

---

 論 文
 

---

大韓造船學會誌  
 第16卷 第1號 1979年 3月  
 Journal of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 16, No. 1, March 1979

## Double-Flap 조파기의 설계 및 조파판의 최적 위상관계

강 신 형\*

### Optimum Draft and Phasing of Double-Flap Wavemaker

by

Shin-Hyoung Kang

#### Abstract

A method to determine the optimum drafts of waveboards of single and double-flap wavemaker is presented by using a linearized first-order wave theory and a linear regression method. A linear regression is verified to be quite simpler than the local disturbance consideration or regular-wave forming distance. It is pointed out that the lower hinge should be deep enough to keep the upper flap vertical for a long wave length.

#### 1. 서 론

조파기에 관한 이론은 Havelock, Biesel[1]이 일차선형화된 경계조건을 이용하여 해석한 이래 Ursell, Dean, Yu[2]에 의하여 피스톤 형의 조파기에 관한 실험적 연구가 있었다. 또한 Taniguchi와 Shibata[3]는 Mitsubishi-Nagasaki 수조에서 flap type wave maker에 대한 실험을 하여 일차선형이론의 결과와 비교하였다.

그리나 몇몇 수조에서 행해진 결과들이 보고되고 있기는 하나 아직 체계적인 실험결과는 흔하지 않다. 이상적으로 말한다면 조파판(flap)은 요구되는 파형과 일치하는 유체입자의 운동을 따르게 하여야 하겠으나 이는 현실적으로 불가능하다. 그래서 고정된 깊이, 고정된 형상의 조파판에 대하여 선형이론으로 해석하면 조파판에 가까운 영역에서는 국부교란이 생기고 조파판에서 멀어지면 국부교란은 감쇄하여 요구되는 정현파를 얻을 수 있다. 이 선형이론을 이용하여 Hyun[4]은 조파기에 필요한 thrust, torque, 국부교란정도, 정현파가 만들어지는 거리들을 조파판의 깊이를 파라메

터로 하여 해석하여 설계에 응용되도록 하였다. 요구되는 파형의 파장이 길어지면 조파판이 깊어야 하고 짧은 파장에서는 얇은 조파판이 효과적임은 잘 알려진 사실이고 극단적으로 무한히 긴 파장의 파형을 위해서는 piston-type의 조파기가 이상적이라고 할 수 있다. 따라서 조파판의 깊이는 요구되는 파장의 범위에서 적당한 깊이로 설계되어야 한다.

최근에는 조파되는 파장의 범위를 넓히기 위하여 double-flap wave maker가 설계 제작되고 있는데 이는 조파판의 형상에 자유도를 하나 더 부여함이다. 다시 Hyun[5]은 조파판의 깊이와 상하부조파판의 상대적인 운동관계를 파라메터로하여 그 성능을 선형이론을 적용하여 해석하였다. 그 결과로 double-flap을 사용하면 조파판 근처의 국부교란을 줄일 수 있고 조파기의 동력을 줄일 수 있음이 지적되었다. 실제로 double-flap wave maker를 설계할 때는[6] 진파장 영역에 알맞게 하부힌지의 위치를 결정하고 짧은 파장에 맞게 상부힌지의 위치를 결정한다. 이에 의하여 설계된 조파기는 설치후에 경험적으로 파장에 따른 최적운전조건을 찾

접수일자 : 1979. 2. 28

\* 정회원 : 한국선박연구소

아내게 된다.

그러나 실제로 설계에 중요한 것은 조파된 파형의 harmonic distortion을 작게 하는 일이다. 이 문제는 수십년간 연구되어 온 과제이나 조파기제작에 가장 어려운 일이다. 불행히도 선형이론으로는 harmonic distortion을 예측할 수 없으며 고차항과 비선형이론을 적용하여야 가능하리라 생각된다. 이는 double-flap의 설계에는 물론 최적운전조건을 결정하는 데도 중요한 문제이다.

