

내만과 내해의 유동구조 및 수질구조에 관한 조사 An investigation on the structures of flow and water quality in a inner bay adjacent to a inland sea.

김한구¹ · 허재영² · 中辻啓二³

Han-Gu Kim¹, Jae-Yeong Huh² and Nakatsuji Keiji³

1. 서 론

내만(inner bay)과 내해(inland sea)에 다량의 질소, 인이 유입하면 식물플랑크톤의 증식(적조현상)과 빈산소 수괴 현상등의 수질문제가 발생한다. 이 때문에 본 연구가 대상으로 하는 Kitan(紀淡)해협을 포함하는 Seto(瀬戸)내해(inland sea)에 있어서는 1973년 Seto내해 환경임시조치법이 제정된 이후 정부차원에서 수질오탁의 원인이 되는 COD, 인 등의 총량규제가 실시되어 왔다. 그 결과, Osaka(大阪)만과 Kii(紀伊)수로를 포함한 Seto내해의 전 수역에 걸쳐 수질 환경이 호전되었다. Fig. 1은 Kitan해협 주변해역의 적조발생 횟수

의 경년변화를 표시한 것이다. 수질 오염이 심화했던 1970년대에 비해 적조 발생 횟수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 행정적 규제가 실시됨에도 불구하고 적조현상과 빈산소 수괴 현상은 매년 발생하고 있고 수질개선 효과는 기대만큼 발휘되지 않고 있는 상황이다.

이러한 원인으로서는 저니(底泥)로부터의 용출(韓, 2001)과 부영양화에 따른 1차생산(또는 내부생산)의 증가가 주목되고 있다. 또한, 최근의 연구결과에 의하면 Kitan해협의 남쪽에 위치한 Kii수로에서는 여름철에 Kuroshio(黑潮)의 이안(離岸)-접안(接岸)상태에 따라 태평양으로부터 유입되는 수괴의 수질구조가 크게 다르다는 연구결과

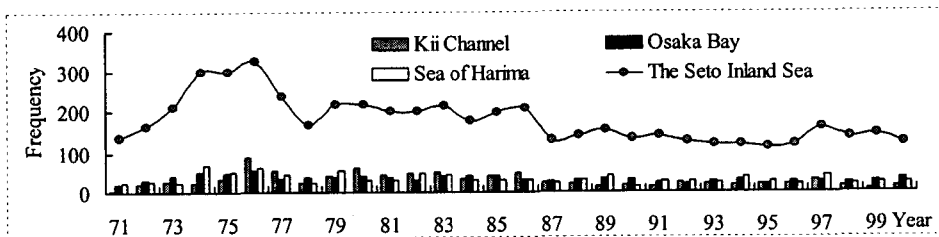


Fig. 1. The annual frequency of red tide.

- 1 오사카대학 토목공학전공 수질시스템공학영역 (Corresponding Author : Han Gu Kim. Water Systems Eng., Social Systems Eng., Dept. Civil Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, Osaka 565-0871, Japan, hk-kim@civil.eng.osaka-u.ac.jp)
- 2 대전대학교 토목공학과 (Dept. Civil Eng., Daejeon University, 96-3 Yongun-dong, Dong-gu, Daejeon 300-716, Korea)
- 3 오사카대학 토목공학전공 수질시스템공학영역 (Water Systems Eng., Social Systems Eng., Dept. Civil Eng., Graduate School of Eng., Osaka University, Osaka 565-0871, Japan)

가 보고되고 있다. Kuroshio는 고온·저염양염인 특징을 갖는 해류이다. Fig. 2에 Kitan해협 주변해역의 지형과 이 수역에서 지금까지 보고된 질소, 인 등의 유입량을 나타내었다.

