

파군특성에 따른 잠제의 반사와 투과 Reflection and Transmission of Submerged Breakwater due to Wave Groups

이철응*
Cheol-Eung Lee*

요 旨 : 천해영역에서 적용 가능한 동수역학적 수치모형을 이용하여 규칙 입사파군이 수직으로 입사할 때 잠제에 의하여 발생하는 반사와 투과의 거동 특성을 해석하였다. 여러 입사파군 조건에서 계산된 잠제의 반사율과 투과율이 파군의 발달정도를 해석하기 위하여 제시된 변수들의 함수로 표시되었다. 입사파군과 잠제의 반사율 및 투과율의 관계를 정성적으로 해석한 결과, 고파군이 발달될수록 잠제에 의하여 발생하는 입사파랑의 반사율과 투과율의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 파군으로 입사하는 경우의 반사율과 투과율이 단일 파랑으로 입사하는 경우의 반사율과 투과율에 비하여 상대적으로 작게 나타났다. 그러나 고파군과 고파군의 간격에 따른 반사율과 투과율의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 비록 제한적이지만 본 연구에서 해석된 결과에 의하면 파랑 연이음의 평균을 이용할 때 입사파군과 잠제의 반사율 및 투과율의 관계가 가장 잘 해석될 수 있다.

핵심용어 : 파군, 잠제, 반사, 투과, 연이음

Abstract □ The effects of wave groups on reflection and transmission over a submerged breakwater are studied by using a hydrodynamic numerical model and five independent wave grouping parameters. Based on qualitative analyses of limited data, it is found that the reflection and transmission coefficients of submerged breakwater may be strongly correlated with the incident wave groups. The reflection and transmission coefficients tend to decrease as wave groups become relatively larger. In particular, the reflection and transmission coefficients due to wave groups are evaluated smaller than those of single incident waves. However, the reflection and transmission coefficients are not affected by the interval of higher wave groups. It is finally concluded that the mean of run-length among wave grouping parameters can be an useful parameter for correlating the wave groups with the reflection and transmission coefficients of submerged breakwater.

Keywords : wave groups, submerged breakwater, reflection, transmission, run-length

1. 서 론

외해에서 내습하는 파랑 에너지를 제어할 목적으로 연안역 주변에 경사제나 직립제 그리고 혼성제와 같은 여러 종류의 방파제가 건설되고 있다. 특히 최근에는 환경 오염을 최소화하기 위해 해수의 원활한 유통을 확보하면서 동시에 파랑 에너지를 효과적으로 제어할 수 있는 여러 가지 형태의 방파제가 개발되고 있다. 이와 같은 목적으로 개발된 방파제 형식 중의 하나가 잠제이다. 특히 잠제는 방파제의 천단고가 수중에 위치하기

때문에 공사비를 절약할 수 있을 뿐만 아니라 연안역의 해양 생태에 미치는 부작용을 최소화하면서 파랑 에너지를 효과적으로 차단할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 잠제를 효율적, 안정적으로 설계하기 위해서는 단일 파랑 뿐만 아니라 파군으로 입사하는 다양한 조건하에서 잠제에 의하여 발생하는 반사와 투과 그리고 시 공간에 따른 잠제 주변의 파랑변형 및 흐름 특성에 대한 정확한 해석이 먼저 선행되어야 한다.

현재까지 잠제 주변에서 파랑장의 거동특성을 해석하려는 대부분의 연구들은 단일 파랑을 대상으로 모형설

*강원대학교 토목공학과, 조교수(Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University, Chunchon 200-701, Korea)

험을 통하여 이루어졌다. 대표적으로 Seelig(1980), Ahrens (1989) 그리고 Van der Meer and Daemen(1994) 등이 모형 실험자료를 이용하여 잠체에 의한 단일 입사파의 반사율과 투과율을 산정할 수 있는 경험식을 제시하였다. 그러나 현재까지 제시된 대부분의 경험식들은 대단히 제한적인 자료를 근간으로 제시된 것이기 때문에 아직 보완되어야 할 문제점들을 많이 내포하고 있다(Bruun, 1985). 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 대안은 그 현상에 적합한 수학적 모형을 근간으로 여러 조건에 적용 가능한 수치모형을 개발하는 것이다. 방파제 등의 연안 구조물과 파랑의 상호작용을 해석할 수 있는 수치 모형들이 Kobayashi *et al.*(1987), Van Gent(1995), Dodd(1998) 등에 의하여 개발되었다. 그러나 이들 수치 모형의 대부분은 잠체가 아닌 경사제 전면에서 파의 처오름 등과 같은 현상을 해석하는데 적용되어 왔다. Kobayashi and Wurjanto(1989)는 기존의 수치모형에 투과 경계조건을 도입하여, 비선형 규칙파가 수직으로 입사하는 경우에 잠체에 의한 입사파의 반사율과 투과율을 계산하였다. Losada *et al.*(1992)과 Grilli *et al.*(1994)은 고립파가 수직으로 입사하는 경우에 대하여 잠체와 고립파의 상호작용에 의하여 발생하는 파랑장의 변화 특성을 해석하였다. 최근에는 이(1999)가 비선형 규칙파와 고립파가 입사하는 경우에 잠체 주변의 파랑장을 해석한 바 있다. 그러나 이상의 연구들은 입사파가 규칙파이던 불규칙파이던 간에 모두 단일 파랑에 대한 것들이다. 따라서 입사파가 단일 파랑이 아닌 임의의 형태를 갖는 파군(wave group)으로 내습하는 경우에 잠체와 파군과의 동수역학적인 상호작용들을 해석하지 못하였다. Goda(1976), Mase and Iwagaki(1986), Medina and Hudspeth(1990), 이 이(1993) 등 많은 연구자들에 의하여 해안 공학적으로 중요한 여러 분야에서 파군에 대한 영향이 언급된 바 있다. 현재까지 경사제 형식의 방파제와 파군과의 상호작용에 대한 실험적 연구가 Johnson *et al.*(1978), Burcharth(1979), Van der Meer and Pilarczyk(1987), Hall(1994) 그리고 Medina *et al.*(1994)에 의하여 수행되었다. 그러나 이들에 의한 해석 결과는 각기 다르게 제시되었다. 즉, Johnson *et al.*(1978), Burcharth(1979), Medina *et al.*(1994)은 경사제의 안전성에 미치는 파군의 영향이 상당히 크다고 제시한 반면, Van der Meer and Pilarczyk(1987), Hall(1994)은 파군의 영향이 거의 없다고 제시하였다. 이와 같이 동일한 현상에 대해 각기 다른 결론이 제시된 원

