

## 연안해역 오염퇴적물개선을 위한 준설편단지수 (Dredging Index, DI) 개발

이찬원<sup>1,†</sup> · 권영택<sup>1</sup> · 윤지훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>경남대학교 토목환경공학부

<sup>2</sup>경남대학교 대학원 환경공학과

### Development of Dredging Index for the Rational Remediation of Polluted Coastal Sediments

Chan-Won Lee<sup>1,†</sup>, Young-Tack Kwon<sup>1</sup> and Ji-Hoon Yun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Kyungnam University,  
449 Wolyoungdong, Masan 631-701, Korea

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, The Graduate School of Kyungnam University,  
449 Wolyoungdong Masan, 631-701, Korea

#### 요 약

연안 퇴적물의 오염도 개선을 위해 수행되는 준설의 시행 여부 판단을 위해서는 합리적인 준설편단지수(Dredging Index: DI) 설정이 필수적이다. 외국에서 사용되는 DI는 국가별 경제수준, 자연환경 특성, 해역의 이용 목적 등이 상이한 까닭에, 국내 환경에 직접 활용하는 것은 비합리적이다. 본 연구에서는 그 동안 축적된 국내 자료를 활용하여 DI를 개발하였고, 이를 오염 우심해역인 마산만의 준설 전·후 환경에 적용하였다. 적용 결과, 개발된 DI는 준설에 따른 퇴적물 환경변화를 잘 지시하는 것으로 판단되며, 준설에 필요한 사회·경제적 여건이 고려된 합리적 DI 값이 도출된다면 특정해역의 준설 범위와 깊이를 결정하는 도구로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** – There is a need to have a dredging index for decision of contaminated sediments dredging. Some differences from nation to nation were found in sediment quality guideline being applied by several nations because of economic level, environmental nature, and multiple uses. Therefore, it is not reasonable to adapt one guideline to be applied to sediments dredging. In this study, we developed dredging index by combining four numerical sets of sediment quality judgement into a quadrodiagram for prudential decisions. This newly developed dredging index was applied to the data obtained from Masan Bay before and after the dredging process. The quadrodiagrams of DI give us a nice graphical comparison and numerical values to explain the relative dredging effect under the circumstances of continuous input loadings. When the guideline value of DI is determined for the judgement of dredging considering social and economic impacts on local community, the DI value will be a scientific and reasonable tool in deciding dredging area and dredging depth.

**Keywords:** Sediment(퇴적물), Quadrodiagram, Dredging Index(준설편단지)

#### 1. 서 론

연안해역은 인간의 활동이 가장 활발한 오염우심 해양환경 중 하나이다. 특히 오염물이 지속적으로 유입되는 연안해역은 외부의 오염원 및 부하량에 따라 변화가 심하며 폐쇄성이 강한 해역에서

는 오염물질이 계속 축적되어 그 악영향이 순환적으로 되풀이된다. 이는 반폐쇄성 해역의 생태계를 회복 불가능한 상태로 변화시키고, 지속가능한 국가 발전의 걸림돌로 작용할 가능성도 배제할 수 없다. 오염도가 높은 연안퇴적물은 연안해역 수질의 악화는 물론 저서생태계 파괴의 직접적인 원인을 제공하고 있다.

수질환경 개선과 다양한 생물들이 서식하는 연안 생태계를 정상적으로 복원하기 위하여 오염퇴적물 준설이 실효적 방법으로 사

<sup>†</sup>Corresponding author: water@kyungnam.ac.kr

용된다(권과 이[1998]). 반폐쇄성 해역에 침적된 오염물질의 제거를 위한 여러 가지 복원·정화 방법이 있으나, 준설은 가장 현실적 방법 중 하나이다. 그러나 준설실시 여부의 판단은 어떠한 오염물질이 어느 정도 오염되었으며 생태계에 어떠한 영향을 미치고 있는지 등을 파악하여 신중히 결정되어야 한다. 무분별한 준설은 경제적인 낭비를 초래하거나 오히려 연안환경을 파괴하는 부작용을 낳을 수 있다. 따라서 준설이 불가피한 선택의 하나로 고려되는 경우 준설 시행을 판단할 지수를 개발하는 것은 적절한 환경관리를 위한 출발점이다.

