

碎波帶의 底質浮游에 관한 現地觀測

신 승 호* · 栗山善昭**

*,** 일본 항만공항기술연구소 해양수공부

Field observation of sediment suspension in the surf zone

Seung-Ho Shin* · Yoshiaki Kuriyama**

*,** Dr. Engg., 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 쇄파대내에 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 2차 mode의 중복파(30s)의 주기성분에서 상관이 높았으며, 2) 또한, 1차 mode 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 suspended 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 suspended sediment concentration and the characteristic values of wave is stronger for the long-period standing wave components (about 60s and 30s where the nodal point of the first mode and the anti-nodal point of the second mode are located at the measurement point, respectively) than the long wave components (about 100s), which have the most energetic power, 2) and also, it is cleared that suspended 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. 서 론

파와 흐름이 격렬하고 해저의 지형변화가 큰 쇄파대는 해안 관리상 대단히 중요한 공간이며 해수욕 등의 레크리에이션 장 임과 동시에 육상의 인명이나 재산의 방호와도 밀접하게 관련 되고 있고 또한 해양 생태계의 관점에 있어서도 극히 중요한 공간으로 인식되고 있다.

쇄파대는 이처럼 귀중한 공간임에도 불구하고, 격렬한 쇄파와 강한 흐름, 현저한 저질 이동 등으로 인해 물리적인 조사가 곤란하고 특히 태풍의 영향 등으로 인한 황천시의 조사는 거의 불가능한 상황이어서 지금껏 쇄파대의 제반 물리적 현상에 대한 규명이 늦어지고 있는 것이 실정이다.

쇄파대의 해저에서는 종종 bar(연안사주, 수심 1~수 m의

영역에 생기는 shoal)가 형성되며, bar가 형성되는 해안의 경우, bar의 육지측 trough 영역에서는 파의 재생(쇄파된 파가 비쇄파의 상태로 되돌아가는 현상)이 생기는 등 일정 경사의 해안의 경우와는 크게 다른 수리현상이 생기고 있어 더욱 현상을 복잡하게 만들고 있다. 이와 같은 bar는, 외해로부터의 입사파와 깊은 관련을 지니고 있어, 해안에 고파랑이 내습할 경우에는 파의 작용이 커짐으로 인하여 작은 파랑에 의해 기존에 형성되었던 bar가 간단히 소멸되어 보다 깊은 수심에 새로이 큰 bar를 형성해 가는 등, 수개월에서 수년의 주기로 그 규모나 위치를 바꾼다. 하지만, 그 이동에 대한 구체적인 기구는 충분히 파악되지 못하여 아직 불명확한 점이 많다.

본 연구는 이러한 bar의 이동에 직접 관계하고 있는 현지해안에서의 저질부유 특성을 면밀히 파악하여, 그 특성이 반영

* 대표저자 : 신승호(중신회원), shinsh@pari.go.jp +81-46-844-5045

** kuriyama@pari.go.jp +81-46-844-5045

된 지형변화 수치모형을 개발하는 것을 최종 목표로 현지 부유사 관측을 행하고 결과를 분석한 것이다.

