大韓機械學會論文集 第10卷 第3號, pp. 285~291, 1986.

<論 文>

時間 平均 홀러그래픽 干涉計에 의한 平面스피이커의 改善에 관한 硏究

李起白*·金修光**·權永吉**·安京勉***·李丙熏*

(1985年 8月 31日 接受)

A Study for the Improvement of the Plane Speaker by Time-Averaged Holographic Interferometry

Ki Baik Lee, Su Kwang Kim, Young Gil Kwon, Kyung Moun An, and Byung Hoon Lee

Key Words: Holography(홀러그래피), Interferometer(간섭계), Hologram(홀러그램), Speaker(스피이커), Laser(레이저), Regeneration(재생)

Abstract

The plane speaker is inspected by the free vibratron theory, the sound pressure, and the holographic interferometry.

It is shown that time-average holographic interferometry is useful for the vibration analysis of the plane speaker.

The position of supporter derternined experimentally and theoretically, the value of r/a, is 0.68.

Theoretical analysis of the free vibration for the plate agrees pretty well with the experimental results.

The plane speaker is distorted vibrationally by the suppoter, but the distortion is not seen in the newly designed speaker.

1. 序 論

最近에 음향기기의 性能向上은 눈부시게 뛰어나고 있지만 유독 스피이커만은 그대로 남아있다. 그것의 最大의 原因은 音質上 특히 重要한 中高音部의 非直線 비틀림에 있다고 생각한다. 특히 저음스피이커(woofer)의 境遇, 이 비틀림의 成分은 청각적으로 가장 민감한 1~4 KHz의 범위에 있는 것이 많고 音質피해도 크다. 스피이커의 非直線비틀림의 개선 方法에는 크게 두개로 나눌 수 있다. 즉 振動系와 驅動系의 개선方法[1]이다. 物理的으로 우수한 스피이커란 피스톤 운동을 하는 진동영역이 넓어 모든 진동수에 대하여 음향재생이 잘되는 스피이커를 말할 수 있다[2]. 分割 모우드를 없에고, 피스톤 모우드를 넓히고, 또한 원추형 스피이커에서 많이 나타나는 음향캐비티[3]현상을 줄이기 위하여 最近에는 平面스피이커를 개발하여 사용하고 있다.

本 硏究에서는 平面스피이커의 振動板의 振動을 理論的으로 해석하고 시간 평균 홀러그래픽 간섭계로 조

* 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학과
** 부산대학교 대학원
*** 금성포스타

사하여, 지지대의 지지위치 선정과 피스톤 진동 모우드를 넓히는 方法을 제시하고, 비틀림이 적은 振動板을 設計하는 方法을 提示하여 平面스피이커의 性能을 向上시키는 데 있다.

2. 振動板의 振動解析

균일한 재질로 된 圓型平板의 振動에 대한 微分方程式은 다음과 같이 쓸 수 있다[4].

$$D\nabla^4 w+\sigma\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0 \tag{1}$$

여기에서 $D=Eh^3/12(1-\nu^2)$이고 ∇^4은 극좌표계의 4차원 중조화 미분 연산자, E는 彈性係數(Young's modulus), h는 板의 두께, ν는 포와송의 比, σ는 平板의 單位面積當의 質量密度를 나타낸다. 또한 t는 時間을 表示한다. 自由振動이라고 가정하여 진동판의 임의의 시간에서의 변위를

$$w=W\cos\omega t \tag{2}$$

로 表示하면 식(1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\nabla^4-K^4)W=0 \tag{3}$$

여기서 $K^4=\sigma\omega^2/D$이다. ω는 각 주파수(angular frequency)를 나타내고 W는 位置만의 함수를 나타낸다.

