

해일고를 고려한 낙동강 하구역의 파랑변형 수치모의

유창일* · 윤한삼** · 류청로* · 김도삼***

*부경대학교 해양공학과, **부경대학교 해양산업개발연구소, ***한국해양대학교 토목·환경시스템공학부

Numerical Simulation of Wave Transformation considering the Storm Surge Height at the Nakdong Estuary

CHANG-ILL YOO*, HAN-SAM YOON**, CHEONG-RO RYU*, DO-SAM KIM***

**Dept. of ocean Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea*

***Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National University, Busan, Korea*

****Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea*

KEY WORDS: Nakdong Estuary 낙동강 하구역, Storm Surge Height 해일고, Wave Transformation 파랑변형, Numerical Simulation 수치모의, Wave Energy Balance Equation 에너지평형방정식

ABSTRACT: 본 연구에서는 낙동강 하구역 해역에서의 폭풍 해일의 특성 및 이를 고려한 외해 입사파랑특성을 고찰하고 연안사주 전면의 입사파랑과 퇴적 특성과의 상호 관계를 고찰하였으며, 천해역의 파랑변형을 예측할 수 있는 다방향 불규칙파 모형을 구성하고 폭풍 해일고를 수심조건에 고려함으로써 하구역 해역에서의 파랑 변형계산을 2차원 평면수치모의실험을 수행하였다. 낙동강 하구역에서 서측에 위치하는 진우도 전면해역이 무명도 전면해역보다 약 1.0배에서 2.0배 크게 파고분포를 나타내었다. 이는 입사하는 파랑의 공간 분포가 사주전면에서 공간적으로 차이가 남을 나타내는 것으로 사주의 퇴적작용에 영향을 줄 것이라고 판단된다.

1. 서 론

전지구적 이상기후변화로 인해 재해발생빈도가 증가함과 아울러 그 규모 또한 대형화되는 추세이다. 우리나라의 경우 최근 10년간(1993-2002)의 재해발생 상황을 원인별로 살펴보면 총 1216회의 재해가 발생하였으며, 호우로 인한 피해는 469회, 태풍으로 인한 피해는 309회, 위의 2가지 요인의 복합적인 피해가 전체 피해의 64.0%를 차지하고 있다(해양수산부, 2003). 특히 하절기에 열대성 저기압인 태풍의 진로에 위치한 우리나라의 경우 매년 이와 같은 태풍의 영향으로인해 막대한 물질/인적 피해를 받아온 것이 현실이다.

또한 원인별로 재해를 분류해 보면 기존에는 바람에 의한 건물 및 기물 파손, 집중호우로 인한 침수피해 등이 주를 이루었으나, 최근 들어서는 폭풍해일로 인한 해안지역의 침수피해가 발생하고 있어 이에 대한 연안재해방재대책이 시급한 실정이다.

그 중 2003년 9월 한반도에 상륙한 제 14호 태풍 "매미"는 우리나라의 남해안을 중심으로 연안·해안에 막대한 경제적, 사회적인 피해를 입힌 것으로 나타났다. 이번 피해는 태풍 이동으로 인한 폭풍해일의 연안침입으로 연안지역에 위치한 민가 및 상가, 공단 등에 엄청난 인명과 재산 피해를 발생시켰으며, 특히, 경상남도 마산, 부산의 녹산공단, 송도·광안리·해운대·송정해수욕장, 대변항 등에서 폭풍 해일에 의한 침수 피해가 컸던 것으로 보고된 바 있다(행정자치부, 2003).

본 연구대상 지역인 낙동강 하구역은 연안사주가 발달해 있어 외해 입사파랑에 의한 직접적인 피해가 크지 않을 것으로 보이

나, 실제로 해일 범람으로 인한 주변 시설물의 침수 및 파괴로 인한 주변 공단의 경제적 손실이 큰 것으로 나타났다.

