

연성 효과를 고려한 마이크로스피커 왜율분석

Analysis of total harmonic distortion in microspeaker considering coupling effect

권중학*·김광석*·방기창*·황상문†

Joong-Hak Kwon, Kwang-Suk Kim, Ki-Chang Bang and Sang-Moon Hwang

Key Words : 연성효과(Coupling effect), 마이크로스피커(Microspeaker), 음의 왜율(Total Harmonic distortion)

ABSTRACT

With the advent of mobile phone, Digital multimedia broadcasting (DMB) service is to be realized for multimedia data communication. For an acoustic part, a smaller and lighter microspeaker is also soon to be realized as an MP3 song player and a speakerphone. Sound quality in the microspeaker is becoming more important in mobile phones. It is evaluated by total harmonic distortion (THD). THD is the proportion of higher order frequencies output response to sinusoidal input signal. It is affected by uneven magnetic distribution and nonlinear response of diaphragm. In this paper, harmonic distortion is analyzed by considering magnetic and mechanical coupling effects. Simulated results of THD are compared with experimental data. Results show that THD in lower frequency range is higher due to high displace on voice coil and high mechanical response of high order frequency.

기호설명

- F_{coil} : 코일에 발생하는 전자기력
- I : 코일에 인가되는 전류
- l : 코일의 길이
- B_m : 코일에 쇄교하는 평균자속밀도
- V : 코일부피
- z : 코일의 응답변위
- $z_{0.1N}$: 0.1N의 가진력에 대한 응답변위
- ω_n : n 차 주파수
- t : 시간
- ϕ_n : n 차 주파수에서의 가진력과 변위의 위상차
- P : 압력

1. 서론

이동통신 기술의 급격한 발전으로 인하여 PDA(Personal Digital Assistant) 및 휴대폰과 같은 이동통신 단말기가 소형 멀티미디어로써 역할을 수행하게 되었다. 이에 따라 그 핵심부품인 LCD(Liquid Crystal Display)와 마이크로스피커의 중요성이 부각되어왔다. 전자기 기계음향부품인 마이크로스피커의 경우 소형화, 고성능화에 초점을 맞추어 개발해왔다. 하지만 소비자들의 음질에 대한 기대치가 높아지면서 마이크로스피커의 음질에 대한 연구가 중요하게 되었다.

마이크로스피커의 음질에 대한 평가는 왜율(Total Harmonic distortion)을 통하여 이루어지고 있다.

† 황상문; 부산대학교 기계공학부
E-mail : shwang@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-2468, Fax : (051) 582-3104
* 부산대학교 기계공학부 기계설계시스템전공

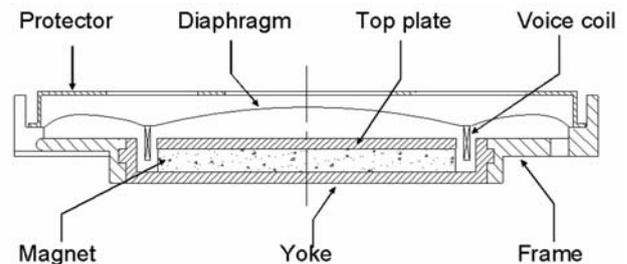


Fig. 1. Schematic of analyzed microspeaker

왜율이란 순수 정현파의 입력으로 발생하는 고조파 성분의 음압비율을 나타내는 것이다. 왜율은 전자기계의 불평형 분포와 진동판의 비선형적인 응답으로 인해 발생한다.

이전 연구에서는 자계불평형 분포를 분석하여서 전자계의 왜곡을 표현하였다⁽¹⁾. 하지만 음의 왜곡은 음압의 스펙트럼으로 표현하기 때문에 전자계 불평형만으로 표현할 수 없다. 또한 전자계와 기계적인 진동계는 서로 연성되어 있기에 이를 고려한 분석으로 나타내어야 한다. 본 논문에서는 전자계와 진동계의 연성효과를 고려하여 음의 왜율을 구하였다. 시뮬레이션으로 예측된 결과는 실험결과와 비교적 유사하였다. 저역에서는 변위가 크고 고조파항의 응답이 상대적으로 높기에 왜율이 고역보다 높게 나타남을 볼 수가 있다.

