

항주파고의 특성에 관한 연구

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

*한국해양수산연수원, **한국해양대학교

A study on the characteristics of shipwaves

† 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 : 항주파는 해안침식, 호안 결괴, 하역곤란 및 어선 등 소형선박의 동요를 발생시키며, 최근에는 고속으로 항행하는 수상오토바이, 모터보트 및 여객선 등이 수영객, 낚시꾼 및 어로작업중인 어민에게 위협이 되고 있다. 본 연구에서는 실험 및 이론적으로 항주파고의 전파특성을 검토하였으며 상대수심이 얇은 수역에서 발생한 항주파가 천해역으로 전파하는 경우 파고증가율이 커지며, 수심이 얇을수록 유속이 느린 흐름이 존재하여도 파가 진행하지 못함을 알 수 있다.

핵심용어 : 항주파, 천해역, 전이역, 심해역, 항주파고

Abstract : Shipwaves can cause beach erosion, seawall destruction and difficulty of cargo working due to rolling of ship. In addition, high speed operation of motor boat and passenger ship jeopardize sea bathers and anglers' safety. This study aims to investigate the characteristics of shipwaves which occurred and propagated in shallow water experimentally and theoretically. Shipwaves which occurred and propagated in shallow water depth represent large wave height increase.

Key words : Shipwave, Shallow water, Intermediate depth, Deep water, Shipwave height

1. 서 론

최근에 해양레저 또는 해양스포츠 활동의 증가로 섬이나 해안에 많은 관광객이 밀집함에 따라 고속여객선과 고속레저보트가 증가하고 있다. 이런 고속선에 의한 항주파는 작업중인 어선, 소형 계류선 등 선박은 물론, 낚시객 또는 수영객의 안전에도 큰 위협이 되고 있다. 고속 여객선이 빈번하게 통항하는 곳에서는 해안침식이 발생하였다는 보고도 있다(한, 2004).

심해역(deep water)에서 발생한 항주파는 전이역(intermediate depth) 및 천해역(shallow water)으로 전파하면서 감쇠가 일어나 해안시설이나 인명에 큰 영향을 미치지 못하는 경우가 대부분이지만 항주파가 얇은 수역에서 발생하면, 특히 고속선에 의해 발생하면 재산피해는 물론 인명피해가 발생하기 쉽다.

항주파에 관한 연구는 주로 수치모델에 의한 연구 및 실험적 연구로 나누어져 수행되었다.

특히 항만내부, 연안역 혹은 좁은 수로 등에서의 항주파는

기존의 조선공학분야의 연구와는 달리 파랑의 천수효과 및 복잡한 경계조건을 고려한 수치모델이 필요하며, 이를 고려한 수치모델에 관한 연구로는 선형의 비정상완구배방정식을 이용한 간이해석법에 관한 연구(森田 등, 1995), Dingeman (2000)이 제안한 불규칙파 전파방정식을 이용한 3차원 파랑전파모형에 관한 연구(이 등, 2003), 쇄파 등에 의한 파랑감쇄까지 고려한 Boussinesq 방정식에 기초한 수치모형에 관한 연구(신과 정, 2003)등이 있다.

한편, 실험적 연구로는 항만내과 항주파에 의한 선박동요에 관한 실험적 연구(倉田 등, 1983), 소형선박의 항주파에 의한 거동해석에 관한 실험적 연구(定藤 등, 1994), 소형선박을 이용한 현지실험의 결과와 기존의 경험식을 비교한 연구(塩谷 등, 1996), 여수항의 항주파에 대한 관측연구(한, 2004) 등이 있다.

일본해난방지협회(1971)에서는 선박의 속력, 길이, 엔진 출력, 배수량 등을 고려하여 실제 선박이 일으킬 수 있는 항주파의 파고에 관한 식을 제안하였다.

