

港內靜穩度 추정^①

李正圭

〈漢陽大 教授, 工博〉

항내 정온도의 요인

항만의 무엇보다도 중요한 기능은 선박에 안전한 정박지를 제공해 주고 선박과 육지 사이에서 승객과 화물의 신속하고 안전한 이송을 편리하도록 해 주는 것이다. 정온한 박지를 확보하는 것은 안전한 정박을 위해서 무엇보다도 필요한 동시에 효율적인 항만 운영을 위해서도 중요하다. 항만 정온도의 문제는 최종적으로 항내나 부두를 따라서 계류된 선박의 동요와 계류력의 문제로 귀착된다.

유럽의 많은 수리실험실-그 중에 영국 수리 연구소는 최초의 실험실에 속한다-은 항내의 중요 지점에 계류된 모형 선박의 동요정도를 측정하여 항내온도를 실험하였으며 그 정도에 따라 항만계획의 적부를 판정하여 왔다.

그러나 일반적으로 말하면 항내 정온도에 관한 대부분의

모형실험은 아직도 항만 배치도에 의하여 파고분포를 측정하고 파고의 절대치나 입사 파고에 대한 파고비로 따져서 여러가지 항만 배치도를 비교하여 판단하고 있다. 그러나 만약 파고가 동일하다하더라도 파랑 작용이 선박에 미치는 영향은 주기 5초의 풍파와 주기 15초의 나불과는 다르다는 점에 유의하여야 한다. 또한 동일한 파랑조건하에서도 대형선박은 파랑변동을 느끼지 못하는 반면 소형 보트는 심하게 동요를 일으킬 수 있다. 따라서 항내 정온도는 대상선박의 동요의 관점에서 판단할 필요가 있다. 선박의 동요는, 특히 일정 수심에 계류된 선박의 경우는 매우 복잡한 동수력학적인 문제이다. 계류선의 배치와 탄성 특성 및 완충재의 반응정도는 문제를 더욱 까다롭게 만든다.

극히 최근에는 문제의 수치 해석에 많은 발전이 이루어졌

다하더라도 선박운동의 특성을 자세히 이해하기 까지에는 상당한 기간이 소요될 것이다. 항만 운영면에서 보면 선박의 동요와 화물취급작업과의 관계는 항만 정온도의 판정에 영향을 미친다. 예를 들어 하역을 마스타 크레인으로 행하고 있는 항에서는 1m정도의 선박의 동요에 의해서는 하역 효율이 저하되지 않는다. 그렇지만 컨테이너 선의 선창내에 적재된 컨테이너를 취급할 때는 선박이 50cm 이상 앞뒤로 움직이면 하역을 중단시키는 요인이 된다. 바람은 선박의 안전과 항만의 하역에 영향을 미치는 또 다른 요인이므로 바람도 항만정온도의 문제에서 고려하지 않으면 안된다.

물리적 요인외에도 선박의 입출항의 난이, 황천시 선박의 피난, 해상작업의 제약조건 등과 같은, 항만의 정온도의 평가에 관련된 다른 요인들이 있으며 또한 하역 효율,

