

韓國東海岸의 波浪 資料 分析 및 漂砂量 推定 Analysis of Wave Data and Estimation of Littoral Drifts for the Eastern Coast of Korea

金阿利* · 李正烈* · 崔秉昊*

Allie Kim*, Jung Lyul Lee*, and Byung Ho Choi*

要 旨 : 해파 모형(HYPA)으로부터 산출된 장기 파랑 자료를 이용하여 동해 근해의 파랑 특성을 분석하였다. 또한 파랑작용(wave action)에 의하여 형성되는 토사이동율을 동해안 연안에 대하여 도표화하여 동해안 연안표사수지(littoral sediment budget) 작성의 토대를 마련하였다.

핵심용어 : 표사량, 표사수지, 파랑작용, 동해연안

Abstract □ Statistical analysis of long-term wave data resulted from HYPA(Hybrid PArametric wave model) for the eastern coast of Korea was performed. Subsequently a simple approach for predicting the global annual and seasonal littoral drifts has been derived to estimate littoral sediment budget.

Keywords : Littoral drift, Sediment budget, Wave action, Eastern coast of Korea

1. 서 론

최근 들어 우리 나라는 산업의 경제적 성장으로 교역량이 증가되므로 연안역(nearshore zone)에 임해 공업단지의 조성, 공업항의 건설, 그에 따른 화력, 원자력 발전소 등의 개발 그리고 해안 위락시설의 조성이 추진되고 있다. 그러나 연안역에 방파제 등의 인공 구조물이 건설되는 경우 표사이동(littoral transport)의 평형상태가 붕괴되어 해변의 침식이나 퇴적현상이 일어나 지형의 변화를 일으키게 하며, 각종 임해공업시설로부터 방출되는 오염물질과 냉각수의 취·배수로 인하여 항내 수질악화를 야기함은 물론 기존의 해안환경의 불균형을 초래하고 있다. 현재 한국 동해안 대부분의 항만에서는 자연적 과정에 의해 이동된 해저퇴적물이 지형적 영향으로 항 입구 및 접근항로의 매물현상을 일으키고 있는데, 지역적으로는 이 현상이 심각한 문제점으로 대두되고 있으며 항내 및 항로의 수심을 유지하기 위한 유지준설이 실시되고 있다. 또한 기존항만의 확장 또는 정온도 개선을 목적으로 하는 방파제 연장공사, 임해 발

전소 건설 등은 인접한 지역에 심각한 해안선 변형을 초래한다. 항로 매물현상과는 달리 해안선 변형의 경우에는 침식으로 인한 피해가 심각한데 속초항 인근해안 및 울진 원자력발전소 인근해안 등이 이에 해당된다. 따라서 연안지역은 해안 환경보전의 측면에서 다루어져야 하므로 연안역에 여러 형태의 사업을 시행할 때 이에 대한 주변 환경 변화의 영향이 사전에 정량적으로 예측되어야 한다. 이러한 문제점의 예측 및 적절한 해결책 마련을 위하여 동해안의 지형적, 자연적 특성에 적합하고 사질퇴적물의 이동과정을 이해하기 위한 퇴적물 이동 수치모형의 수립이 필요하다.

인간활동이 활발하게 이루어지는 연안해역에서 해저토사를 움직이게 하는 외력은 바람, 파랑, 해빈류, 조류, 하천류 등에 의하여 주로 이루어진다고 할 수 있다. 일반적으로 가장 큰 영향력을 미치는 것은 파랑작용으로 알려졌을 뿐만 아니라 연구대상인 동해안은 큰 규모의 하천도 없고 조석간만의 차도 거의 없으므로 파랑에 의한 해저토사의 이동이 거의 지배적이라고 할 수 있다. 해저퇴적물은 거의 전 해안에 걸쳐 모래로 구성되어 있

*성균관대학교 토목환경공학파(Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea)

으며 지역에 따라 약간의 차이는 있으나 수심의 경사가 급한 편이며, 또한 도서 및 압초도 많지 않은 편이다. 대부분의 해안선은 그 지형이 대체로 단조롭거나 절벽과 절벽사이에 사질 해변이 반복적으로 연결된 형태를 띤다. 이상과 같은 자연적, 지형적 조건으로 인해 동해안의 항만 및 해안의 해저퇴적물 이동은 비교적 활발하며 계절적으로도 큰 차이를 보인다. 이와 같은 토사의 이동은 해저지형을 변화시키는데 일반적으로 자연해빈은 계절적 변화를 갖지만 연간의 표사수지(sediment budget)를 놓고 보면 평형상태를 이루는 것으로 생각되며 해저지형도 안정상태를 유지하는 경우가 많다. 따라서 본 연구에서는 관심지역인 우리나라 동해 연안역에 미치는 전반적인 파랑환경을 통계적으로 분석하고 기산출된 정보에 의거하여 북위 39° 이남의 한국 동해안의 해빈과정을 분석, 모래이동 수지(sand movement budget)에 대한 광범위한 기초 자료를 제공하는데 목적을 두었다.

2. 한국 동해안의 현황

동해안은 남·서해안과는 달리 해안선이 사빈 및 암석지역으로 이루어져 있으며 매우 단조로운 특성을 가지고 있다. 또한 태백산맥을 기준으로 동쪽으로 상당히 급경사를 이루며 수심이 급격히 깊어지기 때문에 다른 해역에 비하여 대륙붕의 면적이 매우 작아 수 km 내

외의 좁은 대륙붕이 특징이다. 강원도 고성군에서부터 경상북도 영일군 영일만까지의 울릉도를 제외한 연구대상 해역의 해안선 총 연장은 약 459.4 km이며, 이 중 육지부는 457.3 km이고 도서부는 2.1 km이다. 대상해안은 크게 수원단에서 용추갑까지와 용추갑에서 영일만까지로 구분할 수 있다. 수원단에서 용추갑까지의 해안선은 굴곡이 매우 적다. 이 해안에는 험한 절벽이 많고, 수심은 해안으로부터 갑자기 깊어지나 비교적 규모가 크고 낮은 해안이나 사빈이 해안절벽 사이에 발달해 있다. 용추갑에서 영일만까지의 해안은 굴곡이 거의 없어 매우 단조로우며, 절벽사이 사빈의 규모가 비교적 작다. 시·군별 해안 자료를 구성별 및 형태별로 분류하여 Table 1에 수록하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 대상해역의 해안선을 형태별로 분류하면, 방파제, 방사제, 호안, 석축 등 인공구조물로 이루어진 인공해안이 약 34.5 km, 사질해안이 약 202.8 km, 암석해안이 약 38.9 km, 그리고 산지, 구릉지 또는 농경지로서 경사가 완만하고 해수의 영향이 적은 기타 해안이 약 83.2 km로 나눌 수 있다(과학기술처, 1992).

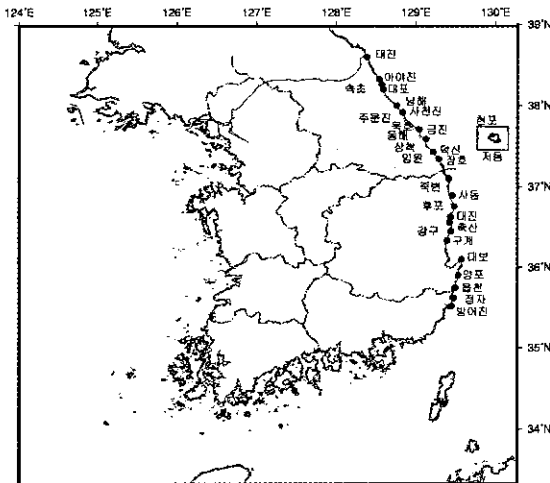
현재 동해안에는 7개의 무역항과 10개의 연안항 등 총 17개의 지정항과 18개소의 제 1종 어항, 2개의 제 3종 어항 및 다수의 제 2종 어항이 산재해 있으며 대부분 남동 또는 동쪽으로 열려 있다. 대상해역내 존재하는 항만 중 비교적 그 규모가 큰 무역항과 연안항을 정리하면 Table 2와 같다.

Table 1. Status of shoreline type(과학기술처, 1994)

시·군	총연장	구성별		형태별			
		육지부	도서부	인공해안	사빈	암빈	기타
경상북도	242.9	421.9	1.0	13.4	97.2	58.3	74.0
포항시	15.6	15.6	-	4.4	2.7	3.1	5.4
영일군	92.1	91.3	0.8	5.3	20.9	16.2	49.7
영덕군	53.2	53.2	0.2	1.5	30.5	20.0	1.2
울진군	82.0	82.0	-	2.2	43.1	19.0	17.7
강원도	216.5	215.4	1.1	21.1	105.6	80.6	9.2
삼척시	11.2	11.2	-	0.7	3.7	3.0	3.8
동해시	20.7	20.7	-	6.0	6.0	3.5	5.2
삼척군	47.2	47.0	0.2	1.2	28.0	18.0	-
강릉시	10.0	9.8	0.2	0.3	8.6	1.0	0.1
명주군	39.3	39.3	-	4.8	17.0	17.5	-
양양군	39.5	39.1	0.4	2.7	19.7	17.1	-
속초시	9.4	9.3	0.1	3.3	2.0	4.0	0.1
고성군	39.2	39.0	0.2	2.1	20.6	16.5	-
총 계	459.4	457.3	2.1	34.5	202.8	138.9	83.2

Table 2. Ports in the study area (과학기술처, 1994)