식(3)의 一般解를 極座標로 나타내면

$$\begin{aligned}W(r,\theta)=&\sum_{n=0}^{\infty}[A_nJ_n(K_r)+B_nY_n(K_r)+C_nI_n(K_r)\\&+D_nK_n(K_r)]\cos n\theta\\&+\sum_{n=0}^{\infty}[A_n^*J_n(K_r)+B_n^*Y_n(K_r)\\&+C_n^*I_n(K_r)+D_n^*K_n(K_r)]\sin n\theta\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 Fig. 1과 같이 圓型平板의 中心에 極座標의 原點을 두고 平板의 內部가 均一하다고 가정하면 $Y_n(K_r)$와 $K_n(K_r)$은 $r=0$에서 無限大의 應力을 피하기 위해서는 무시해야 한다. 또한 지름에 대하여 대칭인 境界조건을 갖는다면 餘弦項은 포함할 필요가 없다. 따라서 식(4)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_n=[A_nJ_n(K_r)+C_nI_n(K_r)]\cos n\theta \tag{5}$$

여기서 n은 마디직경의 수에 해당하고 0에서 ∞까지

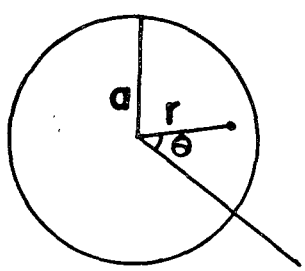


Fig. 1 Free circular plate

취할 수 있다. 境界條件으로써 전단력과 비틀림 모우멘트가 0이라는 조건, 즉

$$\begin{aligned}V_r(a)&=0\\M_r(a)&=0\end{aligned} \tag{6}$$

을 使用하면 다음과 같은 주파수방정식(frequency equation)이 유도된다[5].

$$\begin{aligned}&\frac{\beta^2J_n(\beta)+(1-\nu)[\beta J_n'(\beta)-n^2J_n(\beta)]}{\beta^2J_n(\beta)-(1-\nu)[\beta I_n'(\beta)-n^2I_n(\beta)]}\\&=\frac{\beta^3I_n'(\beta)+(1-\nu)n^2[\beta J_n'(\beta)-J_n(\beta)]}{\beta^3I_n'(\beta)-(1-\nu)n^2[\beta_nI'(\beta)-I_n(\beta)]}\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\beta=ka$를 나타낸다. $\beta\gg n$일때에 식(7)은 근사공식[6]에 의하여 다음과 같은 解를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}&\frac{J_n(\beta)}{J_n'(\beta)}\\&\cong\frac{[\beta^2+2(1-\nu)n^2][I_n(\beta)/I_n'(\beta)]-2\beta(1-\nu)}{\beta^2-2(1-\nu)n^2}\end{aligned} \tag{8}$$

식(7)의 根중 작은 根의 값은 $J_n'(\beta)$와 $J_n(\beta)$함수의 0차 사이에 존재하고 큰 根의 값은 다음과 같은 수열로부터 구할 수 있다. 즉

$$\beta=\alpha-\frac{m+1}{8\alpha}-\frac{4(7m^2-22m+1)}{3(8\alpha)^3} \tag{9}$$

이다. 여기서 $m=4n^2$이고 s는 마디원의 수이고, $\alpha=\frac{\pi}{2}(n+2s)$이고 식(9)는 다음과 같은 근사식으로 쓸 수 있다.

$$\beta\cong\frac{\pi}{2}(n+2s) \tag{10}$$

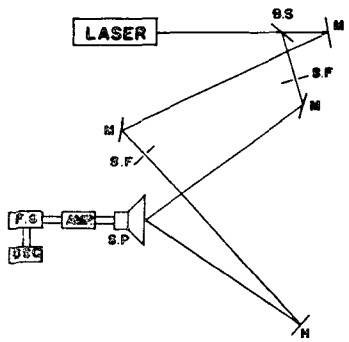
식(8), (9)를 이용하여 각 n, s에 해당는 β^2의 값을 구할 수가 있다. 또한 마디원에 대한 반경의 비인 $\rho=\frac{r}{a}$은 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}&J_n(\rho\beta)\\&=\frac{(1-\nu)[\beta J_n'(\beta)-n^2J_n(\beta)]+\beta^2J_n(\beta)}{(1-\nu)\left[\beta\frac{I_n'(\beta)}{I_n(\rho\beta)}-n^2\frac{I_n(\beta)}{I_n(\rho\beta)}\right]-\beta^2\frac{I_n(\beta)}{I_n(\rho\beta)}}\end{aligned} \tag{11}$$

