

영일만 불규칙파 수치모형 실험

유 동 훈* 조 종 환**
YOO, DONG HOON CHO, JONG WHAN

1. 서 론

연안에 침입해 오는 천해파는 대부분 불규칙파이며, 이를 단순파로 가정하여 해석하였을 때 상당한 오차를 발생할 소지가 있다. 본 연구는 영일만 신항 개발과 관련하여 동해안 영일만 일대 설계파를 불규칙파로 재현하고 이를 스펙트럼파로 분석하여 천해에서 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 개발 사용하여 마찰손실효과를 고려하였다. 또한 마찰계수 산정에 있어 현장 연흔의 발생과 토사이동에 의한 에너지 손실을 고려하였으며, 천해역에서의 쇄파를 고려하기 위하여 Kitaigorodskii의 평형조건식을 수정하여 적용하였다.

본 연구에서 사용된 모형은 실험조건에 적용하여 1차 검증을 확인하였던 것이며(유, 1993), 설계파의 제 조건에 대하여 기존 지형 조건과 인공섬 및 신항 개발후의 지형 조건에 대하여 모두 적용하여 개발 후의 천해파 분포 변이를 파악하는 데 일조를 기하고자 하였다. 또한 동일 설계파 조건에 대하여 단순파를 적용하여 단순파로 해석하였을 때 발생 가능한 오차의 범위를 확인하고자 하였다.

2. 지배방정식과 제 관계식

파선모형의 계산신속성은 파의 대표치를 바로 구할 수 있다는 점과 격자 크기를 정하는데 있어 파형과 파장을 거의 고려치 않고 해저지형의 복잡성에만 의존한다는 점에 연유할 것이다. 파는 파고, 주기 및 방향으로 대표할 수 있는데 에너지보존식을 수심적 분함과 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.

* 아주대학교 토목공학과 부교수

** 한국해운항만청 신공항건설기획단

Battjes (1968)의 부영관계식을 이용하여 회절을 고려한 파수벡터보존식은 다음과 같다 (유, 1993).

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

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

또한 스펙트럼파의 에너지보존식은 에너지손실율을 포함하여

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

여기서 C_E 는 손실계수이며, P 와 Q 는 각각 파수벡터의 x 와 y 성분이며, M 은 단위군 속도(unit number group velocity), 즉 군속도에 파수를 나눈 수치이다.

이상의 지배방정식을 이용하여 개발한 수치모형은 독일의 북쪽에 위치한 Baltic Sea 에도 적용한 바 있으며 (참고 Yoo & Zielke, 1994), 본 과업에서는 마찰손실을 산정하기 위한 등가조고의 결정과 불규칙파의 쇄파에 대하여 좀더 향상된 방법을 이용한 스펙트럼파 수치모형을 적용하였다.

에너지보존식 (3)으로 계산된 파고는 매 계산시간 적절한 쇄파임계치와 비교하여 임계치를 초과할 때 임계치로 대치하는데, 단순파의 쇄파임계치에 대한 이해는 충분한 것으로 판단되나 불규칙파에 대한 이해는 아직 미흡한 것으로 사료된다. 본고에서 불규칙파의 쇄파임계치에 대한 논의는 Kitaigorodskii et al. (1975)의 평형조건식 (saturation relation) 으로부터 전개한다. 주파수 스펙트럼에 대한 Kitaigorodskii의 평형조건식을 수정하여 유(1993)는 다음과 같은 관계식을 제시하였다.

$$E_b(f) = 4\pi \gamma_2 \sigma^{-1} (1+G)^{-1} K^{-2} \tanh^2(Kd) \quad (4)$$

여기서 γ_2 도 역시 상수이다. 식 (4)에 상수 γ_2 는 쇄파대에서 관측된 다섯가지 현장 관측자료 모두 일정한 값($4\pi \gamma_2 = 0.21$)을 취하여 쇄파대내 파고분포를 상당히 정확하게 묘사하였다.

