

다방향 입사파의 쌍곡형 수치모형에 의한 포항신항내 항내정온도 분석

Analysis of Harbor Tranquility in Pohang New Harbor Using a Hyperbolic Model with Multi-Directional Incoming Waves

정원무* · 이창훈* · 채장원*

Weon Mu Jeong*, Changhoon Lee* and Jang Won Chae*

要 旨 : 포항신항내 2개 정점에서의 현장관측자료와 수치실험 결과를 비교·검증하여 쌍곡형 수치모형의 적용성을 검토하였다. 단일 방향 규칙파를 입사파 조건으로 사용한 경우 정점 P2, P3에서 관측치와의 오차가 각각 약 12, 26 %로 제시되었으며, 다방향 성분파를 입사파 조건으로 사용한 경우 2개 정점에서의 오차가 각각 약 4, 16%로 나타나 대략 9% 개선된 결과를 얻었다. 포항신항의 1994년의 평면 배치와 제4 투기장 완공후의 평면 배치에 대하여 다방향 성분파를 입사파 조건으로 하여 항내정온도의 개선 상태를 평가하였다. 그 결과, 제4 투기장 계획에서 연장된 200 m의 북방파제만으로는 제7 부두에서 하역불능시간이 긴 문제를 해결하기가 어려울 것으로 사료된다.

핵심용어 : 항내정온도, 다방향파, 쌍곡형 수치모형

Abstract □ A hyperbolic numerical model with multi-directional waves has been used to investigate harbor tranquility in Pohang New Harbor. Comparing numerical results with field data measured at two stations in the harbor, it was found that use of input condition of multi-directional waves is superior to the use of uni-directional waves. Calculations with uni-directional wave input give errors of about 12% at St. P2 and 26% at St. P3, while calculations with multi-directional wave input give errors of 4 % at St. P2 and, 14% at St. P3. Using the input condition of multi-directional waves, we investigate the tranquility of Pohang New Harbor with two layouts : the condition in 1994 when the downtime at the 7th pier was often reported and the condition in 1996 when the 4th disposal site was constructed. The numerical results show that the problem of downtime at the 7th pier cannot be solved by the construction of the 4th disposal site.

Keywords : harbor tranquility, multi-directional waves, hyperbolic numerical model

1. 서 론

포항신항은 항내정온도 불량 문제가 건설 초기부터 지속적으로 제기되어 왔으며 그 원인을 보다 정확하게 파악하기 위하여 포항신항의 확장(1985년 12월에 외항과 동항 완공) 후 건설부(1987)에서 대규모 현장관측 및 수치모형실험을 통하여 항내정온도 불량의 원인이 단주기파에 의한 것임을 제시하고 그에 대한 대책을 수립한 바 있다. 그 이후에도 포항제철주식회사의

25만톤 원료부두 계획(포항종합제철주식회사, 1989) 및 제4 투기장 계획(포항종합제철주식회사, 1992) 등에 수반되어 항내정온도 검토가 다각적으로 수행되었다. 정 등(1997)은 영일만 신항만 개발사업(해운항만청, 1994a), 해운항만청(1994b)의 R & D 사업 및 한국해양연구소(1995)의 기본연구사업을 통하여 수행된 포항신항 내·외에서의 장·단주기파의 장기간 동시 관측 결과와 포항신항의 하역중단 상태에 대한 자료(즉, 포항제철주식회사의 1987~1994년의 각 선석별 하

*한국해양연구소 연안공학연구부 (Coastal Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

역중단기록)를 토대로 포항신항의 항내정온도 불량 원인을 분석하고 너울을 포함한 단주기파의 항내 침입이 그 주요한 원인임을 제시하였다.

상기 연구들에서 수행된 단주기파 수치모형실험에 대해서는 다음의 몇 가지 사항들을 지적할 수 있다. 먼저, 단일 파향의 규칙파만을 사용하여 주 파향 주변에 분포하는 파랑 성분들이 항입구를 통해 회절되어 전파하는 경우를 정확하게 재현하지 못하였을 가능성이 크다. 즉, 포항신항에 대한 심해파(파향 NE, 주기 12초, 파고 7.0 m)는 영일만을 전파하는 동안 파향이 N47°E (건설부, 1987)로 변한 천해설계파가 되므로 영일만의 灣澳에 위치한 포항신항에 대해서는 이 조건에 대한 항내정온도만을 검토하였다. 과거의 검토에서 단일 파향을 사용한 이유는 주로 컴퓨터 용량, 속도, 사용료 등에 관계되는 경제적인 측면 때문이었다. 그러나, 영일만 신항만 개발사업(해운항만청, 1994a)의 관측 결과에 따르면 폭풍과 영일만을 통과한 후 포항신항 입구 부근에서의 평균 파향은 대체로 N18°E~N46°E에서 분포한다. 항입구를 통해 침입하는 회절파를 생각하면 N47°E의 파향이 보다 안전측이기는 하나 단일 파향의 천해설계파에 의한 검토는 실제 상황을 제대로 재현하지 못할 것으로 사료된다. 둘째로, 천해설계파와 같은 입사파 조건에 대한 수치모형의 검증이 엄밀하게 이루어지지 못한 상태에서 수치실험이 실시되었다. 셋째, 상기 수치실험에서는 대부분 천해설계파에 대비되는 항내파고비만을 검토하여 1개월에 1~2회 발생하는 폭풍파에 의한 항내파고 분포와 직접 연계시키는 것은 곤란하였다. 즉, 건설부(1987)의 경우 항내정온도 검토시 주기 13초, 그리고 포항중합제철주식회사(1989, 1992)에서는 주기 12초의 천해설계파를 사용한 바 있다. 50년 빈도의 천해설계파와 1개월 빈도의 폭풍파는 파고와 주기 면에서 그 특성이 상당히 다르므로 천해설계파보다 주기가 짧은 폭풍파에 대한 검토도 항내정온도 평가시에 포함시키는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

