

소실모형주조용 진동장치의 동특성 분석 및 개선

Analysis of Dynamic Characteristics and Improvement of Vibration Table for Expendable Pattern Casting Process

이 은 경* · 설 진 수** · 이 경 환*** · 최 경 환*** · 임 경 화†

Eun-Kyung Lee, Jin-Soo Seol, Kyung-Whoan Lee, Kyung-Whoan Choi
and Kyung-Hwa Rim

(2003년 8월 5일 접수 ; 2004년 1월 29일 심사완료)

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

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 propose the improved design. In simulation using finite element method, the position of stiffeners is obtained to satisfy the required dynamic characteristics.

1. 서 론

소실모형주조법(expendable pattern casting process)은 발포폴리스티렌(expanded poly-styrene)을 원료로 이용하여 얻고자 하는 주물형상으로 성형한 후, 이를 점결제가 들어있지 않은 건조된 주물사 속에 매설하여 모형에 직접 용탕을 주입하면, 모형이 용탕의 열에 의해 녹아 소실되고, 그 소실된 공간에 용탕이 응고됨으로써 주물제품을 얻는 주조공법이다.⁽¹⁾ 주로 선진국에서 사용되는 공법으로 기존의 사

형주조방식에 비해 정밀도가 높고 형상이 복잡하며 조직이 균일하여 강도가 높은 제품을 제작할 수 있다.⁽²⁾ 그러나 이 공법은 공정 원리는 단순함에 비해 장치개발 관점에서 극복하기 어려운 문제점을 안고 있다. 그중의 하나가 주물사 충전 시 모형의 변형 문제이다. 주조 시 발생하는 탄소결합이나 가스결합을 줄이기 위해서 모형은 발포배율을 높여야 하는데 고 발포 배율의 모형은 강성이 부족하여 주물사의 자중이나 충전 시 가해지는 진동에 의해 쉽게 변형된다.

소실모형주조법에서는 주물사의 충전이 잘되어야 하며, 강도가 약한 모형의 변형을 막기 위해 주물사를 최대한 유동화하여 충전시킬 필요가 있다. 따라서 무리한 힘을 가하지 않으면서 주물사의 양호한 충전을 위해서 진동테이블(vibration table)을 이용한다. 충전에 사용되고 있는 진동의 형식은 진동방향, 진동파형, 진동주파수, 진동량(가속도, 속도, 변위) 및 진동시간에 의해 정의된다. 진동테이블의 가진 방식과 진동계적으로 정리하면 Fig. 1과 같다. 그 동안의 연

† 책임저자 : 정희원, 한국기술교육대학교 메가트로닉스 공학부

E-mail : rim@kut.ac.kr

Tel : (041) 560-1147, Fax : (041) 560-1253

* 정희원, 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

** 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과

*** 한국생산기술연구원

구결과에 의하면 원진동이 가장 효과적인 진동이며, 주형 내 주물사 표면을 수평으로 유지하면서도 매설된 모형에 동하중을 균일하게 전달할 수 있는 것으로 알려져 있다.^(3,4)

본 논문에서는 소실모형주조용 진동장치의 원진동 형태의 가진 성능을 평가하고, 동특성을 분석하여 소실모형주조용 진동장치의 개선방향을 제시하였다.

2. 시스템 분석

2.1 동역학적 모델링

산업계에서 사용되고 있는 소실모형주조용 진동장치는 Fig. 2와 같다. 이 장치는 진동테이블위에 주물 모형과 주물사를 담은 플라스크(flask)가 설치되어 있으며, 진동테이블은 4개의 공기 스프링으로 지지되어 있다. 좌우에는 가진원(vibration source)으로 사용되는 2개의 편심회전모터가 장착되어 있다. 좌우

