

〈論 文〉

탑재장비 동적특성 및 고체음 세기의 간접 측정

Indirect Measurement of Dynamic Characteristic and Structureborne Sound Source Level for Installed Machine

김 상 현* · 정 의 봉**

Sang-Hyeon Kim and Weui-Bong Jeong

(1996년 6월 12일 접수 ; 1996년 10월 10일 심사완료)

Key Words : Structureborne Sound(고체음), Free Acceleration(자유가속도), Mobility(모빌리티), Indirect Measurement(간접 측정)

ABSTRACT

Machines installed in various structures emit airborne sound and structureborne sound and are major source of noise and vibration. Especially when machines are installed upon a flexible foundation, most of noise and vibration are due to transmission of structureborne sound. Therefore, characterization and measurement of structureborne sound source level are necessary for controlling noise and vibration. But structureborne sound from vibrating machine is strongly coupled to the supporting structure. This paper proposes the method of estimating the supporting structure's dynamic characteristic and structureborne sound source level for machine installed system without separating the machine, resilient mount and foundation.

1. 서 론

자동차, 선박, 비행기 등의 수송기구나 건물 등에 설치되는 장비는 공기음(airborne sound)과 고체음(structureborne sound)을 발생시킨다. 특히 선박이나 건물과 같이 다수의 구역을 갖는 대형구조물의 경우, 대부분의 소음 및 진동은 해당 구역내에 소음원인 장비가 위치하는 경우를 제외하고는 주로 인접 구역의 장비 작동에 의한 고체음 성분의 전달에 기인한다. 따라서 장비로 인한 구조물의 제반 소음 및 진동을 최소화 하거나 혹은 이를 예측 및 해석하기 위해서는 저소음 장비의 선정과 함께 고체음의 발생 및 전달에 대한 해석이 요구되며, 일차적으로는 소음원으로 작용하는 장비의 고체음 세기에 대한 측정 및 이의 평가가 필요하다⁽¹⁾.

장비의 고체음은 장비 내부의 다양한 불평형력에 의하여 발생하고, 자체의 고유한 전달경로를 거쳐 탄성마운트 혹은 파이프 등 구조물과의 연결점을 통하여 인접 구조물로 전달된다. 따라서, 고체음 전달로 발생하는 제반 소음 및 진동을 고려할 때, 장비의 고체음 세기는 장비 내부의 전달경로를 포함한 구체적인 진동 세기보다는 구조물과의 연결된 부위를 각각의 점 진동원(point vibration source)으로 취급하고 그 점에서의 진동 세기를 장비의 고체음 세기로 나타내며, 장비로부터의 고체음 전달은 탄성마운트를 통한 기초(foundation)로의 전달이 가장 지배적이므로 장비 지지점(foot) 각각에서의 진동 세기를 장비의 고체음 세기로 간주한다⁽²⁾. 그러나 장비 지지점에서의 고체음 세기는 공기음과는 달리 탄성마운트의 임피던스(impedance)나 장비 지지점 및 기초의 모빌리티(mobility)와 같은 연결 구조물의 동적특성에 크게 영향을 받는다⁽³⁾. 그러므로 고체음 세기에 대한 측정대상 물리량이나 측정방법에 대한 표준화된 국제적 기준은 제시되지 못하고 있으나⁽²⁾,

