

超音波振動子の 複數配列에 依한 指向性可變에 關한 研究

辛 亨 鎰*

A Study on the Control of the Radiation Pattern of an Ultra-Sonic Beam by the Plural Arrangement of the Transducers

Hyeong-II Sin

Abstract

Echo sounder and Doppler sonar are to use the ultra-sonic transducers for measuring the depth and the ship's speed respectively. To measure the depth and speed with a single transducer, it is required to control the ultra-sonic beam to optional direction.

In the past, the direction of the transducer itself is varied, but such a method provoked much problems in the mechanical design of the equipment.

This paper deals with the method to control beam direction by the phase control of the plural arrangement of transducers, and the results are studied by a computer simulation.

The remarkable results of the study is condensed as follows;

1. The greater the interval of arrangement between transducers, the sharper the radiation pattern is, but in this case, the level of undesired sidelobe is also increased.
2. The control of radiation pattern up to 60 degree can be achieved by an adequate arrangement of more than 10 transducers.
3. It is shown that a simultaneous measurement of both depth and speed can be achieved by alternating directivity of the pulse by the method proposed in this paper.

1. 序 論

最近 航行中인 船舶의 水深이나 船速을 測定함에 있어 超音波에 依한 音響測深儀와 도플러 소오나 등이 많이 利用되어지고 있다.

이들 計器는 모두 超音波發射用 振動子를 지니고 있으며, 單一計器로 水深과 船速의 兩方을 測定함에 있어 그 指向性을 任意方向으로 可變시켜야 되며, 그렇게 하기 爲해 지금까지 振動子 그 自體를 任意方向으로 可變시키거나 또는 別個의 振動子를 使用하여야 하므로 裝備上의 難點과 點檢, 補修 等に 어려움을 지니게 되었다. 이러한 點에서 하나의 固定된 振動子の 指向性을 可變시키는 것이 바람직하며, 아직 이와같은 問題에 對하여 研究報告된 例가 거의 없다는 點에서 開發의 價値가 크다고 思料된다.

本 論文에서는 指向性을 可變시키기 爲하여 몇 개의 振動子를 複數配列시킨 경우의 指向特性을 計算機 시뮬레이션에 依하여 分析하여 振動子間의 間隔, 振動子の 數, 振動子の 크기에 따른 指向特性과 그 實用性에 關하여 分析, 檢討하였다.

*正會員, 濟州大學

2. 超音波의 放射와 指向性

超音波의 發生에 利用되는 電氣音響變換器로서의 振動板을 無限大의 平面剛壁에 끼워넣어 그 振動板의 全面이 피스톤과 같이 同相으로 振動하여 半無限空間으로 音을 放射하였다고 하였을 때 全振動板面에 依한 速度포텐셜 Φ 는 다음 式과 같이 求하여 진다.

$$\Phi = \frac{V}{2\pi} \iint \frac{e^{-jkr}}{r} ds \quad (1)$$

但, V : 振幅, s : 振動板의 面積, r : 振動面으로 부터 任意點까지의 距離

k : $2\pi/\lambda$, λ : 波長

振動板音響으로부터 遠距離音場에 있어서는 振動面이 中心軸으로부터 떨어진 位置에서는 振動面의 各部로 부터의 位相差가 크게 되므로 速度 포텐셜은 中心軸上의 值보다 적게되며 이것이 指向性으로 表示되는 原因이 된다.

圓形振動板의 경우, 中心으로 부터의 距離 r , 圓板에 垂直한 中心軸과 θ 의 角을 이루는 點의 速度포텐셜 Φ_r 는

$$\Phi_r = \frac{Va^2}{r} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} \quad (2)$$

但, a : 圓板의 半徑, Z : $ka \sin \theta$, $J_1(z)$: 第一種 Bessel 函數

로 나타낼 수 있다. 한편 軸上에서의 速度포텐셜 Φ_0 는

$$\Phi_0 = \frac{Va^2}{2r} \quad (3)$$

이므로 軸을 基準으로 하여 任意方向의 速度포텐셜 比는

$$R = \frac{\Phi_r}{\Phi_0} = \frac{2J_1(Z)}{Z} \quad (4)$$

로 되며 R 는 圓形板振動子의 指向性을 나타내는 指向性函數로서 表示된다.

矩形振動板의 경우에 있어서도 圓形振動板의 경우와 마찬가지로 하면 指向性函數는

$$R = \frac{\sin Z}{Z} \quad (5)$$

로 表示할 수 있다.

