

海雲臺 海濱의 沿岸流 및 沿近海 海水循環系에 관한 研究

·정병철¹⁾, 강효진²⁾

The Observations of Longshore Currents and Nearshore Circulation System in Haeundae Beach

Byoung-Chul Jung, Hyo-jin Kang

Abstract

Longshore currents and related nearshore circulation system have been studied by measuring the shore-normal and shore-parallel components of wave orbital velocity using an electromagnetic current meter at the Haeundae Beach. Breaker height and angle with the shoreline were also measured to examine the validity of the longshore current relationship, $\bar{v}_l = 2.7 u_m \sin \alpha_b \cos \alpha_b$, proposed by Komar(1976). The rate of littoral transport of sand was calculated from the measured wave conditions.

The longshore current relationship proposed by Komar(1976) was compared with the longshore components of the measured mean currents, and it was found that the relationship could predict the longshore currents reasonably well at a beach without any bottom relief.

Longshore currents were flowing westward at the eastern part (in front of Paradise Hotel) and eastward at the western part (in front of Glory Condo) with a possible rip current at the central part of the beach in March and May. However, the currents were much weaker in August and October. Longshore

1) 한국해양대학교 해양공학과

2) 한국해양대학교 해양공학과

currents were generally flowing eastward at the western part (in front of Glory Condo) and a weak rip current was found at the eastern part (in front of Paradise Hotel).

The current patterns suggest that net westward transport of sand occurs in March and May, whereas a small amount of net eastward transport occurs in August and October. The observed retreat of shoreline at the eastern part with a little advance at the western part also suggests that the overall westward movement of sands at the Haeundae Beach. The shoreline seems to be retreating due to the loss of sands by the rip currents along the beach even though the beach has been nourished annually.

I. 서론

1. 연구배경 및 지역

현재 해운대 해변의 사빈이 유실되고 있지만, 이곳 해운대 해변에 대한 연구는 미흡한 상태에 있다. 해운대 해변의 해안선 변형에 대한 연구가 수치 해석적 방법에 의해 80년대 초반부터 예측되고 있으나, 현재의 변형 형태는 그 예측과 다른 양상을 보이고 있다. 강(1991)은 장기간에 걸친 기상 관측 자료를 이용하여 해운대 해변에서 해안선 부근의 파랑을 계산하고, 파랑에 의해 발생한 연안류(longshore currents)를 계산하여 해안선의 변형을 예측하였다. 그러나 해변 침식의 원인력이 되는 파랑, 해빈류(nearshore current)에 관한 현장 관측이 거의 행해지지 않고 있다. 金(1988)은 drogue를 이용하여 해운대 해변에서 해빈류에 대한 관측을 실시하였지만, 표사이동(sand transport)이 가장 활발하게 일어나는 기파역(surf zone)내에서는 연안류에 대한 관측이 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구는 해안선 부근의 파랑을 관측하여 실제 현장에서의 연안류 및 연근해 해수순환계의 존재를 밝히고, 그와 관련하여 현재까지 우리나라에서는 거의 연구가 되어 있지 않은 해안선 부근의 연근해 해수순환의 발생 기작을 밝히고자 한다. 본 연구에서는 해운대 해변에서 2 방향 전자기 유속계(electro-magnetic current meter)를 이용하여 파랑에 의한 물입자 운동을 관측, 분석하여 연안류 및 연근해 해수순환계의 존재를 파악하고, 실제 현장에서 연안류 및 연근해 해수순환계의 기작을 밝히고자 한다.

해운대 해변은 한국의 남동부 해안 부산 지역에 위치하는 썰갯형의 사장으로 한국에서 가장 유명한 해수욕장이다(Fig. 1). 해변은 거의 SSE 방향에 가깝게 개방되어 있고, 또한 해변의 해안선 길이는 1.8km, 평균 사장폭은 36.0m이다 (釜山直轄市, 1989 and 1990). 해변 후안(backshore)에 호안벽이 높이 1.5 ~ 1.8m 정도로 육지와 강제로 설치되어 있고, 해변의 서쪽에는 동백섬이 위치하고 있으며, 해변의 동쪽에는 유람선의 정박을 위해 부두가 건설되어 있다(咸, 1982). 선안(foreshore)의 경사가 완만하고 평균 해변경사(beach slope)는 0.05 ~ 0.1로서 인근에 있는 광안리 해수욕장에 비해 큰 편이며, 2~5m의 얕은 수심으로 된 해수욕장이다. 해운대 해변의 해안선 부근의 퇴적물은 대부분이 중립 모래로 퇴적물에 자갈이 거의 함유되어 있지 않고 세립 물질도 포함되어 있지 않아 분급(sorting)은 아주 양호하다. 그러나 한국원도 앞의 해안선은 직경이 1m 정도까지 이르는 다양한 크기의 바위로 이루어져 있다(강, 1991).

부산 지방 기상대에 의해 관측된 바람의 자료에 의하면 이 지역은 북동 계절과 남동계 계절의 바람이 탁월하고 전형적인 해륙풍이 발생할 경우에는 오전에는 북서계 계절의 육풍이, 오후에는 남동계 계절의 해풍이 불다. 부산 지방의 연평균 풍속은 약 3.9m/sec로써 봄철과 여름철이 평균 4.0m/sec 이상으로 가을·겨울보다 강하게 나타내고, 풍향 발생빈도를 보면 북북동 계절이 탁월하다(중앙기상대, 1996). 이 지역의 조차는 약 120cm이고, 조류는 항조시에는 남서방향으로 남조시에는 북동방향으로 흐르고 있으며 일조부류는 심한 만일주조이다(수로국, 1997).

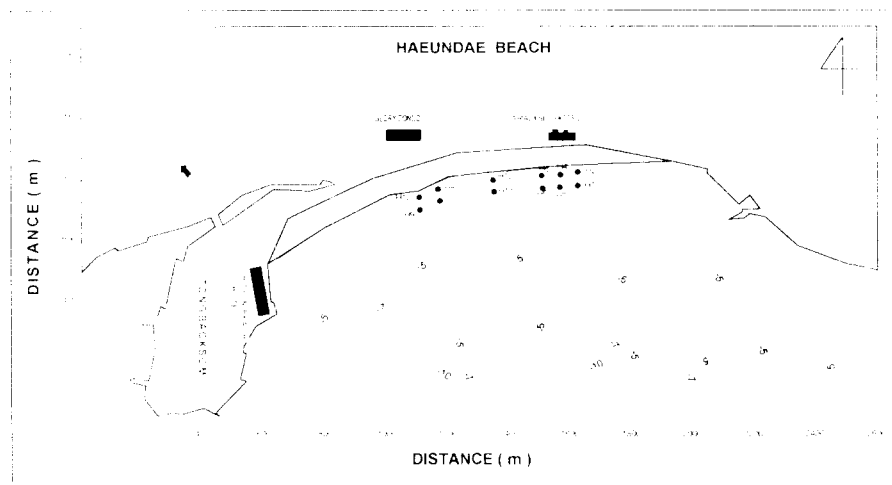


Fig. 1. Map of the study area and observation sites.

