

Class-D 증폭기를 사용한 가진기 시스템의 전기적 잡음 감소

윤을재* · 김인식* · 한태균*

Electrical Noise Reduction in the Electromagnetic Shaker System using a Class-D Amplifier

Eul-Jae Yoon* · In-Sik Kim* · Tae-Kyun Han*

ABSTRACT

Operation of an electromagnetic shaker system using a Class-D amplifier may cause unacceptable electromagnetic interference to another electronic system, requiring the user to take whatever steps are necessary to correct the interference. A differential amplifier in a Class-D amplifier is used to decrease the effect of a common-mode noise voltage in a shaker system. To prevent a ground loop, a transformer is inserted in another shaker system. These methods show reduction of the unwanted vibration which has occurred before. A transformer in a charge amplifier was used to prevent a ground loop in a shaker system using a Class-AB amplifier a few years ago, but it was susceptible of noise in a shaker system using a Class-D amplifier. Hence we corrected a ground loop between a charge amplifier and a vibration control/analysis system without a transformer. The usefulness of this approach is illustrated by the results of experiments.

초 록

Class-D 증폭기를 사용하는 가진기 시스템의 운용으로 인하여 다른 전자 시스템에 전자파 장애가 나타날 수 있으며, 이런 경우에 사용자가 이 장애를 해결하기 위하여 필요한 대책을 마련하기를 요구하고 있다. 한 가진기 시스템에서는 공통모드 잡음전압의 효과를 줄이기 위하여 Class-D 증폭기에서 차동증폭기가 사용되었고, 다른 가진기 시스템에서는 접지루프를 막기 위하여 변압기가 삽입되었다. 이 방법들은 이전에 발생하였던 불필요한 진동의 감소를 보여주고 있다. 전하증폭기의 변압기가 접지루프를 방지하기 위하여 Class-AB 증폭기를 사용한 가진기 시스템에서 수 년간 사용되었으나, Class-D 증폭기를 사용하는 가진기 시스템에서 이것은 잡음에 민감하였다. 따라서 전하증폭기와 진동 제어분석 시스템 사이의 접지루프를 변압기를 사용하지 않고 해결하였다. 이 방법의 유용성이 실험결과를 통하여 확인되었다.

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

1. 서 론

장비나 부품이 비행 또는 수송 등 실제환경에서 겪게되는 진동환경에 얼마만큼 견디는지 여부를 확인하고, 예상되는 동적하중에 의한 성능저하나 오동작이 일어나지 않는지 확인하기 위해 환경진동시험 (environmental vibration test)이 수행된다^[1]. 이러한 환경진동시험을 구현하기 위하여 전자기식 가진기(electromagnetic shaker)가 주로 이용되며, 이것은 자장(magnetic field)을 만드는 구조와 움직이는 코일로 구성되어 코일에 흐르는 전류와 자장과의 상호작용에 의하여 힘이 발생한다. 움직이는 코일과 힘을 전달하는 구조를 합쳐서 전기자 (armature)라 부르며, 전기자의 코일에 흐르는 전류를 증폭기(power amplifier)에서 공급한다. Class-D 증폭기의 효율이 좋고, 공냉식 냉각방식이 가능하여 가진기 시스템에서 Class-AB 증폭기가 Class-D 증폭기로 교체되고 있다^[2].

가진기 시스템은 크게 제어분석 시스템, 증폭기, 가진기로 구성되며, 이들이 서로 가까운 위치에 설치되는 편이 좋으나, 가진기에서 발생하는 소음, 폭발물의 진동시험, 등을 고려하여 증폭기와 가진기는 서로 가까운 위치에 설치하고 제어분석 시스템은 이들과 약간 멀리 설치하여 사용하는 것이 일반적이다. 진동시험은 가속도 스펙트럼을 기준스펙트럼과 비교하여 그 차이를 작게하는 형태로 피드백제어를 실시한다. 진동시험 규격의 진동수준이 낮을 때 가진기 시스템의 잡음에 의하여 시험수행이 불가능한 경우가 발생할 수 있으며, 가진기 시스템의 잡음은 제어분석 시스템에서 가진기의 구동신호를 내보내지 않지만, 증폭기로 연결된 케이블을 포함한 증폭기의 전기적 잡음에 의하여 가진기가 실제로 움직여서 발생하는 진동 그리고 가속도를 측정하는 측정기기가 이상적 조건에서 사용되는 것이 아니고 실제로 접하는 환경에서 사용되기 때문에 검출되는 전기적 잡음으로 나눌 수 있다.

외부의 전자기 환경에 민감한 전자장치를 보호하기 위하여 자장의 감소 혹은 자장의 차폐에 대한 관심이 날로 증대되고 있다^{[3][4]}. 본 연구에서 사용한 Class-D 증폭기는 외부의 전자기 환경에 민감한 전자장치를 보호하기 위하여 미국의 FCC(Federal

Communications Commission)의 Class A에 관한 Part 15의 기준을 만족한다. 그럼에도 불구하고 이 증폭기가 주변에 사용하는 기기의 잡음원(noise source)으로 작용하는 경우에는 적절한 대책을 강구하라는 의미를 담고 있다. 산업환경에서 사용되는 기기에 적용되는 Class A의 전도방사와 복사방사의 한계치는 주거환경에서 사용되는 Class B의 한계치보다 높기 때문이다. 여기서 Part 15는 라디오 주파수대 기기들에 적용하는 것으로 9KHz - 3,000GHz 범위를 말한다^[5].

