을 고려하여 설치 위치를 결정하게 된다. 또한, 정밀한 장비가 설치되는 경우에는 주위로부터 전달되는 진동 및 충격의 영향을 최소화하여야 한다. 이를 위하여 여러 장치들로 이루어진 시스템을 동역학적으로 모델링하고, 컴퓨터를 이용하여 동적 거동을 해석할 필요가 있다. 또한, 장비들의 형상, 설치위치 및 지지마운트의 특성변화에 따른 시스템의 거동을 파악하여 설계의 초기단계부터 이들의 영향을 충분히 고려하면 최적의 시스템을 설계할 수 있다.

이를 위하여 본 논문에서는 기초물체, 공통베

드, 장비 및 마운트로 이루어진 비구속개방계의 동적거동 해석을 위한 운동방정식을 직교좌표를 이용하여 유도하였다. 마운트는 3방향의 병진 스프링과 감쇠기로 모델링하였으며 기준물체에 대하여 임의의 각으로 경사 설치될 수 있도록 하였다. 외부에서 가해지는 여러 요인들에 의한 장비들의 동역학적 거동을 살펴보기 위하여 기초물체에 다양한 형태의 구동조건 또는 충격력이 작용할 수 있도록 모델링하였으며, 이에 따른 장비들의 3차원 동적거동 해석과 각 마운트에 작용하는 힘을 계산하는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

또한 정적평형 해석 루틴을 개발하여 시스템의 평형위치를 계산한 후 동역학 해석을 수행할 수 있도록 하였으며, 동역학 해석 주프로그램에서 계산된 각 장비 및 공통베드의 절대운동을 임의의 장비 또는 공통베드에 대한 상대운동으로 변환 출력할 수 있는 해석 자료의 후처리 프로그램을 개발하였다.

* 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : mebhlee@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2305 FAX : (051)514-7640

** 부산대학교 대학원

*** 국방과학연구소

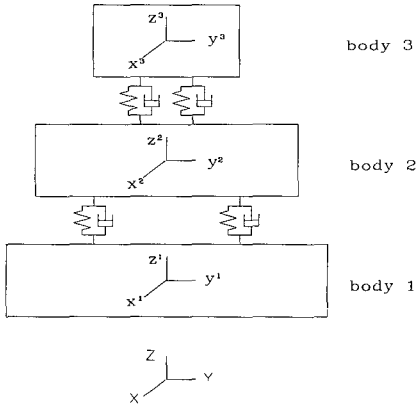


Fig. 1 Mount system

2. 시스템 및 구동조건의 모델링

마운트 시스템은 일반적으로 Fig. 1과 같이 기초물체(물체 1), 공통베드(물체 2), 장비(물체 3) 및 마운트로 구성되어 있다. 공통베드는 강체 또는 탄성체로, 그 외의 장비는 강체로 가정하며 기초물체와 공통베드, 공통베드와 장비 사이에는 각각 마운트로 지지되어 있다. 기초물체에는 병진운동을 일으키는 구동조건을 부가시키거나 외력이 작용할 수 있도록 한다. 여기서 좌표계 $x^i y^i z^i$ 는 각 물체에 설정되어 있는 이동좌표계로서 그 원점은 질량중심에 일치시킨다(공통베드가 탄성체일 경우에는 변형전의 질량중심에 설정한다).

2.1 경사설치 마운트의 모델링

두 물체 사이에 설치된 마운트는 스프링과 감쇠기의 조합으로 보며, 설치된 두 지점간의 상대변위 및 상대 속도에 따라 각 물체에 세 방향으로 힘이 작용하도록 모델링한다.^(1,2) Fig. 2는 마운트가 두 물체 i와 j 위의 점 P^i 및 P^j 에 경사 설치되어 있는 것을 보여준다.

마운트의 변형에 따라 각 방향으로 작용하는 힘의 크기는 설치 지점들의 각 방향의 상대 변위 및 상대 속도 성분의 함수로 주어진다.

$$f_{x_i} = f(\Delta x_i) + f(\Delta \dot{x}_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

이때 각 방향의 마운트의 길이 변화량 및 길

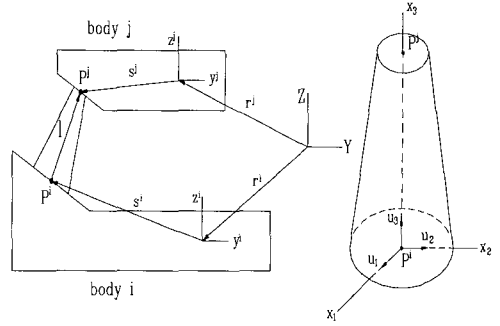


Fig. 2 Model of a mount

이 변화율은 각각 다음과 같다.