해저퇴적물의 오염도 개선을 위하여 마산만에서 국내 최초로 2,111 m<sup>3</sup>의 오염 퇴적물을 1989년부터 1994년까지 준설하였고, 준설에 따른 모니터링 데이터 및 준설이후 데이터가 조사·분석되었으며, 준설해역의 퇴적물 오염도 변화가 파악되었다(마산시[1988]).

본 연구에서는 오염물질의 양 및 질, 생물독성도 영향을 종합적으로 고려한 Dredging Index(DI)를 개발하고, 개발된 DI를 마산만 현장에 적용하여 준설 시행에 따른 DI값 변화의 특성을 분석하였다.

## 2. 준설 판단 지수 개발

준설 등 환경개선 사업을 시행하여야 할 정도로 오염된 퇴적지역을 가려내기 위한 근거나 기준을 마련하기 위하여 1)퇴적물의 화학조성(Sediment Chemistry)과 2)퇴적물이 생물에 미치는 영향(Sediment Bioassay)을 함께 조사 분석한다. 먼저 퇴적물의 화학조성에 관한 연구는 오염원을 고려하여 관심의 대상이 되는 성분들을 결정하고, 퇴적물의 성분함량을 분석한다.

이때 고려되어야 하는 주요 인자로 그 지역의 천연부존량, 퇴적물의 입자크기, 유기물 함량 등이 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위한 객관적 연구 방법으로 퇴적물과 수층간의 분배계수, Pair Comparison Method, 보정계수 이용 등이 있다. Sediment Bioassay에는 현장의 생물농축측정, 생화학적 대사변화측정, 저서생물 구성 및 변화 파악, 어류의 대사측정과 실험실에서 표준화된 방법에 의한 각종 독성도 실험 및 데이터를 이용할 수 있다.

미국, 캐나다, 네덜란드는 여러 종류의 오염물질에 대하여 오염정도의 구분을 위한 기준을 마련하였다. 오염된 퇴적물에 흔히 측

정되는 5가지 종류의 중금속인 경우에도 각각 다른 오염정도의 기준과 수치가 정해져 있다(Table 1).

Adverse Biological Effect(ABE)는 신뢰성 있는 약 350여 편의 논문(오염퇴적물이 생체에 미치는 영향에 관련된 논문)을 정리·제시한 저질 기준이다(Long 등[1995]).

본 연구에서는 퇴적물의 화학조성과 퇴적물이 생물에 미치는 영향이 포함되고, 또한 판단의 착오와 오차를 줄이기 위하여 대체로 합당하다고 판단되는 USEPA SQC와 캐나다의 PSQG, Sediment Bioassay의 데이터로 정리된 ABE 및 그 지역의 천연부존량이 고려된 Degree of Contamination으로 Quadrodigram을 작성하였다(Hakanson[1980], Premazzi 등[1984]). 각 면에 주요오염대상 물질에 관한 각각의 Criteria line을 설정한 후, 오염물질의 종류에 따라 농도가 각각 다른 점을 감안하여 Criteria농도를 Unit로 하여 그 농도비율을 막대그래프로 작성한다. 이때 Criteria 농도를 초과하는 오염물질은 그 비율에 따라 Criteria 농도를 연결한 Box에 들어오게 된다. 장차 정화사업 또는 주요관리대상이 되는 지점의 오염퇴적물 Quadrodigram은 비오염지역의 퇴적물과 달리 상대적으로 많은 면적의 막대그래프가 기준 Box내에 들어온다. 준설편단지수(DI)는 Quadrodigram을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$DI = \frac{\text{기준 Box내 막대그래프면적의 합}}{\text{Box내의 총 유효면적}}$$

DI: Dredging Index

Table 1에 나타난 ABE의 ERL기준수치와 USEPA SQC의 Heavily Polluted 기준 수치 그리고 캐나다의 PSQG의 Lowest Effect Level을 기준 Box Line으로 정하였다. 마지막 한 면은 C<sub>v</sub>의 Very High Contamination Factor로 구성하였다.