*정회원, 국방과학연구소 해상시험장

**정회원, 부산대학교 정밀기계공학과

2. 동적특성의 간접 측정

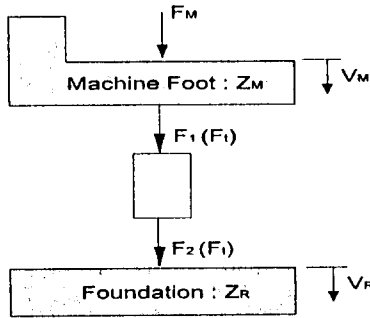


Fig. 1 Exciting of machine foot

기존의 제시된 대부분의 규정은 장비의 고체음 세기를 장비가 탑재되기 전, 지지 구조물을 이상화한 측정 조건에서 장비 지지점에서의 자유가속도(free acceleration) 크기로써 나타내고 있다⁽⁴⁾. 그러나 기존의 탑재된 장비를 대상으로 고체음 세기를 측정 및 평가하거나, 고체음 전달에 의한 과도한 소음 및 진동이 발생하여 그 원인을 해석하기 위해서는 장비 뿐만 아니라 탄성마운트나 기초와 같은 연결 구조물의 동적특성이 함께 측정되어야 한다⁽⁵⁾. 이를 위해서는 장비, 탄성마운트, 기초에 대한 개별적인 동적특성의 측정이 요구되나, 이는 현실적으로 많은 비용과 시간이 소요됨에 따라 장비가 탑재된 상태에서 지지 구조물의 동적특성 및 장비의 고체음 크기를 측정할 수 있는 방법이 요구된다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 유연한 기초위에 탄성마운트로 지지되어 있는 장비에 대하여 장비, 탄성마운트, 기초를 분리하지 않고 장비 지지점과 기초의 모빌리티를 간접적으로 측정하고 이를 이용하여 탑재상태에서 측정된 장비 지지점 및 기초에서의 가속도로써 장비의 자유가속도를 추정할 수 있는 방법을 제시하였다. 여기서, 탄성마운트를 통하여 기초로 전달되는 장비의 고체음은 수직 방향의 힘 및 속도에 의해 지배적이며, 기초에 보강재(stiffener) 등이 설치되었을 경우 기초의 전달 모빌리티(transfer mobility)에 비해 구동점 모빌리티(driving point mobility)가 매우 크다는 가정^(7, 8) 하에 각각의 독립적인 탄성마운트에 대하여 수직방향의 자유가속도, 장비지지점 및 기초의 구동점 모빌리티를 고려한다. 이때 탑재장비로 인한 고체음 전달은 수직방향의 장비 지지점 및 기초의 구동점 모빌리티를 이용하여 해석할 수 있다^(9, 10). 또한 시뮬레이션과 소형 발전기를 대상으로 실험을 수행하여 제시된 방법의 유용성과 타당성을 검증하고자 한다.

2.1 모빌리티의 간접 측정 방법

장비 지지점과 기초의 구동점 모빌리티는 각각을 분리하여 독립된 가진시험을 수행함으로써 측정할 수 있으나, 본 연구에서는 장비와 탄성마운트, 기초가 결합된 상태에서 장비 지지점과 기초를 가진한 후 장비 지지점 및 기초에서의 응답을 측정하여, 가진점과 응답점간의 전달함수로써 각각의 구동점 모빌리티를 간접 측정하는 방법을 제안한다.

Fig. 1과 같이 장비 각각의 지지점을 독립된 점 진동원(point vibration source)으로 간주하고 수직방향의 힘과 속도만을 고려하여, 장비 지지점을 힘 F_M 으로 가진하면 가진힘 F_M 과 기초로의 전달힘 F_2 는 다음과 같다.

$$F_2 = Z_R V_R \quad (1)$$

$$F_M = Z_M V_M + F_1 \quad (2)$$

여기서 Z_M 은 장비 지지점의 구동점 임피던스, Z_R 은 기초의 구동점 임피던스이며 V_M 과 V_R 은 장비 지지점 가진시 지지점과 기초에서의 응답 속도이다. 한편, 탄성마운트 양단에서의 힘과 속도는 탄성마운트의 임피던스 특성에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$F_1 = Z_{11} V_M + Z_{12} V_R \quad (3)$$

$$F_2 = Z_{21} V_M + Z_{22} V_R \quad (4)$$

단,

$$Z_{11} : \text{차단 입력 임피던스 } (F_1/V_M, V_R=0)$$

$$Z_{22} : \text{차단 출력 임피던스 } (F_2/V_R, V_M=0)$$

$$Z_{12} : \text{차단 전달 임피던스 } (F_1/V_R, V_M=0)$$

$$Z_{21} : \text{차단 전달 임피던스 } (F_2/V_M, V_R=0)$$

정재파(standing wave)로 인한 탄성마운트의 내부 공진(internal resonance)이 발생되기까지의 주파수 대역에서는 탄성마운트에 대한 각각의 차단 임피던스 및 탄성마운트 양단에서의 힘은 각각 단일의 전달 임피던스 Z_i 와 전달힘 F_i 로써 아래와 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$|Z_{11}| \approx |Z_{22}| \approx |Z_{12}| \approx |Z_{21}| \approx |Z_i| \quad (5)$$

$$F_1 = F_2 = F_i \quad (6)$$

그러므로 장비 지지점 가진시 가진점과 지지점 및 기초의 응답점간의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_M}{F_M} = \left(\frac{1}{Z_M} \right) - \left(\frac{1}{Z_M} \right) \left(\frac{F_i}{F_M} \right) \quad (7)$$

