

천해역에서의 항주파의 특성에 관한 연구

강성진* · 김선규* · 손창배** · 김종성** · 홍정혁* · 김창제**

*한국해양수산연수원, **한국해양대학교

A study on the characteristics of shipwaves in shallow water

Song-Jin. Gang* · Sun-Kyu. Kim* · Chang-Bae. Son** · Jong-Sung. Kim**
· Jeong-Hyeok. Hong* · Chang-Je. Kim**

*Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 608-829, Korea

**National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 항주파에 의해 해안침식, 호안 결괴, 하역곤란 및 어선 등을 포함한 소형선박의 동요가 발생하며, 심지어 최근에는 수상오토바이, 모터보트 및 여객선의 고속주행은 해수욕장의 수영객 및 낚시꾼 등 어로작업중인 어민에게 위협이 되고 있다. 특히, 천해역에서 발생한 항주파는 심해역에서 발생한 항주파보다 연안시설 또는 작업인원의 안전에 더 큰 영향을 미칠 수 있으며, 파고는 천해역에서 발생하여 극천해역으로 진행하는 경우, 천해역 파고의 1.8배정도로 커진다. 또한 극천해역에 약간의 흐름이 존재하여도 파는 진행하지 못한다.

핵심용어 : 항주파, 천해역, 심해역, 항주파의 특성

ABSTRACT : Damages such as beach erosion, seawall destruction and difficulty of cargo working due to rolling of ship result from shipwave. In addition, high speed operations of motor boat and passenger ship respectively jeopardize sea bathers and anglers' safety. In general, shipwaves in shallow water have worse effect on coastal facilities and working people there than those in deepwater. This study aims to investigate the characteristics of shipwaves which occurred and propagated in shallowwater experimentally and theoretically.

KEY WORDS : shipwave, shallow water, deepwater, characteristics of shipwaves

1. 서 론

최근에 해양레저 또는 해양스포츠의 증가로 섬, 해안가에 많은 관광객이 밀집함에 따라 고속여객선과 고속레저보트가 증가하고 있다. 이런 고속선에 의한 항주파는 작업중인 어선, 소형계류선, 낚시객 또는 심지어 수영객의 안전에 큰 위협이 된다. 고속 여객선이 빈번하게 통항하는 곳에서는 해안침식이 발생했다는 보고도 있다(한, 2004).

심해역에서 발생한 항주파는 천해역 또는 극천해역으로 전파하면서 감쇠가 일어나 해안시설이나 인원에 큰 영향을 미치

지 못하는 경우가 대부분이지만 항주파가 천해역에서 발생하면, 특히 고속선에 의해 발생하면 재산피해는 물론 인명피해가 발생하기 쉽다.

항주파에 관한 많은 연구가 수치시뮬레이션(Morita et al., 1995, 이 등, 2003, 신과 정, 2003), 실선실험(Shiotani et al., 1996, 한, 2004), 수조실험(倉田 등, 1983, Sadakane et al., 1994)에 의해 수행되었다. 또한, 일본해난방지협회(1971)는 선박의 속력, 길이, 엔진 출력, 배수량 등을 고려하여 실제선박이 일으킬 수 있는 항주파의 파고에 관한 식을 제안하였다. 즉, 주로 심해역에서 발생한 항주파를 검토한 연구가 대부분이다.

따라서 이 연구에서는 천해역에서 발생한 항주파의 특성을 고찰하고 그 항주파의 전파특성을 검토한다.

강성진*, 경희원, gangjune@seaman.or.kr 051)620-5845

김창제**, 종신회원, kimc@hhu.ac.kr 051)410-4226

2. 항주파 실험

2.1 차원해석

항주파의 무차원 최대파고 H_{max}/L_s (L_s 는 선박의 길이)는 다음과 같은 6개의 무차원 물리량에 크게 지배될 것으로 판단된다.

$$\frac{H_m}{L_s} = \phi\left(\frac{v_s}{\sqrt{gL_s}}, \frac{L_s}{h}, \frac{d}{h}, \frac{S}{L_s}, \frac{gT_d^2}{h}, \alpha\right) \quad (1)$$

여기에서, v_s 는 선박의 속도, g 는 중력가속도, h 는 수심, d 는 선박의 흘수, S 는 항적 중심선으로부터의 거리 및 α 는 항적선에 대한 종파의 각도이다.