2. 마이크로스피커의 작동원리

그림 1은 해석할 마이크로스피커의 구조를 나타낸 그림이다. 마이크로스피커는 라우드스피커와 유사한 다이내믹형 구조를 가지고 있다. 보이시 코일에 가진력을 발생시키기 위하여 영구자석, 요크, 탑 플레이트로 구성된 전자기회로와 음압을 발생시키기 위한 진동판이 존재한다. 그림 2에서처럼 보이시 코일에 전류가 흐르면 코일에 쇄교하는 자속과의 상호

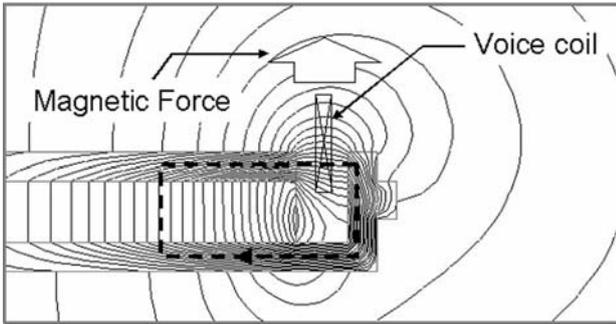


Fig. 2. Operating principle of microspeaker

작용에 의해 전자기력이 발생하게 된다. 발생한 전자기력은 진동판의 움직임을 야기하고 음압을 발생시키게 된다. 따라서 마이크로 스피커의 음향특성을 분석하기 위해서는 진동판의 진동특성분석과 자기회로의 전자계특성분석이 모두 이루어져야 한다. 또한 코일이 자기회로 내에서 움직임을 가지고 있기 때문에 발생하는 전자기력의 왜곡이 발생하고 이는 진동특성의 왜곡을 야기시킨다. 따라서 전자계와 진동계의 연성효과를 고려한 해석을 통해서만 정확한 음향특성을 분석할 수가 있다.

하지만 지배방정식이 다른 2 개의 시스템을 동시에 해석하는 데는 어려움이 있다. 유한요소법을 이용하여 2 개의 시스템을 해석하는 경우도 있지만 해석시간이 오래 걸리고 해석오차도 비교적 크게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 각각의 시스템을 분석하고 2 개의 연성특성을 수식적으로 고려하여 줌으로써 음의 왜곡을 해석하였다.

3. 유한요소해석

3.1 전자계해석

전자계는 영구자석, 요크, 탑플레이트 보이스코일로 이루어져 있다. 영구자석에서 발생하는 자속을 보이스코일이 위치한 공극에 전류와 쇄교시켜주기 위하여 요크와 탑플레이트를 부착하였다. 자기회로가 중심축에 대칭인 원형이므로 2 차원해석을 수행할 수 있다^(1,2). 유한요소해석에는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 를 사용하였으며, 자속밀도는 영구자석, 요크, 탑플레이트가 관계되므로 자기세기에 영향을 줄 수 있는 부품의 부분만 포함시켰고, 그 외의 부분들과 자유공간은 비자성체이므로 공기로 적용하여 각각에 따른 물성치를 부여하였다.

마이크로스피커의 경우 인가되는 전류의 양도 매우 적고 코일의 권선수도 적기 때문에 코일의 전류에 의한 자기장의 변화는 무시하였다.

경계조건은 그림 3 과 같이 축대칭 부분을 제외한 나머지 바깥경계 부분을 자유공간영역인 자기 벡터 포텐셜이 0 이 되도록 조건을 주었다⁽²⁾. 모델링에서

