Delft-3D Model을 이용한 다원주 군파일의 파랑제어 효과에 관한 연구

이상화* · 장은철** · 이한승** · 정석재**

*동아대학교 토목공학과

**동아대학교 대학원 토목공학과

Study on Effect of Wave Control by Multi-Cylinder Piles Using Delft-3D Hydrodynamic Model

Snag-Hwa Lee*, Ean-Chul Jang**, Han-Seung Lee** and Seok-Jae Jeong**

*Division of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

**Graduated of Civil Engineering, Dong-A University, Busan, Korea

KEY WORDS: Multi-cylinder piles 다원주 군파일, Delft-3D : Wave(SWAN), Wave breaker 파제제

ABSTRACT: In order to effectively control waves in a coastal zone, Multi-Cylinder Piles have been suggested as economic structures. A numerical analysis was conducted using the Delft-3D: WAVE module based on SWAN, which considered wave shoaling and refraction. Moreover, irregular waves were used to investigate the hydrodynamic characteristics of the wave interaction with the structure. In this paper, a numerical analysis was carried out to research the effect of wave control through a wave height analysis concerning an existing, concrete wave breaker and multi-cylinder piles placed at the same location. As a result, the effect of the wave control is shown using the wave breaker, multi-cylinder piles, and existing data.

1. 서 론

오늘날 연안해역은 임해공업단지, 항만시설 등의 경제적인 측면과 동시에 휴식공간을 제공하는 해양공간자원으로 중요성이 더해지고 있다. 또한 해양환경 보전에 대한 사회적 관심이 집중되고 있다. 이러한 연안개발 시에 파랑제어 효과가 우수함과 동시에 해수순환이 원활한 해안구조물을 개발하기 위해 동아대학교 하천 및 항만공학 연구실에서는 다원주 형태의 구조물을 제안하고 연구 중이다.

원주형태 구조물(Circular cylinder)에 연구는 국내·외에서 Maull and Milliner(1978), Turgut(1986), 문중춘(1988), Tasuno and Bearman(1990), Mittal and Kumar(2001) 등이 연구하였으나, 대부분 단일 원주 및 2~3개 원주 주위에서 일어나는 흐름현상에 관한 것이며, 한건모(1987)는 원주의 직경, 배치형태에 따라 파력에 대해 실험하여 소개하였다. 그리고 동아대학교 하천 및 항만실험실에서 장은철(2004)은 다원주 실린더 주위의 Vortex 현상을 실험적으로 제시하였으며, 정동화(2005)는 다원주 구조물의 의한 파랑제어 효과에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다. 이상화와 박정호(2006)는 다원주 주위의 유동을 CFX-5 프로그램을 이용하여 해석하기도 하였다.

본 논문은 다원주 군파일 구조물의 파랑제어 기능을 검증하기 위하여 항만의 외곽시설 중 대표적인 파제제(또는 방파제)와

비교·분석 하였다. 연구대상지역은 국토해양부에서 발간한 연안침식 모니터링 체계구축 보고서(국토해양부, 2007)의 자료를 토대로 가장군 임랑 해수욕장으로 선택하였으며, 조석 및 파랑의 해석이 가능한 상용프로그램인 Delft-3D : WAVE(SWAN)를 이용하여 외해 측에 콘크리트를 사용한 방파제를 설치하는 기존의 방법과 다원주 군파일 형태의 구조물을 설치하는 방법을 동일 평면 배치상에서 수치해석을 수행하여 파랑제어의 효과를 비교·분석하는 것이 본 논문의 목적이다.

2. Delft-3D : WAVE (SWAN)

Delft-3D Hydrodynamic Model은 3개의 모듈로 구성되어 있는데 Delft-3D FLOW(Tidal), Delft-3D WAVE(SWAN), Delft-3D SED and MOR(Sediment transport)이다. 이 중 SWAN (Simulating waves nearshore)모델은 바람, 수심 및 해류조건으로부터 근해, 호수 및 강어귀에서 파랑의 특성인자를 추정하는 제3세대 수치 파랑모델이다(Booji et al., 1991; Ris et al., 1991). 이 모델은 파랑 전파 과정에서 파랑의 공간상 직선 전파, 수심과 조류에 의한 굴절, 수심과 조류에 의한 천해 현상, 반대 조류에 의한 파랑의 차단과 반사, 방해물에 의한 파랑의 전달 또는 반사를 고려할 수 있다. 그리고 파랑 생성과 소산 과정에서 바람에 의한 파랑 소산, 수심기인 쇄파에 의한 파랑 소산, 바닥