† 교신저자 : 강성진(정회원), gangjune@seaman.or.kr 051)620-5845

* rajaro73@hotmail.com 051)620-5799

** 중신회원, kaigan@hanmail.net 051)405-6535

** 중신회원, kjsung@hhu.ac.kr 051)410-4474

* 정회원, jhhong@seaman.or.kr 051)620-5804

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

이 연구에서는 모형선박을 이용한 실험결과 및 수심변화에 따른 항주파의 전반적 전파특성에 관하여 검토한다.

2. 실험 개요

실험은 한국해양대학교 해사대학의 3차원 평면수조(L×W×H=2800×600×100cm)를 이용하여 수행하였다. Fig. 1은 항주파 실험시의 수조의 단면도를 나타낸다. 대체에 Table 1에 표시한 모형선박을 매달고 선박중심선에 수직인 방향으로 거리에 따라 다수의 파고계를 설치하고 수심 및 속력을 조정하여 항주파의 파고를 측정하였다.

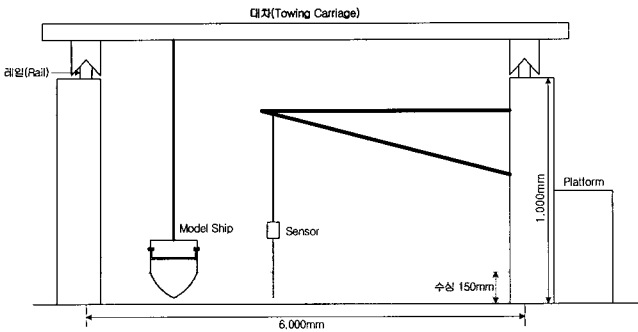


Fig. 1 Sketch of shipwave experiment

Table 1 Dimension of model ships

Kind of ship	LOA(cm)	Breadth(cm)	Depth(cm)
Oil tanker	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. 항주파의 특성

3.1 파장 및 주기

Depth Froude Number($Fr_h = v_s / \sqrt{gh}$, 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 식으로 주어진다(이 등, 2003; 한, 2004).

$$\frac{gL_t \tanh \frac{2\pi h}{L_t}}{2\pi} = v_s^2 \quad (1)$$

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

식(1)에서 파장 L_t 는 선박의 속도 v_s 와 수심 h 의 함수이다.

또한 주기 T_t 는 수심 h 이고 파장 L_t 인 진행파에 대한 것으로 식(2)로 주어진다.

한편, 항주파의 진행이 수심의 영향을 받지 않는 충분히 깊은 수심에 대해서 파장 L_{0t} 및 주기 T_{0t} 는 식(1) 및 식(2)으로부터 각각 다음 식이 된다.

$$L_{0t} = \frac{2\pi}{g} v_s^2 = 0.641 v_s^2 \quad (3)$$

$$T_{0t} = \frac{2\pi}{g} v_s = 0.641 v_s \quad (4)$$

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

$$L_d = L_t \cos^2 \alpha \quad (5)$$

$$T_d = T_t \cos^2 \alpha \quad (6)$$

여기에서, α 는 항적선에 대한 중파의 각도이며, Depth Froude Number가 1보다 작은 경우, 다음 식으로 표시된다.

$$\alpha = 35.27 [1 - \exp\{12(Fr_h - 1)\}] \quad (7)$$

Fig. 2는 Depth Froude Number의 변화에 따른 α 의 변화를 나타내며, Froude Number가 0.7 이상일 때, 급격히 감소한다.

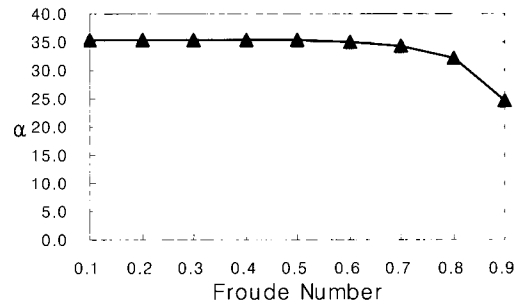


Fig. 2 Variation of wave angle(α) relating to Froude number

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

Fig. 3은 광양항에서 실측한 항주파 주기와 선박의 속력과의 관계를 나타낸 것이다(한, 2004). 실측자료는 수심이 9~10m, 선박의 속력은 10~13노트 및 선박의 총톤수는 88~52,000G/T 인 경우이며, 항주파의 주기는 선속이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다.

