

직선 edge에 의해 회절된 초음파 집속음장의 초점부근에서의 비선형 현상

김정순*, 齊藤 繁實**, 하강열***, 김무준***

(*부경대학교 대학원 음향진동공학과, **일본 東海大學, ***부경대학교 물리학과)

Non-linear phenomenon adjacent to focal plane within the focused fields diffracted by a straight edge

J.S. Kim*, S. Saito**, K.L. Ha***, M.J. Kim***

(*Dept. of Acous. & Vib. Eng. in P.K.N.U., **Tokai Univ., Japan, ***Dept. of Phys. in P.K.N.U.)

요약

집속음장의 고조파성분을 이용한 초음파영상의 특성을 해석하기 위해 집속된 가우스 음원에 직선 edge를 초점면 및 초점면의 전, 후방에 삽입하여 edge의 후방에서 생성되는 음장을 조사하였다. 계산에서는 그린함수의 간단화를 위해 Fresnel근사를 이용하였고, 실험에서는 튜형전극을 형성시킨 1.9MHz 凹面진동자에 의한 가우스분포의 음장을 갖는 초음파빔에 수직하게 edge를 삽입시켰다. 음장의 이론해석 및 실험결과, 초점면의 제2고조파의 빔형상을 세외하고는 계산치와 실험치가 상 일치하고 있으며, 제2고조파의 공간 분해능이 기본파에 비해 높음을 알았다.

I. 서론

초음파현미경에서는 주파수 및 집속도가 대단히 높은 음원이 이용되고 있어 비선형현상이 두드러진다¹⁾. 이때, 투과형 초음파 현미경에서 송파음과 동일한 기본파를 수파하며 화상을 얻으면 과장으로 결정되는 분해능보다도 더 좋은 분해능이 얻어지며²⁾, 비선형현상에 의해 발생한 고조파성분을 수파하면 송파주파수로 얻어지는 영상보

다도 분해능이 높을뿐만 아니라³⁾ 기본파에 의한 영상과는 질적으로 다른 영상이 얻어진다.

기본파에 의한 영상의 분해능이 향상하는 것은, 초점에서는 가는 빔으로 되어 통과한 고조파 파위가 회절에 따른 위상반전의 효과에 의해 초점 후방에서 기본파로 되돌아오기 때문으로 해석되고 있다^{4,5)}. 또, 고조파에 의한 영상의 분해능이 높다는 것은 초점면에서 고조파 빔이 기본파보다 폭이 좁게 되기 때문이라고 해석되고 있다^{6,7)}.

한편, 고조파에 의한 화상이 기본파에 의한 화상과 질적으로 다르게 나타나는 현상에 관해서는 명확한 이론 해석이 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 초음파현미경에 있어 고조파 성분의 영상을 분석하기 위한 첫 단계로서 집속 빔의 초점면과 초점면의 전, 후방에 강체의 회절 edge를 삽입해, 그때 edge의 후방에 생성되는 기본파 및 제2고조파의 음장을 이론해석과 실험적 검증을 통해 파악하였다.

II. 이론 해석

그림 1과 같이 초점거리 D , 반경 r 에 대한 음압진폭분포가 $A_0 \exp(-\xi_0^2 r^2)$ 으로 표현되는 가우

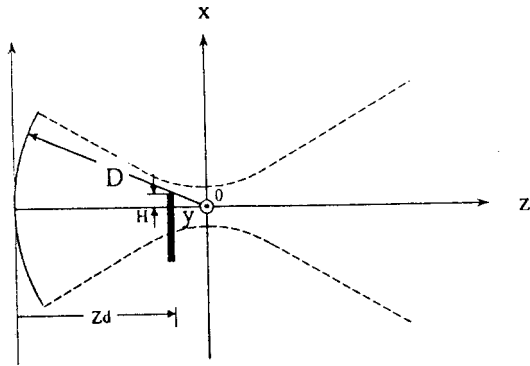


그림 1. 모델해석을 위한 좌표계

스 분포형 집속음원이, 직각좌표계의 z 축 방향에 각 주파수 ω 의 정현파음파를 방사하고 있다. 초점을 좌표계의 원점으로 하면, $z=0$ 에서의 자유음장의 기본파 성분은

$$p_{1f} = p_{10} \exp(-\xi r^2)$$

제2고조파 성분은

$$p_{2f} = p_{20} \exp(-2\xi r^2)$$

으로 표현된다.

