

漁港靜穩度の解析^①

港內 波高分布의 해석

柳 青 魯 <釜山水大 海洋工學科 · 工博>

■ 서 론

새로운 어항의 건설 및 기존 어항의 확장 또는 개축에 있어서 어항기술자가 항상 관심을 가지는 가장 중요한 문제중의 하나는 충분히 정온한 수역을 항내에 확보할 수 있느냐 없느냐 하는 문제이다. 여기서 '정온한 수역'이란 어선이 안전하게 피박·계류할 수 있고, 또한 하역작업이 지장없이 이루어질 수 있는 수역을 의미한다.

수역의 정온한 정도를 나타내는 말로써 항내 정온도라는 어휘가 사용되고 있으나 이 정온도의 판정기준에 대해서는 아직 충분한 검토가 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다.

항내 정온도를 하역이라는 관점에서 생각해 보면 계류선박의 동요가 항내 정온도를 판정하는 중요한 요소가 된다. 이 계류선박의 동요에 영향을 미치는 요소로서는 파랑, 바람 및 계류선박의 제원과 계류상태를 꼽을 수 있으며, 이들 요소를 종합적으로 고려한 정온도의 판정이 필요할 것이다. 이 문제의 해결에 있어서 본 소론에서는 항내의 파랑에 대한 해석방법에 대하여 설명하고자 한다.

항내의 파랑환경은 i)항구로부터의 침입파 ii)항내 전달파 iii)항주파 iv)항내 방생파 v)항내 반사파 vi)부진동 등의 파랑에 의해 결정된다고 할 수

있으나, 항내 파랑의 계산에 있어서 가장 중요한 것은 i)과 v)의 파랑이라 할 수 있다.

ii)~iv)의 파랑에 대해서는 필요에 따라 해석하여 i)과 v)의 파랑에 부가해서 해석하는 것이 일반적이다. 또 vi)에 대해서는 다른 파랑과는 그 성질이 다른 장주기 수면변동이므로 별도의 검토가 필요하다. 이러한 점을 고려하여, i)과 v) 즉 항구 침입파와 항내반사파를 고려한 항내파고의 계산방법을 소개하고자 한다.

이 항구침입파와 항내반사파를 해석하는 방법으로서 Barailler 및 Gaillard¹⁾에 의한 Green함수를 사용하는 방법과 파(波)의 운동방정식을 차분법으로 푸는 谷本 등²⁾과 Abbott 등³⁾의 방법이 있으나, 이들의 해는 규칙파를 대상으로 할 때 사용 가능하며 불규칙파에 대해 해석코자 할 경우는 계산시간과 기억용량의 비 경제성이 매우 큰 문제가 된다. 항구부에서의 파랑의 회절에는 해양파의 불규칙성을 고려하지 않으면 방파제의 차폐역에 대한 파고를 과소 평가하게 되는 문제가 지적되며, 입사파를 불규칙파로 취급하여 해석하는 방법으로 중첩회절도법⁴⁾이 있다.

이 방법은 반사벽을 저울면으로 생각하여, 반사벽 전면의 심의의 점에 대한 반사파고를 반사벽에 대한 대칭점의 회절계수에 대응하는 파고로서 구해가는 방법이다. 이 경우에 회절도로서 불규칙파의 회절도를 사용할 필요가 있다. 이 방법은 도식해법이지만 奥山 등⁵⁾은 전자계산기로써 해석할 수 있도록 개선하고 있다.

그러나 이 중첩회절도법에서는 항구의 형상에 따라서는 반사파가 반사벽에 대한 입사파보다도 크게 계산되는 모순을 가지는 경우도 있으므로 적용상 주의해야 할 경우가 많다.

樫木·廣畑은 수치파동 해석법, Green함수법, Lee의 방법⁷⁾ 및 중첩회절도법을 적용하여 모델항만의 항내파고를 비교하고 현지 항내파랑 자료를 사용하여 여러가지 수치 계산법의 타당성을 검토하고 있다.

