

수중둔덕의 거동특성 해석을 위한 수학적 모형

Mathematical Model for Analysis on the Behaviours of Submerged Mound Constructed by the Dredged Materials

최한규* 이오성**
Choi, Han-kyu Lee, Oh-Sung

Abstract

The numerical model predicting the behaviours of submerged mound constructed by dredged material is developed in this paper. The model is based on the Bailard's sediment transport formula, Stokes' second-order wave theory and the sediment balance equation. Nonlinear partial differential equation which is the same form as convection-dispersion equation which represents change of bed section can be obtained by substituting sediment transport equation for equation of sediment conservation. By this process, the analytical solution by which the characteristic of the behaviours of submerged mound can be estimated is derived by probably combining the convection coefficient and the dispersion coefficient governing the behaviours of submerged mound and the probability density function representing the wave characteristics. The validity of the analytical solution is verified by comparing the analytical solution which is assumed to estimate the movement rate of submerged mound by bed-load with the field data of the past and its characteristic is analyzed quantitatively by obtaining the mean of the dispersion coefficient representing the extent of the decrease rate of the submerged mound height.

키워드 : 수중둔덕

Keyword : *Submerged Mound*

1. 서론

현재 해안선의 침식과 관련하여 연구된 방지대책은 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 표사가 대상영역으로 이동하여 나가는 방향에 인위적인 구조물을 건설하여 강제적으로 표사의 이동을 차단하는 방법이다. 이와 같은 목적으로 건설되는 구조물에는 이안제(detached breakwater)나 방사제

(groyne) 등이 있다. 다른 하나는 침식된 해안선에 대상 지역의 재질과 유사한 모래 등을 직접적으로 공급하는 방법이다(beach nourishment). 그러나 이와 같은 방법들은 항구적인 방법이 아니라 단기간의 보호대책일 뿐이다. 왜냐하면 구조물을 건설하건 해안선에 모래를 직접 공급하건 일정시간이 지나면 그 이전의 상태로 되돌아가려고 하기 때문이다. 즉, 주변지역의 환경을 근본적으로 변환시켜 자연 스스로 새로운 평형상태로 진행하도록 유도하는 방법이 아니기 때문이다. 한편 표사가 항로나 항만 입구에 과잉 퇴적하는 문제를 해결하는 방법

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** (주)동일건설

은 현재로서는 퇴적된 표사를 준설하는 것이다. 매년 이와 같은 목적으로 많은 표사가 준설되지만 처리가 곤란할 뿐만 아니라 준설토를 효과적으로 이용할 수 있는 방법이 강구되지 못하고 있다. 따라서 준설토를 효과적으로 이용할 수 있고, 해안선의 침식과 퇴적을 동시에 해결할 수 있는 환경 친화적인 방법이 요구되고 있는 실정이다.

비교적 최근에 몇몇의 연구자들에 의하여 수중둔덕의 시간에 따른 이동과 관련된 수치적인 해석이 이루어졌다. 먼저 Douglass(1995)는 표사의 이동이 주로 파랑의 비선형성과 관련된 하상 근처의 흐름에 의하여 이루어진다는 가정하에 해석을 하였다. 표사이동량식은 Bailard(1981)에 의하여 제시된 개념적인 모형(energetic model)을 사용하였다. 결과를 현장의 관측자료와 비교하여 수치모형의 적용성을 검증하였다. 그러나 표사이동식을 전개하는 과정에서 단순화하였을 뿐만 아니라 부유사량(suspended load)의 영향을 고려하지 못하였다. Scheffner(1996)는 수중둔덕의 이동을 해석하기 위하여 매우 복잡한 수치적 해석방법을 이용하였다. 이와 같은 수치모형은 외해의 시간에 따른 광범위한 파랑자료를 반드시 필요로 하기 때문에 현실적으로 실무에서 이용하기에는 많은 어려움이 따른다. 왜냐하면 대부분의 현장에서 장시간에 걸쳐 시간에 따른 파랑 자료를 얻는다는 것이 현실적으로 불가능하기 때문이다. 따라서 바람자료로부터 인위적으로 발생시킨 파랑자료를 이용할 수 밖에 없다. 또한 표사이동량식은 하천에서 표사의 이동을 해석하기 위하여 제안된 식(tractive force model)을 사용하였다. 따라서 파랑의 특성을 고려하기 위해서는 여러 가지 연관식들이 필요하게 된다. 마지막으로 Lee(1998)는 Douglass(1995)가 고려하지 못한 부유사량을 포함하는 표사이동량식을 이용하여 수중둔덕의 이동율을 장시간 예측할 수 있는 유한차분모형을 개발하였다. 결과를 현장관측자료와 비교하여 수치모형을 검증하였다. 검증 결과 수치모형은 잠식성 둔덕과 안정성 둔덕 모두에 적용될 수 있음을 확인하였다. 또한 Douglass(1995)의 수치모형에서는 재현할 수 없었던 이류와 확산현상(convection-diffusion processes)이 올바르게 재현되었다. 이류와 확산현상은 이미 현장관측에서 확인된 수중둔덕의 거동특성이다. 수치모형을 이용하면

보다 정확하게 수중둔덕의 장래 거동특성을 예측할 수 있지만 현장의 실무자들이 손쉽게 이용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 현장 실무자들이 현장에서 능동적으로 대처할 수 있는 간편식의 개발이 여전히 요구된다.

본 연구의 목적은 수중둔덕의 거동을 지배하는 인자인, 물리적 환경과 준설토의 표사성질 그리고 수중둔덕과 건설할 공간과의 국지적 결합구조 등을 고려하여 소류사에 의한 수중둔덕의 거동을 예측할 수 있는 해석해를 구하는 것이다. 이를 위해, 표사의 이동을 일으키는 외력은 파랑의 비선형성에 의하여 유발되는 하상에서의 흐름이라고 가정하였고, 표사의 이동량은 Bailard(1981)에 의하여 제안된 개념적 모형을 사용하였다. 따라서 대상영역의 표사보존식에 표사이동량식을 대입하여 시간에 따른 해저면의 변동을 나타내는 이류-확산 방정식과 동일한 형태의 비선형 편미분방정식을 얻을 수 있었다. 이때 수중둔덕의 이동을 지배하는 이류계수와 정점의 감소정도를 지배하는 확산계수를 파랑 발생확률을 나타내는 파랑분포함수와 확률적으로 결합하여 수중둔덕의 이동율과 정점의 감소정도를 예측할 수 있는 해석해를 유도하였다. 수중둔덕의 이동율에 대하여 유도된 해석해는 과거의 현장 관측자료와 비교·분석하여 그 타당성에 대한 검증을 수행하였으며 또한, 수중둔덕 정점의 감소정도에 대하여 유도된 해석해는 그 특성을 정성적으로 해석하였다.

2. 수학적 모형의 구성

2.1 표사이동량 방정식

표사이동량은 파랑에 의하여 발생하는 외력과 표사의 저항력사이의 관계를 이용하여 단위시간 동안에 이동되는 표사량을 나타내는 척도로 이용된다. 수중단위 중량으로 Bailard(1981)에 의하여 제안된 부유사 효과를 무시한 소류사의 표사이동량은 다음 식 (2.1)과 같다.

$$\langle i_B \rangle = \rho c_f \frac{\epsilon_B}{\tan \phi} \langle |u|^2 u \rangle - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |u|^3 \rangle \quad (2.1)$$

여기서 i_B 는 수중 단위중량으로 표시된 표사이동량, ρ 는 해수의 밀도, c_f 는 하상의 마찰력과 관

련된 항력계수(drag coefficient), ϕ 는 표사의 내부마찰각, $\tan\beta$ 는 해저경사, u 는 파랑에 의하여 발생하는 하상의 흐름속도, 그리고 ϵ_B 는 소류사의 표사이동량 계수이다.

