

선박과 해양구조물에 미치는 해양환경인자에 대한 연구동향

- 제11차 ISSC I-1위원회 보고서를 중심으로 -

최 항 순
(서울대학교 교수)

목 차

1. 해양파 자료
2. 해양파의 통계해석
3. 천수역 파랑
4. 파랑스펙트럼
5. 참고문헌

선박과 해양구조물은 다른 공학구조물과는 달리 해양환경의 영향을 지배적으로 받는다는 특성을 지니고 있다. 더욱이나 최근에는 구조물의 최적화와 해양환경보호에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되면서 해양환경에 대한 이해와 공학적 응용을 위한 실측자료의 필요성이 강조되고 있다. 선박과 해양구조물의 설계나 운영에서 고려하여야 하는 여러가지 환경인자 중에서 파랑이 가장 중요한 의미를 지니고 있음에도 재론의 여지가 없다. 이러한 관점에서 본 고에서는 제11차 ISSC I-1(환경조건)위원회의 보고서를 중심으로 해양파에 대한 최근의 연구동향을 간략하게 기술하고자 한다.

1. 해양파 자료

해양파는 매우 복잡한 자연현상으로 그 발생 기구에 대한 물리적 규명이 완결되지 못하였을 뿐아니라 파도를 야기시키는 바람이 대기의 대표적인 난류유동이어서 이를 수학적으로 완벽하게 기술할 수가 없다. 따라서 이론적 연구는

물론 이와 병행하여 실측자료의 필요성이 제기 현재 세계에는 50여개의 기관에서 바람과 파랑등 해양자료를 보관하고 있는 것으로 조사되었다. 이 중에서 4개는 국제기구이며 나머지는 각국의 정부기관이거나 연구소들인데, 그중에서 아래의 2기관이 가장 방대한 자료를 소장하고 있는 것으로 알려져 있다.

British Oceanographic Data Centre, Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, Merseyside L43 7RA, UK
National Climatic Data Center, World Data Center A-Meteorology, Federal Building, Asheville, NC28801, USA

영국해양자료센터의 경우 가장 오래된 자료는 100년에 걸친 것이며, 미국국립기상자료센터는 거의 전세계의 해양에 대한 자료를 보유하고 있다. 그러나 이들 자료는 시대에 따라 측정방법이 서로 다르며, 또한 최근의 자료를 제외하고는 대부분 문서나 테이프에 수록되어 있어서 고액의 사용료를 지불한 다음 별도의 전문가문료를 지불하여야 활용이 가능하다는 문제점을 지니고 있다. 이러한 관점에서는 정확도가 다소 뒤떨어지지만 공학적응용을 염두에 두고 개발한 "Global Wave Statistics"[1]에 주목할 가치가 있다. 이 프로그램은 전세계의 해역에 대한 해양파자료를 수합하여 통계적 분포를 구한 것으로 실제응용을 위하여 개인전산기용 디스켓트에 수록하여 British Maritime Technology Co.가 상업적으로 판매하고 있다.

해양파에 대한 계측은 계속되고 있지만 실제

로 어느 특정해역에 해양구조물을 설치하고자 할 때 그 해역에서 계측되어 축적된 자료가 있는 경우는 극히 드물다. 따라서 가장 가까운 해역에서 실측된 자료를 근간으로 설계환경조건을 추정하여야 하며, 이를 위하여는 해양파의 물리적 모델을 정립하여야 한다. NATO 국가에 속한 20여명의 학자들의 공동으로 수행하고 있는 제3세대 파랑모델(Wave Modelling Group : WAM)에 대한 연구에 많은 진전이 있는 것으로 알려지고 있다[2]. 이 연구의 특징은 인공위성에서 계측하는 파랑과 바람등 기상 자료를 입력으로 이용하며 파의 비선형성과 방향성을 고려하여 파랑의 발달과 전파를 예측하는 점이다. 현재까지 얻어진 결과에서 나타난 문제점으로는 방대한 계산량으로 인하여 실시간 시뮬레이션이 어렵다는 점과 예측결과가 바람의 입력자료에 너무 민감하다는 점 그리고 천수역변형이 부정확하다는 점 등이다. 최근에는 바람에 대한 정확한 측정기법과 경계층이론을 이용한 해석법등에 연구의 초점이 모아지고 있다. 지금까지 이 모델로 추정한 파랑을 실측자료와 비교한 결과 북해의 5개 해역에서 파고오차의 평균치가 0.05m 상대오차가 35%인 비교적 좋은 결과를 얻기도 하였으며[3], 미국해안에서는 파고의 평균오차가 0.8m 상대오차가 30%로 나타난 예가 있다[4].