식 (3)에 사용된 마찰에 의한 손실계수 C_E 는

$$C_E = 2\delta g^{-1} C_b U_{br} (\sigma / \sinh Kd)^2 \quad (5)$$

로 산정된다. 여기서 ($\delta g^{-1} C_b U_{br}$)는 전스펙트럼에 걸쳐 일정하나 ($\sigma / \sinh Kd$)² 는 각 스펙트럼대에서 주파수에 따라 상당히 변할 수 있다. 계수 C_b 이외의 모든 변수는 파조건에 따라 바로 구해진다.

파마찰계수 C_b 는 파조건과 해저면조건에 따라 결정되며, 여기서 파조건이라 하면 마찰력에 관하여 전스펙트럼의 특징을 대표하는 조건이다. 최근에 Madsen, et al. (1988) 은 파마찰계수를 상대조고 A_{br}/k_* 의 함수로 산정하는 수식을 개발하였다. 여기서 A_{br} 은 파운동의 해저면 최대이동거리의 root-mean-square 이며, k_* 는 Nikuradse 등가조고이다. 그들은 경계층에 대하여 운동량방정식을 적분하여 Jonsson의 파마찰계수 산정식과 유사한 수식을 유도하였으며, 유(1994)은 그들 산정식에 기초하여 양해법산정식을 개발하였다.

이상의 제 관련식을 도입한 지배방정식의 해는 Upstream Technique에 의한 유한차분법에 의하여 구한다. Upstream Technique은 과도한 분산을 발생시키는 약점은 있으나 이류항

(advection term)의 존재시 상당한 수치적 안정을 가져다 주기 때문에 여러 방면의 수리학 및 유체역학 해석에 이용되고 있는 기법이다. Upstream Technique에 의한 지배방정식의 유한 차분식은 Yoo & O'Connor(1986)의 논문에 제시되어 있으며 본고에는 이를 생략한다. 스펙트럼파의 각 주파수별 파의 변이는 각 파간의 에너지전도 등과 같은 비선형 간섭효과를 무시하고 독립하여 전파되는 것으로 가정하였으며, 이러한 가정으로 각 주파수별 파변이를 서로 독립적으로 해석하고 최종 천해파 조건은 선형누적법으로 해석한다.

3. 모형의 적용

본 연구의 대상지역으로 설정한 영일만은 폭 3 km, 길이 4 km 내외의 직사각형 만이며 양안은 견고한 화강암으로 이루어져 있으며, 수심이 급격히 변하고 외측은 최대 수심 40여 m로 상당히 깊은 편이다. 그러나 설계파로 택한 파고 7 m, 파주기 12 초의 파는 이미 이러한 수심에서도 상당히 변이과정을 거쳤을 가능성이 높다. 따라서 외해 경계면을 더 깊은 해역으로 연장할 필요성이 있어 외해 경계를 장기갑으로부터 18 km 이상 떨어진 곳에 두며 이곳의 수심은 약 200 m가 넘어 이곳 경계면에서의 파는 심해 설계파로 가정하여도 좋을 것이다. 그러나 수치모형으로 해석할 대상 영역이 광범위하여 수치모형 격자체계의 효율적인 구성이 필요하다.

본 연구의 수치모형에서는 이중 격자체계를 구축하여 이러한 난점을 극복하였다. 즉 영일만을 포함하여 수심 200 여 m 까지 광활한 영역에는 격자간격 1.35 km의 조격자체계를 구성하였으며, 영일만 내는 조격자의 1/3 크기인 세격자 체계를 구성하였고 이들 격자간에 매 계산마다 경계조건을 내삽법으로 구하여 해석하도록 하였다. 이러한 동력학적 격자체계(dynamic nesting system)는 조석수치모형에서도 이용된 기법으로서 본 연구에 사용된 지배방정식이 파에너지밀도나 파수 등과 같이 주기 평균된 변수를 이용하기 때문에 이러한 기법이 가능하다. 즉, 주기 평균된 변수를 사용하면 격자크기를 결정하는 데 있어 파장의 영향을 거의 받지 않기 때문에 조격자와 세격자를 동시에 운용할 수 있다.

