

# 不規則 波浪 入·反射波 分解技法

吳 炳 哲

〈韓國海洋研究所 海洋工學研究部 前任研究員〉

(지난호에서 계속)

## 5. 수치모의 실험에 의 한 검토

방향스펙트럼은 주파수와 파향의 함수로서 에너지의 분포를 표현하고 있으나, 파랑장이 선형이라고 가정하면 에너지 분포는 주파수와 파향에 대해서 각각 독립이라고 생각할 수 있다. 즉, 방향스펙트럼에서 주파수와 파향에 관련된 부분은 각각 독립적인 함수의 형태를 취하므로

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta | f) \quad (47)$$

의 형태로 쓸 수 있으며 여기서  $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼,  $G(\theta | f)$ 는 방향분포함수이다. 일반적으로 실험 또는 현장에

서 관측된 파동량의 시계열 자료는 FFT(Fast Fourier Transform) 등을 통하여 주파수별로 에너지를 분리할 수 있으므로 방향스펙트럼을 계산하는 것은 궁극적으로 매 주파수에 대하여 방향분포함수  $G(\theta | f)$ 를 결정하는 문제로 귀착된다.

그러므로 본 수치모의 실험에서는 임의의 고정된 주파수에 대해서 입사파의 방향분포함수와 반사계수를 설정하고 앞에서 논의한 수정확장최우법으로 방향분포와 반사계수를 재현하여 방향분해능 및 반사계수 산정의 정도를 검토하기로 한다. 수치모의실험의

절차는 다음과 같다.

1) 수치모의 실험에 사용될 입사파의 방향분포함수와 반사계수를 입사파의 방향의 함수로 설정한다. 여기서는 Mitsuyasu의 방향분포함수와 상수 함수와 sine 함수로 표현되는 반사계수( $r$ )를 사용한다.

$$G(\theta) = \sum_{i=1}^I \alpha_i \cos^{2s_i} \left( \frac{\theta - \theta_i}{2} \right) \quad (48)$$

$$r = 0.7 \text{ or } 0.8 \sin \theta \quad (49)$$

여기서  $s_i$ 와  $\theta_i$ 는 각각 방향 집중도(spreading parameter)와 중심각을 의미하며  $\alpha_i$ 는 에너지 밀도의 상대적인 크기를 나타낸다. 그리고  $I =$

1이면 단봉형 방향분포(uni-modal spreading),  $I=2$ 이면 쌍봉형 방향분포(bimodal spreading)를 나타낸다.

2) 관측계기의 배열(observation array)을 상정하고 대상 파동량의 모든 조합에 대해 식(15)를 사용하여 cross 스펙트럼을 계산한다.

3) 식(46)을 사용하여 반사계수를 계산한다. 반사계수는 0과 1 사이의 값이므로 식(46)에 의한 반사계수가 음이면 0, 1보다 크면 1로 놓는다.

4) 식(43)을 사용하여 입사파의 방향분포함수를 계산하고 식(44)를 이용하여 비례상수  $K$ 를 결정한다.

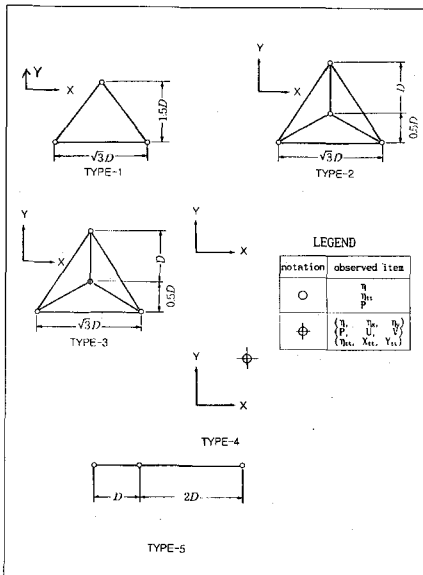
5) 3)과 4)에서 계산된 반사계수와 방향분포함수를 설

정된 것과 비교하여 방향 분해능과 반사계수 산정의 정도를 평가한다.