해양환경에 대하여 한가지 특기할 사항은 영국해역의 파랑을 면밀하게 분석할 결과 이 해역의 파도가 최근에 연평균 0.034m씩 증가하였음이 확인되었다[5]. 이는 최근 지구의 평균기온이 상승하는등 대기기상에 변화가 나타나면서 자주 발생한 열대성 폭풍에 기인하는 것으로 추측하고 있다. 그래서 일부에서는 벌써 설계파고를 상향조정하여야 한다는 의견을 개진하기도 한다.

2. 해양파의 통계해석

2.1 확률밀도함수 어느 한 해역에 대한 극한 해상상태를 추정하는 작업은 보통 그 해역에서 수년간에 걸쳐 수집된 유의파고와 주기를 통계적으로 처리하여 결합확률밀도함수(joint prob-

ability density function)를 도출하는 방식으로 수행된다. 수학적으로는 유의파고에 대한 한계 확률밀도함수(marginal probability density function)와 각 유의파고에 대한 파주기의 조건확률밀도함수(conditional probability density function)를 곱함으로써 유의파고와 주기간의 결합확률밀도함수가 정의된다.

결합확률밀도함수는 각 해역에 따라 다르게 나타나지만 유의파고에 대한 한계확률밀도함수는 대체로 Weibull분포를 그리고 파주기의 조건확률밀도함수는 대수정정규(log-normal) 분포에 따르는 것으로 나타나고 있다[6]. 따라서 결합확률밀도함수는 Weibull분포함수와 대수정정규분포함수의 곱으로 표시되는데, 이에 대한 수학적 표현식이 알려져 있지 않아 이를 유도하는 연구가 진행되고 있다. 만약 이 표현식이 수학적으로 얻어지면 실용가치가 매우 높을 것이다. 왜냐하면 JONSWAP스펙트럼의 경우에서 경험하였듯이 대상해역의 특성치로 이 함수의 파라미터를 결정하는 방식으로 간편하고 범용적으로 이용할 수 있기 때문이다.

한편 유의파고가 Weibull분포에 따른다 하여도 이를 정확히 추정하기 위하여는 장기간에 걸친 자료가 있어야 한다. 그러나 실제로는 제한된 범위의 자료밖에 구할 수 없는 것이 현실이다. 이 문제를 해결하기 위하여 최근에 Bayes법이 시도되고 있다. 즉, 현재까지의 자료에 근거하여 확률밀도함수를 추정하되 새로운 자료가 축적되면 이에따라 확률밀도함수를 지속적으로 수정하는 Bayes법은 이미 오래전에 알려진 통계적방법이나, 이 방법은 사용자의 주관이 강하게 영향을 미칠 수 있다하여 지금까지 그 사용을 가급적 꺼려왔다. 그러나 해양환경같이 항상 자료가 부족한 분야에서는 시도할만한 가치가 있다고 여겨진다. 실제로 Kerstens등[7]은 매년 분포함수를 수정하는 방식으로 이 방법을 북해에서 계측된 유의파고에 적용한 결과 5년의 자료로 비교적 정확하게 장기예측할 수 있음을 밝혔다.

2.2 비선형효과

해양의 불규칙파는 보통 평면파라는 가정하

에 선형중첩원리를 이용하여 수없이 많은 선형 규칙파의 합으로 표시하는 것이 지금까지의 관례이다. 이 방법은 수식처리가 간편할 뿐 아니라 확률분포가 정규분포이므로 통계적 처리가 용이하다. 그러나 최근에는 해양파의 비선형효과에 대한 관심이 날로 커지고 있다. 따라서 선형중첩원리에 근거한 종래의 표현식은 그 효용성이 한계에 부딪히고 있다. 이러한 새로운 요구에 부응하기 위하여 많은 연구가 시도되고 있다. 그 중에서 Langley(8)가 2차 Volterra 함수와 백색소음기법을 이용하여 전개한 아래의 표현식이 주목을 받고 있다.

