

Boussinesq 모델을 이용한 제주 차귀도 해역의 다방향 불규칙파 시뮬레이션

류황진* · 신승호* · 홍기용* · 홍석원* · 김도영**

*한국해양연구원 해양시스템기술연구본부

**홍익대학교 조선해양공학과

A Simulation of Directional Irregular Waves at Chagui-Do Sea Area in Jeju Using the Boussinesq Wave Model

HWANG-JIN RYU*, SEUNG-HO SHIN*, KEY-YONG HONG*, SEOK-WON HONG* AND DO-YOUNG KIM**

*Ocean Engineering Research Department, MOERI/ KORDI, Daejeon, Korea

**Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Hongik University, Jochiwon, Korea

KEY WORDS: Boussinesq wave model Boussinesq 파랑모델, Chagui-do sea area 차귀도 해역, Directional irregular wave 다방향 불규칙파, Wave power generation 파력발전, Wave simulation 파랑모사

ABSTRACT: Based on the Boussinesq wave model, the wave distribution in the Chagui-Do sea area in Jeju was simulated by applying the directional irregular waves at an incident boundary. The time and spatial variations of monthly mean wave height and period were investigated, which aims to provide basic information on optimal sites for wave power generation. The grid size and time interval of the Boussinesq wave model were validated by examining wave distributions around a surface piercing wall, fixed at sea bottom with a constant slope. Except for the summer season, the significant wave height is dominated by wind waves and appears to be relatively high at the north sea of Chagui-Do, which is open to the ocean, while it is remarkably reduced at the rear sea of Chagui-Do because of its blocking effect on incident waves. In the summer, the significant wave height is higher at the south sea, and it is dominated by the swell waves, which is contributed by the strong south-west wind. The magnitude of significant wave height is the largest in the winter and the lowest in the spring. Annual average of the significant wave height is distinctively high at the west sea close to the Chagui-Do coast, due to a steep variation of water depth and corresponding wave focusing effect. The seasonal and spatial distribution of the wave period around Chagui-Do sea reveals very similar characteristics to the significant wave height. It is suggested that the west sea close to the Chagui-Do coast is the most promising site for wave power generation.

1. 서 론

파력 에너지 이용을 목적으로 한 발전설비를 설계할 경우 무엇보다 우선적으로 파악되어야 하는 정보는 가용 파랑에너지 양과 파랑의 물리적 분포특성이다. 상대적으로 우수한 파랑 에너지 밀도는 파력발전 적지 선정의 중요한 요구조건이며, 파랑특성은 발전장치의 효율 관점에서 최적화를 지배하는 주요 인자이기 때문이다. 우리나라는 반도 국가로서 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 특성을 갖고 있을 뿐만 아니라, 천해역의 특성을 보이는 황해, 심해역의 특성이 두드러지는 동해, 크고 작은 도서로 이루어진 남해가 있으며, 또한 제주라고 하는 또 다른 특성의 해역을 보유하고 있다. 서로 다른 해양물리학적 특성을 갖는 다양한 바다로 구성된 우리나라 연안 해역에서 파력발전장치의 최적설계를 위해서는 대상해역의 파랑에너지 및 파랑특성을 정확

히 파악하는 노력이 선행되어야 한다(해양수산부, 2005).

송무석 등(2004)은 15km 격자로 구성된 한반도 해역의 파랑에너지 분포 특성을 연구하여 한반도의 남서쪽 해역, 특히 제주도 해역이 상대적으로 큰 파랑에너지 밀도를 가지고 있음을 보였다. 이 결과를 토대로 홍기용 등(2004), 류황진 등(2004)은 제3세대 파랑모델인 SWAN(Simulating waves nearshore)을 이용하여 1km 격자로 구성된 제주해역의 장기파랑 분포 특성을 조사하여 제주도 서쪽의 차귀도 해역이 타 해역에 비해 평균 파랑에너지 밀도가 현저히 높아 파력발전의 최적 해역으로 평가하였다.

이상의 선행연구 결과를 바탕으로 보다 정밀한 파력발전 적지 선정을 위해, 파랑에너지 밀도에 영향을 미치는 파랑특성 인자인 파고, 파 주기의 시공간적인 분포 특성을 고찰하기 위하여, 본 논문에서는 Madsen and Sorensen(1992)의 식을 토대로 하여 마찰항, 쇄파항을 추가 도입하고, 입사 경계에서 다방향 불규칙파를 생성할 수 있도록 개발된 Boussinesq 파랑모델(신승호, 2001)을 이용하여 차귀도 주변 해역(위도: 33.2993°N~33.3245°N,

교신저자 류황진 : 대전광역시 유성구 장동 171

016-9301-7876 ryu6310@moeri.re.kr

경도: 126.1346°E~126.1625°E)의 파랑 시뮬레이션을 통해 입사파에 대한 파고와 주기의 시공간적 변화 특성을 고찰하여 파력발전 적지선정을 위한 기초 정보를 제공하고자 하였다.

2. 계산영역 및 입사파 조건

2.1 계산영역

제주 차귀도 주변 해역에 대한 수심자료를 얻기 위하여 전자해도를 이용하려 하였으나, 전자해도에 나와 있는 수심 분포가 조밀하지 못하여, 경도 126°07' 25" E~126°09' 50" E, 위도 33° 16' 33" N~33°20' 52" N 영역(약 4km×8km)을 200m의 축선간격으로 수심을 실측하였다. Fig. 1에서 실측된 자료와 전자해도로부터 추출한 해안선 자료를 조합한 제주 차귀도 해역의 수심 분포와 계산영역(D1, D2)에서 Table 1에 기술한 파향의 방향 및 방위 정의를 나타내었다.

계산에 이용한 Boussinesq 모델은 신승호(2001)가 개발한 모델로서 파랑 생성을 위한 개방경계는 계산영역 좌측에 선경계로 설정되어 있으며, 선 경계 좌측에 에너지 흡수층을 설치하고 입반사 분리기법을 도입한 경계처리로 장시간 조파하여도 계산영역 내부가 교란되지 않도록 하고 있다. 그리고 계산영역의 측면, 상류 측에는 에너지 흡수경계를 두었으며, 섬들의 경계조건은 벽 경계로 설정하였다. 따라서 본 계산을 위해서는 입사 파향에 따라 파랑을 생성 시키는 위치가 변화되어야 하며, 그에 따라 계산영역도 변화되어야 한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 입사파향이 주로 남, 북 일 경우에는 Fig. 1의 D1영역으로 계산하고, 입사파향이 북서 일 경우에는 D2영역으로 계산하기 위하여 각각에 맞는 계산영역의 수심자료를 추출하였다. D1계산영역의 격자 간격은 5m이며, x, y방향 격자수 각각 561, 482개로 총 격자수는 270,402개이고, D2 계산영역의 격자 간격은 5m이며, x, y방향 격자수 417개로 총 격자수는 173,889개이다.

그리고 쇄파의 판정은 평면 파랑장으로서의 적용 및 이후의 불규칙파 계산으로서의 확장을 염두에 두고 Kubo et al.(1991)을 따라 개별파에 대한 쇄파판정을 하는 파별해석법을 이용하였다. 지금, 파정 위치에서 파의 진폭 $|\eta|$ 와 수심 h 와의 비를 γ 라고 하면

$$\gamma = \frac{|\eta|}{h} \quad (1)$$

이고, 이 값이 다음식의 쇄파경계치 γ_b 를 넘는 곳에서 쇄파가 시작되며, 파랑의 쇄파한계치가 0.135 이하가 되면 파가 재생되는 것으로 하였다(Isobe, 1986).

$$\gamma_b = 0.8 \times \gamma'_b \quad (2)$$

여기서, γ'_b 는 규칙파의 한계치이고, 계수 0.8은 불규칙파가 일반적으로 규칙파보다 쇄파하기 쉽다는 것을 고려한 것이다(Isobe, 1986). 규칙파 계산인 경우는 γ'_b 와 비교하여 결정한다.

$$\gamma'_b = 0.53 - 0.3 \exp\left(-3 \sqrt{\frac{h}{L_0}}\right) + 5s^{3/2} \exp\left\{\left(\sqrt{\frac{h}{L_0}} - 0.1\right)^2\right\} \quad (3)$$

여기서 L_0 는 외해에서의 입사파 파장이다.

