

미국 매사추세츠주 Cape Cod 해안의 퇴적물 이동

김 동 주 · 은 고 요 나^{*}
광주 · 전남발전연구원 · 전남대학교 해양학과
(1996년 12월 10일 접수)

A Sediment Transport of Cape Cod Coast, Massachusetts, USA

Dong-Ju Kim and Go-Yeo-Na Eun^{*}
Kwangju · Chonnam Development Institute
^{*}Dept. of Oceanography, Chonnam National University
(Manuscript received 10 December 1996)

A total of 24 surface sediment samples collected from coastal region and fronting of sea cliff on Cape Cod in southeastern Massachusetts, were analyzed to investigate the sediment transport mechanism.

According to the result of grain-size analysis, the overall trend of grain size decreases from the north(Wood End Beach) to the south(Nauset Light Beach). The coarser materials tend to be deposited at the foreshore than at the backshore. Especially gravel content(%) is very high in northern beaches. The gravel fraction tended to concentrate at the toe of the beach. In addition to gravel, the beach and nearshore bar also tended to be deposited of very coarse sand and the finer fraction accumulate in the offshore bar.

Grain-size analyses of sediment indicates that the coarsest sands including gravel accumulate in the beach and nearshore bar, the finer fraction winnowed out by wave action to be deposited in the offshore bar. The beach and nearshore bar sands and gravel are subsequently transported laterally by the wave-driven longshore drift, and finally they come to rest in the distal end of Provincetown Hook. The finer offshore sands are transported laterally to the south by net southward-directed longshore current.

Key words : foreshore, backshore, nearshore bar, offshore bar, wave-driven longshore drift, net southward-directed longshore current

1. 서 론

미국 북동부에 위치한 Massachusetts의 남동쪽 Cape Cod는 팔이 굽어 있는 형태로서 Cape Cod Canal에 의해서 본토와 분리되어 대서양과 직면하고 있다. Cape Cod는 제 4기(Quaternary)동안 Wisconsinian glaciation에 의해서 형성되어 크고 작은 kettle lake,

moraine, 그리고 빙하와 함께 운반된 거대한 암석들의 존재는 빙하의 흔적을 나타내고 있다. 오늘날 Cape Cod지형은 빙하기이후 Holocene동안 해양과 바람의 작용에 의한 변형의 결과로서 형성되어진 것으로 Cape Cod land, Cape Cod Bay, Nantucket Sound 등으로 이루어져 있다(Fig. 1).

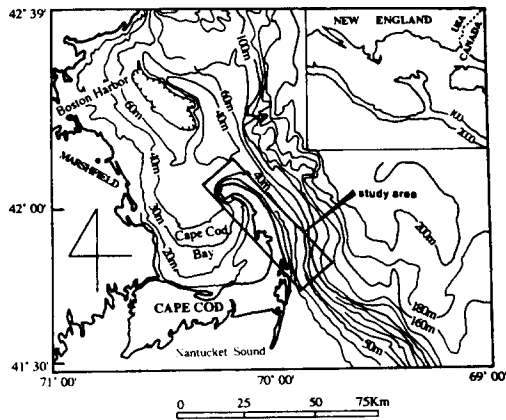
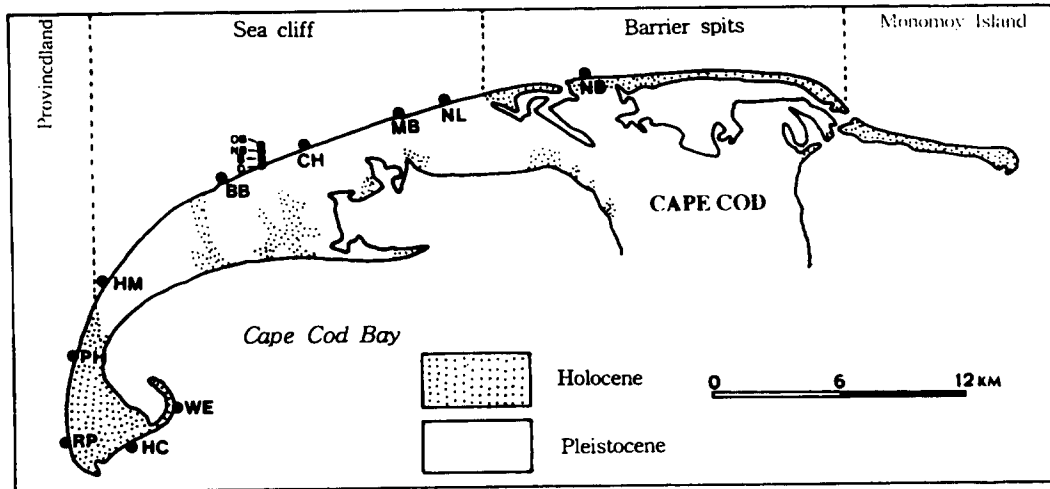


