

設計波算定技法

東海岸에서는 이렇게..... 새 提案

崔 漢 圭 〈江原大 教授·工博〉

序 論

바다의 파랑은 매우 불규칙할 뿐만 아니라 비선형이므로 각 파마다 파고나 주기가 다르다. 따라서 규칙파로서 단순화하여 해석하기가 어렵다. 그러므로 이와같은 불규칙파의 거동을 해석하기 위하여 파고나 주기 등에 대한 통계학적 특성을 이용하거나, 에너지 스펙트럼을 이용하는 방법들에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

한 해역에서의 파랑분포 특성은 해상의 기상과 주변의 지리적 여건, 수심 및 해저지형 등에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 파랑의 발생과 발달은 해상의 기상과 직결된 풍속, 취송거리에 따라 크게 좌우되며, 이들의 크기가 증가함에 따라 더 큰 파도와 주기를 갖는 파랑이 발생한다. 비교적 일정한 풍향을 갖은 지속적인

계절풍의 취송거리는 해역주변의 지형학적인 조건에 따라 결정되며 그 해상의 파랑특성에 큰 영향을 미친다.

동해안에서의 파랑에 관한 연구는 비교적 일찍부터 시작되어 왔으며 이와같은 연구는 초기단계의 경우 실측파랑자료의 부족으로 불가피하게 해상풍으로부터 파랑을 간접적으로 도출하여 내는 파랑추산법(Wave Hindcast method)에 의하여 수행되어 왔다. 이와같은 파랑추산법에 의한 풍파의 해석은 7, 80년대에 들어와 전자계산기의 비약적인 발달에 힘입어 대단히 보편화 되었으며 대부분의 공업항, 어항의 설계 및 유지관리를 위한 파랑 분석에 적용되어 왔다.

그러나 이와같은 파랑추산법에 의한 파랑해석은 그 해석기법이 수학적으로 대단히 정교하고, 또한 전자계산기의 수

치해석이 신속, 정확하다라든가, 두차례의 태풍 내습시의 실측자료를 통한 비교로써 그 모델을 검증 및 보정한다는 것은 신뢰도면에서 많은 의문점을 제기하게끔 하고 있다. 또한 실측자료의 축적면에서는 지난 1961년 이래로 30여년간 자료의 축적이 꾸준히 이루어져 왔으므로 중간의 오측, 결측치를 감안하더라도 상당한 양의 자료획득이 가능하게 되었다.

모든 자연수리현상에 대한 컴퓨터 시뮬레이션은 실측자료와 검증에 의하여 신뢰성이 나타날 때 그 적용성을 인정 받을 수 있는 바, 이러한 검증과정의 누락은 각종 설계시 간단한 검토 후 설계자의 임의적 판단으로 파랑추산법의 적용을 가능하게 하고 있다. 그러므로 동일한 지역에 있어서 설계파가 설계자에 따라서 상당한 차이가 나고 있는 경우도 있으며, 이 경우 판단기준의 설정이 어려운 실정에 있다.

따라서 지금까지 우리나라 동해안의 파랑해석에 적용되었던 각종 파랑추산법에 대한 검증을 실측치에 의하여 시도한 후 실제파랑의 해석적 의미를 고려한 실질적 알고리즘(Practical Algorithm)으로 설계파를 제시하는 상관관계모형을 제안하고자 한다.

파랑추산법

파랑추산이란 지형이나 기상

조건을 주어 해양의 파랑을 계산하는 것을 뜻하며, 과거에 주어진 기상조건을 기초로 파랑을 계산하는 것을 파랑추산(Wave hindcasting), 미래의 기상조건을 예측하고 그것을 이용하여 파랑을 계산하는 것을 파랑예측(wave prediction), 혹은 파랑예보(wave forecasting)라고 부른다. 따라서 파랑추산(波浪推算)은 파랑추산(波浪追算)과 파랑예측(波浪豫測)을 일괄한 용어이다.