## 3. 준설편단지수 적용

마산만 준설해역 및 퇴적물 채취지점을 Fig. 1에 나타내었다. 마산만 준설해역을 대상으로 주요 대표 6개지점의 준설전후 평균 데이터로 Quadrodigram을 작성하였다(Fig. 2 & Fig. 3). 마산

Table 1. Comparisons of numerical sediment quality criteria

(µg/g)

Criteria	SQC <sup>1</sup> (USEPA)		ABE <sup>2</sup>		PSQG <sup>3</sup> (Canada)		Dutch Standards <sup>4</sup>		
	Moderately polluted	Heavily polluted	ERL	ERM	Lowest effect level	Severe effect level	Threshold value	Test value	Action value
Lead	40~60	>60	46.7	218	31	250	530	530	530
Cadmium	-	>6	1.2	9.6	0.6	10	2	2	12
Copper	25~50	>50	34	270	16	110	35	35	190
Chromium	25~75	>75	81	370	26	110	380	380	380
Zinc	90~200	>200	150	410	120	820	480	720	720

<sup>1</sup>Sediment quality criteria by the U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Army Corp of Engineers (Giesy and Hoke[1990]).

<sup>2</sup>Adverse biological effect (Long *et al.*[1995]).

<sup>3</sup>Provincial Sediment Quality Guidelines (Jaagumagi and Persaud[1995]).

<sup>4</sup>Dutch Standards by IADC/CEDA[1997].

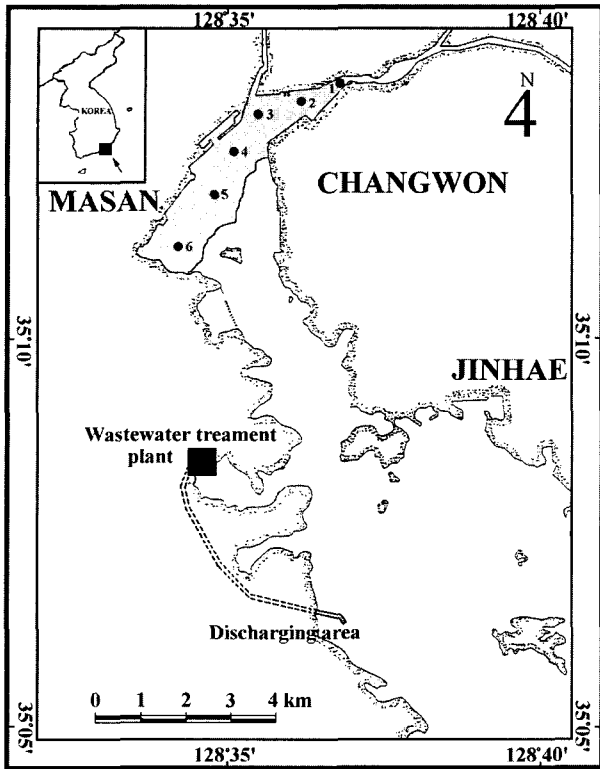


Fig. 1. A map showing sampling site in Masan Bay.

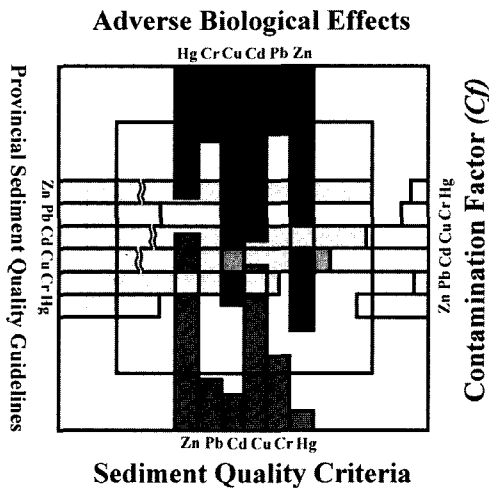


Fig. 2. Quadrodiagram of dredging index for Masan Bay (before dredging).

만의 해양준설사업은 1990년 6월에서 1994년 12월까지 시행되었으며 준설전의 시료는 1989년에 채취하였고 준설후의 시료는 1994년부터 1998년의 퇴적물 모니터링 데이터를 사용하였다.