본 연구에서는 가진기 시스템에서 잡음원, 잡음에 민감한 기기, 잡음을 전달하는 결합통로의 3가지 요소를 파악하고, 적절한 전략을 수립하여 잡음문제를 해결하였다. 이 전략은 실험을 통하여 잡음감소 효과가 입증되었으며, 본 연구에서는 잡음 문제에 관한 실제환경의 경계조건이 너무 복잡하기 때문에 정성적 의미에서 시스템 매개변수에 잡음이 어떻게 좌우되는가를 보여 유용한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1 파라데이 법칙

표면적 s 를 갖는 폐곡선 c 에서 자속밀도 \vec{B} 에 의하여 유기된 전압 emf 는 식 (1)과 같고, 이것은 파라데이 법칙의 적분형이다. 여기서 \vec{E} 는 전계의 세기이다. 곡선 c 에 의하여 경계짓는 개곡면 s 를 통과하는 총자속 Φ 는 식 (2)이며, 파라데이 법칙은 식 (3)으로 다시 쓸 수 있다.

$$emf = \oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

$$\Phi = \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

N 번 감은 코일의 경우에 유기된 전압 emf 는 식 (4)로 쓸 수 있다. 이것은 외부회로에 의하여 발생한 자장에 의하여 코일에 잡음전압이 유기됨을 보여 주고 있다.

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

폐곡선이 고정되어 있고 자속밀도가 시간에 따라서 정현파(sinusoidally)로 변화하고, 폐곡선에 균일하게 자속밀도가 분포되었다고 할 때, 유기된 전압 *emf*는 식 (5)로 쓸 수 있다. 여기서, *S*는 폐곡선의 면적이며, *B*는 ω 의 주파수(rad/sec)를 갖고 정현파로 변화하는 자속밀도의 rms 값이며, 이때 *emf*는 유기된 전압의 rms 값을 나타낸다. 유기된 전압 *emf*가 잠음전압을 나타낸다고 할 때, 이것을 줄이기 위하여 *B*, *S* 혹은 $\cos \theta$ 의 값을 줄여야 함을 보여주고 있다.

$$emf = j\omega BS \cos \theta \quad (5)$$

2.2 동축케이블에서 자계결합(magnetic coupling) 해석

중심 도선의 반경이 *a* 이고, 바깥 도선의 반경이 *b* 이며, 길이가 *l* 인 동축케이블에서 바깥 도선에 *I_s* 의 전류가 흐를 때 자속 Φ 는 식 (6)이 되고 단위 길이당 자기인덕턴스(self inductance) *L_s*는 식 (7)에 의하여 식 (8)이 된다. 또한, 바깥 도선과 중심 도선의 상호인덕턴스는 식 (9)가 되어 식(10)에서와 같이 상호인덕턴스(mutual inductance) *M*은 자기인덕턴스와 같아진다.

$$\Phi = \frac{\mu_0 I_s l}{2 \pi} \ln \frac{b}{a} \quad (6)$$

$$L = \frac{\Phi}{I_s} \quad [H] \quad (7)$$

$$L_s = \frac{\mu_0}{2 \pi} \ln \frac{b}{a} \quad [H/m] \quad (8)$$

$$M = \frac{\Phi}{I_s} \quad (9)$$

$$M = L_s \quad (10)$$

Fig. 1의 (a)는 전류 *I₁* 이 동축케이블의 중심 도선에 흐르고 바깥 도선의 양쪽이 접지에 연결된 회로를 보여주고 있다. 동축케이블의 자기인덕턴스,

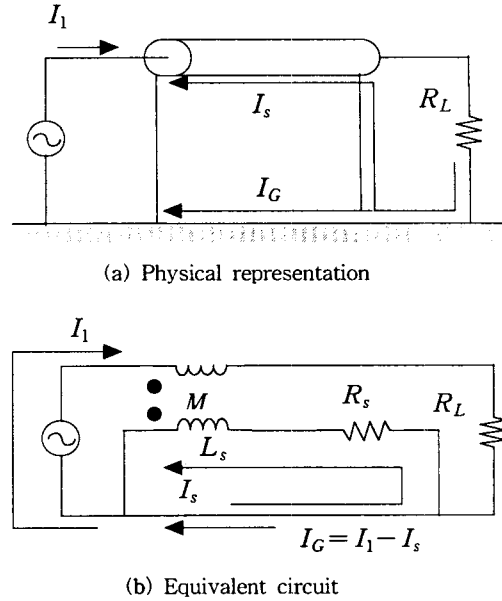


Fig. 1 Division of current between shield and ground plane

상호인덕턴스를 추가하여 (b)의 등가회로를 얻을 수 있다. (b)에서 메쉬 식(mesh equation)을 쓰면 식 (11)을 얻을 수 있다. 식 (10)에서 $M = L_s$ 이므로 바깥 도선에 흐르는 전류는 식 (12)가 되고, 여기서 $\omega_c = \frac{R_s}{L_s}$ 를 쉘드 차단주파수(shield cutoff frequency)라고 한다.

$$I_s(j\omega L_s + R_s) - I_1(j\omega M) = 0 \quad (11)$$

$$I_s = I_1 \left(\frac{j\omega}{j\omega + R_s/L_s} \right) = I_1 \left(\frac{j\omega}{j\omega + \omega_c} \right) \quad (12)$$

식 (12)에서 주파수가 쉘드 차단주파수 보다 훨씬 클 때 ($\omega_c \ll \omega$ 일때) 는 바깥 도선에 대부분의 전류가 흐르지만, 주파수가 쉘드 차단주파수 보다 훨씬 작을 때 ($\omega_c \gg \omega$ 일때) 는 대부분의 전류가 접지선으로 흐르고 바깥 도선에는 거의 전류가 흐르지 않음을 보여주고 있다^[6]. Fig.1에서는 양쪽의 접지전압 차이가 없는 것으로 가정하였으나 접지루프에서 실제로는 접지전압 차이가 존재하여 바깥도선에 전류 *I_s* 가 흐르거나 혹은 다른 회로에 의한 자장

에 의하여 유기된 전압에 의하여 바깥도선에 전류 I_s 가 흐른다. 즉, 접지루프는 비록 접지전압 차이가 없다하더라도 동축케이블의 바깥도선과 접지선에 의하여 폐곡선을 형성하여 잡음전압이 발생하게 된다.

