

# 일본, 山梨縣 四尾連湖에 대한 성층기 표수층의 호류에 관하여

양해근\* · 新井 正\*\*

## Lake Current in the Surface layer during Thermal Stratification on Shibere Lake, Yamanashi Prefecture, Japan

YANG, Heakun\* and Tadashi ARAI\*\*

**요약** : 본 연구에서는 온대호의 성층기 표수층의 호류형성에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 그 성인을 밝히기 위해 호소 수온의 일변화와 호류의 관계, 그리고 기상·기후 요소에 대한 관측을 실시하였다. 그 결과, 성층기에 발생하는 표수층의 호류는 태양고도와 일사량의 차이에 따라 부분적인 수온차가 발생하고, 이에 기인한 열적교환이 주요 에너지원으로 판명되었으며, 2차적으로 탁월풍에 의한 취송류가 작용하는 것으로 간주된다. 한편, 수면이 냉각된 심야에는 수평적 환류보다는 연직대류가 발달하는 것으로 간주된다. 그리고 가열된 낮에는 부분적인 온도경도차에 의해 호심을 중심으로 시계반대방향과 시계방향으로 각각 환류하는 수괴가 존재하고, 탁월풍은 수괴의 이동방향과 이동속도에 다소 영향을 미치지만, 전체적인 흐름방향에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

주요어 : 수온성층, 호류, 표층수, 시비레호수, 3D 지리정보

**Abstract** : In this research, the primary factors affected to the formation of lake current of surface layer and thermal stratification of temperate lake have been analyzed, the daily change of water temperature, relationship with lake current and the research about the elements of meteorological phenomenon have been implemented. As a result, the lake current of surface layer occurring while the period of thermal stratification is showing the proportional difference of water temperature, thermal exchange caused by this has been known as the main energy source, and this is, secondly, considering as the interaction of the wind driven current by the prevailing wind. On the other hand, during the night time when the water surface is cooled, and it is considering as the vertical convection is occurring than horizontal circumfluence. Also, there exists the water mass, which is circumfluent counterclockwise and clockwise direction separately. The prevailing wind is rather affected to the moving direction and moving speed of water mass, but it doesn't affect to the whole flowing direction.

Key Words : thermal stratification, lake current, surface layer, Shibere Lake, SiteBuilder 3D

### 1. 머리말

호소의 성층현상은, 여름철 수심이 깊은 온대호소에서 뚜렷하게 나타나는 현상으로서, 호소의 물질순환과 생화학적 반응속도 그리고 일차생산 등을 조절하는 중요한 요인이며, 호소의 수질분포와 생태계의 구조에 큰 영향을 미치는 인자이다(新井, 1972; Powell and Jassby, 1974; Lam and Schertzer, 1987; 김윤희 외, 2001). 그리고 호류는 호분(湖盆)

의 지형적 특성과 바람, 하천수의 유입·유출, 물의 밀도차이 등의 영향으로 발생하고, 호소내의 물질이동 및 확산을 일으키는 가장 중요한 요소이다(新井正 외, 1985; 서동일, 1998).

지금까지 호류에 관한 연구는, 수온변화에 의한 대규모적인 연직순환(Horiuchi and Ame, 1961; Kiser and Rumber, 1975 등)과 밀도류에 의한 부분순환(Weirich, 1986; Imberger and Patterson, 1990) 또는 취송류에 의한 내진파(Boyce, 1974; Mortimer,

\* 전남대학교 호남문화연구소 전임연구원(Researcher, Honam Culture Research Center, Chonnam National Univ.), yanghk@chonnam.ac.kr

\*\* 日本 立正大學 地球環境科學部 教授(Professor, Faculty of Geo-Environmental Science, Rissho Univ., Japan)

1974 등) 등을 중심으로 많은 연구 성과가 발표되었다. 그리고 온대호소의 성층현상에 대해서는 吉村(1928, 1933, 1937)와 新井(1962, 1964) 등을 중심으로 활발한 연구가 진행되었으며, Dake and Harleman(1969), Henderson(1976), 新井 외(1985), Kim(1995) 등에 의해 호류와 오염물질 확산간의 상호작용에 대해서도 연구되었다.

그러나 수온성층이 강화된 여름철에도 표수층은 바람에 의한 교란과 증발, 기온의 일교차의 영향으로 소규모 대류현상이 일어나지만(新井, 2000), 이러한 대류현상은 그 규모가 매우 작고, 표면부에 한정된 현상이라는 점에서 그 동안 주목을 받지 못했다. 또한 표면부의 열적교류에 의한 소규모 대류현상은 여름철 호소의 수질환경 특히 조류증식과 그 규모를 결정하는 주요 요인 중의 하나임에

틀림이 없다.

따라서 본 연구에서는 이러한 점에 연구의 중요성을 인식하고, 인위적인 물관리가 배제된 자연호인 시비레(四尾連)호를 대상으로 표수층의 호류형성에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 그 성인을 밝히기 위해 호수 수온의 일변화와 호류와 관계, 그리고 기상 요소(풍향·풍속 등)를 중심으로 관측을 실시하였다.

