

칠발도 Buoy자료를 이용한 해양-대기 열교환량 산출 및 파랑 특성에 관한 연구

윤용훈 · 홍성길 · 홍 윤 · 이지연
기상연구소 해양기상연구실

A Study on the Estimation of Air-Sea Heat Fluxes and the Wave Characteristics using Chilbaldo Buoy Data

YONG-HOON YOON, SUNG-GIL HONG, YOON HONG AND JI-YEON LEE

Marine Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute, KMA, Seoul 110-360, Korea

기상청에서는 1996년 7월부터 1997년 2월까지 목포앞바다의 칠발도 인접 해역에 1시간 간격으로 해양기상을 관측할 수 있는 부이를 설치하고 자료를 얻었다. 이 자료로부터 이 해역의 1일 평균 해양-대기 열교환량을 산출하고, 해양기상 상태의 특성을 조사하였다. 현열속의 경우, 7월에 최소(평균 -5.5 Wm^{-2})이고, 1월에 최대(평균 12.6 Wm^{-2})를 나타내고 있는데 이는 여름철에 대기가 해양으로 열을 공급하고 겨울철에는 반대로 해양에서 대기로 열을 공급하지만 그 크기는 여름철이 겨울철에 비해 작다는 것을 의미한다. 잠열속의 경우 7월에 최소(평균 -4.6 Wm^{-2})를 보이고, 최대값은 11월에 월 평균 86.5 Wm^{-2} 이고 10월에 일평균 최대값이 250 Wm^{-2} 까지 나타났다. 잠열속은 대기가 건조해지고 바람이 강해지는 가을철에 최대가 나타나서 겨울철까지 지속된다. 파랑분석에 의하면 바람이 강한 겨울철이 여름철에 비해 높은 파의 출현율이 많았다. 파주기는 4~6초의 출현율이 가장 많았고, 파향은 계절풍의 영향으로 겨울에는 북 또는 북동방향에서 유입되는 파가 우세하고, 여름에는 남, 남서 또는 서쪽에서 유입되는 파가 비교적 자주 출현하였다.

Hourly meteorological data from a marine buoy ($34^{\circ}49'00''\text{N}$, $125^{\circ}46'00''\text{E}$) operated by the Korean Meteorological Agency were obtained from July, 1996 to February, 1997. From the data air-sea heat fluxes and marine meteorological characteristics around the area are estimated. The maximum outflux of sensible heat from the sea surface occurred in January (monthly mean value, 12.6 Wm^{-2}), and the maximum influx to the sea occurred in July (monthly mean value, 5.5 Wm^{-2}). This means that the sea is heated in summer while it loses its heat in winter, and that there is inequality between the absolute values of the two seasons. The outflux of the maximum latent heat occurred in November (monthly mean value, 86.5 Wm^{-2}) and reach a value of 300 Wm^{-2} , and the maximum influx occurred in July (monthly mean value, 4.6 Wm^{-2}). Big difference is shown in their absolute values when the wind becomes strong. The outgoing latent heat flux reaches its maximum in autumn, and it maintains the high value through the whole winter. According to the wave data analysis, the significant wave heights are larger in winter than in summer. The periods of the significant waves are 4~6 sec. In winter, waves propagated from north and northeast are dominant because of the winter monsoon, while in summer waves from south, southwest, and west are relatively frequent.

서 론

해양은 일사의 연변화에 대해 열저장고 역할을 한다. 특히 표층 해수는 여름에 가열되고, 겨울철에는 해양이 대기로 열을 방출하여 냉각된다. 또한 해표면의 냉각과 가열은 표면혼합층깊이 및 성층의 정도를 바꾸어 해황을 변화시키는 주요한 요소로 작용한다(오 등, 1992). 대기는 운동량과 열을 해표면을 통하여 해양에 공급함으로써 해수순환을 유도하고, 해양은 다시 대기에 열을 방출하게 된다. 이러한 해양과 대기의 상호작용은 지구

온난화 및 엘니뇨와 같은 지구규모의 이상현상과 기후시스템에 중요한 요소로 작용한다(권 등, 1992).

해표면을 통한 해양-대기간의 에너지 교환에 대한 국내에서의 연구는 대부분 연안기상관측자료와 국립수산물진흥원의 정선 관측자료를 이용하여 수행하였다(한, 1972; 봉, 1976). 박 등(1995)은 한국과 일본의 선상관측 자료와 부이자료를 이용하여 해양-대기간의 열교환량을 계산하였다. 일본에서는 Manabe(1957), Kato and Asai(1983) 그리고 Miyazaki(1952) 등이 연구한 바 있다.

최근 안 등(1997)은 한반도 주변해역의 수온과 한반도 기온, 강수량이 높은 상관관계가 있음을 보인다. 또한 윤 등(1992)은 집중호우 사례연구를 통해 해상의 열속 및 잠열속의 변화가 풍하역의 특정지역 강수량에 영향을 미침을 제시하였다.

이 연구에서는 관측기간이 비교적 긴 칠발도 근해에 설치된 Buoy 실측 자료를 사용하여 해양-대기 간 열교환량을 산출하였고, 파랑의 특성 및 계절적인 변동성, 그리고 기상요소와의 상관성을 분석하고 그 특성을 살펴보고자 한다.

