

소실모형주조용 진동장치의 성능평가

Performance Evaluation Of Vibrating Table for Expendable Pattern Casting Process

°이은경*, 임경화**, 이경환***
Eun-Kung Lee, Kyung-Hwa Rim, Kyung-Whoan Lee

Key Words : Vibration Table(진동테이블), Dynamic Characteristics(동특성), Expendable Pattern Casting Process (소실모형주조법), Circular Vibration(원진동)

ABSTRACT

Vibration table is required to obtain high packing density in expendable pattern casting process. Packing density, which is an important manufacture factor, depends on the vibration pattern induced by vibration table. In general, circular vibration pattern is recognized as the best pattern. The existing vibration table is investigated to identify current vibration pattern and consider a countermeasure. Modal test is utilized to identify the dynamic characteristics of vibration table, and finite element method is used to present the improved design.

1. 서론

소실모형주조법 (expendable pattern casting process)은 발포 폴리스티렌 (expanded polystyrene)을 원료로 이용하여 얻고자 하는 주물형상으로 성형한 후, 이를 점결계가 들어있지 않은 건조된 주물사 속에 매설하여 모형에 직접 용탕을 주입하여, 그 소실된 공간에 용탕이 충전되어 응고됨으로써 주물을 얻는 주조공법이다.⁽¹⁾ 이 공법을 활용하면 폐주물사의 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 코어(core) 제작이 필요 없고 후처리가 지극히 간단해지며 숙달된 기능인력이나 고도의 설비가 없어도 되는 차세대 조형법이다. 주로 미국 등 선진국에서 사용되는 공법으로 기존의 사형주조방식에 비해 정밀도가 높고 형상이 복잡하며 조직이 균일하여 강도가 높은 주조품을 제작할 수 있다.⁽²⁾

소실모형주조법에서는 주물사의 충전이 잘 되어야 하며, 또한 강도가 약한 모형의 변형을 막기 위해 주물사를 최대한 유동화 하여 충전시킬 필요가 있다. 그래서 무리한 힘을 가하지 않으면서 주물사의 양호한 충전을 위해서 진동테이블을 이용하여 충전시킨다. 진동테이블의 가진 방식관점에

서 정리하면 Fig. 1 과 같이 계열화 할 수 있는데 원진동(circular vibration)이 수직-수평 다축 진동 중에서 가장 효과적인 진동이고, 가진 방법도 간단한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾

본 연구에서는 소실모형주조용 진동장치의 동특성을 평가하고, 원진동 형태의 가진 성능을 평가하여 차후에 개발 예정인 진동테이블의 설계 방향을 제시하고자 한다.

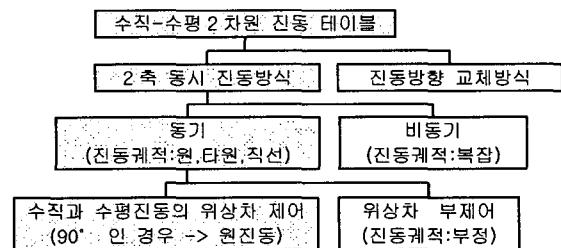


Fig. 1 Classification of vibration table

2. 진동 형태의 영향 분석

2.1 실험장치 및 실험 방법

주물사 충전에 대한 진동형태의 영향을 조사하기 위하여 간이 소형진동장치로 진동형태를 변경하면서 조사하였다. Fig. 2 는 진동 테이블과 변형량 측정 장치의 개략도이다. 주물사 압력의 측정 은 300*300*450mm 의 플라스틱내의 주물사 표면에서부터 100,150,300,400mm 의 깊이에 대해 플라스틱 중앙, 벽근방의 각 위치에 스트레인 게이지를

* 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과
 E-mail : lek002@hanmail.net
 Tel : (041) 560-1143

** 한국기술교육대학교 제어시스템공학과
 *** 생산기술연구원

매설하고 3 축 방향의 모래압력과 모형의 변형량을 측정 하였다.