현재 국내에서는 항내에서의 다중반사를 고려할 수 있는 항내정온도 검토용 수치모형으로 Copeland (1985)의 모형을 수정한 한국해양연구소의 HCORD (과학기술처, 1991)와 西村 等(1983)의 수치모형이 사용되고 있다. 이 수치모형들은 반무한방과제 후면의 회절이나 이안제 후면의 회절 등에 대해서는 수리실험이나 이론해와 비교되었으나 항만과 같이 多重反

射가 발생하는 경우에 대해서는 비교·검증이 이루어지지 못하였다. 단, 곽 등(1990)은 후포항에 대한 수치모형실험 결과와 西村 等의 수치모형에 의한 결과를 비교하였으나 불규칙파에 대한 검토는 수행하지 않았다.

입사 경계에서 불규칙파를 직접 사용할 수 있는 쌍곡형 완경사방정식은 현재까지 여러 연구자들(Smith and Sprinks, 1975; Radder and Dingemans, 1985; Kubo *et al.*, 1992; Lee, 1994)에 의해 개발되었으나 아직까지 다중반사를 포함하는 영역에 이 모형이 적용된 사례는 없다. 천해역에서 비선형 불규칙파를 해석할 수 있는 모형인 Boussinesq 방정식의 경우 Larsen and Dancy(1983)가 스폰지층(sponge layer)을 사용하여 방사 경계조건의 적용성을 검증하였으며 이를 이용한 임의 반사율의 처리 기법은 상용 프로그램인 'SYSTEM21' 또는 'MIKE21'에 채용되고 있다. 한편, 轟岡 等(1996)은 스폰지층을 사용한 임의 반사율의 처리 방법을 제시하였으나 단주기파를 대상으로 하는 경우 아직까지 정확도 측면에서 개선의 여지가 많다.

공학적인 측면에서는 항만정온도 평가를 위해 항내 파고분포의 예측이 요구되며 통상적으로는 쌍곡형 수치모형에 단일 방향의 규칙파를 적용하는 경우가 많다. 그러나, 실제의 파는 방향별로 에너지가 다르게 분포하므로 단일 방향의 파를 입사파로 하여 해석할 경우 실제보다 과대 또는 과소하게 예측할 가능성이 크다. Panchang *et al.*(1990)은 포물형 수치모형에서 입사파 스펙트럼을 주파수 및 방향별로 다수의 성분파로 나누고 각각을 계산한 후 그 결과들을 선형 합성하는 소위 성분파 중첩법을 제시하였다. 그러나, 쌍곡형 수치모형에 이 성분파 중첩법을 사용하면 성분파의 수가 많은 경우 엄청난 계산시간이 소요되므로 실제로 적용이 거의 불가능하다.

본 연구에서는 현장관측자료를 사용하여 수치모형 HCORD의 적용성을 검증하고 포항신항 제4 투기장의 외곽시설 완공 후의 포항신항내 정온도를 재평가하였다. 수치모형 검증시에는 먼저 단일 방향 규칙파를 입사파 조건으로 하여 관측자료와 비교·검토하여 그 적용성의 한계를 밝힌 후 다방향 성분파를 입사파 조건으로 사용하여 관측치에 더 근접한 결과를 얻었다. 그리고, 다방향 성분파를 입사파 조건으로 하여 제4 투기장의 외곽시설 완공후의 평면 배치에 적용하여 항내 정온도의 개선 상태를 분석하였다.

2. 자료 분석

2.1 건설부의 자료

건설부(1987)의 사업에서는 북방파계의 先端에서 NE 방향으로 2.5 km 떨어진 고정 정점에 부이식 파고계(Waverider Buoy)를 설치하고 포항신항의 항입구 지점와 항내의 30개 정점에서 단기간 부이식 파고계를 사용한 이동관측을 실시하여 항외 정점에 대한 항내에서의 파고비를 상세하게 측정하였다. 이 결과들은 동 사업에 사용된 파랑 변형 수치모형의 수립 및 검증자료로 사용하였으나 본 논문에서는 항외의 파랑 정보가 없는 점을 감안하여 사용하지 않았다.

