

2차원 정현파 가진을 받는 강체블록의 록킹진동에 있어서의 카오스

(미끄럼이 없는 경우에 대하여)

Chaos on the Rocking Vibration of Rigid Block Under Two Dimensional Sinusoidal Excitation (In the Case of No Sliding Occurrence)

정만용* · 김정호** · 김지훈** · 양광영*** · 양인영***

M.Y. Jeong · J.H. Kim · J.H. Kim · G.Y. Yang · I.Y. Yang

(1999년 2월 10일 접수, 1999년 4월 22일 채택)

ABSTRACT

This research deals with the non-linearities associated with impact and sliding for the rocking behavior of rigid block subjected to two dimensional excitation of horizontal and vertical direction. The non-linearities examined of impact between block and base: The transition of two governing rocking equations, the abrupt reduction in kinetic energy associated with impact. In this study, the rocking vibration system of two types are considered for several friction condition. One is the undamped rocking vibration system, disregarding energy dissipation at impact and the other is the damped rocking system, including energy dissipation at impact. The response analysis by non-dimensional rocking equation is carried out for the change of excitation amplitude. The chaos responses were discovered in the wide response region, particularly, in the case of high vertical excitation and their chaos characteristics are examined by Poincare map, power spectra and Lyapunov Exponent. The complex behavior of chaos response, in the phase space, were illustrated by Poincare map. Therefore, Poincare map will be a significant material in order to understand chaos of rocking system.

* Numazu College of Technology

** 조선대학교 수송기계부품 공장자동화 연구센터

*** 조선대학교 기계공학부

1. 서 론

강체블록의 록킹진동에 관한 지금까지의 많은 연구에 있어서 록킹거동은 시스템 파라미터와 가진력의 위상변화에도 민감하게 반응한다는 것이 밝혀졌다. 1978년에 Aslam 등¹⁾은 가진실험을 행해 동일입력 조건에도 불구하고 일부영역에서의 록킹응답에 재현성이 없고 실험조건외의 미소변화에도 민감하다고 보고하고 있다. 1980년 Yim 등²⁾은 선형 록킹모델을 이용한 결정론적 수치해석 연구를 행해 블록크기, 형상비, 충돌시의 반발계수, 가진진폭, 가진 주파수 등에 대한 록킹응답의 예민한 의존성에 대해서 고찰했다. 그 연구결과에서는 록킹응답이 시스템 파라미터의 미소변화에 민감하게 반응할 수 있다는 것과 그 확률적 경향에서는 형상비가 작고 크기가 블록만이 안정을 유지할 수 있다라고 보고하고 있다. 1984년 Spanos와 Koh³⁾, 1989년 Tso와 Wong⁴⁾은 지진파를 받는 경우의 록킹거동의 해석에 있어서 거동의 복잡성과 확증을 갖지 못한 어려움에 대한 인식으로부터 형상이 블록형이고 입력이 주기입력이라고 가정한 것과 운동방정식을 선형화하는 것에 의해 시스템을 단순화시켰다. 또한, 주기응답과 준주기응답(sub-harmonic)의 존재를 예측할 수 있는 근사해석법을 개발함과 더불어 해의 안정성에 대해서도 고찰하였다. 이들 연구에 의해 록킹거동의 이해에 있어서 중요한 진보가 얻어졌다. 그러나, Tso와 Wong은 Spanos와 Koh에 의한 선형해석모델로는 가진실험에서 얻어진 록킹응답을 재현할 수 없었다고 보고하고 있다.

1993년 S.C.S. Yim과 H. Lin⁵⁻⁷⁾은 충돌시의 에너지 소모를 고려하지 않는 비감쇄 록킹진동계에 관한 연구에서 주기응답과 전도 이외의 연구에서 얻어지지 않았던 준주기응답과 카오스응답의 존재를 확인했다. 또, 카오스응답의 존재를 해석적으로 예측할 수 있는 Melnikov함수에 근거한 근사해법을 제안하고, 그 근사해법의 정도에 대해서는 Spanos & Koh의 선형모델을 이용한 수치해석 결과에 의해 평가했다. 또 1996년의 연구에서는 1993년의 연구에 있어서 비감쇄 록킹진동계에 있어서는 카오스응답의 존재를 확

인했지만 충돌시의 에너지 소모를 고려한 감쇄 록킹진동계에 대한 수치해석에서는 카오스응답의 존재를 확인할 수 없었던 것에서 정현파의 미소진폭의 정상 랜덤노이즈를 합성한 입력파에 대해 수치해석을 행하여 카오스응답의 존재를 확인하고 그 응답특성에 대해 고찰하였다.

鄭, 鈴木 등⁸⁻¹⁰⁾은 지금까지의 연구에 있어서 실험에서는 레이저변위계를 이용한 록킹진동 실험방법을 제안하고 비선형록킹 운동방정식을 이용한 응답해석에서는 정도를 확보할 수 있는 알고리즘을 개발했다. 또한, 실험응답의 시뮬레이션에서는 미끄럼과 충돌시의 에너지 소모율에 관한 비선형성이 록킹응답에 주는 영향을 조사했다. 또한, 2차원 입력의 경우 등 미끄럼운동이 심한 경우에 대해서는 각 충돌에 있어서 블록과 베이스의 접촉상태가 미소하게 변화할 수 있다는 것과 미끄럼이 발생하는 경우 블록의 위치변화에 대해 블록과 베이스간의 마찰력이 미소변화할 수 있다는 것 등의 실제 록킹계에 있어서 고려되어지는 충돌의 비선형성이 록킹응답에 크게 영향을 미친다고 생각해 기존의 록킹모델로는 실제의 록킹현상을 표현할 수 없고 그 거동특성을 이해하는 것이 곤란하다고 평가했다.