교신저자 장은철: 부산광역시 사하구 하단2동 840번지, 051-200-5736, jec1004@hanmail.net

본 논문은 한국과학재단 2010년도 특정기초연구(No. 2010-0000194 "친환경 소재를 이용한 다 군파일 형태의 연안침식방지 기술개발연구")의 일부임을 밝힙니다.

찰에 의한 파랑 소산, 비선형 상호작용에 의한 에너지 교환, 장애물에 의한 에너지 소산을 고려할 수 있다. 그러나 산란은 고려되지 않기 때문에, 항구나 장애물에 인접한 곳에서는 일반적으로 정확한 계산이 어렵다. SWAN 모델은 파랑작용 평형방정식을 지배방정식으로 한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N = \frac{s}{\sigma} \quad (1)$$

여기서

$\frac{\partial}{\partial t}N$: 작용의 시간 변화량,

$\frac{\partial}{\partial x}c_xN + \frac{\partial}{\partial y}c_yN$: 지리적 공간에서의 작용의 전파,

c_x, c_y : 전파속도,

$\frac{\partial}{\partial \sigma}c_\sigma N$: 수심과 흐름의 변화에 의한 상대주파수의 천이,

$\frac{\partial}{\partial \theta}c_\theta N$: 수심과 흐름에 의한 굴절.

전파속도는 선형파 이론으로 도출되고, 파랑작용 평형방정식의 소오스 항 s 는 파랑간의 비선형 상호작용, 파랑 소산, 파랑 발생의 효과를 나타낸다.

SWAN에서 유의파고(H_s), 파향(Dir), 주기(T_m)는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$H_s = 4 \sqrt{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \quad (2)$$

여기서 $E(\omega, \theta)$ 은 분산 밀도 스펙트럼이다. 풍파와 너울을 합한 총 H_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$H_s = \sqrt{H_{sw}^2 + H_{ss}^2} \quad (3)$$

여기서 H_{sw} 은 풍파에 의한 유의파고이고, H_{ss} 은 너울에 의한 유의파고이다. 평균 파향 Dir 은 다음으로 정의된다.

$$Dir = \arctan \left[\frac{\int \sin(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \cos(\theta) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right] \quad (4)$$

평균 파주기 T_m 은 다음으로 결정된다.

$$T_m = 2\pi \left(\frac{\iint \omega E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1} \quad (5)$$

여기서 ω 는 절대 원주파수로 도플러 효과를 포함하는 분산관계식에 의해 결정된다.

3. 수치해석

수치모형실험의 대상 구간은 연안침식 모니터링 체계구축 보고서(국토해양부, 2007)의 내용을 참고하여 현재 연안침식지역

을 파악하고 해역별로 다원주 군파일 형태의 연안침식방지 기술적용 대상지역을 부산광역시 기장군 장안읍 임랑해수욕장으로 선정하였다. 임랑해수욕장은 연안침식 현황 C등급(우려) 지역으로 백사장 침식현상이 우려되거나 심각한 상황으로 조사되어 도류제 정비공사를 실시하여 해변폭의 변화는 미미하나, 해변고의 변화는 아직 우려되는 상황으로 항내 퇴적된 모래를 준설하고 양빈을 실시하여 해변을 유지하고 있다.

3.1 광역 Model의 검증

심해 설계파원은 한국해양연구원에서 “해상 파랑관측 및 조사” 사업의 일환으로 한반도 주변 전해역에 대해 매 18km 격자마다 매시간 연속 파랑산출 결과와 50년대 이후의 주요 태풍시의 이상 파랑 시뮬레이션 결과를 바탕으로 산정한 ‘전해역 심해설계파 보고서II(한국해양연구원, 2005. 12)’에서 본 과업대상 지역에 해당하는 부분을 선정하여 50년 빈도의 심해 설계파랑 조건으로 광역 수치해석을 실시하였다. 설계파랑은 임랑해수욕장의 50년 빈도 파 중 가장 큰 영향을 차지하는 SSE, SE, ESE에 대하여 해석하였다. 설계파의 제원은 Table 1에 제시하였다. 광역 모형은 임랑해수욕장을 포함한 21.4km × 23.6km의 범위로 100m 격자간격으로 구성하였으며, 수심자료는 한국해양개발의 수치지도 No. 103과 No. 264를 이용하였다(Fig. 1 참조).