동 관측에서는 다음의 몇 가지 문제점을 지적할 수 있다. 먼저, 항외 정점에서 사용된 관측기기가 파향을 관측할 수 있는 파향·파고계가 아니어서 수치모형의 입력조건 중 파향에 관한 것은 추정치를 사용해야 하는 점을 들 수 있다. 이는 항외 정점이 영일만내 깊숙한 곳에 위치하여 평균파향이 NNE~NE에 분포하는 점을 감안하더라도 수치모형으로 재현하는 항내 회절 파고에는 상당한 차이를 유발할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 항외 정점에서의 유의파고가 0.5 m 미만이거나 첨두주기가 5초 미만인 경우도 상당히 있었으므로 이들을 모두 포함하여 항내파고비 분포를 제시한다면 부정확한 항내파고비를 제시할 가능성이 클 것으로 판단된다. 왜냐하면 항내 유의파고가 작은 경우 대형 선박의 왕래가 빈번한 포항신항과 같은 대형 항만에서는 航走波로 자료가 오염될 가능성이 크기 때문이다.

따라서, 본 논문에서는 항외 정점에서의 유의파고가

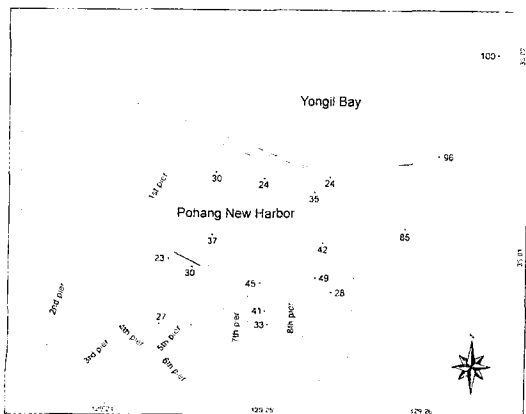


Fig. 1. Spatial distributions of wave height ratios in 1987 between St. W and other stations around Pohang New Harbor.

0.5 m 이상이고 첨두주기가 5초 이상인 자료만을 선정하여 항내파고비를 구한 후 이를 Fig. 1에 제시하였다. 이 그림의 숫자들은 항입구 외측의 정점에서의 파고를 100으로 설정했을 때의 파고를 나타낸다. 이를 살펴보면 먼저 제7 및 제8 부두 전면에서의 파고비가 0.3~0.5 정도로 상당히 크게 나타나고 있어서 동 수역의 정온도가 불량함을 알 수 있다. 기타 정점들에서도 파고비가 최소 0.23, 최대 0.35에 달하여 신항만 설계시 항내 파고비를 통상 0.1 이하(또는 가능하면 0.15 이하)가 되도록 설계함을 고려할 때 현장관측이 수행되었던 1986년의 배치에서는 적절한 항내정온도를 유지할 수 없었음을 알 수 있다. 한편, 파고비들의 평면적인 분포를 보면 인접한 값들과 그다지 큰 차이가 없어서 현장 관측이 적절하게 수행되었음을 알 수 있다.

2.2 해운항만청의 자료

해운항만청(1994a, b)의 포항신항 내외의 파랑 관측 자료는 정 등(1997)의 논문에 자세히 수록되어 있다. 건설부(1987)의 자료와 해운항만청(1994a, b)의 자료 간의 차이점으로는 항외 정점에서의 파향 관측의 유무(전자는 파향 관측이 없었음)와 항내 파고계의 형식(전자는 부이식 파고계, 후자는 수압식 파고계)이 다른 점을 들 수 있다.

Fig. 2에 제시된 3 개 정점(항외 1개소, 항내 2개소)에서의 관측자료 중 항외 정점 W에서 유의파고가 0.5 m를 초과한 경우에 대해 유의파고(H_s)와 첨두 주기(T_p)의 3월 20 30일의 시간에 따른 변화를 Fig. 3과 4에 각각 제시하였다. 3월 27일 전후의 폭풍파의 경우 정점 P2에서의 유의파고는 0.28 → 0.37 → 0.15 m로 변하였

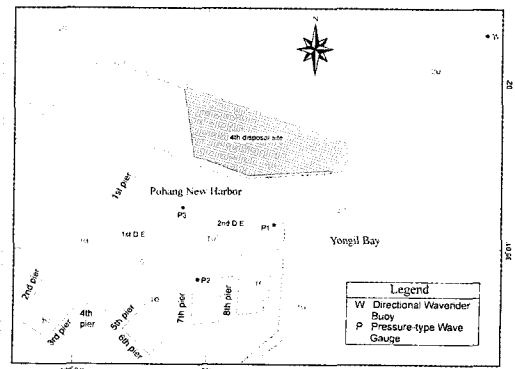


Fig. 2. Location map of short-period wave measurements in 1994 around Pohang New Harbor.

