

쇄파대에 있어서 부유사에 미치는 장주기 성분파의 영향 Influence of long period waves on sediment suspension in the surf zone

신승호¹ · 栗山善昭²

Seung-Ho Shin¹ and Yoshiaki Kuriyama²

1. 서 론

황천 시에 쇄파대 내에서 발달한 장주기파는 전빈의 침식에 직접적인 원인이 되는(加藤·柳嶋, 1992) 등, 쇄파대 내의 표사현상에 큰 영향을 미친다.

쇄파대 내의 부유사 농도가 장주기 변동을 하는 것은 加藤·田中(1983), 柿沼 등(1985) 등에 의해 현지에서 관측되어 있다. 또한 Beach and Sternberg(1988, 1991)는 장주기파가 발달한 때의 쇄파대 내 부유사 농도가 장주기파가 발달하지 않은 경우에 비해 3~4배의 값을 나타내는 것을 지적하면서 장주기파에 의한 내외해 방향(cross shore direction) 부유사 flux의 방향이 주파수나 저면으로부터의 높이에 의해 변화함을 제시하였다.

Aagaard and Greenwood(1994a, 1995a)는 장주기 중북파의 영역에서 부유사 관측을 행하여 특정 지점에서는 장주기파가 외해 방향 유속인 위상에서 부유사 농도가 높아지는 것에 대해 다른 지점에서는 장주기파가 해안 방향 유속인 위상에서 부유사 농도가 높아지는 것을 제시하고, 그 원인으로 장주기파 유속이 비대칭을 이루고 중북파의 배(anti-node)를 향하는 방향에 있어서의 유속이 커지기 때문이라고 추측하였다.

장주기파와 각각의 파 성분파의 관련에 대해서는 Nakamura(2002)가 장주기의 외해 방향 흐름에 풍파에 의한 해안 방향 흐름이 중첩될 때 저질이 부유하고 있음을 제시하였다. 또한 Smith and

Mocke(2002)는 장주기파의 수위변동에 의해 수위가 낮아졌을 때 개개의 파가 쇄파되기 쉬워지며 게다가 수심이 얕음으로 인해 쇄파에 의해 발생한 와(渦)가 저면에 용이하게 도달하기 때문에 저질 부유량이 증대한다고 추찰하였다.

Osborne and Rooker(1999)는 파의 소상대(swash zone)에서 현지 관측을 행하여 부유사 농도가 장주기파의 1주기 내에서 2개의 peak 즉 run up 과 run down시에 peak를 가지는 것 그리고 run up시의 peak즉 run down시의 peak에 비해 크게 되는 경향이 있음을 밝혔다.

Shear wave에 의한 부유사 flux에 관해서는 Aagaard and Greenwood(1995b)가 연안류와 동일 방향의 flux를 관측한 것에 반하여, Miles 등(2002)은 연안류와 역방향의 flux를 관측하고 있으며, Miles 등(2002)은 이 차를 연안류의 크기에 의해 생겼다고 추찰하고 있다. 한편 Aagaard and Greenwood(1995b)는 해안 방향과 외해 방향의 양 방향 flux를 관측하였으나 Miles 등(2002)은 외해 방향의 flux만을 관측하고 있다.

이와 같이 쇄파대 내에 있어서의 저질 부유와 장주기파의 관계에 대해서는 몇 가지 연구가 수행되었지만 저질 부유에 미치는 장주기파의 영향에 대해서는 아직 명확하지 못한 부분이 많다. 따라서 본 연구에서는 장주기중북파가 발달한 황천 시의 쇄파대 내에 있어서 부유사 농도, 유속, 수위의 현지 관측을 실시하고 장주기중북파 영역에 있어서 저질 부유에 미치는 장주기파의 영향

1 일본 항만공항기술연구소 해양수공부(Littoral Div., Marine environment and Engineering Dept., Port and Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826, Japan, shinsh@pari.go.jp)

2 일본 항만공항기술연구소 해양수공부(Head, Littoral Div., Marine environment and Engineering Dept., Port and Airport Research Institute, 3-1-1 Nagase Yokosuka 239-0826, Japan, kuriyama@pari.go.jp)

을 검토하였다.