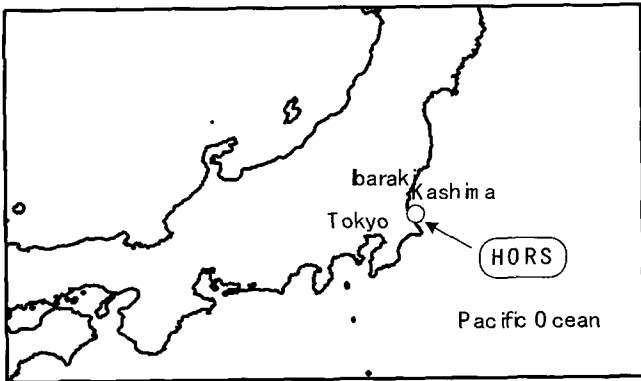


Fig. 1 Location of HORS

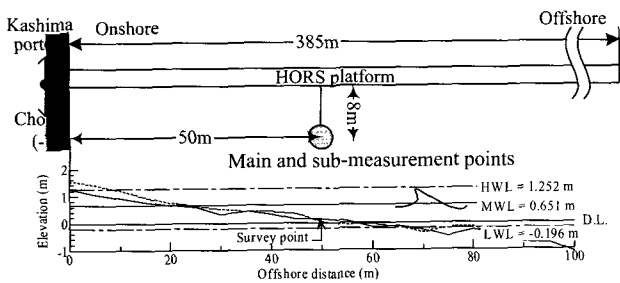


Fig. 2 Beach profile showing location of the measurement point

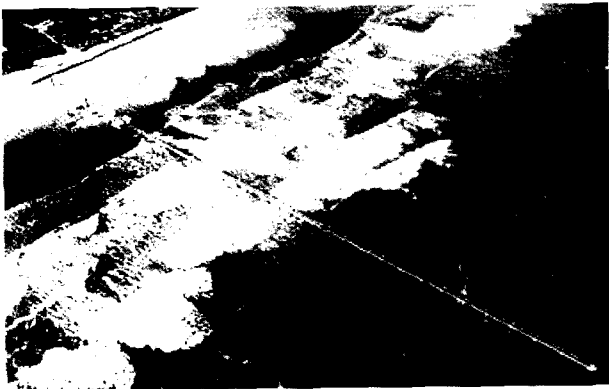


Photo. 1 Aerial view of HORS platform

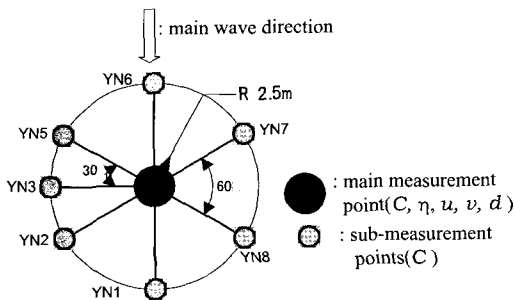


Fig. 3 Array of the main and sub measurement points

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

저질이 부유 상태로 되는 기동력은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 사린(sand ripple)에서 부유사를 발생시키는 전단응력이 있으며 저면에 작용하는 파에 의한 왕복류에 기인하는 것이고, 둘째는 쇄파에 의해 발생하는 분류(噴流)의 연직운동량에 의한 것으로서, 전자의 사린 정부(頂部)에서 발생하는 부유사에 비해 훨씬 많은 것으로 간주하고 있다(Goda, 2001).

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

2. 관측의 개요

2.1 觀測場所와 期間

관측장소는 Fig. 1 및 Photo. 1에 나타난 바와 같이 일본 Kashima해에 면하는 Ibaraki현 Hazaki해안으로서, 해양연구

Table 1 Measurement contents at main and sub-measurement points

관측지점	관측 항목	관측치의 약어	설치조건 (2002/1/20 설치시의 수심:DL+0.15m로부터)
주 관측 지점	X방향 유속(u)	EMC-X	수면하 (저면에서 30cm 상방)
	Y방향 유속(v)	EMC-Y	"
	부유사 농도(C_u)	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
보조 관측 지점	부유사 농도(C)	YN1	수면하 (저면에서 30cm 상방)
	"	YN2	
	"	YN3	
	"	YN5	
	"	YN6	
	"	YN7	
	"	YN8	

시설(Hazaki Oceanographical Research Station, HORS) 관측 잔교 부근의 쇄파대 내이다. 관측기간은 2002년 1월 30일 11:40~2월 25일 18:20까지 총 26일간이며, 2시간 간격으로 매 우수(偶數) 시각을 중심으로 한 전후 20분 동안 계측이 행해져 각 40분간의 관측내용이 기록된 총 315개의 데이터 세트를 취득하였으나, Table 1 및 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 관측기기의 설치 위치가 DL보다 높은 관계로 조석의 영향으로 인해 관측기기가 수면위로 노출되는 경우의 자료는 결측으로 처리하였다.

데이터의 샘플링 간격은 쇄파대 내의 복잡한 난류변동 특성을 가능한 한 최대한으로 포착할 수 있도록 설정할 필요가 있으며 본 관측에서는 관측기기가 허용하는 최소 간격인 5Hz로 하였다.

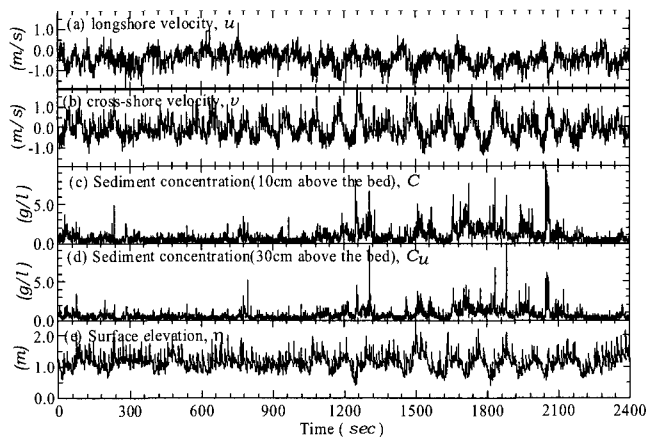


Fig. 4 Time series data of velocity, sediment concentration and surface elevation at the main measurement point

