

비대칭성을 고려한 방향 스펙트럼식

Directional Wave Spectrum Equations Considering Asymmetry

정재상*, 강규영**, 이창훈***, 조용식****

Jae-Sang Jung, Kyu-Yung Kang, Changhoon Lee, Yong-Sik Cho

요 지

본 연구에서는 파랑의 방향에 따른 비대칭성을 고려한 방향 스펙트럼 식을 새로 제안하였다. 심해에서 생성된 다방향 불규칙 파랑이 등수심선에 대해 일정한 각도를 가지고 입사하는 경우, 각 방향의 파랑 성분의 굴절각의 차이에 의해 입사각에 대한 비대칭성이 발생하였다. 파랑의 굴절에 대해서는 Snell의 법칙을 이용하고 천수를 고려하여 해석적으로 계산하였으며, 이 결과와 새로 제안된 방향스펙트럼 식을 이용한 결과를 서로 비교하였다. 그 결과 비대칭성이 강한 천해역에서는 기존의 스펙트럼식에 비해 3 배 이상 정확한 값을 재현하였다.

핵심용어 : 비대칭성, 방향 스펙트럼식, 다방향 불규칙파랑, 굴절

1. 서 론

심해에서 생성된 파랑은 다양한 주기와 파향을 가지고 천해역으로 전파해 온다. 일반적으로 너울(swell)은 심해역에서 바람에 의해 생성되며, 주 파향을 기준으로 좌우 대칭인 형태의 방향 스펙트럼으로 표현할 수 있다. 현재 우리나라에서는 Mitsuyasu 등(1975)에 의해 제안된 방향스펙트럼을 가장 많이 사용하고 있다. Mitsuyasu 타입의 방향 스펙트럼은 좌우 대칭이며, 첨두주파수에서 방향에 대한 파랑의 에너지 집중도가 가장 큰 특성을 갖는다.

심해에서 주파향이 등수심선에 일정한 각도를 가지고 비스듬히 입사하는 경우 굴절이 발생하게 되며, 이로 인해 파랑의 방향에 대한 대칭성이 깨어지게 된다. 또한 서로 주기가 다른 파랑의 경우, 장주기파의 경우 일찍 꺾이게 되고 단주기파의 경우는 보다 천해역에서 늦게 꺾이게 된다(이창훈 등, 2003). 이와 같은 현상에 의해, 천해역에서의 다방향 불규칙파랑 스펙트럼은 장주기에서 더욱 큰 비대칭성이 생기며, 단주기에서는 약한 비대칭성이 생기거나 대칭의 형태를 가지게 된다. 하지만, 현재까지 제안된 방향 스펙트럼식은 이와 같은 비대칭을 재현할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 Mitsuyasu 등(1975)에 의해 제안된 방향 스펙트럼식을 바탕으로 하고, 새로운 비대칭 계수 η 를 도입하여, 비대칭을 고려할 수 있는 방향스펙트럼 식을 새로 제안하였다. 그리고, 먼바다에서 천해역으로 전파하는 파랑에 대해 굴절 및 천수를 고려해 해석적으로 계산하였으며, 본 연구에서 제안된 식 및 Goda와 Suzuki(1975)에 의한 결과를 비교하여 새로 제안된 식의 우수성을 입증하였다.

2. 비대칭성이 고려된 방향분산함수

본 연구에서 비대칭성이 고려된 방향분산함수를 제안하여 다방향 불규칙 파랑의 방향 스펙트럼을 사용하여 실제

* 정회원 · 현대산업개발 토목설계팀 항만파트 사원 · E-mail : fingon@hyundai-dvp.com
** 한양대학교 토목공학과 석사과정
*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 부교수 · E-mail : cleee@sejong.ac.kr
**** 교신저자, 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 · E-mail : ysc59@hanyang.ac.kr

의 자연 현상을 더 정확히 표현하고자 한다. 비대칭성이 고려된 방향분산함수는 다음과 같다.

$$G(f;\theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \xi \right) \quad (1)$$

여기서,

$$\xi = \begin{cases} \frac{1}{\eta} & : \theta \geq \theta_p \\ \eta & : \theta \leq \theta_p \end{cases} \quad (2)$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \xi \right) d\theta \right]^{-1} \quad (3)$$

식 (2)에서 η 는 비대칭계수로서 그 값이 1이면 주 방향 θ_p 를 기준으로 분산의 정도가 좌우 방향의 파랑이 대칭이고, 1보다 작으면 주 방향을 기준으로 오른쪽 방향의 파랑이 왼쪽 방향의 파랑에 비해 분산의 정도가 더 작고, 1보다 크면 오른쪽 방향의 파랑이 왼쪽 방향의 파랑에 비해 분산의 정도가 더 크다. Mitsuyasu 등이 제안한 식은 본 연구에서 제안된 식 (1)의 $\eta=1$ 인 경우에 해당된다.

