

■■■■■■■■■■
技術資料
■■■■■■■■■■

최근의 소실모형주조용 진동장치

池永明 · 이경환^{†*} · 김도경^{*} · 김광배^{**}

Recent Vibrating Table for EPC Process

Akira Ikenaga, Kyong-Whoan Lee[†], Do-Kyong Kim and Kwang-Bae Kim

1. 서 언

소실모형주조법에서는 주형조형용 모형으로써 목형 대신 발포수지성형체를 사용한다. 조형공정에 있어서 점결제를 사용하지 않는 이 프로세스에서는 강도가 약한 모형의 변형을 막기 위해 모래를 최대한 유동화하여 충전시킬 필요가 있다. 따라서, 생형에서와 같은 조형방식은 충격력과 압축력 때문에 사용이 불가능하다.

소실모형주조법의 주물사 충전에 사용되고 있는 진동의 형식으로서 수직 1축 진동 및 수직-수평 다축 진동이 일반적이며 그 외에 수평 1축 진동, 다축 고사이클 진동 등도 사용되고 있는데, 각각 다른 유동 충전형태가 얻어진다.

어떠한 형식도 가진기는 편심회전중추가 단식 또는 복식으로 사용되고 있는데, 최근 공압식의 적용도 검토되고 있다. 또, 가진기로부터 플라스크로의 진동 전달 방법은 체결하는 방법과 하지 않는 방법이 있는데, 이것도 모래의 진동유동형태를 현저하게 변화시킨다. 진동형태는 진동방향, 진동파형, 진동수, 진동량(가속도, 속도, 진폭) 및 진동시간에 의해 정의된다.

모형과 플라스크의 사이에 건조사를 충전하는 수단으로서 응용이 유력한 것은 정현파로 대표되는 조화진동이다. 조화진동은 충격력이 작고, 안정성과 제어성이 뛰어난데, 다른 방향성분과의 합성에 의해 그것들의 특성이 더욱 향상되는 경우가 있다. 그 좋은 예가 원진

동이다.

원진동은 수직진동과 수평진동 사이의 위상각을 90° 유지함으로써 얻어지는 비교적 새로운 형태의 진동이다.

본 원고에서 원진동이라 함은 진동체가 수직면상에서 원운동을 하는 이차원 진동모드를 말하며 원진동장치는 이 진동모드가 진동 컨베이어의 주요 구동기구라는 점에 착안하여 개발되었다.

그 동안의 연구결과에 의하면 원진동은 주형내 모래 표면을 수평으로 유지하면서도 매설된 모형에 동하중을 균일하게 전달할 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다.

원진동은 대형플라스크에서 복잡한 형상의 모형에 모래를 충전할 때 효과적으로 적용할 수 있다.

이 자료에서는 종래의 진동장치와 비교하여 원진동에 의한 모래의 충전특성 및 유동성 개선효과를 설명하고자 한다.

2. 종래의 진동조형기

소실모형주조법용 조형장치로서 여러 가지 형태의 진동장치가 사용되고 있다.

가장 통상적으로 사용되는 것이 일방향 진동기를 부착한 것이며 수직 1축 진동장치(소실모형주조용 진동장치의 구성요소 : 진동판, 진동판 지지용 스프링, 베이스 프레임, 가진기)의 경우, 한 쌍의 편심회전중추형

오사카부립대학교(Osaka Prefecture University)
*한국생산기술연구원(Korea Academy of Industrial Technology)
**한국항공대학교(Hankook Aviation University)
[†]E-mail : Whoan@kitech.re.kr

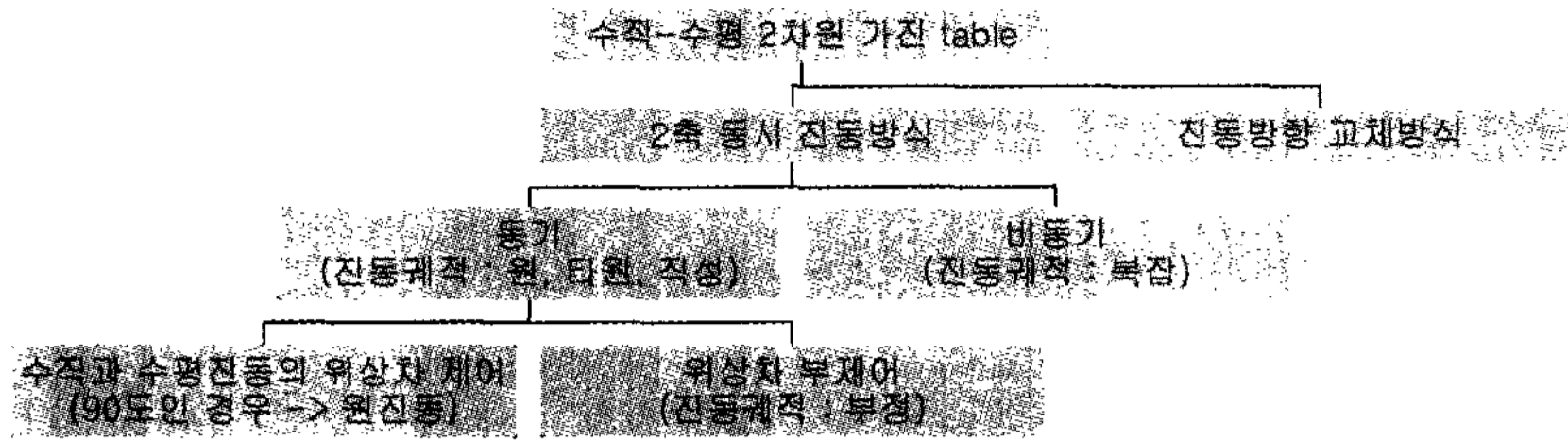


Fig. 1. Classification of vibration tables based on controlling methods of vertical and horizontal vibrations.

가진기가 진동판 바로 아래에 설치되어 좌우의 회전중추는 서로 반대방향으로 회전한다.

경우에 따라서는 다차원 진동기를 이용하는 경우도 있다. 이를테면 이차원 진동은 두 개의 진동기를, 하나는 수평용으로 다른 하나는 수직용으로 가진하는 경우를 말한다. 이런종류의 이차원 진동장치가 일반적으로 성공리에 사용되고 있다.

마찬가지로 삼차원 진동 역시 또하나의 부가적인 수평가진기를 채용하므로써 가능하다.