2.2 다방향 불규칙파의 생성

실해역의 파랑은 기본적으로 불규칙하며 다방향으로부터 전파되는 각 성분파를 토대로 이루어져 있으므로, 규칙파를 대상으로 한 파랑의 특성 조사만으로는 해당 해역의 파랑 특성을 충분히 기술할 수 없다. 따라서 다방향의 성분파가 겹쳐진 실해역 파랑을 고려하기 위해서는 방향 스펙트럼의 개념을 도입한 불규칙파를 생성하여 가능한 한 실해역의 파랑을 모사하고 이를 토대로 한 파랑 에너지의 주파수 및 방향 분포에 따른 고찰도 병행되어야 한다.

다방향 불규칙 파랑의 경우 그 성질은 방향 스펙트럼으로 특징 지워질 수 있다. 방향 스펙트럼은 파의 굴절이나 회절에 영향을 미치므로 파 방향 분포의 집중도를 나타내는 요소 S_{\max} 의 선정은 신중하게 다루어져야 할 필요가 있다. 일반적으로 S_{\max} 는 심해파의 파형 경사를 나타내는 H_0/L_0 와의 역상관의 관계를 가져(Goda, 1991) 파형경사를 통해 정성적으로 추정할 수 있지만, 실제 바다의 파도에서는 이 추정곡선을 사이에 두고 상하로 불규칙한 분포를 보일 것이라 예상된다. 본 논문의 다방향 불규칙파의 시뮬레이션을 위해서는 파의 감쇠거리가 비교적 짧은 너울과 풍파의 혼합조건을 가정하여 $S_{\max} = 25$ 의 파향 집중도를 부여한 Bretschneider-Mitsuyasu형 방향 스펙트럼을 부여하는 것으로 하였다.

스펙트럼의 형상을 결정하는 유의파고와 주기는 HYPА 파랑 모델(Günther et al., 1979)에 의해 풍파와 너울을 구분하여 산정된 우리나라 해역의 광역 파랑자료(해양수산부, 2003)를 경계조건으로, 천해역 파랑전파 모델인 SWAN(Booij et al., 1999; Ris et al., 1999)을 이용하여 제주해역의 파랑분포 시뮬레이션을 수행함으로써 파력발전 효율에 영향을 미치는 파랑 인자들인 파

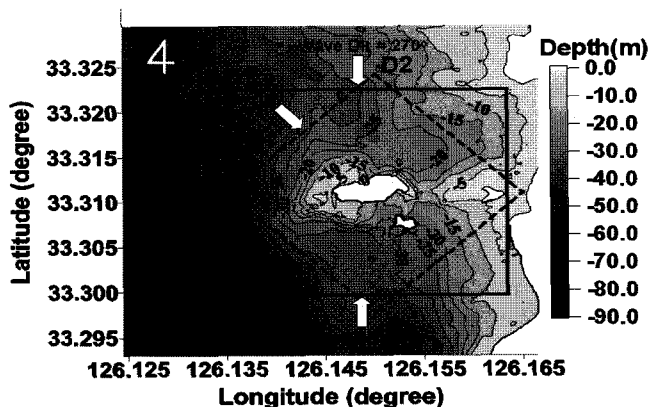


Fig. 1 Depth distribution of computational domain

고, 파 주기, 파향 등을 풍파와 너울을 구분하여 계산한 류황진 등(2004)의 파랑자료를 선형 보간하여 이용하였다.

Table 1에 풍파와 너울이 구분된 입사파랑 조건을 나타내었다.

3. 수치계산의 조건

계산에 이용한 Boussinesq 모델의 격자크기와 계산시간 간격에 대한 계산의 유효성을 검토하기 위하여 Fig. 2에서 보듯이 x 방향 2.5m 지점부터 10.5m까지 수심 0.1m를 시작으로 1/50의 저면 경사를 둔 10.5m×4.0m의 계산영역을 설정하였다. 한편, x 방향 4.5m지점에는 길이 1.5m의 구조물을 설치하고, 4m지점의 측면을 고정경계로 취함으로서 이안제의 조건을 설정하였다. 입사파 조건은 파고 0.02m, 주기 1.0sec인 규칙파이다.

Table 1 Condition of incident wave

Mon.	Wind sea			Swell sea		
	Hs (m)	T1/3 (sec)	Dir. (°)	Hs (m)	T1/3 (sec)	Dir. (°)
1	1.57	7.91	317.6	0.82	9.30	311.1
2	1.48	7.80	316.9	0.77	9.11	311.1
3	1.07	6.65	312.4	0.67	8.12	308.0
4	0.84	6.44	265.4	0.62	7.74	100.4
5	0.54	5.87	265.5	0.64	7.95	68.4
6	0.56	6.04	86.5	0.90	8.49	64.1
7	0.68	6.06	69.8	0.97	8.56	62.6
8	0.72	6.67	95.5	0.84	9.49	67.6
9	0.64	5.99	269.4	0.60	8.87	117.3
10	0.96	6.73	307.4	0.57	8.86	295.2
11	1.28	7.69	316.2	0.71	9.53	307.5
12	1.51	7.83	319.4	0.80	9.42	310.4

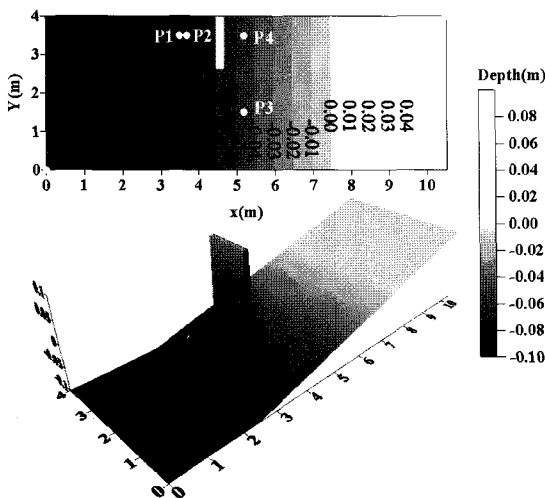


Fig. 2 Wave elevation measurement points and depth distribution

계산영역의 네 지점(P1(x=3.5m, y=3.5m), P2(3.7m, 3.5m), P3(5.2m, 1.5m), P4(5.2m, 3.5m))에서 수위의 시계열을 취득하여 격자크기와 계산시간 간격 변화에 따른 Boussinesq 모델의 특성을 살펴보았다. P1과 P2는 중복파 발생 시에 절파 복이 나타나는 위치이고, P3은 이안제에 의한 차폐 영향을 받지 않고 수심이 얕아짐에 따라 천수변형으로 인한 파형변화를 고려할 수 있는 위치이며, P4는 이안제의 차폐영향으로 인한 파형변화를 고려할 수 있는 위치이다.

3.1 수치계산 시간 간격의 설정

계산에 이용한 Boussinesq 모델의 계산시간 간격(dt)에 대한 계산의 유효성을 검토하기 위하여 Fig. 2와 같은 동일한 수심 분포와 입사파 조건으로 격자크기를 0.05m로 고정하고 계산시간 간격은 0.002sec와 0.01sec의 두 종류에 대하여 검토 하였다. 계산 시간 간격 0.002sec와 0.01sec은 식 (4)에 나타난 Courant안정 조건을 만족시키는 계산시간 간격이다.

