

제주도-고오또 열도 사이를 통과하는 대마난류

현 경 훈·방 의 찬·노 홍 길*·김 준 택*

제주대학교 해양학과, *제주대학교 어업학과

Tsushima Warm Current passing through Cheju-Goto Channel

Kyung-Hoon Hyun · Ig-Chan Pang · Hong-Kil Rho* · Jun-Teck Kim*

Dept. of Oceanography, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea

**Dept. of Fisheries, Cheju National University, Cheju-do 690-756, Korea*

Main route of Tsushima Warm Current (TWC) and a roundabout flow near Goto Islands were examined by water mass analysis and geostrophic calculation with hydrographic data observed in the sea between Cheju and Goto Islands in winter, spring, 1998 and summer, 1994. Most of warm and saline waters which distribute in the center of Cheju-Gotto channel in winter link with waters from the southwest but not to link with waters from the southeast of Gotto Islands. Warm and saline waters near Gotto Islands seems to turn around the islands and to go southward along the iso-bath line. Geostrophic calculation shows that volume transports passing through Cheju-Gotto channel is about 26.9 Sv in winter, 16.4 Sv in spring and summer. But volume transport in the depths of 100-150m is a little larger in summer than in winter, which supports the fact that transport volume passing the western channel of Korean Straits is two times larger in summer than in winter.

Key words : Tsushima Warm Current, Cheju-Gotto channel, volume transport.

서 론

제주도와 고오또 열도 사이에 위치한 해역은 동중국해와 대한해협을 연결하는 길목으로 대마난류가 통과하는 해역이다. 대마난류는 일본 큐슈 남서쪽에서 쿠로시오로부터 분지하여 대한해협으로 북상한다는 이론(Lie and Cho, 1994; Hsueh et al. 1996)과 대마난류에 연장하여 동중국해의 등수심선을 가로질러 북상한다는 이론(Pang et al., 1993, 1998; Pang and Hyun, 1998)이 있다. 그러나 어떤 경로로 북상하던 대마난류는 대부분 제주도와 고오

또 열도 사이를 통과하여 대한해협 서수도로 통과한다. 대마난류의 기원이 전자라면 대마난류의 주축은 수심이 비교적 깊은 고오또 열도 부근해역을 통과하여 서수도로 이어질 것이다. 하지만 대마난류의 기원이 대만난류로부터 동중국해의 100~150m사이의 등수심선을 따라 북상한다는 후자라면 대마난류의 주축은 제주도와 고오또 사이의 수심 100~150m 사이로 통과할 가능성이 많으며, 고오또 부근해역의 난류수는 등수심선을 따라 우회하여 큐슈해안을 따라 남하하는 흐름을 할지 모른다. 그러므로 제주도와 고오또열도 사이 해역은 대마난류의

기원과 쿠로시오가 큐슈연안의 우회류를 연구하는데 매우 중요한 해역이고 또한 대한해협을 수송량을 결정하는데 직접적인 영향을 준다. 일반적으로 대한해협을 서수도를 통과하는 대마난류수는 여름철 수송량이 겨울철에 비해 두 배 정도 많다고 알려져 있는데, 제주도-고오도 사이를 통과하는 수송량도 두 배의 차이가 있는지 살펴보는 것도 흥미 있는 일이다. 물론 제주해협을 유량변화도 대한해협에 영향을 주기는 하나(약 0.3 Sv, Pang and Oh, 1994) 수심이 상대적으로 얕고 해협의 폭도 좁다는

면에서 제주도와 고오도 열도 사이를 통과하는 유량이 대한해협에 보다 직접적인 영향을 줄 것이다.

이 논문에서는 세 가지 면에 초점을 맞추고 자료를 분석하였다. 첫째는 '대마난류수의 주축으로 생각되는 고온고염수는 제주도-고오도 사이에서 어디로 통과하는가?'이며, 둘째는 '고오도 부근해역에서 등수심선을 따라 우회하는 흐름이 있는가?'이다. 셋째는 '제주도와 고오도 열도 사이를 통과하는 유량은 어떻게 계절 변화를 하는가?'이며, 이외에 '대마난류수와 남해연안수의 경계는 어디에서 형성

