

하천 생태복원 전후의 초량천, 대연천 수생태 변화 연구

김민정, 손정원, 문신득, 김주인, 이정규

물환경연구부 물환경생태팀

A Study on Changes in the Aquatic Ecosystem of Choryang and Daeyeon Stream Before and After River Ecological Restoration

Kim Min-jung, Son Jung-won, Moon Sin-deuk, Kim Chu-in, Lee Jung-gyu

Aquatic Environment & Ecology Team

Abstracts

Among the ecological river restoration projects promoted by Busan Metropolitan City, Choryang and Daeyeon Stream which release maintenance water were investigated to know the changes in aquatic ecology before and after the restoration of each stream. As a result of the survey, the KTX underground runoff water discharged to Choryang Stream showed good concentration in all water quality categories and the nutritional salt concentration of the Nambu sewage treatment water discharged to Daeyeon Stream was slightly high. After discharging maintenance water the BOD, TN, TP and TOC of Choryang Stream showed overall improved values but Daeyeon Stream showed similar concentrations to maintenance water of slightly reduced BOD and somewhat higher TN, TP and TOC. After discharging maintenance water, the number of species and populations of Choryang and Daeyeon Stream's benthic macroinvertebrate species generally increased and the rate of appearance of *Limnodrilus gotoi* and Chironomidae sp.4(red type) which were meaningful pollution indicators that appeared as the dominant before discharge, decreased. Contrary to the improved BOD water quality rating before and after discharging, the Benthic Macroinvertebrate evaluation index was "very bad" both before and after discharging maintenance water. However, as the species and population of benthic macroinvertebrate creatures increased, biodiversity and dominant index improved, the continuous release of maintenance water is expected to have a positive effect but ecosystem change needs enough time for organisms to adapt it is judged that long term monitoring is necessary in the future.

Key words : Choryang stream, Daeyeon stream, maintenance water, Ecological restoration

1. 서 론

도심부를 관통하는 대부분 하천들은 교통수요의 충족을 목적으로 도시용지 확보 차원에서 하천 본래의 가치를 무시한 복개를 통하여 도로의 확충과 주차난 해소를 위한 주차장으로 활용 되어 왔다¹⁾. 하지만 근래 환경친화적 도시구현과 생태하천에 대한 국민적 관심과 요구가 증대됨에 따라 하천 복원사업이 급증하고 있는 가운데, 국내 하천 복원사업 전·후의 수생태 변화에 대한 평가 사례는 매우 적으며²⁾, 그 중 부산광역시 내 복원된 하천의 수생태 변화에 대한 관련 사례로는 낙동강 유지용수 공급 후 온천천의 수질 및 생물변화 특성에 관한 연구³⁾, 도심하천 복원 전후의 생태적 특성 비교⁴⁾ 등이 있다.

본 연구 대상지인 초량천과 대연천은 복개되어 과거 주차장과 도로용지 등으로 활용되었다가 부산광역시에서 추진하는 자연 친화적인 하천 환경복원 사업에 의해 각각 2011년, 2012년 용역을 착수하였으며, 복개 구간을 걷어내고 미복개 상류부에서 유지용수를 방류함으로써 수질 개선과 하천 주변 생활환경 개선을 통해 어류 등 수생생물 서식이 가능한 하천으로의 변모를 기대하고 있다.

현재까지 수질 평가를 위해 적용되어온 이화학적 방법은 측정 당시의 수질 상태를 제한된 항목으로 나타내므로 수시로 변화하는 수질을 종합적으로 대변하기에는 한계가 있다⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 이화학적인 수질 변화와 함께 지표생물(Indicator organisms) 중 저서성 대형무척추동물을 이용한 생물학적 방법을 통해 하천의 복원 전·후 양상을 파악하고자 하였다.