자 료

대기-해양 상호작용이 기상변화와 해상상태(해상풍, 파랑 등)의 변화에 영향을 주고 있어 한반도 주변해역에 대한 해양기상 특성에 대한 연구는 해양기상예보기술 향상에 크게 도움이 될 수 있는 자명한 사실이다. 그러나 지금까지 체계적으로 조사 연구가 이루어지지 않은 가장 큰 이유중의 하나가 관측자료의 결핍이다. 이를 극복하기 위해 기상청은 1996년 7월부터 해양기상관측 부이사업을 시작하여 현재 서해의 덕적도 근해(37°14'00"N, 126°01'02"E)와 칠발도 근해(34°49' N, 125°46' E)를 비롯하여 남해의 거문도 근해(34°00'N, 127°30'E)에 해양기상관측 부이를 설치, 종합관측을 실시하고 있다(Fig. 1). 대기-해양 상호작용 영향을 조사하기에 적합한 해면위 3.8 m와 4.8 m에 풍향풍속계가 설치되어 있고 기온, 습도 수감부는 해면위 3.5 m, 그리고 수온 수감부는 해면아래 1 m, 기압 및 파랑수감부는 몸체 안에 내장되어 있다. 장기간 해양에서 효과적인 열속 및 잠열속 분석과 해황을 실시간 모니터링 할 수 있도록 제작되어 있다.

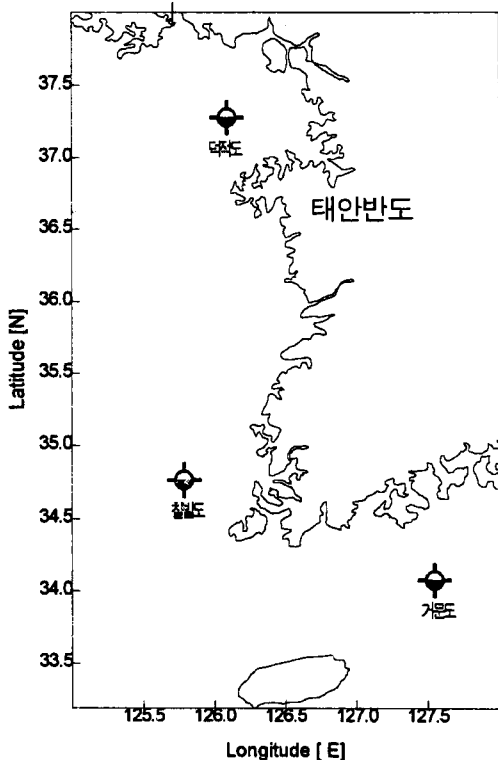


Fig. 1. Observation network of the ocean data buoys in the KMA.

이 연구에 사용된 자료는 1996년 7월부터 1997년 2월까지 칠발도 부이의 1시간 간격으로 관측된 자료이다. 이 자료로부터 벌크 공기역학법을 이용해 부이설치 해역의 1일 평균 해양-대기 간 열교환량을 산출하고, 해양기상 상태의 특성을 조사하였다. 해양-대기경계층의 열수지 방정식은

$$Q_N = Q_S - Q_L - Q_H - Q_E$$

여기서 Q_N 은 대기에서 해양으로 들어가는 총 열속이고, Q_S 은 해면으로 입사하는 유효단파복사, Q_L 은 해면으로부터 대기로 방출되는 유효장파복사이며, Q_H 과 Q_E 는 각각 대기로 방출되는 현열 및 잠열속이다.

열속을 구하는 방법으로는 에디상관법과 같이 직접적인 관측으로부터 구하는 방법과 관측된 기상 변수와 에디상관법 등으로 직접관측된 열속을 이용하여 구한 매개변수를 이용하는 벌크공기역학법과 같은 방법이 있다. 또한 해상에서의 관측값의 부족을 극복하기 위해, 해상에서의 기상 변수 및 열속을 대기경계층 역학을 기초로한 모형으로부터 구하는 방법이 있다(강 등, 1994).

이 연구에서 현열속과 잠열속은 다음과 같은 벌크 공기역학법으로부터 계산하였다.

$$Q_H = \rho_a C_p C_H |V| (T_s - T_a), \quad Q_E = \rho_a L C_E |V| (q^* - q)$$

여기서, ρ_a 는 대기의 밀도, C_p 는 정압 비열, L 은 증발 계수이며, $|V|$ 는 풍속, T_s 는 해면 온도, T_a 는 기온, q^* 는 해면 온도에 대한 포화 비습, 그리고 q 는 대기의 비습을 나타낸다. C_H 와 C_E 는 각각 현열속과 잠열속의 벌크 교환계수를 나타내는데, 이들을 Kondo(1975)의 경험식으로부터 구하였다. Kondo(1975)는 지표층 모형으로부터 수치 모의를 통해 벌크 교환계수를 경험식으로 구하였다.

