

|||||||
論 文
|||||||

소실모형주조용 조형장치의 진동특성 평가

이강래[†] · 최경환 · 조규섭 · 이경환 · 김명호 · 임경화^{**} · 김기영^{***}

Vibration Characteristics of Compaction Table for Expendable Pattern Casting Process through Changing Vibration Modes

Kang-Rae Lee[†], Kyeong-hwan Choe, Gue-Serb Cho, Kyong-Whoan Lee, Myung-Ho Kim*, Kyung-Hwa Rim** and Ki-Young Kim***

Abstract

Vibrational motions of the compaction table were investigated to select the optimal operation conditions of sand filling and compaction for the EPC process. Their modes were measured at the nine points of the table with changing the relative rotation angles between the two eccentric mass vibrators which were attached parallel beneath the table. Well-defined vibration modes were measured at the center of the table but those of left and right sides of the table were distorted regardless of rotational angle differences. The distortion of vibration modes at both sides of the table were caused by the moment generated by offset positions of two eccentric masses. It was found that the uniform vibration modes would be gathered by controlling the relative distances between the rotating axis and the center of gravity in the compaction system at the various conditions of vibration modes and rotational angle differences.

Keywords : vibrating table, EPC, vibration mode, moment, rotational angle differences

(Received July 13, 2004; Accepted August 15, 2004)

1. 서 론

소실모형주조법(EPC; Expendable Pattern Casting Process)은 1958년 H.F. Shroyer가 개발한 후[1] 미술용 주물 제조에 사용된 것이 그 시작이다. 이후 1962년 Wittmoser[2]가 풀몰드(full mold) 프로세스라 칭하며 상용화하였고, 1964년 T.R. Smith[3]가 무점결사를 사용하는 등 현재까지 많은 연구가 이루어지고 있다.

소실모형주조법은 원하는 형상의 발포수지성형(Expanded Polystyrene) 모형을 무점결사 속에 매설한 후, 진동을 부여하고, 용탕을 주입하면 모형이 용탕과 치환되면서 모형과 동일한 형상의 주물이 얻어지는 매우 간단한 공정이고 친환경적인 주조방법이다. 소실모

형주조공정 중에서, 사충전공정은 조형상자 내에서 진동기술을 사용해 모래를 모형의 주위에 채우는 공정으로 주물의 변형, 치수정밀도 등을 결정짓는 중요한 공정이다. 모형주위에 모래가 치밀하게 채워지지 않을 경우 주형의 붕괴, 모래 소착, 주물 변형이나 치수 불량 등의 결함이 발생한다. 따라서 이러한 결함을 방지하기 위해 균일하고 치밀한 사충전이 이루어지도록 진동조건을 최적화시켜야 한다. 즉, 진동의 세기, 진동의 방식 등에 있어서 최적의 조건이 구현되어야 하는 것이다. 소실모형주조법에서 사용되는 진동기술로는 수직1축 진동, 수평진동 또는 수직-수평 다축진동 등이 종래에 사용되었으며, 최근에는 A. Ikenaga 등이 수직면상에서 2차원 원운동하는 원진동을 개발해 소실모형주조

한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)

*인하대학교 재료공학부(School of Materials Science and Engineering, Inha University)

**한국기술교육대학교 제어시스템공학부(Dept. of Control System Engineering, Korea University of Technology and Education)

***한국기술교육대학교 신소재공학과(Dept. of Advanced Materials Engineering, Korea University of Technology and Education)

[†]E-mail : ragon96@kitech.re.kr

법에 적용하고 있다[4,5].

상기와 같은 진동기술을 소실모형구조법의 사충전 공정에 직접 적용하기 위해서는 진동테이블과 가진기, 진동테이블 지지용 스프링 및 베이스 프레임, 플라스크 등으로 구성되는 진동조형장치의 진동특성과 그에 대한 분석과 해석이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 원진동 및 직선진동을 구현할 수 있는 진동조형장치를 구성하였으며, 진동모드와 진동조건에 따른 진동테이블의 진동특성을 조사하고, 향후 소실모형구조용 진동조형장치 제작 시의 기본적인 설계 자료로 활용하기 위한 기초자료를 얻고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 진동장치는 플라스크 체결용 진동테이블(830×830×80 mm)과 테이블 하부에 병렬로 부착된 1쌍의 유도모터 가진기(0.4 kW/1000 kgf), 진동테이블을 지지할 수 있는 4 개의 코일스프링 및 베이스 프레임으로 구성되어 있다. 본 실험에 사용된 가진기는 엔코더가 부착되어 있어 인버터를 사용해 가진용 편심회전추의 회전속도와 방향 및 위상차를 전기적으로 제어할 수 있다.

진동테이블의 진동모드는 Table 1에서처럼 두 가진기의 회전방향과, 두 가진기 사이의 편심회전추의 상대적인 각도차이(이하 회전각차)를 이용해 제어할 수

있다. 1쌍의 가진기를 같은 방향으로 회전시킬 경우에는 수직면 2차원 원진동을 얻을 수 있고, 서로 반대방향으로 회전시키면 수직 또는 수평의 1축 직선진동을 얻을 수 있다. 또한 회전각차에 따라 원진동에서는 진동의 세기를, 직선진동에서는 진동방향을 제어할 수 있다. 본 실험에서는 소실모형구조용 진동장치의 진동특성을 조사하기 위해 두 가진기 사이의 회전각차를 0, 90 및 180°로 변화시키고, 진동방식은 원진동(이하 C 0, C 90 및 C 180)과 직선진동(이하 L 0, L 90 및 L 180)으로 구분하였다. 편심회전추의 회전속도는 50 Hz(3000 rpm)로 설정하였으며, 이 때 진동가속도는 회전각차에 따라 1.5~2.0 G 범위로 설정하였다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 진동측정 장치의 개략도이다. 주파수 측정범위가 2~5 kHz인 1축과 3축 진동센서, A/D 변환기(sampling rate 200 kS/s, 16 bits Resolution, 16 channel analog inputs) 및 진동측정 전용프로그램을 사용하여 진동테이블의 진동특성을 측정하였다.