식 (2.1)은 물리적으로 파랑에 의하여 발생하는 흐름에 의한 외력과 표사의 저항관계를 나타낸 식으로 표사의 저항은 표사의 직경과 형상에 따른 형상계수와 표사 입자사이의 내부마찰각의 관계로 표시되었다. 따라서 식 (2.1)을 이용하여 표사량을 정량적으로 계산하기 위해서는 먼저 파랑에 의하여 발생하는 흐름의 크기를 산정하여야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 표사의 이동은 파랑의 비선형성에 의하여 발생하는 흐름(asymmetry orbital velocity)이라고 고려하였기 때문에 흐름의 관계식은 유한진폭과 이론(finite-amplitude)을 사용하면 다음 식 (2.2)와 같이 하상에서의 흐름 함수식을 얻을 수 있다(Dean과 Dalrymple, 1984).

$$u = A \cos(kx - \sigma t) + B \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2.2.a)$$

$$A = \frac{Hgk}{2\sigma \cosh kh} \quad (2.2.b)$$

$$B = \frac{3H^2 \sigma k}{16 \sinh^4 kh} \quad (2.2.c)$$

여기서 H 는 파고, σ 는 각주파수(angular frequency), k 는 파수(wave number), h 는 평균해수면에서 하상까지의 수심(water depth), g 는 중력가속도를, 그리고 x , t 는 각각 공간과 시간을 나타내는 독립변수이다. 그러므로 식 (2.1)의 표사량 식에서 속도 모멘트(velocity moment)는 식 (2.2)와 다음 식 (2.3)을 이용하여 주기평균하면 정량화될 수 있다.

$$\langle \quad \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T (\quad) dt \quad (2.3)$$

$u_0 = A \cos(kx - \sigma t)$ 과 $u_1 = B \cos 2(kx - \sigma t)$ 라는 새로운 변수와 $|u_1/u_0| < 1$ 이라는 조건하에서 식 (2.1)의 속도모멘트는 다음 식 (2.4)와 같이 확장될 수 있다.

$$|u|^2 u = |u_0|^2 u_0 + 3u_1 |u_0|^2 + 3u_0 u_1^2 + u_1^3 \quad (2.4.a)$$

$$|u|^3 = |u_0|^3 + 3u_0 u_1 |u_0| + 3u_1^2 |u_0| + u_1^3 |u_0|/u_0 \quad (2.4.b)$$

따라서 식 (2.4)를 식 (2.3)에 대입하고, 적분하면

다음 식 (2.5)를 얻을 수 있다.

$$\langle |u|^2 u \rangle = \frac{3}{4} A^2 B \quad (2.5.a)$$

$$\langle |u|^3 \rangle = \frac{4}{3\pi} A^3 + \frac{14}{5\pi} AB^2 \quad (2.5.b)$$

한편, 식 (2.2.a)의 우변의 두 번째 항은 파랑의 비선형성에 의하여 발생하는 흐름의 크기를 나타낸 것이다. 즉, 우변의 첫 항만에 의해서는 표사가 이동되지 않는다. 왜냐하면 표사가 동요는 하지만 그 자리에서 앞으로 진행하다가 위상이 바뀌면 다시 뒤로 이동하는 과정을 반복하기 때문이다. 그러나 두 번째 항을 고려함으로써 첫 항에서 동요된 표사가 후속되는 외력인 두 번째 항에 의하여 해안선쪽이나 외해쪽으로 이동된다. 그러므로 표사가 해안선쪽이나 외해쪽으로 이동된다는 조건하에 식 (2.5)의 결과들을 식 (2.1)에 대입하면 다음 식 (2.6)을 얻을 수 있다.

$$\langle i_B \rangle = \rho c_f \frac{\epsilon_B}{\tan \phi} \left[\frac{3}{4} A^2 B - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \left(\frac{4}{3\pi} A^3 + \frac{14}{5\pi} AB^2 \right) \right] \quad (2.6)$$

식 (2.6)은 한 주기에 대하여 평균된 수중단위중량으로 표시된 소류사의 표사량 방정식이다. 따라서 단위시간당 체적으로 표시된 소류사의 표사이동량은 다음 식 (2.7)을 이용하여 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{\langle i_B \rangle}{(\rho_s - \rho) g a'} \quad (2.7)$$

여기서 ρ_s 는 하상 표사의 밀도, a' 는 표사 입자사이의 공극이다. 따라서 식 (2.6)을 식(2.7)에 대입하면 단위시간당 표사이동량을 다음 식 (2.8)과 같이 얻을 수 있다.

$$Q = c_B \left\{ \frac{3}{4} A^2 B - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \left(\frac{4}{3\pi} A^3 + \frac{14}{5\pi} AB^2 \right) \right\} \quad (2.8.a)$$

$$c_B = \frac{c_f \epsilon_B}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) g a' \tan \phi} \quad (2.8.b)$$

그러므로 식 (2.8)을 이용하면 단위시간당 표사의 이동율을 구할 수 있다. 또한 식 (2.8)을 보면 표사이동량이 파랑의 특성과 관련된 함수임을 쉽게 알 수 있다. 즉, 파고의 크기에 직접적으로 비례한다는 사실을 알 수 있다. 다른 변수인 주기와 파장 그리고 수심의 관계는 분산관계식으로 연관

된다. 따라서 파고가 크면 클수록 많은 표사가 이동될 것이라는 사실을 예측할 수 있다.

2.2 수중둔덕의 거동에 관한 지배방정식

전 절에서 얻어진 단위시간당 표사이동량인, 식 (2.8)을 이용하여 수중둔덕의 이동량을 예측하기 위해서는 대상영역에 적용될 수 있는 지배방정식을 유도하여야 한다. 지배방정식의 유도는 단위시간동안에 대상영역으로 유입되는 표사량과 대상영역을 통하여 유출되는 표사량의 변화는 대상영역에서 단위 시간동안 발생하는 수심의 변화와 같다는 표사보존식에서 시작된다. 이와 같은 표사보존 관계를 시간에 따른 수심의 변화와 표사이동량의 공간 변화의 함수로 다음 식 (2.9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad x_0 \leq x \leq x_1, \quad t \geq 0 \quad (2.9)$$

여기서 x 는 해안선에 직각방향으로의 공간상의 변화를 나타내는 독립변수이다. 그러므로 식 (2.8)을 공간에 대하여 미분한 후 식 (2.9)에 대입하면 다음 식 (2.10)을 얻을 수 있다. 유도과정에서 주의해야 할 것은 수심이 공간과 시간의 함수라는 사실이다. 따라서 연결미분(chain rule)을 사용해야 한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + C \frac{\partial h}{\partial x} - D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0, \quad x_0 \leq x \leq x_1, \quad t \geq 0 \quad (2.10)$$

이때 계수 C 와 D 는 다음 식 (2.11)과 같이 정의된다.

$$C = -\frac{3c_B}{4} \left(A^2 \frac{\partial B}{\partial h} + B \frac{\partial A^2}{\partial h} \right) \quad (2.11.a)$$

$$D = \frac{c_B}{\tan \phi} \left(\frac{4}{3\pi} A^3 + \frac{14}{5\pi} AB^2 \right) \quad (2.11.b)$$