구분	항수	항명
무역항	5	삼척, 동해, 묵호, 옥계, 속초
연안항	6	강구, 후포, 죽변, 임원, 주문진, 거진

**Fig. 1.** The location of ports in the study area.**Table 3.** Annual dredged volumes in Chukpyon Hang(해양수산부, 1997)

년도	준설량(m ³)	년도	준설량(m ³)
1963	16,000	1981	20,300
1964	20,000	1982	12,700
1965	29,000	1983	11,700
1966	47,000	1984	8,900
1970	9,000	1985	23,300
1971	30,000	1986	29,000
1972	9,000	1987	42,000
1974	11,000	1988	5,500
1977	5,000	1991	9,200
1979	42,900	1994	9,300
1980	30,000	1995	12,700
합계 433,500 (년평균 20,000 m ³)			

동해안은 서해안, 남해안과는 달리 파랑의 직접적인 침입과 단조로운 해안선으로 인하여 항만 건설은 주변 해안선의 침식 또는 항내 매물 등을 유발할 가능성을 내포하고 있다. 방파제나 방사제 등 인공적인 구조물이 건설되지 않는 한 아무리 토사이동이 원활하다 할지라도 해안선은 자연적인 평형상태를 유지하게 되지만 만약 항만 건설 등으로 인하여 국지적인 해안선의 변경

Table 4. Dredging status of fishing ports in the east coast (해양수산부 어촌개발과 제공)

항명	준설량(m ³)	준설기간	비고
오산항	15,900	'94.4.1~'94.9.29	비관리청공사
방어진항	23,038	'95.5.1~'97.7.30	비관리청공사
사천진항	56,975	'96.6.24~'97.6.30	비관리청공사
구산항	161,450	'96.4.27~'97.12.31	비관리청공사
오산항	134,839	'96.10.1~'97.9.30	비관리청공사

이 유발되면 그 상태의 평형을 유지하기 위하여 장시간의 해안선 변경이 초래된다. 따라서 항만 건설은 가능한 자연적인 평형 상태를 유지하는 선에서 건설되는 것이 유지관리 비용과 같은 부가비용의 부담을 덜 수 있다. 또한 항만은 선박의 통행을 원활히 하기 위하여 적정 수심의 준설이 필요한데 Table 3에서 제시된 죽변항의 준설량 자료에서 보는 바와 같이 한 번 준설한다 하여 그 준설 수심이 그대로 유지되지 않으므로 계속적인 준설 비용이 요구된다. Table 4는 해양수산부 어촌개발과에서 제공한 몇 개 동해 어항의 준설량을 보여준다.

3. 동해안 해빈의 특성

해빈(beach)은 파랑의 영향이 미치는 연안의 최상한 도에서 저조선(low tide mark)까지의 미고결 퇴적물(unconsolidated sediments)이 집적되어 있는 지역으로(Komar, 1976) 수리에너지 조건의 변화에 따라 지속적인 침식과 퇴적작용이 일어나는 불안정한 퇴적환경을 갖는다. 그러나 대상해안의 자연해빈은 자연적 요인에 의한 연간변화가 거의 없어 평형상태를 이루고 있는 것으로 보이며, 계절적 변화도 상대적으로 작은 편이다. 그러나 태풍이나 폭풍 시 큰 파랑의 영향으로 연간변화보다 더 큰 변형이 나타나기도 한다.

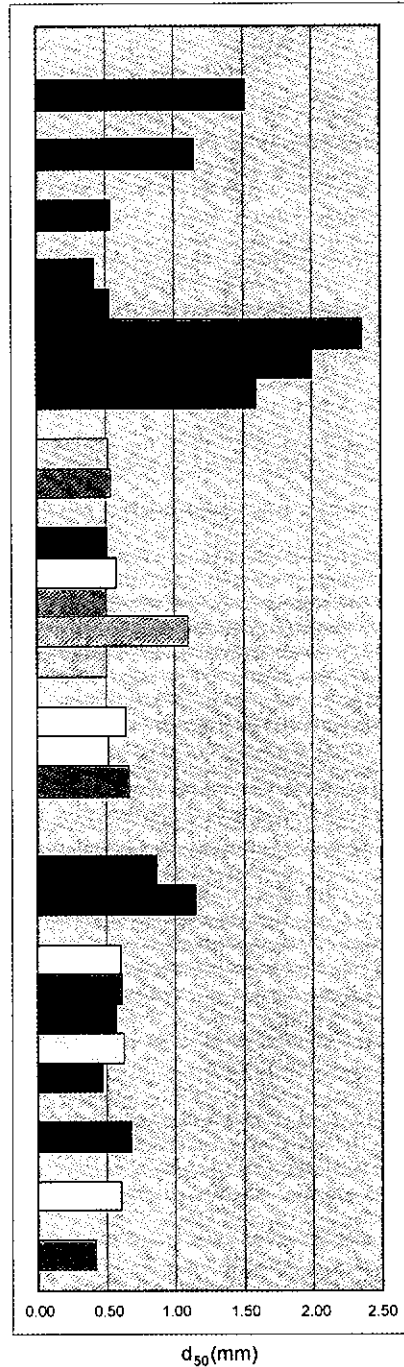
한반도 주변의 동·서해안은 수리적 특성 및 퇴적물 기원(source), 공급량(sediment supply)등이 편이하게 다르다. 평균입도와 분급도의 상관관계를 분석한 결과, 평균입도는 동해안 해빈에서는 일반적으로 중사로 구성되어 있고, 서해안에서는 세사의 사질을 나타낸다. 분급도(SO)에서는 동해안이 비교적 양호한 값(well-sorted)을 보이는 반면 서해안은 불량한 값(moderately/poorly sorted)을 나타낸다. 해빈을 구성하고 있는 퇴적물 중 동해안이 서해안보다 조립질의 양상을 보이는 것은 동·서해

안에서 최대 파랑의 강도는 크게 차이가 없지만, 동해안에서는 1 m이하의 소조해안에서 지속적인 파랑의 영

향과 해안의 경사도 차이에서 기인된 것으로 사료되며, 서해안에서는 높은 부유물 함량에 의한 전형적인 조건

Table 5. Regional distribution of mean diameter, d_{50}

위도	지역	d_{50} (mm)	채취지점
38.25			
38.20	속초	1.52	surf zone
38.15			
38.10	낙산	1.15	surf zone
38.05			
38.00	하조대	0.54	surf zone
37.95			
37.90	주문진	0.42	surf zone
37.85	연곡	0.53	surf zone
37.80	사천	2.36	surf zone
37.75	경포대	2.00	surf zone
37.70	안목	1.59	swash zone
37.65			
37.60	옥계	0.52	surf zone
37.55	망상	0.54	swash zone
37.50			
37.45	삼척	0.51	swash zone
37.40	승공	0.58	swash zone
37.35	삼척문암	0.50	swash zone
37.30	용화	1.10	surf zone
37.25	임원	0.50	swash zone
37.20			
37.15	호산	0.64	swash zone
37.10	부구	0.52	swash zone
37.05	봉평	0.67	swash zone
37.00			
36.95			
36.90	망양	0.87	swash zone
36.85	진북	1.15	swash zone
36.80			
36.75	월송정	0.60	swash zone
36.70	직산	0.61	swash zone
36.65	후포	0.57	swash zone
36.60	백석1리	0.63	swash zone
36.55	고래불	0.47	swash zone
36.50			
36.45	경정1리	0.68	swash zone
36.40			
36.35	강구	0.60	swash zone
36.30			
36.25	화진	0.42	swash zone



대의 퇴적환경, 조립질 퇴적물의 공급, 그리고 리아스식 해안과 같은 지형의 특수성으로 사료된다. 즉, 해저경사가 급한 동해안의 에너지의 집중조성에 의한 선별 확산 작용이, 부유퇴적물 공급량이 많은 서해안은 해변퇴적환경이 우세한 결과이다. 동해안은 최대파랑 빈도가 서해안과 비슷하나 지속적으로 파랑이 내습하는 해변의 특징을 갖고 있는 반면, 서해안 한 역할을 하며, 해변사(beach sand)로 구성된 경계(barriers)를 형성한다(Hayes, 1975). 해변 환경에 영향을 미치는 요인으로는 조석, 파랑, 바람 이외에도 연안의 지형, 조랑(tidal prism), 퇴적물의 유용도(availability of sediment) 및 강우 유입(riverine input) 등이 중요한 역할을 할 수 있다(Davies and Hayes, 1972). 동해 대륙붕 지역의 저질분포에 따르면 포항 이북 대륙붕의 저질은 연안쪽으로는 모래와 자갈 등을 포함하는 조립한 퇴적물이 분포하고, 외해쪽

으로는 세립한 이토질의 퇴적물이 분포한다. Table 5는 본 연구를 위하여 1997년 7월과 12월 동해안 사분역(swash zone) 및 쇄파대에서 채취한 모래의 중앙 입경 d_{50} 결과를 제시한 것이다. 주문진과 고래를 해수욕장의 모래는 비교적 가는 모래로 0.5 mm 정도의 입경을 보이고 있으며 사천 해수욕장의 모래는 2 mm를 넘고 있다. 같은 해수욕장 내에서도 다양한 입경 분포를 보일 수 있기 때문에 참고로 제시한다. Table 5는 동해안을 따라 위도별로 제시한 체분석 결과로 동해안 28군데에서 채취한 모래의 중앙 입경 d_{50} 의 지역적 분포도를 보이고 있다. Fig. 2는 동해 표층퇴적물의 입도 분포를 도시한 것이다.