이에 따르면, 수치파동해석법은 시간스텝의 증가에 따라 이산오차가 누적되어 파고를 과대하게 평가하고, 중첩회절도법은 규칙파를 사용한 다른 방

법에 의한 계산치의 1과장내의 평균파고에 가까운 결과로 나타내는 것으로 보고하고 있다. 실측파고와 Green함수법 및 중첩회절도법과의 비교 결과에서는 비교적 좋은 일치성을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 항내파의 산정을 위해 몇몇 방법이 개발되어 있지만 아직 해양의 불규칙파에 대해서도 실용상 충분한 정도를 가지며, 쉽게 계산될 수 있는 상정법은 흔치 않다.

그러나 장차 불규칙파를 대상으로 하는 해석법의 필요성이 더욱 커질 것을 감안하여, 불규칙파에 대한 파고 산정법을 개발, 그 실용성을 검토한 바 있고, 현재까지는 가장 널리 사용되고 있는 방법의 하나인 高山⁸⁾의 수치계산법을 중심으로 항내파고 계산방법을 소개하고 항내 정온도 해석에의 응용방법에 대해 논하고자 한다.

■ 항내파고의 계산법

■ 항구 침입파(입사파)

외해로부터 항구부에 도달한 파랑은 우선 항구부의 방파제에 의해 회절되어 항내로 침입한다. 항내 수역의 이동 방안을 고려한 항구부의 방파제 배치에 따라서 방파제 배후에서 성분파의 일부가 반사되는 경우도 있고, 2차회절을 하는 경우도 있다.

이러한 복잡한 수리현상을 효율적으로 계산하기 위하여, Sommerfeld의 해석해에 소파제의 반사율 K_R 을 고려하고, 항내를 기하광학적 조건으로 분할하여 高山가 제안한 근사해⁸⁾를 이용하면 불규칙파를 대상으로 하는 계산에 대단히 편리하다.

이때, 각 영역의 경계선상에서의 파랑의 연속조건이 충분히 만족될 수 있도록 실험 및 다른 수치 계산법과의 비교 등을 통한 충분한 검토가 필요하다.

불규칙파의 방향스펙트럼은 적합한 주파수 스펙트럼형을 사용하여(예 ; Bretschneider · 光易型) 항구부의 파고, 주기 및 방향집중도 파라미터 S_{max} 의 값을 고려하여 그 형을 결정할 수 있다.⁸⁾ 단, 항구부 전면에 섬이나, 돌출된 지형이 존재하여 입사파의 파행범위가 제한되는 경우가 있으므로 이러한 경우에는 파행범위가 입력자료로서 고려되어야 한

다.

▣ 항내 반사파

항구부에서 회절되어 항내로 침입한 파랑은 항내의 안벽, 호안 등 구조물에 의해 반사되어 항내의 파고를 증대시킨다.

이 반사파의 추산법으로서는 반사벽을 도제(島堤)로 생각하여, 도제에 의한 회절산란파의 해에서 입사파를 빼낸 식을 사용하여 불규칙파에 대한 계산을 수행할 수 있다.

그러나 이 계산을 수행하기 위해서는, 도제에 입사하는 파고 및 주기, 파의 주방향, 방향범위를 설정해 주어야 할 필요가 있다.

우선 파고와 주기에 대해서는 이미 항구로부터의 침입파 계산에서 도제로 간주한 안벽전면의 파고와 주기가 구해져 있으므로 안벽 전면 부근의 파고, 주기의 평균치를 안벽에의 입사파로 정할 수 있다. 이 평균파고, 평균주기는 유의파에 대한 것이기 때문에, 이 값을 이용하여 Bretschneider형 주파수 스펙트럼을 구할 수 있으며, 이 스펙트럼을 안벽에의 입사파 스펙트럼으로 사용하면 편리하다.

항구부의 방파제에서 회절된 파랑의 진입과정을 고려한 불규칙파의 방향분포 계산은 매우 번잡하므로 안벽에 의한 반사파 계산시 파랑의 주방향으로서 안벽의 중앙점과 항구부의 중앙점과를 연결한 방향으로 단순화하는 개념을 도입할 필요가 있다.

방향범위는 안벽 중앙점과 항구부의 방파제 선단을 연결한 범위로 생각할 수 있다.

