

## 금강하구 연안역에서 HF radar로 측정된 유속의 정확도

이상호\* · 문홍배 · 백혜연 · 김창수 · 손영태 · 권효근 · 최병주  
군산대학교 해양학과, BK21새만금환경연구팀

### Accuracy of HF radar-derived surface current data in the coastal waters off the Keum River estuary

S. H. LEE\*, H. B. MOON, H. Y. BAEK, C. S. KIM, Y. T. SON, H. K. KWON, B. J. CHOI  
*Department of Oceanography, BK21 Saemangeum Environmental Research Team,  
Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*

금강하구 연안역에서 HF radar로 측정된 유속의 정확도를 평가하기 위해 HF radar의 마주보는 radial 유속들을 비교하고, HF radar로 측정된 유속을 현장측정 유속과 비교하였다. 비교 자료들에 대한 회귀선과 편차는 주성분 분석(Principal Component Analysis)으로 구하였다. HF radar site를 연결하는 선의 중간지점에서 마주보는 radial vector를 비교하였을 때 RMS 편차는 동계에 4.4 cm/s, 하계에 5.4 cm/s이었다. HF radar와 유속계로 측정된 유속성분을 비교하여 분석된 RMS 편차에서 GDOP(Geometric Dilution of Precision) 효과를 제거하였을 때 HF radar의 합성 속도 측정오차는 GDOP 값이 적절한 정점들에서 5.1 cm/s 이내였다. 서로 다른 두 방법에 의해 구해진 이 결과는 연구해역에서 HF radar로 측정된 유속의 정확도 하한이 5.4 cm/s임을 제시한다. 기존의 연구에서와 같이 RMS 편차는 섬 주변에 있는 관측점에서 크게 되고, 두 radar에서 평균거리가 멀어질수록 신호 대 잡음수준과 radial vector 교차각의 감소로 인해 증가하였다. GDOP 값을 이용한 오차분리 과정에서 속도성분별 GDOP 값이 유사하고 비교 유속의 성분별 RMS 편차도 비슷한 값을 보이는 경우 HF radar 유속의 오차가 불확실한 값으로 도출될 수도 있음이 밝혀졌다. GDOP가 정상적인 radar 관측 범위 내에 있는 정점에서 측정된 유속을 조류와 해류로 분리하였을 때 HF radar 유속에서 구해진 조류타원의 특성은 유속계로 측정된 타원특성과 잘 부합하였고, 해류의 시간적 변화는 바람과 밀도장의 외력에 의한 물리적 과정을 반영하는 반응을 보였다.

To evaluate the accuracy of currents measured by HF radar in the coastal sea off Keum River estuary, we compared the facing radial vectors of two HF radars, and HF radar-derived currents with in-situ measurement currents. Principal component analysis was used to extract regression line and RMS deviation in the comparison. When two facing radar's radial vectors at the mid-point of baseline are compared, RMS deviation is 4.4 cm/s in winter and 5.4 cm/s in summer. When GDOP(Geometric Dilution of Precision) effect is corrected from the RMS deviations that is analyzed from the comparison between HF radar-derived and current-meter-measured currents, the error of velocity combined by HF radar-derived current is less than 5.1 cm/s in the stations having moderate GDOP values. These two results obtained from different method suggest that the lower limit of HF radar-derived current's accuracy is 5.4 cm/s in our study area. As mentioned in previous researches, RMS deviations become large in the stations located near the islands and increase as a function of mean distance from the radar site due to decrease of signal-to-noise level and the intersect angle of radial vectors. We found that an uncertain error bound of HF radar-derived current can be produced from the separation process of RMS deviations using GDOP value if GDOP value for each component is very close and RMS deviations obtained from current component comparison are also close. When the current measured in the stations having moderate GDOP values is separated into tidal and subtidal current, characteristics of tidal current ellipses analyzed from HF radar-derived current show a good agreement with those from current-meter-measured current, and time variation of subtidal current showed a response reflecting physical process driven by wind and density field.

**Keywords:** HF Radar, PCA, RMS-Deviation, GDOP, Accuracy Evaluation

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

서론

서해 남동부에 위치한 금강하구 연안역은 금강, 만경강, 동진강 하구를 포함하고(Fig. 1) 서쪽으로 갈수록 수심이 점진적으로 깊어지는 천해역이다. 이 해역은 황해의 조석구조에 의해 조석이 남쪽에서 북쪽으로 전파되는 곳으로서(Choi, 1980; Lee and Beardsley, 1999), 6 m 정도의 대조차 환경이다. 조석형태는 반일주조 형이고, 조류는 50 cm/s 내외로 왕복성이 우세하다. 창조류는 전반적으로 북동쪽으로 흐르고 반시계방향으로 전류되며, 낙조류는 남서쪽으로 흐른다(국립해양조사원, 2005; 김 등 2006). 연구해역으로 유입되는 담수는 금강에서 약 60억 톤/년 내외이며 하계 홍수기(6월~9월)에 연간 방류량의 2/3 정도가 유입된다. 만경강과 동진강의 방류량은 금강의 약 1/6, 1/9 정도인 10억 톤/년과 7억 톤/년 내외이다(농어촌진흥공사, 1990; 고 등, 2001). 하계에 담수방류는 저염수 plume을 형성하여 연구해역에서 이동, 희석확산되며, 대규모 방류시에는 북서쪽으로 100 km까지 확장하는 저염수가 관측된 바 있다(최 등, 1999).

본 연구해역에서는 1993년 8월에 금강하구언 수문이 작동되기 시작하여 담수유출이 인위적으로 조정되고, 연안공단건설 및 군산항 안정도를 위해 2002년까지 하구입구에 방파제와 매립공사가 진행되었다. 1992년에 33 km의 새만금 방조제공사가 착공되어 2000년도 이후 새만금 북측(4호) 방조제의 개방구간이 현저히 좁

혀졌다. 고군산군도와 비응도를 연결하는 새만금 4호 방조제는 총 길이가 11.4 km이며 2003년 6월에 끝막이 공사가 완료되어 해수의 유출입이 단절되었다. 2006년 3월에는 남측 방조제도 끝막이 공사가 완료되어 이후부터 300 m와 240 m 폭의 두 갑문을 통해 해수가 유통되고 있다. 이러한 인위적 대규모 구조물들이 축조되는 과정에서 해안선이 변화됨에 따라 인근 연안역에서 조석 및 조류, 강수유입에 의한 저염수 plume 확장과 거동 그리고 바람에 의한 순환 등이 변화되는 현상에 대하여는 관측자료 분석과 수치모델을 이용하여 많은 연구가 진행되어 왔다(이 등, 1995; 이 등, 2003; 신 등, 2003; 김 등, 2006; Lee, 2003; Son *et al.*, 2007; Kang, 2002; Choi, 2001; Choi and Lee, 2003).

연구해역과 같이 대규모 연안개발로 해안선이 급속히 변화되고, 조류가 우세하며 담수유출에 의한 계절적 밀도장의 변화가 크고, 바람에 의한 해수유동의 변화도 많은 연안역에서 환경변화를 파악하기 위해서는 장기간에 걸친 해수유동에 대한 공간적 조사가 필요하다. 최근에는 넓은 해역의 표층 유동을 동시에 관측할 수 있는 장비로 HF radar가 사용되고 있다. HF radar는 지상(연안)에 관측 장비를 설치하여 관리가 용이하며 장기간 관측이 가능하고, 연안역의 복잡한 해수유동장 변화를 모니터링하기에 매우 유용하여 영국, 일본과 미국 등지에서 활발히 사용하고 있다(Prandle, 1987; Paduan and Graber, 1997; Knight and Howarth, 1999; Haus *et al.*, 2000; Hisaki *et al.*, 2001; Kovačević *et al.*, 2004). HF radar

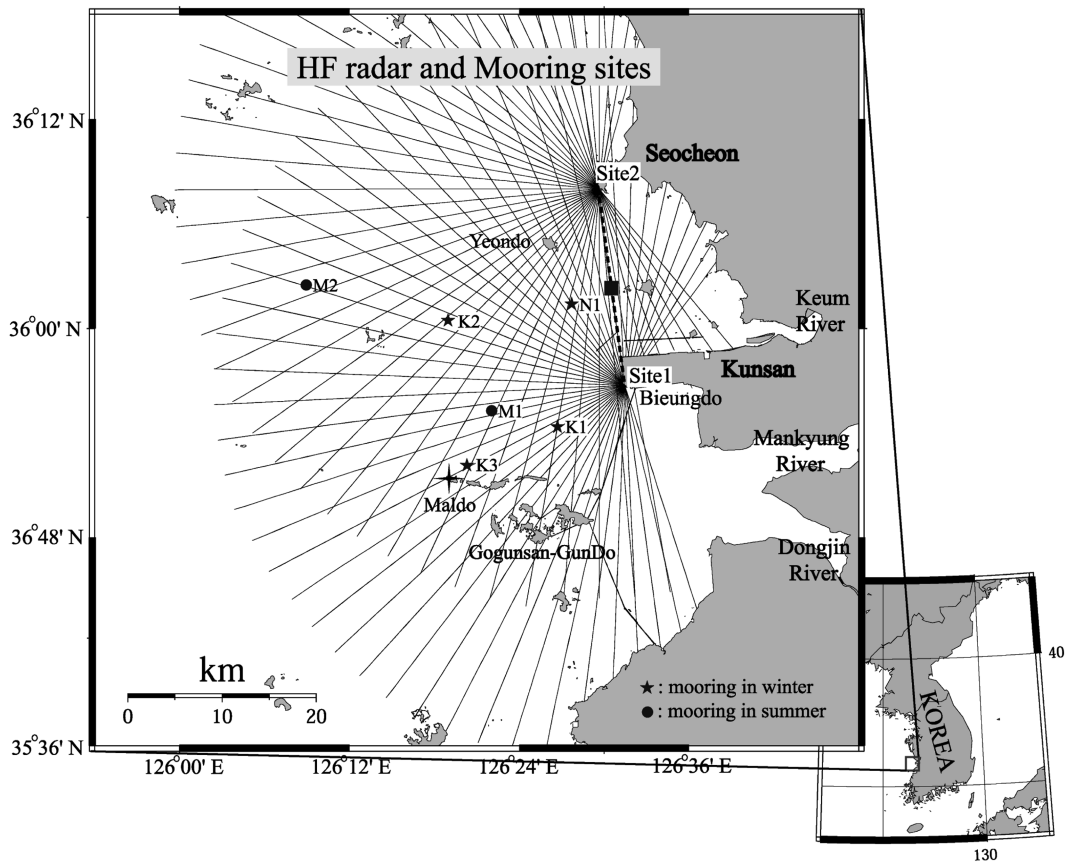


Fig. 1. Location of HF radar sites (Site 1 and 2) and mooring sites (star: winter, circle: summer). Range coverage from each radar is drawn by lines. Dashed bold line represents the baseline (square: middle point of baseline). Wind was measured at Mal-do by Korea Meteorological Administration AWS.

