韓國航海港灣學會 第27卷 第1號 pp. 1~6, 2003.

碎波帶의 底質浮游에 관한 現地觀測

申 承 鎬*, 栗山善昭**

*,** 일본 항만공항기술연구소 해양수공부

Field observation of sediment suspension in the surf zone

Seung-Ho Shin*, Yoshiaki Kuriyama*

*, ** *Dr. eng., Marine environment and Engineering Dept., Port and Airport Research Institute, 239-0826, Japan*

요 약 : 저질의 부유 현상이 일련의 쇄파라고 하는 파동 현상에 어떠한 형태로 연동하는가를 면밀히 조사하기 위하여 현지해안의 쇄파대 내에 주 관측지점을 설치하고 부유사 농도와 유속, 수위변동 등의 관련 파랑 제원을 계측하였다. 분석을 위해 수위변동, 유속변동치의 부유사 농도에 대한 상관관계를 조사하였으며, 상관이 탁월한 주기대에 대한 ensemble 평균 분석으로 유속 및 수위변동의 위상에 따른 부유사 농도의 변화와의 관계를 명백히 하여 다음의 결론을 얻었다. 1) 부유사의 농도 변동은 유속 및 수위변동의 에너지가 가장 큰 장주기 성분(100s)에 있어서 보다 오히려, 관측지점이 절(node)이 되는 1차mode의 장주기중복파(60s) 및 배(anti-node)가 되는 2차mode의 중복파(30s)의 주기성분에서 상관이 높았으며, 2) 또한, 1차mode 의 장주기중복파의 유속 성분이 해안으로 향하여 가속하는 위상 즉, 수면 경사가 상대적으로 해안선측보다 외해측이 높은 위상에서 부유사 농도가 가장 높아짐을 명백히 하였다.

핵심용어 : 쇄파대, 부유사 농도, 유속, 수위변동, cross 스펙트럼 분석, ensemble 평균, 장주기중복파, 현지관측

ABSTRACT : *Time series of suspended sediment concentration, surface elevation and velocity were measured and analysed to investigate the role of waves and the predominance of infra-gravity wave component for sediment suspension phenomena in the surf zone. For the investigation in detail, we adopted the cross spectral analysis method between sediment concentration and the characteristic values of wave, and ensemble average analysis method about long-period wave component, which is dominant to sediment suspension in the measurement point. The obtained results are summarized as follows: 1)The relationship between sediment concentration and the characteristic values of wave is stronger for the long-period standing wave components(about 60s and 30s) than the long wave components(about 100s), which have the most energetic power, 2) and also, it is cleared that sediment concentration is increased in the case of the phase, the velocity components of the first mode long-period standing wave(60sec) were accelerated toward on-shore direction, that is, the water surface in offshore side is higher than on-shore side.*

KEY WORDS : Surf zone, Suspended sediment concentration, Velocity, Surface elevation, Cross spectral analysis, Ensemble average, Long period standing wave. Field observation

1. 序 論

파와 흐름이 격렬하고 해저의 지형변화가 큰 쇄파대는 해안관리상 대단히 중요한 공간이며 종종 bar라 불리는 shoal이 형성된다. bar는 고파랑이 내습할 경우, 파의 작용으로 인하여 작은 파랑에 의해 형성되었던 기존의 bar는 쉽게 소멸되어 보다 깊은 수심에 새로이 큰 bar를 형성하게 된다. 이러한 bar는 수개월에서 수년의 주기로 이동하며 그 규모나 위치를 바꾼다. 하지만, 그 이동에 대한 기구는 아직 충분히 파악되지 못하여 아직 불명확한 점이 많다.

해안의 저질이동에 있어서, 파와 흐름에 의한 저질의 부유는 연안표사(longshore sediment transport), 해안선에 수직한 방향의 내외해표사(cross shore sediment transport)에 불문하고 가장 중요한 요소이다.

저질이 부유상태로 되는 기동력은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 사련(sand ripple)에서 부유사를 발생시키는 전단

* 종신회원, shinsh@pari.go.jp +81 46 844 5045
** 비회원, kuriyama@pari.go.jp +81 46 844 5045