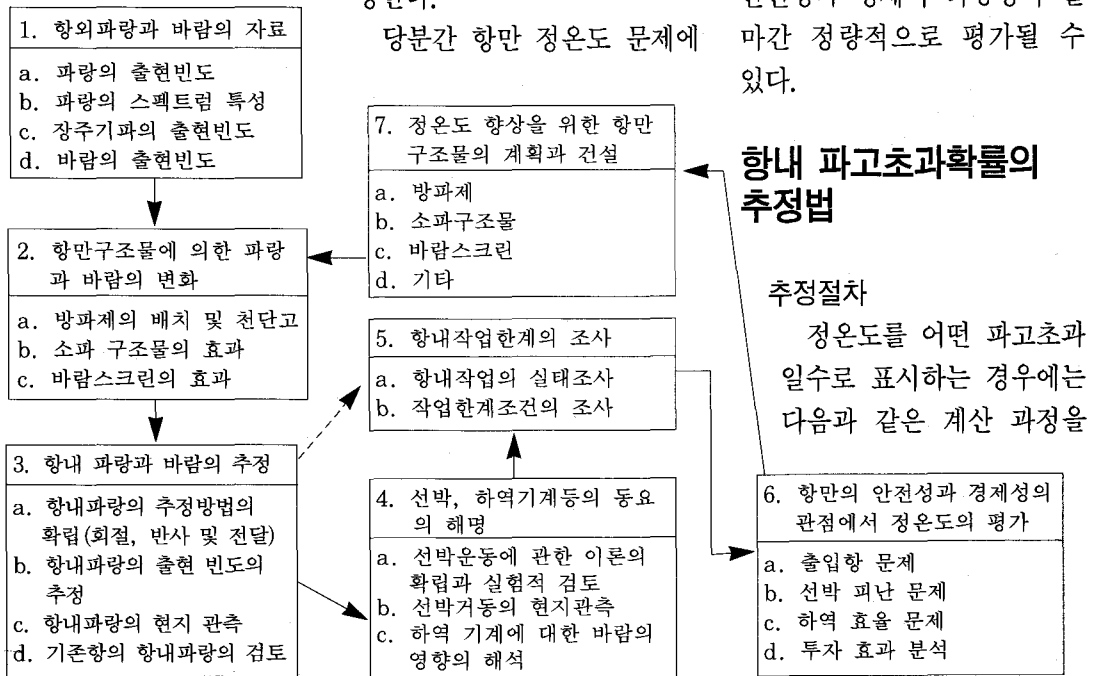
선박작업중지 기간의 체선료, 방파제와 다른 보호시설의 건설비와 같은 경제적 요인도 중요하다. <그림 1>은 항만 정온도 문제와 관련된 복잡하고 다양한 요인들과 이것들을 취급하는 방법을 보여주는 흐름도의 예이다. 해를 구하는 순서는 먼저 항외파랑과 바람의 특성을 파악한 다음 방파제와 기타 보호시설의 차폐효과를 고려하여 항내에서 파랑과 바람의 추정을 행한다. 항내파랑과 바람의 자료를 선박이나 하역기계등의 동요와 결합하여 항내 작업 조건의 한계를 파악한다.

다음에 안전을 판단할 때 황천시 선박의 입출항과 피박(避泊)문제가 고려되어야 한다. 항만시설의 계획과 설계는 이와 같은 단계를 밟아서 적절한 항만의 정온도를 확보하는 것이 바람직할 것이다.

모든 요인들이 정량적으로 평가되어야 한다면 항만의 정온도 해석에 대한 위의 과정은 용이하지 않다(각종 필요한 자료의 부족 때문). 그러나 이러한 요인들의 역할을 분명히 하는데 노력을 기울이고 있고, <그림 1>과 같은 체계적이고 종합적인 과정이 가까운 장래에 나올 것으로 희망한다.

대한 실무적인 접근방법은 여전히 계획중인 항내의 파고의 평가이며, 이것은 특히 실제 설계에서 항만 정온도의 수치해석과 종래의 수리실험 기법에 근거한 설계법의 연속성을 선호하기 때문이다. 그러나 어떤 바람만의 조건하에서 절대파고나 심해파에 대한 파고비로 항내파고를 주는 것은 복잡한 항만정온도 문제의 일부분만을 나타낸다.

항내의 여러 중요 지점에서 어느 수위 이상의 유의파고의 초과일수를 고려하여 파고자료를 재분석할 필요가 있다. 그렇게 함으로써 계획된 항의 안전성과 경제적 타당성이 얼마간 정량적으로 평가될 수 있다.



