

자기부상열차용 VVVF 인버터 및 DC/DC 컨버터의 소음해석

Noise Analyses of VVVF Inverter and DC/DC Converter for Maglev Train

김 현 실*, 김 재 승*, 강 현 주*, 김 봉 기*, 김 상 렬*
(Hyun-Sil Kim*, Jae-Seung Kim*, Hyun-Joo Kang*, Bong-Ki Kim*, Sang-Ryul Kim*)

*한국기계연구원 음향그룹

(접수일자: 2003년 1월 8일; 수정일자: 2003년 5월 29일; 채택일자: 2003년 6월 19일)

자기부상열차의 가장 중요한 소음원인 VVVF 인버터와 DC/DC 컨버터는 탄성체인 코어가 MS (Magnetostriction)에 의해 가진되어 소음을 발생한다. DC/DC 컨버터는 변압기가 주원인이며 소음/진동 스펙트럼에 가진주파수의 하모닉성분이 뚜렷하게 나타난다. 반면, LIM/VVVF 인버터소음은 가진주파수의 하모닉성분은 미약한 대신 변환주파수의 하모닉성분이 매우 강하게 나타난다. VVVF 인버터소음에서 변환주파수를 올리면 하모닉성분이 고주파수대역으로 이동하는데 700 Hz를 2 kHz로 올리면 소음이 5-6 dB 감소되는 것으로 나타났다. 현 기술수준으로 MS에 의한 탄성체의 소음/진동을 정량적으로 예측하기는 어려운 실정이므로 본 논문에서는 정성적으로 MS에 의한 가속도 스펙트럼을 예측하였고 VVVF 인버터에 대해 변환주파수 증가의 효과를 확인할 수 있었다.

핵심용어: 자기부상열차, VVVF 인버터, DC/DC 컨버터, 마그네토 스트릭션

투고분야: 구조 음향 및 진동 분야 (11.1)

In DC/DC converter and VVVF inverter, which are the most dominant noise sources of Maglev train, noise is radiated from core and coil excited by MS (Magnetostriction). The main noise source of DC/DC converter is transformer whose spectrum shows strong peaks associated with harmonics of exciting frequency. On the other hand, LIM/VVVF noise is dominated by the harmonics of switching frequency, whereas harmonics of exciting frequency are not significant. As switching frequency is increased in VVVF inverter, it is shown that the harmonics are shifted to higher frequency range. If switching frequency is increased from 700 Hz to 2 kHz, It is measured that noise can be reduced by 5 to 6 dB. Since complete mathematical description of MS phenomena is far beyond the present technology, vibration spectrum is investigated qualitatively in this paper, where effect of increasing switching frequency is confirmed.

Keywords: Maglev train, VVVF inverter, DC/DC converter, Magnetostriction

ASK subject classification: Structural acoustics vibration (11.1)

I. 서론

자기부상열차는 레일 위를 떠서 주행하므로 재래식 철도에서 가장 큰 문제가 되는 휠-레일간의 마찰소음을 근본적으로 제거할 수 있다는 점에 큰 장점이 있으며 실제 소음레벨도 일반 철도차량에 비해 작다. 그러나 전원 공급장치와 추진장치에서 발생하는 특정 주파수 성분의 소

음이 귀를 거슬리게 하는 문제점이 있다. 주 원인은 추진기인 LIM (Linear Induction Motor)과 이에 전원을 공급하는 가변전압/가변주파수 인버터 (VVVF Inverter: Variable Voltage Variable Frequency Inverter)와 DC/DC 컨버터의 코일진동에 기인한다[1,2].

LIM/VVVF 인버터와 DC/DC 컨버터 소음의 발생 메카니즘은 근본적으로 변압기 및 모터소음과 같다. 변압기, 모터 등 전자기력을 받는 탄성체에서는 소음과 진동이 발생하는데 특히 변압기 소음은 저주파수대역인 가진주파수의 하모닉성분에서 강한 피크를 보이므로 매우 귀에

책임저자: 김현실 (hskim@kimm.re.kr)
305-343 대전광역시 유성구 장동 171
한국기계연구원 구조연구부 음향그룹
(전화: 042-868-7461; 팩스: 042-868-7440)

거슬리며 불쾌감을 초래한다. 변전소 변압기는 대부분 대용량으로 주변 거주구역에 소음공해를 일으키며 변전소 종사자의 근무조건을 떨어뜨린다. 중/소형변압기 또한 가정 및 산업체에서 널리 쓰이고 있으며 소음문제가 자주 발생하고 있다.

변압기와 모터는 기본적으로 코어와 코일로 구성되는데 소음발생은 탄성체인 코어와 코일이 전자기력을 받아 진동하는 현상에 기인한다. 가진원으로는 마그네토 스트릭션 (MS: magnetostriction) 현상과 전자기력 (electromagnetic force)으로 구분된다[3]. MS 현상은 탄성체가 자기장에 노출될 때 시간에 따라 자기장이 변하면 탄성체의 길이변화가 발생하는 것을 말하며 보통 변형율 (strain)과 자속밀도와의 관계로 표현한다. 한편, 전자기력의 대표적인 예로 Lorentz 힘[3]이 알려져 있으며 일반적으로 변압기소음은 MS가 주 원인으로 알려져 있다.