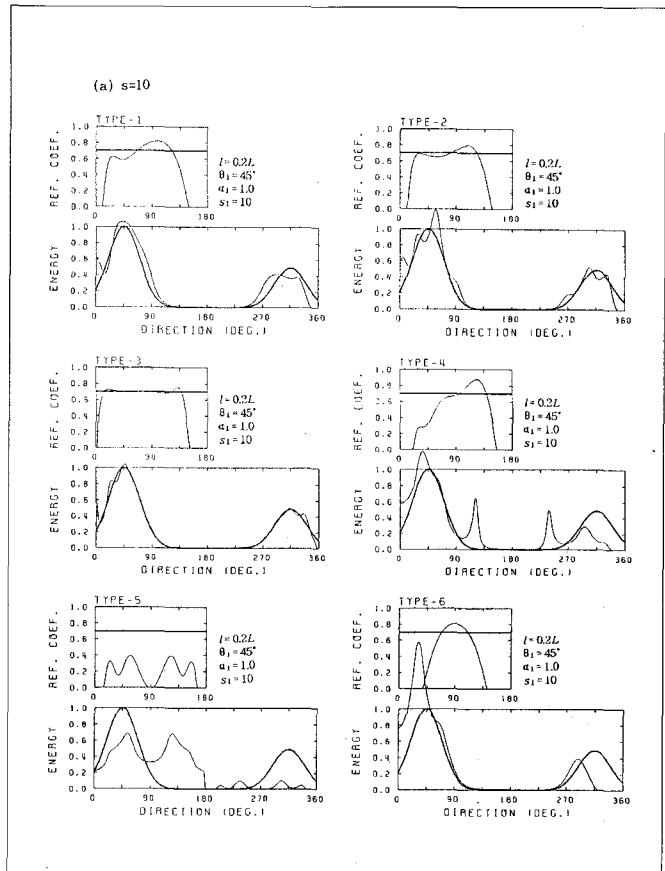
그림 3은 검토 대상으로 한 계기의 배열을 보여준다. 그림 3에서 TYPE 1, TYPE 2, TYPE 3, TYPE 4 및 TYPE 5는 각각 Delta 배열(Delta array), 4성분성형배열(4 component star array), 6성분성형배열(6 component star array), 점배열(point array) 및 반사면

에 직교하는 선형배열(line array)을 나타낸다. 또한, TYPE 5의 배열이 반사면과 평행하게 배치되는 경우를 TYPE 6로 한다. 그리고 TYPE 1, TYPE 2와 TYPE 3를 통틀어 평면배열(plane array)이라 부른다. 그림3에서 공간배열의 경우 계기 간격은  $D=0.2L$ 로 하였다.

그림 4(a)는 반사계수가  $r=0.7$ 일 때  $s=10$ 인 경우, 그림 3의 계기 배열에 대하여



<그림 3> 방향스펙트럼 관측에 사용되는 계기배열의 종류



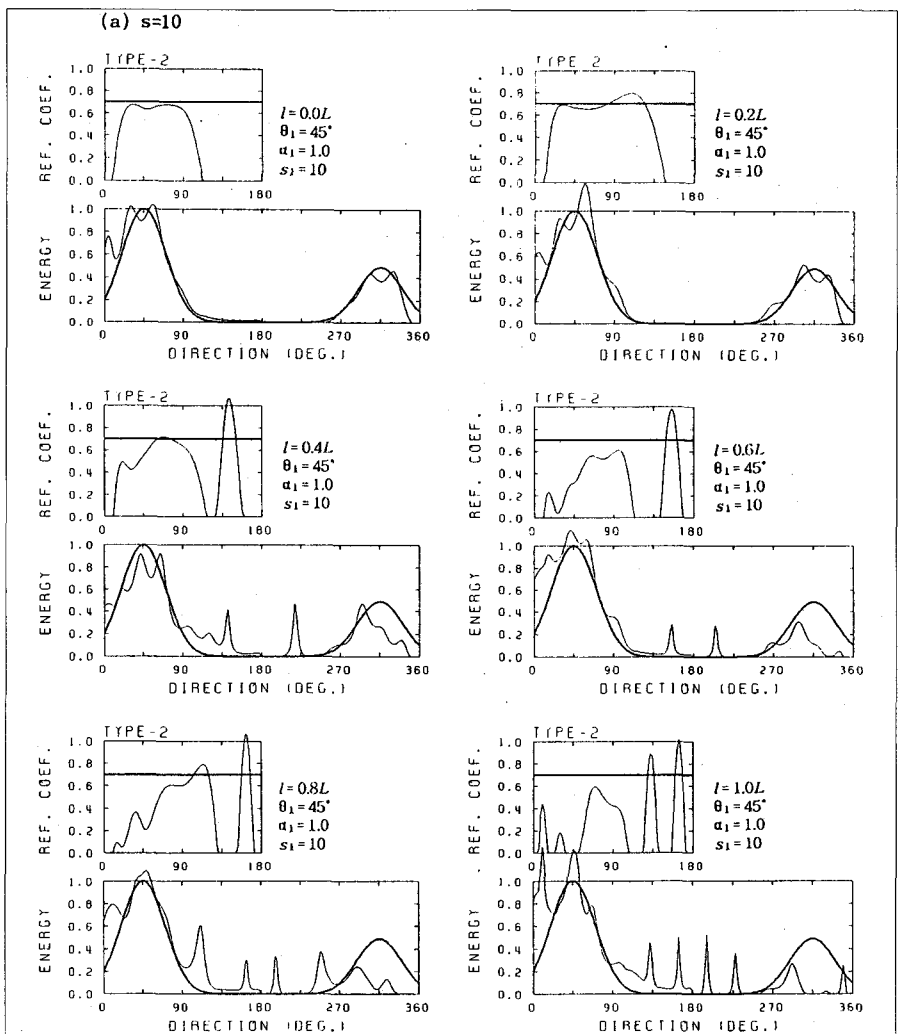
<그림 4> 계기배열에 따른 반사파의 분해능(굵은선:설정치, 가는선:MEMLM 추정치) (a)  $s=10$