지형적 특성상 낙동강 하구역은 대규모 하천인 낙동강으로부터의 하천수 유입과 외해 해양물리환경 영향인자인 조석 및 파랑의 상호작용으로 대체로 수심이 얕은 퇴적지형이 장기간에 형성되어온 전형적인 하구 형태를 이루고 있다(부산광역시, 1999).

그러나 낙동강 하구역은 1934년 녹산 수문의 건설과 1987년 하구둑 완성, 2000년 들어서 녹산 및 신호 공단 조성사업과 명지주거지역 조성을 비롯한 크고 작은 해안매립공사가 실시되고 있는 상태이며, 2011년 완공을 목표로 건설되는 부산 新항만과 같은 대규모 항만시설 및 산업 및 주거시설의 개발로 인해 해안 지형 변화의 포텐셜이 증가하고 있는 상태이다.

이에 본 연구에서는 조건대가 넓게 분포하는 하구해역인 낙동강 해역에서의 폭풍 해일의 특성 및 이를 고려한 외해 입사파랑 특성을 고찰하고, 연안사주 전면의 입사파랑과 연안사주 퇴적 특성과의 상호 관계를 고찰해보고자 한다. 이를 위해 굴절, 회절, 천수, 쇄파 변형의 고려가 가능한 다방향 불규칙파 모형을 구성하고, 폭풍 해일고를 수심조건에 고려함으로써 하구역 해역에서의 파랑변형계산을 수행하고자 한다.

2. 낙동강 하구역의 해역특성

2.1 해양물리환경특성

국립해양조사원(2004)의 자료를 이용하여 연구대상해역의 조류특성을 분석해 보면, 창조류는 감천항 부근으로부터 가덕도

남측으로 흐르고, 낙조류는 대체적으로 창조류와 반대방향으로 흐르는 것으로 나타났다. 감천항 부근에서 창조류 유속은 82 cm/sec 내외, 낙조류는 93 cm/sec이며, 오지·녹산 지역의 진우도 전면에서 창조시 유속은 40 cm/sec, 낙조시는 45 cm/sec 정도이다. 또한 다대포항 부근의 조류는 반일주조형으로 천해 지역의 지형효과로 인하여 지구에 의한 효과는 감소되고 해저의 마찰용력에 의한 효과가 커지므로 다대 내만으로 흐름은 미약하여 특별한 해수유동 현상은 생기지 않는다. 더구나 기조사된 조류도(국립해양조사원, 2004)에 나타난 가덕도 주변해역 창·낙조시 최강유속은 0.1~1.1 m/sec 정도이다. 조석의 대조차는 1.8m이며, 소조차는 1.3m, 그리고 평균해면은 0.95m이다.

또한 낙동강 하구역으로 진입하는 파랑은 SSW방향을 가진 성분들이 70%정도이며, 기존 녹산공단 조성시 사용되어진 심해설계파고는 파향 S10°W, 파고 10m, 주기 15sec이었다. 수산청(1988)의 부산, 다대포 등의 연구대상해역에서의 심해설계파산정 결과는 Table 1과 같다.

Table. 1 Design wave conditions at this study area

Wave dir.	SSW		SSE	
	Wave height/period	Hs(m)	Ts(s)	Hs(m)
10	7.7	11.0	3.9	7.0
20	8.8	12.0	4.5	8.0
Return	9.4	13.0	4.8	8.0
period	10.2	14.0	5.2	9.0
50	10.7	14.0	5.4	9.0
70	11.2	15.0	5.7	9.0
100				
Source	Typhoon		Typhoon	

2.2 퇴적지형특성

연구대상해역인 낙동강 하구역은 상류에서 운반된 토사가 연안류와 조류의 영향으로 삼각주가 형성된 지역으로, 크게 하중도군과 사주군으로 구분된다. 상류부는 하중도군이 하류부는 사주군이 분포하고 있으며, 이들 사이에는 갯벌이 분포한다. 이러한 분포형상은 시간의 변화에 따라 활발히 진행되며 그 면적 또한 해안선의 범선방향으로 복잡하면서도 크게 발달하고 있다. 따라서 낙동강 하구역은 대량의 하천수 유입 및 입사 파랑의 상호작용으로 퇴적지형변화를 가속화시키며 그러한 지형변화로 인해 파랑작용, 해저지형 변화가 계속해서 복잡, 다양하게 발생하고 있다(부산광역시, 1999).

