

직립 방파제 인근에서의 연파 발생 특성

조 용 준*, 송 태 관**, ○ 최 세 호***

서 론

파랑이 직립 방파제에 비스듬히 내습하는 경우 입사파, 석경 반사파와 더불어 방파제를 따라 진행하는 연파가 생성된다. 이렇게 생성된 연파는 상당한 양의 월파를 초래할 수 있어 직립제 형태의 방파제 설계 단계에서는 반드시 고려되어야 할 중요한 인자이다. 연파는 Perroud (1957), Chen (1961) 등이 천해역에서의 장파를 대상으로 수행한 실험에서 처음으로 관측되었으며 그 후 Wiegel (1964 a, b)은 직립제에 고립파가 비스듬히 입사하는 경우에 대해 보고한 바 있다. Wiegel에 의하면 입사각이 45° 보다 작은 경우 입, 반사파 외에 연파가 출현하기 시작하며 입사각이 20° 보다 작은 경우에는 반사파는 완전히 소멸되며 입사파와 연파만이 존재하게 된다. 그 후 Nielsen (1962), Berger 와 Kohlhase (1976) 은 천이역에서 비스듬히 입사하는 주기파를 대상으로 실험을 수행하여 고립파의 경우와 유사한 결과를 얻었다. Nielsen, Berger, Kohlhase 등에 의하면 연파의 파고는 방파제를 따라 점진적으로 증가하다 일정한 값에 수렴하며 연파의 파고는 입사각과 수심이 감소됨에 따라 증가되며 방파제를 따라 연파가 생성되는 영역의 폭은 입사파의 주기가 증가할 수록 확대된다. 입사파 파고가 연파의 생성 특성에 미치는 영향에 대해서는 Stokes 파랑의 불안정성 등으로 인해 실험에 따라 정도의 차이는 있으나 입사 파고가 증가할수록 연파 파고는 감소되며 연파 발생 영역의 폭은 증가한다. 연파에 대한 파랑 모형은 수심이 일정한 천이역의 경우 Yue 와 Mei (1980) 가 Stokes 파랑 이론과 WKB 근사법에 기초하여 제시한 바 있다. 유도 과정은 섭동법에서 도입된 고차 보정항에 대한 비제차 미분 방정식에서 특해가 존재하기 위해 충족시켜야 하는 조건으로부터 복소수 진폭을 지배하는 기본 방정식을 제시하였다. 또한 Yue 와 Mei는 포물형 근사를 적용할 경우 이 기본 방정식은 비선형 Schrodinger 방정식으로 전환되며 이 파랑 모형에 기초하면 전술한 Stokes 파랑에 대한 연파의 반사 특성을 어느 정도 재현할 수 있음을 입증하였다. 1983년에 Kirby와 Dalrymple은 다차원 섭동법을 이용하여 Yue와 Mei (1980) 의 파랑 모형을 완전한 수심 변화가 존재하는 천이역에도 적용 가능하도록 일반화하였다. Peregrine (1983)은 비선형 Schrodinger 방정식과 자연 하천에서의 도수 현상에 대한 지배 방정식간의 유사성을 토대로 연파는 선형 이론의 단순 석경 반사에 해당하는 공액 상태로의 불연속한 전이로 해석하였다. 이상의 논의에 근거하면 연파는 입사 파와 반사파간의 공진성 상호작용에 따라 직립제 방향으로 진행되는 제4의 파랑 성분으로 파랑 에너지가 전이되는 현상으로 인식된다. 이상의 연구에서 Yue와 Mei (1980), Kirby와 Dalrymple (1983) 은 효율적인 수치 연산을 위해 포물형 근사를 적용하여 입사 각도에 다소 제약을 받는 단점이 있다. 천해역의 경우 최근 Kirby (1990)는 천해역에서의 대표적인 파랑 모형인 Boussinesq 방정식과 파랑이 시간과 주 진행 방향뿐만 아니라 연안 방향으로도 주기적인 거동을 보인다는 가정하에 무작위 파랑을 대상으로 해수면 변위와 유속을 복소 Fourier 급수로 전개하여 스펙트럼 파랑모형을 제시하였다. 스펙트럼 파랑 모형은 연안역에 Boussinesq 방정식을 직접 적용하는 경우 부과되는 많은 계산량으로 인해 비효율적이라는 점을 감안하면 적절한 대안으로 여겨진다. 이 연구에서 Kirby는 스펙트럼 파랑모형이 기존의 포물형 근사식보다 Cnoidal 파랑에 의한 직립제에서의 연파 생성과정을 정확하게 기술할 수 있음을 Hammack, Scheffner 와 Segur (1990)의 실험 자료와의 비교를 통해 입증하였으나 경계조건에 주기성을 부과해야만 하는 단점을 내재하고 있다. 최근 방파제의 설치 위

