

주기영향을 고려한 직립식 구조물의 월파량 산정 : 비쇄파조건 Wave Overtopping Formula for Vertical Structure Including Effects of Wave Period : Non-breaking Conditions

김영택* · 이종인**
Young-Taek Kim* and Jong-In Lee**

요 지 : 비쇄파조건에서의 2차원 수리실험을 통해 직립식 구조물에 대한 월파량 산정식을 제안하였으며, 본 연구의 결과를 EurOtop(2007)과 비교하였다. 상대수심 영향계수(γ_{kh})를 통해 특정 상대수심 범위($kh > 1.55$) 내에서는 상대수심이 증가하여도 거의 동일한 영향계수가 산정됨을 알 수 있었다. 그리고 파형경사의 경우에는 파형경사가 증가함에 따라 월파량 영향계수가 감소하는 것을 알 수 있었다. 월파량 산정식은 상대여유고와 무차원 월파량의 지수함수 형태로 표현하였으며, 상대수심 영향계수 및 파형경사 영향계수(γ_s)를 제시하여 주기효과를 정량적으로 고려할 수 있는 월파량 산정식을 제안하였다.

핵심용어 : 직립식 구조물, 상대수심 영향계수, 파형경사 영향계수, 월파량 산정식, 2차원 수리실험

Abstract : Two-dimensional hydraulic experiments for wave overtopping under non-breaking wave condition are conducted. The wave overtopping formula for vertical structure is suggested and the results are compared with EurOtop (2007). The relative water depth coefficient (γ_{kh}) shows that almost the same coefficient is obtained for certain range ($kh > 1.55$) regardless of relative water depth, that is, although the relative water depth becomes larger, the relative water depth coefficient is almost same. When the wave steepness becomes larger the wave steepness coefficient decreases. The overtopping formula are expressed by relative freeboard(R) and non-dimensional wave overtopping rate(Q) and this formula has the form of exponential function. In this formula, the effects of wave period on wave overtopping are quantitatively investigated and suggested through the relative water depth coefficient(γ_{kh}) and wave steepness coefficient(γ_s).

Keywords : vertical structure, relative water depth coefficient, wave steepness coefficient, overtopping formula, two-dimensional hydraulic experiments

1. 서 론

항만구조물을 설계함에 있어 월파는 방파제, 호안, 접안시설 등과 같은 항만구조물의 마루높이를 선정하는데 있어 중요한 설계인자이다. 그리고 월파는 방파제 배후면의 접안시설 활용, 월파에 의한 전달파 발생으로 인한 항내정온에 미치는 영향, 사석경사제의 경우에는 배후면 피복재의 안정성에 영향을 미치게 되는 등 항만 운영 및 구조적인 측면에서 중요한 역할을 한다. 이에 따라 적절한 월파량의 산정 및 예측은 경제적인 측면, 항만구조물 안정성 확보 측면 및 항만 운영 측면에서 매우 중요하다.

항만구조물에 대한 설계기준을 살펴보면, 국내의 경우는 “항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)” 있으며, 일본의 경우는 “港灣の施設の技術上の基準·同解説(일본항만협회,

1999)”, 미국의 경우는 CEM(Coastal Engineering Manual, 2004), 유럽의 경우에는 대표적으로 영국의 BS Code(2001)를 들 수 있다. 특히 구조물 형상과 파랑 등에 따른 월파특성은 해안방재 및 연안구조물 설계에 있어 기본이 되는 내용이기 때문에 모든 설계기준서 내에 기본적으로 포함되어 있다. 최근 EU국가를 중심으로 월파와 관련된 전문 설계서로 EurOtop(2007)이 작성되었다. EurOtop(2007)에는 유럽내 관련 연구자들의 연구성과가 대부분 수록되어 있으며, 각종 단면형상에 대한 기대 월파량을 계산할 수 있도록 되어 있다.

우리나라의 설계기준인서인 “항만 및 어항 설계기준(해양수산부, 2005)” 경우에는 일본의 설계기준을 국내에 적용하는 수준으로서 상치콘크리트의 기하학적 형상 반영 등을 통한 국내 설계여건에 맞는 기준의 정립, 기준 수정 및 이와 관련된 연구가 필요한 상황이며, 국내에서는 아직까지 월파와

* 한국건설기술연구원 하천해안연구실(River and Coastal Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

** 전남대학교 공학대학 해양토목공학과(Corresponding author: Jong-In Lee, Department of Marine and Civil Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 550-749, Korea. jilee@chonnam.ac.kr)

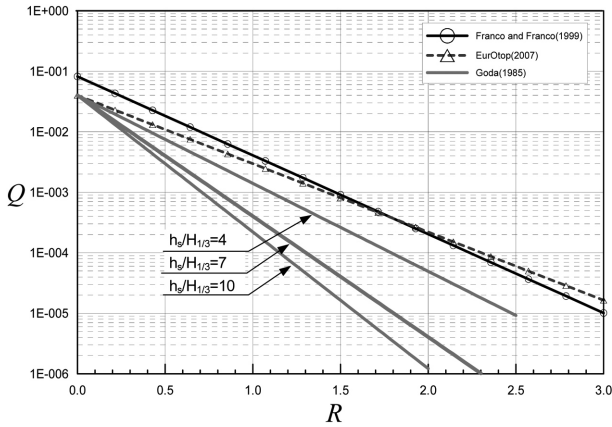


Fig. 1. Comparison of wave overtopping rate for vertical structure.