2. 현지 관측의 개요

관측은 2002년 2월 13일 05:40 ~ 06:20에 일본 동부 태평양 연안의 Ibaraki현 Kashima 해상에 면한 Hazaki 해양관측시설(Hazaki Oceanographical Research Station, 이하 HORS로 표기)에서 행해졌다.

HORS는 전장 427m의 잔교를 가진 현지 관측시설로서 그 위치와 사진은 Fig. 1 및 Photo. 1에 제시하였다.

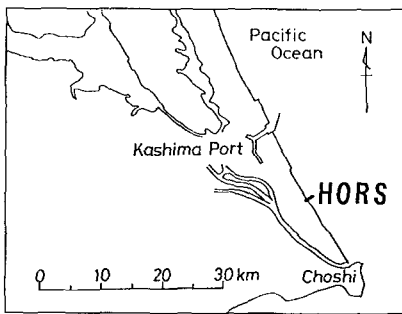


Fig. 1. Location of HORS.



Photo. 1. Aerial view of HORS platform.

Fig. 2는 관측 위치를 단면도와 함께 나타낸 것이며, Fig. 3은 계측기의 평면 배치를 나타낸 것이다. 주 관측 지점에는 후방 산란형 부유사 농도계(저면으로부터 10cm 상방), 수평 2성분 전자유속계(저면으로부터 30cm 상방), 수압계, 사면계를 설치하였다. 또한 이류(移流)에 의한 부유사 농도 상승의 경우를 검토하여 주 관측 지점의 부유사 농도 해석으로부터 배제하기 위해 주 관측 지점을 중심으로 반경 2.5m의 원주상 7개 지점(A1~A7 지점)에 부유사 농도계(저면으로부터 30cm 상방)를 설치하였다.

주 및 보조 관측 지점에서 각각 기록되는 부유사 농도계의 출력 전압은 저질 입경의 영향을 받으므로 미리 현지에서 채취한 저질(중앙입경 0.17mm)을 사용하여 부유사 농도계를 검증하였다. 또한 부유사 농도계의 출력 전압은 식물 플랑크톤이나 하천으로부터 유출된 미세 입자의 영향에 의한 bias가 포함되어 있으므로, Aagaard and Greenwood(1994b)의 접근 방법에 따라 bias를 제거하였다. 구체적으로는 각각의 농도계에서 기록된 전압치의 낮은 측 10%의 평균을 0 g/l로 설정하고 출력 전압으로부터 물리량으로 변환하였다. Fig. 4는 이와 같은 방법에 의해 물리량으로 변환한 부유사 농도와 수위, 내외해 방향 유속의 일례를 나타낸 것이다.

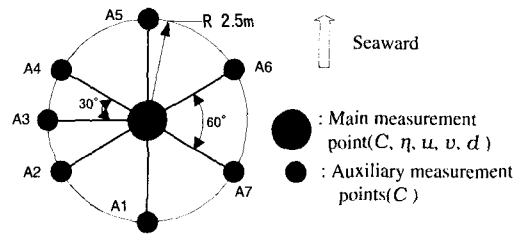


Fig. 2. Array of the main and Auxiliary measurement points.

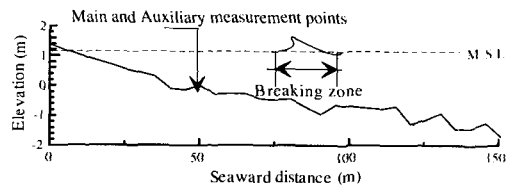


Fig. 3. Beach profile showing location of the measurement point (Feb. 13, 2002).