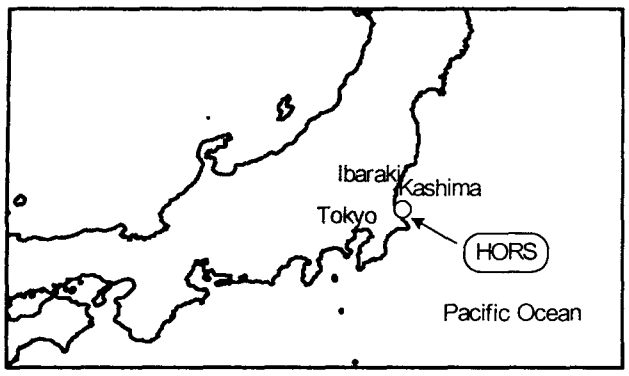

Fig.1 Location of HORS

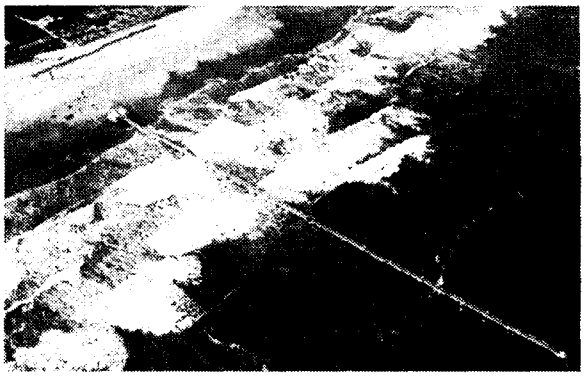

Photo.1 Aerial view of HORS platform

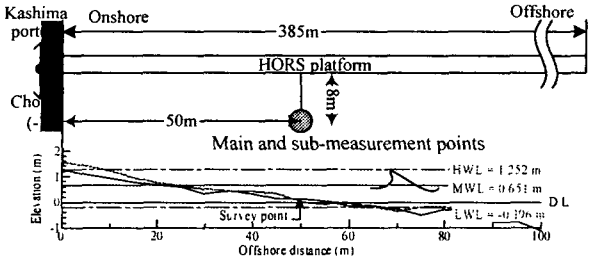

Fig.2 Beach profile showing location of the measurement point

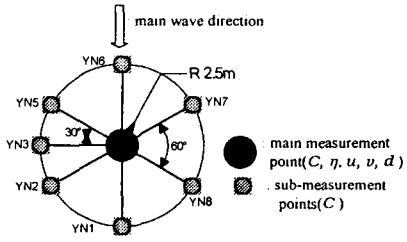

Fig.3 Array of the main and sub measurement points

응력이 있으며 저면에 작용하는 파에 의한 왕복류에 기인하는 것이고, 둘째는 쇄파에 의해 발생하는 분류(噴流)의 연직 운동량에 의한 것으로서, 전자의 사련 정부(頂部)에서 발생하는 부유사에 비해 훨씬 많은 것으로 여겨지고 있다(Goda, 2001).

본 연구는 쇄파대에 있어서의 저질 부유 현상이 쇄파를 포함한 일련의 파동에 대해 어떠한 형태로 연동하는가를 면밀히 분석하여 단·중기해저지형변화 수치모델 개발의 토대를 마련하기 위한 시도로서, 현지해안의 쇄파대내에 주 관측지점을 설치하여, 2층에 걸친 수심별 부유사 농도를 계측하고 동시에 그 지점의 파와 유속 및 수심을 계측하였다. 또한, 주 관측지점을 중심으로 방사선 상의 7개소에는 보조 관측지점을 설정하여 동시에 부유사 농도를 계측하였으며 그 외에도 부유사 관측기간 중에는 관측지점에 있어서의 천후(天候), 풍속·풍향 및 1일 3회의 목시관측에 의한 쇄파 위치와 형태 등도 관측되었다.

2. 觀測의 槪要

2.1 觀測場所와 期間

관측장소는 Fig.1 및 Photo.1에 나타내어진 일본 Kashima해에 면하는 Ibaraki현 Hazaki해안으로서, 해양연구시설(Hazaki Oceanographical Research Station;HORS) 관측잔교 부근의 쇄파대내이다. 관측은, 비교적 고파랑이 발달(Ibaraki현 Kashima항 전면 해상에서의 관측치: 유의파고 2.42m, 유의파 주기 15.1sec)하여 쇄파대내에서 저질 부유가 활발히 일어났다고 판

Table 1 Measurement contents at main and sub-measurement points

관측지점	관 측 항 목	관측치의 약어	설치조건 (2002/1/20 설치시의 수심:DL+0.15m로부터)
주 관 측 지 점	X방향 유속(u)	EMC X	수면하 (저면에서 30cm 상방)
	Y방향 유속(v)	EMC Y	〃
	부유사 농도(C_a)	OBS595	수면하 (저면에서 30cm 상방)
	〃 (C)	OBS594	수면하 (저면에서 10cm 상방)
	수위변동(η)	PW	수면하 (저면에서 30cm 상방)
관측잔교	수위변동(η)	USW	DL+6.744m 공중으로부터 측정
보 조 관 측 지 점	부유사 농도(C)	YN1	수면하 (저면에서 30cm 상방)
	〃	YN2	
	〃	YN3	
	〃	YN5	
	〃	YN6	
	〃	YN7	
	〃	YN8	

단되는 2002년 2월 13일 05:40~06:20에 행해졌으며, 데이터는 5Hz의 샘플링 간격으로 40분간 기록되었다.