해양파의 계산의 경우, 특히 이와 같은 용어가 사용되는 것은 다음과 같은 이유 때문이다. 기상의 경우에는 적당하게 배치된 기상대나 관측소에 의해 끊임없이 데이터가 기록되고 있기 때문에, 과거 및 현재의 기상상황에 대해서 어느 정도 알고 있다. 이에 반하여 해양파는 연안부에 관측점 및 외양의 극히 작은 관측부이(buoy)등을 제외하면 평상시 파랑을 관측하고 있을 때가 거의 없다. 따라서, 해양파에 대해서는 과거는 물론 현재 상황에 있어서도 분명하지 않은 경우가 있다.

그러나 다행히도 해양파는 바람에 의해 발생하고 그 바람은 기상자료(기압배치, 기온, 수온등)를 기초로 계산할 수가 있다.

따라서, 축적되어 있는 기상자료를 기초로 바람의 영역을 계산하고 바람과 파와의 관계를 이용하여 다시 파랑의 영역을 계산할 수 있으며, 이것이 파랑추산이다. 이에 반하여 기

상예측의 수법에 의해 미래의 바람영역을 계산하여 이를 근거로 파랑의 영역을 계산하는 것이 파랑예측이다.

해양파는 바람에 의해 해면에서 발생한 작은 수면파가 바람에서 에너지를 흡입하여 점차로 발달한 것으로, 거대한 것은 파고 수 10m까지 나타난다. 이와같은 파랑은 해안이나 해양재해를 일으키는 요인이 되기 때문에 그 예측은, 해양의 이용과 해양에 있어서의 인간 활동에 있어서 극히 중요하다. 또 최근, 해양파의 생성에 있어서, 해면을 통한 운동량, 열, CO₂ 등의 교환량이 많은 영향을 끼치는 것이 확실시되고 있기 때문에 지구환경의 변동을 예측하기 위해서도 전 지구적인 스케일로 파랑추산을 행하고, 그 결과를 대기 해양 결합대순환모델에 삽입이 필요하며, 이와 같은 것이 시도되고 있다.

(1) S. M. B법

잘 알려져 있는 바와 같이 근대적 파랑추산법이 최초로 출현하게 된 것은, 유명한 "Sverdurp and Munk(1947)"의 논문에 의해서이다. 이 연구가 당시로서는 획기적인 것이 다음과 같은 점들에서였다. 즉

첫째, 불규칙하게 변동하는 해양의 파랑을 정량적으로 기술하기 위한 통계적 평균량으로써의 "유의파"라는 개념을 도입하였고,

둘째, 풍파의 발생, 발달,

전파 및 감쇄로 일컬어지는 연속적 현상의 전체상을 파악할 수 있는 일련의 시스템을 제시하였으며,

셋째, 종래에 단편적으로 얻어졌던 관측자료들을 통일되게 정리되어진 유의파($H_{1/3}$)나 주기($T_{1/3}$)를 도입하여, 파랑을 일으키는 외적조건(풍속 U , 취송시간 t , 취송거리 x , 수심 d ... 등)과의 상관관계를 하나의 식으로 구체적으로 표시하였다.

당초에 직관적으로 도입되어 사용되어진, 유의파고 " $H_{1/3}$ "이나 주기 " $T_{1/3}$ "은 그후 파에 대한 통계적 이론의 출현에 따라 파랑 스펙트럼 특성과 결합하여 보다 명쾌히 설명이 되었다. 또한 파랑에 관한 정도 높은 관측자료를 획득하기 위한 노력이 "Bretschneider (1952, 1958)"와 "Wilson (1961, 1965)"에 의하여 진행되었고 이 연구는 그후의 파랑연구에 완성도를 높이는데 많은 기여를 하였다. 이것이 "Severdrup", "Munk", "Bretschneider"의 3인 머리글자를 따서 "SBM 법"이라는 파랑추산법으로 발전되었고 파랑추산법은 단순한 외적조건, 즉 일정한 바람이 한 방향으로 계속 불고 취송거리가 명확하게 규정되어 있는 경우에는 비교적 간단한 방법으로 정도 높은 파랑을 추산할 수 있는 장점이 있다.