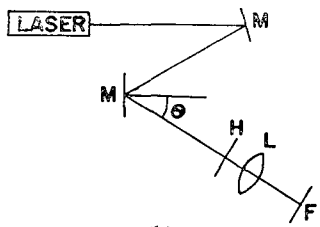
3. 實驗裝置 및 方法

Fig. 2(a)는 시간 평균 홀러그래픽 간섭계를 이용하여 振動板의 진동상태를 알아보기 위하여 홀러그램 제작에 사용한 裝置圖이다. 사용한 광원은 5 mW He-Ne 레이저이고 홀러그램 필름은 고감도 홀러그래피용인 코닥 SO 253이다. 또한 Fig. 2(b)는 홀러그램의 재생을 위한 장치도이고, 재생에 사용한 필름은 코닥사의 Verichrome(ASA125)이다.

Fig. 3은 스피이커의 출력-음압특성을 측정하기 위



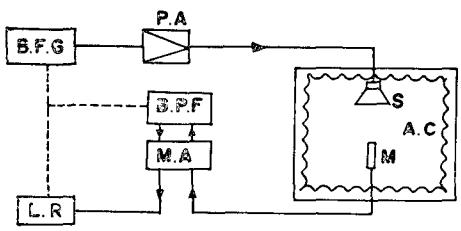
(a)



(b)

(B.S : Beam splitter, M : Mirror, AMP. : Power amplifier, S.F : Spatial filter, L : Lens, F.G : Function generator, S.P : Speaker, H : Hologram, OSC. : Oscilloscope, F : Film)

Fig. 2 The scheme of holographic construction and reconstruction



M.A. : Measuring amplifier
L.R. : Level record
A.C. : Anechoic chamber
S : Speaker
M : Microphone
------ : Interlock
B.F.G. : Beat frequency generator
P.A. : Power amplifier
B.P.F. : Band pass filter

Fig. 3 Set up for automatically plotting the frequency response of speaker

한 장치도이다. 濾波器와 기록계와 함께 연동되는 함수 발생기에 의해 발생하는 餘弦波를 증폭기로 증폭하여 무음향실에 설치된 스피이커로 보내어 진다. 스피이커에서 발생한 음향을 마이크로 받아 증폭기를 거쳐 기록계에 기록된다. 濾波器의 초기치 설정에 따라 1次, 2次, 3次 高調波의 음압특성을 20 Hz에서 20 kHz 까지 측정한다.

4. 結果 및 考察

식(8)과 식(9)을 이용하여 β^2/β_0^2의 값을 수치계산에 의하여 구하면 Table 1과 같이 주어진다.

또한 식(11)로 부터 $\rho=\frac{r}{a}$의 값을 구해보면 Table 2와 같다.

Fig. 4는 Table 1에서 보인 첫째 모우드에서 여덟번째 모우드 까지의 마디직경과 마디원의 수를 나타낸 것이다. 실재실험상으로는 자유단으로 진동을 시킬 수가 없으므로 이러한 모우드를 전부 재현시키는 것은 힘든다. 그러나 이러한 진동모습의 일부를 실험적으로 나타내고 평면스피이커의 지지대의 위치를 구하기 위하여 Fig. 5와 같이 스피이커의 에지(edge)가 달린 원형평판(honeycomb disc)을 스피이커 앞에 설치하여 공기진동으로 진동 시켰다. 스피이커에 사용된 에지는 얇은 스폰지 화합물로써 유연한 재질이므로 $V_r(a)\fallingdotseq 0$,