Fig. 1. The location and bathymetry of Cape Cod and its vicinity(from Uchupi, 1987).

Cape Cod의 지질학적인 특징중에 하나는 빙하기때 형성된 빙하퇴적물과 빙하시대이후

에 형성된 현세퇴적물로 이루어져 있다는 것이며, 빙하퇴적물은 주로 해양학적인 작용에 의해 침식되며, 해양과 바람은 퇴적물을 운반하는데 중요한 역할을 하고 있다. 빙하퇴적물은 주로 해안절벽과 Cape Cod의 주요 육지를 구성하고 있으며, 현세퇴적물은 Provinceland, barrier spits, 그리고 Monomoy Island에 분포하고 있다. 따라서 Cape Cod해안지역은 해양지질학적인 독특한 환경에 의해 Provinceland, sea cliff, barrier spits, Monomoy Island지역으로 구분될 수 있다(Fig. 2). 즉 Provinceland지역은 현세동안에 형성되어진 육지, sea cliff지역은 빙하퇴적층으로 침식작용이 매우 활발히 일어나고 있는 지역, barrier spits는 현세퇴적물로 환경의 변화가 가장 심한 지역, 그리고 Monomoy Island는 남쪽으로 확장하고 있는 사주이다(Aubrey et al. 1982; Giese, 1988; Zeigler et al. 1964).



----- Beach sample -----

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| WE : Wood End Light Beach | HC : Herring Cove Beach |
| RP : Race Point Beach | PH : Peaked Hill Beach |
| HM : Head of the Meadow Beach | BB : Ballstone Beach |
| CH : Cahoon Hollow Beach | MB : Marconi Beach |
| NL : Nauset Light Beach | NB : Nauset Beach |

----- Sample from sea cliff to offshore -----

- D : Drift in the cliff B : Beach NB : Nearshore bar OB : Offshore bar

Fig. 2. Map showing sampling location and geology of the study area.

해안에서 퇴적물의 입도는 연안류의 방향을 따라 일반적으로 감소하지만, Cape Cod해안에서 나타나는 퇴적물의 입도는 침식작용이 활발한 해안절벽지역을 중심으로 북쪽과 남쪽으로 갈수록 증가한다는 것이다(Shalk, 1938; Fisher, 1979). 기 연구된 결과(Shalk, 1938; Fisher, 1979; Schlee et al., 1964)에 따르면, 퇴적물 입도는 대개 연안류(longshore current)의 방향을 따라 감소하지만 연구지역에서는 증가하는 경향을 보여주고 있다.

따라서 본 연구는 해안을 따라 분포하고 있는 표층퇴적물의 입도연구 결과로써 퇴적물 입도가 해안을 따라 나타나는 경향을 이해하고, 침식작용이 활발하게 일어나고 있는 해안절벽을 중심으로 남쪽과 북쪽을 향해 입도가 증가하는 원인과 퇴적물이 이동되어지는 메커니즘을 이해하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구를 위해 해안을 따라 발달되어 있는 10개 해변의 전안과 후안, 그리고 침식작용이 활발하게 진행되고 있는 해안절벽에서 외해방향으로 절벽아래, 해변, 연안사주, 및 외해사주의 4개 지역의 총 24개 표층퇴적물이 1992년도에 채취되어 Woods Hole Oceanographic Institute에서 입도분석을 수행하였다. 표층퇴적물의 채취시 해변들사이의 거리는 고려되지 않았고, 지형적인 요인과 해변의 발달 등을 고려하였다.

