

# 진동수응답함수 측정에 따른 펌프 가진력 산정

## Estimation of Pump Induced Vibration Force by Frequency Response Function

노병철\*

Lho, Byeong Cheol

### 국문요약

본 연구는 두 지점간의 진동수 응답함수를 이용하여 시간 및 진동수 영역에서의 원심펌프(20Hp, 50Hp) 가진력을 추정하기 위한 것이다. 진동수 응답함수는 실수부와 허수부에 대한 신호정보를 가지고 있으며, 응답함수 역시 실수부와 허수부에 대한 신호정보를 가지고 있다. 따라서 이들 진동수 응답함수 및 응답함수의 복소수 계산으로부터 가진력을 실험적으로 구하였으며, 이론적인 방법에 의하여 구한 가진력과 실험적으로 구한 값을 비교함으로써 펌프에 의한 주진동수 성분의 크기는 펌프 및 모터중량의 10~25% 정도가 됨을 제시하였다. 가진력 산정을 위한 시간영역에서의 불평형질량의 크기는 펌프 및 모터중량의 약 30~60%임을 알 수 있었다. 한편, 펌프회전에 의한 진동은 주진동수 이외에도 주진동수의 2~3배의 크기를 갖는 성분이 있음을 알 수 있었으며, 대상 콘크리트 슬래브의 고유진동수와의 가진진동수 비를 달리함에 따라 정확한 진동전달률을 조절하는데 활용할 수 있다.

**주요어** : 펌프가진력, 진동수 응답함수, 응답함수, 진동수 영역

### ABSTRACT

This is a study to estimate the pump induced vibration in time and frequency domain by frequency response function between two points in case of 20hp and 50hp centrifugal pumps. The frequency response function has real and imaginary information of signals, and response function has also real and imaginary information. So the vibration force can be obtained from the response function and frequency response function by complex calculation. And it is compared with the theoretically estimated values and it is suggested that the amplitude of vibration with main frequency is about 10~25% of pump and motor weight, and the magnitude of unbalanced mass is about 30~60% of pump and motor weight to estimate vibration force in time domain. There are the other kinds of vibration components with different frequency values of 2~3 times of its main frequency, and these kinds of information are used to control the tuning ratio between operating frequency of pump and structural frequency of concrete slab.

**Key words** : pump induced vibration, frequency response function, response function, frequency domain

## 1. 서 론

구조물에 과도하거나 불필요한 진동이 발생되고 있을 경우, 피해정도에 따라 진동원으로 부터 진동전달매체 및 수신체에 이르는 진동 전달 경로를 대상으로 적절한 진동제어기법을 적용할 필요가 있다. 예를 들면, 발전소 터어빈

이 설치되는 하부구조에서부터 펌프류와 같은 회전기기가 설치되는 건물내부의 콘크리트 슬래브 등과 같은 경우에는 진동원에 대한 방진 개념의 도입이 주로 이용되고 있다. 이를 위해서는 구조물의 동특성을 개선하거나 가진입력을 저감시키는 기술을 통하여 구조물의 진동 제어를 실시하게 된다. 진동제어를 위해서는 진동성분이 주요 관심대상이 되므로, 입력가진과 계의 응답을 진동수별로 구분함으로써 진동에 대한 물리적 감각을 향상시킬 필요성이

\* 상지대학교 토목공학과 조교수

본 논문에 대한 토의를 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

있다. 한편, 진동제어측면에서도 계의 고유진동수와 가진력 진동수간의 공진현상을 회피하는 것이 바람직하므로 진동수영역에서의 분석이 필요하다.<sup>(1)</sup> 더욱이 일정 입력가진에 대한 구조물의 응답을 구함으로써 변화된 계에 대한 응답예측을 가능하게 하는 정량화된 실험방법이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 슬래브는 물론 건물내부에서의 펌프에 의한 진동을 저감하기 위하여 방진가대와 콘크리트 슬래브간의 진동수응답함수와 펌프에 의한 진동응답을 측정하고, 이들이 가지고 있는 복소수 정보로부터 미지의 가진력을 시간 영역에서는 물론 진동수영역에서 제시함으로써 정확한 진동제어 자료로 활용할 수 있도록 하며, 펌프 가진력에 대한 본 연구에서의 예측 범위를 제시하고자 한다.