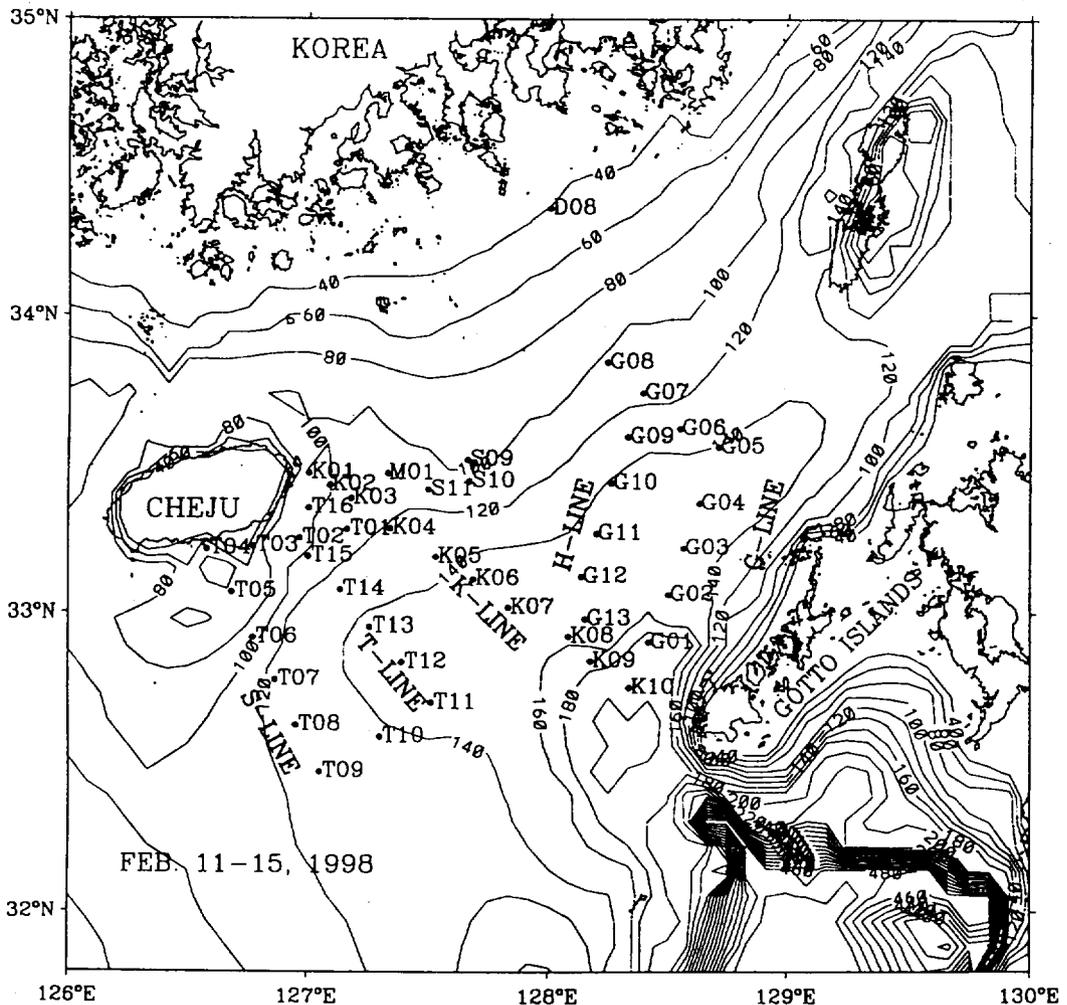


Fig. 1. Hydrographic stations in the sea between Cheju and Goto Islands in 11~15 February 1998. (Depths in meters)

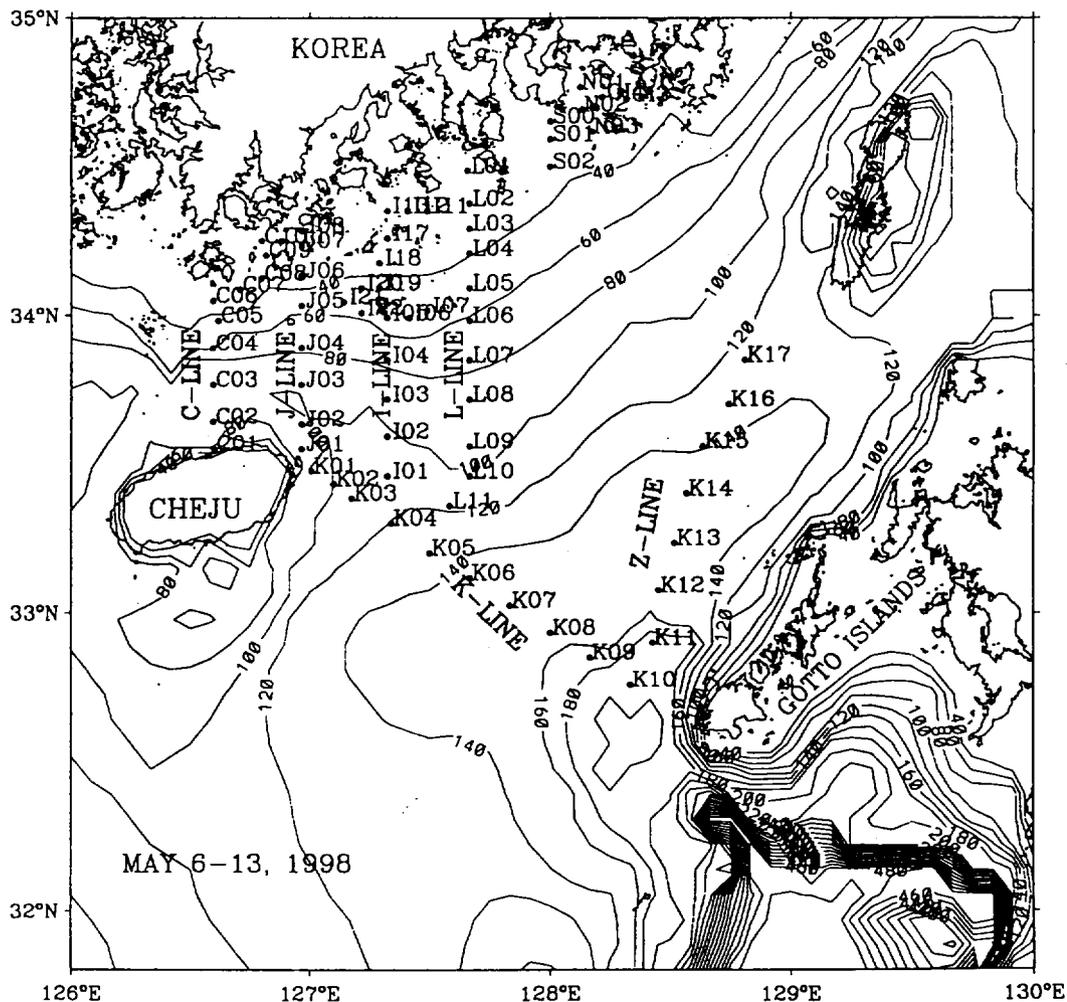


Fig. 2. Hydrographic stations in the South Sea including Cheju-Gotto line in 6~13 May 1998.
(Depths in meters)

되는가?’에 대해서도 살펴보았다. 이 세 가지 문제를 해결하기 위해 제주도과 고오포 열도 사이, 제주해협 동부를 포함한 남해에서 관측한 수온 염분자료를 분석하였고 지형류 계산을 통해 수송량을 알아보았다. Fig. 1과 Fig. 2는 각각 1998년 2월 11-15일, 5월 6-13일에 제주대학교 해양조사선 아라호와 한라호로 제주도-고오포 열도 사이 해역과 제주해협 동부에서 관측한 CTD(Conductivity Temperature Depth meter) 정점을 나타낸 것이다. 제주도-고오포 사이를 통과하는 해수 수송량을 비교

하기 위해 K-line은 고정되어 관측되었다. 여름철과 비교하기 위해 1994년 9월 6-15일 관측된 K-line의 수온 염분자료도 사용하였다.

대마난류의 주축은 제주도-고오포 사이에서 어디로 통과하는가?