Fig. 3과 4는 입사파고 0.02m, 주기 1.0sec인 규칙파에 대하여 격자크기 0.05m에 대해 계산시간 간격을 0.002sec와 0.01sec으로 시뮬레이션 한 파고분포 결과이고, Fig. 5는 Fig. 2에서 제시한 4 지점에서의 수위의 시계열 변화를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 계산시간 간격 0.002sec와 0.01sec일 때의 파고분포는 정성, 정량적으로 거의 비슷한 결과를 보이고 있고, 파형변화 또한 거의 일정한 모습을 보이고 있다. 식 (1)에 나타난 안정조건을 만족시키는 범위의 계산시간 간격이라면 파고분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

$$dt \leq 0.5 \times \left(\frac{\sqrt{dx^2 + dy^2}}{\sqrt{gh}} \right) \quad (4)$$

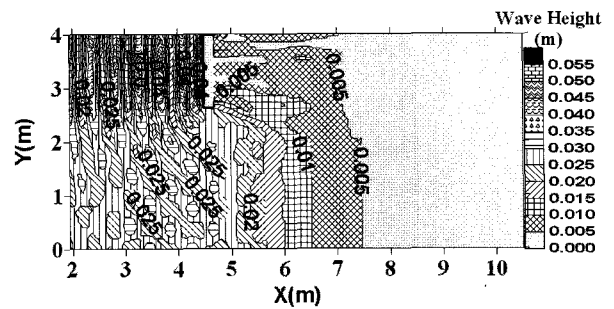


Fig. 3 Wave height distribution (dx=0.050m, dt=0.002sec)

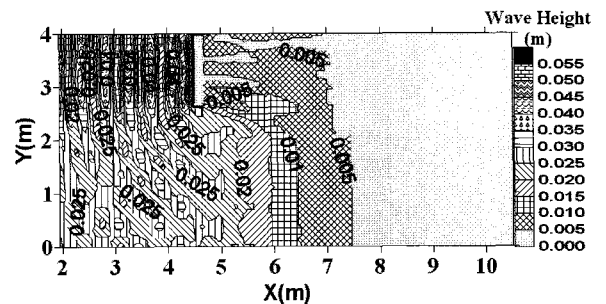


Fig. 4 Wave height distribution (dx=0.050m, dt=0.01sec)

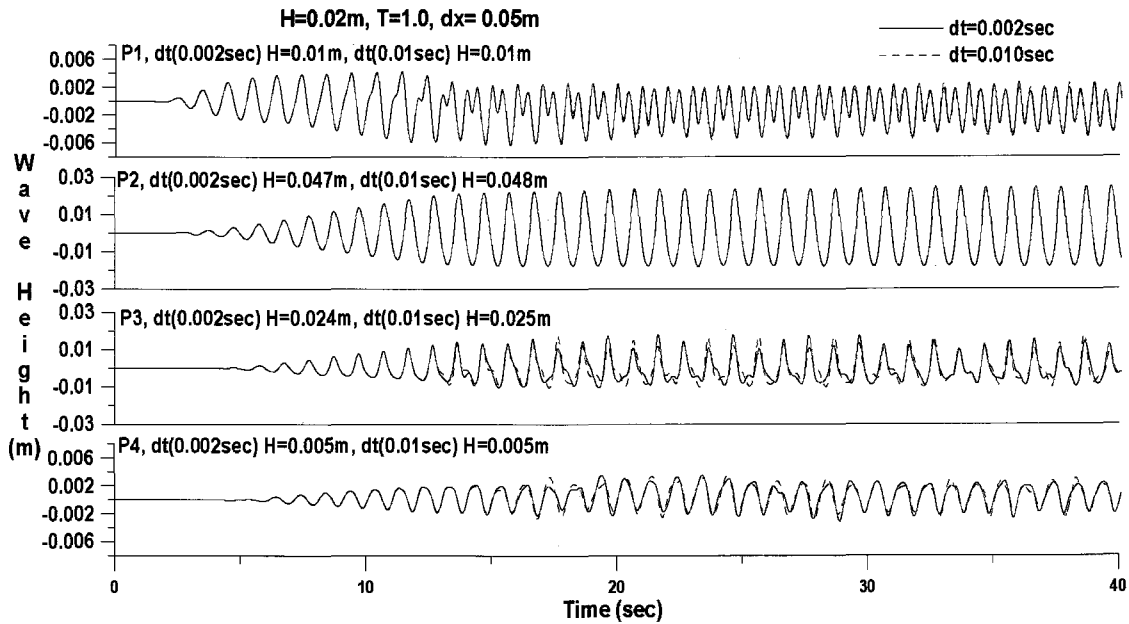


Fig. 5 Comparison of wave elevation with variation time step

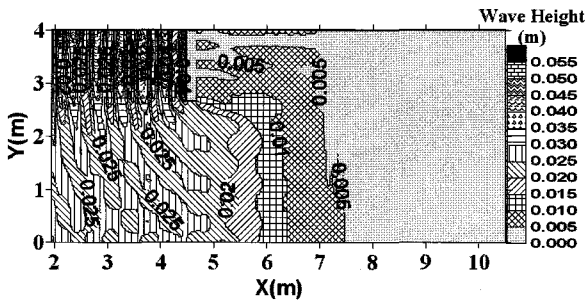


Fig. 6 Wave height distribution(regular wave, $dx=0.025m$)

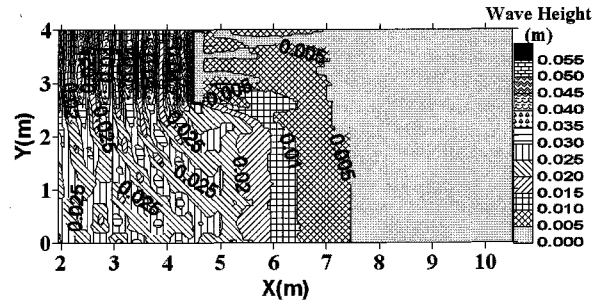


Fig. 7 Wave height distribution (regular wave, $dx=0.050m$)

3.2 수치계산 격자크기의 설정

Fig. 2의 계산영역에 대하여 입사파고 0.02m, 주기 1.0sec인 규칙 파 조건으로 계산시간 간격(dt)을 0.002sec로 고정하고, 계산영역의 격자크기를 0.025m, 0.05m, 0.1m(입사파장 약 0.92m에 대해 한 파장 당 약 36, 18, 9개의 격자 포함)로 구성하여 파고분포와 파형변화를 계산하여 격자크기에 대한 계산의 유효성을 검토하였다.

Figs. 6~8은 입사파고 0.02m, 주기 1.0sec인 규칙파에 대하여 격자크기가 각각 0.025m, 0.05m, 0.1m 일 경우의 파고분포 결과이다. 격자크기가 0.025m, 0.05m일 때의 파고분포는 정성, 정량적으로 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 그러나 격자크기 0.1m인 경우에는 격자크기 0.025m, 0.05m에 비해 파고분포에 차이를 나타내고 있으며, 특히 x방향 4m 이후의 파고분포는 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 입사파장 당 약 9개의 격자를 포함하는 0.1m의 격자크기로는 수심이 얇아짐에 따라 천수변형 효과로 인해 상대적으로 좁아진 파장에 대한 격자간격의 해상도가 부족하게 되어 천수심에서의 파형변화를 충분히 추종할 수 없기 때문이라고 사료된다.

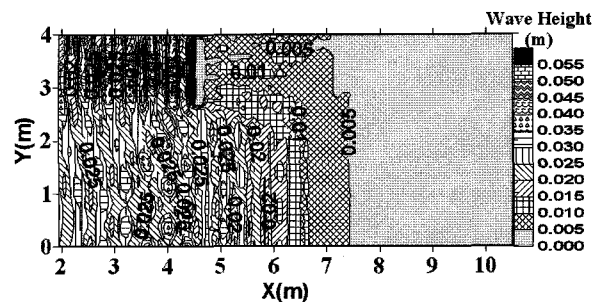


Fig. 8 Wave height distribution (regular wave, $dx=0.100m$)

이안제 전면에서는 중복파가 일어나 약 0.45m 간격으로 중복 파의 현상이 반복하여 나타나고 0.02m인 입사파고는 최대 0.054m까지 증폭되는 모습을 볼 수 있고, 이안제에 의한 차폐 영향을 받지 않는 범위에서는 수심이 얇아짐에 따라 천수변형에 의해 파고가 증폭되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 2에서 제시한 4지점에서 추출된 수위의 시계열 변화를 비교하고 있다.