Table 1 Values of $\beta^2=\omega a^2\sqrt{\rho/D}$ for a completely free circular plate

S	β^2/β_0^2 for values of n ($\beta_0^2=5.253$)						
	0	1	2	3	4	5	6
0			1	2.33	4.11	6.30	8.79
1	1.73	3.91	6.71	10.07	13.92	18.23	23.03
2	7.34	11.40	15.97	21.18	27.18	33.31	40.03
3	16.71	22.65	29.32	36.57	44.22	52.27	60.86

Table 2 Radii of nodal circles $\rho=\frac{r}{a}$ for a completely free circular plate

S	ρ for values of n			
	0	1	2	3
1	0.680	0.781	0.822	0.847
2	0.841 0.391	0.871 0.4972	0.8897 0.562	0.925 0.605
3	0.893 0.591 0.257	0.932 0.643 0.351	0.936 0.678 0.414	0.939 0.704 0.460

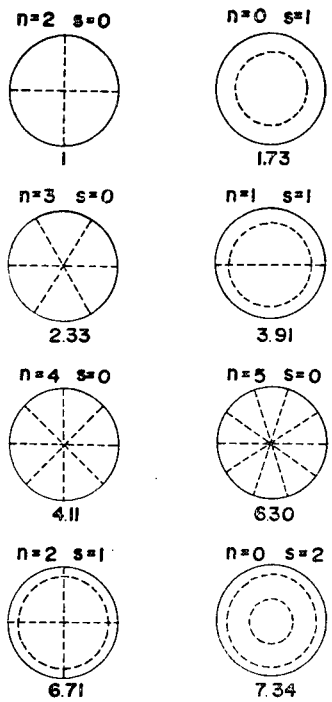


Fig. 4 The vibration modes of circular plate

$M_r(a)\neq 0$로 생각 할 수 있고, 이상적인 스피이커의 설계는 $V_r(a)=0$, $M_r(a)=0$이어야 하나, 실제 $V_r(a)=0$, $M_r(a)=0$인 에지를 만드는 것은 불가능하다.

Fig. 6의 (a)~(f)는 여러가지 주파수에서 스피이커 에지가 달린 원형평판을 공기로 진동 시켰을 때 나타나는 진동모습을 보인 홀러그램의 재생상이다. Fig. 6 (a)는 정지상이고 Fig. 6(b)는 1100 Hz에서 나타나는 두번째 모우드이다. 여기에서 구한 r/a의 比는 0.68로 이론치와 일치한다. 따라서 이 위치에 지지대를 설치하면 마디원을 제거하고 넓은 영역에서 피스톤 진동을 유지할 수 있을 것으로 생각한다. Fig. 6(c)에서 보는 바와 같이 1160 Hz에서는 자유진동이 아닌 일부 고정단 진동같은 모양이 나타나는데, 이것은 에지설계의 잘못이 아닌가 생각된다. Fig. 6(d)에서 보는 바와 같이 1900 Hz에서는 진동의 형태에 비틀림이 나타나고 있는데, 에지의 재료가 불균일하거나, 접착상태가 불균일한 것에서 나타난 것으로 생각된다. Fig. 6(e)는 2530 Hz에서 넷째 모우드의 모습을 하고 있는데, 두번째 모우드의 주파수에 대한 넷째 모우드의 주파수 비는 2.3이므로 이론치인 2.26에 거의 근사하다. 또한 Fig. 6(f)에서 보인 바와 같이 4000 Hz에서는 여덟번째 모우드가 나타나고 있다. 이 주파수는 두번째 모우드의 주파수(1100 Hz)에 대한 비가 3.63이므로 이론치(4.24)에 근사하다. 이 실험에서는 첫번째 모우드가