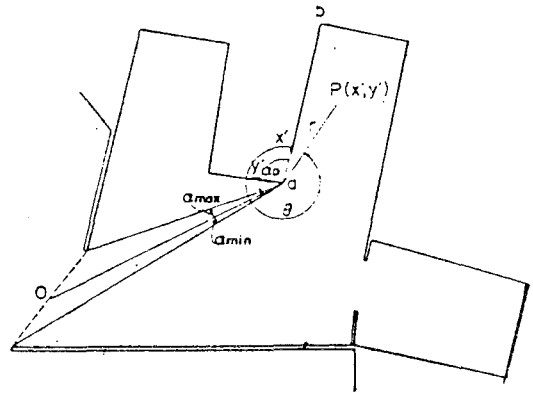
파랑의 방향분포형은 회절전의 분포형을 유추하여 파향범위를 위와 같이 고려하여 계산할 수 있다. 이 파향범위를 좁게 제한할수록 계산에서는 가시방향집중도가 큰 것으로 나타난다. 이상과 같은 안벽에 의한 반사파가 다시 다른 안벽에서 반사될 경우가 있다.

이러한 반사파의 다중반사에 의해 항내파고가 높아지는 경우도 있으므로 이에 대해서도 위와 같은 방법을 몇번이고 반복 계산하여 충분히 계산될 수 있도록 고려하여야 한다.

▣ 안벽 등에 의한 회절파

항구부에서 진입한 파랑이 항내의 안벽이나, 돌제 또는 파제제로 차단되어 직접 도달할 수 없는 해역이 있을 수 있다.

이런 영역내에서는 안벽 등에 의해 재회절된 파가 진입하게 된다. 이 재회절되는 경우를 생각하면, 점 a를 무한제의 선단으로 하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.



<그림 1.> 안벽에 의한 회절파 계산을 위한 입사파 파향

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

$$\begin{aligned} r_1 = & \sqrt{4kr/\pi} \cos \frac{\theta - \alpha}{2} \\ r_2 = & \sqrt{4kr/\pi} \cos \frac{\theta + \alpha}{2} \\ & \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

여기서 alpha는 성분파의 진입각도이고, 식(1)의 우변 제1항 부호는 $\theta < \pi + \alpha_P$ 일 때 (-), $\theta > \pi + \alpha_P$ 일 때 (+)이다. alpha_P는 불규칙파의 주 입사방향, C(r)는 여

현에 관한 fresnel 적분치를 나타낸다.

식(1)을 사용하여 불규칙파에 대해 계산하면 되는데, 이 때, 입사파의 주파수스펙트럼과 방향함수를 결정하여야 하는 문제가 있다.

이는 그림 1의 점 α 근방의 파고, 주기의 평균치로부터 구해지는 Bretschneider형 스펙트럼을 사용하는 등의 방법을 사용하면 된다. 입사파의 주방향은 점 α 와 항구부의 중앙점을 연결한 방향으로 하고, 파향 범위는 점 α 와 항구부 선단을 연결한 범위로 한다.

이상은 항구부의 방파제에 의해 회절된 파랑이 안벽 등에 의해 재회절될 경우에 대한 논의이었으나, 이 방법은 안벽으로부터의 재반사가 안벽이나 파제제(波除堤)에서 회절되는 경우에도 적용될 수 있다.

■ 항내 방파제에 의한 회절파

항에 따라서는 항내에 구항이 있고 외곽에 신항이 개발되는 경우가 있다. 이때의 구항내 파고분포 계산은 안벽에 의한 반사파와 같은 방법으로 해석할 수 있다.

항내 개구부 전면 근방의 유의파 파고, 주기의 평균치를 사용하여 구한 Bretschneider형 스펙트럼을 입사파의 주파수 스펙트럼으로 결정하고, 입사파의 주방향은 항내 개구부의 중앙점과 항구부의 중앙점과 연결한 방향으로 하며, 파향범위는 항내 개구부의 중앙점과 항구부한 방향으로 하며, 파향범위는 항내 개구부의 중앙방파제 선단을 연결한 선의 범위로 하면 된다.