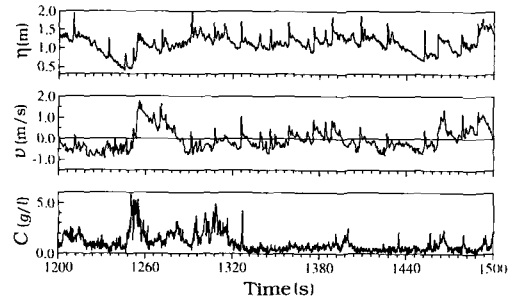


Fig. 4. An example of time series data(upper; surface elevation, medium; cross shore velocity, below; sediment concentration).

3. 부유사 농도 데이터에 포함된 이류 (移流)의 영향

Fig. 4에 제시된 부유사의 농도 데이터에는 주 관측 지점에서 부유한 저질에 의한 것뿐만 아니라 주 관측 지점 이외의 지점에서 부유하여 이류 (移流)되어 온 저질에 의한 것도 포함되어 있을 가능성이 있다. 후자는 주 관측 지점에 있어서의 외력의 영향을 직접 받지 않고 부유하여 이류되어 온 저질에 의한 것이며 주 관측 지점에서 관측된 저질의 부유와 외력과의 관계를 검토하는 경우에는 noise로서 작용한다.

본 연구에서는 이러한 이류의 영향을 검토하기 위해 다음과 같은 2가지 방법으로 관측 지점의 부유사 농도 데이터에 포함된 이류의 영향을 검토하였다.

첫째로, 주 관측 지점과 보조 관측 지점에서의 부유사 농도간 cross spectrum 해석을 행하였다. Fig. 5는 주 관측 지점에 있어서의 저면 10cm 상방에서 취득된 부유사 농도치와 연안류의 상류측인 보조 관측 지점 A2, A3, A4 지점에 있어서의 저면 30cm 상방에서 취득된 부유사 농도치와의 해석 결과를 나타낸 것이다. 관측 시에는 0.45m/s의 연안류가 우측방향(Fig. 4의 위치 기준)으로 흐르고 있고, 상류 측의 보조 관측 지점에서 부유된 저질의 영향이 주 관측 지점에서 나타나리라 추정되는 시간차는 5.5sec(2.5m/0.45m/s)이다. 하지만 양 농도간의 시간차(Fig. 5(d))를 보면 보조 관측 지점에 있어서의 부유사 농도와 주 관측 지점에서의 부유사 농도와의 시간차는 특별히 5.5sec에 집중되어 있지도 않아 주 관측 지점의 부유사 농도치에 대한 이류의 영향이 적다고 사료된다.

두 번째 검토 방법으로는 높은 부유사 농도치에 주목하여 각 지점에서 관측된 농도 시계열에 있어서의 pick up event를 규정하고 각 event에 대한 입자추적 시뮬레이션을 시행하여 이류의 영향을 검토하였다. 우선 부유사의 pick up event의 정의는 Jaffe and Sallenger(1992)와 같은 방식으로 「평균 부유사 농도 + 표준편차」 이상의 값을 포함하는 「평균 부유사 농도」 이상의 값을 나타내는 하나의 연속하는 시간을 부유 event라 정의하였으며(Fig. 6). 보조 관측 지점에 있어서의 각 event가 주 관측 지점에서의 event에 부여하는 영향을 검토하였다. 방법으로는 주 및 보조 관

측 지점에서 발생한 각 event의 peak 시각에 부유한 저질을 확산이나 침강을 고려하지 않은 상태로 주 관측 지점에서의 유속을 이용하여 이류시키는 간단한 입자 추적 시뮬레이션을 행하였다.