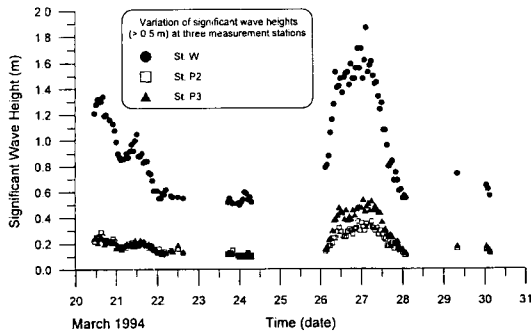


Fig. 3. Variation of significant wave heights at Sts. W, P2 and P3 in March, 1994.

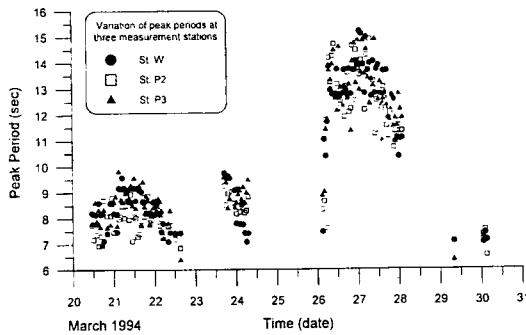


Fig. 4. Variation of peak periods at Sts. W, P2 and P3 in March, 1994.

고, 정점 P3에서는 0.25 → 0.54 → 0.15 m로 변화하였다. 한편, Fig. 4에 제시된 항내 · 외의 정점들에서의 침두주기는 대체로 11~15 초로서 통상의 폭풍파 주기에 비해 상당히 길다. Fig. 5에는 정점 W에서의 파고에 대한 정점 P2 및 P3에서의 파고비의 변화를 제시하였는데 이들은 각각 0.15~0.25 및 0.20~0.37에서 변화하였다. 참고로 단일 방향의 규칙파를 입사파로 한 수치실험 결

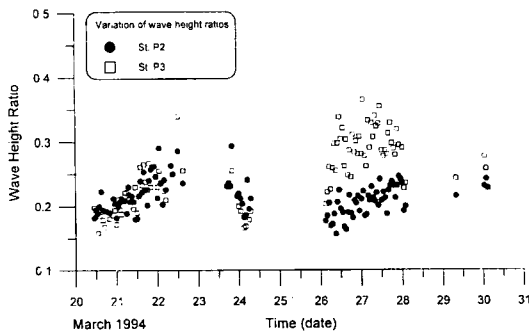


Fig. 5. Variation of wave height ratios between St. W and Sts. P2 and P3 in March, 1994.

과(포항지방해운항만청, 1991)에서는 이 정점들에서의 파고비가 각각 0.1 및 0.15, 그리고 그 이듬해의 결과(포항종합제철주식회사, 1992)에서는 각각 약 0.1 및 0.3으로 제시되었다. 입사파 조건이 단일 방향 규칙파이고 주기가 현장관측치와 상당히 다른 점을 감안할 때 직접적으로 양자를 비교하는 것은 곤란하지만 이들의 수치실험에서는 정점 P2에서의 파고비를 낮게 예측하였을 가능성이 있다.

3. 쌍곡형 수치모형, HCORD

3.1 지배방정식

항내 및 해안에서 규칙파의 천수 · 굴절 · 회절 · 반사 현상을 동시에 고려할 수 있는 파랑식으로서 Berkhoff(1972)의 환경사방정식이 있다. 이 식은 타원형 편미분방정식이므로 해를 구할 때 경계조건을 지정해야 하며 이 때 행렬식이 도출되어 계산시간이 긴 단점이 있다. 반면, 쌍곡형 방정식은 타원형식에 비해 계산효율이 높으면서 규칙파의 천수 · 굴절 · 회절 · 반사 현상을 동시에 고려할 수 있어서 파랑변형을 예측할 때 많이 이용되고 있다.

본 논문에서 사용한 수치모형의 지배방정식은 Copeland(1985)가 개발한 다음의 시간의존 쌍곡형 환경사방정식이다.

$$\frac{C_g}{C} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{Q} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + CC_g \nabla \eta = 0 \tag{2}$$

여기서, t 는 시간, ∇ 은 수평 미분연산자, C 는 위상속도, C_g 는 군속도, η 는 수면 변위, 그리고 $\mathbf{Q}(=C_g \eta)$ 는 중심적인 體積束을 나타낸다.

3.2 초기조건 및 경계조건

항내의 파고변화를 예측하기 위해서는 초기의 파랑 조건이 필요하므로 항내의 파랑이 정상상태에 도달할 때까지 수치계산을 실시하여야 하는데 이 경우 초기조건에 따라 계산시간에 큰 차이가 있다. 초기조건으로 전체 영역에 규칙파를 발생시켜 놓으면 가장 빨리 정상상태에 도달할 수 있으나, 방파제 후면의 파랑이 비현실적으로 커지는 경우가 있으므로 초기조건으로 전체 영역에 파가 전혀 없는 정온한 상태를 가정하는 경

우가 많으며 본 연구에서도 후자를 사용하였다.