영일만 남측 일대의 수심은 동해안 전체 해안선에 평행한 방향으로 거의 일정하나 해안선으로부터 멀어지면서 급격하게 깊어지는 양상을 보이고 있으나 영일만 내측을 향하여 북측 해안은 상대적으로 완만한 경사를 보이고 있다. 장기갑으로부터 동북방향으로 18 km 정도 이르는 곳의 수심은 약 200 m의 매우 깊은 수심을 보이며 영일만 내의 평균 수심은 약 20 여 m에 이르고 있다. 수심 약 200 m에 이르는 지점까지 크기 1.35 km의 정방형 조격자망을 구성하여 종으로 40 개, 횡으로 43 개, 총 격자수는 1720 개이나 등고선이 대체적으로 동측으로 평행하게 발달하였으므로 계산격자 또는 유효격자망 G1은 동서, 남북으로 일직선으로 한정하여 구성하였다. 따라서 유효격자망의 좌우측 경계면은 해안선에 직각방향으로 놓이며 외해측 경계면은 해안선에 평행으로 놓인다. G1에서의 총 유효격자수는 1,341 개이다. 주로 영일만 내의 해역을 포함하는 중간격자망은 크기 450 m의 정방형 격자로 구성되어 있으며, 조격자망과 비교하여 3배의 조밀도를 갖고 있다. 세격자망은 종으로 39 개, 횡으로 30 개, 총 격자수는 1,170 개이며, 육지 부분을 제외하여 유효격자수는 총 903 개이다.

파향 NE, 파고 7 m, 주기 12 초인 심해 설계파에 대하여 불규칙파 모형과 단순파 모형을 동시에 적용하여 두 계산결과를 비교하여 보았다. 불규칙파 형태로 JONSWAP 스펙트럼을 가정하였으며 외해경계면에서의 조건이 유의파고가 7 m이고 유의파의 주기가

12 초가 되도록 두 계수 α 와 γ , 그리고 f_m 을 조정하였다. $\alpha=0.02$ 로 가정하였을 때 $\gamma=2.0$ 이 적합한 수치였으며, $T_m = 12.1$ sec 를 취하면 유의파의 주기가 약 12 초가 되었다.

상기 가정하에 기존 지형조건에 대한 스펙트럼파 수치모형 결과가 Fig.1 에 제시되어 있다. 파고 곱하기 파향으로 정의된 Wave Flux Vector가 Fig.1(a)에는 Grid 1에서의 계산결과가 Fig.1(b)에는 Grid 2 에서의 계산결과가 제시되어 있다. 격자크기와 동일한 크기로 입사 유의파고 7 m 를 택하였다. 제시된 바와 같이 스펙트럼파를 적용할 경우 회절현상에 의한 파집중현상(waves in caustics)이 뚜렷하게 나타나는 지역은 없으며, 단지 굴절과 해저면마찰에 의한 에너지 감소로 파 조건이 결정됨을 알 수 있다. Fig.1(c)와 (d)에 제시된 바와 같이 파에너지는 굴절에 의하여 돌출부인 장기곶에 집중적으로 모이는 것으로 나타났으며, 영일만 내측과 신항 예정지로 설정된 곳으로도 상당한 파에너지가 침입하는 것으로 나타났다.

기존 지형조건에 대하여 단순파 수치모형을 적용하여 해석결과를 검토하여 보았다. 이는 아직까지 많은 수치모형이 천해파를 단순파로 가정하여 산정하기 때문에 이로부터 야기될 수 있는 문제점을 검토하기 위함이다. 스펙트럼파 모형 적용에 있어서는 토사이동에 의한 파에너지손실을 고려하기 위하여 토사이동에 해당하는 등가조고를 고려하였으나 단순파 모형 적용에 있어서는 토사이동에 의한 파에너지 손실을 고려치 않고 단지 연흔에 의한 형상항력 에너지손실만 고려하였다. Fig.1(a)와 Fig.2(a)를 상대적으로 비교 검토하면 알 수 있듯이 해안선에 가까이 이르기 전까지 단순파 수치모형 결과나 스펙트럼파 수치모형 결과는 거의 유사하나, 해안선에 가까이 이르러 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 주로 단순파인 경우 일부 지역에 굴절에 의한 에너지 집중현상 때문이기도 하겠지만 토사이동에 의한 에너지 손실을 고려치 않은데도 그 이유가 있을 것으로 판단된다.