수학적으로 식 (2.10)은 쌍곡선형의 비선형 편미분방정식이다. 따라서 초기조건과 경계조건이 주어지면 임의의 수치해석 방법을 이용하여 해석할 수 있다. 또한 식 (2.10)은 이미 잘 알려진 이류-확산 비선형 방정식과 동일한 형태를 가지고 있다. 이류-확산방정식은 오염물질의 이송과 확산을 동시에 해석하는데 많이 이용되고 있다. 즉, 오염물질의 이동의 정도는 이류계수에 직접적으로 의존하고, 확산의 정도는 확산계수에 의하여 지배된다. 본 논문에서 해석하려는 수중둔덕의 이동과 관련하여 식 (2.10)을 물리적으로 해석하게 되면, 식 (2.11.a)

에 정의된 계수 C 의 크기에 따라 수중둔덕의 이동 정도가 결정될 것이고 또한 식 (2.11.b)에 정의된 D 의 크기에 따라서 수중둔덕 정점의 감소 정도가 결정될 것이다. 수중둔덕은 이동되면서 그 정점의 높이가 점차 감소되는 경향으로 변형될 것이라는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 이미 많은 현장관측에서 확인되었다. 따라서 본 연구에서 얻어진 지배방정식은 현장에서 관측된 수중둔덕의 거동특성을 올바르게 재현할 수 있다고 판단된다. 그러므로 이동과 감소정도를 동시에 해석하려는 경우는 식 (2.10)을 해석하여야 하지만 단지 수중둔덕의 이동율을 해석하는 경우에는 식 (2.10)을 풀지 않고도 평균 이동율을 쉽게 예측할 수 있다. 즉, 식 (2.11.a)가 파랑 특성과 관련된 함수로 표현되었으므로 파랑의 발생확률을 알게 되면 확률적으로 이동율의 기대치를 쉽게 구할 수 있다.

수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치 또한 마찬가지로 식 (2.11.b)가 파랑 특성과 관련된 함수로 표현되어 있으므로 파랑의 발생확률을 알게 되면 식 (2.10)을 풀지 않고도 평균 감소율을 쉽게 구할 수 있다.

3. 해석해의 유도

3.1 Rayleigh 분포함수에 의한 해석해

Rayleigh 파고 분포함수는 좁은 주파수영역에서 파고가 발생될 경우 비교적 간단한 식으로 파고의 발생을 올바르게 묘사할 수 있는 분포함수이다. Rayleigh 분포함수는 다음 식(3.1)과 같이 정의된다.

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} e^{-H^2/H_{rms}^2} \quad (3.1)$$

여기서 H_{rms} 는 평방자승평균(root-mean-square) 파고이다.

Rayleigh 분포는 정규분포와는 다르게 분포형태가 대칭이 아니라 양의 왜곡도(positive skewness)를 갖는다. 즉, 상대적으로 그 크기가 작은 쪽에서 많은 파고가 발생되고 있음을 알 수 있다. 따라서 임의의 지점에서 발생될 수 있는 파고분포는 식 (3.1)을 이용하여 예측할 수 있다.

한편, 수중둔덕의 이동율의 기대치를 구하기 위해서는 확률적 정의를 이용하여 식 (2.11.a)와 식

(3.1)을 다음 식 (3.2)와 같이 결합하면 된다.

$$E [C(T, h)] = \int_0^{\infty} p(H) C(H, T, h) dH \quad (3.2)$$

식 (2.11.a)를 전개하면 다음 식 (3.3)과 같이 쓸 수 있다.

$$C(H, T, h) = f_{CB}(T, h) H^4 \quad (3.3)$$

여기서, $f_{CB}(T, h)$ 는 분산관계식(dispersion relation-ship)을 이용하여 식 (2.11.a)를 주기와 수심만의 함수로 정의하면, 다음 식 (3.4)와 같이 정의된다.

$$f_{CB}(T, h) = \frac{9\pi^7}{g^3 T^7} \frac{c_f \epsilon_B}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) a' \tan \phi} \cdot \frac{(3 \cosh^2 kh - 1) \cosh kh}{\sinh^9 kh} \quad (3.4)$$

그러므로 식 (3.3)과 식 (3.1)을 식 (3.2)에 대입하면 다음 식 (3.5)를 얻을 수 있다.

$$E [C(T, h)] = \frac{2 f_{CB}(T, h)}{H_{rms}^2} \int_0^{\infty} H^5 e^{-H^2/H_{rms}^2} dH \quad (3.5)$$

따라서 식 (3.5)를 적분하면 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치를 다음 식 (3.6)과 같이 구할 수 있다.

$$E [C(T, h)] = 2 f_{CB}(T, h) H_{rms}^4 \quad (3.6)$$

식 (3.6)은 이동율 계수와 Rayleigh 파고분포함수만을 이용하여 유도된 해석해로, 수중둔덕이 건설된 그 지점에 발생될 수 있는 파고의 대표파고인, H_{rms} 를 알게 되면 수중둔덕의 이동율을 쉽게 구할 수 있도록 유도되었다. 즉, 임의의 수심에 수중둔덕을 건설했을 때 그 지역의 주기를 알게 되면 수중둔덕의 이동율은 식 (3.4)와 식 (3.6)을 이용하여 아주 쉽게 구할 수 있다. Rayleigh 분포함수에 의해 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치에 대하여 수심에 따른 이동율의 변화를 Fig. 3.1에 나타냈다. 이때 사용된 변수들은 Bailard(19-

81)가 식 (2.1)을 계산하기 위해 사용했던 값으로 $\rho_s/\rho = 2.65$, $c_f = 0.005$, $\epsilon_B = 0.21$, $a' = 0.64$,

$\phi = 32^\circ$ 를 사용했고 $H_{rms} = 1m$, $T = 10sec$ 라고 가정하였다. Fig. 3.1에서 볼 수 있는 바와 같이 Rayleigh 분포함수에 의하여 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치는 수심이 증가함에 따라 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다. 즉, 수중둔덕

의 이동율은 수중둔덕의 설치수심에 매우 민감하게 반응한다.

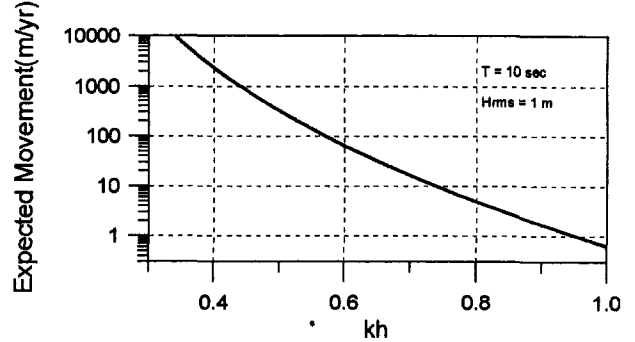


Figure 3.1 Expected movement rates by Rayleigh distribution function

Rayleigh 분포함수에 의한 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치를 구하기 위해서는 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치를 구하는 방법과 마찬가지로 식 (2.11.b)와 식 (3.1)을 다음 식 (3.7)과 같이 확률적 정의에 의해 결합하면 된다.

$$E [D(T, h)] = \int_0^{\infty} p(H) D(H, T, h) dH \quad (3.7)$$

그리고 식 (2.11.b)를 전개하면 다음 식 (3.8)과 같게 된다.