이러한 낙동강 하구 일대의 사주 발생변천과정을 연도별로 도식화하면 Fig. 1과 같다. 아래와 같이 육상으로부터 하천유입을 제어하는 시설물(수문)의 건설 시기에 맞추어서 사주군의 형성이 서측으로부터 동측으로 이동하고 있으며, 현재는 다대포 전면해역에서의 사주발달이 활발한 것을 알 수 있다. 다시 말해 수문건설과 매립으로 인한 지형변화가 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2은 낙동강 하구역의 인공위성 촬영 사진이다. 사진의 왼쪽 중앙에서부터 녹산공단, 신호공단, 명지주거단지, 을숙도

가 위치하며, 그 하단에 놀차도, 진우도, 장자도, 새등, 무명도가 있다. 그림에서 알 수 있듯 낙동강 하구둑 전면해역의 주수로를 제외한 나머지 대부분의 해역은 수심이 상대적으로 낮아 회개 나타난다. 또한 사주의 위치적 특성을 살펴 볼 때, Fig. 1에서도 알 수 있었듯이 진우도, 장자도, 무명도의 순으로 외해방향으로 경사지게 전진한 모양을 나타내고 있음을 알 수 있다.

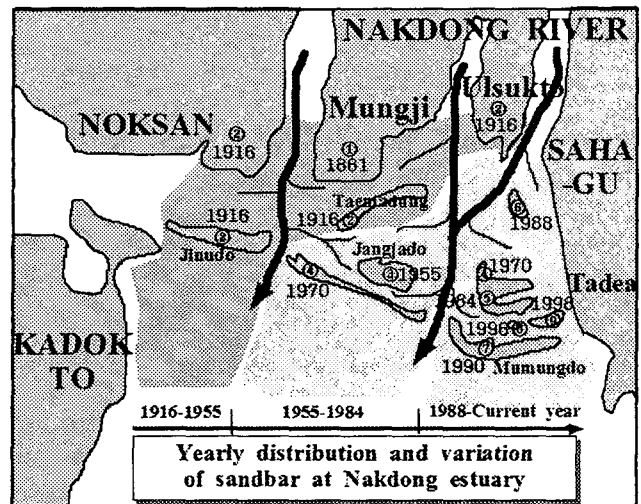


Fig. 1 Yearly distribution and variation of sandbar(Busan Metropolitan City, 1999)