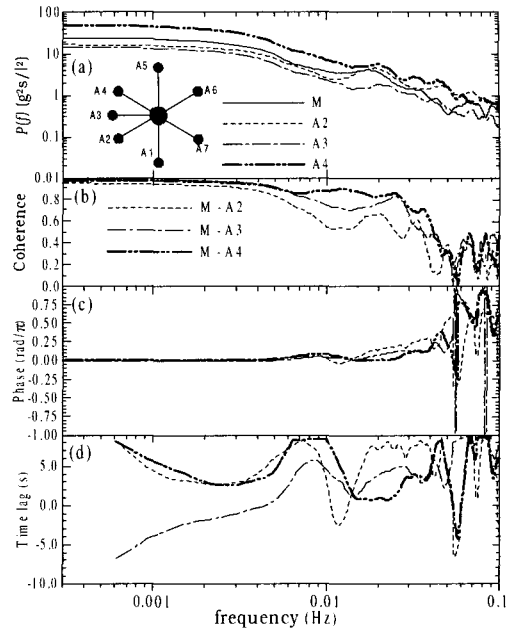


Fig. 5. Cross spectrum analysis of the sediment concentrations between main and auxiliary measurement points, (a) power spectrum, (b) coherence, (c) phase, (d) time lag.

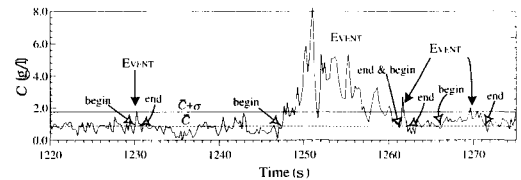


Fig. 6. An example of the suspended sediment time series showing definition of pick up event.

Fig. 7은 입자 추적 시뮬레이션을 표현한 한 예로서 주 관측 지점의 6번째 event의 경우에 대한 입자 추적의 결과를 제시한 것이다. 구체적으로는 우선 6번째 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.7의 가운데 점을 중심으로 한 입자 이동선 및 시간), 다음으로 주 관측지점의 event 6의 peak 시각을 기준으로 하여 7개 보조관측 지점에 있어서 인접하는 시각에 발생한

각각의 event 발생 시각과의 time lag를 계산하였다 (Fig.7의 작은 원 내의 상관관계 그래프). 한편, 각 관측지점 위치에서의 부유사균은 최대 반경 50cm로 발생한다고 가정하여 이를 부유사 농도계가 부유사 농도로서 취득할 수 있는 범위로 가정하고, 입자 추적으로부터 얻어진 저질 입자의 위치가 보조 관측지점의 반경 50cm이내에 위치하며 동시에 그때의 시각이 후보조 관측지점에 있어서의 각 event peak치에 대한 time lag에 접근한 경우를 이류 영향의 가능성이 존재하는 것으로 하여 1차 선별하였다. Fig. 8은 이와 같이 1차 선별된 보조 관측 지점의 각 event를 모두 하나의 그래프로 정리한 것이며 이로부터 다시 이류 저질의 시각을 주 관측 지점의 부유사 농도치 및 event 시각과 함께 표현하고 상세한 시각을 조사하여 주 관측 지점에서 관측된 부유사 농도에 대한 이류의 영향을 2차적으로 검토하였다. 이상의 결과로부터 주 관측 지점에서 관측된 82개의 event 가운데에서 이류의 영향을 받았을 가능성이 있는 event는 14개이고 이는 전체의 약 17%에 해당함을 알았다.

이상 두 가지의 검토에 의해 본 관측에 있어서 부유사 농도의 이류로 인한 영향은 미약한 것

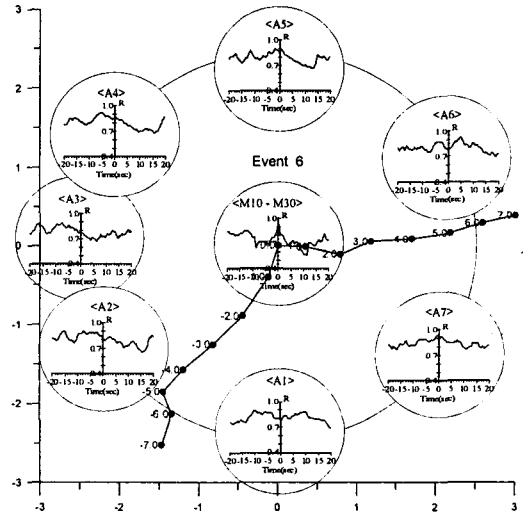


Fig. 7. Tracing of suspended particles according to velocity in main measurement point.