Foster와 Reiplinger[4]는 변압기 코어의 MS를 다루었는데 변압기 코어의 소음은 코일이나 다른 부재의 소음보다 대략 5-15 dB 높은 것으로 기술하고 있다. 또한 코어재료의 열처리 과정에 의해 MS 현상이 크게 달라짐을 보였다. Weiser 등[5]은 변압기 코어의 형상변화에 따른 소음 감소를 연구하였는데 코어 적층방식에서 접합부 형태를 계단형으로 하는 MSL (multistep layer) 방식이 단순한 SSL (single-step layer) 방식에 비해 소음이 더 적게 발생함을 보였다. Ilo 등[6]도 코어 적층방법에 따른 소음변화를 측정하였는데 자속밀도가 임계값보다 커지면 소음이 급격히 증가함을 보였다. Yamamoto 등[7]은 MS를 레이지 도플러 진동측정기를 이용하여 측정하였으며 변압기의 진동레벨분포를 보였다.

Reyne 등[8]은 자성체의 응력문제를 강성 (rigid body), MS가 있는 경우와 없는 경우의 탄성체, MS가 있는 불균일 탄성체 4가지 경우로 나누어 각각에 대해 지배방정식을 제시하였다.

MS에 의한 변형율은 10^{-6} 단위로서 발생 메카니즘이 아직 이론적으로 완벽하게 규명되고 있지 않으며 주로 실험적으로 접근하고 있다. 전자기력에 의해서 발생하는 구조물의 소음문제는 전자기력과 탄성체와의 연성문제를 풀어야 하기 때문에 매우 복잡하는데 FEM/BEM을 이용한 수치해석[9]이 시도되나 대부분 MS는 제외하고 Lorentz 힘만 다루고 있다. 가장 큰 원인은 MS 현상에 대한 완벽한 해석모델이 아직 뒷받침되지 않은 상태이며 또한 필요한 물성치의 자료가 불충분하기 때문이다.

본 논문은 한국기계연구원원들이 시험은행하고 있는 자기

부상열차의 소음해석에 관한 연구결과[10]의 일부로 가장 중요한 소음원인 LIM/VVVF 인버터와 DC/DC 컨버터 소음의 특성파악과 측정결과, 감소방안 등을 기술하였다. VVVF 인버터소음을 감소시키는 유효한 방법으로 변환주파수의 증가가 알려져 있는데 현 단계에서 MS에 의한 구조물소음/진동을 정량적으로 정확히 예측하기는 불가능한 실정이다. 본 논문에서는 변환주파수 증가로 인한 소음감소효과를 정성적으로 확인하기 위해 LIM/VVVF 인버터를 평판으로 단순화한 후 가속도 스펙트럼을 계산하여 측정치와 비교하였다.

II. MS (Magnetostriction) 현상

MS 현상은 변형율과 자속밀도와의 관계로 표현하는데 변형율 곡선이 자속밀도에 대해 대칭이므로 자속밀도가 60 Hz로 변하면 변형율은 120 Hz로 변한다. 따라서 소음은 기본 주파수의 2배, 4배, 6배 등 2배수의 하모닉으로 나타나는 것이 일반적인 특징으로 알려져 있다. 자속밀도의 변화를 다음과 같이 가정하면

$$B(t) = B_M \sin \omega t \quad (1)$$

MS에 의한 변형율은 간략하게 다음과 같이 자속밀도의 자승에 비례한다고 볼 수 있다[4].

$$\epsilon = \Delta l/l \approx B_M^2 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} B_M^2 (1 - \cos 2\omega t) \quad (2)$$

따라서 가진 주파수의 두 배의 하모닉성분이 나타난다. 그러나 실제로는 자승에 비례하는 것만도 아니며 또한 비선형도 강하므로 모든 주파수성분이 나타나는 경우가 대부분이다.

참고문헌 [11]에 의하면 전자기력을 받는 탄성체의 Maxwell 응력 텐서 (stress tensor)는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{nm} = \mu H_n H_m - \frac{1}{2} \delta_{nm} H_k H_k \left(\mu - \frac{\partial \mu}{\partial \rho} \rho \right) \quad (3)$$

여기서 H_n 은 n 방향으로의 자계의 세기 (magnetic field intensity), δ_{nm} 은 Kronecker delta, μ 는 투자율 (permeability), ρ 는 탄성체의 밀도이다. 식 (3)의 우변에서 마지막 항 $H_k H_k (\partial \mu / \partial \rho) \rho$ 이 MS를 나타내고 나머지 항이 Lorentz 힘에 의한 성분을 나타낸다. 현재로서는

$\partial u / \partial \rho$ 값을 직접 측정하는 법은 알려져 있지 않으며 참고문헌 [7]처럼 시편을 막대형태로 제작하여 자기장을 가한 후 변형률 값을 자속밀도의 함수로 측정하는 간접적인 방법이 보편화되어 있다. MS는 재질과 시편이 받는 압축 응력값, 시편의 열처리방법 등에 따라서 달라지는데 현재 참고문헌에 주어지는 MS 데이터는 매우 드물다.

