한국해안·해양공학회 정기학술강연회 발표논문 초록집, 1995년 10월 6~7일

淺水域에서의 交差波의 非線形擧動에 관한 硏究

姜 閔求*, 岩田 好一朗*, 柳 靑魯**

1. 序言

非線形인 多方向波의 基本特性을 究明하는 기초적인 연구단계로서, 2方向波 또는 3方向波 등의 有限振幅의 基本構成波 사이의 非線形干涉에 관한 硏究가 50년 이전부터 진행되어왔다. 이러한 非線形干涉에 관한 硏究는, 처음에 深海域을 中心으로 행해졌으며(Phillips, 1960; Longuet-Higgins, 1962; Su, 1982), 淺海域을 대상으로 한 연구는, 傾斜入射波와 反射波 간의 非線形干涉(Hsu et al., 1979) 그리고 同一週期와 波高의 2方向波 간의 非線形干涉(She, 1991; Moriya &Mizuguchi, 1994) 등이 있다. 그리고, 著者 등(Kang et al., 1994) 도 淺海域에서 서로 다른 週期, 波高 및 方向을 갖는 2 規則波의 간섭에 의한 交差波(crossing waves)를 대상으로 摂動法(perturbation method)을 이용하서 3次近似解를 유도하고, 그의 非線形特性에 관해서 약간 논의한 바 있다. 본 연구에서는, Kang et al.(1994)에 의한 3次 近似理論과 水理実験을 바탕으로 淺水域에 있어서의 交差波의 非線形挙動을 考察 検討하고자 한다.

2. 水理実験

東洋建設(株) 総合技術研究所 鳴尾研究所(日本 西宮市 소재)의 平面水槽(길이 30m, 폭 21m, 높이 1.5m)에서 水理実験을 행했다. 水理実験에서는, 정수심 h을 50cm로 고정하고, Fig. 1에 나타낸 것처럼 交差波를 構成하는 2 基本構成波 중에서 한 基本波(Wave-A)의 週期T_A를 1.1s, 이 週期에 대한 波高H_A를 2종류로 하고, 나머지 한 基本波(Wave-B)의 週期T_B를 2.0, 1.61, 1.3s의 3종류, 각각의 週期에 대한 波高 H_B를 3, 2, 2 종류로 했다. 또한 2 基本 構成波의 交差角θ를 0°, 30°, 60°로 하고, 27종류의 規則波와 30종류의 交差波를 발생시켰다. Fig. 1의 点 P1의 位置에서, 水位를 電気容量式 水位計로 계측하고, 水平水粒子速度(u, v; u, v는 x, y 방향의 水粒子速度)를 z/h=-0.25, -0.5, -0.75의 깊이(z는 연직 상방을 正으로 한 鉛直座標) 에서 超音波式流速計를 이용하여 계측했다.

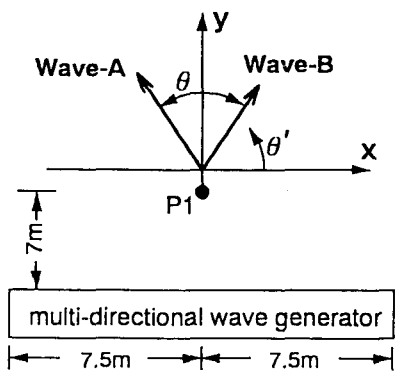

Fig. 1. Definition sketch of coordinates and measurement point of η, u and v

3. 交差波의 非線形挙動

Kang et al.(1994)에 의하면, 속도포텐셜φ, 水面変位η, Bernoulli 정수R 그리고 交差波 내의 Wave-A와 Wave-B의 角週波数 σ_A와 σ_B에 대한 3次近似解는, 式(1)~(3)에 나타낸 바와 같이, $\alpha(=2\pi a/L_A)$와 $\beta(=2\pi b/L_B)$의 摂動展開로 나타낼 수 있다. 여기서, a와 b는 η의1次order에 있어서의 Wave-A와 Wave-B의 振幅에 해당하며, L_A와 L_B는 Wave-A와 Wave-B의 波長이다.

* 名古屋大学 工学部 土木工学科(Dept. of Civil Eng, Nagoya Univ., Nagoya 464-01, Japan)
** 釜山水産大学校 海洋工学科 (Dept. of Ocean Eng., National Fisheries Univ. of Pusan 608-737, Korea)

$$F(=\phi,\eta,R)=\alpha F_{10}+\beta F_{01}+\alpha^2 F_{20}+\alpha\beta F_{11}+\beta^2 F_{02}+\alpha^3 F_{30}+\alpha^2\beta F_{21}+\alpha\beta^2 F_{12}+\beta^3 F_{03} \quad (1)$$

$$\sigma_A=\sigma_{A00}+\alpha\sigma_{A10}+\beta\sigma_{A01}+\alpha^2\sigma_{A20}+\alpha\beta\sigma_{A11}+\beta^2\sigma_{A02} \quad (2)$$

$$\sigma_B=\sigma_{B00}+\alpha\sigma_{B10}+\beta\sigma_{B01}+\alpha^2\sigma_{B20}+\alpha\beta\sigma_{B11}+\beta^2\sigma_{B02} \quad (3)$$

여기서, F_{10}, F_{01} 등의 계수는 水深, 波長, 交差角 등의 함수로 나타내어지는 것으로, 紙面의 制約으로 상세한 기술은 생략한다.