## 2. FFT분석기를 이용한 신호처리 및 계의 분석

### 2.1 Fourier 해석<sup>(2)</sup>

Fourier 급수는 임의의 주기함수를 무한개의 정현파 및 여현파 함수의 급수로 나타낸 것으로, Fourier 급수 및 Fourier 해석은 수학 및 공학분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 즉, 함수  $F(t)$ 의 Fourier 급수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 계수  $a_0$ ,  $a_n$  및  $b_n$ 은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\bar{\omega}t + b_n \sin n\bar{\omega}t) \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) \cos n\bar{\omega}t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) \sin n\bar{\omega}t dt \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\omega}$  ; 회전 각속도(rad/sec)

식 (1)에 나타난 삼각함수 형태의 Fourier

급수를 Euler 방정식을 이용하여 지수형으로 바꾸면 식 (3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-in\bar{\omega}t} + c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n^* e^{in\bar{\omega}t} \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\bar{\omega}t} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $c_0 = a_0$

$$c_n = (a_n - ib_n)/2, \quad c_n^* = (a_n + ib_n)/2$$

식 (2)에서  $a_0$ 는 주기함수  $F(t)$ 의 평균을 나타내며, 이는 별도로 취급할 수 있으므로 차후에 고려한다. 또한 실제 측정값은 양의 진동수 항으로 이루어지므로 식 (3)은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F(t) &= Re \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{in\bar{\omega}t} \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (C_n e^{in\bar{\omega}t} + C_n e^{-in\bar{\omega}t}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $Re$  : 실수부

식 (4)에서  $C_n$ 은 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{2} \left( \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) (\cos n\bar{\omega}t - i \sin n\bar{\omega}t) dt \right) \\ &= \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} F(t) e^{-in\bar{\omega}t} dt \end{aligned} \quad (5)$$

Fourier 급수의 계수를 진동수  $\omega_n$ 에 대하여 도시하면, 결과는 불연속선의 나열로 되며, 이를 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)이라고 하며, 일반적으로  $|C_n| = |2c_n| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ 과  $\varphi = \tan^{-1}(b_n/a_n)$ 의 위상을 도시하게 된다.

### 2.2 신호처리 및 계의 분석

시간영역에서의 계의 입력신호 및 출력신호는 신호의 복합적인 성질 때문에 계의 거동을 이해하거나 해석하는데 어려운 점이 있다. 따라서 진동수영역에서의 공진현상을

보면서 이해하는 것이 바람직하다. 따라서 2 채널 FFT분석기를 이용하여 진동수영역에서 계의 진동수응답함수를 서술하기 위하여 파워 스펙트럼(power spectrum)이나 상호상관 특성(cross properties)을 분석할 필요가 있다. 진동수 응답함수의 일반적인 정의는 식 (6)과 같으며, 입력신호 A(t)의 Fourier변환과 출력신호 B(t)의 Fourier변환은 식 (7)과 같다.

$$\text{전달함수} = \frac{\text{출력함수}}{\text{입력가진력}} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F[A(t)] &= S_A(i\omega) = a + ib \\ F[B(t)] &= S_B(i\omega) = c + id \end{aligned} \quad (7)$$

그러므로 입력과 출력에 대한 평균 파워 스펙트럼(averaged power spectrum)은 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} G_{AA}(\omega) &= S_A(i\omega)S_A(i\omega)^* = (a + ib)(a - ib) \\ \overline{G_{AA}(\omega)} &= \overline{a^2 + b^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G_{BB}(\omega) &= S_B(i\omega) \cdot S_B(i\omega)^* = (c + id)(c - id) \\ \overline{G_{BB}(\omega)} &= \overline{c^2 + d^2} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8) 및 식 (9)에 의한 값은 위상에 대한 정보를 갖지 못한다. 그러나, 두 신호의 인과 관계를 적절히 이용하면, 식 (10) 및 식 (11)과 같이 상호상관특성을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{BA}(\omega) &= S_B(i\omega) \cdot S_A(i\omega)^* = (c + id)(a - ib) \\ \overline{G_{BA}(\omega)} &= \overline{(ac + bd) + i(ad - bc)} \\ &= \text{Re } G_{BA}(\omega) + i \text{Imag } G_{BA}(\omega) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \frac{\text{Imag } G_{BA}(\omega)}{\text{Re } G_{BA}(\omega)} \quad (11)$$

입력신호 A에 대한 출력신호 B의 크로스

스펙트럼(cross spectrum)과 위상은 2채널 상호상관특성 측정에 있어서 가장 중요한 것이다. 이 함수들은 응답신호 B에서의 상호출력관계를 나타내며, 입력신호 A와 안정된 위상관계가 있음을 나타낸다. 안정된 위상관계를 가지고, 실수 및 허수성분은 상호간 성질의 향상을 위하여 평균화되어야 한다.