MS는 전체 부피는 변화시키지 않는 것으로 알려졌으며 이는 Poisson 비가 0.5인 것을 의미한다. 따라서 x 방향으로 변형율이 λ 라면 다른 방향의 변형율은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon_x = \lambda, \quad \epsilon_y = -\lambda/2, \quad \epsilon_z = -\lambda/2. \quad (4)$$

FEM (Finite Element Method) 해석시 주어진 자속밀도에 대해 실험적으로 변형률 λ 를 구하고 나머지 방향에 대해 식 (4)의 변형율을 발생하는 응력을 구하는 방법이 이용된다[12]. 그러나 식 (4)의 방법은 자기장의 분포가 한쪽 방향으로만 주로 형성된 경우에는 적용이 가능하나 변압기코어처럼 3차원으로 자기장이 형성되고 3축 방향의 변형이 동시에 일어나는 경우에는 MS를 어떻게 적용해야 할지 아직 정확한 이론적인 뒷받침이 없는 상태이다.

III. MS에 의한 구조물의 진동

MS에 의한 구조물의 소음/진동을 이론적 또는 FEM 등 수치적 방법을 사용하여 정량적으로 정확히 예측하는 것은 현 단계에서는 사실상 불가능하므로 본 연구에서는 IC/DC 컨버터 및 LIM/VVVF 인버터 소음 스펙트럼의 정성적인 평가에 목적을 두고 다음과 같이 진동해석을 수행하였다.

구조물에 작용하는 가진력의 시간에 대한 항이 $\exp(i\omega_0 t)$ 로 주어질 때 가진력과 변위 f, u 를 다음과 같이 하모닉 형태로 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(\vec{x}, t) &= F(\vec{x}) \exp(i\omega_0 t), \\ u(\vec{x}, t) &= U(\vec{x}) \exp(i\omega_0 t) \end{aligned} \quad (5)$$

구조물 진동의 일반적인 지배방정식은 다음과 같이 된다.

$$L[U(\vec{x})] - m\omega_0^2 U(\vec{x}) = F(\vec{x}) \quad (6)$$

여기서 L 은 미분방정식 형태 (operator), m 은 질량이다. 변위는 고유모드의 합으로 다음과 같이 전개할 수 있

다[13].

$$U = \sum_n \frac{\phi_n}{\Lambda_n(\omega_n^2 - \omega_0^2)} \int_S \phi_n F dS \quad (7)$$

여기서 ϕ_n 는 자유진동의 고유모드이며

$$\Lambda_n = \int_S m \phi_n^2 dS \quad (8)$$

변압기의 경우 적층구조를 이루므로 댐핑이 크기 때문에 복소수 고유진동수 $\omega_n^2(1 + i\eta)$ 를 도입하고 가진력 F 는 상수라고 가정한다. 가속도는 변위에 $-\omega_0^2$ 를 곱하여 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial t^2} = Q(\vec{x}, \omega_0) F \exp(i\omega_0 t) \quad (9)$$

여기서

$$Q(\vec{x}, \omega_0) = \sum_n \frac{-\omega_0^2 \phi_n}{\Lambda_n(\omega_n^2(1 + i\eta) - \omega_0^2)} \int_S \phi_n dS \quad (10)$$

식 (9)의 시간항을 푸리에 변환하면 이론적으로는 다음과 같이 델타 함수가 되나

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega_0 - \omega)t} dt = 2\pi \delta(\omega_0 - \omega) \quad (11)$$

이는 극한 형태이므로 참고문헌 [14]처럼 다음과 같이 시간에 대해 작은 값을 갖는 댐핑 ϵ 을 고려한다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{i(\omega_0 - \omega)t - \epsilon t^2} dt = \sqrt{\frac{\pi}{\epsilon}} e^{-(\omega_0 - \omega)^2 / 4\epsilon} \quad (12)$$

여기서 $\lim(\epsilon \rightarrow 0)$ 을 취하면 식 (11)의 결과가 된다. 식 (12)의 우변 항은 델타 함수를 정의하는 방법 중 한가지이다. 식 (9)를 푸리에 변환하고 제곱을 취하면 가속도 스펙트럼은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial t^2} e^{-i\omega t} dt \right|^2 \\ &= F^2 |Q(\vec{x}, \omega_0)|^2 \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) e^{-(\omega_0 - \omega)^2 / 2\epsilon} \end{aligned} \quad (13)$$

가로, 세로 및 두께가 각각 L_1, L_2, h 인 평판을 고려하고 주변이 단순지지되었다고 가정할 경우 고유모드 및 고유진동수는 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_n = \sin(\pi n_1 x / L_1) \sin(\pi n_2 y / L_2) \quad (14)$$

$$\omega_{n_1, n_2} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{m}} \left[\left(\frac{n_1}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{L_2}\right)^2 \right] \quad (15)$$

여기서 $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, $m = \rho h$. 단 E , ν , ρ 는 각각 Young의 계수, Poisson 비, 밀도이다.