는 해면을 향하여 무지향성으로 전파를 발사하고 ‘Bragg scattering effect’에 의해 되돌아오는 전파에는 표층 흐름으로 인한 Doppler 효과가 내포되어 있으므로 주파수 변화를 분석하여 radar로부터 거리와 방향별로 radial vector들을 얻을 수 있다(Barrick *et al.*, 1977). 신호수신 방향의 일정 각도 폭(분해능)과 거리간격 내에서 스펙트럼정보를 산출하므로 거리가 멀어질수록 radial vector의 간격이 넓어지며, radial vector에 잡음(noise)이 많이 포함된다(Chapman *et al.*, 1997; Yoshikawa *et al.*, 2006). 표층속도는 적어도 두 곳 이상에서 radial vector를 관측하여 vector 합성해야 얻어진다. 공간적으로 등 간격의 유동장 정보를 구하기 위하여 radial vector들을 성분별로 분해하고, 관측자가 설정하는 격자점을 중심으로 일정한 반경 내 유속들을 평균 및 합성하는 과정을 거쳐 격자점에서 유속을 산출하여 사용한다.

군산대학교 새만금 환경연구센터(SERC)는 2002년 하계부터 HF radar (Codar Ocean Sensors, <http://codaros.com/>) 장비를 이용하여 연구해역의 해수유동장을 관측하여 왔다(Fig. 1). HF radar에 의해 간접적인 방법으로 측정된 유속은 유속계 등과 같이 해수 내에서 직접적으로 측정된 유속과 비교 검토되어야 한다. Son *et al.*(2007)과 김 등(2006)은 연구에 사용된 HF radar로 측정된 유속(이후부터 radar 유속)을 유속계 계류에 의해 측정된 유속(유속계 유속)과 비교한 바 있다. 선형회귀분석에 의해 산출된 유속의 차이에서 residual mean square 분산에 의해 계산한 편차는 2002년 자료의 경우 동서방향에서 13.0 cm/s, 남북방향에서 10.2 cm/s였고(Son *et al.*, 2007), 2004년 자료의 경우 각각 5.7 cm/s와 3.8 cm/s이었다(김 등, 2006). 유속이 비교된 지점과 시기, 자료 수는 달랐지만, 두 연구에서 나타난 비교유속의 차이는 매우 다르게 나타났다. 이러한 유속비교 결과의 차이에는 radar site로부터 바라본 각과 두 radar의 radial이 이루는 사이각에 의해 radar 유속오차가 증폭될 수 있는 효과(GDOP: Geometric Dilution Of Precision)와 연구해역에서 계절에 따라 다르게 나타날 수 있는 내재된 물리적 현상의 차이가 포함되어 있었을 가능성이 있다.

HF radar와 유속계로 측정된 유속의 차이는 (1)과 같이 표현될 수 있다(Yoshikawa *et al.*, 2006).

$$u^h - u^c = (u^h - \bar{u}^h) - (u^c - \bar{u}^c) + (\bar{u}^h - \bar{u}^c) \quad (1)$$

여기서  $u^h - u^c$ 는 HF radar와 유속계로 측정된 radial 성분 유속차이이고,  $\bar{u}^h$ ,  $\bar{u}^c$ 는 측정 오차없이 측정된 값이다. 따라서 두 유속의 차이는 각 기기의 측정 오차(error)와 각 기기가 측정하는 대상이 달라 발생하는 유속차이(target difference,  $\bar{u}^h - \bar{u}^c$ )로 구성된다. 대상유속의 차이는 HF radar가 수 km<sup>2</sup>의 넓은 구역 내 표층(해면 하 1 m 이내) 평균유속을 산출하는 반면에 유속계는 한 정점에서 적어도 수 m 이상 깊이의 유속을 측정함으로써 발생한다. 문제는 HF radar 유속의 정확도를 산출할 때 대상유속의 차이를 쉽게 알 수 없다는 데 있다. 비교되는 유속에서 대상유속의 차이를 효과적으로 제거하는 방법은 두 가지로 대별된다. 먼저 radar 유속의 오차는 위치에 따라 달라지는 GDOP 효과를 포함하지만 대상유속의 차이는 대부분 측정 깊이에 따라 달라진다는 점에 착안하여 radar 유속의 오차를 산출하는 방법이다. Chapman *et al.*(1997)는 HF radar로 유속이 측정된 지점에 대해 GDOP를 유속성분별로 적용

하여 radar 유속의 오차와 물리적 현상들(대상유속 차이)에 의한 유속분산을 구분하여 radar 유속의 오차를 산출한 바 있다. 두 번째 방법은 서로 마주보는 radial vector를 비교하여 대상유속차이를 줄이는 방법이다. Yoshikawa *et al.*(2006, 2007)은 대한해협에서 이 방법으로 radar 유속 정확도의 하한을 제시한 바 있다.

본 연구해역은 수심 40 m 미만의 천해이며 조류가 해수유동속도의 대부분을 차지한다. 연구해역의 조류는 계절에 따른 변화가 작지만, 표면 열 수지와 담수유출 등에 의한 수층구조변화, 지형류 및 취송류, 섬 및 해안선 굴곡 등의 효과가 복합되어 있어 해류는 비교지점의 위치, 측정 깊이 그리고 계절에 따라 대상유속의 차이가 클 수도 있다. HF radar를 일찍부터 사용해 온 나라에서는 HF radar로 측정된 자료의 정확도에 대하여 체계적인 분석연구가 진행되었지만 우리나라에서는 HF radar를 이용하여 획득된 유속의 정확도에 대한 평가가 미흡한 실정이다. 본 연구는 서해 금강하구 연안역에서 HF radar 유속을 계류유속계 유속과 비교하고 서로 마주보는 방향의 HF radar 유속을 상호 비교하여 대상유속의 차이를 제거하는 두 방법들을 적용하여 i) HF radar 유속의 정확도를 정량적으로 평가하고 ii) radar 유속과 유속계 유속에서 물리적 현상인 조류와 해류성분의 비교를 통해 radar 유속의 사용한계를 살펴보고자 한다.

## 자료 및 방법

### HF radar

연구해역에서 군산 비응도(Fig. 1, Site 1)와 서천 마량리(Site 2)에 HF radar가 설치되었다. 운영 중인 radar는 동일기종(25MHz)으로서 주파수를 0.1 MHz 정도 다르게 설정하여 동일 시각에 유속을 측정하였다. HF radar는 주파수에 따라 감지거리(detection range)와 분해능(resolution)이 한정된다. 거리 및 방향 분해능은 각각 1.5 km와 5°로 설정되었고 최대 감지거리가 45 km, 유속측정수심은 해면 하 1 m 이내이며, 이상적 전파전개 형태(ideal antenna pattern)를 적용하여 사용하였다. 이 장비 제작사는 HF radar 유속을 ADCP 유속과 비교하였을 때 < 7 cm/s 정도의 대표적 정확도를 제시하고 있다(<http://codaros.com/>).

서로 마주보는 방향의 radial vector 비교에 사용된 자료는 2006년 12월 1일부터 2007년 2월 28일까지 약 90일간 관측된 동계자료와 2007년 6월 1일부터 2007년 8월 31일까지 약 92일간 관측된 하계자료를 사용하였다. 유속계 자료와 비교에는 계류기간 동안 관측된 HF radar 유속이 사용되었다(Table 1). 계획된 간격으로 수평격자점을 설정하고 매 정시마다 격자점에서 일정한 반경에 들어오는 radial vector들을 성분별로 분해하여 평균한 후 재합성하여 표층유동 속도를 생성하는 방식을 사용하였다. 2007년 하계 계류지점 M2 주변에서는 두 site로부터 거리가 멀어 HF radar radial vector가 획득되는 횟수가 적었고 남북방향에서 radial vector 간의 거리가 증가하여 합성 vector 산출반경을 1.5 km로 했을 때 유속이 산출되지 않는 횟수가 증가하였다. M2 지점의 유속계 유속과 비교하기 위해 격자망과 합성반경을 2 km로 하였으며, 그 외 지점의 자료 비교를 위해서는 격자망 간격과 vector 합성반경을 1.5 km로 하였다.

**Table 1.** Summary of HF radar and moored current meter measurement in winter 2006 and summer 2007.  $2\theta$  is an intersecting angle of two HF-radar radials, D1 and D2 is a distance to current measuring station from HF radar site 1 and 2 and Dm is a distance from mid-point of the baseline.

Measurements	Season	Station	Duration(m/d)	Depth(m)	Interval	$2\theta(^{\circ})$	D1(km)	D2(km)	Dm(km)
Facing HF radar radials	Winter	Site 1,	12/1 - 2/28	< 1	1 hour	178	10.5	10.5	-
	Summer	Site 2	6/1 - 8/31	< 1	1 hour				
HF radar and Current meter mooring	Winter	N1	11/16 - 1/06	2	10 min.	133	10.3	12.5	4.6
		K1	11/13 - 12/12	5	10 min.	47	8.4	25.6	15.9
		K2	11/13 - 12/17	2	10 min.	60	20.0	21.2	17.8
	Summer	K3	11/13 - 1/12	2	10 min.	36	18.8	32.5	24.4
		M1	6/26 - 8/28	3	20 min.	50	14.4	26.2	18.3
		M2	6/21 - 8/28	5	10 min.	37	34.3	31.6	31.3

**유속계**

Aanderaa사의 RCM-9 단층유속계와 RDCP-600 다층유속계를 계류하여 속도를 측정하였으며, 동계와 하계 두 번에 걸쳐 계류하였다. 이 기기들의 대표적 정확도는 < 1 cm/s,  $\pm 5^{\circ}$ 이다(http://www.aadi.no/Aanderaa/Products/). 계류기간은 동계 2006년 11월 13일부터 2007년 1월 12일까지 약 60일간이며, 4개 지점(K1~K3, N1)에서 관측기간은 다소 차이를 보인다(Fig. 1, Table 1). 하계에는 2007년 6월 26일부터 8월 28일까지 약 63일간 M1과 M2에 유속계를 계류하였다. 동계에 N1, K2, K3에서는 해면 하 2 m에 RCM-9를 계류하였고 K1에서는 RDCP-600을 계류하여 해면 하 5 m의 속도를 10분 간격으로 측정하였다. 하계에는 M1에서 해면 하 3 m에 RCM-9, 5 m부터는 RDCP로 20분 간격의 속도를 측정하였고 M2 지점의 해면 하 5 m에 RCM-9를 계류하여 10분 간격으로 측정하였다. 각 계류지점에서 CTD (SBE 911) 관측이 수행되었다.