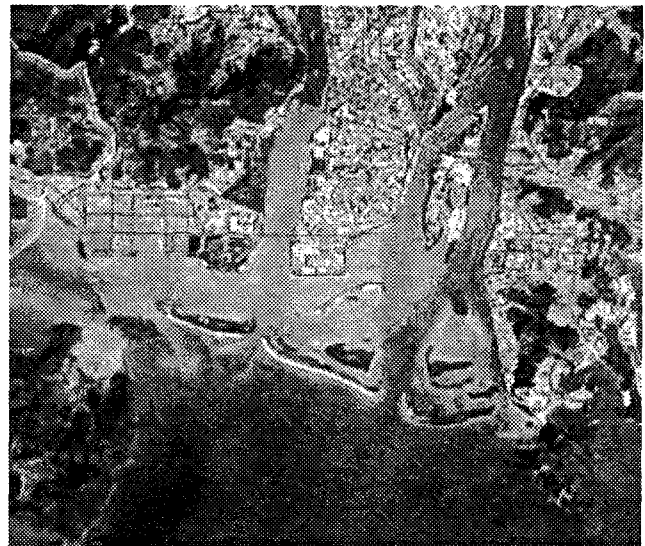


Fig. 2 Aerial Photograph of the Nakdong Estuary

3. 파랑변형 수치모의

3.1 실험모형 개요

본 연구에서 사용되어진 파랑변형모형은 다방향 불규칙파 변형모형으로서 굴절, 회절, 천수, 쇄파 변형의 고려가 가능한 모형이다. 이 모형의 기본방정식은 Karlsson(1969)의 에너지평형방정식이며 이는 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \nabla \cdot (S\vec{V}) - Q = 0 \quad (1)$$

$$\nabla = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial f}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right\}$$

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_f \\ V_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_g \cos \theta \\ C_g \sin \theta \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{pmatrix}$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right\}$$

여기서, $S(=S(f, \theta))$ 는 파랑스펙트럼 에너지밀도, Q 는 외부에너지 출입, \vec{V} 는 성분 에너지 전파속도 vector, C_g 는 군속도, C 는 파속, k 는 파수, d 는 수심, f 는 주파수, θ 는 방향을 나타낸다.

위 식(1)은 1) 파의 상태는 변하지 않는다($\partial S / \partial t = 0$), 2) 성분파의 주기는 변하지 않는다($\partial f / \partial t = 0$), 3) 외부에너지의 출입은 없다($Q = 0$)고 가정하면, 식 (2)와 같이 유도되며, 본 천해변형 계산모형은 이 방정식에 기초하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(SV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(SV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(SV_\theta) = 0 \quad (2)$$

식(1.2)는 유한차분법을 사용하여 풀 수 있으며, 입사경계에서는 입사파랑의 파향(평균파향), 파고(유의파고) 및 주기(유의파 주기)에 대응되는 방향스펙트럼을 바탕으로 성분파 에너지를 분할·입력시키는 바, 본 모형에서 사용한 방향스펙트럼은 식(3)~식(8)에서 제시한 바와 같이 주파수 스펙트럼으로는 Bretschneider-Mitsuyasu형을, 방향분포함수로는 Mitsuyasu형을 사용하는 방향스펙트럼을 적용하였다.

$$S(f, \theta) = S(f) G(f; \theta) \quad (3)$$

$$S(f) = 0.25H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (4)$$

$$G(f; \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (5)$$

$$G_0 = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \quad (6)$$

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & : f \geq f_p \end{cases} \quad (7)$$

$$f_p = 1/(1.05T_{1/3}) \quad (8)$$

여기서, $S(f)$ 는 주파수 스펙트럼, $G(f; \theta)$ 는 방향분포함수, Γ 는 감마함수(gamma function), f_p 는 peak 주파수, S_{\max} 는 방향집중도 변수를 나타낸다.

또한 측면경계에서는 경계 내외의 방향스펙트럼을 동일하게 주며, 육지측에서는 파에너지가 육지에 완전 흡수되는 것으로 한다. 수치해는 계산영역내 각 격자점에서 성분파의 에너지밀도 $S(f, \theta)$ 로 산출되고 이를 바탕으로 식(9)~식(11)과 같은 관계를 이용하여 파고, 주기 및 파향을 산출한다.

$$H_{1/3} = 4 \left\{ \int_0^\infty \int_0^{2\pi} F(f, \theta) d\theta df \right\}^{1/2} \quad (9)$$

$$T_{1/3} = 1.22 \left\{ \int_0^\infty \int_0^{2\pi} F(f, \theta) d\theta df / \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f^2 F(f, \theta) d\theta df \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ \frac{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} F(f, \theta) \sin \theta d\theta df}{\int_0^\infty \int_0^{2\pi} F(f, \theta) \cos \theta d\theta df} \right\}^{1/2} \quad (11)$$