수정확장최우법(MEMLM)으로 산정한 방향스펙트럼(하단)과 반사계수(상단)를 나타낸다. 이 그림에서 방향분포함수의 횡축(ordiante)은 설정된 스펙트럼의 최대치로 무차원화(non-dimensionalization)하였다. 반사면과 계기의 최단거리는  $0.2L$ ( $L$ 은 파장)로 하였으며 평면배열은 삼각형의 한변이 반사면으로 부터 최단 거리에 있도록 하였다. 이 그림에서 보는 바와 같이  $s=100$ 인 경우가  $s=10$ 인 경우보다 방향분해능 및 반사계수 산정의 정도가 훨씬 양호함을 알 수 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 ME-MLM에 의한 반사 계수의 산정식 식(46)은 Delta 함수로 표현되는 방향스펙트럼에 대하여 정확(exact)하다는 사실에 비추어 볼 때 타당한 결과로 사료된다.

배열 형태별로 관찰하면 계산에 사용된 파동량의

수가 제일 많은 6성분성형배열(TYPE 3)이 가장 좋은 결과를 보여주고 있다. 관측파동량의 수가 3개인 배열 중에서는 평면배열인 Delta 배열(TYPE 1)이 점배열(TYPE 4)과 선형배열(TYPE 5, TYPE 6)보다 양호한 결과를 주고 있다. 그러므로 반사파

의 분해능은 파동량의 수 뿐만 아니라 계기의 배치에 좌우됨을 알 수 있다. 특히 주목할 만한 점은  $s=100$ 인 경우에는 3개의 평면배열이 비슷한 결과를 주고 있다는 것이다. 즉 방향집중도계수( $s$ )가 증가함에 따라 관측파동량의 수보다는 계기의 배치 형태가



<그림 5> 반사면과 계기배열간의 거리에 따른 4성분성형배열의 반사파 분해능 (굵은선: 설정치, 가는선: MEMLM 추정치) (a)  $s=10$

반사파의 분해능에 큰 영향을 미친다는 점을 알 수 있다. 또한, 평면배열은 에너지 분포가 유효한 구간에서의 반사계수를 방향집중도에 큰 관계 없이 매우 양호하게 재현하고 있다.