**자료처리 및 분석방법**

Graber *et al.*(1997)는 유속비교에 포함되는 오차의 원인들로서 직접 및 간접적 측정 기기들의 오차, 시공간적 자료채취(sampling) 방법에 의한 속도차이, 그리고 물리적 현상에 의한 속도차이들을 체계적으로 제시한 바 있다. 동일 기종의 HF radar 유속에 측정오차가 없고 동일시각에 측정하였다면, 두 곳 radar site로부터 서로 마주보는 선상(baseline)의 radial vector를 비교하였을 때 크기가 같을 것으로 기대할 수 있다. 하지만, Yoshikawa *et al.*(2006)이 제시한 바와 같이 각 site로부터 거리가 멀어지면 radial vector 측정의 대상이 되는 면적이 증가하게 되어 수평적인 대상유속 차이가 radial vector에 포함된다. 따라서 두 radar site 중간지점의 radial vector를 비교하면 (1)에서 제시된 대상유속 차이에 의한 오차는 최소가 되며, radial vector의 측정오차 범위를 알아볼 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 두 site에서 설정된 radial 방향이 baseline과 각각  $1^{\circ}$  정도의 차이를 보여 각 site의 radial vector에 대한 방향각 수정 없이도 비교가 가능하였다. 또한 대상유속의 차이가 최소가 되는 중간지점에서만 radial vector를 비교하여 사용하였다.

HF radar와 유속계로 측정된 유속을 비교할 때에는 먼저 대상 유속 차이를 줄이기 위하여 유동속도가 측정된 시각과 지점을 맞추어야 한다. HF radar 유속은 매 정시에 구해진다. 측정시각을 맞추기 위해 유속계로 측정된 10분 혹은 20분 간격의 시계열 자료

에서 1 시간 간격의 매 정시 자료를 추출하였다. 다음은 격자점에서 산출된 HF radar 유속을 유속계 계류지점의 유속으로 도출하기 위해 계류위치와 가장 근접한 4 격자점을 선정한 후 각 HF radar 유속에 거리역비례 가중내삽법(inverse distance weighted interpolation)을 적용하여 유속계 계류위치에서의 HF radar 유속을 구하였다. 이러한 과정을 거쳐 HF radar 유속이 있을 경우만 분석에 이용하였다. 하지만, 계류유속계는 한 지점의 일정 깊이에서 측정된 유속인 반면 HF radar 유속은 일정한 반경 내의 표층 평균유동 속도라는 차이는 남아 있다.

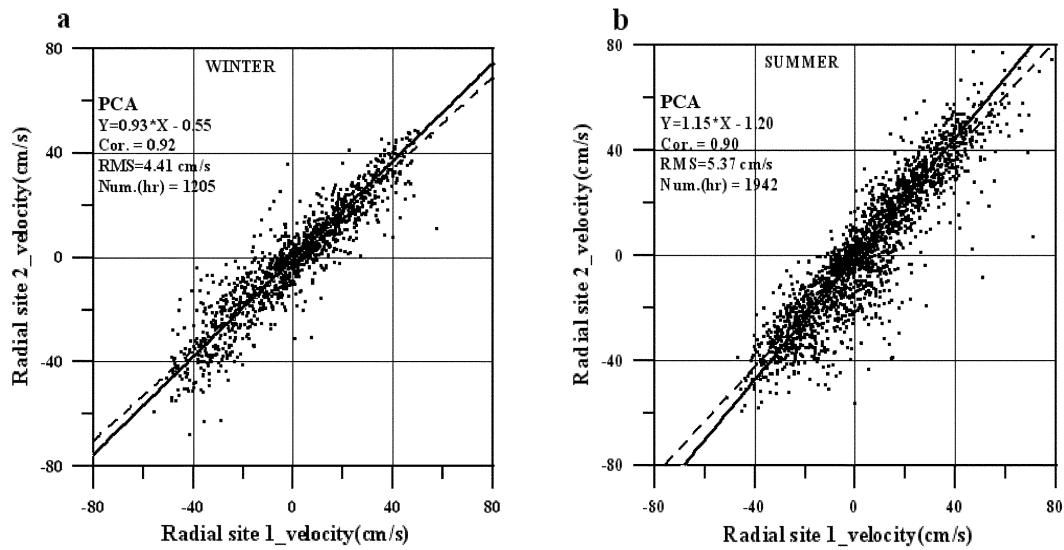
비교자료들은 각 측정기기의 오차와 함께 대상유속 차이를 각각 가지고 있으므로 이 두 요소에 의한 효과를 최소화하기 위해 주성분 분석(PCA: Principal Component Analysis)을 이용하여 회귀분석(regression analysis)을 하였다(Yoshikawa *et al.*, 2006). 비교된 유속집단에 대한 주성분 분석에서 제 1성분 vector (1st mode eigen vector)는 회귀선을 의미하며, 제 2성분의 고유치(eigen value)는 회귀선에 직각방향으로 차이나는 양으로 표현되는 분산정도에 해당한다(Emery and Thomson, 1997). 만약 두 자료에 포함된 오차가 독립적일 경우 이 분산은 두 변수(자료) 모두에 포함된 기기 오차와 대상유속차이에 대한 분산을 포함하게 되므로 본 연구에서는 제 2성분의 고유치를 회귀선에 대한 RMS 편차(Root Mean Square deviation)로 설정하였다.

회귀분석에서 비교유속의 상호간 편차는 알 수 있지만 물리적 현상에 의한 속도들이 얼마나 정확하게 측정되는지는 가늠하기 어렵다. 특히, 연구해역에서는 조류가 해수유동의 대부분을 차지하지만, 동계에는 탁월풍인 북풍계열에 의해 취송류가 발달하고 하계에는 밀도성층 등에 의해 밀도류와 취송류가 동시에 발달할 수 있다. 본 연구에서는 HF radar와 계류 유속계에서 획득된 자료를 조류와 해류성분으로 분리하여 각각을 비교하였다. 29일 유속자료에서 조화상수를 구하고(Easton, 1977), 반일주조와 일주조를 대표하여 조화상수의 안정성이 높은  $M_2$ 와  $O_1$  분조의 조류타원 특성을 비교하였다.

**유속비교**

**마주보는 radial vector 비교**

두 곳의 HF radar site에서 서로 마주보는 선상(baseline)의 중간지점에서 radial vector 크기를 비교하면 Fig. 2와 같다. 동계와 하계에 관측된 자료에 대한 주성분 분석결과는 회귀선의 기울기



**Fig. 2.** Scatter plots of radial velocity measured by two facing HF radars at mid-point of the baseline in (a) winter and (b) summer. Regression results are obtained from PCA. Solid (dashed) line denotes the regression line by PCA (ordinary analysis).

**Table 2.** Comparison statistics between two facing HF radar radials and current components by HF radar and current meter mooring. Values in parentheses represent statistics when radial velocity differences and current component differences larger than four times of RMS deviations are discarded.

Comparison item	Season	Station	A		B (cm/s)		$\gamma$		R.M.S.-d(cm/s)		Num.
			U	V	U	V	U	V	U	V	
Facing HF radar radials	Winter	Site 1 & Site 2	0.93	-0.55			0.92		4.41		1205
			(0.95)	(-0.55)			(0.95)		(3.68)		(1162) (96.4%)
	Summer		1.15	-1.20			0.90		5.36		1942
			(1.11)	(-0.42)			(0.95)		(3.95)		(1796) (92.5%)
HF radar vs. current meters	Winter	N1	1.16	1.05	2.52	0.33	0.96	0.98	4.56	3.64	1020
			(1.14)	(1.05)	(1.93)	(0.43)	(0.97)	(0.99)	(3.96)	(3.41)	(808) (79.2%)
		K1	1.00	0.77	4.62	-1.04	0.89	0.93	7.38	6.10	218
			(0.94)	(0.86)	(2.95)	(-0.67)	(0.97)	(0.97)	(3.99)	(4.17)	(206) (94.5%)
		K2	1.12	1.26	0.66	-0.93	0.97	0.96	3.85	4.87	394
			(1.10)	(1.19)	(0.57)	(-0.83)	(0.99)	(0.97)	(3.26)	(4.05)	(331) (84.0%)
		K3	1.38	0.39	2.29	-9.29	0.86	0.45	12.78	10.91	1018
			(1.09)	(0.83)	(0.24)	(-3.01)	(0.98)	(0.85)	(4.80)	(4.63)	(473) (46.5%)
Summer	M1	1.31	0.99	7.90	-8.10	0.86	0.86	10.66	10.12	1522	
		(1.28)	(1.02)	(6.81)	(-7.82)	(0.89)	(0.87)	(9.68)	(9.72)	(1469) (96.5%)	
	M2	1.12	1.73	2.54	0.62	0.76	0.60	11.55	13.04	1522	
			(1.10)	(1.52)	(1.64)	(-0.52)	(0.84)	(0.74)	(9.24)	(10.53)	(1397) (91.8%)

A, B: slope and intercept of regression line obtained from PCA,  $\gamma$ : correlation coefficient, R.M.S.-d: root-mean-square deviation from PCA regression line, Num: number of samples.

A가 1에 가깝고 절편이 1 cm/s 정도였으며, 작은 RMS 편차(< 5.4 cm/s)를 보였고 상관계수는 0.9보다 크다(Table 2). 비교 결과에서 동계가 하계보다 더 높은 상관성과 작은 RMS 편차를 보였다. 비교지점은 조류세기가 50 cm/s 정도 되는 곳이므로 대략 10% 정도의 RMS 편차이다.

두 지점에서 운용된 HF radar는 동일 기종이며 사용된 주파수도 매우 유사하고, 비교지점이 두 site의 중간이기 때문에 RMS 분산에는 대상유속 차이가 거의 포함되지 않게 된다(Yoshikawa et al., 2006). Table 2의 RMS 편차 4.4 cm/s와 5.4 cm/s는 대부분

radar에서 10.5 km 떨어진 위치에서의 동계와 하계 radial vector의 측정오차라고 볼 수 있다. 이 오차에는 전파의 주파수대역, 전개형태, 기상 및 해상상태, radar 안테나 주변의 조건과 환경 등에 따라 신호 대 잡음 비율이 증감하는 효과와 불확실한 신호에 의한 측정오차도 포함되어 있다. 자료비교 기간이 거의 같았음에도 하계에 사용된 자료수가 동계에 비해 1.6배 많은 것은(Table 2, Num 참조) 기상 혹은 해상상태에 따라 결측되는 빈도가 달라짐을 의미한다. HF radar 운영과정에서 바람이 강하고 폭우나 눈보라가 있는 시기에는 측정범위가 현저히 좁아짐을 알 수 있었다.