또 방향함수형은 전술한 바와 같이 항구부에서의 입사파 방향함수형이 그대로 보존되어 파향범위만이 변화하는 것으로 취급하는 것이 일반적이다. 항내 개구부로의 입사파를 위와같이 결정한 후 항구 침입파와 같은 계산법으로 항내개구부내의 파고분포를 계산한다. 단, 항내 개구부내에서의 안벽에 의한 다중반사에 대해서는 전술한 안벽에 의한 반사파와 같은 개념으로 계산할 수 있다.

■ 합성파의 계산방법

이상 2.1~2.4의 방법에 의해 주어진 파고, 주기를

이용하여 합성파를 계산해야 한다.

이 합성파는 항구회절파, 안벽에 의한 반사파 또는 항내회절파에 대응하는 n 번째의 성분파군(成分波群)에 대한 유의파고를 H_n , 유의파주기를 T_n 이라 하면, 합성파의 유의파고 $H_{1/3}$ 은 에너지의 합으로서 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$H_{1/3} = \sum_{n=1}^N H_n^2 \dots\dots\dots (3)$$

단: 파고비 K_d 로서 표시할 경우 항구입사파의 파고 H_0 에 대한 항내파고비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_d = \frac{\sum_{n=1}^N H_n^2}{H_0} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 $5L$, N 은 항구침입파, 안벽에 의한 반사파 등 해석대상 성분파군의 수를 의미한다.

합성파의 유의파주기 $T_{1/3}$ 에 대해서는 Rice의 이론⁹⁾을 준용하여

$$T_{1/3} = \frac{\sum_{n=1}^N H_n^2}{\sum_{n=1}^N \frac{H_n^2}{T_n^2}} \dots\dots\dots (5)$$

로서 구하고 주기비 K_{Kr} 는 다음식으로 구할 수 있다.

$$K_{Kr} = \frac{\sum_{n=1}^N H_n^2}{\sum_{n=1}^N \frac{H_{n2}}{T_n^2}} / T_i \dots\dots\dots (6)$$

T_i : 항구부에서의 입사파 유의파 주기

이 계산법을 사용할 경우 안벽 부근의 파고는 입사파와 반사파의 위상간섭효과가 크게 나타나므로 에너지 합성이 불가능하게 된다. 그럼에도 불구하고 이러한 에너지 합성에 의해 파고를 산정함에 따라 파고를 과소 평가하는 결과를 가져오게 되므로, 특히 안벽 부근의 파고 분포 계산에서는 이러한 현상에 주의해야 할 필요가 있다.

■ 계산의 흐름과 계산에

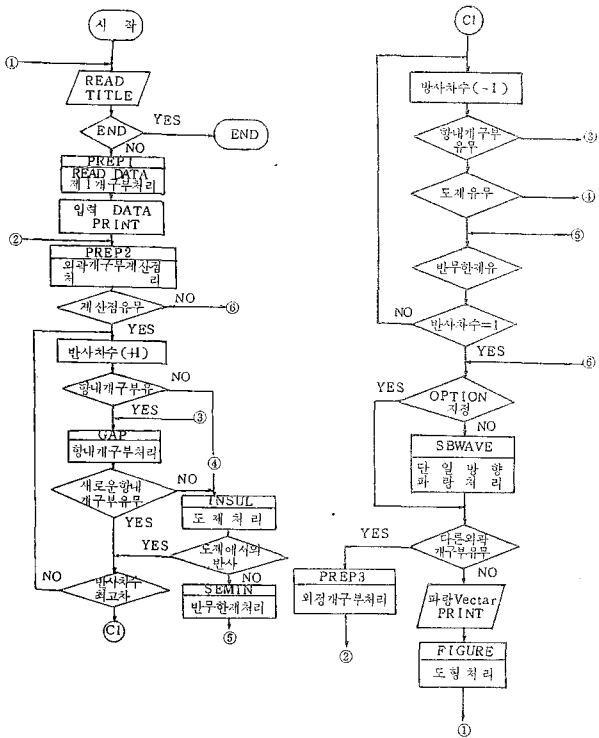
■ 계산의 흐름

2장에서 논의한 계산의 흐름을 나타내면, <그림 2>

와 같다. 이 흐름에 따르면, 먼저 Title 카드를 읽어 END이면 계산을 종료하고 END가 아니면, 제1외곽 개구부의 항구 침입파가 직접 도달하는 영역의 계산을 실시한다. 그리고, 항내 개구부 및 안벽 등에 의한 반사·회절계산을 계산하고자 하는 반사차수까지 계산한다.