모형의 변형량 조사는 EPS 로 만든 상자의 중앙에 LVDT(linear variable differential transformer)를 붙여 상부의 변형량 만을 측정할 수 있도록 한 모형을 플라스틱 중에 자연충전 상태로 매설하고 30 초간 가진 했을 때의 진동 전, 진동 중, 진동 후의 모형의 변형을 측정하였다. (4)

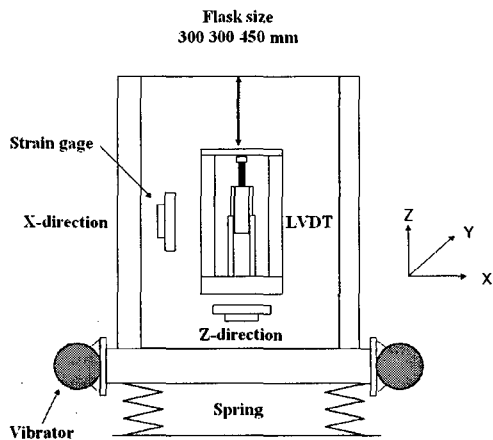


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

2.2 압력분포에 미치는 진동모드의 영향

주물사의 정밀한 충진을 위해 사용되는 진동의 형태에 대해서 수치적으로 효과를 확인한다. Fig. 3 은 진동 중인 플라스틱의 중앙부에서 깊이 방향 (Z 방향)의 압력분포를 나타낸 것이다. 그림의 이론곡선은 진동 충전한 경우의 Z 방향 압력분포를 나타낸 것이다. 원진동의 경우 깊이가 깊어져도 3 축 방향의 압력이 일정하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉 원진동은 주형 내 주물사 표면을 수평으로 유지하면서도 매설된 모형에 동화중을 균일하게 전달할 수 있다.

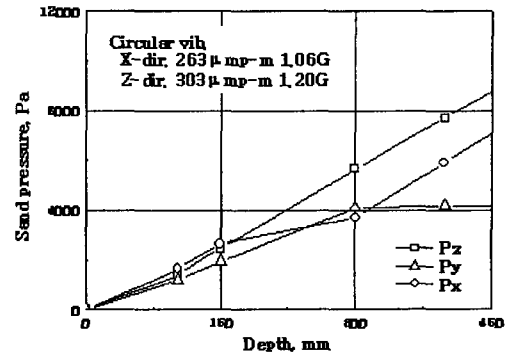


Fig. 3 Sand pressure distribution of vertical direction at central part of flask during the vibration

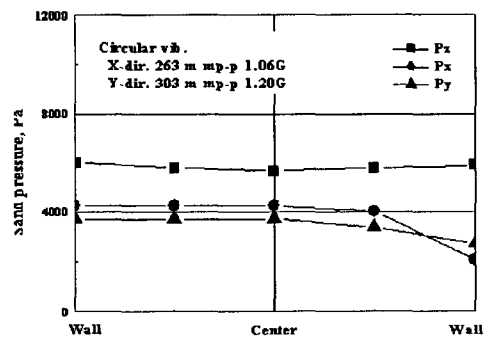
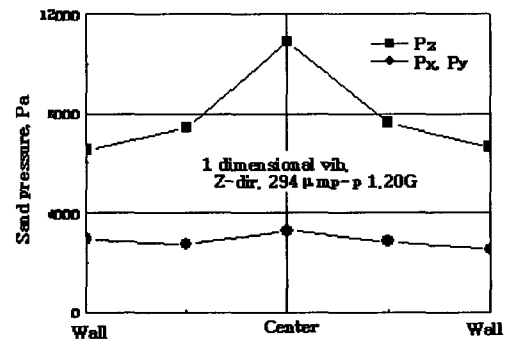
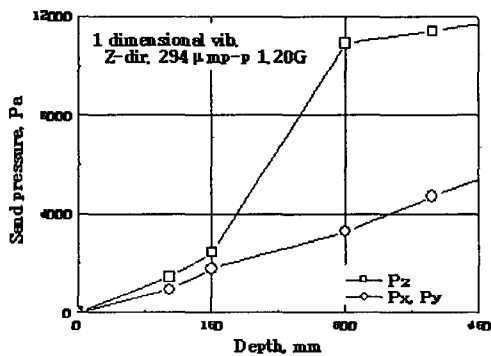