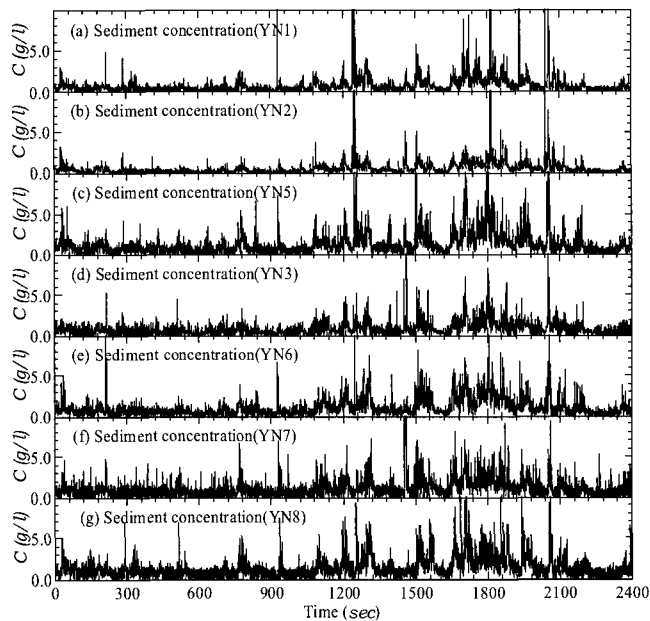


Fig. 5 Time series data of sediment concentration at the sub-measurement point(30cm above the bed)

한편, 본 관측장소의 외해에 해당하는 Ibaraki현 Kashima항 전면 해상에서는 매 우수시각 전후 10분간의 파랑관측이 행해지고 있는데, 관측기간 중 유의파고가 2m를 넘는 기간은 2002년 2월 2일-4일(3일간, 유의파 주기 8~9s) 및 2월 12일-14일(3일간, 유의파 주기 14~16s)이었다. 하지만, 비교적 동일한 정도의 높은 파고를 기록한 두 기간에서 나타난 부유사 농도의 기록은 각각 40분간 평균치의 경우, 유의파 주기가 8~9s를 기록한 전자의 경우에 비해 15s 전후의 값을 기록한 후자의 경우 부유사 농도가 2배 이상의 높은 값을 보였으며, 이는 쇄파대에서 부유사 농도는 장주기파가 발달한 경우가 그렇지 못한 경우에 비해 높은 농도 값을 나타낸다고 보고한 Beach and Sternberg(1991)의 결과를 뒷받침하고 있었다.

본 연구의 분석은, 관측된 데이터 세트 중, Kashima 전면 해상에서 유의파고 2.42m, 유의파 주기 15.1sec이며 쇄파대내에서 부유사 농도가 높게 관측된 2002년 2월 13일 05:40~06:20의 관측기록을 토대로 행해졌다.

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 8m 떨어진 지점이며, 보조 관측지점은 주 관측지점을 중심으로 2.5m의 반경을 가진 방사선상으로 7개소에 설치하였다(Fig.3).

주 관측지점에는 후방산란형 부유사 농도계(Optical Backscatter System, OBS) 2대(저면으로부터 10cm, 30cm 상방의 수중에 설치), 2성분 전자유속계(Electro-Magnetic Current meter, EMC; 모델명 ACM200-A, 정도 ±0.5cm/s)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(Fig. 3 및 Table 1).

Table 1에는 현지관측에 있어서의 관측 항목 중 본 연구의 해석에 사용한 관측항목을 정리한 것이다. 주 관측지점 및 보조 관측지점에 설치된 9개의 후방산란형 부유사 농도계의 경우, 부유사 농도 변화는 전압치로서 나타나게 되는데, 취득된 전압치를 물리량(부유사 농도)으로 환산하기 위해 관측지점에서 채취한 저질(중양입경 0.17mm)을 실험실에서 검정하여 각각에 대한 함수식을 도출하였다. 구체적인 검정식 및 방법은 부록에 제시하였다.

Fig.4는 주 관측지점에서 관측된 (a) 연안방향 유속(u), (b) 해안선과 직교방향의 유속(v), (c) 저면으로부터 상방 30cm에 설치한 OBS595 농도계로부터 측정된 부유사 농도(Cu), (d) 저면 10cm위의 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.