본 연구에서는 록킹진동계를 비선형성이 강한 복잡계(complex system)로 취급해서 그 거동특성을 해명하는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 록킹진동계의 비선형성으로서는 '회전중심이 바뀔 때의 운동방정식의 절환', '충돌시의 회전속도의 단절적인 감소(운동에너지의 소모)', '수평방향의 미끄럼운동' 등을 들 수 있지만, 본 연구에서는 운동방정식의 절환과 충돌시의 에너지 소모만을 고려하여, 그것들에 의한 록킹진동의 비선형특성을 명확히 하고자 한다.

2. 록킹진동 모델

2.1 블록의 회전운동

수직과 수평방향의 입력을 동시에 받는 블록의 록킹진동은 Fig.1과 같이 블록의 앞에서 본 블록중심의 수평방향의 상대변위 x , 수직방향의 상대변위 y 와 회전변위 θ 로 표현할 수 있다. 블록저면과 베이스표면과의 접촉이 완전하고 블

록은 O와 O' 이외의 지점을 갖지 않는다고 가정한다. 베이스의 수평방향의 가속도 입력을 $a_h(t)$, 수직방향의 가속도 입력을 $a_v(t)$ 로 하면 록킹발생조건은 다음과 같다.

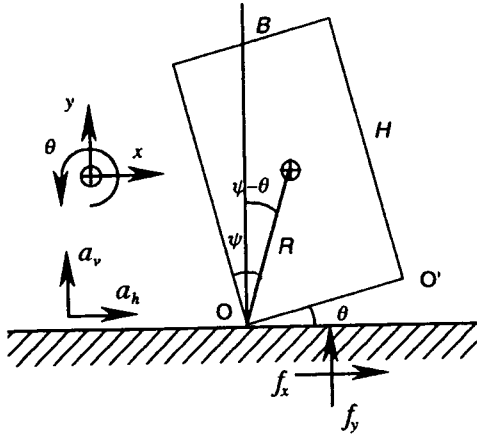


Fig. 1 Rocking of rigid block

$$a_h > \frac{B}{H}(g + a_v) \dots\dots\dots (1)$$

여기에서, g 는 중력가속도이다. 그리고 블록과 베이스 사이의 수평력을 f_x 로 하고, 수직력을 f_y 로 하면, f_x 와 f_y 는 각각 다음과 같다.

$$f_x = ma_h(t) \dots\dots\dots (2)$$

$$f_y = ma_v(t) + mg \dots\dots\dots (3)$$

또 점 O와 O' 둘레의 회전운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$I\ddot{\theta} = mRa_h(t)\cos(\psi - |\theta|) - S(\theta)(ma_v(t) + mg)R\sin(\psi - |\theta|) \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서 $S(\theta)$ 는 부호함수이다. 이들 식에서 블록중심 둘레의 회전운동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\ddot{\theta} + p^2f(\theta) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

여기에서

$$f(\theta) = \frac{a_h}{g} \cos(\psi - |\theta|) + S(\theta)(1 + \frac{a_v}{g})\sin(\psi - |\theta|) \dots\dots\dots (6)$$

이다. I_o 는 블록의 양단에 대한 관성모멘트, p 는 록킹진동수로서 각각 다음과 같은 식으로 나타

내어진다.

$$I_o = \frac{4mR^2}{3} \dots\dots\dots (7)$$

$$p^2 = \frac{mgR}{I_o} \dots\dots\dots (8)$$

2.2 블록과 베이스의 충돌

모델에서는 미끄럼운동을 고려하지 않기 때문에 블록과 베이스의 충돌은 회전운동으로 부터의 충돌만으로 제한된다. 따라서, 충돌시의 에너지 소모율은 블록형상비(block shape ratio)에 의한 다음 식에서 얻어진다.

$$e = 1 - \frac{3}{2} \sin^2\psi \dots\dots\dots (9)$$

또한, 충돌전후의 회전속도관계는 다음 식으로 표현된다.

$$\dot{\theta}_2 = e\dot{\theta}_1 \dots\dots\dots (10)$$

여기에서 $\dot{\theta}_1$ 과 $\dot{\theta}_2$ 는 각각 충돌전후의 회전속도를 나타낸다.

3. 록킹응답 해석

비선형모델을 이용한 록킹응답해석에서는 우선 록킹운동방정식을 록킹주파수에 대해서 일반화하기 위해 $\theta = \psi$, $pt = \tau$, $\hat{\theta} = \dot{\theta}/\psi$, $\omega = p\Omega$ 를 이용해서 무차원화 했다. 일반화 록킹운동방정식은

$$\ddot{\theta} + p^2f(\theta) = 0 \dots\dots\dots (11)$$

이 된다. 여기에서

$$f(\theta) = \frac{a_h}{g} \cos\psi(1 - |\theta|) + S(\theta)(1 + \frac{a_v}{g})\sin\psi(1 - |\theta|) \dots\dots\dots (12)$$

이고, 충돌전후의 속도관계식은

$$\hat{\theta}_2 = e\hat{\theta}_1 \dots\dots\dots (13)$$

이 된다. 수평과 수직방향의 일반화 입력은 각각

$$a_h(\tau) = A_h\psi g \sin(\Omega_h\tau + \phi_h) \dots\dots\dots (14)$$

$$a_v(\tau) = A_v\psi g \sin(\Omega_v\tau + \phi_v) \dots\dots\dots (15)$$

이 된다.