2.2 실험장치와 방법

실험은 한국해양대학교 해사대학의 3차원 평면수조 ($L \times W \times H = 2800 \times 600 \times 100$ cm)를 이용하여 수행되었다. 대차에 Table 1에 나타낸 모형선박을 매달고 수심 및 속력을 조정하여 실험을 하였다.

Table 1 Model ship

Kind of ship	LOA(cm)	Breadth(cm)	Depth(cm)
Tanker ship	77.0	12.0	6.5
Container ship	71.5	11.5	5.5
Fishing boat	42.5	8.7	5.0
Tug boat	35.0	8.2	5.5

3. 파장 및 주기

수심 Froude수 (v_s/\sqrt{gh} , v_s 는 선박의 속도, g 는 중력가속도, h 는 수심)가 1보다 작은 경우의 항주파의 횡파 파장 L_t 및 주기 T_t 를 다음 식에서 얻는다.

$$\frac{gL_t}{2\pi} t \frac{2\pi h}{L_t} = v_s^2 \quad (2)$$

$$T_t = \sqrt{\frac{2\pi}{g} L_t c \left(\frac{2\pi h}{L_t}\right)} \quad (3)$$

식(2)에서 파장 L_t 는 선박의 속도 v_s 와 수심 h 의 함수이다. 또한 식(3)의 주기 T_t 에는 파장의 함수가 추가된다.

한편, 수심이 충분히 깊은 경우의 파장 L_{0t} 및 주기 T_{0t} 는 식(2) 및 식(3)으로부터 각각 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} L_{0t} &= \frac{2\pi}{g} v_s^2 \\ &= 0.641 v_s^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T_{0t} &= \frac{2\pi}{g} v_s \\ &= 0.641 v_s \end{aligned} \quad (5)$$

종파(발산파)의 파장 L_d 및 주기 T_d 는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$L_d = L_t \cos^2 \alpha \quad (6)$$

$$T_d = T_t \cos^2 \alpha \quad (7)$$

여기에서, α 는 항적선에 대한 종파의 각도이며, Froude수가 1보다 작은 경우, 다음 식으로 나타낸다.

$$\alpha = 35^\circ.27 [1 - \exp\{12(\text{Fr} - 1)\}] \quad (8)$$

Fig. 1은 Froude수의 변화에 따른 α 의 변화를 나타내며, Froude수가 0.7이상일 때, 급격히 감소한다.

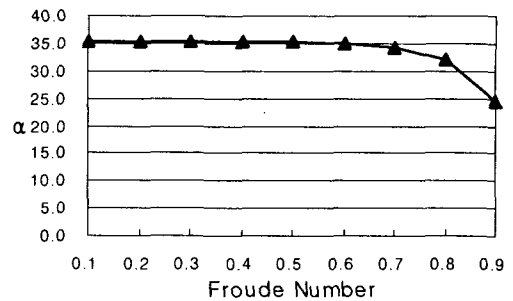


Fig. 1 Variation of wave angle(α) relating to Froude number

제한속도가 10노트이고 수심이 충분한 항만의 항내에서 종파의 파장 및 주기는 각각 11.3m 및 2.7s이다.

Fig. 2는 광양항에서 항주파를 관측한 결과(한, 2004)이며, 선박의 속력과 주기의 관계를 나타낸다. 수심은 9-10m, 선박의 속력은 10-13노트 및 선박의 총톤수는 88-52,000G/T인 경우이다. 항주파의 주기는 선속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

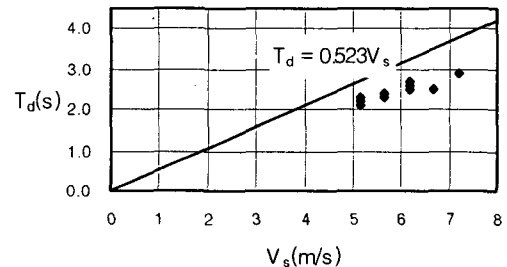


Fig. 2 Relationship between ship's velocity and period of shipwave

4. 파고변화

4.1 실험결과

Fig. 3은 Froude수의 변화에 따른 무차원파고를 나타낸다. Froude수가 증가함에 따라 파고는 증가하나, Froude수가 1.202 인 경우 파고는 현저하게 작아진다. 이유는 Froude수가 커서 파는 깨지기 때문이며, 실험시 확인되었다.