인 중의 하나는 파군의 발달 정도를 정확하게 나타낼 수 있는 변수에 대한 정의가 올바르게 설정되어 있지 않은데서 기인될 수 있다. 즉, 파군과 구조물과의 상호작용을 해석하는데 있어서 가장 어려운 문제 중의 하나가 파군의 발달 정도를 정확하게 나타낼 수 있는 변수가 무엇이나 하는 것이다. 파군의 발달 정도를 정량화하기 위하여 많은 연구자들에 의하여 여러 가지 해석 방법과 변수들이 제시되었다. 먼저 파랑의 에너지 스펙트럼만을 이용하여 파군의 발달 정도를 해석하기 위해 스펙트럼 첨두계수(spectral peakedness parameter)라는 변수가 Goda(1970)에 의하여 제시되었다. 후에 파고자료에서 고파군이 얼마나 연속적으로 발생하는가를 해석할 수 있는 파랑 연이음(run-length)파, 파군과 파군사이의 간격을 해석하는 전 연이음(total run-length) 개념이 도입되었다. Goda(1970), Ewing(1973), Kimura(1980) 등 많은 연구자들이 이와 같은 개념을 가지고 파군과 에너지 밀도와의 상관성 그리고 파군의 발달 정도를 정량화하였다. 현재 파군의 발달 정도를 정량화하기 위하여 많이 적용되고 있는 또 다른 해석방법이 Funke and Mansard(1979)에 의하여 제시된 파랑에너지 이력(Smoothed Instantaneous Wave Energy History)을 이용하는 방법이다. 시간의 함수로 표시된 에너지 이력은 동일한 에너지 스펙트럼일지라도 그 특성이 매우 다른 파랑이 발생될 수 있다는 사실로부터 출발된 개념으로, 파군의 발달 정도가 파군계수(groupiness factor)라는 변수에 의하여 정량화된다. 이와 같은 개념에 근거하여 Thompson and Seelig(1984)의 LVTS(Local Variance Time Series), Medina *et al.*(1994)의 포락초과계수(envelope exceedance coefficient) 등 다른 유사 변수들이 파군특성 해석을 위해 제시되었다. 그러나 Haller and Dalrymple(1995)에 의하여 언급된 바와 같이 아직까지 이와 같은 변수들 중에서 어떤 변수가 파군의 발달 정도를 가장 잘 묘사하는지에 대한 확실한 근거는 제시되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 순수하게 스펙트럼만을 이용하는 스펙트럼 첨두계수를 포함하여 파랑의 연이음, 전 연이음, 파군계수 그리고 포락초과계수를 모두 적용하여 파군의 발달 정도를 정량화하고, 잠체에 의하여 발생하는 파랑장의 변화 특성과 연계하여 관련변수들 간의 상관성을 해석하였다.

본 연구에서는 천해영역에서 적용 가능한 마찰의 효과가 고려된 유한 진폭 천수방정식을 이용하여 각기 다른 특성을 갖는 파군이 입사하는 경우에 잠체 주변의

파랑장을 해석하였다. 규칙 입사파군이 수직으로 입사하는 경우에 잠제에 의하여 발생하는 반사파와 투과파의 거동특성이 해석되었다. 단일 파랑조건을 포함하여 각기 다른 입사 파군 조건하에서 계산된 잠제에 의한 입사파의 반사율과 투과율이 파군의 발달정도를 묘사하기 위하여 여러 변수들의 함수로 제시되었다.

2. 파랑장 계산을 위한 모형의 수립

잠제에 의한 입사파랑의 반사와 투과 그리고 주변의 파랑변형 및 흐름 특성을 수치적으로 해석하기 위하여 이(1999)의 수치모형을 이용하였다. 비선형 단주기 파랑뿐만 아니라 장주기 고립파를 대상으로 잠제 주변에서 발생하는 시간과 공간에 따른 파랑 변형 및 흐름의 변화특성을 만족스럽게 해석한 수치모형이다. 자세한 내용이 이(1999)에 언급되어 있어 본 논문에서는 그 개념만 간략히 언급하도록 한다. 수치모형의 지배방정식은 질량보존방정식과 운동량방정식을 해저면에서 자유수면까지 수심적분하면 얻어지는 유향진폭 천수방정식으로, 입사파고와 주기로 무차원화시키면 다음 식 (1) 및 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{1}{2}h^2\right) = -\theta h - f|u|u \quad (2)$$

여기서 t 와 x 는 각각 무차원화된 시간과 공간에 대한 독립변수이고, f 는 해저면에서 발생하는 마찰효과를 고려하기 위하여 도입된 무차원화된 마찰계수로 전 단면에 대하여 일정하다고 가정하였으며, θ 는 무차원화된 단면의 경사를 의미한다. 또한 h 도 해저면에서 자유수면까지의 연직거리를 파고로 무차원화시킨 종속변수이다. 동일하게 u 는 해저면에서 자유수면까지 수심 적분된 수입자의 평균유속을 입사파고 H 에 의하여 무차원화된 종속변수로 $u = u'/\sqrt{gH}$ 와 같이 정의된다. 식 (1)과 (2)는 입사파랑의 파고와 주기로 무차원화된 지배방정식으로, 경사면에서 마찰효과가 고려된 쌍곡선형의 비선형 편미분방정식이다. 따라서 수치해석을 수행하기 위해서는 경사면의 기하학적인 형상과 초기조건 그리고 대상영역에서 입사점과 투과점의 경계조건이 올바르게 설정되어야 한다.

먼저 초기조건은 외해에서 잠제로 진행되는 입사파가

$t = 0$ 일 때 입사점, $x = 0$ 에 도달한다는 가정하에 다음 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\eta(x) = u(x) = 0, \quad t = 0, x \geq 0 \quad (3)$$

여기서 η 는 정수면에서 자유수면까지의 연직거리를 입사파고로 무차원화시킨 변수이다.

한편 입사점의 경계조건은 Hibberd and Peregrine (1979)에 의하여 제시되고 Kobayashi *et al.*(1987)과 Titov and Synolakis(1995) 등 많은 연구자들에 의하여 그 적용성이 확인된 특성 곡선법을 이용하면 다음 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$h(t) = d_i + \eta_i(t) + \eta_r(t), \quad x = 0, \quad t \geq 0 \quad (4)$$

여기서 d_i 는 입사파고로 무차원화된 입사점의 수심, η_i 와 η_r 는 각각 정수면을 기준으로 입사점에 부여된 입사파의 자유수면과 반사파의 자유수면을 의미한다. 동일하게 투과점에서의 경계조건은 다음 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$h(t) = d_e + \eta_e(t), \quad x = x_e, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

여기서 d_e 는 입사파고로 무차원화된 투과점, x_e 에서의 수심, η_e 는 투과파의 자유수면을 의미한다. 마지막으로 식 (4)에 정의된 입사점에서의 입사파를 정의하면 수학적 모형의 수립이 완성된다. 서론에서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 단일 파랑뿐만 아니라 파군으로 입사하는 경우를 대상으로 잠제에 의하여 발생하는 반사파와 투과파의 거동특성이 해석되었다.

비선형 규칙파의 입사점에서 자유수면은 제한된 조건에서 적용 가능한 Stokes 2차 이론을 사용하여 정의하였다(Dean and Dalrymple, 1984). 이때 식 (1)과 (2)를 유도하는 과정에 도입된 무차원 개념들을 동일하게 적용하면, 단일 파랑에 대한 자유수면을 다음 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_i(t) = a_1 \cos[2\pi(t + t_0)] + a_2 \cos[4\pi(t + t_0)], \quad t \geq 0 \quad (6)$$

여기서 a_1 과 a_2 는 각각 무차원화된 진폭을 의미하며, t_0 는 $t = 0$ 에서 $\eta_i = 0$ 이 만족되도록 도입한 상수이다. 이때 파랑의 비선형성에 의하여 발생하는 진폭, a_2 는 입사점의 수심과 입사파랑의 특성에 의존하게 된다. 식 (6)은 단일 주기를 갖는 비선형 규칙파의 단일 파랑에 대한 것이다. 따라서 파군과 잠제의 상호작용을 해석하기 위해서는 임의 파군을 발생시킬 수 있는 기법이 필요

하게 된다. Sand(1982)와 Lo and Dean(1995) 등의 많은 연구자들에 의하여 사용된 파군 발생 기법은 인접한 주기를 갖는 단일 파랑들을 선형적으로 합성시키는 방법이다. 이와 같은 개념을 도입하게 되면 입사점에서 파군의 자유수면은 다음 식 (7)과 같이 정의될 수 있다.