록킹응답해석에서는 Ralston의 최적 Runge-Kutta법을 이용해서 비선형록킹 운동방정식을 풀었다. 또한, 일반화 시간의 Sampling time은 0.004로 하고 운동방정식의 절환은 회전변위의 절대치가 10^{-6} 보다 작게 되었을 때에 회전변위를 0으로 하여 행하였다. 또한, 충돌시의 에너지 소모율은 식(9)을 이용했다. 그리고, 충돌시 에너지 소모가 없는 비감쇄록킹계와 충돌시의 에너지 소모를 고려한 감쇄록킹진동계로 나누어 행하고 각각의 응답특성에 대해서 고찰했다. 가진 주파수는 일반화주파수 15.708만으로 제한하고 블록이 베이스에서 떨어져(Jump) 재차 베이스에 충돌하는 경우에는 해석이 매우 곤란하기 때문에 가진 진폭을 블록이 떨어지지 않을 정도로 제한했다.

응답해석결과의 고찰에 있어서는 일반화 시간 30, 또는 35까지의 응답시계열, 입력가속도 0에 대해서 응답을 위상평면에 나타낸 Poincare map, 시계열 응답의 3000번째에서 7096번째까지의 응답에 대한 Power spectra를 이용했다. Lyapunov지수의 계산에는 Sato 등에 의해 제안된 수법을 이용하고 50000개의 시계열 데이터를 이용했다. 또한, 분기도는 150000번째에서 200000번째의 시계열 데이터에 이용해서 작성했다.

4. 록킹진동 고찰

4.1 비감쇄록킹진동

두 운동방정식으로 구성되는 록킹진동계의 기본 거동특성을 조사하기 위해 충돌시 에너지소모가 없는 비감쇄록킹진동계를 우선 고찰하기로 한다. 비감쇄록킹진동계는 실제로는 존재할 수 없지만 베이스가 탄성재의 경우 등 충돌시 에너지 소모가 작은 비감쇄록킹진동계에 가까운 계는 충분히 생각할 수 있다. 또, 그 응답특성은 감쇄록킹진동특성을 이해하는 데 있어서 중요한 의미를 갖는다.

4.1.1 수평입력에 의한 응답

강체블럭이 수평방향만의 일차원 입력을 받는 경우의 가진진폭에 대한 의존성을 조사하기

위해 일반화 진동수 15.708에 대한 록킹응답의 분기도를 Fig. 2, 록킹응답의 예를 Fig. 3에서 Fig. 6까지에 나타내었다. 분기도에 있어서 공백 부분은 블록의 전도를 의미하고, Fig. 3~6에서 (a), (b), (c)는 각각 록킹응답에 대한 시계열, Power spectra, Poincare map을 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 5의 (a)에 나타낸 것과 같이 비감쇄 록킹응답 시계열은 랜덤파형으로 되고, Fig. 3과 Fig. 5의 (c)에 나타낸 것과 같이 위상공간 상에서 Chaos attractor를 행사한다. 이들 Attractor는 가진 진폭의 변화와 더불어 위상공간에서 넓게 확장되기도 하고 일부영역으로 수렴되기도 한다. 또한, Attractor는 상하대칭이 되고 Attractor를 형성하는 흡인영역의 수는 진폭의 변화와 함께 기수배로 증가하기도 하고, 감소하기도 함을 알 수 있다. 또, Fig. 6에 나타낸 것과 같이 일부영역에서 준주기 응답도 출현된다. 각각의 응답에 대한 최대Lyapunov지수는 위로부터 순서로 1.5, 0.95, 0.9, 1.3, 0이었다.

4.1.2 수평과 수직의 2차원 응답에 대한 응답

여기에서는 수평가진진폭을 3과 4로 고정하고 수직가진진폭을 1에서 3까지 변화시켜 가면서 Poincare점을 계산해서 Fig. 8과 9의 분기도를 작성했다. Fig. 10은 수평방향의 입력조건의 Fig. 3과 같고, 수직방향의 가진진폭 0.15가 가해진 경우의 Attractor를 나타내고, 그 형상은 Fig. 3에 비해서 크게 변하지는 않았지만 비틀어 놓은 것과 같은 형상이 되고 흡인영역도 넷으로 분리되어 있음을 알 수 있다. 또 Fig. 11은 수직가진진폭이 0.3으로 증가한 경우의 록킹응답을 나타내고, 그 Attractor에 나타낸 것과 같이 위상공간상에 다수의 흡인영역은 같고 응답이 위상전체에 확산하여 최종적으로는 블록이 전도하고 있음을 알 수 있다. 이 두 록킹응답의 최대 Lyapunov지수는 각각 약 1.1과 0.31이었다.