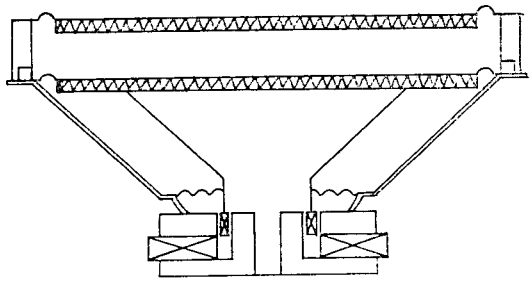


Fig. 5 The apparatus of loud speaker in air vibration

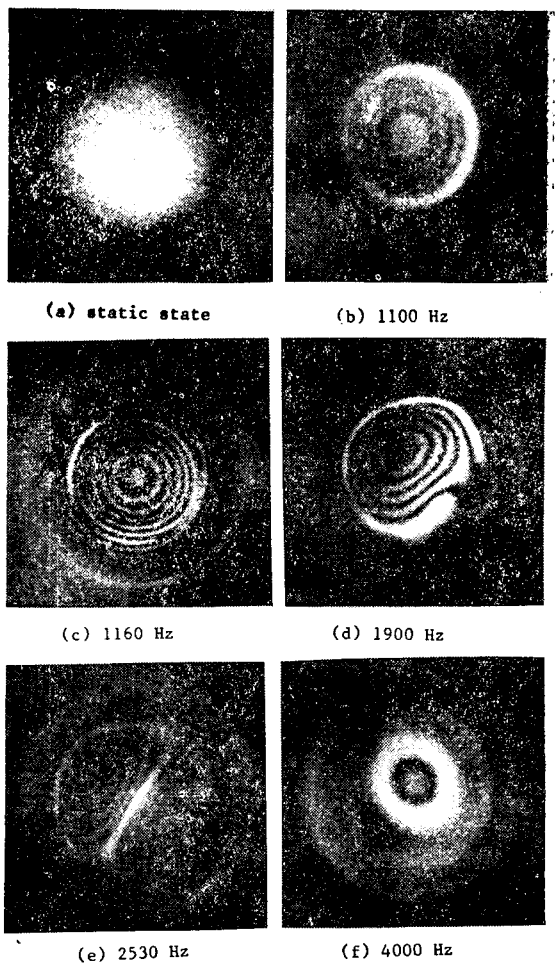


Fig. 6 The holographic reconstruction of loud speaker by air vibration

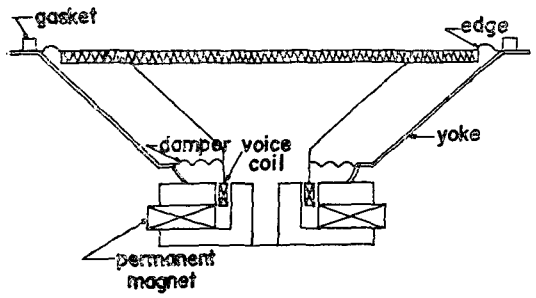


Fig. 7 Structure of honeycomb plane speaker

나타나지 않았는데 그 원인은 완전한 자유단의 진동이 아니기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8의 (a)~(j)는 원형평판(honycomb disc)으로 Fig. 7과 같이 평면 스피이커를 만들었을때 스피이커의 진동판의 진동모습을 시간 평균 홀로그래픽 간섭계로 관찰한 것이다. Fig. 8(a), (b)에서 보는 바와 같이 870 Hz 이하에서는 비교적 정상적인 피스톤 진동을 하고 있다. 그러나, Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 960 Hz에서는 비틀림이 나타나는데 이 원인은 후에 알 수 있는 바와 같이 지지대의 잘못이라는 것을 알 수 있다. Fig. 8(d)에서는 1300 Hz에서 나타나는 진동모습을 보이고 있는데, 일종의 분할 진동모습을 취하고 있다. 즉 에지와 지동판이 180°位相을 갖고, 진동하는 모습을 취하고 있다. Fig. 8(e)에서 (j)까지 진동모습에서는 심한 비틀림현상을 보이고 있다. 이것을 보아서 알 수 있듯이 이 스피이커의 진동계의 설계를 수정해야 할 것이다.