본 연구에서는 classical linear regression을 이용하여 주어진 파장에서 최적한 힌지의 깊이를 결정하고 최적한 double-flap의 운전조건을 계산하고자 한다. 이는 조파판과 정현파 유체입자의 운동궤적과의 차이가 많을수록 distortion이 증가한다는 가정에 기본을 두고 있다. 이 차이는 결국 조파판 근처에서 국부적인 교란과 직결되는 양이지만 국부파형이나 조파판이 받는 순간동력을 최소화하는 과정보다 무척 간단하다. 더구나 Clark와 Menken[7]은 이를 double-flap의 운전상태를 결정하는 과정에서 이용한 결과 실험결과에 비교적 잘 맞는 결과를 얻었다.

### 2. 조파기 해석을 위한 선형이론

우선 조파기에 관한 선형이론을 간단히 소개한다. 조파기가 Fig.1과 같이 semi-infinite 수조의 한쪽끝에 설치되었다고 하자. 유체는 비점성 비압축성이며 수조의 폭은  $B$ , 깊이  $h$ , flap의 깊이는  $f$ 라고 하자.

Simple-harmonic으로 움직이는 조파판에 의한 속도

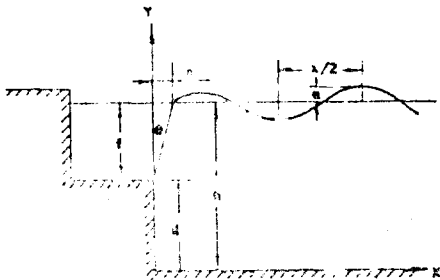


Fig. 1. Schematic diagram of flap-type wavemaker.

포텐셜  $\phi(x, y, t)$ 는 Laplace equation

$$\phi_{xx} + \phi_{yy} = 0; \quad 0 \leq x < \infty, \quad 0 \leq y \leq h \quad (1)$$

을 만족시키고 다음과 같은 경계조건을 만족시켜야 한다.

$$\phi_y = 0 \quad \text{on } y = 0 \quad (2)$$

$$-\omega^2 \phi + g \phi_y = 0 \quad \text{on } y = h \quad (3)$$

$$\phi_x = \omega \xi(y) \cos \omega t \quad \text{on } x = 0 \quad (4)$$

여기에서  $\phi$ 는 파형이  $x \rightarrow \infty$ 의 방향으로 전파되는 radiation condition을 만족시켜야 한다.  $\omega$ 는 조파판의 각속도이고  $g$ 는 중력가속도이다.  $\xi(y)$ 는 조파판의 최고 변위이며 순간위치는 다음과 주어진다.

$$x = \xi(y) \sin \omega t \quad (5)$$

잘 알려진 과정을 통하여 [1], [2] 속도포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi = -\frac{\omega}{k} A \cosh(ky) \sin(\omega t - kx) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\omega}{k_n} A_n \cos(k_n y) \exp(-k_n x) \cos \omega t \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 조파된 파형의 wave number 이고 dispersion relation  $\omega^2 = gk \tanh(kh)$ ,  $\omega^2 = -gk_n \tan(k_n h)$ 의 양실수 근으로부터 계산된다. 한편 계수  $A$ 와  $A_n$ 은 식(4)로부터 구해지며 다음과 같다.

$$A = \frac{2k \int_0^h \xi(y) \cosh(ky) dy}{\sinh(kh) \cosh(kh) + kh} \quad (7)$$

$$A_n = \frac{2k_n \int_0^h \xi(y) \cos(k_n y) dy}{\sin(k_n h) \cos(k_n h) + k_n h} \quad (8)$$

$A_n$ 이 포함되는 항은  $x$ 가 증가함에 따라 소멸되고 조파판에서 충분히 멀어지면 ( $x > 3h$ ) 식(6)의 첫항만 남아 정현파를 이룬다. 구해진 속도포텐셜에서 유체입자의  $x, y$ 방향의 위치와 정면파의 파고  $H$ 는 다음으로 주어진다.

$$X = A \cosh(ky) \sin(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(k_n y) \exp(-k_n x) \sin \omega t \quad (9)$$

$$Y = A \sinh(ky) \cos(\omega t - kx) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(k_n y) \exp(-k_n x) \sin \omega t \quad (10)$$

$$H = 2A \sinh(kh) \quad (11)$$

한편 압력은 Bernoulli's theorem에서 구해지고 조파판에 대하여 적분하면 소요되는 power와 torque, thrust등을 구할 수 있다.