## 2. 연구지역의 개관

시비레(四尾連)호는 일본 야마나시(山梨)현 조후(甲府)분지의 남남서방향으로 약 17km 떨어진 미사카(御坂)산지의 서쪽 산정부근에 위치한 작은

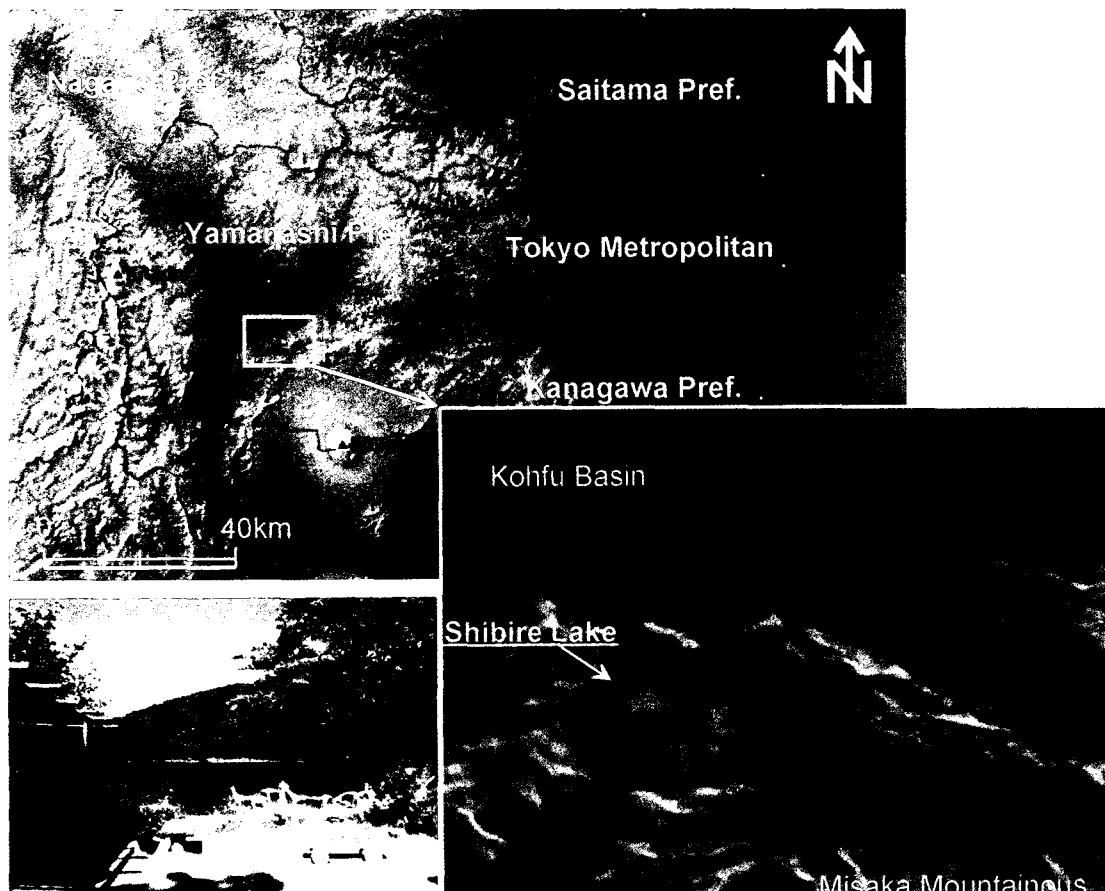


Figure 1. 3D model of the study area by Kashimiru 3D and ArcView GIS Software

호수이다. 호수면의 고도는 약 860m이고, 유역면적은 0.4km<sup>2</sup>, 호수의 최대용적은 328,649m<sup>3</sup>, 최대 수심은 10.7m이다. 호수 주변의 지질은 일부 안산암이 보이지만, 그 대부분은 미사카층<sup>1)</sup>에 해당하는 역암(礫岩)으로 구성되어 있다. 그리고 시비레호는 급사면으로 둘러 쌓여있는 지형적 요인에 의해 겨울철에도 비교적 강풍이 불지 않으며, 연평균 수위 변화가 2m전후이고, 집중호우 또는 장기간 무강수일이 지속되더라도 비교적 수위가 안정된 호수이다(新井, 2000).

아직 호수의 성인에 관해서는 충분히 밝혀진 바가 없으나, 일본 국토지리원에서 발행하는 1/25,000 수치지도(DEM: 25m mesh data)를 기초로 Kashimiru 3D ver. 6.13과 ArcView GIS의 3D Analyst ver. 1.0을 이용한 지형분석 결과로 추론하자면, 남사면의 산사태 또는 산면붕괴에 의해 호수의 동쪽 출구가 막혀 형성된 것으로 간주된다. 따라서 시비레호는 하천의 유입·유출이 없는 폐쇄 호로서 호류를 연구하는데 최적의 장소라 할 수 있다(Figure 1).

호수주변은 여름철 캠프장으로 이용되고 있으나, 화장실은 물을 사용하지 않는 미생물 처리공법에 의한 오수처리 시설이 설치되어 있으므로, 처리

수가 거의 없으며, 여름 휴가철에 잠용수의 일부가 호수로 유입되고 있으나 그 양은 극히 적은 량이다. 또한 호수의 수질에 영향을 미칠 오염물질의 투기에 대해서는 철저한 관리가 이루어지고 있어, 호수의 부영양화를 일으킬만한 오염원은 없다고 해도 무방하다.

### 3. 조사방법

현지조사는 2000년 7월 31일에서 8월 2일, 그리고 2001년 8월 1일부터 8월 3일 사이에 각각 호류 조사와 수온, 수질 그리고 호수주변의 기상·기후에 관한 관측을 실시하였다.

먼저, 호류조사는 호류판의 이동방향과 이동속도에 대한 추적을 통하여 관찰하는 것이 일반적인 방법이라 하겠으나, 본 조사에서는 호안 기수부의 얇은 수심으로 인한 호류판이 호저(湖底)에 접촉하는 문제를 해결하고, 미세한 표면 대류현상과 호안의 물 흐름을 측정하기 위하여, 남동 호안의 수심 1.5m지점에 초음파유속계(USCM: Ultra-Sonic Current Meter)를 설치하였다(Figure 2). 호류판은 φ4mm 철사와 투명한 비닐을 이용하여 폭 45cm,

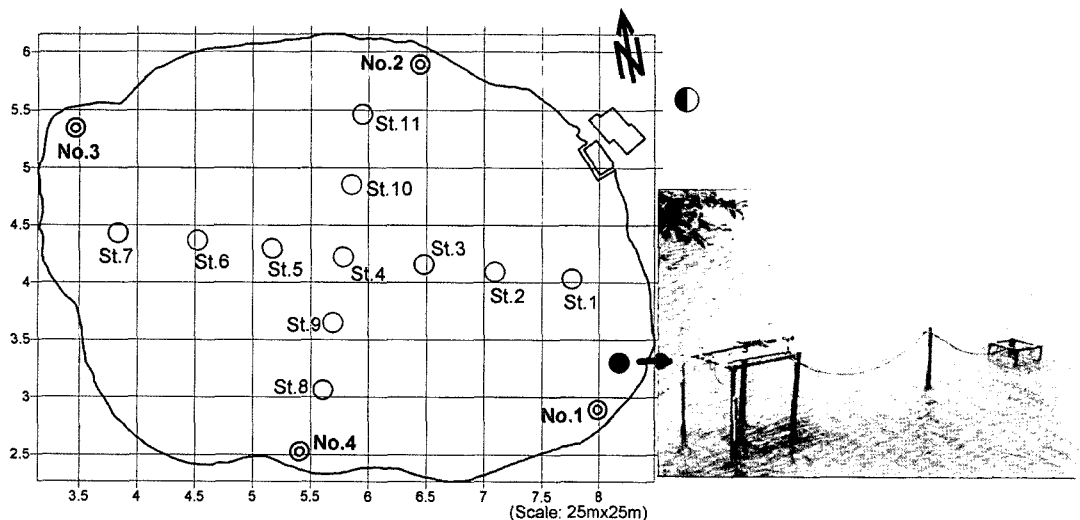


Figure 2. Location of the observation sites in Shibire Lake.

