한국해양공학회 2001년도 추계학술대회 논문집 PP. 103~107

한국 동해 해수순환의 개략적 고찰

김종규
부경대학교 해양공학과

A Review of Ocean Circulation of the East/Japan Sea

JONG-KYU KIM
Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

KEY WORDS: Ocean Circulation 해수순환, East/Japan Sea 동해, Deep Ocean Water 해양심층수, Tsushima Warm Current 쓰시마 난류, East Korean Warm Current 동한난류, North Korean Cold Current 북한한류, Deep Current 심층해류

ABSTRACT: *The major studies of an ocean circulation of the East/Japan Sea related to evaluate the feasibility and utilization of deep ocean water are reviewed. The major feature of surface current system of the East/Japan Sea is an inflow of the Tsushima Warm Current through the Korea/Tsushima Strait and the outflow through the Tsugaru and Soya Straits. The Tsushima Warm Current has been known to split into two or three branches in the southern region of the East/Japan Sea. In the cold water region of the East/Japan Sea, the North Korean Cold Current turns to the east near 39° N after meeting the East Korean Warm Current, then flows eastward. The degree of penetration depends on the strength of the positive wind stress curl, according to the ventilation theory. Various current meter moorings indicate strong and oscillatory deep currents in various parts of the basin. According to some numerical experiments, these currents may be induced by pressure-topography or eddy-topography interaction. However, more investigations are needed to explain clearly the presence of these strong bottom currents. This study concludes the importance of topographical coupling, isopycnal outcropping, different wind forcing and the branching of the Tsushima Warm Current on the circulation of the East/Japan Sea.*

1. 서 론

최근 21세기 지구환경 및 에너지 문제 해결을 위한 방안으로 천혜의 재생순환형 해양자원으로서 우리나라 동해의 해양심층수 자원개발이 기대되고 있다(김 등, 2001). 해양심층수란 태양광선에 의해 광합성 작용이 활발하게 일어나는 표층해수에 반하여 태양광선이 충분히 도달하지 못하여 광합성 작용이 미흡한 수심 200 m 이심의 해수를 일컫는다(안희도, 2001). 해양심층수의 두드러진 특징으로는 Ocean Conveyor Belt 형으로 심층순환을 반복하는 데 있다(Fig. 1).

심층수 이용은 1970년대 미국의 온도차발전을 위한 연구 프로젝트를 시초로, 일본은 식품분야에서 그리고 노르웨이는 수산분야에서 그 특성을 활용한 연구가 이루어져 오고 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 동해의 해양심층수 자원의 효율적 이용 및 개발을 위한 기초적 연구로서 동해 해수순환에 관한 기존 연구자료들의 고찰을 통하여 동해 해수순환 특성을 파악하고자 하였다.

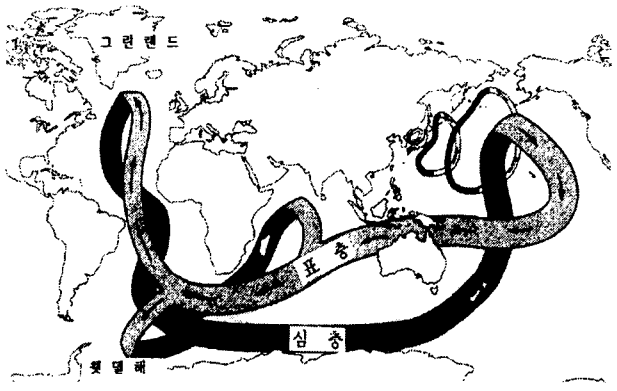

Fig. 1. 심층순환의 모식도(타카하시, 2000).

2. 동해의 해저지형

동해는 한반도와 아시아대륙 및 일본열도 등에 의해 둘러쌓여 있는 북서태평양의 연해로서 해수는 대한해협을 통해서 동중국해 및 황해 해수와 연결되어 있으며, 쓰가루 해협을 통해서 북태평양 해수와 연결되어 있고, 소야해협

과 타타르해협을 통해서 오호츠크 해수와 연결되어 있다 (Fig. 2). 동해의 크기는 남북 및 동서방향으로 약 1,600 km 와 1,000 km에 달하고 평균수심은 1,543 m이다. 동해의 북쪽 및 남쪽경계는 북위 51° 45′ 와 쿠슈, 오도열도, 제주도와 한국본토를 잇는 선으로 하고 있다(국제수로국, 1953).