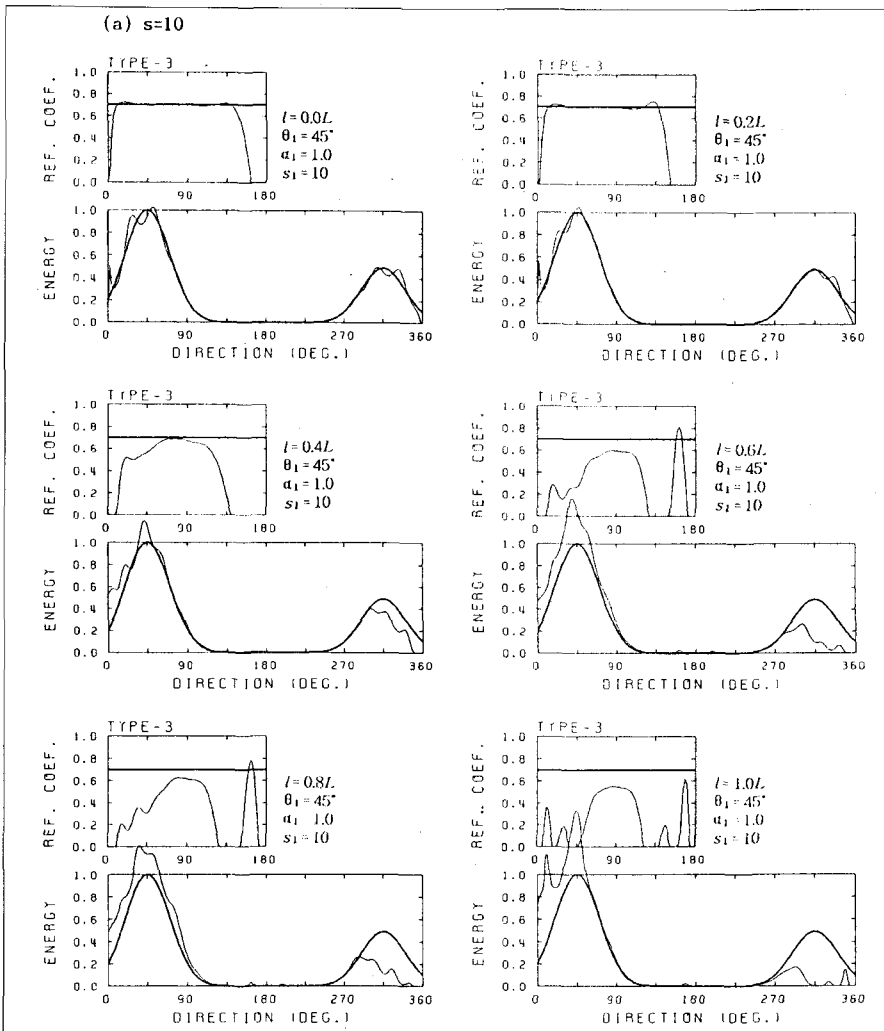
점배열(TYPE 4)의 경우에는 실제의 방향분포함수에

는 없는 의사첨두(spurious peak)가 나타나고 있다. 이러한 의사첨두는 일반적으로 매우 첨예한 형태를 갖고 있으므로 분석 결과로부터 어느 정도 구분할 수 있다. 그리고 방향집중도계수가 작을 때 수정확장최우법을 점배열(TYPE 4)에 적용하면 반사