$$\eta(t) = \sum \{c_i x_i(t) + \lambda_i x_i(t)^2\}$$

여기서 $x(t)$ 는 정규화된 Gauss 프로세스이며, c 와 λ 는 고유치(λ)에 대한 제차적분방정식과 고유함수로부터 정해지는 계수이다. 이 표현식은 비선형항을 지니고 있으므로 그 통계적 특성은 더 이상 정규분포로 대변할 수 없다. 그러나 비정규분포함수의 일반적 특성은 정규분포함수와는 달리 잘 알려져 있지 못하다. 따라서 공학적 응용에서는 흔히 비정규분포함수의 고차모우먼트까지를 고려하여 정규분포에 준하여 해석하는 간이법을 활용한다. 이러한 관점에서 Srokosz와 Longuet-Higgins(9)는 상기 표현식에 대한 3차모우먼트를 이론적으로 해석한 결과 스펙트럼의 폭이 좁은 해양에서는 그 값의 변화가 매우 작아 거의 일정한 상수로 간주할 수 있음을 밝혔다.

한편 해양파의 많은 비선형현상중 공학적으로는 소위 말하는 “돌출파(freak wave)”가 매우 중요한 의미를 지닌다. 해양파는 일반적으로 그 포락선이 서서히 변하는 군집현상으로 특징지어 지는데, 이웃하는 파와는 독립적으로 갑자기 매우 높은 파가 덴마크해안에서 관측된 이후(10) 실험실에서 이를 재현하였다는 보고가 이어지고 있다. 그러나 돌출파의 물리적 발생기구나 운동학이 아직 규명되어 있지 못하다. 또한 이러한 돌출파를 제외하면 해양파의 단기분포는 지금까지 정설로 알려진대로 Rayleigh 분포에 잘 들어 맞지만 어떠한 분포함수도 돌출파를 제대로 포함할 수 없으므로 이를 위한 통계론에 대한 연구가 요청된다.

2.3 설계인자의 동시발생확률

선박이나 해양구조물의 설계인자로는 보통 반복주기가 100년에 해당하는 파랑과 바람 그리고 조류가 선택되며, 이들이 동시에 발생한다고 가정하여 설계하중을 계산한다. 그러나 파랑과 바람 그리고 조류의 최대치는 물리적인 이유에서나 관측결과 동시에 발생하는 확률이 극히 낮음이 밝혀지고 있다. 1981년에서 1983년까지 3년간 북해의 Frigg 유전해역에서 발생한 5개의 폭풍시에 측정한 파도와 바람의 시간별 기록을 살펴보면 파도의 최대치는 바람의 최대치가 발생한 다음 보통 2시간후에 나타나고 있다. 이는 바람에 의하여 에너지가 전달된 다음 일정 시간이 지나야 파랑이 충분히 성장한다는 물리법칙에 비추어 당연한 결과로 받아들여진다. 이 기록에 의거한 가상 자켓에 작용하는 파랑과 바람의 하중계산결과는 단순계산의 결과보다 대략 10% 적게 평가되고 있다(11).

한편 노르웨이의 Tromsflaket 해안에서 7년간 측정한 38개의 태풍기록을 분석한 바에 의하면 파랑과 조류의 최대치가 동시에 나타난 경우는 극히 드물었으며, 방향 또한 일치하지 않았다. 이 기록에 의거하여 계산한 설계하중은 파랑에 의한 물입자의 속도와 조류를 단순히 더하여 계산하는 현행의 결과보다 대략 30% 적게 추정되었다(12).

이상의 예는 파랑과 바람 그리고 조류등 설계인자들이 동시에 발생하는 확률이 극히 낮으며, 동시에 발생한다는 가정하에 하중을 추정하는 현행의 계산법이 과대한 결과를 주고 있음을 강력하게 시사하고 있다. 그러나 이러한 설계인자의 결합확률밀도에 대한 명확한 관계가 아직 밝혀지지 않고 있다. 수학적으로는 다변수 극한통계(multivariate extreme statistics)로 처리하여야 함이 자명하나 개념과 수식이 너무 복잡하여 공학적으로 응용하기까지는 많은 작업이 걸릴 것으로 예상된다.