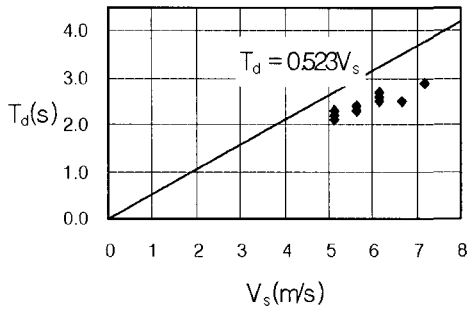


Fig. 3 Relationship between ship velocity and shipwave period

3.2 파고변화

Fig. 4는 실험을 통해 측정된 항주파 시계열($Fr_h=0.912$, $h=15\text{cm}$, 선체길이 $L_s=76\text{cm}$, 선체중앙으로부터의 수직거리 $=2.5L_s$ 인 경우)의 일례이다. 최대파고 H_m 은 연속되는 파봉(파곡)과 파곡(파봉) 중에서 둘 사이의 수직거리가 가장 긴 경우로 취하고 이때의 시간차를 최대 반주기 $T_m/2$ 로 정의하여 해석에 사용하였다.

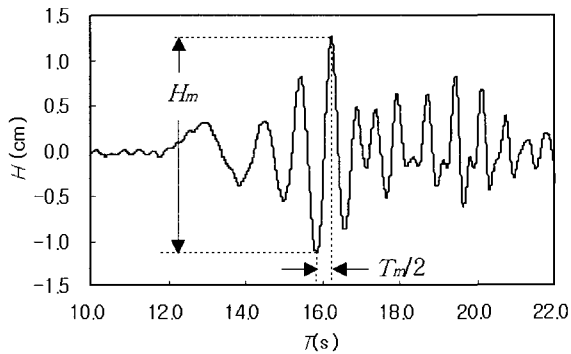


Fig. 4 Maximum wave height H_m and maximum half period $T_m/2$

한편, Fig. 5~Fig. 8은 Table 1에 표시한 각종 선박의 선체 중앙선으로부터의 수직거리에 따른 파고의 변화의 실험결과를 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림중의 H_m 은 최대파고, L_s 는 선체길이, S 는 선체 중심선으로부터의 수직거리를 나타낸다.

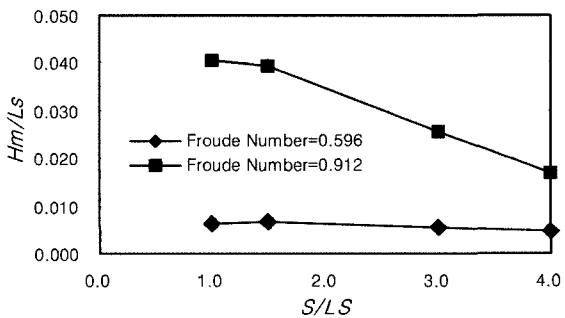


Fig. 5 Non-dimensional wave height relating to Froude number(exp. Table 1 Oil tanker)

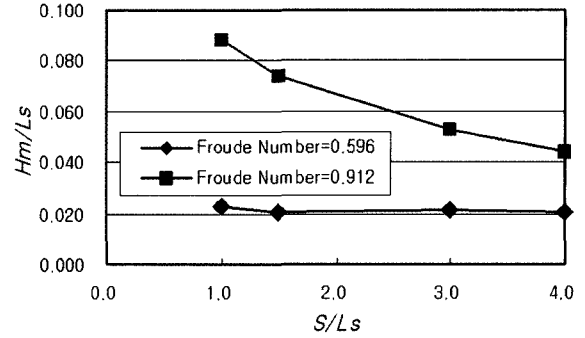


Fig. 6 Non-dimensional wave height relating to Froude number(exp. Table 1 Container ship)

