

# 港内波高 분포

이 해 종

홍 길 표 <국립건설시험소 수공과>

편 종 근 <명지대학교 토목공학과 부교수>

## ■ 서 론

새로운 항만의 건설이나 기존 항만의 확장 또는 개량에 있어서 가장 문제가 되는 것 중의 하나는 항내에 충분히 정온한 수역을 확보해야 한다는 것이다.

이러한 항내정온에 영향을 미치는 요인으로는 파랑, 바람, 흐름 등 여러가지 요인이 있으나, 이 중에서 파랑이 제일 주요한 요인이다. 항내파랑은 항구 진입파, 항내반사파, 항내전달파, 항주파, 항내발생파, 부진동 등이 복합되어 이루어져 있고, 이 중에서 항구진입파와 항내반사파가 항내파고분포에 제일 크게 작용한다.

본 논문에서는 경상북도 울진군에 위치한 후포항만에 대하여 Sommerfeld의 해를 이용한 Takayama 모형과 비정상 환경사방정식을 이용한 수정 김 모형인 수치모형으로 항내파고분포를 계산하고 그 결과를 수리모형실험결과와 비교 분석한 후 수치모형의 타당성을 검토하였다.

## ■ Takayama모형

반무한 방파제에 의한 파의 회절

반무한 방파제에 파가  $\alpha$ 의 각도로 입사하는 경우의 방파제 부근의 속도포텐셜을 구하면 식(1)과 같다.

$$\phi = \frac{A_1 g}{i\sigma} \phi(r, \theta) \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \dots\dots(1)$$

여기서, 반무한방파제의 경계조건을 만족하는 식인  $\phi(r, \theta)$ 는

$$\begin{aligned} \phi(r, \theta) = & \frac{1}{\sqrt{2}} \exp [i\{kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \\ & \times \{ \{C(r_1) + \frac{1}{2}\} - i\{S(r_1) + \frac{1}{2}\} \} \\ & + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp [i\{kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \\ & \times \{ \{C(r_2) + \frac{1}{2}\} - i\{S(r_2) + \frac{1}{2}\} \} \\ & \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

이다. 이 식에서  $(r, \theta)$ 는 Fig. 1에서 방파제의 선단을 나타내는 극좌표이며,  $C(r)$ 와  $S(r)$ 는 Fresnel 적분을 나타내고  $r_1, r_2$ 는 다음과 같다.

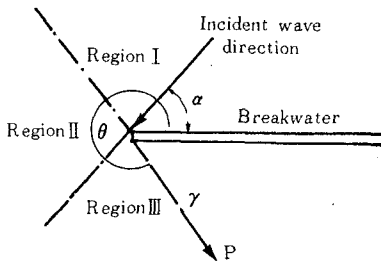
$$r_1 = \sqrt{4kr/\pi} \cos(\theta - \alpha)/2$$

$$r_2 = \sqrt{4kr/\pi} \cos(\theta + \alpha)/2$$

식(2)의 물리적인 의미를 알아보기 위하여 식(2)를 입사파와 반사파 그리고 입사파에 의한 회절파와 반사파에 의한 회절파항으로 분류하면 식(3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \phi(r, \theta) = & \exp[ikr \cos(\theta - \alpha)] \\ & + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i\{kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \\ & \times \left\{ \left\{ C(r_1) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(r_1) - \frac{1}{2} \right\} \right\} \\ & \exp[ikr \cos(\theta + \alpha)] \\ & + \frac{1}{\sqrt{2}} \exp[i\{kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4}\}] \\ & \times \left\{ \left\{ C(r_2) - \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(r_2) - \frac{1}{2} \right\} \right\} \\ & \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

이 식에서 우변 1항은 입사파, 2항은 입사파에 의한 회절파, 3항은 반사파, 4항은 반사파에 의한 회절파를 각각 나타낸다.



이 식을 <Fig. 1>의 영역별로 검토해 보면 I 영역에서는 위의 4가지 항이 모두 존재하고 II 영역에서는 입사파, 입사파에 의한 회절파, 반사파에 의한 회절파가 존재하며, III 영역에서는 입사파에 의한 회절파, 반사파에 의한 회절파가 존재한다.

### 방파제의 임의평면배치 및 도제에 의한 파의 회절

방파제의 임의배치에 대한 회절식은 2.1절의 식을 기초로 하여 방파제의 배치와 입사파항에 따라 6가지 경우에 대하여 구할 수 있고, 도제의 회절식은 도제의 양단에서 파가 회절되어 들어갈 때 서로 상호간섭이 없다고 가정하여 도제 좌측에서는 우측을 반무한제로, 도제 우측에서는 좌측을 반무한제로 생각하여 서로의 위상을 고려해 중첩시켜 구할 수 있다.