* 서울시립대 토목공학과 부교수 ** 농어촌진흥공사 *** (주)세일종합기술공사

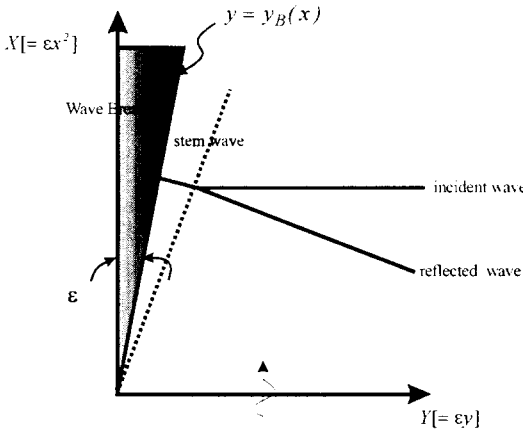


Fig. 1 Definition Sketch

$$2ikCC_g \frac{\partial A}{\partial X} + 2k(k-k_o)CC_g A + i \frac{\partial (kCC_g)}{\partial X} A + \frac{\partial}{\partial Y} (CC_g \frac{\partial A}{\partial Y}) - ikCC_g K|A|^2 A = 0 \quad (1)$$

$$K = \frac{k_o A_o}{\epsilon} \frac{c_o}{c_{go}} \frac{\cosh 4k_o h + 8 \tanh^2 k_o h}{8 \sinh^4 k_o h} \quad (2)$$

$$X = \epsilon^2 x, Y = \epsilon y \quad (3)$$

여기서 아래 첨자 o 는 입사 파랑, ϵ 은 비선형 정도를 나타내는 섭동 변수 혹은 직립재와 입사파가 이루는 각도, i 는 단위 복소수, x 는 파의 진행 방향, A 는 복소수 진폭, h 는 수심, C_g 는 군속도, C 는 파속을 각각 나타낸다 (Fig. 1 참조). 수심이 일정할 경우 식 (1) 은 다음과 같은 비선형 Schrodinger 방정식으로 전환된다 (Yue와 Mei, 1980).

$$2i \frac{\partial A}{\partial X} + \frac{\partial^2 A}{\partial Y^2} - iK|A|^2 A = 0 \quad (4)$$

경계 조건

직립재 $y = y_B(x)$ 를 따라 부과되는 불투과 경계조건 (5) 에 섭동법의 일차해인 속도 포텐셜 ϕ_1 를 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$v = u \frac{\partial y_B}{\partial x} \quad (5)$$

$$\phi_1 = -\frac{g}{2\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} [iAe^{ik \cdot x - \omega \cdot t} + c.c.] \quad (6)$$

$$\frac{\partial A}{\partial Y} = ikA \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial y_B}{\partial x} \quad (7)$$

여기서 u 는 x 방향 유속, v 는 y 방향 유속, $c.c.$ 는 공액 복소수를 나타내며 직립재와 입사파가 이루는 각이 작다는 가정하에 $y_B = \epsilon x$ 로 근사하면 최종적인 경계 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial A}{\partial Y} = ikA \quad (8)$$

설계 파랑조건의 분석

우리나라에서 기 운영중인 39개 항만의 방파제 설치 단면의 수심, 설계 파랑조건을 수집하여 파랑의 비선형 정도를 파악하기위해 kh , ka 와 a/h 를 산출하여 Fig. 3에 도시하였다.