관련된 체계적인 연구의 수행은 미흡한 실정이다(김 등, 2010). 동일한 직립식 구조형상을 대상으로 할 때, 국내 설계기준에 수록된 월파량 산정을 위한 Goda도표(Goda, 1985)는 EurOtop (2007) 및 Franco와 Franco(1999)에 비해 월파량이 적게 산정되는 경향이 있으며(Fig. 1 참조), 이(2008)의 연구에서도 수리모형실험 결과에 비해 월파량이 적게 산정됨을 보였다. 또한 Goda도표는 지수함수 축으로 되어 있고, 월파량 추정 시 도표상에서 내삽 또는 외삽을 사용해야하는 경우가 빈번하기 때문에 사용자에게 따라 오차가 발생할 수 있다.

월파량 산정과 관련된 최근 연구 경향은 월파량 산정식을 대부분 지수함수 형태로 표현하고 있으며, 여유고와 입사파 고를 입력변수로 하여 월파량 산정이 가능하도록 제시하고 있다(van der Meer와 Janssen, 1995; Franco와 Franco, 1999; EurOtop, 2007; Anderson과 Burcharth, 2009 등).

본 연구에서는 입사파의 주기가 월파량에 미치는 영향을 분석하기 위해 비쇄파조건에서 직립식 구조물을 대상으로 2차원 수리실험을 수행하였으며, 입사파의 주기 영향은 상대수심 영향계수 및 파형경사 영향계수로 분석하였다. 본 실험으로부터 분석된 입사파의 주기 영향과 김 등(2010)의 입사파에 의한 월파량 저감계수를 포함하여 직립식 구조물에 대한 지수함수 형태의 월파량 산정식을 제안하고자 한다.

2. 수리모형실험

2.1 실험시설

단면 수리실험은 한국건설기술연구원의 폭 1.0 m, 높이 2.0 m, 길이 56 m의 수로에서 수행되었으며, 단면수로에는 전기서보 피스톤식 조파기가 설치되어 있고, 규칙파 및 불규칙파를 조파할 수 있다(Fig. 2 참조). 그리고 수로 내에서 구조물 설치로 인한 반사와 조파관에서 발생하는 재반사를 효과적으로 제어하기 위해 수로 폭 1.0 m를 폭 0.6 m와 폭 0.4 m로 분할하였다. 분할된 수로에서 실험모형은 폭 0.6 m의 수로에 설치하여 제반 자료를 취득하고, 폭 0.4 m의 수로에서는 입사파의 설정 및 보정을 수행하였다. 단면수로는 주기와

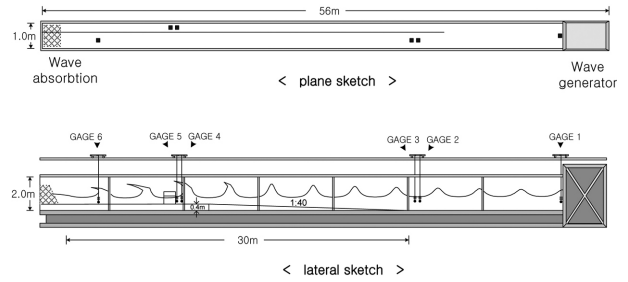


Fig. 2. Schematic sketch of wave flume.

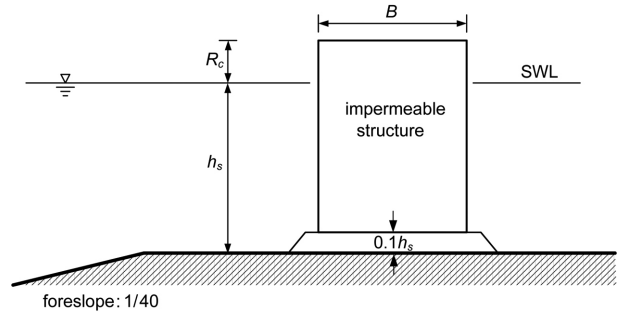


Fig. 3. Schematic sketch of test model.

파고를 연속적으로 변화시킬 수 있게 설치되어 있으며, 전면 30 m 구간을 강화유리로 처리하여 실험장면 관찰이 용이하도록 되어있다. 또한 수로 양쪽 끝 부분에는 여러 겹의 다공성 구조로 형성된 소파장치가 설치되어 있다.