3. 가진기 시스템의 구성

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 가진기 시스템의 개략도를 나타낸 것으로, D300 가진기 시스템, A340 가진기 시스템의 경우에 통제실에서 시험장까지 케이블의 길이는 300m이다. 제어분석 시스템의 출력신호인 구동신호를 증폭기에 전달하는 케이블은 D300 가진기 시스템에서 쉴드 트위스트 페어 (shielded twisted pair) 케이블을 사용하고, A340 가진기 시스템에서 동축케이블을 사용한다. 압전기 가속도계(piezoelectric accelerometer)인 Endevco사의 모델 2221D를 가속도계로 사용하고, B&K사의 Conditioning Amplifier Type 2626을 전하증폭기로 사용하며, 전하증폭기의 출력은 RG58 동축 케이블을 통하여 제어분석 시스템에 전달된다. 통제실의 제어분석 시스템에 공급하는 전원과 시험장의 모든 장비에 공급하는 전원은 별도의 변전실에서 독립적으로 전원을 공급한다. 통제실의 제어분석 시스템과 시험장의 모든 장비의 접지(Protection ground)는 피복접지선에 연결되어 있고 이 접지선은 접지봉에 연결되어 있다.

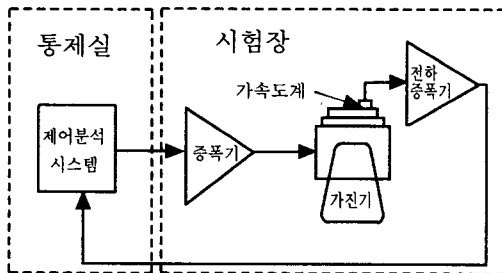


Fig. 2 Blockdiagram of Vibration Test System

D300 가진기 시스템은 9,000 lbf의 정현파 진동시험이 가능한 가진기이며, A340 가진기 시스템은 36,000 lbf의 정현파 진동시험이 가능한 가진

기이다. 가진기에서 허용하는 힘의 한계는 증폭기에서 공급하는 전류와 관련되며, 속도의 한계는 증폭기 출력의 전압과 관련된다. 즉, 2개의 코일에 전류가 흐르면 1개의 코일에 흐르는 전류에 의하여 자속 밀도를 얻을 수 있으며, 식 (13)에 의하여 힘 F 가 발생하고, 자속밀도와 전기자가 움직이는 속도에 의하여 전기자 코일에 식 (14)와 같은 전압 E 가 발생한다.

$$F = K_1 B L I \tag{13}$$

$$E = K_2 B L V \tag{14}$$

여기서, K_1 , K_2 는 상수, B 는 자속밀도, L 은 전기자코일의 길이(코일직경 $\times \pi \times$ 코일의 Turn 수), I 는 전기자에 흐르는 전류, V 는 전기자의 속도를 나타낸다. A340 가진기 시스템의 경우에 증폭기에서 $I_{rms} = 1,230A$ 의 전류를 공급할 때

36,000 lbf의 힘을 발생하며 이 전류를 공급하기 위하여 최대 출력이 288KVA인 증폭기를 사용한다. 가진기 시스템에서 사용하는 증폭기는 대전류 증폭기로서 Class-D 증폭기가 개발되기 이전에는 Class-AB 증폭기를 사용하였다. Class-AB 증폭기는 대략 50%의 효율에서 동작하는 것이 보통이지만, 90% 이상의 효율이 가능한 Class-D 증폭기는 고조파의 생성으로 인하여 이의 해결이 핵심기술로 되어 있다^{[7]-[9]}. Class-AB 증폭기는 효율이 낮기 때문에 열 관리 기술(thermal management techniques)이 필요하여 증폭기 외형의 크기가 커지며, 열을 제거하기 위하여 Heat sink가 사용되었다^[10]. 가진기 시스템에서 사용하였던 Class-AB 증폭기는 인쇄회로 기판 사이에 파이프를 넣어 이 파이프에 증류수를 통과시켜 냉각시켰기 때문에 이에 따른 비용 및 제조원가, 유지보수, 등에서 공냉식의 Class-D 증폭기에 비하여 경쟁력을 상실하게 되었다. 반면에 Class-D 증폭기는 고조파 생성의 문제로 인하여 근본적으로 주변기기의 잡음원이 될 수 있는 특징이 있지만, 미국 FCC의 Class A에 관한 Part 15의 기준을 만족하는 Class-D 증폭기가 가진기 시스템에 사용되고 있다. 이 증폭기는 Class A의 전도방사와 복사방사의 한계치를 만족하기 때

문에 이 증폭기 주변에 사용하는 기기에서 전자파 장애가 발생하면 적절한 대책을 강구하여 문제를 해결하라는 의미를 담고 있다.

제어분석 시스템에서 가진기의 구동신호를 발생하여 증폭기에 전달하면 이 신호의 전압으로부터 증폭기에서 전류를 증폭(voltage to current amplifier)하여 증폭기의 출력에 연결된 전기자 코일에 전류를 흐르게 하여 식 (13)에 의한 힘이 발생하여 가진기는 구동되고, 가속도로부터 가속도계에서 발생한 전하를 전하증폭기에서 전압으로 변환하고 증폭 및 정규화 하여 제어분석 시스템에 보낸다. 압전기 가속도계는 출력 임피던스가 대략 $10^9 \sim 10^{14} \Omega$ 로 잡음에 약하기 때문에 전하증폭기를 가속도계와 가까운 위치에 놓는다. 전하를 전압으로 변환하고 그리고 증폭 및 정규화 하는 전하증폭기의 출력 임피던스는 보통 $20 \sim 30 \Omega$ 이내이다.