한편, 파랑이 해안으로 접근함에 따라 발생하는 쇄파는 상기 방법에 의하여 각 격자점에서 계산된 파고가 식(12)으로 표현되어지는 Goda(1975)의 쇄파관계식으로 계산된 값보다 크지 않은 것으로 하여 고려된다.

$$H_b/L_0 = A \{ 1 - \exp[-1.5\pi(h_b/L_0)(1 + K(\tan \beta)^s)] \} \quad (12)$$

여기서, H_b 는 쇄파파고, L_0 는 심해파장, A 는 0.12~0.18, K 는 15, s 는 4/3, h_b 는 쇄파수심, $\tan \beta$ 는 해저경사를 나타낸다.

3.2 계산입력조건

본 파랑수치모형실험에서 대상으로 하는 계산영역은 낙동강 하구역을 충분히 포함하는 심해영역까지로 제한하였다. Fig. 3은 파랑수치모형실험을 위한 계산영역의 수심도를 나타내는 것으로 이를 한 개 격자간격 70m의 228×356(=81,168개)의 정방형 격자로 구성되어진 계산영역을 설정하였다.

본 연구 대상해역에서의 해일고는 Fig. 3과 같이 일본 항만공학기술연구소의 Kawai(2004)가 마산의 폭풍해일 피해를 조사를 위한 수치모델링에서 얻은 자료로부터 획득하였는데, 본

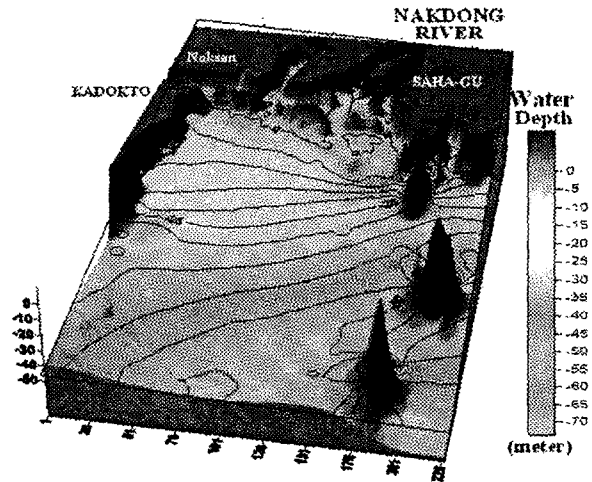


Fig. 3 3-Dimension Water Depth Diagram

Fig. 4 Distribution Maximum Storm Surge(Kawai, 2004)

연구 대상해역에서의 해일고 값은 Fig. 3의 전체 계산영역에서 대해서 외해 경계영역분근에서는 1.4m, 하구역 상부 육지경계에서는 약 1.6m의 값을 가지는 것으로 입력조건을 설정하였다. 중간계산영역에서 대해서는 두 수치값을 선형보간하여 입력하였다. Fig. 4에서 직사각형 부분이 본 파랑수치모형실험의 실험 대상영역에 해당한다.

또한 외해입사파랑조건에 대해서는 해운항만청(1993)의 '항만시설물설계기준서'에 제시된 심해파 제원 중에서 재현기간 100년 빈도의 H_S 와 T_S 를 실험입사파랑제원으로 수치모의하였다.

입사하는 파랑의 주파향은 대상해역에서의 태풍의 진행경로를 고려하여 S방향과 S22.5°W의 두 가지 입사파랑조건에 대해서 고려하였다. 대상해역에서의 수심조건은 수치해도로부터 획득되어진 입력자료에 평균해면(0.95m)를 더하여 고려하였고, 육상부근에서의 세부조건대 수심자료는 해상수심측량자료를 추가하여 보완하였다. Fig. 5는 해상수심측량자료를 획득하기 위한 현장관측사진이다.