2.2 실험모형 및 실험조건

단면 수리실험에 적용된 단면은 무공 직립식 단면으로서 실험단면 형상은 Fig. 3과 같다. 구조물 설치수심(h_s)은 $h_s = 0.5$ m이며, 여유고는 $R_c = 0.05$ m, 0.075 m, 0.10 m, 0.125 m, 0.150 m, 0.175 m 및 0.200 m이고, 케이슨 폭(B)은 $B = 0.4$ m이다. 그리고 구조물 전면에는 1:40의 경사면이 설치되어 있다.

실험과는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한 불규칙파 조건을 적용하였으며, 적용된 유의파고($H_{1/3}$)는 $H_{1/3} = 5.0$ cm, 6.0 cm, 7.0 cm, 7.5 cm, 8.0 cm, 9.0 cm, 10.0 cm, 11.0 cm, 12.0 cm, 12.5 cm, 13.0 cm, 14.0 cm, 15.0 cm, 16.0 cm, 17.0 cm 및 17.5 cm이고, 유의주기($T_{1/3}$)는 $T_{1/3} = 1.4 \sim 2.8$ sec 범위에서 0.2 sec 간격으로 설정하였다. 실험과는 구조물 설치위치에서 구조물이 설치되지 않은 상태에서 설정하였으며, 모형 설치 이후 분할 수로에서는 진행파를 확인하였다. Table 1은 실험조건을 정리한 것으로서 실험에 적용된 유의주기, 유의파고 및 상대여유고($R = R_c/H_{1/3}$)를 나타내었으며, $R = 0.667 \sim 2.000$ 범위에서 실험이 수행되었다. Table 2와 Table 3은 입사파 유의주기에 대한 유의파장(λ) 및 상대수심(kh)과 파형경사($s = H_{1/3}/\lambda$)를 각각 나타낸 것이며, 실험조건은 $kh = 1.06 \sim 2.44$, $s = 0.008 \sim 0.068$ 범위에 해당된다. Fig. 4는 Table 3의 파형경사를 도시한 것으로서 일반적인 풍파영역 이외의 조건을 포함하는 다양한 파형경사를 가지는 실험과 조건이 본 연구에 적용되었음을 확인할 수 있다.

Table 1. Test wave and relative freeboard conditions of experiment

$H_{1/3}$ (cm)	freeboard (R_c)						
	5.0 cm	7.5 cm	10.0 cm	12.5 cm	15.0 cm	17.5 cm	20.0 cm
5.0	1.000	1.500	2.000	-	-	-	-
6.0	0.833	1.250	1.667	-	-	-	-
7.5	0.667	1.000	1.333	1.667	2.000	-	-
9.0	-	0.833	1.111	1.389	1.667	1.944	-
10.0	-	0.750	1.000	1.250	1.500	1.750	2.000
11.0	-	0.682	0.909	1.136	1.364	1.591	1.818
12.5	-	-	0.800	1.000	1.200	1.400	1.600
14.0	-	-	0.714	0.893	1.071	1.250	1.429
15.0	-	-	-	0.833	1.000	1.167	1.333
16.0	-	-	-	0.781	0.938	1.094	1.250
17.5	-	-	-	0.714	0.857	1.000	1.143

$T_{1/3} = 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6$ sec and 2.8 sec

Table 2. Wave length and relative water depth for wave periods

	wave period ($T_{1/3}$, sec)							
	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
wave length(λ , m)	2.57	3.07	3.57	4.05	4.53	5.00	5.47	5.93
relative water depth (kh)	2.44	2.05	1.76	1.55	1.39	1.26	1.15	1.06

Table 3. Wave steepness for test wave conditions

$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)							
	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8
0.050	0.019	0.016	0.014	0.012	0.011	0.010	0.009	0.008
0.060	0.023	0.019	0.017	0.015	0.013	0.012	0.011	0.010
0.075	0.029	0.024	0.021	0.018	0.017	0.015	0.014	0.013
0.090	0.035	0.029	0.025	0.022	0.020	0.018	0.016	0.015
0.100	0.039	0.032	0.028	0.025	0.022	0.020	0.018	0.017
0.110	0.043	0.036	0.031	0.027	0.024	0.022	0.020	0.019
0.125	0.049	0.041	0.035	0.031	0.028	0.025	0.023	0.021
0.140	0.054	0.045	0.039	0.034	0.031	0.028	0.026	0.024
0.150	0.058	0.049	0.042	0.037	0.033	0.030	0.027	0.025
0.160	0.062	0.052	0.045	0.039	0.035	0.032	0.029	0.027
0.175	0.068	0.057	0.049	0.043	0.039	0.035	0.032	0.030

직립식 구조물의 월파량 산정에 대한 실험식을 도출하기 위해 구조물 후면에서 연속적으로 월파량을 계측하였다. 월파량 계측은 각각의 유의주기 기준 1,000파를 대상으로 하였으며, 유량계를 이용하여 1,000파에 대해 연속적으로 계측하였다.