여기서,

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$h(z_d) = 2\xi_0 z_d - jk(1 - \frac{z_d}{D})$$

$$\xi = -j \frac{k}{2z_d} \left[1 + j \frac{k}{h(z_d)} \right]$$

$$p_{10} = \frac{-jk p_0}{h(z_d)}$$

$$p_{20} = \frac{j\beta k^3 p_0^2 \ln \left| \frac{h(z_d)}{k} \right|}{\left[2\rho c^2 h(z_d) (2\xi_0 + j\frac{k}{D}) \right]} - \frac{\beta k^3 p_0^2 \left\{ \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left[\frac{h(z_d)}{2\xi_0} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{z_d} \right) \right] \right\}}{\left[2\rho c^2 h(z_d) (2\xi_0 + j\frac{k}{D}) \right]}$$

이다.

초점면부근에 충분히 긴 강체판 edge를 두어, $x=-\infty$ 에서 $x=H$ 까지의 음장을 차단하고, 강체판의 후면에서 매질의 관에 대한 수직방향의 입자속도를 0으로 가정한다. 수중의 기본파음압을 $p_1 \exp(-j\omega t)$, 제2고조파음압을 $p_2 \exp(-j2\omega t)$

로하면, 수중의 흡수를 무시할 경우 p_1 , p_2 는 다음의 식을 만족한다.

$$\nabla p_1 + k^2 p_1 = 0 \quad (1)$$

$$\nabla p_2 + 4k^2 p_2 = \frac{2\beta k^2}{\rho c^2} p_1^2 \quad (2)$$

여기서, ρ , c , $\beta = 1 + B/2A$ 는 각각 수중의 밀도, 음속, 음향비선형 파라메타이고, B/A 는 매질의 비선형 파라메타, k 는 기본파의 파수, t 는 시간이다.

식 (1), (2)를 $z=0$ 에 있어서 $\nabla_0 G_1(r|r_0) = 0$, $\nabla_0 G_2(r|r_0) = 0$ 로 되는 조건을 만족하는 그린함수 $G_1(r|r_0)$,

$G_2(r|r_0)$ 를 구한 다음, 그린함수에 Fresnel 근사를 적용시키고 그린정리 및 경계조건등을 적용하여 기본파 및 제2고조파의 음압을 계산하면, 기본파 성분

$$p_1 \exp(-j\omega t) = \widehat{p}_1 \exp[j(kz - \omega t)]$$

의 복소진폭 \widehat{p}_1 은

$$\widehat{p}_1(x, y, z, H) = -\frac{jk p_{10}}{2\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_H^{\infty} \exp[-\xi \times (x_0^2 + y_0^2) + j\frac{k}{2z} \{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\}] dx_0 dy_0 \quad (3)$$

으로 구해진다.

제2고조파의 진폭에 관해서는 기본파에 관한 (3)식의 도출과 동일방법으로 계산하되 k 를 $2k$ 로, p_{10} 를 p_{20} 로, ξ 를 2ξ 로 바꾸어 계산하면 제2고조파 성분

$$p_2 \exp(-j2\omega t) = \widehat{p}_2 \exp[j2(kz - \omega t)]$$

의 복소진폭 \widehat{p}_2 은

$$\widehat{p}_2(x, y, z, H) = -j \frac{kp_{20}}{\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_H^{\infty} \exp[-2\xi(x_0^2 + y_0^2) + j\frac{k}{z} \{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\}] dx_0 dy_0 - \frac{\beta k^2}{2\pi \rho c^2} \int_0^z \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[\widehat{p}_1(x_0, y_0, z_0)]^2}{z-z_0} \times \exp\left[jk \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{z-z_0} \right] dx_0 dy_0 dz_0 \quad (4)$$

으로 얻어진다.

III. 실험 결과 및 고찰

초점거리 $D=85mm$, 가우시안 분포 계수 $\xi_0=2300m^{-2}$ 의 1.9MHz 집속 가우스 음원의 초점면에, 회절 edge를 삽입해서 실험을 행했다. 음원에서는, 자유음장의 초점면에서의 기본파, 제2고조파 빔의 $1/e$ 폭은 각각 $4D\sqrt{\xi_0}/k=2.0mm$, $2D\sqrt{2\xi_0}/k=1.4mm$ 이다.

그림 2는 초점면에 집속 빔의 1/2이 차단되도록 $H=0$ 만큼 회절 edge를 삽입하여 $y=0$, $z=18mm$ 에서의 음압의 x방향분포를 측정된 결과를 계산치와 비교하고 있다. 그림 3과 그림 4는 초점면으로부터 15mm 전방에, 그리고 초점면으로부터 10mm 후방에 회절 edge를 삽입해서 측정된 결과를 계산치와 비교해서 각각 나타내고 있다. 그림에서 \cdots 와 \bullet 는 자유음장일 때, 즉 회절 edge를 삽입하지 않았을 때의 계산치와 실험치를, $-$ 과 \circ 는 회절 edge를 삽입했을 때의 계산치와 실험치를 각각 나타내고 있다.