동해와 인접해 및 북서태평양을 연결하고 있는 해협들은 비교적 좁고 얕은 sill 하상이지만 대한해협은 100 m를 넘는다. 동해의 해저지형은 울릉도를 기준으로 울릉분지와 원산만 외해에 위치한 한국 Plateau가 있고, 동해 중부에는 야마토해령, 그 남쪽에는 야마토분지가 자리잡고 있으며, 동해 북부에는 일본분지가 광범위하게 위치하고 있다 (Fig. 2).

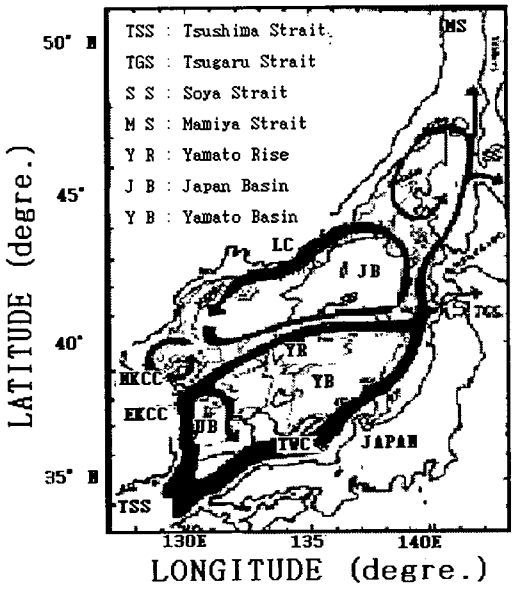

Fig. 2. 한국 동해의 해저지형도(after Senjyu, 1999).

3. 동해의 수괴분포

동해는 수괴의 기원에 따라 일본쪽의 난수대와 한국과 시베리아측의 한(냉)수대로 나누어진다. 이 경계가 되는 것은 "극전선"으로서 대체로 북위 38° ~ 40° 선을 달리고 있는데 이것은 일본 동쪽의 태평양의 극전선과 거의 같은 위도이다(Fig. 2). 한편, 수층에 따라 동해의 수괴는 표층수, 중간수(동해중층수) 및 심층수(동해고유수)로 대별할 수 있다(Fig. 3).

표층수는 표면으로부터 25 m 까지의 것으로서 동해중부를 가로지르는 극전선을 중심으로 난수역과 냉수역으로 나누어지며, 여름에는 뚜렷한 수온약층(thermocline)으로 분포되어 있다. 난수역에 있어서는 고온고염의 쓰시마난류수의 표층수와 일본

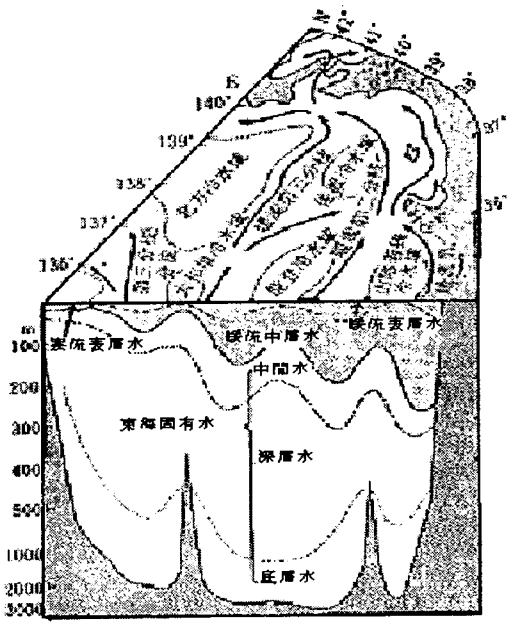

Fig. 3. 한국 동해의 수괴분포도(이석우, 1992).

주위의 연안수가 혼합되는 반면에 냉수역의 표층수는 고용존산소의 수괴가 표층부근에 존재하며 여름과 가을에 해빙으로 인한 시베리아 연안수의 영향을 받는다. 수온과 염분의 변동은 표층수에 있어 현저한데 계절과 장소에 따라 차이가 발생한다.

중층수는 고용존산소/저염수의 수괴로서 난수역의 표층수인 쓰시마난류수 밑에서도 발견된다. 이러한 동해중층수는 동해북부의 냉수역 표층에서 기원되거나 북한한류수의 연장으로 추측되고 있다.