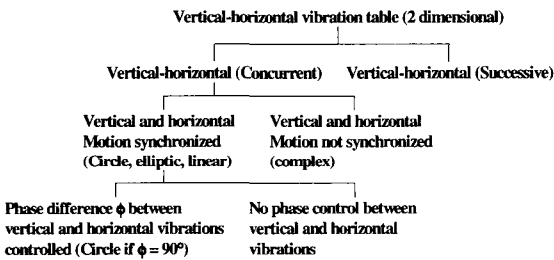


Fig. 1 Classification of vibration table

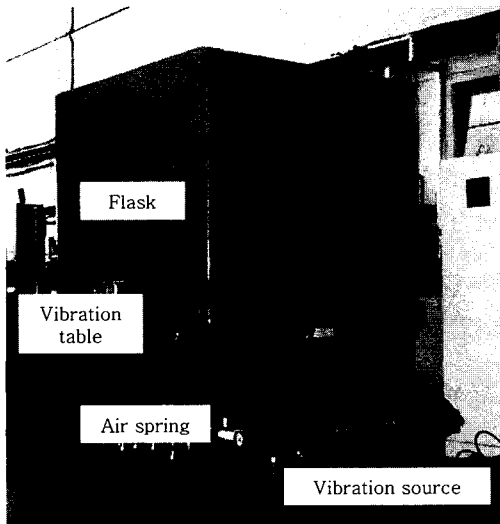


Fig. 2 Vibration table for EPC process

편심회전모터를 상호 역방향으로 회전시킬 경우는 진동테이블을 상하 방향으로 수직일축 선진동으로 가진할 수 있고, 동일 방향으로 회전시키면 원진동으로 가진할 수 있다.⁽⁴⁾

시스템 성능 검증에 앞서 간이 모드실험을 통해 소실모형주조용 진동장치의 충격 응답 스펙트럼을 가속도 센서를 이용하여 측정하였다. Fig. 3에서도 알 수 있듯이 1.5 Hz 근처에 수직방향 강제모드가 존재한다. 소실모형주조용 진동장치의 운전속도가 1200~3600 rpm 영역임을 감안하면 강제모드 주파수보다 훨씬 높은 고주파수 영역에서 운전되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 현 시스템에서는 공기스프링의 강성과 감쇠특성에 상관없이 편심회전모터의 가진력과 플라스크의 동특성에 따라 시스템 응답이 결정됨을 알 수 있다.

2.2 진동 가속도 측정

(1) 실험장치 및 방법

소실모형주조용 진동장치의 성능 평가를 위해 Fig. 4와 같이 실험장치를 구성하고, 3축 방향의 진동 가속도를 측정하였다. 진동테이블에 플라스크를 분리한 경우와 장착한 경우에 대해서 진동형태별(선/원진동), 좌우 모터의 위상, 진동주파수, 위치별로 진동가속도를 측정하였다.

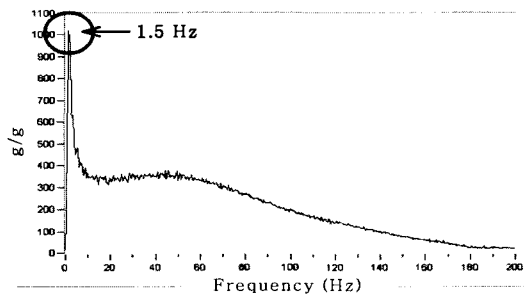


Fig. 3 Output auto-spectrum of vibration table

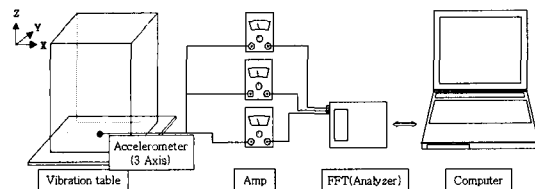


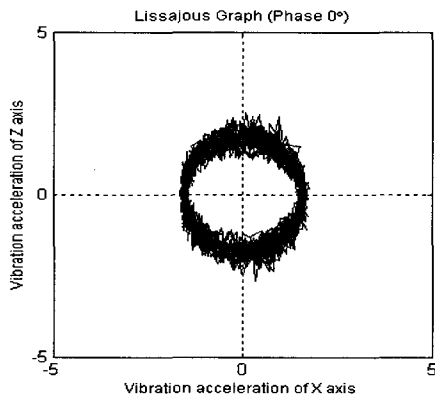
Fig. 4 Schematic of vibration measurement system