2.1 2個의 圓形板振動子의 指向性計算

Fig.1과 같이 X 軸上에 點 O 를 中心으로 하여 d 의 間隔으로 配置한 두 振動子로 부터 遠距離音場에 있어서, 2個의 圓形板振動子의 中心으로 부터 P 點까지의 距離를 各各 R_1, R_2 , 各 振動子에 垂直한 中心軸과 P 點과가 이루는 角을 各各 θ_1, θ_2 라 하면 各各의 振動子에 依한 P 點의 速度포텐셜 Φ_{r1}, Φ_{r2} 는 (1), (2)式으로부터

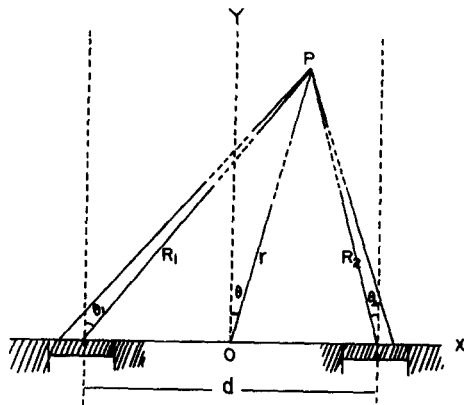


Fig. 1. Showing the arrangement of two circular transducers.

$$\left. \begin{aligned} \Phi r_1 &= \frac{V e^{-jkR_1} \cdot a^2}{R_1} \cdot \frac{J_1(Z_1)}{Z_1} \\ \Phi r_2 &= \frac{V e^{-jkR_2} \cdot a^2}{R_2} \cdot \frac{J_1(Z_2)}{Z_2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

但, $Z_1 = ak \sin \theta_1$, $Z_2 = ak \sin \theta_2$

로 表示된다. 여기서 Y軸와 直線 OP가 이루는 角을 θ , 點 O로부터 P點까지의 距離를 r 라 하면 $d \ll r$ 의 條件에서는 R_1, R_2 는 各各

$$\left. \begin{aligned} R_1 &\doteq r + \frac{d}{2} \sin \theta \\ R_2 &\doteq r - \frac{d}{2} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

의 關係가 있고 이것을 (6)式에 代入하면 合成速度포텐셜 Φ 는

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi r_1 + \Phi r_2 \\ &= \frac{V e^{-jk(r + \frac{d}{2} \sin \theta)} \cdot a^2}{r + \frac{d}{2} \sin \theta} \cdot \frac{J_1(Z_1)}{Z_1} + \frac{V e^{-jk(r - \frac{d}{2} \sin \theta)} \cdot a^2}{r - \frac{d}{2} \sin \theta} \cdot \frac{J_1(Z_2)}{Z_2} \\ &\doteq \frac{V a^2 e^{-jkr}}{r} \left(e^{-jk \frac{d}{2} \sin \theta_1} \cdot \frac{J_1(Z_1)}{Z_1} + e^{jk \frac{d}{2} \sin \theta_2} \cdot \frac{J_1(Z_2)}{Z_2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Fraun-hofer 영역에서는 θ_1, θ_2 는 θ 가 되어 Z_1, Z_2 는 Z 가 되며 (8)式은 (9)式과 같이 된다.

$$\Phi = \frac{V a^2 e^{-jkr}}{r} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} \cdot 2 \cos \left(k \frac{d}{2} \sin \theta \right) \quad (9)$$

또한 Y軸上의 速度포텐셜 Φ_0 는

$$\Phi_0 = \frac{V a^2 e^{-jkr}}{r} \quad (10)$$

로 된다. 그러므로 2個의 振動子の 指向性函數 R 는

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{2J_1(Z)}{Z} \cos \left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta \right) \quad (11)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 2個의 圓形振動子에 位相을 가한 경우의 指向性計算

2個의 圓形板振動子에 電氣的으로 $\pm \delta$ 의 位相角을 가했을 경우 各各의 振動子の 速度포텐셜 $\Phi r_1, \Phi r_2$ 는 (6)式으로 부터

$$\left. \begin{aligned} \Phi r_1 &= \frac{V e^{-j(kR_1 - \delta)} \cdot a^2}{R_1} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} \\ \Phi r_2 &= \frac{V e^{-j(kR_2 + \delta)} \cdot a^2}{R_2} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. (7)式을 (12)式에 代入하여 位相을 가했을 때의 P點의 合成速度포텐셜 Φ 를 求하면 ($d \ll r$)

$$\Phi_0 = \frac{V e^{-j(k(r + \frac{d}{2} \sin \theta) - \delta)} \cdot a^2}{r + \frac{d}{2} \sin \theta} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} + \frac{V e^{-j(k(r - \frac{d}{2} \sin \theta) + \delta)} \cdot a^2}{r - \frac{d}{2} \sin \theta} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z}$$

$$\doteq \frac{2Va^2 e^{-jkr}}{r} \cdot \frac{J_1(Z)}{Z} \cos\left(k\frac{d}{2} \sin\theta - \delta\right) \quad (13)$$