본 수치모형에서 사용하는 경계조건은 크게 입사 경계조건과 반사 경계조건으로 나눌 수 있다. 먼저, 입사 경계면에서는 파가 영역 내부로 입사됨과 동시에 입사 경계면으로 전파되어 오는 파의 투과도 되어야 한다. 본 모형에서는 투과를 고려한 입사 파랑조건으로 상류 경계($x=x_0$)에 x 축 방향의 체적속 Q_x 를 다음과 같이 나타냈다.

$$Q'_{x_0,j} = q'_{x_0,j} + QE \quad (j=1, \dots, J) \quad (3)$$

여기서, 아랫첨자 $(0, j)$ 는 각각 x, y 방향의 격자점 위치, Δt 는 시간 간격, q_x 는 순수입사파의 x 축 방향의 체적속, 그리고 QE 는 반사파의 x 축 방향의 체적속이다. 반사 경계조건은 반사가 전혀 없는(반사율, $r=0$) 개방 경계조건과 반사가 있는 육지 경계조건으로 세분할 수 있는데 이는 하류 경계($x=x_N$)에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q'_{x_N} = AF \cdot Q_{x_N} \quad (j=1, \dots, J) \quad (4)$$

$$AF = \frac{1-r}{[(1+r)^2 \sin^2(k \Delta x \cos \theta) + (1-r)^2 \cos^2(k \Delta x \cos \theta)]^{1/2}} \quad (5)$$

여기서, Δx 는 x 방향의 격자 간격, θ 는 x 축을 기준으로 한 파향각을 나타낸다. 한편, 지연 시간을 나타내는 τ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\tan \omega \tau = \frac{1+r}{1-r} \tan(k \Delta x \cos \theta) \quad (6)$$

여기서, ω 는 각주파수를 나타낸다. 수치모형 적용시의 반사율로 자연해빈에 0.2, 테트라포드로 피복된 방파제에 0.4, 직립 안벽에 0.9를 적용하였다.

4. 방향성을 고려한 향내정온도 검토

4.1 방향성의 고려

전체 파에너지의 분산도에 근거한 다방향 성분파의 개념(Goda, 1985)을 이용하면 16방위 분할과 방향집중도 매개변수 $S_{max}=75$ (포향신향의 항입구는 영일만의 灣澳에 위치하므로 에너지 감쇠거리가 긴 너울이 입사하는 것으로 볼 수 있음)를 기준으로 할 경우 방향별 에너지비가 $\theta=0^\circ$ 일 때 0.60, $\theta=\pm 22.5^\circ$ 일 때 0.18, 그리고 $\theta=\pm 45.0^\circ$ 일 때 0.02로 각각 제시된다. 단, $\theta=\pm 45.0^\circ$ 로 입사하는 경우의 2% 파에너지는 전체 에너지

에 비해 작으므로 각각 $\theta=\pm 22.5^\circ$ 로 입사하는 경우에 포함시킬 수 있다. 이러한 경우 방향성 고려 방법을 다음과 같이 제안할 수 있다.

초기 파향이 θ 인 성분에 대한 입사파의 진폭은 $a_i = \sqrt{2E(f)D(\theta)\Delta f \Delta \theta}$ 이다. 여기서 $E(f)$ 는 입사파의 주파수 스펙트럼, $D(\theta)$ 는 방향분산함수(directional spreading function)이다. 주어진 단조파의 파고에 대응되는 각 성분파의 파고는 $H_i=2a_i = \sqrt{8E(f)D(\theta)\Delta f \Delta \theta}$ 에 주파수 스펙트럼과 유의파고간의 다음 관계식을 대입하여 구할 수 있다.

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \left(\int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi S(f, \theta) d\theta df \right)^{1/2} \quad (7)$$

여기서, $S(f, \theta)$ 는 주파수-방향 스펙트럼을 나타낸다. 식 (7)에 $\sum E(f)\Delta f = m_0 = H_s^2/16$ (여기서, H_s 는 입사파의 유의파고)을 적용하면 다음과 같다.

$$H_i = \sqrt{\frac{8H_s^2}{16} D(\theta)\Delta \theta} = \sqrt{\frac{H_s^2}{2} D(\theta)\Delta \theta} \quad (8)$$

$S_{max}=75$ 일 때 수직 입사($\theta=0^\circ$)의 경우 $D(\theta)\Delta \theta=0.6$, $\theta=\pm 22.5^\circ$ 로 비스듬히 입사하는 경우에는 $\theta=\pm 45.0^\circ$ 의 에너지를 포함시키면 각각 $D(\theta)\Delta \theta=0.2$ 가 되며 이에 해당되는 入射波高對 成分波高의 비를 상기 식에서 구할 수 있다. 이렇게 구한 비율을 입사파고에 곱하여 구해진 성분파고를 입력조건으로 수치모형을 실행한 후 각 격자점에서의 결과를 다음 식으로 합성하여 파고를 구한다.

$$H_{st}^2 = 2 \sum_{i=1}^n H_i^2 \quad (9)$$

여기서, n 은 주파수 성분의 갯수, H_{st} 는 각 격자점에서 계산된 유의파고를 나타낸다.