○ : waster temp. and water quality, ◎ : data logger of water temp., ● : current meter, pranometer and net pyradiometer, ●● : anemometer

길이 100cm인 투명한 비닐판을 만든 후, 바람에 의한 영향을 배제하기 위해 서로 다른 2장의 비닐판을 십자형으로 교차시킨 후 단단히 고정하였다. 호류판의 입수(入水) 위치는 부이와 연결하는 줄의 길이를 조절하여, 수심 2m지점과 수심 5m지점으로 고정했으며, 호류판은 2m수심 6개와 5m수심 4개로서 총 10개를 제작하였다. 호류판의 이동은 호안의 특정 기준기점을 중심으로 한 평판측량과 GPS(Global Positioning System)를 탑재시킨 보트를 이용하여 30분단위로 이동방향과 거리를 관측하였다. 본 조사에서 사용된 초음파유속계(USCM)의 구조 및 측정원리에 대해서는 新井(1984)에 상세히 언급되어 있으며, 호류판 제작에 관한 보다 상세한 내용은 박종관(1997)에 기술되어 있으므로, 본고에서는 언급을 줄이고자 한다.

호안의 물 흐름과 수온간의 상호관계를 조사하기 위하여, 호안 기수부로부터 2m 떨어진 지점 즉 No.1~4지점에 자동수온계를 각각 설치하였다. 그리고 초음파유속계 설치장소에도 수심 0.5m지점과 1.5m지점에 수온계를 각각 설치하고, 수면위에는 풍속계와 일사계, 반사계를 각각 1대씩 설치하였으며, 모든 관측자료는 자동기록계를 이용하여 자료수집을 하였다(Figure 2의 사진). 한편 수온의 일변화와 수온의 연직분포 그리고 수질(DO, EC, 투명도 등)의 연직분포를 파악하기 위해 2000년 조사에서는 st.1~st.11지점을, 2001년 조사에서는 st.2, st.4, st.6, st.8, st.11을 대상으로 2시간마다 수심 50cm간격으로 측정하였다. 이외에도 호소 주변지역에서 풍향풍속, 기온, 일사량 등을 동시에 측정하였으며, 방사온도계를 이용한 수면의 온도분포도 조사하였다(Figure 2).

#### 4. 결과 및 고찰

##### 1) 수온 · 수질의 연직분포

여름철 온대지역의 호소에서는 밀도가 적은 수괴(水塊)가 상층부에 위치하고, 밀도가 큰 수괴가 하부에 축적하는 이른바 수온성층이 형성된다. 이러한 수온성층구조는 상하 등온층을 이루고 있는 수면부근의 표수층(表水層: surface layer)과 그 아

래에 수온이 급격하게 감소하는 변온층(變溫層: thermocline) 그리고 변온층으로부터 서서히 수온이 감소하다가 일정 깊이부터 4°C의 수괴(深水層: hypolimnion)로 이루어져 있다(新井正 외, 1984). 그러나 유입·유출이 많은 인공호소 또는 고농도의 용존성분을 많이 함유한 밀도류가 유입되는 경우에는 보다 복잡한 성층구조를 형성할 것으로 보인다.

新井(2000)에 의하면, 시비레호는 겨울철에 동결하는 년 2회 순환호이고, 산지의 산정부에 위치하고 있기 때문에 여름철 수온이 25~26°C를 나타내며, 변온층의 발달이 뚜렷하다. 그리고 호소의 냉각은 8월 중순부터 시작되고, 10월 이후에는 거의 전층에 걸친 등온층이 확대되기 시작하고, 투명도는 2~5m 내외이며, 플랑크톤의 종류도 많은 것으로 알려져 있다.

Figure 3에서 보는 바와 같이 시비레호의 수온성층은, 최대 수심이 약 10m내외로서 자연호소의 전형적인 성층구조를 이룬만한 수심을 갖지 못하고 있다. 다시 말해서 일정 온도를 나타내는 심수층(深水層: hypolimnion)의 존재가 불명확하여, 표수층과 변온층만으로 이루어졌다고 볼 수 있다. 이들의 경계면은 수심 5~6m로 간주된다. 그리고 2000년에 실시된 수온의 연직분포 조사에서도 표수층

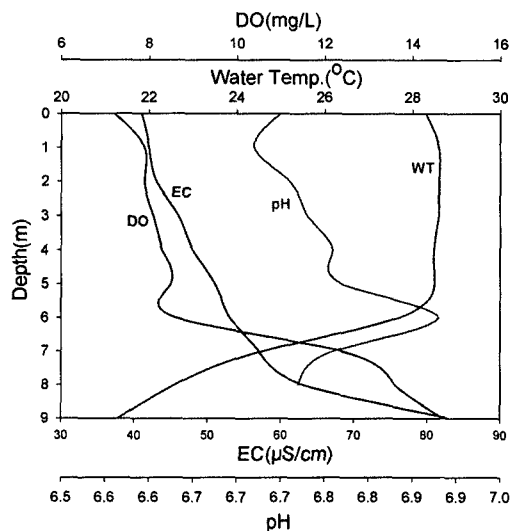


Figure 3. Vertical distribution of WT(water temp.), DO, pH and EC at center point(st.4) in Shibire Lake (9:00, am. Aug. 03, 2001)