저서성 대형무척추동물을 통한 물 환경변화 분석에 있어서 그 유용성은 첫째, 다양한 오염에 대한 분별적인 민감성이 높다. 즉 분류군에 따라 민감한 오염원이 다르며, 오염에 대하여 빠른 반응을 보인다. 둘째, 대부분의 담수생태계, 특히 유수생태계에 다양한 종들이 풍부하게 분포하기 때문에 채집이 용이하고, 보편성이 높으며 분류가 잘 정립되어 있다. 셋째, 이동성이 적어 지역적 환경을 잘 대변한다. 넷째, 환경질을 반영하기에 충분히 긴 생활사를 가진다. 마지막으로 각 분류군이 군집에서 다른 기능을 수행하며, 다양한 영양단계를 구성하고 있어 물 환경의 변화에 따라 다양한 반응을 한다⁶⁾. 그러므로 하천 복원사업 전·후의 저서성 대형무척추동물의 군집을 비교하는 것은 하천 복원의 효과를 검증할 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있다.

따라서 본 연구는 복개구간을 걷어 내고, 유지용수를 방류하는 두 하천의 생태하천 복원사업 전·후를 중심으로 이화학적 변화와 저서성 대형무척추동물 군집 구조의 변화를 분석하여 그 효과를 파악하고, 앞으로 증가 될 생태하천 복원 사업 시 그 효과를 파악하기 위한 하천환경 평가의 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

본 연구는 부산광역시에서 추진하고 있는 생태하천 복원사업 중 2021년 준공한 초량천과 대연천을 대상으로 하였다.

2.1.1 조사지점

초량천은 부산광역시 동구 수정4동 구봉산에서 발원하여 부산항 3부두 인근에서 바다와 합류하는 하천이다. 유역면적 2.39 km², 유로연장 2.67 km로 과거 60년대 무렵부터 상류 지점을 중심으로 복개되어 도로와 주택 구간으로 이용되면서 하수구나 다름없는 상태로 전락했지만, 이후 복합 재개발로 인해 인근 부산천과 함께 수질오염 문제가 대두되면서 유로연장 중 316 m(초량 육거리 ~ 하나은행)가 생태하천 복원사업을 통해 개거되었다.

대연천은 부산광역시 남구 대연동을 관통하여 용호만과 합류하는 하천으로, 유역면적 4.84 km², 유로연장 3.25 km로 2012년까지 복개되어 주차장으로 이용되었다가 유로연장 중 749 m(UN조각공원 ~ 용호교)가 생태하천 복원사업을 통해 개거되었다. 대연천은 감조하천의 특성과 건천화된 하천의 특징을 모두 가지고 있어 만조 시 유입된 오염된 해수가 하천 내에 고이면서 수질이 악화되어 주민들의 불편을 초래하였으나, 복개구간과 미복개 구간의 경계에 수문을 설치함으로써 해수의 유입을 차단하였다.

두 하천 모두 평상시 대부분 건천 상태이며, 생태하천 복원을 위해 안정적인 하천 유지 유량 확보가 필요한 하천이므로 초량천은 KTX 금정터널 지하유출수 평균 4천톤/일을 2021년 7월 준공부터, 대연천은 남부하수처리장 내 하수처리수 재이용수 평균 8천 3백톤/일을 2021년 10월 말부터 시운전을 시작하여, 각 하천의 미복개 구간 시작점에서 워터커튼 형식으로 방류하고 있다.

본 연구의 조사지점은 각 하천의 발원지 1개 지점과

미복개 구간 내 상·하류 각 2개 지점을 선정하였으며 (Fig. 1), 대연천의 경우 발원지의 흔적을 찾을 수 없고, 하류부 외 전 구간 복개되어 있어 상류 지천으로 예상되는 한 지점을 선택하여 조사를 시행하였다.

2.1.2 조사기간

조사 시기는 각 하천의 유지용수 방류 전과 후로 나누어 초량천은 2020년 9월부터 2021년 9월까지 총 5회, 대연천 2020년 9월부터 2021년 11월 총 6회 걸쳐 수질 및 생태 조사를 실시하였으며, 두 하천의 유지용수 방류 전, 후의 수질과 수생태 변화 양상을 보기 위해 부산광역시 보건환경연구원의 물환경측정망과 생

물측정망 등의 데이터를 참고하였다.