실험대상이 되는 계에 대한 응답스펙트럼 크기의 변화를 결정하기 위하여 진동수응답함수를 측정함으로써 계의 입력에 대한 출력특성을 구하여야 한다. 이러한 진동수응답함수는 식 (12)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} TF_{MAG} = H(\omega) &= \frac{S_B(i\omega)}{S_A(i\omega)} \\ &= \frac{S_B(i\omega) \cdot S_A(i\omega)^*}{S_A(i\omega) \cdot S_A(i\omega)^*} \\ &= \frac{S_B(i\omega) \cdot S_B(i\omega)^*}{S_A(i\omega) \cdot S_B(i\omega)^*} \\ H(\omega) &= \frac{\overline{G_{BA}(\omega)}}{\overline{G_{AA}(\omega)}} = \frac{\overline{G_{BB}(\omega)}}{\overline{G_{AB}(\omega)}} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 분자의 크로스 스펙트럼은 입력 파워 스펙트럼으로 정규화 되거나 분자의 파워 스펙트럼이 입력 크로스 스펙트럼으로 정규화됨을 나타내고 있으며, 결과는 입력 파워 스펙트럼에 대한 출력 파워 스펙트럼의 단순한 비(반대의 경우도 성립)로서 전달률(transmissibility)과 비교되는 진동수응답함수가 된다. 식 (12)의  $H(\omega)$ 는 실험대상인 계의 진동수응답함수이며 선형적이다. 또한 이 진동수응답함수의 위상스펙트럼은 식 (11)에 나타낸 바와 같다.

그러나 이러한 일관성 있는 진동수응답함수는 어떤 진동수 또는 진동수영역에 대한 충분한 정보를 제공하지 못하는 경우가 종종 있으므로 입력신호와 출력신호간의 상관정도를 알아야 한다. 이러한 입력신호와 출력신호간의 상관정도의 척도는 기여도함수(coherence)를 이용하여 판단하였다.

### 3. 펌프 가진력의 산정

#### 3.1 이론적 접근방법에 의한 펌프 가진력

이론적 접근방법에 의한 펌프 가진력은 펌프 제작시 발생하는 불평형질량( $m$ )이 회전축으로부터 떨어진 거리( $e$ )에서 회전함에 따라 회전각속도( $\omega$ )의 제곱에 비례하는 원심력을 유발함에 따라, 펌프에 의한 가진력  $F$ 는 식 (13)에 의하여 구할 수 있다.

$$F = me\omega^2 \quad (13)$$

불평형질량의 크기는 제작사에서 제시하는 하나 가진력을 구할 수 있을 정도로 정확하게 제시되지는 않으며, 출고시 제시된 편심값의 정확도는 물론 장기간 사용 후에는 그 값이 일반적으로 증가하므로 이로부터 가진력을 정확히 산정하는 것은 무리가 있다.

한편, VDI(verein deutscher ingenieure)<sup>(3)</sup>에서 제시한 방법에 따르면 평형정도(balancing grade)를 회전기기 및 장비에 따라 구분하고 식 (14)를 이용하여 가진력을 산정하도록 제시한 바 있으나, 정밀해석을 위한 가진력을 산정할 수 있을 정도로 Q값을 세분화하지 않고 등급화 한 것으로 판단된다.

$$\begin{aligned} F &= m(e\omega)\omega \\ &= \frac{W}{g} Q\omega \\ &= \frac{W}{g} Q(2\pi f) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, Q : VDI의 평형정도에 따른 값 (mm/s)

W : 불평형중량 (kgf)

g : 중력가속도 ( $mm/s^2$ )

또 다른 방법 중의 하나는 다소의 이론 및 경험적인 방법을 통하여 펌프의 회전수로 펌프중량의 9%~30%정도의 크기로 가진하고 있다고 가정<sup>(4)</sup>하여 가진력을 산정하는 것으로 engineering 설계차원에서는 활용 가능하지만, 정밀한 진동해석을 하기 위해서는 충분히 상세

하지 못한 입력 자료라 판단된다.