수직, 수평 2방향 동시진동을 얻기 위한 다차원 진동장치는 소실모형구조 현장에서 개발 초기부터 수없이 많이 적용되고 있는데, 그 가진방식 및 진동현상(진동계적)을 계통적으로 정리하면 그림 1과 같이 계열화할 수 있는데 원진동이 수직-수평 다축진동 중에서 가장 안정한 진동이고, 가진방법도 간단한 것으로 구분할 수 있다.

3. 원진동 기본원리

원진동 발생의 원리는 진동판의 밑바닥에 붙어 있는 수직진동용 가진기의 좌우 2개의 편심회전중추의 회전 방향을 종래 반대방향으로 회전시키던 것을 같은 방향으로 변경하는 것으로 원진동이 얻어진다.

종래의 소실모형구조용 진동장치는 다축 동시진동을 얻기 위해 수직진동(Z축 방향)용 가진기와 수평진동(X, Y축 방향)용 가진기로부터 생기는 복수의 진동성분을 합성하였다.

일반적으로 쓰이고 있는 편심회전중추식 가진기에 의한 진동형태는 조화진동이다. 수평진동을 X, 수직진동을 Z라고 하면, 각각의 가진기로부터 발생하는 진동성분은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z = A \sin \omega t \tag{1}$$

$$X = B \sin(\omega' t + \phi) \tag{2}$$

여기에서 Z는 수직변위, X는 수평변위, A와 B는 각각의 진폭, ω , ω' 는 각속도, ϕ 는 초기의 위상차이다. 만약 두 방향의 진동이 같은 진폭, 같은 진동수를 가진다면 ($A = B, \omega = \omega'$), 그것들을 합성했을 때 생기는 진동계적은 다음과 같이 나타내어진다.

$$Z^2 + X^2 - 2ZX \cos \phi = \sin^2 \phi \tag{3}$$

여기에서 초기위상차인 ϕ 가 변화하면, 식 (3)에 의해 나타내어진 진동의 궤적은 다음과 같이 여러가지로 변화한다. 이들 궤적은 일반적으로 Lissajous 도형이라고 불리며, 서로 직각방향으로 진동하는 2개의 조화진동의 진동수의 비, 위상차에 따라 각각의 진동형태가 얻어진다.

- (i) $\phi = \pi/2, 3\pi/2$ 일 때, $z^2 + x^2 = 1$ (원)
- (ii) $\phi = 0, 2\pi$ 일 때, $z - x = 0$ (사선)
- (iii) $\phi = \pi$ 일 때, $z + x = 0$ (사선)
- (iv) $\phi = \pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ 일 때,

$$z^2 + x^2 - \sqrt{2}zx = 1/2$$

좌표계를 45° 회전하면, $(2 + \sqrt{2})z^2 + (2 - \sqrt{2})x^2 = 1$
(기울어진 타원)

이와 같이, 합성조건에 따라 진동의 운동궤적은 변화하며, 예를 들어 원진동을 얻기 위해서는 진폭이 같

Table 1. Lissajous Patterns for Typical Phase Difference.

| Case | Phase angle, f | Equation | Lissajous pattern |
|------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| 1 | $\pi/2$ or $3\pi/2$ | $z^2 + x^2 = 1$ | ircular |
| 2 | 0 or 2π | $z - x = 0$ | Linear |
| 3 | π | $z + x = 0$ | Linear |
| 4 | $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ | $z^2 + x^2 - \sqrt{2}zx = 1/2$ | Elliptic |

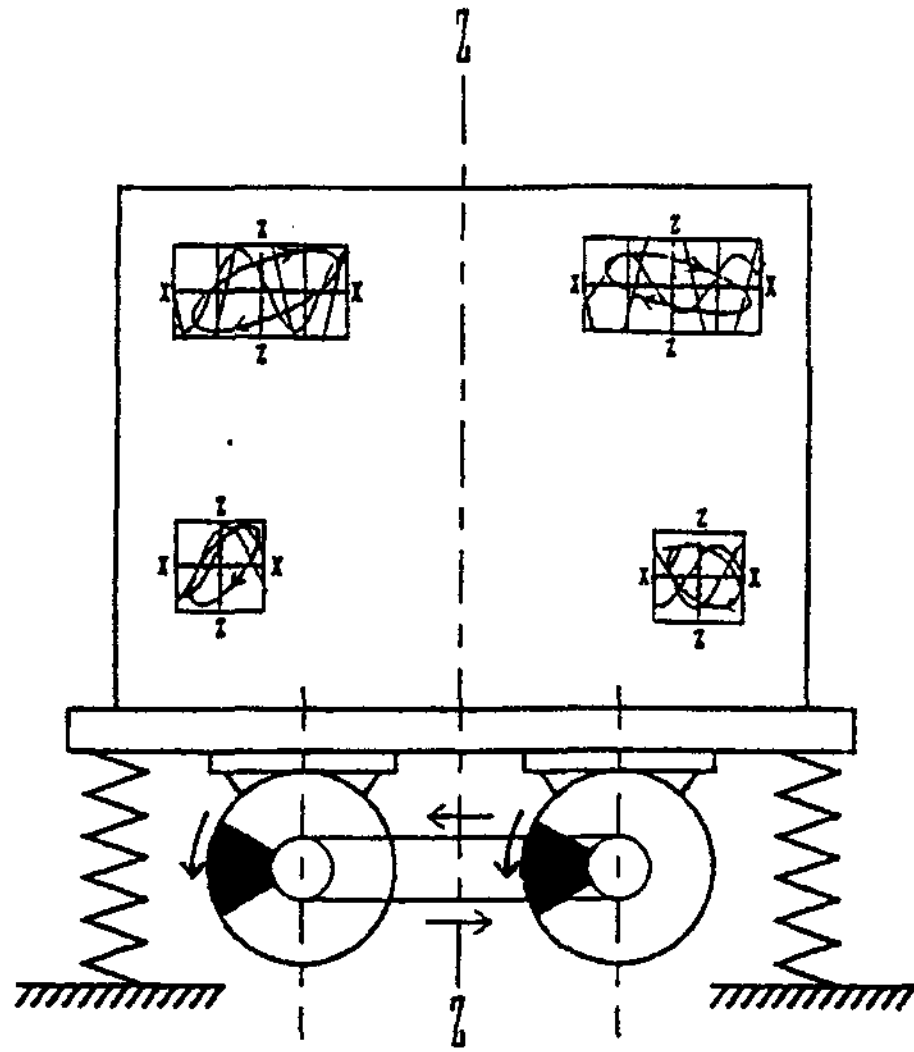


Fig. 2. Eccentric mass exciters connected by a timing belt with no phase difference.