$\delta=0$ 以外の 경우에는 指向性を 表하는 部分인 $\frac{J_1(Z)}{Z} \cos\left(k\frac{d}{2} \sin\theta - \delta\right)$ 에 對한 最大値를 求하여 最大値에 對하는 速度포텐셜의 比를 求하면 指向函數를 나타낼 수 있다.

2.3 n個의 矩形板振動子를 直線配列한 때의 指向性計算

體積速度가 同一한 n個의 矩形板振動子が Fig.2와 같이 隣接한 振動子와 間隔 d 로써 一直線上으로

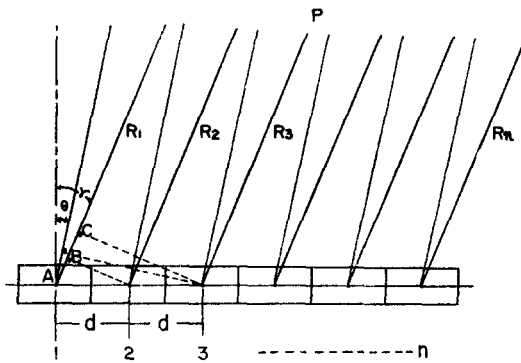


Fig. 2. Showing the rectangular multi-transducer arrangement.

로 配置하였을 때 Fraun-Hofer 영역에 있는 P點에서의 速度포텐셜은 크기가 거의 같고 位相만이 다르게 되며 位相差는 各 振動子로부터 P點까지의 距離差를 알면 求할 수 있다.

지금 各各의 振動子로부터 P點까지의 距離를 R_1, R_2, \dots, R_n 이라고 하면

$$\left. \begin{aligned} R_2 &= R_1 - d \sin\theta \\ R_3 &= R_1 - 2d \sin\theta \\ &\vdots \\ R_n &= R_1 - (n-1)d \sin\theta \end{aligned} \right\}$$

但 θ : 振動子를 연결하는 直線上에서의 法線과 振動子の 中心과 P點을 연결하는 直線과의 角

가 된다. P點의 速度포텐셜 Φ 는 크기가 같고 位相差만 서로 다른 各 振動子로부터의 速度포텐셜의 疊이므로

$$\Phi \doteq \frac{4abV}{2\pi R_1} \cdot \frac{\sin(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} e^{j(\cos\theta \omega t - kR_1)} \{1 + e^{jk d \sin\theta} + e^{j2k d \sin\theta} + \dots + e^{j(n-1)k d \sin\theta}\} \quad (14)$$

가 된다 (但, a, b는 矩形板의 邊長). 等比級數의 疊의 公式를 引用하면 疊 식은

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{4abV}{2\pi R_1} e^{j(\omega t - kR_1)} \frac{\sin(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \cdot \frac{1 - e^{jnkd \sin\theta}}{1 - e^{jkd \sin\theta}} \\ &= \frac{4abV}{2\pi R_1} e^{j(\omega t - kR_1)} e^{j(n-1)\frac{kd}{2} \sin\theta} \cdot \frac{\sin(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{nk d}{2} \sin\theta\right)}{\sin\left(\frac{kd}{2} \sin\theta\right)} \end{aligned} \quad (15)$$

로 된다. 速度포텐셜의 最大인 正面의 速度포텐셜은 (15)式의 $\theta=0$ 일 때 이므로

$$\Phi_0 = \frac{n4abV}{2\pi R_1} e^{j(\omega t - kR_1)} \quad (16)$$

와 같이 되고 이때의 指向性函數 R는 (17)式과 같이 表示할 수 있다.

$$R = \frac{\Phi}{\Phi_0} \doteq \frac{\sin(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta} \frac{\sin\left(\frac{nk d}{2} \sin\theta\right)}{n \sin\left(\frac{kd}{2} \sin\theta\right)}$$

$$= \frac{\sin\left(\frac{d\pi}{\lambda} \sin \theta\right)}{\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta} \cdot \frac{\sin\left(n \frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta\right)}{n \sin\left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta\right)} \quad (17)$$