4. 동해연안 표사량 예측

4.1 파랑자료의 분석

4.1.1 파랑자료

분석대상의 파랑 자료는 한국해양연구소에서 수립된 우리나라 주변 해역의 HYPA 심해파 모형으로부터 산출된 1986~1995년의 10년간 자료중 1990~1995년의 6년간 자료로서 Table 6에 제시된 바와 같이 동해안 12개소(Fig. 3)에서 6시간 간격으로 추출되었다. 12개소는 위도상 북으로는 휴전선 바로 아래 거진으로부터 남으로는 영일만 위 경북 강구를 포함하고 있다. HYPA모형의 격자셀의 크기는 27.5 km×27.5 km이며 선정위치의 수심은 200 m 이상의 심해조건을 대표하고 있다. HYPA 모형은 매 지점마다 유의파고 $H_s(m)$, 침투 스펙

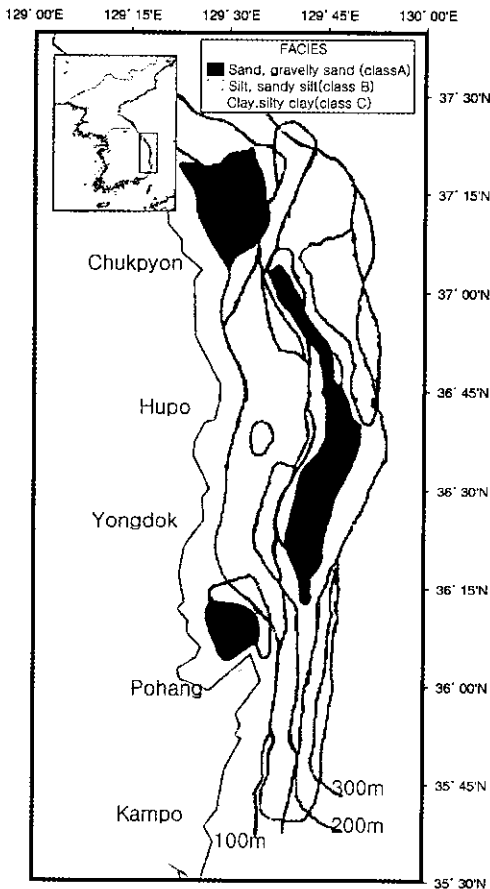


Fig. 2. Distribution of surface sediment facies on the east sea shelf.

Table 6. Grid index, longitude and latitude of 12 points along the east coast

번호	Station Number	위도, 경도(°)
67	3720	38.8, 128.4
66	3821	38.8, 128.8
65	3822	38.5, 128.8
64	3923	38.3, 129.2
63	3924	38.1, 129.2
62	3925	37.8, 129.3
61	4026	37.6, 129.7
59	4027	37.4, 129.7
58	4028	37.1, 129.8
56	4029	36.9, 129.8
55	4030	36.7, 129.9
54	4031	36.4, 129.9

트림 주기(spectral peak period) T_p (sec), 파향(degree, 진북으로부터 시계방향)을 제공한다. 파랑자료로부터 파군의 통계적인 대표파를 정할 필요가 있는데 주로 활용되는 대표파로는 최대파(H_{max} , T_{max}), 1/10 최대파($H_{1/10}$, $T_{1/10}$), 유의파(significant wave) ($H_{1/3}$, $T_{1/3}$) 그리고 평균파(\bar{H} , \bar{T}) 등이 있다. 레일리 분포를 따르는 경우 이들 간의 관계는 Table 7에 주어진 것과 같다. HYPA 모형에서 제공되는 바와 같이 주로 사용되는 것은 유의파로 목시관측에 의해서 보고되어 왔던 파의 파고, 주기와 거의 일치하며 Sverdrup-Munk(1947)에 의해서 도입된 것이다.

4.1.2 파고-파향 분석

대표적으로 위도상 속초와 삼척, 후포에 해당하는 지점의 파랑 자료를 방향별 파고계급별 발생빈도로 분석한 결과가 Fig. 4에 등치선으로 도시되었다. 속초에 해당하는 동해 심해파는 NE와 WNW방향, 삼척과 후포에 해당하는 동해 심해파는 NE와 NW방향이 우세한 것으로 분석되어 상위파고가 2방향으로 나뉘어 집중되는 현

상을 보이고 있다. 그림내 점선은 2개의 파향군을 나누는 경계 파향으로 모두 S를 경계로 양분되었다. 파향군 중 동향(east)계열을 E군, 서향(west)계열을 W군으로 칭하였으며 선정된 12개소의 자료를 분석한 결과 한 방향으로 파고 집중을 보이는 유일한 지역은 위도상 강원도 삼척 아래의 원덕에 해당한다.

4.1.3 파고 및 주기 분석

동해지역은 동계 계절풍이 강하여 주로 겨울철에 높은 파랑이 발생하게 되며 주기는 9월과 겨울철(12, 1,

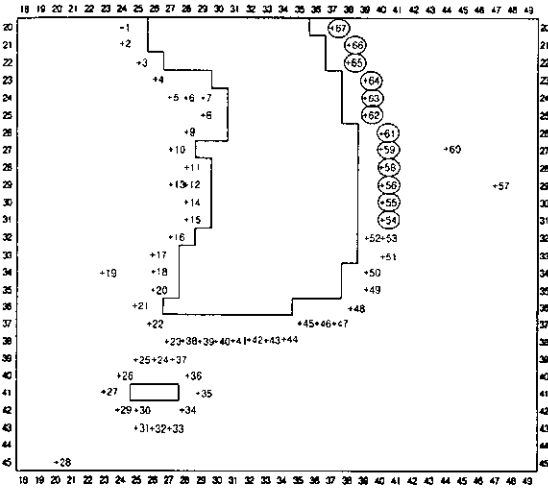


Fig. 3. Positions and grid indexes of grid points of interest (Open circles indicate the grid points used in this study) (해운항만청, 1996).

Table 7. Relation between statistical wave heights obtained from Rayleigh distribution

대표파랑	H_{rms} 와 관계	비고
$H_{1/10}$	$1.80 H_{rms}$	1/10파고
$H_{1/3}$	$1.416 H_{rms}$	유의파고
H_1	$0.886 H_{rms}$	평균파고

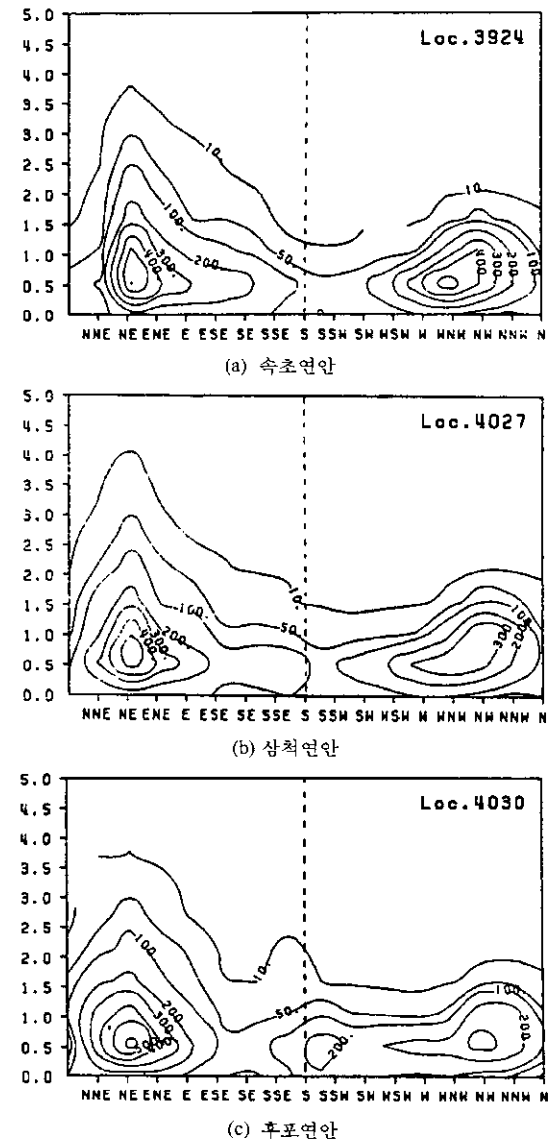


Fig. 4. Contours of wave occurrences of wave height to wave direction.

2월)에 다소 큰 값을 보이고 있다. 다음은 HYPA 모형으로부터 산출된 동해 근해의 심해 파랑 자료(한국해양연구소)로부터 파고 및 주기 각각에 대한 출현빈도와 그 결합 확률 분포를 살펴본다.

Longuet-Higgins(1963)는 일련의 파군자료로부터 파고가 어떤 빈도로 출현하는가하는 문제를 다루고, 그 파

군의 주파수 f (주기 T 의 역수)가 비교적 좁은 스펙트럼 밴드 내에 들어가는 경우, 즉 평균 수위를 좌우로 하나의 파봉과 파곡을 갖는 시계열 자료인 경우, 심해파의 출현 빈도는 레일리 분포(Rayleigh distribution)에 의해서 표시된다는 것을 이론적으로 증명하였다. 파고의 확률 밀도 함수를 $p(H)$ 로 하면,