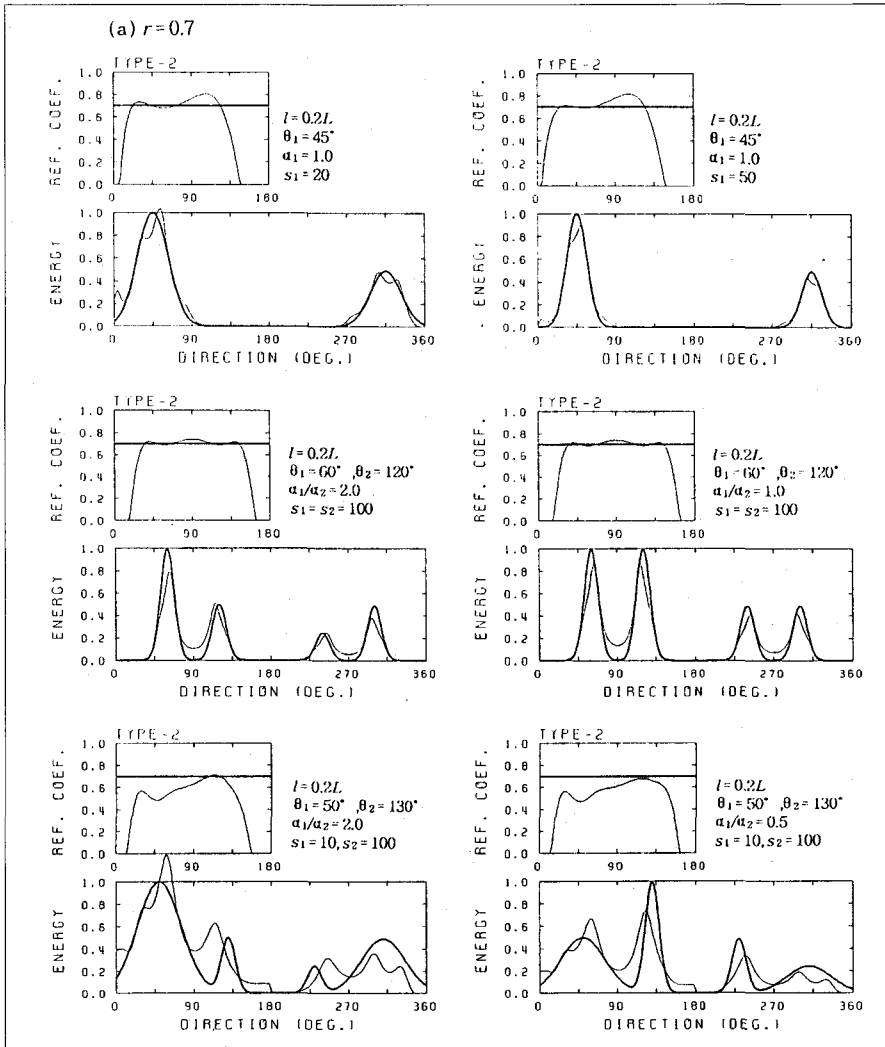
계수의 산정 정도가 크게 저하됨을 알 수 있다. 오 등(1992)의 연구 결과에 의하면 반사파가 없는 파랑장에 대하여 기존의 확장최우법을 3성분 배열(TYPE 1과 TYPE 4)에 적용하면 비교적 양호한 방향분해능을 갖는 추정치를 얻을 수 있다. 그러나

반사파를 무시할 수 없는 경우에는 구하여야 할 미지수에 반사계수가 추가되므로 관측 파동량의 수를 증가시켜야만 방향분해능의 정도를 향상시킬 수 있다.

반사면에 수직으로 설치된 선형배열(TYPE 5)은 90°의 주기를 갖는 결과를 보여주고 있는데 이는 이 배열이 입사각 0°-90°의 파랑과 90°-180°의 파랑을 동일한 것으로 인식하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 파랑이 45°와 135°의 방향으로 동시에 입사하는 경우 이 파랑을 분해할 수 없다. 한편, 반사면



<그림 6> 반사면과 계기배열간의 거리에 따른 6성분선형배열의 반사파 분해능 (굵은선:설정치, 가는선:MEMLM 추정치) (a)  $s=10$



(그림 7) 여러가지 형태의 방향분포함수에 대한 4성분성형배열의 반사파 분해능 (굵은선:설정치, 가는선:MEMLM 추정치) (a)  $r=0.7 \sin\theta$

과 평행한 선형배열(TYPE 6)은 방향집중도에 관계없이 반사계수 산정에서 정도가 가장 낮은 결과를 보여주고 있다.