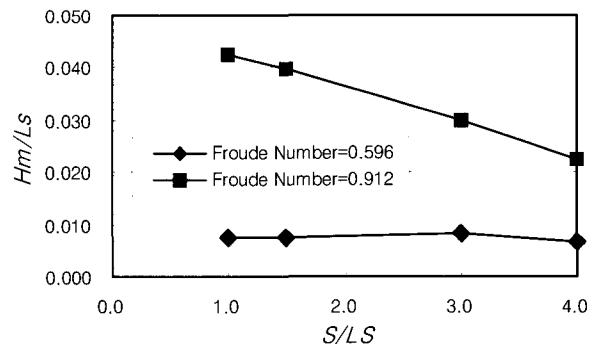


Fig. 7 Non-dimensional wave height relating to Froude number(exp. Table 1 Fishing boat)

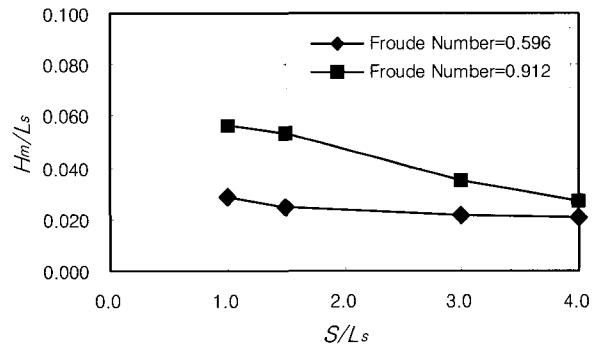


Fig. 8 Non-dimensional wave height relating to Froude number(exp. Table 1 Tug boat)

그림에서 알 수 있듯이 Depth Froude Number가 클수록 파고도 크며, Depth Froude Number가 큰 경우에 파고는 거리에 따라 뚜렷이 감소하는 경향을 보이지만, Depth Froude Number가 작은 경우에는 거리에 따른 파고 감쇄가 뚜렷하지 않다.

Fig. 9는 광양항의 수심 9m 지점에서 일정기간 통항한 각종 선박의 항주파 실측 자료(한, 2004)를 바탕으로 Depth Froude Number와 무차원 최고파고(H_m/L_s)의 관계를 나타낸 것으로 Froude Number가 증가함에 따라 파고가 증가하는 경향을 나타낸다.

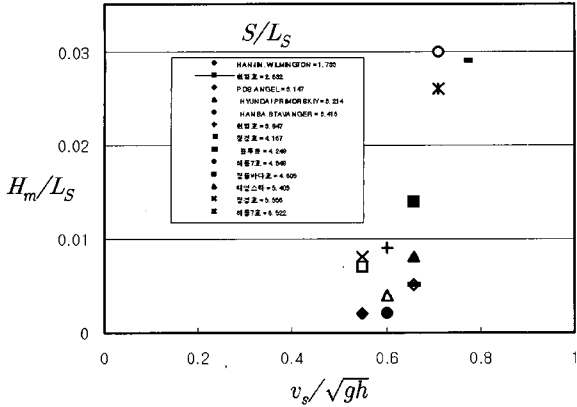


Fig. 9 Non-dimensional wave height relating to Froude number(field)

일본해난방지협회(1971)에서는 선박의 속력, 길이, 엔진 출력, 배수량 등의 제반 사항을 고려하여 실제 선박이 일으킬 수 있는 항주파의 파고에 관한 경험식을 제안하고 있다. 이 식은 선박중심선에서 수직한 방향으로의 거리 S 에 대한 항주파의 최대파고 H_m 으로 표현되며 식(8)에 표시하였다. Fig. 10은 식(8)을 도식화한 것으로 항적중심선에서 거리가 멀어질수록 파고가 감소하는 경향으로 나타내고 있다.

$$H_m = H_n \left(\frac{100}{S} \right)^{1/3} \left(\frac{v_s}{v_E} \right)^3 \quad (8)$$

여기서, $H_n = (L_s/100)^{1/3} \sqrt{E_{HPW}/2.2L_s v_E}$ 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), $E_{HP} = 0.65S_{HPM}$, S_{HPM} 은 연속최대축마력(W), $E_{HPF} = \rho S' v_0^3 C_f / 1,470$, ρ 는 해수의 밀도($=1.025 \text{ kg/m}^3$), $S' = 2.5 \sqrt{\nabla L_s}$, ∇ 는 선박의 만재배수체적(m^3), $v_0 (=0.514v_E)$ 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.