<그림 1>

항내 정온도의 요인과 정온해석의 순서

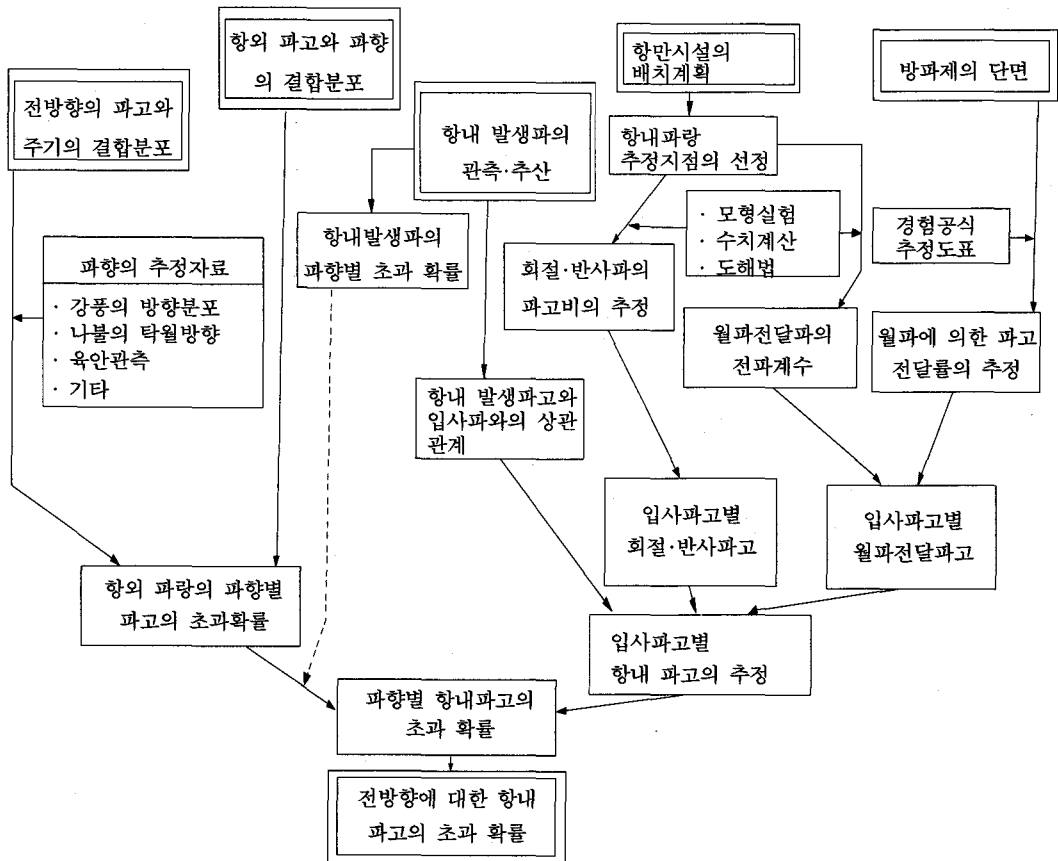
따르는 것이 좋다.

- 1) 항외의 유의파고, 주기 및 방향의 결합분포의 작성
- 2) 항내 파고의 추정지점의 선정
- 3) 항내외의 파고비의 추정
- 4) 입사파고의 계급별 항내 파고의 계산
- 5) 항내의 선정지점에서 파고의 초과확률의 계산

이것을 흐름도의 형태로 나타내면 <그림 2>와 같이 된

다. 이것은 여러가지 정보를 결합하여 파고의 초과확률을 추정하기 위하여 그들을 합성한다. 이 방법에서는 계산의 단순화를 위하여 주기의 영향을 무시하는 것을 가정한다. 그러나 선박의 동요는 파주기에 강하게 영향을 받는 것으로 나타나고 있다. 그래서 실제 설계에서는 파고의 초과확률을 해석을 몇개의 주기별로 나누어 수행하는 것이 좋다.

항외의 유의파고, 주기 및 방향의 결합분포
 계획된 항의 입사파에 대한 자료는 계기에 의한 파랑 측정(육안 관측으로 보완)이나 파랑의 사후추정으로 얻어진다. 이것은 여러개의 입사방향별로, 그리고 몇개 계급의 주기로 분리해서 유의파고의 초과확률의 형태로 분석된다. 그렇지만 다음 예는 간단히 하기 위해서 주기를 분리하지



<그림 2>

항내의 파고 초과확률 추정의 순서도

많은 경우를 취급한다.