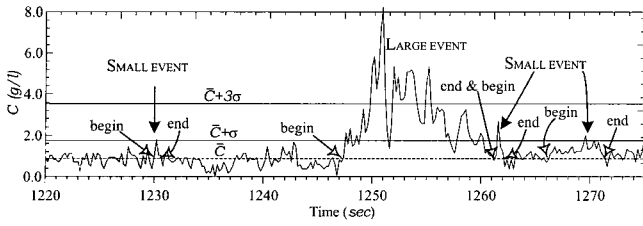


Fig. 6 An example of the suspended sediment time series showing definition of pick up event

3. Pick up event와 이류의 영향 검토

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 농도치로 나타난 것은 아닌가 하는 점을 검토해야 할 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 사실 여부를 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 부유 여부 판단의 임의성을 감소시키기 위해 통계적인 속성을 이용하기로 하고, 주·보조 관측지점에서 관측된 각각의 부유사 농도에 대해 데이터 취득 기간 40분간의 부유사 농도분포로부터 평균농도(\bar{C})와 표준편차(σ)를 구하여 이를 토대로 부유 여부를 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 평균 농도를 초과하는 농도에 주목하여 이 농도로부터 표준편차의 1배를 더한 값 이상에 해당하는 농도($\bar{C} + \sigma$)가 나타나는 부유 상황을 small event로, 표준편차의 3배를 초과하는 농도($\bar{C} + 3\sigma$)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).

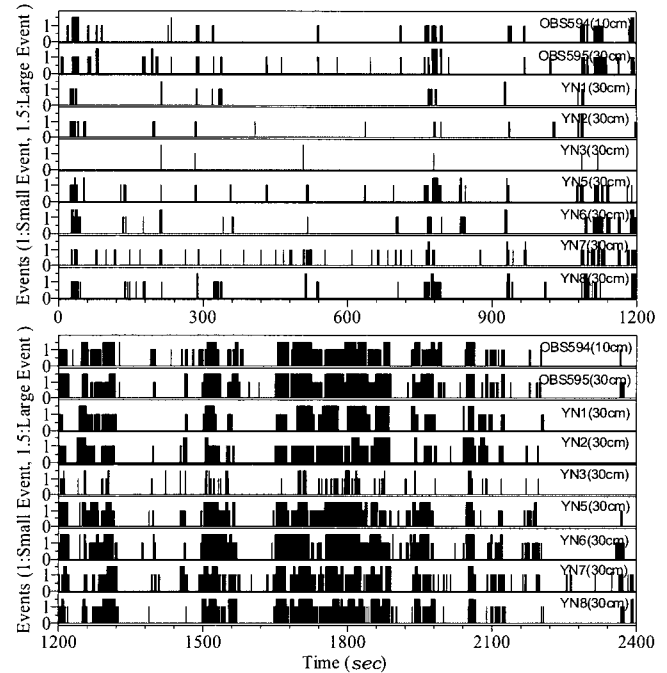


Fig. 7 Application of pick up event definitions to the 40-minutes series in Fig.4 and 5(small event : 1, Large event : 1.5).

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 주변 해역은 계절에 따른 파향의 변화로 인해 동계의 경우 Choshi 측으로의 연안류가 주로 형성되며 하계의 경우는 저기압 등의 영향으로 Kashima 측으로의 연안류가 형성되는 예가 많지만, 이들 연안류에 의한 해저 지형의 변화에 대한 기여는 거의 없어 정선을 포함한 주변 해빈의 퇴적 특성은 2차원성이 매우 강하다(Kuriyama, 2002). 동계에 이루어진 본 관측기간에 있어서도 Fig.4 (a)에 나타난 바와 같이 주 관측지점에 연안방향(Choshi측)으로의 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 이류되어 나타난 것일 가능성이 존재하게 된다.