심층수는 보통 동해고유수라고 불리우는 데 저층에 섭씨 1도 미만의 찬 균질수로 가득 차 있다. 즉 수온은 0~0.5℃, 염분은 34.0~34.1 psu의 균일한 값을 가지고 있다. Uda에 의하면 동해의 심층수는 수평확산에 의해 염분이 34.0 psu가 되고 대류에 의해 겨울에 차거워진 표층해수가 2월과 3월에 동해의 북부에서 침강해서 이루어진다고 한다. 이 수괴 외에 냉수역의 표층의 저염분 해수가(1~4℃, 33.9 psu) 때때로 극전선에서 침강하여 중층수의 밑으로 남하한다. 이러한 현상은 Subarctic 중층수가 일본 북부의 태평양에서 Kuroshio 밑으로 파고 들어오는 현상과 흡사하다.

한편, 최근 한국해양연구원에서는 해양예보시스템을 구축하여 실시간의 동해 해수의 수온분포도의 예보를 실시하고 있다.

4. 동해의 해수순환

한국 동해의 해류와 수괴는 서태평양의 쿠로시오해류가

동중국해 대륙사면을 넘어서 동중국해로 유입하여 형성하는 쓰시마난류의 영향을 크게 받는다(Fig. 4). 대한해협을 통과하여 동해로 유입하는 쓰시마난류의 해수는 표층수와 중층수로 구성되며, 연중 열염을 동해로 공급하므로 동해의 해수순환에 많은 영향을 미친다.

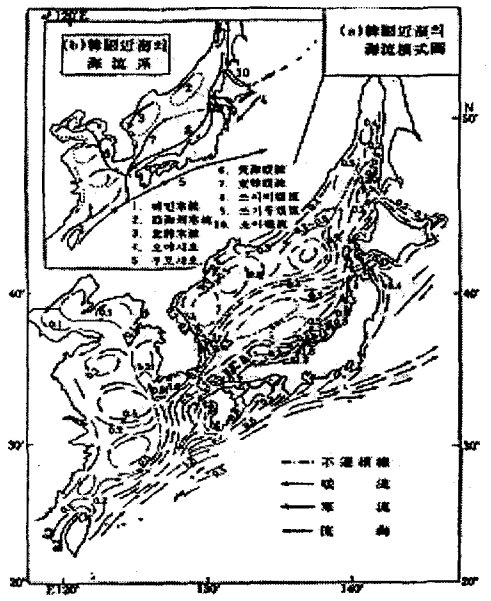

Fig. 4. 한국 근해 및 동해의 해류모식도(Uda, 1934).

동해는 위도 39 °-40 °N에 존재하는 극전선(polar front)을 기준으로 남측의 난수역과 북측의 냉수역으로 나누어 볼 수 있는 데, 난수역 상층의 해수순환에 대한 기존의 연구는 Uda(1934)와 Naganuma(1972)의 분지설과 Moriyasu(1972)의 사행설에 의한 해류모식도 제시 이후에 쓰시마난류수의 유입과 분지에 따른 표층순환에 역점을 두어 수행되어 왔으며, 제시된 평균적인 순환형태에 의하면, 난류수는 대한해협을 통해서 유입되어 한국연안을 따라서 북상(동한난류, East Korean Warm Current)한후 동해 북부로부터 남하한 북한한류(North Korean Cold Current)와 만나 동향하고, 일본 연안을 따라 북동진하는 해류와 만나 쓰가루해협을 통해서 북태평양으로 빠져나가며, 일부는 북상하여 소야해협을 통해 오호츠크해로 빠져나가고, 나머지는 한류와 만나 시베리아 연안 및 한반도 연안을 따라 남하하는 리만한류(Liman Current)와 북한한류를 형성하는 재순환과정을 거치는 순환계를 보여주고 있다.

