

ORIGINAL ARTICLE

낙동·고령 중권역의 표층 퇴적물 입도 조성 및 유기물질 분포 특성 변화

김신·안정민·김형근·권현각·김경훈·신동석¹⁾·양득석*

국립환경과학원 낙동강물환경연구소, ¹⁾국립환경과학원 유역총량 연구과

The Distribution Characteristics of Grain Size and Organic Matters of Surface Sediments from the Nakdong-Goryeong Mid-watershed

Shin Kim, Jungmin Ahn, Hyoungeun Kim, Heongak Kwon, Gyeonghoon Kim,
Dongseok Shin¹⁾, Deukseok Yang*

Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 40438, Korea

¹⁾*National Institute of Environmental research, Hwangyoung-ro 42, Seogu, Incheon, Korea*

Abstract

To investigate the distribution characteristics of grain size and organic matter of surface sediments from the Nakdong-Goryeong Mid-watershed, surface sediments were collected and analyzed. The samples were collected from six sites at four different times between May 2013 and May 2014. They were analyzed for grain size, water content, ignition loss, chemical oxygen demand, total organic carbon and total nitrogen. The surface sediments were mainly composed of medium sand (mean 44.7%) and coarse sand (mean 32.8%) and became coarser in May 2014. Fine sediments at the site NG-2 were poorly sorted and positively skewed, and occur in a tributary environment that is relatively low-energy compared with the other sites. The water content at the studied sites (15.3 ~ 34.9%) averaged 20.25%, and ignition loss (0.4 ~ 5.8%) and total nitrogen (274 ~ 2493 mg/kg) averaged 1.33% and, 696 mg/kg, respectively. These values indicated that the sediments were not seriously contaminated when compared with the sediment pollution evaluation standard of the National Institute of Environmental Research. The chemical oxygen demand (mean 0.17%) was at the non-polluted level compared with United States Environmental Protection Agency sediment quality standards. The total organic carbon (mean 0.18%) at all sites except site NG-2 (lowest effect level) was the no effect level of the Ontario sediment quality guidelines. The COD/IL (0.02 ~ 0.20) and C/N (0.73 ~ 6.76) were less than 1 and 10, respectively. Organic matter in the study area produced naturally from aquatic organisms. Results of principal component analysis showed that fine sediments (very fine sand and silt) were significantly affected by organic matters (ignition loss, chemical oxygen demand, total organic carbon and total nitrogen). In addition, the highest organic matters content in the study area occurred at the site with the finest sediments (NG-2).

Key words : Surface sediment, Grain size, Ignition loss, Chemical oxygen demand, Total organic carbon, Total nitrogen

Received 26 December, 2017; Revised 28 February, 2018;

Accepted 12 March, 2018

*Corresponding author: Deukseok Yang, Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Goryeong 40438, Korea
Phone: +82-54-950-9720
E-mail: yds7055@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

하천에 유입되는 오염 물질은 다양한 경로를 통해 환경에 배출되게 되며 수계로 유입되는 경우 침전되어 퇴적물에 축적되게 된다. 이처럼 퇴적물에 축적된 오염 물질은 저서생물에게 영향을 주게 되며 물리·화학적 변화에 따라 수중으로 용출되어 수질의 변화를 야기하며, 수생생물에게도 해로운 영향을 미치기도 한다(Alloway et al., 1988; Dekov et al., 1997).

하천 환경을 이해하기 위해서는 단기간의 환경 변화를 반영하는 수질 분석과 장기간의 환경 변화를 추적할 수 있는 퇴적물 분석으로 나눌 수 있다. 수질은 단기간에 걸쳐 많은 변화를 보이며 시·공간에 따른 변화가 커 지속적인 환경 변화를 파악하는데 어려움이 있는 반면 퇴적물에 함유된 오염원은 시·공간 변화가 적고 함량도 높아 지속적인 환경 변화를 파악하는데 유용하게 이용할 수 있는 도구로서 활용되고 있다(Thornton, 1983; Ra et al., 2013). 이와 같이 퇴적물을 이용하여 환경 변화를 이해하기 위해서는 퇴적물 내에 포함되어 있는 미량 금속류 및 유기물질 분석을 통한 연구가 수행되어야 한다.

퇴적물 내에 분포하는 유기물질은 침식(erosion), 분해(deposition), 확산(diffusion), 생물교란(bioturbation) 및 유수 흐름 등에 의해 수질에 지속적인 영향을 미칠 수 있다(Lick, 2006). 또한 유기물질이 호수나 하천의 수저에 침강되면 유기오염퇴적물을 형성하게 되고 퇴적물 내에서 유기물의 분해과정이 일어나게 되며 유기물이 분해하는 과정에서 산소를 소모하여 혐기화 조건이 형성되어 황화수소 및 메탄 등이 발생하게 되며 퇴적물 내에서 유해물질이 침강 또는 수층으로 용출되는 과정을 일어난 수질 및 저서 생태계에 영향을 미치게 된다(Kim, 2007). 퇴적물 내 함유되어 있는 유기물질은 하천 환경에 큰 영향을 미치게 되며 퇴적물의 오염정도를 평가하는데 중요한 요소 중 하나로서 이용되고 있다.

유기물질의 함량을 측정하기 위해서는 직접 정량법에 의한 완전연소가능량(IL : Ignition Loss)이나 총 유기탄소(TOC : Total Organic Carbon) 등의 분석과 유기물을 산화 시켜 소비되는 산소량을 측정하는 화학적 산소 요구량인 COD (Chemical Oxygen Demand)

분석 등이 사용되고 있다(Kang et al., 2012). 그리고 총질소 함량인 TN (Total Nitrogen) 역시 유기물질 함량을 대변할 수 있는 분석 항목으로 이용되고 있으며 각 항목 사이에 높은 상관관계가 나타난다고 보고되고 있다(Lee et al., 2010). 이러한 연구 결과들은 퇴적물 내에 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN 함량 등의 분석 결과를 유기물질 함량을 나타내는 지표로 활용 가능한 것을 뒷받침하고 있으며 본 연구에서도 이와 같은 항목들의 분석 결과를 유기물질 함량을 나타내는 지표로 활용하였다.

본 연구는 낙동강 수계 종류에 위치하는 낙동-고령 중권역에 위치한 분류 및 지류에 해당되는 지역에서 2년 동안 총 4회에 걸쳐 표층 퇴적물을 대상으로 입도 (grain size) 분석을 실시하여 퇴적물 입자별 함량 분포와 조직변수를 구하고 유기물질 함량을 대변할 수 있는 함수율(water content), 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN의 함량을 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 연구 지역에서 나타나는 입도 및 유기물질 함량과 오염도의 변화와 각 지점의 분포 특성을 이해하고 퇴적물에 함유된 유기물질의 기원을 추정하였다. 그리고 주성분 분석을 통하여 연구 지역 퇴적물의 입도 및 유기물질 환경에 영향을 미치는 주요인을 파악하였다. 또한, 본 연구는 낙동강 수계의 일부 지역에서 수행된 연구로서 낙동강의 전반적인 퇴적환경을 대표할 수는 없지만 연구 지역에 인위적으로 건설된 보와 인접한 지점에서 분류와 이에 유입되는 지류의 표층 퇴적물을 통하여 시·공간적인 퇴적 환경 변화를 이해하는데 유용한 자료로서 활용이 가능할 것으로 생각된다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 지역