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

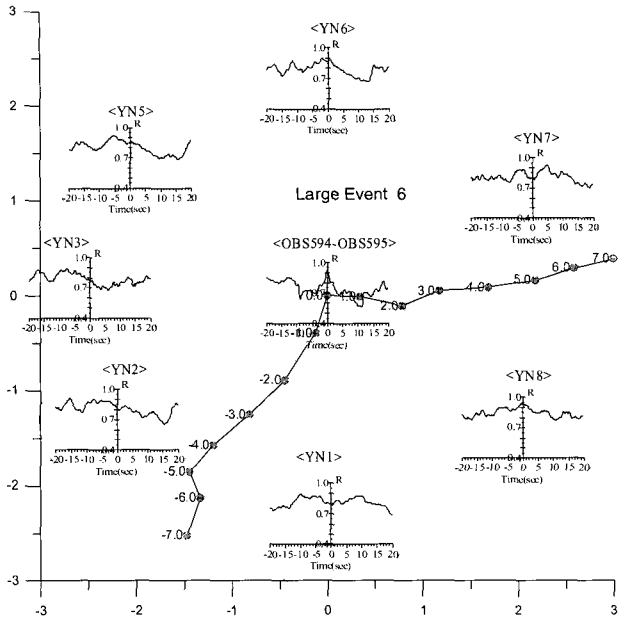


Fig. 8 Tracing of suspended particles according to velocity in main measurement point (in the case of large event 6)

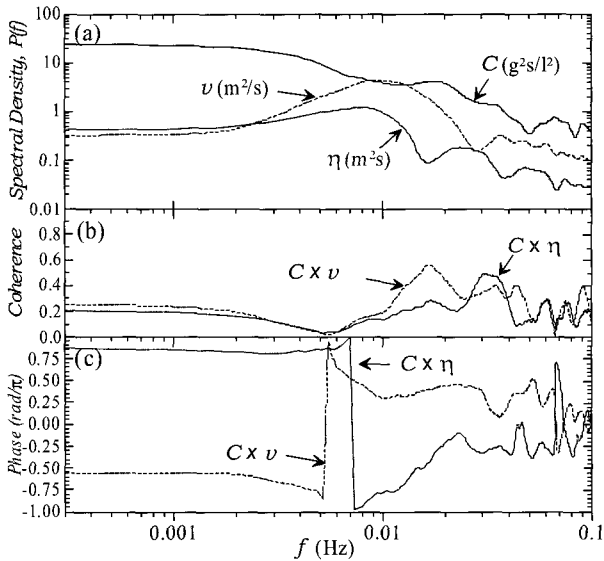


Fig. 9 Cross spectral analysis between C and v, and between C and h at main measurement point, (a) power spectrum, (b) coherence, (c) phase.

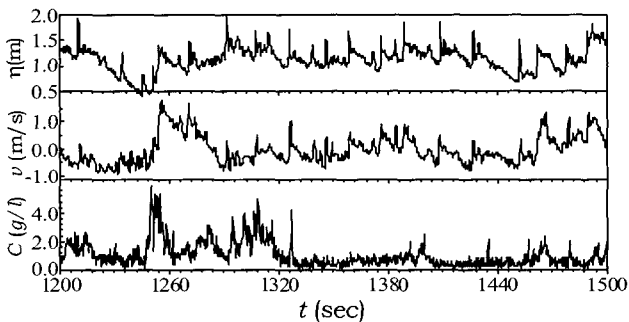


Fig. 10 Time series data of surface elevation, cross shore velocity, and sediment concentration

Fig.8는 입자추적 시뮬레이션의 한 예로서 6번째 large event에 대한 입자의 추적결과를 예시한 것이다. 즉, 우선 6번째 large event의 peak 시각 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.8의 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.8의 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 저질 입자의 위치가 보조 관측지점의 반경 50cm 이내에 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 것이라 가정하여 분석하기로 하였다.

4. 저질의 부유특성

4.1 波浪의 특성과 底質의 浮游特성과의 相關關係

본 관측지점의 면바다 해상관측지점인 Kashima항 전면 해상에서 같은 시각에 관측된 해상의 상태는 유의파고 2.42m, 유의파 주기 15.1sec 이었다. 하지만, Fig.4 (a), (b), (e)의 유속 및 수면변동에서 제시된 바와 같이 관측기간 중에 주 관측지점에서 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 spectrum 분석을 행하였다.

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

Fig. 9 (b)에는 부유사 농도와 내외해 방향의 유속성분간($C \times u$)의 coherence, 부유사 농도와 수면변동간($C \times \eta$)의 coherence를 제시하였고 이들의 위상차는 (c)에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 유속 성분에 대한 부유사 농도의 상관관은 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 보이지 않아, 관측 지점이 쇄파점을 기점으로 하여 해안선부근까지 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.