여기서 다음과 같은 single-flap wavemaker에 대하여 Hyun[4]의 결과를 간추려 모든 길이와 wave number  $k$ 를  $h$ 로 무차원화하면 다음과 같다.

$$\xi(y) = -\frac{S}{f} (y-d) \quad \text{for } d \leq y \leq 1$$

$$\xi(y) = 0 \quad \text{for } y \leq d \quad (12)$$

where  $d = 1 - f$

$$A = 2S \frac{k f \sinh(k) - \cosh(k) + \cosh(kd)}{k f [\sinh(k) \cosh(k) + k]} \quad (13)$$

$$A_n = 2S \frac{k_n f \sin(k_n) + \cos(k_n) - \cos(k_n d)}{k_n f [\sin(k_n) \cos(k_n) + k_n]} \quad (14)$$

이때 조파되는 정현파의 amplitude와 hinge에 걸리는 순간 Torque, 조파판에 작용하는 순간 force의 최대치는 다음식으로 주어지고 계산된 결과는 Fig. 2, Table 1, Table 2에 인용되었다.

$$a = 2S \frac{[k f \sinh(k) - \cosh(k) + \cosh(kd)] \sinh(k)}{k f [\sinh(k) \cosh(k) + k]} \quad (15)$$

$$T = 2B \int_d^1 (\rho_w + \rho_i)_{z=0} (y-d) dy = T_c \cos \omega t + T_s \sin \omega t$$

where

$$T_c = 2B \rho g a \left[ \frac{1}{\cosh k} \right] \left\{ \frac{f \sinh k}{k} - \frac{1}{(k)^2} (\cosh k - \cosh kd) \right\} \quad (16)$$

$$T_s = 2B \rho g \sum_{n=1}^{\infty} A_n \tan(k_n) \left[ \frac{\cos k_n - \cos k_n d}{(k_n)^2} + \frac{f \sin k_n}{k_n} \right]$$

$$F = 2B \int_d^1 (\rho_w + \rho_i)_{z=0} dy = F_c \cos \omega t + F_s \sin \omega t$$

$$F_c = 2B \rho g a \left[ \frac{\sinh k - \sinh kd}{k \cosh k} \right] \quad (17)$$

$$F_s = 2B \rho g \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n \tan(k_n) (\sin k_n - \sin k_n d)}{k_n} \right]$$

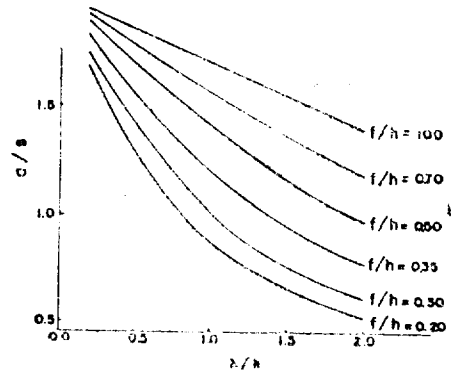


Fig. 2. Wave amplitude as function of wavelength and flap draft.

Table 1 Table 2에서 linear interpolation에 의하여 파장에 따른 조파판의 최적깊이를 추정할 수 있으며 Table 1로부터의 결과는 Fig. 5에 나타내어졌고 본 연구에서의 결과와 비교되었다.