$$\Delta x_i = u_i^T (l - l_0) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$$\Delta \dot{x}_i = u_i^T \dot{i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

여기서 u_1, u_2, u_3 는 마운트가 변형되기 전 상태에서 마운트 특성을 나타내는 세방향의 단위 벡터이며, l_0 및 l 은 점 P^i 에서 P^j 까지 정의되는 벡터로서 각각 마운트가 변형되기 전후의 길이벡터이다. 그리고 \dot{i} 은 두 설치점의 상대속도를 나타낸다.

그러므로 마운트의 변형에 의하여 두 물체 i와 j의 점 P^i, P^j 에 작용하는 힘벡터 f^i 와 f^j 는 각각 다음과 같다.

$$f^i = f_{x_1} u_1 + f_{x_2} u_2 + f_{x_3} u_3$$

$$f^j = -(f_{x_1} u_1 + f_{x_2} u_2 + f_{x_3} u_3) \quad (4)$$

본 논문에서는 마운트의 스프링 및 감쇠특성에 따라 다음 세 가지 경우로 모델링하였다.

① 선형 마운트

스프링 및 감쇠특성이 세방향에 대하여 각각 일정하며 이들 요소에 따라 각 방향으로 작용하는 힘의 크기는 다음과 같다.

$$f_{x_i} = k_i \Delta x_i + c_i \Delta \dot{x}_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

여기서 k_i 는 각 방향의 스프링 상수, c_i 는 각 방향의 감쇠계수이다.

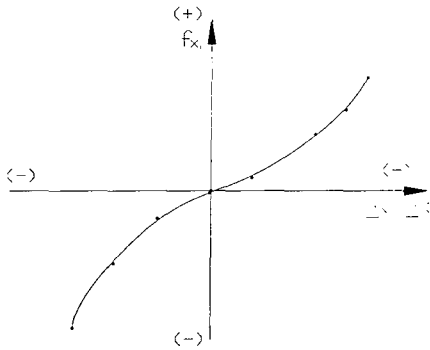


Fig. 3 Spring & Damper characteristics

② 비선형 마운트 I

스프링 특성과 감쇠 특성이 모두 비선형인 경우로서, 물체에 작용하는 힘은 다항식의 형태로 나타난다. 이때 다항식은 정확도를 기하기 위하여 8차식으로 표현한다.

$$f_{x_i} = \sum_{j=0}^8 k_{ij} \Delta x_i^j + \sum_{j=0}^8 c_{ij} \Delta \dot{x}_i^j \quad (i = 1, 2, 3) \tag{6}$$

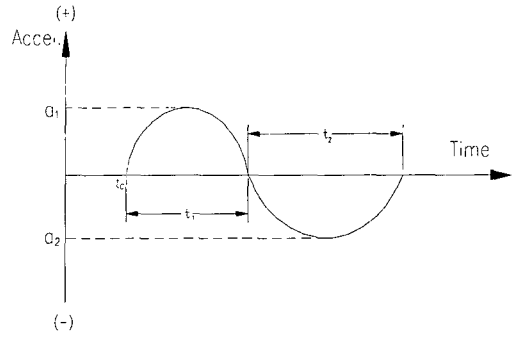
여기서 k_{ij} 는 i 방향의 비선형 스프링 계수이며, c_{ij} 는 i 방향의 비선형 감쇠계수이다.

③ 비선형 마운트 II

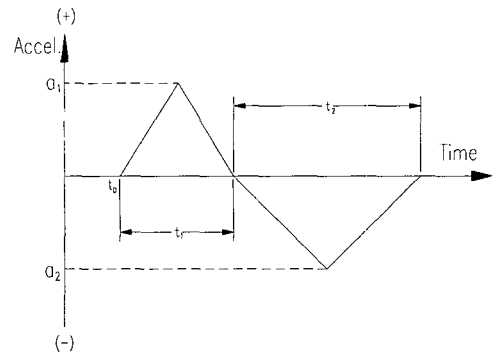
세 방향으로의 마운트의 길이 변화량 및 변화율에 따른 스프링력과 감쇠력이 Fig. 3과 같이 곡선자료로 주어지며 스프라인 보간법을 사용하여 임의의 위치에서의 힘을 계산한다.