(2) 진동가속도 측정 : 플라스크 분리 경우

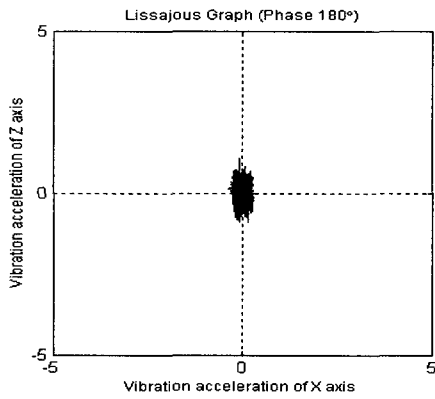
소실모형주조용 진동장치의 플라스크를 분리한 후, 진동테이블을 좌우모터가 동일 방향으로 회전하는 원진동으로 가진할 때, 좌우모터의 편심 위상을 변화시키며 진동가속도를 측정하였다. Fig. 4에서 볼 수 있

Table 1 Vibration acceleration with change of phase in the case of separated flask (circle)

Phase (°)	Vibration acceleration (G)		
	X dir.	Y dir.	Z dir.
0	1.13	0.06	1.28
45	1.07	0.08	1.21
90	0.84	0.07	0.94
135	0.47	0.06	0.54
180	0.12	0.06	0.27



(a) phase 0°



(b) phase 180°

Fig. 5 Vibration pattern with change of phase in the case of separated flask (circle)

듯이 측정위치는 진동테이블 중심이고, 이때 운전속도는 2300 rpm 이다. Table 1의 결과에서 볼 수 있듯이 좌우 편심모터간의 위상이 0° 에서 180° 로 변할수록 X축(좌우 수평방향)과 Z축(상하방향)의 진동가속도는 감소한다. Fig. 5는 위상 0° 와 180° 일 때, 진동테이블의 X-Z축 진동궤적이다. 플라스크를 분리하였을 때, 진동테이블만의 진동은 원하는 원진동이 구현됨을 알 수 있다.

(3) 진동가속도 측정 : 플라스크 장착 경우

가. 위치별 진동 : 선진동 경우

실제 작업조건과 유사한 조건으로 소실모형주조용 진동장치가 위치별로 균일한 진동을 발생시키는 지 파악하기 위하여, 진동테이블에 주물사가 있는 플라스크

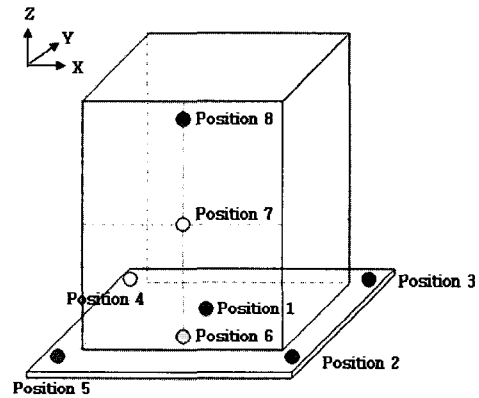


Fig. 6 Measurement positions of vibration acceleration in the case of filled flask (linear)

Table 2 Vibration acceleration with position in the case of filled flask (linear)

Position	Vibration acceleration (G)		
	X dir.	Y dir.	Z dir.
1	0.13	0.08	1.04
2	0.20	0.18	0.89
3	0.19	0.16	0.84
4	0.23	0.16	1.05
5	0.17	0.13	0.83
6	0.12	-	1.01
7	0.22	-	1.02
8	0.12	0.09	1.03

를 장착한 후, 좌우 편심모터가 상호 역방향으로 회전하는 선진동 상태에서 측정위치를 변화시키면서 진동가속도를 측정하였다. 측정위치는 Fig. 6과 같으며, 운전속도 2850 rpm 이다. Table 2에서 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 무게중심에서의 모멘트가 발생되지 않으므로, 모든 위치에서 균일한 진동이 발생함을 알 수 있다.

나. 운전속도별 측정 : 선진동 경우

소실모형구조용 진동테이블에 주물사가 있는 플라스크를 장착한 후 선진동 상태에서 운전속도를 변화시키며 Z축 진동가속도를 측정하였다. 측정위치는 진동테이블 중심이다. Table 3에서 볼 수 있듯이 운전속도가 커질수록 Z축 진동가속도가 급격하게 커짐을 알 수 있다.