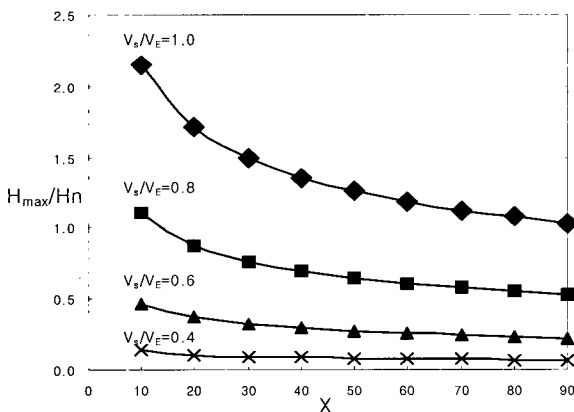


Fig. 10 Non-dimensional wave height relating to distance

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. 11 및 Fig. 12는 Table 2에 표시한 실제 선박의 자료를 바탕으로 식(8)을 이용하여 계산한 항주파의 최대파고를 나타낸 것이다. 그림 중의 $v_s/\sqrt{gL_s}$ 는 선속의 선박길이에 대한 비를 나타내는 Length Froude Number를 나타낸다. 그림에서 항주파의 최대파고는 Length Froude Number가 클수록, 선박중심선으로부터의 거리(S/L_s)가 가까울수록 커짐을 알 수 있다.

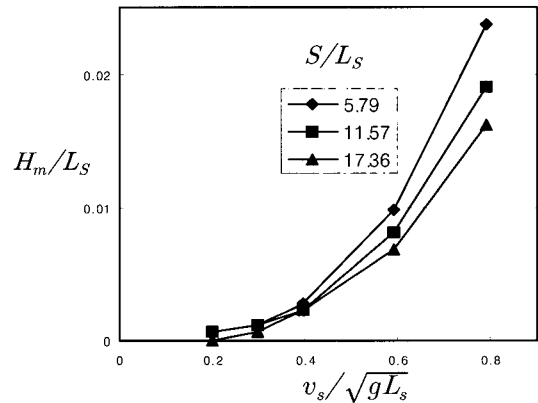


Fig. 11 Non-dimensional wave height relating to Froude number(Patrol boat)

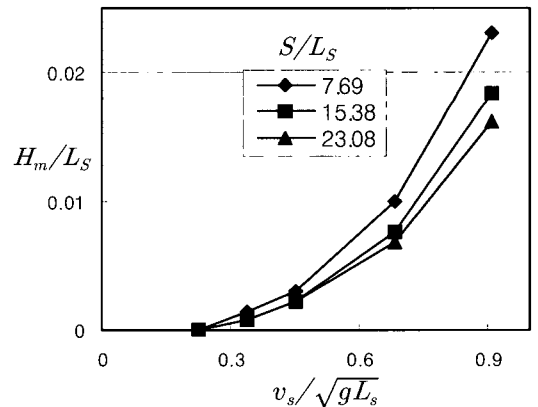


Fig. 12 Non-dimensional wave height relating to Froude number(Fishing boat II)

3. 3 수심의 영향

항주파가 심해역(deep water)에서 발생하여 전이역(intermediate depth) 및 천해역(shallow water)으로 진행하는 경우, 단위폭당 전달되는 파의 에너지는 일정하다면 파고변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \tanh(kh) \right]^{-1/2} \quad (9)$$

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

Fig. 13은 식(9)를 도식화 한 것으로 수심 변화에 따른 파고 변화 나타낸 것이며, 파가 심해역에서 천해역으로 진행함에 따라 파고는 천해에서는 상승하며 심해에서의 1.45배에 도달함을 알 수 있다.