초과확률은 정온일수도 포함된 전도수에 대한 백분율(%)로 표현한다. 파랑통계는 5년 이상의 자료를 가지고 분석하는 것이 표준이지만 신뢰할만한 충분한 기간의 기록이 없거나 현장 측정자료가 없는 지점에 대하여 파랑사후추정 작업이 수행되어야 하는 경우에는 3년간의 자료로 만족할 수 밖에 없다. 기후자료에 의한 파랑사후추정은 주어진 기간 동안 하루에 여러번 풍파와 나불을 추정하여야 한다. 기간은 연속해서 3년간이 아니고, 전체 3년의 기간은 파랑이 거칠은 해, 평균적인 해, 및 온건한 해를 포함하여 선정하는 것이 바람직하다. 이것은 인접항의 기상자료와 파랑통계를 참조하면 가능하다.

파향은 보통 16방위계를 사용하며 파고초과확률 분석에 채용된다. 파랑 자료가 불충분한 때는 8방위계를 사용할 수 밖에 없다. 현재는 많은 관측소가 자동기록계로 파고와 주기를 측정하고 있더라도 불과 수개의 관측소만이 파향을 동시 관측하려는 노력을 하고 있다.

규칙적인 관측을 위한 신뢰할 수 있는 파향기록계는 아직도 개발단계에 있다. 그러

므로 현장 측정 기록에서 필요한 파고와 파향 자료를 얻을 수 있다면 아주 운이 좋은 경우이다. 많은 예에서와 같이 분석을 맡고 있는 사람이, 강풍향의 빈도도표, 그 지점에 나타나는 나불의 특성, 육안 관측에 의한 파향 자료등을 참고로 하여 주관적으로 파향을 추정하지 않으면 안된다.

〈표 1〉은 일본 운수성 제일항만건설국이 아끼다항에서 1974년 1~12월 사이의 파랑 관측기록으로부터 얻은 파향별 유의 파고의 초과확률의 계산 예이다. 일별 파향은 특수 영상레이다의 스크린을 이용하여 분석하였다. 파랑 관측을 수년 동안 계속하였다하더라도 초과확률 분석은 1년만을 대상으로 행해지며 이것은 항내의 파고 추정 결과를 동일 기간의 항내 관측파고에 비교해 보기 위한 목적이다.

이 예에서는 파고의 구간

폭이 1m이지만, 내만이나 다른 비교적 제한된 수역에 위치한 지점과 같은 정온한 해안에서는 0.5m 또는 그 이하의 구간 폭을 사용하는 것이 좋다. 본 예는 앞서 언급한 대로 주기별 분석은 포함되어 있지 않다. 파주기의 구분이 없다 하더라도 유의파고, 주기 및 방향의 결합분포를 참조하여 파향별로 또는 파고의 각 구간별로 탁월파 주기(predominant wave period)를 정할 필요가 있다. 파향이나 주기에 관련된 탁월파주기는 항내의 파고비의 추정에 이용된다.

규모가 큰 항에서는 항내에서 발생된 풍파는 연안연락선이나 거룻배와 같은 작은 배에 대하여 동요의 근원이 될 수도 있다. 국지적 풍파의 통계적 분석은 주로 바람의 연간 통계자료로 부터 추정된 사후추정 자료를 바탕으로 수행되어야 한다. 가능하다면 국지적 풍파

〈표 1〉 파향별 파고의 초과확률의 예 아끼다(秋田) 항

| 파향 | 비율 (%) | 유의파고 $H_{1/3}$ | | | | | | |
|----------------|--------|----------------|------|------|------|------|-------|------|
| | | 0m이상 | 1m이상 | 2m이상 | 3m이상 | 4m이상 | 5m이상 | 6m이상 |
| SW | 1.4 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| WSW | 29.0 | 29.0 | 9.2 | 2.5 | 1.2 | 0.5 | 0.3 | 0.1 |
| W | 68.2 | 68.2 | 21.6 | 6.2 | 2.8 | 1.2 | 0.7 | 0.2 |
| WNW | 1.4 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 계 | 100.0 | 100.0 | 31.6 | 8.9 | 4.0 | 1.7 | 1.0 | 0.3 |
| 탁월주기 $T_{1/3}$ | | | 7.0s | | 9.0s | | 11.0s | |

자료는 어느 구간의 항외파가 어느 파고의 국지 풍파와 연관 지어 지도록 항외 파랑 자료와 관련 지어져야 한다.