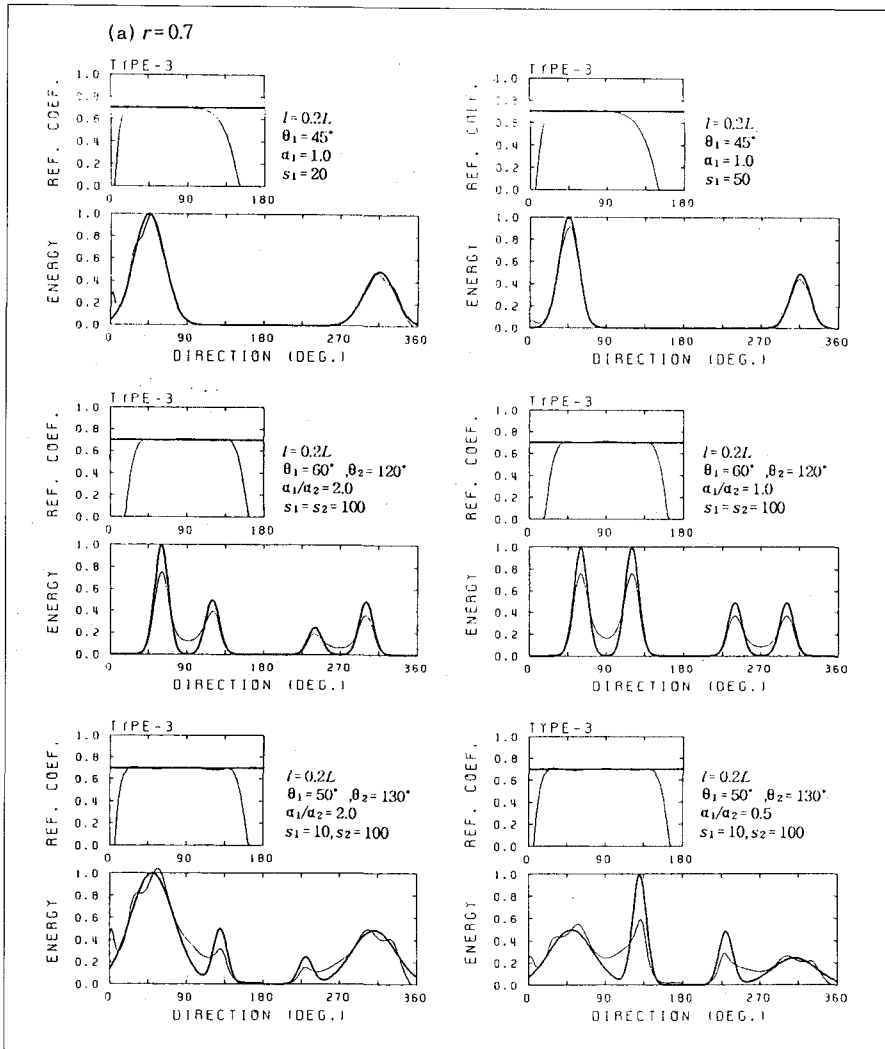
그림 4로부터 반사파가 현저한 파동장의 방향스펙트럼 분석 및 반사계수 선정을 위

해서는 수정확장최우법을 적용하는 경우 4성분 이상의 평면배열을 사용하는 것이 바람직하다고 생각된다. 따라서 이제부터는 성형배열(TYPE 2와 TYPE3)을 반사파 해석능력의 검토 대상으로 한다.

그림 5와 그림 6은 각각 4

성분성형배열 (TYPE 2)과 6성분성형배열 (TYPE 3)을 반사면으로 부터  $l = 0.0, 0.2L, 0.4L, 0.6L, 0.8L, 1.0L$  ( $l$ : 반사면과 계기간의 최단거리,  $L$ : 파장)만큼 떨어지게 배치한 경우 수정확장최우법에 의한 반사파의 추정 결과이다. 반사면으로 부터 계기배열을 멀리 설치할수록 방향분해능과 반사계수의 산정정도가 현저히 떨어짐을 알 수 있다. 특히 반사파의 분해능은 방향분포함수의 유효폭이 작을수록 반사면과 계기배열간의 거리에 민감한 반응을 보이고 있으며 계기가 멀리 설치될

수록 의사첨두가 많이 나타난다. 이러한 의사첨두는 실제의 첨두보다 훨씬 예리한 형태를 보이므로 쉽게 구별할 수 있다. 6성분성형배열 (TYPE 3)에 대하여 방향집중도가 크면 반사면으로 부터 계기배열의 설치 위치를  $l =$



〈그림 8〉 여러가지 형태의 방향분포함수에 대한 6성분성형배열의 반사파 분해능(굵은선:설정치, 가는선:MEMLM 추정치) (a)  $r=0.7 \sin\theta$

L로 증가된 경우 반사계수에는 의사첨두가 발생하였으나 방향스펙트럼에서 보는 바와 같이 반사파의 분해는 양호한 것으로 나타났는데, 이는 반사계수에서 나타나는 의사첨두의 위치에서 입사파의 에너지가 유효(significant)하지

않기 때문이다. 그러나 방향분포함수의 유효폭이 작으면 반사벽과 계기간의 거리를  $l = 0.2L$  이내로 제한하는 것이 바람직하다고 사료된다.