$$\eta(t) = a_1 C_H(t) \cos[2\pi\Delta T(t + t_0)] \cos[\pi(t + t_1)] + a_2 \cos[4\pi\Delta T(t + t_0)] \cos[2\pi(t + t_1)], \quad t \geq 0 \quad (7)$$

여기서 $C_H(t)$ 는 입사 파군내에 고파군과 저파군이 함께 발생되도록 도입된 계단함수로, 주기는 파군의 주기와 동일하며, 크기는 고파군과 저파군의 최대 파고비로 정의하였다. 또한 $\Delta T = T_m/(T_m - T_n)$, T_m 과 T_n 은 각각 합성된 두 단일 파랑의 주기이며, t_1 은 $t=0$ 에서 $\eta=0$ 이 만족되도록 도입한 변수이다. 따라서 단일 파랑인 경우에는 식 (6)을, 파군인 경우에는 식 (7)을 이용하여 식 (1)~(5)를 해석하게 되면 잠제 주변에서 발생하는 입사파의 투과 및 반사 그리고 시간과 공간에 따른 파랑 변형특성을 해석할 수 있다.

한편 본 연구의 목적은 입사점에서 임의의 파랑이 입사할 때 잠제에 의하여 발생하는 입사파의 반사율과 투과율을 산정하여 파군의 발달 정도를 나타내는 여러 변수들과의 관계를 규명하는 것이다. 잠제의 기하학적인 형상 변화에 따른 반사율과 투과율의 관계에 대하여는 해석하지 않았다. 즉, 일정한 기하학적인 형상을 갖는 잠제를 대상으로 입사파를 변화시키면서 입사파의 특성에 따른 잠제의 반사율과 투과율의 관계를 해석하였다. 따라서 반사율과 투과율을 해석할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 본 연구에서는 입사파의 잠제에 의한 반사율과 투과율을 Kobayashi and Wurjanto(1989)가 제시한 방법을 적용하였다. 일반적으로 반사율과 투과율은 각각 입사파고에 대한 반사파고, 입사파고에 대한 투과파고의 비로 다음 식 (8)과 같이 정의된다.

$$R = H_r/H_i \quad (8a)$$

$$T = H_t/H_i \quad (8b)$$

여기서 H_i 는 입사점에서 입사된 파랑이 잠제에 의하여 반사된 후, 다시 입사점으로 되돌아온 반사파의 파고이며, H_r 는 투과점에 도달한 투과파의 파고이다. Kobayashi and Wurjanto(1989)는 반사파고와 투과파고를 산정하기 위하여 에너지 개념을 도입하였는데, 이와 같은 개념을 사용하면 식 (8)에 정의된 반사율과 투과율은 다음 식

(9)와 같이 시간 평균된 자유수면의 함수로 정의될 수 있다.

$$R = \sqrt{\bar{\eta}_r^2/\bar{\eta}_i^2} \quad (9a)$$

$$T = \sqrt{\bar{\eta}_t^2/\bar{\eta}_i^2} \quad (9b)$$

여기서 각각의 시간 평균된 자유수면은 입사파랑이 정상상태에 도달된 후, 다음 식 (10)과 같이 일정한 시간 동안에 대하여 평균하면 된다.

$$\bar{\eta}_i^2 = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} \eta_i(t)^2 dt \quad (10a)$$

$$\bar{\eta}_r^2 = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} \eta_r(t)^2 dt \quad (10b)$$

$$\bar{\eta}_t^2 = \frac{1}{t_p} \int_t^{t+t_p} \eta_t(t)^2 dt \quad (10c)$$

따라서 식 (9)와 (10)을 이용하면 잠제에 의하여 발생하는 입사파의 반사율과 투과율은 시간에 따라 변화되는 자유수면의 함수로부터 쉽게 정량화할 수 있다.

3. 파군특성 해석을 위한 변수의 정의

심해에서 발생한 불규칙파가 갖는 중요한 특성 중의 하나가 파군현상으로, 인접한 주기를 갖는 불규칙파들의 에너지가 중첩되어 발생하는 현상이다. 항만 진동 등과 같이 해안 공학적으로 중요한 현상에 미치는 파군에 대한 영향이 많은 연구자들에 의하여 언급되고 있다. 그러나 방파제 등 많은 구조물과 파군과의 상호작용에 대한 기존의 연구 결과들이 각기 다르게 제시되고 있다. 이와 같이 동일한 현상에 대해 다른 결과들이 제시된 원인 중의 하나는 파군의 발달 정도를 정확하게 나타낼 수 있는 변수에 대한 정의가 올바르게 설정되어 있지 않은데서 기인될 수 있다. 즉, 파군의 발달 정도를 정확하게 나타낼 수 있는 변수가 무엇이나 하는 것이다. 서론에서 언급된 바와 같이 파군의 발달 정도를 해석할 수 있는 많은 방법과 변수들이 제시되어 왔지만, 어느 변수가 일반성을 가지고 적용될 수 있는나 하는 문제에 대해서는 아직까지도 논의 대상이 되고 있다.

본 연구에서는 현재 가장 일반적으로 적용되고 있는 파군특성 해석을 위한 변수들을 선택하여 파군의 발달 정도를 해석하였다. 먼저 순수하게 파랑의 스펙트럼만을 이용하여 파군의 발달 정도를 해석할 수 있는 스펙트

림 침두계수를 계산하는 방법이다. 스펙트럼 침두계수를 이용하여 해석하는 방법을 보완하기 위해 제시된 다른 해석 방법이 파고 자료를 가지고 파랑의 연이음과 전 연이음을 산정하는 해석방법이다. 파랑의 연이음을 해석하는 방법에서는 임의의 파고 이상의 고파랑이 얼마나 연속적으로 또는 얼마의 간격으로 발생하는가를 해석할 수 있다. 이와 유사한 개념으로 포락초과계수라는 변수가 비교적 최근에 제시되었다. 한편 시간에 따른 연속적인 파랑 자료를 직접 이용하는 해석방법이 에너지 이력 개념인데, 현재 파군의 발달정도를 해석하는데 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 에너지 이력 개념을 이용하는 해석 방법에서는 파군의 발달 정도가 파군계수라는 변수에 의하여 정량화된다. 본 연구에서는 이상에서 언급된 모든 변수들을 이용하여 입사 파군의 발달 정도가 정량화되었다. 이하에 각 변수들에 대한 수학적 정의와 물리적 의미가 언급되었다.