Table 1. Water surface elevation at  $x=0$ ,  $\omega t = \pi/2$ , nondimensionalized by wave amplitude  $a$

	$f/h=1.00$	$f/h=0.50$	$f/h=0.35$	$f/h=0.25$	$f/h=0.15$
$\lambda/h=5.0$	-0.1358	-0.4224	-0.5659	-0.6940	-0.8270
$\lambda/h=2.0$	0.1478	-0.1330	-0.2658	-0.3845	-0.5035
$\lambda/h=1.0$	0.4033	0.1304	-0.0055	-0.1308	-0.2555
$\lambda/h=0.5$	0.5970	0.3371	0.2009	0.0665	-0.0714
$\lambda/h=0.3$	0.6871	0.4365	0.3058	0.1665	0.0202

Table 2. Hydrodynamically Induced torque  $T$  and total hydrodynamic force on the flap  $F$ , nondimensionalized by  $2B\rho g a h^2$ ,  $2B\rho g a h$ , respectively. Both quantities are expressed in form of  $M \cos(\omega t - \alpha)$

		$f/h=1.00$		$f/h=0.50$		$f/h=0.35$		$f/h=0.25$		$f/h=0.15$	
		$M$	$\alpha$	$M$	$\alpha$	$M$	$\alpha$	$M$	$\alpha$	$M$	$\alpha$
$\lambda/h=2.0$	$T$	0.2248	-0.0534	0.0795	-0.0914	0.0447	-0.1865	0.0255	-0.2847	0.0106	-0.4146
	$F$	0.3214	-0.1627	0.2540	-0.0169	0.2142	-0.1015	0.1771	-0.2004	0.1279	-0.3600
$\lambda/h=1.0$	$T$	0.1904	-0.7911	0.0554	-0.0591	0.0332	-0.0241	0.0197	-0.0724	0.0086	-0.1946
	$F$	0.4177	-1.1799	0.1545	-0.1684	0.1415	-0.0060	0.1261	-0.0039	0.0980	-0.1320
$\lambda/h=0.5$	$T$	0.4606	-1.4111	0.0454	-0.7425	0.0223	-0.2486	0.0138	-0.0301	0.0066	-0.0339
	$F$	1.0929	-1.4979	0.1856	-1.1286	0.0957	-0.6073	0.0768	-0.1316	0.0675	-0.0441
$\lambda/h=0.3$	$T$	0.8901	-1.5197	0.0810	-1.3009	0.0241	-0.9279	0.0103	-0.3510	0.0050	-0.0060
	$F$	2.0152	-1.5471	0.3747	-1.4430	0.1585	-1.2651	0.0694	-0.8165	0.0457	-0.0426
$\lambda/h=0.2$	$T$	1.4186	-1.5492	0.1395	-1.4638	0.0397	-1.3126	0.0113	-0.9063	0.0038	-0.1103
	$F$	3.1599	-1.5607	0.6244	-1.5198	0.2753	-1.4549	0.0115	-1.2814	0.0338	-0.3682

3. 조파판 최적길이의 결정

서론에서 언급한 바와 같이 조파된 파형의 최적관계는 조파판과 정현파에 해당하는 유체입자의 궤적이 만드는 면의 square error를 최소화하는 조건에서 구해진다고 본다. (Fig. 3)

식 (9)에서 정현파에 의한 궤적면은 국부항을 무시하고  $x=0, t=\pi/2\omega$ 로 놓으면 다음과 같다.

$$X(y) = 2S \frac{k f \sinh(k) - \cosh(k) + \cosh(kd)}{k f [\sinh(k) \cosh(k) + k]} \cosh(ky) \tag{18}$$

따라서  $t=\pi/2\omega$ 일 때 조파판으로부터 square error는 다음과 같다.