연구 지역은 낙동강 권역의 낙동-고령 중권역에 해당되는 지역으로서 북측으로는 경북 고령군 남측으로는 경남 창녕군과 합천군 사이에 위치한다. 연구 지역이 포함되는 낙동강은 면적 23,384.21 km², 분류 하천 연장 400.7 km, 유로연장 510.36 km로서 동경 127°29'19" ~ 129°18'00", 북위 34°59'41" ~ 37°12'52" 사이의 한반도 동남부에 위치하며 행정구역은 3개

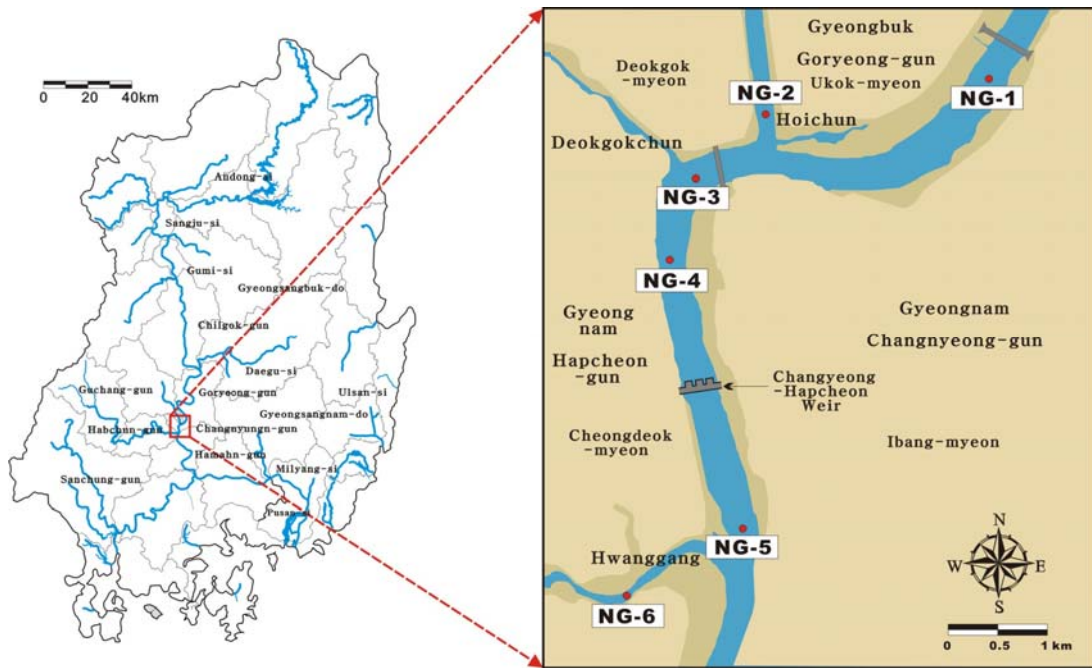


Fig. 1. Map showing sampling site of the study area.

광역시(부산광역시, 대구광역시, 울산광역시)와 5개도(경상 남·북도, 전라 남·북도, 강원도)의 일부를 포함하고 있다(NIER, 2008). 최근 지속적으로 증가되는 용수수요량 대비 부족한 수자원의 확보와 홍수조절 등을 위하여 실시한 4대강 살리기 사업과 관련하여 하도 준설을 실시하고 총 16개의 다기능적인 보를 건설하였으며, 이중 낙동강에는 가장 많은 8개의 다기능보가 건설되어 있다(MOLIT, 2009). 연구 지역은 8개의 보 중 합천과 창녕사이에 건설된 합천창녕보와 인접한 지역으로서 지점 NG-1은 낙동강 본류에 해당되며 합천창녕보의 상류에서 약 5 km 지역에 위치한다. 지점 NG-2는 본류에 유입되는 지류로서 회천에 위치하며 지점 NG-3은 본류로서 덕곡천이 유입되는 지역과 인접하여있다. 지점 NG-4와 NG-5는 합천창녕보와 가장 인접한 지역으로 각각 상류에서 약 1.5 km와 하류에서 약 1.5 km의 지점에 위치하고 있다. 그리고 NG-6은 지류로서 황강에 위치하는 지점이다(Fig. 1).

2.2. 시료 채취 방법

연구지역에 설정된 총 6개의 지점에서 2013년에서

2014년 2년 동안 연간 2회 총 4회에 걸쳐 퇴적물 시료를 채취하였으며 각 해당년도에 춘계에 해당하는 5월과 추계에 해당하는 10월에 시료를 채취하였다. 시료 채취는 중력식 채취기인 포나 그랩(ponar grab)을 이용하여 각 지점의 대표성을 위하여 한 지점에서 5개 이상의 시료를 채취하여 혼합하였으며, 혼합된 시료는 현장에서 2 mm 체를 이용하여 체걸음을 실시한 후 비금속 시료병에 보관하였다. 채취된 시료는 입도, 함수율, 완전연소가능량 및 COD 분석에 이용하였으며 청정시설 내에서 풍건하는 과정을 거친 후 건조된 시료를 입자분쇄기(pulverisette 6)를 이용하여 균질하게 분쇄하여 TOC 및 TN 분석에 이용하였다.

2.3. 시료 분석 방법

입도 분석은 과산화수소(H₂O₂)를 가해 유기물을 분해시키는 전처리 과정을 거친다. 이후 퇴적물 입자들이 레이저빔을 통과할 때 입자의 크기에 따라 발생하는 회절패턴 차이를 측정하여 입도분포를 산출하는 레이저 회절 원리를 이용한 입자크기분석기인 Microtrac S3500를 이용하여 측정하였다. 측정된

결과는 입자 크기별 함량(sediment composition)을 구하여 크게 모래(sand), 실트(silt), 점토(clay)로 구분하고 이 중 모래는 극조립사(very coarse sand), 조립사(coarse sand), 중립사(medium sand), 세립사(fine sand), 극세립사(very fine sand)의 총 5가지 크기로 구분하였다. 그리고 퇴적물에 대한 평균입도(mean grain size), 분급(sorting), 왜도(skewness), 첨도(kurtosis) 등의 조직변수(textural parameters)는 퇴적물의 각 입도구간에서 무게 백분율을 환산한 후 Folk and Ward(1957)의 방법에 따라 구하였으며 입도의 등급을 표시할 때 등배수적 척도보다 대수적 척도가 유용하기 때문에 $\Phi(\phi)$ 를 사용하였으며 이와 입자 직경인 D 관계식은 $\Phi = -\text{Log}_2 D(\text{size in mm})$ 를 이용하였다.

함수율은 원심분리기를 이용하여 상등액을 버린 후 약 110°C에서 4시간 이상을 건조시켜 건조 전과 후의 무게 차이를 백분율로 표시하였으며 완전연소가능량은 수분이 제거된 건조 시료를 전기 회화로에서 2시간동안 약 550°C에서 가열 후 전과 후의 무게차이를 이용하여 백분율로 나타내었다.

화학적 산소요구량인 COD는 0.1N 과망간산포타슘(KMnO₄)과 10% 수산화나트륨(NaOH)용액을 첨가하여 60분간 수욕조에서 가열한 후 10% 아이오드화포타슘(KI)과 4% 아자이드화소듐(NaN₃)용액을 첨가한 후 GF/C 여과지를 이용하여 여과하였다. 그리고 30% 황산(H₂SO₄)용액을 넣어 남아있는 과망간산포타슘에 의하여 유리된 아이오딘의 양을 0.1N 티오황산나트륨·5수화물(Na₂O₃S₂·5H₂O)로 적정한 후 퇴적물 내 COD의 함량(%)을 분석하였다.