2.2 主·補助 觀測地點의 觀測項目

현지 부유사 flux의 주·보조 관측지점은 Fig.2와 같이 HORS 관측 잔교 부근의 정선으로부터 외해 방향 50m지점의 쇄파대내이고 관측 잔교로부터 횡방향으로 8m떨어진 지점이며, 보조 관측지점은 주 관측지점을 중심으로 2.5m의 반경을 가진

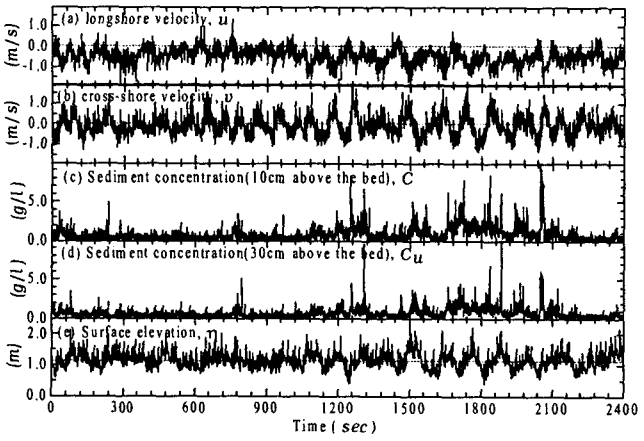

Fig.4 Time series data of velocity, sediment concentration and surface elevation at the main measurement point

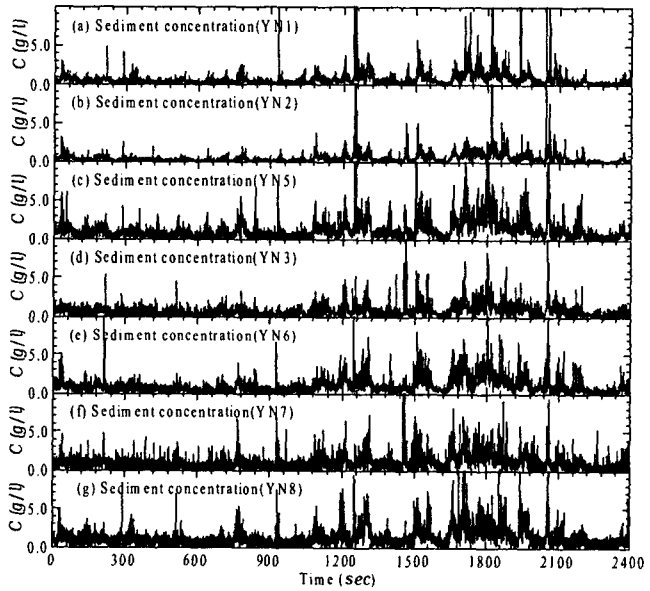

Fig.5 Time series data of sediment concentration at the sub-measurement point(30cm above the bed)

방사선상으로 7개소에 설치하였다(Fig.3).

주 관측지점에는 후방산란형 부유사 농도계(Optical Backscatter System;OBS) 2대(저면으로부터 10cm, 30cm 상방의 수중에 설치), 전자유속계(Electro-Magnetic Current meter;EMC)와 수압식 파고계(Pressure Wave gauge;PW)를 설치하고 주 관측지점과 연안방향 동일 연장선상에 있는 HORS의 관측잔교에 있어서의 초음파식 파고계(Ultra-Sonic Wave gauge;USW)에 의해 수위변동도 동시에 기록되었다. 보조 관측지점에는 후방산란형 부유사 농도계(OBS)를 설치하였다. Table 1에는 현지관측에 있어서의 관측 항목 중 본 연구의 해석에 사용한 관측항목을 정리한 것이다.