반사차수는 안벽에 의한 반사를 1회만 고려할 경우 1이고, 이 반사파가 다른 안벽에서 재반사될 경우 2로 정의되는 것이다.

제1외곽 개구부의 계산이 끝나면 제2외곽 개구부의 계산을 같은 방법으로 수행하면 된다.



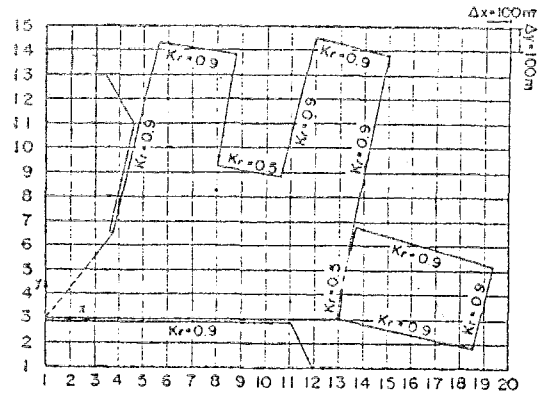
〈그림 2〉항내파고 계산의 흐름도

■ 계산에

〈그림 1〉에 나타낸 가상항에 대한 항내파고계산을 위한 계산 격자망을 나타낸 것이 〈그림 3〉이다.

계산격자의 간격은 $\Delta x = \Delta y = 100m$ 로서 파고 및 주기는 항내의 각 격자점에서 계산할 수 있다. 안벽

및 방파제의 반사율은 〈그림 3〉에 표시되어 있다.



〈그림 3〉여하의 형상과 계산 격자망

계산조건으로 $S_{max} = 25$, $T_{1/3} = 8 \text{ sec}$, 파향 = 225° , 파향범위 = 주방향 $\pm 90^\circ$, 안벽에 의한 반사파를 계산할 경우의 도재길이는 파장의 2배로 하고, 불규칙파의 주파수 및 방향분할수는 각각 3과 30, 반사차수는 1, 2, 3으로 변화시켜 항내파고를 계산해 보았다.

〈그림 4〉는 이상의 계산조건으로 계산한 항내파고 분포를 반사차수에 따라 나타낸 것이다.

그림중의 수치는 파고비로서, 입사파고에 대한 항내파고의 비이다. 이 그림에서, 항구부 부근의 파고비는 반사차수를 변화시켜도 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다.

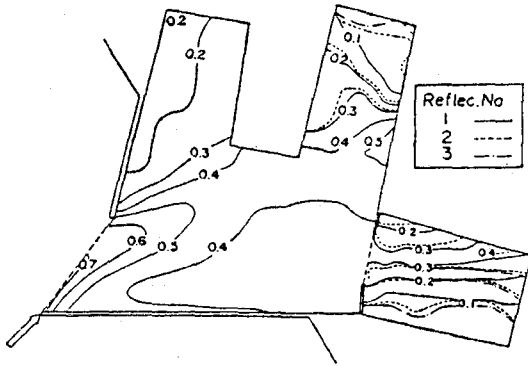
그러나 내항쪽의 안벽에 둘러싸인 부분이나 항내 개구부에서는 반사차수의 변화에 따라 등 파고비선이 항내쪽으로 이동함을 알 수 있어서 반사파에 의한 파고 증대효과를 볼 수 있다.

이 계산법을 이용할 경우 특히 반사율이 큰 안벽으로 이루어진 내항에서는 반사차수에 의한 파고변화에 충분한 주의를 기울여야 하는 데 반사파의 감쇠 메카니즘의 정확한 고려가 앞으로의 과제이다.