먼저 파랑의 연이음과 전 연이음은 상향통과법으로 이산화된 파고자료를 가지고 산정할 수 있다. 파랑의 연이음은 파고자료에서 임의의 파고 이상이 얼마나 연속적으로 발생하는가를 해석하기 위하여 제시된 변수이며, 전 연이음은 파군과 파군 사이의 간격을 해석하기 위하여 제시된 변수이다. 동일한 스펙트럼일지라도 시간에 따라 다르게 나타나는 파군 특성을 해석하기 위하여 제시된 개념이다. 따라서 각각의 시간대에서 구해진 연이음을 평균함으로써 전체 파군의 특성을 정량화하는 해석방법이 현재 가장 많이 적용되고 있다. 불규칙 파군에 대하여 파랑의 연이음과 전 연이음의 평균을 구할 수 있는 식이 Goda(1970)와 Ewing(1973) 등에 의하여 제시되었는데, 주파수 영역에서 정의된 파랑의 에너지 스펙트럼을 이용하여 쉽게 계산할 수 있게 유도되었다. 먼저 넓은 폭을 갖는 스펙트럼에 대하여 Goda(1970)는 다음 식 (11)을 제시하였다.

$$\langle I_1 \rangle = 1/(1 - e^{-k^2/2}) \quad (11a)$$

$$\langle I_2 \rangle = 1/(1 - e^{-k^2/2}) + e^{-k^2/2} \quad (11b)$$

여기서 $\langle I_1 \rangle$ 과 $\langle I_2 \rangle$ 는 각각 파랑 연이음과 전 연이음의 평균이며, $k = \rho/\sqrt{m_0}$, ρ 는 고파군을 정의하기 위하여 도입된 임의의 기준높이(threshold level), $m_0 = \int_0^\infty \omega^2 S(\omega) d\omega$ 이다. 또한 Ewing(1973)은 식 (11)에 포함된 가정, 스펙트럼의 폭이 넓다는 적용의 제약성을 해결하기 위하여 스펙트럼 침두계수, Q_p 를 도입하여 다음 식 (12)를 제시하였다.

$$\langle I_1 \rangle = \frac{Q_p}{\sqrt{2}k} \quad (12a)$$

$$\langle I_2 \rangle = \frac{Q_p}{\sqrt{2}k} e^{k^2/2} \quad (12b)$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^\infty \omega S(\omega)^2 d\omega \quad (12c)$$

본 연구는 파랑의 연이음과 전 연이음을 원래의 근본 개념에 근거하여 쉽게 직접 계산할 수 있는 규칙파군에 대한 해석이기 때문에 식 (11)과 (12)를 사용하여 계산하는 것 외에도 직접계산법으로도 파랑의 연이음과 전 연이음의 평균을 산정하였다. 파랑 연이음의 평균이 크고, 전 연이음의 평균이 작다는 것은 고파군이 자주 발생된다는 것을 의미하는 것이다.

한편 Medina *et al.*(1994)도 파군의 발달 정도를 해석하기 위해 다음 식 (13)과 같이 정의되는 포락초과계수를 사용하였다.

$$\alpha = \frac{1}{T_n} \int_0^\infty \Delta H(t) U[\Delta H(t)] dt \quad (13)$$

여기서 T_n 은 파랑을 관측한 전시간을 의미하며, $\Delta H(t) = H(t)/H_n - 1$ 이고, H_n 는 파군속에 있는 고파고를 정의하기 위하여 도입된 임의의 기준파고, U 는 Heaviside 계단함수이다. 이때 파고의 포락선은 Medina and Hudspeth (1990)에 의하면 $H(t) \approx 2\sqrt{2E(t)}$ 를 이용하여 쉽게 계산된다. $E(t)$ 는 다음 식 (14)에 정의된 에너지 이력함수이다. 식 (13)에서 알 수 있듯이 포락초과계수가 크다는 것은 파군의 발달 정도가 크다는 것을 의미한다. Medina *et al.*(1994)는 식 (13)에 정의된 포락초과계수를 이용하여 경사제 피복제의 안정성에 미치는 파군의 영향을 만족스럽게 해석하였다.

파고자료를 이용하여 연이음을 해석하는 방법과는 다르게 파군의 연속적인 포락선을 이용하는 해석 방법도 현재 파군의 발달 정도를 해석하기 위하여 많이 사용되고 있다.

대표적인 해석방법이 Funke and Mansard(1979)에 의하여 제시된 에너지 이력함수를 이용하여 파군계수를 산정하는 것이다. 에너지 이력함수, $E(t)$ 는 다음 식 (14)와 같이 정의된다.

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^\infty \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \quad (14)$$

여기서 T_p 는 침두 주파수에 해당하는 파랑의 주기를 의

미하며, $Q(\tau)$ 는 창문함수(window function)로, 본 연구에서는 다음 식 (15)와 같은 Bartlett 함수를 사용하였다.

$$Q(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p, & -T_p \leq \tau < T_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

따라서 식 (14)를 이용하여 해석하게 되면 파군이 형성되는 시간 이력을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 에너지의 시간 이력을 가지고 파군의 발달 정도를 정량적으로 산정하기 위해서는 다음 식 (16)과 같이 정의되는 파관계수가 도입되어야 한다.

$$GF = \sqrt{\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt / \bar{E}} \quad (16a)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} E(t) dt \quad (16b)$$

Funke and Mansard(1979)의 해석에 의하면 파관계수, GF 가 크다는 것은 파군의 발달정도가 크다는 것을 의미하게 된다.

본 연구에서는 이상에 제시된 스펙트럼 침투계수, 파랑의 연이음, 전 연이음의 평균, 포락초과계수, 그리고 파관계수를 이용하여, 임의로 발생시킨 입사파군과 잠제의 동수역학적인 거동과의 상관성을 해석하였다.

4. 파군에 따른 반사율과 투과율의 산정

잠제에 의하여 발생하는 반사율 및 투과율과 입사파군의 상관성을 해석하기 위하여, 반사율과 투과율 그리고 파랑변형특성을 해석할 수 있는 동수역학적 모형이 수립되었다. 또한 파군의 발달 정도를 해석할 수 있는 방법과 변수들이 정의되었다. 따라서 이하에서는 각각에서 산정된 결과들에 대하여 해석한 결과를 제시하였다.

수치모형의 검증은 위하여 먼저 식 (6)에 의하여 정의된 단일 비선형 규칙파가 입사할 때 잠제에 의하여 발생하는 반사파와 투과파의 시간에 따른 거동특성과 잠제 주변의 흐름 특성이 계산되었다. 계산에 사용된 잠제의 기하학적인 형상은 단일 파랑에 대한 것이나, 파군에 대한 것이나 모두 이(1999)가 사용한 조건과 동일하다. 또한 단일 파랑의 입사조건도 동일하다. Fig. 1과 Fig. 2가 단일 파랑이 입사할 때 나타나는 동수역학적인 파랑 변형 특성이다. 동일한 결과가 이(1999)에 제시된 바 있다. 그럼에서 쉽게 알 수 있듯이 본 연구의

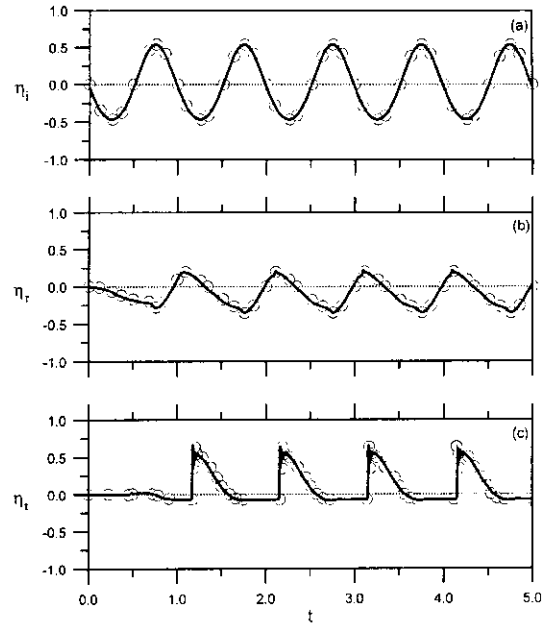


Fig. 1. (a) Incident wave profile, (b) reflected wave profile at seaward boundary and (c) transmitted wave profile at landward boundary for monochromatic wave.