Fig.4는 주 관측지점에서 관측된 (a) 연안방향 유속(u), (b) 해안선과 직교방향의 유속(v), (c) 저면으로부터 상방 30cm에

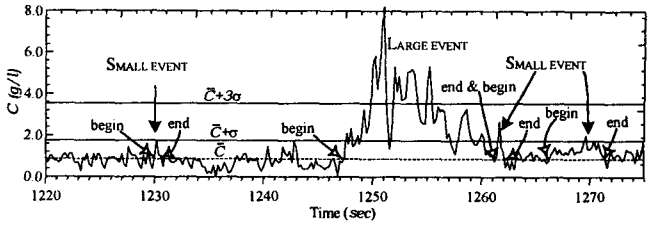

Fig.6 An example of the suspended sediment time series showing definition of pick up event

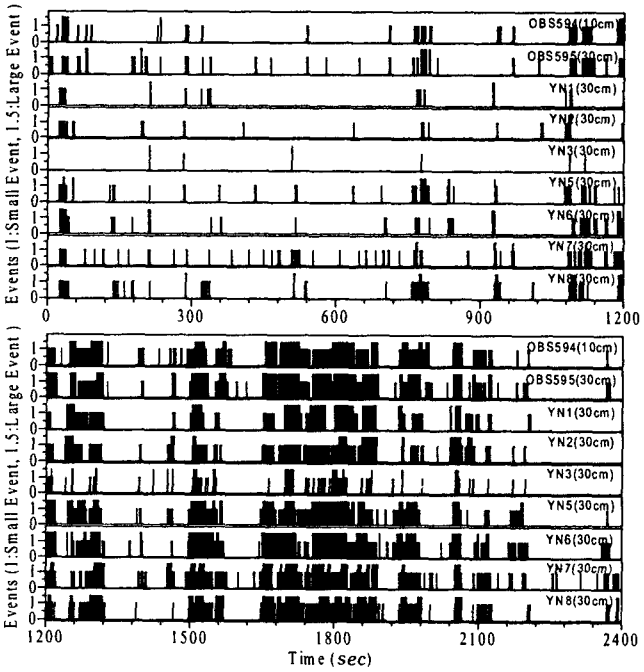

Fig.7 Application of pick up event definitions to the 40-minutes series in Fig.4 and 5(small event : 1, Large event : 1.5).

설치한 OBS595 농도계로부터 측정한 부유사 농도(C_u), (d) 저면 10cm위치의 부유사 농도(OBS594, C), (e) 초음파 파고계(USW)로 관측된 수위변동(η)을 나타내며, Fig.5는 보조 관측지점에서 관측된 같은 시각의 부유사 농도를 나타낸 것이다.

3. Pick up event와 移流의 影響 檢討

파랑에 의한 저질 부유 특성의 정량적인 분석을 위해서는 우선, 저질의 부유 사건(pick up event)을 규정지을 수 있는 객관적인 기준이 필요하며, 또한 분석 대상지점인 주 관측지점에서 얻어진 시계열 부유사 농도가 주위에서 부유된 저질이 移流된, 즉 주 관측지점 외의 장소에서 부유된 저질이 이류의 영향으로 주 관측지점에서 나타난 것은 아닌가 하는 점을 검토해야할 필요가 있다.

3.1 Pick up event의 選別

현지 쇄파대에서의 해저면 저질은 크고 작은 파랑의 내습과 쇄파에 의해 끊임없는 외력을 받고 있으며, 이에 따라 저면 부근의 저질은 간헐적으로 부유하여 특정 값 이상의 농도치를 나타낸다. 그러나, Fig.4, 5에서 나타난 바와 같이 이러한 부유사 농도의 분포는 입사되는 파랑의 각 성분주기에 모두 반응하고 있는 것은 아니며, 또한 그 크기에 있어서도 항상 일정한 값을 나타내지 않으므로 인해 부유된 사실여부를 규정하고 관련 파랑과의 상관 관계를 면밀히 조사하기에는 어려움이 많다.

Jaffe and Sallenger(1992)는 쇄파대에서 저질의 부유를 관측하면서 부유 상황에 대한 객관적인 기준으로서 농도의 평균과 표준편차를 토대로 한 임계 농도치를 규정하고 이의 초과 여부에 따라 부유 상황을 판단하였다. 본 연구에서는 이를 참조하여 관측된 부유사 농도에 대한 부유여부 판단의 임의성을 감소시키기 위해 통계적인 속성을 이용하기로 하고, 주·보조 관측지점에서 관측된 각각의 부유사 농도에 대해 데이터 취득기간 40분간의 부유사 농도분포로부터 평균농도($\overline{C}$)와 표준편차(σ)를 구하여 이를 토대로 부유여부를 판단하는 임계 농도치를 설정하였다.