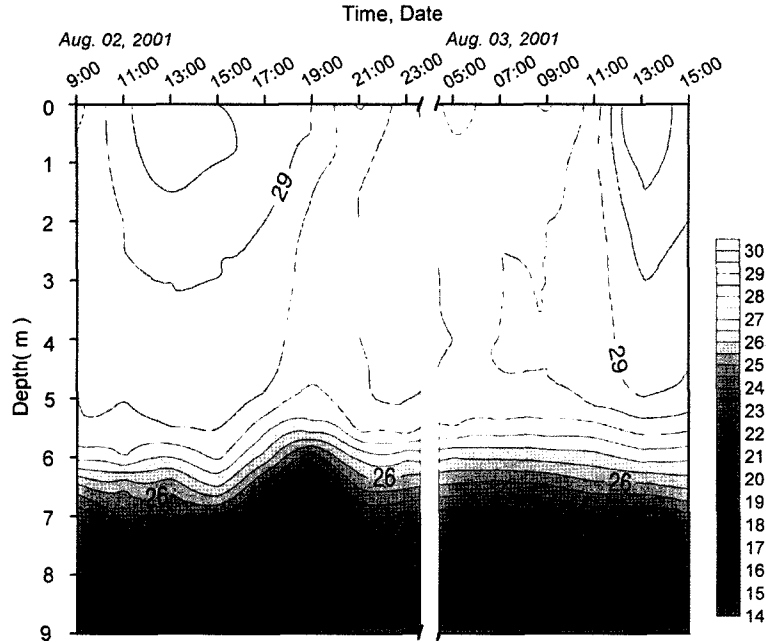


Figure 4. Daily temperature profiles and isopleths in 2-3 Aug. 2001.

과 변온층간의 성층은 뚜렷하게 발달해 있음을 확인할 수 있었다.

한편 태양복사량에 따른 표수층과 변온층의 일일 온도분포는 Figure 4와 같다. 표면온도는 13시에 29.8~30.8°C에 최고온도를 보이나, 15시를 전후로 서서히 냉각되어 21시와 5시에 각각 최저온도 즉 변온층간의 경계면 온도와 등온을 이룬다. 여기서 1.5m 이내의 표층부의 급격한 냉각은 2001년 8월 21~05시 사이에 상하층의 수온역전으로 인한 대류현상이 있었음을 의미하고, 그 범위는 수심 5~6m 부근까지 미치고 있다. 또한 일출 이후 09시를 전후로 표층부의 소규모 수온역전현상이 관측되었으며, 이러한 현상은 표층부의 부분적인 수평이류를 반영한 것으로 판단된다.

전기전도도(EC)는 수체(水體)의 전기통과 능력을 나타내는 것으로 전기를 통과시킬 수 있는 이온들의 총 농도를 의미한다. 따라서 수심별 전기전도도의 차가 현저하게 나타난다면, 수질상태가 서로 다른 것으로 추정할 수 있다(김종민 외, 2002). Figure 3에 나타난 전기전도도와 용존산소(DO)의 연직분포를 보자면, 먼저 수심 0~6.5m에서는 41~53 $\mu$ S/cm의 완만한 증가를 보이나, 7m 이후부

터는 56~76 $\mu$ S/cm로서 급격하게 증가하는 경향을 나타낸다. 상대적으로 호저부근에서 높게 나타나는 전기전도도는 퇴적물의 용출에 기인한 것으로 간주되지만(河野, 1993), 현 시점에서 퇴적물에 관한 상세조사가 이루어지지 않아서 논의를 피하고자 한다.

용존산소의 분포 역시 아래로 내려 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 0~6m사이의 용존산소농도는 6.1~6.7mg/L로서 82.0~82.5%의 포화도를 나타내지만, 6m이후의 용존산소농도는 9.9~12.8mg/L, 즉 100%를 상회하는 123.6~148.1%의 과포화상태를 보인다. 그리고 변온층에서 나타난 과포화층은 표수층에 걸친 미세한 성층구조의 형성으로 보아, 일(日) 중에 형성된 대류의 쇠퇴에 기인한 것으로 판단된다.

## 2) 수면온도의 수평분포

담수호에서 수온의 수평적 차이는 주로 겨울철 전후로 나타나는 현상으로서, 얇은 연안부는 깊은 호심(湖心)부보다 빨리 냉각되거나 가열된다. 그와 같은 수온의 수평적 경도차가 환류를 일으키는 주요 요인이 된다(吉村, 1976). 그리고 이러한 현상은

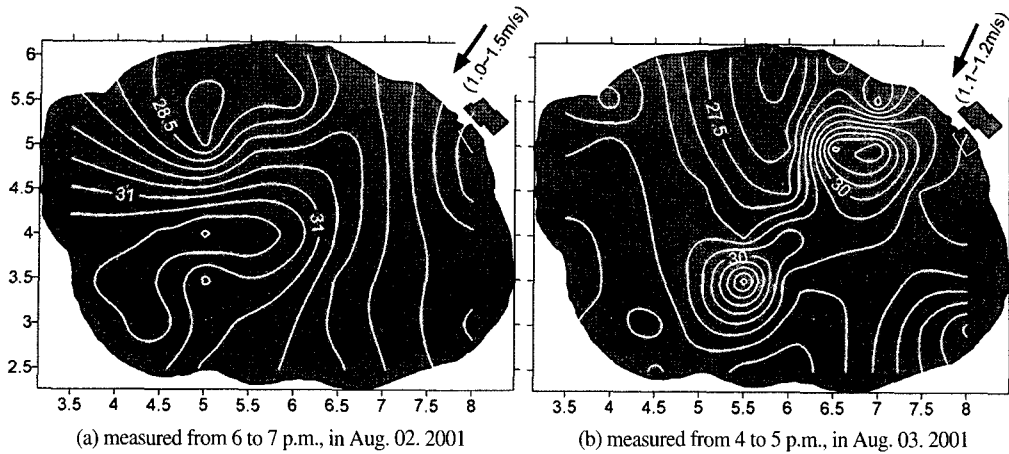


Figure 5. The surface temperature of water by infrared thermometer. The average wind speed at (a) and (b) was recorded up to 1.0~1.5 and 1.1~1.2meters respectively.

태양고도와 주변의 지형적인 요인, 풍향과 풍속, 일교차 등과 같은 기후적인 요인에 의해 그 규모가 결정될 것으로 사료된다.