Fig. 4 Sand pressure distribution of horizontal direction at 300mm depth



2.3 모형의 변형량에 미치는 진동모드의 영향

Fig. 5 는 진동중인 플라스틱의 중앙에 놓인 모형의 변형량과 깊이의 관계를 나타낸 것이다. 일축진동과 원진동 모두 깊이에 비례해서 모형의 변형량도 증가하는 결과를 보였으나 원진동의 경우가 표면에서 바닥에 이르기까지 전체적으로 모형의 변형량이 일축진동의 경우에 비해 적었다.

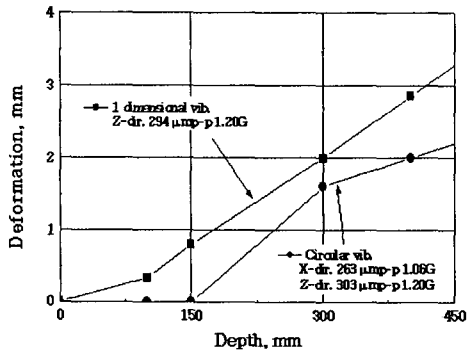


Fig. 5 Relation between deformation of EPS pattern and depth at central part of flask

3. 시스템 분석

3.1 동역학적 모델링

산업계에서 사용되고 있는 소실모형구조용 진동장치는 Fig. 6 과 같이 진동테이블 위에 주물모형과 충전사를 담고 있는 1100*1140*1000mm 의 플라스크(flask)가 설치되어 있다. 진동테이블은 4 개의 공기 스프링으로 지지되어 있고, 좌우에는 가진원(vibration source)으로 사용되는 2 개의 편심 회전모터가 장착되어 있다. 좌우 편심회전모터를 상호 역방향으로 회전시킬 경우는 상하 방향으로 수직일축 선진동(linear vibration)으로 가진할 수 있고, 동일 방향으로 회전시키면 진동판은 원진동(circular vibration)으로 가진할 수 있다.

시스템 성능 검증에 앞서 간이 모드실험을 통해 소실모형구조용 진동장치의 충격 응답 스펙트럼을 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 7 에서도 알 수 있듯이 1.5 Hz 근처에 수직방향 강제모드가 존재한다. 소실모형구조용 진동장치의 운전속도가 1200~3600 rpm 영역임을 감안하면 강제모드 주파수보다 훨씬 높은 고주파수 영역에서 운전되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 시스템에서는 공기스프링의 강성과 감쇠 특성에 상관없이 편심 회전모터의 가진력과 플라스크의 관성력 변화에 따라 시스템 응답이 결정됨을 알 수 있다.

3.2 진동 가속도 측정

3.2.1 실험 장치 및 방법

소실모형구조용 진동장치의 성능 평가를 위해 Fig. 8 과 같이 실험장치를 구성하고, 3축 방향의 진동 가속도를 측정하였다. 베이스 상단에 플라스크를 분리한 경우와 장착한 경우에 대해서 진동형태별(선·원진동), 좌우 모터의 위상별, 진동주파수별, 위치별로 진동가속도를 측정하였다.