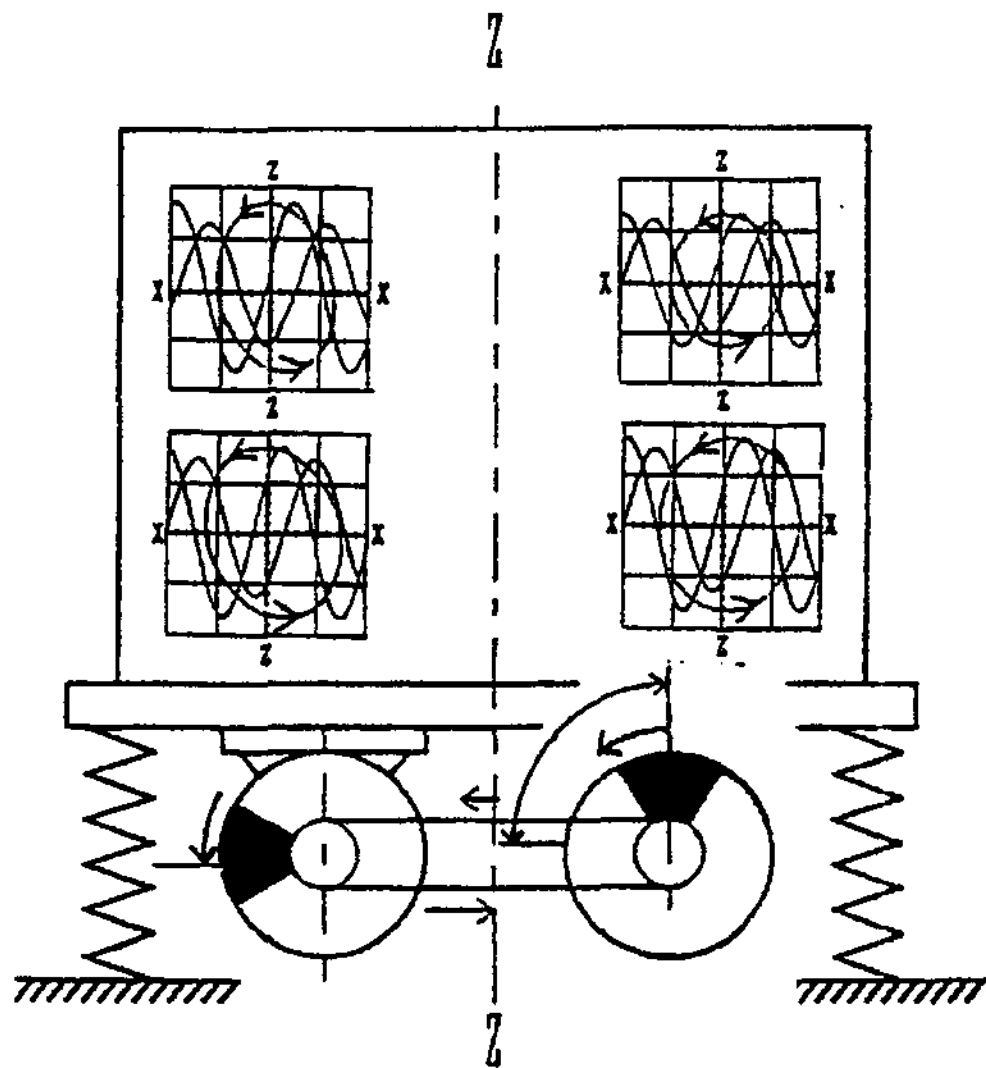


Fig. 3. Eccentric mass exciters connected by a timing belt with 90° phase difference.

은 두 개의 진동성분의 초기 위상차를 90°로 하는 동시에 그 상태를 유지시키기 위해 진동수를 완전 동기 되도록 제어할 필요가 있다. 위 식으로 표현되는 진동의 Lissajous 도형을 각각의 위상차에 대해 얻은 것을 정리하면 표 1과 같다.

그런데, 실제로는 임의의 위상차를 정상적으로 확보하고, 다시 그것을 지속시키는 것은 곤란하다. 즉, 반

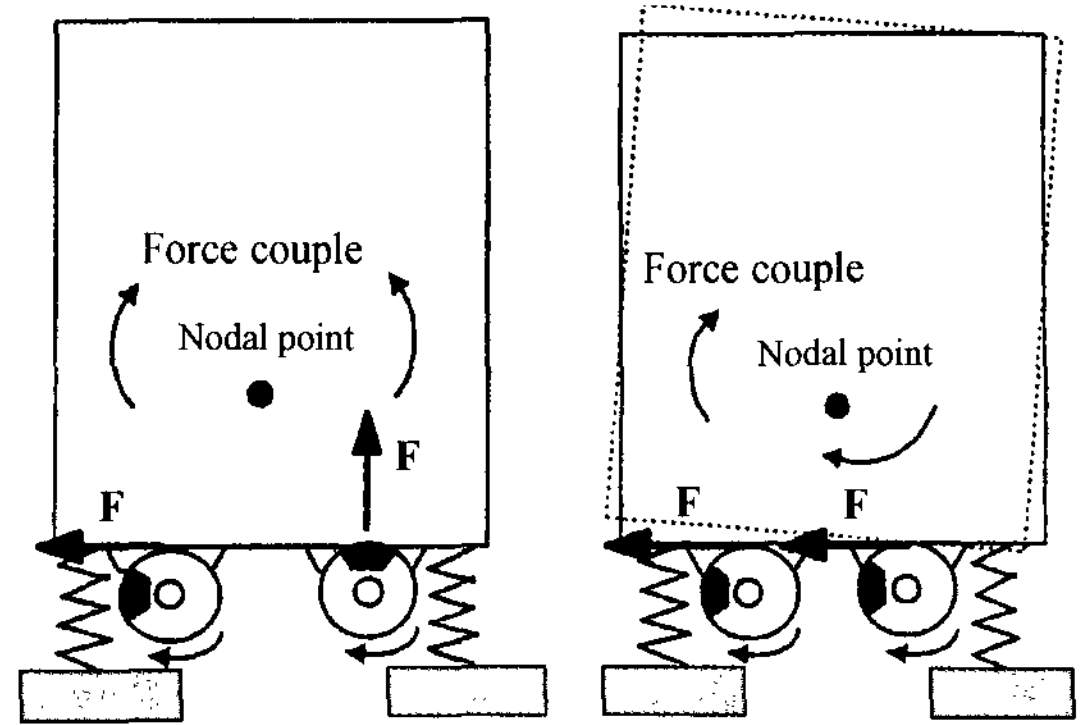


Fig. 4. Examples of forces generated by two eccentric mass exciters: (l) mass position 90° apart; (r) masses at same position.