#### 3.2 실험적 접근 방법에 의한 펌프 가진력

모드실험을 위한 구조물의 가진방법은 여러 가지가 있으며, 본 연구에서는 충격햄머에 의한 충격시험기법을 이용하였다. 충격햄머 시험의 유용성은 가진에너지가 정현파 가진력의 경우처럼 특정진동수대에 있는 것이 아니라, 가용진동수 영역내에 연속적으로 분포해 있다는 점이며, 이러한 충격력은 가용진동수 범위 내에서 구조물의 고유진동수 부근의 증폭현상을 충분히 발생시킬 수 있으며, 가진방법이 비교적 간편하다는 장점이 있다. 충격햄머의 동적특성은 구조물을 가진시키는 선형충격량의 크기에 따라 충격력의 크기와 가용진동수범위가 결정되며, 일반적으로 가진진동수 범위는 햄머의 질량에 반비례하고 팁의 경도에 비례한다. 따라서 햄머의 질량과 팁의 경도에 따라 충격력의 크기가 좌우되므로, 본 연구에서는 건물내부의 진동에 대한 영향을 주로 고려하여 관심 진동수영역을 100Hz이하의 진동수로 선정하고, 매우 무른 팁과 무게가 비교적 큰 충격햄머를 이용하여 큰 에너지를 갖는 저진동수의 가진을 입력가진력으로 사용하였다.<sup>(5)</sup>

만약, 펌프근처와 콘크리트 바닥 슬래브간의 전달함수를 알 수 있다면, 일정 두 점간의 전달함수의 유일성에 근거하여 미지의 가진력을 구할 수 있을 것이다. 두 점간의 전달함수를 측정하기 위하여 펌프근처의 지정된 지점에 충격햄머로 진동을 주고, 이때 바닥 콘크리트 슬래브상의 지정된 지점에서의 가속도를 측정함으로써 지정된 두 점간의 전달함수를 구할 수 있다. 따라서 가진력은 식 (15)에 나타낸 바와 같이 기지의 가진력에 대한 진동가속도를 측정하여 구한 accelerance와 현재 발생되고 있는 진동가속도의 함수로 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$R = H \cdot F \quad (15)$$

여기서,  $F$  : 가진력

$H$  : 전달함수

$R$  : 진동 가속도응답

식 (15)의 변수는 진동수영역에서의 값이며, 복소수로 나타내어져야 한다. 즉, 충격hammer에 의한 가진력은 진동수영역에서  $F = a + ib$ 로 나타낼 수 있다. 50Hp 펌프의 시간영역 및 진동수영역에서의 가속도응답 예는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같으며, 이는  $R = c + id$ 로 나타낼 수 있다. Fig. 3은 충격hammer로 50Hp 펌프 근처를 가진하고 바닥 콘크리트 슬래브에서의 진동 가속도응답으로부터 구한 전달함수의 실수 및 허수부에 대한 예이다.

그러므로 이들간의 전달함수는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H &= \frac{a+ib}{c+id} \\
 &= \frac{(a+ib) \times (c-id)}{(c+id) \times (c-id)} \\
 &= \frac{(ac+bd)}{(c^2+d^2)} + i \frac{(bc-ad)}{(c^2+d^2)} \\
 &= A + iB
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

한편, 펌프 가동중에 대한 바닥 콘크리트 슬래브의 지정점에서 측정한 가속도 응답을  $R' = c' + id'$ 이라 하고, 이때의 구하고자 하는 미지의 펌프 가진력을  $F' = a' + ib'$ 이라 한다면,  $F'$ 은 식 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$F' = \frac{R'}{H}
 \tag{17}$$