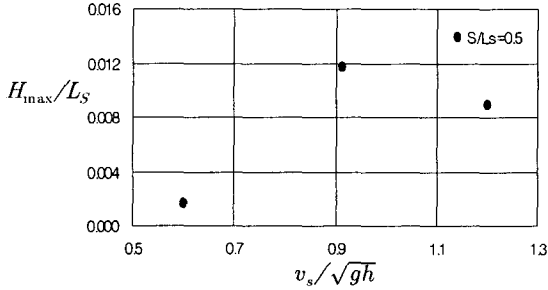


Fig. 3 Non-dimensional wave height relating to Froude number(exp. Table 1 Tanker Ship)

광양에서의 현장실험 결과(한, 2004)는 Froude수가 증가함에 따라 파고가 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 4).

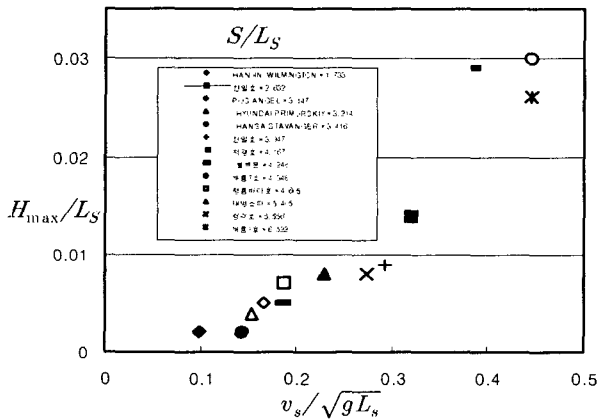


Fig. 4 Non-dimensional wave height relating to Froude number(field)

Fig. 4는 수심 9m에서 측정한 값으로 관측 기간동안 통항한 선박으로부터의 항주파이다.

4.2 산정 결과

임의 거리 x 의 변화에 따른 항주파의 최대파고 H_{max} 는 다음 식으로 표현된다(Fig. 5 참조).

$$H_m = H_n \left(\frac{100}{x} \right)^{1/3} \left(\frac{v_s}{v_E} \right)^3 \quad (9)$$

여기에서, $H_n = (L_s/100)^{1/3} \sqrt{E_{HPW}/2.2L_s v_E}$ 는 항주파의 특성파고(m), 또는 선박이 만재항해속력으로 항해할 때 항적중심선으로부터 100m 거리에서 관측되는 최대파고, v_E 는 만재항해속력(knot), $E_{HPW} = E_{HP} - E_{HPF}$ 는 조파마력(W), $E_{HP} = 0.65 S_{HPM}$, S_{HPM} 은 연속최대축마력(W),

$E_{HPF} = \rho S v_0^3 C_f / \Delta$, 470, ρ 는 해수의 밀도($= 1.025 \text{ kg/m}^3$), $S = 2.5 \sqrt{\nabla L_s}$, ∇ 는 선박의 만재배수체적(m^3) $v_0 (= 0.514 v_E)$ 는 만재항해속력(m/s), $C_f (= 0.075 / \{ \log(v_0 L_s / \nu) - 2 \}^2)$ 는 마찰저항계수, ν 는 해수의 동점성계수($= 1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)이다.

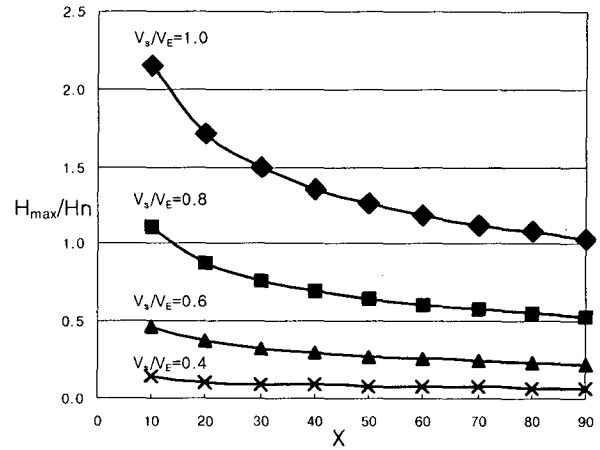


Fig. 5 Non-dimensional wave height relating to distance

Fig. 6-10은 실제 선박(Table 1)의 항주파의 파고를 식(9)에 의해 산정한 것이다(한, 2004). Froude수($v_s/\sqrt{gL_s}$)가 클수록, 선박으로부터의 거리(v_s/L_s)가 가까울수록 항주파의 파고는 커진다. 또한 항주파의 파고는 Froude수에 크게 의존함을 알 수 있다.