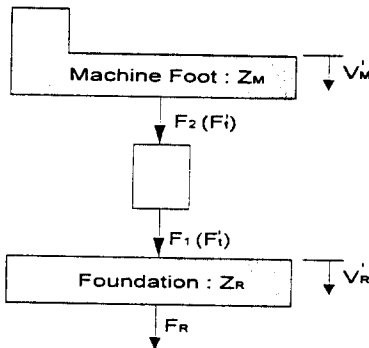


Fig. 2 Exciting of foundation

$$\frac{V_R}{F_M} = \left(\frac{1}{Z_R}\right) \left(\frac{F_i}{F_M}\right) \quad (8)$$

또한 동일한 방법으로 Fig. 2와 같이 장비, 탄성마운트 및 기초가 결합된 상태에서 기초를 가진힘 F_R 로 가진하면 가진힘 F_R 과 장비 지지점으로 전달되는 전달힘 F_i 는

$$F_R = Z_R V_R + F_i \quad (9)$$

$$F_i = Z_M V_M \quad (10)$$

이 되며, 이때 V_R , V_M 및 F_i 는 각각 기초 가진시 기초와 장비 지지점에서의 응답속도 및 장비 지지점에서의 전달힘이다. 따라서 기초 가진시 가진점과 지지점 및 기초의 응답점간의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_R'}{F_M} = \left(\frac{1}{Z_R}\right) - \left(\frac{1}{Z_R}\right) \left(\frac{F_i'}{F_R}\right) \quad (11)$$

$$\frac{V_M'}{F_R} = \left(\frac{1}{Z_R}\right) \left(\frac{F_i'}{F_R}\right) \quad (12)$$

그러므로 기 탑재된 장비를 대상으로 장비 지지점 및 기초를 가진하고 장비 지지점 및 기초에서의 응답 속도를 측정함으로써 식 (7), (8), (11), (12)와 같은 4개의 전달함수를 구할 수 있으며, 이들 4개의

전달 함수를 연립함으로써 장비 지지점과 기초의 동적특성인 구동점 모빌리티(driving point mobility)를 간접측정할 수 있다. 즉, 장비 지지점의 구동점 모빌리티 M_M 과, 기초의 구동점 모빌리티 M_R 은 다음과 같다.

$$M_M = \frac{1}{Z_M} = \frac{\left(\frac{V_M}{F_M}\right) \left(\frac{V_R'}{F_R}\right) - \left(\frac{V_R}{F_M}\right) \left(\frac{V_M'}{F_R}\right)}{\left(\frac{V_R'}{F_R}\right) - \left(\frac{V_R}{F_M}\right)} \quad (13)$$

$$M_R = \frac{1}{Z_R} = \frac{\left(\frac{V_R}{F_M}\right) \left(\frac{V_M'}{F_R}\right) - \left(\frac{V_M}{F_M}\right) \left(\frac{V_R'}{F_R}\right)}{\left(\frac{V_M'}{F_R}\right) - \left(\frac{V_M}{F_M}\right)} \quad (13)$$

단, 이때 모든 속도, 힘 및 모빌리티는 크기와 위상을 갖는 복소진폭(Phasor)이다.

2.2 시뮬레이션

장비 지지점과 기초에 대한 구동점 모빌리티의 간접 측정식에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Fig. 3과 같은 2자유도 모델을 설정하였다. 단, 본 논문에서 제안된 간접 측정방법을 현장에서 적용할 때 가속도의 측정이 측정방법의 단순 및 측정센서의 보편화로 인하여 속도의 측정보다는 편리하기 때문에 구동점 모빌리티를 입력힘 대 응답가속도의 비인 구동점 악세러런스(driving point acceleration)로써 계산하였다. 시뮬레이션 방법은 장비 지지점과 기초로 가정된 질량 M_1 과 M_2 를 가진하고 응답가속도 a_1 , a_2 , a_1' , a_2' 를 계산하여 4개의 전달함수를 구한 후, 이를 이용하여 장비 지지점과 기초가 분리되었을때의 각각의 구동점 악세러런스를 간접 계산하였다. 또한 4개의 전달함수에 0, 5, 10, 15, 20, 25%의 노이즈를 부가하면서 그 결과를 비교하였다.