2.2 구동조건 및 외력의 모델링

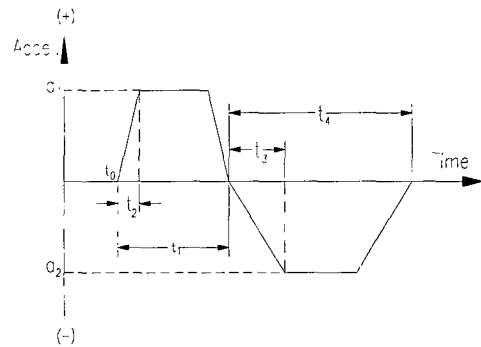
구동조건 및 외력은 기초물체(물체번호 1)에만 작용하는 것으로 가정한다. 구동조건인 경우에는 기초물체의 이동좌표계 중심에 관성좌표계의 X, Y, Z축 방향으로 Fig. 4와 같은 세 가지 규정된 형태 또는 시간에 대한 곡선자료 형태의 가속도로서 병진운동을 하도록 단일 또는 조합으로 부가되며, 외력의 경우에는 질량중심에 관성좌표계의 X, Y, Z축 방향으로 곡선자료 형태의 힘이 단일 또는 조합력으로 작용하도록 한다. 이 때 곡선자료로 주어진 경우에는 3차 스프라인 보간법에 따라 곡선화한다.



(a) Sinusoidal type



(b) Triangular type



(c) Trapezoid type

Fig. 4 Driving type

3. 동역학 해석

3.1 운동방정식

Fig. 5에서와 같이 3차원 공간에서 운동하는 다물체계에서 탄성체 i 의 관성좌표계에 대한 위치

는 물체에 설정한 이동좌표계에 대한 위치좌표

\mathbf{r}^i , 이동좌표계의 자세를 나타내는 오일러 매개변수 $\mathbf{p}^i (= [e_0^i, e_1^i, e_2^i, e_3^i]^T)$ 및 이동좌표계에 대한 탄성체의 변형 모우드 좌표 \mathbf{a}^i 로서 나타낼 수 있다.^(3,4) 따라서 물체 i 의 좌표벡터 \mathbf{q}^i 를 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{q}^i = [\mathbf{r}^{iT}, \mathbf{p}^{iT}, \mathbf{a}^{iT}]^T \quad (7)$$

탄성체가 구조감쇠를 가진 경우 탄성체의 감쇠 에너지를 변형 모우드 좌표로서 표현하면 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} D^i &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{a}}^{iT} \mathbf{c}^i_{aa} \dot{\mathbf{a}}^i \\ &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^i \\ \dot{\mathbf{p}}^i \\ \dot{\mathbf{a}}^i \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{c}^i_{aa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}^i \\ \dot{\mathbf{p}}^i \\ \dot{\mathbf{a}}^i \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^{iT} \mathbf{C}^i \dot{\mathbf{q}}^i \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{c}^i_{aa} 는 모드감쇠행렬로서, 구조감쇠를 비례감쇠로 가정하면 다음과 같이 모드질량행렬과 모드강성행렬로 표현된다.

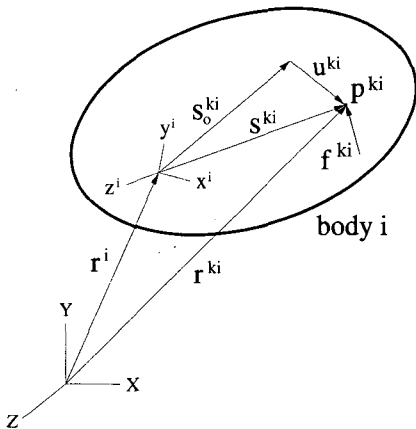


Fig. 5 Deformation of a flexible body

$$\begin{aligned} \mathbf{c}^i_{aa} &= \phi^{iT} \mathbf{c}^i \phi^i \\ &= \alpha [\phi^{iT} \mathbf{m}^i \phi^i] \\ &\quad + \beta [\phi^{iT} \mathbf{k}^i \phi^i] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 α, β 는 각 항의 비례상수이다.

따라서 구조감쇠를 가진 탄성체 i 의 운동방정식을 라그랑지 방정식을 이용하여 표현하면 다음과 같다.^(1,3,4)

$$\mathbf{M}^i \ddot{\mathbf{q}}^i = \mathbf{F}^{i*} - \phi_{q^i}^{iT} \lambda^i \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}^{i*} &= \mathbf{F}^i - \mathbf{K}^i \mathbf{q}^i - \mathbf{C}^i \dot{\mathbf{q}}^i \\ &\quad - \dot{\mathbf{M}}^i \dot{\mathbf{q}}^i + \left(\frac{\partial T^i}{\partial \mathbf{q}^i} \right)^T \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, \mathbf{M}^i 는 물체 i 의 질량행렬, \mathbf{F}^i 는 직교좌표상에서 표현되는 힘벡터, \mathbf{K}^i 는 물체 i 의 강성행렬을 나타내며, \mathbf{C}^i 는 물체 i 의 감쇠행렬이다.