다. 좌우 모터의 위상별 측정 : 원진동 경우

소실모형구조용 진동테이블에 주물사가 있는 플라스크를 장착한 후 원진동 상태에서 좌우모터의 위상을 변화시키며 진동가속도를 측정하였다. 측정위치는 진동테이블 중심이고, 운전속도는 2300 rpm 이다. Table 4와 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 위상이 0°일 때

만 원진동이 일어나는 것을 확인하였다.

(4) 문제점 : 원진동 왜곡현상

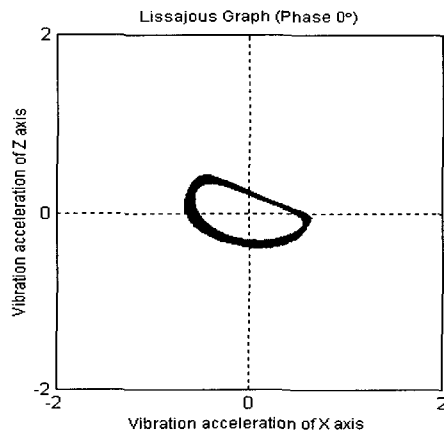
진동테이블에 플라스크를 분리한 경우와 장착한 경우에 대해서 좌우모터의 위상, 진동주파수, 위치별로 진동 가속도를 측정하여 원진동 발생 유무를 파악하였다. 플라스크 분리한 경우에는 원진동 상태에서 위상에 관계없이 원진동이 항상 발생하나, 플라스크를 장착한 경우에는 위상이 0° 일 때만 원진동이 발생한다. 일반적으로 좌우모터가 같은 속도, 같은 방향으로 회전하는 경우, 무게중심에서의 거리에 따라 진동궤적의 형상이 변하고, 불균등한 진동, 즉 롤링현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 현 시스템의 경우 주

Table 3 Vibration acceleration with rotation speed in the case of filled flask (linear)

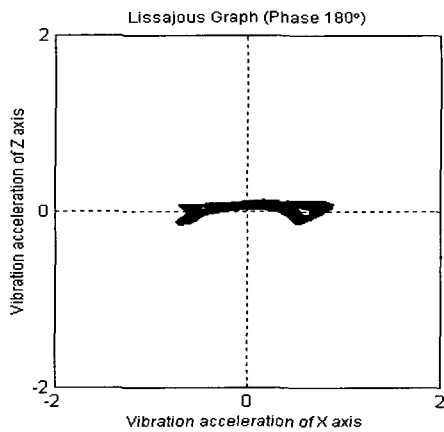
Speed (rpm)	Vibration acceleration in Z direction (G)
780	0.05
1560	0.16
2250	0.24
2850	1.04
3600	1.96

Table 4 Vibration acceleration with phase difference

Phase (°)	Vibration 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



(a) phase 0°



(b) phase 180°

Fig. 7 Vibration pattern with change of phase in case of filled flask (circle)

물사 충전 깊이가 증가할수록 무게중심이 편심회전모터로부터 멀어지고, 이로 인해 무게중심에 대한 회전 모멘트가 발생하여 원진동 왜곡현상이 일어나는 것을 확인하였다. 진동테이블 측면에 좌우모터를 설치할 경우에, 원진동 왜곡현상을 방지하기 위해서 편심회전모터를 최대한 위에 설치하여 무게중심에 가깝게 가진력이 작용하도록 해야 한다.

2.3 플라스크의 동특성 측정 및 해석

(1) 실험장치 및 방법

소실모형구조용 진동장치의 플라스크 동특성을 파악하기 위해 Fig. 8과 같이 실험장치를 구성하였다. 충격해머를 이용한 모드시험(modal test)을 사용하여, 플라스크의 고유진동수 및 모드형상을 측정하였다.⁽⁵⁾

(2) 플라스크 동특성 분석

플라스크의 동특성 실험결과를 검증하기 위하여 유한요소법(finite element method)으로 동특성 해석을 하였다. 상용 유한요소법 프로그램인 MSC/Nastran을 이용하였다.