파고 추정지점의 선정

항내의 파고 추정은 항의 운영 상황을 대표할 수 있는 한정된 수의 지점에서 행한다. 항내 정온도를 수리 모형 실험으로 검토하는 경우에는 항내를 여러 지역으로 나누고 각 지역에 파고 측정을 위한 여러 지점이 선정된다. 항내 파고의 초과확률은 일반적으로 각 지역에 대하여 평균한 파고비를 가지고 계산된다.

항외에 대한 항내의 파고비를 다음에 설명하는 수치계산법으로 추정할 때 파고비는 수많은 지점에서 얻어진다. 그런 경우에도 역시 지역평균한 파고비는 항만 정온도에 대한 전체적인 해석을 쉽게 해준다. 항내 파고분포의 도해법을 사용한 경우에는 추정지점의 수는 소요작업량이나 추정 정밀도 등을 감안하여 12점 정도로 한정하는 것이 적당하다. 파고 분석에 이용될 지점은 안벽의 직전이나 구조물의 삼각부 등의 반사파의 간섭이 강한 장소는 피하고 수로, 박지 기타 유사한 지점의 중앙부를 선정하여야 한다.

항입구에 입사하는 파고의 추정

항내 파랑의 대부분은 항입구로부터의 진입파이고 그 파고는 수리모형 실험, 수치계산, 도해법 등에 의하여 추정한다. 수치계산에 대해서는 서로 다른 원리에 근거를 둔 여러가지 기법이 제안되었다. 예를 들어, 바라일러와 가일라드(Baillaer and Gaillard)는 Green함수의 방법으로 풀었고, 다니모또 등은 파랑방정식을 풀어서 각개 파의 전파를 계산하였고, 아보트(Abbott)등은 파랑전파의 효율적인 해를 구하기 위하여 베르누이식을 사용하였다.

이상의 모든 방법은 항내 면적을 파장의 1/8정도의 격자망 간격을 가진 격자상에 나타내도록 요구하고 있어서 이들의 적용성이 수개 파장 이내의 크기의 항으로 제한된다. 반면에 다가야마는 부방파제와 방사제에 의한 2차 회절의 영향과 함께 항내의 각종 경계조건으로부터 파랑반사의 효과를 포함할 수 있도록 파랑회절의 해를 확장하였다. 이 방법은 항내 파고분포의 도해법에서 설명되는 도해법의 컴퓨터 처리로 분류될 수도 있다. 현재는 다가야마 방법이 수심이 일정한 수역에 한정되어 있지만 항의 크기에

관한 제한이 없는 데다가 방향스펙트럼이 정해진 불규칙 파랑을 취급할 수가 있다. 항내의 파고분포의 수치계산기법을 개선하여 수준이 향상될 수 있도록 더욱 발전이 기대된다.

항내파고는 원칙적으로 항입구나 항외에서 입사하는 파고와 관계된 비로 추정된다. 추정은 바다 파랑의 불규칙성, 특히 파에너지의 방향분포를 적절히 감안하여 행해져야 한다. 수리모형실험실에서 불규칙파를 사용하는 것이 유용하지만, 그 경우에도 파는 방향특성이 없는 일방향 불규칙파이다. 그러므로 파에너지의 방향별 분포의 영향을 고려하기 위하여 여러 파향에 대한 불규칙파의 실험결과를 합성할 필요가 있다.

구체적인 공식으로는 다음식을 사용한다.

$$K_{\text{eff}} = \left(\frac{\sum K_j^2 D_j}{\sum D_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 K_j 는 j 번째 파향의 입사파고에 대한 항내의 특정 지점이나 지역의 파고비를 나타내고 D_j 는 파향별 에너지비를 나타내고 K_{eff} 는 파랑의 방향분도 특성을 고려한 유도 파고비이다. 식(1)은 각파향마다의 실험치와 파향별에너지의 비를 가중시켜 자승평균

하는 것이다.