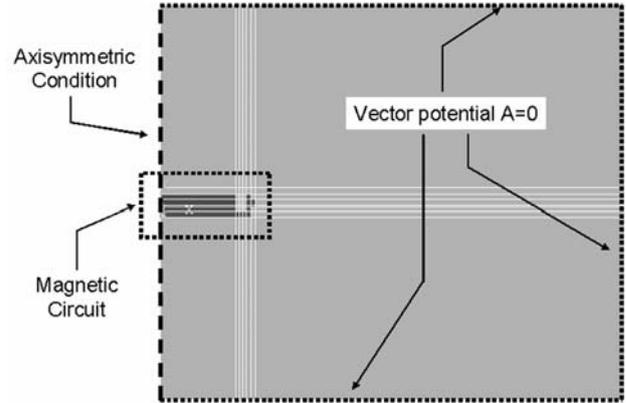


Fig. 3. Boundary condition of electromagnetic system

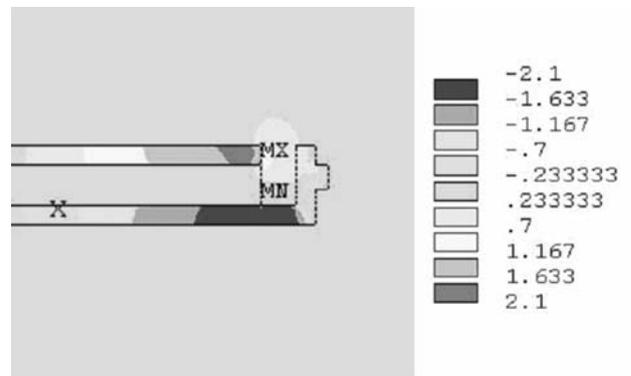


Fig. 4. Flux density distribution

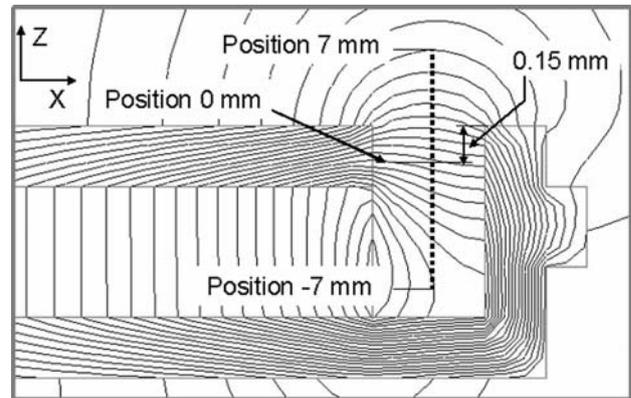


Fig. 5. Fluxlines and definition of position

자유공간영역은 반경방향으로 20mm, 축방향으로 위아래 각각 20mm 씩 확보하였다. 더 많은 영역을 자유공간으로 주었을 때와 비교하여 결과에 대한 오차 범위가 1%미만이다. 그림 4 는 자속밀도분포를 나타낸 그림이다. 마이크로스피커의 경우 작은 자기회로로 비교적 높은 자속밀도를 생성하도록 설계를 하여서 요크와 탑플레이트에 자기포화현상이 발생한다. 그림 5 는 자속선도를 나타낸다. 그림 6 은 그림 5 에서 표시된 지점의 x-축방향 자속밀도를 나타낸 그래프이다. 이상적인 자속밀도는 코일이 움직일 경로