$$E^2(S, k, f) = \int_0^1 [\xi(y) - X(y)]^2 dy \tag{19}$$

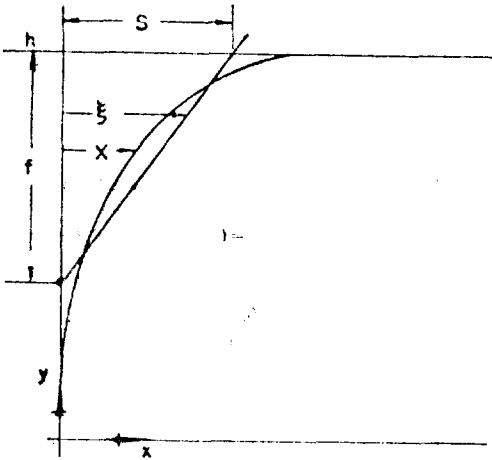


Fig. 3. Waveboard fand waterparticle envelope.

식 (9)에서  $X(y) = A \cosh(ky)$ 이므로

$$\begin{aligned} E^2 &= \int_0^1 [\xi(y) - A \cosh(ky)]^2 dy \\ &= \int_0^d [A \cosh ky]^2 dy + \int_d^1 \left[ \frac{f}{S} (y-d) - A \cosh(ky) \right]^2 dy \end{aligned} \tag{20}$$

이다. 식 (13)을 이용하여 식 (20)을 적분 정리하면 다음과 같다.

$$E^2 = \frac{S^2}{f^2} \left[ \frac{1}{3} f^3 - \frac{U^2}{B} \right] \tag{21}$$

여기서

$$B = [\sinh(k) \cosh(k) + k] / 2k$$

$$U = \frac{f \sinh k}{k} - \frac{\cosh k - \cosh kd}{k^2}$$

이다  $E^2$ 는  $S^2$ 과 직접 비례함을 알 수 있으며  $S, f, \lambda$ 가 주어지면 정현파의 파고가 결정된다. 식 (21)에서 주어진  $E^2$ 을  $S^2$ 으로 나눈후 주어진  $f$ 에 대하여  $E^2/S^2$ 을 계산하면 주어진 조파판으로 얻을 수 있는 최적상태의 파장을 구할 수 있다. 이의 계산결과를 Fig. 4에 나타내었으며  $f$ 에 대한 최적  $\lambda$ 를 알 수 있다. Fig. 4에서 얻은  $(f, \lambda)$ 를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 요구되는 정현파의 파장이 길어지면 조파판의 깊이가 커져야 함을 알 수 있으며 설계를 위하여 다음의 관계를 제시한다.

$$f/h \approx 0.35\lambda/h \tag{22}$$

한편  $\lambda/h \geq 2.8$ 이면 single flap의 한계점에 도달하여 이후에는 piston type의 조파기가 적합함을 알 수 있다.

앞서 언급한 바 Hyun[4]은  $x=0$ 에서 국부파고를 정현파의 파고로 나눈 값과, 조파판이 순간적으로 받는 힘과 torque의 최대값을 계산하였는데 그 결과는 Table 1과 Table 2에서 인용되었다. Table 2에서는 정성적인 추세는 알 수 있으나 일관성 있는 설계치는 구하기 힘들며 Table 1에서 구한  $f$ 와  $\lambda$ 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.  $\lambda/h \leq 1.5$ 에서는 비교적 일치하는 결과를 얻었으나 이보다 긴 파장에서는 많은 차이가 있다. 본 연구에서 이용된 방법은 식 (6), 식 (9), 식 (12)에 나타나 있는 고차항들을 계산할 필요가 없기 때문에 매우 간단히  $(f, \lambda)$ 의 관계를 구할 수 있다. 물론 어느 방법이나 harmonic distortion의 양과 정확한 관련을 갖지는 못하기 때문에 실험적인 연구가 요망된다.

만약 수조에서 관심있는 파장의 범위가  $0.1 \leq \lambda/h \leq 3.0$ 이고 가장 중요한 파장은  $\lambda/h = 1.25$ 이면 single flap을 쓴다면  $f/h \approx 0.42$ 가 될 것이며  $\lambda/h = 1.25$ 를 벗어나면 harmonic distortion이 증가되리라 예상된다.