3. 분석방법

월파는 처오름 높이가 여유고 보다 높은 경우 발생하는 현상이다. 일반적인 항만구조물의 월파량, 즉 평균월파량(단위 폭당 단위시간당 월파량, $q, m^3/sec/m$)에 영향을 미치는 변수는 유의파고, 스펙트럼 첨두에 해당하는 주기(T_{op} 또는 T_{om}),

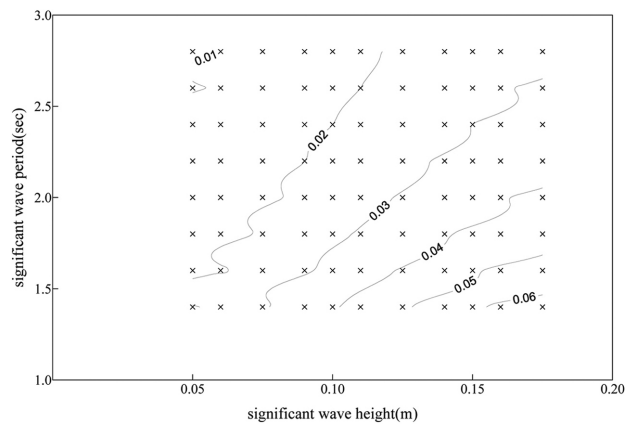


Fig. 4. Wave steepness for test wave condition.

단파봉파(short-crested wave)의 분포형상(σ), 입사파의 내습 각도(β), 여유고(R_c), 구조물 전면 수심(h_s), 중력가속도(g) 및 구조물 형상 등을 들 수 있으며, 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = f(H_{1/3}, T_{op}, \sigma, \beta, R_c, h_s, g, \text{Shape of Structure}) \quad (1)$$

식(1)의 여러 요소 중에서 월파에 가장 지배적인 영향을 미치는 변수를 이용하여 평균월파량을 식(2) 및 식(3)과 같은 무차원 경험식으로 나타낼 수 있다. 즉, 대부분의 기존 연구에서 여유고에 대한 입사파고의 비인 상대여유고($R = R_c/H_{1/3}$)로 무차원화한 변수를 이용하여 월파량 산정식을 제시하였다. 특히 Owen(1982)에 의해 제안된 식(2)의 지수함수(exponential function) 형태의 식은 최근 연구에서도 많이 사용되고 있다 (EurOtop, 2007; Anderson과 Burcharth, 2009 등).

$$Q = ae^{-(bR)} \quad (2)$$

$$Q = aR^{-b} \quad (3)$$

식(2)와 식(3)에서 Q 는 무차원 월파량이고, 변수 a 와 b 는 Q 와 R 의 상관관계를 지수함수 및 거듭제곱함수의 형태로 추

세선을 나타낼 경우에 구조물의 형상 및 입사파 조건 등에 의해서 결정되는 값이다. 식(2)에서 변수 a 는 여유고가 0인 조건(zero freeboard)에서의 무차원 월파량을 의미하고, b 는 단면형상 및 입사파 조건에 의해 변하는 각계수(angular coefficient)이다.

최근 유럽에서 월파량 산정 기준으로 활용중인 EurOtop (2007)에 제시된 직립식 구조물에 대한 월파량 산정식은 식 (4)와 같으며, 본 연구에서 도출된 월파량 산정식의 결과와 비교하고자 한다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.04 \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{1/3}\gamma_\beta}\right) \quad (4)$$

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0062\beta \text{ for } 0^\circ < \beta < 45^\circ$$

$$\gamma_\beta = 0.72 \text{ for } \beta = 45^\circ$$

식(2)의 무차원월파량(Q)은 식(4)의 좌변($Q = q/\sqrt{gH_{1/3}^3}$), 식 (2)의 상대여유고(R)는 식(4)의 우변 지수함수내 변수($H_{1/3}$)에 해당하며, $a = 0.04$ 및 $b = 2.6$ 이다. 그리고 γ_β 는 직립식 구조 물에 대하여 입사각의 영향을 고려한 월파량 저감계수이다. EurOtop(2007)에서는 입사각이 월파에 미치는 영향을 고려 하기 위하여 γ_β 를 식(4)의 지수함수내에 적용하였으며, 이는 경 사식 구조물에 대해 van der Meer와 Janssen(1994)이 적용한 방법과 동일하다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 평균 월파량 산정식

Fig. 3과 같은 직립식 구조물을 대상으로 Table 1의 실험 조건을 적용하여 2차원 실험을 수행한 후 무차원월파량(Q)과 상대여유고(R)를 식(2)와 같은 지수함수 형태로 분석하였다. 본 연구에서 수행된 실험으로 분석된 Q - R 관계와 EurOtop (2007)의 Q - R 관계를 비교하여 도시한 것이 Fig. 5이다. Fig. 5에 도시된 Q - R 의 상관관계에서 본 연구의 결과는 식(5)로 표현되며, 식(5)는 수행된 416개 실험조건의 월파량 예측값을 분석한 것이다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.14 \exp\left(-3.47 \frac{R_c}{H_{1/3}}\right) \quad (5)$$

