

## 새만금 4호 방조제 완성 전·후 HF 레이다로 관측된 표층 M<sub>2</sub> 조류의 변화

김창수 · 이상호\* · 손영태 · 권효근 · 이광희 · 김영배<sup>1</sup> · 정우진<sup>1</sup>

군산대학교 해양학과, 새만금환경연구센터  
<sup>1</sup>국립해양조사원

### Changes of Surface M<sub>2</sub> Currents as Observed by HF Radar Before and After Saemangeum Fourth Tidal Dyke Closing

CHANG-SOO KIM, SANG-HO LEE\*, YOUNG-TAE SON, HYO-KEUN KWON, KWANG-HEE LEE,  
YOUNG-BAE KIM<sup>1</sup> AND OU-JIN JEONG<sup>1</sup>

Department Oceanography, SERC, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea  
<sup>1</sup>National Oceanographic Research Institute, Incheon 400-800, Korea

2003년 6월에 고군산군도와 비응도를 완전히 연결한 새만금 4호 방조제의 완공이 연안역 표층 M<sub>2</sub> 조류분포에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2002년과 2004년에 HF radar로 관측된 유동자료를 분석하였다. 분석에 사용된 자료와 유속계 계류에 의해 관측된 자료는 좋은 일치율을 보였다. M<sub>2</sub> 조류는 관측구역 내에서 반시계방향의 회전성을 보였으며 방조제 완전 체질로 인하여 회전방향이 변경되지는 않았다. 2002년에는 방조제의 미체질 구간을 통해 서쪽으로 향하던 ebb jet가 관측되었지만, 2004년에는 이 흐름이 나타나지 않았다. 방조제 완전체질로 인하여 금강하구 입구부근에서 유속이 증가하였고, 고군산군도 및 방조제 부근에는 유속이 감소하였으며 최강 창조류의 방향이 동서방향에서 남북방향으로 변화되었고 최강 창조류 발생시각이 늦어졌다. 연도 주변해역에서도 최강 창조류 방향이 시계방향으로 변경되었으나 최강 창조류 발생시각은 오히려 빨라졌다. 이러한 M<sub>2</sub> 조류타원 특성의 변화는 방조제 체질의 영향이 연도와 말도를 잇는 지역까지 미치고 있음을 의미한다.

HF radar-derived current data obtained in 2002 and 2004 are analyzed to examine the effects of the completion of the Saemangeum 4th tidal dyke in June 2003, connecting Gogunsan-Gundo and Bieung-Do, on the coastal surface M<sub>2</sub> current pattern. Comparison between the currents by HF radar and current meter mooring showed good agreements. Counterclockwise rotation of the M<sub>2</sub> current in the observed area did not change with the dyke construction. Strong westward ebb jet from the gap of the dyke was observed in 2002 but disappeared in 2004. The complete closing of the dyke gap caused the current speed increase around the mouth of the Keum River estuary, decrease around Gogunsan-Gundo and the dyke, the changes in the direction of maximum current to northward from eastward and the delay of the maximum flood current occurrence around Gogunsan-Gundo and the dyke. Around Yeon-Do, the maximum flood current directed more clockwise and occurred rather earlier. These changes of the M<sub>2</sub> current ellipse characteristics imply that the effects of the dyke construction reached the area connecting Mal-Do and Yeun-Do.

**Keywords:** Saemangeum, Tidal Dyke, HF Radar, Ebb jet, M<sub>2</sub> Current Ellipse

### 서론

황해 남동부에 위치한 새만금 연안역은 금강, 만경강, 동진강 하구를 포함하고 있으며, 넓은 갯벌을 간척하기 위한 방조제 공사가 진행된 곳이다(Fig. 1). 이 해역의 해저 지형은 서쪽으로 갈수록 점진적으로 깊어지는 천해역이고 섬 주변에서는 강한 조류에 의

해 깊어진 지역이 형성되어 있다. 1992년에 총 33 km의 새만금 방조제(tidal dyke) 공사가 착공되어 현재 진행 중이며, 2000년도 이후 새만금 북측(4호) 방조제의 개방구간이 현저히 좁혀졌다. 고군산군도와 비응도를 연결하는 새만금 4호 방조제는 총길이가 11.4 km이며 2003년 6월에 끝막이 공사가 완료되어 해수의 유·출입이 단절되었고, 이 후부터 변산과 고군산군도를 잇는 남측 방조제에 있는 2곳의 개방구간을 통해 해수가 유통되고 있다.

새만금 연안역은 방조제 축조에 따라 해안선, 해저지형, 해수의

\*Corresponding author: sghlee@kunsan.ac.kr

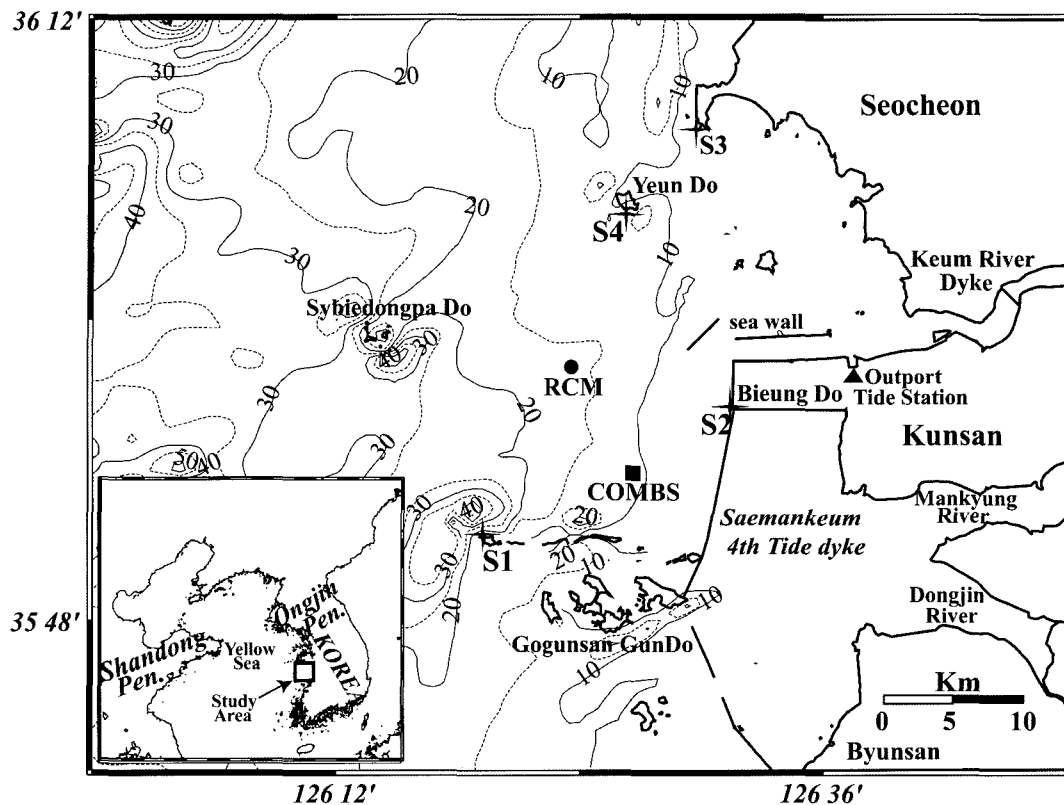


Fig. 1. Map of study area with bottom contours in meter. HF radar system was operated in four stations (S1, S2, S3 and S4) in summer 2002 and 2004 (see Table 1). COMBS and RCM indicate the current meter mooring locations.

순환, 조류 및 해수물성분포 패턴이 인위적으로 변화하고 있다. 이 해역은 해수유동 에너지의 대부분이 조석 및 조류인데, 황해의 조석구조에 의해 조석이 남쪽에서 북쪽으로 전파되는 곳으로서(Ogura, 1933; Choi, 1980; Kantha *et al.*, 1996; Lee and Beardsley, 1999; Kang, 2003), 6.5 m 정도의 대조차 환경이다. 조석형태는 반일주조 형이고, 조류는 왕복성이 우세하다. 창조류는 전반적으로 북동쪽으로 흐르고 반시계방향으로 전류되며, 낙조류는 남서쪽으로 흐른다(국립해양조사원, 2005). 연구해역으로 유입되는 담수는 금강에서 연간 약 60억 ton 내외이며 하계 홍수기(6월~9월)에 연간 방류량의 2/3 정도가 유입된다. 만경강과 동진강의 방류량은 금강의 약 1/6, 1/9 정도인 연간 10억 ton과 7억 ton 내외이다(농어촌진흥공사, 1990; 고 등, 2001). 담수는 연구해역에서 희석·확산되며, 대규모 방류가 발생하였을 때는 북서쪽으로 100km 거리까지 확장하는 저염수가 관측된 바 있다(최 등, 1999).