또한 해양기상 관측부이에서 관측된 풍향풍속, 기온, 습도, 기압, 수온, 파고, 파향, 파주기, 염분, 표층류 등의 해양요소를 장기간 연속적으로 실시간 관측할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시키면서 장기간 해양에서 부이를 고정된 지점에 유지시키는 기술은 대단히 어려운 엔지니어링에 속하는 분야이나, 지금은 센서와 통신기술이 발달함에 따라 획기적인 변화와 새로운 개념의 부이 엔지니어링 기술로 발전하고 있다.

해양 기상 관측 부이

해양기상관측 부이는 해양에 고정된 지점을 확보하여 해상에서 발생할 수 있는 풍향, 풍속, 기온, 기압 등의 기상요소와 표면수온, 파고, 파향, 파주기, 염분, 표층류 등의 해양요소를 장기간 연속적으로 실시간 관측할 수 있어야 한다. 이러한 조건을 충족시키면서 장기간 해양에서 부이를 고정된 지점에 유지시키는 기술은 대단히 어려운 엔지니어링에 속하는 분야이나, 지금은 센서와 통신기술이 발달함에 따라 획기적인 변화와 새로운 개념의 부이 엔지니어링 기술로 발전하고 있다.

부이 시스템은 그 목적과 해양 환경에 따라 수많은 종류가 있다. 즉 항해의 도움을 주는 항해 표식부이, 해상 구조물 또는 연안 산업 지역의 경계를 나타내기 위한 표식 등의 경계 부이, 해양기상 상태 및 환경변화를 지속적으로 모니터링하는 해양기상 부이, 해양의 특성을 장기적으로 관측하고 모니터링하는 해양 플랫폼, 그 밖의 선박을 임시 계류시키거나 어망 등을 고정시킬 수 있는 부이 등으로 구분할 수 있다.

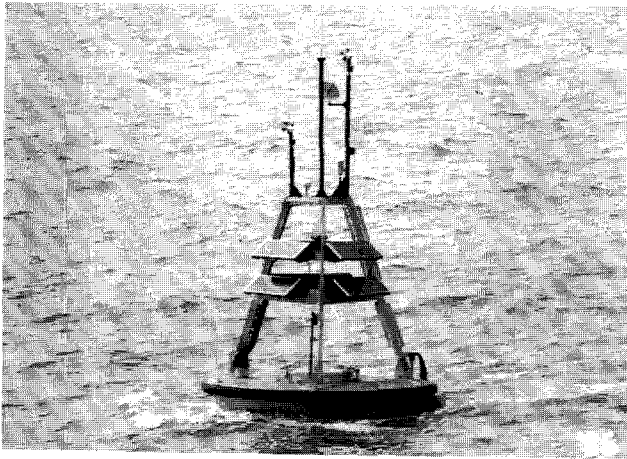


Fig. 2. Photo of 3-meter discuss buoy.

해양기상 상태나 해양환경 변화를 관측할 수 있는 해상관측 시설은 해양기상부이와 해양 플랫폼이다. 해양기상부이는 다시 계류부이(Moored Buoy)와 표류부이(Drifting Buoy)로 구분된다. 계류부이는 해양기상을 관측하고 자료를 취득하는 장비로 침병의 역할을 하고 있는데 천해에서 심해까지 다양한 해역에 계류되므로 계류 방법도 다양하다. 해를 거듭할수록 계류부이는 해상의 날씨를 예보하는데 필요한 기초자료를 생산하는 중요한 임무를 수행하고 있다.

Fig. 2는 기상청에서 운영중인 3 m 원반형 부이의 사진이다. 이 부이는 심해와 천해의 기상과 해양자료수집 및 원격플랫폼으로서 미국의 Woods Hole 해양연구소에서 설계된 것이며, 파랑에 따라 잘 움직일 수 있도록 부이 몸체가 원반형으로 되어 있어 정확한 파의 움직임(Heave, pitch and roll)의 측정이 가능하다. 현재의 측정요소는 풍향, 풍속, 기온, 습도, 기압, 수온, 파고, 파향, 파주기이며, 필요한 수감부를 더 부착하여 관측요소를 늘릴 수 있다. 부이의 총 중량은 1,600 kg이고 부력이 3,800 kg이다. Fig. 3은 1996년 7월부터 서해의 칠발도 근해(34°49' N, 125°46' E, 수심: 25 m)에 설치되어 현재 운영중인 부이의 계류 시스템을 나타낸다.

결 과

Fig. 4는 해양-대기간 열교환량 계산에 사용된 해양 및 기상변수의 1996년 7월부터 1997년 2월까지의 시계열을 나타낸다. 부이에서 관측된 기상 및 해양자료는 칠발도 근해의 해양기상 상태를 대표하고 있다고 보아도 좋을 것이다. 풍속(a)은 11월이 평균 7.2 m/s로 최대를 보이고, 하계인 8월(평균 2.8 m/s)에 최소를 나타내며 평균 4.4 m/s의 차이를 갖는다. 월별분포를 보면 7월부터 10월까지는 풍속이 약하지만 11월부터 2월까지 비교적 풍속이 강하게 나타났다. 기온(b)은 8월에 최고, 1월에 최저값을 나타내고 8월과 1월의 월 평균 20.6°C의 차이를 보인다. 특히 7월부터 10월초까지는 기온의 변화폭이 작지만 10월 중순 이후부터 2월까지의 큰 변화폭을 보인다. 습도(c)는 7월부터 9월까지의 월 평균 80%이상을 보이고 10월부터는 점차 감소하여 월 평균 60~70%로 낮게 분포한다. 9월부터 11월까지 큰 습도변화