### 항내파고 계산법

항내파고는 개구방파제에 의해 회절된 파랑과 항내의 안벽에 의해 반사된 파랑에 의하여 대부분 결정되므로 앞절에서 서술한 식을 기초로 항내파고를 계산하는 방법은 다음과 같다.

첫째, 대상영역을 일정한 간격의 격자로 나눈 후에 입사파의 조건, 방파제의 평면배치조건에 따라 각 격자점에 대하여 계산을 하고 계산된 결과를 항만의 조건에 따라 기억을 시켜 둔다.

둘째, 항내에 안벽이나 호안 등이 있는 경우는 안벽이나 호안을 도제로 간주하여 반사파를 구한다. 이때의 입사파고는 첫째과정에서 계산되어 있는 도제전면파고의 평균치를 취하고, 입사파항은 개구부의 중점과 도제의 중점을 연결한 선의 방향으로 한다.

이렇게 계산된 도제로 인한 반사파고를 각 격자점별로 방파제에 의해 회절된 파고에 중첩시켜 항만의 조건에 따라 기억시킨다.

이러한 과정의 계산을 항만의 조건에 따라 수행하면 항내파고를 구할 수 있으며 항내형상이 복잡하게 되면 다음과 같은 경우를 고려하여 계산하여야 할 것이다.

- 1) 외곽개구 방파제가 2개 이상 있는 경우
- 2) 안벽에서 다중반사하는 경우
- 3) 항내에 개구방파제가 있는 경우
- 4) 안벽을 반무한제로 보는 경우

### 모형의 적용

후포항에 대하여 1988년도에 시공이 완성된 상태(경우 1)와 경우 1의 주방파제와 부방파제를 각각

100m씩 연장한 경우(경우 2)에 대하여 계산을 하였다. 그리고, 항내 평균수심은 4m, 주기 14sec, 파향은 SE방향인 규칙파를 적용하였으며 경우 1은 25×19의 격자망을, 경우 2는 27×19의 격자망을 형성하였다. 각 경우의 격자간격은 50m(원형수치)로 하였다.

## 비정상 환경사방정식을 이용한 수정 김 모형

### 3.1 기본방정식

유체가 비압축성, 비점성이고 유체의 흐름이 비회전류라고 가정하면 식(4)와 같은 Berkhoff의 환경사방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot (C C_x \nabla \phi) + \sigma^2 \frac{C_x}{C} \phi = 0 \dots\dots\dots(4)$$

그리고, Maruyama 등은 Berkhoff의 환경사방정식을 선유량과 수면변위를 사용하여 다음과 같이 바꾸고 이를 비정상 환경사방정식이라고 하였다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C^2 \nabla \eta = 0$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{n} \nabla \cdot (nQ) = 0 \dots\dots\dots(5)$$

이 식은 굴절, 회절 및 반사효과를 고려할 수 있으며 파에너지가 균속도로 전달되어 에너지 보존법칙을 만족하고 있다.

### 3.2 유한차분식

식(5)를 Staggered 격자방법을 사용하여 양해법(explicit method)으로 차분화하여 사용하였다.

### 3.3 경계조건

경계조건으로는 심해부분에 가상적인 영역을 설정하여 파랑을 생성시켜주는 입사가상경계, 파랑이 구조물 등에 의하여 반사되는 임의 반사율경계, 그리고 투과경계 등이 있으며 초기조건으로는 심해가 상영역을 제외한 전영역을 0으로 하는 Cold start 식을 사용하였다.

### 3.4 모형의 적용

후포항을 157×160개의 격자망으로 구성하여 24,963개의 격자에 수심자료를 입력하였는데, 이 수심자료는 54×53개의 격자망에서 선형 보간법을 사용하여 각 격자 사이를 3등분한 것이다.

격자형성은 주파향인 SE방향에 대하여 직각으로 하였으며, 격자간격(Δs)는 8.33m, 계산시간간격(Δt)은 0.25sec로 하였다.

입사파 조건으로는 주기가 14sec, 파향은 SE방향으로 하였고, 쇄파조건인 0.78h를 고려하여 심해파고를 1m, 7m에 대하여 계산을 하였다.

## 수리 모형 실험

수리모형실험은 1988년 5월에서 1988년 8월까지 건설부 국립건설시험소에서 실시하였다. 실험은 규칙파와 불규칙파의 2종류를 사용하여 상호보완 검토하였으며, 규칙파는 여현파(sine wave)로 가정하였고, 불규칙파는 Bretschneider의 스펙트럼을 사용하였다.

## 각 방법에 의한 결과의 비교 및 검토

수리모형실험 및 수치모형의 결과를 <Fig. 2>와 항내를 구역별로 나누어 파고비의 평균치로 나타내면 <표 1>과 <표 2>와 같이 된다. <표 1>은 경우 1의 결과치이고, <표 2>는 경우 2의 결과치이다.