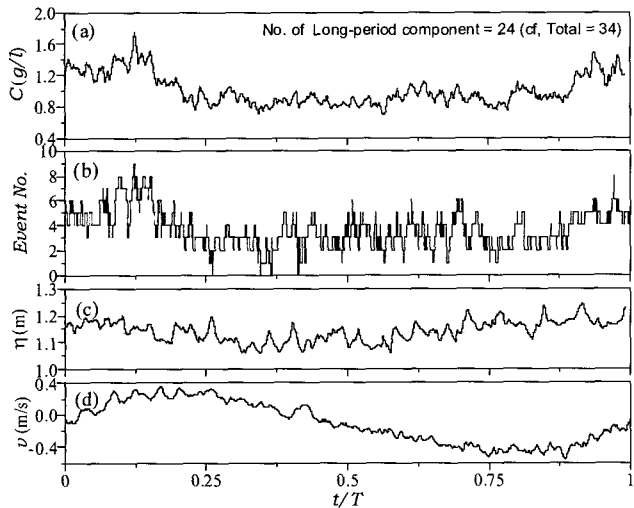


Fig. 11 Long period(40<T<100s) ensemble average for all events (a) sediment concentration, (b) number of events, (c) surface elevation, (d) cross-shore velocity

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 외해측이 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.

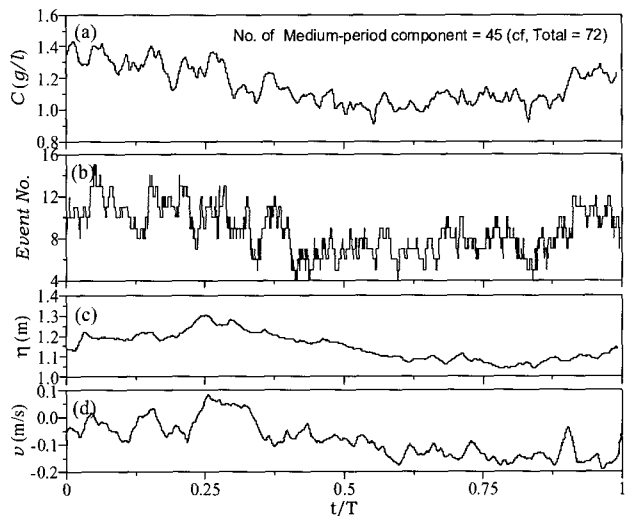


Fig. 12 Medium period(25<T<40s) ensemble average for all events (a) sediment concentration, (b) number of events, (c) surface elevation, (d) cross-shore velocity

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. 결 론

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 관측지

점을 설정하고 부유사 농도를 동시에 계측하여 간단한 입자추적 시물레이션을 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) 쇄파대내에서 장주기성분파가 탁월한 본 관측에 있어서, 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, 1차mode의 장주기중복파의 유속 성분이 해안으로 향하여 가속하는 위상 즉, 수면 경사가 상대적으로 해안선측 보다 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.

참 고 문 헌

[1] Beach, R. A. and R. W. Sternberg(1991), Infragravity driven suspended sediment transport in the swash, inner and outer zone, Proc. Coastal Sediment '91, pp. 114-128.

[2] 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.

[3] 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, ASCE, Vol. 3, pp. 2680-2693.

[4] 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.

부 록

후방산란형 부유사 농도계(OBS)의 검정법

(1) 검정대상과 검정실험

대상으로 한 후방산란형 부유사 농도계는 본 관측에서 사용한 주 관측지점에서의 OBS594, OBS595 과 보조 관측지점에서의 7개 농도계이다.

검정실험은 별도 준비한 용기(용량 약 20L, 25cm×25cm, 높

이 30cm)와 乾燥砂(본 관측이 행해진 Hazaki 해안의 정선 부근에서 채취, 중앙입경 0.17mm)를 이용하여 행해졌으며, 16.5L의 해수에 누적 사중량(砂重量)을 변화시켜가면서, 매 측정마다 120초간의 출력 전압치를 연속기록하여 행하였다.

얻어진 전압치는 각 부유사 농도별로 평균하여 후방산란형 부유사 농도계별로 정리되었다. Table A1은 그 예로서 OBS575에 대해 농도별로 얻어진 평균 전압치를 나타낸 것이다. 단, 각 농도에 대한 평균 전압치는, 농도 0g/l의 경우에 출력 전압치로서 나타난 초기 전압치(OBS595의 경우 0.082665633 Volt)를 0 Volt로 환산한 값이다.