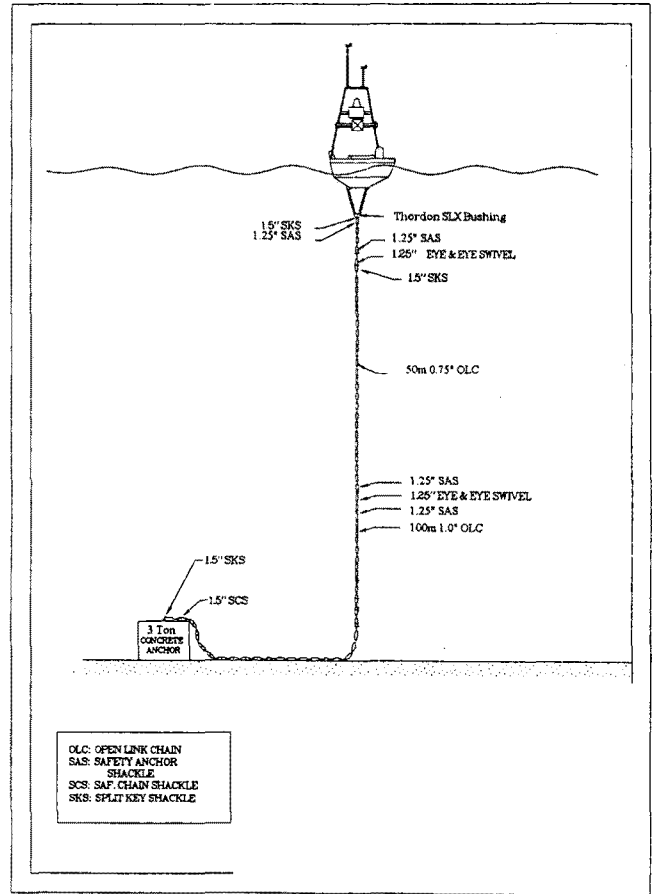


Fig. 3. Mooring schematic diagram of 3 meter discuss buoy.

를 보인다. 해면기압(d)은 7월부터 9월까지 비교적 낮고(1015 hPa 이하), 이후 큰변화폭을 보이면서 상승하여 11월부터 2월까지 최고 1033 hPa의 높은 값을 나타낸다. 해표면수온(e)은 8월에 최고값(평균 23.3°C)을 보이고 그 이후 수온이 계속 감소하는 경향을 볼 수 있다.

열속을 계산하는데 사용되는 해양 및 기상변수에는 해양-대기간의 온도차 및 비습차와 해상에서의 풍속이 있다. 해양-대기간의 온도차(f)의 경우 11월과 1월은 양의 값으로 해양이 대기보다 온도가 높고 그 외의 기간은 음의 값으로 대기가 해양보다 온도가 높게 분포한다. 해양과 대기의 온도차가 양(>0)인 불안정한 대기의 경우 해양으로부터 현열속이 방출되면서 대기는 점차 안정화되려고 한다. 7월부터 9월까지의 해양과 대기간의 온도차의 변화폭이 작지만 10월부터는 상당한 변화폭을 갖고 있다. 비습차(g)는 해면온도에 대한 포화비습과 대기의 비습차로 7월에 최소(평균 0 g/kg)이고 점차 증가하여 대기가 건조해지는 가을철과 겨울철(10월과 11월)에 높은 값을 나타내며 그 변화폭이 크게 나타난다.

Fig. 5는 Kondo(1975)의 경험식을 사용하여 구한 현열속의 시계열을 나타낸다. 7월에 최소(평균 -5.5 Wm⁻²)이고, 1월에 최대(평균 12.6 Wm⁻²)를 나타내고 있는데 이는 여름철에 대기가 해양으로 열을 공급하고 겨울철에는 반대로 해양에서 대기로 열의 공급을 의미하지만 그 크기는 여름철이 겨울철에 비해 작다