Fig. 3과 Fig. 4는 겨울철인 2월 제주도-고오포 사이 해역의 표층 수온과 염분분포를 나타낸 것이

다. 겨울철에는 강한 혼합에 의해 수직적으로 균질한 해수가 분포하기 때문에 표층과 저층의 분포는 거의 비슷하여 저층분포는 생략하였다. 수온은 15.5~17°C, 염분은 34.45~34.7‰를 갖는 고온고염의 난류수가 분포한다. 특히 16.5°C 이상, 34.6‰ 이상의 고온고염수는 K-line의 증앙을 통과하고 있는데 이 고온고염수는 남서쪽에 위치한 T-line과 S-line에서 연결되고 있다. Fig. 5는 겨울철 K-line의 수온, 염분, 밀도의 수직 분포인데 16.5°C 이상 34.55‰ 이상의 고온 고염수가 K-line의 증앙에 해당하는 K05-K07을 통과하는 것이 뚜렷이 나타나 있다. 고오또 부

근의 K10에서는 증앙의 고온고염수와 비슷하거나 약간 낮은 수온 염분분포를 보이는데 증앙의 고온고염수와는 분리되어 있다. 이것은 제주도-고오또 증앙을 통과하는 난류수는 고오또 이남에서 연결되지 않고 남서쪽에서 연결될 가능성을 시사한다. K-line의 남쪽인 T-line과 S-line의 해수특성에 대한 연직분포로 나타낸 것이 Fig. 6과 Fig. 7이다. 이 그림에서 K-line의 증앙에 분포하였던 16.5°C 이상 34.55‰ 이상의 고온 고염수는 S-line과 T-line의 100~120m 수심사이에 넓게 분포하고 있다. 그리고 S-line의 가장 바깥인 T09에는 34.7‰ 이상의 고염수

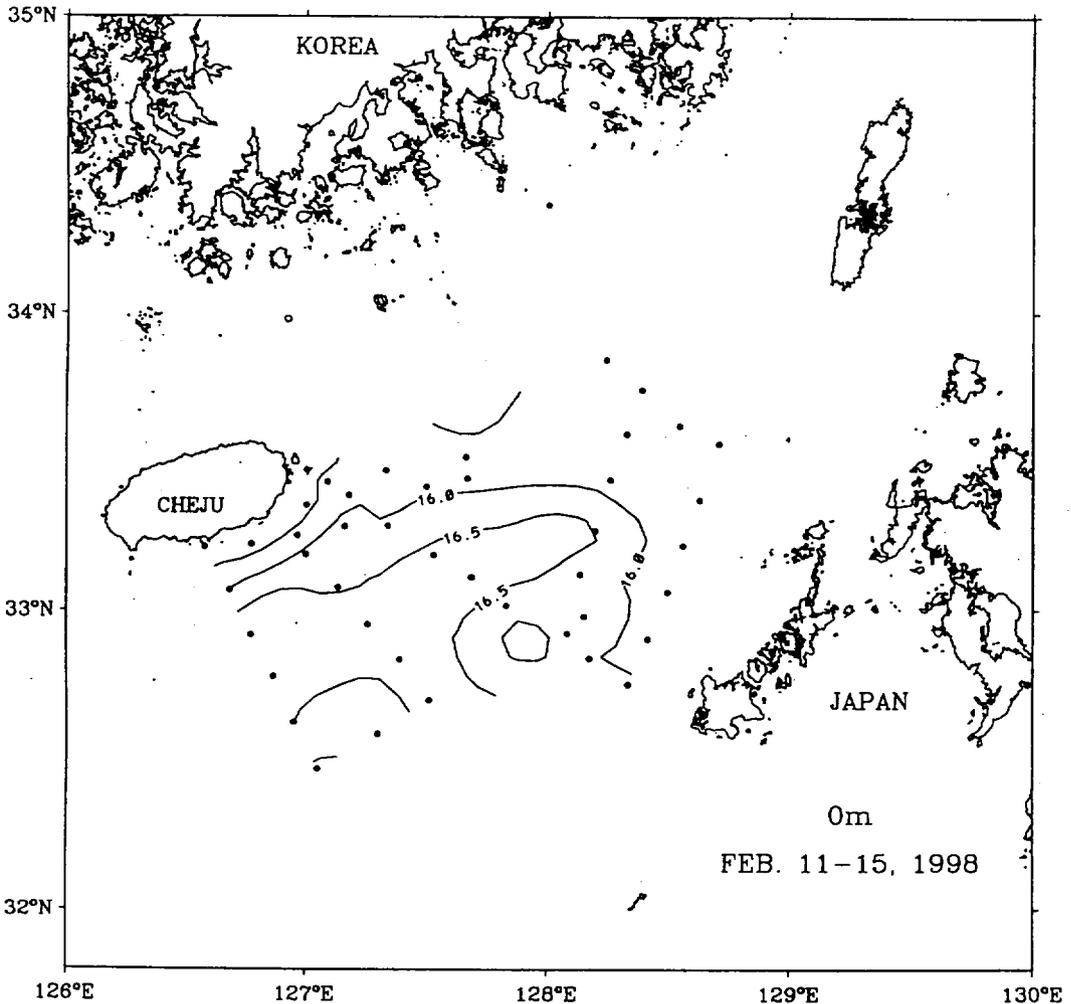


Fig. 3. Horizontal distribution of surface temperature in the sea between Cheju and Gotto Islands in winter.