TOC 및 TN의 함량 분석은 자연 건조 후 분말화된 퇴적물 시료를 주석 성분의 tin foil로 옮겨 아황산 용액(H₂SO₃)를 사용하여 무기탄소를 제거하는 전처리 과정을 거친다. 전처리 후 1000~1100°C의 고온에서 유기탄소와 총질소를 측정할 수 있는 고온연소(high temperature combustion)원리를 이용한 분석기기인 원소 분석기(Vario MACRO, Elementar, Hanau, Germany)를 이용하여 분석을 실시하였다.

본 연구에 이용된 모든 항목의 분석 절차 및 방법은 국립환경과학원의 '수질 오염 공정 시험 방법' 중 '하천·호소 퇴적물 공정 시험 기준'에 의거하였다(MOE, 2012).

3. 결과 및 고찰

3.1. 입도 분포 변화

3.1.1. 입자 크기별 함량 분포

연구 지역은 전반적으로 모래가 평균 95.3%로서 가장 우세하게 분포하고 있으며 그 중 중립사(avg. : 44.7%)와 조립사(avg. : 32.8%)가 높은 함량으로 분포하고 있다. 지점 NG-2는 모든 지점 중 가장 세립한 퇴적물로 구성되어 있는 지점으로서 니질 퇴적물의 함량이 가장 높게 분포하고 있으며 2014년 10월에 극조립사, 조립사 및 중립사의 함량이 급격히 감소하고 실트 함량이 급격히 증가하여 세립질 퇴적물의 함량이 증가하는 분포 양상이 나타났다. 이와 같은 지점을 제외한 나머지 5지점에서는 니질 퇴적물의 함량이 거의 분포하지 않는 것으로 나타났으며 지점 NG-1과 NG-4 및 NG-6은 모든 기간에 걸쳐 중립사가 우세하며 지점 NG-3과 NG-5는 조립사가 우세한 퇴적환경이 나타나고 있다. 지점 NG-1과 NG-3에서는 2014년 5월에 각각 중립사의 함량이 감소하였으나 지점 NG-4에서는 같은 기간에 중립사의 함량이 증가한 것으로 나타났다. 그리고 지점 NG-5는 2013년 5월에 조립사와 중립사의 비율이 비슷하게 나타났지만 이후 조립사의 함량이 증가하는 경향이 나타났다. 또한 NG-6은 극조립사의 함량은 점차 증가하고 세립사의 함량은 점차 감소하여 전반적으로 조립화 퇴적물의 함량이 증가하는 분포 양상이 나타났다(Fig. 2).

3.1.2. 입도 조직 변수 변화

입도 조직 변수에 해당하는 평균입도, 분급도, 왜도 및 첨도를 Fig. 3에 도시화 하였다. 연구 지역의 평균입도는 1.50 Φ (극조립사)에서 3.68 Φ (극세립사)의 범위에서 변화하며 평균 2.25 Φ 로서 세립사 퇴적물이 평균적으로 분포하고 있는 것으로 나타났다. 지점 NG-1과 NG-4 및 NG-6은 전반적으로 세립사(2 ~ 3 Φ)에 해당하는 평균입도가 나타나고 있으며 NG-1은 조립화와 세립화가 반복되는 경향이 나타나며 지점 NG-4와 NG-6은 2014년 5월에 세립사에서 중립사(1.50 Φ , 1.97 Φ)로 조립화되는 경향이 나타나고 있다. 지점 NG-3과 NG-5는 1 ~ 2 Φ 사이의 평균입도로 다른 지점에 비해 비교적 조립질 퇴적물인 중립사가 분포하고 있으며 2014년 5월에 각각 1.77 Φ , 1.52 Φ 로

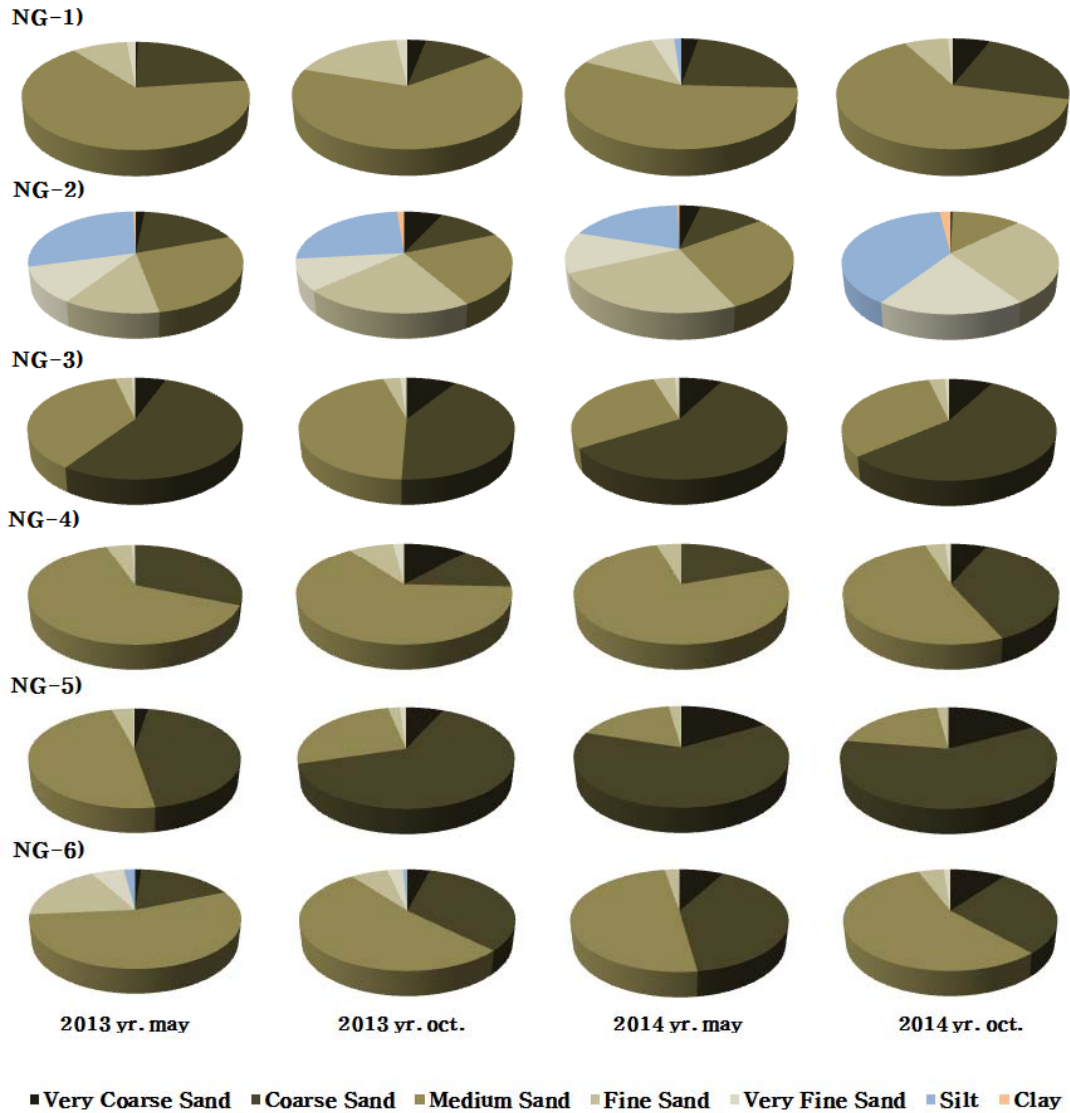


Fig. 2. Variation of sediments composition (very coarse sand, coarse sand, medium sand, fine sand, very fine sand, silt and clay) of surface sediments in the study area.

