

# 강체 블록의 비선형 로킹진동특성에 관한 연구 (미끄럼이 있는 경우)

정만용 · 김정호\*<sup>†</sup> · 김선규\*\* · 나기대\*\*\* · 양인영\*\*\*

Numazu College of Technology · Japan, \*순천대학교 BK21 기계자동차공학부

\*\*익산대학 자동차과 · \*\*\*조선대학교 기계공학부

(1999. 5. 30. 접수 / 1999. 7. 8. 채택)

## A Study on Nonlinear Rocking Vibration Characteristics of Rigid Block (In the Case of Sliding Occurrence)

Man-Yong Jeong · Jeong-Ho Kim\*<sup>†</sup> · Sun-Kyu Kim\*\* · Gee-Dae Na\*\*\* · In-Young Yang\*\*\*

Department Electronics and Control Engineering, Numazu College of Technology, Japan

\*School of Mechanical and Automotive Engineering, Sunchon National University

\*\*Department of Automobile Engineering, Iksan National College

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Chosun University

(Received May 30, 1999 / Accepted July 8, 1999)

**Abstract :** This paper deals with rocking response behavior of rigid block structure subjected to horizontal excitation. A strict consideration of impact and sliding between the block and base is essential to investigate the rocking vibration characteristics because the rocking behavior were greatly influenced by the impact and sliding motion. Therefore, not only restitution coefficient between the block and base but also the energy dissipation rate which is associated with sliding motion, and the static and kinetic friction coefficient between those should be included in the modeling of rocking system. The analytic program was developed to be able to simulate the experimental responses of the block subjected to horizontal sinusoidal excitations. By using this program, rocking responses were numerically calculated by the nonlinear equations for rocking system. From the response simulation and rocking vibration experiment, the following results were obtained. The rocking responses are affected by the impact motion due to energy dissipation and friction and provide very complex behavior. The toppling condition of the block is also influenced by the impact motion and sliding motion.

### 1. 서 론

기초부가 구속되지 않은 블록형 구조물의 지진에 의한 피해는 최근의 미국 캘리포니아 지진, 일본 고베 지진 등에서 다수 보고되고 있다. 그 피해의 예로 석재유물, 건축물내의 가구, 공작기계, 대형 컴퓨터의 전도(넘어짐) 등을 들 수 있다. 특히, 그 중에서도 대형 컴퓨터의 전도에 의한 제어시스템의 마비는 라이프라인(수도, 전기,

교통시스템 등)의 마비를 초래하여 대규모의 2차 재해를 가져올 수 있기 때문에 내진 장치의 개발이 활발하게 진행되고 있다.

기존의 연구에서는 구조물과 기초부가 모두 강체이고 미끄럼이 발생하지 않는다는 가정하의 이상적인 조건에 기초한 해석적인 연구가 주종이었다.<sup>1~8)</sup>

그러나, 실존하는 강체 블록 구조물의 로킹진동이 그와 같은 안정된 환경하에서만 발생한다고 할 수 없고, 각각의 구조물 고유 설치 조건하에 있어서의 강체운동으로서 해석할 필요가 있다. 그 때문에 여러 가지 조건에서 거동의 변화를 실험적으로

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Jeong-Ho Kim, kimstime@sunchon.ac.kr

상세하게 검토하여 로킹진동 거동을 보다 자세히 파악할 필요가 있다. 강체 로킹진동의 실험적 고찰에 의해 얻어진 특성을 이론적 해석에 있어서 로킹진동계의 모델화에 이용하는 것은 매우 중요하다.

지금까지의 연구에 있어서는 로킹진동 실험과 선형 모델을 이용한 응답해석을 비교 고찰하였다. 그러나, 선형 모델로는 미끄럼을 동반한 실험결과를 재현할 수 없고, 미끄럼 운동과 충돌의 비선형성에 대한 평가도 할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 정현파 입력에 의한 로킹진동 실험과 미끄럼 운동을 고려한 비선형 로킹모델을 이용한 응답해석을 하여, 제안한 역학모델의 타당성과 실용성을 검토하고자 한다. 또한, 로킹진동 실험에서 발생하는 블록과 기초부의 접촉조건의 차에 의한 진동응답, 비재현성의 원인을 규명하고, 충돌시 발생하는 에너지 소모와 미끄럼운동이 로킹응답에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

## 2. 로킹진동 실험

실험은 블록과 베이스간의 마찰력과 접촉상태가 로킹응답에 미치는 영향에 주목해서 '시트있음(with sheet)'과 '시트없음(without sheet)'의 두 조건에서 하였다. '시트있음'의 실험은 두께 약 1 mm의 미끄럼 방지용 가죽시트를 베이스 표면에 부착하였다.

### 2.1. 블록

가진 실험은 진도계로 5정도의 지진에서 형상비  $H/B=4$ 의 가구, 묘비 등의 전도가 많이 발생하고 있는 것으로부터 블록의 로킹 계시조건으로서 베이스의 수평가속도 입력을  $g/4 \approx 250$  Gal로 하였다. 또, 블록폭(B)는 50 mm, 높이(H)는 200 mm, 길이(L)은 100 mm의 형상으로 재질은 S55C로 제작하였고, 이 형상비는 비선형 로킹특성이 잘 나타날 수 있도록 미끄럼 운동이 발생하기 쉬운 형상비를 선택하였다. 블록의 무게(W)는 7.81 kg이고, 블록의 크기 파라미터(R)은 103.1 mm이다. 형상각(shape angle,  $\psi$ )은 0.245 rad이다.

### 2.2. 계측장치

가진실험에서는 베이스 플레이트와 블록의 정상부에 가속도계를 설치하여 각각 부위의 가속

도를 측정하였다. 또, 베이스 플레이트에서 26 mm, 69.5 mm와 113 mm의 위치에 레이저 변위계 A, B, C를 설치하고, 각각의 수평변위를 계측하였다. 블록의 회전변위는 두 레이저 변위계에 서 측정된 수평변위로부터 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_2 - d_1}{h}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{d}{h}\right) \quad (1)$$

또한, Fig. 1에 나타낸 것과 같이 레이저광 차단막을 설치하여 레이저광 간섭에 의한 오차발생을 방지하고, 레이저 변위계 B에서는 직류신호를 잡아서 미끄럼 발생의 유무를 계측하였다. 실험장치 구성을 Fig. 2에 나타냈다.