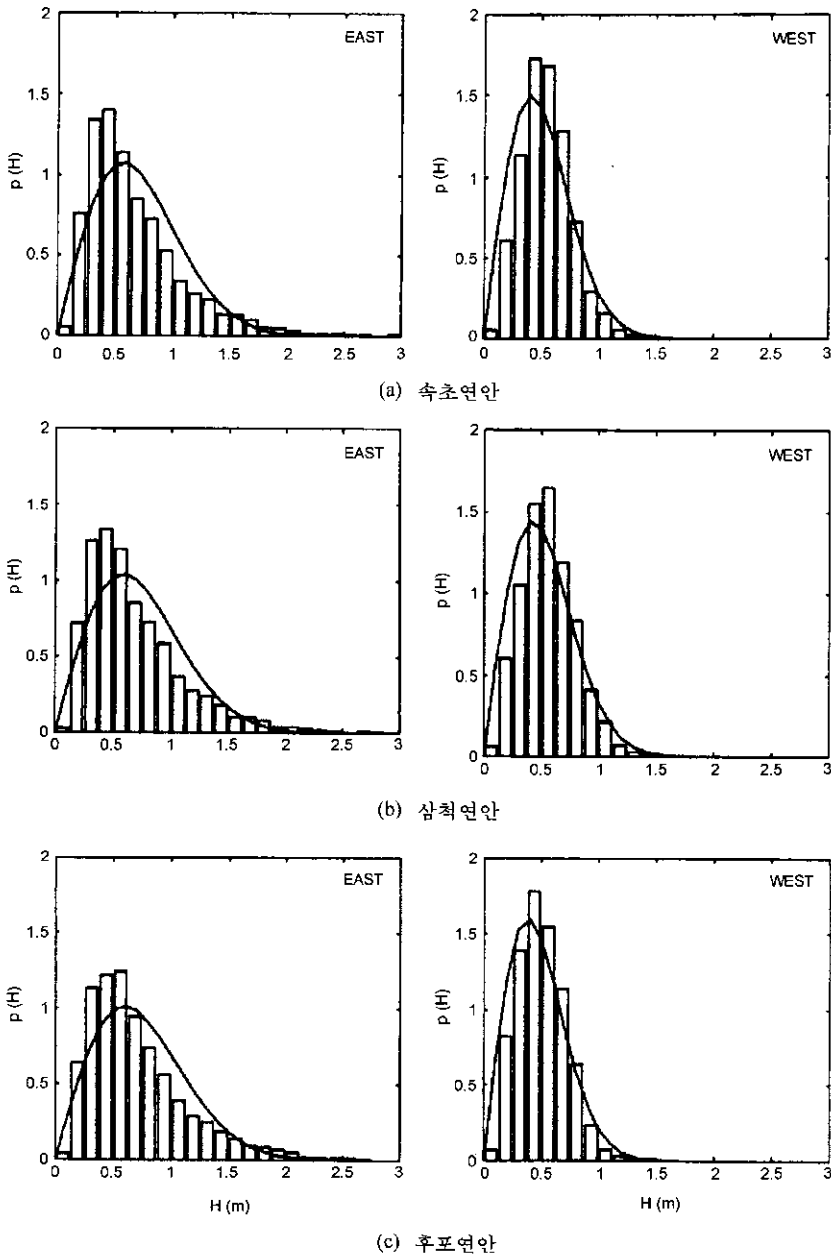


Fig. 5. Comparison of histograms and Rayleigh distributions for angle groups, east and west.

$$p(H) = \frac{2H}{H_{rms}^2} \exp\left\{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right\} \quad (1)$$

에 의해서 표시된다. 여기서 H_{rms} 는 제곱 평균 제곱근 (root-mean square) 파고이다. 임의의 값 H 보다도 큰 파고가 출현할 확률(초과 확률) $P(H)$ 는 다음과 같다.

$$P(H) = 1 - \int_0^H p(H) dH = \exp\left\{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2\right\} \quad (2)$$

본 연구에서 사용하는 파랑자료는 HYPА 모형으로부터 계산되는 유의파고이므로 시계열 파고자료에 적용되는 레일리 분포를 따르지 않을 수 있다. 6시간 간격의 유의 파고 자료를 평균파고, \bar{H} 로 환산한 후 계산된 제곱 평균 제곱근 파고로부터 도출된 레일리 확률 분포가 Fig. 5에 비교되었고 Fig. 6에는 양분없이 합쳐서 계산된 결과를 비교한 것이다. 대체로 막대그

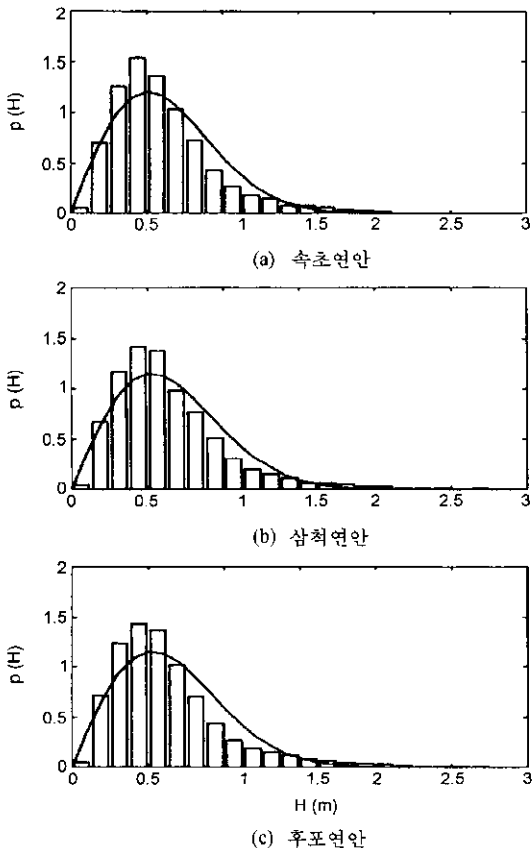


Fig. 6. Comparison of histograms and Rayleigh distributions without division.

래프가 레일리 분포보다 소폭에 치우쳐 있음을 보여 주고 있다. 여기서 제곱 평균 제곱근 파고는 다음과 같이 계산되었다.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum H^2} \quad (3)$$

Longuet-Higgins(1983)를 비교적 좁은 스펙트럼 밴드를 갖는 Gaussian 파랑 조건 하에서 파고와 주기의 결합 확률 분포(joint probability distribution) 다음과 같이 무차원 진폭과 주기의 함수로 표현하였다.

$$f(h, \eta) = \frac{1}{8\sqrt{2\pi\nu}} \left(1 + \frac{\nu^2}{4}\right) \frac{h^2}{\eta^2} \exp\left[-\frac{h^2}{8} \left(1 + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^2 \frac{1}{\nu^2}\right)\right] \quad (4)$$

여기서 h 는 무차원 파고로 $H/\sqrt{m_0}$ 이며 η 는 무차원 주기로 T/\bar{T} 이다. 결합 확률 밀도함수는 스펙트럼 폭 계수(spectral width parameter), ν 가 0.6 이하일 때 적용될 수 있다. ν 는 모멘트의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\nu = \left(\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1\right)^{1/2}$$

여기서, m_n 은 n 차 모멘트로 다음과 같이 근사적으로 추정될 수 있다.

$$m_n \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{H_i^n}{8T_i^n}$$

파의 주기 확률 밀도 함수는 식 (4)를 무차원 파고로 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

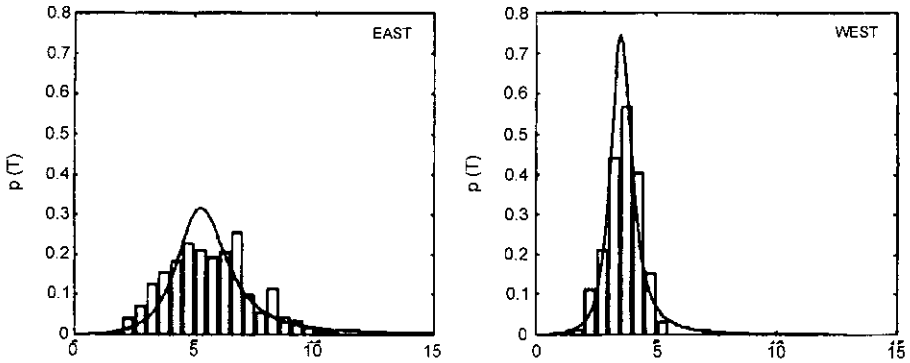
$$p(\eta) = \left(1 + \frac{\nu^2}{4}\right) \frac{1}{2\nu\eta^2} \left\{1 + \left(1 - \frac{1}{\eta}\right)^2 \frac{1}{\nu^2}\right\}^{-3/2} \quad (5)$$

Fig. 7은 파향군으로 양분한 파랑 자료로부터 주기의 확률 분포를 구한 것과 식 (5)로부터 구한 것을 비교한 것이며 Fig. 8에는 양분없이 구한 것을 서로 비교하였다. Fig. 9에는 파고-주기 결합 확률의 등치선을 식 (4)의 결과와 서로 비교한 것이다.

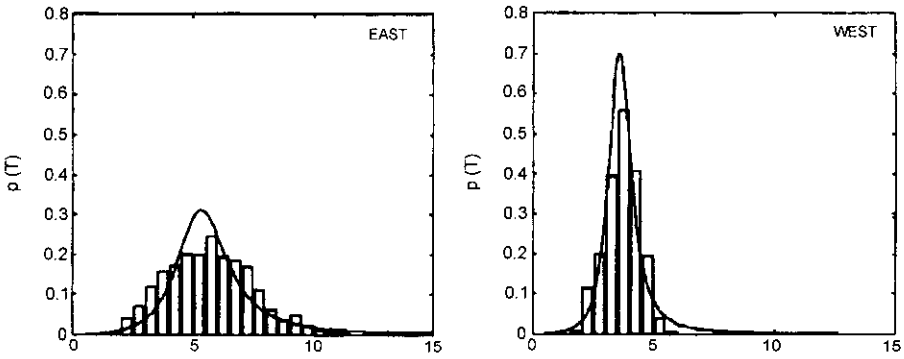
4.2 동해연안 표사량 산정

4.2.1 연안 표사량 산정

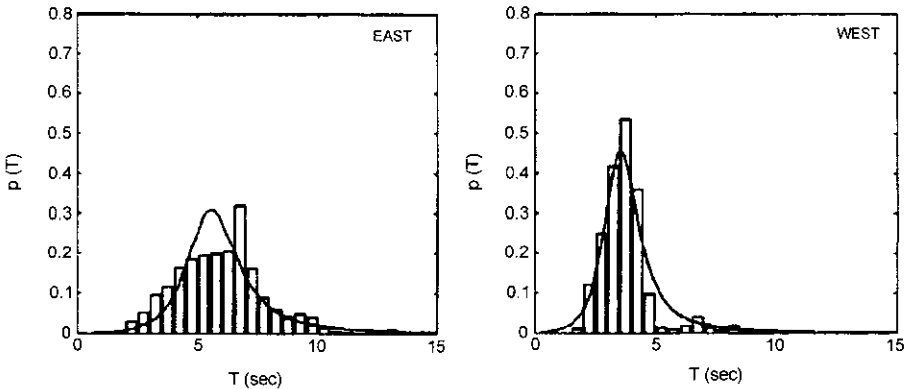
연안 표사량 추정을 위하여 직접 연안류를 연계시키기보다는 오히려 개발적으로 연안류를 발생시키는 파랑



(a) 속초연안



(b) 삼척연안



(c) 후포연안

Fig. 7. Comparison of histograms and theoretical distributions(Eq. 5) for angle groups, east and west.