이때 double-flap을 쓴다면 하부 힌지를 약간 깊게 하여 긴 파장의 범위를 약간 넓히고 상부 힌지의 위치를 적당히 택하여 짧은 파장의 영역을 담당케 하여 전체적인 파장의 범위를 넓힐 수 있다. 그러나 하부 힌지의 위치를 어느 정도 깊게 하느냐는 아직 잘 알수 없으나 double flap을 쓰는 경우 긴 파장의 조파를 위해서는 상하부 조파판의 위상이 반대가 되도록 함으로써 harmonic distortion을 줄일 수 있음은 실험적으로 밝혀졌다. [7] 따라서 설계상 약간 깊게 한다면 큰 무리는 없으며 Try and error로 그 위치를 교정하면 되겠다. 그래서 일단 하부 힌지의 위치  $f_a/h$ 가 결정되고 이에

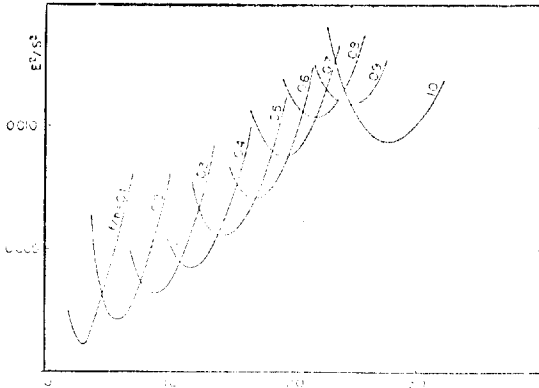


Fig. 4 Calculation Square Error  $E^2/S^2 (f/h, \lambda/h)$

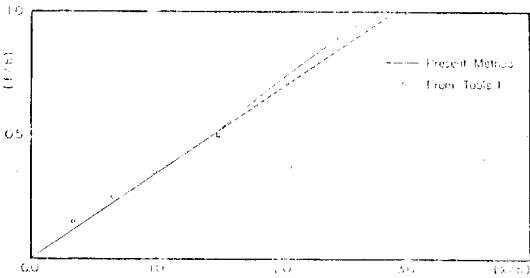


Fig. 5. Optimum relation between  $f/h$  and  $\lambda/h$

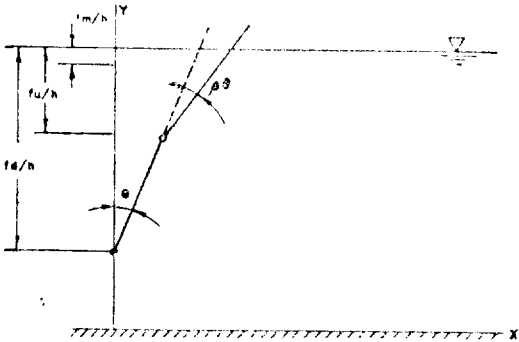


Fig. 6. Schematic diagram of Double flap Wavemaker.

해당하는 파장을  $\lambda_d/h$ 라고 하자. 그리고 요구되는 파장의 최소값을  $\lambda_m/h$ 이라고 하고 이에 해당하는  $f/h$ 를  $f_m/h$ 라하면 일차적으로  $f_u/h$ 는  $f_m/h$ 와  $f_d/h$ 의 1/3의 지점에 설치함이 합리적이라 생각한다. (그림 6)

$$\frac{f_u}{h} = \frac{f_m}{h} + \frac{1}{3} \left( \frac{f_d}{h} - \frac{f_m}{h} \right) \quad (23)$$

예로  $f_d/h=0.50$ 으로 하면  $f_m/h=0.035$  ( $\lambda_m/h=0.1$ )이므로  $f_u/h=0.19$ 가 되겠다. 이는  $\lambda_m/h$ 와  $\lambda_d/h$  사이의

2/3는  $f_u/h$ 가 담당하고 나머지 1/3과  $\frac{\lambda}{h} > \frac{\lambda_d}{h}$ 는  $f_d/h$ 의 조파판이 담당하게 하는 것이다.