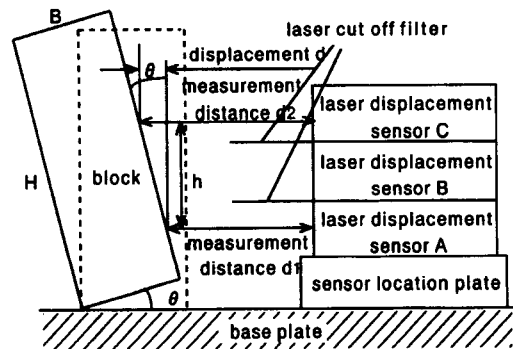


Fig. 1. Outline of measuring system

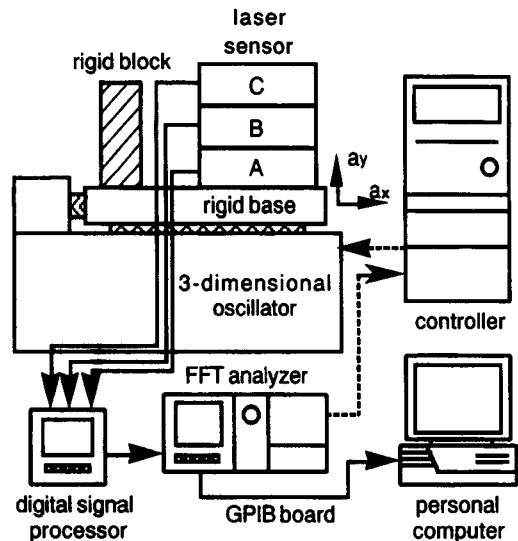


Fig. 2. Set up of experimental equipments

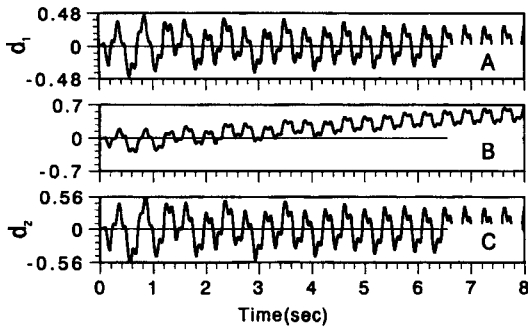


Fig. 3. Measured horizontal displacement by laser sensors ( $f=8$  Hz,  $Amp=0.86$  g, without-sheet)

3개의 레이저 변위계에 의해 계측된 측정 데이터의 한 예를 Fig. 3에 나타냈다.

본 실험에서는 미끄럼변위를 추출하기 위해 3개의 레이저 변위계를 이용하였지만 실제로는 노이즈와 미끄럼에 의한 수평변위를 분리하기가 어렵고, 고찰에 이용할 수 있는 데이터를 획득하기 어려워 레이저 변위계 B의 역할을 미끄럼 발생의 판정만으로 제한하였다.

### 2.3. 로킹진동 실험

로킹진동 실험에서는 '시트있음'과 '시트없음' 두 조건에서 자유진동 실험과 강제진동 실험을 행하였다. 자유진동 실험은 충돌시의 에너지 소모, 즉 반발계수를 평가하기 위하여 행하고, 시뮬레이션에 의해 실제의 반발계수를 계산하였다. 시뮬레이션에 의해 얻어진 반발계수는 '시트없음'과 '시트있음'에서 각각 0.926, 0.956이었다.<sup>1)</sup> 또한, 강제진동 실험에서는 5 Hz~10 Hz까지의 범위에서 1 Hz의 간격으로 가진진동수를 변화시켜 로킹이 발생하여 전도(넘어짐)에 도달하는 진폭까지 증가시켰다. 단지, 본 실험에서는 9 Hz와 10 Hz의 비교적 고진동수 영역에서는 가진기의 성능상 블록이 전도에 도달할 만한 입력 레벨로 가진이 불가능하여, 가진 가능한 진폭영역 내에서 응답특성을 조사하였다. 로킹진동 실험결과의 예를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타냈다.

이들 그림에 있어서 종축은 측정된 회전변위를 블록의 형상각으로 나눈 ( $\theta/\psi$ ) 일반화 각 변위이다.

Fig. 4에 나타낸 두 파형은 '시트없음', 가진진동수  $f=7$  Hz, 가진진폭  $Amp=1.15$  g의 실험 로

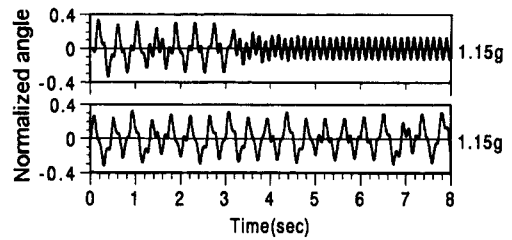


Fig. 4. Experimental rocking responses ( $f=7$  Hz,  $Amp=1.15$  g, without-sheet)

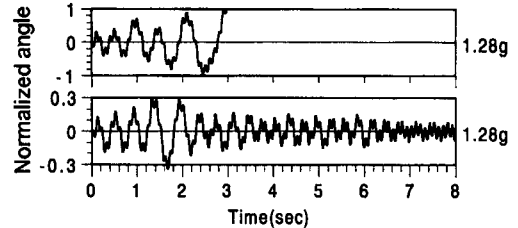


Fig. 5. Experimental rocking responses ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.28$  g, without-sheet)

킹응답이고, Fig. 5의 두 파형은 '시트있음', 가진진동수  $f=10$  Hz, 가진진폭  $Amp=1.28$  g의 실험 로킹응답이다. 두 그림에서 비교적 큰 진폭의 입력에 대한 응답에서는 동일입력 조건하에서도 서로 다른 응답을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 블록과 베이스의 접촉상태의 미소차이와 미끄럼운동에서 기인한다고 생각된다.