에너지와 연안 표사량과의 관계를 구하려는 시도가 더욱 활발히 진척되었다(Caldwell, 1956; Inman and Bagnold, 1963). 현재 널리 사용되고 있는 연안 표사량 산정식은 연안표사량을 에너지 flux의 연안성분으로 표시한 것으로 다음과 같이 쇄파점에서 파랑에너지 E_b ,

군속도 C_{g_b} , 그리고 파향 θ_b 로 표현된다.

$$Q = \frac{C'}{\rho g} E_b C_{g_b} \cos \theta_b \sin \theta_b \quad (6)$$

여기서 Q 는 횡방향(cross-shore)으로 적분된 단위시간당

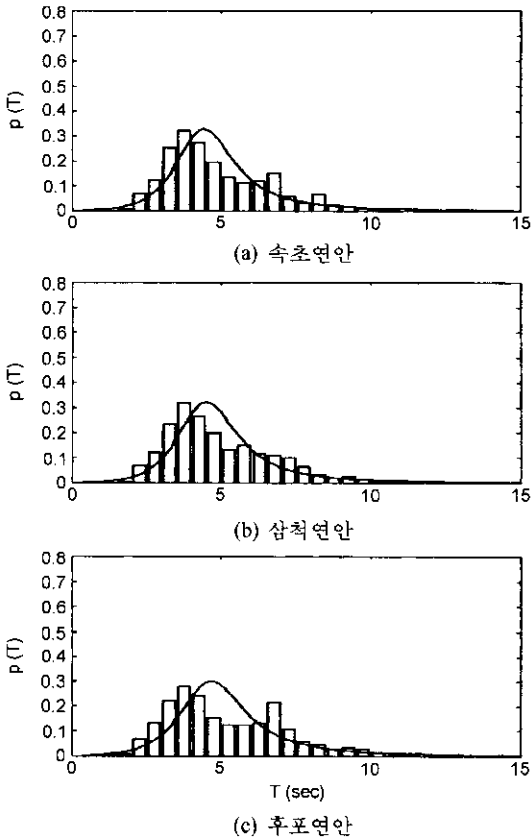


Fig. 8. Comparison of histograms and theoretical distributions(Eq. 5) without division.

표사량의 총량이며,

$$C' = \frac{K}{(s-1)(1-p)} \quad (7)$$

K는 실험 상수(0.2~2.2)이고, s는 모래의 비중(2.65 정도), g는 중력 가속도, ρ는 밀도, 그리고 p는 모래 공극율(0.3~0.4)이다.

심해파 정보로부터 연안 표사량을 산정하기 위해서 식 (6)에서 주어진 쇄파점에서의 정보를 심해파 정보로 환산할 필요가 있다. 해안선과 등수심선이 거의 일직선으로 평행한 경우 다음 파랑에너지 보존 법칙과 Snell의 법칙이 적용될 수 있다.

$$E_0 C g_0 \cos \theta_0 = E_b C_b g_b \cos \theta_b \quad (8)$$

$$\frac{\sin \theta_0}{C_0} = \frac{\sin \theta_b}{C_b} \quad (9)$$

여기서 하첨자 '0'는 심해파랑 제원을 의미한다. 식 (8)

~(9)를 식 (6)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$Q = \frac{0.5 C'}{\rho g} E_0 C_b \cos \theta_b \sin \theta_0 \quad (10)$$

쇄파점을 천해라 가정하면,

$$C_b = \sqrt{gh} = \sqrt{\frac{gH_b}{\chi}} = \left(\frac{\bar{H}_0^2 T \cos \theta_0 g^3}{4\pi \cos \theta_b \chi^2} \right)^{0.2} \quad (11)$$

쇄파점에서의 $\cos \theta_b \approx 1$ 이라 두면 식 (10)은 심해파의 평균 파고 \bar{H}_0 , 파향 θ_0 , 주기 T_0 의 함수로 다음과 같이 주어진다.

$$Q = C \frac{g^{0.6} \bar{H}_0^{2.4} T_0^{0.2} \cos^{1.2} \theta_0 \sin \theta_0}{16(4\pi)^{0.2} \chi^{0.4}} \quad (12)$$

연안표사량 산정식 (12)는 해안선의 변화가 완만한 경우에 적용되는 식으로 복잡한 지형이나 구조물에 의한 파랑의 국지적 변화는 고려되지 않았다. 그러나 지형 또는 구조물에 의하여 연안방향의 쇄파고가 변할 때 이로 인한 연안류의 국지적 변형으로 식 (12)으로부터 추정되는 표사량과는 상당한 차이를 보일 수 있다.

심해 파랑 자료로부터 해안선의 방향에 따라 연안 표사량 정보를 제공하는 연안표사도(littoral drift diagram)는 임의의 연안에서 해안선의 방향 정보만으로도 연간 발생하는 표사량을 추정하는데 상당히 유용한 도구로 활용될 수 있다. 해안선의 방향 α 는 Fig. 10에 도시된 것과 같이 진북(N)에 대하여 동편에 바다가 존재하게끔 방향 설정을 하였다. 따라서 진남(S)의 α 에 대하여 바다는 서편에 위치하게 된다. 해안선 방향에 따라 식 (12)의 심해 입사 파향이 달라지므로 Fig. 10에서 정의된 α 를 고려하면 식 (12)의 단위시간당 표사량은 다음과 같이 된다.

$$Q(\alpha) = C \frac{g^{0.6} \bar{H}_0^{2.4} T_0^{0.2} \cos^{1.2} \beta \sin \beta}{16(4\pi)^{0.2} \chi^{0.4}} \quad (13)$$

여기서 $\beta = \theta_0 - \alpha - \pi/2$ 이다. 따라서 식 (13)은 다음과 같이 주기, 심해 파고와 심해 파향의 함수만으로 표현될 수 있다.

$$Q(\alpha) = C' Q(\alpha) = \bar{H}_0^{2.4} T_0^{0.2} \cos^{1.2} \beta \sin \beta \quad (14)$$

여기서

$$C' = \frac{16(4\pi)^{0.2} \chi^{0.4} (s-1)(1-p)}{g^{0.6} K}$$

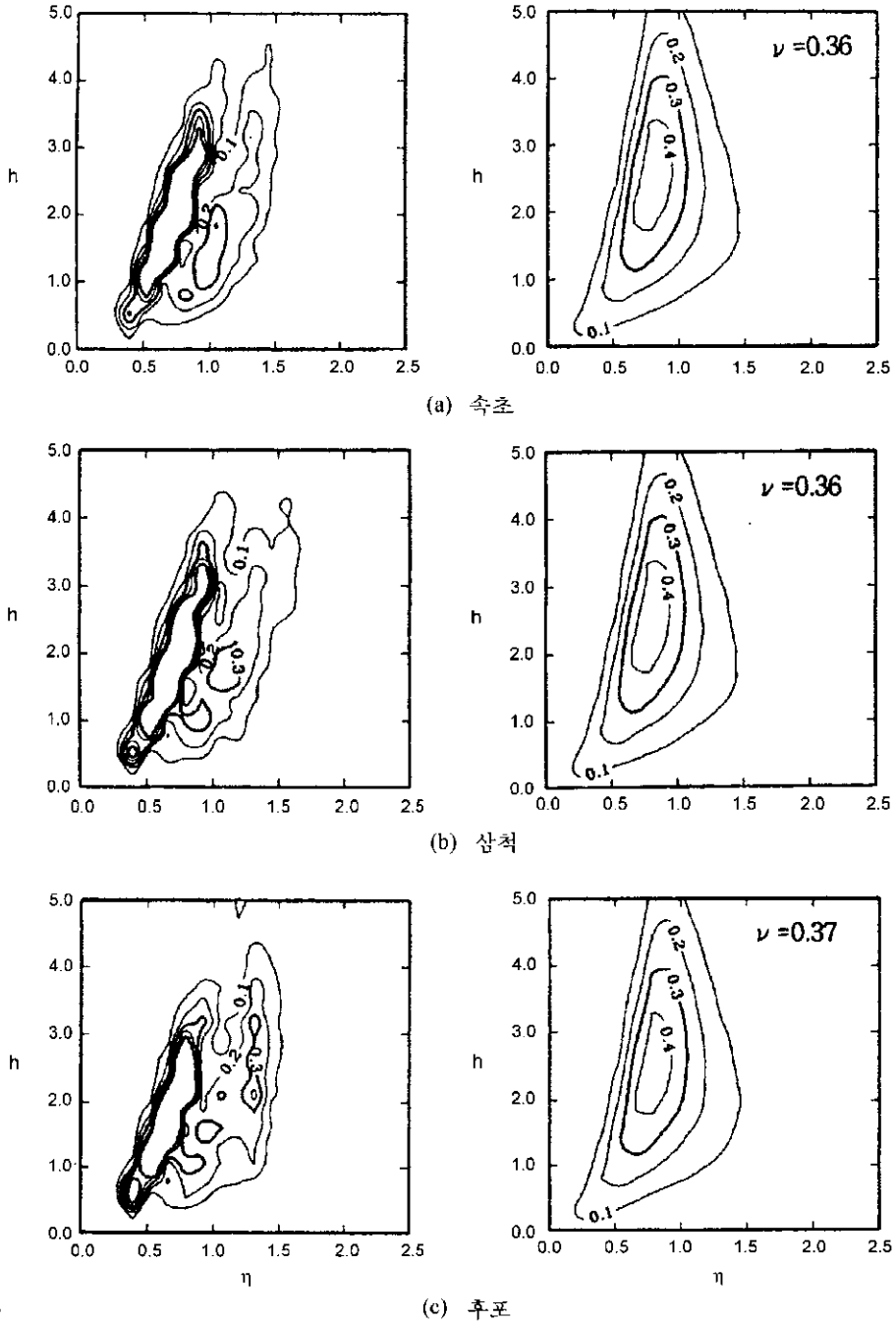


Fig. 9. Bivariate histogram relating significant wave height to period.