Figure 5는 방사온도계로 측정된 표면수온의 수평적 분포를 나타낸 것이다. 먼저 (a)는 2001년 8월 2일 16~17시 사이, 즉 일 중에 표층부의 냉각이 시작되는 시점에 측정된 것으로서 고온부가 호심을 중심으로 남서 호안쪽으로 확대되어 있다. 특히, 최고온부는 호심에서 남서 호안쪽으로 이동하는 듯한 양상을 보이고 있는 반면에 저온부는 북북동에서 북쪽에 걸친 호안과 동쪽 호안에 위치해 있으며, 남서 고온부와 북북동-북쪽 저온부간의 온도경도는 크게 나타나고, 동쪽 저온부와 간의 온도경도는 작게 나타난다. 이때 평균풍속은 1.0~1.5m/s이고, 풍향은 북북동이 우세하였다. 그리고 (b)는 일 중에 성층이 비교적 강하게 나타나는 시기 즉, 14~15시 사이에 측정된 수면의 온도분포이다. 이때 평균풍속 역시 (a)와 비슷한 1.1~1.2m/s를 기록하였으며, 풍향 역시 북동풍이 우세하였다. 수온분포는 (a)보다 다소 복잡한 양상을 나타내고 있다. 전체적으로 볼 때, 28°C 이상의 고온부는 북서-남쪽 그리고 남동-남서를 잇는 "L"자형으로 분포하고 있으며, 다른 호안에 비해 서쪽 호안이 고온을 나타내었다. 최고온부는 호심을 기점으로 북동과 남서 호안에서 나타나고, 저온부는 북쪽과 남동쪽 호안에 자리한다.

이상과 같은 결과를 놓고 볼 때, 호소를 둘러싸고 있는 산능의 영향으로 고온부는 대개 남서쪽에 위치하고, 저온부는 북서쪽에서 위치한 것으로 보인다. 그러나 고온부의 분포 방향이 풍향과 일치한다는 점에서 풍향과 무관하지 않으며, 순간풍속이 강한 (a)에서 그러한 경향은 더욱 뚜렷하게 나타난다.

### 3) 호류의 이동

호류판을 이용한 호류조사는 2000년 7월 31일과 8월 1일 그리고 2001년 8월 1일과 2일에 걸쳐 총 4회 실시하였으며, 호류판의 투입지점은 표수층의 중앙부에 해당하는 2m와 변온층과의 경계부분에 해당하는 5m에 설정하였다. 수심 2m 지점의 호류판의 투입은 호수면 전체를 대표할 수 있도록 호수의 장축방향으로 4개, 단축방향으로 2개를 배열했다. 그리고 수심 5m 호류판은 호분(湖盆)의 지형과 수심을 고려하여 호심부근에 4개를 투입했다. 관측시간은 오전 9시부터 오후 17까지였으나, 그 이전에 호안 기수역에 표류한 호류판은 인접부근에 재 투입하여 이동경로를 추적하였다. 매회 호류의 이동경향은 거의 동일하였으므로, 2001년 8월 2일 9시부터 17시까지의 호류판 이동경로에 관하여 설명하고자 한다(Figure 6).

이날 최대 평균풍속은 1.6m/sec이었으며, 오전에는 남서풍이 탁월하고, 오후부터는 북동풍이 탁월하였다. 최대풍속시에는 수면에 작은 파랑이 일어

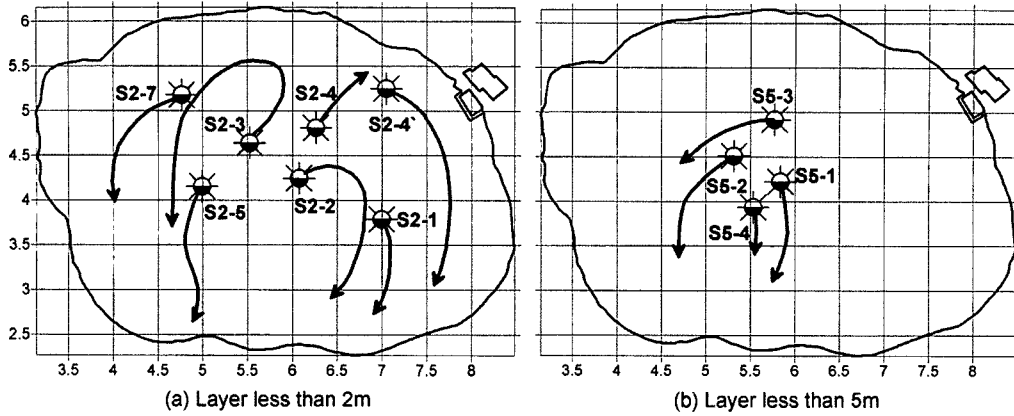


Figure 6. Lake current was investigated by current drag.

났다. 먼저 수심 2m지점에 투입된 호류관의 이동은, 호심을 중심으로 서쪽과 동쪽으로 나뉘어, 각각 시계방향과 반시계 방향으로 환류한 후, 남쪽 또는 남서쪽 호안에 표류하였다. 그러나 S2-3과 S2-4의 호류관의 경우에는, 吉村(1976)에서도 언급된 바와 같이 호소의 중앙부 표층은 바람의 영향을 가장 쉽게 받기 때문에 북동방향으로 직선 이동한 후, 호안부근에는 다시 각각 반시계방향과 시계방향(S2-4')으로 호안을 따라 환류한 것으로 보인다. 즉 표층부의 수괴는 호심을 중심으로 반시계방향으로 환류하는 수괴와 시계방향으로 환류하는 수괴로 구분할 수 있다. 이는, 수면의 부분적 가열에 의해 형성된 밀도차가 지균류(地均流)를 형성한 것으로 생각된다. 이들 수괴의 이동속도는 반드시 호류관의 이동이 연속적인 흐름을 나타내지 않기 때문에 유속을 정량적으로 검토하기에는 다소 무리가 있다. 한편 수심 5m 호류관은 2m 호류관에 비해 유속이 느리고, 위치에 관계없이 북동에서 남서 혹은 남쪽방향으로 이동하는 경향이 뚜렷하다.

이상과 같은 결과로 볼 때, 호류관의 이동방향은 풍향과 풍속의 영향으로 호류관의 이동속도의 지체가 인정되지만, 전체적인 호류의 흐름 방향에는 큰 영향을 미치지 못하고 있다고 볼 수 있다.

