

고속으로 회전하는 광디스크 드라이브의 공력 소음원 규명 및 소음저감방법

Identifications and Reduction Methods of Aerodynamic Noise Sources in High Speed Rotating Optical Disk Drive

김 용 석[†] · 이 덕 주^{*}

Yongseok Kim and Duck Joo Lee

(2006년 11월 20일 접수 ; 2007년 5월 22일 심사완료)

Key Words : Optical Disk Drive(광디스크 드라이브), Aerodynamic Noise Source(공력 소음원), Noise Reduction Method(소음저감방법), CD-ROM, DVD-ROM.

ABSTRACT

Major noise source in high speed rotating optical disk drives (CD and DVD-ROM) arises due to the high-speed airflow produced from the upper and lower surfaces on the rotating disk. The present paper deals with the experimental approach how to identify the noise source based on the fundamental principles of aeroacoustics and to propose a reduction method of the noise source. The CD-ROM device is composed of disk, window tray, motors at the bottom place and electronic circuit plate also located below the window plate. The window is cut in the tray to read the disk information using the optical device located below the tray and moving linearly from the center of the disk through the end of the disk. All components are possible noise generators. Experimental studies were carried out in the anechoic room with various design modifications, such as tray geometry, window size and hole location on tray, to identify the major aerodynamic noise source and significant reductions of the aerodynamic noise were obtained.

1. 서 론

급격하게 변하는 정보화 시대에 돌입하여 컴퓨터가 생활의 필수품으로 자리를 잡게 됨에 따라, 컴퓨터 주변기기들도 놀랄만한 속도로 빠르게 발전하고 있다. 이에 발맞추어 싼 가격으로 고용량의 데이터를 저장할 수 있고, 쉽게 휴대가 가능한 광디스크 드라이브(CD, DVD-ROM)가 편리한 저장매체로 각광을 받고 있다. CD와 DVD는 지름 12 cm의 원판형 모양으로 외관상으로는 구분하기 힘들다. 하지만

데이터 저장과 읽는 방식이 다르기 때문에 전용플레이어를 통해서만 재생할 수 있다. 최근 들어 이들을 동시에 재생할 수 있는 콤보 제품도 등장하면서 CD와 DVD의 경계도 무너지는 추세다.

CD-ROM의 경우 스핀들 모터의 회전속도가 약 10,000 RPM으로 32배속이 물리적 한계로 인식되었었지만 이후에 40배속, 52배속까지 출시되었고, RW 미디어의 보급이 속도경쟁을 지속시켰다. 그러나 10,000 RPM이상의 속도에서 기동되는 CD-ROM 드라이브는 심각한 소음과 진동을 유발한다. 사용자들도 종래에는 데이터의 전송속도가 가장 큰 구매요건이었으나, 최근에는 속도보다는 오히려 얼마나 소음이 적게 나느냐가 가장 큰 구매 요건으로 대두되고 있다.

[†] 교신저자; 정회원, 교통안전공단 항공안전센터
E-mail : yongkim@kotsa.or.kr
Tel : (02) 2037-6048, Fax : (02) 2037-6049
^{*} 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

지난 수년동안 CD-ROM 드라이브에서 발생하는 소음과 진동에 관한 문제들은 공력소음에 대한 연구 동기를 주기에 충분하였고, 특히 회전속도가 빨라짐에 따라 공력소음이 진동소음(구조적소음)을 능가하는 가장 큰 소음으로 여겨지고 있다. 최근에 고속으로 회전하는 디스크에 의한 유동장의 변화와 진동에 대한 연구가 많이 수행되고 있지만⁽¹⁻³⁾, 유동에 의해 발생하는 공력소음⁽⁴⁻⁵⁾에 대한 연구는 미비한 실정이다.

일반적으로 회전체에서 발생하는 소음은 회전속도의 5~6승에 비례함이 알려져 있다. 이것은 단극자(monopole) 음원에 의한 소음이 속도의 4승에 비해, 이중극자(dipole) 음원에 의한 소음이 속도의 6승에 비례함을 미뤄볼 때, 가장 중요한 소음원이 단극자와 이중극자의 조합으로 이뤄졌음을 추측할 수 있다.