본 연구에서 제어분석 시스템(출력 임피던스가 1Ω 미만)의 구동신호는 증폭기의 입력에 연결되어 있지만 별도의 설명이 없으면 구동신호를 내보내지 않는 상태(즉, 가진기의 구동신호는 0V)에서 증폭기의 이득(gain)을 최대로 놓고, 잡음은 가속도계와 전하증폭기를 통하여 Fig. 2의 통제실에서 측정된 것이며, 전하증폭기의 감도는 10mV/G 가 사용되었다. 가속도계를 부착하는 절연 볼트(insulated stud)는 미국 특허번호 2972006을 적용하여 생산된 것이 사용되었으며, 이것은 가속도계의 몸통을 전기적으로 절연시키기 위한 것이다.

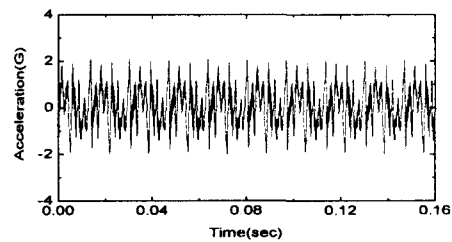
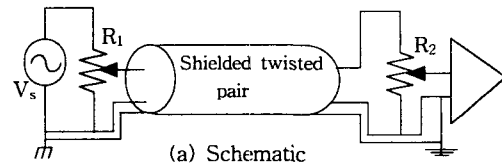
4. 증폭기의 전기적 잡음에 의한 진동

가진기 시스템에서 증폭기는 가진기를 제작한 회사에서 제작한 증폭기를 사용하는 것이 일반적이다. 이는 가진기에서 허용하는 힘과 속도는 증폭기에서 공급하는 전류와 가진기에서 발생하는 전압이 증폭기에서 허용하는 전압과 관계되며, 가진기 시스템에서 사용하는 증폭기는 대전류를 가진기의 전기자 코일에 공급하여 가진을 시키기 때문에 가진기 및 증폭기에 여러 가지 안전장치와 함께 연결되어야 하기 때문이다. 증폭기 제작회사는 증폭기의 설명서에 증폭기의 잡음(hum and noise)수준을 기술하고 있지

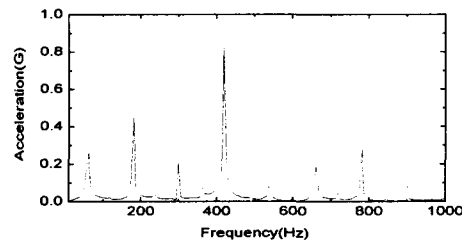
만, 이것은 증폭기의 입력 단자에 0 V(shorted input)를 인가할 때의 잡음수준으로 실제 사용환경이 고려되지 않았다. 제어분석 시스템의 구동신호를 증폭기까지 전달하기 위한 도선의 길이가 길어지면 실제로 잡음수준은 증가하게 되고 그 정도는 잡음신호원(noise source), 도선(cabling), 접지(grounding), 차폐(shielding), 밸런싱(balancing)에 따라서 달라지게 된다.

4.1 D300 가진기 시스템

Fig. 3의 (a)는 D300 가진기 시스템에서 구동신호를 증폭기에 전달하는 개략도를 나타낸 것으로 쉴드 트위스트 페어 케이블이 사용되었으며, V_s 는 제어분석 시스템의 구동신호를 나타내고, R_1 은 통제실의 원격제어 패널에 설치된 증폭기의 이득을 조절하기 위한 $10 \text{ k}\Omega$ 가변저항이며, R_2 는



(b) Noise

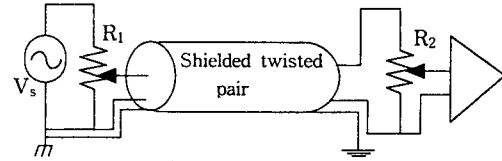


(c) Spectrum

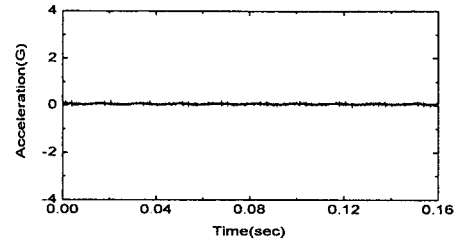
Fig. 3 Grounded source and a single-ended amplifier for D300 shaker system

증폭기에 설치된 10 kΩ 가변저항으로 R_1 과 동일한 목적으로 사용된다. V_s 는 접지에 연결되어 있고 증폭기의 입력단자가 접지에 연결(Single-ended)되어 있으며, 케이블의 쉴드선이 접지에 연결되어 있다. R_2 의 이득을 최대로 놓고 R_1 의 이득을 중간에 놓고 측정한 잡음이 (b)에 나타나 있고, 그 스펙트럼이 (c)에 나타나 있다. (b)의 잡음 수준에서는 전기적 잡음에 의한 가진기의 진동으로 인하여 제어분석 시스템에서 제어가 불가능한 경우가 발생할 뿐만 아니라, 진동시험이 시작되기도 전에 혹은 진동시험이 종료되었다고 생각하고 있는데 불필요한 진동이 가해지게 되어 바람직스럽지 못하다. 그러나, R_1 과 R_2 의 이득을 최대로 놓으면 Fig. 3의 (b)의 잡음수준은 현저하게 감소하여 진동시험을 수행하는데 커다란 지장은 없지만 R_1 의 가변저항을 돌리는 순간에 전기적 잡음에 의한 진동이 발생하며 R_1 의 가변저항을 이용하여 이득을 조절하는 본래의 목적을 상실하게 된다. Fig. 3의 (a)에서 통제실의 접지와 시험장의 증폭기에 연결된 접지는 짧은 도선으로 직접 연결되어 있기 때문에 전압차는 아주 작지만, 접지루프를 고려하지 않은 것이며, R_1 의 중간단자에서 바라본 V_s 의 출력임피던스가 R_1 의 위치에 따라서 크게 달라지기 때문에 Fig. 3의 (b)에서와 같은 잡음이 발생하거나, R_1 과 R_2 의 이득을 최대로 놓으면 잡음수준이 감소하는 것으로 볼 수 있다.