但, $a = d/2$

2.4 n個의 矩形板振動子에 位相差를 가한때의 指向性計算

Fig.2에 表示한 것과 같이 等間隔의 矩形板의 指向特性이 正面軸方向에 極大를 나타내는 理由는 各各의 振動子로부터 正面軸上의 P까지의 距離는 모두 같으므로 各 振動子로부터의 速度포텐셜이 P에서 同相이 되기 때문이다. 이와 같은 考察에서 角 θ 를 이루는 斜方向에 指向性的 極大를 나타내려고 하는 경우에는 各 振動子の 速度포텐셜이 그 方向에서 同一位相이 되도록 位相調整을 하면 된다.

즉 振動子 2는 1에 比하여 \overline{AB} 만큼 가까우므로 $k \cdot \overline{AB}$ 만큼 振動子 2의 驅動位相을 振動子 1에 比하여 遲延시키면 된다.

振動子 3은 振動子 1에 對하여 經路差 $\overline{AC} = 2\overline{AB}$ 間의 傳搬時間에 相當하는 分만큼 驅動을 늦게하면 된다. 이와 같이 하여 振動子 1의 세기를

$$\frac{4abV}{2\pi R_1} \cdot \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} e^{j\omega t}$$

로 한 경우, 振動子 n의 驅動位相은 $w(n-1) \frac{\overline{AB}}{C}$ 로 지연시키면 r方向의 合成速度포텐셜 Φ_r 는 (18) 式과 같이 된다(C는 音波의 速度)

$$\Phi_r = \frac{4abV}{2\pi R_1} \cdot \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \cdot e^{j(\omega t - kR_1)} \cdot e^{j(n-1) \frac{kd}{2} (\sin \theta - \sin r)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{nk d}{2} (\sin \theta - \sin r)\right)}{\sin\left(\frac{kd}{2} (\sin \theta - \sin r)\right)} \quad (18)$$

또한 指向性極大方向의 速度포텐셜 Φ_θ 는 (19)式과 같이 된다.

$$\Phi_\theta = \frac{4abV}{2\pi R_1} e^{j(\omega t - kR_1)} \cdot n \quad (19)$$

(18), (19)式에서 Φ_r 과 Φ_θ 의 比로서 指向性函數를 表示하면

$$R = \frac{\sin\left(\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta\right)}{\frac{d}{\lambda} \pi \sin \theta} \cdot \frac{\sin\left(\frac{d}{\lambda} n \pi (\sin \theta - \sin r)\right)}{n \sin\left(\frac{d}{\lambda} \pi (\sin \theta - \sin r)\right)} \quad (20)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

3. 計算機 시뮬레이션 結果 및 考察

振動子로부터 放射되는 超音波는 單一振動子の 경우 (4), (5)式에서 表示한 것과 같은 指向性을 갖게 되며 이때 主極은 振動子の 配列軸에 垂直한 方向으로 向하게 되며 이것을 任意의 方向으로 向하게 하기 爲해서는 振動子 自體를 어느 方向으로 向하게 하지 않으면 안된다.

振動子を 水平面에 固定하여 두고 指向性을 可變시키기 爲하여 2個 以上の 振動子を 水平面內에 直線配列한 경우에 振動子の 크기, 振動子間의 間隔, 位相角의 變化와 指向性函數와의 關係를 計算機 시뮬레이션에 依해 考察하였다.

2個의 圓形板振動子の 경우의 시뮬레이션 結果를 Fig.3, 4, 5에 보였다. Y軸에는 指向角을 $-90^\circ \sim 90^\circ$, X軸에는 最大値에 對한 指向性函數를 1로 基準한 値를 表示하였다. Fig.3에서 位相角(δ)은 0° , 各 振動子の 中心間의 距離(d)를 振動子の 半徑(a)의 2, 2.5, 3倍, 振動子の 半徑을 波長(λ)의 $1/2, 1, 2$ 倍로 하였을 때 振動子の 半徑이 波長보다 크면 勿論, 振動子間의 間隔이 크면 勿論 尖銳度가 높은 指向性을 갖게 되나 Fig.3의 中, 下圖와 같이 振動子間의 間隔이 커질때는 副極이 커짐으로 振動子の 配列로서는 不適當함을 알 수 있다.