치가 물동량의 증가와 이로 인한 대형 선석의 필요성 혹은 기술 개발로 인해 심해 (20~30 m) 쪽으로 확장되는 추세를 감안하면 향후 보다 많은 직립 방파제의 건설이 예상된다. 따라서 본 연구에서는 현재 우리 나라에 건설된 혹은 건설 예정인 항의 설계 파를 대상으로 연파 발생 여부를 조사 분석하고자 한다.

연파 파랑 모형

Kirby와 Dalrymple (1983)이 Stokes 파랑 이론과 WKB 근사법에 기초하여 제시한 파랑 모형은 다음과 같다.

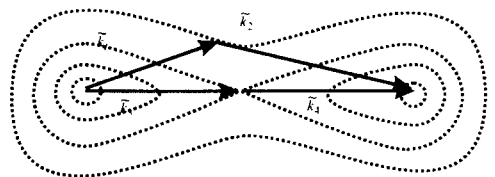


Fig. 2 Resonant Wave Interaction Diagram

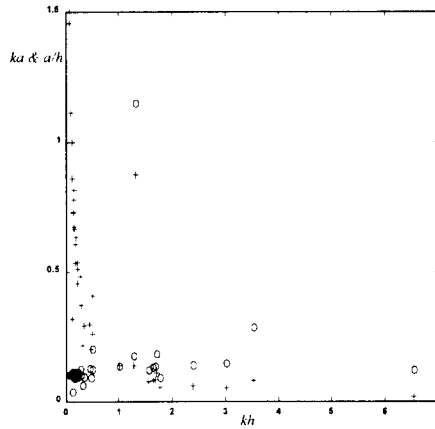


Fig. 3 Design Wave Condition for Harbors in Korea| circle:
ka, plus: a/h]

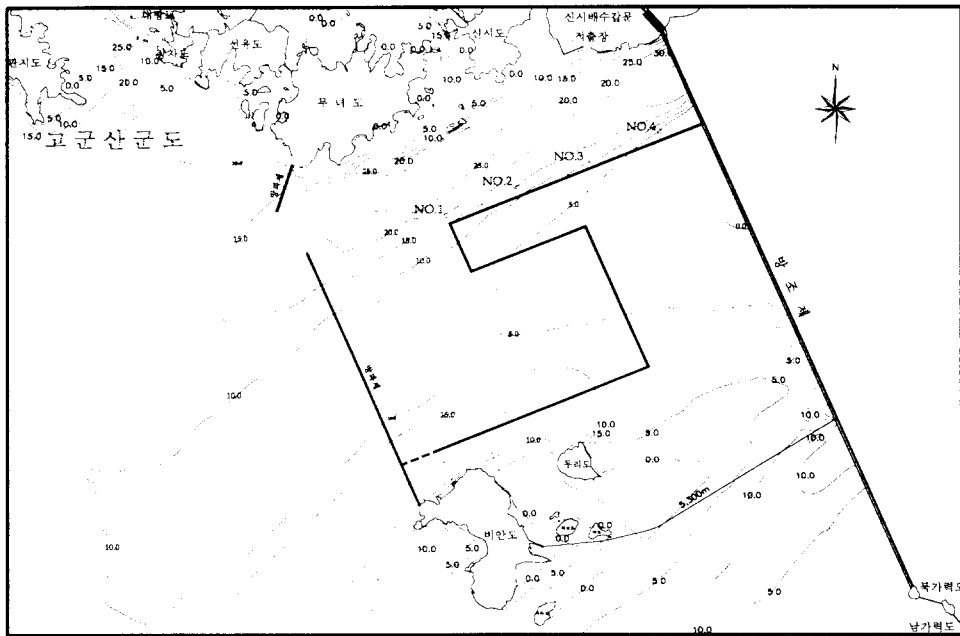


Fig. 4 Layout of New Saemankeum Harbor under Construction

수리 모형 실험

새만금 신항의 방파제 단면 산정 (Fig. 4) 을 위해 농어촌진흥공사 수리모형 실험실내 조파 수조에
서 수행된 실험중에 촬영된 사진을 Photo 1, 2에 수록하였으며 연파가 생성되고 전이되는 과정을
잘 보여주고 있다. 직립 방파제에서 연안쪽으로 0.3 m 이격하여 설치한 측정 1, 2, 3, 4에서 4 Hz의
간격으로 계측된 해수면 변위 시계열 자료를 대상으로 스펙트럼 분석을 수행하였으며 그 결과는
Fig. 5에 수록하였다. 조파된 무작위 파열의 파랑 에너지는 협대역에 분포하고 있으며 직립 방파제