#### 4. Double Flap 조파기의 최적 운전

전장의 과정에서 결정된 double flap 조파기로 조파할 때 설계된  $\lambda_u/h, \lambda_d/h$ 에 대하여는 single flap의 상태로 조파함이 가장 좋다. 그러나 double flap은 자유도가 더 주어지기 때문에 상하부 조파판의 위상을 같게 또는 반대로 작동함으로써 harmonic distortion을 최소로 줄일 수 있으며 이는 double flap 조파기의 최대 장점이다. 이러한 위상관계는 앞장의 논리를 그대로 적용하여 구할수 있다.

여기서 선형이론을 double flap 조파기에 적용하여 해석한 Hyun[5]의 결과를 인용하면 다음과 같다. 모든 길이와 wave number를 수조의 길이로 무차원화하면 조파기의 최대 변위는

$$\xi(y) = \begin{cases} 0 & ; 0 < y \leq H_d \\ \theta(y-H_d) & ; H_d < y \leq H_u \\ \theta(y-H_d) + \beta\theta(y-H_u) & ; H_u < y \end{cases} \quad (24)$$

로 주어지고 정현파에 해당하는 유체입자의 x방향 최대 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$X(y) = A \cosh ky \quad (25)$$

여기서

$$A = \frac{2k\theta[U(H_d) + U(H_u)]}{\sinh k \cosh k + k} \quad (26)$$

$$U(r) = \frac{1-r}{k} \sinh k - \frac{1}{k^2} (\cosh k - \cosh kr) \quad (27)$$

이며 극부항은 나타나지 않았다.

따라서 구하는 square error는

$$E^2 = \int_0^1 [\xi(y) - X(y)]^2 dy \quad (28)$$

로 주어지고 식 (24)와 식 (25)를 대입하여 적분 정리하면 다음과 같이 된다.

$$E^2 = \theta^2 \left[ \frac{1}{3} (f_d^3 + \beta^2 f_u^3) + 2\beta V - \frac{(U_d + \beta U_u)^2}{B} \right] \quad (29)$$

여기서

$$B = \frac{\sinh k \cosh k + k}{2k}$$

$$V = \frac{1}{3} - \frac{1}{2} (H_d + H_u) + H_d H_u + \frac{1}{6} H_u^3 - \frac{1}{2} H_d H_u^2$$

$$U_d = U(H_d)$$

$$U_u = U(H_u)$$

로 정의한다.  $\beta=0$ 이면 single flap의 경우인 식(21)과 일치한다. 그러나 여기서는  $f_d$ 와  $f_u$ 를 고정시키고  $\beta$ 를 변화 시키면서  $E^2$ 를 최소로 하는 파장  $\lambda$ 를 구한다.  $\beta$  대신  $\alpha$ 를 다음과 같이 정의하고

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + |\beta|}$$

주어진  $\alpha$ 에 대하여 조파되는 최적 파장을 구하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이  $\lambda_w/h \leq \lambda/h \leq \lambda_d/h$ 에서는 조파관의 phase를 같게 함으로써 좋은 파형을 얻을 수 있고  $\lambda/h > \lambda_d/h$ 인 경우는 phase를 반대되게 하여 좋은 파형을 기대할 수 있다.