Fig. 9는 이 스피이커의 음압특성을 조사한 그림이다. 2700 Hz 근처에서는 예리한 山과 谷이 나타나는데 이 스피이커는 2700 Hz 근처까지만 사용할 수 있다는 것을 보이고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 50 Hz에서 2700 Hz까지 사용하더라도 2次, 3次高調波의 음압특성은 비교적 높은 비틀림이 나타나고 있어서 좋은 스피이커라고 할 수가 없다. 2次, 3次 高調波의 음압특성의 비틀림을 줄이기 위해서는 驅動系의 磁氣回路의 設計를 개선해야 할 것이다[7].

Fig. 10은 지지대(진동판의 지지대)의 진동 모습을 나타내는 홀로그램의 재생상이다. 이들 재생상에서 알 수 있듯이, 지지대의 운동이 상하운동만 하는 것이 아니고, 불균일한 좌우진동을 하고 있음을 알 수 있다. 이 불균일한 좌우진동에 의하여 앞에서 보는 바와 같이 진동판의 진동에 심한 비틀림이 나타나는 것을 짐작할 수 있다. 따라서 이와 같은 지지대의 좌우진동을 줄이기 위하여 Fig. 11(a)는 지지대에 스칠로폰

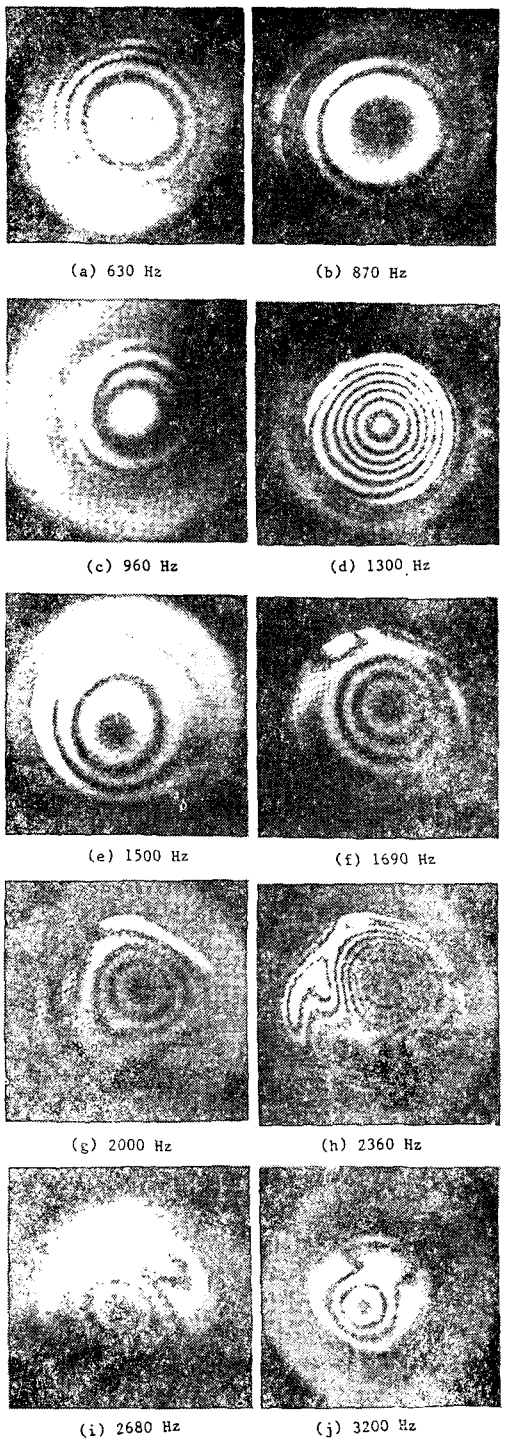


Fig. 8 The holographic reconstruction of loud speaker

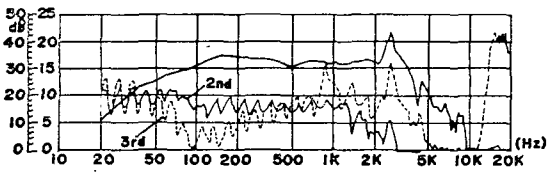
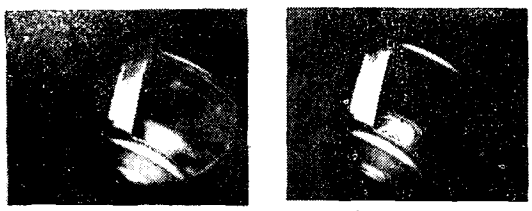