그림 7은 반사계수가  $r=0.7\sin\theta$ 로 주어지는 경우 여러가지 형태의 입사파 방향

분포함수에 대하여 4성분성형배열에 의한 반사파의 해석 결과를 보여 준다. 계기배열의 설치 위치는 반사면으로부터 0.2L이다. 이 그림으로부터 반사계수의 산정 정도는 반사계수의 형태보다는 입사파 방향분포의 형태(s)에 크게 의존한다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 7에서 계기의 배열을 6성분성형배열로 바꾼 것이다. 그림 7과 비교하면 반사파의 분해능이 크게 개선되었다. 특히 입사파의 에너지가 유효한 구간에서의 반사계수는 검토된 모든 경우에서 거의 완벽하게 재현되고 있음을 볼 수 있다. 그러므로 6성분성형배열을 사용하면 방향분포함수의 재현 정도는 다소 낮더라도 반사계수는 매우 정확하게 산정할 수 있다고 사료된다.

## 6. 결론 및 토의

본 연구에서 입사파와 반사파가 공존하는 파랑장의 방향 스펙트럼과 임의의 두 파동량 간의 cross 스펙트럼의 관계식을 적분식의 형태로 유도하고 위상간섭의 영향을 검토하였다. 그리고 수면변위 자료에만 적용할 수 있는 Isobe *et al.* (1984)의 수정최우법(M-MLM)을 일반적인 파동량에도 적용할 수 있도록 확장한 수정확장최우법(MEMLM)에 의한 방향스펙트럼과 반사계수의 산정식을 도출하고, 수치모의 실험을 통하여 MEMLM의 추정 정도를 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 반사파가 현저한 파랑장의 cross-power 스펙트럼은 입사파 성분, 반사파 성분 그리고 입사파와 반사파의 위상이 독립이 아닌 데서 기인하는 위상간섭에 의한 성분으로 구성된다.

2) 위상간섭에 의한 성분의 역할은 반사면에서 가까울수록 그리고 방향분포함수의 유효폭이 작을수록 중요해진다.

3) 반사파의 분해능은 방향집중도계수( $s$ )와 관측파동량의 갯수가 증가할수록 향상된다.

4) 파동량 관측계기의 배치 방법에 따라 반사파의 분해능이 크게 좌우되며 점배열과

선형배열 보다는 평면배열이 반사파 분해에 효과적이다. 특히 점배열의 결과에는 의사첨두가 나타나고, 반사면에 수직인 선형 배열은 입사각이  $0^\circ-90^\circ$ 인 파랑과  $90^\circ-180^\circ$ 인 파랑을 구별하지 못하며, 반사면에 평행한 선형배열은 반사계수 산정의 정도가 가장 낮은 것으로 나타났다.

5) 반사파의 분해능은 반사면과 계기배열간의 거리에 매우 민감한 것으로 나타났으며 그 거리는 0.2 파장 이내로 제한하는 것이 바람직하다. 거리가 0.4 파장 이상이 되면 많은 의사첨두가 발생하며 반사계수 산정의 정확도도 현저히 감소한다.

일반적으로 반사파의 분해능은 방향분포함수의 형태( $s$ ), 관측계기의 갯수, 계기의 배치 방법, 반사면과 계기배열간의 거리( $l$ ) 및 반사파의 분석법 등에 따라서 결정된다. 앞에서 고찰한 바와 같이 선형배열의 경우 방향집중도계수와 관측계기의 갯수에 관계없이 반사면과 계기배열간의 거리는 파장의 0.2배 이내로 제한하는 것이 바람직하지만, 실제 바다의 파랑에는 여러가지 파장을 갖는 파랑들이 중첩되어 있고  $l$ 은 파장의 함수이므로  $l$ 을 일의적으로 결정하기가 곤란하다. 즉,  $l$ 을 긴 파장을 기준으로 하

여 결정하면 파장이 짧은 파랑의 반사파는 분해하기 힘들 것이며, 반대로 짧은 파장을 기준으로 하면 반사면과 계기배열간의 간격이 좁아지기 때문에 방파제 등 반사구조물에 바짝 붙어서 선박을 사용하여 계기배열 설치해야 하는데 이는 사실상 불가능하다. 그러나 태풍 등 폭풍에 의한 풍파의 경우 에너지 스펙트럼은 대부분 그 유효폭이 협소하기 때문에 현실적으로는 첨두주파수의 파장으로 부터  $l$ 을 결정하여도 충분하다고 사료된다. 폭풍시 첨두주파수가  $f_p=0.1$  Hz, 반사구조물 주변의 평균 수심이  $h=10$ m라고 가정하면 선형파 이론에 의한 파장은 약  $L=140$ m이므로 계기배열은 반사면으로 부터  $l=28$ m ~  $30$ m이므로 물결이 잔잔한 경우 조심스럽게 반사구조물 근처에 계기배열을 설치할 수 있다고 생각된다.