진동조건 변화에 따른 진동테이블의 진동모드 변화를 조사하기 위해 Fig. 2에서처럼 진동테이블 위의 9 개 지점에 3축 센서를 부착하고 진동모드를 측정하였다. 진동모드의 궤적은 Y축(회전방향)과 Z축(상하방향)의 진동가속도 궤적을 X-Y그래프로 나타내었다.

또한 진동테이블의 3차원적 움직임을 조사하기 위해 Fig. 2의 1, 7 및 9번 지점에 1축 센서 2개를 사용하여 두 지점의 진동가속도를 동시에 측정하였고, 각각

Table 1. Various vibration conditions by different vibration modes and rotational angle differences

Counter direction rotating (Linear vibration)			Same direction rotating (Circular vibration)		
The sign	Position of eccentric masses	Vibration mode	The sign	Position of eccentric masses	Vibration mode
L 0			C 0		
L 90			C 90		
L 180			C 180		
L 270			C 270		

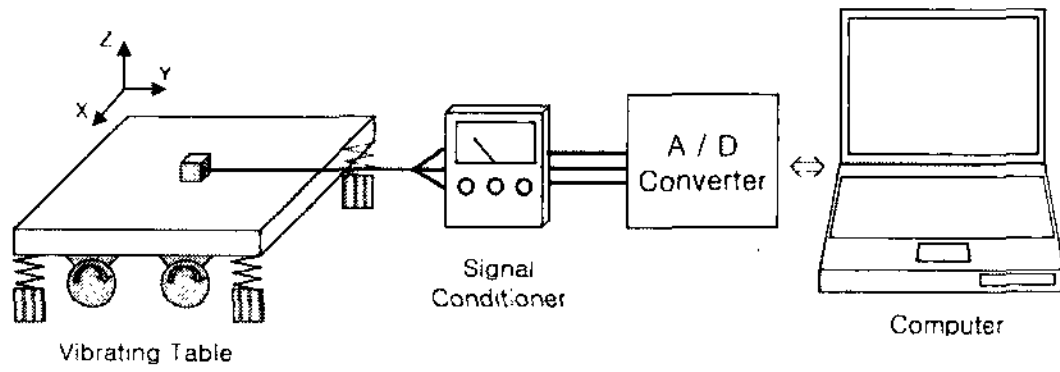


Fig. 1. Schematic diagram for measuring the vibration motions on the compaction table.

1 및 7번 그리고 7 및 9번 지점의 가속도계적을 X-Y 그래프로 나타내었다. 그 모양을 Lissajous 도형과[6] 비교하여 두 지점 간의 상대적인 위상차를 분석하였다.

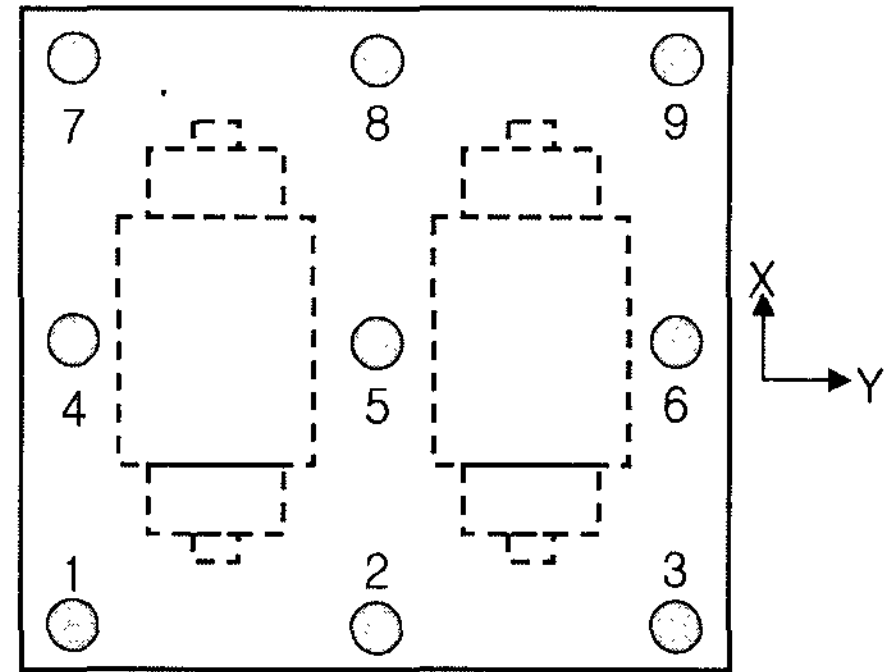


Fig. 2. Relative positions of vibration measurement and two vibrators at the compaction table.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 원진동에서의 진동특성

Fig. 3은 진동조건을 Table 1의 C 0, C 90 및 C 180처럼 변화시켰을 때 진동테이블의 가운데 영역인 4, 5 및 6번 지점에서의 진동모드를 측정된 결과이다. 그림에서처럼 테이블의 중앙부 5번 지점에서 보면 C 0 및 C 90일 때는 진원에 가까운 원진동 즉, 수직성분(Z축)과 수평성분(Y축)의 진폭크기가 같고, 두 성분의

위상차이가 $\pi/2$ 또는 $3\pi/2$ 인 진동을 보이고 있다. 그리고 C 180에서는 두 가진기의 편심회전축 움직임이 서로 상쇄되기 때문에 정지 상태에 가까운 진동모드가 나타났다.