일반적으로는 미끄럼운동이 현저한 '시트없음'의 로킹응답에서는 비교적 작은 가진진폭에 대해서도 매번 다른 응답을 나타낸 것에 비하여 '시트있음'의 경우에는 비교적 입력에 대한 응답의 재현성이 양호하였다. 그러나, 이러한 경우에도 입력 진폭이 크게되면 응답의 재현성이 나빠게 된다.

특히, 실험응답의 재현성은 응답의 위상변화가 입력의 위상변화를 따라잡을 수 없게 되는 (1,1)모드 이상의 응답영역에서 나빠게 된다. 여기에서 (1,1)모드라는 것은 입력이 1주기 가해지는 동안 응답이 1주기 여기되는 로킹 정상응답을 의미한다.

### 3. 비선형 로킹모델

블록의 로킹진동에서는 미끄럼을 고려하면 회전운동은 '회전'과 '회전-미끄럼'의 두 가지로 나뉘고 충돌은 '회전에서 충돌'과 '회전-미끄럼에서

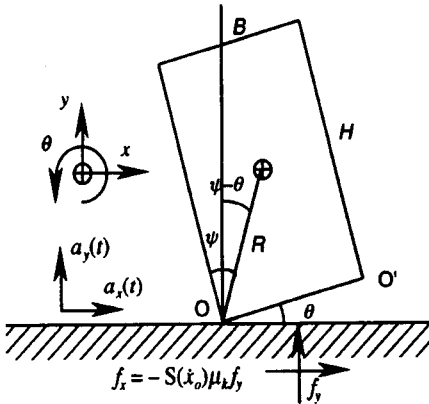


Fig. 6. Rocking model of rigid block structure

충돌'로 나누어 생각할 수 있다. 또한, 각각의 충돌에 대해서도 '미끄럼이 없는 충돌'과 '미끄럼 발생의 충돌'로 나누어 모델화 하였다.

### 3.1. 블록의 회전운동

미끄럼운동을 고려한 경우 수직과 수평입력을 동시에 받는 블록의 로킹진동은 Fig. 6과 같이 베이스에서 본 블록 중심의 상대 수평변위  $x$ , 상대 수직변위  $y$ , 회전변위  $\theta$ 로 나타낼 수 있다. 블록 밑면과 베이스 표면의 접촉이 완전하고 블록은 O와 O' 이외의 지점을 갖지 않는다고 가정한다. 베이스의 수평방향에  $a_x(t)$ , 수직방향에  $a_y(t)$ 의 가속도 입력이 작용하면 블록의 로킹 계시조건은 다음과 같다.

$$a_x > \frac{B}{H} (g + a_y) \quad (2)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이다. 또, 블록과 베이스간의 수평력의 총합을  $f_x$ 로 하고 수직력의 총합을  $f_y$ 로 하면,  $f_x$ 와  $f_y$ 는 각각 다음과 같이 된다.

$$f_x = ma_x(t) + m\ddot{x} \quad (3)$$

$$f_y = m\ddot{y} + ma_y(t) + mg \quad (4)$$

회전운동시에 블록의 미끄럼 발생조건은

$$\mu_s \leq \left| \frac{\ddot{x} + a_x}{\ddot{y} + a_y + g} \right| \quad (5)$$

로 된다. 여기서  $\mu_s$ 는 정마찰계수이다. 또한, 블록이 미끄러지기 시작할 때부터의 수직력의 총합  $f_x$ , 수평력의 총합  $f_y$ 와 블록과 베이스간의 동마찰계수  $\mu_k$ 의 관계는 다음과 같이 나타내진다.

$$f_x = -S(\dot{x}_0)\mu_k f_y \quad (6)$$

또, 점 O와 점 O' 둘레의 회전운동에 대한 운동방정식은 다음 식으로 된다.

$$I\ddot{\theta} = -(m\ddot{y} + ma_y + mg)R\{S(\theta)\sin(\psi - |\theta|) + S(\dot{x}_0)\mu_k \cos(\psi - |\theta|)\} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)에서  $S(\theta)$ 와  $S(\dot{x}_0)$ 는 부호함수이다.

이들 식으로부터 다음과 같은 블록 중심에 대한 회전운동과 수평방향의 미끄럼운동에 대한 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\theta} + p^2 f_1(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{x}) = 0 \quad (8)$$

$$\ddot{x} + f_2(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{x}) = -a_x(t) \quad (9)$$

여기서

$$f_1(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{x}) = \frac{S(\theta)\{\sin(\psi - |\theta|) + S(\theta)S(\dot{x}_0)\mu_k \cos(\psi - |\theta|)\} \left\{ 1 + \frac{a_y}{g} - \gamma \cos(\psi - \theta) \dot{\theta}_p^2 \right\}}{\{1 + \gamma \sin^2(\psi - |\theta|) + \gamma S(\theta)S(\dot{x}_0)\mu_k \cos(\psi - |\theta|) \sin(\psi - |\theta|)\}} \quad (10)$$

$$f_2(\theta, \dot{\theta}_p, \dot{x}) = \frac{-S(\dot{x}_0)\mu_k \{S(\theta)R \sin(\psi - |\theta|) \ddot{\theta} - R \cos(\psi - |\theta|) \dot{\theta}^2 + a_y + g\}}{\gamma \{1 + \gamma \sin^2(\psi - |\theta|) + \gamma S(\theta)S(\dot{x}_0)\mu_k \cos(\psi - |\theta|) \sin(\psi - |\theta|)\}} \quad (11)$$