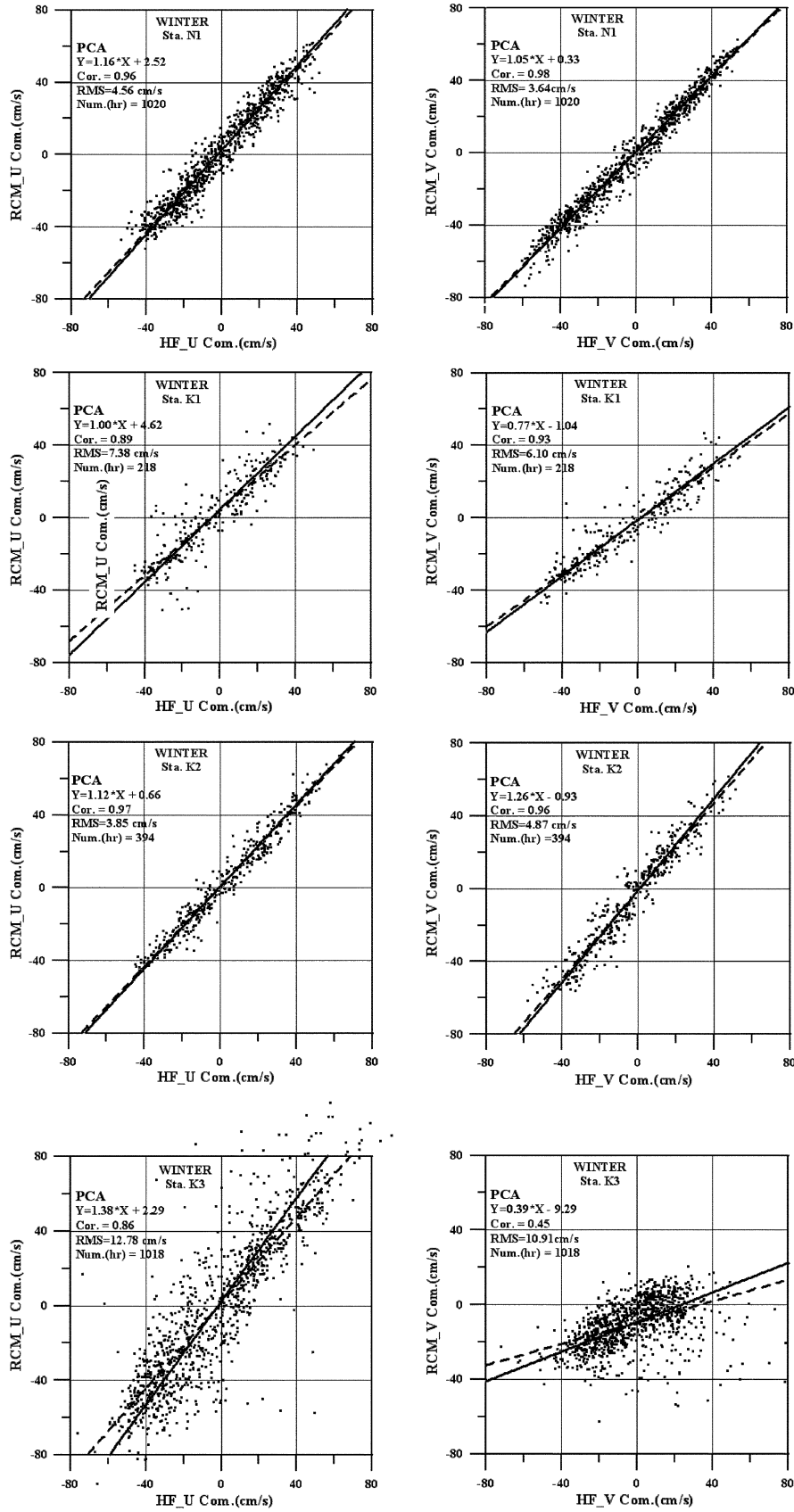


Fig. 3. Scatter plots of current components measured by HF radar and current meter at four mooring stations in winter. Regression results are obtained from PCA. Solid (dashed) line denotes the regression line by PCA (ordinary analysis).

한편, 동계의 상관계수는 하계보다 높았고, 동계 RMS 편차도 하계보다 적었다. 특히, 비교된 유속집단의 회귀선 기울기를 비교해 보면 동계에는 Site 1에서 측정된 유속이 Site 2에서 측정된 유속보다 7% 정도 더 큰데 비해 하계에는 전자가 후자보다 15% 정도 더 작게 나타났다. 이는 하계에 Site 1에서 측정된 유속이 Site 2에서 측정된 유속보다 20 cm/s 이상 크거나 방향이 다른 경우가 동계에 비해 훨씬 많았기 때문이다. 두 유속의 차이가 20 cm/s 이상이 되는 경우는 대략 두 RMS 편차 평균치의 4배가 된다. 이러한 경우를 radial vector가 결정되는 과정에서 주변조건과 환경에 의해 비정상적인 불확실한 정보가 포함되어 발생한 것으로 본다면 동계자료에는 3.6% 정도, 하계자료에는 7.5% 정도가 이에 해당하고, 이러한 빈도수는 두 유속의 차이가 정규분포에서 다소 벗어나는 분포특성임을 제시한다. 이 자료를 제거하면 두 비교 유속의 상관계수는 0.95로 높아졌고 회귀선 기울기도 1에 더 가까워졌으며 RMS 편차가 4 cm/s 이하로 줄어들었다(Table 2 괄호안의 통계치 참조).

**계류유속계 유속과 비교**

**동계:** HF radar와 유속계로 측정된 속도를 성분별로 나누어 비교하였다(Fig. 3). K1과 K2에서는 radar 관측과 중첩되는 기간이

짧아 비교자료 수가 적다. N1에서 상관성이 가장 좋고 RMS 편차가 가장 적으며 K2에서도 0.96 이상의 상관계수와 작은 편차(< 4.9 cm/s)를 보였다(Table 2). 대표유속 60 cm/s에 대한 RMS 편차 비율은 10% 미만 수준이고, 마주보는 radial vector를 상호 비교한 결과보다 좋은 상관성 및 편차이다.

회귀선의 기울기가 1 보다 크면 유속계 유속성분이 HF radar 유속성분보다 큰 값이었음을 의미한다. 동향성분에서는 K1을 제외하면 유속계 유속이 radar 유속보다 큰 값을 보였고 특히 K3에서는 38% 정도 크게 나타났다. 북향성분에서는 K1과 K3에서 유속계 유속이 radar 유속보다 현저하게 작은 값을 보였지만 K2에서는 26% 정도 큰 값으로 측정되었다. K1에서는 회귀선의 기울기가 0.77정도이며, RMS 편차도 7 cm/s 정도로 다소 크다. K3에서는 회귀선의 기울기가 0.39로 1.0에서 크게 벗어나며 절편이 9 cm/s보다 크고, RMS 편차도 11cm/s 이상이며 상관계수가 0.45로 두 유속의 상관성이 매우 낮게 나타났다.

앞 절에서와 비슷하게 비교된 유속성분의 차이가 N1과 K2 지점의 작은 RMS 편차를 평균한 값의 약 4배 정도에 해당하는 14 cm/s보다 큰 경우를 불확실한 정보와 비정상적 조건에서 유속이 측정된 경우로 설정하였다. 이를 제거한 후 다시 회귀분석을 하였을 때에는(Table 2 괄호안의 통계치 참조) 4 지점에서 모든 통계

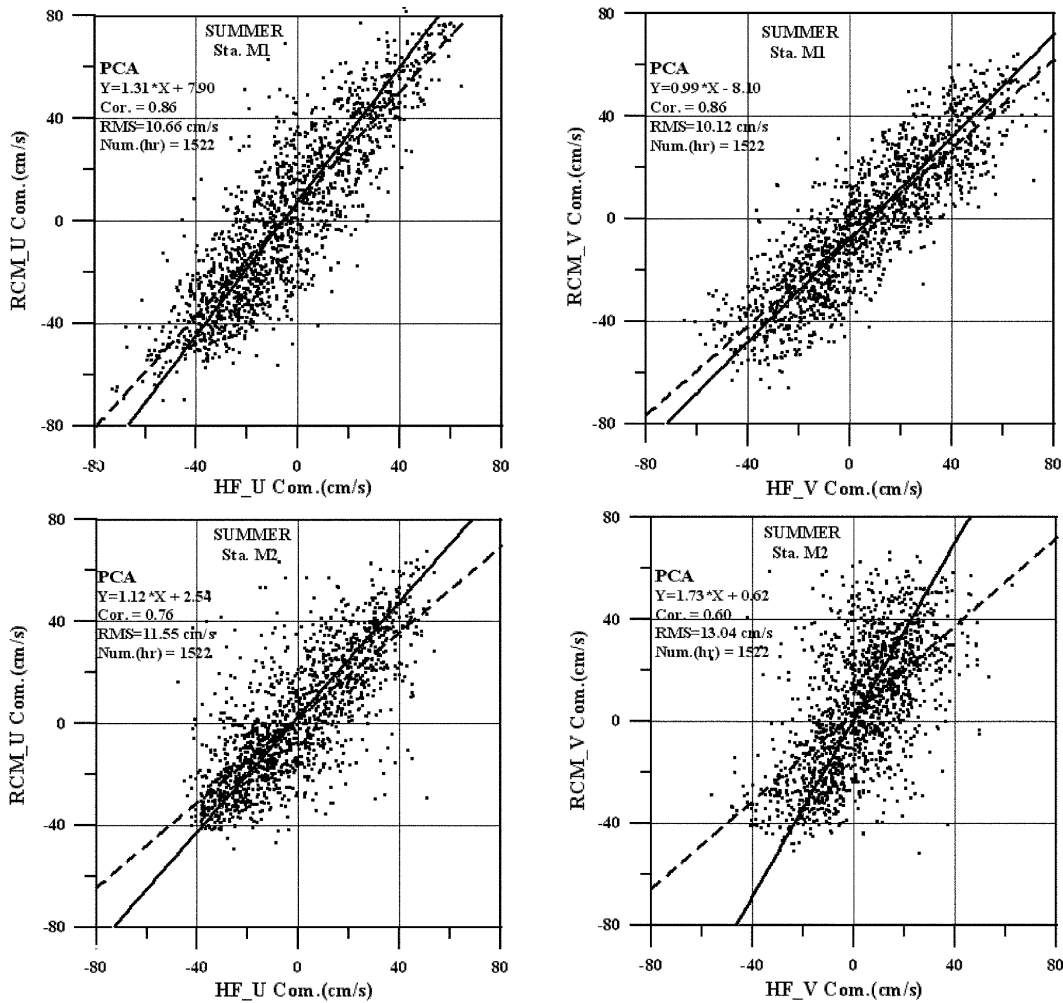


Fig. 4. As in Fig. 3 except for M1 and M2 stations in summer.

적 수치가 좋은 쪽으로 개선되었으며, RMS 편차가 5 cm/s 보다 작아졌다. 하지만 K1을 제외한 3 지점에서 재분석에 사용된 자료 수는 85% 이하로서 감소하였다. K3에서 재분석에 사용된 자료 수는 46.5%로 감소하여 유속차이가 정규분포에서 크게 벗어나 있음을 의미하며, 재분석된 수치들은 통계적 의미를 갖기 어렵다.