Fig.2(b)에 도시된 바와 같이 영일만내 북측 해안 신항 방파제 증상으로 상당한 에너지가 집중하는 것으로 나타나는데 이는 방파제 예정지 전방에 천뢰가 위치하고 있기 때문이다. 이러한 파에너지 집중현상으로 10번 지점에서의 파고는 10.46 m 까지 증가하였다. 그러나 Fig.1(b)에 제시된 바와 같이 스펙트럼파인 경우에는 파집중현상이 뚜렷하게 나타나지 않아 유의파고는 5 m 를 넘지 않았으며, 방파제 설치 후에는 0.25 m 정도까지 작아졌다. 따라서 Swell-Type의 천해파가 침입할 때는 신항 방파제 증상으로 상당한 파에너지가 집중할 것으로 예상되나 불규칙파인 경우에는 파에너지 집중현상이 상당히 반감될 것이다. Fig.1(d)와 Fig.2(d) 를 서로 비교하여 보면 알 수 있듯이 단순파인 경우 스펙트럼파인 경우에 비하여 영일만내 파고는 전체적으로 크게 산정되었는데 이는 주로 토사이동에 의한 에너지손실 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구과업은 경상북도 영일군 영일만 일대의 해양수리현상중 파도의 변형에 관한 수치 실험을 실시하여 한국해양연구소가 수행중인 수치모형 실험 결과와 비교 검토하여 종합적인 판단 기준을 제공하는데 있었다. 연구개발 목표와 수행된 연구결과를 요약하여 다음과 같다.

- 1) 마찰손실에 파에너지의 감소를 고려할 때 등가조고의 산정이 전제되어야 하는데 본 연구에서는 연흔의 발생 여부를 검토하여 연흔이 발생하였다고 판단될 때 연흔의 형상

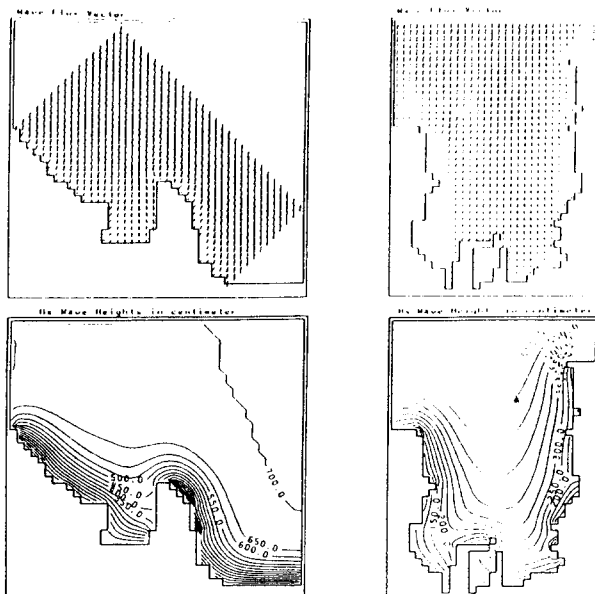


Fig.1 Transformation of JONSWAP spectrum (NE, $H_s = 7$ m, $T_s = 12$ sec)
 (a) Wave flux vector in G1 (b) Wave flux vector in G2
 (c) Significant waveheight H_s in G1 (d) H_s in G2