3. 천수역파랑

최근 천수역에 대한 개발이 활발해지면서 천

수역 파랑의 중요도가 부각되고 있다. 이에 따라 파의 굴절, 해저면마찰 그리고 심지어는 쇄파까지를 포함하는 전산프로그램들이 시장에 나와 있지만 그 유효성이 충분히 입증되어 있지 못한 실정이다. 이들 프로그램에 공통으로 지적되는 문제점은 첫째 해저면의 변화나 조류에 의한 산란이 제대로 처리되어 있지 않으며, 둘째 비선형효과가 제대로 반영되어 있지 못하다는 점이다.

천수역 파랑변환문제는 보통 Berkhoff의 mild-slope 방정식을 이용하여 접근한다. 이 방정식은 간단하여 취급이 용이하고 파의 굴절을 비교적 정확하게 예측하는 등 많은 장점이 있지만 동시에 산란과 비선형효과를 제대로 처리하지 못하는 결정적 단점을 지니고 있다. 이를 개선하기 위하여 최근에는 포물형근사법을 이용한 프로그램들이 개발되고 있다[13]. 즉, 산란을 제대로 취급하려면 라플라스 방정식을 풀어야 하나, 엄청난 계산시간이 소요되므로 포물형 근사를 통하여 계산시간을 줄이고자 한다. 또한 비선형효과를 제대로 반영하려면 2차원 Boussinesq 방정식을 풀어야 하는 데, 이 방정식은 잘 알려져 있는 바와 같이 많은 기억용량과 계산시간이 요구되므로 이를 역시 포물형으로 근사하여 실제문제에 적용하려는 노력이 경주되고 있다.

한편 천수역에서 사용할 수 있는 파랑스펙트럼공식은 아직 알려져 있지 못한 데, 최근 Resio[14]가 매우 흥미있는 이론을 제시하여 관심을 모으고 있다. 그는 평면파의 파수(wave number)스펙트럼을 수심에 관계없이 $F(k) = B\omega k^3$ 으로 가정하여 파에너지스펙트럼은 심해에서 ω^4 에 역비례하고, 천수역에서는 ω^2 에 역비례한다는 이론을 발표하였다. 이 이론은 심해역의 경우에는 잘 알려진 Kitaigorodskii의 상사해와 일치하고 천수역에서 계속한 파에너지 스펙트럼과 잘 일치하고 있다.

천수역 비선형파에 대한 흥미있는 결과는 Osborne등[15]이 제시한 다음의 자유표면식이다.

$$\eta(x, t) = -(3/4k^2 h^3)A^2 + A\cos\theta + (3/4k^2 h^3)A^2\cos 2\theta$$

여기서 h 는 수심을, k 는 기준파수를 그리고 θ 는 변조하는 위상함수를 뜻한다. 한편 A 는 변조하는 포락선의 진폭을 나타내는 데, 이는 잘 알려진 비선형 Schrödinger 방정식의 해가 된다. 첫항은 높은 파고나 파군에 의한 방사응력으로 발생하는 평균수면의 변화를, 둘째항은 선형항을 그리고 세째항은 2차항을 의미한다. 이 표현식은 실제 해양이나 실험실에서 계속되는 천수역파에 잘 들어 맞아 실제 응용에 매우 유용하게 이용될 것으로 전망된다.

4. 파랑스펙트럼

천수역과는 달리 심해역에서 충분히 성장한 파랑의 에너지스펙트럼에 대하여는 여러가지 공식이 제안되어 있다. Pierson-Moskowitz, Bretschneider, JONSWAP, Ochi-Hubble, Scott, ITTC, ISSC스펙트럼 등이 그 예들이다.

그러나 같은 계측결과를 사용하여 이들을 비교하면 서로 다른 모양의 스펙트럼을 얻게 된다. 이들 스펙트럼의 도출과정을 검토하면 Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ITTC, ISSC 스펙트럼은 하나의 부류에 속하며 단지 대표주기에 대한 정의가 서로 다를 뿐이다.

Buckley[16]는 미국해안에 설치한 10개의 관측부표의 데이터를 이용하여 이들 스펙트럼과 비교하였다. 하나의 부표당 55,000개의 스펙트럼을 사용하였으므로 비록 미국해안이라는 지역적 제한은 있지만 해양파의 전체집합을 대변한다고 간주할 수 있다. 그는 방대한 양의 스펙트럼을 비교분석한 결과 비교적 평온한 해상상태는 Pierson-Moskowitz 스펙트럼으로 기술할 수 있으며, 취송거리가 제한되어 있는 해역이나 폭풍해역의 파랑은 JONSWAP스펙트럼에 가장 가깝다는 결론을 얻었다.