대연천 상류 지천의 경우, 조사기간 중 대부분이 건천화 상태를 보여 시료 채집이 불가하였으므로 하천 최상류 특성상 수질 및 수생태 군집의 큰 변화가 없을 것으로 예상되어 유지용수 전과 후 시기의 결과를 하나의 데이터로 같음하였다. 그리고 유지용수에 사용되는 원수의 채수는 KTX 금정터널 지하유출수의 경우, 기존 방류되었던 호계천 내 방류구에서 직접 채수하였고, 남부하수처리장 내 하수처리수 재이용수는 유지용수 방류 시운전 중 워터커튼에서 직접 채수하여 분석하였다.

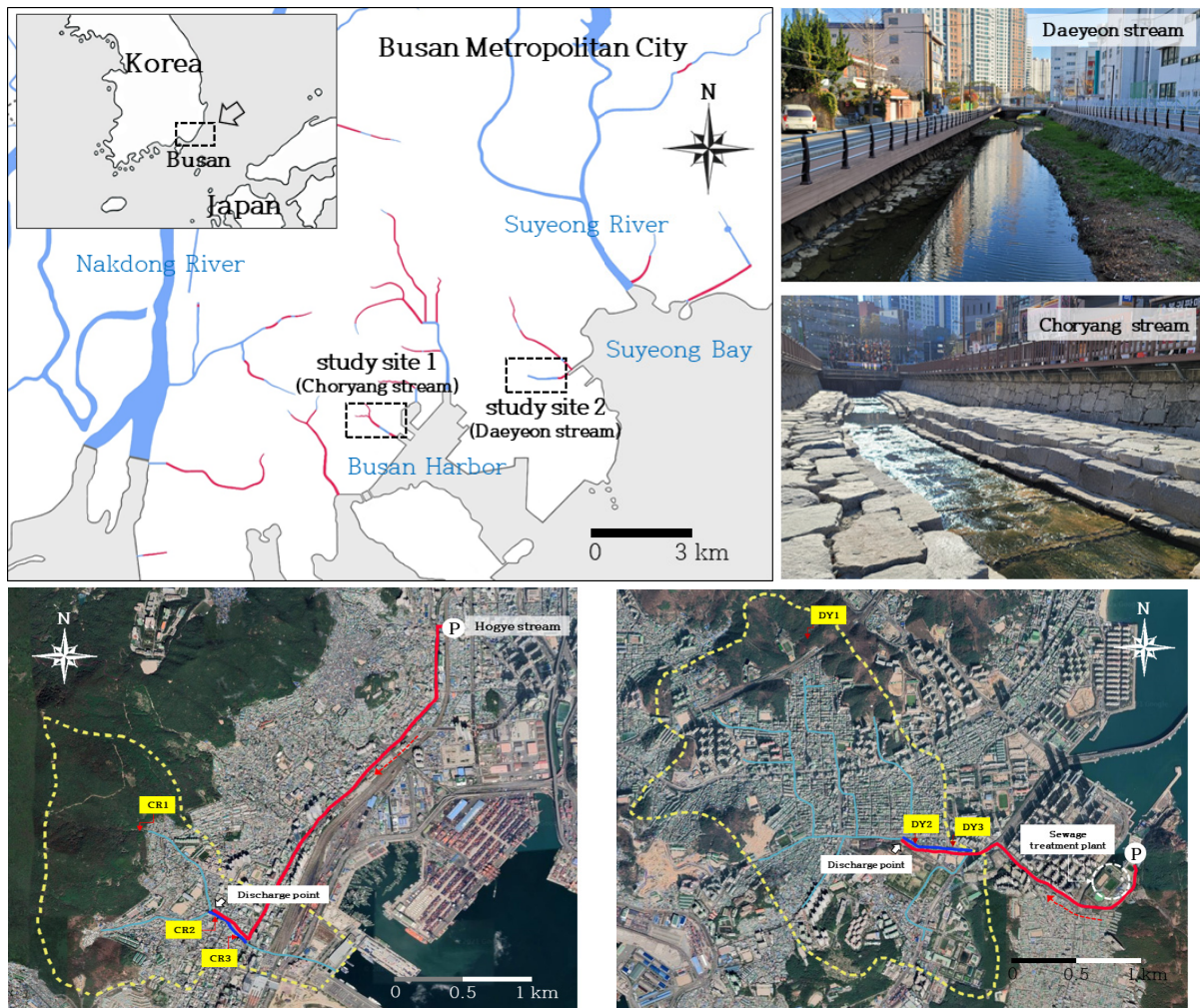


Fig. 1. The map of study sites.