Table A1 An example data for calibration(OBS595)

DATA_No.	Sands(g)	Water(litter)	Av.Volt(Volt)	S/D	C(g/L)
1	0.000	16.50	0.0000000	0.0356646	0.0000
2	0.800	16.50	0.0096729	0.0284293	0.0485
3	1.700	16.50	0.0202701	0.0424670	0.1030
4	4.200	16.50	0.0464174	0.0422975	0.2545
5	8.300	16.50	0.0867128	0.0386275	0.5030
6	16.500	16.50	0.1679128	0.0485716	1.0000
7	49.500	16.50	0.4630300	0.0497914	3.0000
8	132.000	16.50	1.1372669	0.0970891	8.0000
9	249.000	16.50	1.9383173	0.1559892	15.0909
10	417.500	16.50	2.8725095	0.2329255	25.3030
11	840.000	16.50	4.6329675	0.3390021	50.9091

(2) 검정곡선과 상관

검정곡선은 3차 다항식 및 지수함수식에 의한 회귀곡선의 두가지 방법으로 검토하였다.

a) 3차 다항식에 의한 회귀곡선

후방산란형 부유사 농도계(OBS)로부터 얻어진 출력 전압치를 V(Voltage)로 하고, 최종적으로 변환되는 농도 C(g/l)가 다음의 3차식으로 정리되는 것으로 한다.

$$C = a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \quad (A.1)$$

이 경우, 식 (A.1)이 Table A1와 같이 부여된 전압치 V가 부유사 농도 C에 가장 근접하는 a_1, a_2, a_3 를 구하기 위해서는

$$S = \sum_{i=1}^n C_i - (a_1 V_i + a_2 V_i^2 + a_3 V_i^3)^2 \quad (A.2)$$

를 최소로 하는 a_1, a_2, a_3 를 구해야 함을 알 수 있다. 이러한 3차 다항식 회귀모형의 경우, 최우법은 최소자승법에 귀착하게 되고, a_1, a_2, a_3 이 S를 최소로 하기 위한 필요조건은

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = -2 \sum_{i=1}^n V_i (C_i - a_1 V_i - a_2 V_i^2 - a_3 V_i^3) = 0 \quad (A.3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_2} = -2 \sum_{i=1}^n V_i^2 (C_i - a_1 V_i - a_2 V_i^2 - a_3 V_i^3) = 0 \quad (A.4)$$

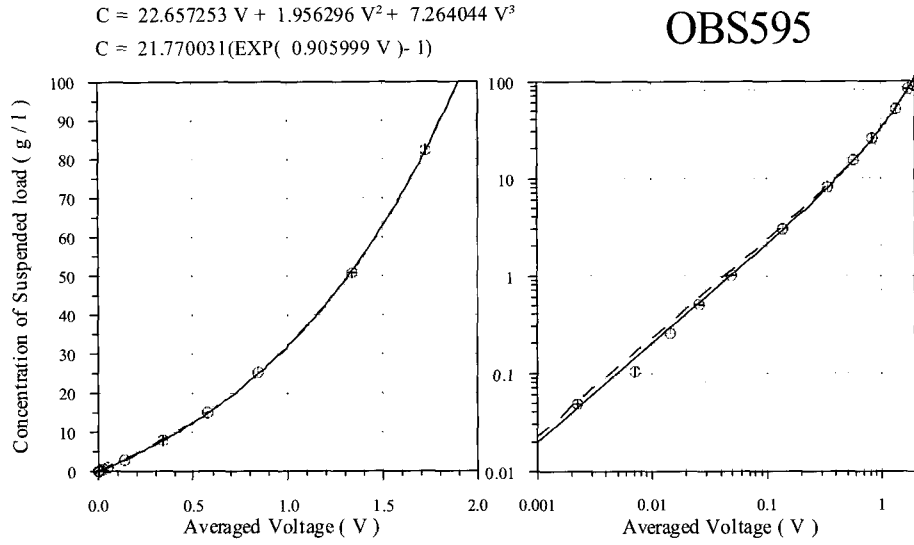


Fig. A1 Calibration curves of OBS595

$$\frac{\partial S}{\partial a_3} = -2 \sum_{i=1}^n V_i^3 (C_i - a_1 V_i - a_2 V_i^2 - a_3 V_i^3) = 0 \quad (\text{A.5})$$

를 만족하는 것이다. 따라서 a_1, a_2, a_3 는 다음과 같은 연립방程式의 해를 구하여 얻어지며 식 (A.6)는 LU분해법으로 해를 구하였다. 단, Σ 는 $\sum_{i=1}^n$ 을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma V_i^2 & \Sigma V_i^3 & \Sigma V_i^4 \\ \Sigma V_i^3 & \Sigma V_i^4 & \Sigma V_i^5 \\ \Sigma V_i^4 & \Sigma V_i^5 & \Sigma V_i^6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma C_i V_i \\ \Sigma C_i V_i^2 \\ \Sigma C_i V_i^3 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

b) 지수함수에 의한 회귀곡선

여기서는 농도 $C(\text{g/l})$ 가 다음과 같은 지수함수식으로 정리할 수 있다고 가정한다.