구속조건식의 시간에 대한 2차 미분결과와 식 (10)을 결합하면 다음과 같은 행렬형이 된다.⁽²⁾

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^i & \phi_{q^i}^{iT} \\ \phi_{q^i}^i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}^i \\ \lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}^{i*} \\ \boldsymbol{\gamma}^i \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서

$$\boldsymbol{\gamma}^i = - \phi_{q^i}^i \ddot{\mathbf{q}}^i - \ddot{\phi}_t^i \quad (13)$$

이며, $\phi_t^i = \left(\frac{\partial \phi^i}{\partial t} \right)$ 이다.

본 논문에서 취급하는 시스템은 각 물체들 사이에 기구학적 조인트로 연결되어 있지 않고 힘요소(force element)로 모델링한 마운트만 있으므로 물체들은 각각 독립된 운동이 가능하다. 따라서 시스템의 물체 수가 많아질 경우 발생할 수 있는 컴퓨터 연산상의 문제를 피하기 위하여 각 물체마다 운동방정식을 구성하여 풀도록 한다.

이때 물체 i 의 질량행렬에 구속조건의 자코비안을 포함한 시스템 행렬 \mathbf{M}^{*i} 는 강체 또는 탄성체인 경우 각각 식 (14) 및 (15)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{M}^{*i} =$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} m^i \mathbf{I}_3 & & 0 & \boldsymbol{\phi}_{q^i}^{i T} \\ 0 & 4 \mathbf{G}^{i T} \mathbf{J}^{i'} \mathbf{G}^i & & \\ \hline & \boldsymbol{\phi}_{q^i}^i & & 0 \end{array} \right] \quad (\text{강체의 경우}) \quad (14)$$

여기서 $\boldsymbol{\phi}_{q^i}^i$ 는 오일러 매개변수 구속조건 및 구동구속 조건식에 대한 자코비안 행렬, $\mathbf{J}^{i'}$ ($= -\sum_{k=1}^n m^{ki} \tilde{\mathbf{s}}^{ki} \tilde{\mathbf{s}}^{ki}$)은 물체 i 의 이동좌표계에 대한 관성모멘트이며, 강체인 경우 이동좌표계의 원점을 질량 중심에 설정하였다.

3.2 정적평형 해석

마운트 시스템의 동적거동 해석은 흔히 정적 평형상태로부터 시작하게 된다. 따라서 동적 해석을 수행하기 전에 시스템의 정적 평형위치를 알 필요가 있으므로 전처리 단계에서 반복법 (iterative method)을 이용하여 정적평형을 구해낸다.

전체계의 평형방정식은 속도, 가속도가 0이며, 탄성체의 탄성변형을 고려하지 않으므로 식 (10)과 (11) 및 구속조건식으로부터 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{F} - \boldsymbol{\phi}_q^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\phi}(\mathbf{q}) = 0 \quad (17)$$

위의 정적 평형방정식을 가우스 소거법을 이용한 좌표분할법을 이용하여 독립좌표 \mathbf{v} 와 종속좌표 \mathbf{u} 로 분할한 후 정리하면 다음과 같은 최종식을 얻을 수 있다.⁽⁶⁾

$$\mathbf{f} \equiv \mathbf{H}^T \mathbf{F}_{(u)} - \mathbf{F}_{(v)} = 0 \quad (18)$$

여기서 $\mathbf{H} = -\boldsymbol{\phi}_u^{-1} \boldsymbol{\phi}_v$ 이다.

식 (18)을 수치 해석적인 방법으로 풀기 위하여 Newton-Raphson 법을 이용하게 되는데 이때의 반복계산식은 아래와 같이 주어진다.

$$\left[\frac{d\mathbf{f}}{d\mathbf{v}} \right] \Delta\mathbf{v} = \mathbf{f} \quad (19)$$

$$\mathbf{v}^{i+1} = \mathbf{v}^i - \Delta\mathbf{v} \quad (20)$$

이때 위의 식 (19)의 $d\mathbf{f}/d\mathbf{v}$ 는 직접적으로 구하기 힘들기 때문에 다음과 같은 수치미분을 이용하여 계산한다.