부유 사건(pick up event)의 구분은, 주·보조 관측지점의 부유사 농도계에서 취득된 40분간의 부유사 농도분포로부터 각각의 평균농도 및 표준편차를 산출하고, 각 관측점의 평균농도를 초과하는 농도에 주목하여 이 농도로부터 표준편차의 1배를 더한 값 이상에 해당하는 농도($\overline{C}+\sigma$)가 나타나는 부유 상황을 small event로, 표준편차의 3배를 초과하는 농도($\overline{C}+3\sigma$)가 나타나는 부유 상황을 large event로 하였다. 이때, 해당 event가 평균농도를 상회하는 순간을 event의 시점, 평균농도 이하로 감소되는 순간을 종점으로 하여 각 event의 폭을 정하였다(Fig.6).

Fig.7은 Fig.6의 정의에 따라 산출한 event를 small event의 경우 1, large event의 경우는 1.5 높이의 막대 그래프로 표현한 것이다. Table 2에는 각 농도 관측결과로부터 산출된 평균농도, 표준편차 및 본 연구의 정의에 의한 산출된 event의 개수를 정리하였다.

3.2 移流의 影響 檢討

본 관측의 대상지점인 HORS 부근 해빈의 특성은 정선은 거의 평행한 등심선이 발달해 있으며, 입사하는 파의 탁월 파향은 정선에 대해 수직한 방향이다(Kuriyama, 2002). 그러나, Fig.4 (a)에 나타난 바와 같이 관측기간에 있어서는 주 관측지점에 연안방향으로의 정상 유속(40분간의 평균 유속 = 0.453m/s)이 관측되었다. 이와 같은 정상흐름이 존재할 경우는 주 관측지점에서 관측된 부유사 농도가 해당 관측지점의 외력에 의해 부유된 것이 아니라 인근 주변에서 부유된 저질이 정상 흐름을 타고

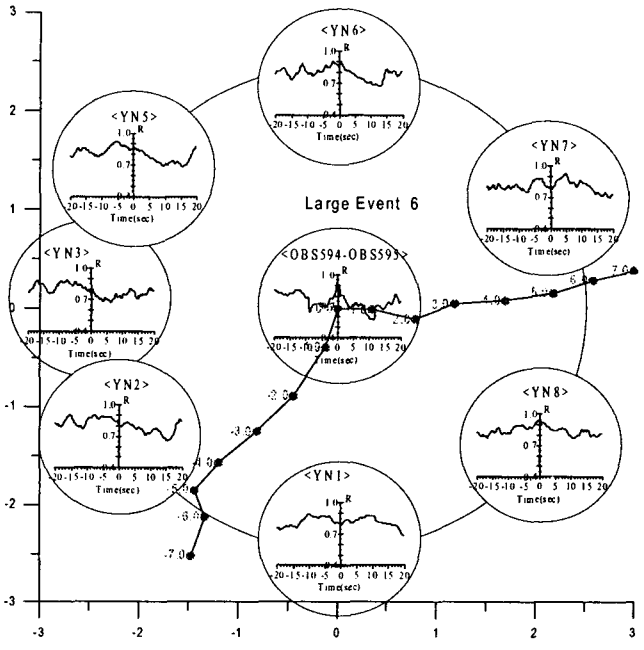

Fig.8 Tracing of suspended particles according to velocity in main measurement point (in the case of large event 6)

이류되어 나타난 것일 가능성이 존재하게 된다.

본 연구에서는 이러한 이류의 영향을 검토하기 위해, 주 관측지점에서 관측된 유속을 사용하여 주 관측지점에서 관측된 부유사의 각 event에 대한 저질 입자추적 시뮬레이션을 행하였다.

Fig.9는 입자추적 시뮬레이션의 한 예로서 6번째 large event에 대한 입자의 추적결과를 예시한 것이다. 즉, 우선 6번째 large event의 peak시각 및 저질입자의 위치를 0으로 설정하고, 주 관측지점에서 5Hz간격의 샘플링 간격으로 얻어진 유속(u,v)을 토대로 하여 입자위치를 전·후 시각으로 이동시켜 시간에 따라 추적된 입자의 위치를 plot하였으며(Fig.9의 가운데 점을 중심으로 한 입자 이동선), 다음으로 주 관측지점의 large event 6의 peak 시각을 기준으로 하여 7개 보조관측 지점에 있어서 인접하는 시각에 발생된 각각의 event 발생 시각과의 time lag를 계산하였다(Fig.9의 작은 원 내의 상관관계 그래프). 한편, 각 관측지점 위치에서의 부유사군은 최대 반경 50cm로 발생한다고 가정하여, 이를 OBS농도계가 부유사 농도로서 샘플링할 수 있는 범위로 정하고, 입자 추적으로부터 얻어진 저질입자의 위치가 보조 관측지점의 반경 50cm이내에 위치하며 동시에 그때의 시각이 주·보조 관측지점에 있어서의 각 event peak치에 대한 time lag와 일치할 경우를 이류의 영향이 있는 것으로 판단하였다.