IV. VVVF 인버터

VVVF 인버터는 가변전압/가변주파수 변환기로 1500 V DC를 공급받아 추진기인 LIM을 구동시키기 위한 교류로 변환하는 기기이다. VVVF 인버터는 차량 앞쪽 (운전석 방향) 차체 하부에 있는데 길이 2.5 m, 폭 0.8 m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조로 되어 있다 (사진 1). LIM은 추진을 위한 편축식 선형유도 전동기로 차량 양쪽에 24개가 배열되어 있다. 사진 2는 소음측정을 위해 LIM을 실외에 설치한 모습을 보여준다. VVVF 인버터는 직류를 교류로 바꾸는 과정에서 변환주파수 (sf: switching frequency)가 필

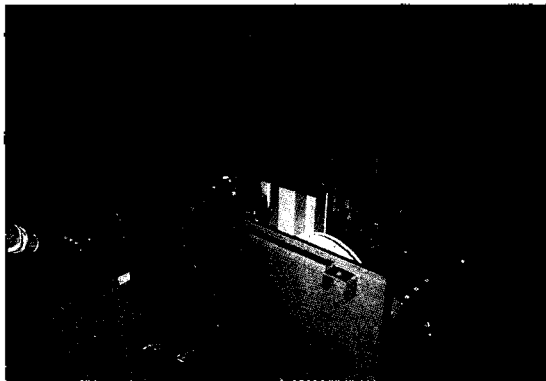


사진 1. VVVF 인버터
Photo 1. VVVF inverter.

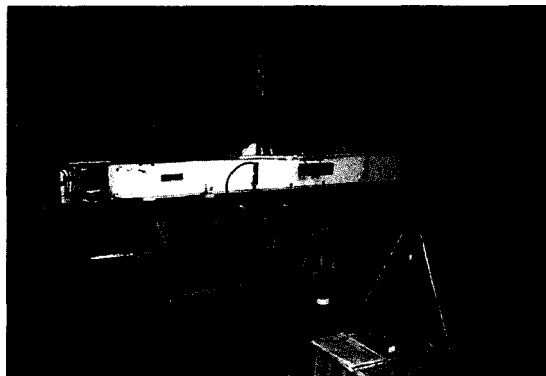


사진 2. LIM 소음측정
Photo 2. Measurement of LIM noise.

요한데 프로그램에서 주파수 값을 선택할 수 있게 되어 있다. 일본자기부상열차의 경우 변환주파수를 400 Hz에서 2 kHz로 올려서 소음저감효과를 본 예[2]가 있는데 본 연구에서는 변환주파수를 여러 단계로 올려가며 소음의 변화를 측정하였다. 소음은 LIM 앞에서 1 m 떨어진 위치에서 측정하였으며 동시에 LIM 표면의 가속도도 측정하였다.

그림 1에는 변환주파수를 700 Hz, 1 kHz, 1.5 kHz, 2.0 kHz, 2.4 kHz로 올려가며 측정한 소음변화를 나타냈는데 변환주파수가 커질수록 63.7 dBA (sf=700 Hz)에서 58.2 dBA (sf=2.4 kHz)로 약 6 dB 소음이 감소함을 알 수 있다. 그림 2와 3에는 sf=700 Hz와 sf=2 kHz 두 가지 경우에 대해 소음과 LIM의 수직방향 가속도를 각각 비교하

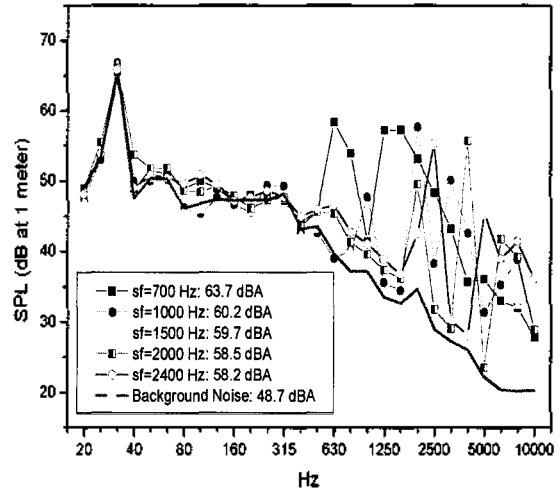


그림 1. 변환주파수 증가와 LIM/VVVF 인버터 소음변화
Fig. 1. Increase of switching frequency vs. LIM/VVVF inverter noise.

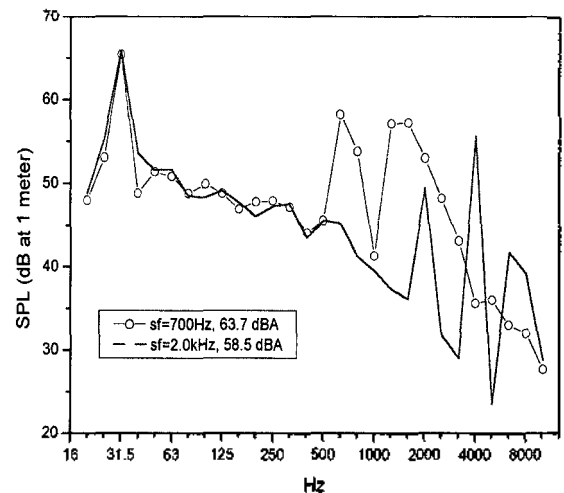


그림 2. LIM/VVVF 인버터 소음비교 (sf=700 Hz, 2 kHz)
Fig. 2. Comparison of LIM/VVVF inverter noise (sf=700 Hz, 2 kHz).