4.2.2 동해안의 연안표사량

동해안의 해안선 기울기에 따라 6시간 간격의 자료로부터 직접 식 (14)를 사용하여 지역적 경험계수를 배제한 심해파고와 파향 정보로만 산출되는 연간 및 계절

당 연안표사량(littoral drift rates) Q 을 계산한 결과는 Table 8~12와 같으며 그 결과를 도시한 것은 Fig. 14~18와 같다. Q 이므로 지역적으로 토사의 차이에 따라서 0.03~0.3 정도의 값을 곱하여야 최종 연안표사량을

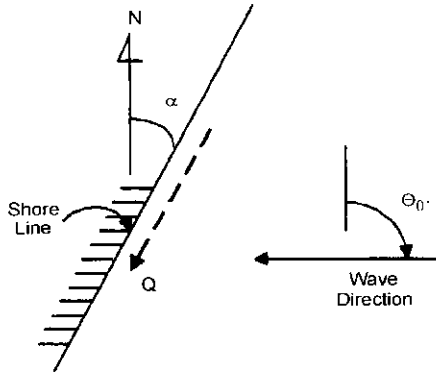


Fig. 10. Definition sketch of shoreline angle α .

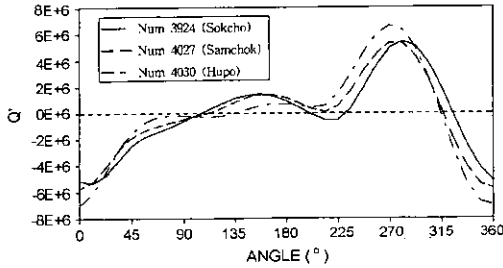


Fig. 11. Littoral drift rates w.r.t. shoreline angle.

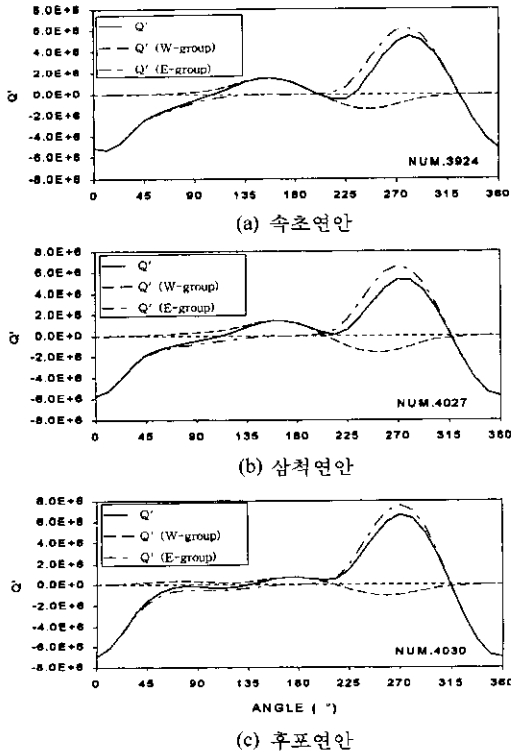


Fig. 12. Contribution to littoral drift of each group.

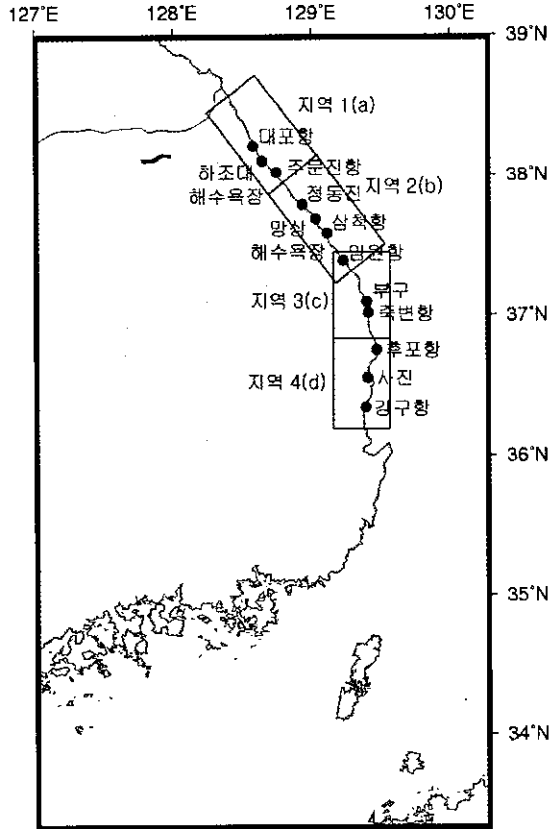


Fig. 13. The area of 1~4 on the study.

Table 8. Annual littoral drift rates of the east coast

지역	$\alpha(^{\circ})$	$Q(m^3/yr)$
지역1		
대포항 남단	-6.2	-0.516×10^7
하조대 해수욕장 인근	-50.4	0.396×10^7
주문진항 남단	-46.9	0.316×10^7
지역2		
정동진 인근	-51.8	0.405×10^7
망상해수욕장 인근	-52.2	0.301×10^7
삼척항 인근	-7.8	-0.720×10^7
지역3		
임원항 남단	14.0	-0.729×10^7
부구 인근	-20.4	-0.631×10^7
죽변항 남단	-15.1	-0.727×10^7
지역4		
후포항 남단	34.1	-0.403×10^7
사진 인근	-7.7	-0.804×10^7
강구항 인근	18.2	-0.669×10^7

주) α 는 진북을 기준으로 하여 (+)는 시계, (-)는 반시계방향, Q'은 (+)는 연안을 따라 상측이동, (-)는 하측이동.

얻을 수 있다. Table 8~12의 지역 1부터 지역 4는 Fig. 14~18의 (a)~(d)에 해당하는 지역으로 Fig. 13에 그 위치를 표시하고 있다. 휴전선 부근 송포(Songpo)로부터

Table 9. Littoral drift rates of the east coast for spring season

지역	$\alpha(^{\circ})$	$Q(m^3/season)$
지역1	대포항 남단	13.8 -0.712×10^6
	하조대 해수욕장 인근	-50.4 0.597×10^6
	주문진항 남단	-46.9 0.524×10^6
지역2	정동진 인근	-51.8 0.620×10^6
	망상해수욕장 인근	-52.2 0.577×10^6
	삼척항 인근	-7.8 -0.640×10^6
지역3	임원항 남단	14.0 -0.892×10^6
	부구 인근	-20.4 -0.502×10^6
	죽변항 남단	-15.1 -0.721×10^6
지역4	후포항 남단	34.1 -0.773×10^6
	사진 인근	-7.7 -0.119×10^7
	강구항 인근	18.2 -0.118×10^7

Table 10. Littoral drift rates of the east coast for summer season

지역	$\alpha(^{\circ})$	$Q(m^3/season)$
지역1	대포항 남단	13.8 -0.126×10^7
	하조대 해수욕장 인근	-50.4 0.133×10^7
	주문진항 남단	-46.9 0.123×10^7
지역2	정동진 인근	-51.8 0.124×10^7
	망상해수욕장 인근	-52.2 0.110×10^7
	삼척항 인근	-7.8 -0.670×10^6
지역3	임원항 남단	14.0 -0.992×10^6
	부구 인근	-20.4 -0.400×10^6
	죽변항 남단	-15.1 -0.754×10^6
지역4	후포항 남단	34.1 -0.555×10^6
	사진 인근	-7.7 -0.115×10^7
	강구항 인근	18.2 -0.928×10^6

Table 11. Littoral drift rates of the east coast for autumn season

지역	$\alpha(^{\circ})$	$Q(m^3/season)$
지역1	대포항 남단	77.8 -0.261×10^6
	하조대 해수욕장 인근	13.6 -0.253×10^7
	주문진항 남단	17.1 -0.244×10^7
지역2	정동진 인근	-51.8 0.115×10^7
	망상해수욕장 인근	-52.2 0.787×10^6
	삼척항 인근	-7.8 -0.288×10^7
지역3	임원항 남단	14.0 -0.274×10^7
	부구 인근	-20.4 -0.254×10^7
	죽변항 남단	-15.1 -0.283×10^7
지역4	후포항 남단	34.1 -0.149×10^7
	사진 인근	-7.7 -0.338×10^7
	강구항 인근	18.2 0.272×10^7

사천(Sachon)까지의 연평균 연안표사량은 Fig. 14(a)에, 춘하추동 계절별 연안표사량이 각각 Fig. 15(a)~18(a)에 도시되었다. 속초의 경우 연평균 표사이동은 북향하고 있

