

방조제 설계과의 추정

유 동 훈* 선우 중 호**

1. 서 론

방조제를 천해역에 구축하고자 할 때, 방조제 설계의 기준이 되는 설계과의 선정에는 풍파의 생성과정과 백파 등에 의한 에너지 감쇄효과 뿐만아니라 굴절, 회절, 천수효과 등에 대한 고려도 충분히 이루어져야 한다. 대부분의 방조제는 천해역에 위치하여 심해파가 방조제 지점까지 내습해오는 동안 상당한 변이과정을 겪기 때문에 방조제 설치 위치에서의 파조건은 심해파조건과 상당히 다를 수 있다. 따라서 심해파조건으로 방조제 전단면에 걸쳐 일괄적으로 설계하면 경제성을 상실할 뿐만아니라 과도한 시공비를 투입하고도 안정성을 충분히 확보할 수 없는 문제가 따를 수 있다. 이러한 관점에서 본연구에서는 굴절과 회절 등을 고려할 수 있는 천해파 수치모형을 적용하여 방조제의 적정한 설계를 위한 설계과를 추정하고자 하였다. 실제 해안에서 발생하는 천해파는 대부분 불규칙파의 형태를 갖기 때문에 불규칙파의 특성을 반영하기 위하여 불규칙파를 스펙트럼파로 재현하였으며, 스펙트럼파의 각 성분파에 대하여 천수, 굴절, 회절, 마찰 및 쇄파 등에 의하여 변이하는 현상을 해석하였다.

지배방정식은 에너지보존식과 파수벡터보존식인데 파수벡터보존식에 회절효과를 고려하는 항을 포함하였다. 스펙트럼형상을 재현하기 위하여는 선형누적법을 사용하였으며, 스펙트럼파에 대한 대표 마찰계수를 간단히 산정하는 약산식을 적용하여 마찰손실효과를 고려하였다. 또한 천해역에서의 쇄파를 고려하기 위하여 수정된 Kitaigorodskii 평형조건식을 적용하였다. 이용한 수치모형은 실험조건에 적용하여 1차 검증이 확인되었던 것이며, 본연구에서는 새만금해역에 적용하여 방조제 위치에서의 천해파조건을 산정하였다.

2. 지배방정식

주기평균파모형의 계산신속성은 파의 대표치를 바로 구할 수 있다는 점과 격자 크기를 정하는데 있어 파형과 파장을 거의 고려치 않고 해저지형의 복잡성에만 의존한다는 점에 연유할 것이다. 새만금방조제 해역과 같이 면적이 10 km^2 이상 되는 대상해역에는 주기평균파모형과 같이 격자의 크기를 자유롭게 결정할 수 있는 모형을 사용하여야지만 현실적인 해석이 가능할 것으로 판단된다. 파는 파고, 주기 및 방향으로 대표할 수 있는데 에너지보존식을 수심적분합과 동시에 일주기 평균을 하면 파에너지밀도 또는 파고의 변이를 나타내는 지배방정식을 구할 수 있으며, 파수(wave number)와 주파수(wave frequency)의 정의로부터 도출되는 파수보존식(wave number conservation equation)을 사용하면 파의 방향을 결정할 수 있게 된다. 에너지보존식과 파수보존식은 천수, 굴절 등과 같은 기본 천해역 변이과정을 해석하는데 기초방정식으로 사용되어 왔으며, Yoo와 O'Connor(1988)는 Battjes(1968)의 浮影關係(eiconal relation)를 이용하여 단순파에 대한 회절현상을 고려한 파수보존식을 개발하였다.

파고의 곡률이 존재할 때 파수는 주파수, 수심뿐만아니라 파고곡률의 함수가 되어 이를 포함한 파수보존식이 유도되었으며, 에너지보존식을 수심적분하고 주기평균하여 스펙트럼파 에너지보존식을 유도하였다 (유동훈, 1993). 이들 지배방정식은 다음과 같다.