Table 5는 모드시험에서 구한 고유진동수와 수치해석으로 구한 고유진동수를 비교한 것이다. 모드형상이 동일한 모드 간의 고유진동수는 대체적으로 비슷하였다. 다만 Fig. 9에서 볼 수 있듯이, 첫 번째 모드가 국부적 모드(local mode)임에 따라 모드시험에서 측정되지 않았다. 1200~3600 rpm의 운전속도를 고려하였을 때, 상대적으로 구조물의 고유진동수가 낮음을 알 수 있다.

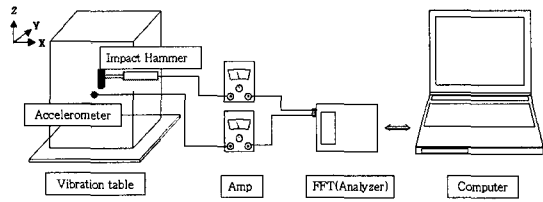


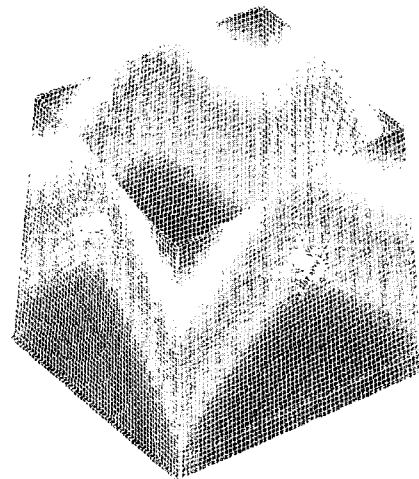
Fig. 8 Schematic of modal test system

Table 5 Comparison between FEM results and experimental results

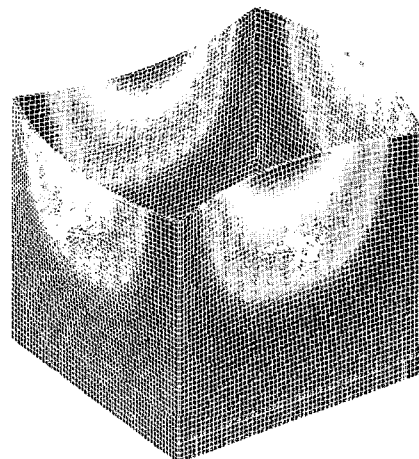
Mode	1	2	3	4	5	6
Modal analysis (Hz)	29	34	52	54	60	106
Modal test (Hz)	-	37	-	56	64	109

(3) 문제점 : 주물사 외향 이동현상

Fig. 9와 Table 5에서 알 수 있듯이 플라스크의 저차 고유진동수가 소실모형구조용 진동장치의 운전속도 내에 존재함으로써 플라스크가 진동한다. 이로 인해 플라스크의 변형에 따라 주물사가 외곽으로 수평 이동하는 외향 이동현상이 발생하게 된다. 플라스크에 주물사 충전 시, 주물사가 단지 상하방향으로 충전되는 것이 바람직하다. 그러나 현 시스템의 경우 상단에 있는 주물사들이 플라스크의 중심에서 외곽으로 수평 이동되는 현상이 발생됨에 따라 플라스크 내에 주물사의 압력분포에 변화를 주어 모형의 변형을 초래하게 되는 문제점이 발생되고 있다.



(a) 1st mode (29 Hz)



(b) 2nd mode (34 Hz)

Fig. 9 Mode shapes of a flask(FEM results)

3. 플라스크 구조변경의 최적화

3.1 민감도 분석

소실모형주조용 진동장치의 동특성 개선을 위해 진동장치의 운전속도 내에 존재하는 플라스크의 고유진동수를 운전속도 밖으로 이동시켜야 한다. 이를 위해서 민감도 분석을 통해 어떤 설계변수의 변화가 플라스크의 동특성 개선에 가장 효과적인지를 알아본다.⁽⁶⁾

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 플라스크에 보강재(stiffener)를 부가함으로써 29 Hz 의 1차 고유진동수를 최대운전속도의 1.5배인 90 Hz 이상으로 증가시키는 구조변경을 수행하였다. 특히 보강재의 크기 및 위치 변화에 대한 고유진동수의 변화를 확인하였다. 건조된 주물사가 채워짐으로써 약간 플라스크의 고유진동수가 증가되지만, 안전 계수를 확보하는 관점에서 주물사 효과를 고려하지 않은 채 플라스크의 고유진동수만을 고려하였다.