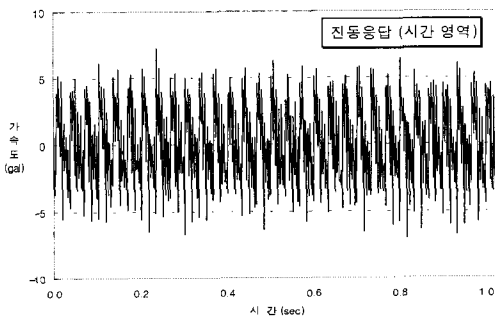


Fig. 1 Response in time domain (50Hp)

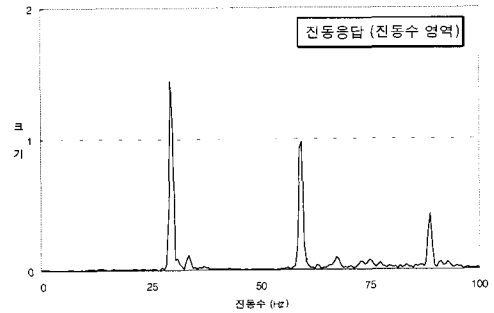
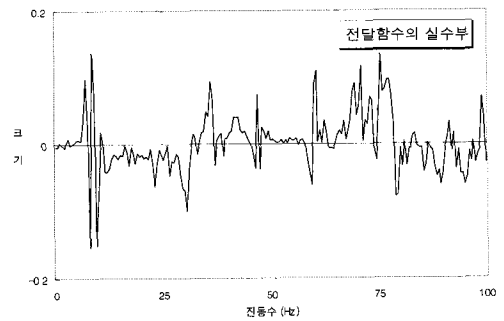
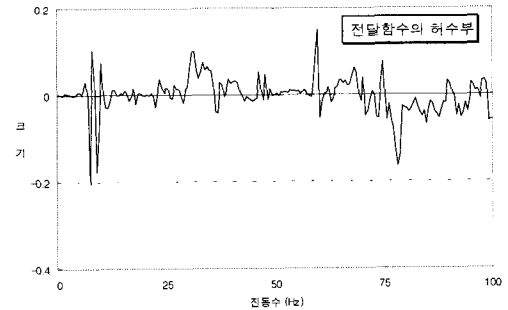


Fig. 2 Response in frequency domain (50Hp)



a) Real part of transfer function



b) Imaginary part of transfer function

Fig. 3 Real and imaginary part of transfer function (50Hp)

식 (17)에서  $H$ 는 식 (16)으로부터 이미 구한 기지의 값이므로, 미지의 가진력(펌프에 의한 가진력)의 진동수 성분은 식 (18)과 같이 정리할 수 있다.

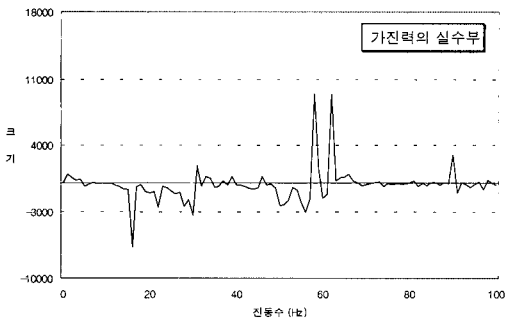
$$F = \frac{(c' + id')}{A + iB}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{(c'A+d'B)}{(A^2+B^2)} + i \frac{(c'B-d'A)}{(A^2+B^2)} \\
 &= C + iD \tag{18}
 \end{aligned}$$

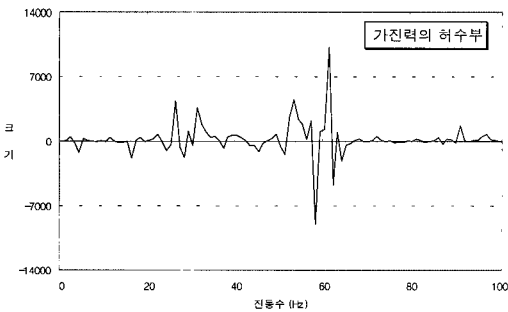
식 (18)에 나타낸 가진력 성분은 진동수 영역에서 표현된 것으로, 진동수에 따른 크기 ( $\sqrt{C^2+D^2}$ ) 및 위상각( $\theta = \tan^{-1} \frac{D}{C}$ ) 정보를 가지고 있게 된다.