준설전 마산만의 DI는 0.67, 준설후의 DI는 0.20이었다. 마산만 준설이 시작되었던 1990년에는 단지 중금속 및 유기물 함량과 Gravity Coring에 의하여 준설 지역과 준설 깊이를 결정하였다.

본 연구에서 개발된 DI의 비교에 의하면 준설로 인해 약 3배 이상의 환경개선 효과가 있었지만, 준설 후에도 총 유효 Box면적

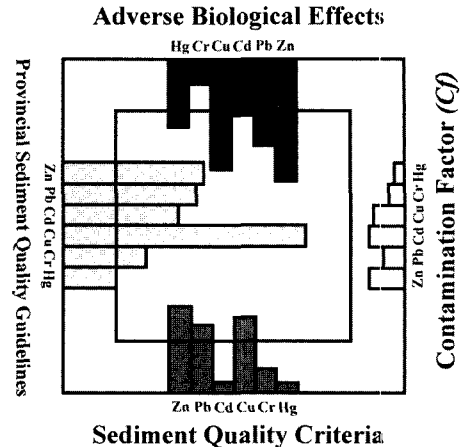


Fig. 3. Quadrodiagram of dredging Index for Masan Bay (after dredging).

의 20%에 해당하는 면적을 보여주어 준설과정 및 준설이후에도 차단되지 못한 유입오염의 영향이 있음을 설명해 주고 있다. 개발된 DI에 의하여 준설효과가 시각적으로 잘 비교되며 또한 정량화 될 수 있었다(Fig. 2, 3).

관심의 대상이 되는 특정 해역의 준설여부를 판단할 때 DI를 이용하기 위하여서는 그 객관성과 범용성이 확보되어야 한다. 이를 위하여 주요 대상오염물질이 밝혀져 있고, 많은 신뢰성 있는 데이터가 확보될 수 있는 사례를 분석할 필요가 있다.

1998년 2월에 깊이별로 채취한 6지점의 퇴적물 준설판단 지수를 구하였다. 1지점의 준설판단지수는 0.02~0.03으로 적용되었던 SQC, ABE, PSQG, Dutch Standards 4가지의 기준으로 구성된 지수에 의하면 비오염퇴적물로 판단되었다.

1993년 11월 이후 하수처리장에서 창원, 마산의 하폐수가 차집·처리하여 옥계해역에 방류하고 있다(Fig. 1). 다시 말하면 1993년 11월 이후부터 봉암천(1지점)을 통하여 유입되었던 창원지역의 하폐수가 감소하였다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 2지점을 제외한 3, 4, 5, 6지점은 깊이별로 같은 경향을 보여주었고 0~6 cm 깊이의 퇴적물이 상대적으로 높은 준설판단지수를 보여주었다.

특히 마산시의 하폐수가 가장 많이 유입되는 산호천 하구 지점인 3번 지점은 준설판단지수가 0.60을 초과하고 있어 준설이 종료된 후 약 4년이 지난 1998년에 이미 0~6 cm의 퇴적물이 준설 이전보다 높은 준설판단지수를 나타내었다.

마산시 수협 부두 앞인 4번 지점에서 채취한 2~6 cm 깊이의 퇴적물이 준설이전의 준설판단지수인 0.67~0.68로 나타나 퇴적물 생태유해성의 변화를 알 수 있었다. 5, 6번 지점의 표층퇴적물은 대체로 0.60이하이나 점차 퇴적물이 생태계에 영향을 미칠 수 있는 오염이 진행되고 있음을 알 수 있었다.

2번 지점은 마산시의 산호천과 창원천의 봉암천 하구의 중간위치와 조류의 영향으로 깊이별로 다소 다른 경향을 보여주고 있는 것으로 판단되었다.