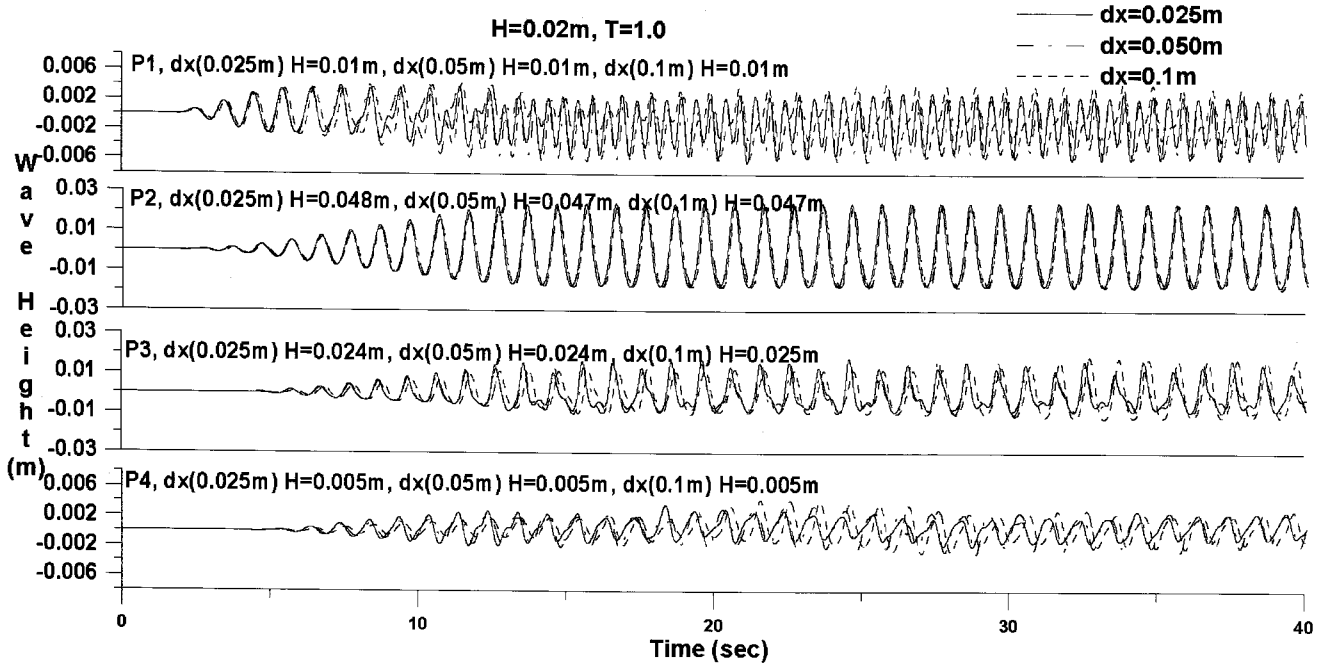


Fig. 9 Comparison of wave elevation with variation grid size

중복과 발생 시에 절이 나타나는 P1에서 파형변화를 살펴보면, 평균파고는 격자크기가 변하여도 동일한 값을 보이고 있고, 격자크기 0.025m와 0.05m의 파형변화는 정성적으로 비슷한 모습을 보이고 있으나, 격자크기 0.1m인 경우의 파형변화는 격자크기 0.025m와 0.05m에 비해 현격한 차이를 보이고 있다. 이는 이안제에 의해 발생된 중복파가 바다 경사로 인해 부분 중복파로 전이되면서 절이 나타나는 영역의 미세한 파형변화를 격자크기 0.1m로는 충분히 따라갈 수 없기 때문이라 생각한다. 그러나 중복과 발생 시에 복이 나타나는 P2에서 평균파고와 파형변화는 격자크기가 변하여도 정성, 정량적으로 거의 비슷한 모습을 나타내고 있다.

이안제의 영향이 적고 수심변화에 의한 천수변형의 영향이 지배적인 P3에서도 평균파고는 격자크기가 변화여도 거의 동일한 값을 보이고 있으나, 격자크기 0.025m와 0.05m에 비해 격자크기 0.1m의 경우 특히, 파저 부분의 파형변화를 잘 따라가지 못하는 것을 볼 수 있다. 이는 입사파가 진행에 오면서 수심이 얕아짐에 따라 파형의 비선형성이 증가하여 나타나는 파정과 파저의 비대칭성을 격자크기 0.1m로는 충분히 따라 갈 수 없기 때문이라고 생각한다.

P4에서 이안제의 차폐영향으로 인한 파형변화를 살펴보면, 평균파고는 동일한 값을 보이고 있으나, 파형의 변화는 P3과 마찬가지로 파형의 비선형성을 격자크기 0.1m로는 충분히 따라 가지 못하는 것을 볼 수 있다.

이상의 시뮬레이션 결과를 이용하여 제주 차귀도 해역에서 파랑 분포 계산의 계산시간 간격은 식 (1)에 나타난 안정조건을 만족시키는 시간간격인 입사파 주기의 1/500으로 시뮬레이션을

수행하였다. 계산 격자크기는 일반적으로 비선형 파랑을 계산하기 위해서는 한 파장 당 약 20개 이상의 격자가 포함되어야 하지만(신승호, 2001), 본 연구의 계산 격자크기는 계산시간과 계산용량을 고려하여, 한 파장 당 풍파와 너울 시 각각 11~19개, 18~28개의 격자가 포함되는 5m 격자크기로 계산하였다.

4. 제주 차귀도 해역의 파랑분포 특성

본 장에서는 Table 1에서 주어진 매월 풍파와 너울이 구분된 입사파랑 조건으로 다방향 불규칙파 시뮬레이션을 수행하여 차귀도 주변 수심의 영향과 차귀도로 인한 파랑의 차폐효과에 의한 파랑의 변형을 고려하여 최종적으로 파력발전에 유리한 적지를 선정하고자 하였다. 특히 계절별 특성이 두드러진 1, 5, 8, 10월을 중심으로 주요 파랑 특성인 유의파고, 파주기를 고찰하였다.

4.1 유의파고

제주 차귀도 해역의 입사파향은 Table 1에서 볼 수 있듯이 가을(10월)과 겨울(1월)의 파향은 북서쪽(약 315°), 여름(8월)에는 남, 남서쪽(약 65-90°)이 우세하며, 봄(5월) 풍파 시에는 북쪽(약 270°), 너울 시에는 남서쪽(약 65°)이 우세하여 계절적인 파향 변화가 두드러지는 특징을 가지고 있다.

Fig. 10~Fig. 13은 1, 5, 8, 10월 풍파와 너울 시 입사파조건으로 계산된 차귀도 주변해역의 유의파고 분포를 나타내고 있으며, Fig. 14는 1월부터 12월까지 풍파와 너울의 연평균 유의파고를 나타내었으며, Fig. 15에서는 풍파와 너울을 합한 연평균 유

의파고 분포를 나타내었다.

1월의 유의파고 분포(Fig. 10)를 살펴보면, 풍파 시 입사 파향과 직접 만나는 차귀도 북서, 서쪽 해역과 너울 시 차귀도 북서, 서, 남서쪽 해역이 다른 해역에 비해 상대적으로 높은 유의파고 분포를 나타내고 있다. 풍파 시 차귀도 북서, 서쪽 해역의 유의파고는 약 1.5m~2.0m로, 입사 유의파고 1.57m에 대해 약 0.95~1.27배의 분포를 보이고 있고, 너울 시에는 차귀도 북서, 서, 남서쪽 해역의 유의파고는 약 1.0m~1.8m로, 입사 유의파고 0.82m에 대해 약 1.22~2.2배의 분포를 보이고 있다. 이에 반해 차귀도에 의해 차폐된 남동쪽 해역의 유의파고는 풍파와 너울 시 각각, 약 0.4m~0.8m와 0.5m~0.7m로, 입사 유의파고에 비해 약 50%~75%, 40%~15% 감소한 파고분포를 보이고 있다. 이렇게 풍파와 너울의 입사파 조건에 대해 차귀도 주변해역의 유의파고 분포가 차이가 나는 이유는 수심변화에 대한 파 주기의 차로 인해 구조물의 차폐에 따른 회절 효과가 서로 달라짐으로 인한 것이라 생각된다. 유의파고 분포가 높게 나타난 차귀도 북서, 서쪽 해역은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 입사 파향에 대한 수심의 변화가 급격하게 일어나 수심 영향에 의한 파고 증폭 및 파랑

집중의 효과가 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 사료된다. 한편, 풍파와 너울 시 차귀도 남동해역은 차귀도로 인한 입사 파랑의 차폐효과로 인해 상대적으로 낮은 파고분포를 보이고 있으나, 입사 유의파고와 이 해역의 유의파고 분포의 비를 살펴보면 너울이 풍파보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 풍파에 비해 상대적으로 긴 주기의 성분파를 갖는 너울이 차귀도 남동 해역까지 회절 해 들어와 나타나는 현상이며, 이러한 회절 효과로 인해 풍파와 달리 너울 시 차귀도 남서 해역의 유의파고 분포가 높게 나타난 것이라 생각된다.