한편 부유식 해양구조물에서는 시간에 따라 서서히 변화하는 표류운동이 조업조건을 결정하는 중요한자로 작용한다. 이러한 문제에는 swell을 포함하는 Ochi-Hubble 스펙트럼의 사용이 효과적이다[17]. 이 스펙트럼은 저주파수성분과 고주파수성분의 합으로 다음과 같이 표시되어 있다.

$$S(\omega) = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \frac{\{1/4(4\lambda_j+1)\omega_{0j}^4\}^{\lambda_j}}{\Gamma(\lambda_j)} \frac{H_{s0}^2}{\omega^{4\lambda_j-1}} \exp$$

$$[-1/4(4\lambda_j+1)(\omega_{0j}/\omega)^4]$$

여기서 H_s 는 유의파고, ω_0 는 모달주파수, λ 는 형상인자로 아랫첨자 $j=1$ 은 저주파수성분에 $j=2$ 는 고주파수성분에 대응한다.

끝으로 본 고찰은 1990년도 현대연구비의 지원을 받아 수행하였음을 밝히며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

5. 참고문헌

- [1] Hogben, N., Dacunha, N. M. C. and Olliver, G.F., "Global wave statistics", Unwin Brothers for British Maritime Technology, 1986.
- [2] Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P. A. E. M., Komen, G. J., Beertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V. J., Greenwood, A., Reistad, M., Zambresky, L., Ewing, J. A. "The WAM model—a third generation ocean wave prediction model" J. Physical Oceanography, Vol. 18, 1988, pp.1775–1810.
- [3] Sanders, J. W., "A growth–stage scaling model for the wind-driven sea", Deutsche Hydrograph. Zeitschrift, Vol.29, 1986, pp. 136–161.
- [4] Zambresky, L., "A verification study of the global WAM model December 1987–November 1988", ECMWF Tech. Report No.63, 1989.
- [5] Carter, D. J. T. and Draper, L., "Has the North Sea Atlantic become rougher?", Nature, Vol. 322, 1988, pp.494.
- [6] Mathisen, J. and Bitner-Gregersen, E., "Joint distributions for significant wave height and wave zero-up-crossing period", J. Applied Ocean Research, Vol. 12, 1990, pp.93–103.
- [7] Kerstens, J. G. M., Pacheco, L. A. and Edwards, G., "A Bayesian method for the estimation of return values of wave heights", J. Ocean Eng., Vol.15, 1988. pp. 153–170.
- [8] Langley, R.S., "A statistical analysis of nonlinear random waves", J. Ocean Eng., Vol. 14, 1987, pp.389–407.
- [9] Srokosz, M. A. and Longuet-Higgins, M. S., "On the skewness of sea-surface elevation", J. Fluid Mech., Vol. 164, 1986, pp. 487–497.
- [10] Sand, S. E. et al., "Freak wave kinematics" Water Wave kinematics, Kluwer Academic Publ., 1989, pp.535–550.
- [11] Cavanie, A., "Joint occurrence of extreme wave heights and wind gusts during severe storms on the Frigg field", Report of E & P Forum No.3.9, 1986.
- [12] Heideman J.C. et al., "Joint probability of extreme waves and currents on Norwegian Shelf", ASCE J. Water, Port, Coast and Ocean Eng., Vol. 115, 1989, pp.534–546.
- [13] Lie, P. L., Yoon, S. B. and Kirby, J. T., "Nonlinear refraction–diffraction of waves in shallow water", J. Fluid Mech., vol. 153, 1985, pp.185–201.
- [14] Resio, D. T., "Shallow water waves. I. Theory", ASCE J. Water, Port, Coast and Ocean Eng., Vol. 113, 1987, pp.264–281.
- [15] Osborne, A. R., Petti, M., Liberatore, G. and Cavaleri, L., "Nonlinear Fourier analysis of laboratory generated broad-banded surface waves", Proc. Computer Modelling in Ocean Engineering, 1988, pp.95–105.
- [16] Buckley, H. W., "Extreme and climatic wave spectra for use in structural design of ships", J. Naval Eng., Vol. 100, 1988.
- [17] Chakrabarti, K. S., Hydrodynamics of Off-shore Structures, Comput. Mech. Publ., 1987.