그림 1에 비대칭계수 η 의 변화에 따른 방향분산함수 $G(f;\theta)$ 의 변화되는 정도를 도시하였다. η 가 1보다 작은 경우 오른쪽 방향으로의 분산의 정도가 왼쪽에 비해서 더 작고, 1보다 큰 경우 그 반대로 됨을 볼 수 있다.

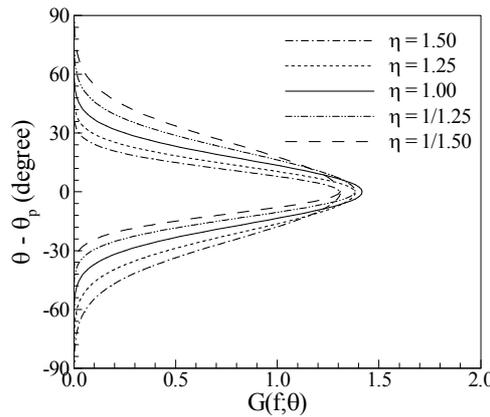


그림 1. 비대칭계수 η 에 따른 방향분산함수 $G(f;\theta)$ 의 변화

3. 수치실험

$H_{1/3} = 5m$, $T_p = 10sec$, $s_{\max} = 10$ 인 다방향 불규칙 파랑의 주 방향이 100m 수심에서 해안선에 직각인 선에 60° 로 각도로 전파하는 경우 수심이 얕아지면서 굴절되는 현상을 수치적으로 모의하였다. 먼저 주파수 및 방향 스펙트럼의 각 성분파를 Snell 법칙을 사용하여 해석적으로 예측하였다(이창훈 등, 2003).

본 연구에서 주파수 스펙트럼으로 다음과 같은 JONSWAP 스펙트럼을 사용하였다(Hasselmann 등, 1973; Goda, 2000).

$$S(f) = \beta_J H_{1/3}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp \left[-1.25 (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[- (T_p f - 1)^2 / 2\sigma^2 \right]} \quad (4)$$

그림 2에 100m 수심에서 시작되는 다방향 스펙트럼을 도시하였다. 그 제원은 $H_{1/3} = 5m$, $T_p = 10sec$, $s_{\max} = 10$ 이다.

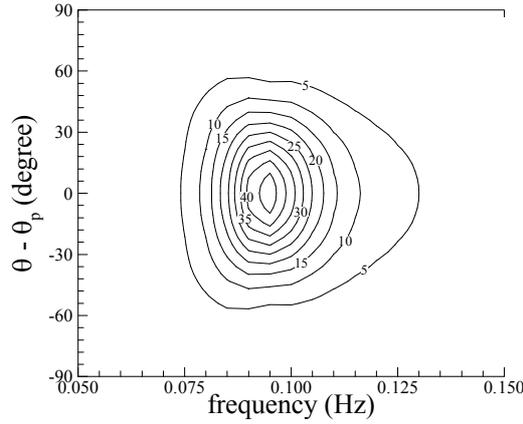


그림 2. 심해에서의 다방향 불규칙파랑 스펙트럼 ($H_{1/3} = 5m$, $T_p = 10sec$, $s_{max} = 10$)

다방향 불규칙 파랑의 주파수 및 방향 스펙트럼 $S(f; \theta)$ 는 각 주파수 f 및 방향각 θ 성분의 에너지 밀도를 의미한다. 각 성분파의 파고 H 는 스펙트럼과 다음의 관계에 있다.

$$H = \sqrt{8 S(f) G(f; \theta) df d\theta} = \sqrt{8 S(f; \theta) df d\theta} \quad (5)$$

먼저 먼 바다에서 파랑의 입사각이 주어졌을 때 수심의 변화에 따른 파랑의 굴절의 정도를 계산하였다. 다음 식으로 표현된 Snell의 법칙을 이용하여, 각 수심에서 파랑의 입사각 θ 를 구하였다.

$$\frac{\sin \theta_1}{C_1} = \frac{\sin \theta_2}{C_2} \quad (6)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{\omega}{k_1}, \quad C_2 = \frac{\omega}{k_2} \quad (7)$$

위 식에서 θ_1 과 θ_2 는 각각 수심이 h_1 , h_2 인 곳의 입사각을 의미하며, C_1 과 C_2 는 그 수심에 대응되는 각각의 위상속도를 의미한다. 또한, 각 성분파가 먼 바다에서 해안선으로 전파해오면서 굴절 및 천수변형에 의한 파고의 변화를 다음과 같이 계산하였다.

$$H_2 = K_s K_r H_1 \quad (8)$$

여기서 K_s 는 천수계수, K_r 은 굴절계수, C_y 는 군속도이다.