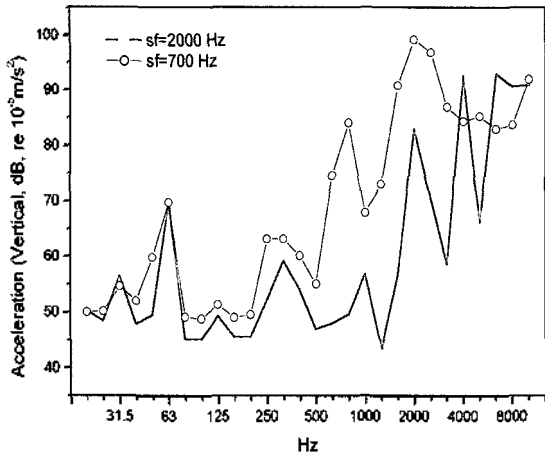


그림 3. LIM 가속도비교 (수직방향, sf=700 Hz, 2 kHz)
Fig. 3. Comparison of LIM acceleration (vertical direction, sf=700 Hz, 2 kHz).

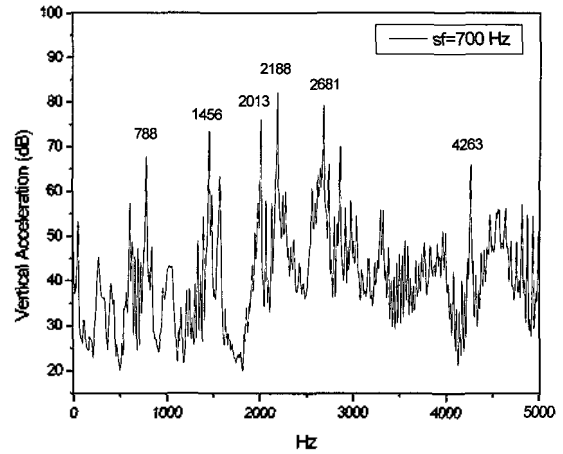


그림 5. LIM 가속도 (수직방향, sf=700 Hz)
Fig. 5. LIM acceleration (vertical direction, sf=700 Hz).

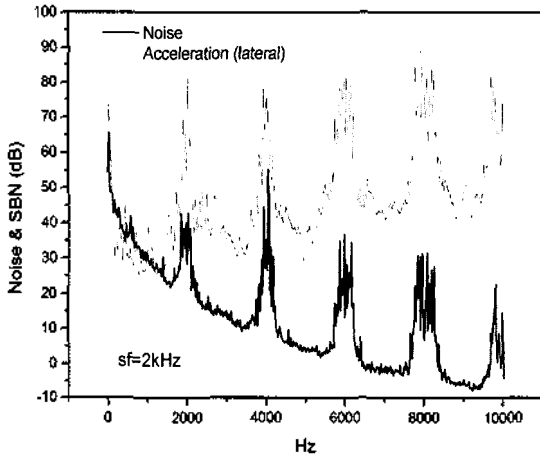


그림 4. LIM/VVVF 인버터 소음과 가속도 스펙트럼비교 (sf=2 kHz)
Fig. 4. Comparison of LIM/VVVF inverter noise and acceleration (sf=2 kHz).

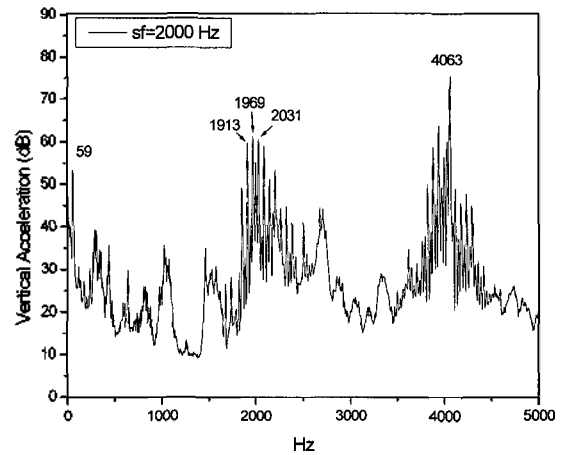


그림 6. LIM 가속도 (수직방향, sf=2 kHz)
Fig. 6. LIM acceleration (vertical direction, sf=2 kHz).

었는데 피크는 변환주파수의 하모닉성분에서 나타나며 변환주파수가 커질수록 피크는 오른쪽으로 이동함을 보여준다. VVVF 인버터는 회로 및 기판으로 구성되어 있어 자체로 발생하는 소음은 매우 미약한 반면 VVVF 인버터에서 전원을 공급받는 LIM에서 대부분의 소음/진동이 발생하는데 두 장비는 소음/진동 관점에서 사실상 같은 시스템으로 보아야 한다. 본 논문에서는 소음을 나타내는 그림에서 LIM/VVVF 인버터로 묶어서 표기하였다.

그림 4에는 변환주파수가 2 kHz일 때 소음과 수평방향 가속도 스펙트럼 (SBN: Structure-borne Noise)을 같이 비교하였는데 변환주파수의 하모닉성분이 매우 강하며 가속도는 주파수가 커져도 크기가 대등한 반면 소음은 급격히 감소하는데 특성을 보인다. 이로부터 변환주파수를 증가시켜 피크를 고주파수 대역으로 이동시키면 소음이 감소함을 예측할 수 있다. 가속도는 수직과 수평방향

(사진 2에서 MIC쪽 방향)을 측정하였는데 두 방향 모두 비슷한 경향을 보인다. 일반적으로 많은 하모닉 성분을 포함하는 가속도 스펙트럼에서 고주파수가 되면 피크값은 감소하지만 저주파수 대역은 피크가 서로 대등한 크기를 보인다. 그림 4에서는 소음이 중요한 10 kHz까지만 보였지만 이보다 더 큰 주파수 영역까지 가속도 스펙트럼을 측정한다면 피크는 감소할 것으로 예상되며 동시에 피크의 형상도 불분명해질 것으로 예상된다. 그림 5와 6에는 가속도 스펙트럼을 보였는데 변환주파수 주위로 여러 피크가 함께 존재한다. 이는 직류를 교류로 변환하는 과정에서 완전한 정현파가 만들어지지 못하고 파형이 왜곡되는 현상에 기인하는 것으로 보인다.