이다. 여기서,  $I_0$ 는 블록의 관성모멘트,  $p$ 는 로킹진동수이다.  $I_0$ ,  $p$ ,  $\gamma$ ,  $\dot{\theta}_p$ 는 각각 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$I_0 = \frac{4mR^2}{3} \quad (12)$$

$$p^2 = \frac{m_g R}{I_0} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{mR^2}{I_o} \quad (14)$$

$$\dot{\theta}_o = \frac{\dot{\theta}}{p} \quad (15)$$

블록이 베이스에 충돌할 때 블록단의 변위와 속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_o = x - S(\theta)R \sin(\psi - |\theta|) \quad (16)$$

$$\dot{x}_o = \dot{x} + R \cos(\psi - |\theta|)\dot{\theta} \quad (17)$$

### 3.2. 블록과 베이스 충돌

블록과 베이스의 충돌을 생각할 때 가장 중요한 것은, 미끄럼을 동반한 회전운동으로부터 충돌할 경우, 충돌시의 미끄럼 발생유무와 에너지 소모이다. 이들 인자는 블록의 로킹응답에 큰 영향을 미치고 그 모델링에는 상세한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 충돌시 순간적으로 행해지고 미끄럼에 의한 에너지 소모를 고려한 Shenton의 충돌모델<sup>8)</sup>을 이용하였다. 미끄럼에 의한 에너지 소모에 대해서는 6.2절에서 고찰하고자 한다.

#### 3.2.1. 충분한 마찰을 갖는 경우

블록중심의 충돌전후의 속도관계는 다음 식으로 나타내진다.

$$\dot{x}_2 = -\frac{H\delta_i}{2} \dot{\theta}_1 \quad (18)$$

$$\dot{y}_2 = -S(\theta_1) \frac{B}{2} (\delta_i + 2e) \dot{\theta}_1 \quad (19)$$

$$\dot{\theta}_2 = \delta_i \dot{\theta}_1 \quad (20)$$

여기서 첨자 1은 충돌전의, 첨자 2는 충돌후의 물리량을 나타냈다. 또,  $\delta_i$ 는 충돌시의 에너지 소모율이고,  $e$ 는 블록의 형상에서 계산되는 충돌시의 반발계수이다.

미끄럼 발생이 없는 로킹진동에서는 회전축이 되는 블록단(회전단)에서의 수평과 수직속도 성분이 모두 0이 되기 때문에 충돌시의 에너지 소모율은 반발계수와 블록형상각에 의해 결정된다. 에너지 소모율  $\delta_i$ 와 속도비  $\lambda_x$ 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$\delta_i = 1 - \frac{3}{4} (1 + \lambda_x) \cos^2 \psi - \frac{3}{2} (1 + e) \sin^2 \psi \quad (21)$$

$$\lambda_x = \frac{2\dot{x}_1}{H\dot{\theta}_1} \quad (22)$$

여기서  $e$ 는 반발계수이고, 자유로킹진동 실험에서 얻어진 값을 적용하였다. 또,  $\lambda_x$ 는 수평방향의 속도와 회전속도의 비이다. 이 때 충돌전의 회전이 미끄럼을 동반하지 않는다면 충돌시의 에너지 소모율  $\delta_i$ 는 반발계수  $e$ 와 같게 된다. 충돌시에 미끄럼발생을 방지하기 위하여 필요한 최소마찰계수는 다음과 같다.

$$\bar{\mu}_s \geq \frac{H}{B} \left| \frac{\delta_i + \lambda_x}{1 + 2e + \delta_i} \right| \quad (23)$$

여기서  $\bar{\mu}_s$ 는 충돌시의 정마찰계수이다.

#### 3.2.2. 미끄럼 발생의 경우

미끄럼 발생의 경우 충돌전후의 속도의 관계식은 다음과 같다.

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 + S(\theta_1)S(\dot{x}_2) \bar{\mu}_k \frac{B}{2} (1 + \bar{\delta}_i + 2e) \dot{\theta}_1 \quad (24)$$

$$\dot{y}_2 = -S(\theta_1) \frac{B}{2} (\bar{\delta}_i + 2e) \dot{\theta}_1 \quad (25)$$

$$\dot{\theta}_2 = \bar{\delta}_i \dot{\theta}_1 \quad (26)$$

여기서 에너지 소모율  $\delta_i$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\delta}_i = \frac{1 - 3(1 - S(\theta_1)S(\dot{x}_2) \bar{\mu}_k \frac{H}{B})(1 + 2e) \sin^2 \psi}{1 + 3(1 - S(\theta_1)S(\dot{x}_2) \bar{\mu}_k \frac{H}{B}) \sin^2 \psi} \quad (27)$$

여기서  $\bar{\mu}_k$ 는 충돌시의 동마찰계수이다.

## 4. 응답해석

로킹응답해석에서는 정확도 확보와 샘플링시간의 변화가 용이한 Ralston의 최적 Runge-Kutta법을 이용해서 로킹 운동방정식을 풀었다. 또한, 로킹진동 실험에서의 최초의 반주기분의 진폭이 약 0.7배 주기가 약 0.65배가 된 것을 고려하여

해석을 행하였다. 그리고, 충돌시의 반발계수는 자유진동실험과 시뮬레이션에 의해 얻어진 0.926(시트없음)와 0.956(시트있음)을 이용하였다. 블록형상에서 계산된 반발계수는 0.925이고, 본 실험에서 이용된 블록과 베이스에 부착한 시트의 영향 때문에 반발계수가 시트의 탄성영향을 받아 약간 크게 된다.

블록의 로킹 모델에서는 시계방향의 회전과 반시계방향의 회전에 대한 운동방정식이 각각 다르다. 따라서, 블록과 베이스가 충돌할 때마다 운동방정식의 절환이 필요하고 회전변위가 0이 되는 점의 정확한 동정은 수치계산의 정도를 유지하는데 중요하다. 본 연구에서는 0에 가까운 값을 찾아내는 알고리즘을 개발해서  $\theta$ 가 충분히 작게 되었을 때 운동방정식의 절환을 행하였다. 그리고 입력은 수평방향의 가속도 입력  $a_x(t)$  만으로 하고 다음 식으로 주어진다.

$$a_x(t) = Amp \cos(2\pi ft + \phi) \quad (28)$$

여기서  $Amp$ 는 가진 진폭이고  $f$ 는 가진 진동수이다. 수치해석에 이용한 프로그램의 흐름도를 Fig. 7에 나타냈다.