본 연구해역에서는 인위적인 환경변화에 따른 해수유동과 순환, 물성분포 등에 대한 연구가 진행되어왔다. 권과 이(1999)는 1994년 8월 말에 시작된 인위적 갑문작동으로 인한 금강하구 내의 평균 해수면과 조석 특성변화를 연구하였고, 이 등(1999)과 이 등(2001)은 인위적 담수방류 환경에서의 금강하구 염분구조와 변화를 관측하고 하구유형을 구분한 바 있다. 이 등(1995)과 Lee *et al.* (1999)은 하계 집중 호우시 대량방류에 따른 담수 plume이 허모양의 염분분포를 보이며 북서쪽으로 편향되는 결과를 제시한바 있으며, 신 등(2002)은 북서향의 plume 확장 기작을 3차원 수치모

델을 통해 밝혔다. 한편, 이 등(2003)은 1999년 하계 CTD 관측결과를 분석하여 고군산군도 북쪽에서는 만경·동진강 담수가 방조제 내측에서 4호 방조제 개방구간을 통해 유출되어 금강 담수와 병합되어 염분전선을 형성하고, 고군산군도 남쪽에서는 연안수가 새만금 방조제 내측으로 유입하는 순환체계가 이루어짐을 제시한 바 있다.

Lee(2003)는 2000년 이후 방조제 미체절 구간이 좁아지면서 만경·동진강 하구역으로부터 미체절 구간을 통하여 외해로 향하는 강한 ebb-jet의 흐름을 실시간 연안 관측부이 시스템(COMBS: Coastal Monitoring Buoy System)을 통해 관측한 바 있다. Kang(2002)과 Choi(2001)는 3차원 수치모델을 수행하여 새만금 방조제가 완성되면  $M_2$  분조의 진폭과 위상이 반경 100 km에 이르기까지 유의성 있게 변화되며 방조제 가까이에서는 진폭이 10 cm, 위상이 6분정도 변할 수 있음을 예측한 바 있다. 또한 Choi and Lee(2003)는 수치모델 실험을 통하여 방조제의 축조 단계에 따른 조위변화와 미체절 구간을 통한 흐름장 변화를 예측한 바 있다.

본 연구해역에서의 조류분포 특성과 변화에 대한 연구는 해역이 넓고 대규모적 환경변화가 많이 가해지는 까닭에 대부분의 기존 연구자들이 주로 수치모델을 이용하여 연구하였지만 수치모델로 실제 해수유동의 변화 및 공간적 특성을 규명하는 데는 제약 요소들이 많이 있다. 최근에는 넓은 해역에 걸쳐 동시적으로 조밀한 간격의 해수유동을 조사할 수 있는 장비가 개발되었고 연안역에서 High-frequency radar(HF radar)를 이용하고 있으며, 본 연구

에 앞서 새만금 4호 방조제가 완전 체절되기 전인 2002년에 HF radar와 COMBS에서 관측된 자료를 분석하여 방조제 체절과정에서 변화되는 조류 특성과 순환체계가 보고되고 있다(Son *et al.*, 2006). 본 연구의 목적은 2002년과 2004년에 새만금 연안역에서 HF radar에 의해 획득된 광역 동시 해수표면 유동관측 자료를 분석하여 새만금 4호 방조제 체절 전과 후의 조류분포 특성을 비교하여 인위적 환경변화에 따른 조류변화를 살펴보고자 한다.

## 자료 및 방법

### HF radar 관측

HF radar는 고주파를 이용하여 육지에서 해면을 향하여 전파를 발사하고 ‘Bragg scattering effect’에 의해 되돌아오는 전파에서 Doppler 효과에 의한 주파수 변화를 분석하여 표층해수유동에 대한 정보를 얻을 수 있다(Barrick *et al.*, 1977). HF radar는 영국과 미국 등지에서 활용되고 있으며(Prandle, 1987), 연안역 전선, 담수 plume 거동, 조석 잔차류 등과 같은 연안역의 복잡한 해수유동장 변화를 모니터링하기에 매우 유용하다(Knight and Howarth, 1999; Haus *et al.*, 2000; Hisaki *et al.*, 2001; Kovačvič *et al.*, 2004). 군산대학교 새만금 환경연구센터(SERC)는 2002년도 하계에 HF radar(Codar Ocean Sensors, 25 Mhz) 장비를 이용하여 시험적으로 연구해역의 해수유동장을 관측한 바 있으며(Son *et al.*, 2003; Son *et al.*, 2006), 새만금 4호 방조제 체절 이후 2004년 2월부터는 국립해양조사원과 공동으로 동일한 규격의 장비를 확대 설치, 운용하여 실시간으로 광해역 표층해수유동을 관측하고 자료를 획득하였다. 2002년에는 비응도(S2)와 연도(S4)에서 원격관측소(remote site)가 동시에 운영되었으며, 2004년에는 말도(S1), 비응도(S2) 그리고 서천 마랑리(S3) 세 곳에서 동시에 운영되었다(Fig. 1).

각 원격관측소에서는 방사형(10° 간격)으로 일정한 거리간격(cell size)에서 방사형 유속자료(radial vector)가 획득되며, 두 곳 이상의 관측소에서 획득된 방사형 유속정보를 벡터합성하고 이를 다시 일정한 간격의 격자망에 대하여 내삽하여 표층 해수의 속도장(이하 HF-유동)을 생성한다. 2002년도에는 관측거리간격을 1 km, 격자간격을 2 km로 설정하였었고, 2004년도에는 거리간격과 격자간격을 1.5 km로 설정하여 속도장 자료를 생산하였다(Table 1). 각 관측소에서 획득되는 방사형 유속정보는 날씨(바람), 해수면상태 및 공급되는 전원의 안정도 등에 의하여 자료의 양(감지구역)과 질이 변화된다. 2002년과 2004년에 관측된 자료에서 해수유동이

감지된 연속적 시간과 감지구역을 기준으로 사용가능한 자료의 양과 질에 대한 일차적인 판단을 하였으며, 이를 기준으로 해수유동장의 특성분석에 사용될 자료의 기간을 선정하였다. 이러한 과정을 거쳐 본 연구에서 사용된 자료는 2002년 7월 8일부터 8월 1일 까지 약 23일간, 그리고 2004년 9월 21일부터 11월 6일까지 45일간이다.

### 유속계에 의한 관측

HF radar에 의해 관측된 유속자료를 비교·검증하기 위해 2004년 11월 17일부터 7일간 HF radar 관측구역의 중앙부에 유속계(RCM9, Aanderaa)를 해면 하 2 m에 계류하여 10분 간격으로 관측하였다. 2002년의 경우에는 군산대학교 새만금환경연구센터가 2001년부터 운영하고 있는 연안역 실시간 관측부의(COMBS)에 장치된 유속계(DCS, Aanderaa)에 의해 해면아래 1.5 m에서 10분 간격으로 관측된 유속자료를 사용하였다(Fig. 1, RCM, COMBS).

### 자료처리

표층유속 검정을 위해 계류된 유속계의 위치들은 HF-유동 격자점 위치와 다르다. 두 자료의 비교·검정을 위하여 먼저 공간적 위치를 일치시켜야 하므로 격자점으로 구성된 HF-유동 자료를 유속계 관측지점의 위치에 대해 내삽하였다. 즉, 유속계 계류위치와 가장 근접한 HF-유동 격자점 네 곳의 자료를 공간에 대해 거리 역비례 보간법을 사용하여 유속계 계류위치에서의 유동 자료를 생성하였다. 2004년 관측된 30분 간격의 HF-유동 자료는 각 격자점마다 시계열 자료로 재구성하고 매 정시 자료를 기준으로 weight를 0.5, 정시 앞뒤 자료는 0.25의 weight를 적용한 가중평균을 사용하여 1시간 간격의 해수유동 자료를 생성하였다. 한편, 10분 간격으로 얻어진 유속계 자료는 이동평균을 통해 1시간 간격의 자료로 재생산하였으며, HF-유동 자료의 관측시각과 일치시켰다.

관측된 해수 유동자료는 조석주기와 장주기 성분을 분리하기 위하여 관측공간에 대한 시계열 자료에서 각 격자점마다의 HF-유동 시계열 자료를 만들었다. Low-pass Filter(Thompson, 1983; Tide-Killer, cut-off period 40hr)를 적용하여 장주기성분을 추출하였으며 다음으로 원본자료에서 장주기 성분이 제거된 속도성분을 구하여 조화분석에 사용하였다. 2002년에 관측된 HF-유동자료는 14.5 일 동안 자료를 사용하여 조화분석을 하였고, 2004년에는 29일간의 조류성분 자료를 조화분석을 통해 조화상수를 구하였다(Easton, 1977). 분석된 각 격자점에서의 조화상수를 이용하여 조류의 특성인 조류타원도, 회전방향, 장축의 방향 그리고 타원운동의 위상을

**Table 1.** Summary of data used in this study

Item	Duration	Location			Time interval	Setting		Source
		Site	Lat.	Lon.		Cell size	Radial distance	
HF radar-derived current	2002 July.8 ~ Aug.1	S2	35.946	126.525	1 hr.	1 km	30 km	KNU SERC Son <i>et al.</i> (2003)
		S4	36.080	126.430				
	2004 Sept.21 ~ Nov.6 Nov.17 ~ 23	S1	35.858	126.315				
		S2	35.946	126.525				
Current by mooring	2004 Nov.17 ~ 23	S3	36.134	126.494	10 min.	2 m below sea surface		SERC
	2002 June 1 ~ July 30		35.957	126.397	10 min.	1.5 m below sea surface		COMBS SERC

구하였으며(Soulsby, 1990) 조류타원 특성의 공간적 분포를 살펴 보았다.