$\alpha = -0.5$ 이면 상부 조파관은 항상 수직을 유지하게 되어서 piston형의 조파관 구실을 하게 된다. 여기서 설계된 힌지의 위치로는  $\lambda/h \geq 1.7$ 인 경우  $|\alpha| > 0.5$ 이므로 상부 조파관은 이미 수직의 범위를 벗어나고 있는 데 이것이 설계상 바람직 하지 못한다면  $f_d$ 를 증가시켜서 해결할 수 있다. 한편  $\alpha = -f_w/(f_d + f_w)$ 이면 수면에서 조파관은 정지해 있는 상태로 수면 아래의 조파관을 쇠기형태의 piston으로 볼 수 있다. 이는 중요한 의미를 갖지 않으나 이러한 범위에서는 이미 하부 조파관의 기능이 제 역할을 못하고 있음이다. 따라서 하부 힌지를 더 깊게 하여야 한다. 예로  $f_w = 0.26$ ,  $f_d = 0.70$ 의 경우에 대하여 계산결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞서  $f_d = 0.5$ 의 경우에는  $\lambda/h \approx 1.7$ 에서  $\alpha = -0.5$ 인데 반하여  $f_d = 0.70$ 의 경우에서  $\lambda/h \approx 2.3$ 에서  $\alpha = -0.5$ 가 되었다.

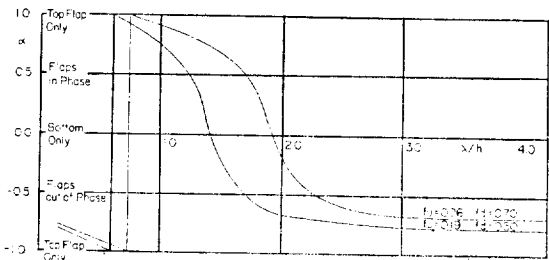


FIG. 7 PHASING BETWEEN FLAPS

Fig. 7. Phasing between Flaps.

### 5. 결 론

이상에서 Flap type 조파기에 관한 기본 선형이론과의 결과를 이용하여 조파관의 크기를 결정하는 방법을 Linear Regression을 이용하여 고찰하였다. 여기서 얻은 결론은

(1) Single flap의 경우 식 (22)의 관계로 주어진 파장에 최적한 조파관의 깊이를 결정한다.

$$\frac{f}{h} = 0.35 \frac{\lambda}{h}$$

(2) Double flap의 경우 요구되는 파형의 파장이 주어지면 이에 따라 적당한 하부와 상부의 힌지위치를 결정하되 하부힌지의 위치는 긴파장에서  $|\alpha|$ 가 0.5의 범위를 많이 벗어나지 않도록 하고 상부힌지의 위치는 식 (23)의 관계에서 구하는 것이 합리적이다.

이상의 결론은 앞서 언급한 바 square error가 harmonic distortion에 직접 정량적인 관계가 있다는 가정에 근본을 두고 있는 바 실험적인 방법 내지 고차이론에 의하여 확인할 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Biesel, F., "Etude theorique d'un certain type d'appareil a houle," La Houille Blanche, No. 2, 1951. *English Translation in Project Rept.* 39, March 1954, St. Falls Hydraulic Lab., Univ. of Minnesota, Minneapolis, Minn.
- [2] Ursell, F., Dean, R.G., and Yu, Y.S., "Forced Small-Amplitude Water Waves: A Comparison of Theory and Experiment," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 7, Part 1 1959, pp.33-52.
- [3] Taniguchi, K. and Shibata, J., "Wavemaker of Mitsubishi Nagasaki Experimental Tank," *Yugoslav Ship Hydrodynamics Inst.*, No. 9, Sept. 1960, pp. (17-1)-(17-23).
- [4] Hyun, J.M., "Theory for Hinged Wavemakers of Finite Draft in Water of Constant Depth," *J. of Hydronautics*, Vol. 10, No. 1, Jan. 1976, pp.2-7.
- [5] Hyun, J.M., "Theory for Articulated Double flap Wavemakers in Water of Constant Depth," *J. of Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 141, 1977, pp. 85-92.
- [6] Schneider, et al., "Design Development Final Report for the Wave-maker for the Engineering Studies Complex at the U.S. Naval Academy, Annapolis, Maryland." *Enclosure (6)*, 1971.
- [7] Allen K. & Marvin M., "Dual Flap Wavemaker Phasing and Motion Apportionment by Linear Regression," *Prec. of 18th ATTC*, Vol. 3, Aug. 1977, pp.705-718.