이상의 해석적인 방법을 통해 다방향 불규칙파랑의 굴절에 대해 정확해를 구하였으며, 이 결과와 본 연구에서 제시한 스펙트럼 식을 통해 근사화한 값 및 Goda와 Suzuki(1975)의 결과를 비교 검토하였다. 스펙트럼은 다음식을 통해 퍼센트 오차가 최소가 되는 값으로 근사화하였다. 주파수는 첨두주파수만을 고려하였다.

$$E_p = \left| \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} (Hn_i^2 - Ha_i^2)}{\sum_{i=1}^{i_{max}} Ha_i^2} \right| \times 100 (\%)$$

여기서, E_p 는 퍼센트오차, Hn 과 Ha 는 각각 스펙트럼 식에 의한 파고 및 해석적 방법에 의한 파고이다. 그리고, 아래첨자 i 는 각 방향 성분의 번호를 나타내며, i_{max} 는 파랑 방향성분의 수를 나타낸다.

해석적 방법과 본 연구에서 제시한 비대칭 방향스펙트럼에 의한 방법, 그리고 Goda와 Suzuki(1975)에 의한 결과에 대해서는 그림 3에서 나타내었다. 그림 3은 심해에서 S_{max} 가 10이고, 입사각이 60도인 파랑을 수심 10m 지점까지 ray 해석을 하여 계산된 방향 스펙트럼을 표현하였다. 해석 결과 비대칭을 고려한 경우가 Goda와 Suzuki에 의한 결과보다 더욱 일치하는 결과를 보였다. 그림 4는 상대수심별 S_{max} 의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 4를 통

해 비대칭을 고려할 경우가 그렇지 않은 경우보다 S_{max} 가 크게 계산됨을 알 수 있다.

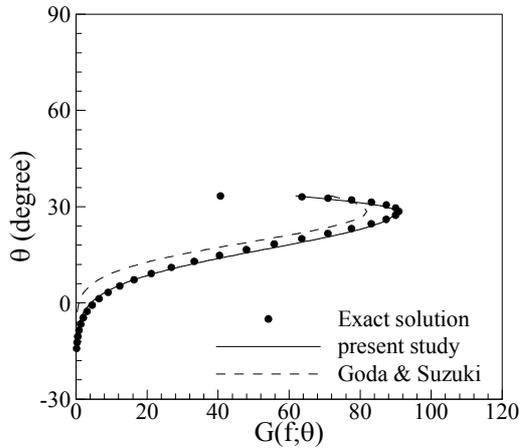


그림 3. 수심 10m 지점에서의 방향스펙트럼

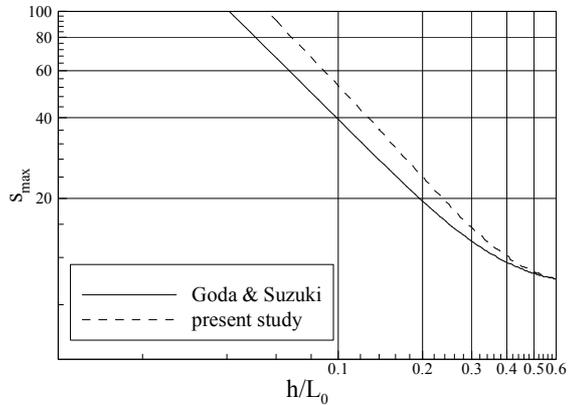


그림 4. 상대수심 변화에 따른 S_{max} 의 변화

4. 결 론

본 연구에서는 방향에 대한 비대칭을 고려할 수 있는 새로운 형태의 비대칭 다방향불규칙파랑 스펙트럼 식을 제안하였다. 새로 제안된 식은 Goda와 Suzuki(1975)에 의한 대칭 방향스펙트럼 식에 의한 결과와 Snell의 법칙을 이용한 정확해와 비교하였다. 다방향 불규칙파랑이 등수심선에 일정한 각도를 가지고 입사할 경우 각 방향 성분을 구성하는 파랑의 굴절각이 달라져 비대칭이 발생하였다. 따라서, 비대칭을 고려한 방향 스펙트럼식이 Goda와 Suzuki(1975)에 의한 결과보다 정확해와 더욱 일치하는 결과를 보여주었다.

감 사 의 글

본 연구는 해양수산부(KSGP)에 의해 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. 이창훈, 정재상, 조용식(2003). 불규칙 파랑의 굴절, 대한토목학회논문집, 제23권 제6B호, pp. 615-619.
2. Goda, Y(2000). Random Seas and Design of Maritime Structures, World Scientific.
3. Goda, Y. and Suzuki, Y(1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum, Tech. Note Port and Harbour Res. Inst., No. 230.
4. Hasselmann, K. et al.(1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsche Hydr. Zeit, Reihe A (8°), No. 12.
5. Mitsuyasu, H. et al.(1975). Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy, J. Physical Oceanography, Vol. 5, No. 4, pp. 750-760.