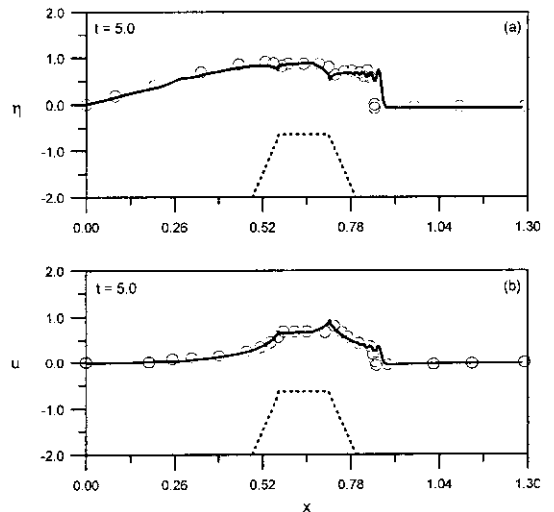


Fig. 2. Spatial variations of (a) free surface elevation and (b) horizontal velocity at time $t = 5.0$.

결과가 Kobayashi and Wurjanto(1989)의 결과(○)와 거의 동일하게 나타나고 있다. 이때 식 (9)에 의하여 산정된 잠제에 의한 반사율과 투과율은 각각 0.554와 0.685이다.

한편 파군이 입사할 때 잠제에 의하여 발생하는 반

Table 1. Conditions for generation of incident wave groups

Case	T_m (sec)	T_N (sec)	ΔT	$C_H(t)=H_L/H_H^*$
#I-1	1.500	0.900	2.5	1.0
-2				0.6
-3				0.2
#II-1	0.500	0.409	5.5	1.0
-2				0.6
-3				0.2
#III-1	0.300	0.265	8.5	1.0
-2				0.6
-3				0.2

* H_H : Maximum wave height of higher wave groups
 H_L : Maximum wave height of lower wave groups

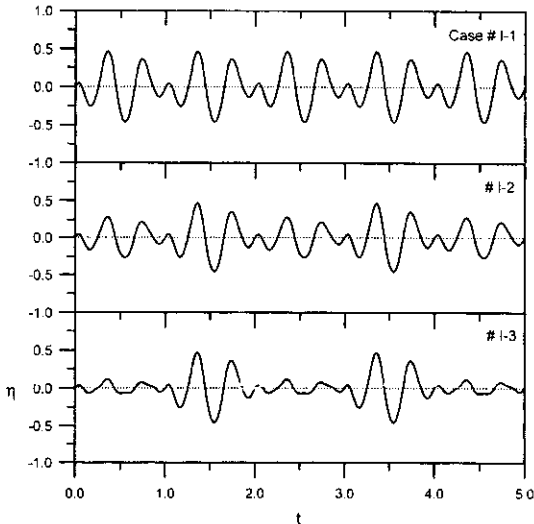


Fig. 3. Incident wave groups for Case #1.

사율과 투과율 그리고 시간 및 공간에 따른 입사파랑의 변형특성에 대한 해석을 위해, 식 (7)을 이용하여 특성이 다른 여러 파군을 발생시켰다. 발생된 파군의 종류는 모두 9가지로, 파군의 발달정도를 해석하기 위하여 제시된 변수들의 정량적인 크기가 각기 다르게 나타나도록 하였다. 예로 파랑의 연이음과 전 연이음의 평균이 다르게 산정되도록, 또한 파군계수가 명확히 구분되도록 발생시켰다. Table 1에 제시된 바와 같이 식 (7)의 ΔT 와 파군의 파고비, C_H 를 변화시키면서 고파군과 저파군이 함께 발생되도록 하였다. Fig. 3~Fig. 5에 각각의 조건에서 발생된 입사파군이, Fig. 6에 발생된 파군의 에너지 스펙트럼이 제시되었다. 각각의 그림에서 알 수 있듯이 파군의 형태가 매우 다르게 발생되고 있다. 또한 합성된 각 주기에서 스펙트럼의 첨두가 명확하게 나

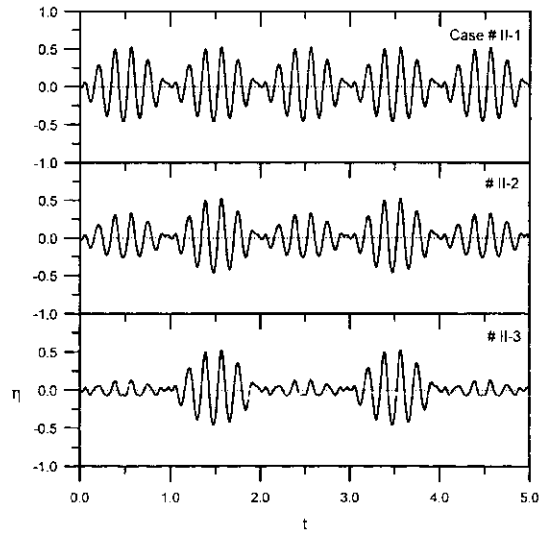


Fig. 4. Incident wave groups for Case #II.

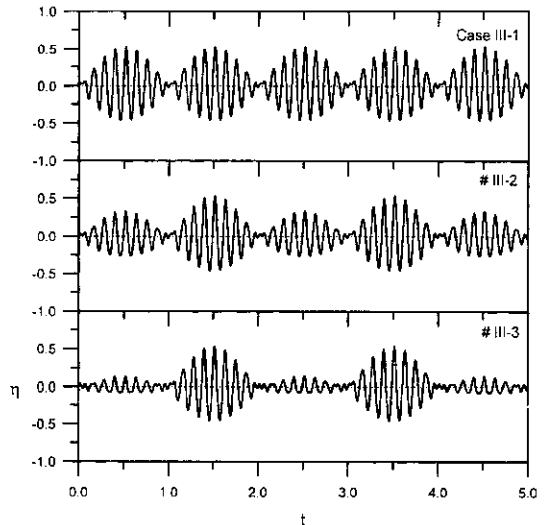


Fig. 5. Incident wave groups for Case #III.

타나고 있으며, 고파군과 고파군 사이에 저파군이 함께 존재하는 경우에는 스펙트럼의 크기와 형태가 약간 변화되고 있음을 알 수 있다. Fig. 6의 결과를 이용하여 먼저 스펙트럼의 첨두계수를 구한 다음 $p=0.25$ 라는 조건을 부여하여 식 (11)과 식 (12)로부터 파랑의 연이음 및 전 연이음의 평균을 구하였다. 여기서 $p=0.25$ 인 조건은 파고 개념으로 환산하면 입사 최대파고의 절반에 해당하는 크기이다. 직접계산법으로 구해진 결과와 함께 Table 2에 그 결과를 제시하였다. 이때 입사파군에 의하여 발생하는 입사파의 반사율과 투과율도 함께

나타내었다. Fig. 1과 2에 제시된 것과 같은 시간과 공간에 따른 입사파군 및 흐름에 대한 변형특성이 계산되었으나, 이에 대한 결과는 본 연구에서 제시하지 않았다. 먼저 스펙트럼 첨두계수의 변화는 일반적인 경향과 일치하고 있다. 즉, 스펙트럼 첨두계수가 상대적으로 크다는 것은 스펙트럼의 폭이 좁다는 것을 의미하기 때문이다. 한편 표에서 알 수 있듯이 식 (11)과 (12)를 이

용하여 계산된 결과가 직접계산법으로 산정된 결과와 정성적으로는 유사한 거동특성을 보이고 있으나, 정량적으로는 큰 차이를 나타내고 있다. 이에 대한 원인은 여러 가지로 생각할 수 있지만 식 (11)과 (12)에서 알 수 있듯이 각각의 제안식이 너무 스펙트럼의 폭에 민감하