■ 항내정온도 해석에의 응용

■ 외양파 조건

항내 정온도의 해석을 위해서는 임의의 외력조건에 대한 항내파고분포 해석방법을 이용하여 항내



〈그림 4〉 반사치수에 의한 항내파고분포의 변화
($S_{max} = 25$)

임의 수역에서의 파고, 주기, 파향의 출현율이 기초 외력자료로서 필요하게 된다.

이를 해석하기 위해서는 먼저 외양파의 출현율을 구해야 한다. 일반적으로 파향에 대한 정확한 자료가 부족하므로 파고-주기의 출현율은 파향이 다르더라도 같은 파고계급에서는 같은 출현율을 가진다고 가정하여 다음식으로 구할 수 있다.

$$(P_i)_k = (P)_k (P)_k / \sum_k (P)_k \dots\dots\dots (7)$$

여기서 k는 파고계급의 순번, i는 파향, j는 주기계급이다.

▮ 항내파고의 초과출현율

식(7)에 근거하여 구해진 외력 조건에 대하여 항내파고비를 계산하고 파랑변형을 고려하여 각 파향에 대하여 식(8)과 같이 임의지점에서의 항내파고를 계산할 수 있다.

$$H_{in} = \bar{K}_d \cdot K_r \cdot K_s \cdot H_o \dots\dots\dots (8)$$

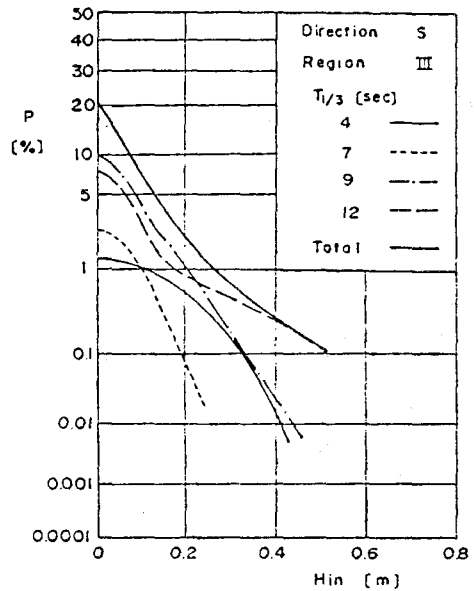
- H_{in} : 항내파고
- \bar{K}_d : 항내파고비(회절계수)
- K_r : 굴절계수
- K_s : 천수계수
- H_o : 심해파고

이렇게 구한 항내파고의 초과출현율 P를 각 방향에 대하여 매 주기별로 정리해야 할 필요가 있다.

그림 5는 어느 어항의 파향 S에 대한 항내의 영역 III에서의 항내파고 초과출현율을 해석결과를 예시한 것이다.

매 주기별 항내파고의 초과출현율을 더하면 파향 S에 대한 항내파고의 초과출현율을 구할 수 있다. 이것을 각 파향에 대해 시행하고 각 파향별의 파고출현율을 더하면 항내파고의 초과출현율이 구해진다.

이런방법으로 구한 각 영역내의 파고초과출현율을 나타낸 예가 〈그림 6〉이다.

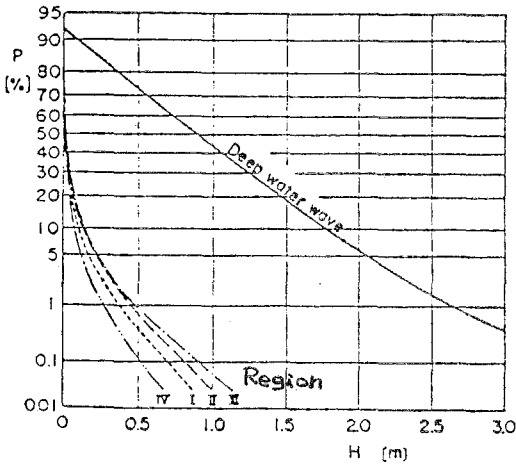


〈그림 5〉 항내파고의 초과출현율
(파향 : S, Region : III)

가령 항내정온도의 기준을 50cm 이상의 파고출현율을 5% 이하로 정했다면 이 조건이 만족되도록 방파제의 축조, 항내시설의 배치 및 개선(반사파 조절), 등이 계획되어야 할 것이다.