#### 4) 고찰

일반적으로 대규모 호수에서 10°C 이상의 기온 변화가 있을 경우, 1°C 정도의 변화가 일어나고, 수온의 일변화는 크지 않지만, 시비레호처럼 열적유

량이 작은 소규모 호소의 경우 바람이 없는 날이면, 5°C 가까이 수온변화가 일어난다고 알려져 있다(吉村, 1976). 더욱이 시비레호는 주변산지와 수면간의 비고(比高)는 200m 이상이고, 태양고도가 낮은 아침과 저녁 무렵에 부분적인 가열과 냉각의 차이가 크게 발생하며, 이 때문에 수온분포의 차이가 발생한다고 볼 수 있다.

이러한 현상은 호소연안부에 설치된 자동수온계(No.1~4)의 관측결과를 보면 더욱 뚜렷한 결과를 볼 수 있다(Figure 7). 호수를 둘러싸고 있는 산능의 고저가 수면의 열저유량을 결정하는 요인으로 작용함으로써, 일출 이후에는 수온이 No.2 > No.1 > No.3 > No.4의 순으로 나타나고, No.2는 상대적으로 쉽게 냉각되지 않아 온도변화의 폭이 적은 반면에 그 외에는 온도의 변화 폭이 크게 나타나는 것이 특징이다. 일출 이후에는 각 지점의 수온은 급격하게 상승하고, 각 지점의 모든 온도는 오후 14:00~15:00 사이에 최고치를 보이며, 이때 온도 변화폭이 크게 일어나는 것 또한 흥미로운 현상이라 할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 본고에서는 표면수온의 변화형태를 냉각기와 순환기로 구분하였다. 즉, 오후 20시 이후부터 서서히 냉각되어 지점간의 온도역전 현상이 거의 일어나지 않고, 수평이류보다 표면냉각에 따른 연직대류현상이 일어날 것으로 생각되므로 이를 표수층의 냉각기(冷却期: cooling-off periods)라 정의 하였다. 연직대류의 규모는 수온이 가장 많이 냉각되는 북서 호안(No.3)에서 가장 크고, 북동부 호안(No.2)에서 적을 것으

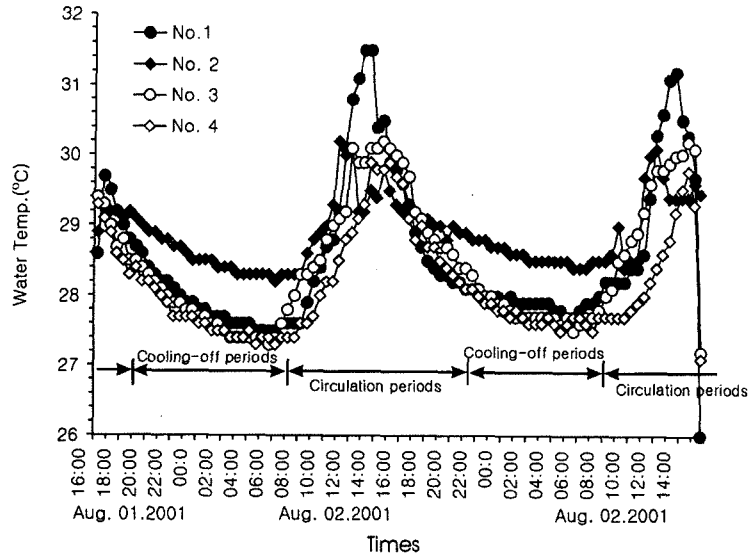


Figure 7. Result of the observation of surface water temperature.

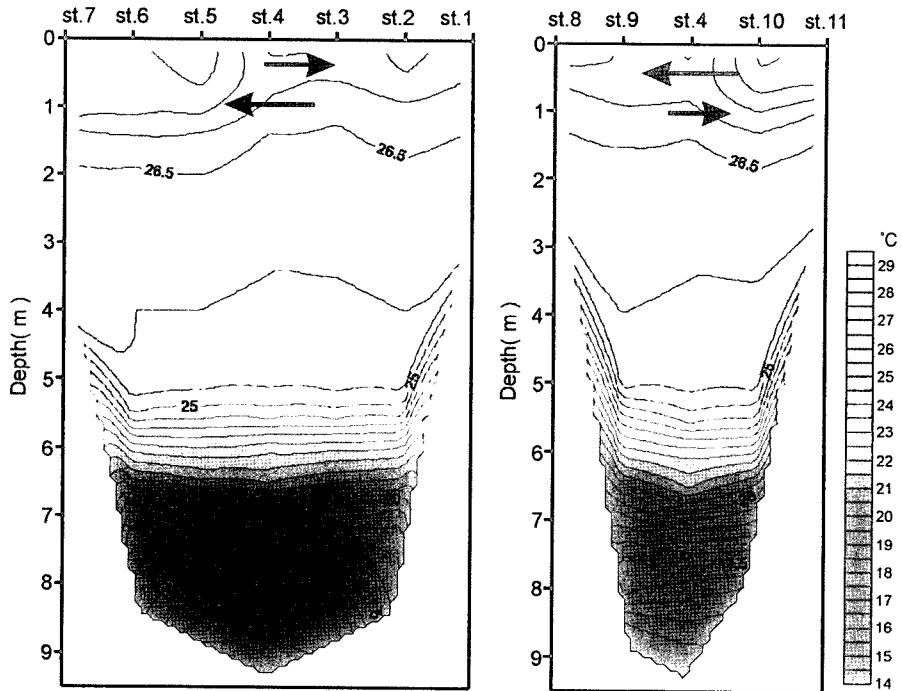
로 사료된다. 그러나 이들 관측지점의 수심은 모두 1.5m이내의 얇은 곳이므로, 호심과 동일한 규모의 뚜렷한 연직대류가 일어난다고 보기에는 다소 무리가 있을 것이다. 한편, 일몰이후 지점간의 수온 역전이 관측되고, 수온 고온기에 급변하는 수온 변화는 다른 수괴의 유입에 의한 온도변화를 의미하는 것으로 이를 표수층의 순환기(循環期; circulation periods)로 정의 하였다.