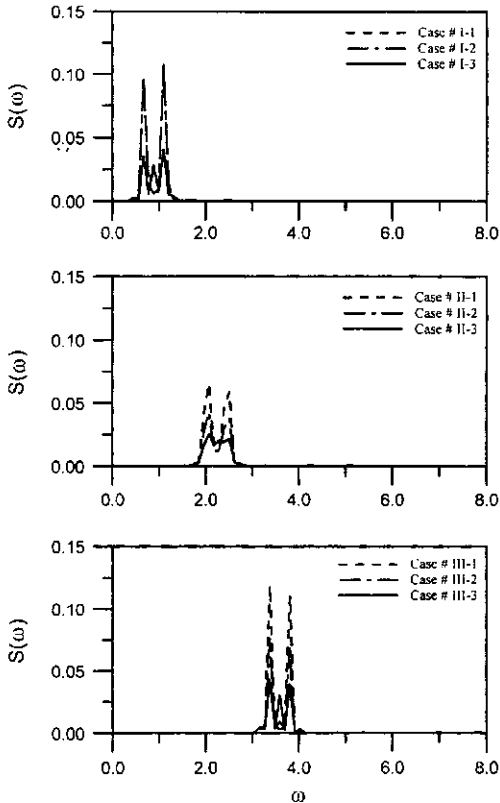


Fig. 6. Energy spectra of incident wave groups.

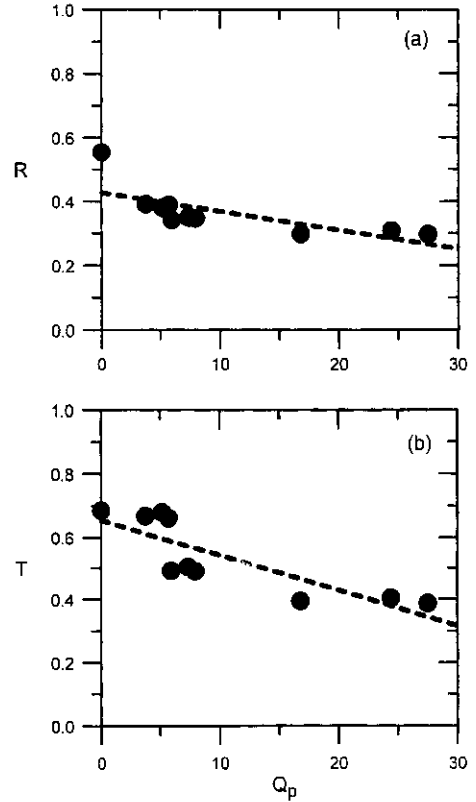


Fig. 7. Linear relationship between (a) reflection and (b) transmission coefficients and spectral peakedness parameter.

Table 2. Spectral peakedness parameter, mean values of run-length and total run-length, and rates of reflection and transmission due to wave groups.

Case	Q_p	$\langle l_1 \rangle$			$\langle l_2 \rangle$			R	T
		Direct	Goda	Ewing	Direct	Goda	Ewing		
#I-1	5.70	2	1.5	2.7	3	4.6	8.4	0.389	0.661
-2	5.15	1.5	1.3	2.0	3	6.6	10.7	0.380	0.679
-3	3.71	2	1.1	1.3	6	10.1	11.2	0.392	0.667
#II-1	7.94	4	1.5	3.7	6	4.6	11.7	0.347	0.490
-2	7.35	3	1.3	2.8	6	6.6	15.2	0.350	0.503
-3	5.93	4	1.1	2.0	13	10.1	18.0	0.342	0.491
#III-1	27.49	5	1.5	12.8	9	4.6	40.4	0.297	0.387
-2	24.41	4	1.3	9.4	9	6.6	50.6	0.309	0.404
-3	16.77	5	1.1	5.7	19	10.1	50.8	0.298	0.394

계 의존하기 때문이다. 본 연구에서 사용된 규칙파군의 파랑 자료는 두 개의 파랑을 선형적으로 합성하여 발생시킨 파랑이기 때문에 스펙트럼의 폭이 실제 해상에서 나타날 수 있는 불규칙파의 스펙트럼 폭보다 매우 좁기 때문이다. 특히 식 (11)을 이용하여 계산된 결과는 파군의 특성이 다름에도 불구하고 동일한 결과를 나타내고 있어, 그 적용의 한계성이 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 이상에서 언급된 입사 파군특성을 나타낼 수 있는 변수들과 잡제에 의하여 발생하는 반사율과 투과율의 관계를 살펴보았다. 각각의 결과가 Fig. 7 ~ Fig. 9에 제시되었다. 이때 식 (11)과 (12)에 의하여 계산된 파랑의 연이음들과 반사율 및 투과율의 관계는 그림으로 제시하지 않고, 그 선형적인 관계식만 Table 4에 제시하였다. 전반적으로 스펙트럼 첨두계수, 파랑 연이음 및 전 연이음의 평균이 클수록 잡제에 의한 반사율과 투과율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히 앞에서 언급된 바와 같이 단일 파랑인 경우의 반사율과 투과율에 비하여 파군으로 입사하는 경우의 반사율과 투

과율이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 이는 잡제 정부 근방에서 쇄파에 의한 많은 에너지 손실이 발생되기 때문이다. 경사제에 대하여 Medina *et al.*(1994)이 얻은 결과와 동일하게 잡제의 구조적 안정성에 미치는 파군의 영향이 존재할 수 있음을 의미하는 것이다. 각각의 그림에 제시된 변수와 반사율 및 투과율과의 선형적인 함수 관계, 그리고 상관계수에 대한 해석 결과는 이후에 수행될 변수들과 함께 Table 4에 제시하였다.

파랑의 연이음 개념과 함께 파군 특성 해석에 가장 많이 이용되고 있는 방법이 에너지 이력 개념이다. 식 (14)로부터 알 수 있듯이 주파수 영역에서의 해석이 아니라 시간에 따른 파랑 에너지의 크기를 가지고 해석하는 방법으로, 고파군에서 큰 에너지가 발생된다. Fig. 10에 Case #에 대한 파군의 에너지이력, $E(t)$ 가 제시되었다. 또한 Table 3에 에너지 이력으로 계산된 포락 초과계수와 파군계수가 잡제에 의한 반사율 및 투과율과 함께 제시되었다. 표에 제시된 결과에 의하면 고파군이 발달될수록, 파군과 파군사이의 간격이 좁을수록

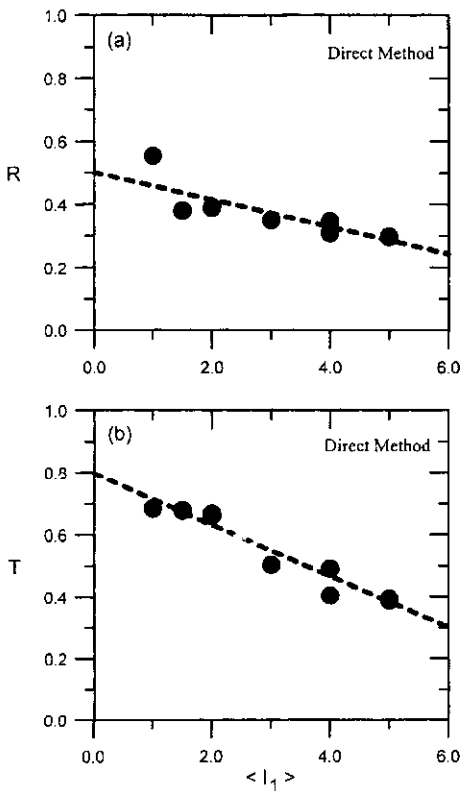


Fig. 8. Linear relationship between (a) reflection and (b) transmission coefficients and mean of run-length.