이렇게 항내정온도가 항내파고의 초과출현율로서 판정되고 있는 배경은 항내파고가 높아지면 높아질수록 계류선박의 동요가 커지고, 동요가 커지면 하역에 지장을 줄 것이라는 개념이다.

그러나, 선박의 동요는 항내파고 뿐만 아니라 그



〈그림 6〉 항내파고의 초과출현율
(Region I ~ IV)

주기도 매우 중요한 요소가 되므로, 이 주기의 영향에 의한 계류선박의 하역한계동요량을 명확히 해야 할 필요가 있다.

장차 주기별 항내파고 출현율의 산정이 이러한 주기의 효과를 평가하기 위해 이루어져야 할 것이며, 이는 매 주기별로 전파량에 대해 파고의 출현율을 더함으로써 정의될 수 있을 것이다.

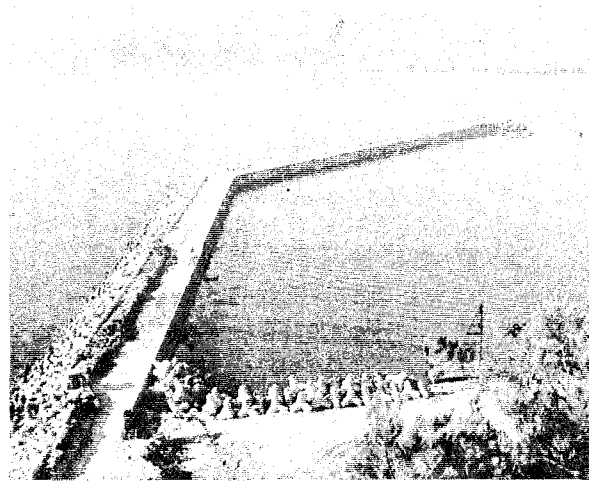
■ 결 론

이상 불규칙파에 대한 항내파고의 계산법과 항내 정온도해석에의 응용법에 대해 高山의 방법을 중심으로 소개하여 어항의 정온도해석을 위해 제일먼저 수행해야할 외적조건의 해석개념이 정리되었다.

이렇게 파고의 초과확률 또는 주기의 초과확률까지가 임의의 어항에 대해 구해졌다면, 이 어항을 이용하는 어선세력의 동태와 그 선박들의 동요특성을 고려하는 정온도평가가 이루어져야 할 것이다. 이에 대한 해석방법의 소개는 다음 기회로 미룬다. ㉔

〈참 고 문 헌〉

1) Barailler, L. and D. Gaillard : Evolution recente des modeles mathematiques d'agi-



tation due a lahoule : Calcul de la diffraction en profondeur non uniforme, La Houille Blanche, No. 8, 1967, pp.861~969.

- 2) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦：數値波動解析法による港内波高分析の計算, 港灣技術研究所報告, 第14卷, 第3號, 1975, pp. 59~106.
- 3) Abbott, M. B., H. M. Peterson and O. Skovgaard : Computations of short waves in shallow water, Proc. 16th Conference of Coastal Engineering, 1978, pp.414~433.
- 4) 佐藤昭二・合田良實：海岸・港灣, 土木學會編集, 彰國社刊, 1972, pp.72~77.
- 5) 奥山育英・寺内 潔・吉田行秀・中辻 降：折り返し回折計算プログラムの開發, 港灣技研資料, No. 288, 1979, 15p.
- 6) 樞木 亨・廣佃彰一：港内波高の數値シミュレーション手法の檢證について, 第26回 海岸工學講演會論文集, 1979, pp.109~113.
- 7) Lee, J. J. : Wave induced oscillation in harbours of arbitrary shape, Calif. Inst. of Tech., 1970, 130p.
- 8) 高山知司：波の回折と港内波高分布に関する研究, 1981, 140p.
- 9) Rice, S. O. : Mathematical analysis of random noise, reprinted in selected Papers on Noise and Stochastic Processes, Dover Pub. Inc., 1954, pp. 133~294.