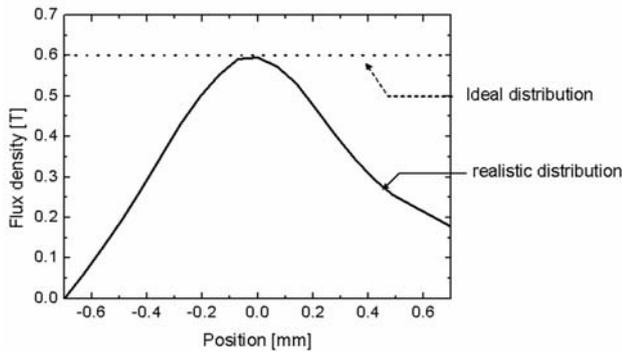


Fig. 6. Flux density along the airgap

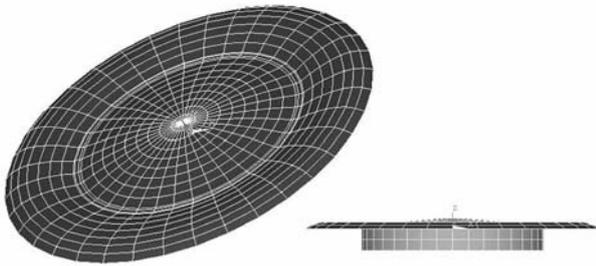


Fig. 7. Modeling of mechanical system

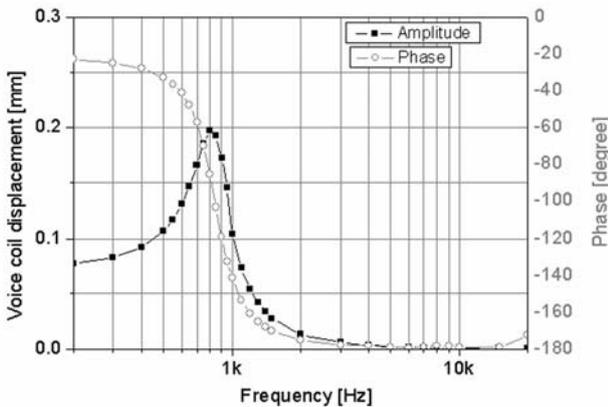


Fig. 8. Voice coil displacement

내에서 일정한 값을 갖는 것이지만 마이크로스피커의 경우 그 두께가 매우 얇기 때문에 그림 6 에서와 같이 위치에 따른 차이가 많이 난다.

3.2 진동계

진동계에서는 정현파 가진력에 대한 진동판의 응답특성을 분석함으로써 수행된다. 진동계는 진동판과 보이스코일로 이루어져 있고 보이스코일의 각 노드에 가진력을 분포시켰다^(3,4).

그림 7 은 진동계의 모델링 형상을 나타낸 그림이다. 진동판의 모델링의 경우 메쉬(mesh)를 더욱 많이 나눌수록 정확도도 상승하나 계산시간과 오차의 정도를 고려하여 메쉬를 나누었다. 또한 메쉬의 형태

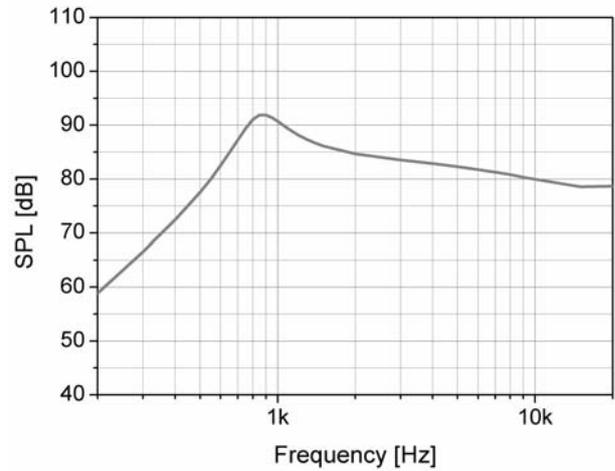


Fig. 9. Sound pressure level

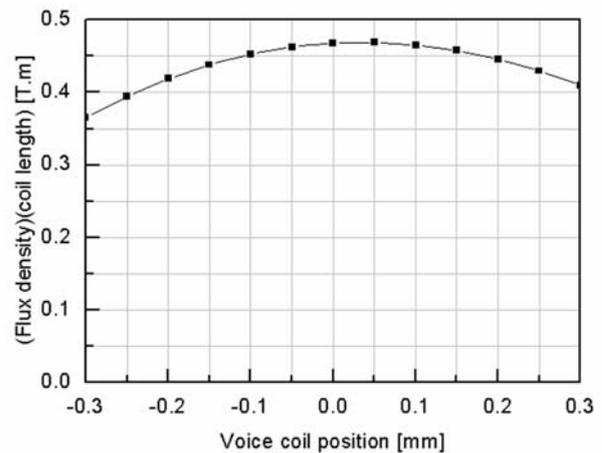


Fig. 10. Magnetic force per current

가 대칭을 이루는데 주안점을 두었다. 그림 8 는 각 주파수마다 0.1N의 harmonic force 를 주어 코일의 변위를 구한 그래프이다. 1 차 공진주파수가 약 800Hz 로 나타난다. 변위의 위상은 가진력과의 위상 차이를 나타낸다. 그림 9 은 0.1N 의 가진력에 대한 음압의 해석치를 나타낸 그래프이다⁽⁴⁾.