연구대상지역인 임랑해수욕장 인근의 실시간 파랑 관측 자료가 없는 관계로 광역모형의 검증을 심해 설계파 지점보다 연안

Table 1 Data of design deep water waves

Latitude	Longitude	Direction	Height	Period
35.08°	129.50°	SSE	8.04 m	13.44 sec
		SE	6.18 m	12.24 sec
		ESE	6.22 m	12.05 sec

Fig. 1 Bathymetry of overall area

Table 2 Comparison of observation and numerical result

Position	Latitude: 35.21°, Longitude: 129.33°					
	Observation		Numerical analysis		Comparison	
	Height (m)	Period (sec)	Height (m)	Period (sec)	Height (%)	Period (%)
SSE	8.47	11.93	8.17	11.51	+3.54	+5.19
SE	10.09	12.8	10.35	12.43	-5.56	-3.36
ESE	10.07	12.78	9.92	12.29	+1.49	+3.83

Fig. 2 Grid composition **Fig. 3** Arrangement of multi-cylinder piles

측에 위치한 지점에서의 파고와 주기를 비교한 결과 5% 이하의 오차를 나타내었다(Table 2참조).

3.2 세부역 Model의 구성

Model의 범위는 임랑해수욕장의 4.42km × 3.960km 구간이고, 공간 계산 격자는 6.67m~20m의 간격으로 Rectangler grid로 구성하였고(Fig. 2 참조), 시간 계산 간격은 10분으로 하여 설계 파랑 내습시의 3시간에 대하여 해석하였다.

설계파는 광역 수치해석에서 세부 모형의 경계에 해당하는 자료를 입력하였다.

Fig. 4 Bathymetry composition **Fig. 5** Cross section of multi-cylinder piles

수치해석은 현 상태(파제제가 없는 경우)와 파제제(콘크리트) 구조물을 설치했을 때 그리고 다원주 군파일 구조물을 설치했을 경우의 세 가지 Case를 해석하여 연안역을 3개의 구역으로 나누어 파고를 비교해보았다.

콘크리트 파제제는 길이 500m, 폭 33m 3개를 100m간격으로 이안제 형식으로 3개 설치하였고, 다원주 군파일 구조물의 파일 직경은 6.67m이며 교차배열방식으로 콘크리트 파제제와 동일 위치상에 설치하였다. 각 구조물의 높이는 EL. 0m로 잠제형식으로 하였다. 1개의 원주는 각각 1개의 Rectangler grid(6.67m × 6.67m)로 표현을 하여 수치해석을 수행하였다(Fig. 3, 5 참조).

파업대상구역의 수심분포와 평균파고의 측정 구역을 세 구역(a, b, c)으로 나타내어 Fig. 4에 나타내었다.

3.3 수치해석 결과

현 상태의 해안에서 콘크리트 파제제와 다원주 군파일 구조물의 설치로 인한 파랑제어 효과는 충분히 향상된 것을 볼 수 있다.

파향에 따른 수치해석 결과 SSE파향일 때 파고가 가장 높게 나타났다. 연안역에 근접해있는 a, c구역이 b구역보다 상대적으로 파고가 낮은 것을 볼 수 있다. 구역별 파고는 b구역 > c구역 > a구역 순으로 나타났다. b구역은 상대적으로 수심이 깊고 a, c 구역으로부터 파가 중첩이 되어 파고가 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 3에 각 구역별 파향에 따른 유의파고를 나타내었고, 아래 3.2.1~3.2.3에 파향별 수치해석 결과를 따로 제시하였다.