**하계:** 두 지점에서 측정된 HF radar와 유속계 속도를 성분별로 나누어 비교하면 Fig. 4와 같다. RMS 편차는 두 지점 모두 10 cm/s 이상이지만 M1에서는 M2에 비해 상관성이 좋고 RMS 편차도 적다. M1에서는 동향성분에서 유속계 유속이 HF radar 유속보다 31% 정도 크고(기울기 1.31) M2에서는 북향성분의 회귀선 기울기가 1.73으로 유속계 유속이 HF radar 유속보다 70% 이상 크고, 상관계수가 0.6, RMS 오차가 13 cm/s 이상이어서 상관성이 낮았다 (Table 2). 이 회귀분석 결과는 K3 지점을 제외한 동계의 분석결과들에 비해 상관계수가 낮고, 약 2배 이상의 RMS 편차를 보여준다.

M1에서 RMS 편차의 작은 값은 10 cm/s 정도이다. 이 값의 4배가 되는 40 cm/s를 불확실한 정보나 비정상적 조건에서 측정된 유속으로 본다면 M1에서는 3.5%, M2에서는 8.2%가 이에 해당하였다. 이를 제거한 후 다시 회귀분석을 하였을 때 통계적 수치는 다소 개선되었지만 M1에서는 여전히 동향성분의 회귀선 기울기가 크고 절편도 크다. M2에서도 북향성분의 회귀선 기울기가 1.5 이상이고 상관계수도 0.74정도가 되었다. 하계의 두 정점은 동계 정점들에 비해 radar site로부터 거리가 멀다. 특히, M2에서는 두 radar site로부터 radial vector 방향이 동서방향에 가까워서 HF radar가 동서방향 유속은 잘 감지하지만 남북방향의 유속을 정확하게 감지할 수 없는 조건이다. 이 위치적 조건에 의해 북향성분의 회귀선 기울기가 1.7 이상을 보이는 것으로 해석된다.

동계와 하계에 측정된 유속의 비교 결과에서 비교지점이 두 radar site의 중간지점으로부터 떨어진 거리 Dm이 증가하면, 상관계수들은 낮아지고, RMS 편차는 증가하는 경향을 보인다(Table 2, Fig. 5). RMS 편차는 하계(M1, M2지점)가 동계보다 크고, 계류 유속계의 깊이가 깊으면(K1, M2지점) 증가하는 경향도 있다. 이러한 경향은 radar로부터 거리증가에 따라 감소하는 신호 대 잡음 비율에 의한 효과를 포함하고 있으며, 동시에 대상유속 차이도 포함하고 있음을(Graber *et al.*, 1997; Yoshikawa *et al.*, 2006) 제시한다.

비교지점의 위치에서 두 radar site로부터 바라본 radial line이 이루는 사이각 2θ가 직각에서 벗어난 정도에 따라 RMS 편차가 달라지는 경향이 보인다. K3과 M2 지점이 2θ가 37° 미만으로 작은 값인 곳이며, RMS 편차가 크다(Table 1과 2). 한편 동계 K1과 K2, 하계 M1 지점은 Dm이 16~18 km 범위이지만, K2지점의 RMS

편차는 Dm이 5 km 미만인 N1지점의 편차와 비슷한 반면에 다른 정점에서는 큰 RMS 편차를 보였으며, 회귀선의 기울기와 절편, 그리고 상관계수도 차이를 보였다. K2 지점은 2θ가 60° 되는 곳이며 D1과 D2가 거의 같다. K1과 M1지점의 위치는 K2 지점에 비해 두 radar site까지의 거리 D1, D2가 크게 다른 곳에 해당한다.

이러한 경향들은 유속비교에서 계산된 RMS 편차에는 유속계의 고유 측정오차뿐만 아니라 radar 유속에는 두 radar site에 대해 비교지점이 어느 위치에 있는가에 따라 달라지는 GDOP를 포함하고 있음을 의미한다. 여기서 GDOP는 계절에 상관없이 비교지점의 위치에 따라 결정되는 HF radar 유속의 오차이므로 이를 계산하여 RMS 편차에서 제거하면 비교유속 차이를 보다 정량적으로 분석할 수 있다(Chapman *et al.*, 1997). 유속계 유속과의 비교에서 작은 RMS 편차의 4배 이상 되는 유속차이를 불확실한 정보나 비정상적 조건에서 측정된 값으로 보고 이를 제거한 후 재 분석하였을 때 회귀분석의 통계적 수치는 개선되었다(Table 2). 하지만 비정상적 조건이 되었다는 것을 확인할 측정현장의 기준은 어디에도 없다. 따라서 모든 자료가 비교된 경우의 RMS 편차에서 radar 유속의 정확도를 분석하여야 한다.

**오차구분**

유속계가 계류된 지점에 대해 두 radar site로부터 측정된 radial vector가 V<sub>1</sub>과 V<sub>2</sub>이고 그 지점에서 각 radial vector 측정에 포함된 잡음(noise) σ가 동일하다면, 합성된 속도 vector의 성분 U와 V에 포함된 편차는 (2)와 같이 주어진다(Chapman *et al.*, 1997).

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \sqrt{2} \left[ \frac{\sin^2 \alpha \sin^2 \theta + \cos^2 \alpha \cos^2 \theta}{\sin^2(2\theta)} \right]^{1/2} \sigma \\ \sigma_v &= \sqrt{2} \left[ \frac{\cos^2 \alpha \sin^2 \theta + \sin^2 \alpha \cos^2 \theta}{\sin^2(2\theta)} \right]^{1/2} \sigma \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 α는 두 radar site의 baseline 중간지점에서 동서방향을 기준으로 유속계 계류지점을 바라본 각도이고 θ는 radial vector 교차각의 이등분 각이다. (2)에서 σ<sub>u</sub>/σ와 σ<sub>v</sub>/σ가 GDOP의 동서와 남북방향 성분이다. 본 연구에서 Site 1과 2는 남북방향으로 설치되어 있으므로는 D1과 D2가 차이나는 효과를 반영하며 θ는 부분적으로 Dm의 차이를 반영한다. α가 작은 K2와 M2에서는 동향성분의 GDOP가 작은 값을 보였으며(Table 3), 동향성분의 편차가 작아지게 한다. K3과 M1에서는 GDOP의 두 성분 모두 큰 값이다. N1과 K1에서는 GDOP 효과에 의해 동향성분에서 편차가 작아지고, K2와 M2에서는 북향성분에서 편차가 증가되게 한다.

Chapman *et al.*(1997)은 GDOP를 이용하고, 측정된 각 성분의 유속편차를 σ<sub>a</sub>로 보고 HF radar 유속의 오차 σ<sub>h</sub>와 다른 요인들(계류 유속계 오차, 대상유속 차이 등)에 의한 오차 σ<sub>p</sub>로 나누어 (3)과 같은 관계식을 제시하였다.

$$\sigma_a^2 = GDOP^2 \sigma_h^2 + \sigma_p^2 \quad (3)$$

본 연구에서 유속 비교지점들에 대한 GDOP 성분과 측정된 속도의 성분별 유속에 대한 RMS 편차(Table 2)를 σ<sub>a</sub>로 사용하여 (3)에서 σ<sub>h</sub>와 σ<sub>p</sub>를 구하였다. K3와 M1에서 σ<sub>h</sub>가 7 cm/s 정도로 크고, M2에서는 σ<sub>p</sub>가 10 cm/s 이상의 큰 값을 보였다(Table 3). 이

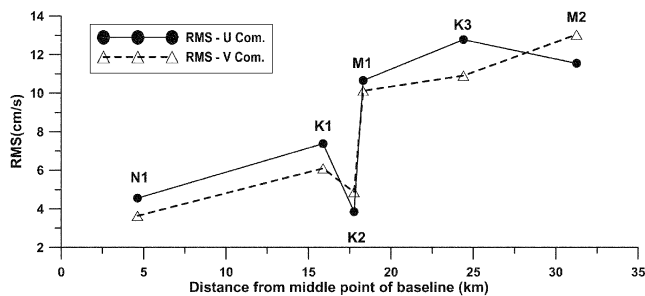


Fig. 5. Variations of RMS deviation as a function of distance from middle point of base line.



**Table 3.** Analysis of differences between current component measured by HF radar and mooring as a function of GDOP.

Season	Station	$\theta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	Component	$\sigma_u(\text{cm/s})$	GDOP	$\sigma_v(\text{cm/s})$	$\sigma_r(\text{cm/s})$
winter	N1	66.5	22	U	4.56	1.67	2.39	2.20
				V	3.64	0.98	2.39	2.20
	K1	23.5	67	U	7.38	1.66	3.56	4.41
				V	6.10	0.99	3.56	4.41
	K2	30	11	U	3.85	0.85	2.68	3.11
				V	4.87	1.40	2.68	3.11
K3	18	51	U	12.78	1.84	6.69	3.41	
			V	10.91	1.55	6.69	3.41	
summer	M1	25	47.5	U	10.66	1.34	7.69	2.69
				V	10.12	1.27	7.69	2.69
	M2	18.5	0.5	U	11.55	0.75	3.58	10.31
				V	13.04	2.23	3.58	10.31

두 지점을 제외하면  $\sigma_v$ 는  $\sigma_u$ 에 비해 현저히 감소하였으며 2.4~3.6 cm/s 범위의 값이고  $\sigma_r$ 도 2.2~4.4 cm/s 정도이다. 따라서 유속계 유속과 비교에서 계산된 RMS 편차  $\sigma_r$ 의 40~50% 정도는 적어도 HF radar의 유속측정 오차  $\sigma_r$ 에 의한 편차로 볼 수 있다.

K3 지점은 육지 가까이에서는 전파의 신호 대 잡음비 수준이 현격히 감소하여 발생하는 큰 측정오차가 HF radar 유속에 포함되었고(Barrick *et al.*, 1977), 유속계에는 주변 섬들의 지형적 형상과 섬들 사이에 형성된 수로로 인하여 주변의 대표(평균)적 흐름과는 다른 국지적 흐름이 관측되어  $\sigma_r$  값이 크게 나타났을 가능성이 있다. M1에서도 큰  $\sigma_r$ 가 계산되었는데 이는 GDOP의 성분이 비슷하고 RMS 편차 성분도 크기가 비슷하여 발생하는 결과로서 (3)의 관계식에 대한 검토가 요구된다.

M2에서 두 radar site까지 거리가 30 km 이상이어서 거리에 따라 증가하는 신호 대 잡음비 수준이 M1에서 보다 컸을 것으로 기대된다. 또한, M2 지점에 대한 HF radar 유속을 산출하기 위해 반경 2 km 내의 radial vector를 사용한 처리과정도  $\sigma_r$ 가 증가한 원인이 될 수 있고, 유속계 계류 깊이가 5 m로서 큰 대상유속 차이가 있었을 가능성도 충분하다. GDOP를 보정했을 때  $\sigma_r$ 는  $\sigma_u$ 보다 현저히 줄어들었고  $\sigma_v$ 는 큰 값을 보였다. 하지만 북향성분을 감지하기 어려운 위치조건이므로 M2에서 오차구분은 의미가 없다.