4. 연성해석

정현파의 전류가 코일에 인가되면 식 (1)과 같이 로렌츠 방정식에 의해 코일에 발생하는 전자기력을 구할 수 있다. 보이스코일의 평균값은 식 (2)와 같이 구할 수 있고 보이스코일의 위치에 대한 함수로 표현된다.

$$F_{coil}(t) = I(t)lB_m(z)\vec{k} \quad (1)$$

$$B_m(z) = \frac{\int_{coil} B \cdot dV}{V} \quad (2)$$

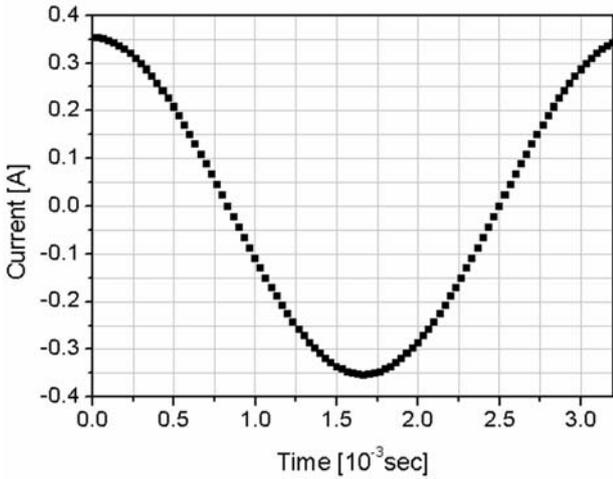


Fig. 11. Current on voice coil at 300Hz

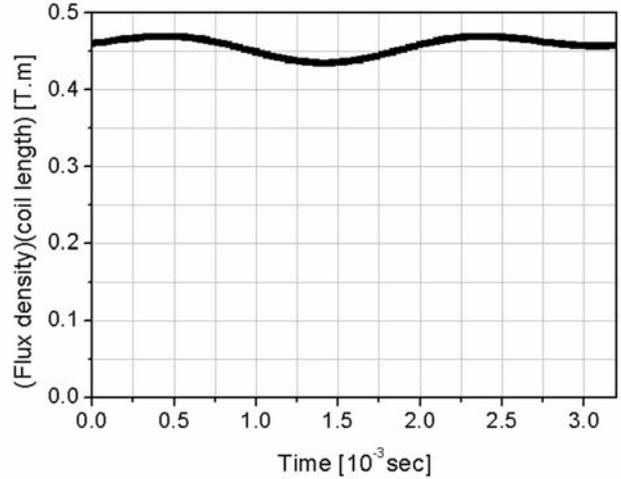


Fig. 13. Magnetic force per current at 300Hz

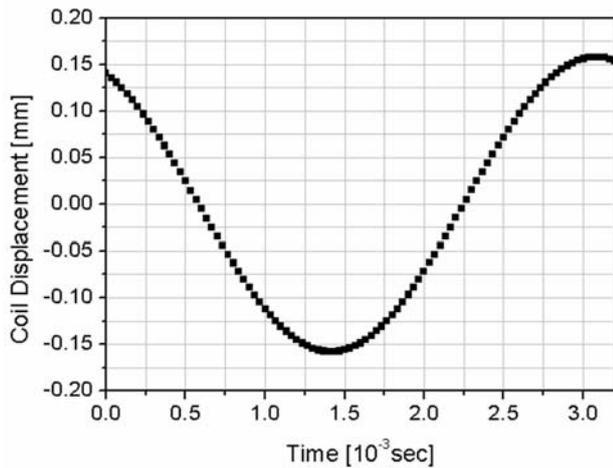


Fig. 12. Coil displacement when force is 0.1N

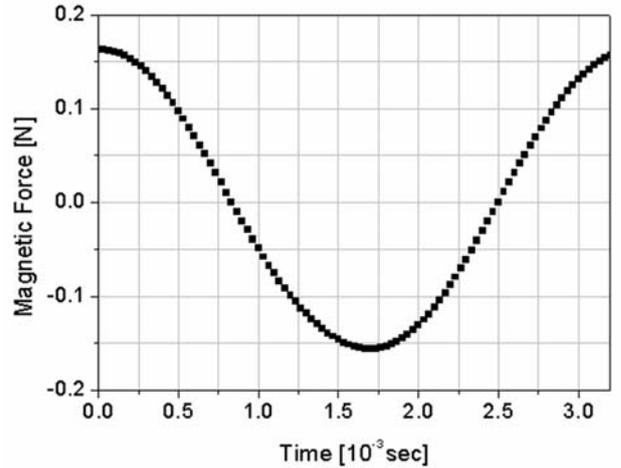


Fig. 14. Magnetic force at 300Hz

전자기계해석을 통하여 평균자속밀도 값과 코일길이를 이용하여 단위전류당 전자기력을 구하면 그림 10과 같다. 그림 10의 결과로부터 단위전류당 전자기력을 2 차함수로 도출하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$IB_m(z) = 0.46811 + 70.8016z + 8914463.92427z^2 \quad (3)$$