그런데 테이블 바깥부분(4 및 6번 지점)에서는 C 0의 중앙부에 비하여 Z축이 늘어나고 Y축은 줄어들어 타원형의 진동양상을 보이고 있다. 즉 4번 지점에서는 Z축과 Y축의 위상차이가 $\pi/4$ 이고, 6번 지점에서는 $3\pi/4$ 임을 알 수 있다. C 90의 경우, Z축과 Y축의 위상

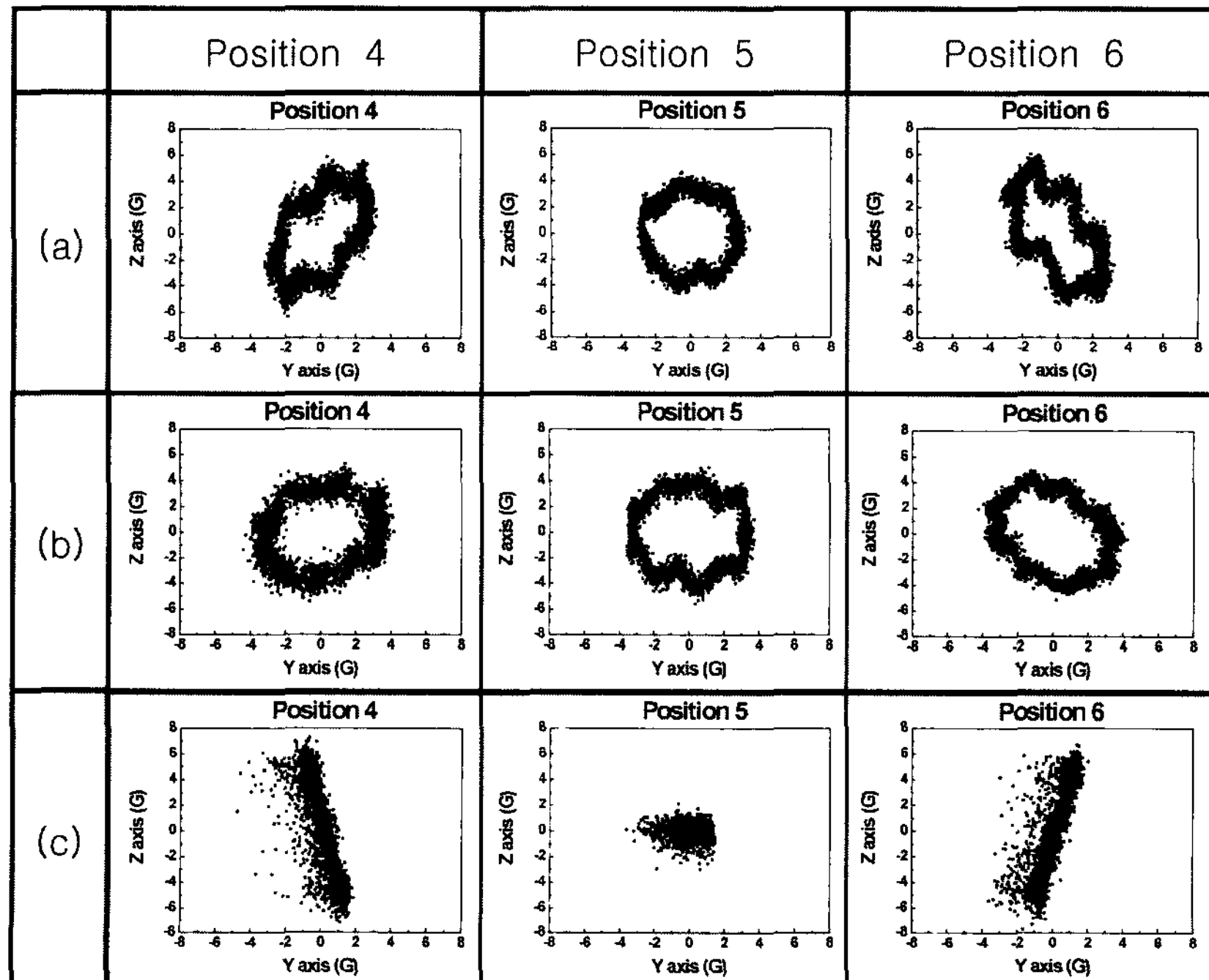


Fig. 3. Circular vibration modes of compaction table at the 4, 5 and 6 position with rotational angle differences (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

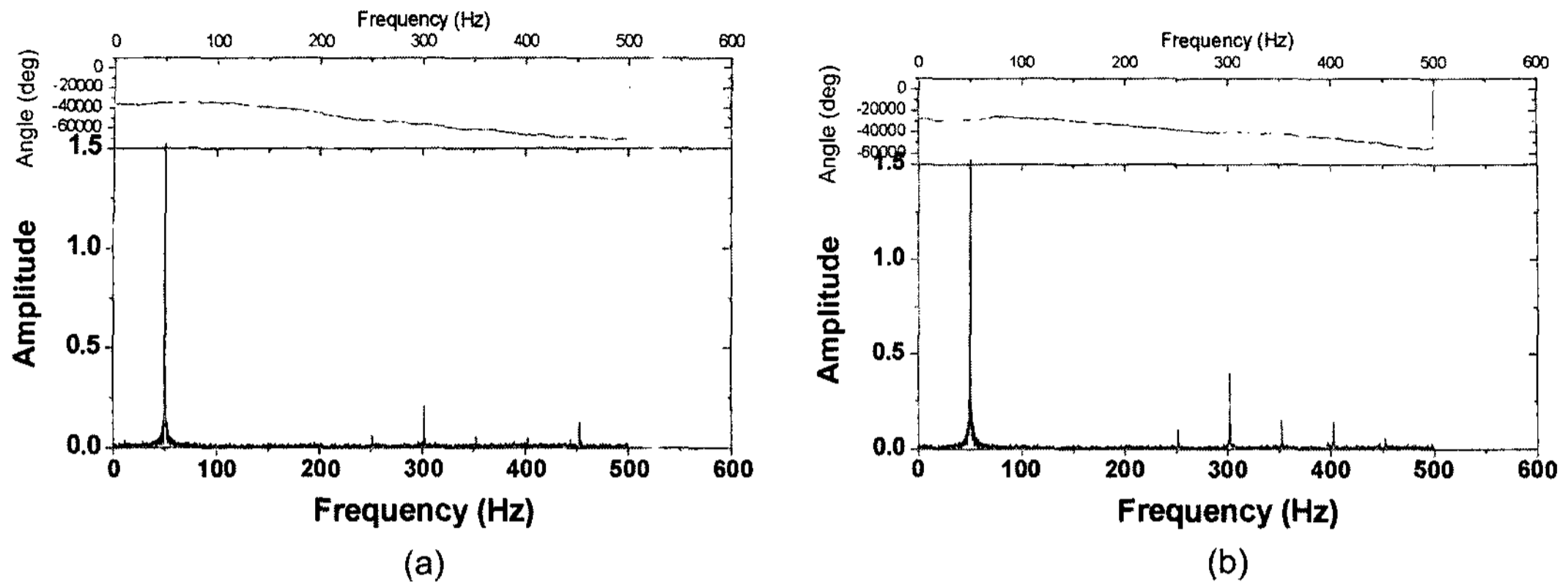


Fig. 4. Frequency spectrums showing the high order frequency at circular vibration mode (a) Position 5 (b) Position 6.