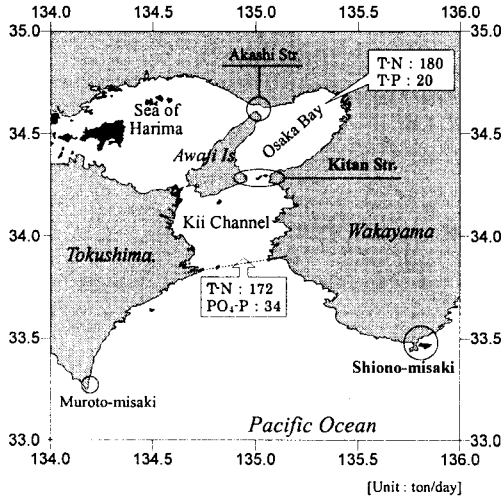
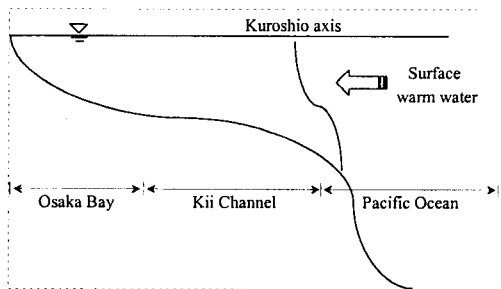
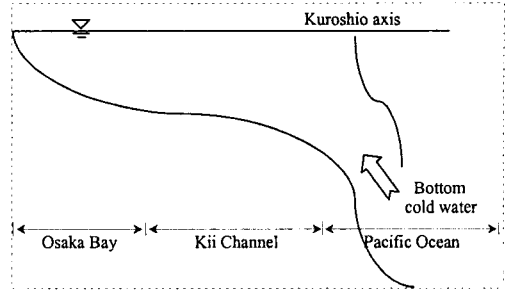


Fig. 2. Load of nutrient salt around Kitan strait.

Takeuchi(竹内) 등(1997)은 Kii수로의 남쪽에 위치한 Shionomisaki(潮岬)에서 Kuroshio의 중심부가 20해리(37km)이내로 접안해 있는 경우에는 Kuroshio의 고온·저염양염의 해수가 Kii수로 내부로 진입하고, Shionomisaki에서 Kuroshio의 중심부가 20해리(37km)이상으로 이안해 있는 경우에는 태평양의 아표층(亞表層)으로부터 저온·고염양염의 해수가 Kii수로의 내부로 진입한다고 하였다. Fig. 3은 Kuroshio의 접안 및 이안상태에 따른 해수의 유입상태를 모식적으로 나타낸 것이다.



(a) Kuroshio axis distance within 37km from shionomisaki ; inflow with warm water, low concentration



(b) Kuroshio axis distance out of 37km from shionomisaki ; inflow with cold water, high concentration

Fig. 3. Schematic diagram of water inflow from Pacific Ocean to according to Kuroshio axis distance from Shionomisaki.

본 연구는 Osaka만과 Kii수로를 연결하고 있는 Kitan해협에 있어서 현지관측을 통해 유동구조와 수질구조의 시·공간적 변동특성과 잔차류 구조의 해명, 물질수송의 정량화와 이러한 현상에 영향을 미치는 외적인 요인을 밝히는 것을 그 목적으로 하고 있다.

2. 현지관측 및 천해정선 관측

2.1 현지관측의 개요

Fig. 4는 Kitan해협 주변의 관측점 위치를 나타내고, Table 1에 현지관측 상황을 표로 나타내었다. 유향과 유속의 관측에는 ADCP(300kHz, 600kHz)를 이용하였고, 1999년 8월 4일에는 B1측선, 2000년 8월 7일, 2001년 8월 10일, 2002년 9월 10일에는 B3측선에 대해 1조석 이상의 단면 연속 관측을 실시하였다. 동시에 염록소센서가 부착되어 있는 STD와 CTD시스템을 이용하여 각 관측점에 있어서의 수온, 염분 등을 관측하고 2001년과 2002년에는 관측 단면내에서 채수(약30점×6회)를 실시하여 영양염(T-N, NO₂-N, NO₃-N, NH₄-N, T-P, PO₄-P)의 분석도 실시하였다. 관측일의 날씨는 맑았고, 바람도 거의 무풍이었다. 또한, 조류의 일조 부등이 적은 날을 선택하여 관측을 실시하였다. 관측시 Kuroshio의 상태는 1999년과 2002년에는 Kuroshio의 중심부가 약 37km로 접안해 있었고, 2000년과 2001년에는 Kuroshio 중심부가 각각 약 64km, 약 74km로 이안상태에 있었다.