드시 (i)의 상황이 발생하는 것은 아니고, 경우에 따라 (ii), (iii), (iv)의 궤적을 가지는 진동이 생기고, 또 위상의 주기적 어긋남이 생기는 것에 따라 진동궤적이 수초 단위로 연속적으로 변화하는 현상을 수반하며 모래의 충전이 불충분한 상황이 발생하기도 한다.

일반적으로 진동판 하부에 설치된 좌우 2기의 가진기의 편심중추를 같은 속도, 같은 방향으로 회전시킨 경우, 진동 중심점(nodal point)이 가진기 바로 위에 나타나고, 진동 중심점에서의 거리에 따라 진동궤적의 형상이 변하는, 불균등한 진동 즉 롤링 현상이 일어난다.

따라서, 롤링 현상을 억제하고, 진동계 전역에서 균등한 원진동을 얻기 위해서는 양 편심회전중추의 안정한 동기상태가 불가결하다.

그림 2 및 3은 좌우 2기의 편심회전중추의 초기 위상차를 0°, 90° 유지, 고정했을 때의 플라스크 각 부위의 진동궤적이다. 위상각이 0° 일 때는 롤링 현상이 나타났었고 위상각이 90°로 증가하면 롤링 현상은 사라지고 진동모드는 원형이 된다.

이러한 경향은 그림 4에서 보는 바와 같이 시스템의 진동 중심점에서 생성되는 짝힘을 검토해 봄으로서 설명된다. 90°일 경우 각 가진기에서 발생한 짝힘이 서로 반대이기 때문이며 한편 0°의 경우는 짝힘이 같은 방향으로 작용한다. 같은 이유로 위상차가 90°에서 180° 사이일 경우 롤링 현상도 제거될 수 없다.

4. 충전성에 대한 평가

일반적으로 플라스크 내에서의 모래의 충전성을 평

가하는 경우, 컴팩터빌리티(compactability:겉보기 체적의 감소도)가 문제가 된다. 그러나 소실모형주조법에서는 다른 조형 프로세스와는 달리 모형의 유공부분(일반주형의 증자부)에 대한 모래의 양호한 유입성을 얻는 것이 가장 중요한 문제가 되고 있다.

주물사의 진동충전 압축능은 시간에 대한 주물사의

체적 변화의 식으로 나타낼 수 있다. 부피변화의 측정 결과를 점근선으로 근사하고 곡선의 파라미터를 이용하여 충전특성을 분석한다.

$$C = \frac{abt}{1+bt} \tag{4}$$

t : 진동시간 C : 부피감소도

a : 물질정수 b : 유동성을 나타내는 정수

그림 5는 위 식을 나타낸 그림이다. 먼저, 위 식을 로 변형하고, 종축에 t/C, 횡축에 t를 놓고, 최소자승법에 의한 직선근사를 하여 그 직선의 y축 절편 1/ab와 기울기 1/a를 구한다.

다음에 $C = \frac{abt}{1+bt}$ 의 양변을 t로 미분한다.

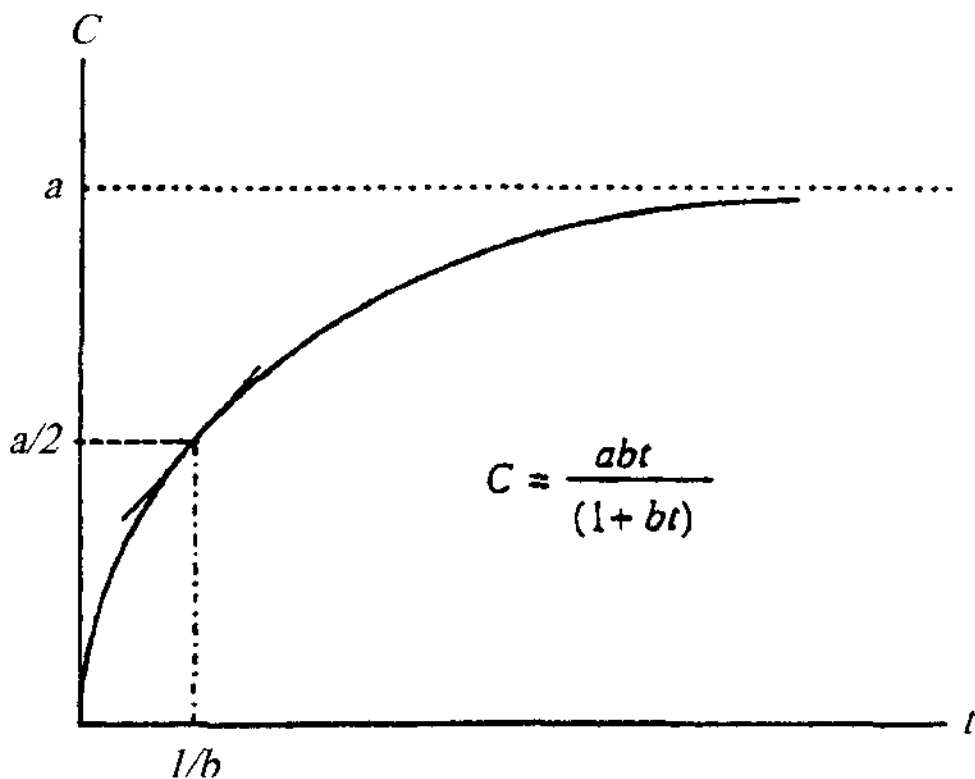
$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= \frac{ab(1+bt) - ab2t}{(1+bt)^2} \\ &= \frac{ab}{(1+bt)^2} \end{aligned}$$

여기에서 $t = 1/b$ 일 때 ($C = a/2$ 일 때)