먼저, 交差波의 水面波形의 입체도에 대한 한 예를 Fig. 2에 나타냈다. 交差波의 波峰線은 2 基本波의 波峰線으로 이루어지는 평행사변형으로 나타나며, Wave-A와 Wave-B의 각각의 波峰線 상에, 각각 Wave-B와 Wave-A가 중첩되어 波峰線의 높이가 주기적으로 변화한다. 또한, Fig. 2의 交差波는 波峰은 뾰족하고, 波谷은 평탄한 凹렌즈 형을 이루며, 波形의 上下 非対称性가 강하게 나타나는 한 예이다.

Zero-up crossing method에 의한 최대파고 H_{max}의 無次元化 된 $H_{max}/(H_A+H_B)$은, Fig. 3에 例示한 것처럼, 交差角θ의 증가에 따라 감소하고, θ≈90° 전후에서 최소가 되며, 이후 다시 증가하지만, θ=0°에서 가장 큰 값을 나타내고 있다. 또한 $H_{max}/(H_A+H_B)$의 값은 $R_L(=L_B/L_A)$과 $R_{WS}(=WS_B/WS_A$, WS_A: Wave-B의 파형경사, WS_A: Wave-A의 파형경사)에 의해 변화하며, R_{WS}=1.0보다 R_{WS}=2.0의 경우가 波의 非線形性이 강하기 때문에 R_{WS}=2.0의 경우의 $H_{max}/(H_A+H_B)$가 크게 나타난다. 또한 R_L=1.0의 경우, 交斜波의 非線形 효과가 가장 강하게 나타나며, 이 때문에 交斜波의 최대파고 H_{max}은 2 基本波의 波高의 합(H_A+H_B)과 같아지거나 커진다(1.015≥$H_{max}/(H_A+H_B)$≥1). Fig. 3의 경우, 전체적으로는 1.015≥$H_{max}/(H_A+H_B)$>0.95의 값을 보이고 있다.

이어서, 水粒子의 運動의 관점으로부터 交差波의 挙動特性을 조사해보고자 한다. Fig. 4는 線形理論(1次 近似理論), 非線形理論(3次 近似理論) 및 水理実験으로부터 얻어진 交差波의 水粒子速度 벡터의 평면궤적을 나타낸 한 예이다. 그림 중의 궤적은 2 基本構成波의 週期의 最小公倍数의 時間의 데이타로부터 얻어진 것이다. 波峰과 波谷 부근의 位相에 있어서의 交差波의 最大水粒子速度의 방향 차는, 線形理論에서는 180°가 된다. 그렇지만, 非線形理論의 경우에는, 波峰位相에서의 最大水粒子速度의 방향은 水粒子速度가 큰 Wave-B의 방향으로 偏向되고, 波谷位相에서는 水粒子速度가 작은 Wave-A의 방향으로 偏向되어, 이들 간의 방향의 차는 180°가 되지 않는다. Fig. 4에 나타낸 조건에 대한 実験値와 計算値의 時間波形의 비교결과를 Fig. 5에서 보여주고 있으며, 이 결과로부터 1次 近似理論보다는 3次近似理論 에 의한 계산결과와 実験결과의 일치도가 좋다는 것을 확인 할 수 있다.

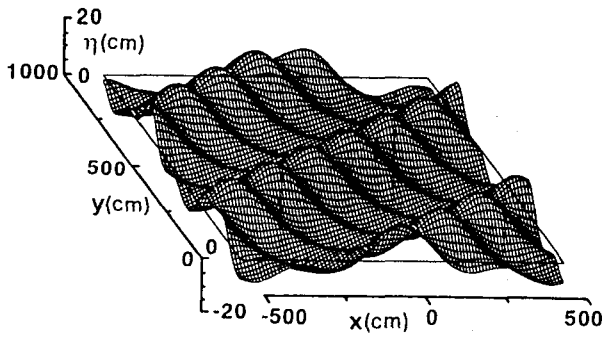

Fig. 2. Two-dimensional water surface profile (h/L_A=0.326, H_A/L_A=0.039, h/L_B=0.12, H_B/L_B=0.0358, θ=60°)