$$D(H, T, h) = f_{DB1}(T, h) H^3 + f_{DB2}(T, h) H^5 \quad (3.8)$$

여기서 $f_{DB1}(T, h)$ 와 $f_{DB2}(T, h)$ 는 분산관계식을 이용하여 식 (2.11.b)를 주기와 수심만의 함수로 정의하면, 다음 식 (3.9.a), (3.9.b)와 같이 정의된다.

$$f_{DB1}(T, h) = \frac{4\pi^2}{3g T^3} \frac{c_f \epsilon_B}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) a' \tan^2 \phi} \cdot \frac{1}{\sinh^3 kh} \quad (3.9.a)$$

$$f_{DB2}(T, h) = \frac{63\pi^6}{10g^3 T^7} \frac{c_f \epsilon_B}{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) a' \tan^2 \phi} \cdot \frac{\cosh^2 kh}{\sinh^{11} kh} \quad (3.9.b)$$

따라서 식 (3.1)과 식 (3.8)을 식 (3.7)에 대입하면 다음 식 (3.10)을 얻을 수 있다

$$E [D(T, h)] = \frac{2 f_{DB1}(T, h)}{H_{rms}^2} \int_0^{\infty} H^4 e^{-H^2/H_{rms}^2} dH + \frac{2 f_{DB2}(T, h)}{H_{rms}^2} \int_0^{\infty} H^6 e^{-H^2/H_{rms}^2} dH \quad (3.10)$$

그러므로 식 (3.10)을 적분하면 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치인 다음 식 (3.11)을 얻을

수 있다.

$$E[D(T, h)] = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} f_{DB1}(T, h) H_{rms}^3 + \frac{15\sqrt{\pi}}{8} f_{DB2}(T, h) H_{rms}^5 \quad (3.11)$$

Rayleigh 분포함수에 의하여 유도된 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치에 대하여 수심에 따른 정점의 감소율의 변화를 Fig. 3.2에 나타냈다. 이때 사용된 변수들 역시 Bailard(1981)가 사용한 값들이며, 수중둔덕 정점의 감소율도 설치수심에 매우 민감하게 반응함을 알 수 있다.

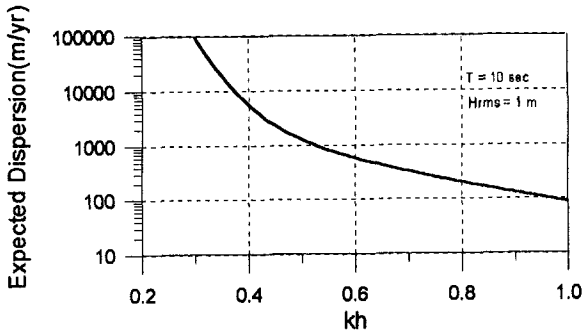


Figure 3.2 Expected dispersion rates by Rayleigh distribution function

그러나, 이 절에서 유도한 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치인 식 (3.6)과 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치인 식 (3.11)은 적용지역의 파고 분포가 Rayleigh 분포를 따를 때만 적용될 수 있는 해석해이다.

3.2 결합확률밀도함수에 의한 해석해

전 절에서 구한 해석해는 파고가 Rayleigh 분포를 따른다는 가정 하에 유도되었다. 따라서 파고가 Rayleigh 분포를 따르지 않을 때 즉, 넓은 주파수 영역에 파고가 분포될 경우에는 적용이 곤란하다.

임의의 주파수영역에서 적용 가능한 파고분포함수는 파고와 주기의 두 확률변수(random variable)로 이루어진 결합확률밀도함수에서 시작한다.

Longuet-Higgins(1983)는 평균해수면을 기준으로 상향통과법(zero-up-crossing method)을 이용하여 해상에서 발생하는 파고와 주기를 정의하였다. 즉, 평균해수면을 상향통과하는 시간을 주기로, 상향통과된 두 지점사이의 최대 높이차를 파고로 정의하여 임의의 시간동안에 발생될 확률을 구하였다. 무한시간 동안에 발생될 이와 같은 확률은 결국 정규분포(normal distribution)를 따른다는 가

정 하에 Gaussian Random Processes를 이용하여 파고와 주기의 결합확률밀도함수를 유도하였다. Longuet-Higgins(1983)에 의하여 유도된 결합확률 밀도함수는 다음 식 (3.12)와 같다.

$$p(\zeta, \eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi\nu}} \frac{\zeta^2}{\eta^2} e^{-\zeta^2[1+(1-1/\eta^2)/\nu^2]} L(\nu) \quad (3.12)$$

여기서 ζ, η 는 각각 파고와 주기를 무차원화 하여 표시된 확률변수로 다음 식 (3.13.a), (3.13.b)와 같이 정의된다.

$$\zeta = \frac{H}{H_{rms}} \quad (3.13.a)$$

$$\eta = \frac{T}{T_m} \quad (3.13.b)$$

또한 ν 는 스펙트럼의 주파수 영역의 폭을 정의 하는 변수(spectral width parameter)로 다음 식 (3.13.c)와 같고, $L(\nu)$ 는 보정계수로 다음 식 (3.13.d)와 같이 각각 정의된다.

$$\nu^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1 \quad (3.13.c)$$

$$L(\nu) = \frac{2\sqrt{1+\nu^2}}{1+\sqrt{1+\nu^2}} \quad (3.13.d)$$

여기서 m_n 는 주파수영역에 대한 에너지 스펙트럼의 n차 모멘트로 다음 식 (3.14)와 같이 정의할 수 있다.

$$m_n = \int_0^\infty \sigma^n E(\sigma) d\sigma \quad (3.14)$$

ν 가 작다는 것은 스펙트럼이 좁은 주파수 영역에 집중된다는 것을 의미한다. 즉, ν 가 작을수록 평균 주파수에 해당하는 부분에 파고가 집중되어 분포된다. 동일한 결과들에서 알 수 있는 또 하나의 사실은 ν 가 작을수록 대칭에 가까워진다는 것이다.

(1) 주변확률밀도함수에 의한 해석해

식 (3.12)는 파고와 주기에 대한 결합확률밀도함수이다. 따라서 확률이론에서 정의된 관계식을 도입하여 다음 식 (3.15)와 같이 주기에 대하여 적분하면 파고분포에 관한 주변확률밀도함수를 얻을 수 있다.

$$p(\zeta) = \frac{2L(\nu)}{\sqrt{\pi\nu}} \int_0^\infty \frac{\zeta^2}{\eta^2} e^{-\zeta^2[1+(1-1/\eta^2)/\nu^2]} d\eta \quad (3.15)$$

그러므로 식 (3.15)를 정리하면 다음 식 (3.16)과 같이 파고에 대한 확률밀도함수를 얻을 수 있다.

$$p(\xi) = \xi L(\nu) e^{-\xi^2} [1 + \text{erf}(\xi/\nu)] \quad (3.16)$$

여기서 $\text{erf}(x)$ 는 다음 식 (3.17)과 같이 정의된 에러 함수(error function)이다.