Table 3 Significant wave height of each area

Area	Direction	Existing state	Con'c wave breaker	Mlti-cylinder piles
a	SSE	3.98	2.32	3.13
	SE	3.87	2.44	3.07
	ESE	3.83	2.61	2.64
b	SSE	4.74	3.03	4.09
	SE	4.44	2.59	3.55
	ESE	4.11	2.39	3.14
c	SSE	4.50	2.41	3.46
	SE	3.65	1.99	3.02
	ESE	3.31	1.80	2.70

(Unit: m)

Fig. 6 Distribution of wave height: SSE wave (existing state) **Fig. 7** Distribution of wave height: SSE wave (Con'c wave breaker)

3.3.1 SSE 파향 해석 결과

구역별 파고 결과 현 상태에서 최소 3.98m~최대 4.74m의 파가 콘크리트 파제제 설치 시 최소 2.32m~최대 3.03m로 나타났고, 다원주 군파일 구조물 설치 시 최소 3.13m~최대 4.09m로

Fig. 8 Distribution of wave height: SSE wave (multi-cylinder piles) **Fig. 9** Result of average wave height (wave direction: SSE)

나타났다.

그리고 구조물 배후에서 콘크리트 파제제를 설치하였을 때는 반사파의 영향으로 구조물 배후에 파고가 높게 나타났으나, 다원주구조물 설치시에는 파고가 줄어든 것을 볼 수 있다.

Fig. 6~8에 각 Case별 파고분포를 나타내었고, Fig. 9에 구역별 평균파고를 비교하였다.

3.3.2 SE 파향 해석 결과

구역별 파고 결과 현 상태에서 최소 3.65m~최대 4.44m의 파가 콘크리트 파제제 설치 시 최소 1.99m~최대 2.59m로 나타났고, 다원주 군파일 구조물 설치 시 최소 3.02m~최대 3.55m로 나타났.

SSE파향에서와 마찬가지로 구조물 배후에서의 파고가 콘크리트 파제제보다 다원주구조물 설치시 파고가 줄어든 것을 볼 수 있다.

Fig. 10~12에 각 Case별 파고분포를 나타내었고, Fig. 13에 구역별 평균파고를 비교하였다.

3.3.3 ESE 파향 해석 결과

구역별 파고 결과 현 상태에서 최소 3.31m~최대 4.11m의 파

Fig. 10 Distribution of wave height: SE wave (existing state)

Fig. 13 Result of average wave height (wave direction: SE)

Fig. 11 Distribution of wave height: SE wave (Con'c wave breaker)

Fig. 14 Distribution of wave height: ESE wave (existing state)

Fig. 12 Distribution of wave height: SE wave (Multi-cylinder piles)

Fig. 15 Distribution of wave height: ESE wave (Con'c wave breaker)

가 콘크리트 파제제 설치 시 최소 1.80m~대 2.61m로 나타났고, 다원주 군파일 구조물 설치 시 최소 2.64m~최대 3.14m로 나타났다.

ESE파향에서도 구조물 배후의 파고는 다원주구조물 설치시 콘크리트 파제제보다 줄어든 것을 볼 수 있다.

Fig. 14~16에 각 Case별 파고분포를 나타내었고, Fig. 17에 구역별 평균파고를 비교하였다.

3.4 수치해석 결과 분석

콘크리트 파제제를 설치하였을 때에는 a구역에서 평균 36.84%, b구역에서 평균 39.76% 그리고 c구역에서 평균 45.89%

Fig. 16 Distribution of wave height: ESE wave (multi-cylinder piles)

Fig. 17 Result of average wave height (wave direction: ESE)

Table 4 Ratio of effect on wave control

Area	Direction	Con'c wave breaker	Multi-cylinder piles	Comparison
a	SSE	41.75	21.42	51.29
	SE	36.87	20.67	56.06
	ESE	31.70	31.00	97.77
	Average	36.84	24.31	65.98
b	SSE	36.05	13.77	38.19
	SE	41.67	20.05	48.11
	ESE	41.96	23.66	56.37
	Average	39.76	18.92	47.60
c	SSE	46.41	23.16	49.90
	SE	45.44	17.33	38.13
	ESE	45.67	18.50	40.52
	Average	45.89	19.96	43.49
Total	Average	40.84	21.06	52.92

(Unit: %)

의 감쇄 효과가 있었다. 그리고 다원주 군파일 구조물을 설치하였을 때에는 a구역에서 평균 24.31%, b구역에서 평균 18.92%

Fig. 18 Ratio of effect on wave control

그리고 c구역에서 평균 19.96%의 감쇄 효과가 있었다.