### 조류와 평균해류 비교

#### 조류

HF radar와 유속계로 측정된 동일지점의 M<sub>2</sub>와 O<sub>1</sub> 분조 조류타

원 특성을 비교하면 Table 4와 같다. 반일주조 조류타원의 이심율은 M2 지점을 제외하면 0.95 이상으로서 왕복성 조류이다. 일주조는 K3 지점 해면 하 2 m에서 이심율이 0.77로서 회전성 조류이며 그 외 지점에서는 0.94 이상으로 왕복성이 뚜렷하다. 두 분조 조류타원에서 K2에서만 유속계 유속에서 계산된 장축이 HF radar 유속에서 얻어진 장축보다 크고 나머지는 모두 전자가 후자보다 작았다. 이러한 특징은 회귀분석에서 얻어진 기울기가 대부분 1 보다 크게 나온 결과와 일치하는 것으로서 조류의 경우 HF radar 유속이 유속계 유속보다 다소 작은 값으로 측정되었음을 의미한다. 하지만, 비교지점들 중에서 K3와 M2를 제외하면, HF radar와 유속계로 측정된 M<sub>2</sub> 분조의 특성차이는 장축크기에서 5~9 cm/s, 장축방향에서 3~8°, 위상에서 3~9° 정도이고, O<sub>1</sub> 분조의 특성차이는 장축크기에서 2 cm/s 미만이며 나머지 특성차이는 M<sub>2</sub> 분조와 유사하다. 따라서 앞장의 유속비교에서 분석된 위치적 문제가 없는 범위 내에서 radar 유속은 조류를 측정하는 데는 충분한 분해능을 갖는다고 판단된다.

K3 지점에서 M<sub>2</sub> 분조 조류타원의 장축방향은 180° 이상이며 해면과 해면 하 2 m에서 조류의 회전이 반대임을 의미한다. 이로 인해 타원운동 위상도 차이가 크다. 또한 O<sub>1</sub> 분조 조류타원에서도 장축방향과 타원운동 위상이 큰 차이를 보였다. 이 지점에서 조류 특성이 크게 차이나는 것은 회귀분석 및 오차구분에서 언급된 바와 같이 주변 섬의 영향과 GDOP, 그리고 대상유속 차이에 의한 것으로 예상된다. M2 지점에서는 해면과 해면 하 5 m에서 반일주조와 일주조 타원특성 차이가 장축크기에서 16 cm/s와 4 cm/s, 장축방향은 25°와 45°, 위상은 29°와 5°로서 매우 크다. 이는 주로

**Table 4.** Characteristics of tidal current ellipse measured by HF radar and current meter. MA: major axis strength, MA-dir.: major axis direction measured clockwise from the north, Net phase: phase of net motion, *e*: eccentricity of the ellipse.

	Station	N1		K1		K2		K3		M1		M2	
	Items	HF	RCM9	HF	RDCP	HF	RCM9	HF	RCM9	HF	RCM9	HF	RCM9
M <sub>2</sub>	MA(cm/s)	46.7	51.6	40.4	36.5	43.8	51.6	43.1	54.0	45.2	54.9	23.8	39.3
	MA-dir(°)	38.2	41.8	38.9	45.6	50.6	46.2	59.1	258.2	41.9	50.3	68.9	44.0
	Net phase(°)	20.4	23.4	14.8	8.0	14.0	23.4	13.4	-161.4	31.9	30.8	10.0	39.1
	<i>e</i>	0.976	0.972	0.986	0.989	0.971	0.959	0.975	0.988	0.999	0.988	0.877	0.823
O <sub>1</sub>	MA(cm/s)	3.7	4.4	3.4	3.0	3.3	5.3	4.1	4.8	5.3	6.1	2.8	6.7
	M.A-dir(°)	218.2	219.4	204.1	201.6	223.0	212.3	186.8	239.0	236.7	249.3	248.2	203.4
	Net phase(°)	-14.2	-11.0	-22.5	-37.9	-5.2	-6.0	-11.3	-68.5	-6.8	-8.2	18.3	22.2
	<i>e</i>	0.985	1.000	0.993	1.000	0.998	0.995	0.941	0.773	0.989	0.993	0.987	0.997

**Table 5.** Vector mean of wind and current. Speed of wind and current is in m/s and cm/s and the direction is in degree clockwise from the north. Wind direction is presented as same manner as current direction.

Station	Items	Direction (°)	Speed	Data period
N1	Current	HF radar	198.05	4.56
		RCM-9 (2m)	171.07	4.82
	Wind at Mal-do	152.95	3.03	2006/12/2~2007/1/11
K2	Current	HF radar	154.89	4.04
		RCM-9 (2m)	151.01	6.05
	Wind at Mal-do	173.31	2.40	2006/12/2~12/16
M1	Current	HF radar	326.19	9.19
		RCM-9 (3m)	138.55	2.25
	Wind at Mal-do	306.21	1.21	2007/6/27~8/3

HF radar 유속의 오차에 의한 것이다.

**평균해류**

주성분 분석에 의한 유속비교에서 RMS 편차가 적고 조류비교에서 조류타원 특성 차이가 비교적 적은 N1, K2와 M1 지점에 대해 HF radar와 유속계 관측기간이 중첩된 동안의 평균 해류를 구하였다(Table 5). 동계 N1과 K2 지점에서는 해류가 4~6 cm/s 정도의 평균유속이고 남쪽 혹은 동남동쪽으로 흘렀으며 평균바람은 3 m/s 정도의 북서풍이었다. N1에서는 바람이 불어가는 방향에 대해 평균흐름이 오른쪽으로 향하였지만 K2에서는 왼쪽으로 향하였다. 특히, K2에서는 해면 하 2 m의 평균유속이 HF radar 해류 유속보다 컸다.

하계에는 평균바람이 동남동풍이었고 풍속도 1.2 m/s로 약했다. M1에서 HF radar 해류는 평균바람의 오른쪽으로 흐르며 유속이 9.2 cm/s로 동계보다 크다. 해면 하 3 m에서는 평균유속이 현저히 줄어들고 해면과는 반대 방향으로 흘렀다. RDCP에 의해 해면 하 5 m부터 1 m 간격으로 측정된 속도의 평균 방향도 3 m의 흐름방향과 유사하여 유속계의 오차는 매우 작은 것으로 판단되었다. N1과 M1 표층의 평균해류는 모두 Ekman 취송류 이론에 부합되지만, K2와 M1에서 평균속도 수직구조는 단순히 취송류만으로는 설명하기는 어렵다. 따라서 HF radar로 측정된 유속이 해류를 적절히 분해해 낼 수 있는가에 대한 검토가 필요하다.

**토의 및 요약**

Chapman *et al.*(1997)은 유속비교의 편차를 산출하는 회귀분석의 특성에 대해 언급하지 않았다. Yoshikawa *et al.*(2006)이 제시한 것처럼 일반적 회귀분석은 비교되는 변수의 대응 축을 바꾸면 회귀선이 바뀌고 분산도 변한다. 하지만 주성분 분석에 의한 선형 회귀선은 사용된 자료집단에 대해 대칭적인 회귀선이 되며, 분산도 변하지 않게 된다. 따라서 비교되는 두 변수에 오차가 모두 포함되어 있을 경우에는 비교할 절대치가 없으므로 주성분 분석에 의해 편차를 추출하는 것이 가장 합리적이라고 볼 수 있다. 이러한 특성을 바탕으로 본 연구에서도 주성분 분석을 이용하여 회귀 분석을 하였으며, 각 변수의 표준편차가 같을 경우 주성분 분석에서 얻어진 RMS 편차는 표준편차/√2가 된다.

Yoshikawa *et al.*(2006, Fig. 6)이 대한해협에서 7개소 radar들 중에서 마주보는 선상의 중간까지 거리가 대략 25 km와 50 km

되는 지점에 대해 동일한 방법으로 계절에 대한 구분 없이 3년 동안의 측정치를 비교분석한 상관계수는 각각 0.88과 0.63 그리고 RMS 편차는 5.7 cm/s와 13.7 cm/s이었다. 두 지점에서 차이는 통계적 수치는 거리에 의한 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio) 감소효과로 설명되었다. 본 연구의 비교결과는 이들보다 상관계수가 높았다(Fig. 2와 Table 2). 하계 RMS 편차 5.4 cm/s는 대한해협에서 중간지점까지 거리가 25 km 되는 경우의 편차 5.7 cm/s와 비슷하지만 동계 RMS 편차 4.4 cm/s는 작은 값이다. 본 연구해역에서는 radar site로부터 중간지점까지 거리가 10.5 km로서 대한해협의 경우보다 짧아서 높은 상관계수를 보인 것으로 해석된다. 또한 동계 RMS 편차 4.4 cm/s는 대한해협 25 km 거리에서 산출된 편차 5.7 cm/s보다 확연히 작은 값이므로 본 연구해역에서 신호 대 잡음비가 대한해협에 비해 낮았다고 하기는 어렵다. 다만 하계 RMS 편차가 동계보다 큰 값을 보인 것은 하계에 신호 대 잡음비가 동계보다 낮았을 가능성을 제시한다.

HF radar 유속을 유속계 유속과 비교하였을 때도 RMS 편차는 기존 연구들(Chapman *et al.*, 1997; Paduan and Graber, 1997)에서 밝혀진 바와 같이 radar로부터의 평균거리 Dm이 증가할수록, GDOP 값이 클수록 증가하는 경향이 뚜렷하였다. Dm의 차이를 부분적으로 반영하는 GDOP를 이용하여 RMS 편차를 분리하였을 때에는 radar 유속의 성분별 오차인  $\sigma_{rn}$ 는 비정상적인 위치인 K3과 GDOP 제거에 문제점이 포함된 M1, M2 지점을 제외하면 2.4~3.6 cm/s 범위의 값이다(Table 3). HF radar로 관측되어 합성된 속도 vector의 측정오차는 성분별 오차의 √2배가 되므로 radar 유속의 측정오차는 동계 GDOP 효과를 제거하였을 때에 적어도 5.1 cm/s (=√2×3.6 cm/s) 보다 작다고 할 수 있다. 이 값은 baseline의 중간 지점에서 비교된 radial vector의 동계 RMS 편차 4.4 cm/s보다 크고 하계 5.4 cm/s보다 작으며, radar 제작사가 제시한 대표적 정확도 7 cm/s보다 약 √2배 정도 작다.

본 연구에서 마주보는 선상의 중간지점에서 radial vector를 비교하여 얻어진 RMS 편차는 방향에 대해서는 독립적인 유속 vector의 정확도를 나타낸다. 이 방법에 의해 평가된 편차는 동계와 하계의 편차 4.4 cm/s와 5.4 cm/s는 유속 성분별로 비교하여 얻어진 합성속도 vector의 RMS 편차 5.1 cm/s와 같은 의미를 갖고 있다. 따라서 서로 다른 두 방법에 의해 얻어진 비교유속의 편차는 4.4~5.4 cm/s의 범위를 갖는다고 할 수 있고, 가장 큰 값인 RMS 편차 5.4 cm/s는 연구해역에서 운영된 HF radar의 유속측정 정확도의 하한이다. 본 연구에서는 주성분 분석을 통해 구하였기 때문에 제작사

가 제시한 것보다 좋은 정확도가 도출된 것으로 보이며, 연구해역에서 조류가 해수유동의 대부분을 차지하여 측정된 유속이 대부분 주기적이었기 때문에 얻어진 결과라고 해석된다.