로 판단하여 이하의 해석에서는 전 데이터를 사용하지기로 하였다.

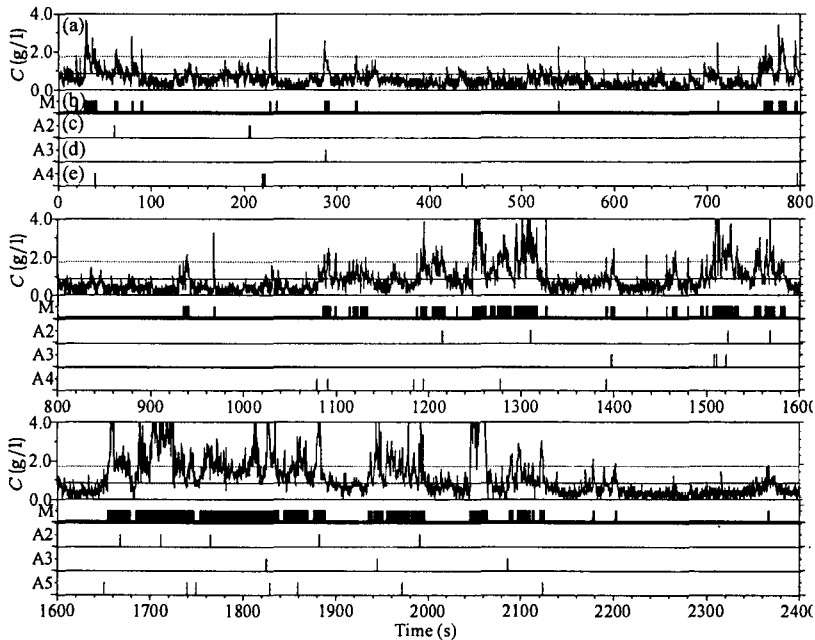


Fig. 8. Time series of sediment concentration and events(M; main point, A2, A3, A4; auxiliary points).

4. 저질의 부유와 장주기파와의 관계

Fig. 4로부터 수위 변동 및 유속 성분에 있어서 장주기 성분이 탁월함과 함께 부유사 농도가 간헐적으로 높아져 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 9는 부유사 농도와 수위, 내외해 방향의 유속에 대한 power spectrum 및 부유사 농도와 내외해 방향의 유속, 부유사 농도와 수위의 coherence, 위상을 나타낸 것이다.

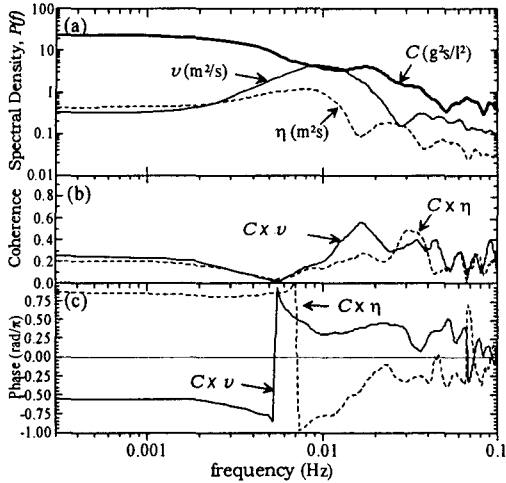


Fig. 9. Cross spectrum analysis between sediment concentration and cross shore velocity, surface elevation, (a) power spectrum, (b) coherence, (c) phase.

수위나 내외해 방향의 유속에서는 100sec 정도의 장주기 성분에 대해 에너지가 크게 나타나 있지만, 부유사 농도와 상관이 큰 것은 그 외의 장주기 성분에서 인 것이 흥미롭다. 유속과 부유사 농도와 상관을 보면 61sec(0.0165Hz)에서 상관이 높고, 수위와 부유사 농도의 상관은 32sec(0.0311Hz)에서 상관이 높게 나타나 있다.