2.2 조사방법

2.2.1 하천 수질 조사

하천 수질 분석 항목 중 pH, DO, 수온, 전기전도도는 현장측정기(YSI, 556MPS)로 현장에서 직접 측정하였으며, BOD, TOC, TN, TP 등은 채수 후 즉시 실험실로 운반하여 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였다.

2.2.2 저서성 대형무척추동물 조사

저서성 대형무척추동물은 생물측정망 조사 및 평가지침⁷⁾에 따라 정량채집망인 Suber Net(30×30 cm, 망목 1 mm)을 사용하여 채집하였으며, 현장에서 고정 후 실험실로 운반하여 Merritt and Cummins⁸⁾ 등의 관련 도감에 의거, 분류하였다. 종 수준까지 분류가 어려운 종은 외부 형태가 확연히 구별되는 개체에 대하여 임의로 상위 단계의 분류군인 과나 속 등의 수준에서 sp.1의 형태로 정리하였다. 또한 저서동물의 군집구조를 파악하기 위해 저서동물 조사자료를 토대로 하여 종 다양성 지수⁹⁾, 우점도 지수¹⁰⁾, 그리고 한국 환경부에서 제시한 저서성 대형무척추동물평가지수(Benthic Macroinvertebrate Index, BMI)를 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 하천 수질

3.1.1 하천 유지용수 수질

초량천의 유지용수는 하천에서 4 km 떨어진 동구 범일동에 위치한 호계천 내 방류되었던 KTX 금정터널 지하유출수를 별도의 수처리 없이 펌프와 관로 시설을 통해 주간 9시간, 평균 4천톤/일이 미복개 시작 구간에서 워터커튼 형식으로 공급되고 있다. 방류수의 BOD는 0.2 mg/L로 하천수질 생활환경기준 ‘매우 좋음’수준을 나타내었으며, DO 8.8 mg/L, TN 3.416 mg/L, TP 0.086 mg/L, TOC 0.7 mg/L을 나타내어 전반적으로 양호한 수질을 보였다.

대연천의 유지용수로 사용되는 남부하수처리장 내 하수처리수 재이용수는 하천에서 2 km 떨어진 남부하수처리장에서 MLE공법과 A2O+MBR공법으로 처리한 혼합수(4:1)를 별도의 총인처리 시설인 용존공기 부상(Dissolved Air Flotation : DAF)시설을 거쳐(Fig. 2), 주간 12시간, 하루 최대 8천3백톤/일이 미복개 시작 구간에서 워터커튼 형식으로 공급되고 있다. 방류수의 BOD는 3.2 mg/L로 하천수질 생활환경기준 ‘보통’수준을 나타내었으며, DO 8.3 mg/L, TN 12.514 mg/L, TP 0.574 mg/L, TOC 5.4 mg/L를 나타내어 영양염류의 농도가 다소 높은 것으로 조사되었다.