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du \quad (3.17)$$

또한 식 (3.16)을 식 (3.2)에 대입하기 위해서는 다음 식 (3.18)과 같이 Jacobian을 이용하여 파고의 함수로 변수변환을 해야한다.

$$p(H) = p(\xi) \left| \frac{\partial \xi}{\partial H} \right| \quad (3.18)$$

그러므로 식 (3.16)과 식 (3.13.a)를 식 (3.18)에 대입하면 파고의 함수로 표시된 다음 식 (3.19)를 얻을 수 있다.

$$p(H) = L(\nu) \frac{H}{H_{rms}^2} e^{(-H/H_{rms})^2} \cdot \left[1 + \text{erf} \left(\frac{H}{\nu H_{rms}} \right) \right] \quad (3.19)$$

식 (3.19)의 파고분포를 식 (3.1)에 정의된 Rayleigh 분포와 비교하면 ν 가 작은 경우($\nu < 0.1$)에는 Rayleigh 분포와 동일하나 ν 가 커짐에 따라 상대적으로 큰 파고분포를 나타낸다. 따라서 식 (3.19)는 Rayleigh 분포 보다 천수효과(shoaling)에 의하여 파고가 증가하는 연안역에서의 파고분포를 더 잘 묘사할 수 있다고 판단된다.

따라서 식 (3.19)를 식 (3.2)에 대입하여 적분하면 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치를 다음 식 (3.20.a)와 같이 얻을 수 있다.

$$E[C(T, h)] = A_{CB}(\nu) f_{CB}(T, h) H_{rms}^4 \quad (3.20.a)$$

$$A_{CB}(\nu) = \left[1 + \frac{8 + 20\nu^2 + 15\nu^4}{8(1 + \nu^2)^{5/2}} \right] L(\nu) \quad (3.20.b)$$

식 (3.20.a)는 식 (3.6)에 내재된 제약성을 해결하기 위하여 유도된 해석해이다. 즉, 식 (3.6)은 좁은 주파수 영역에 파고가 집중되어 분포한다는 기본 가정 하에 유도된 해석해이지만, 식 (3.20.a)는 그와 같은 기본 가정을 내포하지 않는 해석해이다.

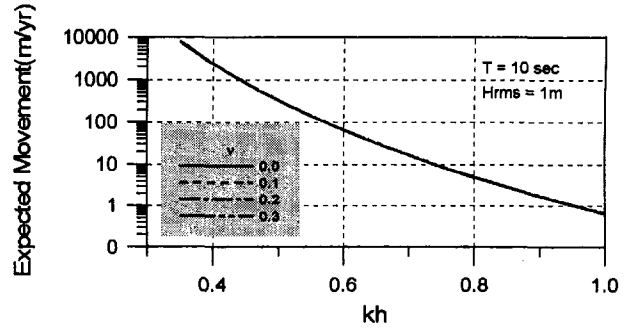


Figure 3.3 Expected movement rates by marginal probability density function
또 한가지 중요한 사실은 식 (3.20.a)에서 $\nu=0$ 이라고 가정하면 식 (3.20.a)는 식 (3.6)과 수학적으로 같아진다. 따라서 식 (3.20.a)는 식 (3.6)을 포함하는 일반식으로 고려할 수 있다. 따라서 결합확률밀도함수로부터 파고에 관한 주변확률밀도함수를 구하여 유도된 식 (3.20.a)는 임의의 주파수 범위에서 발생하는 파고분포에 적용할 수 있다. 주변확률밀도함수에 의하여 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치에 대하여 ν 값이 0.0, 0.1, 0.2, 0.3일 때 수심에 따른 각각의 이동율의 변화를 Fig. 3.3에 도시하였다. 이때 계산을 위해 사용된 변수들은 $\rho_s/\rho = 2.65$, $c_f = 0.005$, $\epsilon_B = 0.21$, $a' = 0.64$, $\phi = 32^\circ$ 이고 $H_{rms} = 1m$, $T = 10sec$ 라고 가정하였다. Fig. 3.3에서 볼 수 있듯이 스펙트럼의 주파수 영역의 폭을 정의하는 변수인 ν 가 0일 때는 Rayleigh 분포에 의한 이동율의 기대치와 같아지는 반면에 ν 가 커짐에 따라 상대적으로 많은 이동율을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 수중둔덕의 이동이 파고뿐만 아니라 주기에 의하여도 영향을 받고 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 파랑의 주기가 길수록, 수심이 얕을수록 표사의 이동은 증가한다는 Hands와 Allison(1991)의 관측결과와 일치하는 것이다.

주변확률밀도함수에 의한 수중둔덕 정점의 감소 정도에 대한 기대치는 식 (3.8)과 식 (3.19)를 확률적으로 결합하고 적분하는 것에 의해 다음 식 (3.21.a)와 같이 구해진다.

$$E[D(T, h)] = A_{DB1}(\nu) f_{DB1}(T, h) H_{rms}^3 + A_{DB2}(\nu) f_{DB2}(T, h) H_{rms}^5 \quad (3.21.a)$$

$$A_{DB1}(\nu) = \left[\frac{3\sqrt{\pi}}{4} + \frac{3 \tan^{-1}(1/\nu)}{2\sqrt{\pi}} + \frac{\nu(3+5\nu^2)}{2\sqrt{\pi}(1+\nu^2)^2} \right] L(\nu) \quad (3.21.b)$$

$$A_{DBE}(\nu) = \left[\frac{15\sqrt{\pi}}{8} + \frac{15 \tan^{-1}(1/\nu)}{4\sqrt{\pi}} + \frac{\nu(15+40\nu^2+33\nu^4)}{4\sqrt{\pi}(1+\nu^2)^3} \right] L(\nu) \quad (3.21.c)$$

주변확률밀도함수에 의하여 유도된 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치에 대하여 ν 값이 0.0, 0.1, 0.2, 0.3일 때 수심에 따른 각각의 정점의 감소율에 대한 변화를 Fig. 3.4에 도시하였다. Fig. 3.4 역시 Bailard가 사용한 값을 이용하여 도시된 것이며 ν 값이 커짐에 따라 수중둔덕 정점의 감소율도 증가함을 보이고 있다.

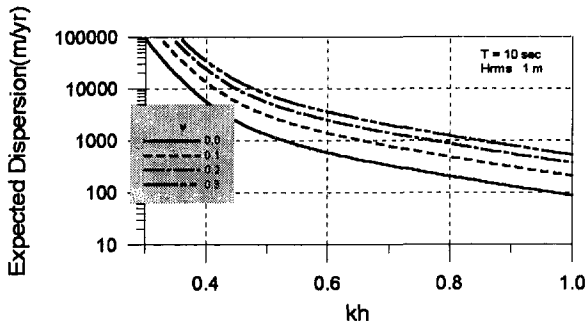


Figure 3.4 Expected dispersion rates by marginal probability density function

(2) 결합확률밀도함수에 의한 해석해

한편, 식 (3.20.a)는 이류계수 C가 주기의 함수가 아니라는 가정 하에 유도된 해석해이기 때문에 이류계수 C와 결합분포함수 사이에 존재하는 주기에 대한 상호작용의 효과를 고려하지 못한다. 따라서 이와 같은 상호작용의 효과를 해석하기 위해서는 어떠한 가정도 내포되지 않은 식 (2.11.a)와 식 (3.12)를 그대로 이용하여야 한다. 이때 식 (3.12)를 식 (3.13.a)와 (3.13.b)에 정의된 무차원 변수를 이용하여 다음 식 (3.22)와 같이 변수변환 하여야 한다.

$$p(H, T) = p(\zeta, \eta) \left| \frac{\partial(\zeta, \eta)}{\partial(H, T)} \right| \quad (3.22)$$

따라서 식 (3.22)를 전개하면 다음 식 (3.23)이 된다.