### 결 과

#### HF radar에 의해 관측된 해수유동장

Fig. 2는 새만금 4호 방조제 체절 전인 2002년 7월 24일(월령 13.5일)에 HF radar로 관측된 표층의 창·낙조류 분포이다. 창조류는 북동쪽으로 흐르고 미체절된 구간으로 유입되는 흐름을 보였으며, 낙조류는 남서쪽으로 향하는 흐름을 보였다. 고군산군도 북측연안 주변에서는 조류가 동서방향으로 흘러 동서방향으로 길게 분포하는 섬들에 의해 흐름 방향이 제어되고 있음을 보여준다. 특히, 낙조시에 미체절된 방조제의 좁은 구간을 통해 유출되는 강한 ebb jet 형태의 흐름이 뚜렷하게 나타났으며, jet 주변에서는 조류의 방향과 세기가 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 흐름장의 변화와 분포 특성으로 보아 HF radar를 이용한 간접적 관측결과는 조류가 우세한 연구해역의 해수유동을 충분히 반영하고 있음을 제시한다.

새만금 4호 방조제 체절 후인 2004년 9월 28일에 HF radar로 관측된 표층유동의 예를 3시간 간격으로 표현하면 Fig. 3과 같다. 이 시기는 월령이 Fig. 2와 같은 13.5일로서 보름 전 1일에 해당한다. 관측해역 전반에 걸쳐 창조류보다 낙조류가 더 큰 유속을 보이며 전체적인 흐름분포가 2002년 관측결과와 유사하였다. 한 조석주기 동안 조류는 반시계방향으로 회전하는데 이러한 조류 회전성은 2002년과 동일하였다. 한편, 창조 초기(11시)에 연도와 금강하구 입구 사이 해역에서는 흐름이 수렴하는 분포를 보이고 낙조 초기(17시)에는 반대로 발산구조의 흐름을 보였다. 유속이 증가하여 창조류가 강해진 때에는 고군산군도 북측해역과 새만금 4호 방조제 부근에서 금강하구 입구쪽으로 향하여 수렴하는 흐름 분포가 나타나고 낙조류는 발산하는 분포를 보였다. 이 지역의 창조류 방향은 북-북동쪽으로 향하여 2002년의 동서방향 창조류에 비해 흐름방향이 시계방향으로 확연히 달라졌음을 보여준다.

방조제 체절에 따른 해수유동의 변화를 자세히 살펴보기 위해

2002년까지 미체절된 방조제 개방구간 외측에 유속 비교점을 선정하여(Fig. 2참조) 체절 전과 후에 관측된 HF-유동의 분산도를 비교하였다(Fig. 4). 방조제가 체절되기 전에는 낙조류가 주로 서쪽과 남서쪽으로 향하였으며 창조류는 북동쪽으로 향하였다. 방조제가 체절 된 후에는 동서방향의 흐름이 미약해지고 남북방향으로의 왕복성이 강해져 방조제와 평행한 흐름으로 변경되었다. 한편, 2002년에 관측된 조류분산도에서 낙조류가 창조류보다 현저히 강하고 흐름방향이 45°이상 분산되고 있었다. 이러한 낙조류의 변동성은 Lee(2003), Son *et al.*(2003)과 Son *et al.*, (2006)도 COMBS 유속자료를 분석하여 보고하였는데, 낙조류는 초기에 서북서쪽으로 흐르다가 후기에는 남서쪽으로 향하는 두 단계 변동성을 보이는데 낙조중반에 최대유속이 나타나며 서쪽으로 향하는 현상을 관측한 바 있다. Lee(2003)는 조류가 증가하는 낙조중반에 남서쪽에서 서쪽으로 오히려 시계방향으로 회전한 현상에 근거하여 낙조류의 변동성은 방조제가 미체절된 좁은 구간을 통해 유출되는 강한 ebb jet에 의한 것으로 해석한 바 있다. Fig. 2에 제시된 낙조류 분포에서 이러한 ebb jet가 형성되고 있음을 확인할 수 있다.

#### 유동 비교검정

전자기파를 이용하여 간접적으로 해수유동을 관측한 HF-유동은 실제 수중에서 유속계에 의해 관측된 유동과 비교·검증되어야 신뢰성을 높일 수 있다. 2002년과 2004년에 COMBS와 RCM에 의해 관측된 유동과 HF-유동 vector를 동서, 남북 방향의 유속성분으로 나누어 비교하였다(Fig. 5).

2002년의 COMBS에서 관측된 유동 성분을 Y로 하고 HF-유동 성분을 X로 하여 일차식에 의한 상관성 분석을 해보면, 동서방향의 유속이 남북방향 유속보다 큰데 이는 미체절된 구간을 통한 해수유출입의 영향으로 해석된다. 동서방향 유속은  $Y=1.07X-0.061$ , 상관계수  $R=0.91$ , 표준편차  $RMS=12.98$  cm/s이었으며, 남북방향 유속은  $Y=0.993X-0.246$ ,  $R=0.86$ ,  $RMS=10.21$  cm/s의 결과를 보였다(Fig. 5a). 관측된 최대유속이 75 cm/s를 보인 연구해역에서 상관분석의 결과는 두 자료가 통계적으로 잘 일치하고 있음을 보

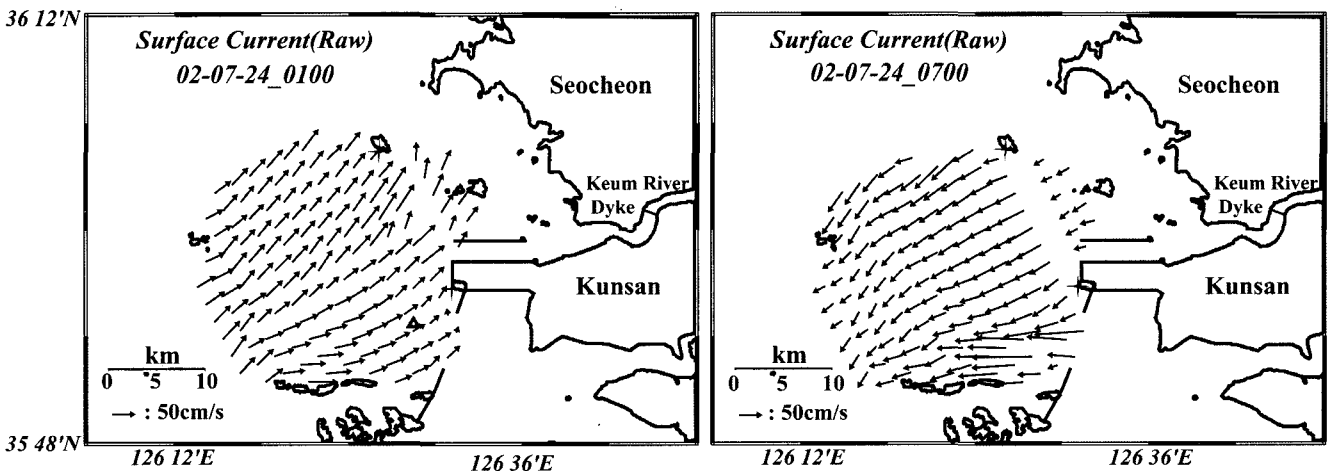


Fig. 2. Examples of HF radar-derived current field in flood (left) and ebb period (right) in July 24, 2002 before the closing of the Saemangeum 4th tidal dyke.