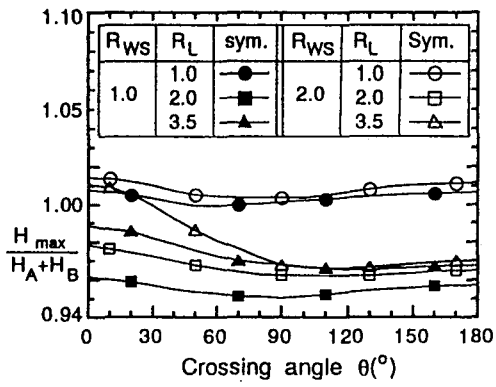

Fig. 3. Variation of $H_{max}/(H_A+H_B)$ with θ, R_L and R_{WS}(h/L_A=0.4, H_A/L_A=0.025)

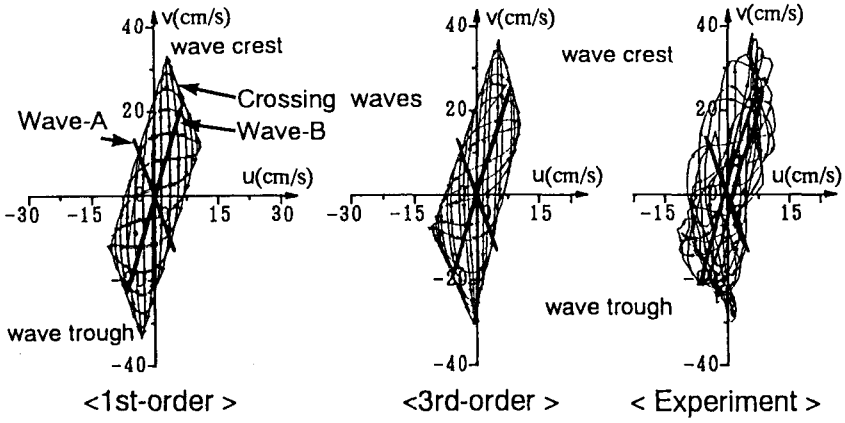

Fig. 4. Horizontal vector trace of water particle velocity(T_A=1.1s, H_A=6.5cm, T_B=2.0s, H_B=12.0cm, θ=30°, z/h=-0.25)

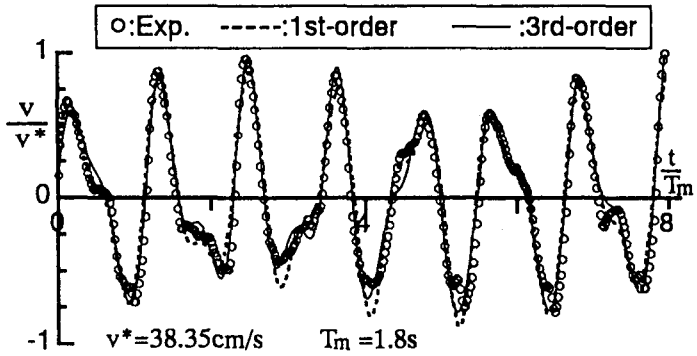

Fig. 5. Comparison of experimental and calculated water particle velocity v (T_A=1.1s, H_A=6.5cm, T_B=2.0s, H_B=12.0cm, θ=30°, z/h=-0.25)

Fig. 6은 계측한 水平水粒子速度의 벡터궤적에 대한 楕円度 γ_u(=R_s/R_l, R_s와 R_l는 각각 水平水粒子速度 벡터궤적의 楕円의 短軸과 長軸의 길이)의 鉛直分布를 보여준 한 예이다. 그림 중의 $R_E^{(-0.5)}$는, z/h=-0.5의 $R_{l,B}$ / $R_{l,A}$ ($R_{l,A}$와 $R_{l,B}$는 Wave-A와 Wave-B의 R_l)이다. 이 때, γ_u는 2 基本構成波 주기의 最小公倍数의 時間의 데이타로부터 얻어진 것이다. 이 그림으로부터, 交差角이 커질수록, 그리고 底面보다는 表面에 가까와질수록 2基本構成波 쌍방의 影響이 강하게 나타나며, 水粒子는 楕円運動性보다는 円運動性이 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고, 이 경향은 2 基本構成波의 주기의 差가 클수록 강하게 나타난다.