Fig. 13의 10월의 유의파고 분포 또한, 1월의 유의 파고분포와 유사한 경향을 보이고 있다.

봄과 여름의 계절적 특징이 두드러진 5월과 8월의 유의파고 분포를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 5월 풍파 시 다른 해역에 비하여 유의파고 분포가 높게 나타난 해역은 차귀도 북서쪽 해역으로 유의파고는 약 0.4m~0.7m이고, 8월에는 남서, 서쪽 해역으로 유의파고는 약 0.6m~0.9m로 나타나 입사 파고에 대해 5월과 8월 각각 0.74~1.30, 0.83~1.25배의 유의파고 분포를 보이고 있다. 너울 시에는 5월과 8월 모두 차귀도 북서, 서, 남서쪽 해역

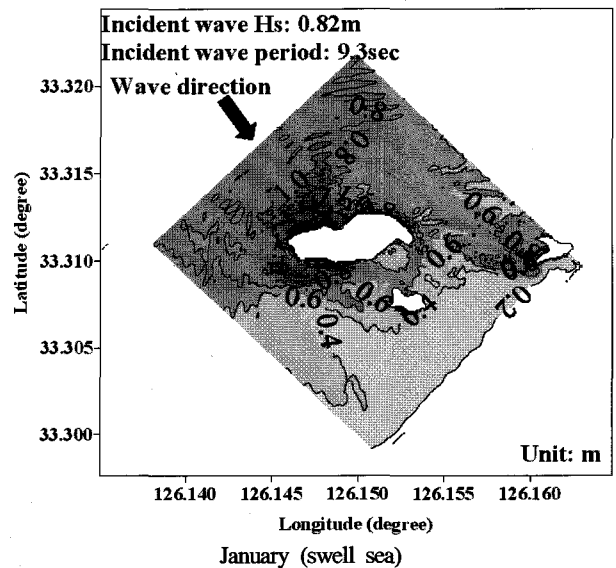
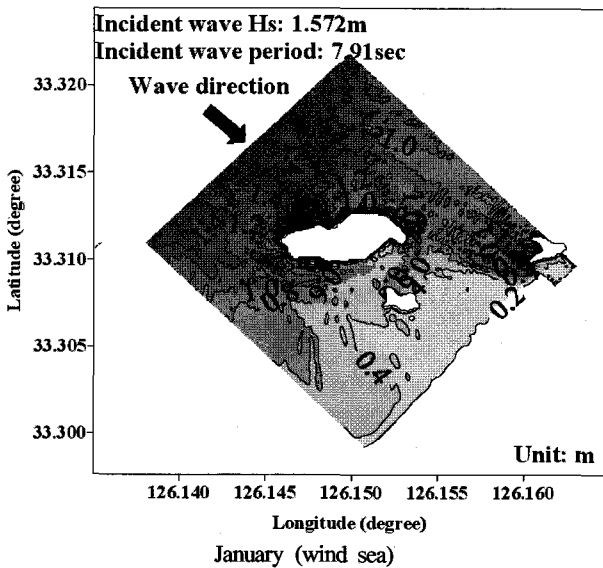


Fig. 10 Distribution of significant wave height (January)

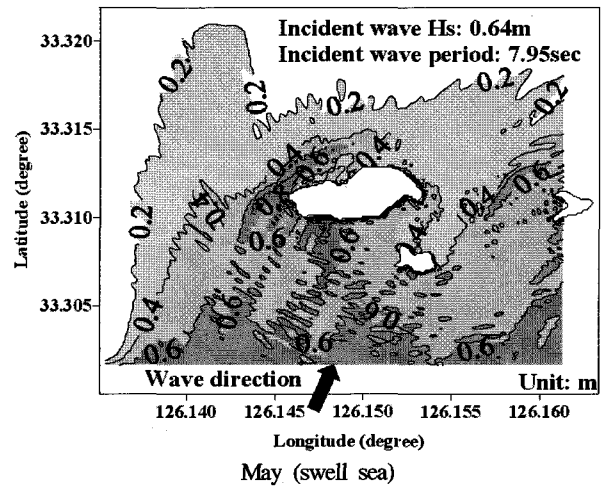
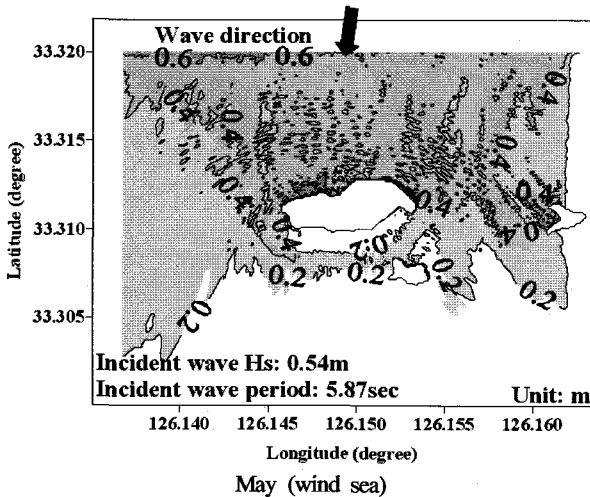


Fig. 11 Distribution of significant wave height (May)

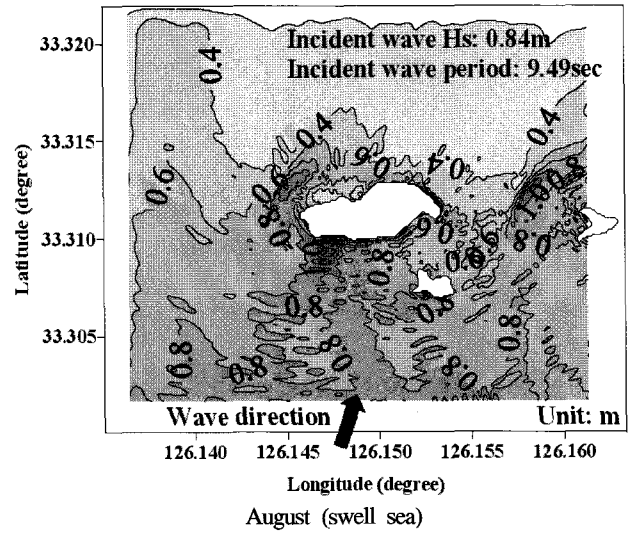
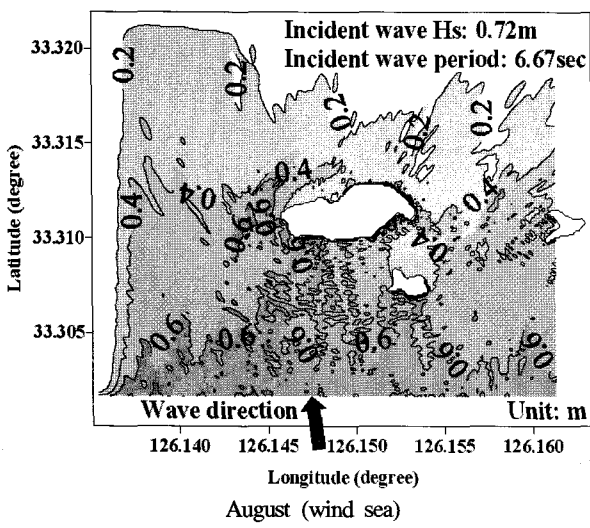