2. 연구방법

파랑의 물입자 운동을 관측하기 위하여 유속을 x-y방향 성분 벡터로 측정할 수 있는 전자기 유속계 (Marsh-McBirney Model 527)를 사용하여 항상 x 방향은 유속의 해안선에 평행한 성분 y 방향은 해안선에 수직인 성분을 측정하였다. 유속의 측정은 삼각대를 사용하여 유속계의 측정부(probe)가 해저바닥에서 약 30cm 정도에 위에 놓이도록 고정하였으며, 유속의 측정 간격(sampling interval)은 0.2초로 각 정점에서 15분간씩 측정하였다. 측정된 유속은 디지털 신호로 바뀌어 현장에서 직접 휴대용 컴퓨터에 저장하여 실험실에서 자료를 분석하는데 사용하였다.

측정된 유속자료는 실험실에서 각 성분별 에너지 스펙트럼을 분석하였으며, 스펙트럼 분석은 최소자승법으로 평균 편향치를 제거하고 Sande-Tukey algorithm을 이용하여 Fast Fourier Transform을 사용하였다(Bloomfield, 1976; Otnes and Enochson, 1978).

또한 기파역의 폭을 측정하기 위해서 줄자를 이용하여 해안선으로부터 파가 가장 외해에서 부서지는 곳까지의 거리를 측정하여 기록하였고, 쇄파 파고를 측정하려고 시도했으나 장비의 미비로 관측하지 못하고, 실험실에서 관측된 유속자료를 이용하여 계산하였다. 쇄파 파고는 관측된 유속자료로부터 다음의 식을 이용하여 계산하였다(U. S. Army Corp of Engineers, 1984).

$$H = \frac{2 u_m h}{\sqrt{g h}} \quad (1)$$

여기서

H : 파고

u_m : 측정된 유속의 최대치

h : 수심

g : 중력 가속도

해안선과 쇄파의 파봉선이 이루는 각도를 쇄파각(breaking angle)이라고 하는데, 쇄파각은 연안역의 관측에 있어 가장 측정하기 어려운 파라메타 중 하나이다. 많은 연구 논문에서 쇄파각을 측정하기 위해서 비행기를 이용한 항공사진이나 기구를 이용하여 공중에서 카메라로 관측하는 방법을 사용하고 있으나, 본 연구에서는 위와 같은 장비의 미비로 현장에서의 목측(visual observation)과 관측한 유속자료를 이용한 유속벡터에 의해서 쇄파각이 측정되었다.

II. 자료의 분석 및 결과

1. 3월 관측 결과

1.1 파랑

Table 1은 3월에 관측한 유속과 기파역의 파라메타를 나타내고 있다. 측정 당시에 파고는 파라다이스 호텔 전면부에서 약 45cm로 클로리 콘도 전면부의 약 15cm 보다 상당히 높은 것을 볼 수 있으며, 이것은 파랑이 남남동 방향에서 들어오고 있어서 해운대의 동쪽에 위치하고 있는 호안벽의 영향에 의해서 파라다이스 호텔 부근에서 파도가 수렴하고 클로리 콘도 부근에서 발산하기 때문이다. 또한 측정 당시에 해운대 해변 앞부분의 수중에는 연안사주(longshore bar)가 존재하는 것을 볼 수 있었다. 기파역의 폭은 파라다이스 앞부분은 약 25~30m 정도였고, 클로리 콘도 앞부분은 약 15 ~ 20m 정도였다.

Table 1. Measured current velocity and parameters of the surf zone in March, 1997.

Station No.	Mean current velocity (cm/sec)		R. M. S current velocity (cm/sec)		Breaking wave height (cm)	Breaking angle(°)	Water depth(cm)
	Cross-shore	Longshore	Cross-shore	Longshore			
H1	-133.00	-72.00	130.00	107.00	51.37	27	68
H2	-99.00	-106.00	6.50	6.80	37.00	42	63
H3	-101.00	-108.0	6.30	6.70	44.00	42	76
H4	-102.00	-109.00	6.30	7.40	39.00	31	66
H5	-103.00	110.00	5.90	7.20	44.00	30	74
H6	-0.80	-0.91	2.13	2.35	2.00	5	68
H7	3.30	-0.25	29.85	7.85	13.00	10	74
H8	-4.11	-0.65	26.22	13.12	9.50	22	62
H9	0.91	1.81	16.61	23.29	6.50	31	68
H10	-1.14	0.21	25.13	7.11	10.15	11	70
H11	0.54	0.06	22.15	6.79	8.00	8	62

Table 1에서 해안선의 수직방향 성분(shore-normal component)에 대한 유속에서 +는 해안으로 진행하는 흐름(onshore current)을 나타내고, -은 외해로 흐르는 흐름(offshore current)을 나타낸다. 또한 해안선의 평행방향 성분(shore-parallel component)에 대한 유속에서 +는 동쪽으로 흐르는 흐름을 나타내고, -은 서쪽으

로 흐르는 흐름을 나타낸다.

3월에 관측한 기파역의 각 파라메타들을 살펴보면, 해안선의 수직방향 유속은 파라다이스 호텔의 전면부에서 외해로 약 100cm/sec로 흘러나가는 것을 볼 수 있으며 글로리 콘도 앞부분에서는 거의 0에 가까운 것을 볼 수 있다. 해안선의 평행방향 유속을 보면 파라다이스 호텔의 전면부 부근에서 약 100cm/sec를 가지고 동에서 서로 흘러가는 것을 볼 수 있고, 다른 정점에서의 유속들은 거의 0에 가까운 것을 나타낸다. 쇄파각은 파라다이스 호텔의 전면부에서 약 30° 정도의 각도를 나타내고 있으며 글로리 콘도 앞부분에서 10 ~ 15° 정도를 나타내고 있다.

3월에 측정된 유속들은 파라다이스 호텔 앞부분에서 강한 흐름이 존재하고 글로리 콘도와 정점 H11은 약한 흐름이 존재한다. 이것은 파고에서 보여주고 있는 것처럼 파라다이스 호텔 앞부분의 파고가 매우 높고 따라서 파도에 의해 유발된 흐름 또한 매우 강한 것을 볼 수 있다. 글로리 콘도 앞의 파고들이 파라다이스 호텔에 비해 매우 작은 값을 나타내고 있어서 흐름들은 또한 약하게 흐르는 것을 볼 수 있다.