프로그램은 크게 구분하여 미끄럼발생 여부를 판정하고, 회전변위를 계산하는 회전 프로세스와 회전변위가 0이 되는 시각을 찾아내고 예너

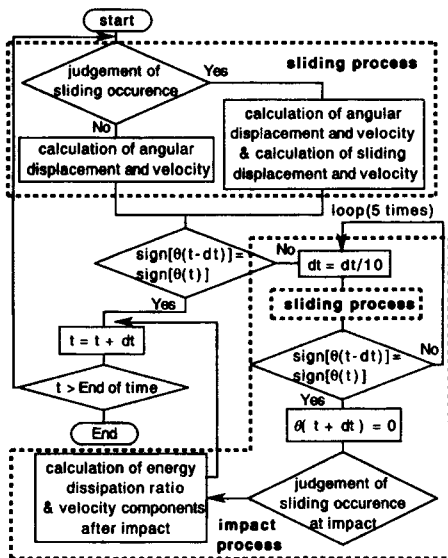


Fig. 7. Flow chart of analysis program

지소모를 고려하여 운동방정식의 절환을 계산하는 충돌 프로세스의 두 부분으로 구성되어 있다.

### 5. 실험과 해석결과의 비교에 의한 고찰

미끄럼이 블록의 로킹응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 행한 회전시와 충돌시의 정·동 마찰계수를 충분히 크게 하여 미끄럼이 발생하지 않는 조건에서의 해석과 실험의 비교 예를 Fig. 8~11에 나타냈다.

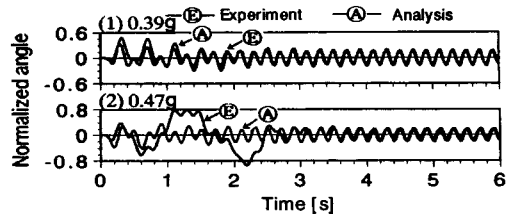


Fig. 8. Comparison of experimental results and analytical responses without sliding ( $f=5$  Hz,  $Amp$ =varying, without-sheet)

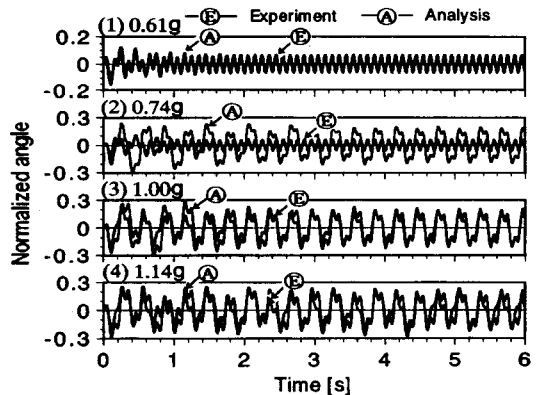


Fig. 9. Comparison of experimental results and analytical responses without sliding ( $f=10$  Hz,  $Amp$ =varying, without-sheet)

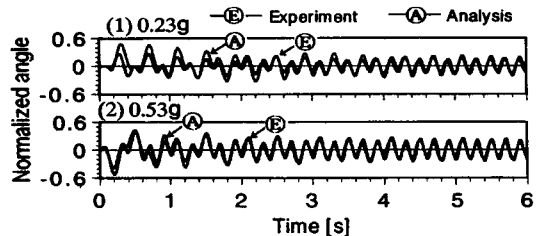


Fig. 10. Comparison of experimental results and analytical responses without sliding ( $f=5$  Hz,  $Amp$ =varying, with-sheet)

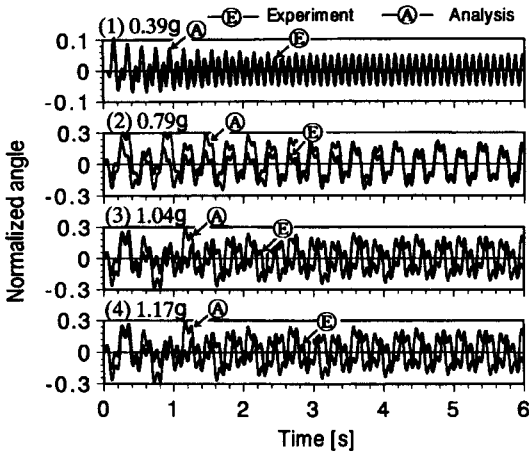


Fig. 11. Comparison of experimental results and analytical responses without sliding ( $f=10$  Hz,  $Amp$ =varying, with-sheet)

여기서 말하는 해석결과는 식(7)로 표현되는 운동방정식을  $\lambda_x=1$ 의 경우, 에너지 소모율의 식(20)을 적용해서 계산한 결과를 나타냈다. 본 장의 Fig.에 있어서 실선은 실험결과를 나타내고 점선은 해석결과를 나타냈다. 그리고, 이하의 설명에서 이용되는 ‘(m,n) 로킹진동 모드’라는 것은 입력이 n주기분 가해지는 동안 m주기분의 응답이 여기되는 로킹 정상응답을 의미한다.