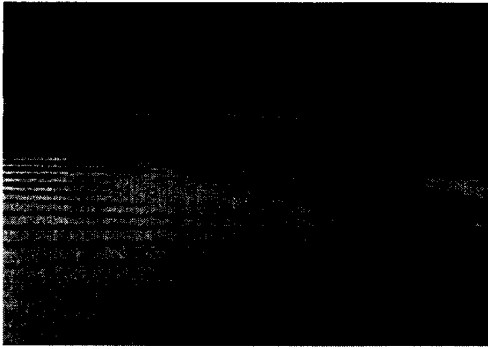


Photo1 Snap Shot of Instantaneous Water Surface Profile
along the Vertical Wave Breaker

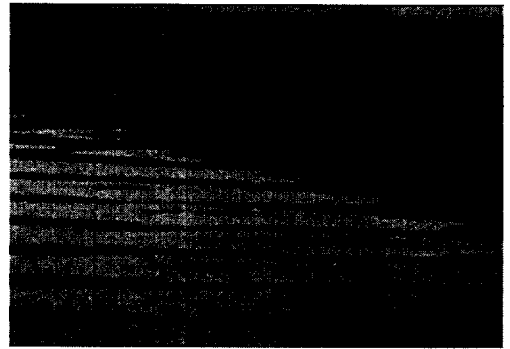


Photo 2 Snap Shot of Instantaneous Water Surface Profile
along the Vertical Wave Breaker

를 따라 진폭이 상당히 변조되는 양상을 보여주고 있다. 이러한 경향은 측정지 직립 방파제와 상당히 이격되어 있어서 방파제 인근에 파랑 에너지가 축적되는 현상을 반영하지 못하기 때문으로 판단된다. Peregrine (1983)의 도약론을 확인하기 위해 해수면 변위 ζ 와 해수면 변위의 Hilbert 변환 $\hat{\zeta}$ 으로 위상공간을 구성하여 해수면 변위 시계열 자료가 이루는 궤적을 산출하였으며 그 결과는 Fig. 6에 수록하였다. 방파제 전면부 측정 1, 2, 3에서는 진폭이 상당히 변조하고 있으나 측정 4에서는 연파의 생성영역이 발달되어 비교적 환형을 이루고 있다.

Numerical Results

비선형 Schrodinger 방정식을 Crank Nicolson 방법을 사용하여 $K=0.1, 1, 2, 3$ 의 경우에 대해 수치 모의하였으며 그 결과는 Fig. 7, 8, 9, 10에 각각 도시하였다 [$\Delta X=0.1$, $\Delta Y=0.1$]. Fig. 11와 12에는 방파제에서의 진폭과 연안방향의 진폭을 각각 도시하였다. 입사 파랑의 파경사와 직립제와 입사파가 이루는 각도의 상대 비율을 나타내는 K 가 커짐에 따라 연파의 파고는 감소되며 연파가 생성되는 영역의 폭은 증가하였다. 이러한 경향은 유입되는 파랑 에너지를 제한되어 있는 반면 입사파고가 증가되면서 확대되는 연파 생성폭과 균형을 이루기 위한 것으로 사료된다.