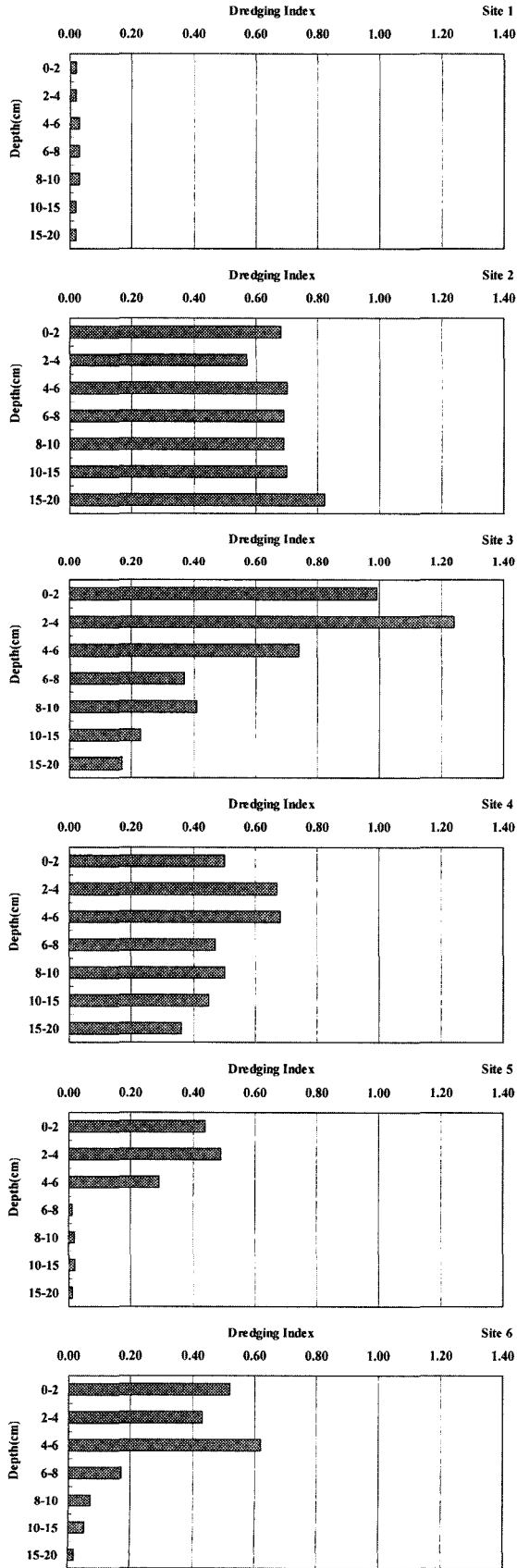


Fig. 4. Depth profile of dredging index in masan bay after dredging.

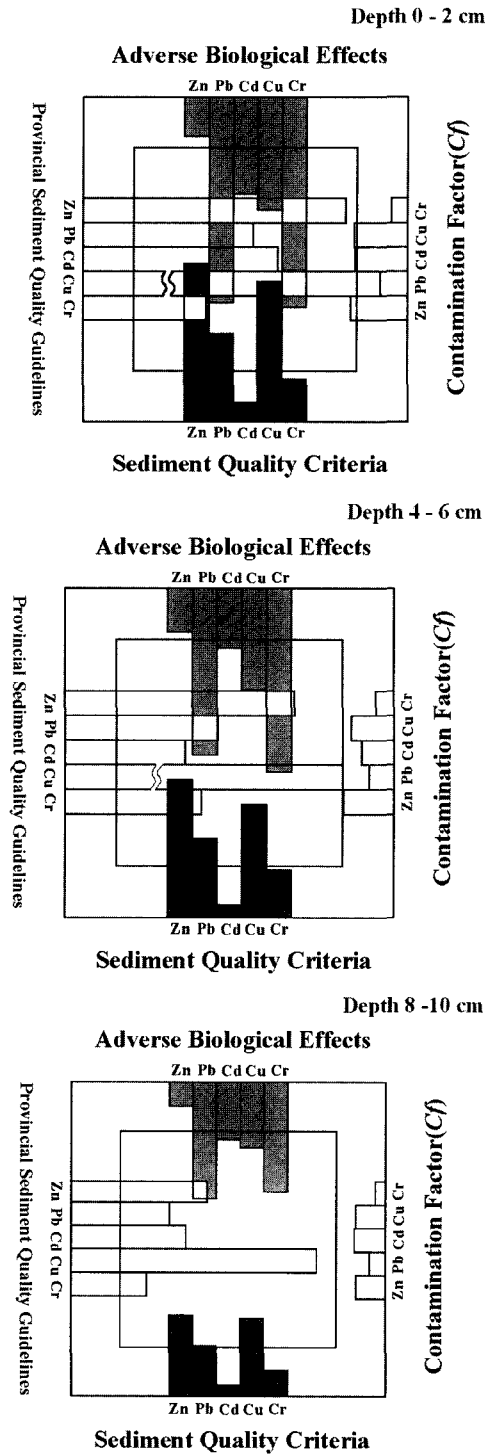


Fig. 5. Quadrodigram of dredging index by depth after dredging.

