

수중둔덕의 이동을 예측을 위한 해석해 Analytical Solutions for Predicting Movement Rate of Submerged Mound

이 철 응*
Cheol-Eung Lee*

要 旨 : 파고와 주기 그리고 수심의 함수로 정의된 이류계수를 파고와 주기에 대한 결합분포함수와 확률적으로 결합하여 수중둔덕의 이동을 예측할 수 있는 해석해를 유도하였다. 파랑의 비선형성에 의하여 유발되는 하상에서의 흐름이 표사의 이동을 유발한다는 가정하에 개념적 모형의 표사이동량 방정식을 사용하였다. 표사보존식에 표사이동량을 대입하여 시간에 따른 해저면의 변동을 나타내는 비선형 이류-확산 방정식을 얻을 수 있었다. 해석해에 의하면 수심이 증가할 수록 수중둔덕의 이동율은 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 스펙트럼에서 주파수 영역의 폭을 정의하는 계수, ν 의 값이 커지면 수중둔덕의 이동율은 증가하였다. 해석해에 의하여 예측된 수중둔덕의 이동율은 관측자료보다 과대평가하는 경향을 나타내나, 해석해를 유도하는 과정에 내포된 이론식의 제약성 및 입력자료의 부정확성 등을 고려할 때 전반적으로 해석해의 결과는 관측자료와 잘 일치한다고 볼 수 있다. 특히, 수심의 변화에 따른 해석해의 거동은 대상영역 외해에서 추정된 자료를 이용하여 이산화 기법으로 추정된 결과와 매우 잘 일치하였다.

핵심용어 : 해석해, 수중둔덕, 표사이동량, 결합분포함수, 이류-확산방정식

Abstract □ Analytical solutions to predict the movement rate of submerged mound are derived using the convection coefficient and the joint distribution function of wave heights and periods. Assuming that the sediment is moved onshore due to the velocity asymmetry of Stokes' second order nonlinear wave theory, the micro-scale bedload transport equation is applied to the sediment conservation. The nonlinear convection-diffusion equation can then be obtained which governs the migration of submerged mound. The movement rate decreases exponentially with increasing the water depth, but the movement rate tends to increase as the spectral width parameter, ν increases. In comparison of the analytical solution with the measured data, it is found that the analytical solution overestimates the movement rate. However, the agreement between the analytical solution and the measured data is encouraging since this over-estimation may be due to the inaccuracy of input data and the limitation of sediment transport model. In particular, the movement rates with respect to the water depth predicted by the analytical solution are in very good agreement with the estimated result using the discretization technique with the hindcast wave data.

Keywords : analytical solution, submerged mound, sediment transport rate, joint distribution function, convection-diffusion equation

1. 서 론

해안선 부근의 표사이동과 관련된 문제는 해안공학 분야에서 반드시 해결해야 할 어려운 문제중의 하나이

다. 이와 같은 표사이동 문제는 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 하나는 임의의 지역에 필요한 양보다 많은 표사가 퇴적되는 현상이고, 다른 하나는 반대로 표사가 점진적으로 침식되어 가는 현상이다. 해안선의 침식

* 강원대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea)

을 방지하기 위하여 이안제나 방사제와 같은 인위적인 구조물을 건설하거나, 침식된 해안선에 대상지역의 재질과 유사한 모래를 직접적으로 공급하는 방법이 현재 가장 많이 이용되고 있다. 한편, 표사가 항로나 항만 입구에 파잉 퇴적되는 문제를 해결하는 일반적인 방법은 퇴적된 표사를 준설하는 것이다. 매년 이와 같은 목적으로 많은 표사가 준설되지만 해안선의 침식과 관련하여 준설토를 효과적으로 이용할 수 있는 방안이 강구되지 못하고 있다. 따라서 이와 같은 준설토를 효과적으로 이용한다면 환경 친화적인 방법으로 해안선의 침식과 퇴적을 동시에 해결할 수 있다. 즉, 준설토를 침식이 발생하는 해안의 연안역에 투하하여 수중둔덕(submerged mound)을 건설한 후, 그 모래가 자연현상 속에서 해안선 쪽으로 이동하게 하는 방법이다. 주어진 외력조건에 맞게 설치되면 경제적으로 매우 유리하다. 왜냐하면 매년 준설을 반복하지 않아도 되고 해안선의 침식을 자연현상 속에서 방지할 수 있기 때문이다. 그러나 수중둔덕을 이용하는 방법은 비교적 최근에 관심을 갖기 시작하였기 때문에 아직 그와 관련된 이론이 미약한 실정이다. 즉, 어떤 성분의 표사를 얼마 만큼 어느 위치에 투하해야 표사가 해안선 쪽으로 이동되는 지에 대한 설계기준이 마련되어 있지 못하다.