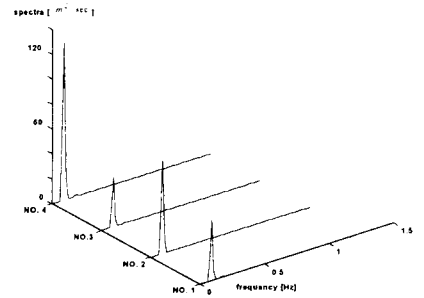
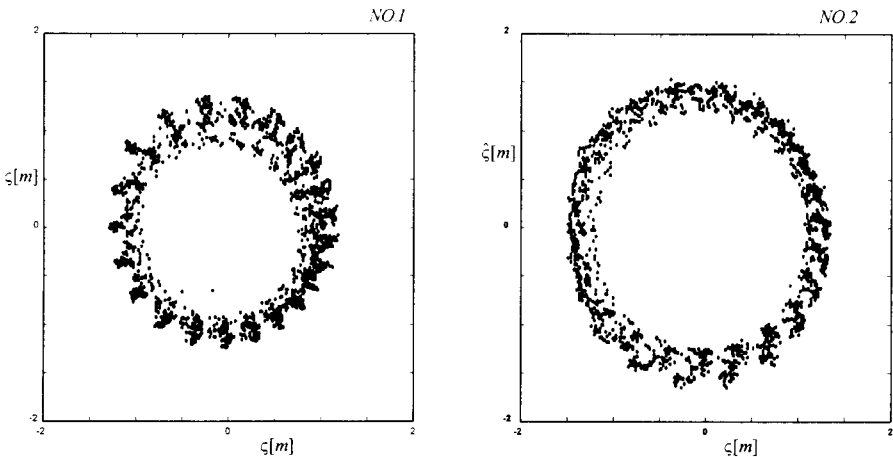


Fig. 5 Evolution of wave spectra along the wave breaker



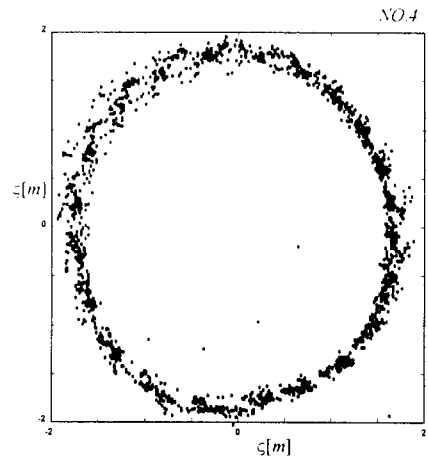
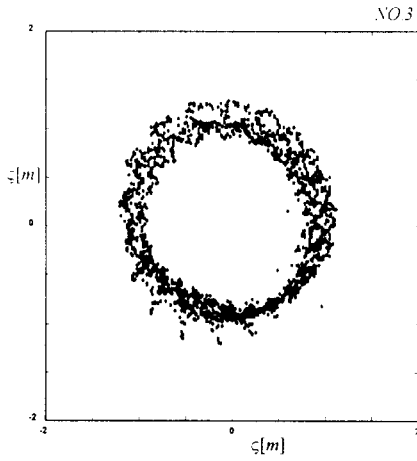


Fig. 6 Trajectory of Water Surface Displacement in the Phase Space across the Shore