한편, 이를 역 FFT하면 시간영역에서의 가진력 성분으로도 환산할 수 있다. Fig. 4 및 Fig. 5는 각각 50Hp 및 20 Hp펌프에 의한 가진력의 실수부 및 허수부를 나타낸 것이다.

한편, Fig. 6 및 Fig. 7은 Fig. 4 및 Fig. 5의 결과로부터 최종적으로 구한 실험적 가진력을 진동수 및 시간영역에서 나타낸 것이다.

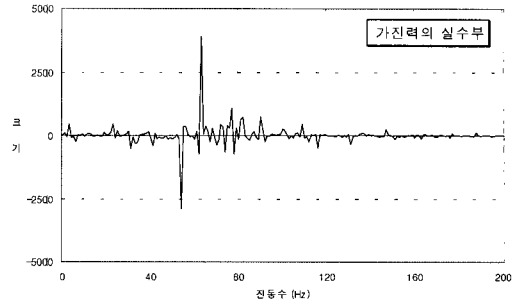


(a) Real part of force

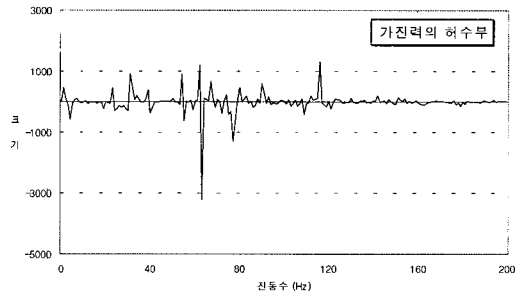


(b) Imaginary part of force

Fig. 4 Real and imaginary part of force (50Hp)

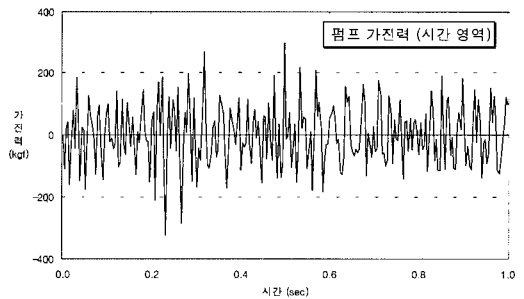


(a) Real part of force

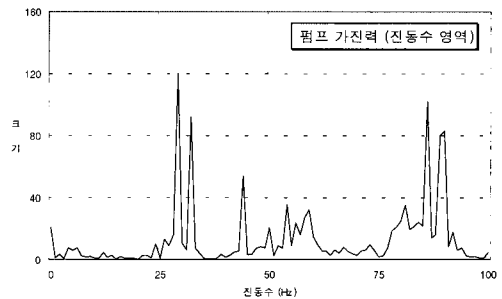


(b) Imaginary part of force

Fig. 5 Real and imaginary part of force (20Hp)

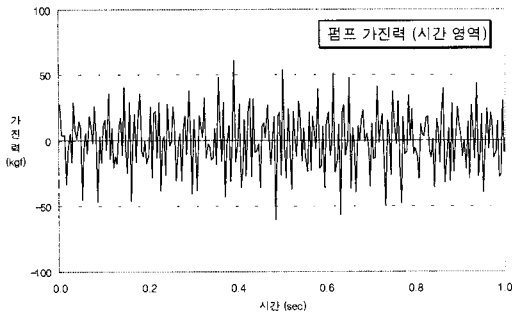


(a) Time domain

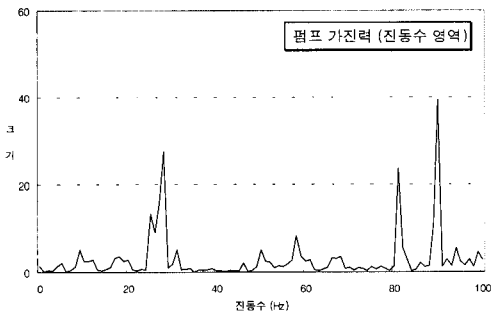


(b) Frequency domain

Fig. 6 Pump induced vibration (50Hp)



(a) Time domain



(b) Frequency domain

Fig. 7 Pump induced vibration (20Hp)