조립화되는 경향이 나타나고 있다. 지점 NG-2는 실트의 함량이 가장 높게 분포하는 지점으로 평균입도 역시 극세립사에 해당하는 범위에서 변화하며 다른 지점과 마찬가지로 2014년 5월에 비교적 조립화 되는 경향이 나타나고 있다. 분급은 구성입자들의 표준편차를 통하여 입자의 균질한 정도를 의미하는 자료로서 0.35 이하는 매우 양호한 very well sorted, 0.35 Φ

에서 0.5 Φ 사이는 well sorted, 0.5 Φ 에서 1 Φ 사이는 moderately well sorted에 해당하며 0.7 Φ 에서 1.0 Φ 사이는 moderately sorted에 해당한다. 그리고 1 Φ 에서 2 Φ 사이는 poorly sorted, 2 Φ 에서 4 Φ 사이는 very poorly sorted, 4 Φ 이상은 extremely poorly sorted에 해당한다. 연구 지역은 평균적으로 0.86 Φ 으로 보통 분급인 moderately sorted에 해당하는 것으로 나타났다.

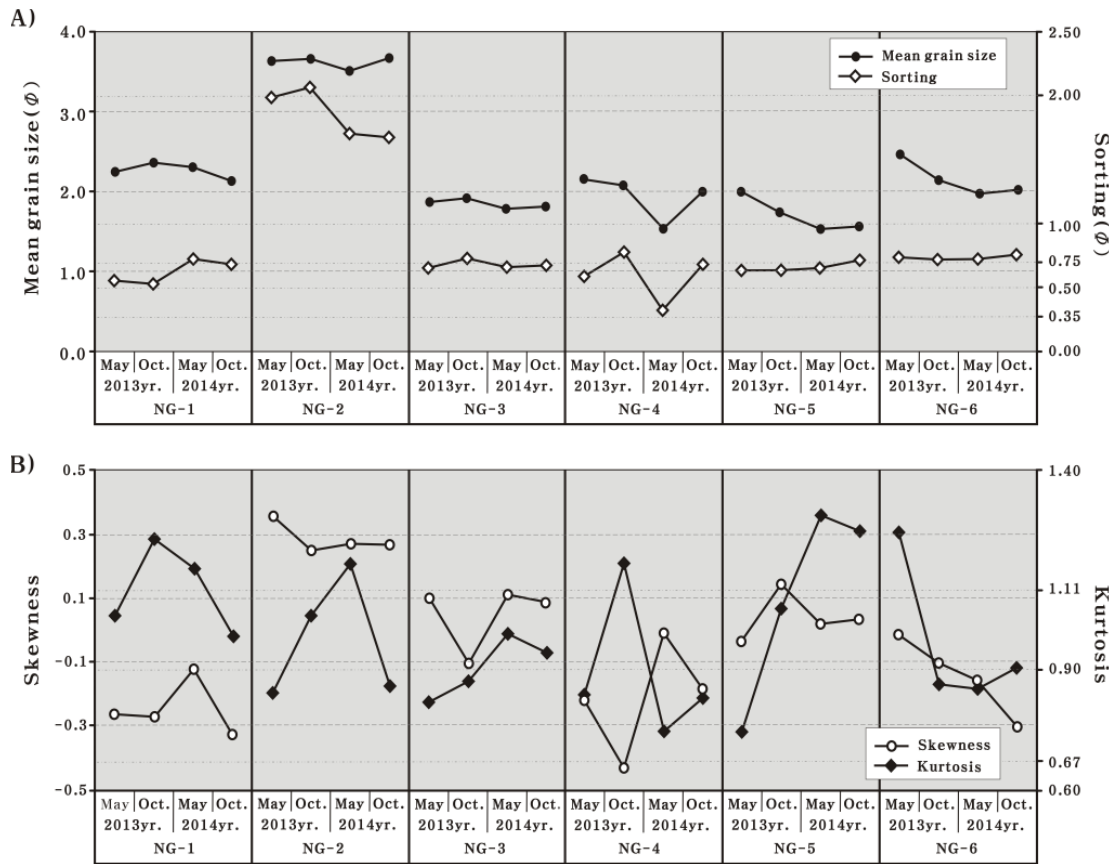


Fig. 3. Variation of sediments mean grain size, sorting, skewness and kurtosis of surface sediments in the study area (A: mean grain size and sorting, B: skewness and kurtosis).

대부분의 지점에서 모든 기간에 걸쳐 사질 퇴적물의 주를 이루고 니질 퇴적물이 극히 미약하게 함유되어 있어 보통이거나 보통 양호한 분급으로 나타나는 반면 지류인 회천에 위치하는 지점인 NG-2에서는 사질 뿐만 아니라 니질에 해당하는 실트 함량의 증가로 인하여 불량한 분급인 poorly sorted에 해당하며 특히 2013년 10월에 2.07 φ로 매우 불량한 분급인 very poorly sorted에 해당하는 것으로 나타나 다른 지점에 비해 다양한 크기의 입도를 가지는 퇴적물이 혼재되어 있음을 의미한다. 왜도는 입자 분포의 편향의 비대칭성을 나타내는 것으로 조립물질(coarse fraction)과 세립물질(fine fraction)의 존재와 부재를 의미한다. 왜도가 0에 가까울수록 조립질과 세립질 퇴적물이 대칭적으로 분포하는 것으로서 음의 값이면 조립질로 편

왜되어 있고 양의 값이면 세립질로 편왜되어 있다. 즉, 지점 NG-1과 NG-6는 모든 기간에 음의 값으로 퇴적물이 조립질이 우세한 비대칭성이 나타났으며 가장 세립한 지점인 NG-2는 모든 기간에 양의 값으로 세립질 퇴적물이 우세한 비대칭성이 나타났다. 첨도는 입도의 분포곡선이 정규분포에서 집중 또는 분산에 의한 값으로서 1 이하의 값이면 넓게 분산된 형태로 platykurtic, 1 이상의 값이면 중앙으로 집중된 형태로 leptokurtic으로 구분된다. 연구 지역은 평균 0.99로 분산된 형태인 platykurtic에 해당되지만 전반적으로 1과 가까운 값들이 분포하고 있다. 그리고 모든 지점에서 시간이 지남에 따라 정규분포에서 분산되어 platykurtic에서 다시 집중되어 leptokurtic의 형태로 분포 양상이 변화하고 있다(Fig. 3).