1.2 유속의 에너지 스펙트럼

3월에 측정된 유속자료를 각 정점에 대해서 최소자승법에 의해 편향치(trend)를 제거하고 파랑에 의한 물입자 운동의 에너지 스펙트럼을 분석해 보면, 파라다이스 호텔 앞부분에 있는 정점들이 글로리 콘도 전면부보다 대체적으로 에너지 수준이 높은 것을 나타내고 있다.

3월에 측정된 유속의 에너지 스펙트럼은 해안선에 수직인 방향과 평행한 방향에서 전체적으로 0.13 ~ 0.15Hz 부근에서 주 peak가 나타나고 있으며 그 보다 고주파수인 0.21 ~ 0.26Hz 부근에서 보다 작은 peak를 나타내고 있다.

2. 5월 관측 결과

2.1 파랑

5월의 유속 관측은 8개의 정점에서 측정되었다. 유속 측정 당시에 바람은 남풍이 불어오고 있었으며, 한국 콘도 앞부분에서부터 파라다이스 호텔 앞부분의 사장까지 해변 커슥(beach cusp)이 약 10m 간격으로 존재하였다. 기파역의 폭은 파라다이스 호텔 앞부분에서는 40 ~ 50m 정도였고, 글로리 콘도 전면부에서는 30 ~ 35m 정도로 3월보다 넓었다. 또한 기파역 내에 연안사주가 해안선에 평행하게 존

재하였다.

파라다이스 호텔 앞부분에서 쇄파각은 약 20° 정도가 되었고, 갈로리 군도 앞부분에서 쇄파각은 약 20° 정도였다. 기파역 외해의 파고가 약 1m 정도를 나타내고 있었지만, 쇄파 파고는 전체적으로 10 ~ 20cm 정도를 보이고 있었다. 해안선에 수직인 방향의 유속과 평행한 방향의 유속은 각각 25cm/sec와 50cm/sec 정도 되는 평균유속 존재함을 알 수 있고, 해안선에 수직인 방향의 유속은 약 20초 정도의 장주기 진동에 덧붙여 잔물결들이 일어나고 있는 것을 볼 수 있다. 해안선에 평행한 방향의 유속 성분은 입사파에 의한 고주파의 진동에 덧붙여 약 50초 정도의 장주기 진동을 나타내고 있다. 파라다이스 호텔 부근에 있는 정점들의 유속은 정점들이 동에서 서로 갈수록 해안선에 수직인 방향의 유속 성분들은 평균유속을 갖지 않고 왕복 운동하는 경향을 나타내고 있다. 왕복운동의 진폭 또한 정점들이 동에서 서로 갈수록 작아지는 경향이다.

갈로리 군도 전면부에 위치하고 있는 정점들에 대한 유속의 해안선에 수직인 방향 성분과 평행한 방향 성분은 파도의 조건들은 대단히 불규칙한 형태를 나타내고 있고 또한 많은 잔물결들이 합성되어 있는 것을 볼 수 있다. 해안선에 수직인 방향의 물입자 운동은 약 40cm/sec의 속도로 왕복운동하고 있고, 해안선에 평행한 방향의 물입자 운동은 약 15cm/sec 정도의 속도를 가지고 동에서 서로 흐르는 평균유속을 보여주고 있다.

2.2 유속의 에너지 스펙트럼

5월에 측정된 유속의 에너지 스펙트럼을 살펴보면, 파라다이스 호텔 앞부분에 있는 정점들은 전반적으로 거의 비슷한 양상을 보이고 있으나 정점 H5와 H6은 약간 다른 양상을 보이고 있다.

파라다이스 호텔 앞부분에 위치한 정점들에서 측정된 유속에 대한 에너지 스펙트럼은 해안선에 수직인 방향의 유속은 0.06Hz에서 주 peak가 나타나고, 0.14Hz와 0.22Hz에서 약간의 에너지를 가진 peak가 보인다. 해안선에 평행한 방향에 대한 유속의 에너지 스펙트럼은 0.02Hz 부분과 0.06Hz 부분의 peak가 뚜렷하게 나타나고 고주파수인 0.23Hz 부분에서 약한 peak가 나타나고 있다. 그러나 파라다이스 호텔 서쪽에 위치하고 있는 정점 H5와 H6은 주 peak가 뚜렷하게 보이지 않고 위에서 기술한 주파수 부분에서 여러 개의 peak들이 나타나고 있다. 이것은 정점 H1은 호안벽과 부두 부분에 위치하고 있으나, H5와 H6은 호안벽이나 부두로부터

멀리 떨어져 있기 때문인 것으로 생각된다.

그렇지만 글로리 콘도 부근에 있는 정점들은 해안선에 수직한 방향의 에너지 스펙트럼이 0.07Hz와 0.09Hz에서 주 peak가 나타나고, 그 이외의 어떤 뚜렷한 peak를 보이고 않고 여러 개의 작은 peak들이 혼재해 있는 것을 볼 수 있다. 또한 해안선에 평행한 방향의 에너지 스펙트럼은 0.05Hz와 0.07Hz에서 주 peak가 나타나고 있다.

3. 8월의 관측 결과

3.1 파랑

8월의 유속 관측은 7개의 정점에서 측정되었다. 측정 당시에 쇄파대의 폭은 대략 20 ~ 25m로 관측되었고, 파고는 쇄파대 외해에서 1.5m 정도로 매우 높은 상태였으며, 파가 부서져서 기파역으로 들어 온 후에도 쇄파 파고는 35cm에서 50cm으로 매우 높았다. 이것은 쇄파에 의해 부서진 파가 에너지를 완전하게 소멸되지 않고 다시 파를 형성하여 bore로 해안선에 접근한 것으로 여겨진다.