CD-ROM드라이브는 회전하는 디스크, 디스크를 고정시켜 주는 윈도우 트레이(window tray)와 구동 모터, 그리고 트레이의 아래에 부착된 전자기판으로 이루어져 있다. CD의 안쪽에서 바깥쪽까지 광센서가 자유롭게 움직이며 데이터를 읽고 쓰게 할 수 있도록 트레이의 중심에서 반경 방향으로 일정한 두께의 윈도우가 뚫려 있다. 이러한 모든 구조물의 형상 특성은 모두 유동과 구조물의 상호작용으로 발생하는 공력 소음원으로 작용할 수 있다.

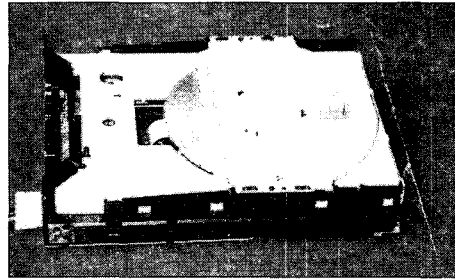
이 연구는 고속으로 회전하는 디스크 주위의 유동의 흐름에 의해 발생하는 공력소음을 실험적으로 고찰하고, 그 소음원을 분석하여 궁극적으로 CD-ROM 드라이브의 유동에 기인한 소음을 저감시키는 것을 목적으로 한다. 트레이와 가이드 벽(guide wall)의 형상을 변화시키거나 트레이의 원형 구멍의 수와 위치를 변화시키는 등, 여러 가지 형상에 대한 비교 실험을 수행함으로써, 각 형상 특성이 CD-ROM 드라이브 전체 소음에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 이러한 방법을 통해, CD-ROM 드라이브에서 발생하는 공력소음에 가장 큰 영향을 미치는 형상 변수를 찾아 그 형상을 최적화시킴으로써 소음을 저감할 수 있다.

이 논문은 2절에서 실험 방법 대해 다루고 3절에서는 디스크의 유동특성 및 공력 소음원에 대하여 소개하고, 4절에서 실험 결과를 고찰하며, 5절 결론으로 글을 맺는다.

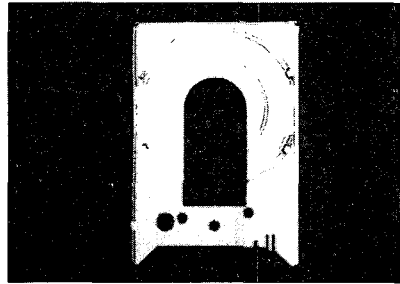
2. 실험 방법

2.1 CD-ROM 드라이브의 형상

이 연구에 사용된 일반적인 CD-ROM 드라이브의 형상은 Fig. 1과 같다.



(a)



(b)

Fig. 1 Photographs of the CD-ROM device for the present experiment. (a) Entire view of the CD-ROM geometry, (b) window tray

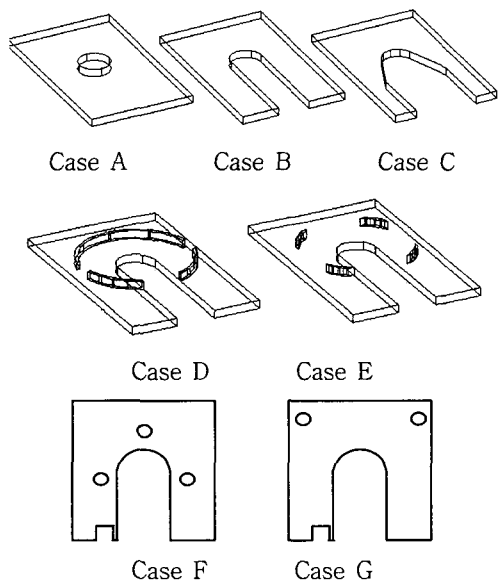


Fig. 2 Various schematic diagrams of the tray and window geometry

Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 중심부에 윈도우가 뚫려있고, 원형의 턱을 갖는 가이드 벽 및 전자기판의 방열을 위해 작은 구멍들이 여러 곳에 뚫려 있다. 따라서 이러한 형상들의 조합 중 다양한 RPM 운전 조건 하에서 공력소음을 줄 일 수 있는 최적안을 실험을 통하여 도출하고자 한다.