#### 4. 비교 및 분석

Fig. 6 및 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 시간 영역에서의 50Hp 펌프의 가진력은 290kgf~323kgf 정도 발생하며, 20Hp 펌프의 가진력은 36kgf~61kgf 정도 발생하는 것으로 분석된다. 또한 50Hp의 경우 진동수 영역에서 가진력은 29.5Hz일 때 120kgf, 59.0Hz일 때 32kgf, 89.0 Hz일 때 102kgf가 비교적 크게 작용하며, 20Hp의 경우 29.5Hz일 때 28kgf, 59.0Hz일 때 8kgf, 89.0Hz일 때 39kgf가 작용함을 알 수 있다. 한편, 펌프 가진력은 여러 종류의 가진 성분이 있으나 펌프의 주회전수 성분과, 축정렬불량(misalignment), 베어링, 날개수 및 헐거움(looseness)에 기인한 2~3배의 진동수성분을 갖는 가진원도 영향력이 있음을 알 수 있다.

Table 1 에는 국내에서 생산되고 있는 펌프 용량에 따른 이론적 가진력을 전술한 방법에 의하여 구한 것이다.

Fig. 8은 Table 1을 도시한 것으로 가진력 산출방법에 따라 큰 편차가 있음을 알 수 있으며, 평형등급개념을 이용하여 산정한 값은 일반적으로 사용되어 왔던 펌프중량의 9%~30% 사이의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Pump induced vibration (theoretical)

내용 종류 (Hp)	진동수 (Hz)	가진력의 크기(kgf)			펌프 중량 kgf
		평형등급 개념이용	펌프 중량의 9%	펌프 중량의 30%	
150	29.5	218.5	167.0	556.8	1,856
100	29.5	100.1	76.5	255.0	850
75	29.5	74.7	57.2	242.5	808
50	29.5	64.8	49.5	165.0	550
25	29.5	48.3	36.9	123.0	410
20	29.5	33.0	25.2	84.0	280
10	29.5	30.0	23.0	76.5	255

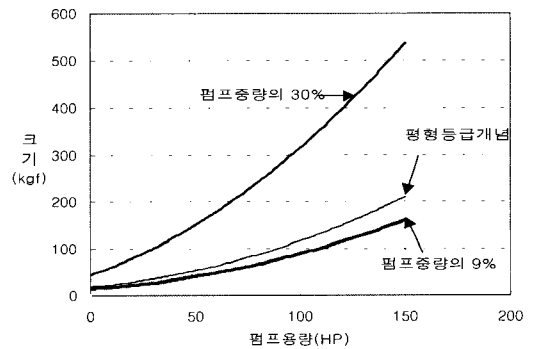


Fig. 8 Pump induced vibration by several methods

Table 2는 본 연구에서 측정한 50Hp의 펌프의 가진력을 기존의 이론적 방법에 의하여 도출한 값과 비교한 것이다.

Table 2는 본 연구에 의한 가진력 산정법이 기존의 방법과는 다른 가진력이 존재함을 나타내고 있다. 물론 이들 가진력 사이에

는 각자의 위상각을 가지기 때문에 펌프가 가진력은 나타난 값들의 단순한 산술합이 되지 않는 것이라 사료된다.

Fig. 9 및 10은 50Hp 및 20Hp 펌프에 대하여 본 연구에서 실험적으로 산정한 진동가진

력 성분중 몇 개의 중요성분(모터 회전수, 회전수의 2~3배 진동수)이 동일 위상각 차로 가진된 가상의 경우, 모터의 회전수를 기준으로 하여 이론적 방법에 의하여 산정된 가진력 및 실험적으로 산정된 가진력 성분을 시간영역으로 역 FFT 하여 산정한 가진력의 차이를 펌프 용량별로 비교한 것이다.

즉, 펌프에 의한 가진력은 주요 3~4개의 진동수 성분이 동일 위상각을 가지고 가진된다고 보아도 큰 무리가 없으며, 개략적인 계산을 위한 가진력산정을 위한 개략식은 펌프 중량의 10~25%정도를 가진력이 모터의 주진동수에 관계하여 진동하고, 이에 배수되는 진동수 성분은 약 2~15% 정도까지 추가로 고려하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 이는 시간영역에서의 가진력 값은 펌프의 제작기술, 중량 및 노후정도 등에 따라 편차가 있으나 펌프 및 모터중량의 30~60% 수준이 됨을 알 수 있다. 따라서 시간영역에서의 분석을 위해서는 시간영역으로 역 FFT한 자료를 활용하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다. 평형등급 개념을 이용할 경우 Q의 값이 6.3mm/s이라 가정하면 펌프 중량의 12%정도가 진동발생에 기여함을 알 수 있다. 그러나 이 방법도 펌프의 분당회전수만의 함수로 표시되므로, 가진력의 진동수를 고려한 진동제어를 위해서는 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 정확한 진동제어를 위한 상세한 가진력의 산정을 위해서는 본 연구에서 제안한 전달함수개념을 이용한 산정방법을 사용하는 것이 바람직하다.