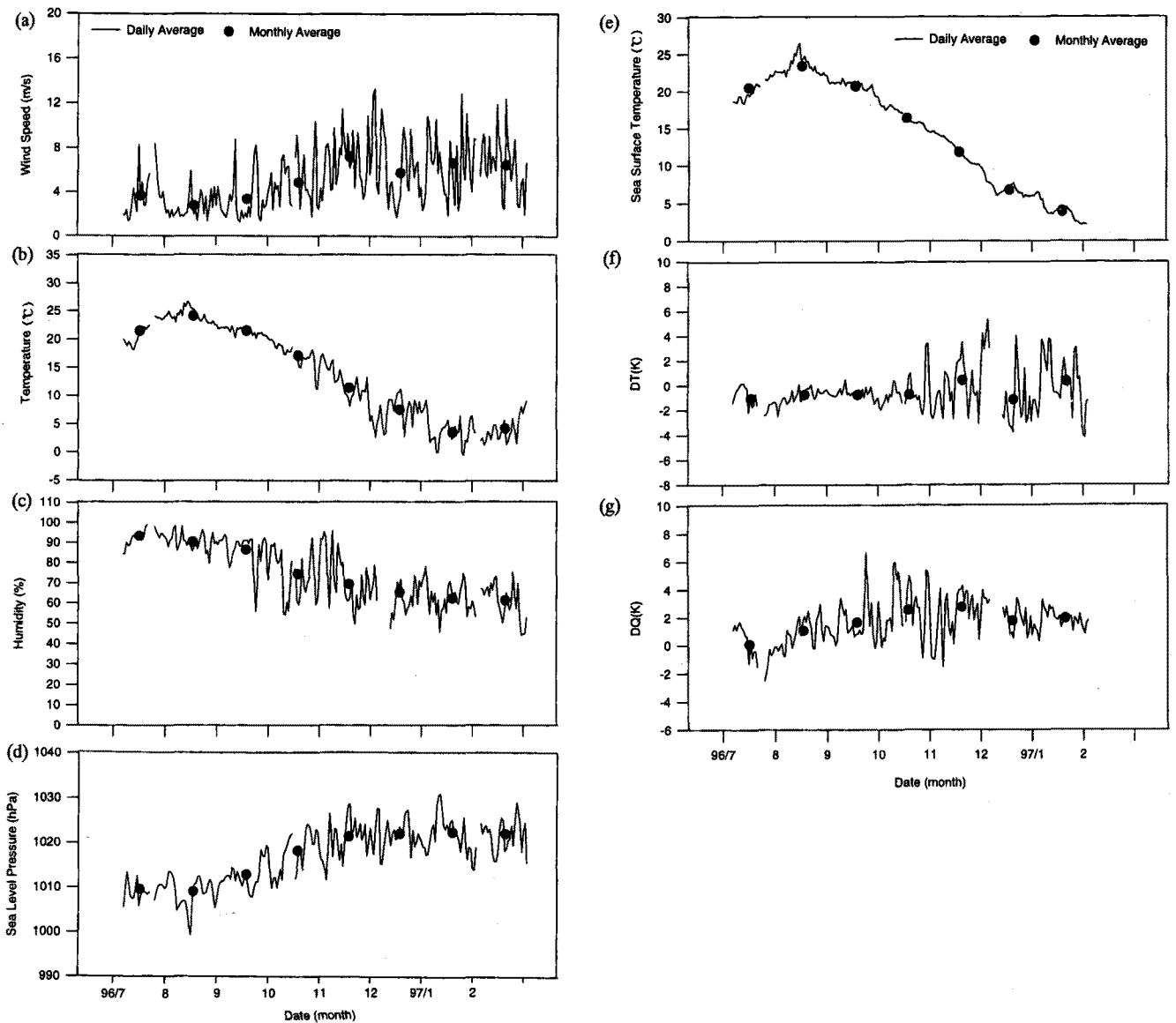


Fig. 4. Time series of wind speed (a), air temperature (b), humidity (c) and sea level pressure (d) from July 1996 to Feb. 1997, sea surface temperature (e), differences between sea surface temperature and air temperature [DT (K), (f)] and differences between saturated specific humidity and specific humidity [DQ (K), (g)] from July 1996 to Jan. 1997 measured at the KMA buoy (37°14'00"N, 126°01'02"E) around Chilbaldo sea area.

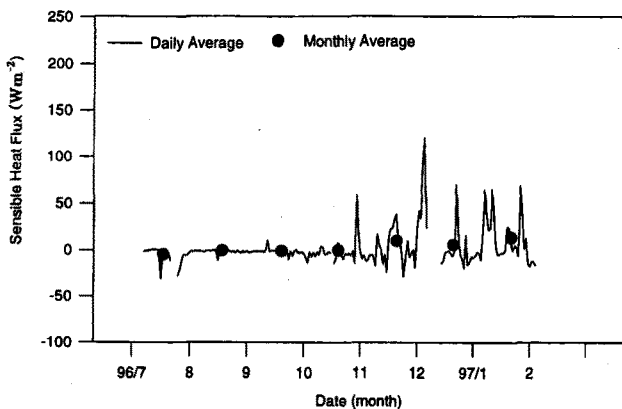


Fig. 5. Time series of the sensible heat flux (Wm⁻²) in Chilbaldo sea area estimated by using Kondo (1975) method from July 1996 to Jan. 1997.

는 것을 알 수 있다. 특히 7월부터 10월까지의 음의 값 또는 거의 영(0)에 가까운 일정한 값을 나타내고 11월 이후부터는 현열속의 상당한 변화폭을 가지고 양의 값을 나타낸다.

잠열속의 시계열 Fig. 5는 7월에 최소(평균 -4.6 Wm⁻²)를 보이고, 최대값은 11월에 평균 86.5 Wm⁻²를 보인다. 잠열속의 경우 대기가 건조해지고 바람이 강해지는 가을철에 최대가 나타나서 겨울철까지 지속된다. 7월부터 9월까지의 잠열속의 변화폭이 작지만 10월부터는 상당한 변화를 보이고 최대값이 약 250 Wm⁻²까지 나타났다. Fig. 7은 현열속과 잠열속을 더한 난류속의 시계열을 나타낸다. 난류속의 경우 여름철에는 해양에서 대기로 방출되는 열은 적지만 겨울철에는 난류속의 형태로 해양은 대기로 열을 공급하게 되는데, 11월에 최대(평균 86.5 Wm⁻²)를 나타내고, 일평균 최대값은 약 300 Wm⁻²까지 나타났다.