동해 표층수의 순환의 유형은 쓰시마난류의 3분지설(Suda와 Hidaka, 1932 ; Uda, 1934)이 유력하였다(Fig. 4). 그러나 쓰시마난류를 항시 3개의 분지로 구분하기는 어려우며 각각의 분지가 서로 합류하거나 다시 분리되는 경우도 많이 나타난다. 이에 대하여 Naganuma(1973)는 쓰시마난류가 한 개의 커다란 주류로 이루어 졌으며 이것이 복잡한 양상으로 사행하고 있을 가능성도 시사하였다. 최근의 연구결과에 의하면 쓰시마난류가 대한해협으로 유입된 후 한국연안을 따라 북상하는 동한난류와 일본연안을 따라 북상하는 일본연안지류로 나뉜다는 것이 정설로 알려졌다(Fig. 5). 쓰시마난류는 대한해협의 동수도에서 전층에 걸쳐 나타나서 해저지형의 영향을 받으나 서수도에서는 쓰시마난류수의 두께가 수심보다 작아서 해저지형의 영향을 받지 않는다. 따라서 동수도를 지난 쓰시마난류수는 등수심선을 따라 흐름으로써 그의 위치와도를 보존시키려고 한다(Yoon, 1982a). 따라서 일본연안의 얕은 수심을 따라 흐르게 된다. 제2지류는 일본연안의 대륙사면을 따라 형성되는 데 Kawabe(1982)에 의하면 이는 하계 대마난류의 수송량이 증가함에 따라 형성되는 일종의 대륙붕파가 사면을 따라 진행함으로써 나타나는 현상이라 하였다. 서수도를 통과한 쓰시마난류는 지구의 베-타 효과에 의해 계속하여 연안을 끼고 북상할 수 있다(Kang, 1988 ; Seung, 1992 ; Yoon, 1982b). 만약 이 북상류(동한난류)에 아무런 힘이 가해지지 않는다면 동한난류는 계속하여 북상하게 되고 결구 쓰가루 혹은 소야해협을 통하여 유출될 것이다. 그러나 실제로 동한난류는 북위 약 38° N 부근까지만 북상하고 여기서부터는 외양으로 향하여 이안현상을 보이고 있다. 이는 동해내부에서 작용하는 바람(나 등, 1992)이나 대기와의 열교환에 의해 생긴 북한한류에 의하여 그 진로가 차단되기 때문일 가능성이 매우 높다. 이안된 동한난류는 사행을 하면서 대체적으로 위도에 평행하게 흘러서 일본연안지류와 합류한 후 동해를 빠져나간다. 동한난류의 연장과 냉수역과의 사이에는 극전선이 형성되며 해류의 사행시에는 독립된 냉수역과 난수역이 형성되는데 특히 울릉도부근에서 거의 항시 존재하는 난수역(Kang, 1990)은 이로 인하여 생긴 것이라 사료된다. 전선의 북쪽 냉수역에는 북한한류(혹은 Liman 한류)가 동해 서 · 북측 연안을 따라 남하 한 후 앞서 언급한 바와 같이 북위 약 38° N 부근에서 북향하는 동한난류와 마주친 후 외양으로 향하여 극전선을 따라 흐르는 것으로 알려져 있다. 따라서 북한한류의 연장부분은 반시계방향의 순환을 이루는데 냉수역에는 이외의 몇개의 크고 작은 독립된 반시계방향의 순환류가 있는 것으로 알려져 있다. 이 중 가장 두드러진 것은 동해 북동부 일본분지상에 존재한다. 냉수역에 반시계방향의 순환이 존재한다는 간접적인 증거는 대한해협을 통하는 수송량이 동해의 북서-남동 단면을 통하는 수송량에 비해 현저히 작다는 사실에서도 나타난다(Lim과 An, 1985). 이러한 순환류의 역학기구는 동해해수 순환구조를 밝히는 데에 매우 중요하리라 생각되는 데, 동해(특히 북-북서부)에서의 국지적인 힘(바람, 해표면 냉각)에 의해 생성된다는 것이 최근의 연구결과이다(Seung, 1992). 동해에서의 바람장의 분포는 계절적으로 크게 변하고 있으며 이는 동해가 기상학적으로 Suntropic과 Sunarctic의 경계부에 위치하고 대륙의 동쪽에 위치함으로써 계절풍의 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 또한 해상풍의 분포는 대륙의 분포와 국지적 변화 요인에 의해서 변형되어 나타나 바람응력 분포가 표층 해수순환에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 특히 바람응력 분포와 관련하여 북한한류의 발달과 동한난류의 이안 위치에 대한 연구 결과에 의하면 바람장의 분포가 곧 극전선의 위치 및 형성과 깊은 관계를 맺고 있음을 알 수 있다(Fig. 5). 그러나 난수역에서의 난류수의 유

입과 바람과의 관계, 냉수괴의 출현과 관련하여 냉수괴의 기원 및 발생의 역학적 기구에 관한 연구 등은 지속적으로 연구해야 할 과제이며, 특히 쓰시마난류의 변동과 관련한 저온현상과 냉수괴의 출현 등의 역학적인 관련성 및 기구에 대한 연구가 필요하다.