Table 2 Ships' dimension

Detail	Unit	Patrol boat	Port cleaning vessel	Lighthouse and buoy tender	Fishing boat I	Fishing boat II
Tonnage	ton	38.27	149.0	85.0	5.0	10.0
LOA	L_s (m)	17.28	31.35	29.0	10.0	13.0
Speed	v (knot)	20	20	20	20	20

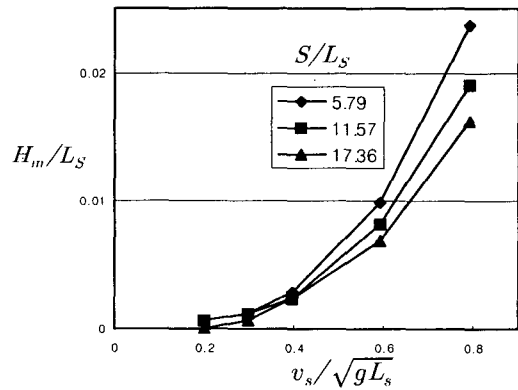


Fig. 6 Non-dimensional wave height relating to Froude number(Patrol boat)

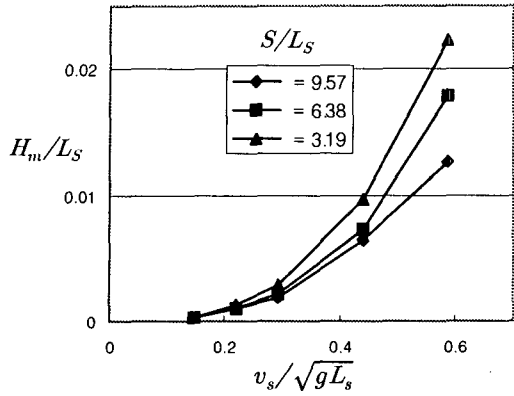


Fig. 7 Non-dimensional wave height relating to Froude number (Port cleaning vessel)

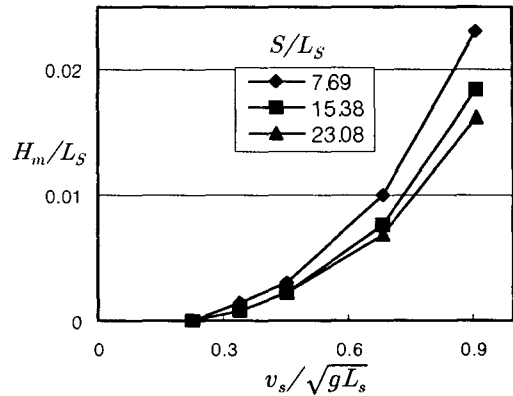


Fig. 10 Non-dimensional wave height relating to Froude number (Fishing boat II)

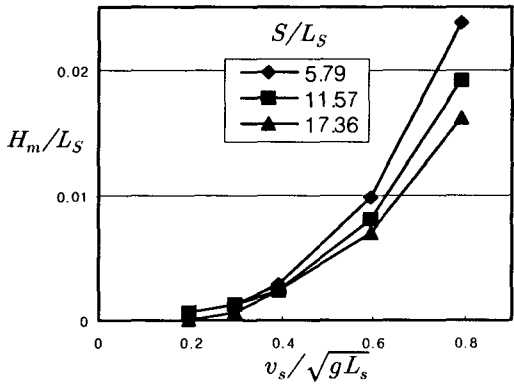


Fig. 8 Non-dimensional wave height relating to Froude number (Lighthouse and buoy tender)

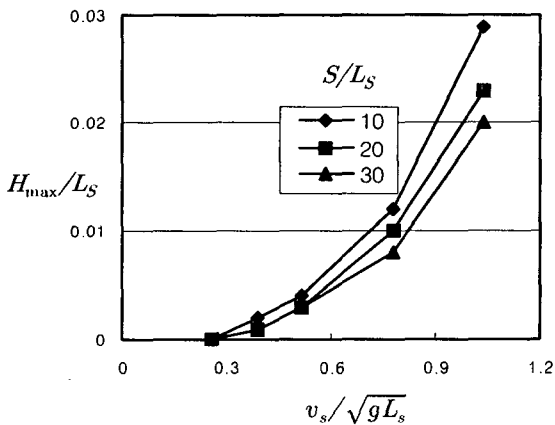


Fig. 9 Non-dimensional wave height relating to Froude number (Fishing boat I)

항주파가 심해에서 발생하여 천해, 극천해로 진행하는 경우, 단위폭당 전달되는 파의 에너지는 일정하다. 따라서 파고변화는 다음 식과 같다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \right]^{-1/2} \quad (10)$$

여기에서, H 는 어떤 지점에서의 파고, H_0 는 심해파고, k 는 파수이다.