연안에 건설된 수중둔덕과 관련된 최초의 현장 사례는 미 육군공병단(USACE)에서 1935년에 미국 California의 Santa Babara 항만 입구에서 적정 항로 수심을 확보하기 위하여 준설한 준설토를 이용하여 인근해역에 건설한 것이다. 그후 USACE에서는 1942년에 New Jersey의 Atlantic City의 침식성 해안에, 1948년에 Long Beach에 수중둔덕을 건설하였다(Hall and Watts, 1957). 이상의 현장 사례들은 비록 심하게 침식되는 해안을 보호할 목적으로 실시되었으나, 사전에 문제에 대한 이해 등 철저한 준비가 없이 건설되었기 때문에 최초의 목적을 충족시킬 수가 없었다. 그러나 South Africa의 Durban Beach(Zwamborn *et al.*, 1970)와 Brazil의 Copacabana Beach(Vera-Cruz, 1972)에 건설된 수중둔덕은 해안선의 보호에 매우 효과적이었다. 대상지역의 파랑특성을 정확히 이해한 후, 현장과 동일한 파랑조건하에서 수중둔덕의 기하학적 제원 및 재질적 특성을 변화시켜 모형실험을 충분히 수행한 후 건설되었기 때문이다. 이들 연구에서 수중둔덕의 건설 위치가 올바르게 선정되어야 한다는 사실이 확인되었다. 또한 표사의 재질적 특성과 기하학적인 형태가 이동과

밀접하게 관련있다는 사실도 확인되었다. 그러나 현상학적으로 중요한 변수들만을 언급하였을 뿐, 현장에 적용 가능한 이론이 제시되지 못하였다. 그 후, Connecticut의 Long Island Sound(Bokuniewicz *et al.*, 1977), North Carolina의 New River Inlet(Schwartz and Musialowski, 1977), Virginia의 Dam Neck(Hands and DeLoach, 1984)에서 수중둔덕의 효용성 및 이용 가능성이 확인된 후, 현장사례들을 종합 정리하여 연안에 건설될 수중둔덕을 체계적으로 연구하기 위하여 1988년에 USACE에 준설연구계획(Dredging Research Program)이 설립되었다. 준설연구계획은 크게 준설기법의 개발, 준설장비의 개발, 표사의 재질적인 특성 해석, 표사의 이동특성 해석 그리고 현장관측 및 관리 등 모두 다섯 개의 연구분야로 구성되어 있다(Sheall, 1991). 이와 같은 계획에 따라 Alabama의 Sand Island(Hands and Bradley, 1990)와 Mobile Mound(McLellan *et al.*, 1990), Oregon의 Coos Bay(Hartman *et al.*, 1991), California의 Silver Strand State Park(Andrassy, 1991), New Zealand의 Tauranga Harbour(Healy *et al.*, 1991) 등의 현장사례에서 나타나는 관측자료들을 이용하여 문제 해결을 위한 이론적 근간들이 제시되기 시작하였다. 물리적으로는 수중둔덕이 시간에 따라 이류와 확산현상(convection-diffusion processes)처럼 거동한다는 사실이 확인되었다. 또한 잠식성 수중둔덕(active mound)과 안정성 수중둔덕(stable mound)을 구분할 수 있는 기준식들이 파랑 및 표사의 특성과 관련된 함수로 제시되기 시작하였다(McLellan and Kraus, 1991; Hands and Allison, 1991; Ahrens and Hands, 1998; Lee, 1998). 제안식들의 보완을 위하여 후속적인 연구가 Florida의 Canaveral Port(Bodge, 1994)와 Perdido Key(Otay, 1995)에서 수행되었다. 표사의 이동과 관련하여 기존에 제안된 표사량식들이 수중둔덕의 경우에도 올바르게 적용될 수 있는지에 대한 연구가 계속되고 있다. 한편 비교적 최근에 몇몇의 연구자들에 의하여 수중둔덕의 시간에 따른 이동과 관련된 수치적인 해석이 이루어 졌다. 먼저 Douglass(1995)는 표사의 이동이 주로 파랑의 비선형성과 관련된 하상 근처의 흐름에 의하여 이루어진다는 가정하에 수중둔덕의 거동을 해석하였다. 표사이동량식은 Bailard(1981)에 의하여 제시된 개념적인 모형(energetic model)을 사용하였으며, 현장의 관측자료와 비교하여 수치모형의 적용성을 검증하였다. Scheffner(1996)는 장기간에 걸쳐 수중둔덕의 이동과 관련된 현

상을 해석하였다. 외력조건으로는 수중둔덕이 건설될 지역의 바람자료를 이용하여 인위적으로 발생시킨 파랑자료를 이용하였으며, 표사이동량은 하천에서 표사의 이동을 해석하기 위하여 제안된 모형(tractive force model)을 사용하였다. 마지막으로 Lee(1998)는 Douglass(1995)가 고려하지 못한 부유사량을 포함하는 표사이동량식을 이용하여 수중둔덕의 이동을 예측할 수 있는 유한차분모형을 개발하였다. 예측 결과를 현장 관측자료와 비교하여 수치모형을 검증하였다.

본 연구의 목적은 연안역 임의의 수심에 건설된 수중둔덕의 이동을 예측할 수 있는 해석해를 유도하는 것이다. 이때 표사의 이동을 일으키는 외력은 파랑의 비선형성에 의하여 유발되는 하상에서의 흐름으로 가정하였으며, 표사의 이동량은 Bailard(1981)에 의하여 제안된 개념적 모형을 사용하였다. 대상영역의 표사보존식에 표사이동량식을 대입하여 시간에 따른 해저면의 변동을 나타내는 이류-확산 방정식과 동일한 형태의 비선형 편미분방정식을 얻을 수 있었다. 이때 수중둔덕의 이동을 지배하는 이류계수(convection coefficient)를 파랑 발생확률을 나타내는 파랑분포함수와 확률적으로 결합하여 수중둔덕의 이동을 예측할 수 있는 해석해를 유도하였다. 유도된 해석해의 거동특성이 해석되었으며, 관측자료가 있는 몇 개의 현장에 적용하여 검증되었다.