波의 非線形性에 따른 σ_A와 σ_B의 1 次 order의 角週波数 σ_{A00}와 σ_{B00}에 대한 変化의 정도를 式(4)로 정의한 F_A와 F_B를 이용하여 검토하고자 한다.

$$F_A = \frac{\sigma_A - \sigma_{A00}}{\sigma_{A00}}, \quad F_B = \frac{\sigma_B - \sigma_{B00}}{\sigma_{B00}} \qquad (4)$$

Fig. 7은 β/α의 変化에 따른 F_A와 F_B의 変化를 例示한 것이다. 그림 중의 (a) 는 Fig. 1의 座標系와 동일한 경우이며, (b)는 Wave-B의 方向를 역으로 한 경우이다. 이 그림으로부터, Wave-A를 일정하게 고정한 경우,

Wave-B의 非線形性이 강하게(β/α가 크게) 되면, (a)의 경우에서는, F_A와 F_B가 함께 증가하지만, (b)의 경우에서는, F_B는 증가하나, F_A는 감소해서, 특히 L_B/L_A=1의 경우 β/α=1의 곳에서 같아진다. 이러한 결과로부터, (a)의 경우는, Wave-A와 Wave-B의 角週波数가 동시에 증가하지만, (b)의 경우는, Wave-A의 角週波数는 감소하나, Wave-B의 角週波数는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 (b)의 경우에서, L_B/L_A=1의 경우는, 입사파와 반사파의 비선형 간섭에 의해 2 基本波 사이에 週波数의 差가 발생하며, 이로 인하여 長週期成分이 発生하는 것을 보여주는 한 예이다.

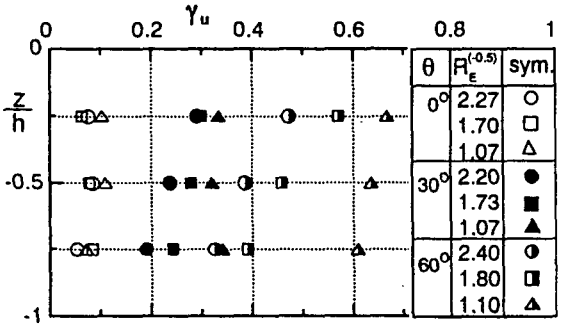

Fig. 6. γ_u of horizontal vector trace of water particle velocity(T_A=1.1s, H_A=6.5cm, T_B=2.0s)

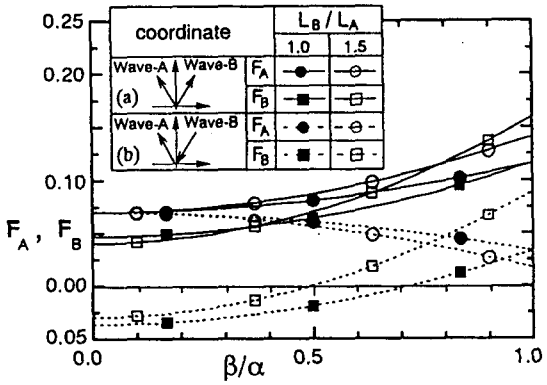

Fig. 7. Variation of F_A and F_B with β/α (θ=60°, h/L_A=0.2, α=0.3)

4. 結言 및 감사의 글

본 논문에서는, 水理実験結果와 交斜波의 3 次近似理論을 이용하여 交斜波의 水位変動과 水粒子速度에서 나타나는 非線形特性을 論議했다. 논의된 결과는 交斜波의 非線形挙動의 일부를 소개한 것에 지나지 않지만, 交斜波의 基本特性를 이해하는 실마리가 되고, 또한 非線形인 多方向不規則波의 諸特性에 대한 관심을 부여하는 계기가 되길 바란다. 끝으로, 본 연구의 수행에 귀중한 조언을 준 博士 T. Tomita(日本 名古屋大学)와 水理実験의 기회 제공해 준 K. Kurata 所長(東洋建設(株) 総合技術研究所 鳴尾研究所)에게 감사드린다.

参考文献

Hsu, J.R.C., Y. Tsuchiya and R. Silvester (1979) : Third-order approximation to short-crested waves, J. Fluid Mech., Vol.90, pp.179-196.

Longuet-Higgins, M.S. (1962) : Resonant interactions between two trains of gravity waves, J. Fluid Mech., Vol.12, pp.321-332.

Kang, Y., T. Tomita , K. Kurata and K. Iwata (1994) : Wave kinematics of nonlinear crossing waves, Proc., 4th Int'l. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. 3, pp.91-98 .

Moriya, Y. and M. Mizuguchi (1994) : Weakly nonlinear bidirectional waves in shallow water, Waves-Physical and Numerical Modeling, Proc. Int'l Sympo., Vancouver, pp.396-405.

Phillips, O.M. (1960) : On the dynamics of unsteady gravity waves of finite amplitude, J. Fluid Mech., Vol.9, pp. 193-217.

She, K. and W.J. Easson(1991): Effects of three-dimensionality on wave kinematics and loading, Proc., 1st Int'l. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. 3, pp.1-5.

Su, M.Y. (1982) : Three-dimensional deep-water waves. Part 1. Experimental measurement of skew and symmetric wave patterns, J. Fluid Mech., Vol. 124, pp.73-108.

岩垣雄一(1987) : 最新海岸工学, 森北出版, 463p..