$$p(H, T) = \frac{2L(\nu)}{\sqrt{\pi\nu}} \frac{T_m}{H^3_{rms}} \frac{H^2}{T^2} \cdot e^{-\frac{(H/H_{rms})^2[1+(1-T_m/T)^2/\nu^2]}{2}} \quad (3.23)$$

그리고 식 (2.11.a)와 식 (3.23)을 다음 식 (3.24)와 같이 확률적으로 결합하면 수심에 따른 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치를 구할 수 있다.

$$E[C(h)] = \int_0^\infty \int_0^\infty p(H, T)C(H, T, h) dHdT \quad (3.24)$$

여기에서 식 (3.24)를 파고에 대하여 적분한 후, 주기에 대하여 적분하는 과정에서 변수 $\alpha = (T - T_m)/\nu T$ 을 도입하여 변수변환 하면 수중둔덕의 이동율을 해석할 수 있는 해석해를 다음 식 (3.25.a)와 같이 유도할 수 있다.

$$E[C(h)] = B_{CB}(\nu) f_{CB}(T_m, h) H^4_{rms} \quad (3.25.a)$$

$$B_{CB}(\nu) = \frac{15}{8} L(\nu) \int_{-\infty}^{1/\nu} \frac{(1-\nu\alpha)^7}{(1+\alpha^2)^{7/2}} d\alpha \quad (3.25.b)$$

여기서 $B_{CB}(\nu)$ 는 식 (3.23)이 안정적으로 적용될 수 있는 ν 의 범위 내에서 수치적분을 통하여 구할 수 있다. 식 (3.25.b)에서 ν 에 대한 피적분함수(kernel function)는 ν 가 커짐에 따라 첨두값이 커지면서 양의 방향으로 왜곡된다. 또한 $\nu \geq 0.5$ 이면 수치적으로 적분하기가 곤란해진다. Donelan 등(1985)에 의하면 완전히 발달된 파랑인 경우, 식 (3.23)의 안정적인 적용범위는 $\nu \leq 0.3$ 인 경우이다. 식 (3.25.b)에서 ν 값의 변화에 따른 피적분함수의 변화를 Fig. 3.5에 나타내었다. Fig. 3.5에 의하면 식 (3.25.b)의 피적분함수는 ν 가 커짐에 따라 첨두값이 커지면서 양의 방향으로 왜곡됨을 알 수 있다. 결합확률밀도함수에 의하여 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치에 대하여 ν 값이 0.0, 0.1, 0.2, 0.3일 때 수심에 따른 각각의 이동율의 변화를 Fig. 3.6에 나타냈다. Fig. 3.6에서 알 수 있는 바와 같이 결합확률밀도함수에 의한 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치는 주변확률밀도함수에 의한 것보다 다소 크게 산정된다. 이는 주변확률밀도함수에 의한 해석해는 이류계수가 주기의 함수가 아니라는 가정하에 유도된 해석해이고 결합확률밀도함수에 의한 해석해는 이류계수와 결합분포함수 사이에 존재하는 주기에 대한 상호작용의 효과를 고려한 해석해이기 때문이다. 따라서 Fig. 3.6은 Fig. 3.3에 비교하여 수중둔덕의 이동율에 대한 주기의 영향을 반영하는 것으로 볼 수 있다.

한편, 식 (3.21.a) 역시 확산계수 D가 주기의 함수가 아니라는 가정하에 유도된 해석해이기 때문에 확산계수 D와 결합분포 사이에 존재하는 주기에 대한 상호작용의 효과는 고려하지 못한다. 따라서 이와 같은 상호작용의 효과를 해석하기 위해서는 어떠한 가정도 내포되지 않은 식 (2.11.b)와 식

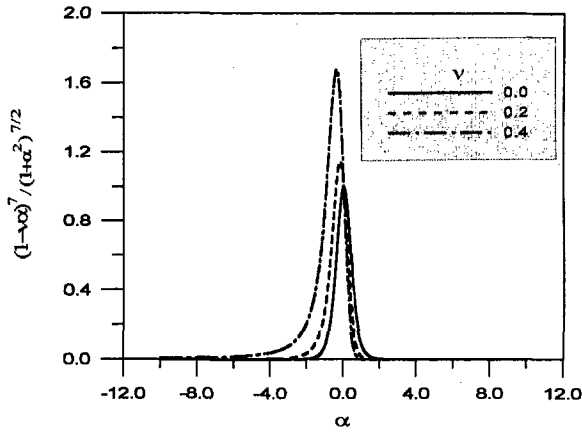


Figure 3.5 Kernel functions of Eq. (3.33) with respect to the spectral width parameter

(3.12)를 그대로 사용하여야 한다. 그러기 위해서는 식 (2.11.b)와 식 (3.23)을 다음 식 (3.26)과 같이 확률적으로 결합해야 한다.

$$E[D(h)] = \int_0^\infty \int_0^\infty p(H, T) D(H, T, h) dHdT \quad (3.26)$$

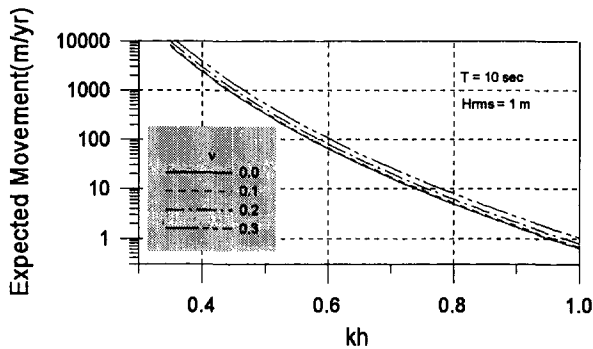


Figure 3.6 Expected movement rates by joint probability density function

마지막으로 식 (3.26)을 파고에 대하여 적분한 후, 주기에 대하여 적분하는 과정에서 변수 $\alpha = (T - T_m) / \nu T$ 을 도입하여 변수변환 하면 수심에 따른 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치인 다음 식 (3.27.a)를 얻을 수 있다.

$$E[D(h)] = B_{DB1}(\nu) f_{DB1}(T_m, h) H_{rms}^3 + B_{DB2}(\nu) f_{DB2}(T_m, h) H_{rms}^5 \quad (3.27.a)$$

$$B_{DB1}(\nu) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} L(\nu) \int_{-\infty}^{1/\nu} \frac{(1-\nu\alpha)^3}{(1+\alpha^2)^3} d\alpha \quad (3.27.b)$$

$$B_{DB2}(\nu) = \frac{6}{\sqrt{\pi}} L(\nu) \int_{-\infty}^{1/\nu} \frac{(1-\nu\alpha)^7}{(1+\alpha^2)^4} d\alpha \quad (3.27.c)$$

식 (3.27.b)와 식 (3.27.c)에서 ν 값의 변화에 따른 피적분함수의 변화를 Fig. 3.7과 Fig. 3.8에 각각 도시하였고 결합확률밀도함수에 의하여 유도된 수중둔덕 정점의 감소율에 대한 기대치에 대하여

ν 값이 0.0, 0.1, 0.2, 0.3일 때 수심에 따른 각각의 감소율의 변화를 Fig. 3.9에 도시하였다. Fig. 3.7과 Fig. 3.8에서 볼 수 있는 바와 같이 식 (3.27.b)와 (3.27.c)의 피적분함수는 ν 값이 증가함에 따라 첨두점이 커지면서 양의 방향으로 왜곡된다. 또한 Fig. 3.9에 의한 수중둔덕 정점의 감소율은 $\nu > 0$ 일 때, Fig. 3.4에 의한 값보다 다소 크게 나타났다. 이는 확산계수와 결합분포함수 사이에 존재하는 주기에 대한 상호작용의 영향으로 볼 수 있다.