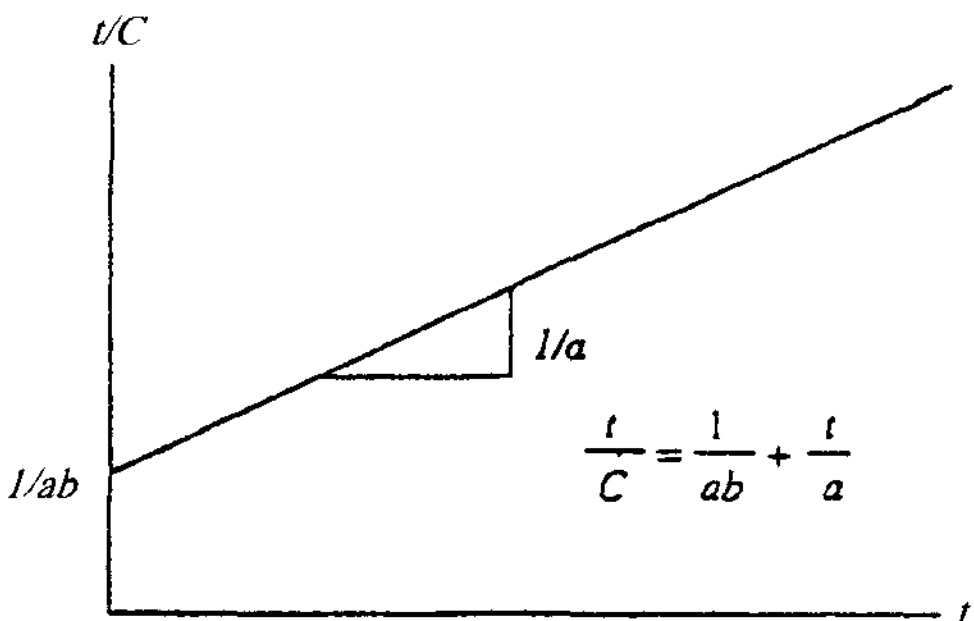
$$\frac{dC}{dt} = \frac{ab}{4}$$

ab/4는 부피감소율 C가 최대부피감소율 a의 절반일 때, 즉 시간 t가 1/b일 때의 컴팩터빌리티 곡선 상에서의 접선의 기울기로 주어진다.

그림 6은 수직원진동, 수직1축진동, 수평1축진동에서의 부피감소율 C를 보인 것이다. 여기에서 보면, 같은 가속도에서도 진동의 모드에 따라 부피감소율 C가 매우 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 이 곡선에서 구한 컴팩터빌리티 정수 a, b, ab/4는 표 2와 같다. 표에 따르면, a와 ab/4는 모든 경우에 있어서 가속도가 증가함에 따라 증가하고, 파라미터 b는 가속도의 증가와 크게 상관이 없다.



(a) asymptotic curve



(b) determination of parameters

Fig. 5. Asymptotic curve fit for volume reduction ratio, C, versus time.

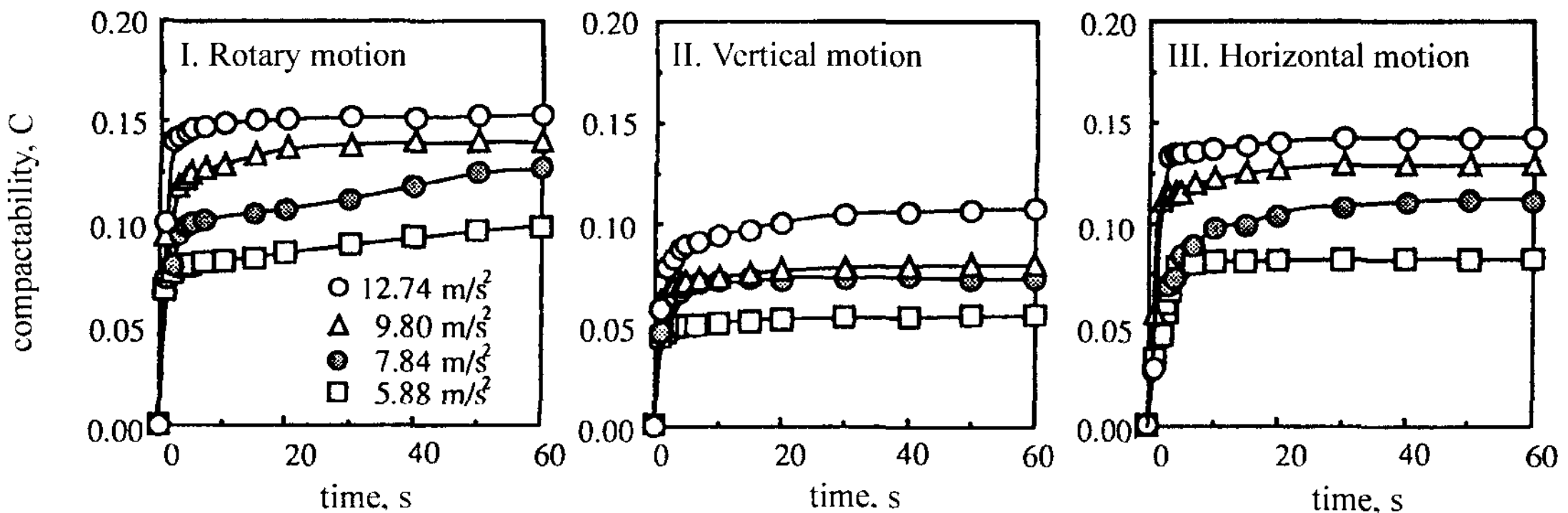


Fig. 6. Effect of vibration modes and intensity on volume change.

Table 2. Effect of vibration mode and level on compactability constants.

| Vibration level | 원진동 | | | 수직진동 | | | 수평진동 | | |
|------------------------|-------|-----|-------|-------|-----|-------|-------|------|-------|
| | a | b | ab/4 | a | b | ab/4 | a | b | ab/4 |
| 5.88 m/s ² | 0.088 | 2.0 | 0.044 | 0.053 | 3.3 | 0.045 | 0.085 | 1.0 | 0.022 |
| 7.84 m/s ² | 0.11 | 1.6 | 0.045 | 0.074 | 2.5 | 0.047 | 0.11 | 0.58 | 0.016 |
| 9.80 m/s ² | 0.14 | 1.6 | 0.058 | 0.078 | 2.5 | 0.048 | 0.13 | 1.7 | 0.054 |
| 12.74 m/s ² | 0.15 | 4.2 | 0.16 | 0.11 | 1.2 | 0.032 | 0.14 | 2.2 | 0.080 |

이상의 결과로부터 컴팩터빌리티 정수로서 최대부피 감소율 a와 컴팩터빌리티 ab/4를 적용하는 경우에 진동형태와의 관계를 잘 정리할 수 있다고 하겠다.