2. 수학적 모형의 구성

파랑에 의하여 발생하는 어떤 힘이 표사의 저항을 어떻게 극복하여 표사의 이동을 유발하느냐의 관계를 묘사한 것이 표사이동량 방정식이다. 표사이동량은 파랑에 의하여 발생하는 외력과 표사의 저항력 사이의 관계를 이용하여 단위시간 동안에 이동되는 표사량을 나타내기 위한 척도로 이용된다. 먼저 외력조건은 크게 파랑 그 자체에 의한 힘과 파랑에 의하여 발생하는 흐름에 의하여 유발되는 힘으로 분류할 수 있다. 전자는 폭풍해일과 같이 대규모 파랑이 해안선을 내습하는 경우에 해안선의 침식에 지대한 영향을 미치게 되고, 후자는 평상시의 국소적인 표사이동에 중요한 역할을 하게 된다. 따라서 평균해수면 아래 임의 수심에 위치한 수중둔덕인 경우에는 파랑에 의하여 유발되는 하상의 흐름 크기에 따라 표사의 이동량이 좌우될 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 파랑의 비선형성(asymmetry

of orbital velocity)에 의하여 발생하는 하상의 흐름이 수중둔덕의 이동에 직접적인 영향을 준다는 가정하에 수학적 모형을 구성하고자 한다.

일반적으로 표사이동량을 해석할 수 있는 접근방법은 크게 다음과 같이 분류할 수 있다. 하나는 국소적인 흐름 특성과 표사의 상호작용을 자세히 고려하여 해석하는 접근방법(micro-scale approach)이고, 다른 하나는 현장관측에서 나타나는 전반적인 특성을 하나의 변수로 치환하여 반 경험적으로 표사의 이동량을 결정하는 접근방법(meso-scale approach)이다. 본 연구에서 관심을 갖는 수중둔덕의 이동과 관련된 현상은 국소적인 표사의 이동특성을 근간으로 장기적인 거동을 해석하는 것이기 때문에 전자의 접근방법을 이용하는 것이 해석의 정도를 높일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Bailard(1981)가 제안한 개념적 표사이동량 방정식을 선택하였다. 이 표사이동량 방정식은 파랑에 의하여 유발되는 하상 흐름의 크기에 따라 표사 이동이 좌우된다는 개념에 의하여 제시된 것이다. 수중 단위중량으로 Bailard(1981)에 의하여 제안된 소류사의 표사이동량 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\langle i_b \rangle = \frac{\rho c_f \epsilon_b}{\tan \phi} \left(\langle |u|^2 u \rangle - \frac{\tan \beta}{\tan \phi} \langle |u|^3 \rangle \right) \quad (1)$$

여기서 i_b 는 수중 단위중량으로 표시된 소류사의 표사이동량, ρ 는 해수의 밀도, c_f 는 하상의 마찰력과 관련된 항력계수(drag coefficient), ϕ 는 표사의 내부 마찰각, $\tan \beta$ 는 해저경사, u 는 파랑에 의하여 발생하는 하상의 흐름, 그리고 ϵ_b 는 소류사와 관련된 표사이동량계수이다. 또한 $\langle \rangle$ 은 주기 평균을 의미한다. 식 (1)은 물리적으로 파랑에 의하여 발생하는 흐름과 표사의 저항관계를 나타낸 식으로, 표사의 저항을 표사의 형상에 따른 형상계수와 표사 입자사이의 내부마찰각의 함수로 표시한 것이다. 식 (1)을 이용하여 표사량을 정량적으로 계산하기 위해서는 먼저 파랑에 의하여 발생하는 흐름의 크기를 산정하여야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 표사의 이동을 유발하는 외력이 파랑의 비선형성에 의하여 발생하는 흐름이라고 하였기 때문에, 흐름의 관계식은 Stokes의 2차 비선형 파랑이론을 사용하면 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있다(Dean and Dalrymple, 1984).

$$u = A_1 \cos(kx - \sigma t) + A_2 \cos 2(kx - \sigma t) \quad (2)$$

여기서 흐름의 진폭을 나타내는 $A_1 = Hgk/2\sigma \cosh kh$, $A_2 = 3H^2 \sigma k/16 \sinh^4 kh$ 이다. 또한 H 는 파고, σ 는 각주파수 (angular frequency), k 는 파수(wave number), h 는 평균 해수면에서 하상까지의 수심, g 는 중력가속도를, 그리고 x, t 는 각각 공간과 시간을 나타내는 독립변수이다. 식 (2)의 우변 두 번째 항이 파랑의 비선형성에 의하여 발생하는 흐름의 크기를 나타낸 것이다. 즉, 우변의 첫 항에 의하여는 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 외력(두번째 항)에 의하여 해안선쪽으로 이동하게 된다. 식 (2)를 한 주기에 대하여 평균한 다음, 식 (1)에 대입하면 다음 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\langle i_b \rangle = \frac{9\pi^2}{64} \frac{\rho g^2 c_f \varepsilon_B}{\tan^2 \phi} \frac{TH^4}{L^3} \frac{(\tan \phi - \tan \beta)}{\sinh^4 kh \cosh^2 kh} \quad (3)$$

식 (3)은 한 주기에 대하여 평균된 수중단위중량으로 표시된 표사량방정식이다. 따라서 단위시간당 체적으로 표시된 표사이동량은 다음 식 (4)와 같게 된다.

$$Q = \frac{9\pi^2}{64} \frac{g c_f \varepsilon_B}{(S-1)p \tan^2 \phi} \frac{TH^4}{L^3} \frac{(\tan \phi + \frac{\partial h}{\partial x})}{\sinh^4 kh \cosh^2 kh} \quad (4)$$

여기서 S 는 비중을, p 는 표사입자 사이의 공극을 의미한다. 식 (4)를 보면 표사이동량이 파랑의 특성과 관련된 함수임을 알 수 있다. 즉, 파고의 크기에 직접적으로 의존한다는 사실을 알 수 있다. 다른 변수인 주기와 파장 그리고 수심의 관계는 분산관계식으로 연관된다. 따라서 파고가 크면 클수록 많은 표사가 이동될 것이라는 사실을 쉽게 예측할 수 있다.