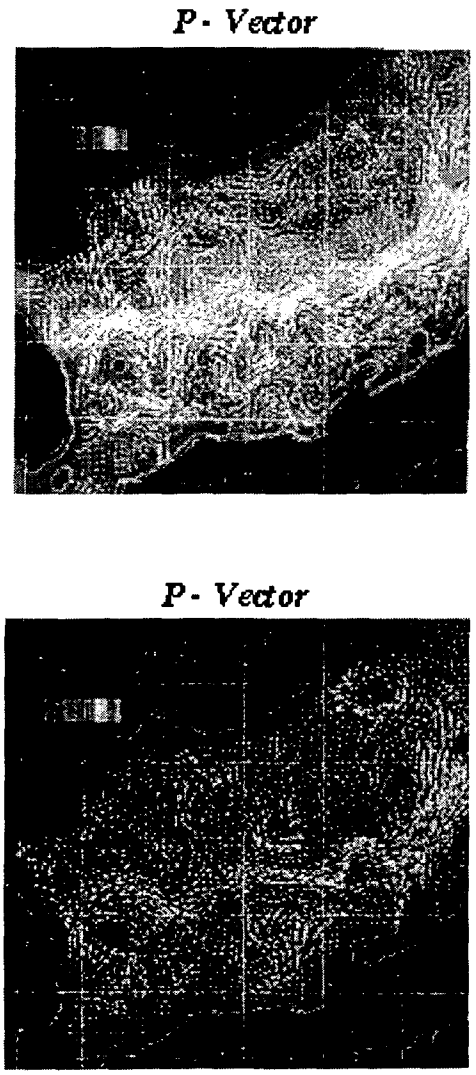

Fig. 5. 동해의 해류벡터도(Ro, 2000).

동해의 해저지형의 분포는 매우 복잡한 분포상을 나타내고 있으며, 이러한 동해의 수심분포는 평균적인 표층해류의 분포가 등수심선, 특히 1000~1500 m의 수심선을 따라 발달되어 있음을 볼 때 해저지형 분포가 표층 해수순환에 영향을 미치고 있으며, 특히 쓰시마난류의 분지와 사행, 난수성 와(eddy)의 형성과 이동 등에 영향을 미침을 알 수 있다(Fig. 6). 또한 난수성 와는 동해 남서해역 및 극전선 부근에 많이 존재하는데 특히 울릉분지내에 거의 매년 1~2개 존재하며, 크기와 운동특성은 대단히 다양하게 나타나고 있으며, 난수성 와에 의한 해류의 변형 등의 효과를 고려해 볼 때, 난수성 와에 대한 역학적인 고찰과 발생 기구 등에 대한 지속적 연구가 필요하다.