그리고 본 연구의 결과와 EurOtop(2007)의 결과를 비교해 보면 전체적으로 Q - R 상관관계식의 경사가 상이함을 알 수 있다(Fig. 5 참조). 즉, $R < 1.4$ 인 경우에는 본 연구에 의한 월파량이 많게 산정되며, $R > 1.4$ 인 조건에서는 EurOtop (2007)이 많게 산정된다. 이는 본 연구에서는 수리실험시 주 파수 스펙트럼으로 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 적용한데 반해, EurOtop(2007)에서는 JONSWAP 스펙트럼을 적용하였기 때문으로 판단된다. Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼의 형상은 폭이 넓고 첨두가 낮으며, JONSWAP 스펙트럼의 형상은 상대적으로 폭이 좁고 첨두가 높다. 따라서 상대여유고가 작은 경우에는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼에 의한 월파가 상대적으로 많이 발생하게 되며, 상대여유고가 큰 경우에는 JONSWAP 스펙트럼에 의한 월파 량이 많게 나타나는 것이다.

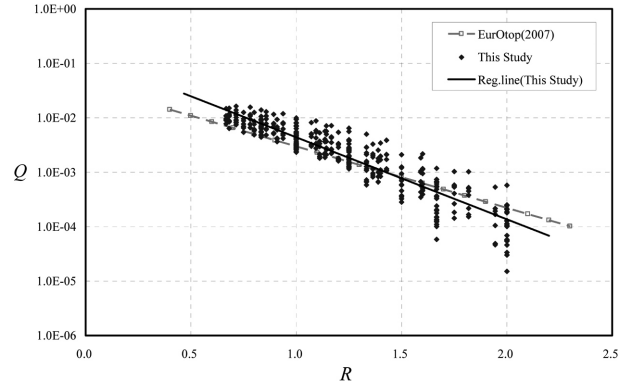


Fig. 5. Wave overtopping for vertical structures.

펙트럼의 형상은 폭이 넓고 첨두가 낮으며, JONSWAP 스펙트럼의 형상은 상대적으로 폭이 좁고 첨두가 높다. 따라서 상대여유고가 작은 경우에는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼에 의한 월파가 상대적으로 많이 발생하게 되며, 상대여유고가 큰 경우에는 JONSWAP 스펙트럼에 의한 월파 량이 많게 나타나는 것이다.

4.2 상대수심과 월파량의 상관관계 분석

입사파의 주기가 월파량에 미치는 영향을 검토하기 위하여 무차원 값인 상대수심(kh)을 이용하여 주기효과를 검토하였다. 상대수심 영향계수(γ_{kh})를 분석하기 위해 식(5)에 γ_{kh} 를 적용하여 식(6)과 같이 나타내었다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.14 \exp\left(-3.47 \frac{R_c}{H_{1/3}\gamma_{kh}}\right) \quad (6)$$

본 연구에서 수행한 416개 조건의 월파량 예측결과가 도시되어 있는 Fig. 5에서 각각의 상대수심에 대한 무차원 월파량(Q)과 상대여유고(R)의 관계를 이용하여 γ_{kh} 를 산정하였다. Fig. 6은 각각의 상대수심에 대한 Q 와 R 의 상관관계를 도시한 것이며, 각각의 kh 에 해당하는 월파량 산정식은 식(7)과 같이 정리할 수 있다. 식(7)의 상대수심에 대한 월파량 산정식을 $Q = a \exp(-b'R)$ 로 표현할 경우, 식(6)에서 $b' = b/\gamma_{kh}$ 이므로,

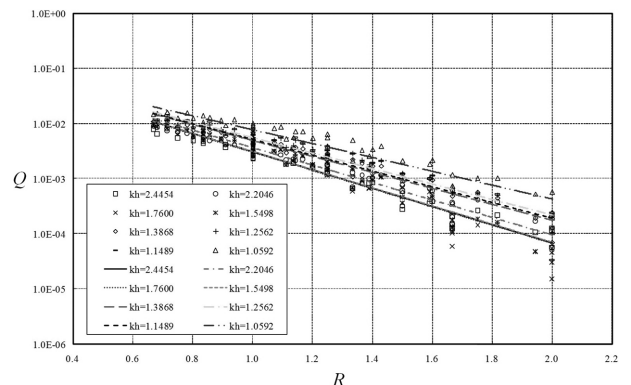
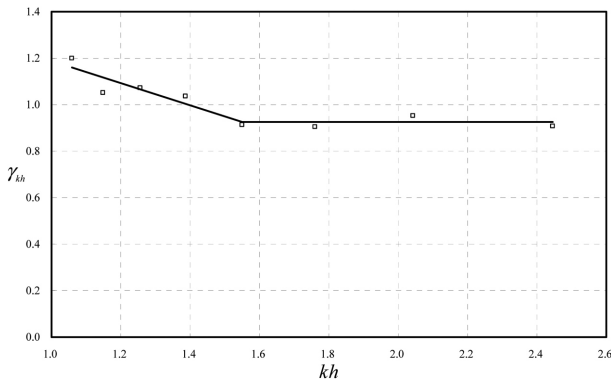


Fig. 6. Wave overtopping for each relative water depth.