3.2 플라스크 형상에 따른 고유진동수 변화

보강재의 크기 변화에 대한 고유진동수 민감도 분석에 앞서 플라스크 형상과 두께 변화에 따른 고유진동수의 변화를 확인하였다. 동일 부피와 높이를 갖는 다양한 형태의 플라스크에 대해 해석한 결과는 Fig.

Table 6 Change of the natural frequency with shapes of flask

Shape \ Mode	Tri	Quad (present)	Hex	Oct	Circle
1 st natural frequency(Hz)	27	29	31	32	32

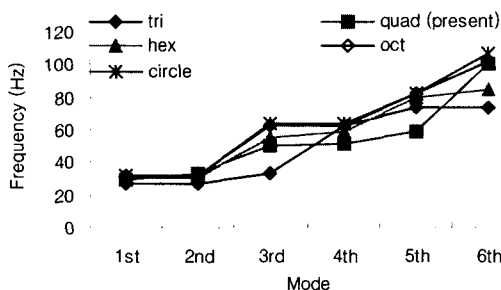


Fig. 10 Changes of the natural frequencies with shapes of a flask

10과 같다. Fig. 10과 Table 6에서 알 수 있듯이 플라스크 형상 변화에 따른 1차 고유진동수의 변화는 거의 없다. 그러나 각 모드에서 원형 플라스크가 다른 형태의 플라스크보다 고유진동수가 높았다. 또한 플라스크의 두께 변화에 경우 Fig. 11에서 알 수 있듯이 두께가 증가할수록 고유진동수는 전반적으로 증가하지만, 1차 고유진동수가 운전속도 내에 존재하고 두께 증가에 따른 플라스크의 질량 증가로 편심회전 모터의 가진력을 증가시킬 필요가 생긴다.

3.3 보강재를 이용한 고유진동수 민감도 분석

(1) 하단 보강재 크기에 따른 고유진동수 변화

소실모형주조용 플라스크에는 Fig. 12와 같은 형태의 보강재가 하단(lower part) 내부에 설치되어 있다. 플라스크 하단에 설치되어 있는 보강재와 동일한 'ㄱ형' 보강재의 크기에 따른 고유진동수의 변화를 확인하였다. Fig. 13과 Table 7에서 볼 수 있듯이 보강재의 사이즈가 증가함에 따라 1차 고유진동수는 증가하나 어느 이상이 되면 일정한 값으로 접근하였다.

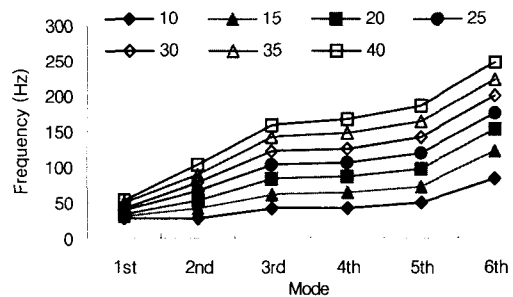


Fig. 11 Changes of the natural frequencies with thickness(mm) of a flask

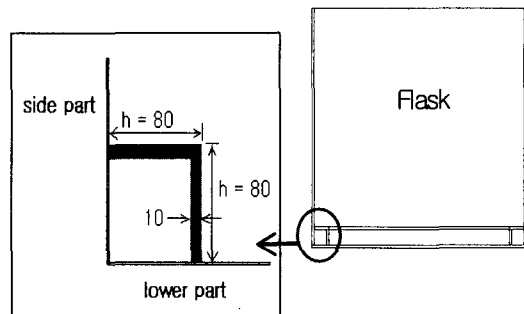


Fig. 12 Dimension of stiffener at lower part of a flask(mm)