Table 1은 입력값인 4개의 전달함수에 각각 0, 5, 10, 15, 20, 25%의 노이즈를 부가하면서, 입력 전

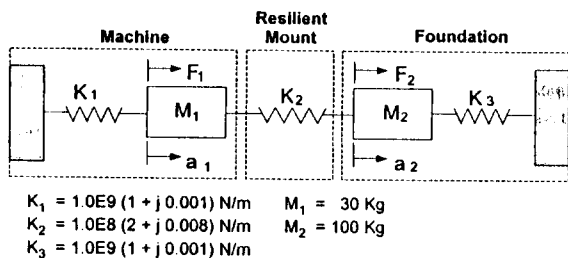


Fig. 3 2-DOF Simulation model

Table 1 Specification of the estimated parameters

Noise (%)	Input transfer function (dB)	Acclerance of machine (dB)	Accelerance of foundation (dB)
0	0.000	0.000	0.000
5	0.355	0.604	0.617
10	0.711	1.080	1.028
15	1.079	1.421	1.376
20	1.441	1.725	1.786
25	1.810	2.131	2.048

달함수 및 장비 지지점과 기초의 구동점 악세러런스의 간접 계산값과 참값과의 오차에 대한 자승근 평균값(RMS)으로서 입력값에 노이즈가 없을시에는 정확하게 참값에 일치하고, 25% 노이즈 부가시 각각 약 2.1dB 및 2.0dB의 값을 나타낸다. 단, 구동점 악세러런스의 간접 측정방법은 장비 지지점과 기초의 악세러런스가 탄성마운트의 악세러런스에 비하여 상대적으로 클 경우 그 발생오차는 현저히 감소하게 되며, 본 시뮬레이션에서는 지지점 및 기초와 탄성마운트의 악세러런스 비를 약 5로 설정하였다. 또한, Fig. 4는 25%의 노이즈 부가시 입력함수의 하나

인 기초 가진시 가진힘 대 장비지지점에서의 응답가속도 비, 전달함수 a_1/F_2 이고, Fig. 5 및 Fig. 6은 입력 전달함수에 25%의 노이즈를 부가한 후 모델의 장비지지점과 기초에 대한 구동점 악세러런스의 간접 계산 결과 및 참값을 나타낸다.