입도분석결과는 연구지역을 포함하고 있는

Fisher(1979)와 Shalk(1938)의 기 연구결과와 비교·분석되었고, 이들을 함께 그림에 나타내었다. 연구지역의 범위는 Shalk의 경우 Race Point부터 연구지역보다 훨씬 남쪽지역까지 포함하고 있으며, Fisher는 Herring Cove Beach에서 Nauset Beach인 반면에 본 연구지역은 Wood End Beach에서 Nauset Beach사이이다(Fig. 3)

3. 결과 및 고찰

연구지역 10개 해변의 전안(foreshore)과 후안(backshore)에서 취한 20개의 표층퇴적물은 자갈과 모래로 구성되어 있다. 자갈은 Wood End Beach와 Herring Cove Beach의 전안과 후안에서 상대적으로 많았고, 특히 Herring Cove Beach의 전안에서는 자갈이 94.3%에 이른다. Peaked Hill Beach와 Nauset Beach의 전안에서 각각 16.9%와 12.3%이며 후안에서는 자갈이 존재하지 않았다. 그리고 기타 해변에서 자갈은 1.2%이하의 매우 소량으로 존재하거나 존재하지 않고 있다. 전체적으로 후안보다는 전안에서 자갈의 함량이 높게 나타나며, 이러한 경향은 Wood End Beach, Herring Cove Beach, Peaked Hill Beach, 그리고 Nauset Beach에서 현저하다. 이들 해변을 제외한 다른 해변에서는 전안보다는 후안에서 상대적으로 약간 높은 함량을 보이고 있다(Table. 1). 위와 같이 후안보다는 전안에 조립질 퇴적물이 퇴적되고 있는 것은 후안보다는 전안에서 상대적으로 큰 에너지의 영향을 받고 있다는

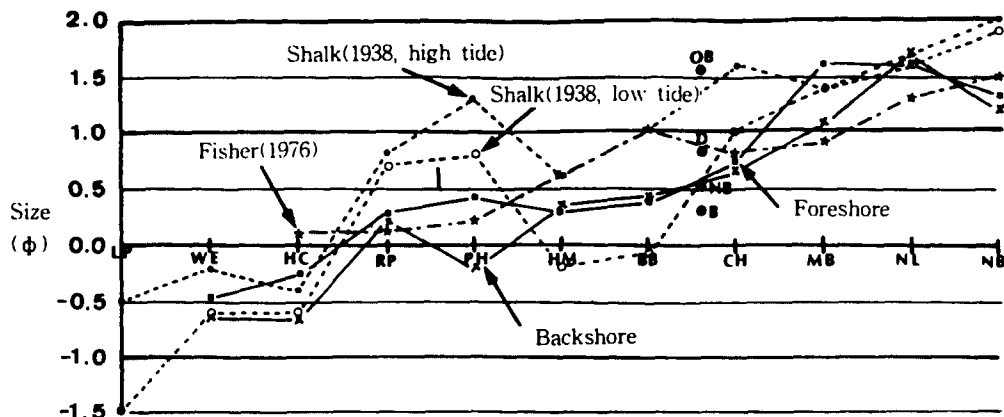


Fig. 3. The plot showing the median size of the study area and a comparison between this study and previous studies.