결과에 의하면, 초점면의 전방 및 후방, 즉 $z_d=70mm$, $z_d=95mm$ 에 회절 edge를 삽입했을 때의 음장의 계산치와 실험치가 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 2, 3, 4에서 잘 나타나 있는 것과 같이 기본파보다도 제2고조파쪽의 빔 폭이 좁게 나타나 제2고조파쪽의 공간 분해능이 높다는 것을 알 수 있었다.

집속빔의 일부를 초점면에서 차단하면, 초점면으로부터의 투과음압의 확산은 점음원으로부터의 방사에 가까우므로, 후방의 빔은 보다 확산된다. 초점면에 회절 edge를 삽입했을 때, 기본파 진폭의 실험결과는 이러한 양상을 잘 나타내고 있다. 제2고조파에 관해서는, edge에 의해 빔이 확산되어져야겠지만, edge 삽입후의 빔형태는 실험치가 계산치보다도 폭이 좁게 나타나고 있다. 또, 빔의 중심의 진폭이 실험에서 약간 크게 나타났다. 분해력의 계산에 의하면, edge 통과후에 생성되는 제2고조파 성분은 edge 통과시에 전체적으로 생성되고 있는 성분보다도 작기 때문에, 회절후의 빔폭이 주성분으로서, edge 통과시의 제2고조파음압의 빔형상에 의해 결정된다. 따라서, 실험에서는 edge를 통과하는 미미한 제2고조파등의 영향 때문에 이라고 생각된다.

한편, 축상외의 위상파라메타가 edge의 영향을

받아서 변화하는 양상에 대해서는 실험과 계산이 잘 일치하고 있어, edge에 의한 변화의 특징이 실험결과에 잘 나타나고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

집속초음파를 이용한 영상장치에 있어서 얻어지는 기본파와 제2고조파에 의한 영상질적 차이의 해석의 초기단계로서, 초점부근에 놓인 강체 박판에 의한 회절 edge의 음장에의 영향을 이론과 실험에 의해 파악했다. 2차의 비선형을 고려한 파동방정식의 순차근사해는, 근축근사한 그린함수를 이용한 수치적분에 의해 구했다. 실험은, 가우스음원의 초점면에 강체의 박판을 삽입하고, 그 후방에서 음장을 관측했다. 계산치와 실험치는 회절 edge에서의 투과로 인해 다수 차이는 있었지만 비교적 잘 일치하였다. 결과적으로 제2고조파는 기본파에 비해 공간 분해능이 향상되는 것을 파악할 수 있었다.

참고문헌

- (1) T. G. Muir and E. L. Carstensen, "Prediction of nonlinear acoustic effects at biomedical frequencies and intensities," *Ultrasound Med. Biol.* **6**, 345-357 (1980).
- (2) D. Rugar, "Resolution beyond the diffraction limit in the acoustic microscope: A nonlinear effect," *J. Appl. Phys.* **56**, 1338-1346 (1984).
- (3) L. Germain and J. D. N. Cheeke, "Generation and detection of high-order harmonics in liquids using scanning acoustic microscope," *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 942-949 (1988).
- (4) R. Kompfner and R. A. Lemon, "Nonlinear acoustic microscopy," *Appl. Phys. Lett.* **28**, 295-297 (1976).
- (5) C. E. Yeack, M. Chodorow and C. C. Cutler, "Nonlinear acoustic off-axis imaging," *J. Appl. Phys.* **51**, 4631-4636 (1980).
- (6) T. S. Hart and M. F. Hamilton, "Nonlinear effects in focused sound beams," *J. Acoust. Soc. Am.* **84**, 1488-1496 (1988).

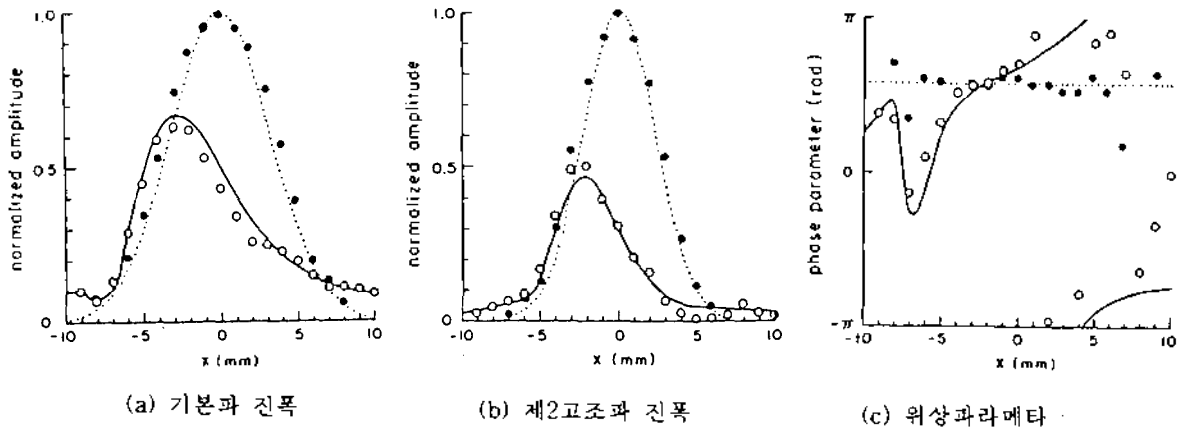


그림2 자유음장일때와 $z_d = 70\text{mm}$ 에 edge를 삽입했을때에 대한 $z = 18\text{mm}$ 에서의 x 축상의 음압비교
 (---와● : 자유음장일때의 계산치와 실험치, —과○ : 회절 edge를 삽입했을때의 계산치와 실험치)