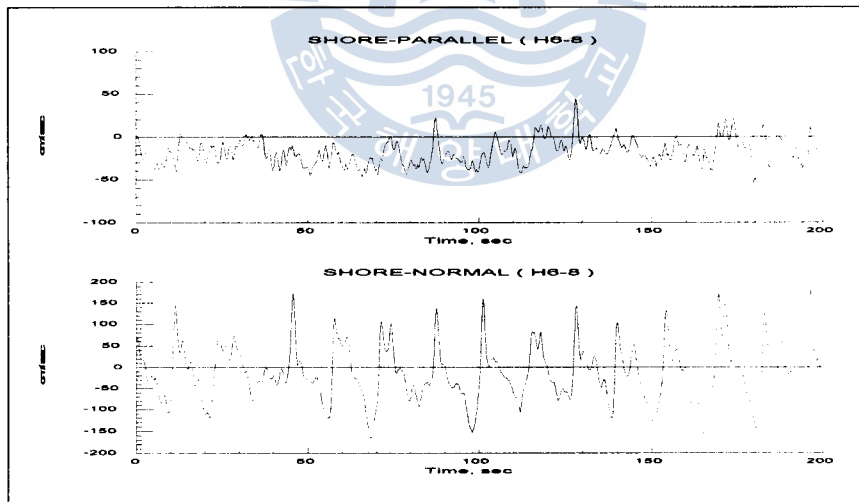


Fig. 2. Current velocity of shore-normal and shore-parallel components at the station No. H6 in August, 1997.

8월 관측 당일은 해운대 해수욕장이 폐장하고 일주일 정도밖에 지나지 않아서 해안선 부근의 해저 지형은 해수욕객들에 의해 많이 교란된 상태였다. 파라다이스

호텔 앞부분은 연안사주가 길게 발달하여 있고 글로리 콘도 전면부는 양빈(nourishment)을 하여 해변전면의 경사가 급격하게 되어 있었다. 쇄파의 형태는 파라다이스 호텔 전면부가 권파(plunging breaker)로 부서졌고, 글로리 콘도 부근에서는 해변전면의 경사가 급하고 수심이 깊어서 쇄기파(surgings breaker)로 해변전면을 쳐 올라왔다가 빠르게 backwash 하였다.

파라다이스 호텔 부근의 정점들에서 측정한 유속의 해안선의 수직방향 성분과 평행방향 성분은 입사파가 약 15초의 주기로 해변에 접근하는 것을 볼 수 있다. 또한 non-breaking undular bore들이 발견되고 있다. 이것은 Gallagher(1972)에 의해 하와이 섬에 있는 해변의 쇄파대에서 breaker로부터 형성되는 것을 발견했다. 이것은 바닥경사가 빠르게 감소하거나 파가 reef 위를 지나감에 따라 바닥 기질기의 증가로 발생한다. 또한 Huntley와 Bowen(1975b)은 undular bore가 상대적으로 단순한 해저지형을 가진 가파른 해변(steep beach)에서도 발견되고, 이것은 backwash의 상호작용으로 기인될 수 있다고 제안하고 있다.

글로리 콘도 부근의 정점들에 대한 해안선에 수직인 방향의 유속 성분과 평행한 방향의 유속 성분은 정점 H16과 비슷하게 약 15초의 주기를 가진 파들이 입사하고 있는 것이 보이고 있으며, 또한 저주파수의 장주기의 진동이 해안선에 수직 방향의 유속 성분에서 나타나고 있다. 해안선에 평행한 방향의 유속 성분은 해안선에 수직인 방향의 유속 성분과 같이 약 15초 주기의 진동이 보이고 약 25cm/sec의 서에서 동으로 흐르는 평균류가 나타나고 있다.

3.2 유속의 에너지 스펙트럼

8월에 관측한 유속을 FFT에 의해 분석한 에너지 스펙트럼을 살펴보면, 파라다이스 호텔 전면부에 있는 정점에서 해안선에 수직 방향의 에너지 스펙트럼은 주 peak가 0.07 Hz에서 나타나고 매우 약한 peak가 0.07 Hz의 두 배인 0.15 Hz 부근에서 보이고 있다. 해안선에 수직인 방향의 에너지 스펙트럼 또한 해안선에 수직인 방향의 에너지 스펙트럼과 같은 양상을 보이고 있다. 파라다이스 호텔 전면부에 있는 정점들은 H1 정점만을 제외하고 해안선에 수직인 방향의 에너지 스펙트럼은 주 peak가 0.07 Hz에서 나타났다. 정점 H1은 0.01 ~ 0.04 Hz에 에너지가 집중되어 있는 것을 볼 수 있다.

해안선에 평행한 방향의 에너지 스펙트럼을 보면 주 peak는 0.07Hz에서 나타나고 0.15Hz에서 0.07Hz보다 매우 작은 peak가 보인다. 이것은 약 7(= 1/0.14)초의 주기

로 해안에 접근하고 있는 입사파의 에너지가 전안(foreshore)을 벗어나지 못하고 해안선에 평행한 방향으로 진동하는 입사파 주기와 같은 해안파(edge wave)인 것으로 생각되고, 특히 해운대 해수욕장처럼 포켓형의 해안에서는 정상형 해안파(standing edge wave)가 형성되게 될 것이다. 따라서 정상형 해안파에서 물입자의 수평방향 성분을 관측하면 node에서는 수평운동이 가장 크고 antinode에서는 수평운동이 가장 작으므로 이곳에서 이안류(rip current)가 발생한다(Komar, 1976).

8월에 관측한 유속의 에너지 스펙트럼은 전체적으로 0.07Hz의 주 peak를 나타내고 있다. 따라서 8월 관측 당시 해운대 해수욕장에 들어오고 있는 입사파는 약 7초의 주기를 가지고 있으며, 해안선에 평행한 방향의 에너지는 입사파의 두배를 가진 주기의 해안파인 것으로 여겨진다.

4. 10월의 유속관측 결과

4.1 파랑

10월 관측시 부산 지역의 풍향은 북서풍이 불어왔으며, 풍속은 3.5m/sec였다. 파랑은 SSW 방향에서 해변으로 접근하고 있었으며 쇄파대의 폭은 파라다이스 호텔 앞부분이 약 20 ~ 30m로 측정되었고, 글로리 콘도 부근은 약 15m 정도로 나타났다. 쇄파 파고는 20cm 이내인 매우 잔잔한 파도가 해운대 해변에 입사하고 있었으며, 파라다이스 호텔 앞 부근에 연안사주가 존재하고 있었다.

파라다이스 호텔 전면부에서 파의 진행 방향인 해안선의 수직방향 성분은 그 유속의 진폭이 약 50 cm/sec 정도로 불규칙한 파형을 이루면서 왕복운동을 하고 있다. 그러나 해안선에 평행한 방향의 유속은 25cm/sec 정도로 역시 불규칙하게 왕복운동을 하고 있다. 또한 수직방향 유속 성분과 수평방향의 유속 성분들은 입사파에 의한 고주파수의 진동에 덧붙여 저주파수의 장주기 진동이 약하게 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

글로리 콘도 부근의 유속들은 이곳의 유속들은 파라다이스 호텔의 전면에 위치하고 있는 정점들의 유속들과 거의 유사한 양상을 보이고 있다. 해안선에 수직인 방향의 유속 성분들은 약 6초의 주기를 가지고 50cm/sec의 진폭을 가지고 왕복운동을 하고 있는 것을 볼 수 있고, 해안선에 평행한 방향의 유속성분은 주기가 약간 길어지고 진폭의 폭이 20cm/sec 정도에서 왕복 운동을 하고 있다.