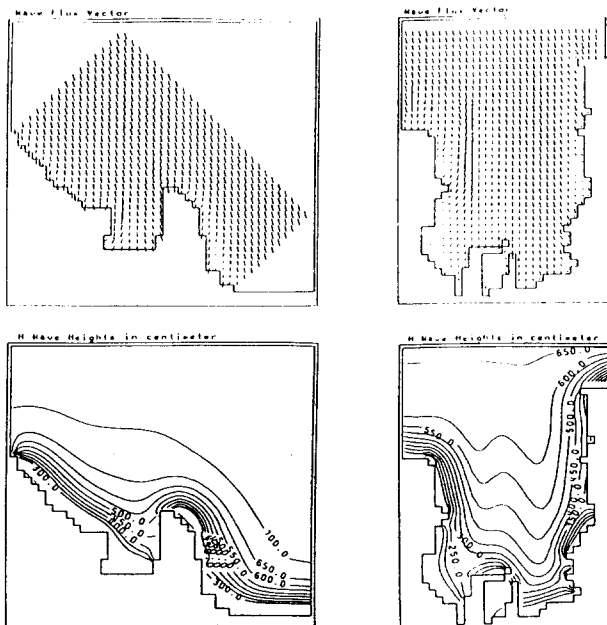


Fig.2 Transformation of monochromatic waves (NE, $H = 7$ m, $T = 12$ sec)
 (a) Wave flux vector in G1 (b) Wave flux vector in G2
 (c) Waveheight H in G1 (d) H in G2

을 고려하여 등가조고를 산정하였다. 또한 토사 이동시 상당한 파에너지의 소산이 발생할 것으로 판단되며, 토사 이동에 의한 에너지 손실효과를 이에 상당하는 등가조고로 환산하였다. 산정 결과 연흔만을 고려하였을 때 에너지 손실이 예상 보다 너무 작은 것으로 판단되며, 보다 정확한 파고 산정을 위하여는 토사이동에 의한 에너지 손실을 반영하여야 될 것으로 판단된다.

- 2) 0.45 km 의 세격자를 사용하여 기존 영일만내의 지형특성과 천해파 특성을 충분히 재현하였다고 판단된다. 그러나 신항 건설후의 방파제 재현에는 충분치 못하다고 판단되며, 앞으로 보다 세밀한 격자망을 구성하여 재검토할 필요성이 있을 것이다.
- 3) 불규칙 스펙트럼과 모형을 운용함과 동시에 단순파 모형을 운용하여 두 모형의 계산 결과를 서로 비교하였는데, 일부 지역에서 산정된 파조건에 상당한 차이를 보이고 있음을 확인하였다.
- 4) 신항 후보지에서 파향은 점증적으로 해안선에 평행한 방향으로 바뀌는 형태로 천해파가 내습하기 때문에 북측해안에서 영일만 내로 상당한 크기의 연안류가 발달할 것으로 판단된다. 이에 반하여 영일만 남측해안은 북측해안보다 해안경사도 급할 뿐만아니라 내습파의 파향도 해안선에 거의 평행하게 나타나기 때문에 연안류의 발달이 미약할 것으로 판단된다. 이는 영일만 해수순환 과정뿐만아니라 포항항내 부진동현상을 파악하는데 중요한 요인인 것으로 사료되며, 영일만 해수순환과 항내 부진동현상은 영일만내 북측 해안에서 주로 생성 발달하는 연안류가 주도할 것으로 여겨진다. 따라서 영일만 북측 해안에 위치한 신항은 두가지 문제점, 즉 해수순환과 항내 부진동 문제에 상반되는 역할을 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구를 수행하는데 지원하여준 한국해운항만청과 한국해양연구소의 관계자 제위에게 감사드린다.

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.
- Madsen, O.S. and Rogengaus, M.M., 1988, Spectral wave attenuation by bottom friction: experiments, Proc. 21st Int. Conf. Coastal Eng., ASCE: 849-857.
- 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.
- Yoo, D. and Zielke, W., 1994, Diffraction of irregular waves in large coastal region, 94년도 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), pp.548-551.