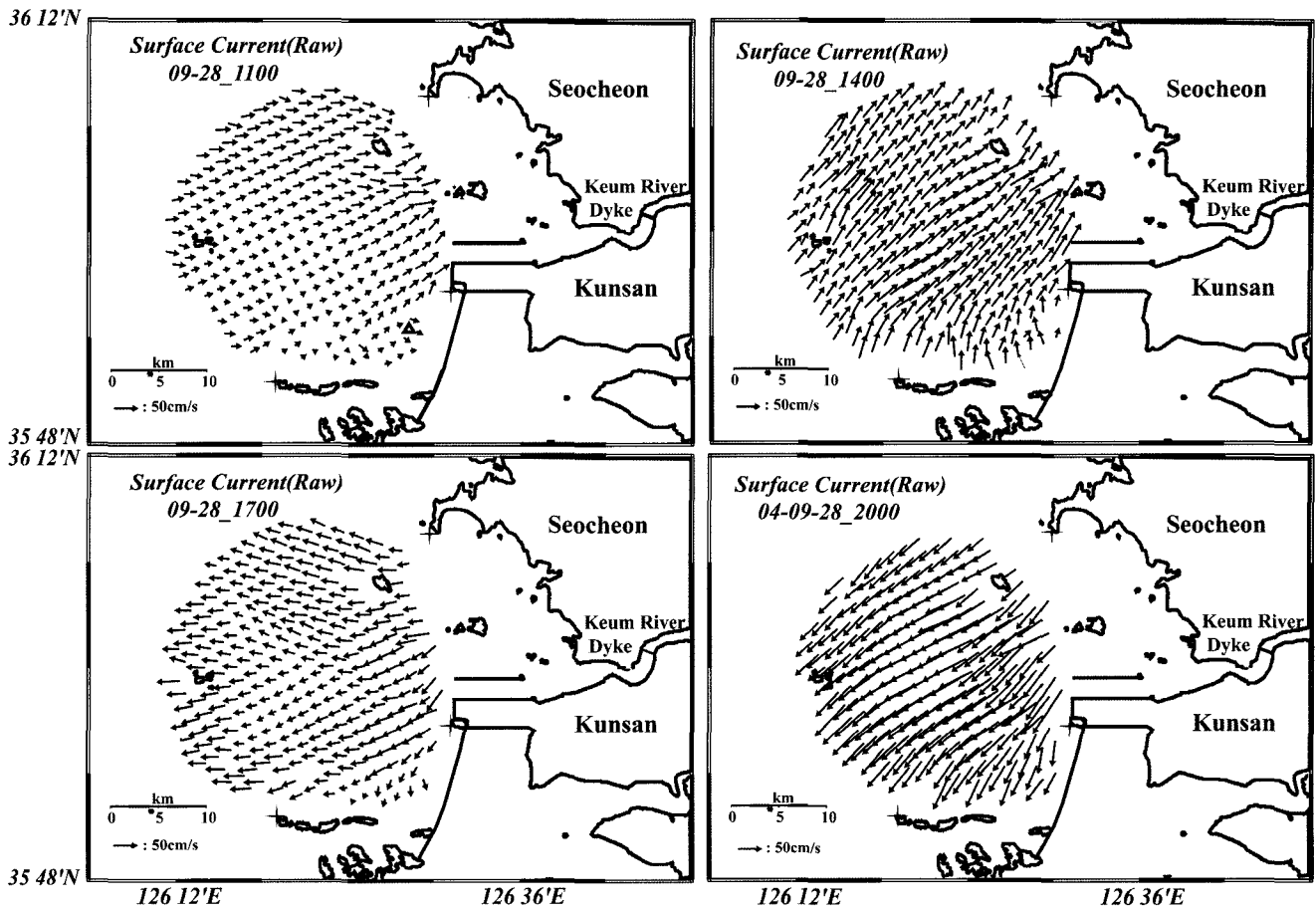


Fig. 3. Examples of HF radar-derived current field in flood (upper) and ebb period (lower) in September 28, 2004 after the closing of the Saemangeum 4th tidal dyke.

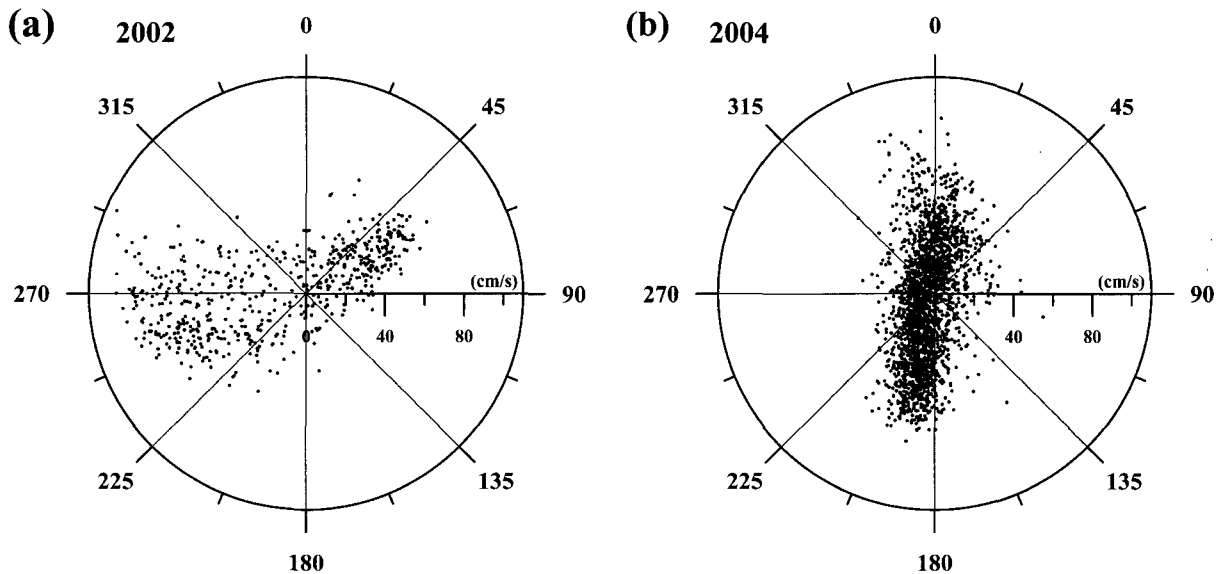


Fig. 4. Scatter diagrams of HF radar-derived current at a selected point ( $\Delta$  in Fig. 2 and 3) near the Saemangeum 4th tidal dyke in 2002 before the dyke closing (a) and in 2004 after the dyke closing (b).

이다. 2004년 RCM에 의한 유동 성분을 Y로 하고 HF-유동 성분을 X로 하여 일차식에 의한 상관성 분석을 해보면, 동서방향 유

속은  $Y=1.04X-0.32$ 로 나타났으며,  $R=0.95$ ,  $RMS=5.69$  cm/s이었다. 남북방향 유속은  $Y=0.88X-0.66$ 로 표현되었고,  $R=0.96$ ,  $RMS$

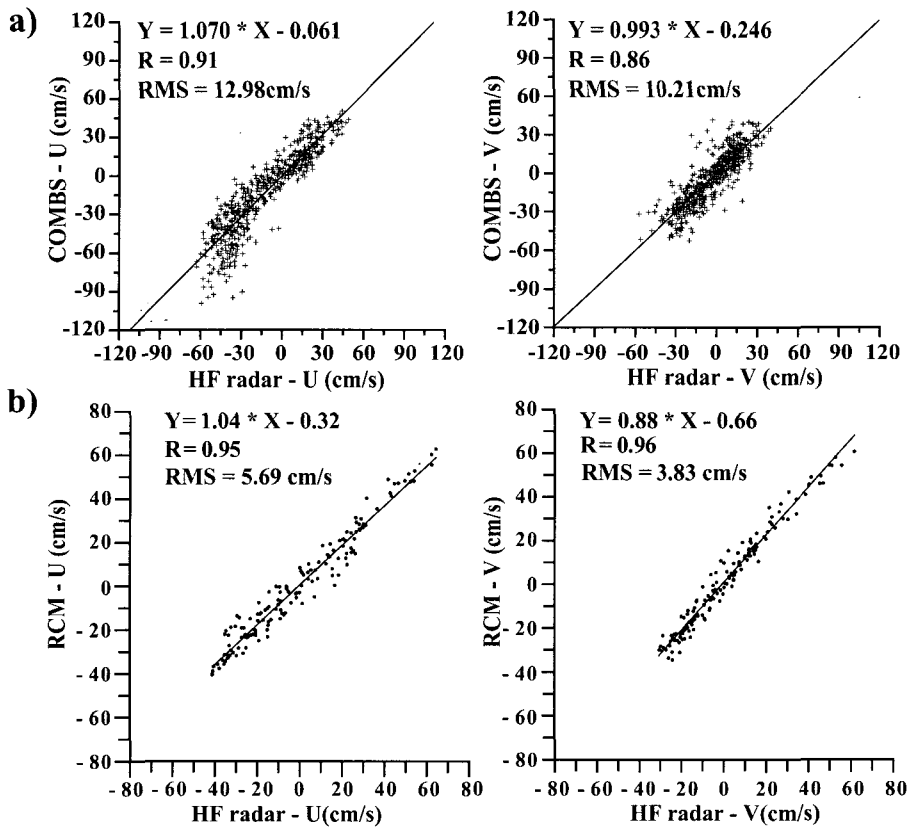


Fig. 5. Linear regression of the east and north components of (a) HF radar-derived and COMBS-measured current in 2002 and (b) HF radar-derived and RCM-measured current in 2004.

=3.83 cm/s로 나타났다(Fig. 5b). 각 성분에서 상관계수는 0.95이상이고 편차가 6 cm/s 이하로서 좋은 상관성을 보였다. 관측지점의 유동성분별 세기가 60 cm/s 이상이므로 두 관측치의 편차 6 cm/s는 만족할 만한 결과이다.

한편, 통계적 유의성이 매우 높은 비교결과이지만 2004년의 경우 남북방향 성분 상관식의 기울기 0.88은 동서방향 성분 기울기에 비해 다소 작은 값으로 나타났다. 또한 2002년에 두 유속자료의 RMS 편차가 2004년도의 경우보다 두 배 정도 큰 결과를 보였다. 이러한 차이는 1) 유속관측 깊이차이 및 비교지점 위치의 적절성, 2) radar로 관측된 유속으로부터 비교지점에 대해 내삽된 유속과 유속계 계류에 의한 한 지점에서의 유속과의 비교, 3) 2002년의 경우 방조제 미 체절구간에서 발달한 ebb jet에 의해 속도가 공간적으로 크게 변하는 곳에 COMBS가 위치한 점 등에 의한 것으로 판단되며, 이에 대한 구체적인 검토는 다음 장에서 토의하였다.