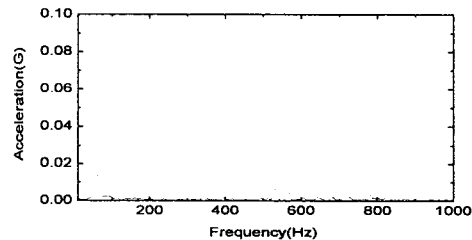
Fig. 4의 (a)는 차동증폭기를 사용한 것으로 R_1 과 R_2 는 Fig. 3의 (b)를 측정한 동일한 조건에서 전기적 잡음에 의하여 발생한 진동을 측정한 것이 Fig. 4의 (b)이며, 그것의 스펙트럼이 Fig. 4의 (c)에 나타나 있다. R_1 과 R_2 의 이득이 달라져도 잡음 수준은 거의 무시할 정도이며, 이는 R_1 의 중간단자에서 바라본 V_s 의 출력임피던스가 R_1 의 위치에 따라서 크게 달라지지만, 접지에서 바라본 증폭기의 입력임피던스가 크기 때문에 밸런스를 이루는데 영향을 주지 못하며, 공통모드에 의한 잡음을 줄이는 효과가 있으며, 접지루프를 형성하지 않기 때문에 바람직한 방법이다.



(a) Schematic



(b) Noise



(c) Spectrum

Fig. 4 Grounded source and a differential amplifier for D300 shaker system

4.2 A340 가진기 시스템

Fig. 5의 (a)와 Fig. 6의 (a)는 A340 가진기 시스템에서 구동신호를 증폭기에 전달하는 개략도를 나타낸 것으로, D300 가진기 시스템과의 차이점은 변압기(isolation transformer)가 사용되었으며 쉴드 트위스트 페어 케이블 대신에 동축케이블이 사용되었다. Fig. 5의 (a)에서 차동증폭기를 사용하고 Fig. 6의 (a)에서 증폭기의 입력단자를 접지에 연결하여 R_1 과 R_2 의 이득은 D300 가진기 시스템에서와 동일한 방법으로 측정한 전기적 잡음에 의한 진동의 수준이 Fig. 5 및 Fig. 6의 (b)에 나타나 있으며, 그 스펙트럼이 Fig. 5 및 Fig. 6의 (c)에 나타나 있다. Fig. 6의 잡음수준이 Fig. 5의 잡음수준에 비하여 확실히 개선되었음을 알 수 있으며, Fig. 5의 (a)에서 변압기와 차동증폭기를 사용하더라도 R_1 과 R_2 의 이득을 최대로 놓으면 전기적 잡

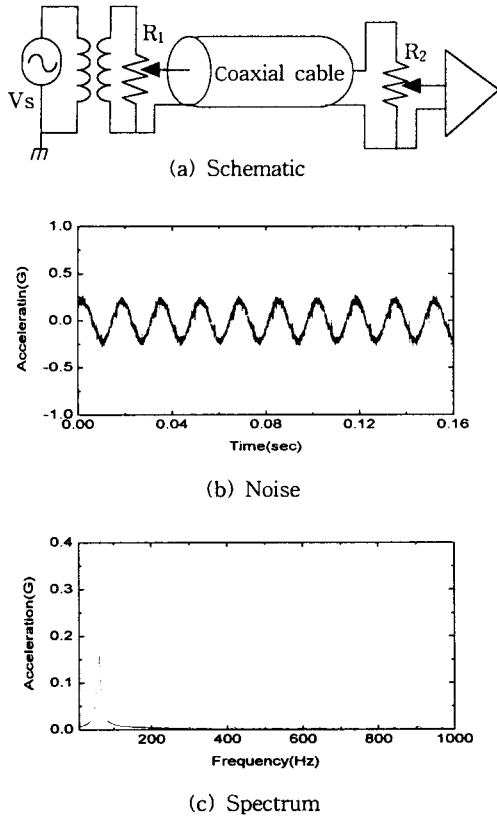


Fig. 5 Grounded source and a differential amplifier for A340 shaker system

음에 의한 진동의 수준이 Fig. 6의 잡음수준 정도의 개선이 확인되었다.

Fig. 6의 (a)에서 V_s 가 접지에 연결되어 있고 증폭기의 입력단자가 접지에 연결되어 있지만 변압기에 의하여 접지루프가 형성되지 않는다. Fig. 5의 (a)에서 변압기에 의하여 접지루프가 차단되어 있음에도 불구하고 단지 V_s 만이 접지에 연결되어 R_2 의 이득을 최대한으로 놓을 때 R_1 의 가변저항의 위치에 따라서 밸런스가 이루어질 때 잡음수준이 개선되지만 그렇지 못할 때 잡음수준이 증가하게 된다. 여기서 밸런스란 두 도선의 잡음이 같아 공통모드 신호가 부하에서 서로 소거되는 것을 말하며, 잡음개선에 쉽게 사용하는 방법이지만 R_1 과 R_2 의 이득을 조절할 필요가 있기 때문에 Fig. 6의 (a)에서 제시한 방법이 바람직하다. A340 가진기 시스템에서는 변압기를 사용하여 접지루프를 차단하기 때문에