(2) 보강재 위치에 따른 고유진동수 변화

보강재를 설치할 위치를 선정하기 위해 하단에 보강재가 설치되지 않은 플라스크에서 보강재 설치 위치에 따른 1차 고유진동수의 변화를 확인하였다. 플라스크 하단에 설치된 보강재와 동일크기의 'ㄷ'형 보강재를 플라스크 중앙에 각각 수평과 수직방향으로 설치하였다. 결과는 Fig. 14와 같으며 수평방향으로 설치할 경우에 플라스크의 고유진동수가 증가하였다. 이것은 1차 고유진동수의 모드형상이 수직방향 진동 변위 보다 수평방향 진동 변위가 크므로 보강 효과가 나타나는 것이다. 따라서 보강 효과가 있는 수평방향에 최적위치를 선정하기 위해 Fig. 15와 같이 플라스크의 수평방향 위치에 따른 1차 고유진동수 변화를 확인하였다. 결과는 Table 8과 Fig. 16, 17에서 볼 수

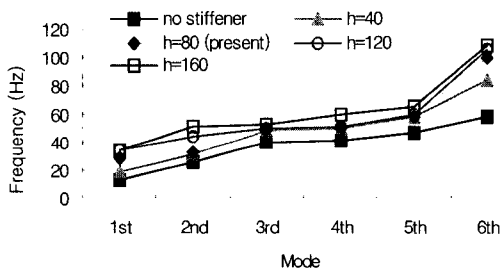


Fig. 13 Changes in natural frequencies with sizes of a stiffener at lower part of flask (h, mm)

Table 7 Change in the natural frequency with sizes of a stiffener at lower part of flask (h, mm)

Mode \ Size(mm)	0	40	80	120	180
1 st natural frequency (Hz)	13	18	29	34	35

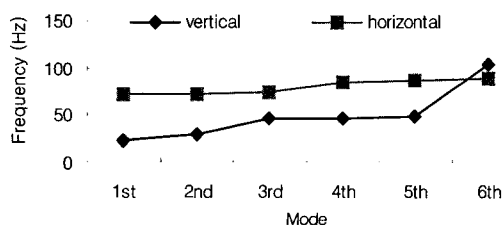


Fig. 14 Changes in natural frequencies with directions of stiffener

있듯이 진동 변위가 큰 상단(upper part), 즉 Case 4, 5에 보강재를 설치할 경우 1차 고유진동수가 크게 증가하였다.

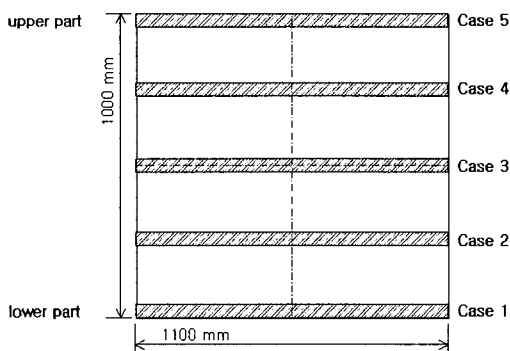


Fig. 15 Positions of a stiffener in horizontal dir

Table 8 Change of the natural frequency with case

Case \ Mode	1	2	3	4	5
1 st natural frequency (Hz)	29	40	64	69	67

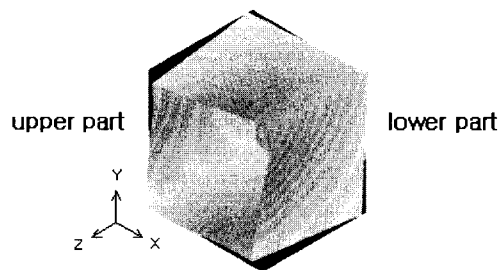


Fig. 16 Mode shape of a flask

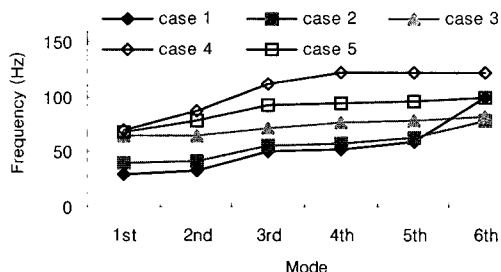


Fig. 17 Changes in natural frequencies with positions of stiffener (horizontal)