Fig. 12 Distribution of significant wave height (August)

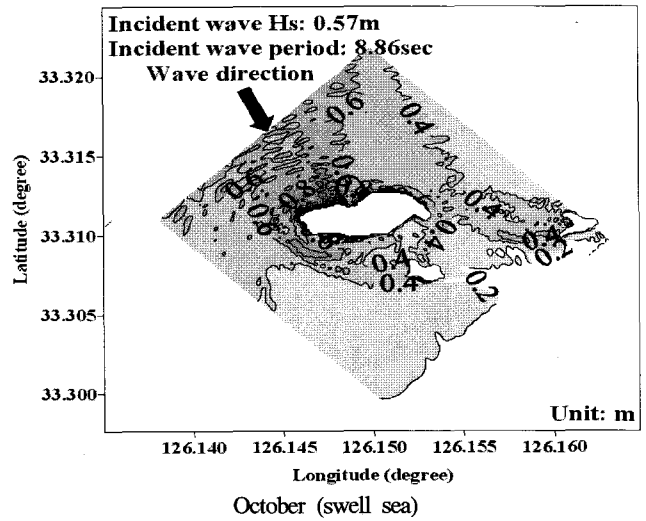
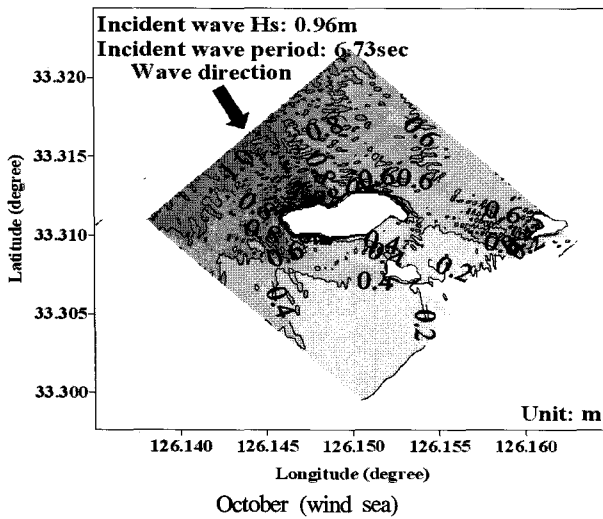


Fig. 13 Distribution of significant wave height (October)

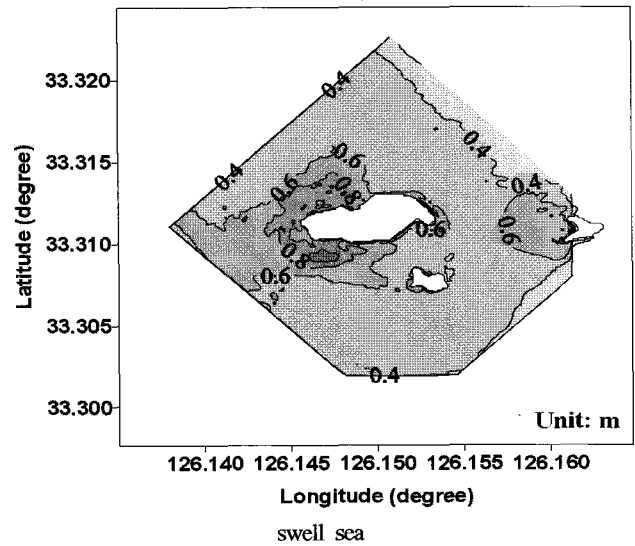
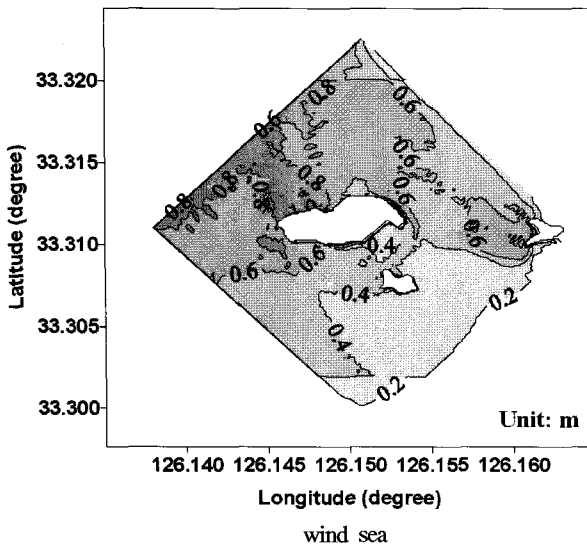


Fig. 14 Distribution of year mean significant wave height (wind sea, swell sea)

의 유의파고 분포가 높게 나타났다. 5월 이 해역의 유의파고는 약 0.6m~1.0m로 입사 파고에 대해 0.94~1.56배의 분포를 보이고 있고, 8월에는 입사파고의 0.83~1.67배인 0.7~1.4m의 유의파고 분포를 보이고 있다. 유의파고 분포가 다른 해역에 비하여 상대적으로 높게 나타난 해역과 너울 시 입사파 배후지역인 차귀도 북서쪽의 유의파고 분포가 높게 나타난 이유는 1월의 유의파고 분포에서도 설명하였듯이 수심의 영향과 풍파에 비해 상대적으로 긴 주기를 갖는 너울의 영향으로 인한 회절 효과에 기인한 것이다.

차귀도 주변해역 유의파고의 계절적 변화 특성을 살펴보면, 풍파 시 평균 유의파고 분포가 다른 달에 비하여 상대적으로 높은 달은 1월(2, 11, 12월)로 주로 겨울철에 해당되고, 10월(3, 4월)이 그 다음을 따라오고 5, 8월(6, 7, 9월)의 평균파고 분포가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 너울 시 평균 유의파고 분포가 다른 달에 비하여 상대적으로 높은 달은 1, 8월(2, 6, 7, 11, 12월)로 주로 겨울과 여름철에 해당되고, 5, 10월(3, 4, 9월)의 평균 유의파고 분포가 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 풍파와 너울 시의 평균 유의파고 분포를 비교해 보면, 풍파 시 평균 유의파고 분포가 다른 달에 비하여 상대적으로 높은 달인 1월(2, 11, 12월)은 너울 시에도 높은 평균 유의파고 분포를 보이고 있고, 특히 풍파 시 평균 유의파고 분포가 가장 낮은 것으로 나타난 8월(6, 7월)의 평균 유의파고 분포는 너울 시에는 높은 평균 유의파고 분포를 보이고 있다.

이는 제주 차귀도 주변해역의 경우 겨울철에는 북서 계절풍의 영향으로 풍파와 너울 시의 파고 분포가 높은 것으로 생각되고, 여름철에는 풍파의 영향 보다는 태풍 등으로 인한 강한 남서풍의 영향으로 발달된 너울의 영향이 지배적이며, 차귀도 남쪽해역이 상대적으로 높은 유의파고 분포를 보인다. 여름을 제외하면 봄, 가을, 겨울에는 풍파의 영향이 지배적이고, 차귀도 북쪽해역이 상대적으로 높은 유의파고 분포를 보인다.

풍파와 너울의 연평균 유의파고 분포(Fig. 14)를 살펴보면, 풍파 시 다른 해역에 비하여 상대적으로 높은 유의파고 분포를 보이는 해역은 차귀도 북서쪽 해역으로 약 0.8m~1.0m의 유의파고 분포를 보이고 있으며, 너울의 경우에는 북서, 서, 남서해역이 높게 나타났고 약 0.8m~1.0m의 유의파고 분포를 나타내고 있다.

Fig. 15에서 풍파와 너울을 합한 차귀도 주변해역의 유의파고 분포를 보면, 차귀도 북서, 서, 남서해역의 유의파고 분포가 다른 해역에 비하여 상대적으로 높은 유의파고 분포를 나타내고 있고, 약 1.0m~1.5m의 분포를 보인다.