<표 1>에서 보면 수리모형실험 결과는 불규칙파인 경우가 규칙파인 경우보다 파고가 크게 나타남을 알 수 있고, Takayama모형의 결과는 실험치와 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고, 수정 김모형 결

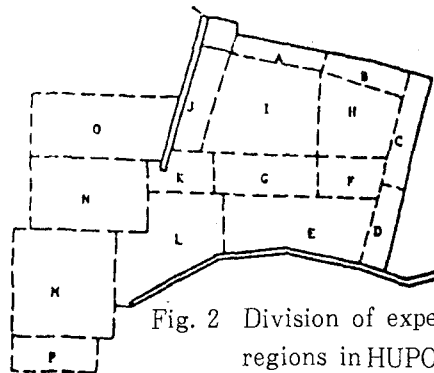


Fig. 2 Division of experimental regions in HUPPO harbor

과는 실험치보다 대체적으로 크게 나타나지만 전반적인 경향은 일치하고 있다.

즉, 수정 김모형 결과와 실험치를 비교하여 보면 안벽지역(A, B, C, D)에서는 A와 D구역, 회절지역(E), 항 입구역(L, K, J)에서는 J구역, 항내지역(F, G, H, I)에서는 I구역이 잘 맞지 않는데 이는 안벽과 안벽이 맞닿는 구석진 곳에서 파고가 높게 나타나기 때문이다. 그러나 수정 김 모형은 반사율을 1로 계산하였고, 쇄파조건을 0.78h로 사용하여 쇄파후 상태를 고려치 못하였으며, 안벽이 맞닿는 구석진 곳에서 반사문제가 있어 반사율을 조정하고 쇄파후 상태를 고려하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

경우 2의 결과를 나타낸 <표 2>에 의하면 경우 2도 경우 1과 같은 경향이나, 경우 1보다는 항내가 정온하므로 방파제의 연장효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과에 의해 앞으로 다음과 같은 연구가 계속되어야 한다고 생각되는데 우선, Takayama 모형은 불규칙파에 대해서 주기스펙트럼과 방향스펙트럼을 모두 고려한 계산이 가능하므로 불규칙파인 경우로 확장하여 해석해 볼 수 있을 것이다.

수정 김 모형은 임의 반사율인 경우를 고려하여 계산하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이며 또, 격자간격을 좀더 세분하여 계산을 해보는 것도 바람직할 것이다. 그리고, 쇄파후의 파고변화를 예측할 수 있다면 훨씬 타당한 결과를 얻을 수 있다고 사료된다. ㉔

표 1 Comparison of calculated values and experimental values(Case 1)

H : 심해파고

구역	수리모형실험		Takayama 의 결과	수정 김 모형	
	불규칙파	규칙파		H=1m	H=7m
A	0.22	0.18	0.19	0.56	0.33
B	0.21	0.28	0.15	0.23	0.22
C	0.23	0.16	0.19	0.16	0.15
D	0.19	0.18	0.17	0.40	0.27
E	0.15	0.09	0.14	0.27	0.26
F	0.17	0.18	0.19	0.29	0.23
G	0.21	0.34	0.16	0.24	0.23
H	0.21	0.21	0.16	0.22	0.22

I	0.22	0.19	0.19	0.37	0.29
J	0.22	0.15	0.20	0.46	0.35
K	0.38	0.29	0.18	0.44	0.35
L	0.31	0.22	0.24	0.35	0.34

표 2 Comparison of calculated values and experimental values(Case 2)

H : 심해파고

구역	수리모형실험		Tokayama 의 결과	수정 김 모형	
	불규칙파	규칙파		H=1m	H=7m
A	0.14	0.08	0.12	0.33	0.28
B	0.17	0.08	0.11	0.22	0.21
C	0.13	0.11	0.15	0.17	0.16
D	0.13	0.11	0.13	0.33	0.25
E	0.10	0.08	0.11	0.24	0.23
F	0.11	0.13	0.15	0.25	0.22
G	0.13	0.19	0.13	0.24	0.24
H	0.12	0.12	0.14	0.20	0.20
I	0.12	0.10	0.14	0.28	0.25
J	0.12	0.07	0.10	0.26	0.25
K	0.16	0.23	0.12	0.25	0.24
L	0.24	0.26	0.23	0.32	0.31

<참고문헌>

1. Tanimoto, Kobune & Komatsu, "Numerical Analysis of Wave propagation in Harbours of Arbitrary Shape, "PHRI Rep. 1975, pp. 35~58
2. 高山知司, "波の回折と 港灣波高分布に關する研究," 港灣技研資料, 1981
3. 김철, "단기해빈변형의 수치예측모형," 서울대학교 박사학위 논문, 1988년
4. 이한배, 이용규, 오세범, 편종근, "방파제의 임의 배치에 대한 파랑의 회절," 대한토목학회, 학술발표회 개요집, 1988, pp.481~485
5. 이해중, "항내 파고분포에 관한 연구," 명지대학교 석사학위논문, 1989년