### 5.1. ‘시트없음’의 경우

Fig. 8과 Fig. 9의 경우에는 미끄럼 없음의 해석결과와 시트없음의 실험결과를 비교결과를 나타냈다. 여기에서는 ‘(1,1)모드’ 로킹응답을 나타내는 저진폭입력의 경우( $f=5$  Hz이고,  $Amp=0.39$  g와  $f=10$  Hz이고,  $Amp=0.61$  g)에서는 실험결과와 미끄럼 없음의 해석결과가 잘 근사하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 고진폭 가진 경우에는 미끄럼이 발생하고 그 미끄럼운동이 응답 전체에 크게 영향을 미치고 있다. 특히, Fig. 8(2)( $f=5$  Hz이고,  $Amp=0.47$  g)와 Fig. 9(2)( $f=10$  Hz이고,  $Amp=0.74$  g)의 경우에는 미끄럼운동이 로킹응답에 미치는 영향이 현저하다. 한편,  $f=10$  Hz이고,  $Amp=1.0$  g과  $1.14$  g의 경우에는 실험결과와 해석결과가 잘 근사하고 있다. 그러나, 이 들 고진폭 영역에서의 실험결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 것과 같이 응답의 재현성이 나쁘고 해석결과와 크게 다른 응답을 나타내는 경우도 있다. 다시 말하면 각 실험에서 가진 전의 블록과 베

이스의 초기 접촉상태의 미소 차이와 미끄럼 발생에 의한 블록 위치의 변화가 블록의 로킹거동에 크게 영향을 주고 있다.

### 5.2. ‘시트있음’의 경우

‘시트있음’의 해석결과 실험결과를 비교에서는 Fig. 10(1)과 Fig. 11(1), (2)에 나타내어진 것처럼 비교적 작은 진폭영역에서 서로 잘 근사하고 있다. 또, Fig. 11(3)에 나타내어진 ‘시트있음’의 경우, 실험결과는 ‘시트없음’의 경우에 비해서 응답의 재현성이 양호하다는 것을 생각하면 미끄럼이 발생하는 경우에도 미끄럼운동은 최초의 한순간 만이고 그것이 그후의 응답에 영향을 미쳐 미끄럼 없음의 해석결과와 다른 거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

### 5.3. ‘시트없음’과 ‘시트있음’의 비교

Fig. 8(2), Fig. 9(2), (3), (4), Fig. 11(3), (4)의 결과에 나타난 것과 같이 ‘시트없음’과 ‘시트있음’의 경우 모두 다 비교적 고진폭에서는 미끄럼이 발생하고 있다. 그러나, ‘시트없음’에 있어서  $Amp$ 가 1.0 g, 1.14 g의 실험결과는 미끄럼의 영향을 크게 받지 않는 반면 ‘시트없음’의  $Amp=0.74$  g와 ‘시트있음’의  $Amp=1.04$  g와  $Amp=1.17$  g의 경우에는 미끄럼의 로킹응답에 대한 영향이 크다. 이것은 미끄럼이 발생하면 입력과 로킹 응답간의 위상에 차이가 발생하기 때문에 그 차이량에 의해 블록의 로킹 응답 전체에의 영향이 현저하기 때문이다. 가진 진폭의 값이 비교적 낮은 ‘시트없음’의  $Amp=0.74$  g와 ‘시트있음’의  $Amp=0.79$  g의 응답(Fig. 9(2)와 Fig. 11(2))를 비교하면 ‘시트없음’의 경우와 블록과 베이스 간의 마찰력이 작기 때문에 미끄럼 발생시의 수평방향의 변위가 크고 미끄럼 운동에 소모되는 운동에너지량 만큼 회전변위가 작게 된다. 따라서, ‘미끄럼이 발생하지 않으면 (1,3)모드의 로킹응답을 보이는 영역에서 미끄럼 발생과 더불어 응답거동이 크게 변화하고 (1,1)모드의 로킹응답으로 된다. 이 경우, 미끄럼 운동은 블록을 안정하게 하는 역할을 하고 미끄럼 발생에 의해 블록의 최대 회전변위가 작게 되었음을 알 수 있다. 또, 미끄럼 방향과 회전방향이 역으로 되고 블록의 회전운동에너지가 크게 소모되는 형태의 응답이 있다. 이 경우에는 미끄럼이 발생하지 않으면

(1,3)모드의 응답을 보이는 경우에도 미끄럼이 발생하면 충돌시의 운동에너지 소모가 커지고 결국 (1,1)모드의 응답을 나타냈다.

### 5.4. 시뮬레이션

본 연구에서 해석모델의 신뢰성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 행하였다. 미끄럼이 발생하고, 응답의 재현성이 좋은 두 조건을 만족하는 실험결과(Fig. 10(2)와 Fig. 11(4))를 대상으로 한 시뮬레이션 예를 Fig. 12와 13에 나타냈다.

Fig. 12는  $f=10$  Hz이고  $Amp=1.17$  g, 위로부터 순으로 정·동마찰계수가 0.425, 0.43, 0.435의 로킹응답이고 회전시의 마찰계수와 충돌시의 마찰계수는 같은 것으로 가정하였다. 일반적으로 동마찰계수와 정마찰계수는 다르지만 양자의 차이에 의해 응답이 크게 변화하고 문제는 복잡하게 하기 때문에 여기에서는 양자가 동일하다고 가정해서 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 12에 나타낸 것과 같은 응답의 재현성이 좋은 계산 예에 대한 시뮬레이션은 실험결과에 잘 근사하고 있다. 그러나, Fig. 13에 나타낸 것과 같이 비교

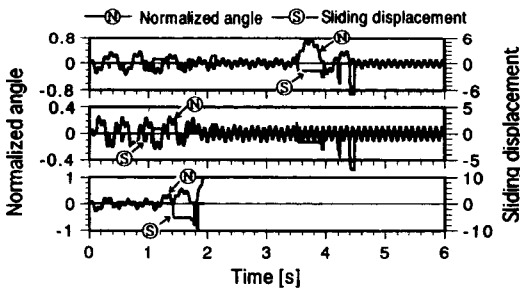


Fig. 12. Simulation of experiment result ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.17$  g, with-sheet,  $\mu_s = \mu_k = \overline{\mu}_s = \overline{\mu}_k = 0.425, 0.43, 0.435$ )

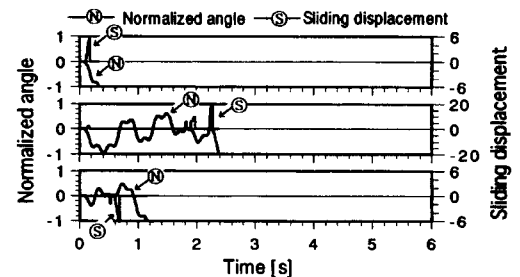


Fig. 13. Simulation of experiment result ( $f=5$  Hz,  $Amp=0.47$  g, without-sheet,  $\mu_s = \mu_k = \overline{\mu}_s = \overline{\mu}_k = 0.28, 0.29, 0.3$ )

적 저진동수에서 재현성이 나쁜 로킹 진동응답에 대한 시뮬레이션은 실험결과를 재현하지 않는다. 그 원인은 블록 위치의 미소변화에 대해서 블록과 베이스간의 접촉상태, 즉 블록과 베이스간의 마찰력이 미소변화하기 때문으로 생각되어진다.