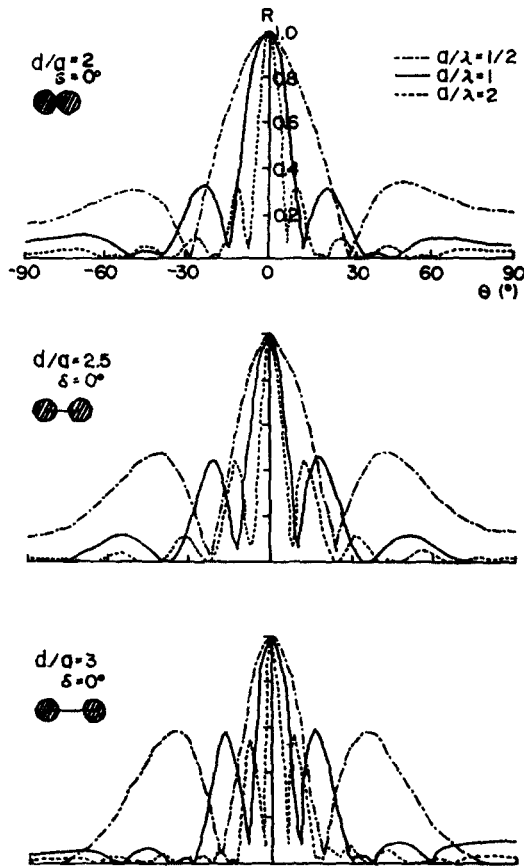


Fig. 3. Relation between directivity function and the radius of the circular transducer (a) and transducer interval (d) when the phase angle is 0°

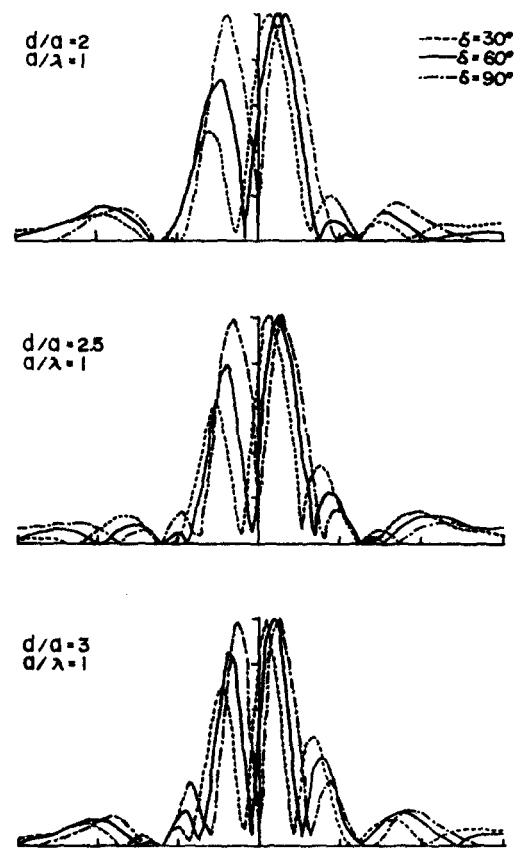


Fig. 4. Relation between directivity function and the phase angle (δ) and transducer interval (d) when radius of the transducer is fixed.

Fig.3의 最上圖와 같이 振動子間이 接하도록 配置한 경우는 (4)式의 單一振動子の 半徑을 2倍로 한 것과 같은 指向性을 갖게 되어 單一振動子와 같은 指向性을 表示하게 된다.

指向性を 可變시키기 爲하여 各 振動子에 位相角을 30°, 60°, 90° 變化시킨 경우는 Fig.4에 表示한 것과 같이 振動子の 半徑이 클수록, 振動子間의 間隔이 클수록 尖銳度가 높은 指向性を 갖게 되며 Fig.3의 경우와는 달리 兩振動子の 中心 右側에는 主極이 나타나고 左側에는 位相角이 커짐에 따라 副極이 나타나고 位相角이 90°인 경우는 主極과 副極이 同一한 振幅을 나타내고 있다. 位相角이 90°인 경우, 圓形板振動子の 크기와 間隔이 變할때의 指向性函數는 Fig.5에 表示하였고 Fig.5에서 알 수 있는 바와 같이 半徑이 클수록 間隔이 커질수록 尖銳度가 높아지나 主副極間의 사이가 좁혀지고 있음을 보여주고 있다.