차가 C 0과 유사한 진동모드를 보이지만 C 0에 비해 바깥부와 중앙부 모두 양호한 원진동의 양상을 보이고 있다. C 180의 경우에는 원진동이 아닌 수직의 직선진동모드가 나오는 것을 볼 수 있다.

C 0일 때 진동테이블 위 5 및 6번 지점의 진동 스펙트럼을 분석해 보면 Fig. 4와 같은데 가진주파수(저차주파수)는 약 50 Hz이고, 가진주파수의 정수배인 고차주파수가 발생하고 있다. 5번 지점보다 6번 지점에서 고차주파수의 세기가 클 뿐 아니라 발생빈도수도 많은 것을 알 수 있다. 이를 진동모드와 비교해보면, 각각의 진동계적에서 고차주파수가 원래의 진동성분에 잡음으로 작용하여 Fig. 2에서 보는 것과 같이 진동모

드 궤적이 각이 지고 변형되는 것으로 생각된다[7].

Fig. 5는 C 0, C 90 및 C 180으로 진동조건을 변화시킴에 따라 진동테이블 위 2개 지점의 가속도값을 측정해 X-Y축 상에 표시한 것이다. 이를 Lissajous도형과 비교하여 두 지점간의 상대적인 위상차를 조사해보았다. 먼저, 진동테이블 상하부(7+1번 지점)는 진동조건이 C 0, C 90 및 C 180로 변함에 관계없이 두 지점은 동일한 위상을 가지며 움직이는 것을 알 수 있다. 그러나 좌우측(7+9번 지점)에서는 회전각차가 변함에 따라 각각 $\pi/4$, 0, $3\pi/4$ 의 다른 위상을 가지면서 움직인다는 것을 알 수 있다.

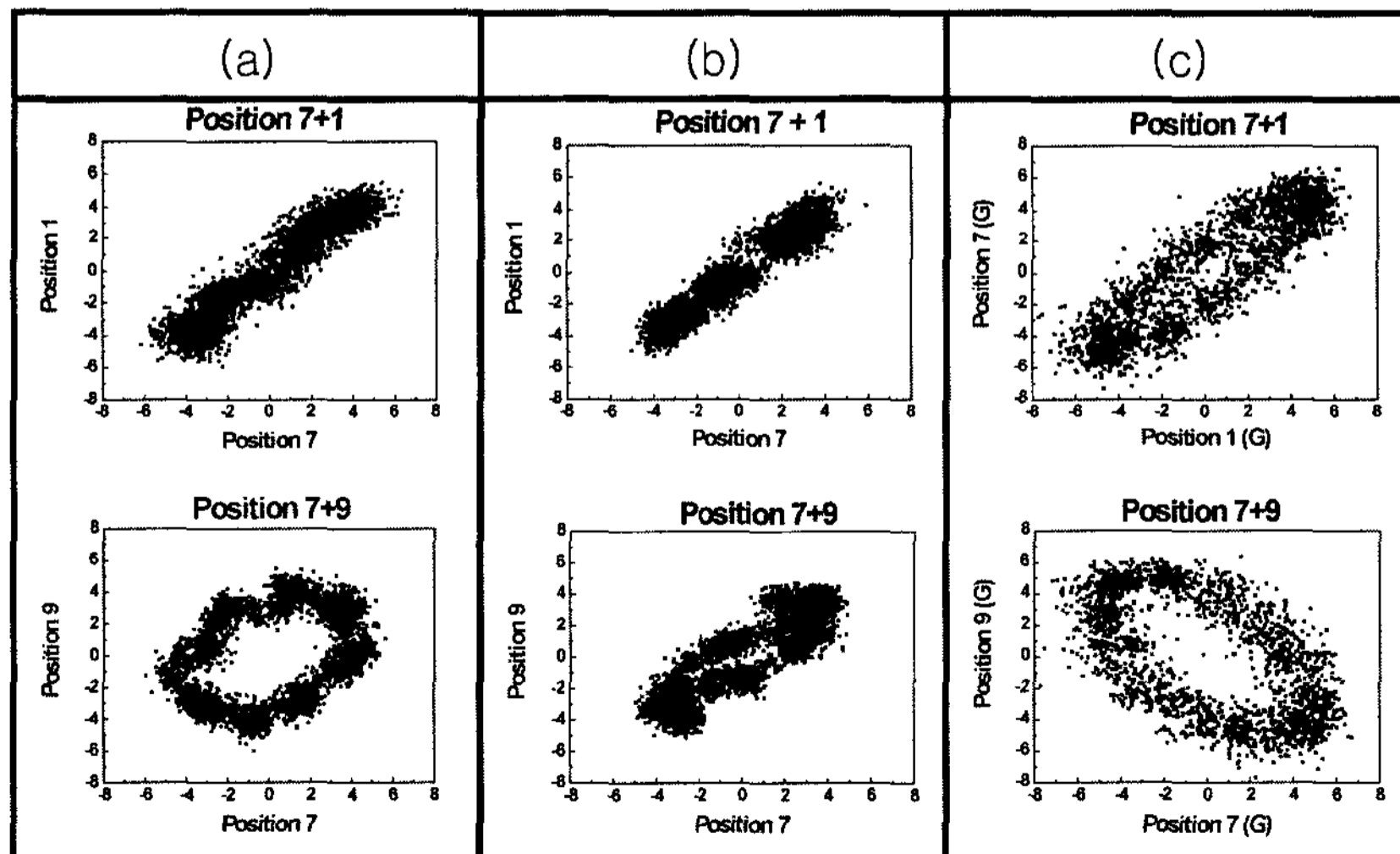


Fig. 5. The relative movement between the two positions of the table with rotational angle differences at circular vibration mode (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

3.2 수직진동에서의 진동특성

Fig. 6는 진동조건을 L 0, L 90 및 L 180으로 변화시킴에 따른 진동테이블의 진동모드를 측정된 결과이다. 진동테이블의 가운데(5번 지점)에서는 진동조건 변화에 따라 각각 수직, 사선, 수평 진동모드가 관찰되

었다. 또한, 진동테이블의 좌우측(4 및 6번 지점)에서는 L 0일 때 양호한 수직진동모드가, L 90 및 L 180에서는 진동모드가 타원의 형태로 왜곡됨을 알 수 있다. 진동조건 변화에 따라 진동모드의 왜곡되는 경향은 원진동과 다르나, 왜곡되는 위치는 원진동과 비슷하였다.