전 절에서 얻어진 단위시간당 표사이동량, 식 (4)를 이용하여 수중둔덕의 이동량을 예측하기 위해서는 대상영역에 적용될 수 있는 지배방정식을 유도하여야 한다. 지배방정식의 유도는 단위 시간동안에 대상영역으로 유입되는 표사량과 대상영역을 통하여 유출되는 표사량의 변화는 대상영역에서 단위 시간동안 발생하는 수심의 변화와 같다는 다음 식 (5)의 표사보존식에서 시작한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

그러므로 식 (4)를 공간에 대하여 미분한 후, 식 (5)에 대입하면 다음 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + C \frac{\partial h}{\partial x} - D \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

여기서 이류계수, C 와 확산계수, D 는 각각 파고와 주기 그리고 수심의 함수로 다음 식 (7)과 (8)로 정의된다.

$$C(H, T, h) = c_1 f_1(T, h) H^4 \quad (7)$$

$$D(H, T, h) = c_2 f_2(T, h) H^4 \quad (8)$$

여기서 표사의 특성에 따라 결정되어지는 상수, $c_1 = 9\pi^2 c_f \varepsilon_B / [(S-1)g^3 p \tan \phi]$ 이고, $c_2 = 9\pi^2 c_f \varepsilon_B / [8(S-1)g^2 p \tan^2 \phi]$ 이다. 또한 주기와 수심의 함수로 표시된 임의의 함수, f_1 과 f_2 는 각각 다음 식 (9) 및 (10)과 같다.

$$f_1(T, h) = \frac{(3 \cosh^2 kh - 1) \cosh kh}{T^7 \sinh^9 kh} \quad (9)$$

$$f_2(T, h) = \frac{\cosh kh}{T^5 \sinh^7 kh} \quad (10)$$

수학적으로 식 (6)은 오염물질의 이송과 확산을 해석하는데 많이 사용되고 있는 비선형 이류-확산방정식이다. 즉, 오염물질의 이동의 정도는 이류계수에 직접적으로 의존하고, 확산의 정도는 확산계수에 의하여 지배된다. 본 논문에서 해석하려는 수중둔덕의 이동과 관련하여 식 (6)을 물리적으로 해석하게 되면 식 (7)에 정의된 이류계수, C 의 크기에 따라 수중둔덕의 이동 정도가 결정될 것이고, 식 (8)에 정의된 확산계수, D 의 크기에 따라 수중둔덕의 정점이 감소될 것이다. 수중둔덕은 이동되면서 그 정점의 높이가 점차 감소되는 경향으로 변형된다는 사실이 이미 많은 현장관측에서 확인되었다. 그러므로 수중둔덕의 이동과 감소의 정도를 동시에 해석하는 경우에는 지배방정식인 식 (6)을 수치적으로 해석하여야 하지만 본 연구에서와 같이 단지 수중둔덕의 이동만을 예측하는 경우에는 식 (6)을 풀지 않고도 이동율을 쉽게 예측할 수 있다. 즉, 식 (7)이 파랑 특성과 관련된 함수로 표현되었으므로 파고와 주기에 대한 결합분포를 알게 되면 확률적으로 이동율의 기대치를 구할 수 있다.

3. 해석해의 유도

표사의 재질적 특성이 주어진다면 식 (7)의 이류계

수는 파고와 주기 그리고 수심의 함수가 된다는 사실을 전 절에서 알 수 있었다. 따라서 수심의 함수로 수중둔덕의 이동을 예측하기 위하여는 주기와 파고에 관한 분포특성을 알아야 한다. 본 연구에서는 Longuet-Higgins(1983)가 제안한 파고와 주기에 대한 결합분포함수(joint distribution function)를 이용하였다. 평균해수면을 상향 통과하는 시간간격을 주기로, 상향 통과된 두 점 사이의 최대 높이를 파고로 정의하여 임의의 시간동안에 발생될 확률이 무한시간이 지나면 정규분포를 따른다는 가정하에 파고와 주기에 대한 결합확률밀도함수를 다음 식 (11)과 같이 유도하였다.

$$p(\zeta, \eta) = \frac{2}{\sqrt{\pi\nu}} \frac{\zeta^2}{\eta^2} e^{-\zeta^2(1+(1-1/\eta^2)^{\nu})} L(\nu) \quad (11)$$

여기서 ζ , η 는 각각 파고와 주기를 무차원하여 표시된 확률변수로 다음 식 (12)와 같이 정의되며, ν 는 스펙트럼에서 주파수영역의 폭을 정의하는 계수(spectral width parameter)로 다음 식 (13)와 같다. 또한 보정계수, $L(\nu)$ 는 다음 식 (14)로 정의된다.