Table 1. The data of the surface sediment on backshore and foreshore along beach of Outer Cape Cod(included previous studies)

Sampling location		Gravel(%)	Median(ϕ)	Median(ϕ) by Shalk(1938)		Median by Fisher(1976)
				Low tide	High tide	
Long Point Beach				Low tide	-1.5	
				High tide	-0.5	
Wood End Beach	Backshore	11.6	-0.5	Low tide	-0.6	
	Foreshore	55.4	-0.6	High tide	-0.2	
Herring Cove Beach	Backshore	22.8	-0.3	Low tide	-0.6	0.1
	Foreshore	94.3	-0.7	High tide	-0.4	
Race Point Beach	Backshore	0.4	0.3	Low tide	0.7	0.1
	Foreshore	0.2	0.2	High tide	0.8	
Peaked Hill Beach	Backshore	0.0	0.4	Low tide	0.8	0.2
	Foreshore	16.9	-0.2	High tide	1.3	
Head of the Meadow Beach	Backshore	1.1	0.3	Low tide	-0.2	0.6
	Foreshore	0.6	0.3	High tide	0.6	
Ballston Beach	Backshore	0.3	0.4	Low tide	-0.1	1.0
	Foreshore	0.0	0.4	High tide	1.0	
Cahoon Hollow Beach	Backshore	1.2	0.7	Low tide	1.0	0.8
	Foreshore	0.0	0.6	High tide	1.6	
Marconi Beach	Backshore	0.7	1.6	Low tide	1.4	0.9
	Foreshore	0.0	1.1	High tide	1.4	
Nauset Light Beach	Backshore	0.5	1.6	Low tide	1.6	1.3
	Foreshore	0.0	1.7	High tide	1.7	
Nauset Beach	Backshore	0.0	1.3	Low tide	1.9	1.5
	Foreshore	12.3	1.2	High tide	2.0	

것을 암시하며, 결과적으로 파랑 및 해류 등과 같은 에너지의 차이는 퇴적물 입도의 변동을 야기한다(Giese, 1988).

연구지역의 퇴적물 입도분석을 통한 결과에 따르면, 퇴적물 입도의 중앙값(median)은 $-0.7\phi \sim 1.7\phi$ 로 후안퇴적물보다는 전안퇴적물에서 대체로 작게 나타나고 있어 후안에 퇴적되고 있는 퇴적물의 입도가 크다는 것을 나타낸다. 비록 Race Point Beach와 Ballstone Beach에서는 $0.3\phi \sim 0.4\phi$ 로 거의 변동이 없지만 전체적으로 후안퇴적물에서 중앙값은 Wood End Beach(-0.5ϕ)에서 Nauset Light Beach(1.6ϕ)에 이르기까지 증가하고, 연구지역의 가장 남쪽에 위치하고 있는 Nauset Beach에서 1.3ϕ 로 약간 감소하고 있다. 반면에 전안퇴적물의 중앙값은 $-0.7\phi \sim 1.7\phi$ 로 연구지역의 상부에 위치하는 Wood End Beach와 Peaked Hill Beach사이에서 $-0.7\phi \sim 0.2\phi$ 사이로 상당한 변동을 보여주고 있다. 그리고 Head of Meadow Beach에서 Nauset Light Beach에 이르기까지 중앙값은 일정한 증가를 보이며, Nauset Beach에서 다

시 감소하고 있다. 해안절벽에서 외해방향으로 절벽아래, 해변, 연안사주, 및 외해사주의 4개 지역에서 취한 퇴적물은 각각 0.9ϕ , 0.3ϕ , 0.5ϕ , 그리고 1.6ϕ 로서 외해사주에서 가장 세립질의 퇴적물이 존재하고, 해변에서 가장 큰 입도를 보여주고 있다.

연구지역의 전안과 후안의 표층퇴적물의 입도분석결과는 기본적으로 남쪽으로 갈수록 입도가 감소하고 있다. 그러나 Peaked Hill Beach에서 입도는 전안에서 증가하고 후안에서는 감소하며, Nauset Light Beach에서 Nauset Beach사이에서는 약간 증가하고 있다. 그러나 Wood End Beach에서 Nauset Beach에 이르는 퇴적물의 median size(중앙값)는 일반적으로 세립화(finishing)되는 경향이며, 해안절벽지역에서 가장 큰 입도의 변동을 보여준다.