방향집중도계수는 반사파의 분해능에 큰 영향을 미치는 요소이다. Mitsuyasu *et al.* (1975)은 cloverleaf buoy에 Longuet-Higgins *et al.* (1963)의 방법을 적용하여 방향스펙트럼과 방향집중도계수를 계산하고 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$s = s \max(f/f_b)^5 \quad f \leq f_b$$

$$s \max(f/f_b)^{-2.5} \quad f \geq f_b \quad (50)$$

그러므로 방향집중도계수는 에너지 스펙트럼의 첨두주파수에서 최대가 된다. 한편, Goda(1985)는 풍파의 경우  $S_{max}=10$ , 파형경사가 큰 너울의 경우  $S_{max}=25$  그리고 파형경사가 작은 너울의 경우에는  $S_{max}=75$ 라고 하였다. 한편, 작은 폭풍시 강릉 경포대 해상에서 관측한 자료를 최대엔트로피법으로 분석한 결과에 의하면  $S_{max}$ 는 약 10이고 방향집중도계수는 식(50)의 경향을 따르는 것으로 나타났다(오동, 1992). 그러므로 현실적으로 대부분의 경우에 방향집중도계수는 10 이하로 간주하는 것이 타당하며, 이에 따라 적합한 계기배열을 선정하여 반사파의 관측에 활용하는 것이 바람직하다고 생각된다. 앞에서 논의한 수치모의실험 결과를 종합하여 생각하면 성형배열을 사용하는 것이 가장 좋다. 그러나 현재 상용화된 계기배열은 3 성분 점배열(국내에서 사용 가능한 것은 네덜란드 Datawell사의 directional waverider buoy와 미국 Sea Data사의 PUV 계기 등이다) 뿐이므로 6성분성형배열을 비롯한 평면배열은 독립된 여러 관측계기를 조합하여 직접 제작하여야 한다.

계기배열의 제작에서 가장 중요한 점은 모든 관측 자료

가 동시성을 가져야 한다는 것이다. 이는 파랑의 방향이 관측파동량의 power 스펙트럼 보다는 서로 다른 파동량 간의 cross 스펙트럼에 지배되기 때문이다. 그리고 자료 저장 장치(Data logger)의 용량도 계기배열의 제작에서 반드시 고려되어야 한다. 여러가지 상황을 종합해 볼 때 현 시점에서는 4성분성형배열을 제작하여 반사파 관측에 활용하는 것이 가장 현실성이 크다고 생각된다. Data logger의 용량이 크게 증대되고 6개 이상의 계기를 동시화할 수 있는 기술이 확보된다면 6성분성형 배열도 활용할 수 있다.

반사파의 분석법으로는 수정확장최우법, 확장수정 Bayesian법(EMBM) 그리고 수정 확장 최대엔트로피법(MEMEP) 등이 있으나 현재 가용한 방법은 수정확장최우법 뿐이다. 따라서 EMBM과 MEMEP를 활용하여 반사파를 분해할 수 있는 software를 개발하여 각 방법을 서로 비교분석하여 실무에서 가장 합리적인 방안을 강구하여야 한다.

현장의 자료로부터 반사파를 해석하기 위해서는 반사파의 분석 software와 관측자료의 동시성과 충분한 용량의 자료저장장치 등 hardware

의 개발이 필수적이다. 저자 등에 의해 분해능 향상을 위한 분석 software가 지속적으로 연구되고 있으며 또한 한국해양연구소 4개의 수압식 파고계로 구성되는 배열의 동시성 기술과 자료저장장치 제작에 관한 기술을 보유하고 있으며 이의 성능 개선을 위한 연구가 수행되고 있다. ㉑

**쾌적하고 활력있는  
어항어촌건설**