각 진동형태의 충전성을 컴팩터빌리티 정수 a, ab/4에 따라 비교하면, 표 2에서 알 수 있듯이 수직 원진동이 가장 우수한 충전성을 나타내고, 이것보다 약간 떨어지는 것이 수평1축진동, 그리고 수직1축진동이 가장 떨어지는 충전성을 보인다.

일반적으로 소실모형구조용 진동판에 적용되고 있는 다차원 진동판 사양으로서는 임의방향의 1축진동 후 다른 방향의 1축진동으로 도중에 교체하는 방식 및 방향이 다른 복수의 1축진동을 합성하는 형태의 동시 다축진동이 있다. 그림 7은 10초의 수직 1축진동을 한

후 정지하고 계속해서 10초간의 수평 1축진동을 가한 경우와 교호진동의 순서를 반대로 했을 때의 컴팩터빌리티 곡선이다. 표 3은 각각의 컴팩터빌리티 정수이다.

앞서의 2축 동시진동과 비교하면 원진동과 달리 진동을 일단 정지한 후 다른 방향의 진동을 부가하여도 충전에 대해 유효하게 작용하지 않고 진동의 중단은 전체의 컴팩터빌리티에 악영향을 주는 것을 알 수 있다. 먼저 수직진동을 했을 때 발생한 열악한 충전은 나중에 수평진동을 가하여도 개선되지 않는데, 이는 진동이 중단됨에 따라 유동화 상태에 있던 모래가 침하하여 굳어진 결과 최초의 자연충전상태나 진동중에 비해 내부마찰계수나 벽마찰계수가 커지고 중력가속도를 조금 넘는 정도의 가진력으로는 유동화가 복원되지 않기 때문이다.

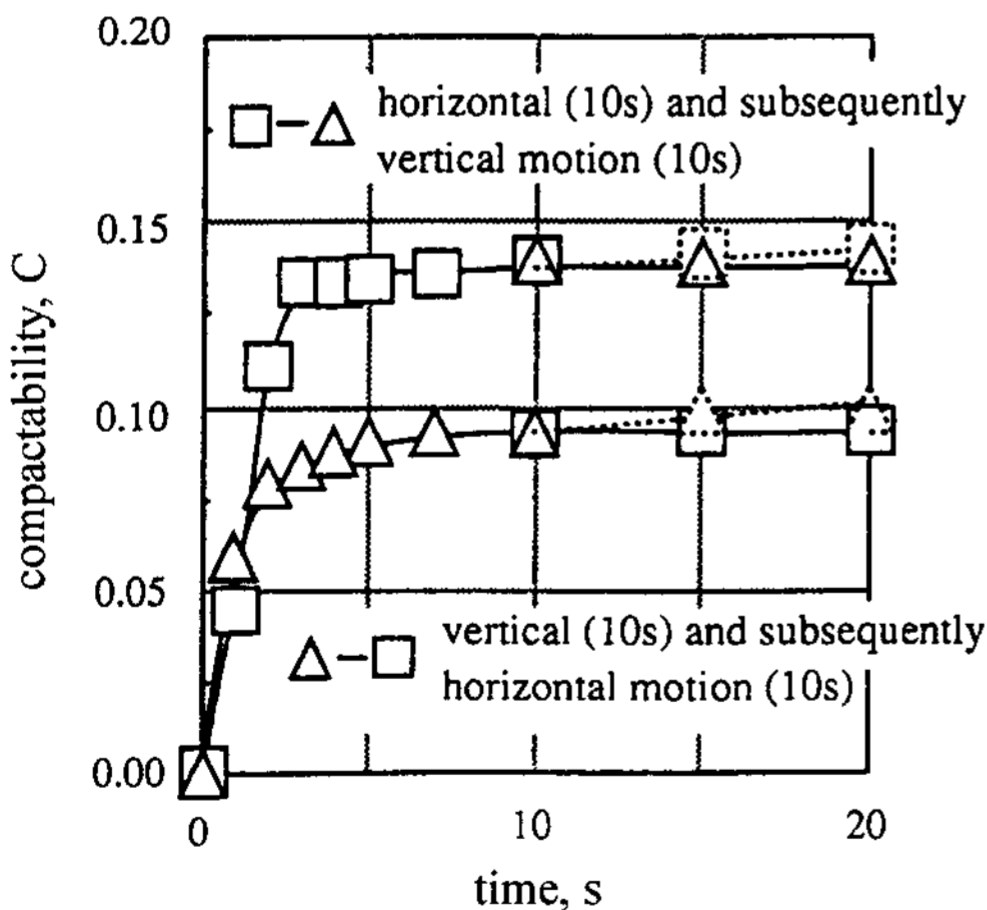


Fig. 7. Volume change behavior resulting from vibration with successive change in vibration direction.

Table 3. Effect of successive change in vibration direction on compactability constants.

| | a | b | ab/4 |
|------------------------------|-------|-----|-------|
| Vertical → Horizontal motion | 0.095 | 2.7 | 0.065 |
| Horizontal → Vertical motion | 0.14 | 1.7 | 0.061 |