(2) P. N. J 법

1950년대에 들어서서, 불규칙한

성질의 해양파를 기술하기 위한 통계적 이론들이, "Longuet-Higgins (1952)"와 "Pierson (1953)"에 의해서 급속도로 정리되어 졌다. 또한 "Neumann (1953)"은 해양파의 실측 결과를 해양파의 스펙트럼형 (Neumann 스펙트럼)으로 결정하는 방법을 제시하였다. 이러한 기초적 연구성과에 의하여 파랑 스펙트럼을 바탕으로 한 파랑추산법이 "Pierson", "Neumann and James (1955)"에 의하여 "PNJ" 법으로 제안 되었다.

(3) 수치모델에 의한 파랑 추산법

"SMB 법"이나 "PNJ 법"은 해양파랑의 표현에 유의파를 이용하는 것과 파랑 스펙트럼을 이용하는 것에 있어서 그

차이는 있으나, 모두 다 일정한 방향의 바람이 계속해서 동일 강도로 불어오는 정상상태의 파랑이나 풍향을 기초로 하고 있다. 즉, 이것은 파랑의 에너지 변환을 지배하는 미분방정식을 일정한 풍속으로 적분한 것으로써, 바람의 영역이 시간, 공간적으로 변동하고 있는 경우에는(여러가지 편리한 방법들이 고안되고 있으나) 이러한 방법에 의한 파랑추산이 곤란하다.

따라서 프랑스의 "Gelci" 등은 "SMB 법"의 개량이나, "PNJ 법"의 적용이 유행한 1957년경에 간략화되어진 에너지 평형방정식을 이용한 파랑추산을 시도한 바 있으며 그 후, 파랑의 수치모델에 대한 연구는 괄목할 만한 진보를 거듭하여, 1960년대 부터 1970년대 초까지 개발된 파랑의 비선형 효과를 직접적으로 고려하지 않은 소위 제1세대 모델과, 1970년대 부터 1980년대 초까지 개발된 - 파랑 스펙트럼의 유사성을 이용하여 스펙트럼의 매개변수를 계산한 - 제2세대 모형으로 발전하여, 현재에는 비선형 효과를 고려하여 정확한 파랑추산을 할 수 있는 제3세대 모델의 개발이 성행하고 있다.

파랑 추산모델의 응용 및 전개

파랑추산의 목적은, 물론 해상해역의 파랑특성을 상시예보하는 것에 있다. 이 때문에 세

태풍역내의 파랑분포와 넓은 해역에 걸친 파랑의 전반적 성질, 그리고 특정해역에서의 파랑의 극치분포와 설계파 등을 확실히 알기 위해서는 관측자료 만으로는 충분하지 않고 기상 자료를 이용하여 파랑추산을 한 후 그 자료를 기준으로 분석할 수 밖에 없다.

계각국은 각각 독자적 파랑모델을 개발하여 매일의 파랑예보에 이용하고 있다. 또한 미국 해군과 같이 전 지구적인 규모로 파랑예보를 하고 있는 곳도 있다. 그러나 이 외에도 여러가지의 응용분야를 생각할 수 있다.

현재에 있어서도 파랑관측점의 수는 그리 많지 않고, 더욱이 대부분이 연안지역에 집중되어 있다. 또 계측기에 의한 파랑관측이 시작된 기간도 그리 오래지 않으며 상당히 오래된 곳도 겨우 30년 정도이다.

따라서 태풍역내의 파랑분포와 넓은 해역에 걸친 파랑의 전반적 성질, 그리고 특정해역에서의 파랑의 극치분포와 설계파 등을 확실히 알기 위해서는 관측자료 만으로는 충분하지 않고 기상 자료를 이용하여 파랑추산을 한 후 그 자료를 기준으로 분석할 수 밖에 없다. 또한 최근에 지구의 온난화, 지구의 사막화, 이상 기온의 발생 등 지구 환경의 변화가 큰 문제로 대두되고 있다.