이들 결과로부터 블록이 2차원 입력을 받으면 응답의 Attractor는 상하비대칭으로 되고 입력 파라미터의 변화에 대한 록킹응답의 예민성도 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 수직가진진폭이 비교적 작은 경우를 제외하는 모든 영역에서 록킹진동응답은 다수의 흡인영역을 갖고 위상공간(phase space) 전체에 확산된다. 즉, 블

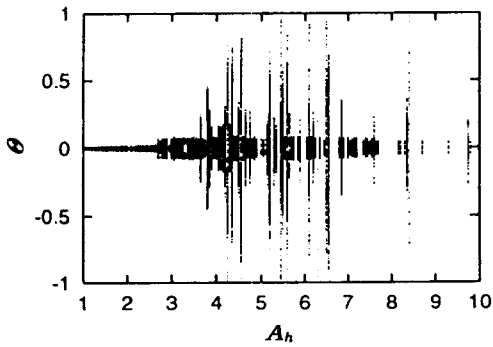


Fig.2 Bifurcation diagram of undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=1\sim 10$, $e=1$)

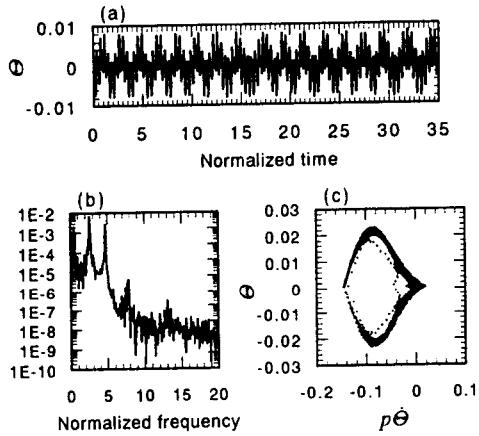


Fig.3 Undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=2.0$, $e=1$)

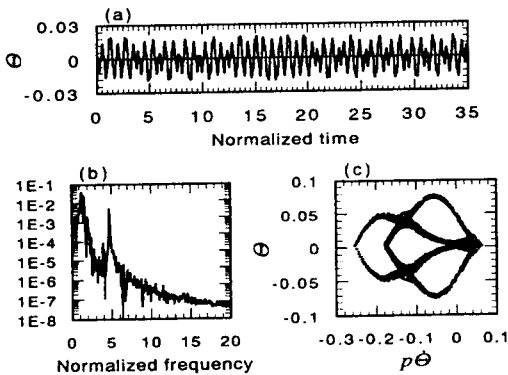


Fig.4 Undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=3.0$, $e=1$)

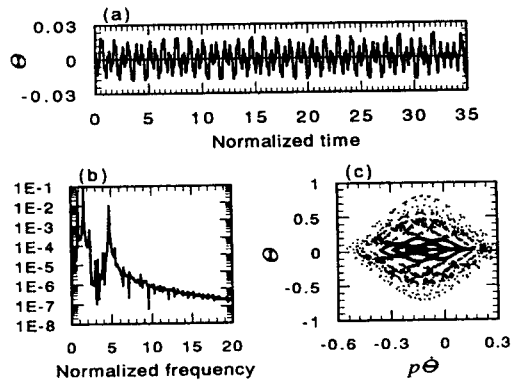


Fig.5 Undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=3.957$, $e=1$)

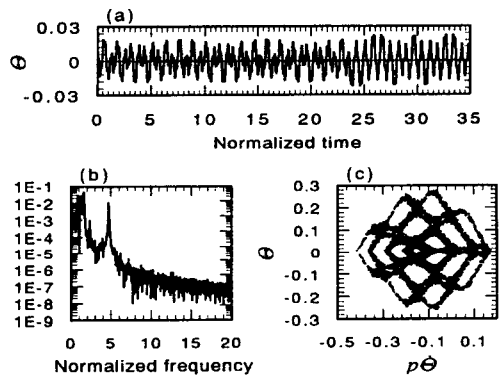


Fig.6 Undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=3.958$, $e=1$)

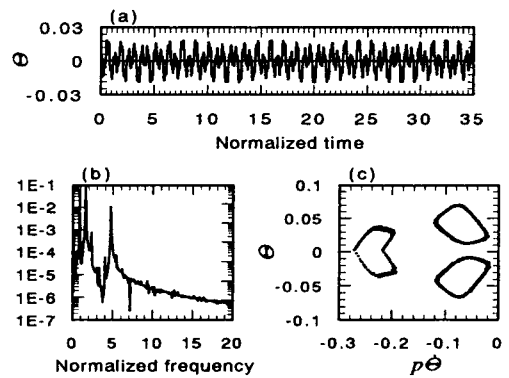


Fig.7 Undamped rocking response ($\Omega_h=15.708$, $A_h=3.969$, $e=1$)

록이 2차원입력을 받으면 그 응답은 불안정하게 되고 전도(tumble)할 확률도 높게됨을 알 수 있다.