$$\zeta = \frac{H}{H_{rms}}, \quad \eta = \frac{T}{T_m} \quad (12)$$

$$\nu^2 = \frac{m_0 m_2}{m_1} - 1 \quad (13)$$

$$L(\nu) = \frac{2\sqrt{1+\nu^2}}{1+\sqrt{1+\nu^2}} \quad (14)$$

여기서 $H_{rms} = \sqrt{8m_0}$, $T_m = \sqrt{m_0/m_2}$ 이고, m_n 는 주파수영역에 대한 에너지 스펙트럼의 n 차 모멘트로 다음 식 (15)와 같이 정의할 수 있다.

$$m_n = \int_0^\infty \sigma^n E(\sigma) d\sigma \quad (15)$$

그러므로 식 (7)과 식 (11)을 다음 식 (16)과 같이 확률적으로 결합하면 수심에 따른 수중둔덕의 이동에 대한 기대치를 구할 수 있다.

$$E[C(h)] = \int_0^\infty \int_0^\infty p(H, T) C(H, T, h) dH dT \quad (16)$$

먼저 식 (7)의 이류계수에서 주기가 평균주기 T_m 으로 일정하다고 생각하면, 식 (7)의 이류계수는 단지 수심과 파고만의 함수가 된다. 따라서 식 (16)에서 주기에 대한 적분은 필요없게 된다. 이것은 물리적으로 수중둔덕의 이동에 대한 파고만의 영향을 해석하는 것과

동일하다. 그러므로 식 (16)은 다음 식 (17)과 같이 간단히 표시할 수 있다.

$$E[C(h)] = c_1 f_1(T_m, h) \int_0^\infty p(H) H^4 dH \quad (17)$$

그러므로 식 (17)을 풀기 위해서는 파고분포, $p(H)$ 가 정의되어야 한다. 파고분포는 식 (11)의 결합분포함수를 주기에 대하여 적분하고, Jacobian을 이용하여 변수 변환하면 다음 식 (18)과 같이 파고에 관한 주변분포함수(marginal distribution function)를 구할 수 있다.

$$p(H) = L(\nu) \frac{H}{H_{rms}^2} e^{-(H/H_{rms})^\nu} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{H}{\nu H_{rms}}\right) \right] \quad (18)$$

여기서 $\operatorname{erf}(x)$ 는 오차함수(error function)을 의미한다. 그러므로 식 (17)에 식 (18)을 대입하여 적분하면 수중둔덕의 이동을 해석할 수 있는 첫 번째 해석해를 다음 식 (19)와 같이 구할 수 있다.

$$E[C(h)] = A(\nu) f(T_m, h) H_{rms}^4 \quad (19)$$

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

여기서 한가지 중요한 사실은 식 (19)에서 $\nu=0$ 이라고 가정하면 식 (19)는 식 (17)의 파고분포함수, $p(H)$ 에 Rayleigh 분포함수를 대입하여 구한 해석해와 동일해진다. 이는 당연한 결과라고 생각된다. 왜냐하면 $\nu=0$ 이면 식 (18)은 Rayleigh 분포함수가 되기 때문이다. 따라서 식 (20)의 유도과정이 간접적으로 증명되었다. 그러나 식 (19)는 Rayleigh 분포함수로부터 얻은 결과와 다르게 $0.0 \leq \nu \leq 0.6$ 범위에서 주기의 변화에 대한 영향을 고려할 수 있다. 즉, 임의의 주파수 범위에서 발생되는 파고분포에 적용할 수 있다.

한편 식 (19)는 이류계수가 주기의 함수가 아니라는 가정하에 유도된 해석해이기 때문에 이류계수와 결합분포함수 사이에 존재하는 주기에 대한 상호작용의 효과를 고려하지 못한다. 따라서 이와 같은 상호작용의 효과를 해석하기 위하여는 어떠한 가정이 내포되지 않은 식 (7)과 식 (11)을 그대로 이용하여야 한다. 이때 식 (11)을 식 (16)에 대입하기 위하여는 식 (12)에 정의된 무차원변수를 이용하여 다음 식 (21)과 같이 변수 변환하여야 한다.

$$p(H, T) = \frac{2L(\nu)}{\sqrt{\pi\nu}} \frac{T_m}{H_{rms}^2} \frac{H^2}{T^2} e^{-(H/H_{rms})^\nu} \left[1 + (1 - T_m/T)^\nu \right] \quad (21)$$

그러므로 식 (21)을 식 (7)과 함께 식 (16)에 대입하면 다음 식 (22)를 얻을 수 있다.

$$E[C(h)] = c_1 \int_0^\infty \int_0^\infty p(H, T) f_1(T, h) dH dT \quad (22)$$

마지막으로 식 (22)를 파고에 대하여 적분한 후, 주기에 대하여 적분하는 과정에 변수 $\alpha = (T - T_m)/vT$ 을 도입하여 변수변환하면 수중둔덕 이동율을 해석할 수 있는 해석해를 다음 식 (23)과 같이 유도할 수 있다.

$$E[C(h)] = B(v) f(T_m, h) H_{ms}^4 \quad (23)$$

$$B(v) = \frac{15}{8} L(v) \int_{-\infty}^{1/v} \frac{(1 - v\alpha)^7}{(1 + \alpha^2)^{7/2}} d\alpha \quad (24)$$