본 연구의 K1지점은 Son *et al.*(2007)이 유속을 비교한 지점과 일치한다. 2002년 7월에 측정된 유속을 사용하여 주성분 분석을 하였을 때 U와 V에 대한 RMS 편차는 9.47 cm/s와 7.71 cm/s 이었고, 회귀선 기울기는 1.0과 0.63 이었으며 상관계수가 0.92와 0.85 이었다. 본 연구에서 동계 유속성분 비교결과에 비해(Table 2) 북향성분의 회귀선 기울기와 상관계수는 더 낮았고, RMS 편차는 더 큰 값이었다. 2002년도 비교유속의 RMS 편차에 대해 K1 지점에 대한 GDOP 효과를 제거하였을 때  $\sigma_u=4.08$  cm/s,  $\sigma_v=6.56$  cm/s이었다. 이 값들은 본 연구에서 2006년 동계 유속을 비교분석한 결과에 비해(Table 4참조)  $\sigma_u$ 는 0.5 cm/s 정도 차이이지만,  $\sigma_v$ 는 2 cm/s 이상 큰 차이를 보인다. Son *et al.*(2007)이 지적한 바와 같이 2002년 하계에는 K1지점이 새만금 방조제의 개방공간을 통해 유출입하는 강한 조류 jet의 영향을 받고 있었으며, 동시에 개방공간 주변에서 발생하는 조류 잔차류와 만경강과 동진강 하구에서 유출된 저염수의 영향도 받아 공간적 속도차이가 크게 형성되는 지점이었기 때문에  $\sigma_p$ 가 크게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

한편, K3에서는 인근 육지가 radial vector를 얻는 범위 내에 포함될 수 있어 radar 유속에 육지에서 반사된 정보가 많이 포함되었기 때문에  $\sigma_p$ 가 큰 값을 보인 것으로 해석되었지만, 하계 정점 M1에서  $\sigma_p$ 가 큰 값을 보인 것은 검토가 필요하다. U와 V성분에 대한 GDOP 값은 다른 지점의 GDOP 값에 비해 크지 않지만 두 성분의 GDOP 값은 비슷하다(Table 3). (3)에서 GDOP는 미지수  $\sigma_u$ 나  $\sigma_v$ 에 대한 방정식의 기울기이고,  $\sigma_p^2$ 는 절편이다.  $\sigma_u^2 - \sigma_p^2 < 0$  혹은  $\sigma_v^2 - \text{GDOP}^2 \sigma_p^2 < 0$ 인 경우에는  $\sigma_u$ 나  $\sigma_v$ 가 허수가 된다. 또한 U와 V성분에 대한 두 방정식의 기울기와 절편이 비슷하면 각각의 값이 조금만 달라져도  $\sigma_u$  혹은  $\sigma_v$ 가 실수의 해를 가질 수 없다. M1에서 계산된 GDOP와 RMS 편차  $\sigma_a$ 가 이러한 조건을 가지고 있었고, 계산과정에서  $\theta$ 와  $\alpha$ 가 조금 차이가 났을 때 허수의 해가 일어났다. K3에서도 유사한 효과가 있었다. M1에서는 이러한 불확실성 때문에 큰 값의  $\sigma_p$ 가 도출되었고 따라서  $\sigma_p$ 도 불확실하다고 할 수 있으며, (3)을 적용하는 과정에서 유의해야 할 경우에 속한다. Chapman *et al.*(1997)은 radar 관측해역의 중앙부에 대한 대표적 GDOP를 사용하여 (3)식으로부터  $\sigma_u$ 와  $\sigma_v$ 를 얻었으며 GDOP와  $\sigma_a$ 의 성분별 값은 서로 비슷하지 않았기 때문에 (3)을 적용하는 과정에서 나타날 수 있는 문제점이 노출되지 않은 것으로 보인다.

$\sigma_p$ 는 물리적 현상과 관측하는 깊이차이에 의한 대상유속차이를 주로 포함한다. 하지만  $\sigma_p$ 가 작다고 해서 radar 유속이 물리적 현상들을 충분히 감지한다고 보기는 어렵기 때문에 본 연구에서는 이를 검토하기 위해 radar와 유속계로 측정된 유속에서 조류와 평균해류를 구분하여 비교해 보았다. 조류타원 특성비교에서 GDOP와 위치조건이 양호한 N1, K1, K2에서는 HF radar로 관측된 조류와 유속계로 관측된 조류의 특성이 매우 가까워 두 관측결과를 함께 사용하여도 무리가 없을 정도이다(Table 4). 하계 M1 지점에서 RMS 편차가 크고, GDOP에 의한 오차구분 조건도 나빴지만 조류특성은 동계 N1과 K1 지점들에서 나타난 차이와 비슷하다. 따라서 K3와 M2지점과 같이 위치적 조건이 나쁜 경우를 제

외하면 연구해역에서 HF radar로 표층조류를 측정하여 공간적 특성분포를 충분히 구분할 수 있다.

동계 N1 지점의 평균해류 수직구조는 취송류 이론에 부합하였지만, 동계 K2 지점과 하계 M1 지점에서 radar와 유속계로 측정된 평균해류의 수직구조는 취송류로만 해석하기가 어려웠다. 유속이 작은 해류를 radar로 측정하여 감지할 수 있는가에 대해 검토하기 위해 해류와 바람과의 관계를 시간변화에서 살펴보았다(Fig. 6). 동계 K2 지점에서 해류는 풍속의 세기에 따라 크기가 변화되었다. 풍속이 5 m/s 이상(표층해류가 7 cm/s 이상)일 때 해면과 2 m의 해류방향은 거의 같고 풍향이 바뀌면서 풍속이 작아질 때 해면과 2 m 깊이의 해류방향 차이가 커졌다. 본 연구에서는 제시하지 않았지만 이러한 경향은 N1과 K1에서도 나타났다. 본 연구에서, 2 m의 유속이 해면유속보다 큰 이유와 바람이 바뀔 때 해류방향도 수직적으로 달라지는 현상을 밝히기 어렵지만, 수직적으로 균질한 물성구조를 갖는(Fig. 7참조) 동계에는 해류가 주로 바람에 의해 발달한다고 할 수 있으며 HF radar는 표면 취송류를 측정할 수 있고 원시자료에서 이를 구분하여 사용할 수 있다고 판단된다.

한편, 하계 M1에서는 풍속이 약했음에도 평균해류가 해면에서 강하게 나타난 결과(Table 5)는 하계 성층효과를 고려하면 취송류 이론에 의해 정성적으로 해석이 가능하다. Ekman 취송류의 해면 유속  $U_s$ 는 바람응력  $\tau_w$ 에 비례하고 Ekman depth,  $D_e$ 에 반비례한다(Bowden, 1983).

$$U_s = \frac{\sqrt{2}\pi\tau_w}{\rho f D_e} \quad (4)$$

여기서  $f$  = 전향력 계수이고  $\rho$ =해수밀도이다. M1에서 관측된 물성구조는 해면 하 8 m까지 강한 성층이 형성되었음을 보여준다(Fig. 7). 하계 성층구조에서  $D_e$ 는 동계 균질해수 구조에서  $D_e$ 에 비해 현저히 작아지고, 이로 인하여 하계  $U_s$ 는 바람이 약할지라도 증가할 수 있다. M1에서 해면 하 3 m에서 평균해류가 해면과 반대방향인 것이  $D_e$ 가 3 m가 된다고 단정할 수는 없다.

Fig. 6에서 HF radar로 측정된 M1 지점 해면해류가 대부분의 경우 해면 하 3 m의 해류보다 강하였다. 표면에서 해류방향은 변화폭이 작고 풍향과의 차이도 작는데 비해 3 m의 해류방향은 관측기간인 50여일에 걸쳐 시계방향으로 1 회전하는 느린 변화를 포함하고 있다. Table 5에서 평균해류 방향이 반대인 것은 해면에서는 바람방향에 따른 변화를 보인 반면, 해면 하 3 m에서는 이러한 장기적 해류방향 변화가 평균되어 나타난 결과이다. 해면에서는 풍속에 따른 해류세기의 확연한 변화가 대부분 나타나지만, 3 m에서는 풍속에 따라 해류세기가 변화되는 횟수가 드물고 해류세기가 바람과 관련이 없을 때가 오히려 더 많았다. 따라서 M1에서 radar로 측정된 해면해류는 물리적 과정에 의해 발생한 현상으로 볼 수 있으며, 하계에도 radar 유속에서 해류성분을 분리하여 사용할 수 있음을 제시한다.

본 연구에서 해석하기 어려운 점은 해류방향이 반대인 결과이다. 정성적으로 유추해 보면 M1과 M2에서 형성된 성층구조에 의해(Fig. 7) 연구해역에 강한 경압성 지형류가 형성될 수 있고, 성층구조에서 경압성 지형류와 취송류가 합성되면 해면에서의 해류와 수직 해류구조가 단순한 역학적 과정으로는 설명되기 어렵다. M1에서 두 층의 해류변화는 금강 담수방류량의 변화와 상관성이