제주 차귀도 해역에 대한 다방향 불규칙파 시뮬레이션을 통하여 파랑에너지 밀도의 주요 함수인, 유의파고 분포의 시공간적 변화를 검토한 결과 차귀도 북서, 서, 남서해역은 주변의 다른 해역에 비해 평균파고분포가 상대적으로 높고, 매월 파고분포 또한 다른 해역에 비해 높게 나타나 파력발전의 유력한 적지로 평가된다.

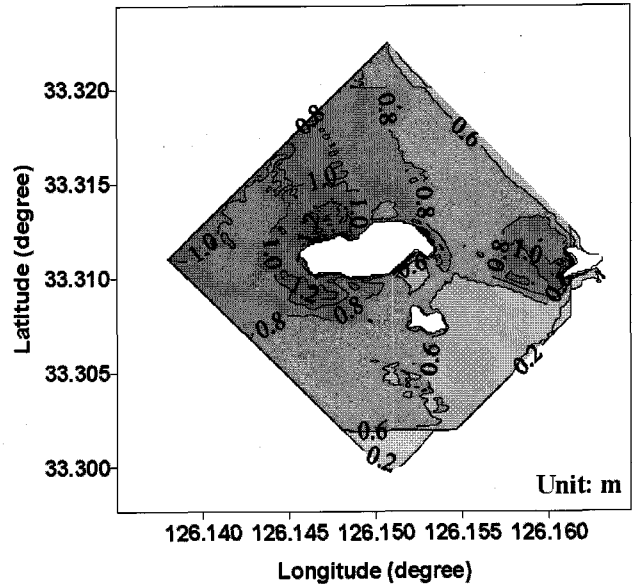


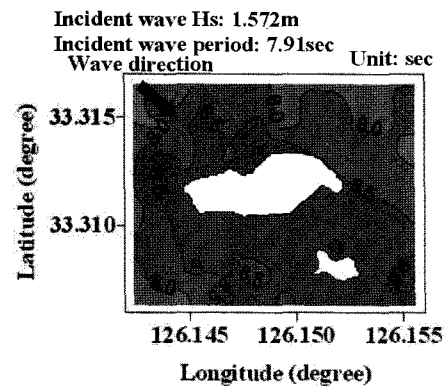
Fig. 15 Distribution of year mean significant wave height (wind+swell sea)

4.2 평균 파주기

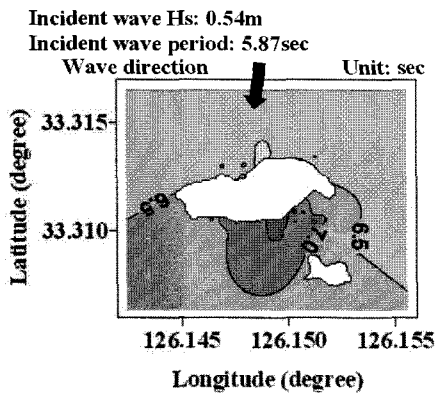
Fig. 16과 Fig. 17은 1, 5, 8, 10월의 풍파와 너울 시의 평균파주기 분포를 보여주고 있다.

풍파와 너울 시 평균 파주기와 유의 파고분포를 비교하면 입사파 배후지역에서 파고분포는 다른 해역에 비해 매우 낮은 값을 보이고 있으나, 상대적으로 긴 주기가 분포함을 볼 수 있다. 그러나 입사파 주기 중 가장 긴 주기를 갖는 너울 시 1월, 8월의 입사파 배후지역 주기분포는 입사파 주기와 거의 동일한 값을 가지고 있다. 이는 상대적으로 긴 주기의 입사파 성분이 차귀도를 회절 해 들어와 입사파 배후지역까지 그 영향을 미쳐 나타나는 현상이라 생각된다. 그 다음 긴 주기를 갖는 너울 시 5월 10월과 풍파 시 1월의 입사파 배후지역 주기분포는 입사파 주기에 비하여 0.7sec~1.5sec 긴 주기를 보이고, 가장 짧은 입사파 주기를 갖는 풍파 시 5월, 8월, 10월에는 입사파 주기에 비하여 1.3sec~1.7sec 긴 주기를 보이고 있다. 이는 상대적으로 짧은 주기의 입사파 성분은 차귀도를 회절하지 못하지만, 긴 주기의 성분은 차귀도 배후까지 그 영향을 미치기 때문이다.

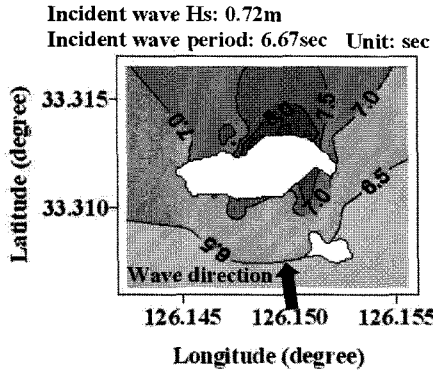
풍파와 너울의 평균 주기 분포를 비교해 보면, 풍파의 평균 주기 분포가 다른 달에 비하여 상대적으로 긴 달인 1월은 너울 시에도 긴 평균 주기 분포를 보이고 있고, 특히 풍파 시 평균 주기 분포가 가장 낮은 것으로 나타난 5월의 평균 주기 분포는 너울 시에는 높은 평균 주기 분포를 보이고 있다. 이는 제주 차귀도 주변해역의 경우 겨울철에 발생하는 북서 계절풍의 영향으로 풍파가 발달하며, 지속적인 풍향 및 긴 취송시간으로 인해 너울이 잘 발달함을 보여준다. 여름철에는 태풍 등의 영향으로 발달된 너울이 지배적으로 작용한 것으로 사료된다.



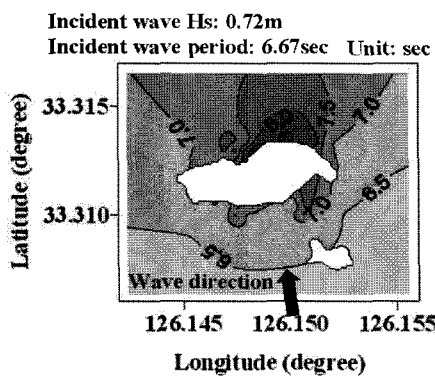
January



May

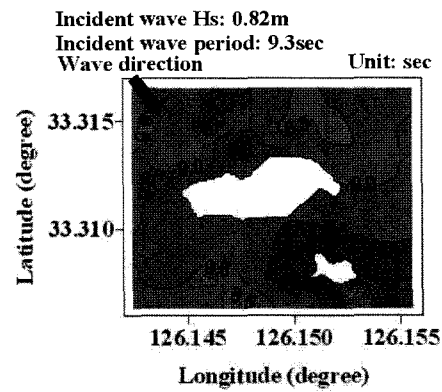


August

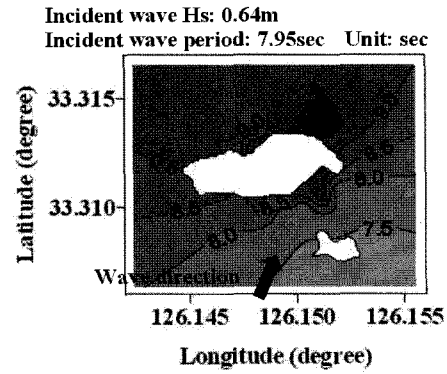


October

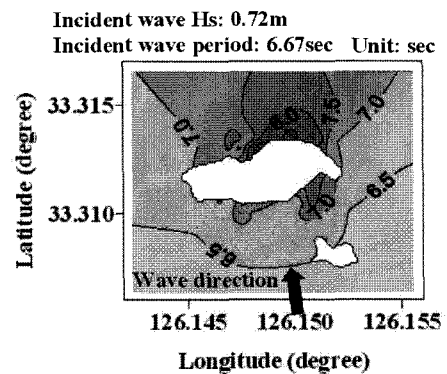
Fig. 16 Distribution of wave period (wind sea)