Table 4. Coefficient of γ_{kh} for relative water depth, kh

kh	b'	$\gamma_{kh} = b/b'$
2.4454	3.82	0.9091
2.0426	3.64	0.9530
1.7600	3.83	0.9056
1.5498	3.80	0.9142
1.3868	3.35	1.0373
1.2562	3.23	1.0731
1.1489	3.30	1.0520
1.0592	2.89	1.2009

**Fig. 7.** Coefficient of γ_{kh} for relative water depth, kh .

$\gamma_{kh} = b/b' = 3.47/b'$ 과 같이 계산된다. 각각의 상대수심에 대한 영향계수 γ_{kh} 는 Table 4에 정리하였고, Fig. 7은 전체 결과를 도시한 것이다.

$$\begin{aligned}
 Q &= 0.14 \exp(-3.82R) & \text{for } kh &= 2.4454 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.64R) & \text{for } kh &= 2.0426 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.83R) & \text{for } kh &= 1.7600 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.80R) & \text{for } kh &= 1.5498 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.35R) & \text{for } kh &= 1.3868 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.23R) & \text{for } kh &= 1.2562 \\
 Q &= 0.14 \exp(-3.30R) & \text{for } kh &= 1.1489 \\
 Q &= 0.14 \exp(-2.89R) & \text{for } kh &= 1.0592
 \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 7에 도시된 상대수심 영향계수(γ_{kh})는 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며, $kh = 1.55$ 를 기준으로 $kh \geq 1.55$ 의 조건에서는 $\gamma_{kh} \approx 0.92$ 로 거의 일정한 값을 보이고, $kh < 1.55$ 에서는 kh 가 감소할수록 γ_{kh} 는 증가하는 경향이 나타났다. 이는 동일 수심 조건을 적용할 경우, 특정 주기($kh = 1.55$)보다 짧은 조건에서는 주기변화에 따른 월파랑의 변화가 거의 없음을 의미하며, $kh = 1.55$ 에 해당하는 주기보다 긴 조건에서는 주기가 길어질수록 월파랑이 증가한다는 것을 의미한다. 식(5)는 전체 실험결과를 평균 개념으로 고려하여 모든 조건을 포함한 월파랑 산정식이므로 파고와 여유고에 대한 영향만 반영되었을 뿐 주기의 영향은 고려되지 않는다. 그러나 식(6)은 월파랑을 산정함에 있어 주기의 영향을 고려할 수 있는 식이며, γ_{kh} 는 식(8)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \gamma_{kh} &= 1.67 - 0.48kh & \text{for } 1.06 < kh < 1.55 \\
 \gamma_{kh} &= 0.92 & \text{for } kh \geq 1.55
 \end{aligned} \quad (8)$$

4.3 파형경사와 월파랑의 상관관계 분석

식(6)은 주기와 수심의 관계에 해당하는 상대수심을 고려한 월파랑 산정식이다. 본 절에서는 파고와 주기의 관계를 나타내는 무차원값인 파형경사(wave steepness, s)가 월파에 미치는 영향을 분석하고자 한다. EurOtop(2007)에서는 단일 사면경사(S)를 갖는 경사식 구조물($S = 1:3, 1:4, 1:6$)에 대해 파형경사를 고려한 월파랑 산정식은 제시하고 있으나, 직립식 구조물에 대해서는 파형경사의 영향이 포함되어 있지 않다. 본 연구에서는 직립식 구조물에 대한 파형경사에 따른 영향계수를 분석하였으며, 이를 위해 식(6)과 같이 식(5)에 파형경사 영향계수(γ_s)를 적용하여 식(9)와 같이 나타내었다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.14 \exp\left(-3.47 \frac{R_c}{H_{1/3} \gamma_s}\right) \quad (9)$$

파형경사에 따른 영향계수를 분석하기 위해 Table 3에 제시된 파형경사 조건을 이용하여 각각의 파형경사에 따른 영향계수를 분석하였다. 분석방법은 상대수심에 대한 분석방법인 식(7) 및 Fig. 6과 같이 각각의 파형경사에 대한 월파랑 관계식을 산정하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. Fig. 8은 Table 5에 제시된 여러 파형경사 조건 중 일부인 $s = 0.013, 0.022, 0.031$ 및 0.049 인 조건에 대한 Q 와 R 의 상관관계를 도시한 것이다. Table 5의 결과를 이용하면 파형경사 영향계수, γ_s 를 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며, 전체 결과를 도시한 것이 Fig. 9이다. Fig. 9를 살펴보면 파형경사가 증가할수록 파형경사 영향계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 파형경사가 증가함에 따라 월파랑이 감소하는 것을 의미한다. 이러한 결과는 경사식 구조물에서 파형경사가