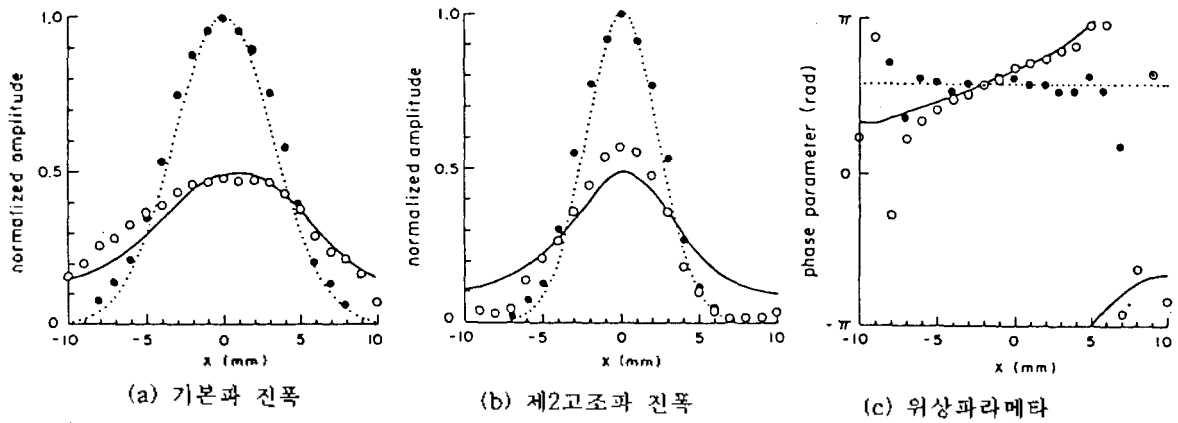


그림3 자유음장일때와 $z_d = 85\text{mm}$ 에 edge를 삽입했을때에 대한 $z = 18\text{mm}$ 에서의 x 축상의 음압비교
 (---와● : 자유음장일때의 계산치와 실험치, —과○ : 회절 edge를 삽입했을때의 계산치와 실험치)

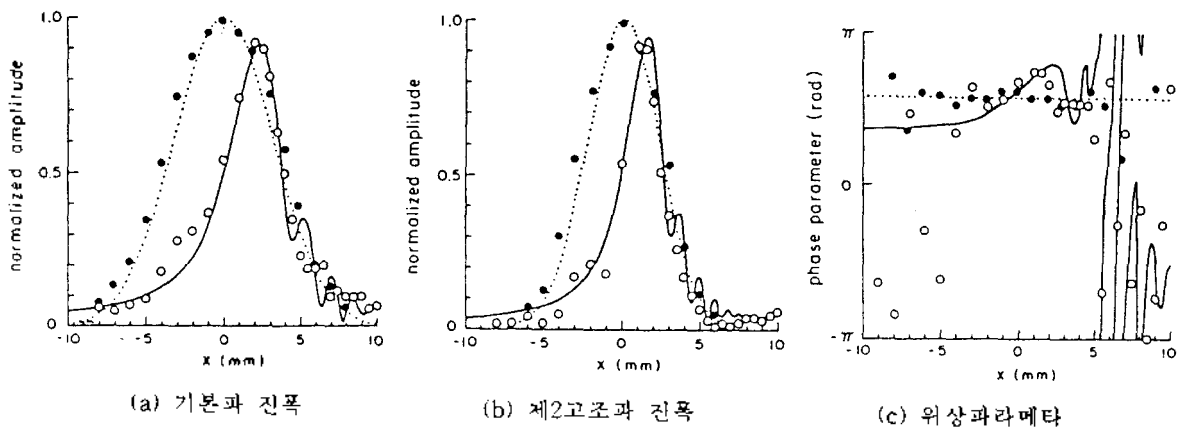


그림4 자유음장일때와 $z_d = 90\text{mm}$ 에 edge를 삽입했을때에 대한 $z = 18\text{mm}$ 에서의 x 축상의 음압비교
 (---와● : 자유음장일때의 계산치와 실험치, —과○ : 회절 edge를 삽입했을때의 계산치와 실험치)