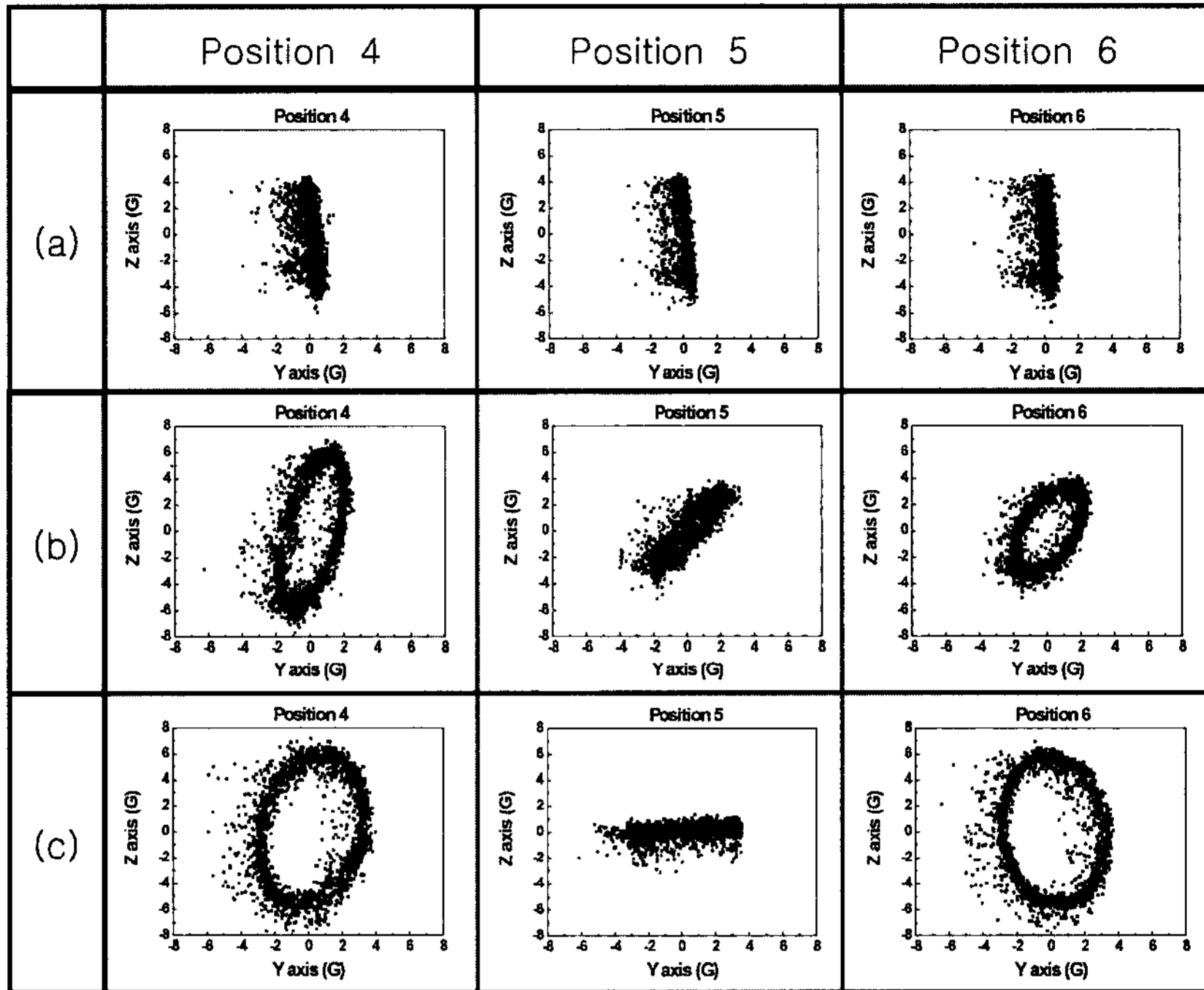


Fig. 6. Linear vibration modes of compaction table at the 4, 5 and 6 position with rotational angle differences (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