$$\mathbf{M}^{*i} = \left[\begin{array}{cc|cc} m^i \mathbf{I}_3 & -2 \sum_{k=1}^n m^{ki} \tilde{\mathbf{s}}^{ki} \mathbf{E}^i & \mathbf{A}^i \sum_{k=1}^n m^{ki} \boldsymbol{\phi}_t^{ki} & \\ \hline & 4 \mathbf{G}^{i T} \left(\sum_{k=1}^n m^{ki} \tilde{\mathbf{s}}^{ki T} \tilde{\mathbf{s}}^{ki} \right) \mathbf{G}^i & -2 \mathbf{G}^{i T} \sum_{k=1}^n m^{ki} \tilde{\mathbf{s}}^{ki T} \boldsymbol{\phi}_t^{ki} & \boldsymbol{\phi}_{q^i}^{i T} \\ & & + 2 \mathbf{p}^i \sum_{k=1}^n m^{ki} \mathbf{s}^{ki T} \boldsymbol{\phi}_t^{ki} & \\ \hline & & \sum_{k=1}^n m^{ki} \boldsymbol{\phi}_t^{ki T} \boldsymbol{\phi}_t^{ki} & \\ \hline & & & 0 \end{array} \right]$$

symmetric

(탄성체의 경우)

(15)

$$\frac{df}{dv_i} = \frac{f(\mathbf{v}^i) - f(\mathbf{v})}{\Delta v_i} \quad (i = 1, 2, \dots k) \quad (21)$$

여기서,

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_i \\ \vdots \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} \quad \mathbf{v}^i = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{v}_i + \Delta \mathbf{v}_i \\ \vdots \\ \mathbf{v}_k \end{bmatrix} \quad (22)$$

위의 식 (19)와 식 (21)을 이용하여 독립좌표를 계산한 후 여기서 구한 독립좌표를 식 (17)에 대입하여 나머지 종속좌표 \mathbf{u} 를 구한다.

4. 프로그램의 구성

본 논문에서 개발된 프로그램은 시스템의 동적 거동 해석을 위한 주프로그램과 주프로그램에서 출력된 자료를 이용하여 관심 지점의 상대운동을 계산· 출력하는 후처리 프로그램으로 나뉘어진다. Fig. 6에서와 같이 주프로그램에서는 시스템에 대한 정보를 입력받아 각 물체의 절대운동을 계산하며 후처리 프로그램에서는 주프로그램에서 구한 결과와 관심지점에 관한 정보를 입력받아 관심지점의 운동을 임의의 장비 또는 공통베드에 대한 상대운동으로 계산· 출력하도록 개발되었다.

데이터 입력은 Fig. 7과 같은 순서로 수행되며, 대화식을 기본으로 하되 필요시에는 데이터 파일 처리도 가능하도록 개발되었다. 마운트의 비선형 요소, 외력 및 구동구속 조건의 곡선자료에 대한 입력과 탄성체에 대한 자료는 별도의 데이터 파일을 이용하여 입력한다.

해석 전처리 단계에서 일차원 배열을 프로그램의 주배열로 사용하기 위한 포인터 지정 및 곡선 자료에 대한 보간함수를 생성하고 정적평형 해석을 수행한 후 시스템의 동적 거동을 해석하며 시스템 내의 물체 수가 많아질 경우 발생하는 컴퓨터 연산상의 문제를 피하기 위해 각 물체에 대한 운동방정식을 개별적으로 구성하여 해를 구한다. 여기서 적분알고리즘으로는 4th order Runge-Kutta 법과 Adams - Bashforth 예측수정법에 기초한 DE/STEP법 중 하나가 선택적으로 이용된다.

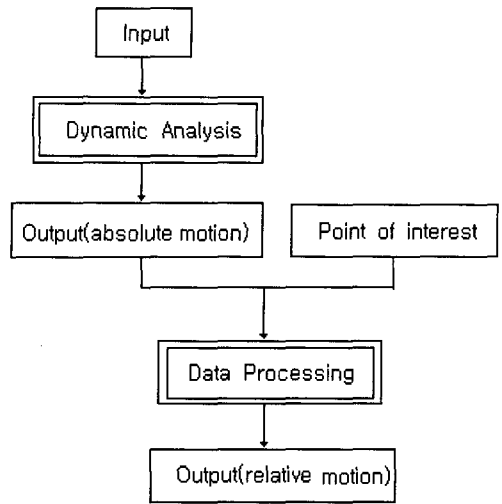


Fig. 6 Flow chart of the program

구동조건 및 외력은 기초물체의 자세를 구속한 상태에서 관성좌표계의 X, Y 및 Z축 방향으로 단일 또는 조합으로 작용시킨다.