Table 12. Littoral drift rates of the east coast for winter season

지역	$\alpha(^{\circ})$	$Q(m^3/season)$
지역1	대포항 남단	13.8 -0.246×10^7
	하조대 해수욕장 인근	-50.4 0.933×10^6
	주문진항 남단	-46.9 0.584×10^6
지역2	정동진 인근	-51.8 0.105×10^7
	망상해수욕장 인근	-52.2 0.542×10^6
	삼척항 인근	-7.8 -0.301×10^7
지역3	임원항 남단	156.8 0.118×10^7
	부구 인근	134.0 0.649×10^6
	죽변항 남단	166.3 0.106×10^7
지역4	후포항 남단	34.1 -0.119×10^7
	사진 인근	-7.7 -0.328×10^7
	강구항 인근	18.2 -0.242×10^7

으며 가을에는 상당량이 남하하고 있다. 대포항 남단에서는 가을을 제외하고 남하하는 토사이동이 탁월하여 대포항 인근에서는 해빈이 발달하지 못하고 있다. 강릉 경포(Kyongpo)로부터 창호(Changho)까지의 연평균 연안표사량은 Fig. 14(b)에, 계절당 연안표사량은 각각 Fig. 15(b)~18(b)에 도시되었다. 구역내 경포대 해수욕장, 정동진 해수욕장, 망상 해수욕장 그리고 맹방 해수욕장 등 대규모 해수욕장은 가을을 제외하고 북향하는 토사가 우월하게 나타나고 있으나 대체로 평형을 유지하고 있다. 매월(Maewol)로부터 망양해수욕장(Mangyang)까지의 연평균 표사이동율은 Fig. 14(c)에, 춘하추동 계절당 연안표사량은 각각 Fig. 15(c)~18(c)에 도시되었다. 봄과 여름에는 비교적 적은 양의 토사가 이동되고 있으나 가을과 겨울에는 특히 죽변항에 상당량의 토사가 남하하고 있는 것으로 계산되었다. 기성(Kisong)으로부터 강구항(KangguHang) 아래까지의 연평균 연안표사량은 Fig. 14(d)에, 그리고 계절당 연안표사량은 각각 Fig. 15(d)~18(d)에 도시되었다. 전체적으로 남하하는 토사이동을 보이고 있으나 봄·여름 보다는 가을·겨울에 남하하는 토사량의 크기가 탁월하다. 후포항은 북으로부터 남하하는 상당량의 토사가 움푹파인 후포항에서 퇴적되는 형상을 하고 있어 지역적으로 항내 매물 문제가 심각할 잠재력이 많은 지역임을 보이고 있다.

$Q'(\alpha)$ 는 단위시간당 연안표사량 $Q(\alpha)$ 중 지역적 경험계수를 배제한 심해파고와 파향 정보로만 산출되는 값으로 $Q(\alpha)$ 에 지역적 토사의 차이에 따른 경험계수 C'' 을 곱하여 연안표사이동을 $Q(\alpha)$ 를 얻을 수 있다. C'' 은 지역적으로 다른 토사의 차이에 따라서 0.03~0.3정도의 값을 갖는다. 0도부터 360도까지의 해안선 방향 α 에 대

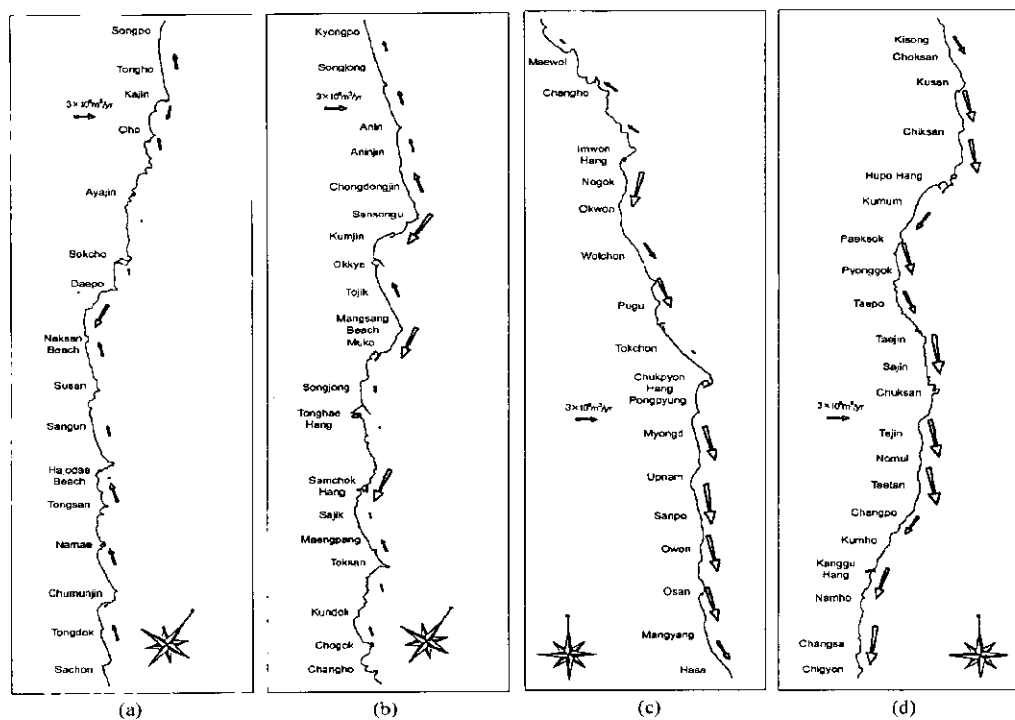


Fig. 14. Annual littoral drift rates of the east coast; (a) from Songpo to Sachon (b) from Kyongpo to Changho (c) from Maewol to Hasa, and (d) from Kisong to Chigyon.

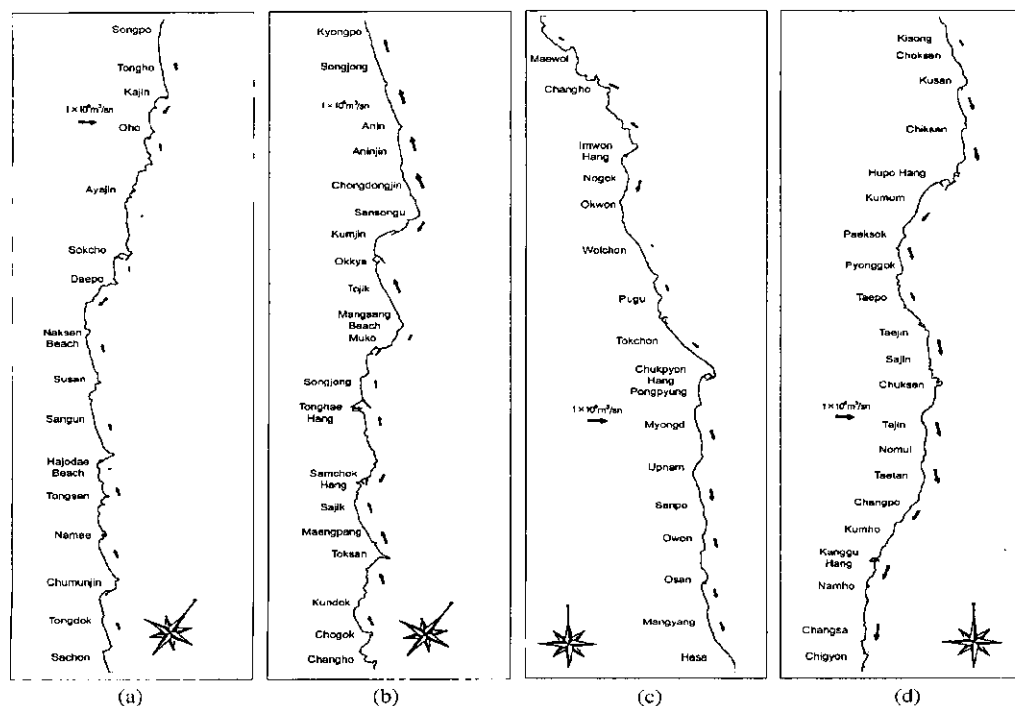


Fig. 15. Littoral drift rates of the east coast for spring season; (a) from Songpo to Sachon (b) from Kyongpo to Changho (c) from Maewol to Hasa, and (d) from Kisong to Chigyon.

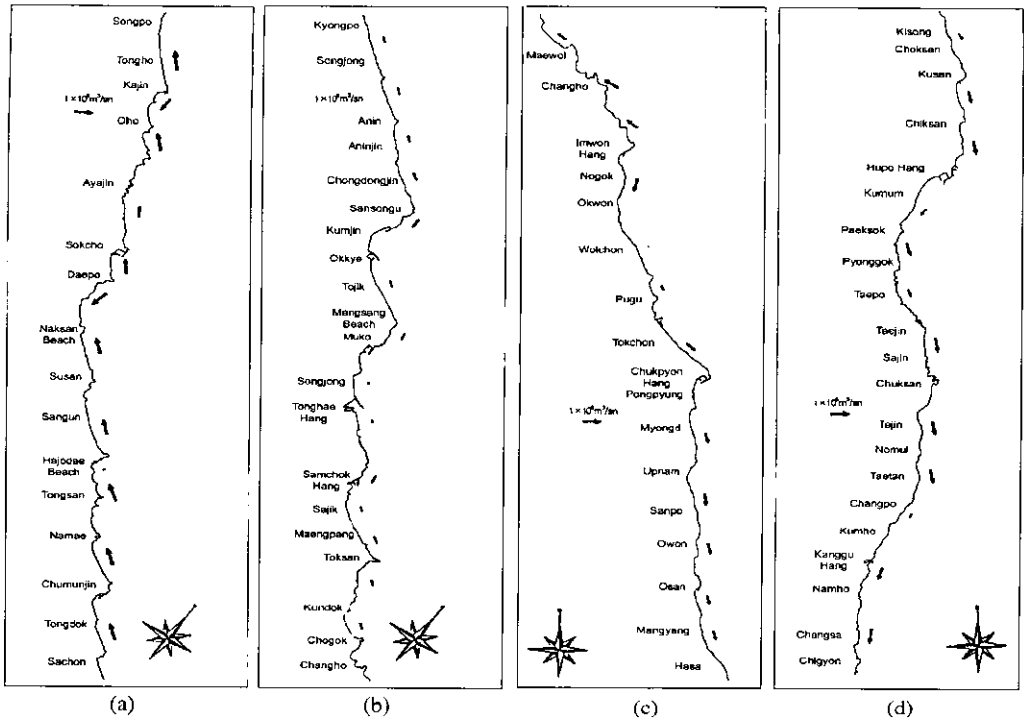


Fig. 16. Littoral drift rates of the east coast for summer season; (a) from Songpo to Sachon (b) from Kyongpo to Changho (c) from Maewol to Hasa and (d) from Kisong to Chigyon.