이론적으로 변환주파수 증가의 효과를 확인하기 위해 본 논문에서는 LIM을 평판으로 단순화하고 식 (13)을 이용하여 가속도 스펙트럼을 계산하였다. LIM은 모터의 코일부위를 평판으로 펼친 형상을 하고 있는데 실제 형상은

매우 복잡하나 본 논문의 목적은 정성적인 비교에 있으므로 LIM을 다음과 같이 단순지지된 평판으로 가정하였다.

$$L_1 = 1.8 \text{ m}, L_2 = 0.8 \text{ m}, h = 5 \text{ cm}$$

$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2, \rho = 7800 \text{ kg/m}^3$$

MS에 의한 가진력은 자속밀도의 자승에 비례한다고 가정하면 식 (1)과 (2)처럼 가진 주파수의 2배만 나타나나 실제로는 자속밀도의 왜곡현상과 비선형특성 때문에 가진 주파수의 모든 하모닉이 나타나므로 가진력을 다음과 같이 변환주파수 ω_s 의 하모닉으로 이루어졌다고 가정하였으며 현 단계에서 각 성분의 크기를 알 수 없으므로 모두 같다고 간주하였다.

$$f = \exp(i\omega_s t) + \exp(2i\omega_s t) + \exp(3i\omega_s t) + \dots \quad (16)$$

스펙트럼은 식 (13)의 각 주파수 성분을 더하면 되며 다음 식과 같이 주어진다.

$$\left| \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial^2 u(\vec{x}, t)}{\partial t^2} e^{-i\omega t} dt \right|^2$$

$$= \sum_m |Q(\vec{x}, \omega_m)|^2 \left(\frac{\pi}{\epsilon} \right) e^{-(\omega_m - \omega)^2 / 2\epsilon} \quad (17)$$

여기서 $\omega_m = \omega_s, 2\omega_s, 3\omega_s, \dots$.

식 (17)에서 ϵ 은 극한값을 취하는 대신 $\epsilon = 1.0 \times 10^{-10}$ 을 대입하였고, 식 (10)의 댐핑값은 $\eta = 0.1$ 을 사용하였다. 가속도 스펙트럼을 계산하는 위치는 평판의 중앙으로 하였다. 변환주파수가 700 Hz일 때와 2 kHz인 경우에 대해 식 (17)을 각각 계산하여 그림 7에 두 종류의 하모닉을 같이 나타냈는데 절대값은 의미가 없으므로 상대적인

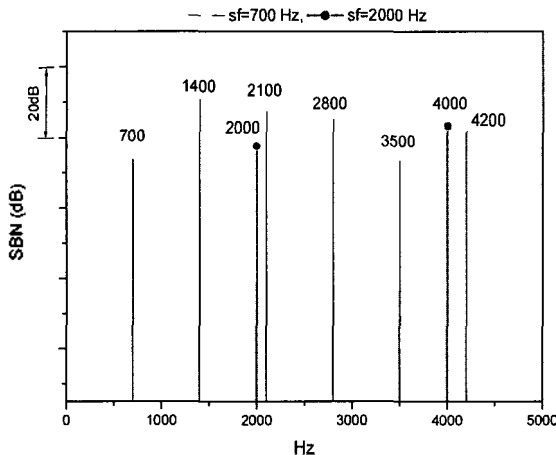


그림 7. 식 (17)을 이용하여 계산한 LIM 가속도
Fig. 7. Calculated spectrum of LIM acceleration by using Eq. (17).

SBN 값만 표현하였다. 그림 7에서 변환주파수가 커지면 피크의 크기는 대체로 대등한 반면 고주파수대역으로 이동하는 현상을 확인할 수 있는데 그림 3을 정성적으로 설명하고 있다.

변환주파수를 더 크게 하면 소음은 줄어들 수 있으나 파워의 손실이 증가하는 등 다른 문제가 발생하므로 적정 선에서 타협점을 찾아야 한다. 일반 철도차량의 경우 변환주파수로 700 Hz - 800 Hz를 사용하는데 본 자기부상열차의 경우 2 kHz 또는 2.4 kHz로 올려서 사용하면 소음은 5-6 dB 감소시킬 수 있으며 성능면에서도 큰 차이가 없으므로 향후 자기부상열차의 주행중 소음을 줄이는데는 VVVF 인버터의 변환주파수를 증가하는 것이 중요한 감소수단임을 확인하였다.

V. DC/DC 컨버터

DC/DC 컨버터는 1500 V DC를 공급받아 추진용 전원을 제외한 차내에 필요한 각종 전원을 공급하는 장치로 변압기가 2개 있는데 차량 후방쪽 하부에 있으며 길이 2.5 m, 폭 0.8 m, 깊이 0.6 m의 박스형 구조이다. 사진 3에 바닥 해치 및 박스 뚜껑을 연 DC/DC 컨버터 내부모습을 보였다. 주변압기 (main transformer)가 소음의 주원인으로 제원은 다음과 같다.