* 아주대학교 환경도시공학부

** 서울대학교

$$\frac{\partial P}{\partial t} + PM\frac{\partial P}{\partial x} + QM\frac{\partial P}{\partial y} + S\frac{\partial d}{\partial x} = \frac{M}{4E} \left[\frac{\partial^3 E}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial xy^2} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + PM\frac{\partial Q}{\partial x} + QM\frac{\partial Q}{\partial y} + S\frac{\partial d}{\partial y} = \frac{M}{4E} \left[\frac{\partial^3 E}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 E}{\partial xy^2} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial PME}{\partial x} + \frac{\partial QME}{\partial y} + C_E E = 0 \quad (3)$$

여기서 P와 Q는 각각 파수벡터의 x와 y 성분이며, E는 주파수 스펙트럼에너지이고, d는 수심이다. M은 단위군속도(unit number group velocity), 즉 군속도에 파수를 나눈 것으로서

$$M = (1+G)\sigma/2K^2 \quad (4)$$

$$G = 2Kd/\sinh(2Kd) \quad (5)$$

이다. 여기서 K는 파수이다. 따라서 PM 과 QM 은 각각 군속도의 x 와 y 성분 R_x 와 R_y 가 된다. 또한 $S = \sigma G/2d$, σ 는 주파수, C_E 는 손실계수이다.

마찰손실만을 고려하였을 때 손실계수 C_E 는 다음과 같이 계산된다 (유동훈, 1993).

$$C_E = 2\delta g^{-1}C_b U_{br}(\sigma/\sinh Kd)^2 \quad (6)$$

$$C_b = \text{EXP} (5.213(k_s/A_{br})^{0.194} - 6.57) \quad (7)$$

여기서 δ 는 유속 3제곱의 평균치로서 파운동을 상현곡선으로 가정할 때 $\delta = 4/3\pi$ 가 되며 해류와 합성할 때 $4/3\pi$ 로부터 증가한다. U_b 는 각 스펙트럼대의 최대 해저면유속으로서 보통 포텐셜이론으로 산정되며, U_{br} 는 U_b 제곱의 평균의 근 (root-mean-square)이며, C_b 는 파마찰 계수로서 해저면의 등가조도 k_s 와 해저면에서 파운동의 최대이동거리 A_b 의 함수이다.

상기 지배방정식 (3)은 쇄파되기 전에 성립하며 쇄파된 후에는 쇄파조건식을 사용하여 파 에너지 스펙트럼을 계산한다. 불규칙파의 쇄파임계치는 Kitaigorodskii et al.(1975)의 평형조건식(saturation relation)을 수정하여 결정하였으며(유동훈, 1993), 수정된 쇄파조건식은 다음과 같다.

$$E_b(f) = \frac{\gamma \tanh^2(Kd)}{K^2 \sigma (1+G)} \quad (8)$$

여기서 γ 는 경험계수로서 실험자료와 비교하여 약 0.21이 적합함을 확인하였다.

3. 모형의 적용

식 (1), (2), (3)으로 대표되는 지배방정식은 일정 간격의 격자에 upstream method에 의한 유한차분법으로 풀어 해를 구할 수 있으며 (Yoo and O'Connor, 1986), 각 스펙트럼대에 대하여 독립적으로 풀어 최종 결과는 누적적분하여 구한다. 본모형을 새만금방조제 축조해역에

적용하여 방조제 위치에서의 파조건을 산정하였다.

그림 1에 도시된 바와 같이 새만금 일대의 수심은 서해안 전체 해안선에 평행한 방향으로 거의 일정하며 완만한 경사를 보이고 있다. 수치모델에 사용된 지역의 최대수심은 약 40 m 정도이며 새만금개발지역의 평균 수심은 약 4 m에 이르고 있다. 그림2에 도시된 바와 같이 대상지역의 전 격자에 대해 크기 1.05 km의 정방형 격자망을 구성하여 종으로 87 개, 횡으로 60 개, 총 격자수는 5220 개이며 등고선이 대체적으로 남서방향으로 평행하게 발달하였고, 총 유효격자수는 3973 개이다.

새만금해역에 평균파 모형을 적용하였으며, 네가지 방향의 설계파를 Bretschneider의 불규칙파로 가정하여 수치모형을 적용하였다. 새만금 방조제 노선의 수심이 극히 일부분만 제외하고는 12~13 m 정도되는 천해지역이므로 이 지역에서의 파랑특성을 관측하므로서 방조제 단면 설계를 위한 설계파고를 결정할 수 있다. 서해안 새만금 일대의 풍도는 일일최대풍속이 주로 W와 WNW방향에서 가장 많이 발생하므로 이같은 풍향에서의 바람은 새만금 방조제 노선에 특히 야미도와 비용도를 잇는 노선에 거의 직각방향으로 파랑을 발달시킨다고 판단할 수 있다. 심해설계파조건으로 해운항만청과 농업진흥공사의 자료를 참조하여 다음과 같이 선택하였다.