실험Case는 1) 대조평균고조위만을 고려할 시(CASE-1), 2) 대조평균고조위에 해일고(storm surge height)를 더한 수심조건을 고려한 경우(CASE-2)의 2가지 실험 Case에 대해서 실시하였다.

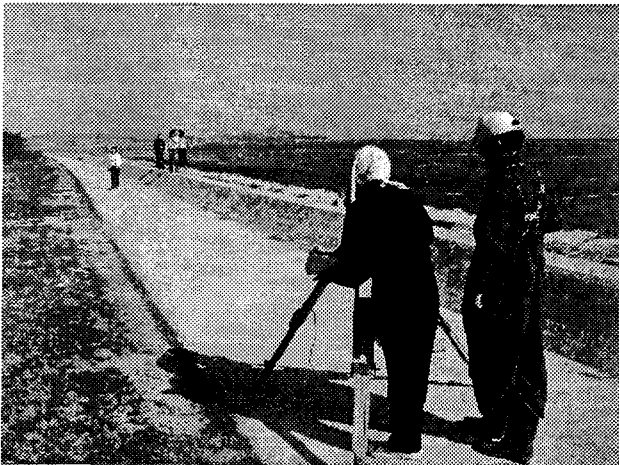


Fig. 5 Photos for depth survey of this site

Table. 2 Distribution of calculated wave height for 2 CASEs

Division	Front-sea of barrier island			
	Jinudo	Saedung	Mumyongdo	
CASE-1	Wave height distribution	4.1~3.5	3.5~1.5	2.6~1.4
	%	158-250%	107-135%	100%
CASE-2	Wave height distribution	3.6~3.0	2.9~1.4	2.0~1.4
	%	180-214%	100-145%	100%

4. 결과 및 고찰

상술한 두 실험CASE에 대한 낙동강 하구역에서의 파랑변형 수치실험 결과는 다음 Table 2와 같이 제시할 수 있다.

계산되어진 결과를 살펴보면 CASE-1에서 진우도 전면해역에서의 파고분포는 4.1-3.5m, 새등 전면에서는 3.5-1.5, 무명도 전면해역에서는 2.6-1.4m의 최대-최소범위를 나타내었다. 무명도에 대한 진우도와 새등의 파고비를 계산해 보면 진우도의 경우158-250%, 새등의 경우 107-135%의 범위를 나타내었는데, 이를 통해 진우도 전면해역(낙동강 사주군의 전면의 서측해역)에서의 파고비가 무명도 전면해역(낙동강 사주군의 전면의 동측해역)보다 약 1.5배에서 2.5배 상승하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

또한 CASE 2에서는 진우도 전면해역에서의 파고분포는 3.6-3.0m, 새등 전면에서는 2.9-1.4, 무명도 전면해역에서는 2.0-1.4m의 최대-최소범위를 나타내었다. 무명도에 대한 진우도와 새등의 파고비를 계산해 보면 진우도의 경우 180-214%, 새등의 경우 100-145%의 범위를 나타내었는데, 이를 통해 진우도 전면해역(낙동강 사주군의 전면의 서측해역)에서의 파고비가 무명도 전면해역(낙동강 사주군의 전면의 동측해역)보다 약 1.0 배에서 2.0배 상승하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

그러나 본 실험에서 적용되어진 해일고의 고려방법에 있어서 단순히 수심에 해일고를 더하는 방법의 경우 계산상의 정수면이 고정상태에서 해일고 만큼 수심이 깊어지는 효과로서 작용함으로써 CASE-1에 비해서 CASE-2가 천수효과 및 쇄파효과가 작게 작용함에 따라서 수심변화에 따른 파고상승효과가 작게 나타난 결과로 판단된다.