수리모형실험이 규칙파로 행하여지는 경우 혹은 수치해가 규칙파에 대한 해답만을 줄 수 있는 경우에는 최종적인 파고비는 불규칙적인 방향별 입사파에 대한 항의 응답을 얻을 수 있도록 수정되지 않으면 안된다. 파고 비는 앞에서 설명한 불규칙파의 굴절 추정외의 경우와 똑같이 여러개의 파주기와 파향이 대표치에 대하여 얻어져야 한다.

수리실험의 결과나 일정한 규칙파에 대한 수치계산은 실험파의 주기와 파향이 현지에서의 유의파와 정확하게 일치한다 하더라도 항내의 파랑 상황을 완전히 재현했다고 말할 수 없다. 이런 상황은 규칙파와 불규칙파에 대한 회절도표를 현지방파제에 적용하는 것과 똑같다.

불규칙파에 대한 회절도를 이용하여 파고비를 도해법으로 구했을 때는 보정할 필요가 없다.

파랑 특성이 <표 1>에 나와 있는 아끼다항의 예에서는 남방파제(제측은 거의 NW 방향)의 선단으로부터 방파제를 따라 안쪽으로 약 800m, 그곳에서 방파제에 직각으로 약 620m떨어진 지점에서 1년동안 파랑 추정을 하였다. 그 지

점에서 입사파에 대한 파고비를 불규칙파에 대한 반무한제의 회절계산으로 추정하였다.

그 결과가 <표 2>에 나와 있다. 이 예에서는 3개의 파주기 사이의 회절계수의 차가 작은 편이고 입사파 주기의 영향이 비교적 작다는 것을 알 수 있다.

방파제의 월파에 의한 전달파의 추정

일부의 파에너지가 월파나 방파제의 투과에 의하여 항내로 전달된다면 파고전달계수는 혼성방파제의 파고 전달계수의 방법이나 다른 실험자료에 의하여 추정된다. 다음에 여러 구간의 입사파고에 대하여 전달파고를 계산한다.

아끼다항의 예에서 남방파제는 $h_c=5.0m$, $d=8.5m$, $h=12.0m$ 의 값을 가지므로 전달파고는 <표 3>과 같이 추정되었다.

방파제를 넘은 전달파의 전

파양상에 대하여는 잘 알려져 있지 않은 실정이다. 그렇지만 항만정온도의 해석에는 파랑 전파에 대하여 어느 정도의 추정을 하지 않으면 안 된다. 그러므로 수리 모형실험이 월파에 의한 전달파를 재현시킬 수 있을 만큼 충분히 큰 축적으로 수행되지 않으면 (이것은 대부분의 항만정온도 실험에서 사실과 다르다), 실용적인 방법은 월파부분을 방파제의 가상 개구부로 보고 전달파의 전파를 개구부로부터의 회절파로 추정하는 방법이다. 항의 형상에 따라 더욱 단순화하는 방법은 일정범위의 파향에 대하여 대상지점까지 전달파의 비분산 전파를 가정하고 그 범위 밖으로는 전파가 일어나지 않는다고 가정하는 것이다. 즉, 전자에 대해서는 전파계수를 1로, 후자에 대해서는 0으로 가정하는 것이다. ㉔

<표 2> 항내 대상지점의 불규칙파의 회절계수

| 파 향 | 회 절 계 수 | | |
|-----|---------|--------|---------|
| | T = 7s | T = 9s | T = 11s |
| SW | 0.101 | 0.116 | 0.130 |
| WSW | 0.277 | 0.290 | 0.303 |
| W | 0.508 | 0.587 | 0.595 |
| WNW | 0.849 | 0.852 | 0.855 |

<표 3> 전달파고의 추정치

| 입사파고 H_i (m) | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|
| 전달파고 H_r (m) | 0.03 | 0.06 | 0.09 | 0.24 | 0.45 | 0.81 |