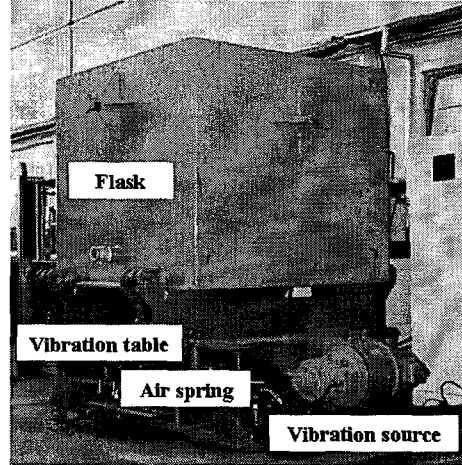


Fig. 6 Vibrating table for EPC process

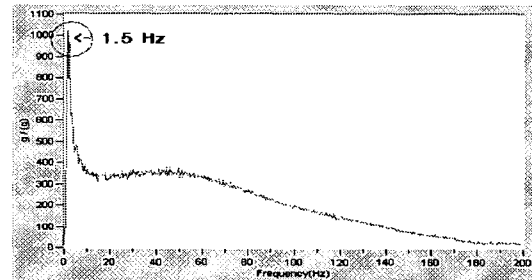


Fig. 7 Measured auto-spectrum

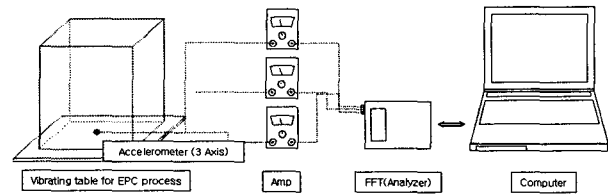


Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup

3.2.2 진동가속도 측정 : 플라스크 분리 경우

소실모형구조용 진동장치의 플라스크 제거 후 진동테이블만 원진동으로 가진할 때, 좌우 모터의 편심 위상을 변화시키며 진동가속도를 측정하였다. Fig. 8 에서 볼 수 있듯이 측정위치는 진동테이블 중심이고 운전속도는 2300rpm 이다. Table 1 의 결과에서 볼 수 있듯이 좌우 편심모터간의 위상이 0° 에서 180° 로 변할수록 X 축(좌우 수평방향)과 Z 축(상하방향)의 진동가속도는 동일비율로 감소한다. Fig. 9 는 위상 0°와 90°일 때, 진동테이블의 X-Z 축 진동궤적이다. 플라스크를 분리하였을 때, 진동테이블만의 진동은 원래 원하는 원진동이 구현됨을 알 수 있다.

Table 1 Vibration acceleration with phase difference

Phase (°)	Vibration acceleration (G)		
	X 방향	Y 방향	Z 방향
0	1.13	0.06	1.28
45	1.07	0.08	1.20
90	0.83	0.07	0.93
135	0.46	0.06	0.54
180	0.11	0.0625	0.27

Table 2 Vibration acceleration with position

Position	Acceleration (G)		
	X dir.	Y dir.	Z dir.
1	0.13	0.07	1.04
2	0.20	0.18	0.89
3	0.18	0.15	0.84
4	0.22	0.16	1.05
5	0.16	0.12	0.82
6	0.11	0.68	1.01
7	0.22	1.07	1.01
8	0.12	0.09	1.02

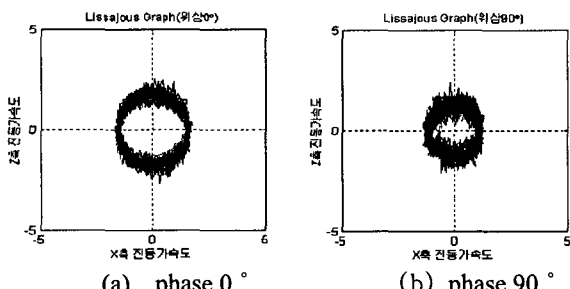


Fig. 9 Vibration with change of phase

(2) 운전속도별 측정 : 선진동 경우

소실모형구조용 진동장치에 주물사가 있는 플라스크를 설치한 후 선진동 상태에서 운전속도를 변화시키며 Z 축 진동가속도를 측정하였다. 측정 위치는 진동테이블의 중심이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 운전속도가 커질수록 Z 축 진동가속도가 급격하게 커짐을 알 수 있다.