본 연구지역을 포함하고 있는 기 연구된 Shalk(1938)의 고조(high tide)와 저조(low tide)때에 취한 퇴적물 입도분석 결과에 따르면, 입도는 Long Point에서 Pamet River Coast Guard까지 고조때보다는 저조때 취한

퇴적물이 더 조립질이었으며 Wood End Light에서는 저조때에 취한 퇴적물이 고조때보다 약간 세립질이었다. 그러나 본 연구결과는 후반보다는 전안에서 취한 퇴적물의 입도가 더 조립질이었다. 이와 같은 입도변화는 swash와 surf zone의 에너지 차이를 암시하고 있다. 즉 Komar(1976)에 따르면 outgoing swash와 incoming surf의 충돌지역으로 에너지가 가장 큰 점이지대(transition zone)에서는 상대적으로 입도가 증가한다. 또한 Shalk는 가장 세립질의 입도는 해안절벽지역에서 나타나고 퇴적물 입도의 median diameter는 sea cliff의 남쪽과 북쪽방향으로 갈수록 증가한다고 보고하였다. 이와 같은 경향은 Fisher(1979)의 결과에서도 유사하게 나타난다. Fisher는 퇴적물을 비록 여러 번에 걸쳐 취하기는 하였지만 퇴적물 입도는 해안절벽지역에서 북쪽으로 갈수록 중립질에서 조립질로 증가하고, Provincland에서는 spit를 따라 조립질에서 매우 조립질의 사질로 증가하고 있다는 것을 보여 주었다. 결과적으로 Cape Cod의 대서양과 직면해 있는 동쪽해안에 입도의 전체적인 경향은 Wood End Beach에서 Nauset Beach에 이르기까지 감소하고 있다. Fisher의 결과는 Nauset Beach 북쪽의 퇴적물은 여름 동안 우세한 남풍에 의해서 퇴적물의 이동방향을 따라 조립화되며, Nauset 남쪽의 해변사질은 매우 불규칙한 입도 변화를 보여주고 있어 뚜렷한 입도변화를 파악할 수 없다. 그리고 퇴적물의 조립화(coarsening)나 세립화(finishing)는 Nauset Beach의 남쪽에서는 나타나지 않고 있다.

연안을 따라 나타나는 퇴적물의 입도에 관한 연구는 Johnson(1965), King(1972), Seymour(1989) 그리고 Komar(1976) 등에 의해 다양한 연구가 수행되었는데, 이중 Komar는 해안지역에서 나타나고 있는 퇴적물의 입도변화를 4가지 유형으로 설명하고 있다. 즉 퇴적물 입도는 ① 해안을 따라 나타나는 파랑에너지의 변화(longshore change in wave energy), ② 세립질 퇴적물이 조립질보다 더 먼 거리 이동(selective rates of transport where the fines are transported longer distances than the coarser grades), ③ 바람이나 파도에 의한 세립질 물질의 거름작용

(winnowing of the fines from the beach which are carried onshore by the winds or offshore by waves), ④ 서로 다른 방향으로부터 파랑의 상호작용(the interplay of waves from different direction)에 의해서 지배된다고 보고하였다. 그러나 Cape Cod는 빙하퇴적물로 구성되어 있는 해안절벽에서 침식작용이 활발하게 일어나며 침식된 물질은 남쪽보다는 북쪽으로 2배 이상이 이동되며(Zeigler et al., 1965), 해안절벽에서의 해안선 후퇴는 매년 0.8m정도이다(Zeigler, et al., 1964). 많은 양의 퇴적물을 제공하고 있는 해안절벽이 존재한다는 것과 입도분석 결과에 의한 해안절벽에서 입도변동이 적고, 북쪽으로 갈수록 증가하며, 남쪽으로 갈수록 세립화 되고 있다는 사실은 Komar가 제안한 4가지 가능성에 배제되어 있는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 Komar가 제안한 유형 외에 퇴적물 근원지의 지질학적인 특성과 해안에서의 해안에서 작용하고 있는 해양학적인 작용에 의존하는 것으로 보인다. 즉 이것은 ⑤ longshore variation in source grain size로서 입도는 퇴적물의 근원지인 해안절벽의 구성물질에 의해 좌우되며, 해안을 따라 나타나고 있는 입도 변화는 해양학적인 작용에 의해 좌우될 수 있다는 것이다. McCave(1978)는 England 동부의 East Anglia해안에서 퇴적물의 이동방향에 따른 입도 증가는 세립질 퇴적물이 거름작용(winnowing action)과 조류에 의해 외해로 이동됨으로서 해변에는 점진적으로 조립질화 되는 것으로 보고하였다. 그는 또한 강한 조류가 없는 지역에서는 세립질 퇴적물이 해변으로 재 유입되어 해안을 따라 세립화되는 것으로 보고하였다. Cape Cod남쪽 해안인 Nauset Light Beach에서 Nauset Beach사이에서 나타나고 있는 사질의 조립화는 Komar가 제안한 3번째와 McCave(1978)에 의해 제안된 기작과 일관성을 보여 준다. 즉 세립질 퇴적물은 바람이나 파랑에 의한 거름작용(winnowing action)에 의해 해변에서 외해로 이동된 것에 기인하고 있는 것으로 사료된다.