전자기력을 구하기 위해 우선 전류는 실용전압 2V에 발생하는 순수정현파로 가정한다. 전류의 위상은 발생하는 전자기력과 동일하고 그림 8과 같이 변위와의 위상차이를 가진다고 가정한다. 그림 11은 300Hz에서의 전류값을 시간역에 대해 나타낸 그래프이다.

코일에 발생하는 전자기력을 구하기 위해서는 시간과 변위의 관계를 예측하여야 한다. 그림 8의 변위와 위상을 이용하면 가진력의 파형을 만들 수 있다. 단, 이때의 변위와 위상은 초기값을 결정해 주기 위해 설정해 준 것이며 완전해는 아니다. 그림 12와

같이 0.1N의 변위 응답을 이용하여 단위 전류당 전자기력을 시간에 대한 함수로 가정할 수 있다. 그림 13은 300Hz의 단위전류당 전자기력을 가정한 그래프이다. 시간에 따라 단위전류당 전자기력이 변화함을 알 수가 있는데 이것이 음의 왜곡을 유발하는 전자기력 왜곡이다. 이를 식(1)과 같이 전류와 곱하여 주면 전자기력을 시간에 대한 함수로 표현할 수 있다. 그림 14는 300Hz의 전자기력을 나타낸 그래프이다. 이 값은 순수정현파가 아니라 왜곡된 전자기력성분을 가지고 있다. 이를 스펙트럼 분석하면 그림 15와 같이 고차성분들을 구할 수가 있다. 문제는 이러한 가진력이 왜곡된 진동을 유발함에 있다. 이러한 가진력에 대한 변위 응답은 식 (4)와 같다.