연구 지역은 입도 분석 결과 모든 지점에서 전반적으로 2014년 5월에 비교적 조립화 되는 경향이 공통적으로 나타났으며 이러한 결과는 계절적 변화와 연구 지역인근에 건설된 보에 의한 인위적 영향으로 유량과 유속이 감소한 결과로 판단된다. 입도 분석을 통한 조직변수는 퇴적 환경에서 퇴적 에너지 조건을 반영하며 저에너지 환경은 퇴적물이 세립하고 분급이 불량하며 양의 왜도 경향을 보이는 반면 고에너지 환경은 분급이 양호한 조립질 퇴적물이 양 또는 음의 왜도를 보이는 경향이 있다고 알려져 있다(Baek, 2002). 또한, 왜도가 양의 값으로 크다는 것은 유속과 같은 물리적인 영향으로 인하여 침식이 일어나는 것을 의미하며 반면 왜도가 작다는 것은 물리적인 영향이 비교적 약해 침식 보다는 퇴적이 우세한 지역으로 분류될 수 있다(Folk, 1980). 즉, 연구 지역에서 실트의 함량 분포가 다른 지점에 비해 매우 높게 나타나 가장 세립한 퇴적물로 구성되어 있으며 불량한 분급과 양의 왜도가 나타나는 지류인 회천에 위치하는 지점 NG-2은 퇴적물의 운반 및 이동에 큰 영향을 줄 수 있는 유속 및 유량 등의 물리적인 환경 영향을 비교적 낮게 받고 있어 다른 지점에 비해 퇴적이 우세한 저에너지 환경에 해당되는 것으로 판단된다.

3.2. 유기물질 분포 특성 변화

3.2.1. 함수율, 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN 함량

연구 지역의 총 6개 지점에서 유기물질 분포 특성 변화를 알아보기 위하여 함수율, 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN의 함량 분포를 Table 1에 나타내었다.

함수율은 15.3% ~ 34.9%의 범위에서 변화하며 분포하고 평균 20.25%로 나타났다. 대부분의 지점에서 20% 이하의 함수율이 나타나는 반면 지점 NG-2에서는 다른 지점보다 비교적 높은 30% 내외의 함수율로서 2014년 10월에 34.9%로 가장 높게 나타났다.

완전연소가능량은 0.4% ~ 5.8%의 범위에서 평균 1.33%로 나타났으며 대부분의 지점에서 1% 이하로 나타났지만 함수율과 마찬가지로 지점 NG-2에서는 급격히 감소하여 2.47%로 나타나는 2014년 5월을 제외한 나머지 기간에는 모두 5% 이상으로 비교적 높게

나타나고 있다. 그리고 국립환경과학원의 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준에서 완전연소가능량이 13%를 초과하면 심각하고 명백한 오염상태인 IV 등급으로 지정하고 있으며(NIER, 2015), 연구 지역의 완전연소가능량 분석 결과는 모두 13% 미만으로 나타나 모든 지점에서 연구 기간 동안 유기물질의 오염은 심각한 상태는 아닌 것을 의미한다.

COD 함량은 0.01% ~ 1.16%의 범위로 평균 0.17%로 분포하고 있으며 대부분의 지점에서 0.1% 이하의 낮은 함량이 분포하고 있지만 함수율과 완전연소가능량이 높게 나타나는 지점인 NG-2에서 모든 기간에 0.4%를 초과하는 비교적 높은 함량으로 분포하며 2013년 5월에 1.16%로 가장 높은 함량으로 증가하는 경향이 나타났다. 미국 환경 보호청에서는 COD의 함량이 4% 미만일 경우 non polluted에 해당한다고 명시되어 있으며(USEPA, 1999), 이에 따라 연구 지역의 모든 기간에 오염되지 않는 상태에 해당하는 것으로 나타났다.

TOC의 함량은 0.04% ~ 1.28%의 범위로 평균 0.18%로 분포하고 있다. 캐나다 온타리오 환경부의 퇴적물 환경기준은 1% ~ 10%는 LEL (Lowest Effect Level)에 해당하며 10% 이상은 SEL (Severe Effect Level)에 해당하는 것으로 설정되어 있다(CCME, 1995). 이 기준에 따라 대부분 지점에서는 0.1% 내외로 낮게 나타나 오염이 되지 않은 NEL (No Effect Level)에 해당하지만 지점 NG-2에서 2014년 10월에 1.28%로 급증하여 저서생물 다수가 견딜 수 있는 수준이지만 몇몇 종에게는 악영향을 미칠 수 있는 LEL에 해당되는 것으로 나타났다. TOC는 퇴적물의 입도, 수심, 퇴적률, 광물조성 등과 밀접한 관계가 있으며 일반적으로 세립한 퇴적물에서 함량이 증가하고 표층으로부터 유입이 일정할 경우 수심이 증가할수록 수층에서의 분해로 인해 함량은 감소하게 된다(Lee et al., 2012). 연구 지역에서 지점 NG-2는 가장 세립한 퇴적물이 분포하며 다른 지점에 비해 비교적 하도 폭이 좁고 수심이 얇은 지류에 위치하고 있다. 이러한 지형적인 특성과 입도의 세립화에 의해 TOC 함량이 다른 지점에 비해 높게 나타나는 것으로 판단된다.

TN의 함량은 274 mg/kg에서 2493 mg/kg의 범위로 분포하며 평균 696 mg/kg으로 분포하고 있으며

Table 1. Water content, ignition loss, chemical oxygen demand, total organic carbon and total nitrogen of surface sediments in the study area

Site name	Year	Month	WC(%)	IL(%)	COD(%)	TOC(%)	TN(mg/kg)
NG-1	2013	may	17.5	0.71	0.09	0.09	532
		oct.	18.9	0.77	0.05	0.08	592
	2014	may	19.7	1.02	0.10	0.12	709
		oct.	18.3	0.60	0.02	0.05	687
NG-2	2013	may	33.3	5.70	1.16	0.95	1405
		oct.	29.7	5.03	0.40	0.39	774
	2014	may	23.6	2.47	0.45	0.37	972
		oct.	34.9	5.79	1.10	1.28	2493
NG-3	2013	may	16.6	0.56	0.03	0.06	703
		oct.	18.1	0.57	0.02	0.06	274
	2014	may	19.0	0.82	0.06	0.06	413
		oct.	18.1	0.49	0.02	0.04	507
NG-4	2013	may	18.1	0.69	0.06	0.08	392
		oct.	16.0	0.77	0.06	0.09	472
	2014	may	21.3	0.81	0.09	0.11	523
		oct.	18.9	0.67	0.05	0.07	898
NG-5	2013	may	15.4	0.44	0.02	0.04	340
		oct.	18.5	0.38	0.01	0.06	562
	2014	may	18.7	0.68	0.02	0.04	428
		oct.	15.3	0.40	0.02	0.06	868
NG-6	2013	may	17.7	0.76	0.06	0.07	482
		oct.	18.2	0.52	0.01	0.05	382
	2014	may	20.3	0.58	0.04	0.06	772
		oct.	19.9	0.71	0.06	0.09	546

앞서 분석된 다른 유기물질 항목 분석 결과와 같이 지점 NG-2에서 TN의 함량이 가장 높게 분포하고 있으며 특히 2014년 10월에는 2493 mg/kg으로 최대함량이 나타나고 있다. 그러나 국립환경과학원의 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준(NIER, 2015)에서 심각하고 명백한 오염으로 지시하고 있는 IV 등급(> 5,600 mg/kg) 보다는 낮은 함량으로 TN을 통한 유기물질 오염은 심각한 수준은 아닌 것으로 해석된다.