여기서 $B(v)$ 는 식 (21)이 안정적으로 적용될 수 있는 v 의 범위내에서 수치적분을 통하여 구할 수 있다. 여러 개의 v 에 대한 식 (24)의 피적분함수(kernel function)를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 피적분함수는 v 가 커짐에 따라 첨두값이 커지면서 양의 방향으로 왜곡되고 있다. 또한 $v \geq 0.5$ 면 수치적으로 적분하기가 곤란해진다. Donelan *et al.*(1985)에 의하면 완전히 발달된 파랑인 경우, 식 (21)의 안정적인 적용범위는 $v \leq 0.3$ 경우이다. 따라서 본 연구에서도 $v \leq 0.3$ 범위에서 수치적분을 수행하여 함수, $B(v)$ 값을 Table 1에 제시하였다. 이때 식 (20)에 정의된 $A(v)$ 값도 같이 나타내었다. Table 1에서 알 수 있듯이 식 (23)의 계수, $B(v)$ 는 식 (19)의 계수, $A(v)$ 보다 큰 값을 갖는다. 이는 식 (19)에 이류계수와 결합분포함수 사이에 존재하는

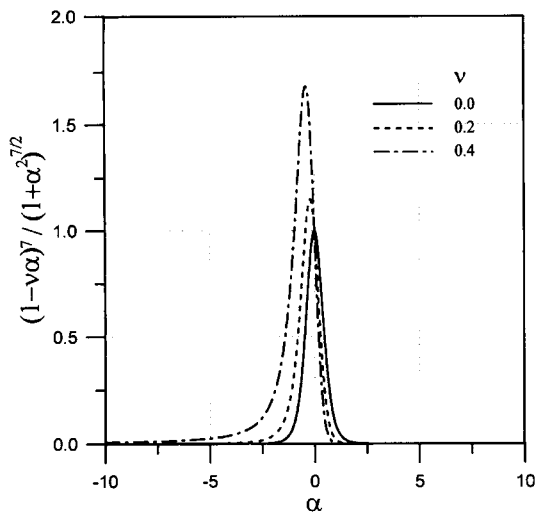


Fig. 1. Kernel functions of Eq. (24) with respect to the spectral width parameter.

Table 1. Comparison of coefficient $A(v)$ and $B(v)$ with respect to the spectral width parameter, v .

v	$A(v)$	$B(v)$
0.00	2.000	2.000
0.05	2.001	2.029
0.10	2.005	2.112
0.15	2.011	2.264
0.20	2.020	2.492
0.25	2.030	2.822
0.30	2.043	3.294

주기에 대한 상호작용의 영향이 고려되지 않았기 때문이다. 특히, 식 (23)은 $v=0$ 인 경우에 식 (19)와 같게 됨으로 식 (23)은 식 (19)를 포함하게 된다.

파고와 주기에 대한 결합분포함수를 이용하여 수중둔덕의 이동율을 예측할 수 있는 두 개의 해석해를 유도하였다. 하나는 이류계수가 주기의 함수가 아니라는 가정하에 순수하게 파고만의 변화에 의하여 발생하는 수중둔덕의 이동율을 예측할 수 있는 해석해이고, 다른 하나는 이류계수와 결합분포함수사이에 존재하는 주기에 관한 상호작용의 효과를 해석하기 위하여 유도되었다. 따라서 이들 해석해의 거동특성과 적용성에 대한 해석이 수행되어야 한다.

4. 수중둔덕의 이동율 예측

대상지역의 평균주기와 대표파고 그리고 표사의 재질을 알 때 수중둔덕의 이동율을 수심의 함수로 예측할 수 있는 해석해를 유도하였다. 먼저 수중둔덕의 이동율을 예측하기 위하여 유도된 해석해의 수심에 따른 거동특성을 살펴보기 위하여 식 (19)와 식 (23)를 이용하여 여러개의 v 에 대하여 계산된 수심에 따른 수중둔덕의 이동율을 Fig. 2에 나타내었다. 계산을 위하여 사용된 변수들은 Bailard(1981)가 식 (1)을 유도하면서 제시한 값들을 사용하였다. $S=2.65$, $p=0.64$, $c_f=0.005$, $\epsilon_B=0.21$, $\tan \phi=0.63$ 이며, $H_{ms}=1.0$ m, $T_m=10$ s로 가정하였다. 또한 Table 1에서 이미 살펴보았듯이 식 (19)의 해석해는 $v \leq 0.3$ 범위내에서 변화를 거의 보이지 않고 있어 Fig. 2에는 식 (23)으로부터 계산된 결과만 제시하였다. 즉, 식 (19)에 의하여 계산된 결과는 Fig. 2에서 $v=0.0$ 인 경우로 생각할 수 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 수심이 증가할수록 수중둔덕의 이동율은 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러나 v 가 커짐에 따라서 수중둔덕의 이동율은 증가하고 있다. 이

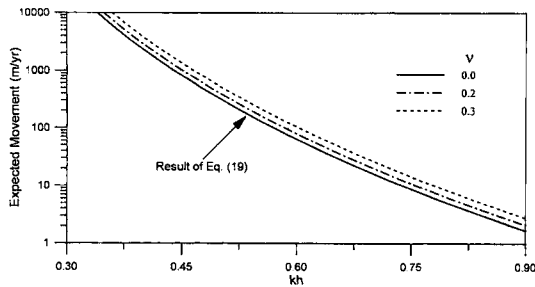


Fig. 2. Movement rates as function of water depth calculated by Eq. (23) with various spectral width parameter.

는 수중둔덕의 이동이 파고 뿐만 아니라 주기에 의하여도 영향을 받고 있다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 파랑의 주기가 길수록, 수심이 얕을수록 표사의 이동은 증가한다는 Hands and Allison (1991)의 관측자료와 일치하는 것이다. 따라서 본 연구에서 유도된 해석해는 수심의 변화에 따른 수중둔덕의 이동율을 올바르게 예측할 수 있다고 판단된다.