이들 주파수를 포함한 25~100sec의 장주기 대역에서는 수위 변동의 스펙트럼과 유속 변동의 스펙트럼이 서로 반대의 양상, 즉 수위 변동의 스펙트럼이 극대치를 가질 때 유속 변동의 스펙트럼은 극소치를 가지며, 역으로 수위 변동의 스펙트럼이 극소치를 가질 때 유속 변동의 스펙트럼이 극대치를 가지는 것으로부터 장주기중복파가 형성되어 있는 것을 알 수 있다.

유속 성분과 부유사 농도와 관계를 보면, 양자의 coherence가 높은 61sec 부근에서는 수위 변

동이 극소치를 가지는 것으로부터 관측지점에서 절(node)이 되는 중복파가 형성된 것으로 사료된다.

계속하여 저질 부유의 위상을 검토하기 위해 61sec를 사이에 둔 40~100sec의 장주기 유속 성분을 재합성하고 이를 토대로 40분간의 관측치를 zero up cross법에 의해 분할하여 event가 포함되어 있는 경우에 대해 내외해 방향 유속과 부유사 농도, 수위 변동의 ensemble 평균을 구하였다.

Fig. 10은 그 결과를 나타낸 것으로서 그림에서 부유사 농도는 장주기중복파의 유속 성분이 해안 방향으로 가속하는 위상에서 커지고 있는 것을 확인할 수 있다. 중복파의 경우 유속이 해안 방향으로 가속하는 위상은 해안측 보다 외해 측의 수면 경사가 상대적으로 높은 위상에 일치하며 따라서 61sec 부근의 장주기중복파에서는 해안보다 외해 측의 수면 경사가 상대적으로 높은 위상에 있어서 부유사 농도가 높아진다고 할 수 있다.

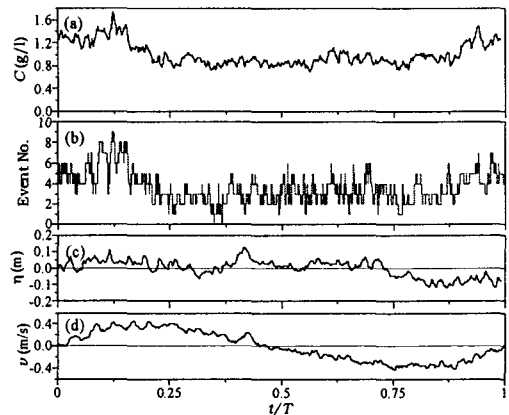


Fig. 10. 40~100sec ensemble average for all event, (a) sediment concentration, (b) number of events, (c) surface elevation, (d) cross shore velocity.

다음으로 수위 변동과 부유사 농도와 관계를 검토한다. 양자의 coherence가 높게 나타난 32sec 부근의 수위 변동과 유속 변동의 power spectrum을 보면, 35sec(0.0284Hz) 부근에서 수위 변동이 극대치, 유속 변동이 극소치를 취하고 있으며 26sec(0.0378Hz) 부근에서는 역으로 수위 변동이 극소치, 유속 변동이 극대치를 취하고 있는 것으로 보아 관측 지점은 32sec 부근의 파에 대해서는 해안 측의 배(anti node)와 외해 측의 절(node)의 중간에 위치하고 있다고 추찰된다.