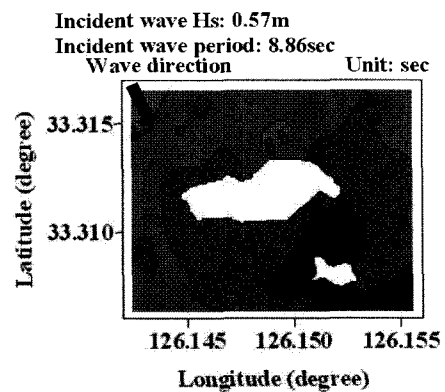
January



May



August



October

Fig. 17 Distribution of wave period (swell sea)

5. 결 론

본 논문에서는 선행연구 결과에 의해 파력발전 적지로 평가된 제주 차귀도 해역 중 제한된 해역 범위인 위도 33.2993°N~33.3245°N, 경도 126.1346°E~126.1625°E 해역에 대하여 Boussinesq 파랑모델을 이용하여 다방향 불규칙파의 조건에서 파랑 시뮬레이션을 통해 입사파에 대한 파고와 주기의 시공간적 변화 특성을 고찰하여 파력발전 후보지 선정에 위한 기초 정보를 제공하고자 하였다. 계산에 이용된 Boussinesq 모델의 격자 크기와 계산시간 간격에 대한 계산의 유효성을 검토하기 위하여 이안제를 둔 x, y 를 10.5m×4.0m의 계산영역에 대하여 입사파고 0.02m, 주기 1.0sec인 규칙파 시뮬레이션을 수행하였고, 제주 차귀도 해역에 대해 실측된 수심자료와 전자해도로부터 추출한 해안선 자료를 조합한 제주 차귀도 해역의 수심 분포자료를 5m의 크기의 상세격자로 Boussinesq 파랑 모델에 적용하고 다방향 불규칙파의 조건에서 수치시뮬레이션 함으로써 다음을 확인하였다.

(1) 계산에 이용된 Boussinesq 모델의 계산시간 간격과 격자 크기에 대한 계산의 유효성을 검토하였다. 식 (1)에 나타난 안정 조건을 만족시키는 범위의 계산시간 간격인 0.002sec와 0.01sec으로 시뮬레이션 한 결과 파고분포와 파형변화는 정성, 정량적으로 거의 비슷한 결과를 보이고 있어, 안정조건을 만족시키는 간격이라면 파고분포와 파형변화에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 계산시간 간격을 0.002sec로 고정하고, 계산영역의 격자크기를 0.025m, 0.05m, 0.1m로 구성하고, 파고분포와 파형변화를 계산한 결과, 격자크기가 0.025m, 0.05m일 때의 파고분포와 파형변화는 정성, 정량적으로 거의 비슷한 결과를 보이고 있으나 격자크기 0.1m인 경우에는 격자크기 0.025m, 0.05m에 비해 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 0.1m의 격자크기로는 수심이 얕아짐에 따라 천수변형 효과로 인해 상대적으로 짧아진 파장에 대한 격자간격의 해상도가 부족하게 되어 천수심에서의 파형변화를 충분히 추종할 수 없기 때문이라고 사료된다.

(2) 풍파와 너울의 입사파 조건에 대해 유의파고 분포가 공통적으로 높게 나타난 차귀도 북서, 서쪽 해역은 수심의 변화가 급격하게 일어나 수심 영향에 의한 파고 증폭 및 파랑 집중의 효과가 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 생각되고, 너울 시 유의파고 분포가 높게 나타난 차귀도 남서쪽 해역은 풍파에 비해 상대적으로 긴 주기의 파랑이 수심의 영향을 받아 파고가 증폭되면서 이곳까지 회절 해 들어와 나타나는 현상이라 생각된다.

(3) 풍파와 너울 매월 주 입사 파향에 대해 차귀도의 차폐효과가 나타난 입사파 배후지역에서는 풍파와 너울 모두 다른 해역에 비해 매우 낮은 파고를 보이지만, 입사 유의파고와 이 해역의 유의파고 분포의 비를 살펴보면, 너울의 경우 상대적으로 긴 주기의 성분파로 인한 회절 효과로 인해 풍파보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

(4) 제주 차귀도 주변해역의 경우 겨울철인 1, 2, 11, 12월에는 북서 계절풍의 영향으로 풍파가 발달하며, 또한 지속적인 풍향 및 긴 취송시간으로 인해 너울이 잘 발달하여 풍파와 너울 시의 파고 분포가 다른 달에 비해 상대적으로 높게 나타났고, 풍파 시 평균 유의파고 분포가 가장 낮은 것으로 나타난 5, 6, 7, 8, 9

월 중에서 여름철인 6, 7, 8월에는 풍파의 영향 보다는 태풍 등으로 인한 강한 남서풍의 영향으로 발달된 너울의 영향이 지배적이며, 이로 인해 차귀도 남쪽해역이 상대적으로 높은 유의파고 분포를 보인다. 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울에는 풍파의 영향이 지배적이고, 차귀도 북쪽해역이 상대적으로 높은 유의파고 분포를 보인다. 이러한 경향은 풍파와 너울 시의 파주기 분포에도 적용 된다.

(5) 파랑에너지는 주기와 파고의 제곱에 비례하는 함수 이므로 차귀도 북서, 서, 남서쪽 해역은 주변의 다른 해역에 비해 평균파고분포가 상대적으로 높고, 매월 파고분포도 다른 해역에 비해 높게 나타나 파력발전의 유력한 적지로 평가된다.

후 기

본 연구는 해양수산부의 지원으로 한국해양연구원에서 수행한 "파력에너지 실용화 기술 개발"과 공공기술연구회의 지원으로 한국해양연구원에서 기본연구사업으로 수행한 "기상 재난파에 의한 해양구조물의 안전성 평가기술 연구"의 연구결과 중 일부를 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 류황진, 홍기용, 신승호, 송무석, 김도영 (2004). "SWAN 모델을 이용한 제주해역 장기 파랑분포 특성연구", 한국해양공학회지, 제7권, 제3호, pp 137-145.
- 송무석, 김도영, 김민, 홍기용, 전기천 (2004). "장기 수치모사 파랑자료를 바탕으로 한 한국해역의 파랑에너지밀도 분석", 한국해양환경공학회지, 제7권, 제3호, pp 152-157.
- 신승호 (2001). "외해 구조물 배후의 해빈변형 기구와 그 모델화에 관한 연구", 구주대학 공학연구과 박사학위 논문, p 190, (in Japanese).
- 홍기용, 류황진, 신승호, 홍석원 (2004). "파력발전 적지 선정에 위한 제주해역 파랑에너지 분포특성 연구", 한국해양공학회지, 제18권, 제6호, pp 8-15.
- 해양수산부 (2003). "해상파랑관측 및 조사", 해양수산부 해양수산연구 개발사업 보고서.
- 해양수산부 (2005). "파력에너지 실용화 기술 개발", 해양수산부 해양수산연구 개발사업 보고서.
- 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.
- Goda, Y. (1991). "Random seas and design of maritimes structures", University of Tokyo Press.
- Günther, H., Rosenthal, W., Weare, T.J., Worthington, B.A., Hasselmann, K. and Ewing, J.A. (1979). "A Hybrid Parametric Wave Model", J. Phys. Oceanogr., Vol 84, pp 5727-5738.

- Isobe, M. (1986). "포물형 방정식을 이용한 불규칙파의 굴절, 회절, 쇄파변형의 계산법", 제33회 해안공학강연회 논문집, pp 134-138 (in Japanese).
- Kubo, Y., Kotake, Y., Isobe, M. and Watanabe, A. (1991). "비정상 완구배 불규칙 파동방정식에 대해서", 해안공학논문집, 제 38권, pp 46-50 (in Japanese).
- Madsen, P.A. and Sorensen, O.R. (1992). "A new form of Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristic Part 2. A slowly varying bathymetry", Coastal Eng, Vol 18, pp 183-204.
- 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.

2006년 10월 26일 원고 접수

2007년 1월 31일 최종 수정본 채택