4.2 유속의 에너지 스펙트럼

10월에 관측한 정점들의 유속에 대한 에너지 스펙트럼의 주 peak는 해안선에 수직인 방향과 평행한 방향에서 0.11Hz에서 나타나고 있으며 해안선에 수직인 방향에서는 또 다른 작은 peak들이 0.16 과 0.19Hz에서 나타나고 있으며, 해안선에 평행한 방향에서는 0.05와 0.17Hz에서 작은 peak들을 볼 수 있다. 파라다이스 진면에 위치하고 있는 정점들은 주 peak가 0.11Hz에서 나타나고 작은 peak들은 0.16 ~ 0.21Hz 부근에서 볼 수 있다.

따라서 10월에 관측한 유속은 약 9초의 주기를 가진 입사파에 의해서 발생된 흐름으로 생각되고 해안선에 평행한 방향의 물입자 운동은 입사파에 의해 발생된 입사파 주기와 같은 해안파로 인해 발생된 운동으로 여겨진다.

IV. 연안류 및 연근해 해수순환계

1. 해안선에 예각으로 입사하는 파에 의해 발생된 연안류

파봉선이 해안선에 완전히 평행하지 않고 어느 정도의 예각을 이루면서 해안에 접근하면 이 파도는 해안선에 평행한 성분의 운동량을 전달(longshore component of moment flux)하게 되고, 라디에이션 스트레스라고 하는 파도에 의한 파잉 운동량이 연안에 와서 파도가 부서질 때 해안선에 평행한 방향으로 일정한 해수의 흐름을 일으키게 된다(Bowen, 1969a; Longuet-Higgins, 1970a; Thornton, 1971; Galvin, 1991). 이렇게 해안선에 평행하게 흐르는 연안류는 해안선에서부터 쇄파대를 약간 벗어난 외해역까지 흐르게 되나 대체로 주된 연안류는 기파역(surf zone) 내에서 흐르게 된다(Longuet Higgins, 1970b; Komar, 1976).

연안류의 유속은 파도가 부서지기 직전의 쇄파파고(H_b)와 파도가 부서질 때 해안선과 이루는 각도인 쇄파각(α_b)에 따라 정해지며, 라디에이션 이론과 실제 해안 및 실험실에서의 자료들을 토대로 Komar(1976)는 기파역의 중간부분의 유속(\bar{v}_l)을 나타내는 간단한 식을 제시하였다.

$$\bar{v}_l = 2.7 u_m \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (2)$$

여기서 α_b : 해안선과 쇄파 파봉선이 이루는 각도

$$u_m = \left(\frac{2 E_b}{\rho h_b} \right)^{1/2} : \text{기파역에서 계산된 최대 파궤적 속도}$$

식(2)는 대부분의 실제 현장 관측 결과나 실험실의 자료들과 잘 일치하는 결과를 보여주고 있으나, 파봉선과 해안선이 이루는 각도가 약 45도 이상이 되면 잘 맞지 않고, 해저지형이 연안사주(longshore bar)나 골짜기(trough)등에 의한 굴곡이 심하지 않은 해안에서 가장 잘 적용될 수 있다(Komar, 1983). 연안류의 기파역 내에서의 속도분포는 기파역의 중앙부근에서 유속이 최대값을 갖고 해안선과 쇄파대 쪽으로 갈수록 유속이 감소하는 형태를 나타내게 된다.

2. 연안퇴적물수송 (littoral drift)

파도가 해안에 예각을 이루면서 부서지면 해안선에 평행한 흐름이 생기고 이 흐름은 파도에 의해 교란된 바닥의 퇴적물을 연안에 평행한 방향으로 쉽게 이동시키게 된다. 이러한 해안의 퇴적물 이동을 연안퇴적물수송이라고 하며 이 연안퇴적물수송이 해안의 침식이나 퇴적의 원인이 된다. 연안류가 운반할 수 있는 연안퇴적물수송율(rate of littoral drift)은 파도가 외해에서 전달해 온 에너지 전달율(wave power 혹은 energy flux)에 따라서 달라지고, 연안퇴적물수송에 관련된 에너지 전달율은 다음과 같이 전달된다(Eaton, 1951; Longuet-Higgins, 1972; Galvin and Vitale, 1977; Inman et al., 1980).

$$P_l = (ECn)_b \sin \alpha_b \cos \alpha_b \quad (3)$$

식(3)과 같이 정의되는 P_l 에 대해서 Komar와 Inman(1970)은 현장 관측자료들을 바탕으로 퇴적물의 침수중량이동율(immersed-weight transport rate) I_l 을 다음과 같이 구하였다.

$$I_l = 0.77 P_l \quad (4)$$

위 식(4)은 연안류에 의해 운반되는 퇴적물이 어떠한 성분이든지 이동되는 침수중량의 이동율을 나타내고 있으며, 이 식을 석영모래(quartz sand) 성분의 부피 이

동용(Q_s)로 나타내면,

$$Q_s = 6.8 P_l \tag{5}$$

로 된다(Komar, 1983). 위 식(8)에서 Q_s 는 m^3/day , P_l 은 W/m , 파고는 제곱평균 평방근(root mean square) 값을 사용하여야 하며, 만약 흔히 사용하는 유의파고를 사용할 때는 위 식의 값을 1/2로 나누어야만 된다(Komar, 1983).

V. 해운대 해빈의 흐름 패턴 및 해빈변형

1. 해운대 해빈의 흐름 패턴

연안역에서 발생된 연안류는 해안선에 어느 예각을 갖고 입사하는 파나 해안선에 수직하게 파가 입사할 때 연안방향(longshore direction)으로 발생하는 쇄파파고의 변화, 또는 이들 두 경우의 결합에 의해서 발생할 수 있지만, 파가 해안선에 수직하게 입사할 때 발생하는 연안방향의 쇄파파고의 변화는 실제 해안에서 관측하기 어렵다. 따라서 연안역에서 연안류를 예측할 때, 해안선에 예각으로 입사하는 파도에 의해 발생된 연안류를 예측하는 관계식을 많이 사용하고 있다. 본 논문에서는 Komar(1976)에 의해 제시된 연안류의 관계식을 사용하여 해운대 해빈에서 관측한 유속과 비교하였다.