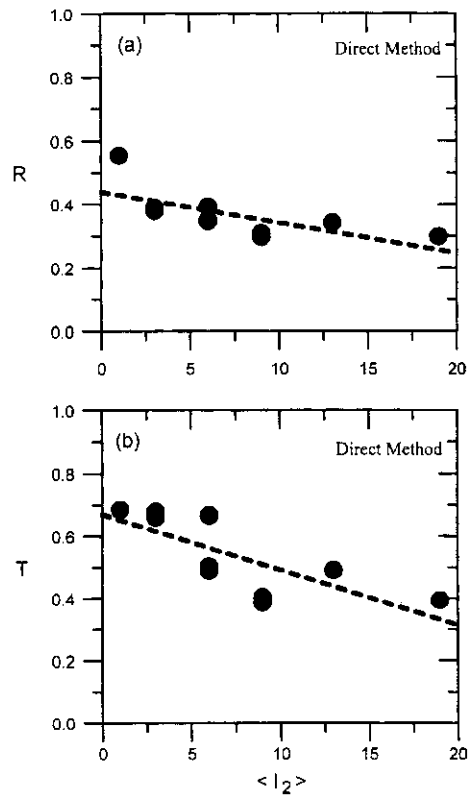


Fig. 9. Linear relationship between (a) reflection and (b) transmission coefficients and mean of total run-length.

Table 3. Envelope exceedance coefficient, groupiness factor and rates of reflection and transmission due to wave groups

Case	α'	GF	R	T
#I-1	0.28	0.49	0.389	0.661
-2	0.11	0.75	0.380	0.679
-3	0.11	1.32	0.392	0.667
#II-1	0.33	0.65	0.347	0.490
-2	0.14	0.88	0.350	0.503
-3	0.13	1.46	0.342	0.491
#III-1	0.34	0.68	0.297	0.387
-2	0.14	0.91	0.309	0.404
-3	0.14	1.49	0.298	0.394

Table 4. Linear relationships between rates of reflection and transmission and five wave grouping parameters

y^*	x	a	b	r^{**}	
R	Q_p	-0.006	0.427	0.726	
T		-0.011	0.654	0.834	
R	$\langle l_1 \rangle$	Direct	-0.043	0.502	0.835
		Goda	-0.175	0.588	0.442
		Ewing	-0.012	0.419	0.629
T	$\langle l_1 \rangle$	Direct	-0.083	0.797	0.962
		Goda	-0.148	0.724	0.224
		Ewing	-0.025	0.644	0.772
R	$\langle l_2 \rangle$	Direct	-0.018	0.438	0.688
		Goda	-0.015	0.460	0.574
		Ewing	-0.003	0.432	0.741
T	$\langle l_2 \rangle$	Direct	-0.018	0.669	0.759
		Goda	-0.011	0.608	0.266
		Ewing	-0.006	0.663	0.853
R	α'	-0.387	0.432	0.563	
T	α'	-0.465	0.616	0.406	
R	GF	-0.105	0.457	0.650	
T	GF	-0.112	0.633	0.417	

* $y = ax + b$

**coefficient of correlation

포락초과계수의 값은 커진다. 그러나 파군계수에서는 고 파군과 고파군의 간격이 길수록 파군계수가 커지는 경향을 나타내고 있다. 파군계수의 이와 같은 거동특성은 파랑의 전 연이음에서 알 수 있었던 특성과 동일한 것이다. 연이음 개념을 이용하여 해석한 방법과 동일하게, 포락초과계수와 파군계수를 이용하여 입사파군과 잠제에 의한 반사율 및 투과율의 관계가 해석되었다. Fig. 11와 Fig. 12에 그 결과를 제시하였는데, 각각의 그림에서 볼 수 있듯이 선형적인 함수관계로 두 변수의 상

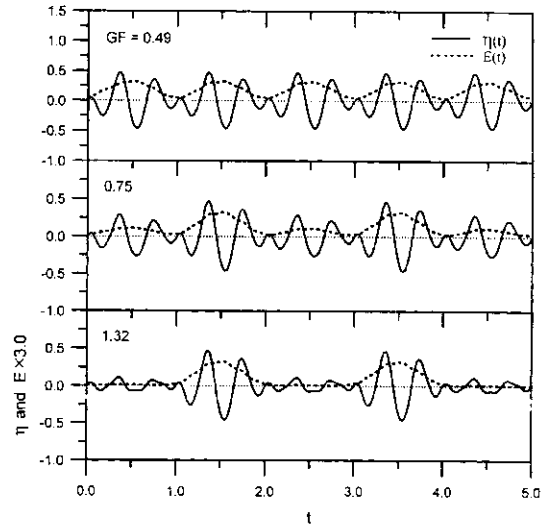


Fig. 10. Incident wave groups, $E(t)$ of Eq. (14) and groupiness factor for Case #1.

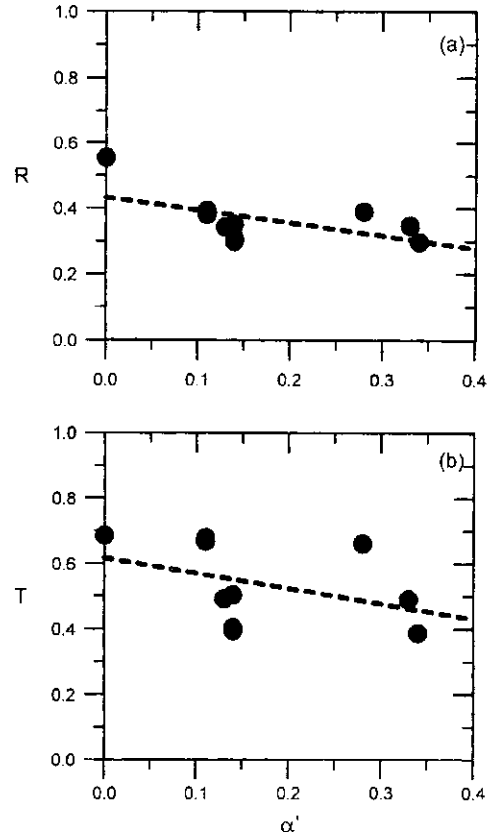


Fig. 11. Linear relationship between (a) reflection and (b) transmission coefficient and envelope exceedance coefficient.

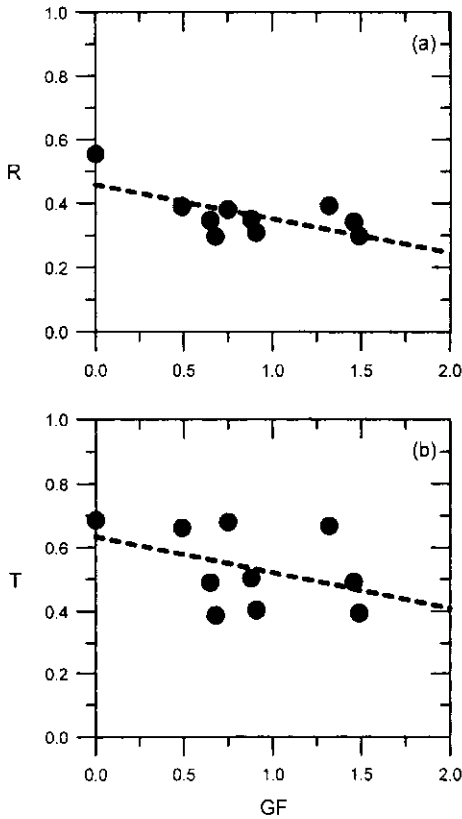


Fig. 12. Linear relationship between (a) reflection and (b) transmission coefficient and groupiness factor.