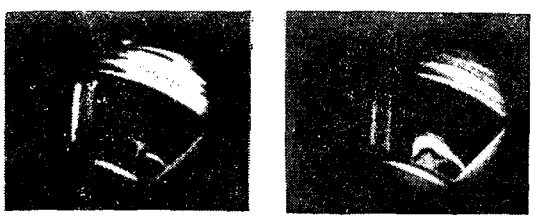


Fig. 9 The sound pressure level of loud speaker



(a) 1500 Hz 4 (b) 2360 Hz 4



(c) 2680 Hz 2 (d) 3200 Hz 5

Fig. 10 The characteristics of vibration of supporter (*The right numbers represent the locations of supporter*)

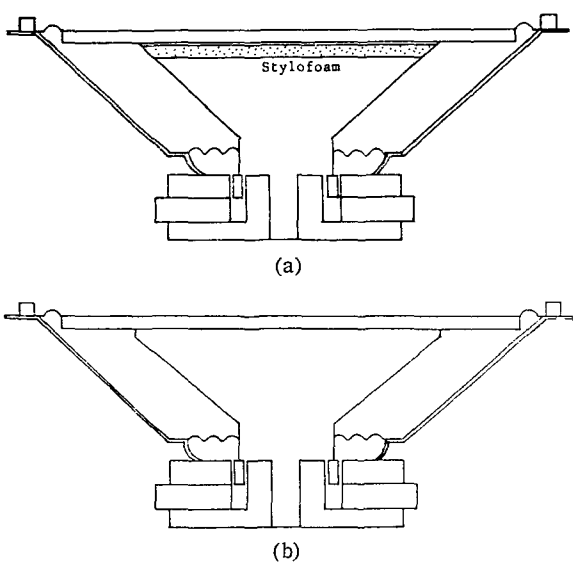
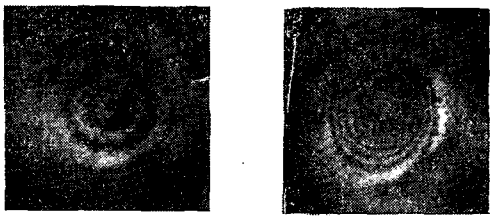
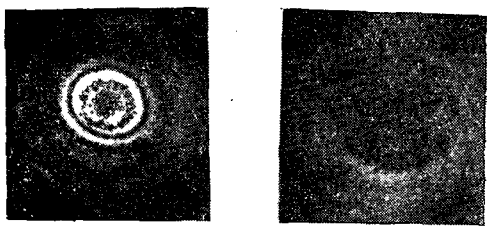


Fig. 11 The newly designed structure of supporter



(a) 830 Hz (b) 2491 Hz



(c) 2519 Hz (d) 3704 Hz

Fig. 12 The holographic reconstructions of newly designed speaker

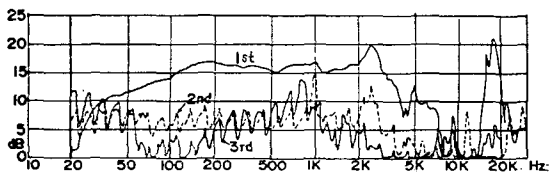


Fig. 13(a) The sound pressure level of the loud speaker designed like Fig. 11(a)