해운대 해빈에서 관측한 해안선에 평행한 방향의 유속 성분과 Komar에 의해 제시된 연안류의 관계식인 식(2)와의 비교를 Fig. 4에서 보여주고 있다. 해운대 해빈에서 관측한 해안선에 평행한 방향의 유속과 Komar에 의해 제안된 연안류의 관계식인 식(2)를 비교해 보면 전체적으로 유사한 경향을 보여주고 있다. 그렇지만 몇 개의 데이터는 Komar의 관계식에 맞지 않은 데이터가 존재하고 있는데, 이것은 해안선과 쇄파 파봉선이 이루는 각도인 쇄파각 측정의 어려움과 연안사주 및 trough가 존재하는 해저 지형적인 조건에 의한 것으로 생각된다. 따라서 해운대 해빈에서 가파역의 연안류의 속도를 예측하는데 있어 Komar의 연안류 관계식인 식(2)를 사용하여 예측 가능한 것으로 생각된다.

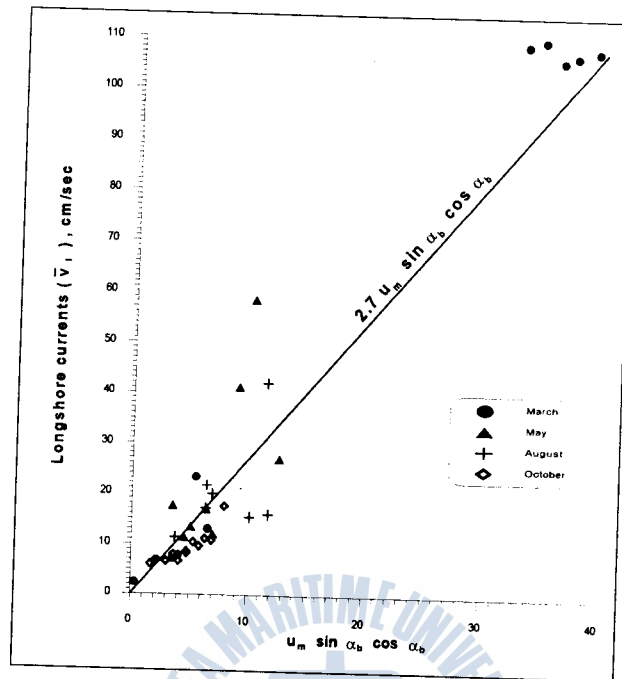


Fig. 4. Comparison of observed longshore currents and predicted longshore currents[from Komar and Inman(1976) longshore currents relationship].

해안선에 예각으로 입사한 파도는 부서지면서 연안류를 발생시키고, 연안류는 연안 퇴적물수송(longshore sediment transport)을 이르게 해안에 침식(erosion)이나 퇴적(deposition)을 발생시킨다. 따라서 해안선의 침식 및 퇴적문제를 파악하기 위해서는 해안선 부근의 흐름 패턴이 연구되어야 한다. 본 연구에서는 해운대 해변에서 관측한 유속과 기파역의 파라메타들을 가지고 해운대 해변의 흐름패턴을 분석하고 퇴적물수송율(sediment transport rate)를 계산하였다.

3월, 5월, 8월, 그리고 10월에 해운대 해변에서 관측한 흐름들은 해변의 동쪽부분에서 전체적으로 동에서 서로 흐르는 흐름들이 존재하고, 서쪽 부분에서는 전체적으로 서에서 동으로 흐르는 흐름들이 존재하고 있다. 흐름의 크기는 해변의 서쪽보다는 동쪽부분이 매우 큰 것을 볼 수 있으며, 3월과 8월이 5월과 10월에 비해 큰 것을 볼 수 있다. 해운대 해변에서 이러한 흐름패턴이 나타나고 있는 것은 부산지역의 일반적인 바람의 풍향별 발생빈도(기상청, 1996)에서 북동계열이 가장 많이 나타나고, 남동계열이 가장 적게 나타나지만, 해운대 해변은 그 지형이 남남

동쪽으로 열린 포켓형태를 취하고 있어 이 지역의 우세한 북동 계절보다는 남동 계절의 바람에 의한 크게 영향을 받기 때문인 것 같다. 해변의 중간부분에서 그 위치들은 조금씩 변하지만 연안류가 존재하는 것을 볼 수 있다. 연안류의 위치가 조금씩 바뀌는 것은 해안선 앞부분의 해저지형적인 조건이나 입사하는 파랑의 특성에 의한 것으로 여겨진다.

해운대 해변에서 연안류에 의해 일어나는 연안퇴적물수송은 해변의 동쪽부분에 서쪽 끝에서 서로 이동하고 있으며, 서쪽부분에서는 서에서 동으로 이동하고 있는 것을 볼 수 있다. 3월과 5월은 연안퇴적물수송의 전체적인 방향이 동에서 서로 이동하는 형태를 나타내고, 8월과 10월은 서에서 동으로 이동하는 형태를 나타내고 있다. 그러나 연안퇴적물수송량을 보면, 동에서 서로 이동한 퇴적물수송량은 3월이 다른 달보다 매우 많으며, 서에서 동으로 이동하는 퇴적물수송량은 8월이 다른 달보다 상당히 많은 것을 볼 수 있다.