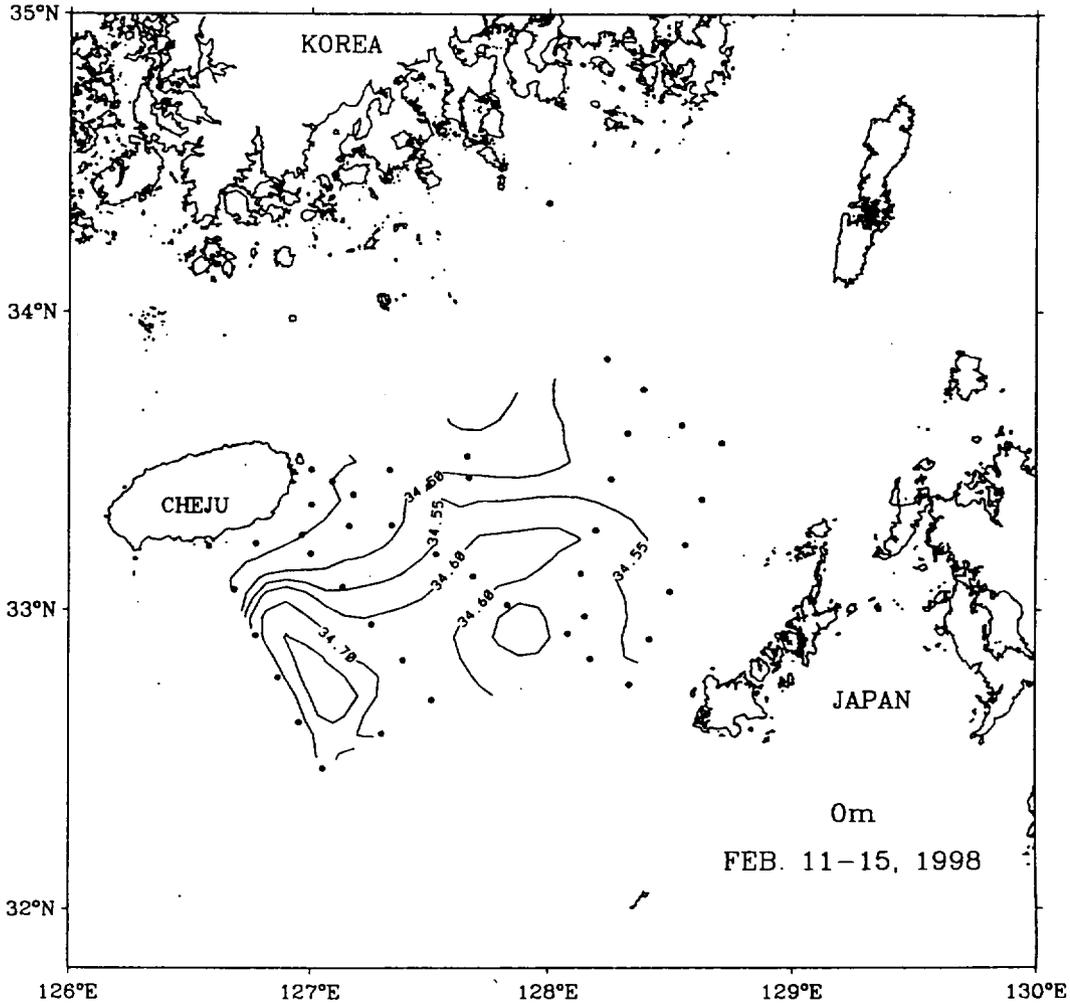


Fig. 4. Horizontal distribution of surface salinity in the sea between Cheju and Gotto Islands in winter.

가 분포하고 있어 K-line을 통과하는 고염수의 근원은 고오또 이남이 아니라 동중국해의 등수심선을 따라 공급될 가능성이 보다 크다.

Fig. 8은 봄철인 5월에 K-line의 해수특성을 연직 분포로 나타낸 것이다. 수온과 염분의 성층이 생기면서 표층에는 고온저염수가 분포하지만, 저층에는 겨울철과 비슷한 해수가 분포하고 있다. 34.5% 이상의 고염수는 고오또 부근과 제주도 북근해역에 모두 분포하고 있으며 K-line의 중앙의 중층에는 겨울철과는 다르게 주변보다 약간 저염인 해수가 분포하고 있어 대마난류의 통과 경로가 겨울철과 다

름을 보여준다. 즉, 봄철에는 겨울철과는 달리 K-line에서 고염수의 축이 제주도 부근해역과 고오또 부근 해역으로 나뉘어 진다. 제주도 부근해역을 통과하는 고염수의 축은 K2-I3-L7의 경로로 연결되는 것으로 보인다. 고오또 부근 해역인 K09, K10에서는 전층에 걸쳐 34.5% 이상의 고염수가 분포하는데 이 고염수가 등수심선을 따라 우회할지 혹은 대한해협을 서수도로 이어질지는 다음절에서 살펴보기로 하자.

Fig. 9는 여름철인 9월초에 관측한 K-line의 해수 특성을 연직분포로 나타낸 것이다. 수온약층과 염

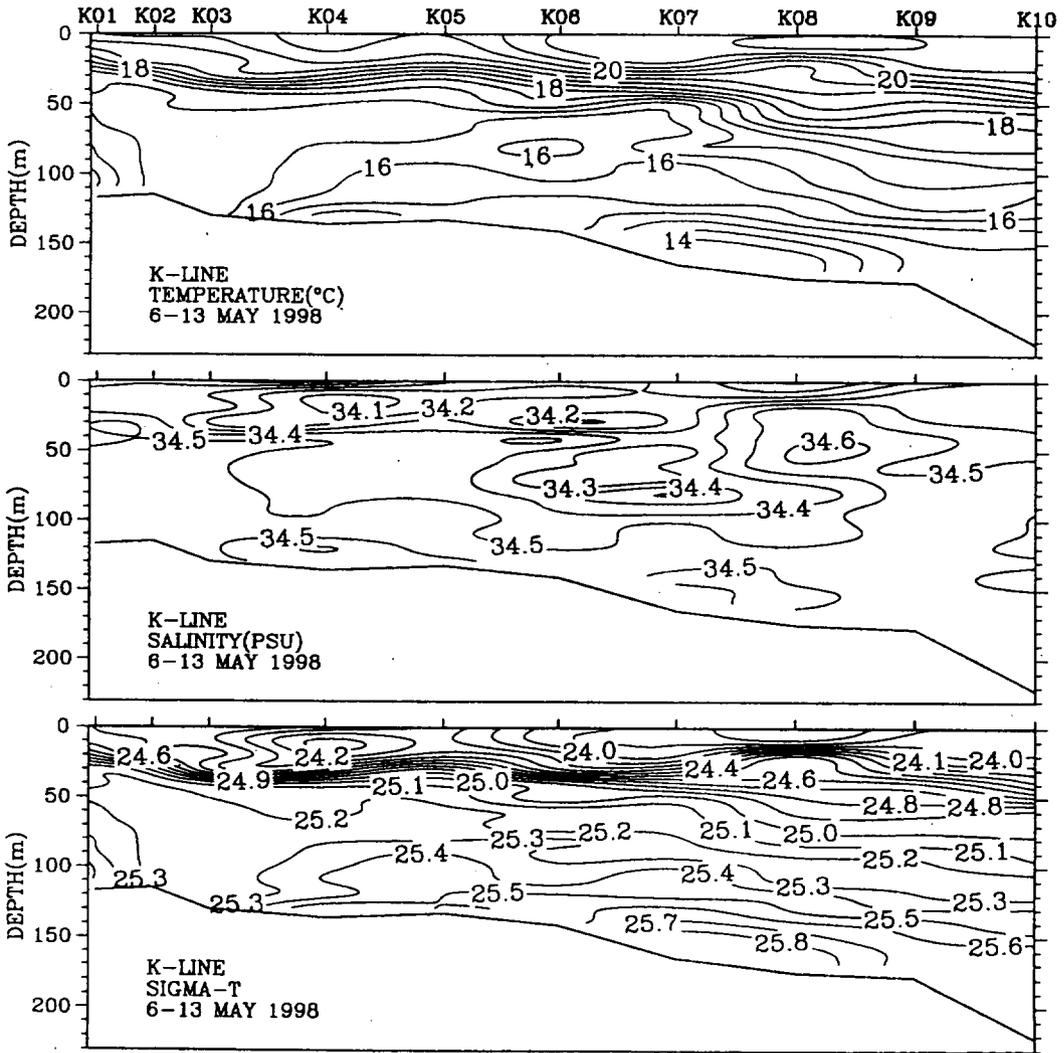


Fig. 8. Vertical distribution of temperature, salinity and density along K-Line between Cheju and Gotto Islands in spring.