Table 1. A detailed account of observation in Kitan strait

year	1999	2000	2001	2002
date	Aug. 4 (05:00-18:00)	Aug. 7 (05:00-18:30)	Aug. 10 (05:00-18:00)	Sep. 10 (05:00-18:30)
observational line & point	B1 line(8 round trip) B3 line(16 round trip)	B3 line (east side-5 round trip- west side-6 round trip)	B3 line(6 round trip)	B3 line(8 round trip)
observation item	velocity, temperature, salinity	velocity, temperature, salinity, Chl.a	velocity, temperature, salinity, Chl.a, T-N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, T-P, PO ₄ -P	velocity, temperature, salinity, Chl.a, DO, T-N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, T-P, PO ₄ -P
condition of sea	neap tide	neap tide	middle tide	middle tide
condition of weather	fine, weak wind	fine, weak wind	fine, calm	fine, calm

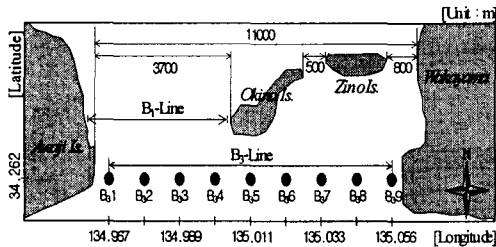


Fig. 4. Observation lines with ADCP in Kitan strait and observation Points(B₁ ~ B₉) of water quality by sampling.

2.2 천해정선 관측

1965년대에 접어들어 수질오염이 심각한 사회적 문제로 부각됨에 따라, Kitan 해협 주변해역에서는 주변에 있는 4군데의 수산시험장으로부터 1972년부터 매월 정기적으로 수온, 염분 등의 일반 수질항목에 대한 관측이 실시되고 있고, 영양염 등의 특수 수질항목에 대해서도 2, 5, 8, 11월에 정기적으로 관측이 실시되고 있다. 2, 5, 8, 11월은 각각 겨울, 봄, 여름, 가을을 대표하고 있다. 그러나, 기후 등의 여건에 따라서 관측시기가 다소 달라지는 경우도 있다. 현재까지는 2000년까지의 자료가 공개되어 있다. 공개된 자료중 관측시기가 중복되어 있는 1999년 8월과 2000년 9월의 특수 수질항목 자료를 이용하여 관측자료와 비교 검토하였다. Fig. 5는 주변 4군데의 수산시험장에 의해 관측이 실시되고 있는 Kitan해협 주변해역의 천해 정선 관측점을 나타내고 있다

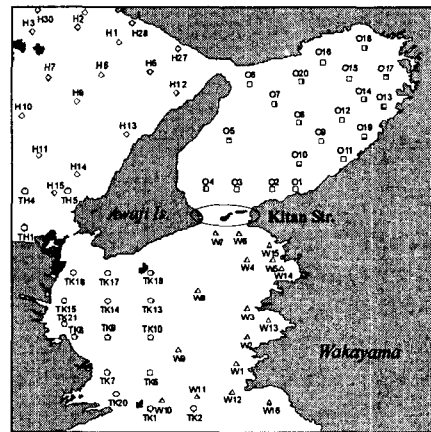


Fig. 5. Observation points of Hyogo, Osaka, Tokushima and Wakayama Prefectural Fisheries Experimental Station around Kitan strait.

3. 유동 및 밀도구조와 이에 영향을 미치는 요인

3.1 잔차류와 밀도구조

Fig. 6은 Fig. 4에 나타난 Kitan해협의 횡단면에 걸친 현지관측 결과 중 잔차류와 평균밀도 구조를 나타낸다. 종축은 수심을 나타내고, 횡축은 Fig. 4의 왼쪽 관측점으로부터의 거리를 나타낸다. 회색으로 나타낸 영역은 해저지형을 표시하고 수평유속은 백터의 길이로 표시하고 있다. 백터의 상하 방향은 유속의 남북성분을, 좌우성분은 유속의 동서성분을 나타내고 있다.