3.2.3 진동가속도 측정 : 플라스크 장착 경우

(1) 위치별 진동 : 선진동 경우

실제 작업조건과 유사한 조건으로 운전되는 소실모형구조용 진동장치에서 진동의 균일성을 조사하기 위하여, 베이스에 주물사가 있는 플라스크를 설치한 후 선진동(linear vibration) 상태에서 측정 위치를 변화시키면서 진동가속도를 측정하였다. 운전속도 2850rpm 이고, 측정 위치는 Fig. 10 과 같다. Table 2 에서 볼 수 있듯이 위치별로 선진동의 발생이 다소 양호하고, 진동크기가 모든 위치에서 거의 비슷함을 알 수 있다. 선진동 상태에서는 좌우 모터의 불평형력(unbalancing force)으로 인한 모멘트가 발생되지 않으므로, 모든 위치에서 균일한 진동이 발생함을 알 수 있다.

Table 3 Vibration acceleration with rotation speed

Rotation speed (rpm)	Acceleration in Z direction (G)
780	0.05
1560	0.16
2250	0.24
2850	1.04
3600	1.96

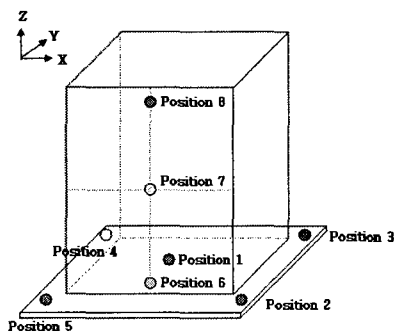


Fig. 10 Measurement Positions

(3) 좌우 모터의 위상별 측정 : 원진동 경우

소실모형구조용 진동테이블에 주물사가 있는 플라스크를 설치한 후 원진동 상태에서 위상을 변화시키며 진동가속도를 측정하였다. 측정 위치는 진동테이블 중심이고, 운전속도는 2300rpm 이다. Table 4 와 Fig. 11 에서 볼 수 있듯이 위상이 0° 일 때만 원진동이 일어나는 것을 확인하였다.

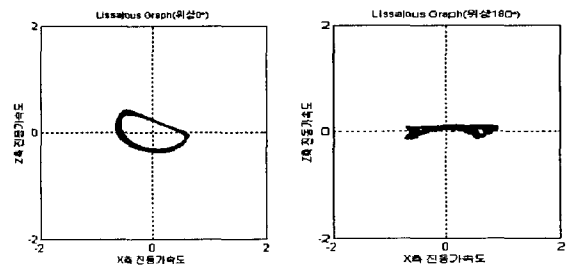


Fig. 11 Vibration patterns with change of phase

Table 4 Vibration acceleration with change of phase

Phase (°)	Acceleration (G)		
	X dir.	Y dir.	Z dir.
0	0.47	0.01	0.26
90	0.12	0.02	0.19
180	0.58	0.03	0.09

3.3 구조물의 동특성 측정 및 해석

3.3.1 실험장치 및 방법

소실모형주조용 진동장치의 플라스크 동특성을 파악하기 위해 Fig. 12 와 같이 실험장치를 구성하였다. 충격해머를 이용한 모드시험(modal test)을 사용하여, 플라스크의 고유진동수 및 모드형상을 측정하였다.⁽⁵⁾

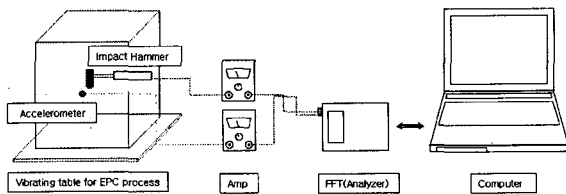


Fig. 12 Schematic diagram of experimental setup

3.3.2 플라스크의 동특성 해석

플라스크의 동특성의 실험결과를 검증하고 차후 설계 개선을 위하여, 유한요소법(finite element method)으로 동특성 해석을 하였다. 기존의 유한요소법의 패키지인 N4W(Nastran For Window)를 이용해 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용한 재료물성치는 Table 5 와 같다.