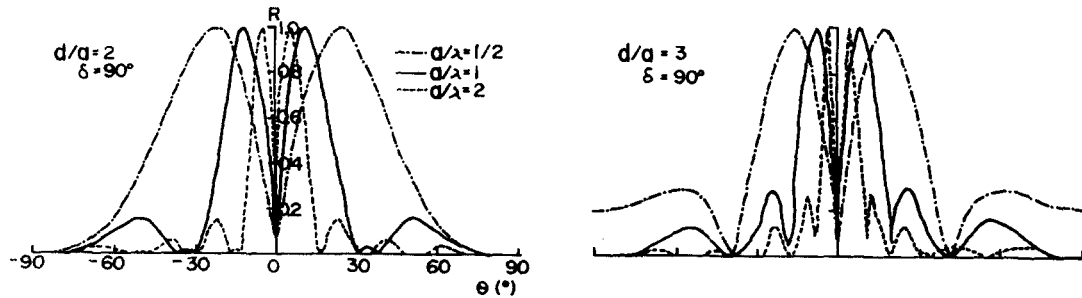


Fig. 5. Relation between directivity function and the radius of the circular transducer when the phase angle is 90°

이 경우의 指向性は 前後, 左右의 船速測定, 前方의 水深測定이나 魚探의 應用에 有利한 것으로 豫想되어지나, 船速測定을 함에 있어서는 더욱 尖銳度가 높은 指向性이 要求되며 指向性を 銳利하게 할수록 이 경우는 主副極間의 間隔이 좁혀져 가므로 船速測定用으로는 不適當하다. 그러나 魚探의 送受波器을 利用하는 경우 Fig.5에서 처럼 圓形板振動子를 接하게 하고 半徑을 波長의 1/2로 하면 半減角이 30°로 前後, 左右로 指向角이 30°인 方向으로 可變시킬 수 있음이 豫想된다.

이상에서 본 바와 같이 2個의 振動子の 間隔을 變化시켜서는 指向性 可變이 어렵고 尖銳度가 높은 指向性を 얻을 수 없으므로 n 個의 振動子를 直線配列한 경우의 指向性에 對하여 檢討하여 본다.

n 個의 矩形板振動子를 直線配列한 경우의 計算機시뮬레이션 結果는 Fig.6에 表示하였다. Fig.6은 振動子の 數가 3, 6, 9, 12個일 때, d/λ 가 1/2, 1이며 位相差가 0°, 30°, 60°인 경우의 指向性函數를 表示한 것이다.

Fig.6에서 振動子の 數가 많을수록 더욱 銳利한 指向性を 얻을 수 있고 또한 指向角이 60°인 方向에 主極大를 表示하기 爲해서는 12個 以上の 振動子가 必要하게 되며 d/λ 가 1인 경우는 指向角이 60°인 方向에 主極大를 表示할 수 없음을 알 수 있다. d/λ 가 1이며 位相角이 30° 일때는 中心軸의 左右에 指向角이 $\pm 30^\circ$ 인 方向에 主副極大를 나타내게 되며 振幅은 多少 減少함을 알 수 있다.

Fig.6에서 振動子の 數에 따른 指向性函數를 極座標로 表示하였을 때의 振動子の 數와 半減角과 의 關係를 Fig.7에 表示하였다. Fig.7에서 振動子가 클수록 位相差가 적을수록 또한 振動子の 數가 많을수록 半減角이 적어져 더욱 銳利한 指向性を 表示함을 알 수 있다.