**방조제 체절 전·후의 M<sub>2</sub> 조류특성 비교**

연구해역에 설치된 COMBS에서는 장기간 관측된 해수유동 정보를 얻을 수 있다. 주요 분조들의 크기를 알아보기 위하여 2002

년 6월과 7월에 걸쳐 58일간 관측된 유속을 조화분해 하였다(Table 2). 이 곳에서의 평균흐름은 13.2 cm/s로서 서쪽으로 향하는데 이에 대해 Son et al.(2006)은 미 체절구간에서 발생하는 조석간차류와 새만금 내부에서 유출되는 저염수에 의한 것으로 해석하였다. M<sub>2</sub> 분조의 진폭은 다른 주요 분조 진폭의 합보다 큰 값을 보이며 이 지역의 평균조류 진폭에 해당한다. S<sub>2</sub>와 N<sub>2</sub> 분조의 진폭은 M<sub>2</sub> 분조 진폭의 39%와 16% 정도이고 일주조 진폭에 비해 크다.

HF-유동은 2002년과 2004년의 자료에서 14.5일과 29일의 자료를 발췌하여 조화분석 하였기 때문에 M<sub>2</sub>와 S<sub>2</sub> 분조를 분해할 수는 있지만 M<sub>2</sub> 분조 외 다른 분조는 인접 분조들의 간섭에 의해 조화상수가 상당히 오염되게 된다. 따라서 본 연구에서는 M<sub>2</sub> 분조가 연구해역의 조류를 대표한다고 할 수 있고 또한 14.5일간 자료를 조화분석 했을 때 분조간의 간섭이 비교적 적어 안정된 조화상수를 보이는 M<sub>2</sub> 분조에 대해서 방조제 체절의 영향을 살펴보기로 하였다.

새만금 4호 방조제 체절 전후의 M<sub>2</sub> 조류타원의 분포는 Fig. 6과 같다. 방조제 체절 전과 후에 전 관측구역에서는 조류가 반시계방향의 회전을 보여 방조제 체절로 인한 조류회전방향의 변화

Table 2. Harmonic constants of major constituents of tidal current at COMBS. 58 days long data set obtained in June and July, 2002 is used for tidal current analysis. A is amplitude in cm/s and P is phase in degree relative to 135°E.

	Mean	O <sub>1</sub>		K <sub>1</sub>		N <sub>2</sub>		M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>	
		A	P	A	P	A	P	A	P	A	P
U	-13.0	3.9	156	3.8	182	6.1	345	40.4	11	15.8	56
V	-2.4	1.7	123	1.3	212	3.4	21	18.2	31	8.9	60

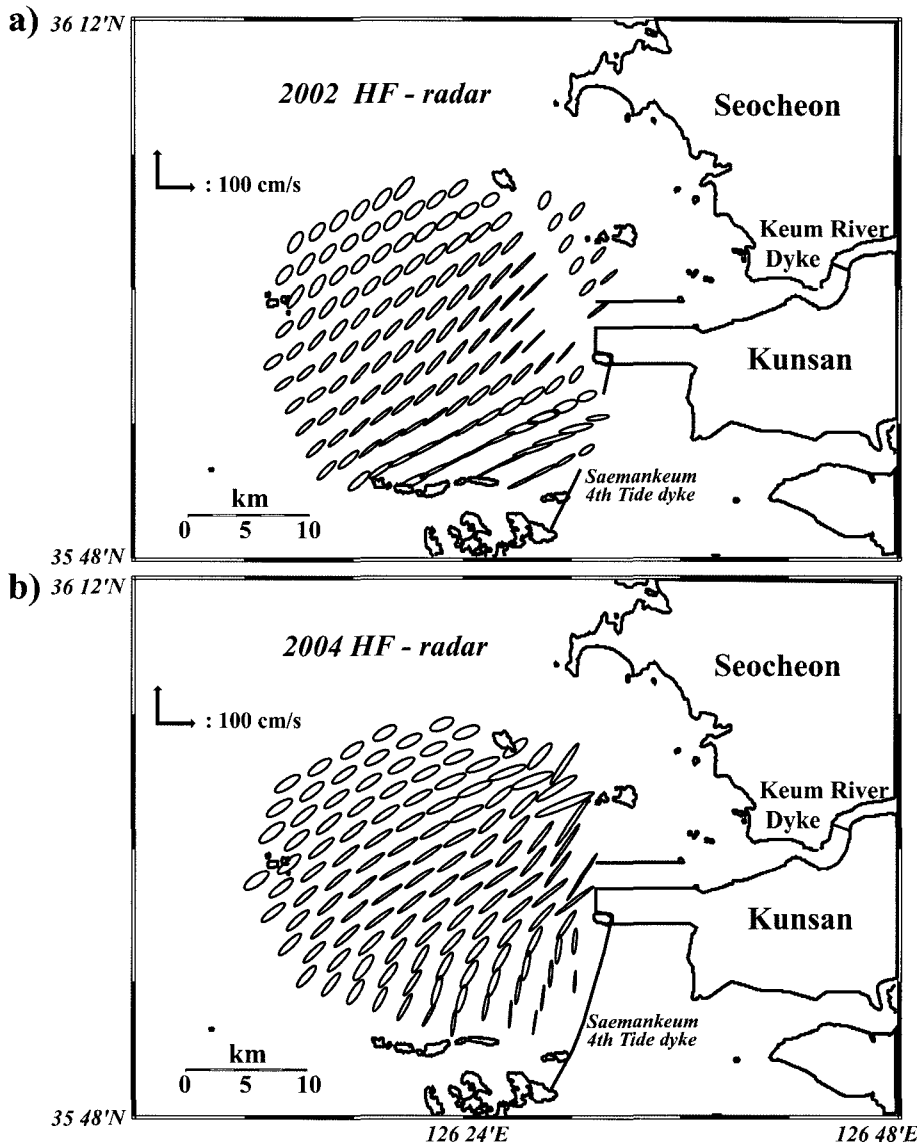


Fig. 6. Distribution of the M<sub>2</sub> current ellipses analyzed using HF radar-derived current observed before (2002) and after (2004) the closing of the Saemangeum 4th tidal dyke.

는 없었다. 하지만 고군산군도의 말도와 금강하구역의 연도를 연결하는 선의 동쪽에서는 조류타원 장축의 방향과 크기가 현저히 변화되었다. 조류타원 장축은 금강하구 입구 주변해역에서 확인하게 증가되었음을 보여준다. 특히, 방조제 인근지역과 고군산군도 북측해안 인근지역에서는 방조제 체절 전에 장축이 동서방향인데 비하여 방조제 체절 후에는 남북방향으로 바뀌었고, 장축의 크기는 현저히 줄어들었다. 이러한 M<sub>2</sub> 조류타원 특성의 분포변화는 방조제가 완전 체절되기 전에는 고군산군도 인근 북측해역에서 새만금 방조제 내측으로 흐르는 동서방향의 흐름이 유지되고 있었지만, 방조제가 체절 되고 난 후에는 조류가 방조제와 나란한 방향으로 바뀌었고, 금강하구 입구 주변해역에서 조류세기가 증가되었음을 보여준다. 방조제 체절 후에 고군산군도 북측에서 남북방향의 조류타원이 형성된 것은 고군산군도 섬들 사이로 해수가 유통되기 때문임을 시사하며, 타원의 장축방향 변화는 방조제 체절 전에 비해 고군산군도를 구성하는 섬들 사이에서 조류가 크게 증

가되었을 가능성을 제시한다.

M<sub>2</sub> 조류타원 장축의 방향(분조의 최강 창조류 방향, 북쪽에서 시계방향으로 증가)을 정량적으로 도시하면 Fig. 7과 같다. M<sub>2</sub> 분조의 장축방향은 연구해역의 중앙에서 40°~50° 북동-남서 방향이다. 방조제가 건설 중인 2002년에는 미체절된 구간을 통해 조류가 유출입하였기 때문에 고군산군도 북측해안 인근에서는 최대 창조류가 동북동방향(60°)이었고, 관측지역 내 조류타원 장축방향의 공간적 차이는 30° 정도였다. 하지만 방조제가 체절된 후 고군산군도 북측 해역 및 4호 방조제 부근에서는 방조제와 거의 평행한 북향 혹은 북북서 방향(10°~30°)으로 변화되었다. 또한 금강하구 입구와 십이동파도를 연결하는 선 북쪽에서는 장축방향이 동북동 방향(60°~70°)으로 변화되어 방조제 체절 전에 비해 20°~30° 정도 증가하였다. 이로 인하여 M<sub>2</sub> 분조 최대장조류 방향이 조사지역 내에서 60°이상 차이가 난다. 이러한 조류타원 장축방향의 변화는 방조제 체절로 인하여 새만금 내부지역으로 왕복하여 출