$$|z(\omega)| = \frac{|z(\omega)|_{0.1} F_{coil}(\omega)}{0.1} \quad (4)$$

응답변위의 크기는 각각의 가진력 크기에 비례하고 위상은 그림 8과 같다. 이를 식 (5)와 같이 중첩의

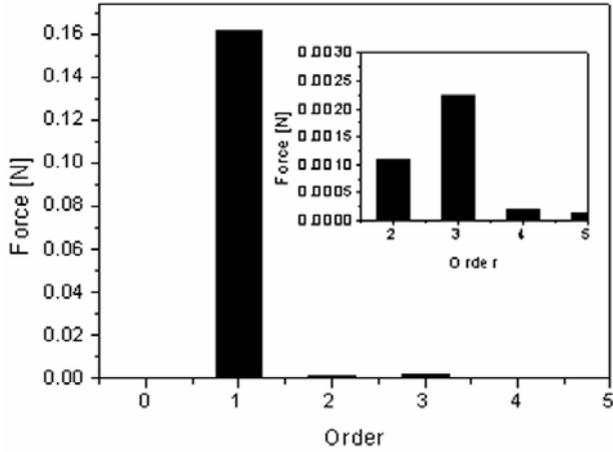


Fig. 15. Spectrum of magnetic force at 300Hz

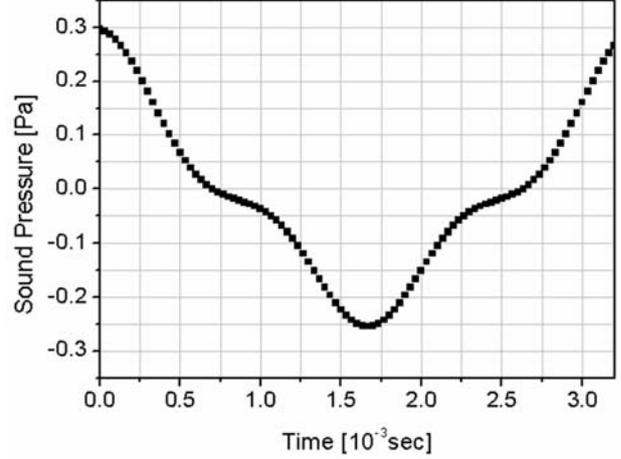


Fig. 17. Sound pressure at 300Hz

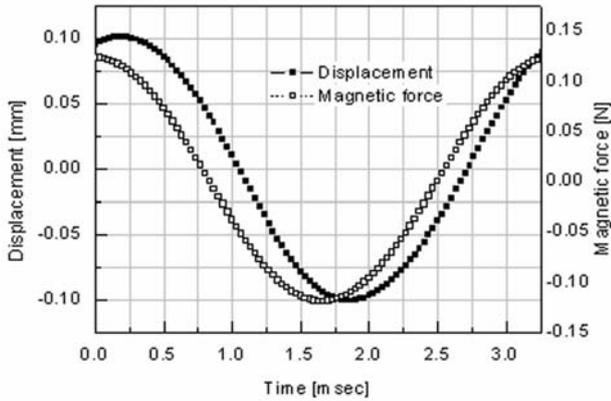


Fig. 16. Final solution of force and displacement at 300Hz

원리를 이용하여 더하여 주면 앞선 가진력에 대한 변위파형을 구할 수 있다.

$$z(t) = \sum_{n=1} |z(\omega_n)| e^{j(\omega_n t + \phi_n)}$$

$$z(t) = \sum_{n=1} \frac{|z(\omega_n)|_{0.1} F_{coil}(\omega_n)}{0.1} e^{j(\omega_n t + \phi_n)} \quad (5)$$

정확한 해를 구하기 위하여 앞서 가정했던 변위파형 대신 새로 도출한 변위파형으로 새로운 전자기력 파형을 구하고 다시 변위파형을 구하는 작업을 반복하여 수렴하는 전자기력파형과 변위파형을 구한다. 그림 16 은 300Hz 에서 도출된 전자기력과 변위의 최종파형이다. 변위와 가진력은 완전한 정현파가 아니며 두파형 사이에는 위상차이가 존재한다. 위상차는 각 주파수마다 다르기 때문에 각주파수마다 왜곡율도 크게 달라진다.

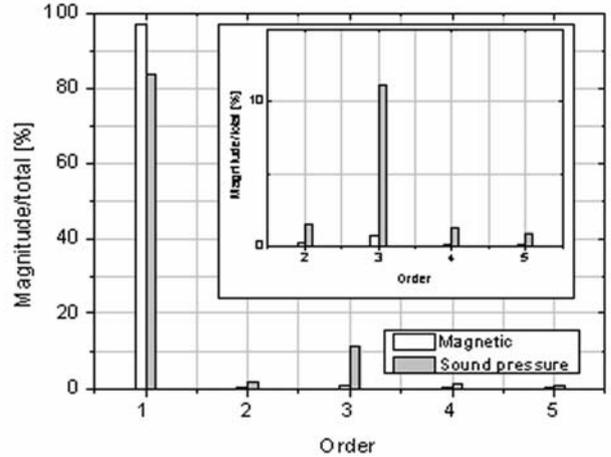


Fig. 18. Spectrum of force and pressure at 300Hz

5. 왜을 분석

음의 왜곡은 음압 파형을 분석하여 구할 수 있다. 앞서 구한 전자기력 파형에 대한 음압의 응답은 식 (6)으로 구할 수 있다⁽⁴⁾.