체적수송량의 계절 변동

제주도-고오도 사이를 통과하는 체적 수송량의 계절 변동을 알아보기 위해 겨울철과 봄철, 여름철 K-line을 통과하는 체적수송량을 지형류 계산을 이용하여 계산하였다. 지형류 계산은 인접하는 두 관측점 사이에서 계산하였으며 무류점은 두 관측점에

서 수심이 낮은 쪽의 최대 수심으로 설정하였다. Fig. 13은 K-line을 통과하는 겨울철 봄철 여름철의 체적수송량을 수심 10m 간격으로 나타낸 것이다. 각 정점간의 체적수송량은 하단에 표시되어 있고 제주도과 고오도 사이를 통과하는 전체 수송량은 그림의 중앙에 표시되어 있다. 수송의 방향은 양의 방향은 북동류, 음의 방향은 남서류를 나타낸다. 전체 수송량은 겨울철에 26.9 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)으

제주도-고오또 열도 사이를 통과하는 대마난류

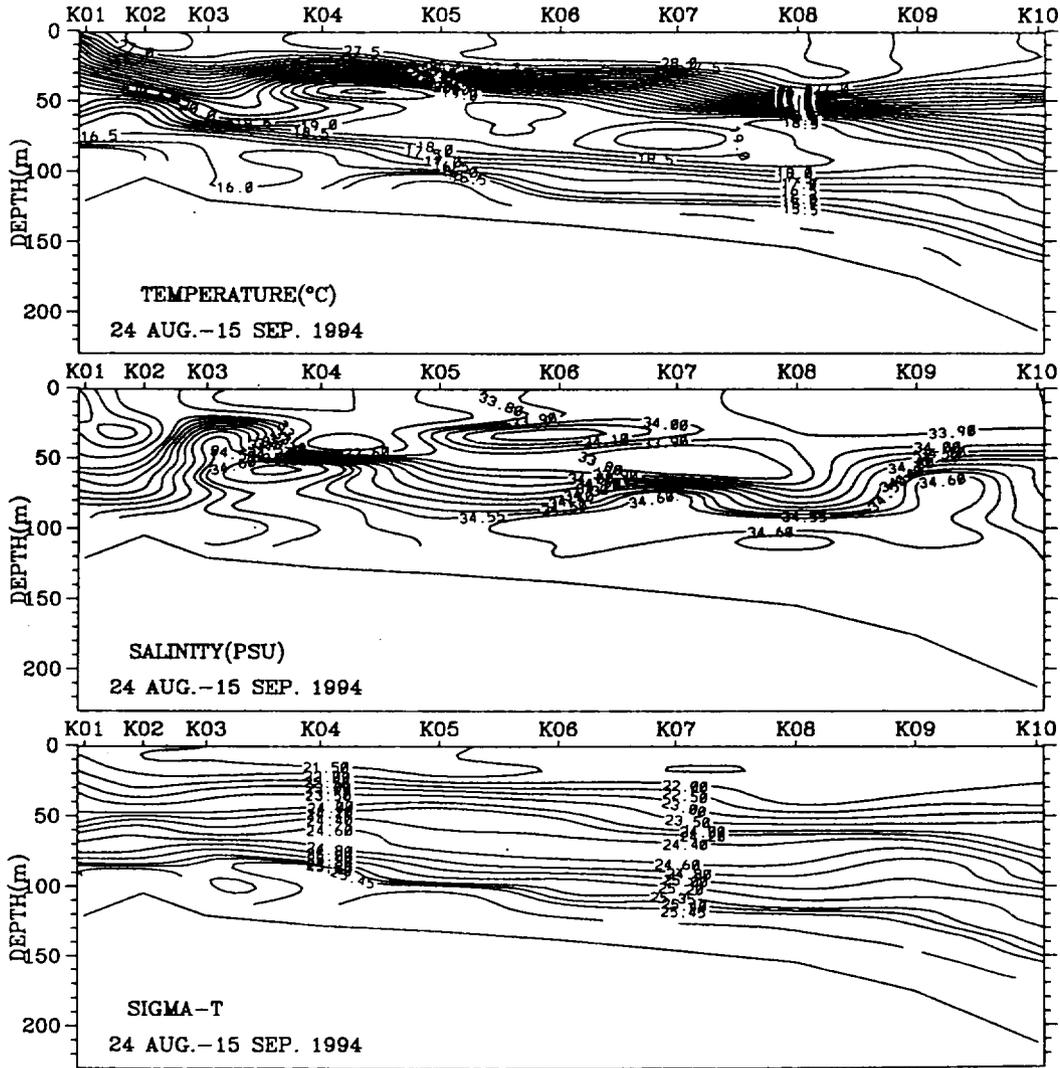


Fig. 9. Vertical distribution of temperature, salinity and density along K-Line between Cheju and Gotto Islands in summer.

로 가장 많았고 봄철과 여름철에는 16.4 Sv 정도로 비슷하였다. 수심이 깊은 고오또 부근의 K08-K10 사이에서는 겨울철에 17.85 Sv, 봄철에 13.35 Sv, 여름철에 7.09 Sv의 수송량이 통과하고 있다. 이 값은 제주도과 고오또 사이를 통과하는 전체 수송량 중에서 겨울철에 66%, 봄철에 81%, 여름철에는 43%만이 고오또 부근을 통과하고 있음을 보여준다. 그리고 수심이 100-150m 사이에 위치하는 K01-K08

사이를 통과하는 수송량은 겨울철에 9.14 Sv, 봄철에 3.09 Sv, 여름철에 9.31 Sv으로 오히려 여름철 체적 수송량이 약간 많고 모든 정점에 걸쳐 고르게 체적수송이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 겨울철에는 수심이 깊은 고오또 부근을 통해 많은 체적수송이 이루어지지만 등수심선을 따라 우회하는 흐름 때문에 대한해협 의 서수도로 수송량이 연결되지 않는다는 것을 말해준다. 반대로 여름철에

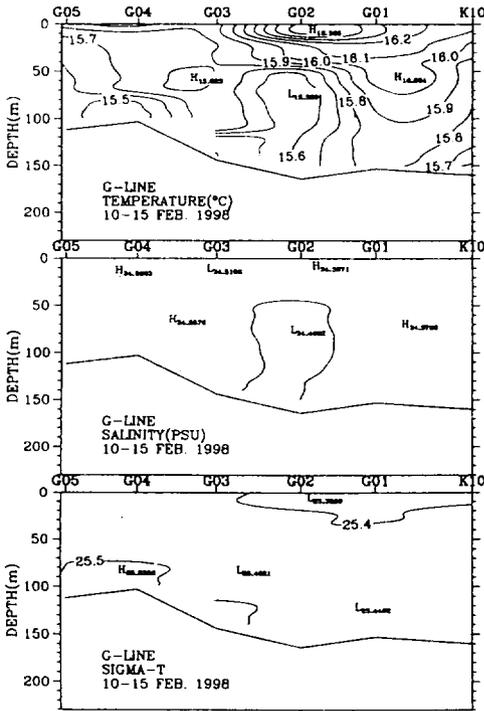


Fig. 10. Vertical distribution of temperature, salinity and density along G-Line (shown in Fig. 1) in winter.