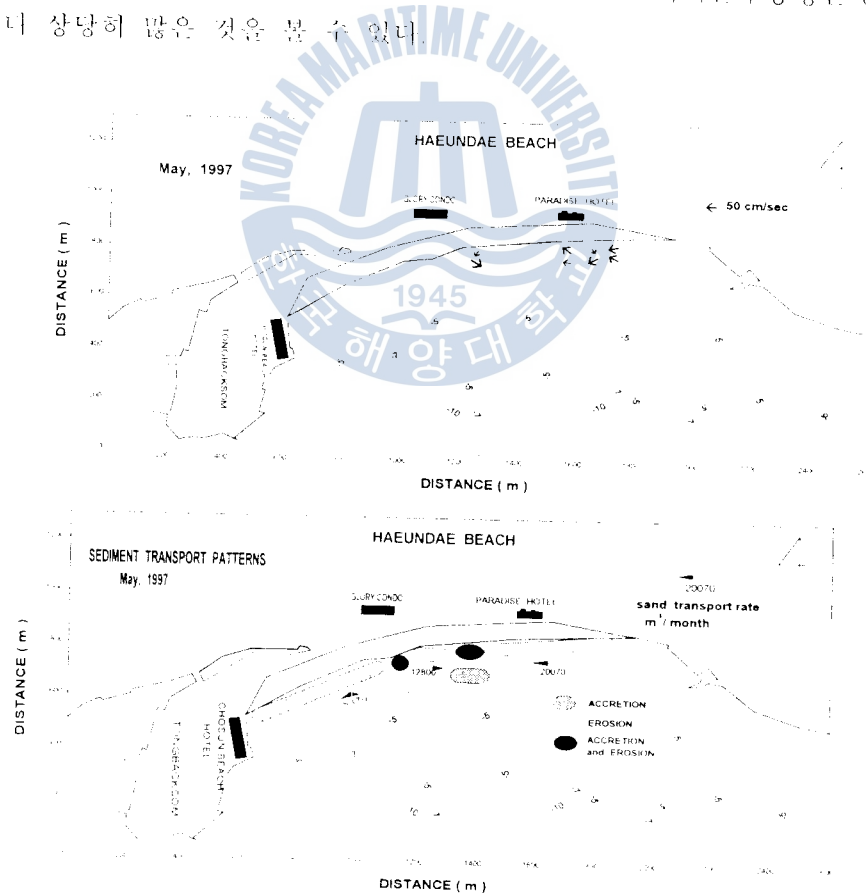


Fig. 4. Velocity distribution of wave-induced current and sediment transport patterns at the Haeundae Beach in May, 1997.

2. 해운대 해변의 해안선 변화

해운대 해변의 해안선은 동쪽부분이 후퇴하고 있으며 해변의 중간부분인 글로리 콘도와 서쪽에 위치하고 있는 조선 비치 호텔 부근에서는 전진하는 양상을 볼 수 있다. 해운대 해변의 동쪽 부분은 지속적인 해안선의 후퇴가 이루어지고 있는 반면에 해변의 서쪽 부분은 80년대 중반까지 해안선이 전진하다가 90년대에 들어 후퇴하고 있는 양상을 보여주고 있다. 또한 파라다이스 호텔과 글로리 콘도 중간 부분은 후퇴도 전진도 아닌 준평형상태(quasi-equilibrium)를 유지하고 있다.

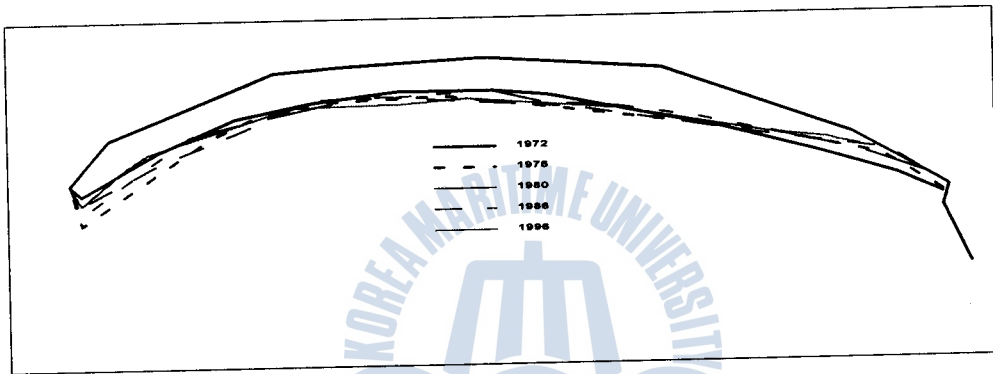


Fig. 5. Shoreline change of Haeundae Beach from 1972 to 1996.

해운대 해변은 3월과 5월에 동에서 서로 이동하는 연안퇴적물수송이 일어나고, 8월과 10월에 서에서 동으로 이동하는 연안퇴적물수송이 일어나고 있다. 그 양은 3월과 5월이 8월과 10월보다 상당히 많은 것을 볼 수 있다. 그래서 연안류에 의해 일어난 연안퇴적물수송이 해변의 동쪽부분에서 해안선의 후퇴를 일으키고, 해변의 서쪽부분에서 해안선의 전진을 일으키는 것으로 여겨진다. 그러나 해변의 동쪽은 침식이 계속되고 있으나 해변의 서쪽은 퇴적이 동쪽에서 일어나고 있는 침식만큼 일어나지 않고 있다. 그것은 해변의 중간부분에서 외해로 흘러나가는 이안류에 의해서 퇴적물이 외해로 유출되거나 서쪽 벽면을 따라 외해로 유출되어 일어나는 것으로 생각된다.

VI. 결 론

해운대 해변에서 연안퇴적물수송의 외력이 되는 파랑에 의해 발생된 연안류 및

연근해 해수순환계를 관측하기 위해서 2방향 전자기 유속계를 사용하여, 해안선에 평행한 방향의 유속과 수직한 방향의 유속을 관측하였다. 기파역에서 해변침식의 한 원인인 연안류를 예측하기 위해, 관측한 유속 중 해안선에 평행한 방향의 유속과 Komar에 의해 제시된 연안류 관계식인 식(2)을 비교하였다. 관측한 유속들이 식(2)와 상당히 일치하는 것으로 봐서 해운대 해변에서 식(2)를 사용하여 예측 가능한 것을 여겨진다. 그러나 몇몇 데이터가 식(2)에 일치하지 않는 것은 해안선과 왜곡 파봉선이 이루는 각도인 쇄파각 측정의 어려움이나 연안사주와 trough와 같은 해저 지형적인 영향에 의해서 발생된 것으로 생각된다.

3월에 관측한 흐름들을 보면, 해변의 동쪽부분인 파라다이스 호텔 부근에서 동에서 서로 이동하는 연안류와 서에서 동으로 이동하는 연안류, 그리고 해변의 중간부분에서 외해로 흘러 나가는 이안류가 존재하는 것을 볼 수 있었으며, 연안류의 속도는 해변의 동쪽부분에서 약 100cm/sec 정도의 강한 흐름이 서쪽으로 흐르는 것을 볼 수 있다. 5월에 관측한 흐름들은 3월과 같이 동에서 서로 흐르는 연안류와 서에서 동으로 이동하는 흐름이 존재하지만, 흐름의 속도는 3월에 비해 그리 크지 않는 것을 보여주고 있다. 8월과 10월에 관측한 흐름들은 글로리 콘도 부근에서 서에서 동으로 이동하는 연안류가 존재하는데 이 흐름의 속도는 그리 크지 않았으며, 또한 파라다이스 호텔부근에서 외해로 흘러나가는 이안류가 존재하는 것을 볼 수 있다.