이상과 같이 Figure 6과 Figure 7에 제시된 호류판의 이동경로를 종합하여 볼 때, 냉각기에는 연직대류가 발달하고, 순환기에는 온도경도에 따른 수평이류가 발달한다고 가정할 수 있으며, 호소내 관측지점(st.1~11)과 호안 기수부의 관측지점(No.1~4)간의 수심차이를 감안할 때, 호소를 중·횡단면에 대한 연직수온분포는 온도경도에 따른 밀도류의 형성을 충분히 설명한다고 단언할 수 있다(Figure 8). 즉, 2000년 8월 2일과 3일에 대한 오후 13시의 호소의 중·횡단면에 대한 연직 수온분포는 호심을 중심으로 서쪽 방향이 동쪽 방향보다 가벼운 수괴가 분포하고 있으며, 북쪽 방향이 남쪽 방향에 비해 가벼운 수괴가 분포하고 있다. 그리고 일출시에는 남서쪽의 표면수온이 다른 곳보다 약 1.2~1.4°C 높게 나타나고, 일몰시에는 북동부의 표면수온이 0.2~0.94°C 낮게 나타난다. 이러한 부분적인 표층부의 수온차이가 수괴이동을 일으키는

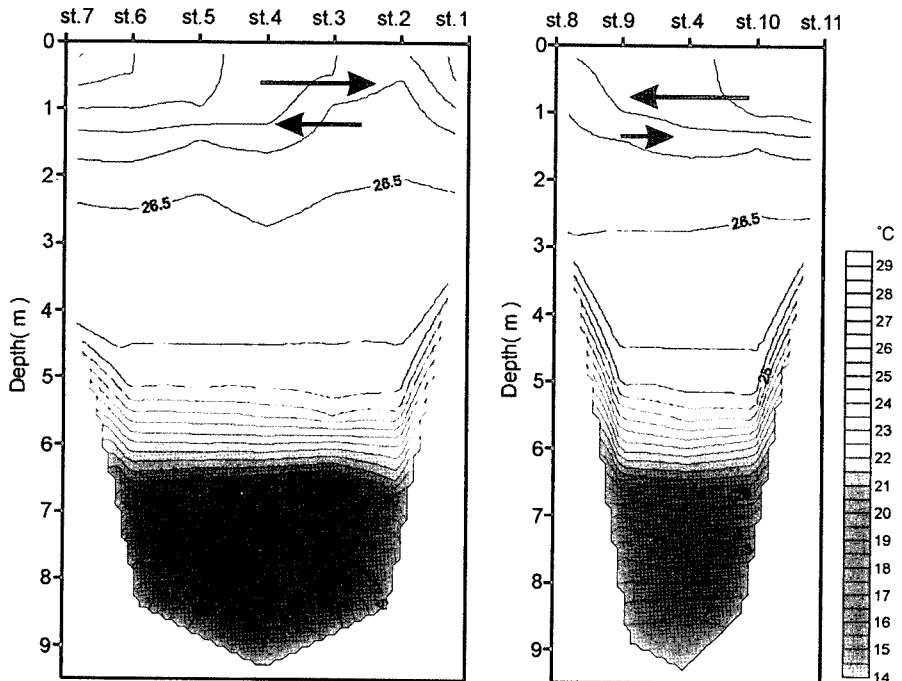
일차적인 요인으로 간주된다.

미세한 수괴의 이동을 관측하기 위해 호안에 수심 1.5m 깊이에 초음파유속계(USCM) 설치하였으며(Figure 2 참조), 같은 장소에 수심 0.5m와 1.5m 깊이에 각각 자기수온계를 설치하였다. 24시간 자기 수온관측지점에서도 야간에는  $T_{0.5}$ (표면수온)와  $T_{1.5}$ (수심 1.5지점의 수온)가 거의 같거나  $T_{1.5} > T_{0.5}$ 의 역전관계를 이루어 상·하류 즉 연직대류의 발달이 관측되었다. 연직수직류의 유속은 평균  $1\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 이하로서 아주 미세한 것이었으나, 수심을 고려할 때, 이는 수괴의 이동에 중요한 의미를 나타낸다고 볼 수 있다. Figure 9는 수온의 가열기 즉 표수층의 순환기에 해당하는 오전 중의 초음파 유속계의 유속과 수온(0.5m, 1.5m), 풍속간의 상호관계를 나타낸 것이다. 먼저 0.5m 수온과 1.5m 수온 변화는 일출 후에  $T_{1.5} > T_{0.5}$ 이었던 것이, 오전 9시 이후에  $T_{0.5} > T_{1.5}$ 로 안정상태를 취하지만, 오전 11시 20분부터 12시 사이에 일시적으로  $T_{1.5} > T_{0.5}$ 의 불안정한 상태로 변화하였다. 이와 더불어 초음파 유속계에 기록된 유속 역시 오전 11:20 이후 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이때 호류의 흐름은 225° 방향을 나타냈으며, 풍속은 0.0~0.3m/s를 기록하였다. 이러한 사실을 비추어 볼 때, 취송류에 의한 수괴이동보다는 수온이 다른 수괴가 이동하고 있음을 의미하는 것이다.





(a) at 13:00(JST), Aug. 01, 2000



(b) at 13:00(JST), Aug. 02, 2000

Figure 8. The sectional diagram of water temperature.

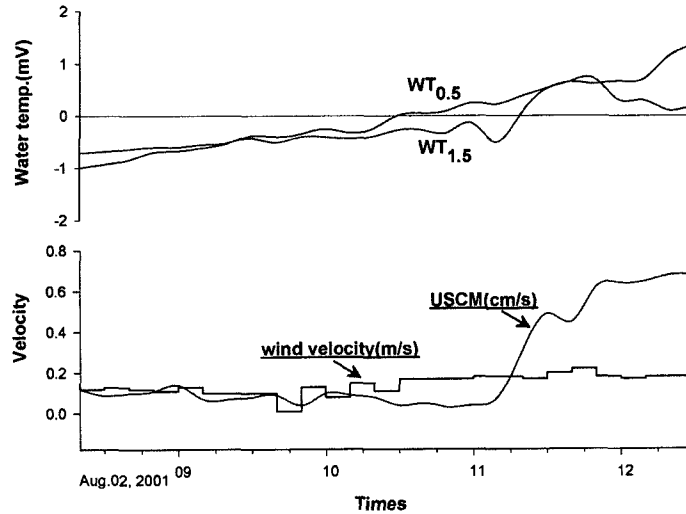


Figure 9. Variation of vertical water velocity(USCM: Ultra-Sonic Current Meter), wind velocity and water temperature at 0.5m and 1.5m depth.