이와 같은 유기물질 함량 분석 결과를 낙동강 본류 및 지류가 아닌 도시 인근에 위치하는 부산시 도심하천의 총 14개 지점에서 실시된 하천퇴적물의 유기 오염도 평가에 관한 연구결과(Lee et al., 2009)와 비교

하였다. 그 결과 부산시 인근 도심하천에서는 완전연소가능량, COD 및 TOC 함량이 각각 0.19 ~ 11.54%, 1.20 ~ 75.07% 및 0.17 ~ 34.21%에 비해 연구 지역은 매우 낮은 범위에서 분포하고 있으며, 특히 TOC의 함량은 캐나다 온타리오 환경부의 퇴적물 환경기준에 2개 지점이 SEL 기준치보다 2배 이상 초과하였고 7개 지점에서 LEL을 초과하는 결과가 나타난 반면 연구 지역은 이에 비해 매우 낮은 오염 기준에 해당되는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 보아 도심의 인근에 위치하여 인위적인 영향을 직접적으로 받는 하천에 비해 도시나 산업 단지 등의 지역과는 인접해 있지 않은 연구 지역은 인위적 활동에 의한 유기물질에 의한

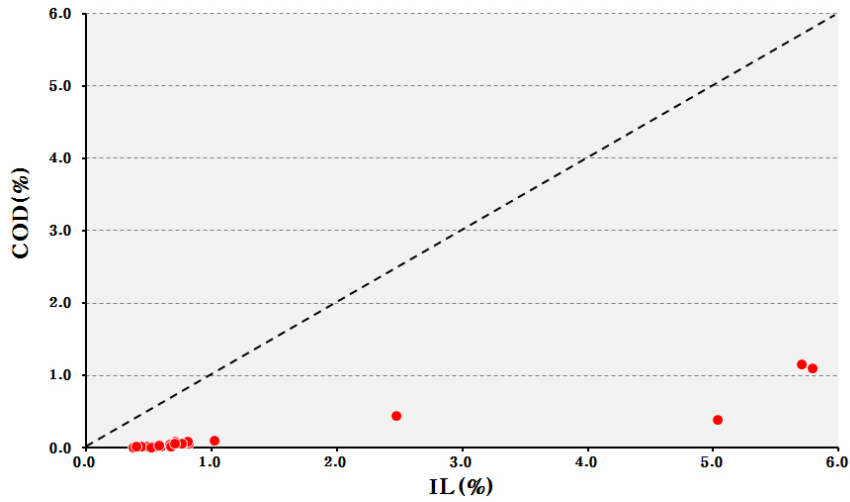


Fig. 4. Relationship between COD and IL of surface sediments in the study area.

오염은 미약한 것으로 해석된다.

3.2.2. 유기물질 기원 추정

유기물질의 기원을 추정하는 방법은 다양하게 활용되고 있으며 본 연구에서는 유기물질을 대변할 수 있는 항목들의 분석 결과를 이용하여 COD와 완전연소가능량의 비율(COD/IL)과 총유기탄소와 총질소의 비율(C/N)을 통하여 유기물질 특성과 기원에 접근하였다. COD는 화학적으로 분해 가능한 유기물을 의미하며 COD와 완전연소가능량의 비로부터 퇴적물의 기원을 추정할 수 있다. COD/IL의 비율이 1을 기준으로 1보다 큰 분포상의 유기물질은 외부로부터 유입된 물질을 나타내며 1 이하인 경우는 자연중의 1차 생물 생산이나 기타요인에 의해서 형성된 유기물을 나타낸다고 보고하고 있다(Yoon, 2000; Jang and Cheong, 2010). 연구 지역에서 COD/IL 비율을 분석한 결과 0.02에서 0.20의 범위에서 변화하며 평균 0.08로 나타나 모든 지점에서 연구 기간 동안 1이하의 비율이 나타나고 있다(Fig. 4). 이러한 결과로 보아 연구 지역의 퇴적물에 함유된 유기물질은 육상이나 대기에 의해 유입된 것이 아니라 수중의 생물생산이나 기타요인에 의해 자생적으로 형성된 유기물질인 것으로 판단된다.

유기물질의 특성 및 기원을 추정할 수 있는 또 다른 방법 중 하나인 C/N비는 수중 생물의 기초생산에 의

해 공급된 유기물질은 10이하이며 주변 육지에서 공급된 유기물질인 경우 10이상의 비율을 보이고 있는 것으로 알려져 있다(Muller, P. J., 1977; Sampei and Matsumoto, 2001). 연구 지역의 C/N 비율은 0.73에서 6.76의 범위로 평균 1.97로 나타나 연구 기간 동안 모든 지점에서 10 이하의 비율을 보이고 있다(Fig. 5). 즉, 연구 지역에 퇴적물에 함유된 유기물질은 주변 육지 등의 외부가 아닌 수중 생물의 기초생산에 의해 공급되어 형성된 것으로 추정된다. 퇴적물 내 유기물 함량은 다양한 기원에서 유래된 산물이기 때문에 C/N 비율만을 통하여 유기물 기원을 확인하는 것은 한계가 있으며 지역 특성에 따라 강우 및 유량의 증가로 인하여 육상기원의 유기물 유입이 발생할 수도 있다. 그러나 질소성 단백질(nitrogen protein)이 풍부한 조류의 퇴적에 의해 총질소의 함량이 증가하여 C/N 비율이 비교적 낮게 나타나게 된다(Kim et al., 2015). 이와 같이 연구 지역에서 나타나는 10이하의 낮은 C/N 비율은 퇴적물 내에 함유된 유기물질이 육상 및 대기의 외부에서 유입보다는 수중에 서식하는 생물기원에 의해 형성된 유기물질인 것으로 판단된다.

3.3. 주성분 분석

주성분 분석(PCA; Principal Component Analysis)은 많은 변수들을 유사한 공통차원들끼리 묶어 적은

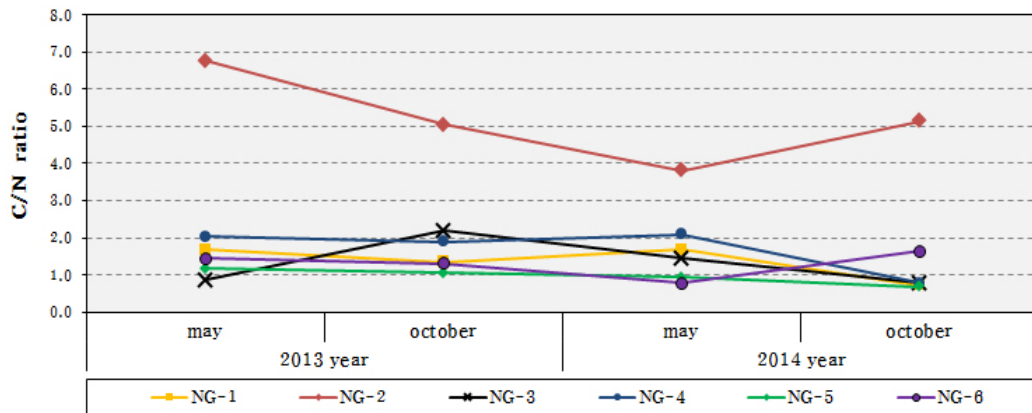


Fig. 5. C/N ratios of surface sediments in the study area.

수의 요인으로 축소시키는 통계학적 분석 방법으로 이용되고 있다(Grant, 1990). 본 연구에서는 실시된 모든 항목의 분석 결과를 통계 프로그램인 spss 20.0 을 사용하여 차원감소의 요인분석에서 주성분 분석을 실시하였다. 분석시 행렬의 열을 단순화한 varimax 직각회전방법을 통하여 연구 지역의 입도 및 유기물 분포 변화에 관하여 어떠한 항목이 주요인으로 작용

하는지 알아보았다.