동일한 실험조건에서 연안사주 전면에서의 파고분포가 차이를 나타내는 것은 본 대상해역내로 입사하는 파랑의 작용이 외해와 접한 사주군에 대해서 미치는 영향이 차이가 남고 이로 인해 토사의 이동 및 퇴적/침식작용에 큰 영향을 미칠 것이라는 것을 추측할 수 있다. 즉, 진우도 전면 해역이 무명도 전면해역보다 파랑에너지의 집중도가 크다는 것을 알 수 있다.

5. 요약 및 차후 과제

본 연구에서는 낙동강 하구역 해역에서의 폭풍 해일의 특성 및 이를 고려한 외해 입사파랑특성을 고찰하고, 연안사주 전면의 입

사파랑과 퇴적 특성과의 상호 관계를 고찰하였으며, 천해역의 파랑변형을 예측할 수 있는 다방향 불규칙파 모형을 구성하고, 폭풍 해일고를 수심조건에 고려함으로써 하구역 해역에서의 파랑 변형계산을 2차원 평면수치모의실험을 수행하였다. 이상에서 얻어진 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 낙동강 하구역에서 서측에 위치하는 진우도 전면해역이 무명도 전면해역보다 약 1.0배에서 2.0배 크게 파고분포를 나타내었다. 이는 입사하는 파랑의 공간분포가 사주전면에서 공간적으로 차이가 남을 나타내는 것으로 사주의 퇴적작용에 영향을 줄 것이라고 판단된다.

즉, 상대적으로 파랑에너지가 크게 입사하는 진우도가 그렇지 않은 지역보다 침식이 많이 발생하며, 침식된 토사는 연안흐름에 따라서 진우도 전면 및 새등 전면 해역을 따라서 상대적으로 입사파랑에너지가 작은 무명도 전면해역으로 이동 및 퇴적될 것으로 추측된다.

(2) 일반적으로 사용되어지는 파랑변형모형실험에 폭풍해일의 발생으로 해일고를 고려할 시 수심에 단순히 해일고를 더하는 계산방법에는 보다 신중한 검토가 요구된다고 판단되며 이를 해결하기 위한 수치기법의 개발이 요구되어진다.

(3) 위의 두 가지 결과를 종합/정리하면 낙동강 하구역과 같이 수심이 얕고 조간대가 넓게 분포하는 하구역의 경우 파랑 입사 시 상대적으로 파랑에너지가 큰 지역에는 침식작용이, 파랑에너지 작은 지역에는 퇴적작용이 발생할 것으로 생각되어진다.

따라서 기존 낙동강 하구역에서의 사주 발달 및 형성 기원을 찾기 위한 기초적 연구측면에서 본 연구와 같이 파랑에 기인한 사주의 공간특성과의 상호관계에 대한 보다 면밀한 검토가 요구되어진다고 판단된다. 또한 낙동강 하구역의 지형변화로 인한 생태·환경적 측면과 해양방재측면에서 해일고에 의한 피해지역을 예측하고 방재대책을 세울 수 있는 토대가 마련되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 국립해양조사원 (2004). 2004 조석표.
- 부산광역시 (1999). 낙동강하구일원 환경관리기본계획수립용역 중간보고서.
- 수산청 (1988). 해역별(동해·남해) 심해파 추산 보고서.
- 행정자치부 국립방재연구소 (2003). 2003 태풍 매미 피해 현황 조사 보고서.
- 해양수산부 (2003). 연안침식방지 종합대책 수립을 위한 조사 연구(II).
- 해운항만청 (1993). 항만시설물설계기준서.
- Karlsson, T. (1969). "Refraction of continuous ocean wave spectra", Journal of waterway, Ports, Harbors and Coastal Engineering, ASCE, 95, WW4, pp.275-287.
- Goda, Y. (1975). "Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking", Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol.14, No.3, pp59-106(in japanese).
- Kawai, H. (2004). "Field investigation of the storm surge disaster

in Masan caused by Typhoon Maemi and Hindcase of the Storm Surge by Numerical Model", Invitation Seminar of Dept. of Ocean Eng., PKNU.