표 1. 심해 설계파 조건

파향	파고(m)	주기(sec)	재현기간(년)
SSW	10.2	14.0	50
NWN	5.5	9.0	50
WNW	5.6	7.8	100
SW	6.9	9.2	100

상기 설계파 조건에 대하여 불규칙 스펙트럼파로 가정한 조건에 대하여 수치실험하였다. 불규칙파 스펙트럼 형태는 실측 또는 추산에 의하여 결정할 수 있다. 대표파고와 주기를 알고 있을 때 해당 스펙트럼의 형상을 추정하기 위하여 Bretschneider 스펙트럼으로 가정하였으며, 일본의 Mutsuyasu에 의해 수정된 계수를 사용했다.

표 1에 제시된 네방향의 심해파조건을 입사경계에 적용하여 새만금해역에서의 천해파 파고분포를 산정하였다. 1차 계산으로 수심은 평균해면하 수심으로 가정하였으며, 추후 만조시 또는 간조시의 조건에 대하여도 살펴볼 예정이다. 평균수심조건에서 방조제 위치에서의 파고가 크게 산정되는 NWN 파향인 경우에만 몇개 참고지점에서의 파스펙트럼을 그림 3에 도시하였으며, 각방향에 대한 파고벡터와 유효파의 파고분포도가 그림 4에 제시되어 있다. 도시된 바와 같이 평균수심하에서 파에너지는 20여 m 내외의 얇은 수심조건에서 상당한 에너지 손실과 고군산도 일대에서의 방파효과, 그리고 고군산도 북측에 보이는 천퇴로 인한 파에너지의 집중현상으로 새만금방조제로의 파에너지 전파는 상당히 감소되고 있음을 살펴볼 수 있다.

파향 SSW인 경우 심해파 파고는 10여 m에 이르지만 새만금방조제의 위치가 SSW 방향으로부터는 직접적으로 노출되지 않기 때문에 상당히 작은 파만 도달하는 것으로 판단된다. 방조제 지점에서의 파고는 북서측방조제나 서측방조제 공히 0.5 m 이하로 산정되었다. NWN 파향인 경우 입사파의 파고는 SSW 파향의 10.2 m에 비하여 상당히 작은 5.5 m밖에 안되지

만 북서측방조제는 NWN파에 직접적으로 노출되기 때문에 상당한 파에너지가 이곳에 도달하는 것으로 보인다. 북서측방조제 위치에서는 유의파의 파고가 3 m 가까이에 이르는 것으로 산정되었으며, 서측방조제 위치에서는 SSW 파향과 마찬가지로 0.5 m 이하로 산정되었다. 북서측방조제 북측 끝에 위치한 No.2지점에서는 고주파수의 파에너지가 대부분 도달하는 것으로 보이며 이곳에서 유의파의 파고는 2.9 m에 이르는 것으로 산정되었다. WNW 파향인 경우에도 북서측방조제 위치에서의 파고는 2 m에 이르며, 서측방조제에서는 0.5 m 내외로 계산되었다. SW 파향인 경우에도 SSW 파향과 같이 서측방조제에서는 0.5 m 이하의 파고로 계산되었으나 북서측방조제에서는 1 m가 넘는 것으로 산정되었다. 이는 상당한 파에너지가 회절현상으로 고균산도를 우회하여 북서측방조제에 이르기 때문이다.

4. 결론 및 토의

이와같이 천해역에 위치한 해안구조물은 심해조건과 상당히 다른 파조건에 놓이기 때문에 심해파조건으로 설계파를 결정하면 상당한 오류를 범할 수 있다. 새만금방조제와 같이 수심 20 m에 이르는 위치에서도 고균산도나 주변의 수심조건에 따라 파조건이 상당히 달라짐을 보이고 있다. 방조제의 위치에 따라 파조건이 매우 다르기 때문에 모든 방조제에 대하여 동일한 설계파를 적용하면 동일한 시공비를 들였을 때 충분한 안정성을 확보할 수 없을 뿐만 아니라, 충분한 안정성을 확보하고자 할 때 비경제적인 설계를 하는 우를 범할 수 있다.