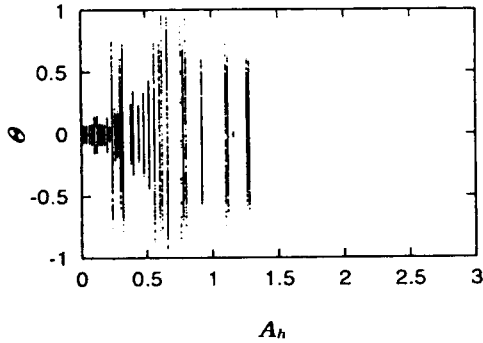


Fig. 8 Bifurcation diagram of undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 3.0$, $A_v = 1 \sim 3$, $e = 1$)

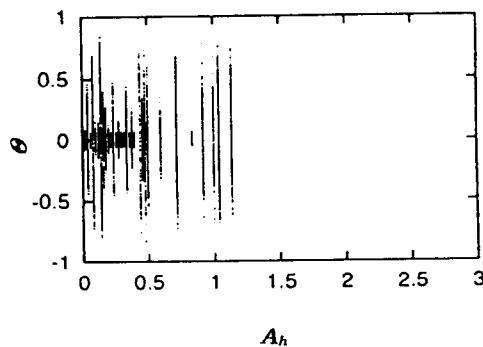


Fig. 9 Bifurcation diagram of undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 1 \sim 3$, $e = 1$)

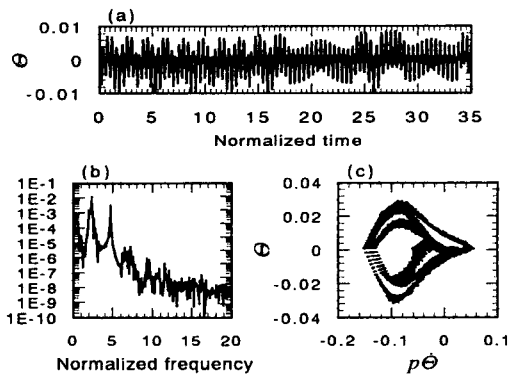


Fig. 10 Undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 2.0$, $A_v = 0.15$, $e = 1$)

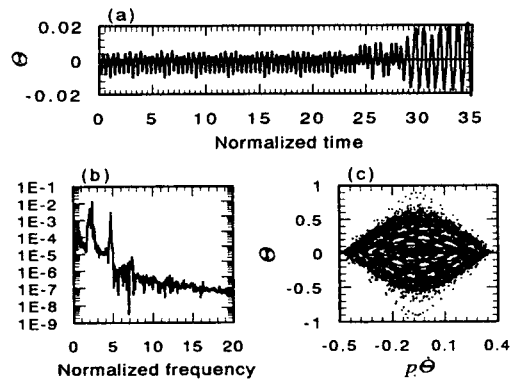


Fig. 11 Undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 2.0$, $A_v = 0.35$, $e = 1$)

4.2 감쇄록킹진동

비감쇄 록킹진동계에 대해 설명했지만 실제로는 충돌시의 에너지 소모가 없는 록킹계는 존재할 수 없다. 즉, 블록의 형상비가 무한히 크지 않는 한, 블록과 베이스를 완전강체로 생각하는 한 많은 적든 충돌시의 에너지 발산은 반드시 발생한다. 본장에서는 블록과 베이스가 강체인 경우, 형상에 의한 에너지소모율을 적용해서 에너지소모가 록킹응답에 미치는 영향에 대해 조사했다.

4.2.1 수평입력에 대한 응답

수평입력만을 받는 록킹응답의 분기도를 Fig. 12에 나타낸다. 그림에서 나타내어지는 것과 같이 충돌시의 에너지 소모에 의해 흡인영역이 좁게되고 어느 한 점으로 수렴함을 알 수 있다. 본 연구에 적용한 진폭범위에서는 (1,1)모드와 (1,3)모드의 주기응답만이 존재한다. Fig. 13은 수평방향만의 1차원 입력에 대한 감쇄록킹진동계의 응답시계열의 한 예이고, 세 개의 흡인안정점을 갖는 (1,3)모드의 록킹 주기응답이다. 세 개의 흡인안정점(Singular point)의 주변에 분포하는 점은 과도응답에 대한 Poincaré점을 나타내고 시간의 경과와 더불어 급속히 안정점으로 수렴되어 정상응답상태로 됨을 알 수 있다.

4.2.2 수평과 수직의 2차원 입력에 대한 응답

수평과 수직의 2차원 입력을 받는 경우의 록킹진동에 대해서는 응답을 주기응답과 카오스응

답으로 나누어 고찰했다. 우선 Fig. 8과 9의 비감쇄록킹응답의 분기도에 상응하는 분기도를 Fig. 14와 15에 나타내었다. 2차원 입력의 경우에도 1차원 입력의 경우와 같이 충돌시의 에너지 소모의 영향을 받고, 흡인영역이 좁게 되지만 수직방향의 가진 진폭이 어느 정도 크게되면 응답이 위상평면에서 급격하게 확산되고 카오스 응답이 됨을 알 수 있다.