이 연구에 사용된 다양한 종류의 트레이 형상을 Fig. 2에 도시하였다. 윈도우의 크기, 가이드 벽의 뚫린 정도 및 홀(hole)의 개수와 위치를 변화시켜 실험을 수행하였다.

각각의 경우의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- Case A: 윈도우와 가이드 벽(guide wall)이 모두 없는 경우
- Case B: 좁은 윈도우를 갖고, 가이드 벽이 없는 경우
- Case C: 넓은 윈도우를 갖고, 가이드 벽이 없는 경우
- Case D: 좁은 윈도우를 갖고, 일반적인 형상의 가이드 벽이 경우
- Case E: 좁은 윈도우를 갖고, 최소한의 가이드 벽을 둔 경우
- Case F: CD가 돌아가는 밀판에 3개의 홀(hole)을 삼각형 형태로 배치한 경우
- Case G: CD가 돌아가는 밀판에 2개의 홀(hole)을 좌우 구석에 배치한 경우

2.2 실험 방법

모든 실험은 Cutoff 주파수가 350 Hz인 무향실에서 수행되었고, 소음 측정을 위해 1/2 inch 콘덴서타입 마이크로폰(Type 4165, B&K)을 이용하였다. 측정 위치는 Fig. 3처럼, CD-ROM 드라이브의 앞쪽 윗 모서리에서 10 cm 떨어진 곳에 마이크로폰을 고정하였다. 측정 위치의 선정 이유는 PC 사용자들이 주로 광디스크 드라이브의 전면 방향으로 발생하는 소음을 가청하게 되고, 여러 가지 형상 및 위치변화에 따른 실험 결과가 명확히 비교될 수 있었기 때문이다.

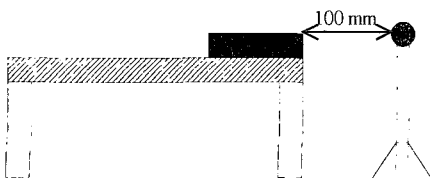


Fig. 3 Schematic diagram showing the measuring position

많은 양의 데이터를 빠르게 얻고 처리하기 위하여 FFT를 하였으며, 모든 데이터는 400번의 선형 평균을 취하였고, 12.8 kHz까지 4 Hz의 간격으로 측정하였으며, 해닝 윈도우(hanning window)를 사용하였다.

3. 유동 특성 및 공력 소음원

Fig. 4와 같이 회전하는 디스크 주위 유동장은 원심 펌프(centrifugal pump)와 유사한 유동 특성을 보이고 이때 약 10,000 RPM 이상으로 회전하는 52 배속 CD-ROM의 레이놀즈 수는 다음과 같이 구해진다.

$$Re = r^2 \times \omega / \nu \approx 1.8 \times 10^5$$

이때 ω 는 회전각속도, ν 는 동점성계수, r 은 디스크의 반경이다. 디스크 주위 유동의 속도성분은 원주 방향 성분과 반경 방향 성분으로 나뉘어진다. 원주 방향 성분은 트레이에 뚫린 윈도우를 통해 빠져나가거나 트레이 구조물과 간섭을 일으키게 되고, 반경 방향 성분은 가이드벽과 부딪혀 복잡한 형태의 와류를 발생시킨다.

CD-ROM 드라이브의 공력 소음원 중 하나는 디스크 자체 소음이다.