는 100-150m 등수심선을 따르는 체적수송량이 그대로 대한해협 의 서수도로 연결됨으로서 대한해협 의 여름철 수송량이 겨울철보다 많게 나타날 가능성이 큰 것이다. 하지만 수심 100~150m 사이를 통과하는 수송량이 여름철과 겨울철 차이가 그렇게 크지 않고 봄철에 3.1 Sv 정도로 매우 적은 것 등은 해류계 관측을 통해 실제 수송량과 비교해 볼 필요가 있다.

대마난류수와 남해연안수의 경계

제주도-고오포사이를 통과하는 대마난류수와 남해연안수의 경계를 알아보기 위해 C-line, J-line, I-line, L-line(Fig. 2 참조)에 대한 봄철 해수특성을 살펴보았다. 난류수와 연안수의 경계는 염분전선이 형성되는 곳으로 보았다. Fig. 14와 Fig. 15는 제주

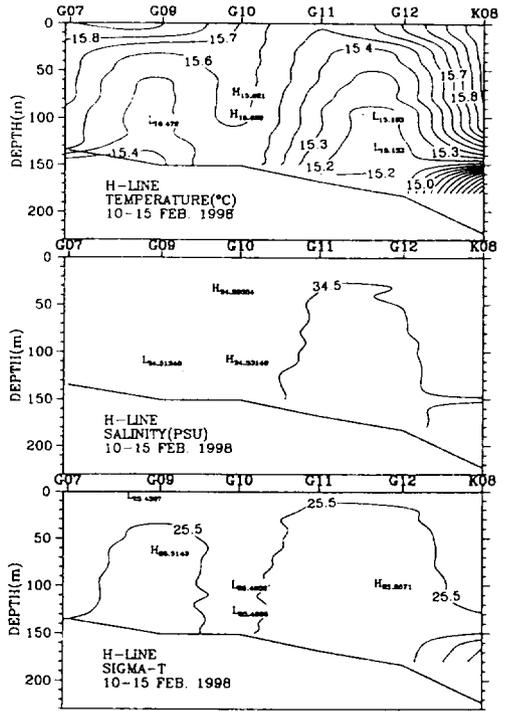


Fig. 11. Vertical distribution of temperature, salinity and density along H-Line (shown in Fig. 1) in winter.

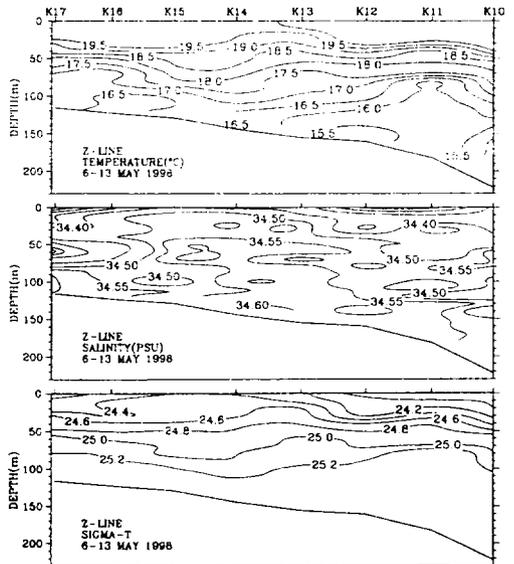


Fig. 12. Vertical distribution of temperature, salinity and density along Z-Line (shown in Fig. 2) in spring.