식(10)을 표현한 것이 Fig. 11이다.

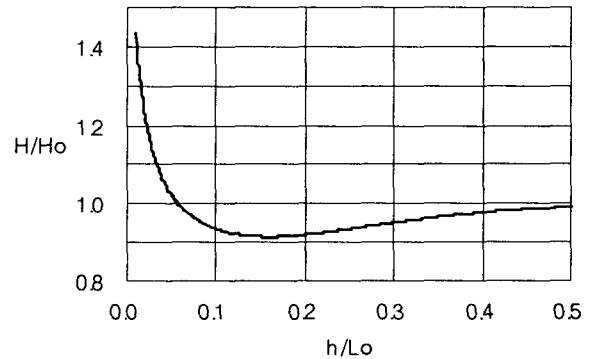


Fig. 11 Wave height change related to water depth (deep to very shallow water)

파가 심해에서 극천해로 진행함에 따라 파고는 천해에서 작아지고 극천해에서는 상승하며 심해에서의 1.45배에 도달한다.

한편, 천해에서 발생하여 극천해로 진행하는 파일 경우, 에너지보존법칙을 적용하면 다음식이 얻어진다.

$$\frac{H_s}{H} = \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \sqrt{\frac{1}{kh} \tanh kh} \right]^{1/2} \quad (11)$$

식(11)을 Fig. 12에 나타낸다. Fig. 12에서 파고는 h/L 을 기준으로 하였다.

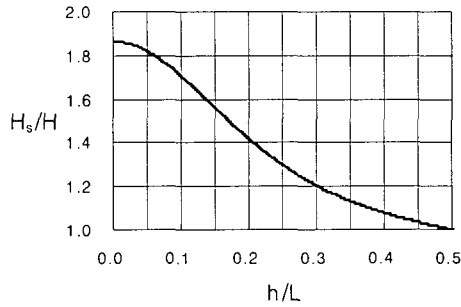


Fig. 12 Wave height change related to water depth(shallow to very shallow water)

파가 천해에서 발생하여 극천해로 진행할 경우, 극천해에서의 파고는 천해의 1.8배정도까지 증가한다.

심해에서 발생한 항주파가 진행하면서 흐름을 만날 경우, 흐름이 있는 부분의 파고는 심해에서의 파고와는 달라진다.

심해에서 발생한 파의 파속 c_0 , 파장 L_0 , 파고 H_0 인 파가 유속 U 인 흐름을 거슬러($U < 0$)갈 때, 어떤 수심에서의 파속은 $c + U$, 파장은 L , 파고는 H 라 한다. 이 경우, 주기 T 는 변하지 않기 때문에 다음 식이 성립한다.

$$T = \frac{L_0}{c_0} = \frac{L}{c + U} \quad (12)$$

하천에서 에너지수송량은 $Ec_y + EU$ 이므로 다음 식이 성립한다.

$$E(c_y + U) = \text{const.} = E_0 C_{y0} \quad (13)$$

따라서 $C_{y0} = c_0/2$, $E_0 = \rho g H_0^2/8$, $E = \rho g H^2/8$, $c_y = nc$ 를 위의 식에 대입하여 파고비에 관한 다음 식을 얻는다.

$$\frac{H}{H_0} = [2n \left(\frac{c}{c_0}\right) + 2 \left(\frac{U}{c_0}\right)]^{-1/2} \quad (14)$$

또한, 파속 L/T 는 $c + U$ 와 같으므로 다음식이 성립한다.

$$c^2 = \left(\frac{L}{T} - U\right)^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (15)$$

식 (15)에 $h^* = 4\pi^2 h / (gT^2)$, $U^* = U / (c_0) = 2\pi U / (gT)$, $k^* = gT^2 / (2\pi L)$ 를 대입하고 정리하여 다음 식을 얻는다.

$$(1 - U^* k^*)^2 = k^* \tanh k^* h^* \quad (16)$$

이 식에서 U^* 와 h^* 가 주어지면 k^* 를 구할 수 있다. 또한, U^* 의 부호는 파가 흐름을 따라서 같은 방향으로 진행할 때는 (+), 파가 거슬러 올라갈 때는 (-)이다.