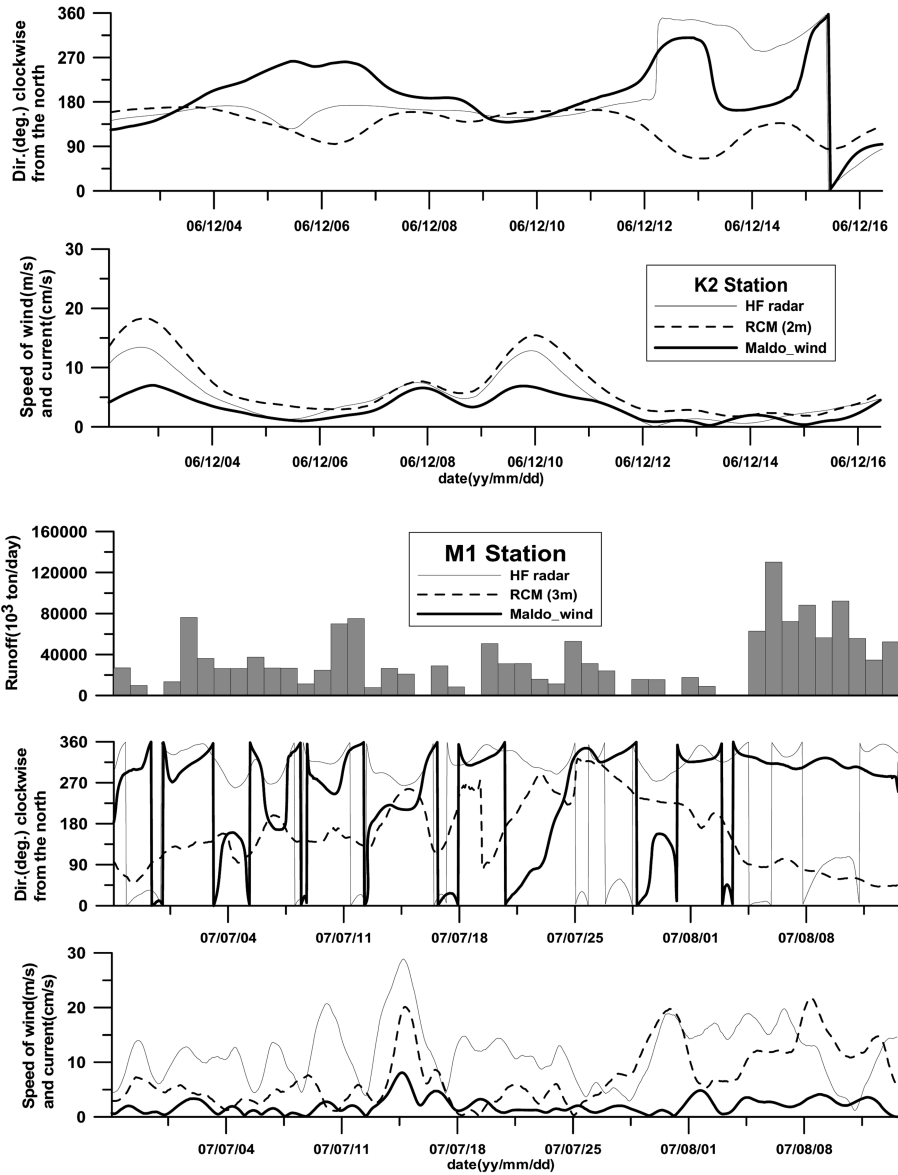


Fig. 6. Variation of speed and direction of subtidal frequency wind (thick line) and current (thin and dashed line) in winter 2006 (upper) and in summer 2007 (lower). Daily runoff of the Keum River is plotted in summer.

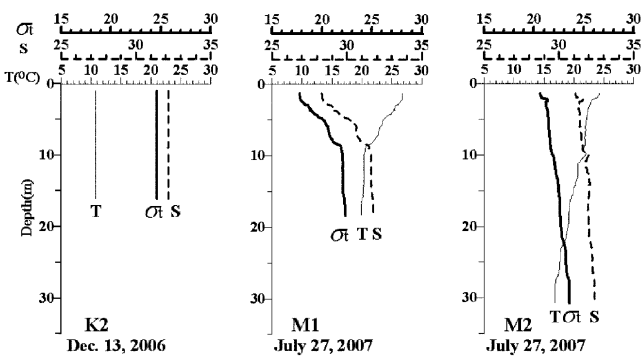


Fig. 7. Profiles of temperature, salinity and sigma-t measured by CTD at the current meter mooring points.

낮아 보인다. 성층효과는 시공간적으로 변화될 것이고 담수방류에 의해서만 지배되는 것이 아니므로 수직적으로 변화되는 해류크기의 차이와 해류방향에 대해서는 관측기기의 정확도에 대한 검

토와 더불어 천해 경계층 효과도 고려하여 앞으로 더 연구되어야 할 현상이다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 서로 마주보는 두 radar의 중간점에서 HF radar radial vector의 비교와 유속계에 의한 유속과 비교에서 주성분 분석에 의한 RMS 편차와 GDOP 효과를 제거하여 HF radar 유속의 오차범위와 원인들을 분석한 결과로부터 HF radar 유속의 정확도를 제시하면, 두 radar의 중간점에서 HF radar radial vector의 비교에서 RMS 편차는 동계에 4.4 cm/s, 하계에 5.4 cm/s이었고, 유속계 유속과 비교한 결과에서 GDOP 효과를 이용하여 편차를 분리하였을 때 HF radar 유속의 성분별 측정오차를 합성하면 속도의 오차는 5.1 cm/s (배경유속의 10%이하) 정도로 평가되었다. 따라서 연구해역에서 서로 다른 방법에 의해 평가된 radar의 유속측정 오차를 종합하면 정확도의 하한은 5.4 cm/s라고 할 수 있다. 이 HF radar의 유속측정 오차는 유속계 유속과 비교에서 나타나는 RMS 편차의 40~50%정도를 차지하였다. 기존연구들에서 언급된 바와 같이 비교유속의 RMS 편차를 분석하

는 과정에서 육지부근 지점의 HF radar 유속, 두 radar의 radial vector가 교차하는 사이각이 40°보다 작은 지점의 유속, radar로부터 평균거리가 30 km 이상인 지점의 유속은 큰 오차를 내포하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 속도성분별 GDOP 값이 유사한 지점에서 비교유속의 성분별 RMS 편차도 비슷한 값을 보이는 경우에는 GDOP 효과를 제거한 HF radar 유속오차가 불확실할 수도 있음도 밝혀졌다.

연구해역에서 해수유동의 대부분을 차지하는 조류를 조사하는 목적에는 HF radar 유속과 유속계 유속을 혼용하여 쓸 수 있을 정도로 비슷한 결과를 보였다. 조류보다 세기가 현저히 작은 해류도 동계와 하계 모두 HF radar로 측정할 수 있음을 밝혔다. HF radar 유속과 유속계 유속의 차이는 주로 대상유속의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 유속계 유속과 함께 radar 유속을 사용하여 취송류와 지형류 등의 해류형성역학을 규명하는데 이용하기 위해서는 차후에 보다 엄밀한 연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 군산대학교 새만금환경연구센터에서 구입한 HF radar를 이용하여 유속자료가 수집되었으며, BK21 새만금환경연구팀의 지원으로 수행되었다. CTD 관측과 유속계 계류에 협조해 준 군산대학교 조사선 해립 2호의 선장과 선원들께 감사드린다. 본 논문의 체계와 내용을 보다 선명하게 정리할 수 있도록 많은 조언과 의견을 주신 심사위원들께 감사드린다.

## 참고문헌

- 고재원, 정신택, 김 철, 조흥연, 2001. 지리정보체계를 이용한 만경강동진강의 유역정보 및 오염 부하량 분석. *한국해양학회 공학회지*, **13**(3): 237-244.
- 국립해양조사원, 2005. *조석표(한국연안)*.
- 김창수, 이상호, 손영태, 권효근, 이광희, 김영배, 정우진, 2006. 새만금 4호 방조제 완성 전후 HF 레이더로 관측된 표층 M<sub>2</sub> 조류의 변화. *한국해양학회지(바다)*, **11**(2): 37-48.
- 농어촌진흥공사, 1990-1998. *새만금지구 간척종합개발사업 사후환경영향 조사보고서*.
- 신은주, 이상호, 최현용, 2002. 금강플룸의 구조와 분포에 대한 수치모델 연구. *한국해양학회지(바다)*, **7**(3): 157-170.
- 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.
- 최현용, 이상호, 유광우, 1999. 금강하구연 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.
- Bowden, K.F., 1983. *Physical Oceanography of Coastal Waters*, Ellis Horwood Limited, 302 pp.
- 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. In: *Proceedings Of The First Asian And Pacific Coastal Engineering Conference*, PAPCE2001, Dalian, China, no. 1, pp. 25-36.
- Choi, B.H. and Lee, H.S., 2003. Preoperational simulation of dyke closure for Saemangeum tidal barriers. In: Choi, B.H., Kioka, W. (Eds.), *Hydro-environmental impacts of large coastal developments, ACECC-TC1 Workshop Proceeding by KSCOPE and CECJSCE*, pp. 91-118.
- Chapman, R.D., L.K. Shay, H.C. Graber, J.B. Edson, A. Karachintsev, C.L. Trump, and D.B. Ross, 1997. On the accuracy of HF radar surface current measurements: inter-comparisons with ship-based sensors, *J. Geophys. Res.*, **102**(C8): 18,737-18,748.
- Easton, A.K., 1977. Selected programs for tidal analysis and prediction. Computing Report. *The Flinders Institute for Atmospheric and Marine Sciences*, pp79.
- Emery, W.J. and R.E. Thomson, 1997. *Data analysis methods in physical oceanography*, Elsevier, 638 pp.
- Graber, H.C., B.K. Haus, R.D. Chapman, and L.K. Shay, 1997. HF radar comparisons with moored estimates of current speed and direction: Expected differences and implications, *J. Geophys. Res.*, **102**(C08): 18,749-18,766.
- Haus, B.K., J.D. Wang, 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., T. Tokeshi, W. Fujii, K. Sato, and S. Fujii, 2001. Surface current variability east of Okinawa Island obtained from remotely sensed and in situ observational data. *J. Geophys. Res.* **106**(12): 31057-31073.
- Kang, S.K., 2002. Study on tidal change prediction due to the large scale of coastal reclamation (TIDPRE, II), *KORDI report BSPM* 191-00-1560-2, 426 pp.
- Knight, P.J., Howarth, M.J., 1999. The flow through the northern channel of the Irish Sea. *Continental Shelf Research* **19**: 693-713.
- Kovačević, V., M. Gačić, I.M. Mosquera, A. Mazzoldi, 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. and R.C. Beardsley, 1999. Influence of stratification on residual tidal currents in the Yellow Sea. *J. Geophys. Res.* **104**(C7): 15679-15701.
- Lee, S.H., 2003. Variability of currents observed in Saemangeum coastal region. In: Choi, B.H., Kioka, W. (Eds.), *Hydro-environmental impacts of large coastal developments, ACECC-TC1 Workshop Proceeding by KSCOPE and CECJSCE*, pp. 73-89.
- Paduan, J.D. and Graber, H.C., 1997. Introduction to HF radar, reality and myth. *Oceanography* **10**: 36-39.
- Prandle, D. 1987. The fine structure of near shore tidal and residual circulations revealed by H.F. radar surface current measurements. *J. Physical Oceanography* **17**: 231-245.
- Son, Y.T., S.H. Lee, C.S. Kim, J.C. Lee and G.H. Lee, 2007. 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 Research*. **27**: 43-63.

Yoshikawa, Y., A. Masuda, K. Marubayashi, M. Ishibashi, and A. Okuno 2006. On the accuracy of HF radar measurement in the Tsushima Strait, *J. Geophys. Res.*, **111**, C04009, doi: 10.1029/2005JC003232.

Yoshikawa, Y., T. Matsuno, K. Marubayashi, and K. Fukudome 2007. A surface velocity spiral observed with ADCP and HF radar in

the Tsushima Strait, *J. Geophys. Res.*, **112**, C06022, doi: 10.1029/2006JC00362.

---

2008년 2월 1일 원고접수

2008년 2월 15일 수정본 채택

담당편집위원: 장경일