3. 자유가속도 계산

장비의 고체음 세기를 특징짓는 물리량이나 그 측정방법에 대한 표준화된 국제적 기준이 제시되지 못하고 있으나, 장비 고체음 세기에 대한 기존의 제

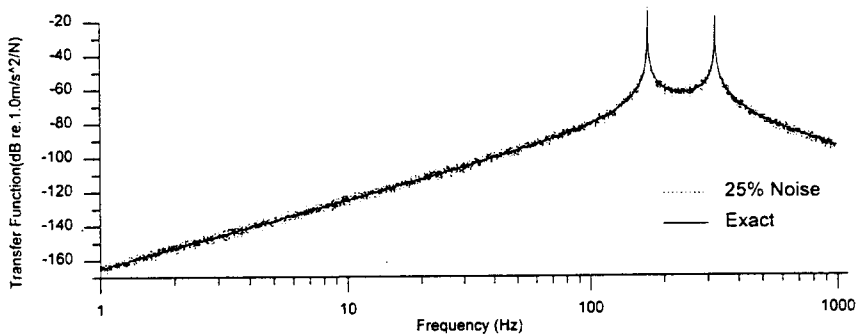


Fig. 4 Input transfer function with 25% noise

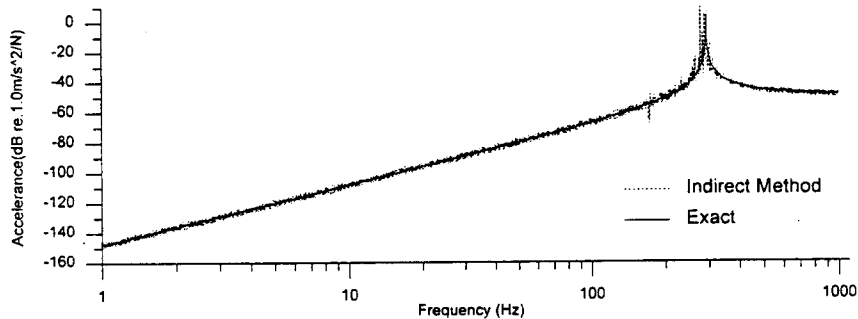


Fig. 5 Accelerance of simulated machine foot by indirect method with 25% noise

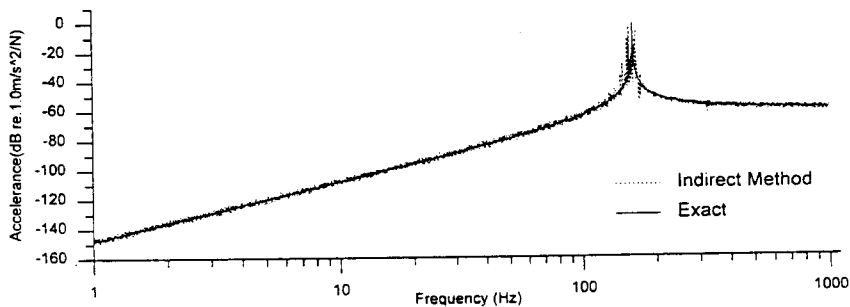


Fig. 6 Accelerance of simulated foundation by indirect method with 25% noise.

시된 대부분의 규정은 장비 지지점에서의 자유가속도를 장비 고체음 세기로 사용하며, 장비 자유가속도는 이상적인 탄성마운트위에 장비가 탑재되었을 때 지지점에서 측정된 가속도이다.

탄성마운트위에 탑재된 장비에 대하여, 지지점에서 측정된 가속도는 장비 지지점, 탄성마운트 및 기초의 동적특성이 복합적으로 작용하여 아래와 같이 나타난다.

$$a_M = \frac{j\omega \cdot F_M}{Z_M + Z_I / \left(1 + \frac{Z_I}{Z_R}\right)} \quad (15)$$

여기서, a_M 은 설치된 장비의 지지점에서 측정된 가속도이고 F_M 은 장비의 가진힘이며, Z_M , Z_I 및 Z_R 은 각각 장비 지지점의 구동점 임피던스, 탄성마운트의 전달 임피던스 및 기초의 구동점 임피던스이다. 이때 이상적인 탄성마운트란 탄성마운트의 전달 임피던스가 장비지지점 및 기초의 구동점 임피던스보다 상대적으로 매우 작음을 의미하며, 이러한 임피던스 조건으로부터 장비 지지점에서의 자유가속도란 지지 구조물로 부터의 반력(reaction force)이 상대적으로 작은 특별한 탑재조건에서 측정된 가속도임을 알 수 있다. 그러므로 일반적인 탑재상태에서 장비 자유가속도는 장비지지점에서 측정된 가속도로부터 지지구조물로부터의 반력에 의한 가속도 영향을 고려함으로써 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$a_{sf} = a_M + F_r \cdot A_M \quad (16)$$

단, 여기서 a_{sf} 는 자유가속도이고 A_M 은 장비지지점의 구동점 약세러런스이며, F_r 은 지지구조물로부터의 반력으로서 기초의 구동점 약세러런스, A_R 과 기초에서 측정된 가속도, a_R 로써 계산할 수 있다. 즉,

$$F_r = \frac{a_R}{A_R} \quad (17)$$

따라서 장비의 자유가속도는 다음과 같이 계산할 수

있다.