Table 2 Comparison of pump induced vibration (크기 : kgf)

내용 용량 (Hp)	본 연구						기 존 방 법			
	가진력1		가진력2		가진력3		진동수 (Hz)	크 기		
	진동수 (Hz)	크기	진동수 (Hz)	크기	진동수 (Hz)	크기		평형등급 개념	펌프중량 9%	펌프중량 30%
20	29.5	28	59.0	8	90.0	39	29.5	33	25	84
50	29.5	120	59.0	32	86.0	102	29.5	65	50	166

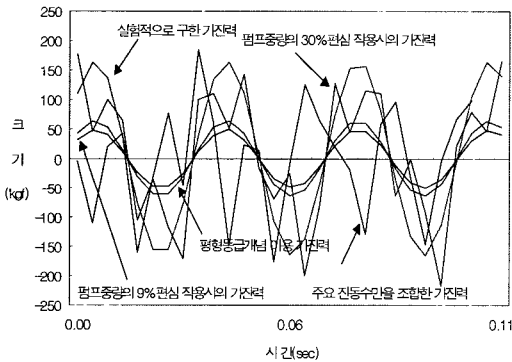


Fig. 9 Comparison of pump induced vibration (time domain, 50Hp)

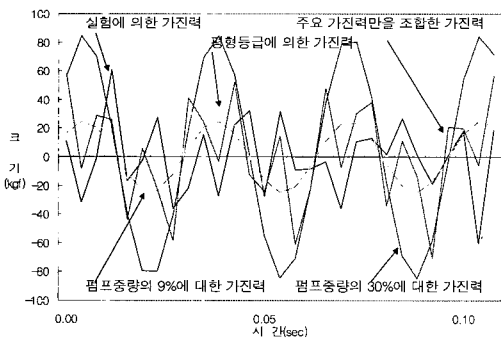


Fig. 10 Comparison of pump induced vibration (time domain, 20 Hp)

## 5. 결 론

펌프가 건물내의 콘크리트 슬래브에 가하는 가진력을 시간 및 진동수영역에서 구하였다. 가진력은 펌프중량의 10~25%정도를 가진력이 모터의 주진동수에 관계하여 발생하고, 이에 배수되는 진동수 성분을 약 2~15% 정도까지 추가로 고려하는 것이 바람직한 것



으로 판단된다. 펌프 가진력의 진동수성분은 펌프의 회전수 이외에도 회전수에 2~3배가 되는 가진성분이 작용하고 있음을 실험적으로 구명하였다.

한편, 이론적인 방법과 실험적인 방법에 의하여 가진력을 구하여, 이론적인 방법으로 구한 값과 실험값과를 비교하여 실험적으로 구한 값의 타당성을 입증하였다. 향후 토목구조물에 가해지는 가진력에 대한 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 상지대학교의 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 小野介嗣, 精密防振ハンドブック, フジテクノシステム(株), 1987, pp. 80~472.
2. Randall, R. B., *Frequency Analysis*, Brüel & Kjær, Sept. 1987, pp. 11~15.
3. VDI, "Criteria for assessment of mechanical vibration," VDI 2056, Peter Peregrinus Ltd., 1966, pp. 1~5.
4. 유니슨, "Pump 설치방법의 결정", 유니슨 기술연구소, 1994, pp. 1~7.
5. 변근주, 노병철, 이현주, "전달함수법에 의한 콘크리트슬래브의 동특성 해석", 1993년 학술 발표회 개요집(I), 1993, pp. 87~90.
6. Ewins, D. J., "Modal testing : theory and practice," Research Studies Press Ltd., 1984, pp. 1~264.