제주도-고오뜨 열도 사이를 통과하는 대마난류

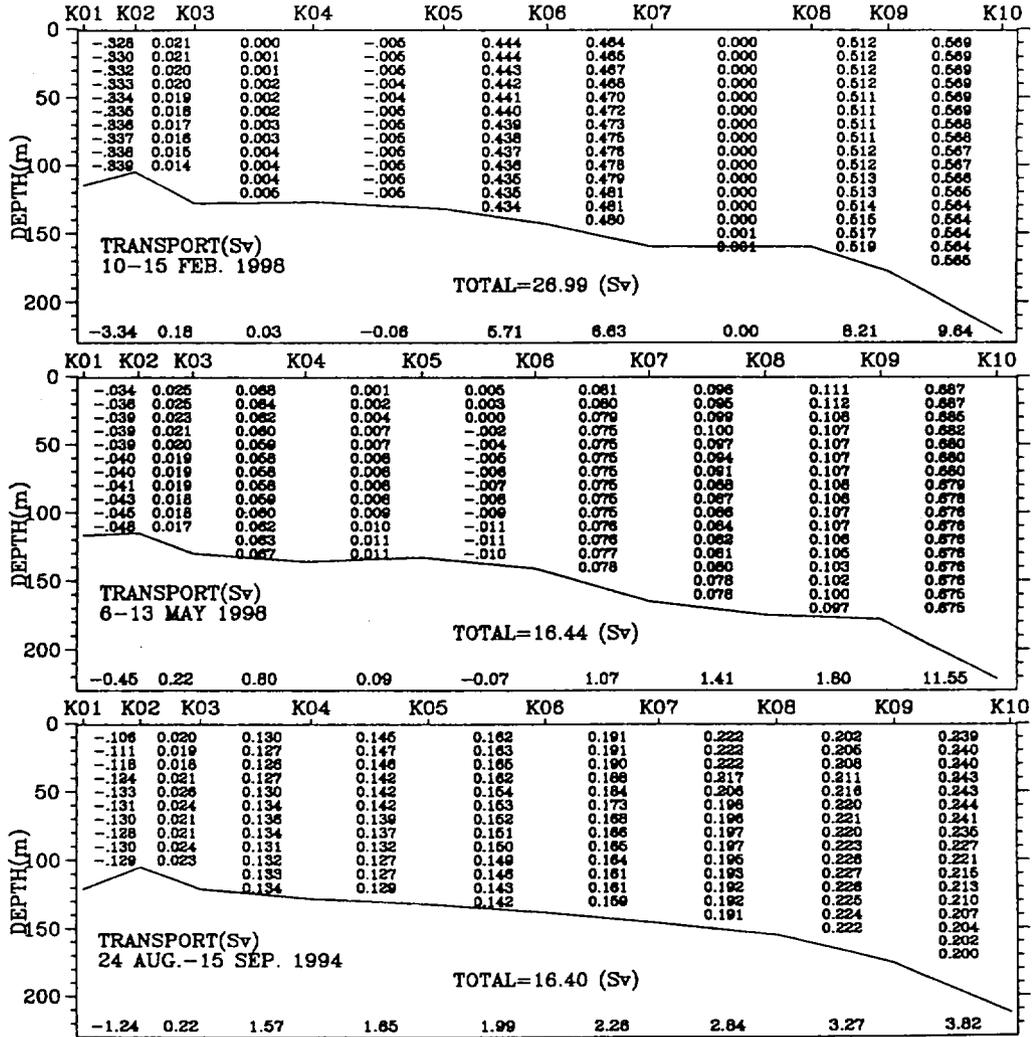


Fig. 13. Geostrophic volume transport (1 Sv = 10⁶m³/s) along K-Line between Cheju and Goto Islands in winter, spring and summer. Transport between adjacent stations are shown in the below of the box and total volume transport passing through Cheju-Gotto channel are shown in the center. Positive sign means northeastward and negative means southwestward transport.

해협중앙과 제주해협 동쪽 경계의 해수특성분포를 나타낸 것이다. 수온과 염분 분포에서 보면 C05-C06사이, J05-J06사이에서 강한 열염전선이 형성되고 있어 제주해협에서는 C05-J05를 경계로 그 북쪽은 남해연안수, 남쪽은 대마난류수가 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 제주해협의 동쪽에 위치한

I-line과 L-line의 해수분포는 Fig. 16, 17에 나타나 있는데 I05-I19사이, L05부근해역에서 강한 열염전선이 형성되고 있고 이곳을 경계로 난류수와 연안수가 대치하고 있다. 따라서 남해에서 북해에 대마난류수와 남해 연안수의 경계는 C06-J06-I19-L05을 잇는 선이 될 것이다.

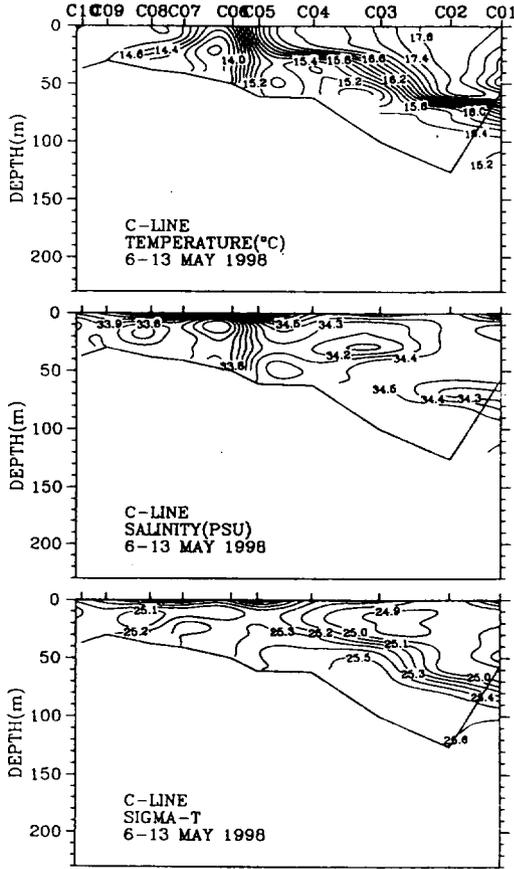


Fig. 14. Vertical distribution of temperature, salinity and density along C-Line (shown in Fig. 2) in spring.

결론 및 토의

겨울철 제주도-고오포 열도 사이에는 15.5~17°C, 염분 34.45~34.7‰를 나타내는 고온고염의 대마난류수가 분포한다. 특히 16.5°C 이상, 34.6‰ 이상의 보다 고온고염인 대마난류수의 주축은 제주도-고오포 열도사이의 중앙을 통과하고 있는데 이 난류수가 대한해협 서수도로 연결되는 대마난류수의 주축으로 여겨진다. 그런데 이 난류수의 주축은 수심이 깊은 고오포 이남해역의 난류수와 연결되지 않고 등수심선을 따라 남서쪽으로 연결되는 모습을 보여

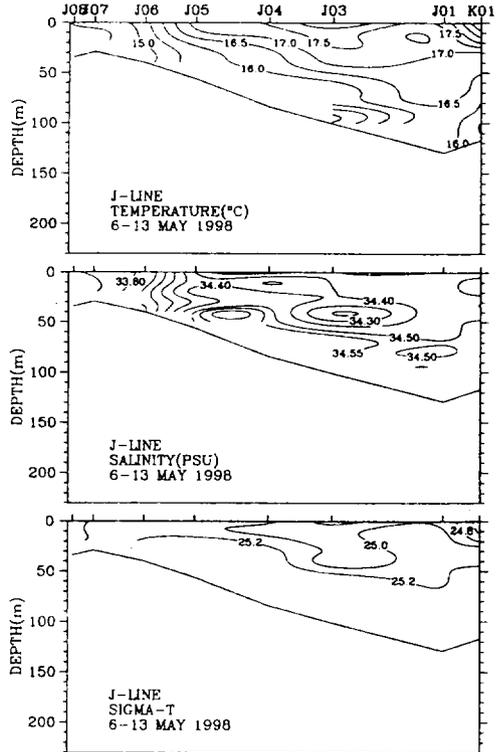


Fig. 15. Vertical distribution of temperature, salinity and density along J-Line (shown in Fig. 2) in spring.

대마난류의 북상경로가 동중국해의 등수심선을 따라가는 경로일 가능성을 보여주고 있다. 봄철에는 겨울철과는 약간 다른 분포를 보이는데 즉 고염수의 축이 제주도 부근해역과 고오포열도 부근해역으로 나누어진다는 것이다. 이것은 대마난류의 주축이 계절에 따라 변화함을 보여주며 대마난류의 경로를 알기 위해서는 많은 관측이 필요하다.