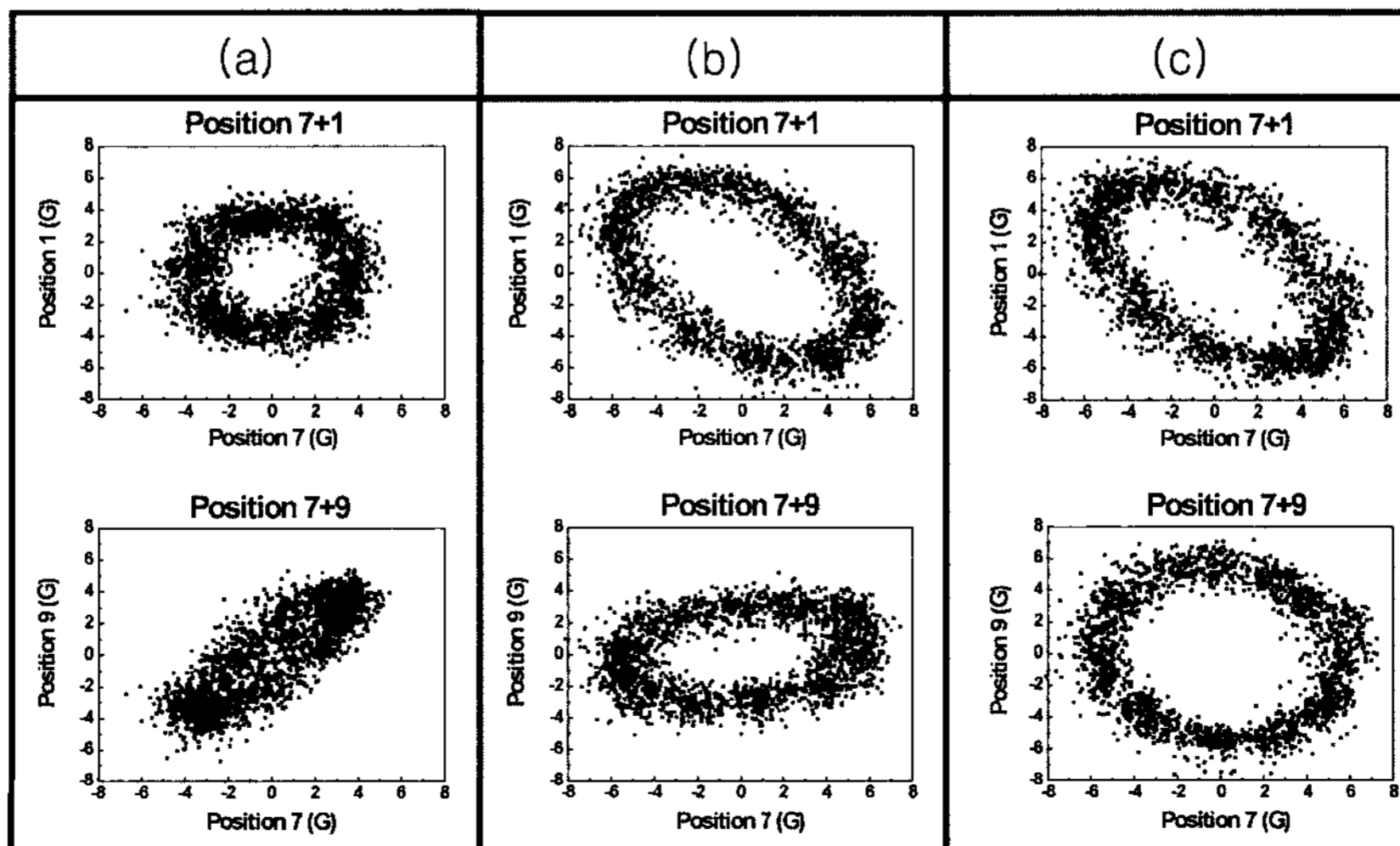


Fig. 7. The relative movement between two positions of the table with rotational angle differences at linear vibration modes (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

Fig. 7은 진동조건 변화에 따른 진동테이블 위 2개 지점의 가속도값을 조합해 두 지점간의 상대적인 위상 차이를 조사한 것이다. 원진동과는 달리 진동테이블의 상하부(7+1번 지점)는 진동조건이 L 0, L 90 및 L 180으로 변함에 따라 각각 $\pi/2$, $3\pi/4$, $3\pi/4$ 의 위상을 가지며 움직이고, 좌우측(7+9번 지점) 또한 각각의 경우에 따라 다른 위상을 가지며 움직인다는 것을 알 수 있었다.

3.3 진동특성에 미치는 모멘트의 영향

진동조건 변화에 따른 진동테이블의 진동모드를 측정한 결과, 편심회전축의 회전방향에 관계없이 진동테이블의 가운데에서는 양호한 진동모드가 관찰되었고, 좌우측에서는 가운데방향으로 기울어져 있는 진동모드가 관찰되었다. 진동테이블 좌우측의 진동모드가 왜곡되는 원인을 규명하기 위해 전체 진동시스템의 무게중심과 관련된 모멘트를 조사하였다. 모멘트(M)의 크기는 가해진 힘의 크기와 강체의 거리에 비례한다. 즉, 두 편심회전축에 의한 가진력을 F_1 , F_2 라 하고, 무게중

심과의 수직거리 또는 회전축 사이의 거리를 d_1 , d_2 라고 하였으며, 이 경우 가진력 F_1 , F_2 는 동일한 크기이고 방향만 다르다. 가진력과 거리를 조합하여 전체 진동계에 걸리는 모멘트(M_1 , M_2)를 구하였다.

Fig. 8은 원진동일 때 두 가진기의 편심회전축이 1회전하는 경우에 진동조건 변화에 따른 모멘트의 작용을 예측한 것이다. 회전각차가 0 및 180°일 때에는 모멘트가 상쇄되는 경우($M_t = M_1 - M_2$)와 한쪽으로만 작용하는 경우($M_t = M_1 + M_2$)가 주기적으로 반복되고 있지만, 모멘트의 거리성분 d_1 , d_2 가 서로 다른 것을 알 수 있다. 이에 반해 회전각차 90°일 때에는 모든 방향 조합에서 모멘트가 서로 상쇄되었다. 즉, 모멘트가 편향되게 작용하면 진동테이블의 가운데 부분(2, 5 및 8번 지점)을 제외한 좌우측에서는 원하는 진동모드가 구현되지 않고, 모멘트 성분이 합성된 진동모드가 발생하는 것이다. 회전각차 180°일 때를 예로 들면, 좌우 편심회전축의 위치조합에 따라 가진력은 서로 상쇄되어 테이블의 가운데에서는 진동모드가 점의 형태를 나타낸다. 하지만, 테이블 좌우측의 경우에 가진력은 상