식(12) 및 식(15)를 이용하여 파속비 c/c_0 및 L/L_0 를 식 (17)

및 식 (18)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{c}{c_0} = \frac{(L/T) - U}{(gT/2\pi)} = \frac{1}{k^*} - U^* \quad (17)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1}{k^*} \quad (18)$$

이들을 정리하여 파고비를 구하면 다음 식이 성립한다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \left(\frac{L/T - U}{gT/2\pi}\right) + 2 \left(\frac{U}{c_0}\right) \right]^{-1/2} = \left[\left(1 + 2k^* h^* \operatorname{cosech} 2k^* h^*\right) \left(\frac{1}{k^*} - U^*\right) + 2U^* \right]^{-1/2} \quad (19)$$

Fig. 13은 흐름변화에 따른 파고비를 나타낸 것이다.

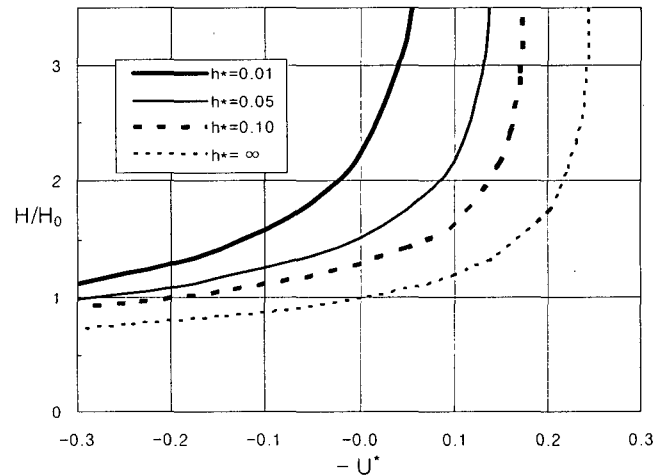


Fig.13 Wave height change related to constant current

Fig. 13에서, 수심이 낮은 경우, 약간의 흐름이 있으면 파가 흐름을 거슬러서 진행할 수 없으며, 또한 흐름이 파속의 1/4배 이상이면 파는 흐름을 거슬러서 진행하지 못한다.

5. 결 론

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 항주파 주기의 산정값은 관측값과 잘 일치한다.
- 2) 항주파의 파고는 Froude수에 크게 의존한다.
- 3) 심해에서 발생한 파의 파고는 천해에서 작아지고 극천해에서 상승하며 극천해의 파고는 심해에서의 1.45배에 도달한다.
- 4) 파가 천해에서 발생하여 극천해로 진행할 경우, 극천해의 파고는 천해에서의 1.8배정도까지 증가한다.
- 5) 수심이 낮은 경우, 약간의 흐름이 있으면 파가 흐름을 거슬러서 진행할 수 없으며, 또한 흐름이 파속의 1/4배 이상이면

면 파는 흐름을 거슬러서 진행하지 못한다.

참 고 문 헌

- [1] 신승호, 정대득(2003), 비선형분산파랑모형을 이용한 항주파의 발생과 전파에 관한 수치예측모형 개발, 한국항해항만학회지 제27권 제5호, pp.527-537
- [2] 이화영, 권세영, 오병철, 전인식(2003), 韓國海岸海洋工學發表論文集 第14券, pp. 270-275
- [3] 한태영(2004), 선박 운항에 따른 항주파 영향 및 저감 방안에 관한 연구, 연세대학교 공학대학원 석사학위 논문
- [4] Hiroyuki Sadakane et al.(1994) 航走波を受ける小型船の動搖に関する實驗的研究, 日本航海學會論文集 91号, pp.79-88
- [5] 森田修二 外(1995), 港内における航走波の簡易解析手法, 海洋開發論文集 Vol. 11, pp.13-18
- [6] 塩谷茂明 外(1996), 三種類の小型實船による航走波の特性, 水産工學 Vol. 33 No. 2, pp. 123-134
- [7] 日本海難防止協會(1971), 海上交通安全に關る基礎的事項の調査研究, -航行船舶の航走波が小型船舶に及ぼす影響の研究-, 海難防止の調査研究事業報告書, 完了報告書, p. 83
- [8] 倉田克彦 外(1983), 淺海水路中の航走波の特性および繫留船舶に及ぼすその影響, 第30回 海岸工學講演會論文集, pp.598-602