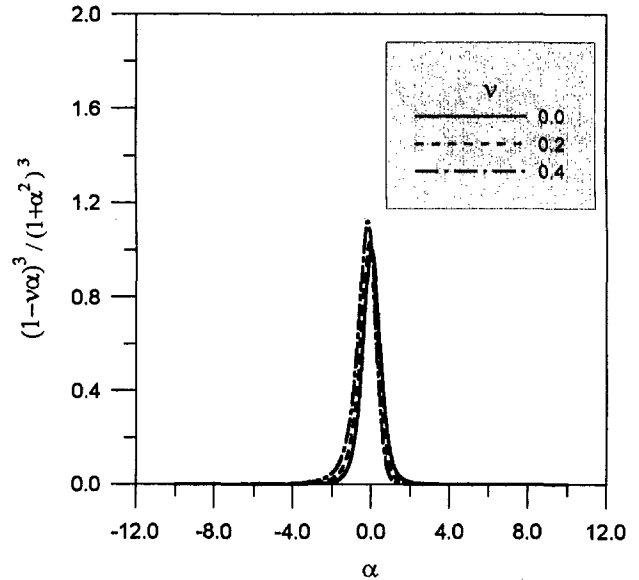


Figure 3.7 Kernel functions of Eq. (3.36) with respect to the spectral width parameter

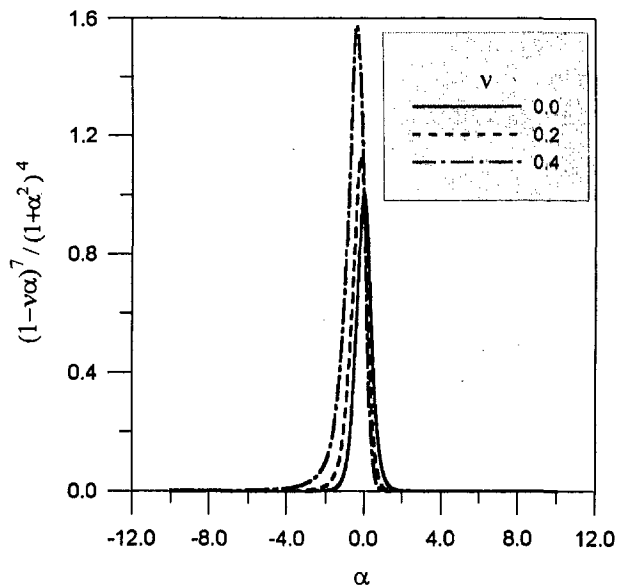


Figure 3.8 Kernel functions of Eq. (3.37) with respect to the spectral width parameter

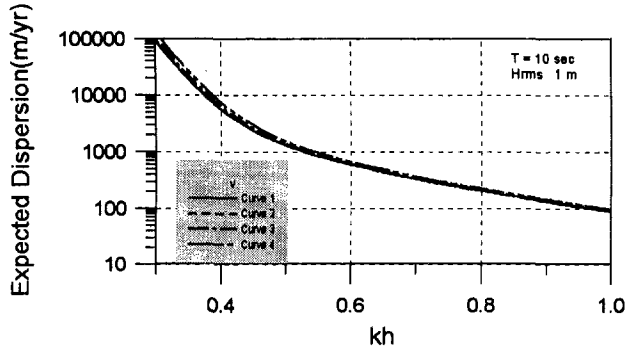


Figure 3.9 Expected dispersion rates by joint probability density function

4. 해석해의 검증

4.1 현장관측자료와 해석해의 비교·분석

해석해를 검증하기 위하여 관측자료가 비교적 양호한 California의 Silver Strand State Park와 Florida의 Port Canaveral 그리고 Alabama의 Mobile Mound에 건설된 수중둔덕들에 대한 현장 관측자료와 Otay에 의해 수행된 모형실험 자료를 대상으로 검증을 수행하였다. 각각에 대한 표사특성과 파랑제원이 Table 4.1에 나타나 있다. 해석해는 결합확률밀도함수를 이용하여 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 기대치를 이용하였으며 그 결과가 Fig. 4.1에 도시되었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 Silver Strand State Park에 건설된 수중둔덕을 제외하고는 모두 해석해와 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 본 연구에서 유도된 해석해가 Ursell Number가 약 26 이하 일 때 적용가능한 Stokes의 2차 비선형 파랑이론에 의해 유도된 것이므로 Silver Strand의 관측자료와는 차이를 보일 수 있다.

Table 4.1 Measured data at three field sites and one experimental test.

Location	Silver Strand, CA.	Port Canaveral, FL.	Mobile Mound, AL.	Experimental Test
	SS	PC	MB	ET
Median Grain size d_{50} (mm),	0.20	0.21	0.20	0.20
Water depth, h (m)	4.6	6.8	6.1	0.36
Wave Height, H_{rms} (m)	0.62	1.2	0.78	0.09
Wave Period, T (sec)	13.1	6.3	9.1	1.7
Ursell Number, U_r	48	8	15	17
Movement Rate (m/yr)	313	93	60	90
4.1 Refer.....	Andras sy (1991)	Bodge (1994)	Hands and Allison(1991)	Otay(1995)

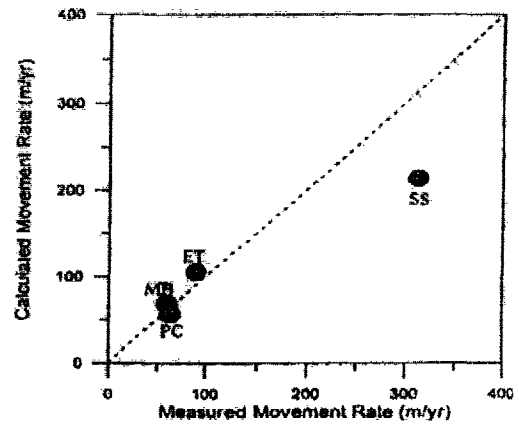


Fig. Comparison of the analytical solution calculated by Eq. (37) with the measured data

Fig. 4.2는 본 연구에서 유도된 수중둔덕의 이동율에 대한 해석해의 결과와 이산화기법을 사용하여 식(3.24)를 해석한 Douglass(1995)의 결과를 비교한 것이다. 본 연구에서는 파고와 주기에 대한 연속적인 결합분포함수를 사용한 반면에 Douglass의 결과는 Mobile Mound 외해영역의 바람자료로부터 예측된 20년간의 파고와 주기에 관한 WIS(Wave Information System) 자료를 이용하였다. 이때 Douglass가 외해영역의 자료를 이용하였기 때문에 해석해에서 $\nu=0.0$ 이라는 조건을 사용하였다. Fig. 4.2에서 볼 수 있듯이 수심의 변화에 따

른 해석해의 거동이 Douglass가 이산화기법으로 예측한 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

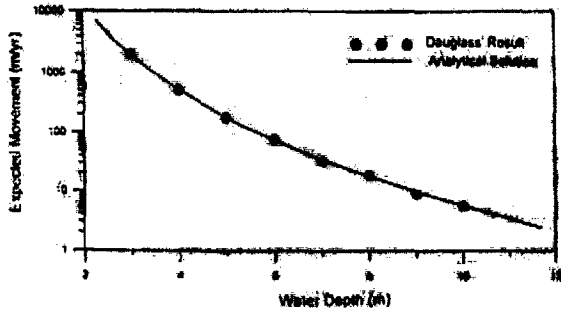


Fig. Comparison of the analytical solution with Douglass's Result(1960) for Mobile Mound, AL.