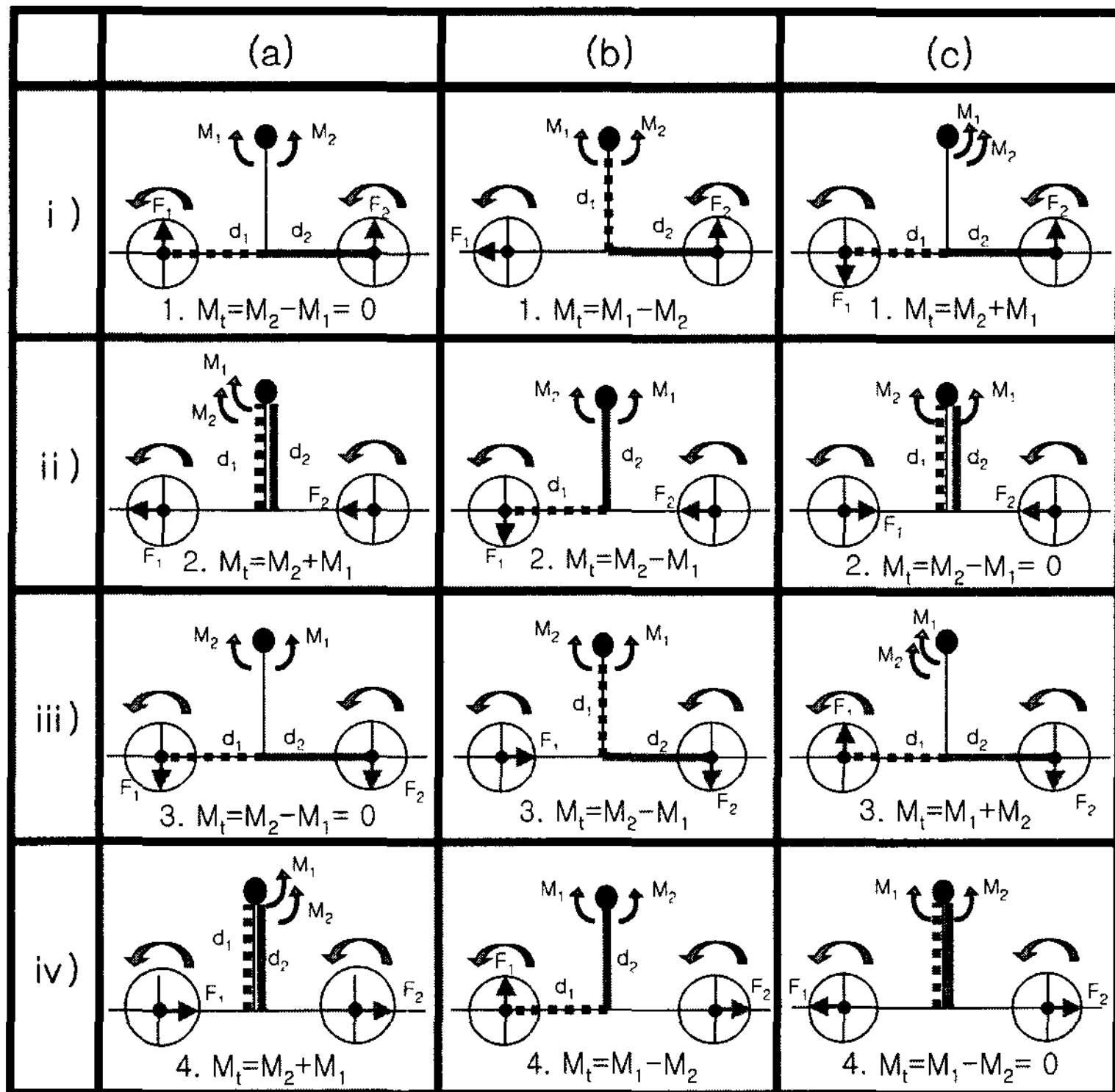


Fig. 8. Moments generated by two eccentric mass vibrators at circular vibration modes with rotational angle differences (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