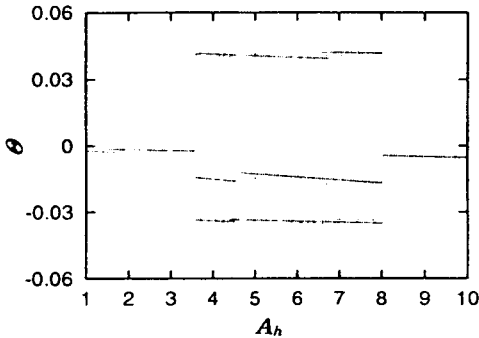


Fig. 12 Bifurcation diagram of damped rocking response ($\Omega_h = 15.708$, $A_h = 1 \sim 10$, $e = 0.925$)

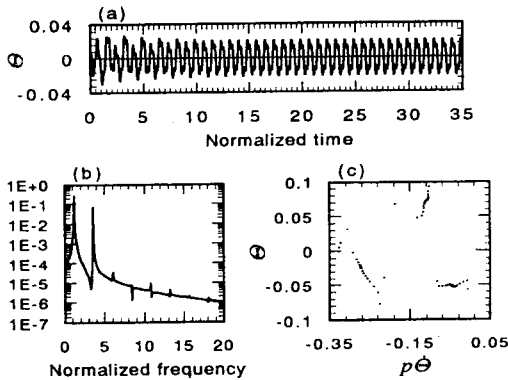


Fig. 13 Damped rocking response ($\Omega_h = 15.708$, $A_h = 3.6$, $e = 0.925$)

주기응답의 대표 예의 시계열, Power spectra, Poincare map을 Fig. 16, 18, 20, 21에 나타내고, 카오스응답의 대표 예를 Fig. 17, 19, 22에 나타내었다. 주기응답의 경우, Power spectra, Poincare map은 일반화 시간 25이상의 시계열로 작성했다. Fig. 16의 록킹응답은 시계열에서

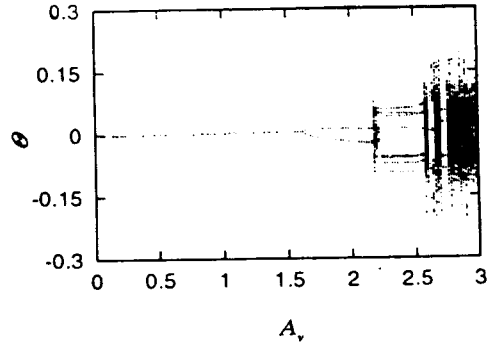


Fig. 14 Bifurcation diagram of damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 3.0$, $A_v = 1 \sim 3$, $e = 0.925$)

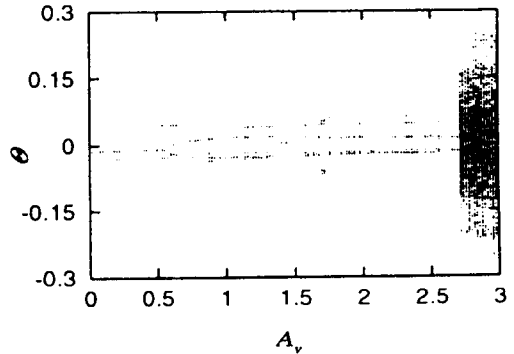


Fig. 15 Bifurcation diagram of damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 1 \sim 3$, $e = 0.925$)

알 수 있는것과 같이 긴 과도응답을 거쳐 (1,4)모드의 주기응답으로 된다. 이 경우, 록킹응답의 Poincare map은 두 개의 흡인안정점으로 구성되어 있는 것처럼 보이지만 실제로는 그것들에 근접한 또다른 흡인점을 갖고 (1,4)모드 또는 (1,5)모드의 주기응답으로 된다. 이 경우의 록킹응답은 (1,2)모드에서 (1,4)모드로 변화하는 과정에 있다고 할 수 있다. 또, Fig. 18의 경우에는 근접한 두 흡인점과 또하나의 흡인점을 세 흡인점(Limit point)으로 구성되고 (1,3)모드의 록킹응답으로 된다. 이 경우에는 근접한 두 흡인점에서는 이미 주기배분기가 시작되었음을 알 수 있다. Fig. 20에 나타낸 록킹응답도 세 흡인점으로 구성되어있는 것처럼 보이지만 자세히 보면 각각의 흡인점은 근접한 두 흡인점으로 구성되

어 있다. 즉, (1,6)모드의 록킹주기응답으로 된다. 두 개의 근접한 흡인점이 완전히 분리되어 위상공간에 확산되어진 응답의 예를 Fig. 21에 나타내었다. 지금까지 설명한 주기록킹응답의 Lyapunov지수는 모두 0이었다. 이들 흡인점은 Fig. 14, 15의 분기도에도 나타난것과 같이 주기배분기의 상태를 나타내고 수직가진진폭의 증가와 더불어 주기배분기가 발생되고 우수모드로 된다. 여기에서 말하는 (m,n) 록킹모드는 입력이 n주기분 작용하는 동안 m주기분의 응답이 존재하는 주기록킹정상응답의 형태를 말한다.

다음으로 카오스응답의 예를 Fig. 17, 19, 22에 나타내었다. 이들 카오스 응답의 Poincare map은 Chaos attractor를 형성하고 그 Attractor는 반시계방향의 소용돌이 형상을 하고 있다. 이것은 2차원 입력을 받는 비감쇄 록킹응답을 Attractor에서도 볼 수 있었고, 수직방향의 입력이 그 원인임을 알 수 있다. 또, 소용돌이 형상은 수직방향의 가진진폭의 증가와 더불어 급격한 형태로 변화함을 알 수 있다. Fig. 17의 록킹응답은 두개의 근접한 흡인점으로 구성되는 세 개의 흡인영역을 갖는다. Fig. 19의 록킹응답은 6개의 흡인영향을 받고 각각의 흡인영역에로의 흡인과 탈출이 반복된다. 이들 카오스응답에 대한 Lyapunov지수는 각각 0.3, 1.52, 0.98이었다.