각 요인의 고유치를 의미하는 eigenvalue는 각 요인이 기존 변수의 정보를 어느 정도 설명하는지를 나타내는 지표로서 연구 지역에서는 요인 1(Factor 1)은 67.386%, 요인 2(Factor 2)는 12.963%로 추출되었으며 2 요인의 누적 고유치는 80.350%로서 각 변수의 정보를 포함하고 있는 것으로 확인된다. 요인 1에 해

Table 2. Rotated component matrix of surface sediments in the study area (varimax rotation method)

	Factor 1	Factor 2
Eigenvalue loading(%)	67.386%	12.963%
Very Coarse Sand	-0.200	-0.783
Coarse Sand	-0.425	-0.838
Medium Sand	-0.662	0.728
Fine Sand	0.721	0.448
Very Fine Sand	0.937	0.248
Silt	0.985	0.150
Clay	0.892	0.114
Mean Grain Size	0.865	0.374
Sorting	0.924	0.042
Skewness	0.755	-0.362
Kurtosis	-0.033	-0.223
Water Content	0.932	0.195
Ignition Loss	0.961	0.166
Chemical Oxygen Demand	0.936	0.202
Total Organic Carbon	0.934	0.197
Total Nitrogen	0.835	0.121

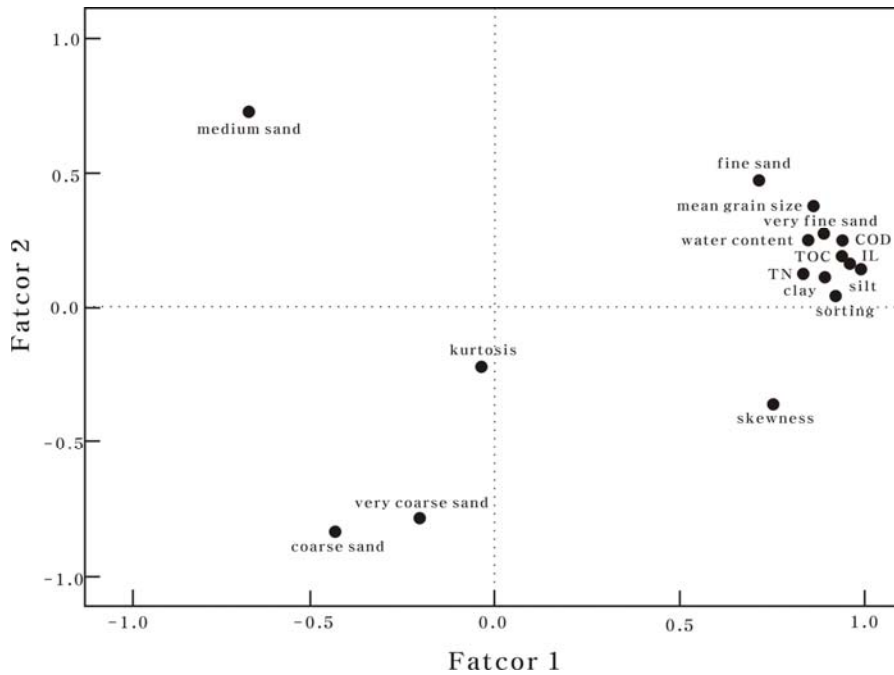


Fig. 6. Principal component analysis plot of surface sediments in the study area.

당되는 항목은 실트, 극세립사, 평균입도, 분급도, 완전연소가능량, COD, TOC, 함수율 및 TN이 나타났으며 요인 2는 평균입도 및 세립사가 해당되는 것으로 나타났다. 이 중 특히 요인 1에 해당되는 세립질 퇴적물인 실트(0.985)와 극세립사(0.937)와 유기물질 함량을 대변하는 항목인 완전연소가능량(0.961), COD(0.936), TOC(0.934), TN(0.835)의 함량이 연구 지역의 주요 성분 요인인 것으로 해석된다(Table 2).

연구 지역에서 입도 및 유기물질 함량에 관한 상관관계를 산출된 주성분의 식을 시각화한 성분도표에 요인 1을 가로축으로 요인 2를 세로축으로 설정하고 각 변량의 계수를 좌표로 도시화 하였다(Fig. 6). 앞서 기술한 요인 1의 항목들인 세립질 퇴적물과 유기물질 항목들은 성분도표의 우측에 집중되어 있으며 이는 세립질 퇴적물인 실트와 극세립사가 함수율, 완전연소가능량, TOC, TOC 및 TN의 함량과 매우 큰 상관관계가 나타나고 있는 것으로 확인된다. 그리고 연구 지역에서 분포하는 비교적 조립질 퇴적물인 중립사, 조립사 및 극조립사는 유기물질 함량과는 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 주성분 분석을

통한 상관분석에서 상관계수가 큰 항목들은 대체로 그 지화학적 특성이나 환경 내에서 밀접한 관련성을 갖는다(Kim et al., 2005). 이와 같이 주성분 분석을 통하여 연구 지역의 입도 및 유기물질의 퇴적 환경을 조절하는 일차적 요인을 이해할 수 있으며 본 연구에서는 요인 1로 추출된 극세립사와 실트의 함량에 의해 유기물질 함량이 조절되는 것으로 판단된다.

퇴적물은 입도, 기반암, 광물 조성 및 유기물질의 영향을 많이 받고 있다(Clavert, 1976). 그리고 퇴적물의 입자가 세립할수록 표면적이 넓어져 더 많은 물질을 흡착할 수 있는 물리적 면적이 증가하고 이온 교환량이 증가하여 용존 미량 금속 및 유기물질이 쉽게 흡착될 수 있다고 알려져 있다(Horowitz, 1991). 본 연구에서도 주성분 분석 결과 극세립사 및 실트로 구성된 세립질 퇴적물이 유기물질 함량을 대변할 수 있는 함수율, 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN의 함량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 연구 지역에서 지류에 위치하며 비교적 저에너지 영향으로 퇴적 환경이 우세하여 다른 지점에 비해 가장 세립한 퇴적물 분포를 보이고 있는 지점 NG-2에서 세립질 퇴적물인

실트와 극세립사에 의해 유기물질 함량이 증가하는 것으로 판단된다.

4. 결론

낙동-고령 중권역의 입도 및 유기물질 함량 분포 변화를 이해하기 위하여 6개의 지점에서 2년간 총 4회에 걸쳐 표층 퇴적물을 채취하여 입도 분석을 실시하여 퇴적물 입자별 함량 분포와 조직변수를 구하고 유기물질 함량을 대변할 수 있는 함수율, 완전연소가능량, COD, TOC 및 TN의 함량을 분석하였다.

연구 지역은 전반적으로 모래가 평균 95.3%로서 가장 우세하게 분포하고 있으며 그 중 중립사(avg. : 44.7%)와 조립사(avg. : 32.8%)가 높은 함량으로 분포하고 있으며, 전반적으로 2014년 5월에 비교적 조립화되는 경향이 나타났다. 그리고 세립질 퇴적물의 함량이 높고 불량한 분급으로 양의 왜도 경향이 나타나는 지점 NG-2는 다른 지점에 비해 비교적 퇴적이 우세한 저에너지 환경인 것으로 판단된다.