$$a_{sf} = a_M + a_R \cdot \frac{A_M}{A_R} \quad (18)$$

4. 실험 및 결과 고찰

1기통 4행정 기관을 탑재한 정격출력 10마력, 중량 260kg의 발전기를 대상으로 탑재계를 구성하여 실험을 하였다. 실험 방법은 우선, 발전기 지지점과 기초의 구동점 약세러런스를 간접적으로 측정하기 위하여 발전기 탑재상태에서 임팩트 햄머(impact hammer)를 사용하여 지지점과 기초를 가진하였으며, 지지점 가진시 지지점과 기초에서의 응답가속도, 기초 가진시 지지점과 기초에서의 응답가속도로서 4개의 전달함수를 측정하였다. 또한 자유가속도의 간접 측정을 위하여 발전기를 정상 운전시킨 상태에서 발전기 지지점과 기초에서 각각 가속도를 측정하였다. 마지막으로, 제시한 동적특성 및 자유가속도의 간접 측정방법에 대한 유용성을 검증하기 위하여 발전기를 탄성마운트와 분리한 후 지지점과 기초의 구동점 약세러런스를 직접 측정하였으며, 나일론 로프를 사용하여 발전기를 크레인에 매단 상태에서, 탑재 상태에서와 동일한 운전조건에 대하여 자유가속도를 직접 측정하였다.

Fig. 7과 Fig. 8에서는 발전기 지지점 및 기초의 구동점 약세러런스에 대하여 탑재된 상태에서 간접 측정한 값과 발전기 분리 후 동일 지점에서 직접 측정한 값을 비교하였다. 10Hz에서 3000Hz까지의 두 값의 차이에 대한 자승근 평균은 발전기 지지점의 경우 약 6.1dB, 기초의 경우 약 9.9dB로서 본 연구에서 제시한 간접 측정방법으로써 장비 지지점과 기초에 대한 동적특성의 개략적인 측정이 가능함을 알 수 있으며, 발생된 차이는 지지점 및 기초의 가진시 임팩트 햄머를 사용함으로써 가진력이 미약하여 탑