이상의 결과로부터 블록의 록킹진동응답은 충돌시 에너지 소모율에 민감하게 영향을 받고 특히 2차원 입력을 받는 록킹응답의 경우에는 수직가진진폭영역에서 카오스응답으로 되고 가진진폭의 미소변화에도 크게 영향을 받는다.

또한, 2차원 입력을 받는 록킹진동응답에서는 입력과라미터에 대한 의존성이 일차원입력의 경우보다 강하고 Attractor의 형상도 급격하게 변동함을 알 수 있다.

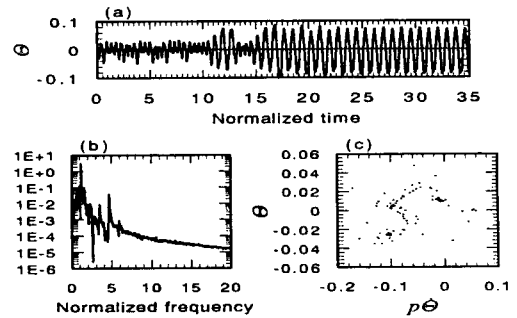


Fig. 17 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 2.0$, $A_v = 1.9$, $e = 0.925$)

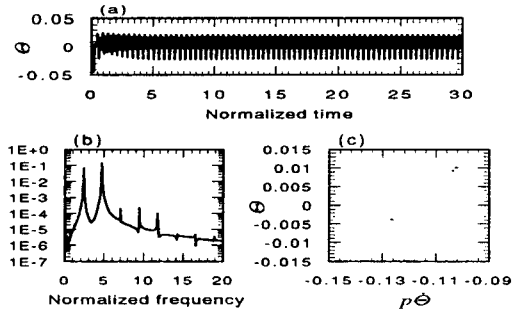


Fig. 18 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 3.0$, $A_v = 1.7$, $e = 0.925$)

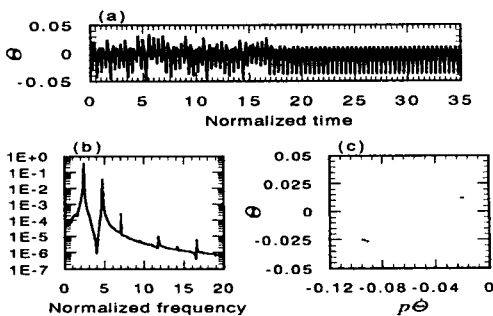


Fig. 16 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 2.0$, $A_v = 1.3$, $e = 0.925$)

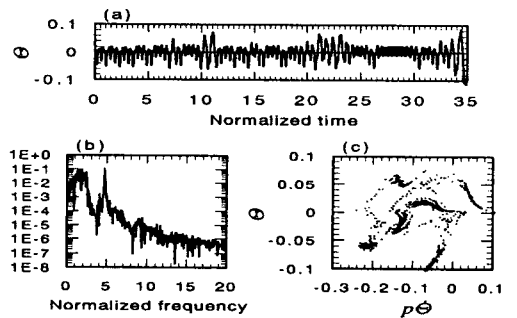


Fig. 19 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 3.0$, $A_v = 2.3$, $e = 0.925$)

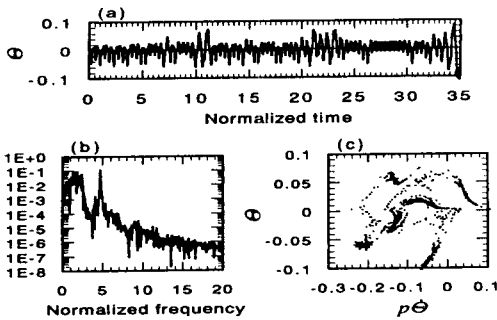


Fig. 20 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 0.3$, $e = 0.925$)

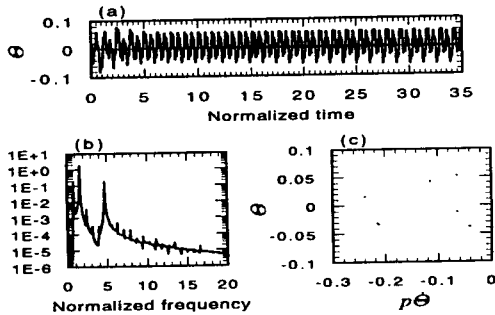


Fig. 21 Undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 0.85$, $e = 0.925$)

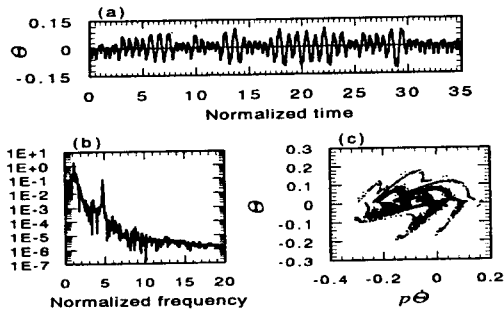


Fig. 22 Undamped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 2.8$, $e = 0.925$)

5. 초기치 의존성에 대한 평가

2차원 입력을 받는 록킹진동계에 있어서 초기치에 대한 예민한 의존성에 대해서 고찰했다. Fig. 23과 24는 Fig. 22의 록킹응답에 대해서 초

기 회전변위 θ_0 를 각각 0.00004와 0.0001로 해서 계산한 응답이다. 이들 응답에 대한 시계열 (a)에 나타난 것과 같이 일반화 시간 5정도까지는 각각 근사한 시계열을 나타내지만 그 이후는 전혀 다른 응답으로 됨을 알 수 있다. 즉, 카오스 응답 영역에서는 초기치에 대한 예민한 의존성을 갖고 있음을 알 수 있다. 또, 이들 응답의 Poincare map에서 알 수 있듯이 시계열은 서로 다르지만 같은 형상의 Attractor를 형성하고 있음을 알 수 있다.