Fig. 13에 나타낸 시뮬레이션 결과는  $f=5$  Hz이고  $Amp=0.47$  g의 예이고, 위로부터 순으로 정·동마찰계수가 0.28, 0.29, 0.3으로 ‘시트없음’의 경우의 응답 예이다. 이 경우에는 양호한 시뮬레이션 결과를 얻을 수 없었다. 이와 같이 미끄럼이 빈번히 발생하는 경우와 미끄럼에 의한 수평변위가 큰 경우의 계산결과는 실험결과와 상당히 다르게 나타났다. 이들 결과로부터 미끄럼에 의한 블록의 위치변화에 따른 블록과 베이스의 접촉상태의 변화는 로킹진동 거동을 크게 좌우하는 요인이라고 말할 수 있다.

## 6. 로킹거동에 있어서 미끄럼에 대한 고찰

정현과 가진에 의한 블록의 로킹응답을 평가할 때 블록의 회전변위와 속도의 관계는 매우 중요한 의미를 갖는다. 정현과 입력을 받는 블록의 로킹진동에서는 일반진동계의 응답과는 다르게 진동주기가 진폭과 더불어 변화하기 때문에 입력과 출력이 비례해서 나타나는 (m,n)모드로 불리는 정상응답이 되기도 하고 전도가 발생하기도 한다.

### 6.1. 위상도에 의한 고찰

동일 입력조건으로 미끄럼이 발생하지 않는 경우의 시계열과 위상도를 미끄럼이 발생하는 경우에 그것들과 비교해서 로킹진동에 미치는 영향을 조사하고자 한다. Fig. 14는 미끄럼 없음

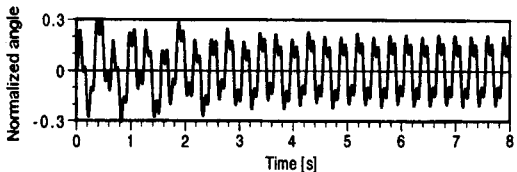


Fig. 14. Time history of analytical response without sliding ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.0$  g,  $\mu_s = \overline{\mu}_s = 1$ ,  $\mu_k = \overline{\mu}_k = 1$ ,  $e=0.926$ )



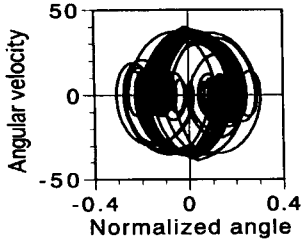


Fig. 15. Phase analytical response without sliding  
 ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.0$  g,  $\mu_s = \overline{\mu}_s=1$ ,  
 $\mu_k = \overline{\mu}_k=1$ ,  $e=0.926$ )

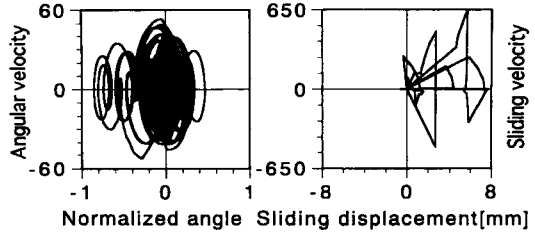


Fig. 17. Phase of analytical response in the case of sliding occurrence  
 ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.0$  g,  $\mu_s = \overline{\mu}_s=0.45$ ,  
 $\mu_k = \overline{\mu}_k=0.43$ ,  $e=0.926$ )

의 (1,3)모드 로킹응답의 한 예를 나타냈다. Fig. 15에 나타내어진 것과 같이 미끄러움이 발생하지 않는 로킹진동계에서는 응답이 정상상태에 들어가면 그 위상은 회전변위-회전속도축에 대해서 거의 대칭이 되고 블록은 안정된 거동을 나타냈다. Fig. 15에 있어서 복수의 곡선이 중첩되어 진하게 된 부분이 정상상태의 위상을 나타냈다.

Fig. 17은 Fig. 16에 나타난 미끄러움 발생을 동반한 로킹응답에 대한 위상도이다. 그림에서 나타난 것과 같이 미끄러움 발생에 의해 미끄러움 방향과 반대방향으로 회전 변위가 크게 되어 있다. 이 경우에는 회전변위-회전속도축에 대해서 대칭이 되지 않고 응답은 불안정한 상태로 된다. 블록과 베이스 간의 마찰력이 작으면 미끄러움 운동이 발생하고, 미끄러움에 의해 로킹응답과 입력과의 사이에 위상의 차이가 발생한다. 그 위상의 차이에 의해 블록의 회전변위는 크게 변화하고 블록은 불안정한 상태에 도달한다. 즉, 미끄러움이 발생한 경우의 로킹에서는 마찰계수가 응답에 미치는 영향이 크고 미끄러움이 발생하면 최대 회전변위가 크게 되기 때문에 블록이 진도에 도달할 가능성이 크게 된다는 것을 알 수 있다.