이는 Fig. 5의 Kobayashi⁽⁶⁾ 등의 디스크 유동 가시화 실험에서 예측할 수 있다. 디스크의 반경 끝부분에서 와류 흘림(vortex shedding)과 불안정성이

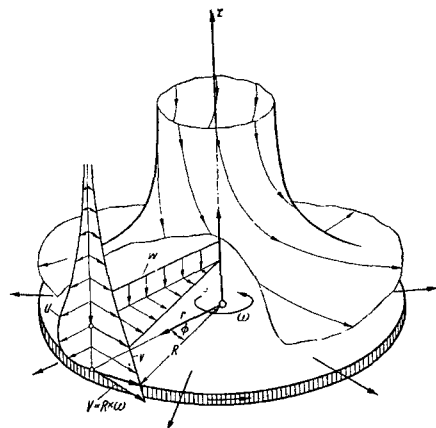


Fig. 4 Streamlines and 3-D velocity components in the neighborhood of a rotating disk in a fluid at rest

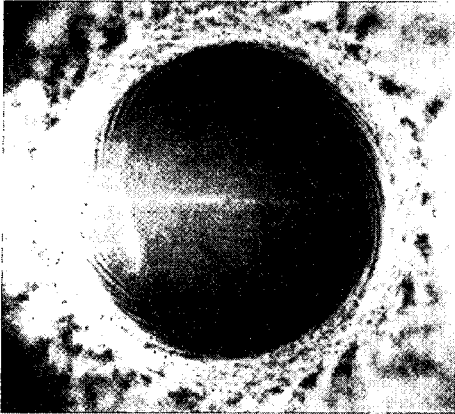


Fig. 5 Flow visualization on a disk rotating in air at 1,800 RPM [Kobayashi et al.⁽⁶⁾]

발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 회전하는 디스크 자체도 소음원으로 작용함을 보여준다.

CD-ROM시스템의 소음원은 회전하는 디스크 표면 상하에서 존재하는 고속의 유동에 기인해서 발생하며 주된 소음원은 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 원주 방향의 유동이 윈도우와 공동(cavity)형태로 상호작용을 일으켜 공동소음을 발생시키거나, 윈도우를 빠져나가면서 전자기판의 구조물과 부딪힐 때 발생할 수 있다. 둘째, 반경 방향의 유동이 가이드 벽과 부딪혀 불안정한 와류유동에 기인한 소음을 발생시킬 수 있다. 실제 제품의 트레이 형상에서는 디스크의 데이터를 읽고 쓰기 위해 윈도우가 반드시 필요하고, 디스크를 흔들림 없이 정확한 위치에 고정하기 위하여 가이드 벽 또한 없어서는 안 된다. 따라서 이러한 형상이 주요한 공력 소음원으로 작용하게 되므로, 기존의 기능을 유지하면서 소음을 저감할 수 있는 형상 최적화가 요구된다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 실험에 사용된 CD-ROM 드라이브 가이드 벽 주위의 유동을 PIV(particle image velocimetry)를 사용하여 가시화 하였다. 가이드 벽 주위에서 강한 와류 흐름을 볼 수 있는데 연속적인 와류 흐름은 벽면의 압력을 변화시키게 되어 공력 소음원으로 작용함을 알 수 있다. 따라서 가이드 벽의 최소화를 통해서 소음 저감을 이룰 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 7은 스모크 와이어(smoke wire)를 이용하여 CD-ROM 주위, 특히 윈도우 근처 유동장을 가시화



Fig. 6 Flow visualization around the guide wall by using PIV

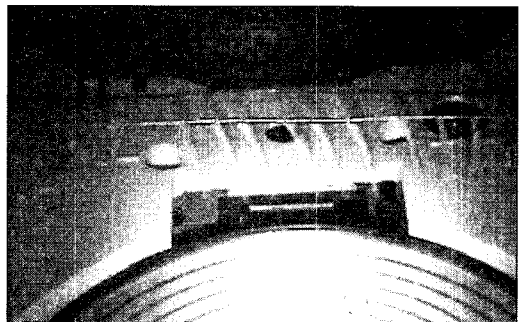


Fig. 7 Flow visualization around the tray window using the smoke wire

한 것이다. 가시화를 통해 트레이 바닥에 뚫려 있는 윈도우로 유동이 빨려 들어감을 볼 수 있다. 이렇게 빨려 들어간 유동은 트레이 아래에서 많은 구조물과 충돌을 일으킬 뿐만 아니라, 내부에서 공동(cavity)에 의한 공진을 유발할 수도 있다. 실제로 윈도우가 클수록 더욱 많은 유동이 빨려 들어감을 확인할 수 있었고, 소음도 더 크게 측정 되었다.