새만금방조제의 경우 북서측방조제는 외해파에 상당히 노출된 것으로 판단되나, 서측방조제는 외해파의 직접적인 침입으로부터 보호되어 있기 때문에 상대적으로 방파에 대한 대책을 완화할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 한정된 예산이 주어질 때, 서측방조제에 투입할 방파시공예산을 북서측방조제 방파예산으로 이전하는 것이 바람직하다. 단, 금번 연구에서 수행한 수심조건은 평균해면하 조건에 대해서만 시행하였기 때문에 만조시와 간조시의 수심조건을 추가로 적용하여 보다 명확하고 포괄적인 천해파 해석이 필요하다.

사 사

본 연구는 심재문화재단의 재정지원에 의한 “서해안 간척개발에 관한 연구”의 일환으로써 이루어졌으며, 당재단에 심심한 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

- 유동훈, 1993, 천해에서 불규칙파의 변이, 한국해안해양공학회지, 5(3): 212-220.
- Battjes, J.A., 1968, Refraction of water waves, J. Waterways, Harbors, Coastal and Ocean Eng., 94, WW4: 437-451.
- Kitaigorodskii, S.A., Krasitskii, V.P. and Zaslavskii, M.M., 1975, On Phillips' equilibrium range in the spectra of wind generated gravity waves, J. Phys. Oceanogr., 5: 410-420.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1986, Ray model for caustic gravity waves, Proc. 5th Conf. Asian and Pacific Division of IAHR, 3: 1-13.
- Yoo, D. and O'Connor, B.A., 1988, Diffraction of waves in caustics, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, 114, 6: 715-731.

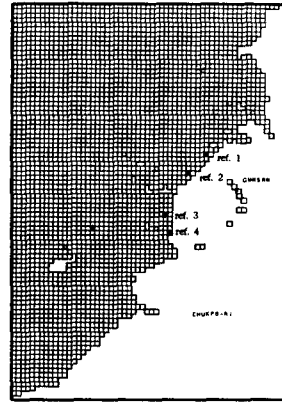
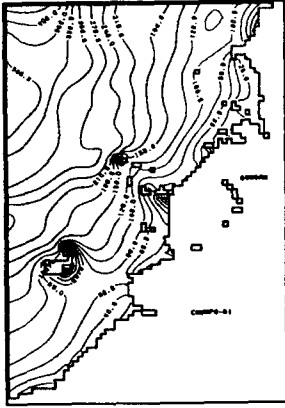


그림 1. 새만금해역 해저지형도 그림 2. 새만금해역 수치모형 격자망

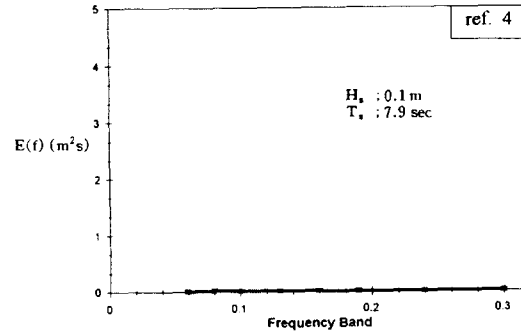
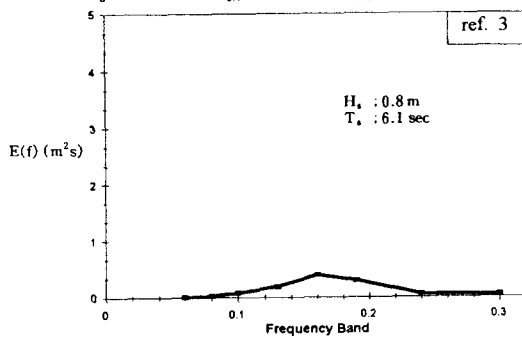
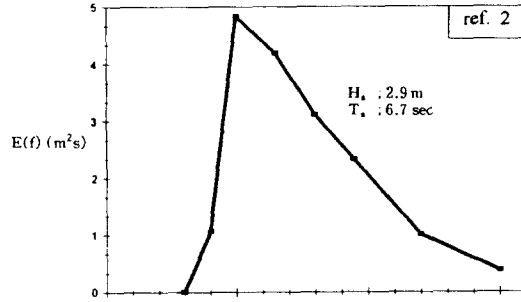
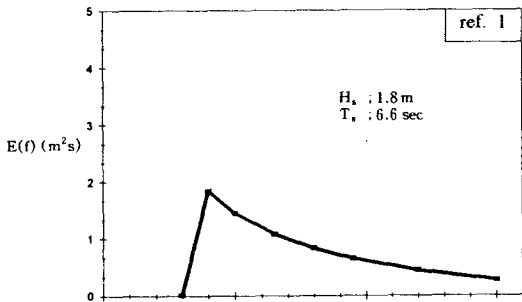
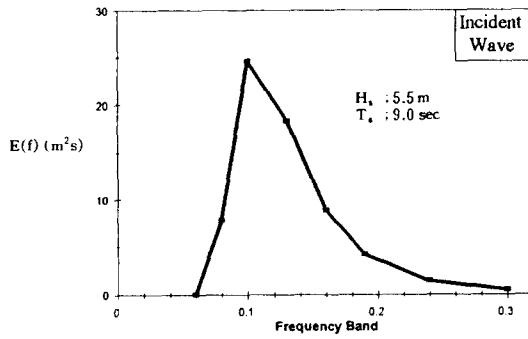
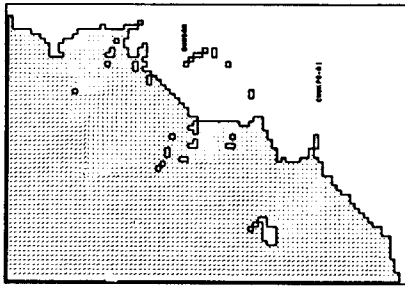
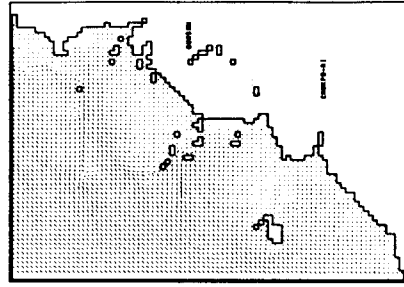