- 입력: 380 VAC, 출력: 300 VAC, 3 phase
- 변환주파수 (switching freq): 2.5 kHz, 가진주파수 (exciting freq): 400 Hz
- 부하: 25 KVA (최대: 100 KVA)

그림 8에는 DC/DC 컨버터 상부 1 m에서 측정된 소음의 스펙트럼을, 그림 9에는 주변압기 표면에서 측정된 수직 방향의 가속도 스펙트럼을 나타냈다. 변압기 가진주파수 400 Hz의 하모닉성분이 강하게 나타남을 알 수 있고 변환주파수 2.5 kHz 성분도 나타난다.

식 (17)을 이용하여 가속도 스펙트럼을 계산하였는데 변압기 코어는 단순지지된 사각형 평판구조 (재질은 강철)로 다음과 같이 가정하였다.

$$L_1 = 0.6 \text{ m}, L_2 = 0.55 \text{ m}, h = 6 \text{ cm}$$

가진력은 가진주파수 ω_0 의 하모닉성분과 변환주파수 ω_s 로 이루어졌다고 가정하였으며 계산한 변압기의 가속도 스펙트럼은 그림 10에 나타냈다. LIM의 형상은 단순 평판에 비교적 가까운 모양을 하고 있지만 DC/DC 컨버터의 주소음원인 변압기는 평판으로 모델링하기에는 매우

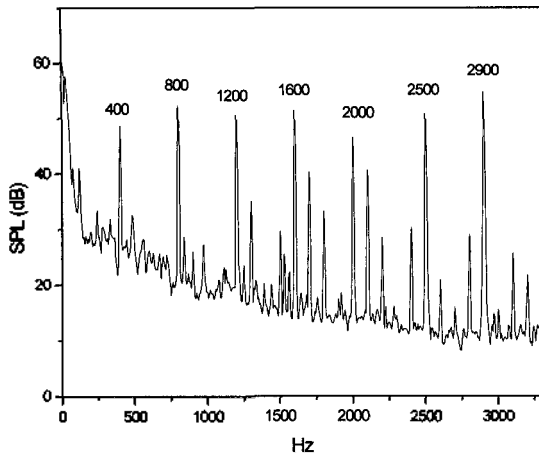


그림 8. DC/DC 컨버터소음 스펙트럼
Fig. 8. Spectrum of DC/DC converter noise.

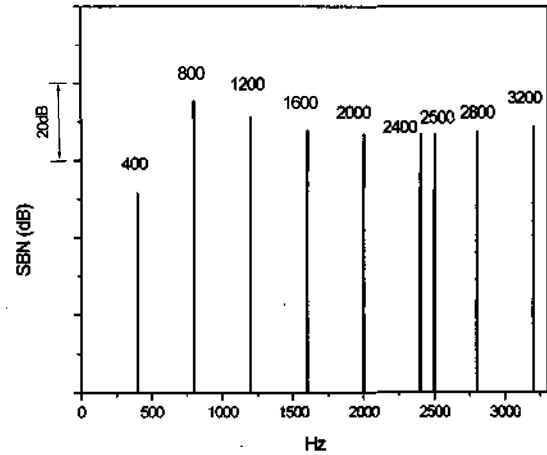


그림 10. 식 (17)을 이용하여 계산한 DC/DC 컨버터 변압기 가속도
Fig. 10. Calculated acceleration spectrum of transformer in DC/DC converter by using Eq. (17).

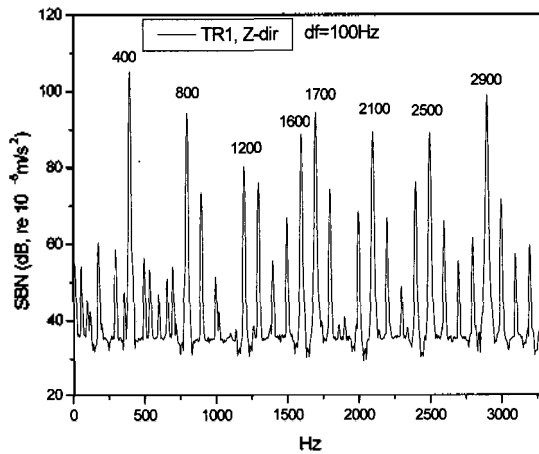


그림 9. DC/DC 컨버터 변압기표면의 수직방향 가속도 스펙트럼
Fig. 9. Spectrum of transformer acceleration (vertical direction, at surface) inside the DC/DC converter.

어려운 복잡한 3차원 형상을 하고 있는데 이와 같은 점이 예측결과와 대비한 정성적인 가속도평가에서 LIM (그림 7)이 DC/DC 컨버터 (그림 10)보다 상대적으로 더 양호한 설명을 주는 원인으로 보인다.

DC/DC 컨버터는 변압기 소음이 지배적이며 가진주파수의 하모닉성분이 매우 뚜렷하게 나타난다. 변압기소음의 감소방안으로 코어 적층시 모서리 이음매가 계단형이 되도록 하는 MSL (Multi-Step Layer) 방식이 기존의 단순 교차형보다는 유리한 것으로 알려졌으며 임계자속밀도이하로 변압기를 가동하는 것이 중요하다.