4.2 수치모형 검증

4.2.1 파랑조건

쌍곡형 수치모형의 향내정온도 검토에의 적용성을 파악하기 위하여 Fig. 3과 4에 제시된 관측자료에서 파향, 주기, 분산도 등을 감안하여 몇 개의 파랑조건을 선정하고 이들을 Table 1에 정리하였다. 이를 살펴보면 유의파고(H_s)는 0.55~1.87 m, 침두주기(T_p)는 8.16~13.94초, 대표파향은 N32.2°E~N45.6°E, 대표파향에서의 파향 분산각(spreading angle)은 13.3~25.6°로 비교

Table 1. Input wave conditions in 1994 for the applicability test of numerical model.

Data set no.	Measured time	H_s (m)	T_p (sec)	Wave direction	Spr. angle(deg)
1	3/21 06:00	0.90	9.18	N32.2°E	13.3
2	3/21 11:00	1.00	9.17	N34.2°E	14.9
3	3/22 00:00	0.61	8.16	N34.2°E	15.1
4	3/26 04:00	0.81	11.04	N39.8°E	14.5
5	3/26 15:00	1.52	12.80	N36.8°E	15.1
6	3/26 21:00	1.56	13.72	N36.3°E	14.8
7	3/27 03:00	1.87	13.94	N44.7°E	15.4
8	3/27 10:00	1.34	12.82	N45.6°E	15.3
9	3/27 16:00	0.80	12.69	N41.4°E	25.6
10	3/28 00:00	0.55	10.38	N39.6°E	23.6

적 좁은 범위에 분포되어 있다. 이 조건들은 하역불능 시간(downtime)이 발생한 3월 26~28일(정 등, 1997)을 중심으로 항외 정점 W에서의 유의파고가 0.5 m 이상인 경우를 기준으로 침두주기, 대표파향 및 파향 분산각을 감안하여 가능한 한 출현율이 낮은 조건까지도 포함하도록 설정하였다.

4.2.2 단일 방향 규칙파에 의한 결과와 방향성이 고려된 파에 의한 결과의 비교

수치모형의 검증은 단일 방향 규칙파와 3방향 합성법에 의한 경우로 구분하여 실시하였다. 수치모형에 사용된 격자망은 700×650 ($\Delta x = \Delta y = 10$ m)로 구성하였는데 항외 정점 W(수심 약 22.5 m)가 入射境界線에 위치하도록 하였다. 현장관측 자료와 수치모형에 의한

계산 결과를 항외파고에 대한 항내파고의 비로 Table 2에 제시하였다.

먼저, 단일 방향 규칙파에 의한 결과를 살펴보면 data set nos. 3, 4, 10을 제외하면 관측치와의 오차가 $\pm 15\%$ 이하로 나타났다. 오차가 큰 3 조건에서는 정점 P2에서 작게, 정점 P3에서 크게 예측하는 공통된 양상을 보이는 데 Table 1에 제시된 입사파 조건을 살펴보면 3 조건 모두 정점 W에서의 파고가 작은 경우(data set no. 9는 nos. 3, 4, 10에 비해 대표 파향 및 파향 분산각이 상당히 다름)여서 항내파고 관측치가 항주파나 항내에서 발생한 풍파로 오염되었을 가능성이 있다. 또한, data set no. 8을 제외한 9개 조건에서 3방향 합성법에 의한 결과가 단일 방향파에 의한 결과보

Table 2. Comparisons of predicted wave height ratios against measured ones using input conditions of uni- and multi-directional waves before the construction of the 4th disposal site.

Data set no.	St. P2					St. P3				
	Meas.	Uni-direction		Multi-direction		Meas.	Uni-dirdection		Multi-direction	
		Pred.	Err.(%)	Pred.	Err.(%)		Pred.	Err.(%)	Pred.	Err.(%)
1	0.189	0.184	-2.6	0.192	1.6	0.222	0.224	0.9	0.221	-0.5
2	0.180	0.162	-10.0	0.175	-2.8	0.230	0.259	12.6	0.249	8.3
3	0.213	0.146	-31.5	0.168	-21.1	0.230	0.289	25.7	0.269	17.0
4	0.185	0.152	-17.8	0.178	-3.8	0.222	0.486	118.9	0.425	91.4
5	0.164	0.159	-3.0	0.166	1.2	0.303	0.341	12.5	0.305	0.7
6	0.205	0.187	-8.8	0.200	-2.4	0.301	0.346	15.0	0.313	4.0
7	0.187	0.178	-4.8	0.185	-1.1	0.262	0.285	8.8	0.255	-2.7
8	0.201	0.215	7.0	0.233	15.9	0.328	0.316	-3.7	0.322	-1.8
9	0.225	0.209	-7.1	0.214	-4.9	0.313	0.331	5.8	0.325	3.8
10	0.236	0.132	-44.1	0.183	-22.5	0.291	0.475	63.2	0.400	37.5
RMS error(%)			18.9		11.2			44.1		31.9

Table 3. Numerical results of wave height ratio using input conditions of multi-directional waves after the construction of the 4th disposal site.