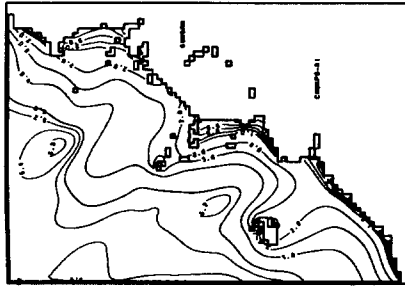
그림 3. NWN 입사파에 대하여 참고지점에서의 파스펙트럼



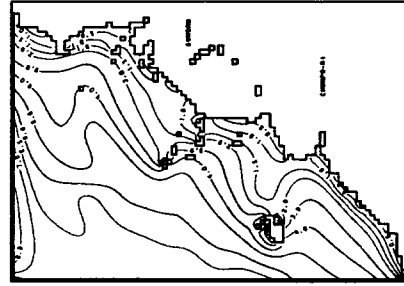
NWN (파고베타도)



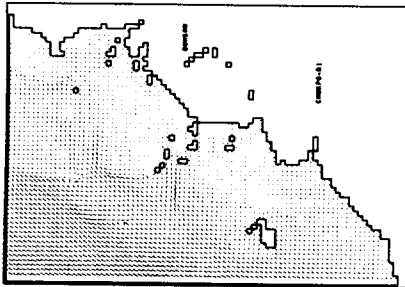
SW (파고베타도)



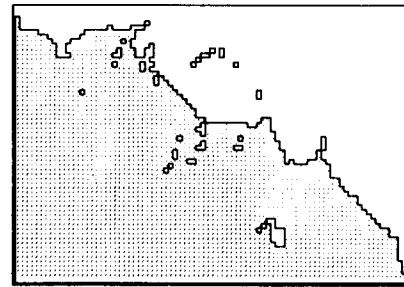
NWN (파고분포도)



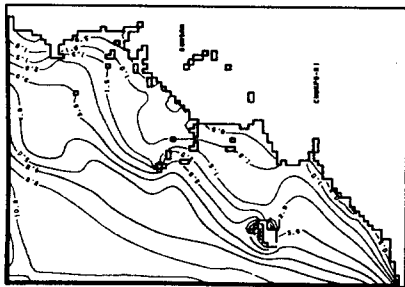
SW (파고분포도)



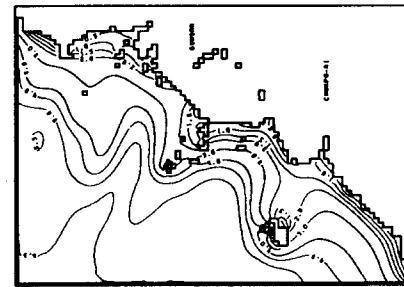
SSW (파고베타도)



WNW (파고베타도)



SSW (파고분포도)



WNW (파고분포도)

그림 4. 설계파에 대한 수치모형 산정결과