만약 준설편단지수(DI)의 준설퍼부 가이드라인으로 DI=0.40을 설정하였을 때 Fig. 4에 나타난 결과에 의하면 1지점을 제외한 모든 지점을 준설편할 필요가 있으며 준설편 깊이는 지역마다 각각 다르게 결정됨을 알 수 있다.

3번 지점의 경우를 예를 들어 준설편단지수 Quadrodigram을 Fig. 5에 제시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 깊이별 변화를

구체적으로 파악할 수 있었다.

Contamination Factor의 기준으로는 표층퇴적물에서도 준설 판단지수의 수치에 영향을 주지 않았으나 ABE, PSQG, SQC의 기준 이상에 해당하는 중금속 오염을 알 수 있었다. 특히 퇴적물의 생태독성학적 데이터를 정리하여 제시한 ABE의 기준으로 볼 때 아연을 제외한 납, 카드뮴, 구리, 크롬에 의한 오염 퇴적물의 영향이 깊이별로 유효면적을 차지하는 경향을 잘 나타내 주었다.

#### 4. 결 론

1990년 6월에 시작되었던 우리나라 최초의 해양 오염퇴적물 준설사업은 그 당시에 퇴적물 오염도 판단기준이나 가이드라인이 없었기 때문에 약 70지점의 Coring 시료의 퇴적물 색깔과 중금속 농도로 준설 대상 지역과 준설 깊이를 결정하였다.

본 연구에서는 생태독성화학 및 퇴적물 생태 위해성의 기준이나 가이드라인이 포함된 Cf, ABE, PSQG, SQC를 바탕으로 준설 판단지수(DI)와 Quadrodigram을 개발함으로써 정량화와 그래프에 의한 퇴적물 생태독성도를 파악할 수 있었다. 아울러 생태위해도와 경제적 여건을 고려하여 기준이 되는 DI를 선택할 경우 준설대상 해역 면적과 준설깊이를 결정할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문 게재 연구비 지원으로 이루어졌음.

#### 참고문헌

- [1] 권영택, 이찬원, 1998, “하수종말 처리장 처리수의 해양 방류와 퇴적물의 중금속 오염”, 한국해양환경공학회지, 1(1), 83-92.
- [2] 마산시, 1988, 마산만 정화사업 기본 및 실시 설계보고서(기본설계편), 1-36.
- [3] Giesy, J. P., and R. A. Hoke., 1990, ed Bauco, R., Giesy, J. P., and M. Muntao. Freshwater sediment quality criteria: toxicity bioassessment in sediment: Chemistry and toxicity of in-place pollutants. 391, Ann Arbor, MI: Lewis publishers.
- [4] Long, E. R., Macdonald, D. D., Smith, S. L., and F. D. Calder., 1995, “Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentration in marine and estuarine sediments”, Environmental Management, 19, 81-97.
- [5] Jaagumagi, R. and D. Persaud., 1995, Sediment assessment and remediation Ontario approach. ed Roesters, P. and Stokman, G., editors, POSW, Remediation of contaminated sediments, 21-32.
- [6] IADC/CEDA, 1997, Conventions, codes and conditions; marine disposal. Environmental Aspects of Dredging 2a, 71.
- [7] Hakanson, L., 1980, “An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach”, Water Res., 14, 975-1001.
- [8] Premazzi, G., Provini, A., Gaggino, G. F. and Parise, G., 1984, Geochemical trends in sediments from 13 Italian subalpine lakes: Sediments and Water Interaction (edited by Peter G. S.) Springer-verlag, 157-165.

2003년 12월 12일 원고접수

2004년 1월 24일 수정본 채택