5. 수평중공부의 모래 유입성에 미치는 진동의 영향

대형제품의 조형에 적합한 가진조건과 주물사의 성상을 알아보기 위해 각종 주물사와 진동형태에 따른

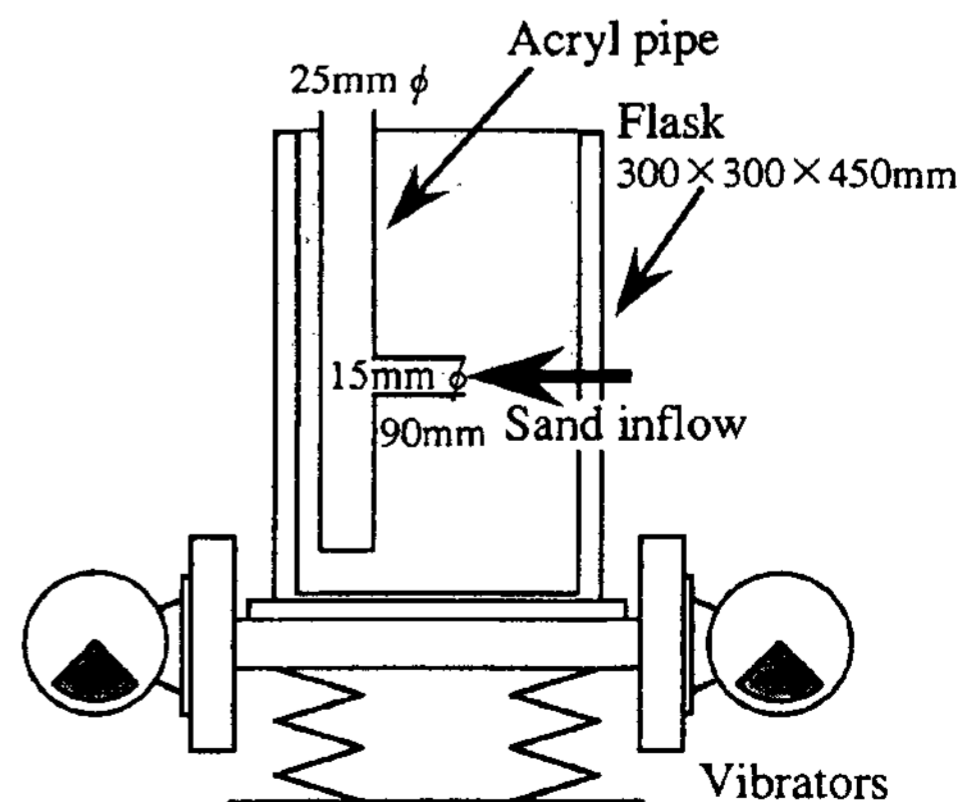


Fig. 8. Method of measuring the filling rate in the vibrated sand.

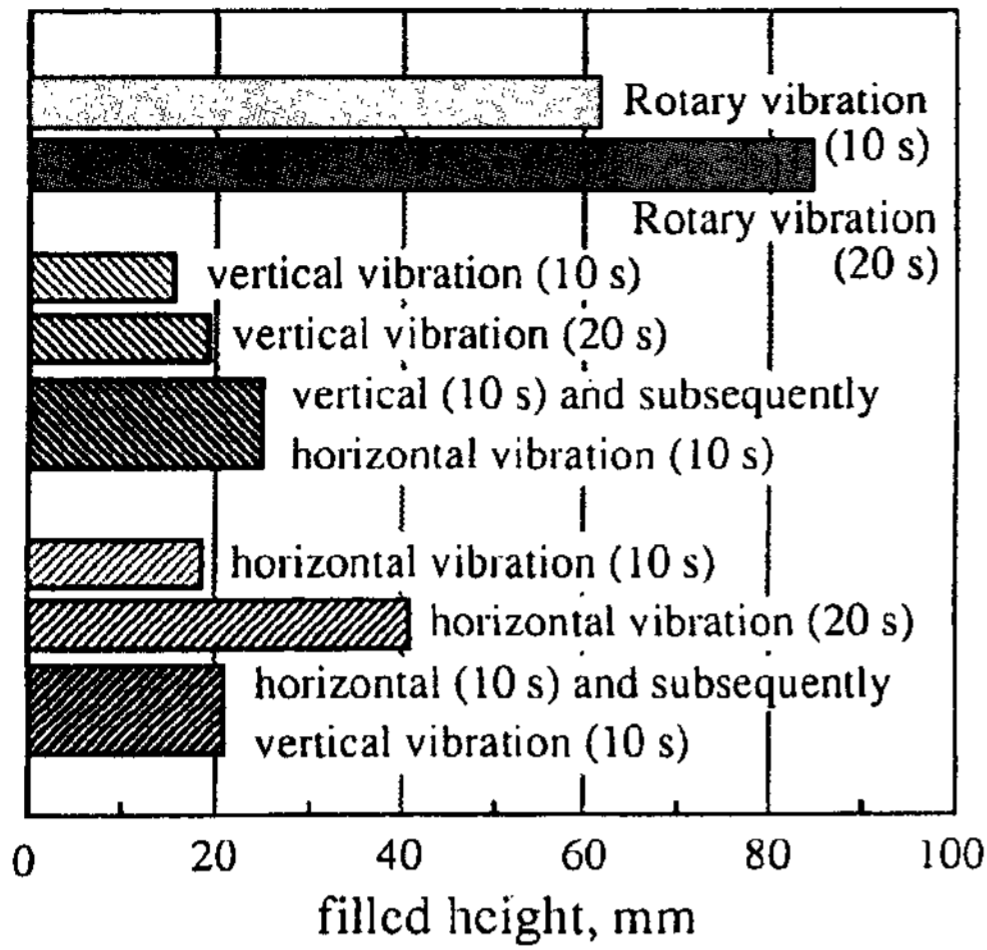


Fig. 9. Effect of successive change in vibration direction on filling.

수평중공에 대한 주물사의 유입성을 조사하였다.

유입성은 그림 8과 같이 자연충전상태로 있는 플라스크 내의 주물사 중에 매설한 수평중공(내경 15 mm, 길이 90 mm)을 가진 T자형 아크릴 파이프에 유입된 주물사의 양에 따라 평가하였다.

가진시간은 10초 및 20초로 하였다.

그림 9는 각종 진동형태에 따른 수평중공으로의 주물사의 유입성을 나타낸 것이다. 1축진동에서의 주물사의 유입량은 수직진동보다도 수평진동이 우수하다. 수직1축진동의 경우, 10초와 20초에서의 유입량을 비교하면, 초반 10초까지의 전반기에 집중되어있는데, 이는 주물사 압력의 수직방향성분 P_z 에 대한 수평방향성분 P_x 의 비율(P_x/P_z)로서 개략적으로 표현된 사립체계수 $K[(1 - \sin\phi_s)/(1 + \sin\phi_s)]$ 가 진동개시직후에 급격히 작아지기 때문이다. 즉, 진동 개시로부터 2, 3초 사이의 주물사의 침강충전과정에서는 사립체의 공극률이 큰 상태로 급격한 진동유동이 발생하고 주물사의 내부마찰계수는 작다. 현저한 침강과정을 거친 후에는 공극률이 작아져서 1.0G를 조금 넘는 정도의 진동으로는 주물사의 진동유동이 일어나지 않고 진동 중에도 주물사는 다져진 상태로 내부마찰계수가 비교적 큰 값으로 된다.