이상과 같은 결과를 정리하자면, 성층기에 발생하는 표수층의 호류는 태양고도와 일사량의 차이에 따라 부분적인 수온차가 발생하고, 이에 기인한 열적교환이 주요 에너지원으로 판명되었으며, 2차적으로 탁월풍에 의한 취송류가 작용하는 것으로 간주된다. 한편, 수면이 냉각된 심야에는 수평적 환류보다는 연직대류가 발달하는 것으로 간주된다. 그리고 가열된 낮에는 부분적인 온도경도차에 의해 호심을 중심으로 시계반대방향과 시계방향으로 각각 환류하는 수괴가 존재하고, 탁월풍은 수괴의 이동방향과 이동속도에 다소 영향을 미치지만, 전체적인 흐름방향에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

에 기인한 부분 순환류 즉 밀도류라 사료된다. 그리고 조사기간 중에는 호류에 영향을 크게 미칠만한 풍속이 형성되지 못했으며, 취송류의 발달이 뚜렷한 시기에는 호류의 방향이 일정하지 않기 때문에 비정상류(比定常流)를 형성한다고 말할 수 있다. 앞으로 저열량(貯熱量) 변화와 온도경도에 의한 확산계수 등에 대한 연구가 이어진다면, 표수층과 변온층에 형성되는 이류에 관한 일반화가 가능하며, 그 결과는 호소물질순환모형과 수질모형 개발에도 활용될 수 있으리라 생각한다.

## 註

### 5. 맺는말

본 연구에서는 성층기에 있어서 표수층의 호류 형성에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 그 성인을 밝히기 위해 호소 수온의 일변화와 호류와 관계, 그리고 기상·기후 요소를 살펴보았다. 그 결과 호류를 형성하는 주요 요인과 호류의 특성을 규명할 수 있었다. 그러나 현시점에서는 호분(湖盆)의 지형적인 요인이 표수층 호류에 미치는 영향을 언급할 만한 자료를 수집하지 못한 관계로, 성층기 표수층의 호류에 가장 중요한 인자로서는 열적차이

- 1) 미사카층(御坂層)은 야마나시현(山梨縣) 특히 조후분지(甲府盆地) 남측사면의 미사카(御坂)산지와 조후분지(甲府盆地) 서측사면 그리고 탄자와(丹澤)산지 등에서 볼 수 있는 신생대 제3기 중신세(약2500~1200만년전)층으로 해저화산에 의하여 형성된 응회각력암(凝灰角礫岩)층이다.

## 사시

현지조사를 진행하는데 있어서 日本 立正大學 地球環境科學部の 3학년 아라이 세미나(新井ゼミ

나) 학생들과 대학원생인 元木군과 森田군 그리고 일본 유학중인 서지연(전남대 지리학과 98학번), 原美登理 박사의 도움을 받았습니다.

### 文 獻

김윤희 · 김법철 · 최광순 · 서동일, 2001, "2차원 수리 수질모델(CE-QUAL-W2)을 이용한 소양호 수온 성층현상과 홍수기 밀도류 이동 현상의 모델링," 상하수학회지, 15, 96-105.

김종민 · 박준태 · 노혜란 · 한명수, 2002, "소양호와 팔당호 수질의 수직 및 계절적 변화," 한국육수학회지, 35, 10-20.

박종관 역, 1997, 물환경 조사법, 청문각, 서울(新井正, 1995, 水環境調査の基礎, 古今書院, 東京), 139-142.

서동일, 1998, "대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구," 대한환경공학회지, 20, 1219-1234.

新井正, 1964, "湖沼の熱的凡性質と湖沼スケールとの關係," 地理學評論, 37, 131-137.

新井正, 1972, "凡地球的近にみた湖沼水溫の特性," 地理學評論, 45, 601-615

新井正, 1984, "琵琶湖, 失橋人工島附近の湖流について," 立正大學文學部論叢, 78, 1-10.

新井正 · 岡田浩美 · 植田芳明, 1985, "中禪寺湖の水質障害と湖流," 地域研究, 26(2), 39-45.

新井正, 2000, "湖沼表面混合層における垂直流の測定," 地球環境研究, 2, 5-16.

吉村信吉, 1928, "日本の湖水の夏期深層水溫," 海と空, 8, 33-44.

吉村信吉, 1933, "日本の湖水の夏期深層水溫(第2報)," 海と空, 13, 287-310.

吉村信吉, 1937, "日本の湖水の夏期深層水溫(第4報)," 海と空, 17, 451-473.

吉村信吉, 1976, 湖沼學 -增補版-, 生産技術センター, 東京, 125.

河野忠, 1993, "赤城大沼 · 小沼の湖沼環境," 地域研

究, 33, 21-30.

Boyce, F.M., 1974, Some aspects of Great Lakes physics of importance to biological and chemical processes, *J. Fish. Res. Board Canada*, 31, 689-730

Dake, J.M.K. and Harleman, D.R.F., 1969, Thermal stratification in lakes: analytical and laboratory studies, *Wat. Resour. Res.*, 5, 484-495.

Henderson, S.B., 1976, Role of eddy diffusivity in thermocline formulation, *J. Environ. Eng. Div., ASCE*, 102, 517-531.

Horiuchi, S. and Ame, Y., 1961, A study on water temperature and movement in Lake Kizaki, *Memoires on Water Temperature Research*, 1, 21-31.

Kim, Kyung Sub, 1995, An eddy diffusion model for thermal stratification in lakes, *J. KSWO*, 11, 183-191.

Imberger, J. and Patterson, J.C., 1990, Physical limnology, *Adv. Appl. Mech.*, 27, 303-475.

Kiser, Li.C. and Rumber, R.R., 1975, Physical model study of circulation pattern in Lake Ontario, *Limnology and Oceanography*, 20, 323-337.

Mortimer, C.H., 1974, Lake hydrodynamics, *Mitt. Int. Ver. Limnol.*, 20, 124-197.

Lam, D.C.L. and Schertzer, W.M., 1987, Lake Erie thermocline model results: comparison with 1967-1982 data and relations to anoxia occurrences, *J. Great Lakes Res.*, 13, 757-769.

Powell, T.A. and Jassby, A., 1974, The estimation of vertical eddy diffusivities below the thermocline in lakes, *Water. Resour. Res.*, 10, 191-198.

Weirich, F.H., 1986, A study of the nature and incidence of density currents in a shallow glacial lake, *Annals of the Association of American Geographers*, 76, 396-413.

최초투고일 03. 04. 21  
 최종접수일 03. 06. 04