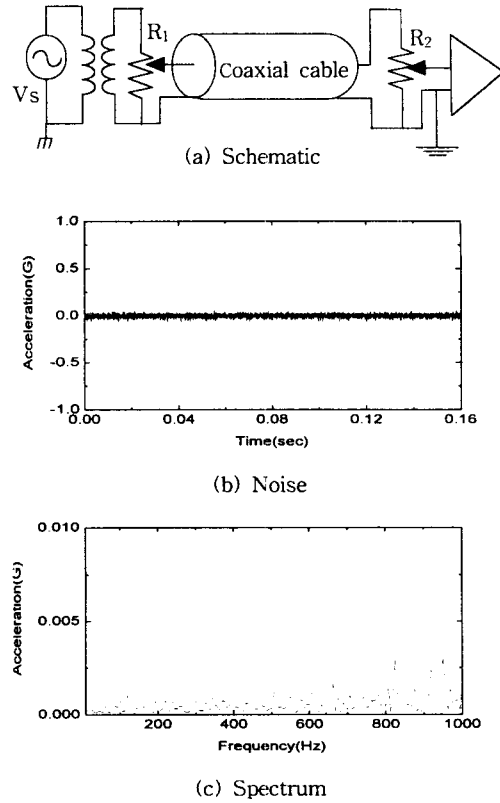


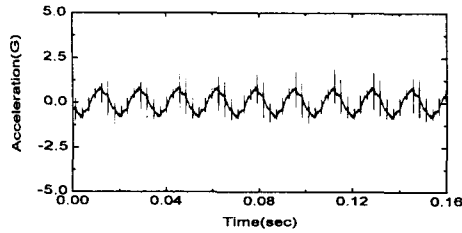
Fig. 6 Grounded source and a single-ended amplifier for A340 shaker system

통제실의 구동신호를 접지에 연결하고 시험장의 증폭기를 접지에 연결할 수 있지만, D300 가진기 시스템에서는 변압기를 사용하지 않기 때문에 통제실의 구동신호를 접지에 연결하고 시험장의 증폭기를 접지에 연결하면 접지루프가 생기기 때문에 차동증폭기를 사용할 때 잡음이 감소한 것이다.

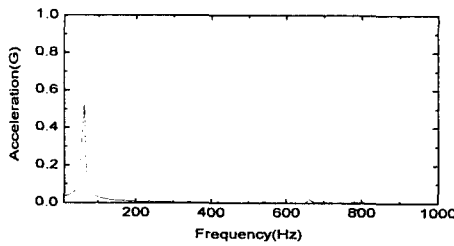
5. 가속도 측정기와 잡음

5.1 전하증폭기

증폭기의 전기적 잡음에 의한 진동이 Fig. 4 혹은 Fig. 6에서 거의 무시할 정도이지만, 가진기 시스템의 가속도 측정시 Class-D 증폭기의 복사방사(radiated emission)에 의한 전기적 잡음이 나타날 수 있다. 이 잡음은 Class-D 증폭기에서 사용하는



(a) Noise

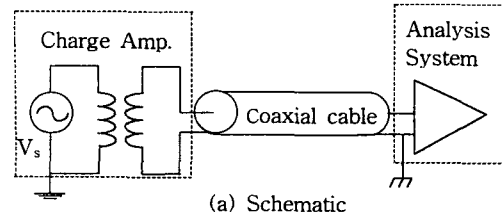


(b) Spectrum

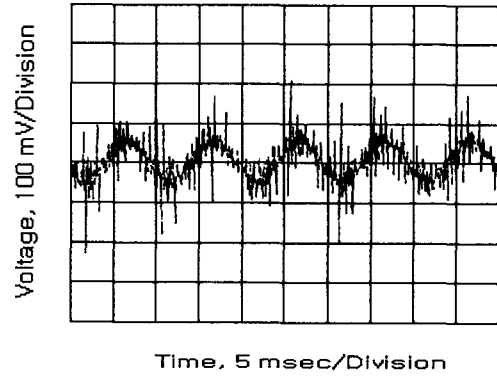
Fig. 7 Measured noise when a charge amplifier is located at control room

스위칭 주파수 (switching frequency) 56KHz 및 그 고조파에 관련된 잡음으로 진동시험에서 일반적으로 사용하는 최대 주파수 2,000Hz에 비하면 훨씬 높은 주파수이며, 전하증폭기의 저역필터 (low pass filter)를 사용하여 제거되지 않는 특징이 있다. 가속도계에서부터 전하증폭기의 저역필터까지의 잡음은 제거할 수 있기 때문에 이것은 그 이후의 잡음으로 간주되어야 한다. 진동시험에서 사용하는 제어분석 시스템은 최대 10KHz의 대역폭이 가능하므로 이 잡음은 제어분석 시스템에서는 제거되지만, 100 MHz 대역폭의 오실로스코프에서 이 잡음은 관찰할 수 있다. 진동시험중에 시험물 및 가진기 시스템의 동작을 감시하기 위하여 오실로스코프를 사용하여 전하증폭기의 출력을 관찰하는 것이 일반적이며, 이때 이 잡음은 신호관찰에 지장을 준다.