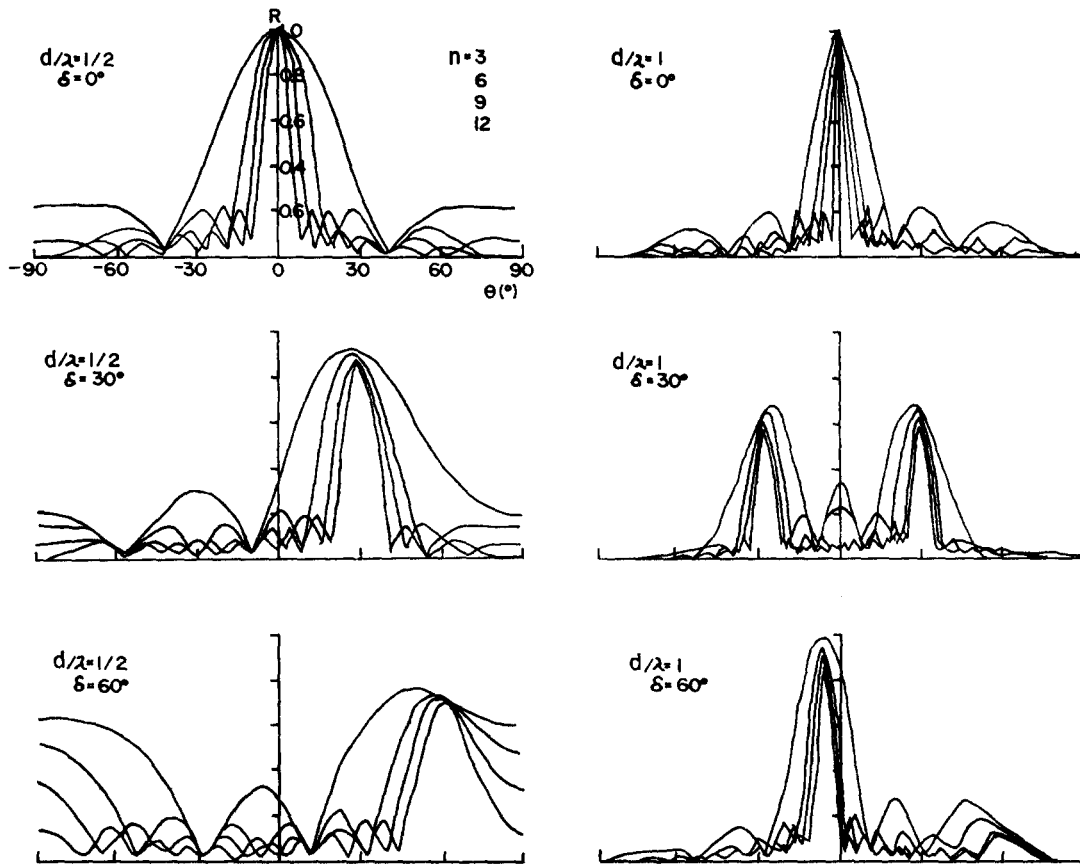


Fig. 6. The directional pattern of the rectangular transducer array, array the number of "n".

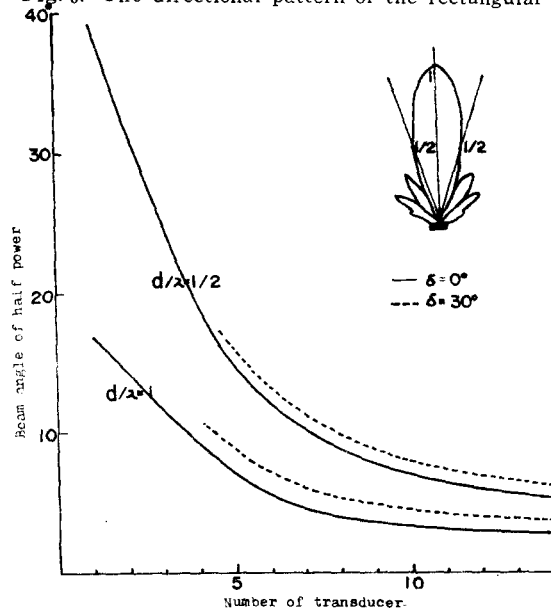


Fig. 7. Relation between the beam angle of halfpower and the number of transducer.

d/λ 가 1/2이하일 때와 1이상일 때의 代表的 例로서 振動子가 8個인 경우의 指向性函數는 Fig. 8에 表示하였다. Fig. 8에서 位相差가 0°인 경우, 振動子와 波長과의 比가 크면 클수록 指向性은 銳利하여지며 位相差가 30°인 경우 d/λ 가 1/4일 때 그 指向性은 指向角 30°方向으로 可變이 可能하나 指向性이 鈍하고 d/λ 가 1보다 큰 때 즉 d/λ 가 3/2일 때는 任意方向의 可變이 不可能하여 同時測定用振動子로서 d/λ 가 1/2이하일 때와 1이상일 때는 指向性可變用 振動子로서 不適當하다고 思料된다.

Fig. 7에서 水深과 船速測定用 振動子の 半減角이 5°~8°程度가 되게 하기 爲해서

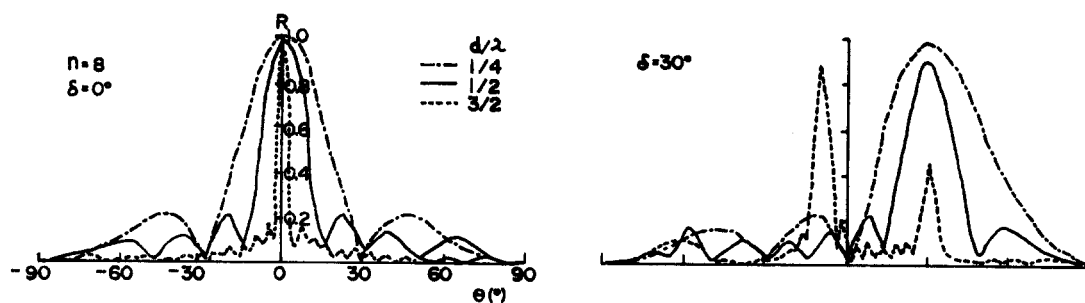


Fig. 8. Relation between directivity function and the size of the rectangular transducer.