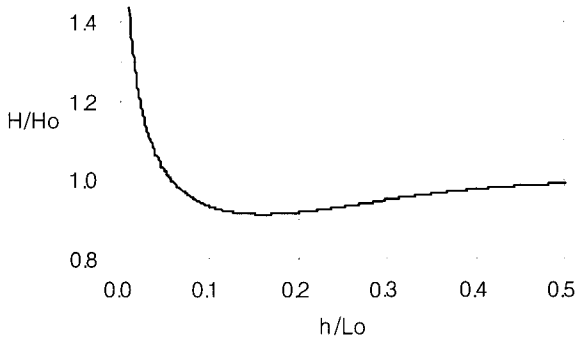


Fig. 13 Wave height change related to water depth(deep to shallow water)

또한, 전이역에서 발생하여 천해역으로 진행하는 파일 경우, 에너지보존법칙을 적용하면 파고변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

Fig. 14는 식(10)을 도식화한 것이다.

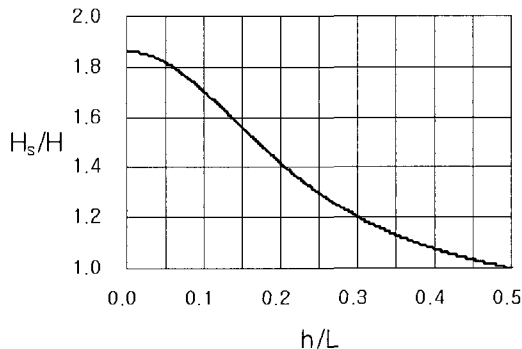


Fig. 14 Wave height change related to water depth (intermediate depth to shallow water)

파가 전이역에서 발생하여 천해역으로 진행할 경우, 천해역에서의 파고는 전이역의 1.8배 정도까지 증가한다.

한편, 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($U < 0$) 진행할 때, 어떤 수심에서의 파속은 $c + U$, 파장은 L , 파고는 H 이다. 이 경우, 주기 T 는 변하지 않기 때문에 다음 식이 성립한다.

$$T = \frac{L_0}{c_0} = \frac{L}{c + U} \quad (11)$$

하천에서 에너지수송량은 $Ec_g + EU$ 로 나타낼 수 있으며 이를 참고하면 다음식이 성립한다.

$$E(c_g + U) = \text{const.} = E_0 C_{g0} \quad (12)$$

미소진폭파이론에 기초하여 $C_{g0} = c_0/2$, $E_0 = \rho g H_0^2/8$, $E_0 = \rho g H^2/8$, $c_g = nc$ 등의 관계식을 위의 식에 대입하면 파고비에 관한 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{H}{H_0} = \left[2n \left(\frac{c}{c_0} \right) + 2 \left(\frac{U}{c_0} \right) \right]^{-1/2} \quad (13)$$

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

$$c^2 = \left(\frac{L}{T} - U \right)^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (14)$$

식 (14)에 $h^* = 4\pi^2 h / (gT^2)$, $U^* = U / (c_0) = 2\pi U / (gT)$, $k^* = gT^2 / (2\pi L)$ 을 대입하고 정리하여 다음 식을 얻는다.

$$(1 - U^* k^*)^2 = k^* \tanh(k^* h^*) \quad (15)$$

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(11) 및 식(14)를 이용하여 파속비 c/c_0 및 L/L_0 를 식 (16) 및 식 (17)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{c}{c_0} = \frac{(L/T) - U}{(gT/2\pi)} = \frac{1}{k^*} - U^* \quad (16)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1}{k^*} \quad (17)$$

이들을 정리하여 파고비를 구하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \frac{H}{H_0} &= \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \left(\frac{L/T - U}{gT/2\pi} \right) + 2 \left(\frac{U}{c_0} \right) \right]^{-1/2} \\ &= \left[\left(1 + 2k^* h^* \operatorname{cosech}(2k^* h^*) \right) \left(\frac{1}{k^*} - U^* \right) + 2U^* \right]^{-1/2} \end{aligned} \quad (18)$$

Fig. 15는 이상의 결과를 바탕으로 흐름이 존재하는 경우의 파고변화를 나타낸 것이다. 그림의 가로축은 심해파의 파속에 대한 흐름의 속도비를 나타내며 세로축은 파고비를 나타낸다.