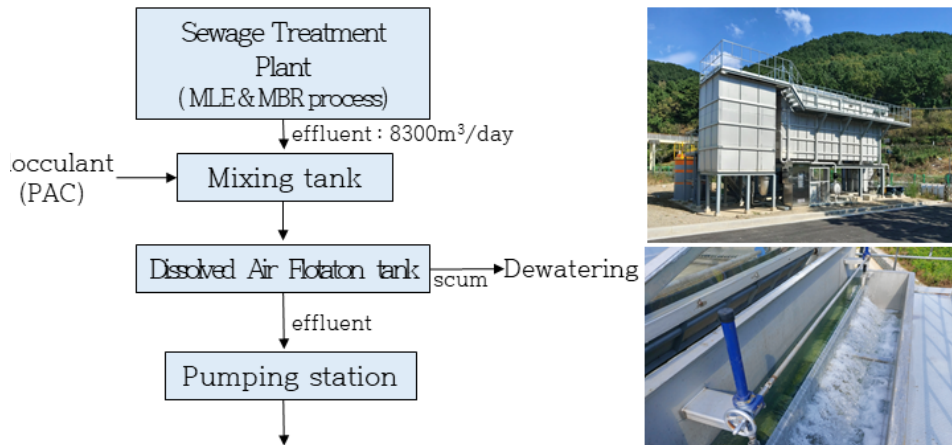


Fig. 2. Main treatment process in Nambu sewage treatment plant(MLE, A2O+MBR, DAF).

Table 1. Water quality of Maintenance water in Choryang and Daeyeon stream

Item	pH	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	TOC (mg/L)
KTX-underground runoff	7.1	8.8	0.2	3.416	0.086	0.7
Nambu sewage treatment water	7.6	8.3	3.2	12.514	0.574	5.4

3.1.2 하천 하류 지점 수질 변화

유지용수 방류 전, 후의 수질 개선 효과를 보기 위해 각 하천의 하류 지점인 CR3와 DY3의 BOD, TOC, TN, TP 농도를 나타내보았다(Fig. 3).

유지용수 방류 전 BOD 평균은 CR3, DY3에서 각각 17.7 mg/L, 15.7 mg/L로 나타나 하천수질 생활환경 기준 '매우 나쁨'수준을 보였으나, 방류 후 7.0 mg/L, 3.1 mg/L로 나타나 각각 '약간나쁨'과 '보통'수준을 보여 두 하천 모두 BOD 농도가 크게 감소된 것을 보였다.

유지용수 방류 전 TOC 평균은 CR3, DY3에서 8.6 mg/L, 6.3 mg/L로 하천수질 생활환경기준 '나쁨'수준을 보였으나, 방류 후 3.0 mg/L로 6.1 mg/L로 나타나 CR3는 ' 좋음'으로 개선된 반면, DY3는 방류 전과 유사한 것으로 나타났다.

유지용수 방류 전 TN 평균 농도는 CR3, DY3에서 각각 11.641 mg/L, 2.282 mg/L, 방류 후 6.430 mg/L 11.638 mg/L로 나타났고, 유지용수 방류 전 TP 평균 농도는 CR3, DY3에서 각각 0.965 mg/L, 0.330 mg/L, 방류 후 0.432 mg/L, 0.583 mg/L로 나타나 유지용수가 방류된 후 CR3의 TN과 TP 농도는 약 2배 감소되어 방류 전에 비해 개선된 수질을 보였으나, DY3는 방류 전 대비 약 2 ~ 5배 증가된 것을 보였다.

위의 결과를 통해 방류 후 CR3의 개선된 수질과 DY3의 BOD, TOC, TN, TP의 농도가 유지용수의 수질과 유사한 값을 보임에 따라 유지용수의 유입이 하천 내 수질에 전반적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3.1.3 하천 구간별 수질 변화

각 하천의 발원지와 미복개 구간의 상·하류 구간의 유지용수 방류 전과 후의 BOD, TOC, TN, TP의 평균 농도 변화 흐름을 나타내었다.

초량천의 발원지 CR1은 유지용수 방류 전 시기에 각 항목의 평균 농도는 BOD 0.4 mg/L, TOC 0.8 mg/L, TN 1.970 mg/L, TP 0.175 mg/L를 보였고, 방류 후 시기에는 각각 평균 BOD 0.4 mg/L, TOC 0.9 mg/L, TN 1.095 mg/L, TP 0.027 mg/L로 나타나 모든 조사기간 동안 매우 양호한 수질을 보였다.