Fig. 8은 유의 파고(a)와 주기(b)의 시계열을 나타낸다. 유의파

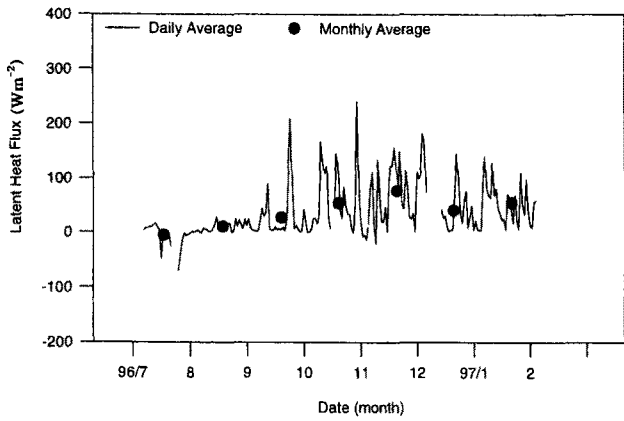


Fig. 6. Same as Fig. 4, but for latent heat flux (Wm^{-2}).

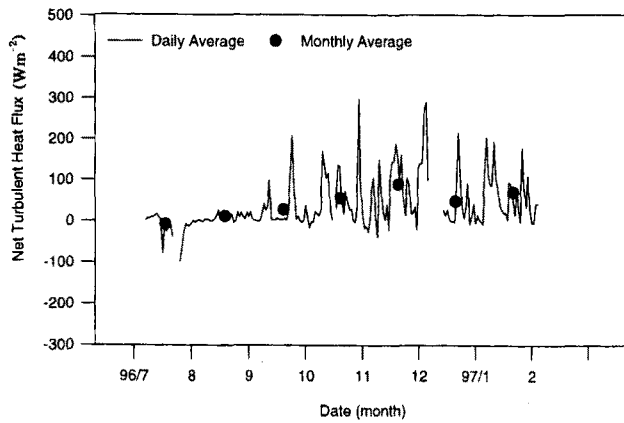


Fig. 7. Same as Fig. 4, but for net turbulent heat flux (Wm^{-2}).

고(Fig. 8a)의 월별 분포를 보면 7월부터 10월까지의 월평균값이 0.5~0.9 m를 보이고, 바람이 점차 강해지는 겨울철에 접어들면서 월평균값이 1.2~1.4 m로 높게 나타난다. 통계기간중 시간별 자료에 의하면 유의파고가 최고 6.5 m까지 기록하였다. 파주기(Fig. 8b)는 전체적으로 3~11초의 분포를 하고 월평균값은 5~6초로 균일한 분포양상을 보여준다.

Fig. 9는 유의파고별 출현율(a), 파주기별 출현율(b) 그리고 파향별 출현율(c)을 나타낸 것이다. 유의파고별의 출현율(Fig. 9a)을 보면 여름철인 7월과 8월의 경우 0.4~0.8 m의 유의파고 출현율이 약 45~50%를 차지하고 있으며, 바람이 강한 겨울철이 여름철에 비해 높은 파의 출현율이 많다. 전기간을 걸쳐 0.4~0.8 m의 유의파고 출현율이 20~50%로 대부분을 차지한다. 파주기(Fig. 9b)는 3~11초의 분포를 보이고, 파주기 4~6초의 출현율이 가장 많다. 여름철인 7월과 8월에 11초의 비교적 장주기의 파가 5% 이내로 관측되었다. 파향별 출현율(Fig. 9c)은 계절풍의 영향으로 겨울에는 N과 NE방향에서 유입되는 파의 출현빈도가 현저하게 높게 나타나지만, 여름에는 바람이 약해 주 파향은 알 수 없으나 S, SW 및 W방향에서 유입되는 파가 비교적 자주 출현한다. 특히 12월, 1월 및 2월의 경우 N과 NE방향의 출현율이 약 30~55%로 집중 분포한다.

또한 파고는 풍속, 취송거리 및 취송시간에 관계되는데 칠발도 근해에서의 풍속과 유의파고의 상관성이 0.76으로 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다(Fig. 10). Fig. 11은 월별 풍속과 유의파