Data set no.	St. P2			St. P3		
	Predicted result		Reduction Rate(%)	Predicted result		Reduction rate(%)
	1994	1996		1994	1996	
1	0.192	0.151	21.4	0.221	0.197	10.9
2	0.175	0.116	33.7	0.249	0.197	20.9
5	0.166	0.136	18.1	0.305	0.236	22.6
6	0.200	0.173	13.5	0.313	0.238	24.0
7	0.185	0.158	14.6	0.255	0.220	13.7
8	0.233	0.208	10.7	0.326	0.283	13.2
9	0.214	0.196	8.4	0.325	0.289	11.1
Average	0.195	0.163	17.2	0.285	0.237	16.6

다 관측치에 더 근접하여 다방향 성분파를 입사파의 조건으로 사용함이 타당했음을 보여준다. 3방향 합성법의 경우에도 단일 방향 규칙파의 경우와 마찬가지로 계산치가 관측치에 비해 정점 P2에서는 작게, 그리고 정점 P3에서는 크게 예측하는 양상을 보인다. 참고로 단일 방향 및 다방향 입사파 사용시의 RMS(Root-Mean-Square) 오차는 정점 P2에서 약 19 및 11%, 그리고 정점 P3에서 약 44 및 32%로 나타났다.

4.3 제 4투기장 완공후 평면 배치에 대한 정온도 분석

포항신항 북방파제 외측의 제4 투기장 건설계획시(포항종합제철주식회사, 1992)에 북방파제를 200 m 연장하는 항내정온도 개선대책이 수립되었으며 이중 방파제 연장구간은 1996년에 완공되었다. 항내정온도 검토 측면에서는 전술한 과정에서 검증된 수치모형과 입사파 조건을 개선안에 적용하여 파고비 감소 효과를 종합적으로 검토함으로써 이후의 포항신항내 정온도를 부분적으로 예측할 수 있을 것이다. 단, 수치모형의 검증시 관측치와 상당한 차이를 보인 data set nos. 3, 4 및 10은 수치계산은 실시하였으나 검토대상에서는 제외하였다.

Table 3에는 제4 투기장 완공후의 평면 배치에 대하여 3 방향 합성법에 의한 파고비 예측 결과를 나타냈는데 이에 제시된 data set nos. 5~8의 파고비 평균치를 보면 1994년도의 배치에 비해 정점 P2, P3에서 각각 16%, 18%의 파고비 감소 효과가 나타났다. Table 3에 제시된 감소율(reduction rate)은 1994년의 평면 배치시에 대해 계산된 파고비를 기준하여 제4 투기장 완공후의 평면 배치시 계산된 파고비의 감소율을 나타낸

다. 한편, 7개 data sets의 파고비 감소율의 평균치는 정점 P2와 P3에서 모두 약 17%로 나타났다.

1997년 현재 포항신항의 제4 투기장의 외곽시설은 거의 완공된 상태로서 이를 기준으로 3방향 합성법에 의해 수치계산한 결과를 이용하여 현 상태의 정온도를 평가하였다. 정점 P2에서 예측된 data set nos. 5~8의 파고비 평균치 0.169는 수치모형 검증시의 관측치 평균 0.189와 3방향 합성법에 의한 계산치의 평균인 0.196을 이용하면 약 0.163($\approx 0.169/0.196 \times 0.189$)로 제시되어 약간 감소하게 된다. 정점 W에서의 data set nos. 5~8의 입사파고 평균치는 약 1.57 m이므로 이 경우 실제적인 파고의 감소는 0.297 m → 0.256 m의 약 0.04 m가 되어 엄밀한 판단은 어려우나 제4 투기장 계획을 통해 연장되는 200 m의 북방파제만으로는 제7 부두 등의 downtime 문제를 크게 개선하기는 어려울 것으로 사료된다.