Fig. 8은 무향실의 배경소음(background noise)과 CD-ROM 모터의 소음을 주파수 스펙트럼으로 나타낸 것으로 배경소음은 모든 주파수에서 22 dBA 이하의 값을 가짐을 알 수 있다. 모터 소음은 디스크 없이 모터만 10,000 RPM으로 회전하였을 때의 소음을 측정된 것으로, 각 피크는 RPS(revolution per second)의 배수에 해당하는 주파수를 갖는다.

이러한 피크는 디스크가 있을 때, 유동의 영향으로 주파수에 따라 증폭되거나 감소하게 된다. 그러나 OSPL에는 크게 영향을 미치지 않으므로, 이 연구에서는 모터 소음에 의한 피크값은 제거하고 공력 소음을 분석하였다.

Fig. 9는 디스크 자체 소음을 분석하기 위해서 자유공간에서 디스크만 회전할 때의 소음을 두 곳의 각도에서 측정된 결과이다. Position A는 디스크 중심에서 45도, Position B는 디스크에서 수직 상 방향으로 10 cm 떨어진 위치를 나타낸다. 두 경우 각각 1,300 Hz와 1,850 Hz의 두 개의 주파수에서 피크가 발생하고 비슷한 주파수 특성을 보이지만, B위치에서 소음레벨이 크게 측정되었고 이것은 소음 전파의 방향성(directionality)이 존재함을 보여준다.

두 피크 주파수의 소음원은 첫째, 디스크 가장자리에서의 불안정한 와류흔림(vortex shedding)에 의한 벽면 압력 섭동(fluctuation)에 기인하고, 둘째 3차원 효과로 인한 원주방향 음향모드에 의해 발생한다고 생각된다. 이에 대해서는 향후 연구 과제로 삼기로 한다.

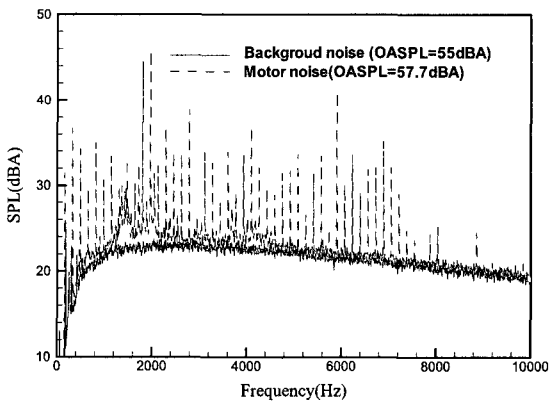


Fig. 8 Frequency spectrum of the background noise and motor noise

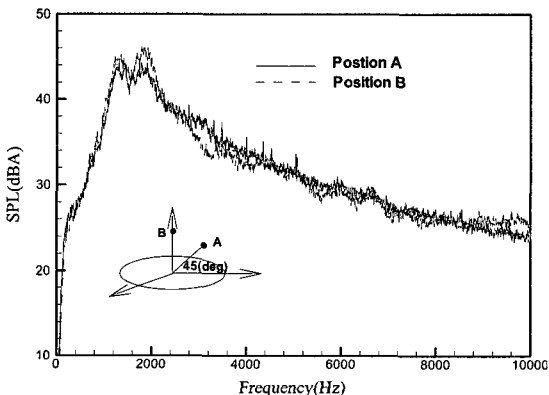


Fig. 9 Frequency spectrum of rotating disk noise in the free field

Fig. 10은 윈도우의 크기가 공력소음에 미치는 영향을 비교한 실험 결과이다. Fig. 2에서 윈도우의 크기가 각기 다른 A, B, C 세가지 타입에 대해 측정하였다. Fig. 10의 실험 결과를 보면 윈도우의 크기가 커질수록 음압레벨(SPL)이 커짐을 볼 수 있다. 그 이유는 윈도우의 크기가 커질수록 윈도우 아래로 빨려 내려가는 유동의 양이 증가하여, 윈도우 밑 전자기관과 충돌하는 유동이 증가하기 때문으로 판단된다. 윈도우의 크기가 전체 공력소음에 미치는 영향은 윈도우가 전혀 없는 경우(Case A)가 윈도우가 작은 경우(Case B)보다 2.8 dB, 윈도우가 큰 경우(Case C)보다 5.5 dB 더 작게 측정되어 그 차이를 명확하게 확인할 수 있다.