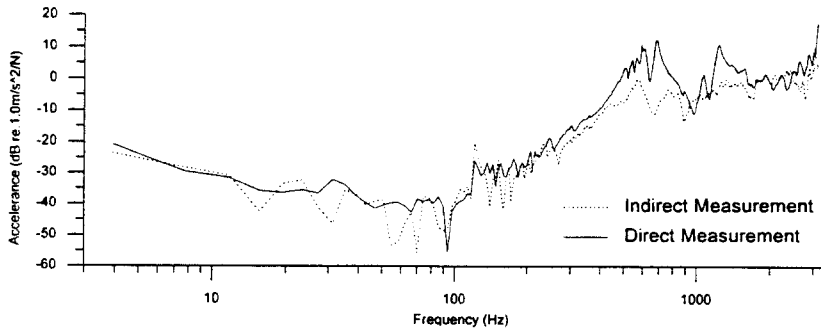


Fig. 7 Driving point acceleration of generator foot

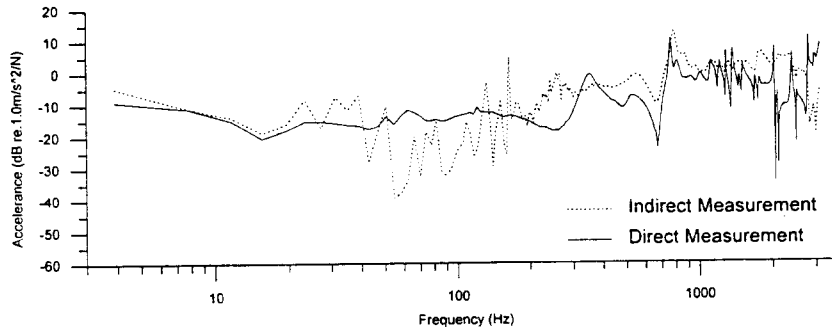


Fig. 8 Driving point acceleration of foundation

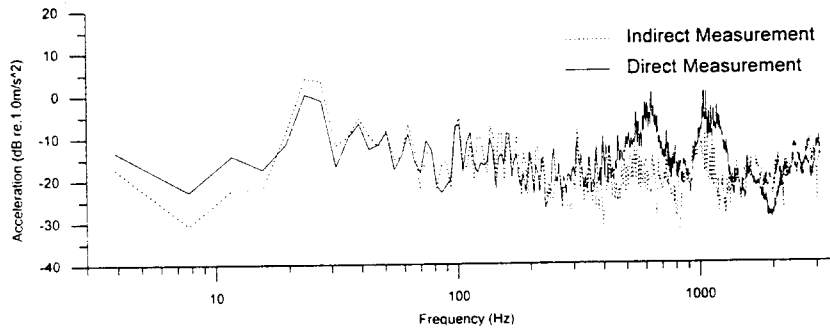


Fig. 9 Free acceleration at generator foot

재상태에서 측정된 전달함수에 구조물 동적특성이 충분히 나타나지 못한 데 원인이 있다. 또한 Fig. 9는 간접 측정으로 구해진 지지점 및 기초의 구동점 악세러런스와 탑재상태에서 지지점 및 기초에서 측정된 가속도를 이용하여 계산한 자유가속도를 장비 분리후 직접 측정한 자유가속도와 비교한 그림이다. 10Hz에서 3000Hz까지의 발생 오차에 대한 자승근 평균은 약 6.7dB이며, 600 및 1000Hz 부근에서의 오차는 발전기에 설치되어 있는 탄성마운트가 관통 볼트에 의하여 양단이 구속되는 방식으로 체결되어 있어 이로 인한 비선형 특성이 나타난 데 그 원인이 있다.

5. 결 론

장비, 탄성마운트, 기초로 구성되는 탑재체에 대하여 탑재된 상태에서 가진시험을 통하여 전달함수를 측정하고, 이를 이용하여 장비 지지점과 기초의 동적특성인 구동점 악세러런스 및 고체음 세기인 장비 자유가속도를 간접 측정할 수 있는 방법을 제시하였으며, 시뮬레이션 및 발전기를 대상으로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제시한 간접 측정방법의 타당성을 확인하였으며, 실제 현장 적용시 측정이 신뢰성 있게 수행될 경우 제시된 방법으로써 장비지지점 및 기초의 동적특성과 장비의 자유가속도에 대한 개략적인 측정이 가능하다.

(2) 탑재상태에서 장비, 지지구조물의 동적특성을 간접측정하고 장비의 고체음 세기를 계산함으로써 장비 진동 수준의 평가 및 고체음 전달에 대한 해석이 가능하다.

(3) 가진시험시 관심 주파수 대역에서의 구조물 진동특성이 충분히 측정될 수 있는 가진장치의 선정이 중요하며, 다점 지지된 장비에서 기초의 진동 전달점간 진동 차단이 충분하지 못할 경우 전달 임피던스에 의한 진동 전달점간 연동을 고려할 수 있는 측정방법의 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) T. Kihlma, 1978, "Urgent Need for Structure-Borne Sound Source Data," Proceedings Inter-Noise 78, pp. 343~347.
- (2) T. ten Wolde, and G. R. Gadefelt, 1987, "Devel-

- opment of Standard Measurement Methods for Structureborne Sound Emission," Noise Control Engineering Journal, Vol. 28, No. 1, pp. 5~14.
- (3) B. M. Gibbs, B. Petersson, and S. Qiu, 1991, "The Characterization of Structure-borne Emission of Building Services Machinery Using the Source Descriptor Concept," Noise Control Engineering Journal, Vol. 37, No. 2, pp. 53~61.
- (4) 한국선급, 1991, "선박진동·소음제어지침".
- (5) J. M. Mondot, and B. Petersson, 1987, "Characterization of Structure-Borne Sound Sources: The Source Descriptor and The Coupling Function," Journal of Sound and Vibration, Vol. 114, No. 3, pp. 507~518.
- (6) T. ten Wolde, 1986, "Measurement of Structure-Borne Sound Source Strength with a Reciprocal Substitution Method," Proceedings Inter-Noise 86, pp. 1033~1038.
- (7) A. T. Moorhouse, and B. M. Gibbs, 1993, "Prediction of the Structure-Borne Noise Emission of Machines: Development and Methodology," Journal of Sound and Vibration, Vol. 167, No. 2, pp. 233~237.
- (8) R. J. Pinnington, 1987, "Vibrational Power Transmission to a Seating of a Vibration Isolated Motor," Journal of Sound and Vibration, Vol. 118, No. 3, pp. 513~530.
- (9) A. Granhall, and T. Kihlman, 1980, "The Use of Mechanical Impedance Data in Predicting Vibration Isolation Efficiency," Noise Control Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 88~93.
- (10) T. Kihlman, 1982, "Prediction of Structure-Borne Sound from Source and Foundation Data," Proceedings Inter-Noise 82, pp. 437~440.