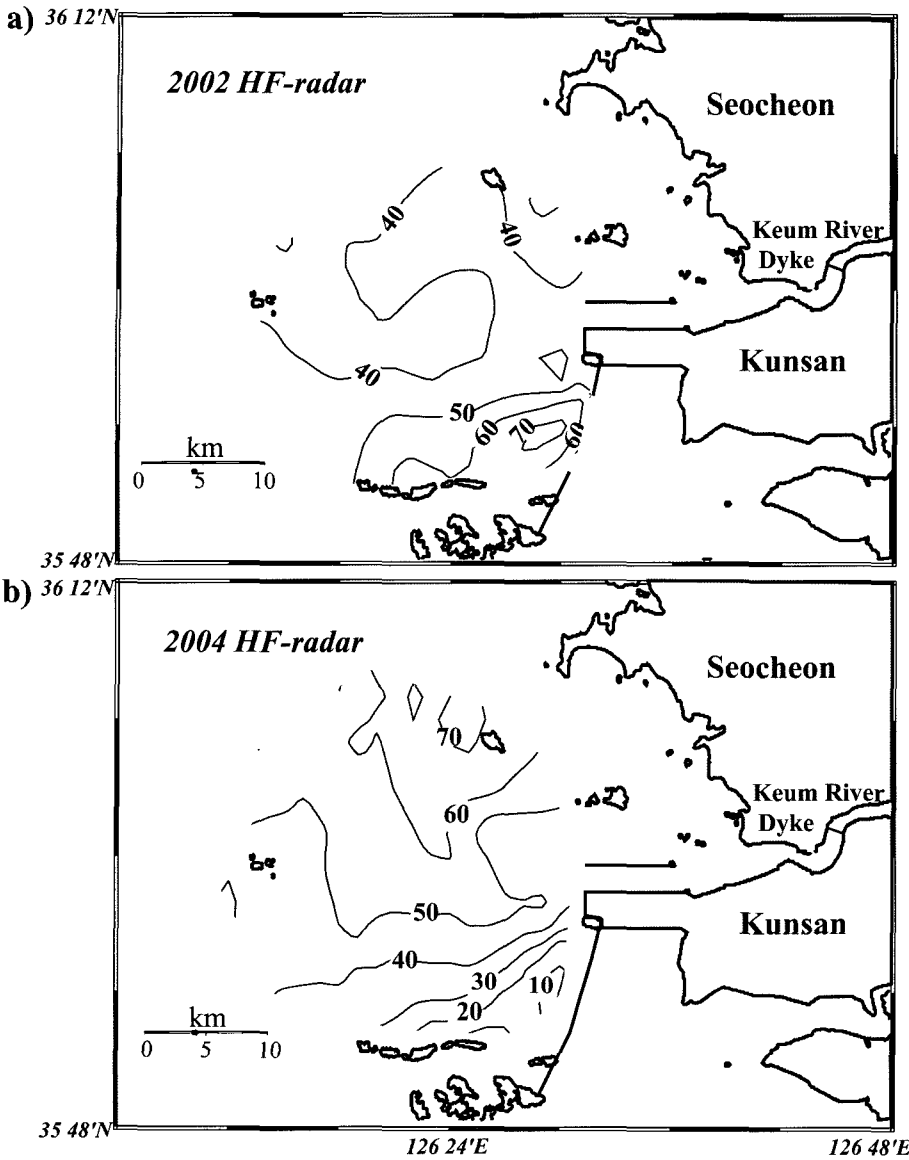


Fig. 7. Distributions of maximum  $M_2$  current direction in degree clockwise from the north analyzed using HF radar-derived current observed in 2002 (a) and 2004 (b).

입하던 조류가 차단된 결과로 조류의 주축방향이 금강하구 입구 주변으로 수렴하였음을 의미하며, 조류타원 장축의 크기가 금강하구 입구 주변에서 방조제 체절 전에 비하여 확연히 증가한 분석 결과(Fig. 6)와 잘 부합된다.

최대 창조류가 일어나는 위상(phase of net motion,  $\Phi$ )을 정량적으로 도시하면 Fig. 8과 같다. 각 지점에서 최대 창조가 일어나는 시각은  $t = \Phi \times \text{분주주기} / 360$ 으로 계산될 수 있으며, 따라서 위상각이 작을수록 최대 창조류가 일찍 발생함을 의미한다. 한편,  $M_2$  조류성분 조화상수(진폭과 위상)의 안정도에 따라 조류타원에서 최대 창조류 발생 위상은 다소 민감하게 변동될 수 있다. 이를 검토하기 위하여 2004년에 분석된 29일간의 자료에서 14.5일씩 두 자료로 나누어 최대  $M_2$  창조류 발생 위상 값을 구하고 이를 29일 자료에서 분석된 결과와 비교하였다. 14.5일 자료에서 얻어진 위상은 29일 자료에서 얻어진 값에 비해 6° 정도를 차이를 보였으나 이 차이는 공간적으로 거의 균일하였다. 이는 동일시기에 조류를 관측한 경우 위상 값의 공간적 차이에 대한 정보는 신뢰도가

매우 높다는 바를 제시하므로 이를 바탕으로 방조제 체절 전후의 최대 창조류 발생 위상분포 특성을 비교할 수 있다.

2002년과 2004년의  $M_2$  분조 최대 창조유속이 발생하는 위상은 공간적으로 30° 정도 차이를 보였다. 2002년에는 관측구역 중앙해역에서 가장 늦은(큰) 30° 정도의 위상을 보여 거의 같은 시각에 최대 창조류가 발생하지만, 금강하구 입구와 방조제 미체절 구간 부근에서는 0°~10° 위상이 나타나는데, 이는 중앙해역보다 1시간 정도 일찍 최대 창조류가 발생함을 의미한다. 2004년에는 가장 늦은 위상이 발생하는 구역이 십이동파도쪽으로 치우쳐 있으며 2002년에 비해 5° 빠른 25° 정도의 값이다. 공간적 차이를 살펴보면, 연도주변에서 위상이 20° 정도 감소하였고, 고군산군도 북측과 방조제 부근에서는 오히려 증가하였다. 이는 방조제 체절로 인하여 최대 창조류가 발생하는 시각의 공간적 분포가 변화되었음을 의미하는 것으로서 특히 조류타원 장축방향의 공간적 차이가 크게 변화된 고군산군도 북측해안 가까이에서 최대 창조류 발생 시각의 공간적 차이도 크게 나타났다.



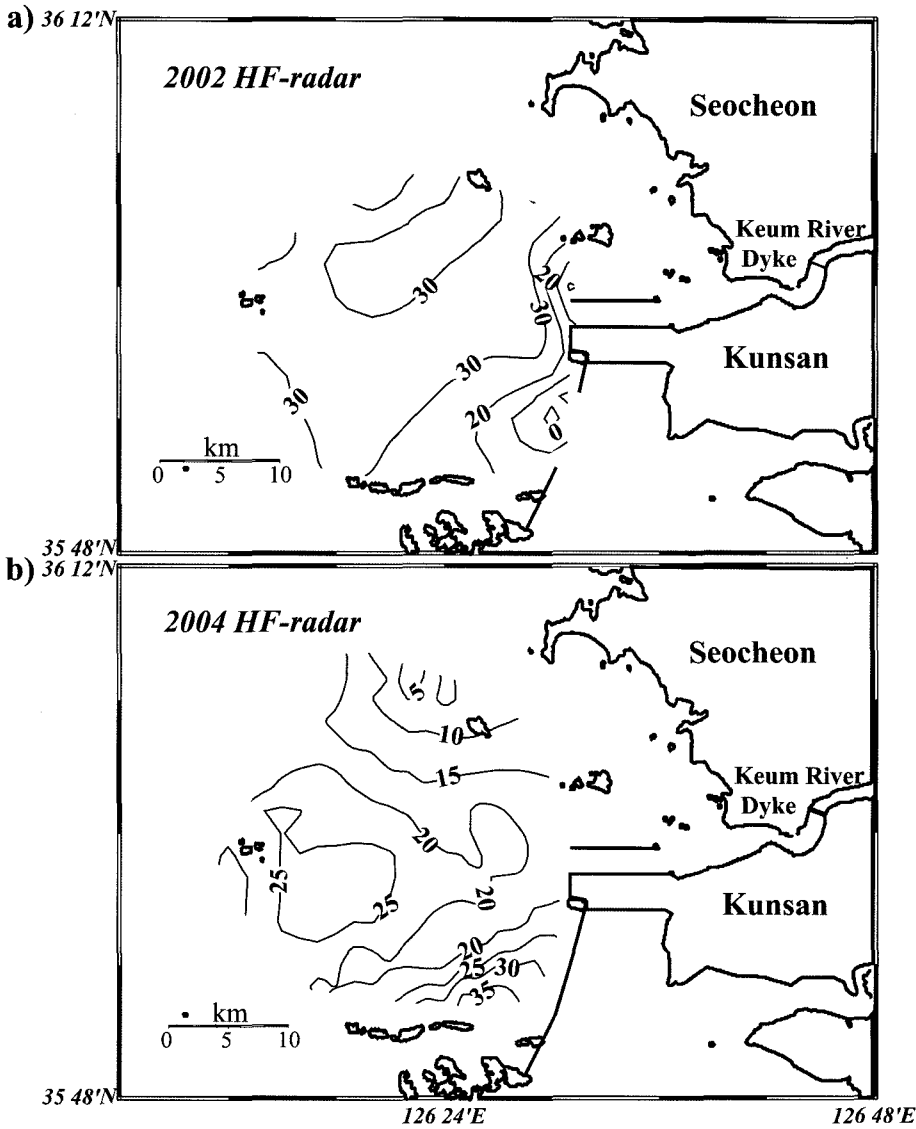


Fig. 8. Distributions of phase ( $\Phi$ ) of net motion of the M<sub>2</sub> analyzed using HF radar-derived current observed in 2002 (a) and 2004 (b).

### 토의 및 요약

대단위의 새만금 간척사업으로 인한 지형(해안선) 변화는 물리적 해양환경에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 이러한 인위적 변화에 대한 연안역 해수유동의 반응을 파악하기 위하여 2002년과 2004년도에 HF radar를 설치·관측하였으며, 본 연구에서는 표층 유속자료를 분석하여 조류특성 분포의 변화를 살펴보았다.