다음은 가이드 벽(guide wall)의 공력소음에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 형상이 각기 다른 Case

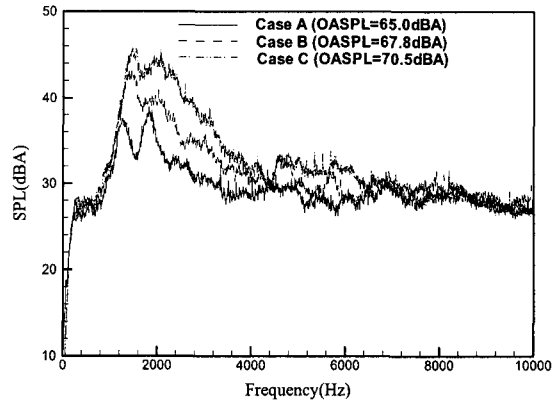


Fig. 10 Frequency spectrum showing the window size effect

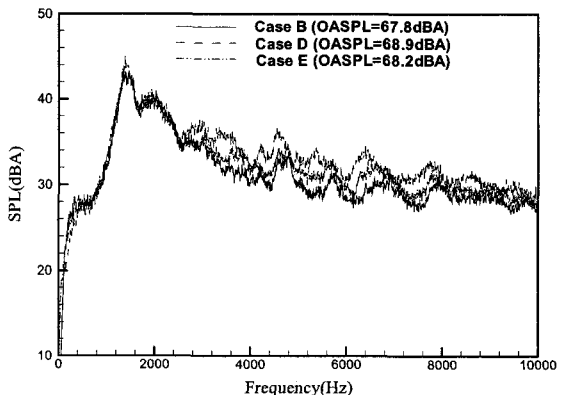


Fig. 11 Frequency spectrum showing the guide wall effect

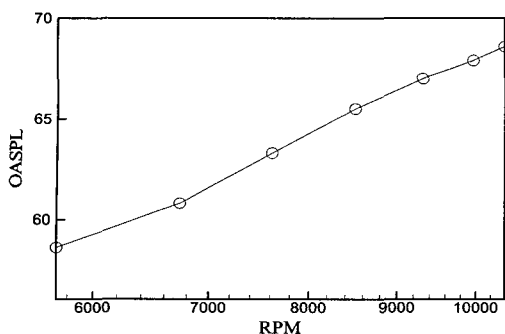


Fig. 12 Overall sound pressure level as a function of rotating RPM

D, E의 경우와 가이드 벽이 전혀 없는 Case B와의 비교실험을 수행하였다.

Fig. 11에서 보듯이 가이드 벽 형상이 변함에 따라 3,000 Hz에서 8,000 Hz에 걸친 광대역 소음(broadband noise) 변화가 두드러짐을 확인할 수 있다. 가이드 벽의 최소화에 의한 전체 소음레벨은 차이가 거의 없으나 고주파수 광대역 소음은 소비자들이 불쾌감을 느낄 수 있으므로 음질 향상면에서 가이드 벽을 최소화하는 설계가 필요하다고 생각된다.

소음원의 정확한 규명과 향후 개발될 고속 CD-ROM 드라이브의 소음 예측을 위하여 회전 RPM에 따른 소음 변화를 실험하였다. Fig. 12에서 보듯이, x축의 RPM은 로그 스케일로 도시하였으며, 이는 6,000~7,000 RPM사이의 간격과 9,000~10,000 RPM사이의 간격차이로 확인할 수 있다. x축과 y축의 스케일이 동일하고, RPM은 디스크의 회전속도($v=r\omega$, 디스크 반경은 6 cm로 가정)로 표현될 수 있으며 OASPL과 $\log(\text{RPM})$ 과의 관계가 선형성을 보여주고 있으므로 음압강도(intensity)는 확실히 속도의 지수승에 비례한다고 볼 수 있다. 그러나 이 연구에서는 몇개의 측정점에서 독립적으로 소음을 측정하였으므로, 전 공간의 음압강도를 바로 계산하기에는 한계가 있다. 따라서 향후에는 수치해석을 통하여 음압과 디스크 회전속도와의 상관관계를 도출하고, 디스크 표면에서의 압력섭동이 소음 및 디스크진동에 미치는 영향에 대해 연구를 수행할 예정이다.