구간별 콘크리트 파제제에 대한 다원주 구조물의 감쇄효과는 a구역에서 65.98%, b구역에서 47.60%, c구역에서 43.49%로 나타났다.

콘크리트 파제제와 다원주 군파일 구조물에 대하여 각 구간별, 파향별 감쇄효과를 비교하여 Table 4와 Fig. 18에 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 시공되고 있는 콘크리트 파제제와 비교하여, 시공이 간편하고 해수유동이 원활하여 해양오염을 줄일 수 있는 파랑제어 구조물로서 다원주 군파일의 구조물을 제시하였다. 콘크리트 파제제와 다원주 군파일의 구조물을 동일 평면 상에 배치하여 수치해석 해 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 동일 평면배치 상에서 파랑제어 효과는 콘크리트 파제제 > 다원주 군파일 구조물 > 현 상태 순으로 나타났다.

(2) 기존의 콘크리트 파제제에 비해 다원주군 파일의 구조물이 최대 97.77%에서 최소 38.13%로 평균 52.92% 정도의 감쇄효과가 있는 것으로 나타났다.

(3) 수치해석의 파고 분포도에서 볼 수 있듯이 반사파의 영향으로 콘크리트 파제제 배후의 파고가 커지는 현상이 다원주 군파일 구조물에서는 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

다원주 군파일 구조물을 설치하는 경우 콘크리트 파제제에 비해 파랑제어 효과는 평균 50% 정도이다. 하지만 해수유동이 원활하다는 장점을 본다면 연안역의 파랑제어 기능과 원활한 해수유동의 기능을 동시에 만족하는 구조물로서 그 효용성이 있다고 판단된다.

앞으로 다원주 군파일 구조물의 파랑제어의 효율을 높이기 위하여 다원주 군파일의 배열이나 치수 등을 변화해가며 좀 더 기능을 보완 할 수 있는 방법을 더 연구하고, 연안 침식의 문제와 관련한 수리모형 실험과 수치해석을 통하여 다원주 군파일 형태의 구조물의 수리적 특성과 기능을 규명해야한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 2010년도 특정기초연구(No. 2010-

0000194 “친 환경 소재를 이용한 다 군파일 형태의 연안침식방지 기술개발 연구”)의 지원으로 수행된 연구이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 국토해양부 (2007). 연안침식 모니터링 체계구축 보고서.
- 문종춘 (1988). 왕복운동하는 원주 주위의 유동특성에 관한 연구, 석사학위논문, 동아대학교 대학원 기계공학과.
- 장은철 (2004). 다원주 주위 유동에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 동아대학교 대학원 토목공학과.
- 정동화 (2005). 연안역 파랑제어 구조물에 관한 실험적 연구, 석사학위 논문, 동아대학교 대학원 토목공학과.
- 이상화, 박정호 (2006). “수치모형을 이용한 다원주 주위의 유동 해석”, 한국해양공학회지, 제20권, 제2호, pp 29-35.
- 한건모 (1987). 원주 해양구조물에 작용하는 파력의 파력계수에 관한 연구, 박사학위 논문, 동아대학교 대학원 토목공학과.
- Booij, N., Ris, R.C. and Holthuijsen, L.H. (1999). “A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation”, J. Geophys. Res., Vol 104, C4, pp 7649-7666.
- Mauil, D.J. and Milliner, M.G. (1978). Sinusoidal Flow Past a Circular Cylinder, Coastal Engineering 2.
- Mittal, S. and Kumar, V. (2001). “Flow-induced Oscillations of Two Cylinders in Tandem and Staggered Arrangements”, Journal of Fluids and Structures, 15, pp 717.
- Ris, R.C., Booij, N. and Holthuijsen, L.H. (1999). “A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part II, Verification”, J. Geophys. Res., Vol 104, C4, pp 7667-7681.
- Tatsuno, M. and Bearman, P.W. (1990). A Visual Study of the Flow around an Oscillating Circular Cylinder at Low, J. Fluid.
- Turgut, S. (1986), “Force on a Circular Cylinder in Viscous Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers”, J. Fluid Mech., 165, pp 61-71.

2011년 1월 17일 원고 접수

2011년 3월 3일 심사 완료

2011년 4월 22일 게재 확정