지구환경의 기본적 변동은 대기, 해양, 육지의 상호 작용 결과로 발생하는 것으로써, 이와 같은 변동을 예측하기 위한 수치모델이 개발되고 있다. 특히 장기적인 지구환경의 변동에 대해서는 해양이 중요한 역할을 하고 있기 때문에, 대기와 해양의 상호 작용에 관한 적절한 매개 변수화가 극히 중요한 역할을 하고 있다.

현재는 인공 위성을 이용한

해면원격탐사(Remote sensing) 기술의 진보에 의하여 전 지구적으로 해양파와 해상풍의 계측이 가능해 지고 있기 때문에, 파랑모델의 새로운 전개를 부여하려고 하고 있다. 즉, 마이크로 파도계의 신호를 바탕으로한 평균 파고와 해상풍의 추정, 마이크로파 산란계를 이용한 해상풍의 계측등이 그것으로, 인공위성에서 계측된 광역 해상풍 자료는 파랑 계산의 정밀도를 자랑하는 바람추산의 정밀도를 비약적으로 향상시키며, 파랑자료는 파랑수치모델의 정확도 확인 및 수치예보와 연동되어 파랑예보의 정밀도를 향상하는데 도움이 될 것이다.

파랑 자료의 신뢰도 검토 및 상관 분석

어떤 지역 또는 해역의 해안 구조물 설계와 시공, 유지 관리를 위한 파랑분석에 있어서 다음의 세 가지 방법이 주로 사용되고 있다.

첫째, 대상지역에서의 장기간 실측자료를 기초로 하는 방법,

둘째, 해안이나 해상의 바람 자료로 부터 간접적으로 도출해낸 파랑추산자료를 기초로 하는 방법,

셋째, 대상지역 또는 인근 지역에서 가장 강했던 선평 또는 태풍을 선정하여(single storm) 그것을 기초로 파랑을 추산하는 방법 등이 있다.

가장 바람직한 방법은 물론 첫번째의 방법을 사용하는 것이나, 자료 획득의 어려움 및 결측, 오측 등으로 인하여 통상 두번째 방법을 많이 사용하고 있다.

이 방법은 "SMB법", "PNJ"법, "Wilson법" 등 외에도 많은 기법들이 사용되고 있다. 그러나 이 방법들의 적용은 실측치와 엄정한 검정에 의하여 해당 지역에 가장 적합한 방법을 선정 후 적용하여야 하나 지금까지는 실측 자료의 불편등으로 인하여 많은 자료에 의한 검정보다는 특정 태풍 등에 의한 3, 4일 간의 비교로서 적용 방법의 적정성을 검정하여 왔다. 따라서 일차적으로 실측된 자료들 자체에 대한 신뢰도 검정을 실시한 후, 실측치를 바탕으로 파랑추산방법들에 대한 신뢰성을 검토하여 파랑자료들 상호간의 상관관계를 조사하였다.

상관관계모델의 제안

한편 앞에서 기술한 여러 복잡한 모델들이 우리나라 해역에 적용될 때 과연 실용성, 경제성, 확실성이 있느냐를 생각할 때 부정적인 견해를 갖지 않을 수 없었다.

즉, 대양에 접해있지 않은 우리나라 항, 포구에 전 지구적규모의 자료가 필요한 복잡한 기법을 적용하는 것은 의미가 없고, 또한 그와같이 하였을 때의 정확성에도 많은 의심이 들기 때문이었다. 따라서

필자는 손쉽게 실무진에서 사용할 수 있으며, 파랑에 대한 기존계측자료들이 없는 지점에도 적용할 수 있는 상관관계모델을 제안하고자 한다.