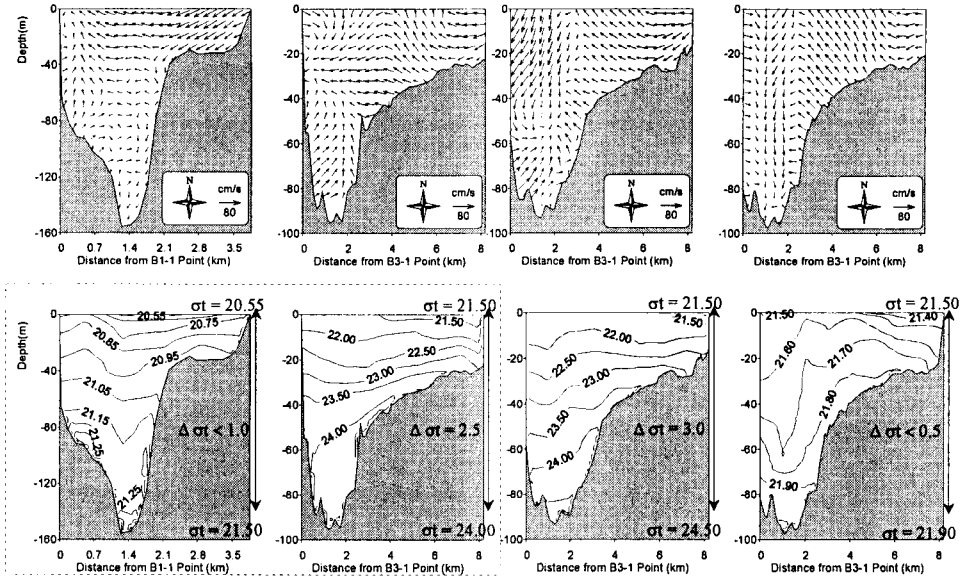


Fig. 6. Residual current and mean density of cross-sectional view in Osaka Bay. Indicators directed upward and downward mean inflow Kii Channel to Osaka Bay and outflow from Osaka Bay to Kii Channel, respectively.

Fig. 6(a)의 잔차류 구조를 보면 1999년의 B₁측선에 있어서는 Okino Is.의 지형적인 영향을 받아서 東岸(Okino Is. 방향)에서는 남서류(약 0.6m/s)의 유동구조를 나타내고 있다. 西岸(Awaji Is. 방향)의 전 단면에 있어서는 북류가 우세하고, 중앙단면의 표층으로부터 수심 약 50m까지는 서류가 우세한 유동구조를 나타내고 있으며, 수심이 약 50m 이상인 곳에서는 특정한 유동구조가 나타나지 않고 아주 복잡한 유동구조를 나타내고 있다. B₃측선의 잔차류 구조는 東岸(Wakayama 방향)에서는 2000년, 2001년, 2002년의 3년간 북서류와 서류의 유동구조를 나타내고 있지만, 수심이 깊고 유속이 빠른 西岸(Awaji Is. 방향)에서는 유동구조가 매년 변동하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 Kitan 해협의 잔차류 구조가 수심이 깊고 유속이 빠른 西岸에서는 매년 변동하고 있는 것을 동일측선을 3년간 연속 관측함으로써 알 수 있었다.

Fig. 6(b)의 1조석 평균의 밀도구조를 보면, 표층과 저층간의 밀도차가 작은 1999년과 2002년, 표층과 저층간의 밀도차가 큰 2000년과 2001년의 두 가지 양상으로 구분할 수가 있다.

먼저, 표층과 저층간의 밀도차가 작은 1999년과 2002년의 평균밀도 구조를 상세히 보면, 1999년 B₁측선의 관측에서는 밀도가 표층에서 $\sigma_t=20.55$, 저층에서 $\sigma_t=21.50$ 을 나타내어 표층과 저층간의 밀

도차가 $\Delta\sigma_t < 1.0$ 이고, 2002년의 B₃측선의 관측에 있어서는 밀도가 표층에서 $\sigma_t=21.50$, 저층에서 $\sigma_t=21.90$ 을 나타내어 표층과 저층간의 밀도차가 $\Delta\sigma_t < 0.5$ 로 Kuroshio가 접안해 있던 1999년 여름과 2002년 여름 모두 성층구조와 붕괴되어 연직혼합이 일어난 것을 알 수 있다. 또한, 2002년에는 기온이 하강하는 9월에 관측을 실시해, 연직혼합이 1999년 8월관측보다 더욱 진행되어 있는 것을 알 수 있다.

한편, 표층과 저층의 밀도차가 큰 2000년과 2001년의 평균 밀도 구조를 보면, 표층에서는 $\sigma_t \approx 21.50$, 저층에서는 $\sigma_t \approx 24.50$ 의 밀도구조를 나타내어 표층과 저층간의 밀도차는 $\Delta\sigma_t \approx 3.0$ 으로 Kuroshio가 이안해 있던 2000년 여름, 2001년 여름 모두 강한 성층구조를 나타내고 있다.

전술한 바와 같이 Kitan 해협의 남쪽에 위치한 Kii 수로에서는 Kuroshio의 변동이 수온분포와 영양염 농도분포에 영향을 미치고 있다는 연구결과가 보고되어 있다. 따라서, Kuroshio의 변동이 Kitan 해협의 유동구조에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 검토한다.