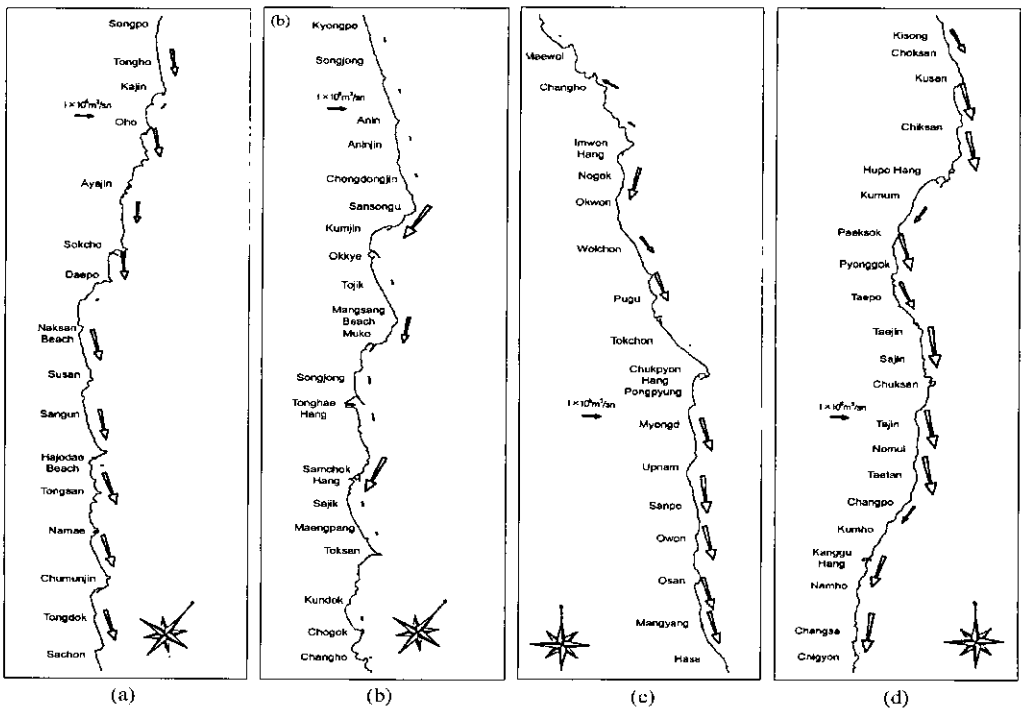


Fig. 17. Littoral drift rates of the east coast for autumn season; (a) from Songpo to Sachon (b) from Kyongpo to Changho (c) from Maewol to Hasa and (d) from Kisong to Chigyon.

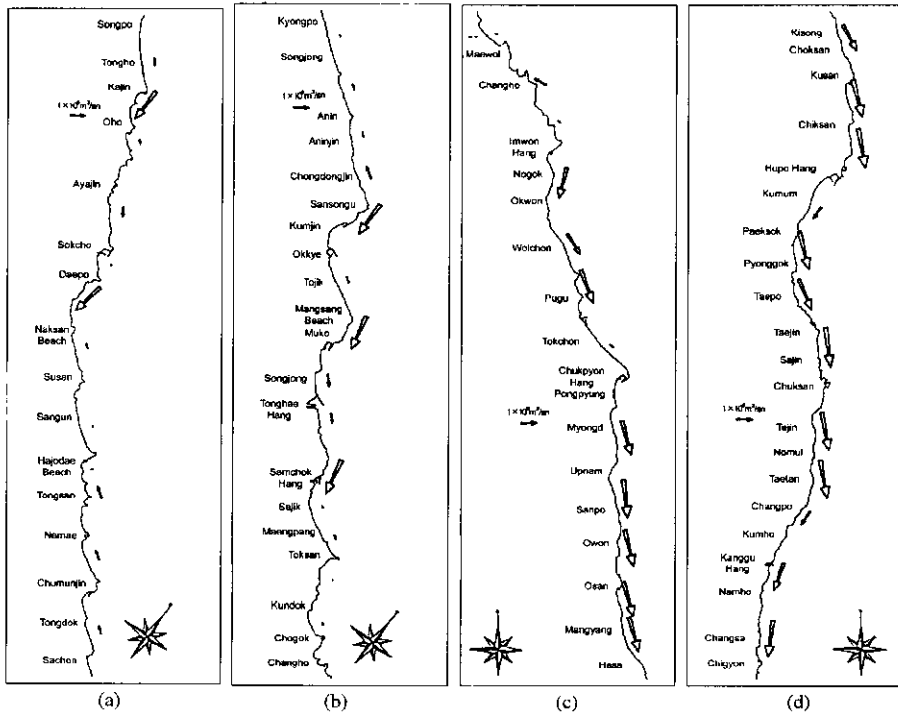


Fig. 18. Littoral drift rates of the east coast for winter season: (a) from Songpo to Sachon (b) from Kyongpo to Changho (c) from Maewol to Hasa and (d) from Kisong to Chigyon.

하여 각각 식 (13)과 (14)를 이용하여 구한 년평균 표사량으로 $Q(\omega)$ 를 비교 도시하면 Fig. 11와 같다. Fig. 12는 각 파향군의 영향을 파악하기 위하여 성분 분할하여 도시한 것이다. NE 방향으로 파의 집중이 이루어진 E군의 영향력이 더 큼을 보여주고 있다. 따라서 약 0도의 해안선 방향에 대하여 가장 큰 남쪽 방향의 표사량이 유발되며 약 270도의 해안선 방향에 대하여 가장 큰 북쪽 방향의 표사량을 유발한다.

5. 결 론

동해안 근해의 파랑자료를 분석한 결과 위도상으로 고덕 지방에 해당하는 자료를 제외하고 2개의 방향(NW와 WNW)으로 우월한 파고 집중을 보이고 있다. 본 연구에서 사용하는 파랑자료는 HYPAMODEX로부터 계산되는 유의파고이므로 시계열 파고자료에 적용되는 레일리 분포를 따르지 않을 수 있으나 비교 결과 대체로 만족스러운 결과를 얻었다. E와 W군으로 양분된 경우가 양분없이 합쳐서 계산된 경우보다 레일리 확률 분포에 더 근접한 결과를 제공하였다. 그러나 레일리 분포보다 소

폭에 치우치는 경향을 보이고 있다. 파의 주기에 대해서도 제시된 확률밀도함수에 상당히 근접하는 결과를 보이고 있다. 하지만 모형으로부터 계산되는 자료는 시계열 파고자료에 적용되는 확률이론과는 다를 수 있으므로 이에 대한 확률론적 접근이 요구된다.

본 연구에서는 풍성해파 모형(HYPA)으로 산출된 6시간 간격의 파랑자료를 이용하여 동해안 연안을 따라 파랑작용(wave action)에 의하여 형성되는 해변과정(beach process)의 중요한 해석자료인 토사이동율을 도표화하여 항내 매몰 및 침식 방지대책의 토대를 마련하였다. 연안표사수지의 좀더 정확한 작성을 위하여 각 해변마다 토사종류에 따른 경험상수를 결정하고 하천으로부터 동해안으로 유입되는 유사량의 산정이 후속과제로 요구된다.

감사의 글

한국해양연구소로부터 HYPAMODEX 모형에 의한 파랑산정 결과를 제공받은 바 이에 사의를 표한다. 본 연구는 성균관대의 한국동해안의 총체적 해변과정 연구를 위한 기초연구로서 수행되었다.

참고문헌

- 과학기술처, 1992. 동해안의 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(I).
- 과학기술처, 1994. 동해안의 항만매몰 및 해안변형에 관한 연구(III).
- 해운항만청, 1996. 長期波浪算出資料集.
- Caldwell, J., 1956. Wave action and sand movement near Anaheim Bay, California Tech.
- Davis, R.A. and Hayes, M.O., 1972. Comparison of ridge and runnel systems in tidal and non-tidal environment. *J. Sediment. Petrol.*, **42**, 413-21.
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries. In : Cronin, L.E. (ed.), *Estuaries Research*, **2**, 3-22.
- Inman, D.L. and Bagnold, R.A., 1963. Littoral processes. In *The Sea*, ed. Hill, M.N., **3**, 529-33. Interscience, New York.
- Komar, P.D., 1976. *Beach processes and sedimentation*, Prentice-Hall.
- Longuet-Higgins, M.S., 1963. The effect of non-linearities on statistical distributions in the theory of sea waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.17, Part 3, pp. 459-480.
- Longuet-Higgins, M.S., 1983. On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, Vol. 389, pp. 241-258.
- Sverdrup, H.U. and Munk, W.H., 1947. *Wind, sea and swell : Theory of relation for forecasting*, U.S. Navy Hydrographic Office Publ. 601, 44 p.