주 관측지점의 OBS595에서 관측된 각 event에 대해 이와 같은 방법의 시뮬레이션을 행한 결과, 이류의 영향이 있었던 것으로 판단될 수 있는 것은 5% 미만의 작은 부분을 차지하였으며, 따라서, 이후 본 연구에서는 주 관측지점으로부터 얻어진 부유사 농도치가 이류의 영향이 없이 해당지점에서 모두 부유한 것

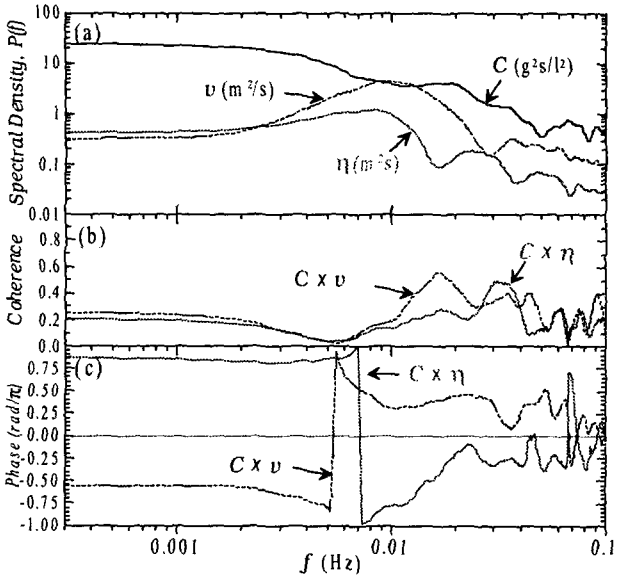

Fig. 9 Cross spectral analysis between C and υ, and between C
and h at main measurement point,
(a) power spectrum, (b) coherence, (c) phase.

이라 가정하여 분석하기로 하였다.

4. 底質의 浮游特性

4.1 波浪의 特性과 底質의 浮游特性과의 相關關係

본 관측지점의 먼바다 해상관측지점인 Kashima항 전면 해상에서 같은 시각에 관측된 해상의 상태는 유의파고 2.42m, 유의파 주기 15.1sec 이였다. 하지만, Fig.4 (a), (b), (e)의 유속 및 수면변동에서 제시된 바와 같이 관측기간 중에 주 관측지점에서의 이들 변동치에는 장주기 성분이 탁월함을 알 수 있으며, 이에 수반되어 부유사 농도가 간헐적으로 높아져 있음을 확인할 수 있다. 특히 1200sec~1500sec 부분의 관측치를 확대 표시한 Fig.10에서는 1260s 부근의 시간에서 장주기의 중복파가 뚜렷이 형성되어 있음을 한 예로서 관찰할 수 있다.

주 관측지점에 있어서 관측된 파랑 특성의 파악과 이들의 부유사 농도와의 상호관계를 명확히 하기 위해 cross spectrum분석을 행하였다.

Fig.9 (a)는 OBS594(저면으로부터 10cm 상방)로부터 관측된 부유사 농도, C, 내외해 방향의 유속성분, υ, 수위 변동량, η의 power spectrum을 나타낸다. 수위와 유속에 있어서 100sec정도의 장주기 성분에 에너지가 크게 집중되어 있음을 알 수 있어, 비교적 높은 파고를 가진 입사파가 쇄파됨으로 인해 관측지점인 쇄파대내에서 장주기파가 발달되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig.9 (b)에는 부유사 농도와 내외해 방향의 유속성분간(C x υ)의 coherence, 부유사 농도와 수면변동간(C xη)의 coherence

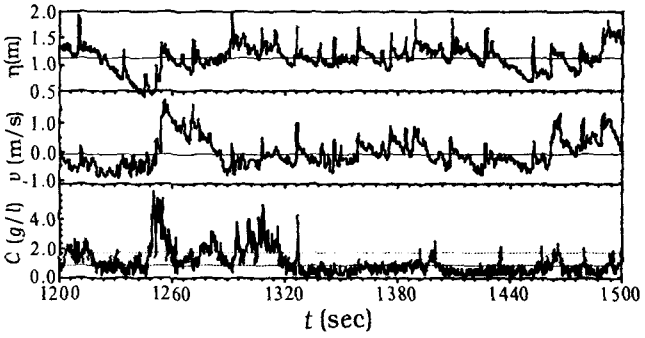

Fig.10 Time series data of surface elevation, cross shore velocity, and sediment concentration