한편 유도된 해석해의 적용성을 확인하기 위하여 해석해의 결과를 세 개의 현장 관측자료 및 하나의 모형 실험자료와 비교하였다. 각각에 대한 표사특성 및 파랑제원을 Table 2에 제시하였다. 식 (23)을 이용하여 계산된 수중둔덕의 이동율을 관측자료와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이때 주어진 파랑조건에 맞는 v 를 결정하기가 어려워 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 $v=0.0$ 에서의 하한치와 $v=0.3$ 에서의 상한치 두 결과의 평균값을 해석해의 결과로 사용하였다. 일반적으로 파랑의 변화가 심한 영역에서는 v 가 상대적으로 큰 값을 갖게 되고 파랑의 변화가 거의 없는 심해영역에서는 $v=0.0$ 으로 고려할 수 있다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 해석해에 의하여 예측된 수중둔덕의 이동율은 관측자료보다 과대평가하는 경향을 나타내나, 해석해를 유도하는 과정에 내포된 이론식들의 제약성 및 입력자료의

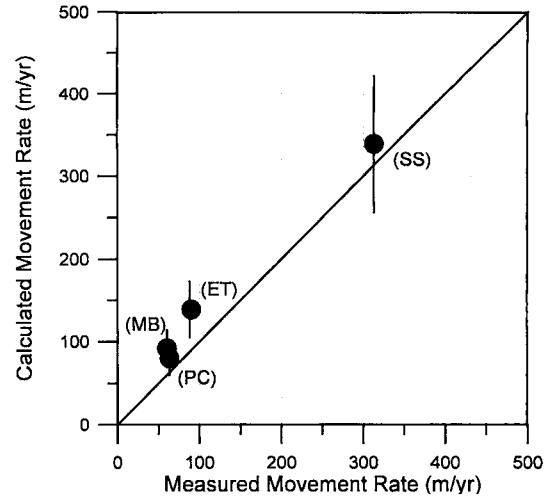


Fig. 3. Comparison of the analytical solutions calculated by Eq. (23) with the measured data.

부정확성 등을 고려할 때 해석해의 결과는 전반적으로 관측자료와 잘 일치한다고 볼 수 있다.

마지막으로 본 연구에서 유도된 해석해의 결과를 이산화 기법을 사용하여 식 (16)을 해석한 Dauglass (1995)의 결과와 비교하였다. 즉, 본 연구에서와 같이 파고와 주기에 대한 연속적인 결합분포함수를 사용하는 대신 Mobile Mound 외해영역의 바람자료로부터 예측된 20년간의 파고와 주기에 관한 WIS(Wave Information System)자료를 이용하였다. 이때 Dauglass (1995)가 외해영역의 자료를 이용하였기 때문에 해석해에서 $v=0.0$ 이라는 조건을 사용하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수심의 변화에 따른 해석해의 거동이 Dauglass(1995)가 이산화 기법으로 예측한 결과와 매우 잘 일치하고 있다.

그러므로 본 연구에서 유도된 해석해를 수중둔덕의 설치계획 시점에 이용한다면 수중둔덕의 설치수심을 올바르게 결정하는데 매우 유용하리라 판단된다. 그러나

Table 2. Wave conditions, median grain size, and movement rate measured at three field sites and one experimental test.

Location	Silver Strand, CA.		Port Canaveral, FL.		Mobile Mound, AL.		Experimental Test	
	SS	PC	MB	ET	SS	PC	MB	ET
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_m (s)	13.1	6.3	9.1	1.7				
Median grain size, d_{50} (mm)	0.20	0.21	0.20	0.20				
Movement rate (m/yr)	313	63	60	90				
Reference	Andrassy (1991)	Bodge (1994)	Hands and Allison (1991)	Otay (1995)				

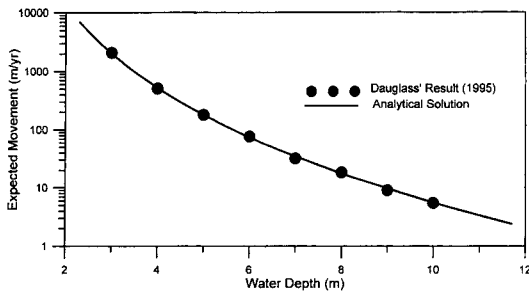


Fig. 4. Comparison of the analytical solution with Dauglass' (1995) result for Mobile Mound, AL.

해석해의 유도과정에 수중둔덕의 규모 등 형상학적 인자들이 고려되지 못하였다. 따라서 이와 같은 인자들에 의하여 수중둔덕의 이동율에 미치는 영향이 앞으로 연구되어야 한다.

5. 결 론

표사의 이동을 일으키는 외력이 파랑의 비선형성에 의하여 유발되는 하상에서의 흐름이라는 가정하에 개념적 모형을 근간으로 표사이동량을 정의하였다. 이와 같은 표사이동량을 표사보존식에 대입하여 수중둔덕의 이동과 관련된 현상을 지배하는 이류-확산 방정식과 동일한 형태의 지배방정식을 얻을 수 있었다. 이때 수중둔덕의 이동을 지배하는 파고와 주기 그리고 수심의 함수로 정의된 이류계수를 파고와 주기에 대한 결합분포함수와 확률적으로 결합하여 수중둔덕의 이동을 예측할 수 있는 해석해를 유도하였다. 해석해에 의하면 수심이 증가할수록 수중둔덕의 이동율은 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 그러나 스펙트럼에서 주파수영역의 폭을 정의하는 계수, ν 의 값이 커질수록 수중둔덕의 이동율은 증가하였다. 해석해의 적용성을 확인하기 위하여 해석해의 결과를 세 개의 현장 관측자료와 하나의 모형 실험자료와 비교하였다. 해석해에 의하여 예측된 수중둔덕의 이동율은 관측자료보다 과대평가하는 경향을 나타냈으나, 해석해를 유도하는 과정에 내포된 이론식들의 제약성 및 입력자료의 부정확성 등을 고려할 때 해석해의 결과는 전반적으로 관측자료와 잘 일치한다고 볼 수 있다. 특히 해석해는 대상 영역의 외해에서 추정된 파랑자료를 이용하여 이산화기법으로 예측된 결과와 매우 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서 유도된 해석해를 수중둔덕의 설치계획 시점에 이용한다면 수중둔덕의 설치수심을 올바르게 결정