$$C = a(e^{bV} - 1) \quad (\text{A.7})$$

이 경우, 상기의 3차 다항식에 의한 회귀곡선과 마찬가지로

$$S = \sum_{i=1}^n \{C_i - a(e^{bV_i} - 1)\}^2 \quad (\text{A.8})$$

을 최소로 하는 a, b 를 구하면 되지만, 본 계산에서는

$$\frac{\partial S}{\partial a} = - \sum_{i=1}^n C_i (e^{bV_i} - 1) + a \sum_{i=1}^n (e^{bV_i} - 1)^2 = 0 \quad (\text{A.9})$$

즉,

$$a = \frac{\Sigma C_i (e^{bV_i} - 1)}{\Sigma (e^{bV_i} - 1)^2} \quad (\text{A.10})$$

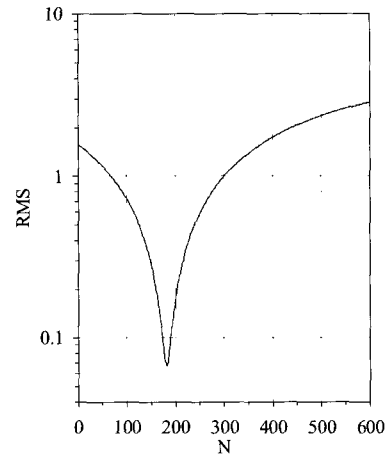


Fig. A2

을 만족하면서 S 가 최소(실제 계산에서는 $\sqrt{(\Sigma S)/n}$ 이 최소)로 되는 b 를 Trail and Error법을 이용하여 수치적으로 구하였다. 이때, b 는 초기치 0.001를 시작으로 0.3까지 0.005간격으로 대입하였다.

(2) 검정곡선의 작도와 상관

Table A1에 예로 제시한 OBS595 부유사 농도계의 검정용 실험치에 대해 3차 다항식(A.1) 및 지수함수식(A.7)을 이용하여 작도한 검정곡선은 Fig. A1에 제시하였다. 그림에서의 \oplus 는 실험치를 나타낸 것이며, 실선은 지수함수식, 점선은 3차 다항식에 의한 검정곡선 또한 Fig. A1의 왼쪽 그림은 직교 좌표계에 나타낸 것이며, 오른쪽 그림은 10g/l이하의 낮은 농도에 대한 명확한 비교를 위해 대수 좌표계를 이용하여 도시한 것이다. Fig. A2는 Trial and Error법으로 구한 지수함수 검정식(A.7)의 계수 a, b 가 적절한가의 여부를 판단하기 위해 $\sqrt{(\Sigma S)/n}$ 를 조사한 결과를 나타내고 있으며 그림의 가로축

은 반복횟수, 세로축의 RMS는 $\sqrt{(\sum S)/n}$ 치를 나타낸다. 여기서 예시한 OBS595의 경우, 반복횟수 182에서 최소 RMS인 0.0669를 얻었으며, 이때 a는 21.770031, b는 0.905999를 얻었다.

한편, 3차 다항식 및 지수함수식에 의한 추정치(\widehat{C}_i)와 실제 농도(C_i)와의 상관관계(R^2)는 식(A.11)로 구하였으며, 여기서 제시한 OBS595의 경우 3차 다항식(A.1)은 0.99994, 지수함수식(A.7)은 0.999913을 얻었다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(C_i - \widehat{C}_i)^2}{\sum C_i^2 - \frac{(\sum C_i)^2}{n}} \quad (\text{A.11})$$

Fig. A1의 비교로부터 식(A.1) 및 (A.7)은 모두 실험치에 대해 양호한 추정치를 나타내고 있지만, 10g/l이하의 농도에 대해서는 지수함수식에 의한 검정식(A.7)이 더욱 적절하다고 사료되어 본 관측에서 얻어진 후방산란형 부유사 농도계의 출력 전압치는 식 (A.7)의 검정식을 토대로 각각의 농도계에 대해 계수 a, b 를 구하여 농도로 환산하였다.

원고접수일 : 2003년 4월 15일

원고채택일 : 2003년 9월 1일