를 제시하였고 이들의 위상차는 (c)에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 유속 성분에 대한 부유사 농도의 상관은 장주기 성분의 에너지가 크게 집중된 100sec 전후의 주기대에서 보다는 오히려 60sec 전후의 주기대에서 높게 나타나고 있음이 흥미롭다. 또한, 이 주기대에 있어서는 수위 변동은 극소치를 취하고 있음에도 불구하고 유속 변동성분은 이와 같은 경향은 보이질 않아, 관측 지점이 쇄파점을 기점으로 하여 해안선 부근까지 형성된 내외해 방향의 장주기파에 대한 1차mode 중복파의 절(node)에 위치하고 있음을 알 수 있다.

한편, 관측지점에서 형성된 장주기중복파는 30초 전후에서 유속 성분이 극소치를 취하고 수면은 극대치를 취하는 2차 mode 중복파의 배(anti-node)에 해당함을 나타내고 있는데, Fig.9(b)에서 제시된 바와 같이 부유사 농도에 있어서도 두 번째로 높은 상관치를 제시하고 있음을 알 수 있다.

4.2 長周期 및 中長周期波의 周期帶에 대한 ensemble平均

Fig.9(b)의 부유사 농도와 상관이 깊은 60sec 전후 및 30sec 전후의 주기대에 있어서의 유속분포 및 수위변동에 대한 부유사 농도의 특성을 보다 구체적으로 파악하기 위해 각 주기대 성분에 대한 관측 제량의 ensemble 평균을 구하였다.

먼저, 장주기중복파에 대한 분석을 위하여 주기 60sec를 중심으로 하는 40s~100s의 장주기 유속성분을 재합성하여 이를 토대로 40분간의 유속관측치를 zero up cross법에 의해 분할하고, 부유사 농도가 크게 나타났던 경우(34개의 파 성분 중 24개)에 있어서 부유사 농도, 발생된 event의 수, 수위변동, 내외해 방향 유속에 대해 ensemble 평균을 구하였다. Fig.11은 그 결과를 나타낸 것이며, 그림에서 부유사 농도는 장주기중복파의 유속 성분이 해안선 방향으로 가속하는 위상에서 커지고 있고, event의 개수에 있어서도 같은 대응을 보이고 있음을 알 수 있다. 중복파의 절(node) 부근의 경우 유속이 해안선 방향으로 가속하는 위상은 수면 경사가 상대적으로 해안선에 비해 외해측이 높아져 있는 위상에 일치하고 있으며, 이에 따라 장주기중복파가 발달하는 장에서는 수면의 경사가 해안선측보다 상대적으로 외해

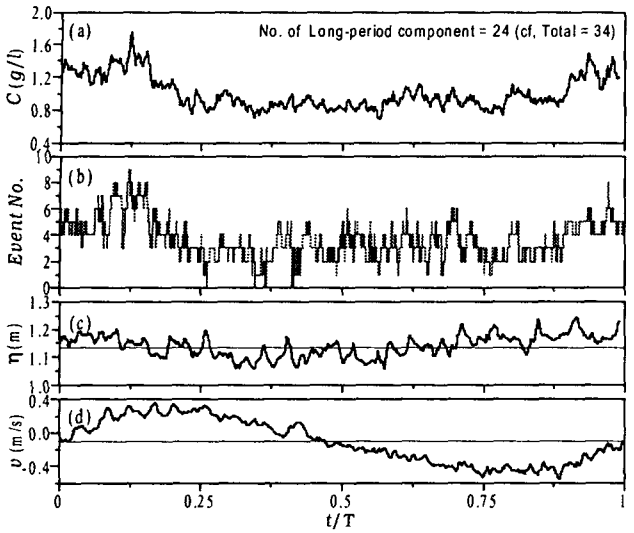

Fig.11 Long period(40<T<100s) ensemble average for all events (a) sediment concentration, (b) number of events, (c) surface elevation, (d) cross-shore velocity