Table 5 Physical parameters of flask

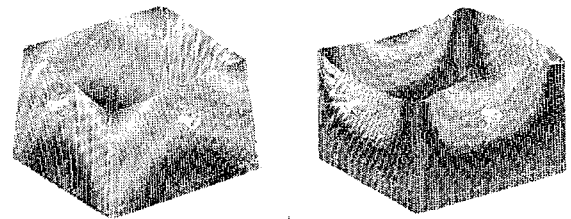
Density (kg/m ³)	Elastic modulus (Gpa)	Poisson's ratio
7800	210	0.32

3.3.3 실험결과와 해석 결과의 비교

Table 6 은 모드시험에서 구한 고유진동수와 수치해석으로 구한 고유진동수를 비교한 것이다. 모드형상이 동일한 모드 간의 고유진동수는 대체적으로 비슷함을 알 수 있다. 다만 Fig. 13 에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 모드가 국부적 모드(local mode)임에 따라 모드시험에서 측정되지 못하였다. 1200~3600 rpm 의 운전 회전 속도를 고려하였을 때, 상대적으로 구조물의 고유진동수가 낮음을 알 수 있다.

Table 6 Natural frequencies from modal Test and modal analysis

Mode	1	2	3	4	5	6
Modal Analysis (Hz)	29	34	52	54	60	106
Experiment (Hz)	-	37	-	56	64	109



(a) Mode 1 (29Hz) (b) Mode 2 (34Hz)

Fig. 13 Mode shapes

3.4 이상진동 측정

Fig. 14 와 같이 소실모형주조용 진동장치가 원진동 상태에서 가끔 맥놀이 현상이 발견되었다. 작동 회전 속도에 상관없이 가진 주파수가 인접되게 발생되어 맥놀이 현상이 발생되었다.

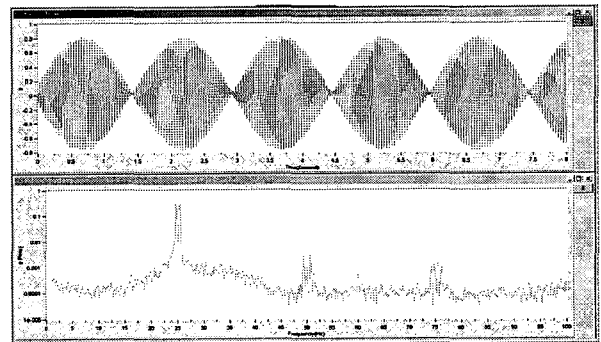


Fig. 14 Vibration acceleration and auto-spectrum of Z axis (1500rpm)

4. 문제점 분석 및 대책

4.1 원진동 왜곡 현상

각 상태의 위상별, 진동주파수별, 위치별로 진동 가속도를 측정하여 원진동 발생 유무를 파악하였다. 플라스크 제거 후 원진동 상태에서 위상에 관계없이 원진동이 항상 발생한다. 그러나 플라스크가 존재할 때는 위상이 0° 일 때만 원진동이 발생한다.

소실모형주조용 진동장치의 경우 주물사 충전

깊이가 작은 경우에 무게중심에서 편심회전모터까지의 수평거리가 편심회전모터까지의 수평선까지의 수직거리에 비해 길다. 이로 인해 회전모멘트가 발생하여 원진동 왜곡 현상이 일어나는 것을 확인하였다. Fig. 15 과 같이 편심회전모터의 위치를 플라스크 측면에서 플라스크 아래 위치로 변경하여 무게 중심에서부터의 거리를 줄여서 회전모멘트의 발생을 방지하여 원진동 왜곡현상을 방지할 수 있다.

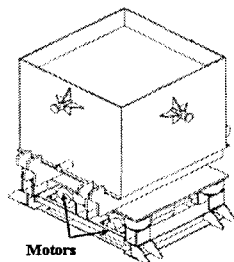


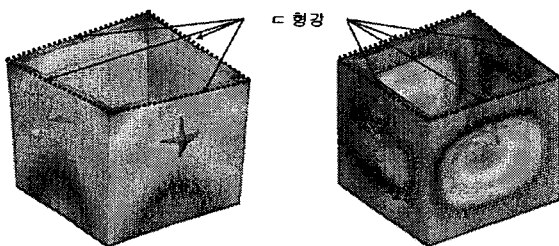
Fig. 15 Relocation of eccentric motors

4.2 주물사의 외향 이동현상

플라스크에 주물사 충전 시, 주물사가 단지 상하방향으로 충전되는 것이 바람직하다. 그러나 본 시스템의 경우 상단에 있는 주물사들이 플라스크 중심에서 외곽으로 수평 이동되는 현상이 발견되었다.