임의의 관심지점의 운동을 알기 위하여 기존에는 해석 프로그램내에 관심지점에 대한 정보를 입력받도록 하였으나 이럴 경우 관심지점이 변경되면 해석 프로그램을 다시 수행해야하는 번거로움과 시간적 낭비가 있다. 따라서 주 프로그램에서는 각 물체에 대한 절대운동을 한 번만 계산하고 후처리 프로그램에서 필요에 따라 관심지점을 변경하면서 관심지점의 운동을 계산할 수 있도록 하였다. 개발된 후처리 프로그램은 관심지점의 관성좌표계에 대한 절대운동과 관심지점의 임의의 기준물체에 대한 상대운동을 출력한다.

5. 수치예제

본 논문에서 개발한 기초물체, 공통베드 및 장비로 이루어진 시스템의 동적거동 해석 프로그램의 타당성을 확인하기 위한 예제로서 기초물체에 외력이 작용하는 경우를 선정하여 본 프로그램의 해석 결과를 검토하였다. 예제에서 취급한 시스템은 Fig. 8과 같이 모두 4개의 물체로 구성되어 있으며, 각 물체는 그 기준물체에 대하여 4개의 마운트로 지지되어 있다. Table 1은 각 물체의 물성치와 초기위치를 나타낸다. 여기서 각 물체의

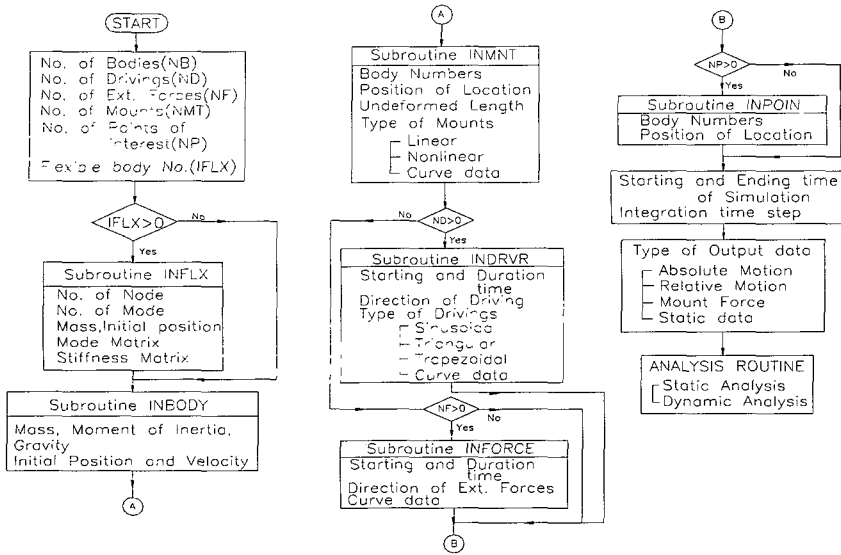


Fig. 7 Flow chart of the input routine

이동좌표계 원점은 그 물체의 질량중심에 설정하였으며 공동베드가 탄성체인 경우에는 이동좌표계 원점을 변형전 초기 질량중심에 설정하였다.

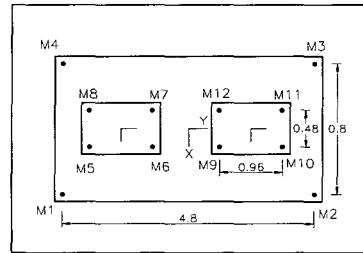
5.1 마운트의 특성 및 구동조건

각 물체에 설치된 마운트는 모두 초기 변형이 없는 것으로 가정하며 물체 2와 물체 3사이 에 설치된 마운트는 기준물체에 대하여 45° 경사 설치되어 있다. 모든 마운트는 3방향의 스프링 및 감쇠특성이 모두 같은 선형 마운트로 가정하며 물체 2와 물체 4사이 에 설치된 마운트는 감쇠를 가지고 그 외의 마운트는 감쇠가 없는 것으로 가정한다.

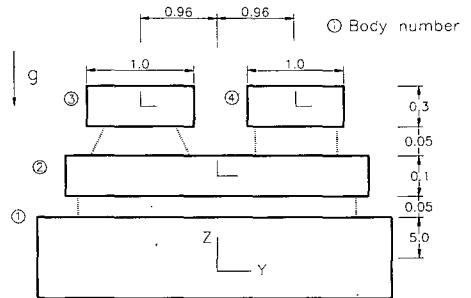
그리고 앞에서 주어진 시스템에 대하여 물체 1(기초물체)의 질량중심에 Fig. 9와 같은 조화합수형의 단일 외력을 관성좌표계의 Z축 방향으로 작용시켰으며, 외력의 입력자료는 곡선자료 형태로 주었다.