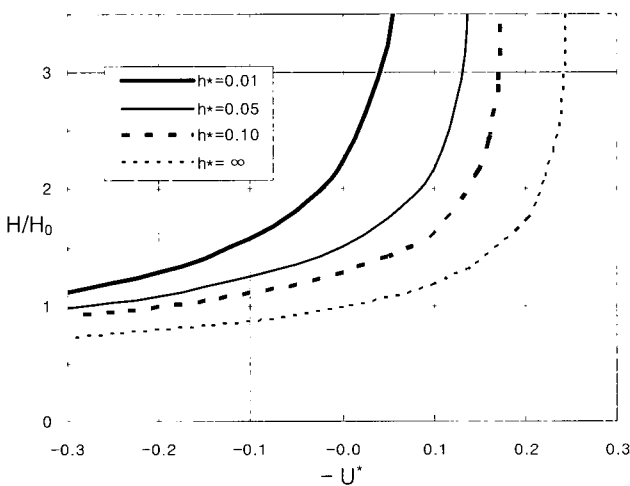


Fig.15 Wave height change related to constant current

이 그림에서 알 수 있듯이 수심이 얇은 경우에는 파속이 감소하여 약간의 흐름이 존재하여도 파가 흐름을 거슬러서 진행할 수 없으며, 또한 흐름이 심해파 파속의 1/4배 이상이면 파는 흐름을 거슬러서 진행하지 못함을 알 수 있다.

4. 결 론

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 항주파의 파고는 Depth Froude Number 및 Length Froude Number에 크게 의존하며 비례관계에 있음을 알 수 있다.
- 2) 심해역에서 발생한 파의 파고는 전이역을 지나면서 감소하다가 천해역에 도달하면 상승하며 천해역의 파고는 심해역에서의 1.45배에 이른다.
- 3) 전이역에서 발생한 파가 천해역으로 진행할 경우, 천해역

의 파고는 전이역의 1.8배 까지 증가한다.

- 4) 수심이 얇을수록 약간의 흐름에도 파가 흐름을 거슬러서 진행할 수 없으며, 또한 흐름이 심해파 파속의 1/4배 이상이면 파는 흐름을 거슬러서 진행하지 못한다.
- 5) Depth Froude Number가 1부근에서의 파고는 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소하며, Depth Froude Number가 0.6에서의 파고는 거리에 따라서 거의 변화가 없다.

후 기

이 논문은 2005년도 (재)산학협동재단의 지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 신승호, 정대득(2003), "비선형분산과랑모형을 이용한 항주파의 발생과 전파에 관한 수치예측모형 개발", 한국항해항만학회지 제27권 제5호, pp.527-537
- [2] 이화영, 권세영, 오병철, 전인식(2003), "항내 항주파 계산을 위한 수치모의", 韓國海岸海洋工學發表論文集 第14卷, pp. 270-275
- [3] 한태영(2004), "선박 운항에 따른 항주파 영향 및 저감 방안에 관한 연구", 연세대학교 공학대학원 석사학위 논문
- [4] 倉田克彦, 小田一紀, 平井往夫(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
- [5] 定兼廣行, 西代伸造, 湯田紀男(1994) "航走波を受ける小型船の動搖に關する實驗的研究", 日本航海學會論文集 91号, pp.79-88
- [6] 塩谷茂明, 藤富信之, 齋藤勝彦, 石田廣史, 山里重將(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] 森田修二, 榎木享, 出口一郎, 奥田晋, 史(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
- [8] 日本海難防止協會(1971), "海上交通安全に關す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
- [9] Dingeman, M. W.(2000), "Water wave propagation over uneven bottoms", Part1-Linear wave propagation, World Scientific, pp.248-256

원고접수일 : 2006년 6월 7일

원고채택일 : 2007년 3월 19일