3.2 잔차류와 밀도구조에 영향을 미치는 요인

Fig. 5에 표시한 천해 정선 자료를 이용하여 Kitan 해협 주변해역의 저층의 수온 및 밀도구조를

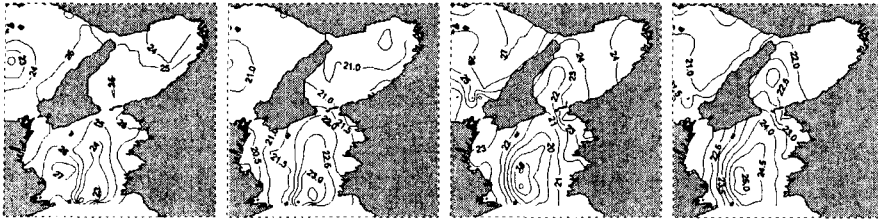


Fig. 7. Distribution of water temperature and density on the bottom around Kitan strait.

Fig.7에 나타낸다. Fig. 7(a)의 Kuroshio가 접안해 있었던 1999년 8월의 수온 및 밀도구조를 보면, 태평양 부근부터 고온(25.5℃), 저밀도($\sigma_t=22.0$)의 수괴가 Kitan 해협의 저층부로 유입하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 7(b)의 Kuroshio가 이안해 있던 2000년 9월의 수온 및 밀도구조를 보면, 태평양부근으로부터 저온(21.0℃), 고밀도($\sigma_t=24.0$)의 수괴가 Kitan 해협의 저층부로 유입하는 것을 알 수 있다. 이와 같이, Kuroshio의 접안 및 이안상태에 따라 Kii 수로내의 수온과 밀도구조가 변화하는 것을 알 수 있으며, 이러한 Kii 수로내의 수온과 밀도구조의 변동에 따라 Kitan 해협에 있어서도 Kuroshio가 접안해 있던 1999년과 2002년 여름에는 표층과 저층간의 밀도차($\Delta \sigma_t < 1.0$)가 적고, Kuroshio가 이안해 있던 2000년과 2001년 여름에는 표층과 저층간의 밀도차(약 $\Delta \sigma_t=3.0$)가 크다는 것을 알 수 있다. 이렇게 Kuroshio의 사행에 따라 Kii 수로내의 밀도구조가 변동하고 이에 따라 Kitan 해협에서도 잔차류 구조가 매년 크게 변동하고 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는, Osaka만과 Kii 수로를 연결하는 Kitan 해협에 있어서 유동구조와 물질수송구조의 실태를 명확히 밝히기 위해 현지관측을 실시했다. 그 결과, Kitan해협의 유동구조는 수심이 낮은 동안에서는 서류, 남서류의 일정한 유동구조를 나타내고 있지만, 수심이 깊고 조류가 빠른 서안에서는 유동구조가 매년 크게 변동하고 있는 것을 알 수 있었다. 이러한 유동구조의 변동은 Kuroshio의 사행에 따른 Kii수로내의 수온 변동 때문에 밀도구조가 변화하여 일어나는 것임을 알 수 있었다.

참고문헌

- 韓 銅珍(2001). "底泥からの栄養塩の溶出機構を考慮した閉鎖性海域の水質・底質予測モデルに関する研究", 大阪大学大学院工学研究科博士論文.
- 竹内淳一, 中地良樹, 小久保友義 (1997). "紀伊水道に進入する表層温水と底層冷水", 海と空 第73巻, pp. 81~ 92.
- 門谷 茂, 三島康史, 岡市友利 (1991). "沿岸海洋研究ノート", 第29巻, pp. 13~27.
- 浜走辛育, 日比野忠史, 駒井克昭, 松岡純作 (2001). "瀬戸内海における湾・灘水塊の移流・交換量の季節変動特性", 海岸工学論文集 第48巻, pp. 1036~1040.
- Fujiwara, T., T. Takahashi, A. Kasai, Y. Sugiyama, and M.Kuno (2002). "The role of circulation in the development of hypoxia in Ise Bay", Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol 54, pp. 19~31.
- Fujiwara, T. and Y. Yamada (2002). "Inflow of Oceanic Water into a Coastal Embayment (Tokyo Bay) and Generation of Subsurface Hypoxic Water mass", Japan, Geophysical Research, Vol 107, No.C5, 13, pp. 1~10.
- Hoshika, A., T. Tanimoto and Y. Mishima (1999). "Current and Material Transport at Tomogashima Strait", Japan, J. Oceanography, Vol 55, pp. 427~437.