해운대 해변에서 연안류에 의한 연안퇴적물수송의 패턴을 보면, 3월과 5월에 동에서 서로 이동하는 연안퇴적물수송이 상당히 많이 일어나고, 8월과 10월에 서에서 동으로 이동하는 연안퇴적물수송이 일어나고 있다. 그 양은 3월과 5월이 8월과 10월보다 상당히 많은 것을 볼 수 있다. 그래서 연안류에 의해 일어난 연안퇴적물수송이 해변의 동쪽부분에서 해안선의 후퇴를 일으키고, 해변의 서쪽부분에서 해안선의 전진을 일으키는 것으로 여겨진다. 해변의 동쪽은 침식이 계속되고 있으나 해변의 서쪽은 퇴적이 동쪽에서 일어나고 있는 침식만큼 일어나지 않고 있다. 그것은 해변의 중간부분에서 외해로 흘러나가는 이안류에 의해서 퇴적물이 외해로 유출되거나 서쪽 벽면을 따라 외해로 유출되어 일어나는 것으로 여겨진다.

연안퇴적물수송의 문제에서 연안퇴적물수송의 외력이 되는 연안류 및 연근해 해수순환계는 해저지형과 해안선의 변화에 영향을 주고, 해저지형 및 해안선 부근의 지형들은 연안역에서 흐름들을 변화시킨다. 따라서 본 연구에서는 이루어지지 않았지만, 연안류 및 연근해 해수순환계를 연구하기 위해서는 연안역의 지형변화

가 동시에 연구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 강효진, 1991. 수영만 지역의 연안퇴적물이동에 관한 연구. 한국해양대학교 해양공학
학과, p32 - 62.
- 강효진, 1993. 연안역의 해안파 발생에 의한 해안선 부근 지형변화에 관한 연구.
한국학술진흥재단, p29 - 32.
- 수로국, 1997. 조석표, p19 - 21.
- 중앙기상대, 1996. 기상연보.
- 金次謙, 1988. 海雲臺 海水浴場의 海濱變形에 관한 基礎的 研究. 釜山 水産大學校
大學院 海洋工學科, 碩士學位論文, p4 - 12.
- 釜山直轄市, 1989. 海雲臺 海水浴場 沙濱流失 原因糾明 및 防止對策 工法 樹立을
위한 研究 報告書, p17 - 61.
- 朴一欽, 1994. 沿岸域에서 漂砂移動과 海濱變形模型, 釜山水産大學校 大學院 海洋
工學科, 博士學位論文, p8 - 35.
- 榎木 亨, 1982. 漂砂と海岸侵蝕. 森北出版社, p61.
- Basco, D. R., 1982. Surf Zone Currents, Volume I State of Knowledge.
Miscellaneous Report No, 82-7(I), U. S. Army, Corps of Engineers
Coastal Engineering Research Center, p23 - 40.
- Bloomfield, P., 1976. Fourier Analysis of Time Series : An Introduction. John
Wiley & Sons, New York, p258.
- Bowen, A. J., 1969b, The generation of longshore currents on a plane beach.
Jour. Mar. res., 37, p206 - 215.
- Bowen, A. J. and Inman, D. L., 1969. Rip currents, 2 Laboratory and field
observations. Jour. Geophys. Res., 74, p5467 - 5478.
- Eaton, R. O., 1951. Littoral processes on sandy coasts. Proc. 1st. Conf. Coast.
Eng., p140- 154.
- Galvin, C. J. 1967. Longshore Current Velocity : A review of theory and data.
Rev. Geophysics 5, NO.3, p287 - 304.
- Galvin, C. J. and Vitale, P., 1977. Longshore transport prediction-SPM 1973

- equation. Proc. 15th Conf. Coast. Eng., p1133 - 1148.
- Galvin, C. J. 1991. Longshore currents in tow laboratory studies: relevance to theory. Jour. WaterW. Port. Coast. and Ocean Eng., 117, p44 - 59.
- Guza, R. T. and Inman, D. L., 1975. Edge waves and Beach Cusps. Jour. Geophys. Res., 80, No. 21, p2997 - 3012.
- Holman, R. A., 1983. Edge waves and the configuration of the shoreline. in CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion (P. D. Komar ed.), CRC Press, Boca Raton, p21 - 34.
- Huntley, D. L. and Bowen, A. J., 1975a. Field observation of edge waves and their effect on beach material. Jour. Geol. Soc. Lond. vol. 131, 1975, p69 - 81.
- Huntley, D. L. and Bowen, A. J., 1975b. Comparison of the hydrodynamics of steep and shallow beaches. in Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation (J. Hails and A. Carr eds.), John Wiley & Sons, London, p69 - 109.
- Inman, D. L. and Guza, R. T., 1982. The origin of swash cusps on beaches. Mar. Geol., 49, p133 - 148.
- Kang, H. J., Cross-shore sediment transport in relation to waves and currents in a groin compartment. Ph. D. Disst., Old Dominion Univ., Norfolk, Virginia, U. S. A., p129.
- Komar, P. D. and Inman D. L., 1970. Longshore sand transport on beaches, Jour. Geophys. Res., 75, p5914 - 5927.
- Komar, P. D., 1971. The Mechanics of sand transport on beaches. Jour. Geophys. Res., 76, NO. 3, p713 - 721.
- Komar, P. D., 1975. Nearshore currents: generation by obliquely incident waves and longshore variations in breaker height. in CRC Hand-book of Coastal Processes and Erosion (P. D. Komar ed.), CRC Press Boca Raton, p1 - 20.
- Komar, P. D., 1976. Beach processes and Sedimentation. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, p429
- Komar, P. D., 1983. Beach processes and erosion - an introduction. in CRC

- Handbook of Coastal Processes and Erosion (P. D. Komar ed.), CRC Press, Boca Raton, p21 - 34.
- Longuet-Higgins, M. S. and Stewart, R. W., 1964. Radiation stresses in water waves ; a physical discussion, with applications. Jour. Deep sea Res. 11, p529 - 540.
- Longuet-Higgins, M. S., 1970b, Lonhshore currents generated by obliquely incident sea waves II. Jour. Geophys. Res., 75, 6790 - 6801.
- Longuet-Higgins, M. S., 1972. Recent progress in the study of longshore currents. in Waves on Beaches (Meyer, R. E. ed.), Academic Press, New York, p203 - 248.
- Shepard, F. P. and Inman, D. L., 1950, Nearshore circulation. First Coastal Eng. Conf., Univ. Cali., Proc, p50 - 59.
- Thornton, E. B., 1971. Variations of longshore current across the surf zone. Proc. 12th Conf. Coast. Eng., p291 - 308.
- U. S. Army Corp of Engineers, 1984. Shore Protection Manual, vol. 1.