$$P_{rms}(\omega) = 2 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{SPL(\omega)}{20}}$$

$$SPL(\omega) = SPL(\omega)_{0.1N} + 20 \log_{10} \left[\frac{F(\omega)}{0.1} \right] \quad (6)$$

그림 17 은 300Hz 에서의 음압파형을 나타낸 그림이다. 전자기력 파형의 왜곡에 비해 음압파형의 왜곡은 아주 심하게 나타남을 볼 수가 있다. 이는 저주파수 대역의 가진력의 경우 고차항이 공진점 부근에 존재하기 때문에 가진력의 크기가 작아도 음압의 응답이 커지기 때문이다. 또한 기본주파

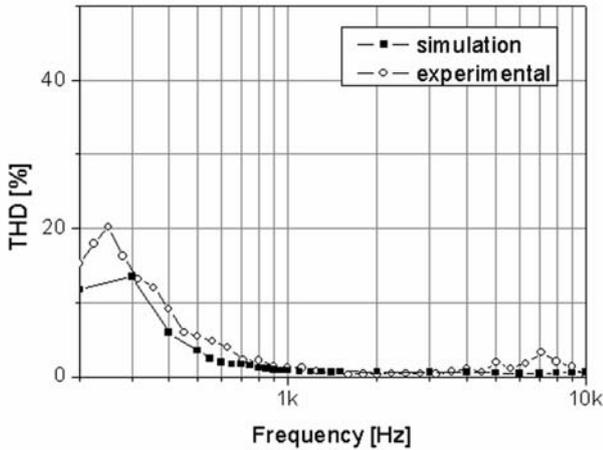


Fig. 19. Total harmonic distortion

수의 응답이 작기 때문에 상대적인 왜곡은 더 크게 나타난다. 그림 18 은 300Hz 입력전류에 대한 전자기력과 음압의 스펙트럼을 나타낸 그래프이다. 고조파 3 차가 약 900Hz 로 공진주파수 부근에 위치하기에 음압의 3 차성분이 크게 증가함을 보여준다. 이를 이용하여 음의 왜율을 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} P_n^2}}{P_1} \times 100 \quad (7)$$

그림 19 는 각 주파수별 왜율을 나타낸 그래프이다. 전체적으로 저주파수 대역이 고주파수 대역보다 높게 나타나는 이유는 저주파수에서의 변위가 비교적 커서 전자기적왜곡이 크게 나타나고 고조파성분이 공진주파수부근에 위치하여 음향응답이 기본주파수에 비해 크기 때문이다.

6. 결 론

고음질의 마이크로스피커를 설계하기 위해서는 음의 왜율에 대한 연구가 필수적이다. 음의 왜율을 분석하기 위해서는 전자계특성과 진동특성의 연성효과를 고려한 해석이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 각각 시스템을 해석하고 둘의 연성관계를 수식적으로 고려하여 줌으로써 해석시간을 단축하면서 비교적 정확도가 높은 결과를 도출하였다. 전자기력의 왜곡은 진동계의 진폭이 커질수록 심해졌고 저주파수의 경우 고조파 성분이 공진주파수 부근에 위치하게 되어 음향왜곡이 증가하게 된다.

후 기

본 논문은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의

출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다

참 고 문 헌

- (1) Hwang, S. M., Hong, G. S., Lee, H. J, Kim, J. H. and Jeung, S. K., 2004, “ Reduction of harmonic distortion in dual magnet type microspeaker” , IEEE Transactions on Magnetics, Vol.40, No.4, pp.2004~2006.
- (2) Hwang, S. M., Lee, H. J., Kwon, J. H, Hwang, G. Y. and Yang, Y. C., 2006, “ Development of Combined Permanent Magnet Type Microspeakers Used for Mobile Phones” , Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.16, No.2, pp.183~189.
- (3) Hong, D. K., Woo, B. C., Ahn, C. W. and Han, G. J., 2005, “ Vibration Analysis of Microspeaker Diaphragm” , Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 551~554.
- (4) Kinsler, L. E., 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, Inc., New York.