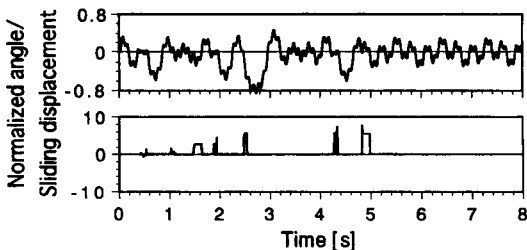


Fig. 16. Time history of rocking and sliding response in the case of sliding occurrence  
 ( $f=10$  Hz,  $Amp=1.0$  g,  $\mu_s = \overline{\mu}_s=0.45$ ,  
 $\mu_k = \overline{\mu}_k=0.43$ ,  $e=0.926$ )

## 6.2. 에너지 소모율에 의한 고찰

미끄러움을 고려한 블록의 로킹진동에 있어서 블록과 베이스의 충돌은 매우 중요한 의미를 갖는다. 미끄러움이 발생하지 않는 경우의 로킹진동에서는 충돌시의 에너지 소모율이 일정하지만 '미끄러움-회전'에서의 충돌을 생각하면 충돌시에 미끄러움이 발생하는가 어떤가에 의해서 다르게 된다. 미끄러움이 발생하지 않는 경우의 에너지 소모율은 식(21)과 식(22)에 의해 결정된다.

Fig. 18에 있어서 회전으로부터의 충돌의 경우에는  $\lambda_x=1$ 이 되지만  $\lambda_x$ 가 -1 이외(미끄러움-회전에서의 충돌)의 경우에는 블록이 미끄러지는 방향과 회전방향의 관계에 의해서 에너지 소모율이 '회전'에서 충돌의 경우(에너지 소모율=반발계수)에 비교해서 크거나 작게 된다. 이것은 블록의 로킹응답과 진도조건에 큰 영향을 미친다.

미끄러움이 발생하는 경우의 에너지 소모율은 식(27)에 의해 결정된다. 이 경우에는 Fig. 19에 나타난 것과 같이 에너지 소모율이 블록의 형상비와 충돌시의 동마찰계수에 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 또한, 미끄러움이 발생하는 경우의 에너지 소모율은 마찰력이 크면 클수록,

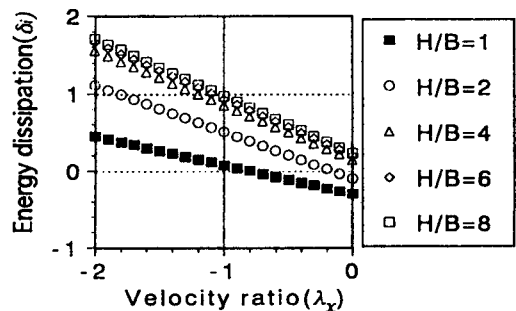


Fig. 18. Energy dissipation rate in case of without-sliding

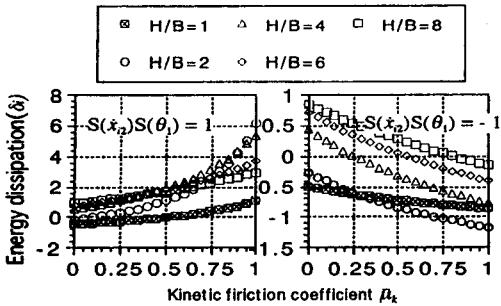


Fig. 19. Energy dissipation rate in case of sliding occurrence

블록의 형상비가 크면 클수록 크게 된다. 그리고, 충돌전의 회전방향과 충돌후의 미끄럼 방향이 같으면 에너지 소모율이 크게되고, 충돌전의 회전방향과 충돌후의 미끄럼 방향이 다르면 에너지 소모율이 작게 된다. 여기에서 에너지 소모율이 음(-)값이 되면 블록은 바운싱(bouncing)현상을 나타냈다. 바운싱은 회전운동 중심축이 충돌전후에 동일하게 되는 현상을 말한다.

### 7. 결론

본 연구에서는 정현과 가진에 의한 로킹진동 실험과 Ralston의 최적 Runge-Kutta법을 이용해서 로킹응답해석을 행하고, 그 결과의 고찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 로킹진동 실험결과의 시뮬레이션에서는 잘 근사한 결과를 얻을 수 있었고, 본 연구의 로킹진동모델의 타당성을 검증할 수 있었다.
- 2) 로킹진동응답의 비재현성에 대한 직접적인 원인은 블록과 베이스의 접촉상태의 미소한 차이에 있고, 그것은 미끄럼에 있어서의 큰 차이로 나타나고 블록의 로킹거동을 크게 변화시킨다.
- 3) 로킹이 미끄럼 운동을 동반하는 경우에는

입력과 로킹간의 위상에 차이가 발생하고 블록은 불안정한 상태가 되고 전도하기 쉽게 됨을 알 수 있었다.

- 4) 블록과 베이스간의 마찰력이 크면 클수록 미끄럼이 발생할 때 에너지 소모율의 변화도 크게되고, 로킹응답에 미치는 영향도 크게된다.

### 참고문헌

- 1) 鄭萬裕, 鈴木浩平, 剛体 ブロック型構造物のロッキング振動に関する基礎的研究, 日本機械學會論文集, 第62卷 603号, pp. 4136-4146, 1997.
- 2) Yuji Ishiyama, Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 635-650, 1982.
- 3) Housner, G. W., The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes, Bullen of the seismological society of America, Vol. 53, No. 2, pp. 404-417, 1963.
- 4) Spanos, P. D. and Koh, A. S., Rocking of rigid blocks due to harmonic shaking, J. Engrg. Mech. Div., ASCE, Vol. 110, No. 11, pp. 1627-1642, 1984.
- 5) Solomon C. S. Yim and Huan Lin, Nonlinear impact and chaotic response of slender rocking objects, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 9, pp. 2079-2100, 1991.
- 6) Hogan, S. J., On the dynamics of rigid-block motion under harmonic forcing, Proc. R. Soc. Lond. A 425, pp. 441-476. 1989.
- 7) Yim, C. S., Chopra, A. K. and Penzien, J., Rocking response of rigid blocks to earthquakes, Earthquake Engrg. Struct. Dynamics, Vol. 8, No. 6, pp. 565-587, 1980.
- 8) Shenton, H. W. and Jones, N. P., Base excitation of rigid bodies: formulation, J. Engrg. Mech., Vol. 117, No. 10, pp. 2286-2306, 1991.