5. 결론 및 토의

건설 초기부터 항내정온도 불량 문제가 계속 제기되고 있는 포항신항을 대상으로 최근 항내정온도 검토에 많이 사용되는 쌍곡형 수치모형의 적용성을 현장관측 자료와 수치실험 결과의 비교·검증을 통하여 검토하였다. 수치모형 검증시에는 먼저 단일 방향 규칙파를 입사파 조건으로 하여 관측자료와 비교·검토하여 그 적용성의 한계를 밝힌 후 다방향 성분파를 입사파 조건으로 사용하여 관측치에 더 근사한 결과(정점 P2의 경우 전자는 오차가 평균 12%였으나 후자는 4%로 나타났다)를 얻었다. 그리고, 이 조건을 1994년의 평면

배치와 제4 투기장 완공후의 평면 배치에 적용하여 항내정온도의 개선 상태를 평가하였다. 본 논문에서의 주요 결론 및 토의사항은 다음과 같다.

- 단일 방향 규칙과보다 3방향 성분파를 입사파 조건으로 하는 경우에 관측치에 더 근사한 수치실험 결과를 얻었다.
- 항의 정점에서 파고가 작은 자료에서는 다른 자료에 비해 수치모형의 재현성이 낮았으며 이는 항내파고 관측치가 航走波나 항내에서 발생한 풍파로 오염되었을 가능성이 있기 때문이다.
- 제 4투기장 계획에 포함된 200 m 연장된 북방과제 만으로는 제 7부두 등의 downtime 문제를 크게 개선하기는 어려울 것으로 사료된다.
- 현재까지 실시된 외항방과제를 연장하는 방안이 접근수도로 인하여 더 이상은 곤란할 것으로 생각되므로 항입구의 외측에 이안제를 설치하는 배치안 등에 대한 검토가 요망된다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 기관고유사업인 "연안방재 구조물의 설계기술 개발"의 연구 결과의 일부이며 현장관측 및 자료 분석에 수고해주신 한국해양연구소 연안공학연구부의 관계자들에게 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 건설부, 1987. 포항신항 파랑조사 및 모델실험 용역 보고서, 제 2권 파랑조사 및 모델 실험편, 연구기관: 한국과학기술원 부설 해양연구소.
- 과학기술처, 1991. 항만정온도 유지대책 수립에 관한 연구(I), 연구기관: 한국해양연구소.
- 곽문수, 홍길표, 편종근, 1990. 시간의존 환경사방정식을 이용한 항내 파고분포 계산, 한국해양·해양공학회지, 2(1): 18-27.
- 정원무, 오세범, 채장원, 김상익, 1997. 포항신항내 파랑에 의한 Downtime 원인 분석, 한국해양·해양공학회지, 9(1): 24-34.
- 포항종합제철주식회사, 1989. 포항항 종합계획 및 원료부두 설계 용역 보고서, 항내정온도 검토편, 연구기관: 한국과학기술원 부설 해양연구소.
- 포항종합제철주식회사, 1992. 포항제철소 제 4투기장 조성 수치모형실험보고서.
- 포항지방해운항만청, 1991. 포항신항 제 7부두내 안벽 축조공사 실시설계 용역 보고서, 연구기관: 한국해양연구소.
- 한국해양연구소, 1995. 포항신항 항만부진동 현장관측 및 수치실험.
- 해운항만청, 1994a. 영일만 신항개발 외곽시설 실시설계 용역 보고서, 제 2권 수치모형실험편, 연구기관: 한국해양연구소.
- 해운항만청, 1994b. 천해파랑 산출 시스템 구축 용역 1차년도 보고서, 연구기관: 한국해양연구소.
- Berkhoff, J.C.W., 1972. Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Int. Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 471-490.
- Copeland, G.J.M., 1985. A practical alternative to the mild-slope wave equation, *Coastal Engrg.*, 9, pp. 125-149.
- Goda, Y., 1985. *Random seas and design of maritime structures*, Univ. of Tokyo Press.
- Kubo, Y., Kotake, Y., Isobe, M. and Watanabe, A., 1992. Time-dependent mild slope equation for random waves, *Proc. 23rd Int. Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 419-431.
- Larsen, J. and Dancy, H., 1983. Open boundaries in short wave simulation a new approach, *Coastal Engrg.*, 7, pp. 285-297.
- Lee, C., 1994. A study of time-dependent mild-slope equations, PhD dissertation, Univ. of Delaware.
- Panchang, V.G., Wei, G., Pearce, B.R. and Briggs, M.J., 1990. Numerical simulation of irregular wave propagation over shoal, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, 116(3), pp. 324-340.
- Radder, A.C. and Dingemans, M.W., 1985. Canonical equations for almost periodic, weakly nonlinear gravity waves, *Wave Motion*, 7, pp. 473-485.
- Smith, R. and Sprinks, T., 1975. Scattering of surface waves by a conical island, *J. Fluid Mech.*, 72, pp. 373-384.
- 西村仁嗣, 丸山康樹, 平口博丸, 1983. 直接數値積分による波の場の解析, 海岸工學講演會論文集, 第30卷, pp. 123-127.
- 喜岡涉, 柏原謙爾, 相川久紀, 田中正博, 1996. 多方向不規則波による港内副振動の豫測モデルとその適用性, 海岸工學論文集, 第39卷, pp. 201-205.