5.2 해석결과 및 검토

위에 주어진 예제에 대하여 각 물체의 이동좌표계 원점의 동적거동을 해석하였으며 정적평형 해석시에는 오차한계를 1.0×10^{-6} 으로 하여



(a) Top view of the mount system



(b) Front view of the mount system

Fig. 8 A typical mount system

Table 1 Physical properties and initial positions of bodies

Body No.	Mass (kg)	Moment of inertia (kg·m ²)			Initial Position(m)		
		J _{xx}	J _{yy} '	J _{zz}	x	y	z
1	1,000,000	2.2×10 ⁸	4.2×10 ⁷	2.4×10 ⁸	0.0	0.0	0.0
2	2995.2	5753.28	162.24	5910.53	0.0	0.0	5.1
3	100	9.1	2.8	10.4	0.0	-0.96	5.35
4	100	9.1	2.8	10.4	0.0	0.96	5.35

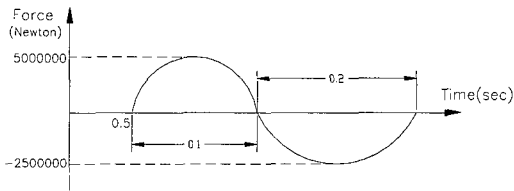


Fig. 9 External force acting on body 1

반복 계산하였다.

정적평형 해석을 수행한 후의 각 물체의 절대 위치 및 자세는 Table 2와 같으며 엄밀해와 일치함을 확인하였다. 동적거동의 경우에도 상용 프로그램인 DADS⁽⁷⁾의 결과와 비교하여 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

외력이 주어지는 경우 물체 1의 질량이 다른 물체들에 비하여 상대적으로 대단히 크므로 가속도가 외력과 유사한 모양으로 나타남을 알 수 있다.(Fig. 10) 물체 3의 관성좌표계에 대한 Z방향의 절대위치를 나타내는 Fig. 11을 보면 정적평형 상태에서 구동을 한 경우는 그렇지 않은 경우에 비하여 물체의 진폭이 작음을 알 수가 있다. 이는 정적평형 해석으로 인하여 초기 에너지가 제거되었기 때문이라고 생각한다.

또한 물체 2(공통베드)를 강체로 취급하였을 때와 탄성체로 취급하였을 경우, 그리고 구조감쇠($\alpha=0.0$, $\beta=0.01$)를 가진 탄성체로 취급하였을 경우의 동적거동을 비교 해석하였다. 탄성체로 가정한 공통베드의 탄성변형은 100개의 평판요소(노드수는 121개)로 등분한 모델에 대하여 유한요소법(MSC/NASTRAN)을 이용하여 구한 2개의 진

Table 2 Static equilibrium position of mount system

Body No.	Position (m)			Orientation (deg)		
	x	y	z	α	β	γ
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	5.084	0.0	0.0	0.0
3	0.0	-0.96	5.332	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.96	5.332	0.0	0.0	0.0