저질 부유의 위상을 검토하기 위해 전술한 것과 마찬가지로 단, 여기서는 수위 변동을 토대로 하여 32sec의 주기대를 포함한 25~40sec의 장주기 수위 변동 성분을 재합성하고 zero up cross법에 의해 분할한 후 저질 부유의 event가 포함되어 있는 경우에 대해 ensemble 평균을 구하였다(Fig. 11). 32sec의 장주기중복파를 기준으로 한 경우, 부유사 농도는 관측 지점에서의 수위가 평균수위보다도 높은 위상에서, 수면 경사의 경우는 해안측이 높은 위상에서 높아지고 있다. 이 위상은 61sec의 장주기중복파를 기준으로 한 고농도의 부유사 발생과는 다른 위상으로 나타나 있지만, 각각의 위상에 있어서 저질 부유의 지배 요인은 아직 명확히 밝혀지지 못하였다.

5. 결 론

장주기중복파가 발달한 쇄파대 내에 있어서 현지 관측을 행하고, 부유사 농도, 유속 및 수위 변동의 상관관계를 분석하였다.

그 결과, 부유사 농도 변동은 관측 기간 중 가장 발달한 장주기 성분(100sec)보다 오히려 관측 지점이 절(node)이 되는 장주기중복파(61sec) 및 관측 지점이 해안측 배(anti node)와 외해 측의 절(node)의 중간에 위치하는 장주기중복파(32sec)와의 상관성이 높게 나타났다. 전자의 경우, 내외해 방향 유석이 해안 측을 향하여 가속하는 위상 즉 해안측 보다 외해 측의 수면 경사가 상대적으로 높아지는 위상에 있어서 부유사 농도가 높게 나타남에 대해, 후자의 경우는 관측 지점에서의 수위가 평균수위보다 높고 수면의 경사로서는 해안측이 높은 위상에서 부유사 농도가 높게 나타났다. 이상과 같은 검토의 결과로 장주기중복파 영역에서는 2개의 서로 다른 위상에서 저질의 부유가 발생하는 것이 명백해졌지만 각각의 위상에 있어서의 저질 부유에 대한 지배 요인이 명확하지 못하며 이후 이들에 관한 검토를 추가해야 할 것으로 본다.

참고문헌

- 柿沼忠南·伊福 誠·栗原 薫, 1985. 砕破帯における浮遊砂濃度の二、三の観測例、第32回海岸工学講演会論文集, pp. 321-325.
 加藤一正·田中則男, 1983. 砕破帯内の浮遊砂に関

- する現地観測、第30回海岸工学講演会論文集, pp. 224-228.
 加藤一正·柳嶋慎一, 1992. 長周期波によるバームの侵食、土木学会論文集、No.452/II-20, pp.41-50
 Aagaard, T. and B. Greenwood, 1994. Suspended sediment transport and the role of infragravity waves in a barred surf zone, *Marine Geology*, Vol. 118, pp. 23-48.
 Aagaard, T. and B. Greenwood, 1995a. Suspended sediment transport and morphological response on a dissipative beach, *Continental Shelf Research*, Vol. 15, No. 9, pp.1061-1086.
 Aagaard, T. and B. Greenwood, 1995b. Longshore and cross-shore suspended sediment transport at far infragravity frequencies in a barred environment, *Continental Shelf Research*, Vol. 15, No. 10, pp. 1061-1086.
 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.
 Jaffe, B. and A. Sallenger, Jr., 1992. The contribution of suspended events to sediment transport in the surf zone, *Proc. 23rd ICCE*, pp.2680-2693.
 Miles, J. R., P. E. Russell, B. G. Ruessink and D. A. Huntley, 2002. Field observation of the effect of shear waves on sediment suspension and transport, *Continental Shelf Research*, Vol. 22, pp.657-681.
 Nakamura, S., 2002. Sediment suspension and the role of low frequency flow, 28th ICCE, 2391-2598.
 Osborne, P. D. and G. A. Rooker, 1999. Sand re-suspension events in a high energy infragravity swash zone, *J. Coastal Research*, Vol, 15, No. 1, pp. 74-86.
 Smith, G. G. and G. P. Mocke, 2002. Interaction between breaking/broken waves and infragravity scale phenomena to control sediment suspension transport in the surf zone, *Marine Geology*, Vol. 187, pp. 329-345.