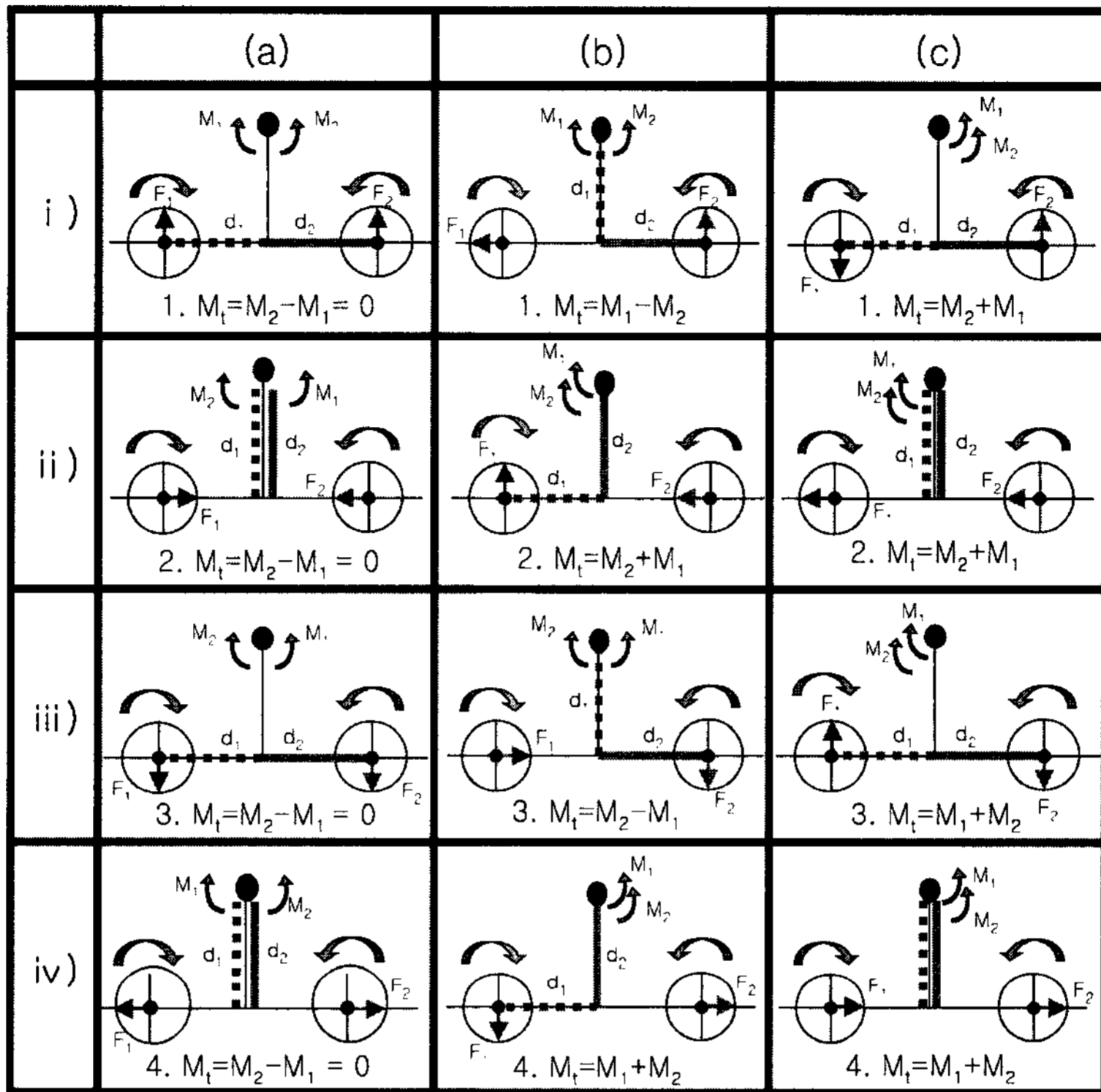


Fig. 9. Moments generated by two eccentric mass vibrators at linear vibration modes with rotational angle differences (a) 0°, (b) 90°, (c) 180°.

쇄되지만, 편향되게 작용하는 모멘트 성분이 존재하기 때문에 점의 형태가 아닌 직선형태의 진동모드가 나타나는 것이다.

이처럼 모멘트에 의한 진동모드의 왜곡을 막기 위해서는 모멘트의 합을 0으로 만들어야 한다. 원진동의 경우 Fig. 8(a)-ii 및 iv 처럼 회전각차 0°일 때에는 무게중심과 가진 회전축이 동일선상에 위치하면 모멘트가 제거되나, Fig. 8(c)-i 및 iii 처럼 180°일 때에는 d가 회전축간 거리이기 때문에 모멘트의 제거가 어렵다고 판단된다. 회전각차 90°일 때에는 두 모멘트의 거리성분 d1과 d2가 같아지면 진동테이블의 진동모드의 왜곡을 막을 수 있는데, 이를 위해서는 회전축선으로부터 무게중심까지의 높이가 두 회전축간 거리의 1/2과 같아야 합을 알 수 있다.

Fig. 9는 직선진동일 때 모멘트의 작용을 조사한 것이다. Fig. 9(a)처럼 회전각차 0°일 경우에 모멘트는 편심회전축의 1회전 중 서로 상쇄되어 나타남을 알 수 있다. 그러나 회전각차 90°일 때는 모멘트가 상쇄되는 경우와 한쪽으로만 편향되는 경우가 주기적으로 반복

되고, 180°일 때에는 모멘트가 한쪽으로 편향되는 것만 나타난다. 이로 인해 테이블 좌우측의 진동모드 또한 직선진동이 아닌 타원형태로 왜곡되는 것이다.

원진동과 마찬가지로 직선진동에서도 모멘트의 합을 0으로 만들어야 양호한 직선진동을 얻을 수 있다. 하지만, 회전각차 90°와 180°일 때에는 무게중심의 위치 변화로는 모멘트를 제거하기 어렵다고 판단된다.

4. 결 론

소실모형주조법의 사충전 공정에서 진동조건의 최적화를 구현하기 위하여, 진동가진기의 편심회전축의 회전방향과, 상대적인 회전각도의 차이에 따른 진동테이블의 진동모드와 진동테이블의 진동특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 진동모드는 회전각차의 변화에 관계없이 진동테이블의 가운데에서는 양호한 진동모드가 구현되었지만, 진동테이블의 양쪽에서는 왜곡된 진동모드가 관찰되었다.

2) 원진동의 경우 회전각차 변화에 따라 진동테이블의 상하부는 같은 위상을 가지며 움직이고 좌우측은 다른 위상을 가지며 움직였다. 또한, 직선진동의 경우 진동테이블의 상하부와 좌우측 모두 다른 위상을 가지며 움직였다.

3) 편심회전추의 1 회전 동안 C 90과 L 0에서는 모멘트가 상쇄되기 때문에 진동모드의 형상도 양호한 원과 직선의 형태를 나타냈다. C 0와 C 180 및 L 90에서는 모멘트가 상쇄되는 경우와 편향되어 작용하는 경우가 편심회전추의 1 회전 동안 반복되어 나타났다. 이로 인하여 진동테이블의 진동모드가 왜곡되는 것을 알 수 있었다.

4) C 0와 L 0일 경우에는 무게중심과 회전축이 동일선상에 위치하면 모멘트가 제거되어 균일한 진동모드를 얻을 수 있다. 또한, C 90일 경우에는 회전축선상으로부터 회전축간 거리의 1/2 만큼의 높이에 무게중심을 위치시키면 모멘트를 제거할 수 있다.

참고문헌

- [1] H. F. Shroyer : US Patent, "Cavityless Casting and Method of Making Same", No. 2830343, (Apr. 15, 1983).
- [2] R. Bailey : Modern Casting, "Understanding the Evaporative Pattern Casting Process", (Apr., 1982) 58-61.
- [3] T. R. Smith : US Patent, "Method of Casting", No. 3157924, (Nov. 24, 1964).
- [4] A. Ikenaga, M. Kawamoto and Y. Gotou : Transaction of the JFS, "Effect of rotary motion on filling of sand in flask for expendable pattern casting", 69(3), (1995) 184-189.
- [5] A. Ikenaga, S. Kuraoka and M. Kawamoto : AFS Transactions, "Performance of Rotary Vibration Table for Compaction of Molding Sand", Vol. 106, 125(1998), 1-6.
- [6] A. Ikenaga, K. W. Lee, D. K. Kim and K. B. Kim : Journal of KFS, "Recent vibrating Table for EPC process", 21(2), (2001) 101-110.
- [7] G. M. Lee : Transaction of The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, "Use of higher order frequency response functions for non-linear parameter estimation", 7(2), (1997) 223-229.