하는데 매우 유용하리라 판단된다. 그러나 해석해의 유도과정에 수중둔덕의 규모 등 형상학적 인자들이 고려되지 못하였다. 따라서 이와 같은 인자들에 의하여 수중둔덕의 이동율에 미치는 영향이 앞으로 연구되어야 한다.

참고문헌

- Ahrens, J.P. and Hands, E.B., 1998. Velocity parameters for predicting cross-shore sediment movement, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **124**(1), pp. 16-20.
- Andrassy, C.J., 1991. Monitoring of a nearshore disposal mound at Silver Strand State Park, *Proc. Coastal Sediments '91*, pp. 1970-1984.
- Bailard, J.A., 1981. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach, *J. Geophys. Res.*, **86**(C11), pp. 10938-10954.
- Bodge, K.R., 1994. Performance of 1992 nearshore berm disposal at Port Canaveral, Florida, Olsen Associates, Inc., Jacksonville, FL.
- Bokuniewicz, H.J., Gerbert, J., Gordon, R.B., Kaminsky, P., Pilbeam, C. C., Reed, M. and Tuttle, C., 1977. Field study of the effects of storms on the stability and fate of dredged material in subaqueous disposal areas, *Tech. Rep. D-77-22*, US Army Corps Engineers, CERC, Vicksburg, MS.
- Dauglass, S.L., 1995. Estimating landward migration of nearshore constructed sand mounds, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **121**(5), pp. 247-250.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1984. *Water wave mechanics for engineers and scientists*, Prentice-Hall.
- Donelan, M.A., Hamilton, J. and Hui, W.H., 1985. Directional spectra of wind-generated waves, *Philos. Trans. R. Soc. Lond., Ser. A*, **315**, pp. 509-562.
- Hands, E.B. and Allison, M.C., 1991. Mound migration in deeper water and methods of categorizing active and stable depths, *Proc. Coastal Sediments '91*, pp. 1985-1999.
- Hands, E.B. and Bradely, K.P., 1990. Results of monitoring the disposal berm at Sand Island, Alabama, *Tech. Rep. DRP-90-2*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Hands, E.B. and DeLoach, S.R., 1984. An offshore mound

- constructed of dredged material, *Proc. Dredging and Dredged Material Disposal, Dredging '84*, ASCE, pp. 1030-1038.
- Hall, J.V. and Watts, G.M., 1957. Beach rehabilitation by fill and nourishment, *Transactions*, ASCE, **122**, pp. 159-160.
- Hartman, G.L., Ogston, A. and Hanson, M., 1991. Analysis of transport processes on ocean disposal mound, *Proc. Coastal Sediments '91*, pp. 2027-2036.
- Healy, T., Harms, C. and de Lange, W., 1991. Dredge spoil and inner shelf investigations off Tauranga Harbour, Bay of Plenty, New Zealand, *Proc. Coastal Sediments '91*, pp. 2037-2051.
- Lee, C.E., 1998. Migration of offshore mound constructed by dredged material, *J. Korean Soc. of Civil Engrs.*, **KSCE**, **2**(3), pp. 347-358.
- Lee, C.E., 1998. Critical wave height for predicting response of ocean disposal mound, *J. Korean Soc. of Civil Engrs.*, **KSCE** (submitted).
- Longuet-Higgins, M.S., 1983. On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field, *Proc. R. Soc. Lond.*, Ser. A, **389**, pp. 241-258.
- McLellan, T.N. and Kraus, N.C., 1991. Design guidance for nearshore berm construction. *Proc. Coastal Sediments '91*, pp. 2000-2011.
- McLellan, T.N., Pope, M.K. and Burke, C.E., 1990. Benefits of nearshore placement, *Proc. 3rd National Conference on Beach Preservation Technology*, pp. 339-353.
- Otay, E.N., 1995. Monitoring results of a nearshore disposal berm, *Proc. Coastal Dynamics '95*, pp. 547-558.
- Scheffner, N.W., 1996. Systematic analysis of long-term fate of disposed dredged material, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, ASCE, **122**(3), pp. 127-133.
- Schwartz, R.K. and Musialowski, F.R., 1977. Nearshore disposal: Onshore sediment transport, *Proc. Coastal Sediments '77*, pp. 85-101.
- Sheall, I.L., 1991. Reducing costs and improving the industry: Goals of the dredging research program of the United States, *J. Coastal Res.*, **7**(2), pp. 535-542.
- Vera-Cruz, D., 1972. Artificial nourishment of Copacabana beach, *Proc. 13th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 1451-1463.
- Zwamborn, J.A., Fromme, G.A.W. and Fitzpatrick, J.B., 1970. Underwater mound for protection of Durban's beaches, *Proc. 12th Coastal Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 975-994.