함수율(15.3 ~ 34.9%)은 평균 20.25%이며, 완전연소가능량(0.4 ~ 5.8%)과 TN의 함량(274 ~ 2,493 mg/kg)은 각각 평균 1.33%, 696 mg/kg로 나타나 국립환경과학원 퇴적물 기준과 비교한 결과 심각하고 명백한 오염 상태는 아닌 것으로 나타났다. COD 함량(0.01% ~ 1.16%)은 평균 0.17%로서 미국 환경 보호청 퇴적물 기준과 비교하였을 때 오염 되지 않는 상태에 해당하는 것으로 나타났다. TOC의 함량(0.04% ~ 1.28%) 평균 0.18%로 대부분 지점에서는 0.1% 내외로 낮게 나타나 캐나다 온타리오 퇴적물 환경기준에 비해 오염이 되지 않은 NEL에 해당하지만 지점 NG-2에서 2014년 10월에 1.28%로 급증하여 다수의 생물체에 영향을 미치지 않는 LEL에 해당하였다.

유기물질 기원을 추정하기 위하여 COD/IL 및 C/N 비율을 분석한 결과, COD/IL (0.02 ~ 0.20)는 1이하의 비율이 나타났으며, C/N 비율(0.73 ~ 6.76)은 10이하의 값이 나타났다. 이에 따라 연구 지역의 유기물질은 수중에 서식하는 생물이나 기타요인에 의해 자생적으로 형성된 유기물질인 것으로 판단된다.

주성분 분석 결과 극세립사 및 실트로 구성된 세립질 퇴적물이 유기물질 함량을 대변할 수 있는 함수율,

완전연소가능량, COD, TOC 및 TN의 함량에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 연구 지역에서 지류에 위치하며 비교적 저에너지 영향으로 퇴적 환경이 우세하여 다른 지점에 비해 가장 세립한 퇴적물 분포를 보이고 있는 지점 NG-2에서 세립질 퇴적물인 실트와 극세립사에 의해 유기물질 함량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 향후에는 본 연구에서 실시된 입도 및 유기물질 뿐만 아니라 퇴적물 내에 분포하는 미량금속 및 유기화합물 등의 오염물질 분석을 통한 하천 환경 연구를 계속 실시되어야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-03-03-002).

REFERENCES

- Alloway, B. J., Thornton, I., Smart, G. A., Sherlock, J. C., Quinn, M. J., 1988, Metal availability, *Sci. Total Environ.*, 75, 41-69.
- Baek, Y. S., 2002, Seasonal variation of depositional characteristics of surface sediment and sedimentary facies in the Yumsan intertidal flat, southwestern coast of Korea, Master's thesis, Chonnam National University, Gwangju metropolitan city, 76.
- Canadian Council of Ministers of the Environmental Protection (CCME), 1995, Protocol for the derivation of canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life, EPA-98E, CCME, Canada.
- Clavert, S. E., Mineralogy and geochemistry of nearshore sediments, In : *Chemical oceanography*, 2nd edition vol. 6, by Riley, J. P., Chester, R., Academic Press, London, 187-280.
- Dekoev, V. M., Komy, Z., Araujo, F., Van Put, A., Van Grieken, R., 1997, Chemical composition of sediments, suspended matter, river water and ground water of the Nile (Aswan-Sohag traverse), *Sci. Total Environ.*, 20, 195-210.
- Folk, R. L., 1980, Petrology of sedimentary rock, Hemphill Publishing Company Austin, Texas, 182.
- Folk, R. L., Ward, W. C., 1957, Brazos river bar: A Study in the significance of grain size parameter. *J. Sedi. Petro.*, 27, 864-874.

- Grant, A., 1990. Multivariate statistical analyses of sediment geochemistry, *Mar. pollut. Bull.*, 21, 297-299.
- Horowitz, A. J., 1991, A Primer on sediment-trace element chemistry, Lewis publish, Chelsea, 1-136.
- Jang, S. G., Cheong, C. J., 2010, Characteristics of grain size and organic matters in the tidal flat sediments of the Suncheon bay, *Jour. Kor. Soc. Mar. Environ. Eng.*, 13, 198-205.
- Kang, M. K., Choi, I. Y., Park, J. H., Choi, J. H., 2012, Investigation of the effect of weirs construction in the Han river on the characteristics of sediments, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 34, 597-603.
- Kim, D. H., 2007, Study on the sediment quality in bottom water (I), *Kor. Soc. Marine Environ. Saf.*, 13, 93-102.
- Kim, S., Lee, G. Y., Kim, J. E., Lee, G. C., Ahn, J. M., Lee, I. J., Jung, G. Y., Im, T. H., 2015, Vertical variation of sediment structure and geochemical characteristics of core sediment in Nakdong river midstream, *Jour. Kor. Soc. Water Environ.*, 31, 204-312.
- Kim, S. K., Lee, M. K., Ahn, J. H., Kang, S. W., Jeon, S. H., 2005, The effects of mean grain size and organic matter contents in sediments on the nutrients and heavy metals concentrations, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 27, 923-931.
- Lee, J. K., Kim, S. G., Song, J. H., Lee, T. Y., 2009, Evaluation of organic sediments qualities for the urban stream in the Busan city, *Environ. Eng. Res.*, 31, 975-982.
- Lee, J. K., Kim, S. G., Song, J. H., Lee, T. Y., 2010, Evaluation of organic compounds and heavy metals in sediments from the urban streams in the Busan city, *Jour. Kor. Geo-environ. soc.*, 11, 35-43.
- Lee, J. H., Park, K. S., Woo, H. J., 2012, Characteristics of total carbon and total organic carbon using elemental analyzer in Hyung-Do intertidal zone sediments, *Econ. Environ. Geo.*, 45, 673-684.
- Lick, W., 2006, The sediment-water flux of HOCs due to “diffusion” or is there a well-mixed layer? If there is, does it matter?, *Environ. Sci. Technol.*, 40, 5610-5617.
- Ministry of Environment (MOE), 2012, Official test methods of water quality, notification No. 2012-99, Ministry of Environment, 1-333.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2009, River maintenance master plan in the Nakdong river, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- Muller, P. J., 1977, C/N ratio in pacific deep-sea sediment : Effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays, *Geochimica et Cosmochimica Acta.*, 41, 765-776.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2008, Result on target water quality monitoring network operation of Nakdong river system in 2008, 11-1480523-000444-10, Ministry of Environment, 5-14.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2015, Sediment pollution evaluation standard of river and lake, published rulings 687.
- Ra, K. T., Kim, E. S., Kim, J. K., Kim, K. T., Lee, J. M., Kim, E. Y., 2013, Distribution and pollution assessment of trace metals in core sediments from the artificial lake Shihwa, Korea, *Jour. Oce. Pol. Res.*, 35, 69-83.
- Sampei, Y., Matsumoto, E., 2001, C/N ratios in a sediment core from Nakaumi lagoon, southwest Japan -usefulness as an organic source indicator, *Jour. Geochem.*, 35, 189-205.
- Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry, Academic Press, London, 1-501.
- USEPA, 1999, Protocol for developing sediment TMDLs. EPA841-B-99-004, USEPA, USA.
- Yoon, Y. H., 2000, A Study on the distributional characteristics of organic matters on the surface sediments and its origin in Keogeum-sudo, southern part of Korea peninsula, *Jour. Kor. Environ. Sci. Soc.*, 9, 137-144.