관성을 나타내기가 어렵다. 이와 같은 현상은 투과율의 해석에서 두드러지게 나타나고 있다. 파군계수를 사용하여 파군과 경사제의 안정성과의 관계를 해석한 Hall (1994)의 연구에서도 이와 유사한 결과가 제시되었다. 변수들간의 선형적인 함수식과 상관성을 Table 4에 제시하였다.

본 연구에서 얻어진 결과가 매우 제한적이기 때문에, 입사파군과 잠제에 의한 반사율 및 투과율의 관계를 파군의 발달 정도를 해석하기 위하여 제시된 임의의 변수로 정량화하기는 어렵지만, Table 4에 제시된 결과를 이용하면 정성적인 해석이 가능하다. 즉, 고파군이 발달될수록 잠제에 의하여 발생하는 입사파랑의 반사율과 투과율의 크기는 감소하는 것으로 나타났다. 또한 고파군과 고파군의 간격에 따른 반사율과 투과율의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 파랑 연이음의 평균을 이용하면 입사파군과 잠제에 의한 반사율 및 투과율의 관계를 가장 잘 해석할 수 있다.

5. 결 론

천해영역에서 적용 가능한 파찰의 효과가 고려된 유한 진폭 천수방정식을 이용하여 각기 다른 특성을 갖는 규칙 입사파군이 수직으로 입사하는 경우에 잠제에 의하여 발생하는 반사율과 투과율의 거동 특성이 해석되었다. 단일 파랑조건을 포함하여 각기 다른 입사파군 조건에서 계산된 잠제의 반사율과 투과율이 파군의 발달 정도를 묘사하기 위하여 제시된 여러 변수들의 함수로 제시되었다. 입사파군과 잠제의 반사율 및 투과율의 관계를 정성적으로 해석한 결과, 고파군이 발달될수록 잠제에 의하여 발생하는 입사파랑의 반사율과 투과율의 크기가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 단일 파랑인 경우의 반사율과 투과율에 비하여 파군으로 입사하는 경우의 반사율과 투과율이 상대적으로 작게 나타나고 있다. 즉, 잠제 정부 근방에서 쇄파에 의하여 많은 에너지 손실이 발생되었다. 이는 앞의 연구지들에 의하여 제시된 결과와 동일하게 발달된 파군이 입사할수록 잠제의 구조적 안정성에 미치는 영향이 커질 수 있음을 나타내는 것이다. 그러나 고파군과 고파군의 간격에 따른 반사율과 투과율의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 비록 제한적인 결과이지만, 본 연구에서 해석된 결과에 의하면 파랑 연이음의 평균을 이용할 때 파군의 발달 정도와 잠제에 의한 입사파의 반사율 및 투과율의 관계가 가장 잘 해석될 수 있다.

참고문헌

이철용, 1999. 잠제 주변의 파랑장 해석, 한국해양·해양공학회지, 11(2), pp. 95-106.
 이철용, 이길성, 1993. 불규칙 파군의 특성해석, 한국해양·해양공학회지, 5(4), pp. 395-405.
 Ahrens, J.P., 1989. Stability of reef breakwaters, *J. Wirway, Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 115(2), pp. 221-234.
 Bruun, P., 1985. *Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal protection*, Elsevier Science Pub., New York, N.Y.
 Burcharth, H.F., 1979. The effect of wave grouping on on-shore structures, *Coast. Engrg.*, 2, pp. 189-199.
 Dean, R.G. and Dalrymple, R.A., 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Dodd, N., 1998. Numerical model of wave run-up, overtopping, and regeneration, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **124**(2), pp. 73-81.
- Ewing, J.A., 1973. Mean length of runs of high waves, *J. Geophy. Res.*, **78**(12), pp. 1933-1936.
- Funke, E.R. and Mansard, E.P.D., 1979. On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, *HLR Rept. LTR-HY 66*, Natl. Res. Council. Canada.
- Goda Y., 1970. Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, *Rept. Port Har. Res. Inst. Min. Transp.*, **9**(3), Japan.
- Goda Y., 1976. On wave groups, *Proc. Conf. Behaviour of Offshore Structure*, **1**, pp. 115-128.
- Grilli, S.T., Losada, M. and Martin, F.L., 1994. Characteristics of solitary wave breaking induced by breakwaters, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **120**(1), pp. 74-92.
- Hall, K.R., 1994. Influence of wave groups on stability of berm breakwaters, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **120**(6), pp. 630-636.
- Haller, M.C. and Dalrymple, R.A., 1995. Looking for wave groups in the surf zone, *Proc. Coast. Dyn. '95*, ASCE, Poland.
- Hibberd, S. and Peregrine, D.H., 1979. Surf and run-up on a beach: a uniform bore, *J. Fluid Mech.*, **95**, pp. 323-345.
- Johnson, R.R., Mansard, E.P.D. and Ploeg, J., 1978. Effects of wave grouping on breakwater stability, *Proc. 21st Int. Conf. on Coast. Engrg.*, ASCE, pp. 2228-2243.
- Kimura, A., 1980. Statistical properties of random wave groups, *Proc. 17th Int. Conf. on Coast. Engrg.*, ASCE, pp. 2955-2973.
- Kobayashi, N., Otta, A.K. and Roy, I., 1987. Wave reflection and run-up on rough slopes, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **113**(3), pp. 282- 298.
- Kobayashi, N. and Wurjanto, A., 1989. Wave transmission over submerged breakwaters, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **115**(5), pp. 662-680.
- Lo, J.M. and Dean, R.G., 1995. Long waves due to interactions beneath wave groups, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **121**(6), pp. 317-325.
- Losada, M., Kobayashi, N. and Martin, F.L., 1992. Armor stability on submerged breakwaters, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **118**(2), pp. 207-212.
- Mase, M. and Iwagaki, Y., 1986. Wave group analysis from statistical viewpoint, *Proc. Oc. Structure Dynamic Symp. '86*, pp. 145-157.
- Medina, J.R. and Hudspeth, R.T., 1990. A review of the analyses of ocean wave groups, *Coast. Engrg.*, **14**, pp. 515-542.
- Medina, J.R., Hudspeth, R.T. and Fasssardi, C., 1994. "Breakwater armor damage due to wave groups," *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **120**(2), pp. 179-198.
- Sand, S.E., 1982. Long wave problems in laboratory models, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **108**(WW4), pp. 492-503.
- Seelig, W.N., 1980. Two-dimensional tests of wave transmission and reflection characteristics of laboratory breakwater, *Tech. Rept. No. 80-1*, U.S. Army Coast. Engrg. Res. Ct., VA.
- Thompson, E.F. and Seelig, W.N., 1984. High wave grouping in shallow water, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **110**(2), pp. 139-157.
- Titov, V.V. and Synolakis, C.E., 1995. Modeling of breaking and nonbreaking long-wave evolution and runup using VTCS-2, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **121**(6), pp. 308-316.
- Van der Meer, J.W. and Daemen, I.F.R., 1994. "Stability and wave transmission at low-crested rubble-mound structures," *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **120**(1), pp. 1-19.
- Van der Meer, J.W. and Pilarczyk, K.W., 1987. Stability of breakwater armour layers; deterministic and probabilistic design, *Communication Rept. No. 378*, Delft Hydraulic, Netherlands.
- Van Gent, M.R.A., 1995. Wave interaction with berm breakwaters, *J. Wtrway., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, **121**(5), pp. 229-238.