3.4 구조변경의 최적화

보강재의 위치 및 크기 변화에 대한 고유진동수 민감도 분석 결과를 살펴보면, 진동 변위가 큰 상단에 수평방향으로 보강재를 설치하면 1차 고유진동수를 크게 증가시킬 수 있었다. 따라서 소실모형주조용 플라스크의 상단에 보강재를 설치함으로써 1차 고유진동수를 증가시킬 수 있다. Fig. 18과 Table 9는 하단에 보강재가 설치된 플라스크 상단에 보강재를 설치했을 경우의 고유진동수 변화를 보여 준다. 상단뿐만 아니라 중심에 보강재를 설치할 경우(Case 1+3+5)에 1차 고유진동수가 가장 증가하였다. 그러나 이 경우는 중앙에 설치된 보강재가 주물사의 유동화에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 Case 1+5와 같이 하단과 상단 끝에 보강재를 설치하면 목표했던 1차 고유진동수로 변경이 가능하다. 이 경우 하단만 보강

된 플라스크의 1차 고유진동수(29 Hz)에 비해 진동수는 228 % 가 향상 되었고, 질량의 증가율은 13 % 가 되었다. 또한 Fig. 19의 모드형상을 통해 보강이 효과적으로 된 것을 확인하였다.

4. 결론

소실모형주조법을 성공적으로 실시하기 위한 소실모형주조용 진동장치의 성능평가를 위해 각 상태의 진동형태, 좌우모터의 위상, 진동주파수, 위치별로 진동 가속도를 측정하여 원진동 발생 유무를 파악하였다. 또한 모드시험을 통해 소실모형주조용 진동장치의 동특성을 파악하고, 주물사 외향 이동현상을 방지할 수 있도록 민감도 분석을 이용하여 플라스크에 장착하는 보강재의 크기와 설치 위치에 대한 최적 조건을 도출하였다. 이를 토대로 소실모형주조용 진동장치의 개선방향을 제시하였다.

참 고 문 헌

- (1) 최현진, 오영근, 이경환, 1998, "소실모형주조법에 의한 중공크랭크축 개발," 한국주조공학회지, 제 18 권, 제 4 호, pp. 325~333.
- (2) 김기영, 이경환, 임경화, 2002, "알루미늄 합금 소실모형주조 시의 주형 충전재에 따른 특성 변화," 한국주조공학회지, 제 22 권, 제 3 호, pp. 137~143.
- (3) Ikenaga, A., 이경환, 김도경, 김광배, 2001, "최근의 소실모형주조용 진동장치," 한국주조학회지, 제 21 권, 제 2 호, pp. 104~110.
- (4) Ikenaga, A., Kuraoka, S., and Kawamoto, M., 1998, "Performance of Rotary Vibration Table for Compaction of Molding Sand," Transactions of the American Foundrymen's Society, Vol. 106, pp. 1~6.
- (5) 장헌탁, 임경화, 2001, "칩 마운트 시스템의 진동 경감," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 8 호, pp. 331~337.
- (6) 박석주, 최창우, 오창근, 왕지석, 정재현, 1996, "보강재를 이용한 열린 상자형 구조물의 구조변경법에 관한 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제 6 권, 제 1 호, pp. 57~66.

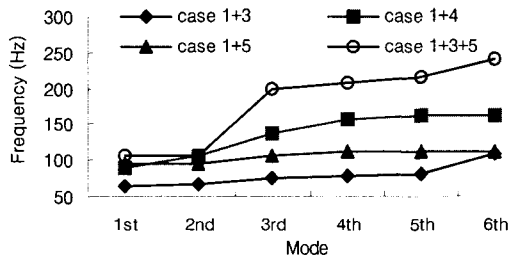


Fig. 18 Changes in natural frequencies with multi-positions of stiffener

Table 9 Change of the natural frequency with multi-positions of stiffener

Case	1+3	1+4	1+5	1+3+5
1 st natural frequency (Hz)	64	89	95	106

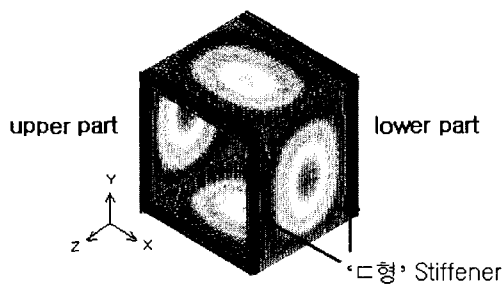


Fig. 19 Mode shape of stiffened flask