Fig. 13은 RPM의 변화에 따른 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. RPM의 변화에 관계없이 같은 주파수에서 협대역(narrow-band) 피크가 발생하고, RPM이 증가함에 따라서 전 주파수 범위에 걸쳐 고르게 SPL이 증가하는 경향을 보인다.

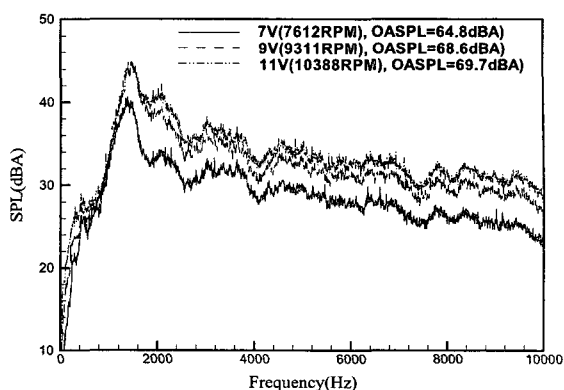


Fig. 13 Frequency spectrum showing the rotating RPM effect

5. 결 론

이 논문은 실험을 통하여 광디스크 드라이브인 CD-ROM의 공력 소음원을 규명하고, 소음저감 방안을 제시하였다.

회전하는 디스크 자체 소음원은 디스크 익단(tip)에서의 와류 흘림(vortex shedding)과 3차원 효과에 기인한 원주방향(circumferential) 모드로 추정되었다. CD-ROM 시스템의 유동에 의한 주된 소음원은 트레이 윈도우를 지나는 유동이 공동(cavity)과 상호작용으로 발생하는 소음 및 이 유동이 트레이 밑에 위치한 전자회로 기판에 부딪혀서 발생하는 소음을 알았고 윈도우 크기가 증가할수록 소음도 증가함을 확인하였다. 다른 소음원은 디스크의 윗면과 아랫면에서 발생한 와류가 가이드 벽에 충돌하면서 생기는 광대역 소음을 PIV 가시화 실험과 주파수 스펙트럼을 통해 확인하였다.

RPM에 따른 소음 측정을 통해 OASPL과 $\log(\text{RPM})$ 과의 관계가 선형성을 보여주고 있으므로 음압강도(intensity)는 확실히 속도의 지수승에 비례함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Angelo, III, C. D., Mote Jr, C. D., 1993, "Aerodynamically Excited Vibration and Flutter of a Thin Disk Rotating at Supercritical Speed", Journal of Sound and Vibration, Vol. 168, No. 1, pp. 1~54.
- (2) Yasuda, K., Torii, T. and Shimizu, T., 1992,

"Self-excited Oscillations of a Circular Disk Rotating in Air", JSME International Journal, SeriesIII, Vol. 35, No. 3. pp. 982~989.

(3) Kim, S., Han, G., Son, H., 1998, "A Study of Characteristics of Disk Vibration and Rotating Airflow in Magneto Optical Disk Drives", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 44, No. 3, pp. 601~605.

(4) Kim, D.-H, Oh, S.-W. and Kim, Y.-S., 2005, "A Study on the Characteristic of Driving Sound Noise for Various Optical Disk Drives",

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 10, pp. 1169~1176.

(5) Song, I. S., Park, G. S., Choi, H. H., Kim, S. K. and Lee, S. Y., 1998, "A Study on Characteristics of Airflow and Sound Noise Induced by Disk Rotation in Optical Disk Drives", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 191~198.

(6) Kobayashi, R., Kohama, Y. and Takamodate, Ch., 1980, "Spiral Vortices in Boundary Layer Transition Regime on a Rotating Disk", Acta Mech., Vol. 35, pp. 71~82.