Fig. 13 과 Table 6 에서 알 수 있듯이 플라스크의 저차 고유진동수가 소실모형구조용 진동장치 운전 속도 내에 존재함으로써 플라스크가 진동함을 알 수 있다. 이로 인해 플라스크의 변형에 따라 주물사 외향 이동현상이 발생한다.

저차 모드형상을 감안하였을 때 플라스크 상단에 ㄷ 형상을 보강하여 수치해석에서 고유진동수의 증가를 확인하였다. Fig. 16 은 보강 후 플라스크의 저차 모드가 3 배 이상 증가한 것을 보여주고 있다. 추후 제작에 반영할 예정이다.



(a) Mode 1 (107 Hz) (b) Mode 2 (114 Hz)

Fig. 16 Mode shapes

4.3 맥놀이 현상

원진동 상태에서 Fig. 14 와 같이 맥놀이 현상이 발생한다. 불안정한 제어기(controller)로 인해 엔코더(encoder)에서 편심회전모터로 보내는 운전속도 신호가 모터별로 동일하지 않아 맥놀이 현상이 발생하므로 엔코더에서 각 모터로 보내는 운전속도가 동일하도록 안정한 제어기를 재제작할 필요가 있다.

5. 결론

소실모형구조법(EPC)의 공정 원리는 단순함에 비해 장치개발 관점에서 극복하기 어려운 문제점들을 안고 있다. 따라서 소실모형구조법(EPC)을 성공적으로 실시하기 위해 소실모형구조용 진동장치의 성능평가를 위해 실험과 수치해석을 수행하였다. 먼저 선진동과 원진동이 주물사의 압력과 모형의 변형에 미치는 영향을 실험을 통하여 검토하였다. 진동중의 모래 압력 분포를 조사한 결과 원진동의 경우 선진동에 비해 대체적으로 유사한 압력값이 측정되었고, 변형량 또한 적었다.

각 상태의 진동형태별, 좌우모터의 위상별, 진동 주파수별, 위치별로 진동 가속도를 측정하여 원진동 발생 유무를 파악하였다. 플라스크가 존재하지 않을 때는 원진동이 항상 발생하나 그 외 다른 상태에서는 위상 0° 를 제외하고 원진동 왜곡 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 이것은 편심회전모터의 위치를 변경하여 중심에서부터 거리를 줄여서 회전모멘트 발생을 방지함으로써 해결할 수 있다. 또한 모드시험을 통해 소실모형구조용 진동장치의 동특성을 파악하여 주물사 외향현상을 방지할 수 있는 대안을 제시하였다. 이를 토대로 향후 소실모형구조용 진동장치의 설계 개선방향을 제시하였다.

참고문헌

- (1) 최현진 등, 1998 “소실모형구조법에 의한 중공크랭크축 개발,” 한국구조공학회지 제 18 권 제 4 호.
- (2) 김기영 등, 2002, “알루미늄 합금 소실모형구조 시의 주형 충전재에 따른 특성변화,” 한국구조공학회지 제 22 권 제 3 호.
- (3) 이경환 등, 2001, “최근의 소실모형구조용 진동장치,” 한국구조공학회지 제 21 권 제 2 호.
- (4) 이경환 등, 2002. “소실모형구조법에서 진동 모드에 따른 모래압력 분포와 무형 변형과의 관계,” *Matels & Materials International*.
- (4) 장현탁 등, 2001. “칩 마운트 시스템의 진동경감,” 한국소음진동공학회논문집 제 11 권 제 8 호