간접적으로 관측된 HF-유동은 계류된 유속계에서 측정된 유속과 매우 높은 상관성과 신뢰도를 보였지만 2002년의 경우 각 유속성분에서 상관식에 대한 RMS 편차가 상대적으로 큰 값을 보였다. 두 곳의 원격관측소에서 측정된 방사형 유속벡터는 합성벡터를 생산하는 과정에서 사이 각( $\theta$ )을 이룬다. 이 사이 각이 직각일 때 합성벡터의 오차를 최소화하지만 그 외의 경우에는  $1/|\sin\theta|$  만큼 오차를 발생시킬 수 있다(Graber *et al.*, 1997). 즉, 이 값이 클수록 RMS 편차는 더 크게 될 수 있으므로  $\theta$ 가 직각인 위치가 유속비교를 위한 계류위치로서 적합한 장소가 된다. 2002년도에는

COMBS 계류위치에서  $1/|\sin\theta|=1.22$ , 2004년도에 유속계가 계류된 위치에서는 1.07 이었으며, HF-유동자료에 포함된 오차에서 2004년도 관측위치에서의  $\theta$  값에 의한 오차는 매우 작았다. 이러한 2002년 유속비교 지점의 선정에서 발생한 오차는 비교된 유속의 RMS 편차가 증가하는 원인이 될 수 있다. 특히, 2002년에는 방조제 미체절 구간에서 발생하는 jet로 인하여 COMBS 부근에서 공간적으로 큰 유속차이가 발생한다. COMBS는 한 지점에서의 유속을 측정한 반면, HF radar 유속은 각 원격관측소에서 관측소에서 획득된 방사형 유속정보를 벡터합성하고 이를 다시 일정한 간격의 격자망에 대하여 내삽한 것이다. 또한 유속비교를 위하여 COMBS 주변 격자점에서의 유속을 이용하여 COMBS 위치에서의 유속을 생성하였으므로 공간적으로 상당히 평균된 유속이다. 따라서 COMBS 유속에는 ebb jet의 시공간적 변동이 많이 포함되어 있지만 HF-유동은 COMBS 주변에 대해 평균된 유속이므로 두 자료의 비교는 내재적으로 RMS 편차를 보이게 된다.

2004년의 경우 남북방향 유속성분에서 상관식의 기울기가 2002

년에 비해 상대적으로 작은 값을 보였다. 일주일 미만의 RCM 관측으로 비교자료 수가 2002년에 비해 작았던 것이 통계적 상관식 기밀기에 영향을 줄 수 있다. 다음으로 본 연구의 자료처리과정에서 유속계자료는 10분 간격의 자료를 1시간에 걸쳐 평균하였지만 HF radar 자료는 30분 간격의 자료를 평균하였는데 이러한 자료 처리과정에서 발생된 오차일 수도 있다. 한편, HF radar는 표층 해수면을 관측하는데 반하여 유속계는 해수면 하 2 m에서 관측되었다. 수심이 10 m 정도로 얕은 연구해역의 경우 흐름의 연직구조는 해저면 마찰, 취송류 발달정도 및 담수유출 등에 의한 밀도성층에 따른 유속차이 등에 의해 속도차를 보일 수 있다. 따라서 유속이 측정된 깊이가 수직적으로 2 m 이상 차이므로 비교·검정된 두 자료에 내재적인 유속오차가 포함되었을 수 있으며 두 자료의 상관식의 기밀기가 다소 낮아지는 원인일 수 있다. 하지만 두 관측방법에 의해 획득된 유속자료의 비교결과는 2002년과 2004년 모두 통계적으로 매우 높은 상관성을 보였으므로 본 연구에서 분석된 HF radar 관측  $M_2$  조류타원의 특성분포 비교는 높은 신뢰도를 가진다.

조류특성의 수평적 분포·비교는 기본적으로 회전성, 장축의 방향과 크기 그리고 위상 등으로 표현될 수 있다. 관측된 조류타원 분포는 Choi and Lee(2003), 신 등(2002)이 보여준 수치모델 조류의 타원분포와 유사하다. Son *et al.* (2006)은 2002년 HF-유동에서 분석된  $M_2$  조류타원, 장축방향과 이심율에 대하여 방조제건설 이전인 1986년과 1987년에 국립해양조사원에 의해 관측된 자료에서 분석한 타원특성과 비교한 바 있으며, 연구해역에서 2002년에 이미 조류특성이 상당히 변화되었음을 보여주었다. 하지만, 연구해역에서 조류는 방조제 축조 전과 후 모두 반시계방향의 회전성을 보였다. 새만금 방조제 축조로 인하여 조류의 회전방향이 변화되지 않은 것으로 관측된 본 연구결과는 11 km 길이의 방조제가 황해의 전반적 조석 구조에 의한 조류의 회전성 분포에 영향을 주지 못하는 매우 작은 규모임을 의미한다. 한편, Fang *et al.*(1991)은 부분적으로 개방되어 있는 만두(Bay head)와 해저 마찰력을 포함한 경우에 대해 Taylor problem을 풀어 그 해를 황해에 적용한 바 있으며, 만두(웅진, 산동반도, Fig. 1)로부터 만들어진 Poincare mode에 의해 만두 부근 해역에서  $M_2$ 의 조류타원이 반시계방향의 회전을 일으킨다고 지적하였다. 본 연구해역에서 반시계방향의  $M_2$  조류 회전성은 Fang *et al.*(1991)이 보여준 황해 Taylor problem에 의해 형성된 연안역 조류구조의 결과로 해석될 수 있다. 또한 외해쪽에서 연안쪽으로 갈수록 조류의 왕복성이 증가하는 경향(타원의 이심율 증가)은 연안 가까이에서 no-normal flow 조건에 의해 야기되는 것으로 해석 할 수 있다.

2004년 관측된 HF-유동에서 분석된  $M_2$  조류타원 장축방향 분포는 2003년 6월 새만금 4호 방조제 완공으로 해수의 유·출입이 완전 차단됨에 따른 조류변화를 잘 반영하였다. 방조제 부근과 고군산군도 북측해안 부근에서 장축의 방향은 방조제와 평행한 남북방향의 왕복성 조류가 우세해졌음을 보였다. 고군산군도 북측에서 조류타원 장축이 남북으로 바뀐 현상은 새만금 방조제 체질이 국지적 조류체계의 변화를 발생시켰음을 의미하며, 이렇게 조류타원 장축 방향이 변경되기 위해서는 동서방향의 고군산군도 섬들 사이 구간에서 조류에 의한 체적유량이 남북방향으로 증가되어야 한다. 2006년 4월에는 고군산군도 남측의 방조제가 완전히 체질

되고 가령도와 신시도 두 곳의 수문에서 해수유통이 인위적으로 통제될 예정이다. 방조제 건설로 인하여 새만금 내부로의 해수유입이 완전히 차단되면 2002년 혹은 2004년의 경우와는 다르게 외해에서 새만금 내부(동쪽)로 향하던 조석에너지 및 체적 유량의 방향이 완전히 북쪽으로 변경되게 된다. 따라서 고군산군도 주변 섬들 사이에서는 남북방향으로의 조류가 더욱 증가될 것으로 예상할 수 있다.

2004년에 관측해역의 북쪽구역에서  $M_2$  분조의 장축방향은 2002년도에 비해 시계방향으로 변화되었으며, 또한 최강 창조류 발생시각의 분포에서도 방조제 완전 체질로 인하여 연도 주변해역에서는 발생시각이 빨라졌고 고군산군도와 방조제 주변에서는 늦어졌다. 이는 방조제 체질의 영향이 금강하구 입구부근을 포함하여 연도 주변해역까지 미치고 있음을 제시한다. 특히 금강하구 입구부근에서는 장축의 크기가 증가하여 유속이 증가하였음을 제시한다. 조류특성의 분포변화는 국지적인 조석 전파가 방조제 체질로 인하여 변화되었음을 의미한다. Kang(2002)은 수치모델 연구를 통하여 새만금 방조제로 인한  $M_2$  조석 진폭과 위상의 변화를 보여 주었는데 고군산군도 북측과 방조제 주변에서 위상의 등치선(동조시선) 방향이 반시계방향으로 변화되고 진폭이 감소하게 됨을 예측하였으며, 이와 더불어 창조류 방향도 반시계방향으로 변화됨을 예상하였다. 이러한 수치모델 연구 결과는 본 연구의 관측조류 장축방향의 변화와 잘 일치한다.