는 10個以上の 振動子が 必要함을 알 수 있다. 實際로 應用하기 爲한 代表的인 例로 10, 14個인 경우의 指向性을 表示하면 Fig.9와 같이 된다.

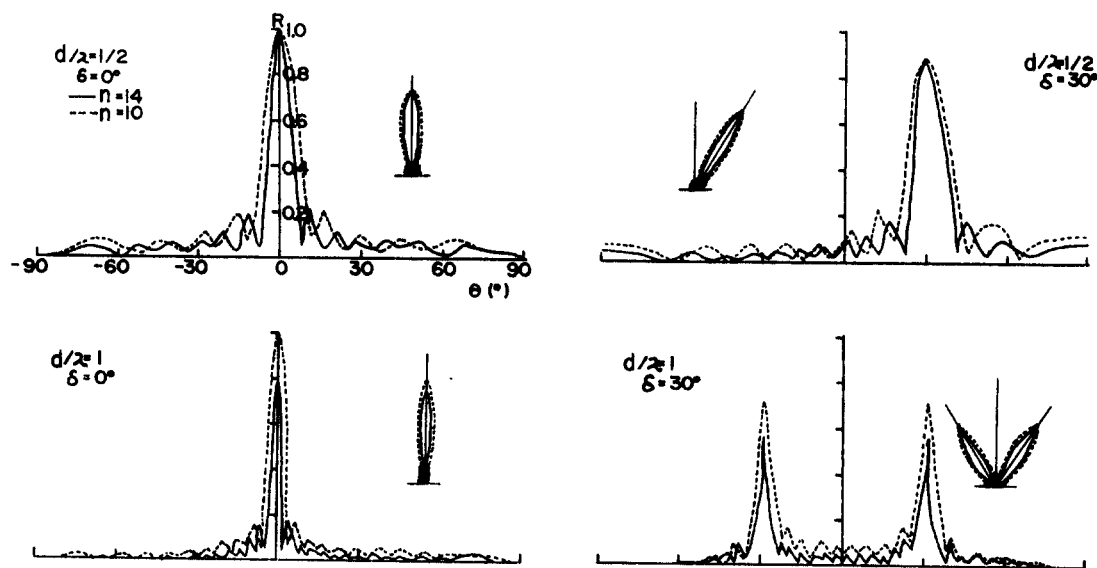


Fig. 9. The directional pattern of the transducer array with the number of array of 10, 14.

Fig.9에서 d/λ 가 1/2인 경우 Pulse波를 利用하여 한번은 位相差가 0°가 되게 또 한번은 30°가 되게 超音波로 發射한다면 Echo sounder와 Single beam log로써 應用될 수 있는 指向性可變이 可能하고 d/λ 가 1인 경우에는 Echo sounder와 Pair beam sonar로 應用할 수 있는 指向性可變이 可能함을 表示하고 있다.

4. 結 言

從來Echo sounder나 Doppler sonar의 振動子の 指向性을 可變시키기 爲하여는 振動子 自體를 回

轉하였으므로 많은 裝備上의 難點을 지니게 되었다. 그 解決方案의 一案으로 振動子를 複數配列하여 指向性을 可變시키는 方法을 計算機시뮬레이션에 依해 分析, 檢討하였고 그 結果 振動子間의 間隔을 크게하면 指向性은 銳利하여지나 副極이 커짐으로 不利하며 10個以上の 振動子를 複數配列하여 各 振動子에 位相差를 가하면 8° 以下の 半減角을 가지게 할 수 있으며, 60° 以內의 指向性可變이 可能하고 이를 振動子에 Pulse波를 가하면 水深, 船速 同時測定도 可能하다는 結論을 얻었으며, 今後 實驗을 通하여 實證하고자 한다.

參 考 文 獻

1. 川村雅恭：電氣音響工學概論，日本 昭晃堂，pp.38~53, (1977).
2. 實吉純一，菊池喜充，能本乙彦：超音波技術侵覽，日刊 工業新聞社，pp.23~28(1978).