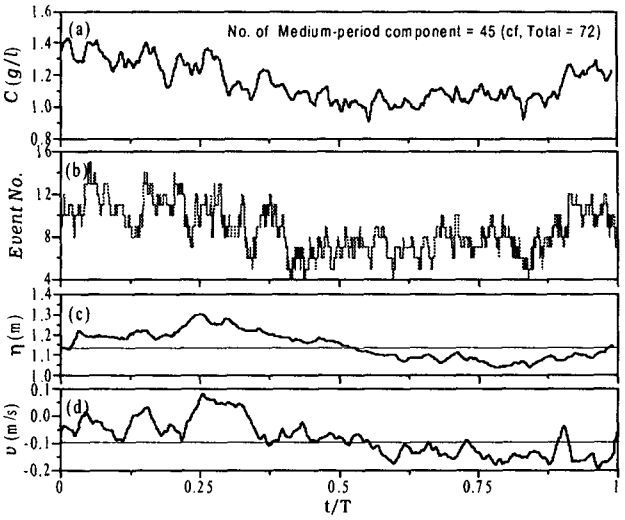

Fig.12 Medium period(25<T<40s) ensemble average for all events (a) sediment concentration, (b) number of events, (c)surface elevation, (d) cross-shore velocity

측이 높은 위상에서 부유사 농도가 높아졌다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터, 수면 경사가 상대적으로 외해측이 높게 형성된 상황에서 쇄파에 의한 bore가 통과되는 때에 부유사 농도가 높아짐을 알 수 있다.

Fig.12는 장주기중복파의 2차mode인 30초를 중심으로 주기 25s~40s의 주기대의 수위변동에 대해 동일한 ensemble 평균을 구한 것이다. 이 성분의 파는 전체 40분의 관측기간중 72개의 성분이 있었으며 부유사 농도가 크게 나타났던 성분은 45개의 성분이다. Fig.10이 유속 성분에 잘 대응하고 있는 것과는 달리, 2차mode의 배에 위치하는 장주기중복파의 경우는 수위변동에 잘 대응하고 있으며, 30sec 전후의 수위변동에 있어서 수면이 높아지는 위상에서 부유사 농도가 높아지는 경향을 보이고 있다.

5. 結 論

저질의 부유 현상이 일련의 쇄파라고 하는 파동 현상에 어떠한 형태로 연동하는가를 면밀히 조사하기 위하여 현지해안의 쇄파대내에 주 관측지점을 설치하고 부유사 농도와 유속, 수위변동 등의 관련 파랑제원을 계측하였다. 분석 대상인 주 관측지점의 저질 농도치에 대한 이류의 효과를 검토하기 위해 주 관측지점을 중심으로 한 방사선 상의 7개소에 보조 관측지점을 설정하고 부유사 농도를 동시에 계측하여 입차추적 시뮬레이션을 행하였다.

관측된 파랑 특성과 부유사 농도와의 상호관계를 분석하기 위해 수위변동, 유속 변동치의 부유사 농도에 대한 상관관계를 조사하였으며, 상관이 탁월한 주기대에 대한 ensemble 평균 분석으로 유속 및 수위변동의 위상에 따른 부유사 농도 변화와의 관계를 명백히 하여, 다음의 결론을 얻었다.

1) 부유사의 농도 변동은 유속 및 수위변동에 있어서 가장 에너지가 큰 장주기 성분(100s)에 있어서 보다 오히려, 관측지점이 절(node)이 되는 1차mode의 장주기중복파(60s) 및 배(anti-node)가 되는 2차 mode 중복파의 주기성분에서 상관이 높았으며,

2) 또한, 1차mode 의 장주기중복파의 유속 성분이 해안으로 향하여 가속하는 위상 즉, 수면 경사가 상대적으로 해안선측보다 외해측이 높은 위상에서 부유사 농도가 높아짐을 명백히 하였다.

관측지점이 배(anti-node)가 되는 2차mode의 장주기중복파(30s)에서의 구체적인 부유사 농도 증가의 메커니즘은 아직 구체적으로 밝혀지지 못하였으며 이후 더욱 상세한 검토가 필요하리라 본다.

參 考 文 獻

[1] Goda Y.(2001):A New Approach to Beach Morphology with the Focus on Suspended Sediment Transport. Keynote Lecture, Asian and Pacific Coastal Engineering 2001, Dalian, China.

[2] Jaffe B. E. and A. H. Sallenger Jr.(1992) : The Contribution of suspension events to sediment transport in the surf zone, Proceeding of the 23rd International Coastal Engineering Conference, Vol. 3, pp.2680-2693, ASCE, New York.

[3] Kuriyama, Y.(2002):Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, Journal of Geophysical Research, Vol.107, No. C9, 3132, pp.15-1~15-12.

원고접수일 : 2003년 4월 일
원고채택일 : 2003년 월 일