제주도-고오포 사이를 통과하는 체적 수송량을 지형류계산을 통해 살펴본 결과 겨울철에는 26.9 Sv, 여름철에는 16.4 Sv로 오히려 겨울철이 많게 나타났다. 그런데 겨울철 수송량의 많은 부분이 수심이 깊은 고오포 부근해역으로 통과하여 우회하는 흐름에 의해 다시 큐슈 연안을 따라 남하할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 하지만 여름철에는 수심 100~150m 전수심에 걸쳐 고르게 체적수송이 이루어져서 오히려 겨울보다 약간 많은 수송량을

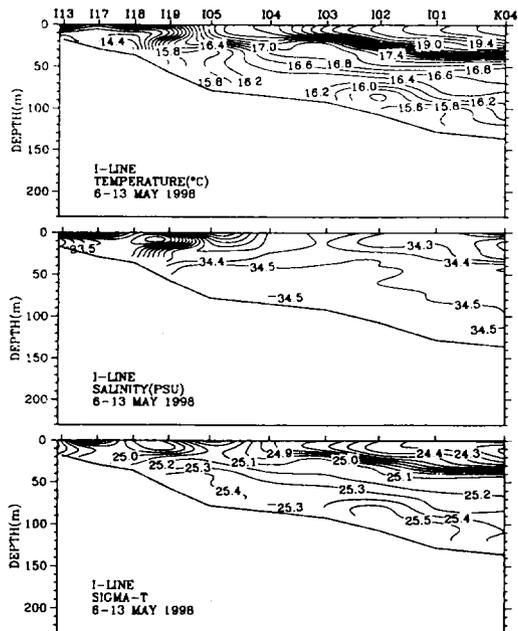


Fig. 16. Vertical distribution of temperature, salinity and density along I-Line (shown in Fig. 2) in spring.

보인다. 여름철에 수심 100~150m 사이의 체적수송 증가는 대한해협 서수도를 통과하는 수송량을 여름철에 두 배 증가시키는 원인으로 작용할 가능성이 크다. 대마난류수 북방한계는 C05-J05-I05-L06을 잇는 선으로 강한 열염전선에 의해서 남해 연안수와 대치된다.

결론적으로 제주도과 고오포 열도사이 해역에는 연중 북상하는 고온고염의 난류수가 분포하며 수심 100~150m을 따라 북상하는 난류수의 주축이 대한해협의 서수도로 연결되는 대마난류의 주공급원인 것으로 보인다. 이 대마난류수의 주축은 계절별로 위치가 약간씩 다르고 그에 따른 수송량 변동도 한다. 보다 정확한 수송량을 파악하기 위해서는 장기간 해류 관측을 통해 계절별 수송량을 계산할 필요가 있다.

요 약

대마난류수의 주축은 제주도-고오포 사이에서 어디로 통과하며 고오포 부근해역에서 등수심선을 따

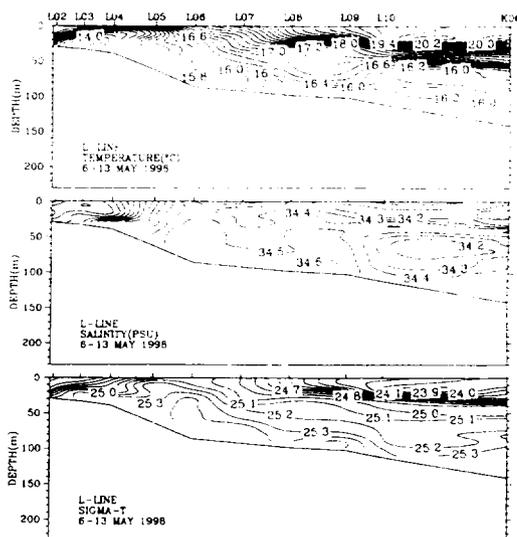


Fig. 17. Vertical distribution of temperature, salinity and density along L-Line (shown in Fig. 2) in spring.

라 우회하는 흐름이 있는지 알아보기 위해 제주도와 고오포 사이해역의 해수특성자료에 대한 분석과 지형류계산을 통해 체적 수송량을 계산하였다. 제주도와 고오포 사이 해역에는 연중 고온고염의 대마난류수가 분포하며 수심 100~150m을 따라 북상하는 난류수가 대한해협 서수도로 연결되는 대마난류의 주축으로 보인다. 이 대마난류수의 주축은 겨울철에는 제주도와 고오포의 중앙으로, 여름철에는 수심 100~150m 전 범위에 걸쳐 고르게 체적수송이 이루어진다. 수심이 깊은 고오포 부근해역에 고염의 난류수가 서수도로 연결되지 않는 것은 우회하는 흐름이 있기 때문이다. 제주도와 고오포 사이를 통과하는 지형류에 의한 체적수송은 겨울철에 26.9 Sv, 여름철에는 16.4 Sv으로 오히려 겨울철이 많게 나타났다. 그런데 겨울철 수송량의 많은 부분이 수심이 깊은 고오포 부근해역으로 통과하여 우회하는 흐름에 의해 다시 큐슈 연안을 따라 남하할 가능성이 크다. 여름철에는 수심 100~150m 전 수심에 걸쳐 고르게 체적수송이 이루어지고 이 수심에서는 겨울보다 약간 많은 수송량을 보여 여름철에 대한해협 서수도를 통과하는 수송량을 증가시키는 원인으로 작용하는 것으로 보인다.

사 사

해양관측을 위해 수고하신 제주대학교 실습선 아
라호와 한라호 선원여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Hsueh Y., H. J. Lie and H. Ichikawa, 1996. On the Branching of the Kuroshio west of Kyushu. *J. Geophys. Res.*, 101, 3851~3857.
- Lie H. J. and C. H. Cho, 1994. On the origin of the Tshushima Warm Current. *J. Geophys. Res.*, 99, 25081~25091.
- Pang I. C., T. H. Kim, T. Matsuno and H. K. Rho, 1993. On the origin of the Tsushima Warm Current (I): Barotropic Case. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 26(6), 580~593.
- Pang I. C. and I. S. Oh, 1995. Warm Water Circulation and its Origin by Sea Level Fluctuation and Bottom Topography. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 28(5), 677~697.
- Pang I. C., K. H. Hyun, J. H. Lee and H. K. Rho, 1998. Another Possibility of the Tsushima Current Route. *Proceedings of 5th Joint Symposium of Cheju-Nagasaki University*, 1998.
- Pang I. C. and K. H. Hyun, 1998. Seasonal Variation of Water Mass Distribution in the Eastern Yellow Sea and the Yellow Sea Warm Current. *J. of Kor. Soc. of Oceanography*, 33(3), 41~52.