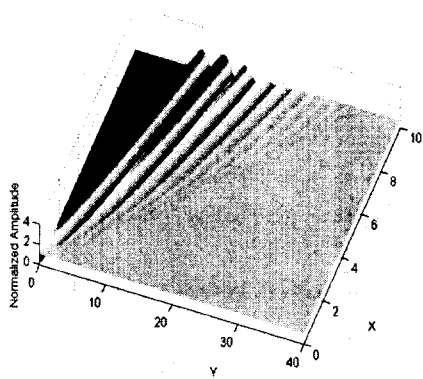


Fig. 7 Normalized Wave Amplitude along the Vertical Wave Breaker for $K=0.1$

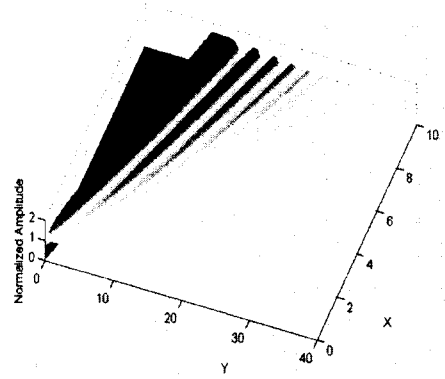


Fig. 8 Normalized Wave Amplitude along the Vertical Wave Breaker for $K=1$

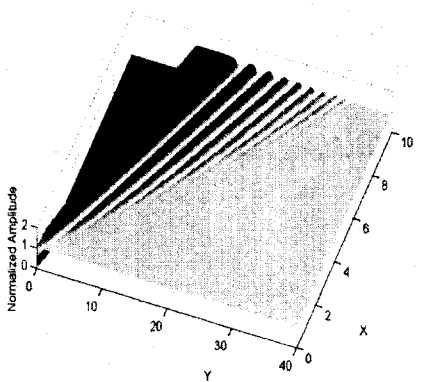


Fig. 9 Normalized Wave Amplitude along the Vertical Wave Breaker for $K=2.0$

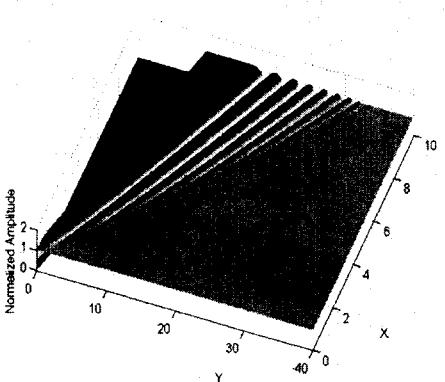


Fig. 10 Normalized Wave Amplitude along the Vertical Wave Breaker for $K=3.0$

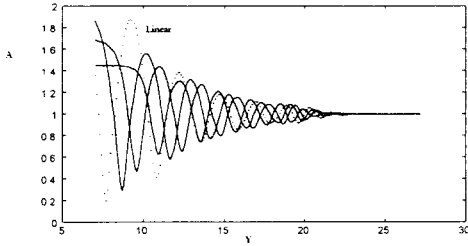


Fig. 11 Normalized Wave Amplitude across the Vertical Wave Breaker for Varying K

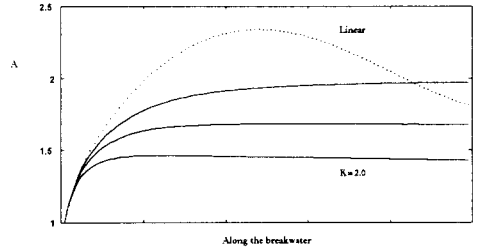


Fig. 12 Normalized Wave Amplitude along the Vertical Wave Breaker for Varying K

참고 문헌

- Berger, U. and Kohlhase, S., 1976. Mach reflection as a diffraction problem, Proc. 25th Conf. Coastal Engrg., ASCE, 1, pp. 796-814.
- Chen, T. G., 1961. Experimental Studies on the solitary wave reflection along a straight sloped wall at oblique angle of incidence, U.S. Beach Erosion Board Tech. Mem. 124.
- Hammack, J., Scheffner, N. and Segur, H., 1989. Two dimensional periodic waves in shallow water, J. Fluid Mech., Vol. 209, pp. 109-122.
- Kirby, J. T. and Dalrymple, R. A., 1983. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of Stokes waves by mildly varying topography, J. Fluid Mech., Vol. 136, pp. 453-466.
- Kirby, J. T., 1990. Modelling shoaling directional wave spectra in shallow water, Proc. 32th Conf. Coastal Engrg., ASCE, pp. 796-814.
- Nielsen, A. H., 1962. Diffraction of periodic waves along a vertical breakwater for small angles of incidence, Univ. of California, Berkely, IER Tech. Rep. HEL-1-2.
- Peregrine, D. H., 1983. Wave jumps and caustics in the propagation of finite-amplitude water waves, J. Fluid Mech., Vol. 136, pp. 435-452.
- Perroud, P. H., 1957. Solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence, University of California-Berkely IRE Technical Report 99-3.
- Wiegel, R. L., 1964a. Oceanographical engineering, Prentice-Hall.
- Wiegel, R. L., 1964b. Water wave equivalent of Mach reflection, Proc. 9th Conf. Coastal Engng. ASCE, Vol. 6, pp. 82-102.
- Yue, D. K. P. and Mei, C. C., 1980. Forward diffraction of Stokes waves by a thin wedge, J. Fluid Mech., Vol. 99, part1, pp. 33-52.