VI. 검토 및 결론

자기부상열차의 가장 중요한 소음원인 DC/DC 컨버터

와 LIM/VVVF 인버터는 지배적인 가진원이 MS이며 근본적으로 변압기/모터소음과 발생 메카니즘이 같다. DC/DC 컨버터소음은 내부에 장착된 변압기 소음이 지배적이며 가진주파수의 하모닉성분이 저주파수대역에 매우 뚜렷하게 나타난다. LIM/VVVF 인버터소음은 가진주파수의 하모닉성분은 미약한 대신 변환주파수의 하모닉성분이 매우 강한 것으로 나타났으며 변환주파수를 기존의 700 Hz에서 2 kHz로 올리면 인버터성능 자체에는 큰 변화가 없으며 소음을 5-6 dB 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 변환주파수의 증가는 유효한 소음저감방법이며 이는 자기부상열차 외에 일반 철도차량이나 지하철에서 사용되는 인버터에도 적용이 가능하다.

전자기장에 노출된 탄성체의 소음/진동문제에서 MS는 매우 중요한 가진원이나 현 단계에서는 정식화 과정에 대해 아직까지 확실한 이론적인 뒷받침이 없는 상태로 소음레벨을 정량적으로 예측하기에는 어려움이 많은 실

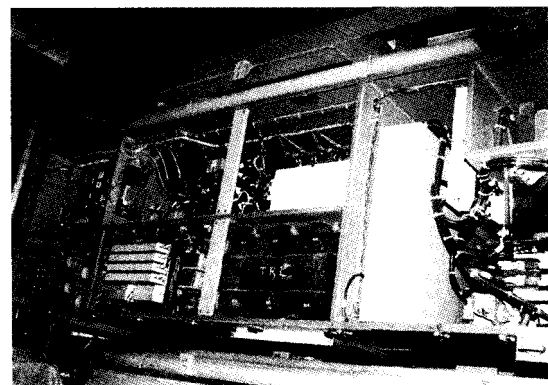


사진 3. DC/DC 컨버터
Photo 3. DC/DC converter.

정이다. 본 논문에서는 정성적으로 MS에 의한 가속도 스펙트럼을 예측하였으며 VVVF 인버터에 대해 변환주파수 증가의 효과를 확인할 수 있었다.

참고 문헌

1. 김현실, 김재승, 강현주, 김봉기, 김상렬, "저속주행시 자기부상 열차의 실내소음저감에 관한 연구," 한국소음진동공학회지, 11 (7), 253-260, 2001.
2. M. Tanaka, M. Fujino, and M. Murali, "The results of running test of the HSST-1001 vehicle," *Proceedings of the Maglev '98*, 62-67, 1998.
3. P. L. Timar, *Noise and Vibration of Electrical Machines*, Elsevier, 1989.
4. S. L. Foster and E. Reiplinger, "Characteristics and control of transformer sound," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100, 1072-1077, 1981.
5. B. Weiser, H. Pflutzner, and J. Anger, "Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores," *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 3759-3777, 2000.
6. A. Ilo, B. Weiser, T. Booth, and H. Pluzner, "Influence of geometric parameters on the magnetic properties of model transformer cores," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160, 38-40, 1996.
7. M. Yamamoto, S. Arai, R. Kawamata, M. Mizokami, and T. Kubota, "Recent development in grain-oriented electrical steel with low magnetostriction," *JMEPEG*, 6, 713-721, 1977.
8. G. Reyne, J. C. Sabonnadiere, J. L. Coulomb, and P. Brissonneau, "A survey of the main aspects of magnetic forces and mechanical behaviour of ferromagnetic materials under magnetization," *IEEE Transactions on Magnetics*, 23, 3765-3767, 1987.

9. M. Rausch, M. Kaltenbacher, H. Landes, and R. Lerch, "Combination of finite and boundary element methods in investigation and prediction of load-controlled noise of power transformers," *Journal of Sound and Vibration*, 250, 323-338, 2002.
10. 김현실, 김재승, 강현주, 김봉기, 김상렬, 경량전철의 실내소음 저감기술연구 (자기부상열차 소음저감연구), 한국기계연구원, 2002.
11. H. H. Woodson and J. R. Melcher, *Electromechanical Dynamics*, John Wiley & Sons, Part II, 463, 1968.
12. K. Delaere, W. Heyen, K. Hameyer, and R. Belmans, "Local magnetostriction forces for finite element analysis," *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 3115-3118, 2000.
13. L. Cremer and M. Heckl, *Structure-Borne Sound*, Springer-Verlag, 318-322, 1973.
14. G. F. Carrier, M. Krook, and C. E. Pearson, *Functions of a Complex Variables*, McGraw-Hill, 318-321, 1996.

저자 약력

- 김 현 실 (Hyun-Sil Kim)
한국음향학회지 제21권 제1호 참조
- 김 재 승 (Jae-Seung Kim)
한국음향학회지 제21권 제1호 참조
- 강 현 주 (Hyun-Joo Kang)
한국음향학회지 제21권 제1호 참조
- 김 봉 기 (Bong-Ki Kim)
한국음향학회지 제21권 제1호 참조
- 김 상 렬 (Sang-Ryul Kim)
한국음향학회지 제21권 제1호 참조