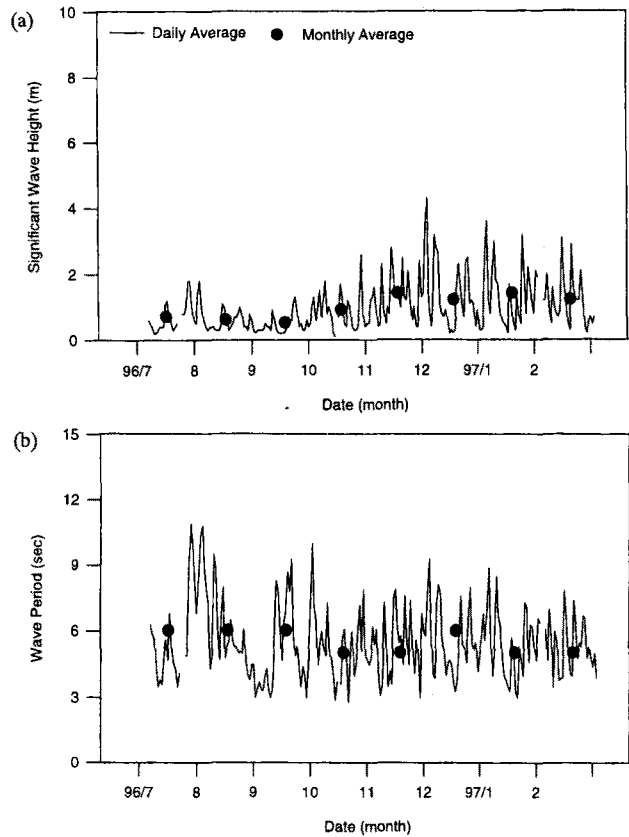


Fig. 8. Time series of the significant wave height (a) and the significant wave period (b) measured at the KMA buoy ($37^{\circ}14'00''N$, $126^{\circ}01'02''E$) around Chilbaldo sea area from July 1996 to Feb. 1997.

고의 상관도를 나타낸 것이다. 너울의 영향이 비교적 많은 7월과 8월을 제외하고는 월별 상관도가 0.7~0.84로 높게 나타난다. 이는 하계에는 타 해역에서 전파되어 오는 너울의 영향을 상당히 받고 있는 것으로 사료된다.

결론

칠발도 근해에 설치된 부이자료를 이용하여 이 해역의 해양-대기간 열교환 및 파랑 현상을 분석한 바 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 현열속은 7월에 최소(평균 $-5.5 Wm^{-2}$)이고, 1월에 최대(평균 $12.6 Wm^{-2}$)를 나타내고 있는데 이는 여름철에 대기가 해양으로 열을 공급하고 겨울철에는 반대로 해양에서 대기로 열의 공급을 의미하지만 그 값은 여름철이 겨울철에 비해 작은 값을 보인다. 잠열속은 7월에 최소(평균 $-4.6 Wm^{-2}$)를 보이고, 11월에 최대(평균 $86.5 Wm^{-2}$)이고 10월에 일평균 최대값이 약 $250 Wm^{-2}$ 까지 관측된 바 있다. 잠열속의 경우 대기가 건조해지고 바람이 강해지는 가을철에 최대가 나타나며 이것이 겨울철까지 지속된다. 전체적으로 잠열속의 변화폭이 현열속보다 비교적 크게 나타난다. 파랑분석에 의하면 바람이 강한 겨울철이 여름철에 비해 높은 파의 출현율이 많았다. 유의파고의 월별 분포를 보면 7월부터 10월까지의 월평균값이 0.5~0.9 m/s를 보이고, 바람이 점차 강해지는 겨울철에 접어들면서 월평균값이

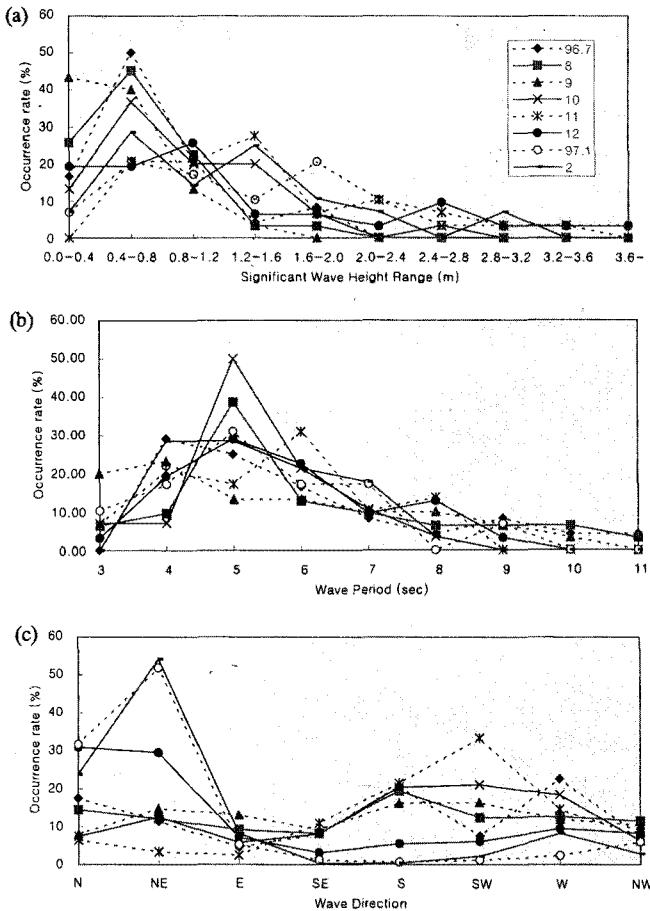


Fig. 9. Same as Fig. 7, but for occurrence rate of significant wave height (a), significant wave period (b) and significant wave direction (c).