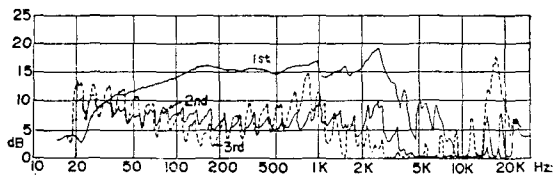


Fig. 13(b) The sound pressure level of the loud speaker designed like Fig. 11(b)

(stylofoam)을 부착하여 강성을 높였고, Fig. 11(b)는 진동판의 운동방향에 직각되게 작용하는 구동력을 차단하기 위하여 지지대를 진동판에 수직되게 부착하여 지지대의 설계를 변경하여 보았다.

Fig. 12의 (a)~(d)는 Fig. 11(a), (b)와 같은 설계에 의하여 만든 스피이커의 진동현상을 홀러그래픽 간섭계로 조사한 것이다. 이 사진에서 보는 바와 같이 전반적으로 비틀림 진동이 나타나지 않고 정상적인 피스톤 진동을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 12(c)에서는 2519 Hz에서 마디원을 가지는 분할 진동을 하고 있다. 따라서 이와 같은 설계에 의한 스피이커로 2519

Hz까지 사용할 수 있다.

Fig. 13(a), (b)는 Fig. 11(a), (b)와 같은 설계에 의하여 만들어진 스피이커의 음압특성을 조사한 그림이다. 이 음압특성을 보면 알 수 있는 바와 같이 2次, 3次 高調波의 음압특성은 진동계의 설계변경에 의하여 다소 개선된 듯 하나 K, Koiwa[7]등이 제안하는 바와 같이 磁石回路에 대한 設計硏究가 바람직하다.

5. 結 論

시간 평균 홀러그래픽 간섭계로 平面스피이커의 진동상태를 分析하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차모우드 이상의 진동을 억제하고, 피스톤 진동을 유지할 수 있도록 진동판을 진동시키기 위한 지지대의 위치는 r/a이 0.68인 데, 이론적으로 구한 값과 홀러그래픽 간섭계로 구한 값이 잘 일치한다.

(2) 진동계의 비틀림을 줄이기 위하여 지지대의 설계를 2가지 방법으로 변경하여 진동을 판의 진동상태를 홀러그래픽 간섭계로 조사해본 결과 진동판의 비틀림 상태는 상당히 개선되었다.

(3) 진동계와 구동계의 비직선성으로 나타나는 2次, 3次 高調波의 음압 비틀림은 진동계의 設計변경만으로는 완전히 줄일수 없고 구동계의 磁氣回路에 대한 設計硏究도 병행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 금성포스타 연구비 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) 土屋英司外, "スピーカーの驅動系による非直線ひばみの低減", 三菱電機技報, Vol. 50, No. 12, 1976

(2) Grean, P., "Laser in Hi-Fi" Electron, Today Int, (GB) Vol. 10, No. 10, 1981

(3) 田中準一外, "平面形スピーカーの解析", 三菱電機技, Vol. 54, No. 12, 1980

(4) Arthur W. Leissa, "Vibration of Plates", NASA SP-160, 1969

(5) Schulze, F.A, "Einige neue Methoden Zür Bestimmung der Schwingungshzahlen Höchster Hörbarer und Unhöbarer Töne-Anwendung auf die Galtonpfeifeund die Bestimmung der oberen Hörgreze", Ann. Physik, Bd. 24, Heft 15, (1907)

(6) CoLwell, R.C., and Hardy, H.C., "The Frequencies and Nodal System of Circular Plates", Phil. Mag. Scr. 7, Vol. 24, No. 165, 1957

(7) 報小岩賢二外, スピーカの非直線歪(そのて), 電氣音響硏究會資料, 資料番號 EA71-8, 1971