4.2 ν 에 따른 해석해의 거동특성

Rayleigh 분포함수와 주변확률밀도함수 그리고 결합확률밀도함수를 이용하여 수중둔덕의 이동에 대한 기대치와 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 기대치를 유도하였다. 여기에서 $\nu=0$ 일 때 주변확률밀도함수와 결합확률밀도함수에 의한 해석해는 Rayleigh 분포함수에 의한 해석해와 같아짐을 알 수 있었다. 즉 주변확률밀도함수와 결합확률밀도함수에 의한 해석해는 Rayleigh 분포함수에 의한 해석해를 포함하는 일반해로 볼 수 있다. 주변확률밀도함수에 의한 해석해인 식 (3.20.a)와 (3.21.a), 그리고 결합확률밀도함수에 의한 해석해인 (3.25.a)와 (3.27.a)는 이미 언급한 바와 같이 주파수 영역에서 정의된 스펙트럼의 폭을 나타내는 변수의 함수이다. 그러므로 ν 에 따른 수중둔덕의 영향을 살펴보는 것이 의미가 있다. Table 4.2에 ν 에 따른 피적분함수의 변화값을 제시하였다.

한편 유도된 해석해가 모두 수중둔덕이 외해쪽에 건설되면 될수록 그 이동율과 정점의 감소정도가 지수함수적으로 감소한다는 사실을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 기존의 표사이동과 관련하여 연구된 많은 결과들과 일치하는 것이다. 즉, 파랑 에너지의 대부분이 쇄파점 주변에 집중되기 때문에 해안선에서 멀어지면 멀어질수록 표사의 이동이 적게 발생되기 때문이다. 따라서 수중둔덕의 거동특성은 설치위치에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 알 수 있다. 즉, 설치수심이 증가할수록 수중둔덕의 이동율과 정점의 감소정도는 지수함수적으로 감소하게 된다.

Table 4.2 Values of coefficients $BCB(\nu)$, $BDB1(\nu)$ and $BDB2(\nu)$ with respect to the spectral width parameter ν

ν	$L(\nu)$	$BCB(\nu)$	$BDB1(\nu)$	$BDB2(\nu)$
0.00	1.00000	2.00000	1.32934	3.32335
0.05	1.00062	2.02766	1.33348	3.36048
0.10	1.00249	2.11282	1.34595	3.47389
0.15	1.00556	2.26211	1.36676	3.66964
0.20	1.00980	2.48752	1.39597	3.95837
0.25	1.01515	2.80752	1.43367	4.35584
0.30	1.02154	3.24905	1.47999	4.88388

5. 결 론

해석해를 검증하는 과정에서 수중둔덕의 거동은 설치위치에 매우 민감하게 반응한다는 사실을 알 수 있었다. 즉, 설치수심이 증가할수록 수중둔덕의 이동율과 정점의 감소정도는 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 기존의 연구결과와 일치하는 것이다. 또한 유도된 해석해들을 상호 비교하여 수중둔덕 이동율과 정점의 감소의 ν 에 따른 영향을 해석하였다. 해석 결과 $\nu=0$ 일 때 주변확률밀도함수와 결합확률밀도함수에 의해 유도된 해석해는 Rayleigh 분포함수에 의해 유도된 해석해와 동일함을 알 수 있었다. 따라서 ν 에 의한 영향을 받는 쇄파대 부근에서는 결합확률밀도함수에 의한 해석해를 이용하여 수중둔덕의 이동율과 정점의 감소율을 예측하는 것이 바람직하다. 다시 말하면, 파랑의 변화가 심하게 발생하는 쇄파대부근의 영역이 아니면 Rayleigh 분포함수에 의한 해석해인 식 (3.6)을 써서 수중둔덕의 이동율을 예측하고 식 (3.8)을 써서 수중둔덕 정점의 감소율을 예측하여도 된다. 마지막으로 해석해를 수중둔덕의 이동율을 관측한 현장자료와 비교하여 검증하였다. 검증 결과 해석해가 관측자료와 매우 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 유도된 해석해를 수중둔덕의 설치계획 시점에 이용된다면 수중둔덕의 설치 수심을 쉽게 결정할 수 있다. 수중둔덕의 설치수심을 올바르게 결정하는 것이 해안선 보호에 지대한 영향을 준다는 사실로 비추어 볼 때 본 연구의 결과는 많은 의미가 있다고 판단된다.

그러나 수중둔덕 정점의 감소정도에 대한 현장

관측 자료나 모형실험 자료의 부재로 인하여 정점의 감소율에 대하여 유도된 해석해를 검증할 수가 없었다. 따라서 앞으로 수중둔덕의 정점의 감소율에 대한 실험을 병행하여 유도된 해석해를 검증할 수 있다면 보다 정확하게 수중둔덕의 설치조건을 만족시키리라 판단된다. 또한 해석해의 유도과정에서 부유사 효과가 무시되었고 수중둔덕의 규모 등 형상학적 인자들이 고려되지 못하였으므로 이에 대한 영향이 앞으로 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이철용, "수중둔덕의 이동을 예측을 위한 해석해", *한국 해안·해양공학회*, 1998(in press).
- [2] Bailard, J. A., "An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86, No. C11, pp. 10938-10954, 1981.
- [3] Caruso, H. A. and Pousa, J. L., "Beach evolution in the vicinity of a submerged bar", *Journal of Coastal Research*, Vol. 6, No. 3, pp. 587-596, 1990.
- [4] Donelan, M. A., Hamilton, J. and Hui, W. H., "Directional spectra of wind-generated waves", *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, 315, pp. 509-562, 1985.
- [5] Douglass, S. L., "Estimating Landward migration of nearshore constructed sand mounds", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 5, pp. 247-250, 1995.
- [6] Dean, R. G., and Dalrymple, R. A., *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Prentice-Hall, 1984.
- [7] Hands, E. B., and Allison, M. C., "Mound migration in deeper water and methods of categorizing active and stable depths", *Proceedings of Coastal Sediments '91*, ASCE, pp. 1985-1999, 1991.
- [8] Lee, C. E., "Migration of offshore mound constructed by dredged material", *KSCE, Journal of Civil Engineering*, KSEC, Vol. 2, No.3, pp.347-358, 1998.
- [9] Longuet-Higgins, M. S., "On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 80, No. 18, pp. 2688-2694, June 20 1975.
- [10] Longuet-Higgins, M. S., "On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field", *Proceedings of Royal Society in London*, Series A, Vol. 389, pp. 241-258, 1983.
- [11] McLellan, T. N., and Kraus, N. C., "Design guidance for nearshore berm construction", *Proceedings of Coastal Sediments '91*, ASCE, pp. 2000-2011, 1991.
- [12] Otay, E. N., *Long-term evolution of nearshore disposal berms*, Ph. D. Department of Civil Engineering University of Florida, 1994
- [13] Sheall, I. L., "Reducing costs and improving the industry : Goals of the Dredging Research Program of the United States", *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 535-542, Spring 1991.
- [14] Scheffner, N. W., "Systematic analysis of long-term fate of disposed dredged material", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp.127-133, 1996.
- [15] Sheall, I. L., "Reducing costs and improving the industry : Goals of the dredging research program of the United States", *Journal of Coastal Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 535-542, 1991.