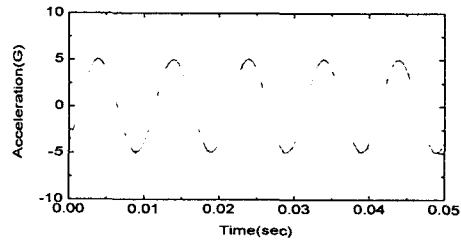
식 (13)에서 B 의 자속밀도를 형성하기 위한 코일의 전류를 인가하지 않으면서 증폭기를 동작시킬 때 (turned on) 나타나는 잡음은 가진기가 움직이지 않기 때문에 실제로 진동은 아니고 증폭기를 동작시키지 않으면 (turned off) 이 잡음은 사라지는 것을 관찰할 수 있다. 이는, 잡음에 민감한 장치 혹은 회로에 잡음을 최소화하기 위하여 Class-D 증폭기는



(a) Schematic



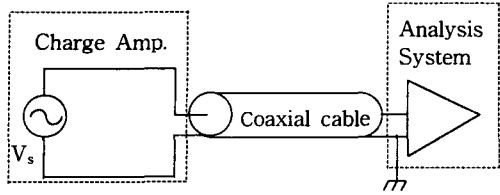
(b) Waveform observed by oscilloscope



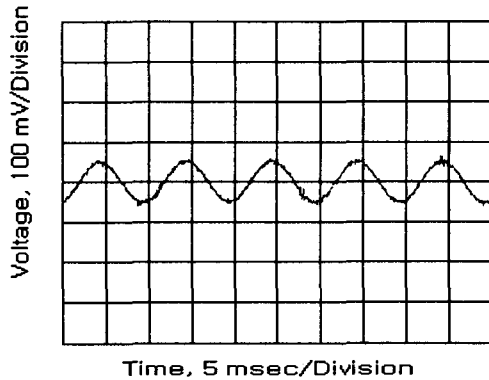
(c) Waveform acquired by analysis system

Fig. 8 Waveforms when a transformer is used

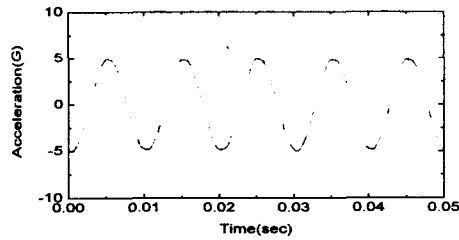
특수한 방법으로 밀폐를 시키고 있음에도 불구하고, 가속도 측정기기의 잡음신호원이 되고 있음을 말해주고 있다. 잡음문제를 야기시키는 3요소는 잡음신호원, 잡음에 민감한 장치 혹은 회로, 잡음을 전달하는 경로이다. 잡음 신호원이 Class-D 증폭기이므로 전하증폭기를 Class-D 증폭기와 멀리 떨어진 위치 (통제실)에 놓고 잡음을 측정 한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 이 결과는 증폭기의 복사방사에 의한 전하증폭기의 잡음은 감소한다 할지라도, Fig. 4에 비하여 잡음수준이 훨씬 높으며, 이는 압전계 가속도계의 출력 임피던스가 매우 크기 때문에 잡음에 취약함을 보여주고 있다. 이런 이유에서 압전계 가속도계에서 발생하는 전하를 전압으로 변환하는 장



(a) Schematic



(b) Waveform observed by oscilloscope



(c) Waveform acquired by analysis system

Fig. 9 Waveforms when a transformer is not used

치(charge converter)를 가속도계와 가까운 위치에 놓고 사용하며, B&K 2626 전하증폭기는 이 장치의 기능을 포함한다.

B&K 2626 전하증폭기는 접지루프에서 유기된 잡음전류를 줄일 목적으로 변압기를 사용할 수 있다. 이전에 Class-AB 증폭기를 사용한 가진기 시스템에서 이 변압기는 접지루프를 차단하여 잡음을 줄이는데 효과적으로 사용되었다. 그러나 Fig. 8의 (b)와 Fig. 9의 (b)에서 오실로스코프로 관찰한 파형은 전하증폭기의 변압기를 사용할 때, 잡음이 훨씬 많음을 보여주고 있다. D300 가진기 시스템을

사용한 100 Hz, 5 G의 정현파 진동시험에서 Fig.8의 (a)는 전하증폭기를 접지에 연결하고 변압기를 사용하여 접지루프를 차단하는 개략도를 나타내고, Fig.9의 (a)는 전하증폭기의 접지를 제거하고 변압기를 사용하지 않는 개략도를 나타내며, (b)는 오실로스코프로 관찰한 파형을 나타내고 있으며, (c)는 제어분석 시스템에서 획득한 파형을 나타내고 있다.

Class-D 증폭기에서 사용하는 스위칭 주파수에 관련된 잡음이 Fig. 8의 (b)에 섞여 있음을 알 수 있다. Fig. 8의 (c)와 Fig. 9의 (c)의 제어분석 시스템에서 획득한 파형은 필터(anti-aliasing filter)를 거친 파형으로 이 결과는 서로 거의 같다. 즉, 제어분석 시스템에서 필터를 쓰기 때문에 시험결과는 서로 동일하다고 볼 수 있지만, 진동시험이 진행되는 동안 오실로스코프로 파형을 관찰하는 것이 일반적이므로, Fig.8의 (b)보다 Fig.9의 (b)에서 관찰한 파형이 더 바람직하다.

5.2 가속도계의 절연

D300 가진기 시스템에서 Fig. 4의 (a)에 의한 방법으로 증폭기의 잡음에 의한 진동을 줄이고, Fig. 9의 (a)에 의한 방법으로 Class-D 증폭기에 의한 전기적 잡음을 줄이는 것이 바람직하나, 때때로 가속도계의 절연볼트 부분에 절연이 파괴되어 Fig. 9의 (a)가 Fig. 10의 (a)와 같이 되어 잡음이 발생한다. 가진기의 전기자 테이블 혹은 진동시험중에 치구는 전기적으로 접지에 연결되어 있기 때문에, Endevco사의 모델 2221D 가속도계는 절연볼트를 사용한다. 이 절연볼트는 미국 특허번호 2972006의 방법에 의하여 제조된 것으로, 가속도계의 몸체가 볼트를 통하여 가속도계를 부착한 부분(치구)에 접촉하지 않도록 절연와셔(insulating washer)와 절연관(insulating sleeve)을 사용한다. 절연와셔와 절연관은 서로 분리되어 있기 때문에 틈새가 생겨 때때로 절연이 파괴되는 것을 경험할 수 있다. 제조회사에서 권장하는 토오크(8~12in.-lb)로 볼트를 조인다 할지라도 가속도계의 몸체와 가속도계의 부착부분의 절연이 이루어지지 않는 경우가 종종 발생하는 것을 경험할 수 있으며, 진동시험을 시작하기 전에 절연이 이루어졌다 할지라도 진동시험중에 절연이 파괴되는 경우도 생길 수 있다. 이는 절연와셔와 절연