실측치를 포함한 각 파랑추산기법별 계산파랑 간의 상관관계를 분석한 결과, 동일 지역내에서의 각 기법간의 관계는 "SMB법"과 "PNJ법"이 아주 강한 상관관계를 보여주고 있다.

또한 지역간의 상관관계에 있어서는 거리상으로 인접하여 있는 포항과 울산지역에서 "SMB법"이 강한 상관관계를 나타내고 있었으며, 이는 기상자료를 이용한 파랑추산에 있어 인접지역은 유사한 파랑으로 추산되기 쉽기 때문이라고 생각 된다. 같은 지역간 임에도 실측자료에 있어서는 큰 차이를 보이는 것은 두 지역간의 지정학적 특징이 서로 다르기 때문이라고 생각 된다.

포항지역의 경우 영일만의 내부에 자리잡고 있으며 그 동쪽으로 장산곶이 돌출하여 남해와는 완전히 차단되어 있으므로 동해의 해양특성에 전적으로 영향을 받고 있는데 비하여 울산지역은 동해와 남해사이의 완만한 경계선상에 위치하여 남해의 해양환경의 영향을 같이 받는 바, 양 지역간의 실제적 해양특성에는 많은 차이가 있다. 한편 지역적으로 상당히 떨어져 있는 동해의 특징으로 인하여 실측파랑 사이에 강한 상관관계를 나타내고

있다.

이는 동해, 포항사이에 있어서 파랑특성이 크게 차이나지 않음을 보여주고 있으며 두 지점사이의 여타 지역에서도 유사한 파랑특성이 존재한다고 유추할 수 있다.

또한 본 모델의 미계측 지점에 대한 적용성을 파악하기 위하여 실측자료가 취약한 울산 및 속초, 후포항에 대하여 본 기법을 적용하여 53계절의 파랑자료를 확충한 후 단 순회귀분석과 함께 다중회귀 분석을 실시하여 그 결과를 검토하였다.

결 론

파랑현상을 해석하는데 있어서 그 대상이 되는 파랑자료들을 기상자료들로부터 간접적으로 추산하여왔던 방법에서 벗어나, 보다 실제적이고 직접적인 분석을 할 수 있는 상관관계모델을 개발하기 위하여 실

**본 상관관계모델을
실측자료가 극히
미미한 울산 및
속초, 후포지역에
적용하여 본 결과
설계파 산정시 양호한
결과를 얻을 수
있어 합리적 모델인
것으로 확인되었다.**

측자료를 근간으로 확률론적 관점에서 연구를 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 포항과 울산지역간에 있어서 파랑추산기법 자료간의 상관관계는 $r=0.989$ 의 강한 상관관계를 나타내나, 실측자료에 있어서는 $r=0.349$ 의 약한 상관을 나타내고 있다. 따라서 인접한 지역이라도 기상자료에 의한 파랑추산시 지형학적인 상이성을 고려하여야 되는 것으로 나타났다.

2) 동해와 포항 지역간에 있어서 실측파랑간의 상관관계는 $r=0.920$ 의 강한 상관관계를 보여주고 있으며, 동해안 파랑에 있어서 지역적 거리차 보다는 지정학적 유사성이 더 큰 영향을 끼침을 알 수 있다.

3) 필자의 상관관계모델에 의하여 설계파를 산정한 결과 재현기간 50년의 경우, 동해 지역과 포항 지역은 7.3m로 나타났으며, 울산, 속초, 후포 지역은 각각 8.2m, 8.8m, 6.6m로 나타났다.

4) 본 상관관계모델을 실측자료가 극히 미미한 울산 및 속초, 후포지역에 적용하여 본 결과 설계파 산정시 양호한 결과를 얻을 수 있어 합리적 모델인 것으로 확인되었다.

5) 본 상관관계모델은 자료의 입력 후 그 처리가 연속적으로 일관되게 진행되는 알고리즘으로 개발하였으며 타해역에서의 극치파랑해석에도 적용이 가능하리라 판단된다. Δ