Table 5. Coefficient of γ_s for wave steepness, s

s	b'	$\gamma_s = b/b'$	s	b'	$\gamma_s = b/b'$
0.008	3.42	1.0146	0.028	3.6	0.9639
0.009	3.47	1.0000	0.029	3.64	0.9533
0.010	3.36	1.0327	0.031	3.56	0.9747
0.012	3.56	0.9747	0.034	3.52	0.9858
0.013	3.3	1.0515	0.035	3.54	0.9802
0.015	3.35	1.0358	0.036	3.46	1.0029
0.016	3.47	1.0000	0.037	3.47	1.0000
0.017	3.34	1.0389	0.038	3.55	0.9775
0.018	3.51	0.9886	0.041	3.57	0.9720
0.019	3.36	1.0327	0.042	3.47	1.0000
0.021	3.45	1.0058	0.043	3.69	0.9404
0.022	3.45	1.0058	0.045	3.5	0.9914
0.023	3.49	0.9943	0.049	3.67	0.9455
0.024	3.35	1.0358	0.052	3.63	0.9559
0.025	3.59	0.9666	0.057	3.81	0.9108

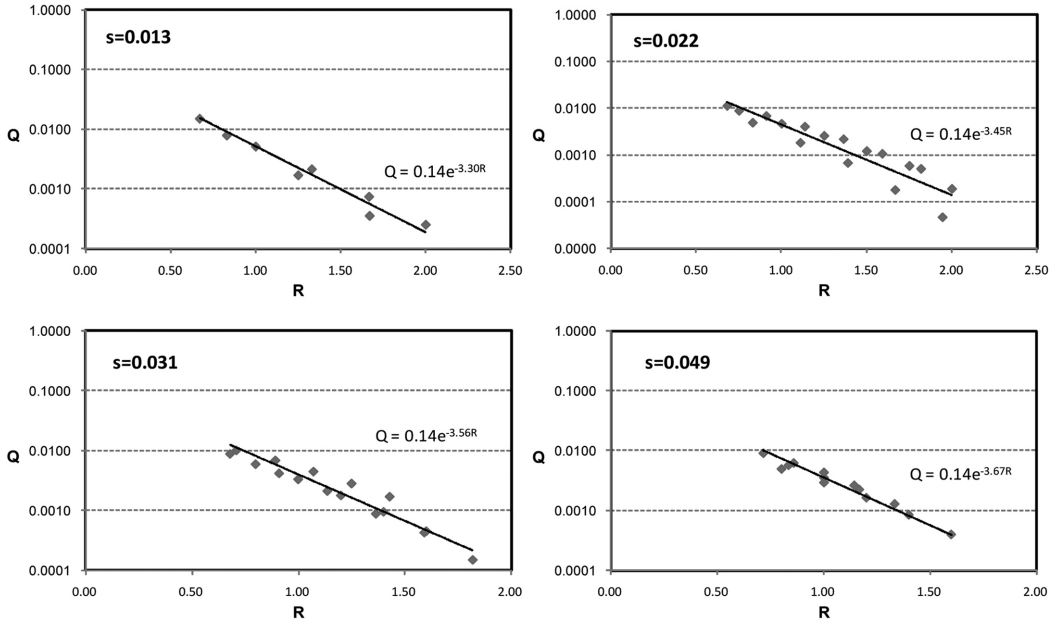


Fig. 8. Q-R relation for each wave steepness.

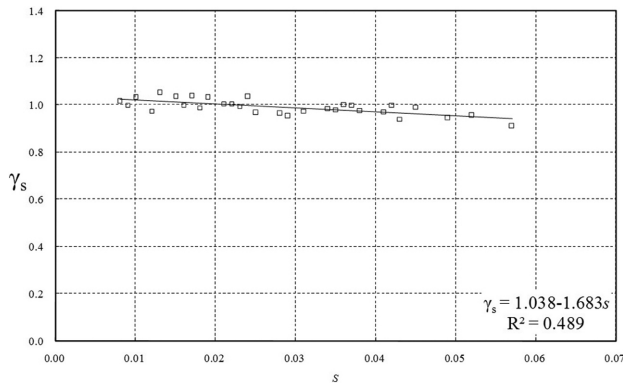


Fig. 9. Coefficient of γ_s for wave steepness, s .