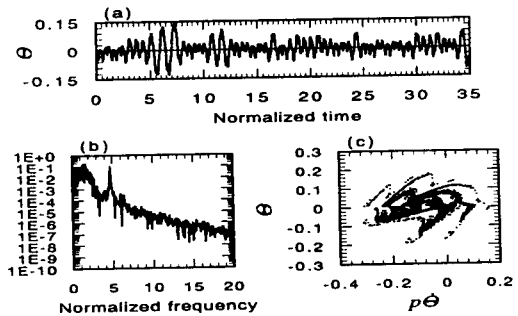


Fig. 23 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 2.8$, $e = 0.925$, $\theta_0 = 0.00004$)

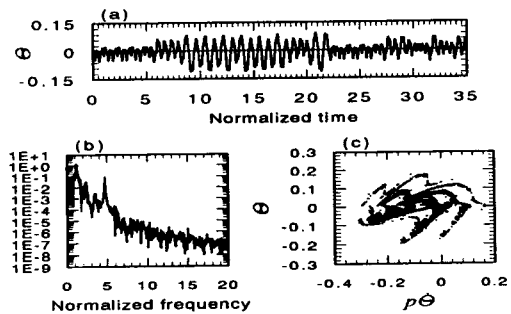


Fig. 24 Damped rocking response ($\Omega_h = \Omega_v = 15.708$, $A_h = 4.0$, $A_v = 2.9$, $e = 0.925$, $\theta_0 = 0.00001$)

6. 결론

본 연구에서는 2차원 입력을 갖는 블록의 록킹진동계를 충돌시의 에너지 소모를 무시한 비감쇄 록킹진동계와 에너지소모를 고려한 감쇄 록킹진동계로 나누어 각각의 계에 대해 응답특

성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비감쇄 록킹진동계의 응답은 준주기응답을 나타내는 일부영역을 제외한 모든 영역에서 카오스응답이 되고 1차원 가진의 경우 그 Attractor는 기수개의 흡인영역으로 되고, 2차원 가진의 경우에는 우수개의 흡인영역으로 구성된다. 또한, 흡인영역의 수는 가진진폭과 주파수의 변화와 함께 그 수가 감소하기도 하고 증가하기도 한다.
- 2) 2차원 입력의 경우에는 수직방향의 진폭증가와 더불어 Attractor의 형상이 반시계방향의 소용돌이 형상으로 변화되고 흡인영역의 수로 수직방향의 가진진폭의 변화와 더불어 급격히 증가한다.
- 3) 2차원 입력을 받는 감쇄 록킹응답에서는 1차원 입력의 경우에는 볼 수 없었던 우수모드 ($m, 2n$)가 존재하고 수직입력이 가해짐에 의해서 주기배분기가 발생한다.
- 4) 2차원 입력을 받는 록킹진동응답은 에너지소모율과 가진진폭의 변화에 민감하게 영향을 받는다. 특히, 고가진진폭 영역에서는 거의 카오스응답으로 되고 복잡한 거동을 나타낸다.

참 고 문 헌

- 1) Aslam, M., Godden, W.G. and Scalise, D.T., "Earthquake rocking response of rigid bodies", J. Engrg. Struct., ASCE, Vol. 106, No. 2, pp. 377~392, 1980.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Tso, W.K. and Wong, C.M., "Steady state rocking response of rigid blocks, Part I: Analysis", Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 18, No. 106, pp. 89~106, 1989.
- 5) Solomon C.S. Yim and Huan Lin, "Non-linear impact and chaotic response of slender rocking objects", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117, No. 9, pp. 2079~2100, 1991.
- 6) Lin, H. and Yim, S.C.S., "Nonlinear rocking motions overturning under random excitations. I", J. engrg. Mech., ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 719~727, 1996.
- 7) Lin, H. and Yim, S.C.S., "Nonlinear rocking motions overturning under random excitations. II", J. engrg. Mech., ASCE, Vol. 122, No. 8, pp. 728~735, 1996.
- 8) 鄭萬溶, 鈴木浩平, "剛体 ブロック型構造物のロッキング振動に關する基礎的研究", 日本機械學會論文集, 第62卷 603号, pp. 4136~4146, 1997.
- 9) 鈴木友和, 鄭萬溶, 鈴木浩平, "正弦波加振を愛けるブロックのロッキング振動に關する研究", D & D97(日本機械科學機械力學·計測制御部門講演會), 97-A, pp. 435~438, 1997.
- 10) 鄭萬溶, 鈴木浩平, "剛体 ブロックの非線形ロッキング振動特性に關する研究", D & D97(日本機械科學機械力學·計測制御部門講演會), 97-A, pp. 439~442, 1997.