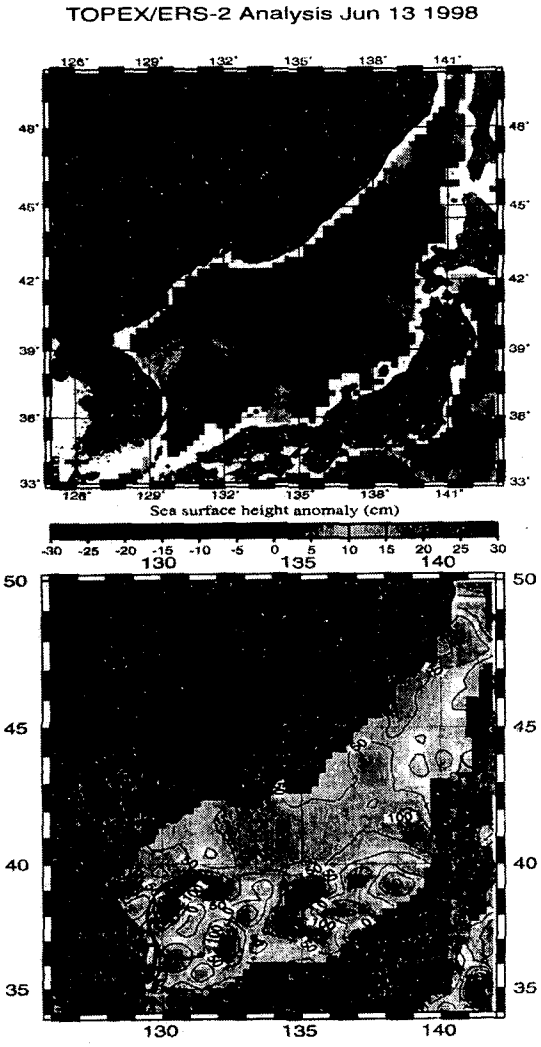

Fig. 6. 동해의 해수면고도편차(Lee et. al., 2000).

최근 동해안 심층부(600~800m)의 남향류(Lie 등, 1989)의 관측 및 동해 남부해역의 중층과 저층해류의 관측(신홍열 등, 2001; 장경일 등, 2001)으로부터 동해해수의 대부분을 차지하는 동해고유수의 형성 등 동해의 중층 이심의 순환이 대양의 심층(열염)순환적 특징을 보이고 있음을 주목할 필요가 있다.

이상의 결과를 통하여 쓰시마난류는 쿠로시오해류로부터 분지되었지만 동중국해와 한국 남해 연안을 흐르면서 쿠로시오해류의 물성을 변형시킨 후에 동해로 유입되고 있으며, 유입구인 대한해협의 수심 제한과 밀도분포를 고려해 볼 때 동해 심층으로의 유입은 어려울 것으로 사료되며, 동해 심층수의 기원은 동해 순환계내에서 생성되어짐을 알 수 있을 것이라 사료된다.

이러한 동해 해수순환에 대한 연구는 수괴분석과 아울러 해

수순환의 역학기구와 변동성을 중심으로 한국을 비롯한 일본, 러시아 등의 인접국들과 미국의 해양학자들에 의해서 국제적 공동연구의 일환으로 지속적으로 이루어지고 있다(CREAMS, 1997).

따라서 동해의 해류 및 수괴 분포는 쓰시마난류 수송량의 계절적 변동, 한국 동해의 바람응력의 분포 및 계절적 변동, 대기-해양간의 열염교환에 따른 저층냉수의 형성 및 이동, 해저지형 효과 및 담수유입 등의 국지적인 요인에 의해 순환형태가 복잡하게 형성되므로 이들에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

4. 동해 해수순환의 연구전망

우리나라 동해의 해양심층수 자원의 효율적 이용 및 개발을 위한 기초적 연구로서 동해 해수순환에 관한 기존 연구자료들의 고찰을 통하여 동해 해수순환 특성을 파악하였다. 한국 동해의 해수순환은 쓰시마난류수의 순환 및 이의 분지 특성, 북한한류의 형성 및 극전선의 확장, 중층수의 형성 및 확장, 동해고유수의 생성 및 저층냉수의 순환 등 여러 가지 요소가 복합적으로 연관되어 있음을 알 수 있다. 따라서 이들 복잡한 제현상의 역학적 기구에 관한 연구가 선행되어야 동해의 해수순환 특성을 보다 더 명확히 규명할 수 있을 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

김현주, 오병두, 홍석원(2001). "해양심층수의 자원적 특성 및 다목적 이용", 한국해양공학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp 49~52.

단첸코프, 홍기훈, 김 구, 쥬엔코 유(1996). "동해 해양과학 서지", 해양연구, 제18권 제2호, pp 183~220.

안희도(2001). "알기쉬운 해양심층수", 도서출판 과학기술, pp 145.

이석우(1992). "한국근해해상지", 집문당, pp 334.

한국해양학회(2001). "춘계학술발표회 요약집", pp 136.

CREAMS(1997). "Proceedings of the CREAMS'97", pp 374, Fukuoka, Japan.

IOC/WESTPAC(2001). "Proceedings of Abstracts for 5th IOC/WESTPAC', pp 250, Seoul, Korea.

KIOS(1997). "East Sea Oceanography Conference", pp 73, Pusan, Korea.

MOMAF/KORDI/PNU(2000). "International Workshop on Operational Ocean Prediction around Korean Waters", pp 139, Pusan, Korea.

PAMS/JECSS(2001). "Proceedings", pp 491, Cheju, Korea.