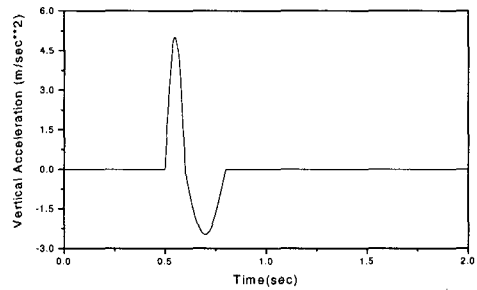


Fig. 10 Acceleration in Z-direction of body 1

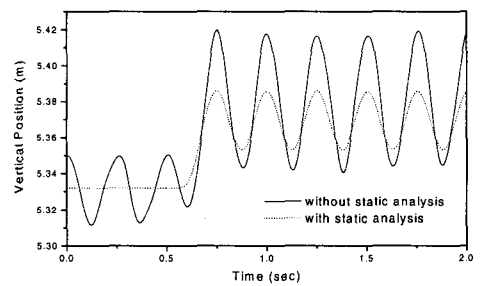


Fig. 11 Absolute position in Z-direction of body 3

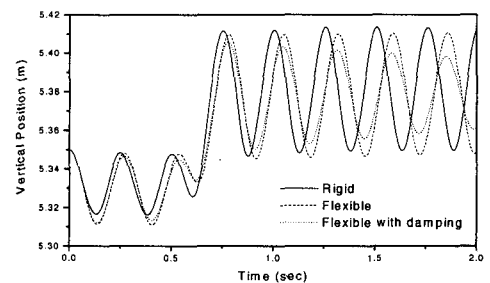


Fig. 12 Absolute position in Z-direction of body 4

동모드로써 표현하였다. 공통베드를 탄성체로 하였을 때에는 공통베드 위에 설치된 장비들의 Z방향으로의 처짐이 강제일 때보다 크고 위상도 오른쪽으로 약간 이동하였음을 알 수 있다. 이는 강제일 때보다 탄성체일 때 탄성변형으로 인하여 공통베드가 아래쪽으로 처짐에 따라 이동좌표계의 원점이 Z방향으로 좀 더 많이 내려오고 이로 인하여 공통베드의 수직방향 변위의 진동주기가 길어짐으로써 전체적으로 오른쪽으로 이동하게 되기 때문이라 생각되며 공통베드가 감쇠를 가진 경우에는 공통베드의 운동에너지가 시간에 따라 감소되어 공통베드와 그 위에 설치된 물체들의 진폭이 점차 줄어들음을 볼 수 있다.(Fig. 12)

그리고 물체 2와 물체 3 사이에 설치된 마운트들의 감쇠가 없는 경우에는 물체 3(경사 설치 마운트)의 운동이 물체 4(직립 마운트)의 운동과 일치하는데 이는 물체 사이에 설치된 마운트들의 세방향 특성이 모두 동일하며 수직변위만 있기 때문이라고 사료된다.

6. 결론

본 논문에서는 기초물체, 공통베드, 장비들과 마운트 요소로 이루어진 다자유도 마운트 시스템의 3차원 동역학 거동 해석을 위한 체계적인 프로그램을 개발하였다. 라그랑지 방정식 및 라그랑지 승수 기법을 이용하여 시스템의 운동방정식을 절대좌표공간에서 기술하였고, 관성좌표계에 대한 각 물체의 자세를 나타내는 회전좌표로 오일러 매개변수를 사용하였다. 공통베드를 감쇠를 고려한 탄성체로 모델링하였으며, 기초물체에 여러 가지 형태로 가해지는 구동조건 또는 충격력에 따라 장비의 운동을 해석할 수 있도록 하였다.

장비 및 공통베드를 지지하는 마운트는 3방향 병진변형을 고려하여 임의의 각도로 설치될 수 있도록 모델링하였으며 시스템의 정적형형해석 루우틴을 포함시켰다. 또한 시스템내의 물체 수가 많아질 경우 발생할 수 있는 컴퓨터의 연산상의 문제와 미분대수방정식의 해의 오차를 최소로 하기 위하여 각 물체의 운동방정식을 개별적으로 구성하여 풀도록 하였다. 동역학 해석 주프로그램에서 계산된 각 장비 및 공통베드의 절대운동을 임의의 장비 또는 공통베드에 대한 상대운동을

으로 변환 출력할 수 있는 해석 자료의 후처리 프로그램을 개발하였다.

개발된 프로그램은 상용 프로그램인 DADS의 결과와 비교 검토하여 프로그램의 타당성을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 개발한 프로그램을 이용하여 탄성을 고려한 마운트 시스템의 동적거동 해석을 여러 가지 시스템 파라미터를 변경하면서 수행할 수 있으며 이 결과를 이용하여 마운트 시스템에 전달되는 진동 및 충격의 영향을 파악하고 이를 최적화 하는데 기여를 할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 지원(UD970007BD)에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Greenwood, D. T., 1985, *Principles of Dynamics*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- (2) E. J. Haug, 1989, *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System*, Allyn and Bacon.
- (3) B. H. Lee, W. S. Yoo and B. M. Kwak, 1993, "A Systematic Formulation for Dynamics of Flexible Multibody Systems Using the Velocity transformation Technique," *J. Mechanical Engineering Science, IMechE*, Vol. 207, No. c4, pp. 231~238.
- (4) 이병훈, 유완석, 1993, "탄성 다물체계의 체계적인 동역학적 해석," 대한기계학회논문집(A) 제17권 제10호, pp. 2483~2490.
- (5) Meirovitch, L., 1971, *Analytical Methods in Vibrations*, 2nd ed., Macmillian Co., New York.
- (6) Nikravesh, P. E., 1988, *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice-Hall, Inc.
- (7) DADS(Dynamic Analysis and Design System) User's Manual, 1997, Computer Aided Design Software Inc., USA.