증가할수록 처오름 높이 및 월파량이 감소하는 결과를 제시한 EurOtop(2007)과 동일한 경향이다.

$$\gamma_s = 1.038 - 1.683s \quad \text{for} \quad 0.008 < s < 0.057 \quad (10)$$

4.4 직립식 구조물의 월파량 산정식

김영택 등(2010)은 입사각에 따른 저감계수(γ_β)를 EurOtop(2007)에서 제시한 적용범위를 확장하여 제안하였으며, 본 연구에서는 상대수심 영향계수(γ_{kh})와 파형경사 영향계수(γ_s)를 실험을 통해 도출하였다. 이러한 결과를 이용하여 γ_{kh} , γ_s 및 γ_β 를 고려한 비쇄파조건에서 직립식 구조물의 월파량 산정식을 식(11)과 같이 제안하고자 하며, 적용범위는 식(12)와 같다. 식(11)에서 직립식 구조물에 파랑이 직각으로 입사하는 조건인 경우에는 $\beta = 0^\circ$ 이므로 $\gamma_\beta = 1.0$ 이다.

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = 0.14 \exp\left(-3.47 \frac{R_c}{H_{1/3} \gamma_{kh} \gamma_s \gamma_\beta}\right) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{kh} &= 1.67 - 0.48kh & \text{for} & \quad 1.06 < kh < 1.55 \\ \gamma_{kh} &= 0.92 & \text{for} & \quad kh \geq 1.55 \\ \gamma_s &= 1.038 - 1.683s & \text{for} & \quad 0.008 < s < 0.057 \\ \gamma_\beta &= 1 - 0.0062\beta & \text{for} & \quad 0^\circ < \beta < 80^\circ \end{aligned} \quad (12)$$

5. 결 론

항만구조물에서 발생하는 월파는 구조물의 안정성, 배후 부지의 활용, 선박 항행 등 항만 운용에 영향을 주는 중요한 현상 중의 하나이며, 월파량 예측을 위한 연구는 현재까지도 활발히 진행중에 있다. 본 연구에서는 비쇄파조건에서 직립식 구조물의 월파량 산정을 위한 수리실험을 수행하였으며, 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2차원 수리실험을 통해 직립식 구조물에 대한 월파량 산정식을 제안하였으며, EurOtop(2007)의 결과와 비교하였다. 동일 구조형식에서 월파량 산정 결과의 경향은 유사하게 나타났으나, 적용 스펙트럼에 따라 차이가 발생함을 확인하였다.
- (2) 입사파의 주기가 월파에 미치는 영향을 상대수심 영향계수를 적용하여 제시하였다. 상대수심 $kh = 1.55$ 를 기준으로 $kh \geq 1.55$ 의 경우에는 주기가 월파량의 증감에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 분석되었으며, $kh < 1.55$ 의 경우에는 kh 가 작아짐에 따라 월파량이 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 직립식 구조물에 대한 파형경사와 월파의 관계를 파형경사 영향계수를 적용하여 제시하였다. 기존 연구와 마찬가지로 파형경사가 증가할수록 월파량 영향계수가 감소, 즉 월파량이 감소하는 것으로 나타났다.
- (4) 김 등(2010)이 제안한 입사각에 따른 월파량 저감계수와 본 연구에서 도출된 상대수심 및 파형경사에 의한 영향계

수를 포함하여 직립식 구조물의 월파량 산정식을 제안하였다.

본 연구에서 제안한 월파량 산정식의 신뢰도 향상을 위해 추가적인 수리실험이 진행되고 있으며, 향후에도 지속적으로 수행될 예정이다. 또한 상치콘크리트의 기하학적 형상, 쇄파 조건 등의 경우도 고려할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 지원과제인 “기후변화 대응 항만설계기준 개선 방안연구(1단계)” 과제의 성과임을 밝히며, 국토해양부 및 한국해양과학기술진흥원의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김영택, 이종인, 조용식, 하태민 (2010). 경사입사파에 대한 직립식구조물에서의 월파량 저감계수. 한국해양·해양공학회논문집, 22(3), 149-155.
- 이원 (2008). 사석경사제 호안의 월파특성, 한양대학교 석사학위논문.
- 일본항만협회 (1999). 港灣の施設の技術上の基準・同解説.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.

- Anderson T.L. and Burcharth H.F. (2009). Three-dimensional investigation of wave overtopping on rubble mound structures, Coastal Engineering, 56, 180-189.
- British Standard(BS) (2001). British Standards Institution.
- Coastal Engineering Manual(CEM) (2004). U.S. Army Corps of Engineers.
- EurtOtop (2007). EurOtop-Wave overtopping of sea defences and related structures : Assessment Manual.
- Franco, C. and Franco, L. (1999). Overtopping Formula for Caisson Breakwaters with Nonbreaking 3D Waves. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 125(2), 98-108.
- Goda, Y. (1985). Random seas and design of maritime structures. World Scientific Publishing.
- Owen, M.W. (1980). “Design of seawalls allowing for wave overtopping.” Report No. EX924, HR Wallingford.
- van der Meer and Janssen J.P.F.M. (1994). Wave run-up and overtopping at dikes. Wave forces on inclined and vertical wall structures, ASCE.

원고접수일: 2012년 1월 6일

수정본채택: 2012년 4월 21일(1차)

2012년 6월 8일(2차)

게재확정일: 2012년 6월 20일