그림 10은 내용적이 300×300×450 mm인 투명한 아크릴 상자형 플라스크 내에 자연충전된 주물사의 진동충전에 의한 침하 압축한계와 진동가속도의 관계를 나타낸 것이다. 침하압축한계의 평가는 주물사 층의 최

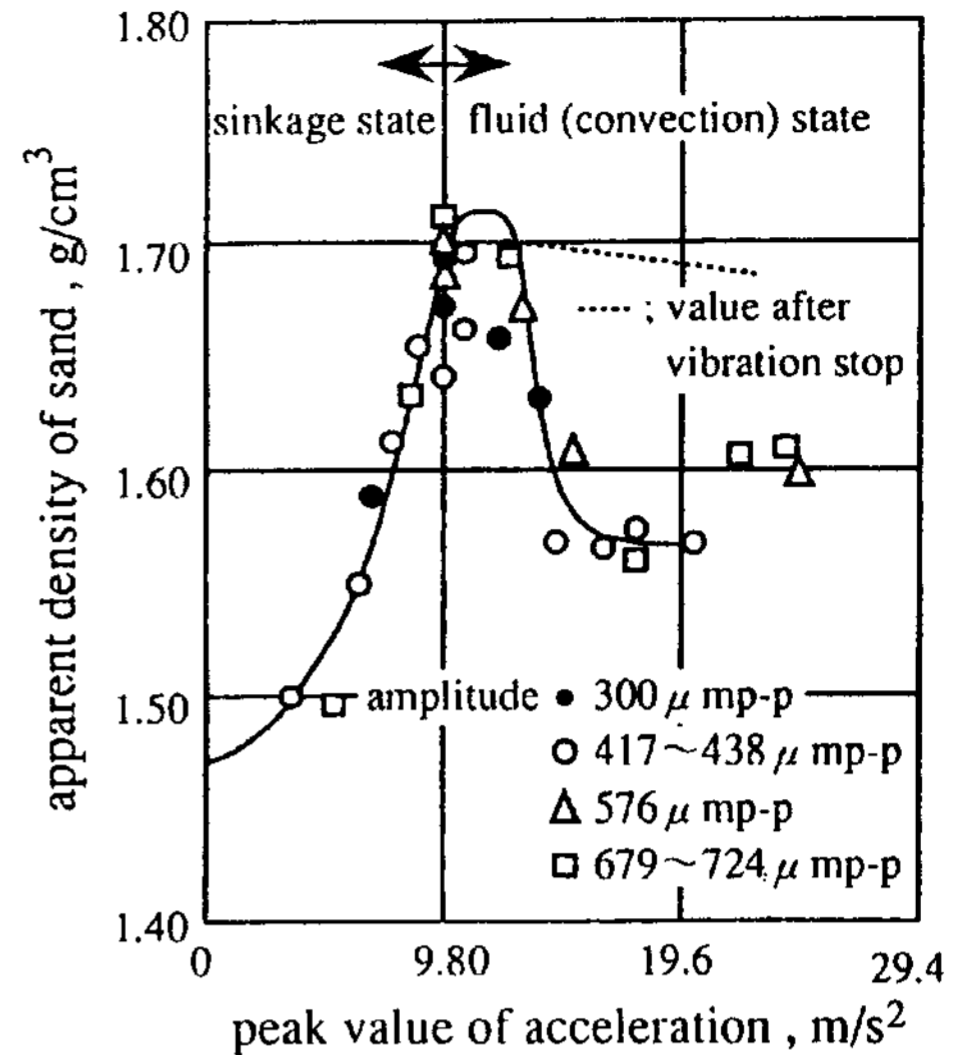


Fig. 10. Relationship between apparent density of sand and peak value of acceleration.

종 겉보기 밀도로 하였다. 가속도가 1G 부근까지의 영역에서의 침하압축한계는 가속도의 증가와 더불어 급격히 향상되고 있다. 여기에서 1G 부근을 넘으면 모래 입자사이의 충돌현상이 발생하기 때문에 사립체는 느슨한 형태가 되고 체적이 팽창하는 동시에 전체적으로 유동화된다. 사립체의 유동은 2, 3초간의 침강충전과정 직후에 일어나서 벽면 부근이 강하하고 중앙부에서 상승하는 대류형태를 나타낸다. 진동에 의한 모래의 유입성에 미치는 영향인자로서는 진동수송작용과 동시에 사립의 수평성분에 의한 압입효과도 중요한 것으로 알려져 있다.

따라서 수평중공에 대한 모래의 유입성이 도중에 나빠지는 것은 내부마찰계수의 증가에 수반하는 P_x/P_z 의 감소가 사립 P_x 의 저하를 이끌어서 사립의 수평성분에 따른 압입효과가 저감하기 때문이다. 한편, 수평진동의 경우, 수평성분사압 P_x 가 사립체계수 K 보다 직접적으로 수평방향의 진동가속도나 진동에 큰 영향을 받기 때문에 모래의 유입성이 정상적으로 양호한 상태를 유지하는 것으로 생각되어진다.

한편, 진동방향을 도중에 바꾸는 경우에는 컴팩터빌리티 특성의 경우와 같은 양상을 보인다. 원진동에 대해서도 컴팩터빌리티 특성의 경우와 마찬가지로 여타의 진동법에 비해 특히 우수한 유입성을 보인다. 따라서, 원진동과 같은 다축 동시 진동의 적용효과가 큰 것을 알 수 있다.

6. 결 론

회전진동기를 다른 진동 형식들과 비교할 때 다음과 같은 결론을 얻었다.

한쌍의 편심회전중추를 이용해 회전진동을 얻을 수 있었다. 공진에 의한 과진동이나 진동모양이 주기적으로 찌그러지는 현상을 타이밍 벨트를 이용하여 두 회전중추를 강제로 동기화 함으로서 줄일수 있었다. 또한 양 중추의 위상차를 90°로 유지함으로서 롤링현상을 최소화 할 수 있었다.

회전진동기구를 수평진동 또는 수직진동, 수평수직 교대변화진동과 비교하였다.

충전성능을 평가한 결과 동일한 진동강도에 대해 회

전진동은 수직진동에 비해 월등히 나았고 수평진동에 비해서는 다소 나은 결과를 보였다.

수평중공부의 모래 유입성 평가에서도 충전성과 유사한 결과를 보였다.

후 기

이 자료는 1999년 10월 4일부터 10월 7일까지 한 일기술협력사업의 일환으로 생산기술연구원이 주관하여 우리나라 주물업체가 일본 오사카 지방의 소실모형 주조공장을 견학한 후 원진동 이론의 발명자인 오사카 부립대학의 池永明 教授가 제공한 자료를 정리한 것이다.