침식작용이 활발한 퇴적물의 근원지로서 알려진 해안절벽에서 외해쪽으로 해변(beach), 절벽 바로 아래지역(drift), 근해사주(nearshore bar), 외해사주(offshore bar)에서

취한 퇴적물의 입도분석 결과에 따르면, 자갈을 포함하는 가장 조립질의 사질은 해변에 퇴적되고 세립질은 연안사주에 퇴적되며, 연안사주에 퇴적된 물질은 파랑에 의한 거름작용에 의해 외해사주에 퇴적되는 것으로 사료된다. 또한 해변과 연안사주에 퇴적된 사질과 자갈은 그 후에 wave-driven longshore drift에 의해 측면으로 이동되어 궁극적으로 Provincetown Hook의 배후면에 퇴적되며, 보다 세립질의 외해사질(offshore sand)은 쇄파에 의해 재부유될때 남쪽으로 향하는 연안류에 의해 이동되어지는 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- Aubrey, D.G., D.C. Twichell and S. L. Pfirman, 1982, Holocene sedimentation in the shallow nearshore zone off Nauset Inlet, Cape Cod, Massachusetts: *Marine Geology*, 47, 243~250.
- Fisher, J.J., 1979, Regional geomorphology and sedimentation, Outer Cape Cod., *Environmental Geologic Guide to Cape Cod National Seashore*(Edited by Leatherman, S.P.), 55~67.
- Giese, G.S., 1988, Cyclical behavior of the tidal inlet at the Nauset Beach, Chatham, Massachusetts, in Aubrey D.G., and Welshar, L., eds., *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of tidal Inlets*, Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies: New York, Springer-Verlag, 29, 269~283.
- Johnson, D.W., 1965, Shore processes and shoreline development. Hafner Publishing Company. 584pp.
- King, C.A.M, 1972, *Beaches and Coasts*, St.Martins's Press, Inc., New York, 570pp.
- Komar, P.D., 1976, Beach processes and sedimentation. Prentice-Hall, Inc., 351~355.
- McCave, I.N., 1978, Grain-Size trends and transport along beaches: Example from eastern England., *Marine Geology*, 28, M43~M51.
- Schalk, M., 1938, A textural study on the outer beach on the Cape Cod MA., Jr. of *Sed. Petro.*, 8, 41~54.
- Seymour, R.J.(eds.), 1989, *Nearshore Sediment Transport*, Plenum Press, New York, 418pp.
- Zeigler, J.M., H.M. Tasha and G.S. Giese, 1964, Erosion the cliffs of outer Cape Cod: tables and graphs : Woods Hole Oceanographic Institution No. 64~21(unpublished report), 59p.
- Zeigler, J.M., S.D. Tuttle, H.J. Tasha and G.S. Giese, 1965, The age and development of the Provinceland Hook, outer Cape Cod, Massachusetts: *Limnology and Oceanography*, Refield Volume, R298~R311.