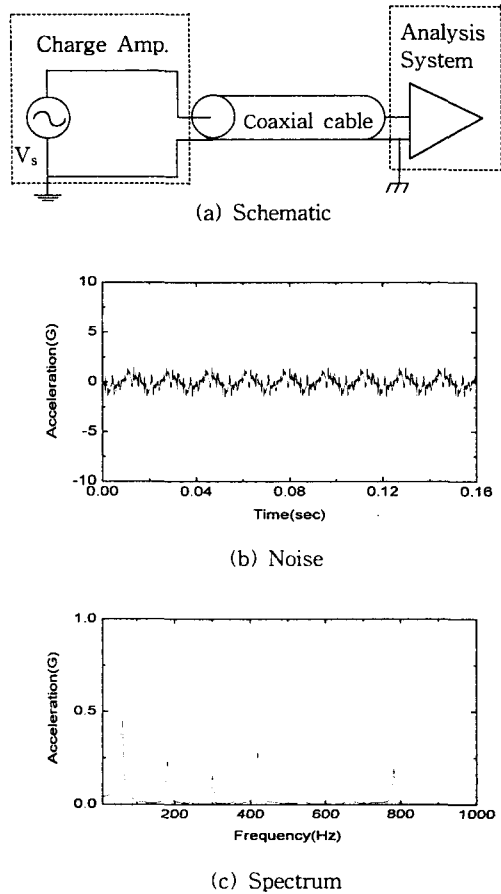


Fig. 10 Noise when insulation is breakdown

관이 일체형이 아니고 분리되어 있기 때문이다.

Fig. 10의 (a)는 전하증폭기의 변압기를 사용하지 않으면서 가속도계의 절연이 이루어지지 않거나 혹은 전하증폭기를 접지에 연결할 때의 개략도를 나타낸 것이며, (b)는 측정된 전기적 잡음, (c)는 그 스펙트럼을 나타내고 있다. 전하증폭기의 변압기를 사용하지 않기 때문에 접지루프가 형성되어 (b)와 같은 잡음이 발생한 것이다. 만약에 가속도계의 절연이 이루어지지 않았지만, 전하증폭기의 변압기를 사용한다면 Fig. 8의 (a)에서 볼 수 있듯이 접지루프는 차단되지만, (b)에서와 같이 스위칭 주파수에 의한 잡음이 섞이므로 Fig. 9의 (a)에 의한 방법이 적용되기 위해서는 전하증폭기의 접지를 제거하고 가속도계의 절연은 파괴되지 않아야 한다.

6. 결 론

가진기 시스템의 측정기에서 관찰되는 잡음은 증폭기의 전기적 잡음에 의하여 가진기가 실제로 움직여서 발생하는 진동과 측정기의 사용환경 때문에 관찰되는 잡음으로 나눌 수 있다. 전자는 진동시험 규격의 진동수준이 낮을 때 시험수행이 불가능한 경우가 발생할 수 있으며, 후자는 진동시험중에 파형의 관찰에 지장을 준다. 이런 이유에서 가진기 시스템에서 잡음의 감소를 위한 기술개발이 요구되었으며, 본 연구에서는 잡음의 문제를 일으키는 요소를 파악하고 그리고 알려진 이론에서 유도된 적절한 전략을 수립하여 문제를 해결하였다. 차동증폭기를 사용한 접지루프 방지, 변압기를 사용한 접지루프 방지, Class-D 증폭기의 스위칭 주파수와 관련된 잡음을 제거하기 위하여 기존에 사용하던 전하증폭기의 변압기를 사용한 접지루프 방지 대신에 전하증폭기의 변압기를 사용하지 않고 전하증폭기의 접지를 제거하여 접지루프를 방지하는 방법이 사용되었다. 이 방법들은 실험을 통하여 잡음감소 효과가 입증되었다.

참 고 문 헌

1. 김준엽, 윤을재, "반공진 진동수 해석에 의한 치구 설계 변경," 한국추진공학회지 제1권 제2호, 1997년 12월, pp.48-57
2. Wayne Tustin and Robert Mercado, "Random Vibration in Perspective," Tustin Institute of Technology, Santa Barbara, California, 1984, pp.77~82
3. Pablo Moreno and Robert G. Olsen, "A Simple Theory for Optimizing Finite Width ELF Magnetic Field Shields for Minimum Dependence on Source Orientation," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.39, No.4, November 1997, pp.340~348
4. William M. Frix, "A Circuital Approach to Estimate the Magnetic Field Reduction of

- Nonferrous Metal Shields," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.39, No.1, February 1997, pp.24~32
5. 양배덕, "전자파 장애 이론과 대책," 국방과학연구소, 1998, pp.33~56
 6. Henry W. Ott, "Noise Reduction Techniques in Electronic Systems," 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 1988, pp.29~72
 7. Ships et al., "Active noise conditioning system," U.S Patent 5848168 Dec., 1998
 8. Danz et al., "Silent start Class-D amplifier," U.S Patent 5805020 Sep., 1998
 9. Chatterjee et al., "High power efficiency audio amplifier with digital audio and volume inputs," U.S Patent 5898340 Apr., 1999
 10. Simopoulos, "High efficiency power amplifier," U.S Patent 5777519 Jul., 1998