하지만 새만금 북측(4호) 방조제의 완전체질로 인하여 금강하구 입구부근에서의 유속증가, 연도 주변해역에서 조류타원 장축방향이 반시계방향으로 변화, 그리고 최강 창조류 발생시각의 공간적 분포가 변화된 현상은 수치모델 연구에서 제시되지 않았던 새로운 관측된 현상이다. 새만금 방조제 체질로 인한 조석전파 특성과 조류특성 분포의 정량적 변화는 상호간에 역학적으로 밀접하게 관련되어 영향을 주는 현상이므로 해수면에서의 조류 특성분포의 변화만으로는 해석할 수 없고, 앞으로 정밀한 수치모델 연구를 통하여 규명되어야 할 내용이며, 조류변화가 해양환경이 미칠 영향에 대한 연구도 함께 수반되어야 한다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) 광역에 걸쳐 동시적으로 해수표면 유동을 관측하는 HF radar를 본 연구해역에 적용하여 획득된 자료는 기존의 계류식 유속계에 의해 관측된 유동자료와 좋은 일치를 보였으며 연구해역의 유동특성을 잘 반영하였다. 관측해역에서  $M_2$  조류는 전체적으로 반시계방향의 회전성을 보였으며 새만금 4호 방조제 완전 체질로 인하여 회전방향이 변경되지는 않았다. 체질 전에는 방조제의 미체질 구간을 통해 유·출입하던 동서방향의 강한 흐름(ebb jet)을 관측하였지만, 체질 후에는 이 흐름이 나타나지 않았다. 2) 방조제 체질로 인하여 금강하구 입구부근에서 유속이 증가하였고, 고군산군도 및 새만금 4호 방조제 부근에는 유속이 감소하고 최강 창조류의 방향이 동서방향에서 남북방향으로 변화되었다. 또한 연도 주변해역에서도 조류타원의 장축방향이 시계방향으로 10~20° 변경되었으며 최대 창조류 발생시각은 오히려 빨라졌다. 이러한 조류타원 특성분포의 변화는 방조제 체질의 영향이 연도와 말도를 있는 선까지 미치고 있음을 의미한다. 3) 앞으로 고군산군도 남측의 방조제가 완전히 체질되면 새만금 내부로의 해수유입이 차단되므로 외해에서 새만금 내부(동쪽)로 향하던 조석에너지 및 체적 유량의 방향이 완전히

북쪽으로 변경되게 된다. 이에 따라 고군산군도 주변에서는 남북 방향으로의 조류가 더욱 증가될 것으로 예측할 수 있다.

## 사 사

본 연구는 산업자원부가 지정하고, 전라북도가 지원하는 군산대학교 새만금환경연구센터의 지원으로 진행되었으며, 김창수는 제 2단계 BK21(핵심과제) 사업의 지원을 받고 있다. 자료검정을 위해 유숙계 계류와 자료 분석을 지원해 준 국립해양조사원 서해분소에 감사드리며, 현장조사 및 자료처리에 도움을 준 군산대학교 백혜연 양에게도 감사한다. 본 논문의 유숙비교 결과와 해석에 많은 조언해 주신 심사위원들께도 감사드린다.

## 참고문헌

- 고재원, 정신택, 김철, 조흥연, 2001. 지리정보체계를 이용한 만경강·동진강의 유역정보 및 오염부하량 분석. 한국해양학회지, **13**(3): 237-244.
- 국립해양조사원, 2005. 조석표(한국연안).
- 권효근, 이상호, 1999. 하구언 수문작용으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 I. 평균해수면과 조석. 한국해양학회지(바다), **4**(2): 93-100.
- 농어촌진흥공사, 1990-1998. 새만금지구 간척종합개발사업 사후환경영향 조사보고서.
- 신은주, 이상호, 최현용, 2002. 금강플룸의 구조와 분포에 대한 수치모델 연구. 한국해양학회지(바다), **7**(3): 157-170.
- 이상호, 권효근, 최현용, 양재삼, 최진용, 1999. 하구언 수문작용으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 II. 염분구조와 하구 유형. 한국해양학회지(바다), **4**(4): 255-265.
- 이상호, 최현용, 권효근, 2001. 하구언 수문작용으로 인한 금강 하구역의 물리적 환경변화 III. 저염수의 조석동조. 한국해양학회지(바다), **6**(3): 115-125.
- 이상호, 최현용, 손영태, 권효근, 김영곤, 양재삼, 정해진, 김종구, 2003. 하계 서해안 새만금 연안역 주변 저염수와 순환. 한국해양학회지(바다), **8**(2): 138-150.
- 이상호, 최현용, 오임상, 1995. 하계금강 Plume의 구조와 변동. 한국해양학회지(바다), **30**: 125-137.
- 정종률, 이재학, 안희수, 1983. 금강하구의 해수 순환 역학. 한국해양학회지(바다), **18**: 142-148.
- 최현용, 이상호, 유광우, 1999. 금강하구언 대량방류시 관측된 황해중동부 연안역의 염분분포. 한국해양학회지(바다), **4**(1): 1-9.
- Barrick, D.E., M.W. Evans, and B.L. Weber, 1977. Ocean surface currents mapped by radar, *Science*, **198**: 138-144.
- Beardsley, R.C., R. Limeburner, K. Kim, and J. Candela, 1992. Lagrangian flow observations in the East China, Yellow and Japan Seas. *La Mer*, **30**: 297-314.
- Choi, B.H., 1980. A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea. *Korea Ocean Research and Development Institute (KORDI) Report* 80-02, pp72.
- Choi, B.H., 2001. Effect of Saemangeum tidal barriers on the Yellow Sea tidal regime. *Proceedings of the first Asian and Pacific Coastal Engineering Conference*, APACE 2001, Dalian, China, **1**: 25-36.
- Choi, B.H. and H.S. Lee, 2003. Preoperational simulation of dike closure for Saemangeum tidal barriers. In: *Hydro-environmental impacts of large coastal developments*, ed. B. H. Choi and W. Kioka, ACECC-TC1 workshop proceeding by KSCOE and CEC-JSCE, pp91-11.
- Easton, A.K., 1977. Selected programs for tidal analysis and prediction. Computing Report. *The Flinders Institute for Atmospheric and Marine Sciences*, pp79.
- Fang, Z., A. Ye, and G. Fang, 1991. Solutions of tidal motions in a semi-closed rectangular gulf with open boundary condition specified. In *Tidal Hydrodynamics*, ed. B. Parker, John Wiley & Sons, 153-168.
- Graber, H.C., B.K. Haus, L.K. Shay and R.D. Chapman, 1997. HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction: expected differences and implications. *J. Geophysical Research*, **102**(8): 18749-18766.
- Haus, B.K., J.D. Wang, J. Rivera, J. Martinez-Pedraja, and N. Smith, 2000. Remote radar measurement of shelf currents off Key Largo, Florida, USA. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* **51**: 553-569.
- Hisaki, Y., Tokeshi, T., Fujiie, W., Sato, K., Fujii, S., 2001. Surface current variability east of Okinawa Island obtained from remotely sensed and in situ observational data. *J. Geophysical Research*, **106**(12): 31057-31073.
- Kang, S.K., 2002. Study on tidal change prediction due to the large scale of coastal reclamation (TIDPRE,II), *KORDI rept. BSPM* 191-00-1560-2, pp426.
- Kantha, L.H., I.K. Bang, J.K. Choi, and M.S. Suk, 1996. Shallow water tides in the Yellow Sea. *J. Korean Soc. Oceanography*, **31**: 123-133.
- Knight, P.J., M.J. Howarth, 1999. The flow through the northern channel of the Irish Sea. *Continental Shelf Research*. **19**(5): 693-713.
- Kovačvič, V., M. Gacic, I. Mancero Mosquera, A. Mazzoldi, and S. Marinetti, 2004. HF radar observations in the northern Adriatic: surface current field in front of the Venetian Lagoon. *J. Marine Systems*. **51**: 95-122.
- Lee, S.H., 2003. Variability of currents observed in Saemangeum coastal region. Workshop on Hydro-environmental Impacts of Large Coastal Developments. *ACECC-TC1 Workshop Proceeding by KSCOE and CEC-JSCE*, 73-89.
- Lee, S.H. and Beardsley, R.C., 1999. Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea, *J. Geophysical Research*, **104**: 15679-15701.
- Lee, S.H., H.Y. Choi, H.K. Kwon and E.J. Shin, 1999. Estuary type and plume structure of the Keum River estuary. In *Progress in coastal engineering and oceanography. Vol. 1 Coastal oceanography of asian seas. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 143-156.
- Ogura, S., 1933. The tides in the seas adjacent to Japan. *Bulletin of Hydrographic Department, Imperial Jpn. Navy*, **7**: 1-189.
- Prandle, D., 1987. The fine-structure of nearshore tidal and residual circulations revealed by H.F. radar surface current measurements. *J. Physical Oceanography*. **17**: 231-245.
- Schureman, P., 1941. *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*. Special Publication No. 98, Coast and Geodetic Survey.

- Son, Y.T., S.-H. Lee, J.C. Lee, and D.H. Kim, 2003. Surface currents variability observed by HF radar off the Keum River in the west coast of Korea in summer, 2002. *Proc. 12th PAMS/JECSS workshop*, 7-6-1~4.
- Son, Y.-T., S.-H. Lee, C.-S. Kim, J.C. Lee and G.-H. Lee, 2006. Surface current variability in the Keum River Estuary (South Korea) during summer 2002 as observed by high frequency radar and coastal monitoring buoy. *Continental Shelf Res.*, (accepted).
- Soulsby, R. L., 1990. Tidal-current boundary layers, in *The Sea*, vol. 9, *Ocean Engineering Science*, 523–566.
- Thompson, R.O.R.Y., 1983. Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. *J. Physical Oceanography*. **13**(6): 1077–1083.

---

2006년 4월 18일 원고접수

2006년 5월 27일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일