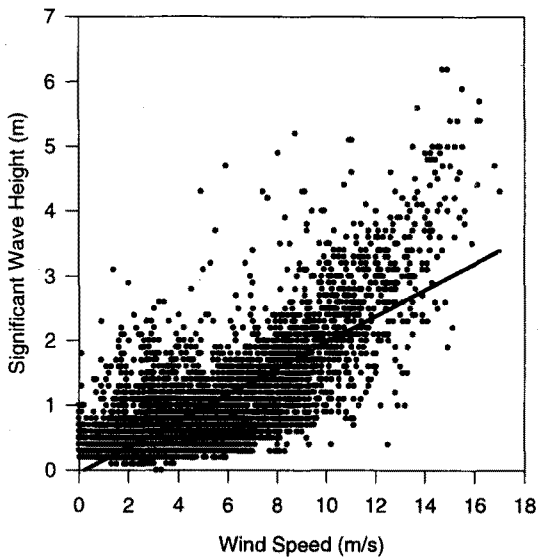


Fig. 10. Relationship of the wind speed and the significant wave height from July 1996 to Feb. 1997. Correlation coefficient is 0.76.

1.2~1.4 m/s로 높게 나타난다. 통계기간중 시간별 자료에 의하면 유의파고가 최고 6.5 m까지 기록하였다. 파주기는 전체적으

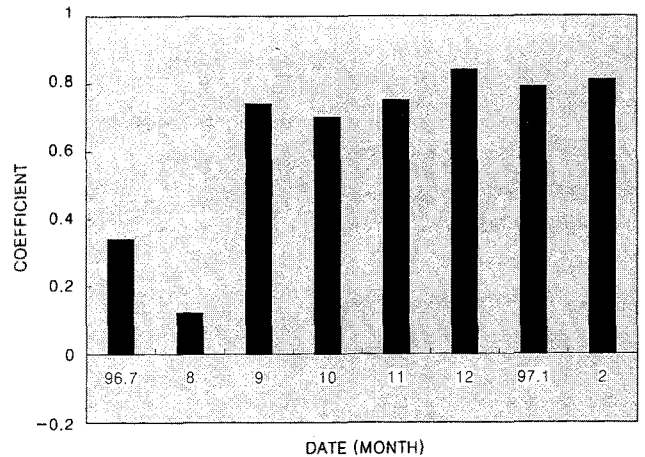


Fig. 11. Distribution of monthly correlation coefficient from July 1996 to Feb. 1997.

로 3~11초의 분포를 하고 월평균값은 5~6초로 균일한 분포양상을 보여준다. 파주기는 4~6초의 출현율이 가장 많았고, 파향은 계절풍의 영향으로 겨울에는 N과 NE방향이 우세하고, 여름에는 S, SW 및 W 방향이 비교적 자주 출현하였다. 특히 12월, 1월, 2월의 경우 N과 NE방향의 출현율이 약 30~55%로 집중 분포한다.

사 사

이 연구에서 사용된 부이자료는 기상청 부이 운영요원의 지원과 협조로 가능하였고 부이 설치 및 운영에 함께 수고하신 기상청 응용기상국 응용기획과와 기상연구소 해양기상연구실 직원 여러분께 심심한 사의를 드립니다. 이 연구를 수행하는데 많은 도움을 준 부산대학교 류정희양과 이 논문을 읽어 주시고 미흡한 점을 지적하여 주신 서울대학교 오임상 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

강인식, 김맹기, 심태보, 1994. 한반도 주위 해양에서의 해면 열수지와 응력의 계절변화. 한국해양학회지, 29: 325-337.
 권원태, 봉종현, 강인식 등, 1992. 한국-대평양 기후 시스템 연구 (I). 과학기술처 연구보고서, 254 pp.
 박원선, 오임상, 심태보, 1995. 동해열수지의 시·공간적인 분포. 한국해양학회지, 30: 91-115.
 봉종현, 1976. 한국연안의 표면해수와 대기간의 열교환. 한국해양학회지, 11: 43-50.
 안중배, 류정희, 조익현, 박주영, 류상범, 1997. 한반도 기온 및 강수량과 주변해역 해면온도와의 상호관계에 관한 연구. 한국기상학회지, 33: 1-10.
 오임상, 김구, 강인식, 1992. 미시적 MLD(온도혼합층) 예보모델에 관한 연구 II. 국방과학연구소 연구보고서, 179 pp.
 윤용훈, 이충구, 봉종현, 1992. 1989년 7월 25~27일 광주지역 호우전 서해상의 열속 변화. 한국기상학회지, 28: 211-223.
 한영호, 1972. 1월의 동해 남서해역에서의 열수지에 대한 해협

- 의 냉수괴. 한국해양학회지, 7: 19-23.
- Kato, K. and T. Asai, 1993. Seasonal variations of heat budget in both the atmosphere and the sea in the Japan sea area. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61: 222-237.
- Kondo, J., 1975. Air-sea bulk coefficients in diabatic condition. *Bound-Layer Meteor.*, 9: 91-112.
- Manabe, S., 1957. On the modification of air mass over the Japan Sea when the outbreak of cold air predominates. *J. Meteor. Soc. Japan*, 35: 311-326.
- Miyazaki, M., 1952. The heat budget in the Japan Sea. *Bull. Hokkaido Reg. fish. Res. Lab.*, 49: 1-54.