초량천의 미복개 구간의 유지용수 방류 전, 후의 각 항목 농도 변화를 살펴보면, 유지용수 방류 전 BOD 평균 농도는 CR2에서 35.2 mg/L, CR3에서 17.7 mg/L로 하천수질 생활환경기준 '매우나쁨'을 보였으나, 방류 후 CR2와 CR3 모두 평균 7.0 mg/L로 나타나 방류 전에 비해 약 5배 이상 떨어져 '약간나쁨'수준까지 개선된 것을 보였다.

TOC 평균 농도는 유지용수 방류 전 CR2에서 11.7 mg/L, CR3에서 8.6 mg/L를 보였으며, 방류 후 CR2에서 4.5 mg/L, CR3에서 3.0 mg/L로 나타나 약 2배 이상 감소된 것을 보였다.

TN 평균 농도는 유지용수 방류 전 CR2에서 12.991 mg/L, CR3에서 11.641 mg/L를 보였으며, 방류 후 CR2에서 9.955 mg/L, CR3에서 6.430 mg/L를 나타내었고, TP 평균 농도는 유지용수 방류 전 CR2에서 1.207 mg/L, CR3에서 0.965 mg/L를 보였으며, 방류 후 CR2에서 0.809 mg/L, CR3에서 0.432 mg/L로 나타나 전반적으로 유지용수 방류 후 각 항목의 농도가 현저히 감소된 것을 보였다.

초량천 발원지(CR1)는 조사기간 동안 모든 항목에서 양호한 수질을 보였고, 미복개 구간이 시작되는 상류(CR2)에서 급격히 높은 농도를 보이지만 하류(CR3)

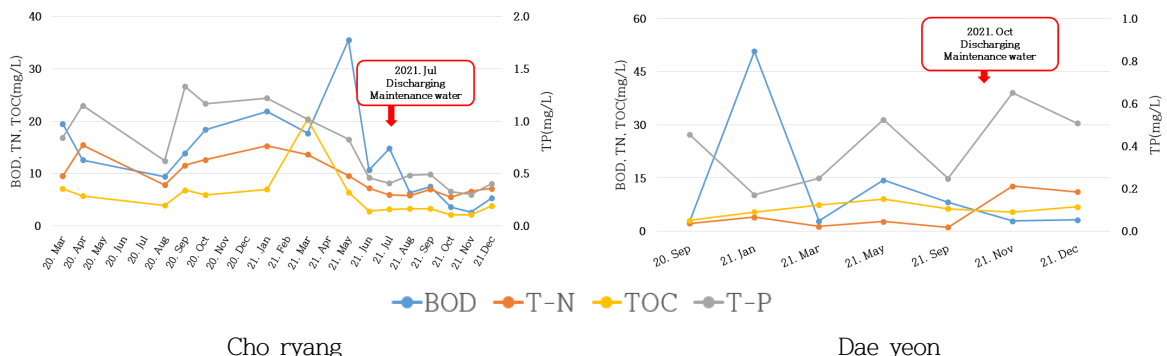


Fig. 3. Average monthly water quality in Choryang and Daeyeon stream.

로 갈수록 전 항목의 평균 농도는 낮아지는 양상을 보였다. 이는 초량천 복개 구간 내 오염원의 유입이 있는 것으로 의심되며, 하천 종단을 따라 위치한 여러 단계의 낙차공 상류 정체구간에서의 부유물 침전효과로 인해 하류로 갈수록 유기물질 등의 농도 감소가 나타난 것으로 판단된다. 또한 4천톤/일의 양호한 수질의 유지용수의 유입이 하천 내 건천화를 해소하고, 정체화로 악화되었던 수질 개선에 도움이 된 것으로 보인다.

에서 6.3 mg/L, DY3에서 6.1 mg/L로 나타나 방류 전, 후 유사한 농도를 보였다.

TN 평균 농도는 유지용수 방류 전 DY2에서 1.843 mg/L, DY3에서 2.282 mg/L을 보였고, 방류 후 DY2에서 11.333 mg/L, DY3에서 11.638 mg/L을 나타내어 방류 후 평균 농도가 약 5 ~ 10배 높아진 값을 보였다.

TP 평균 농도는 유지용수 방류 전 DY2에서 0.305

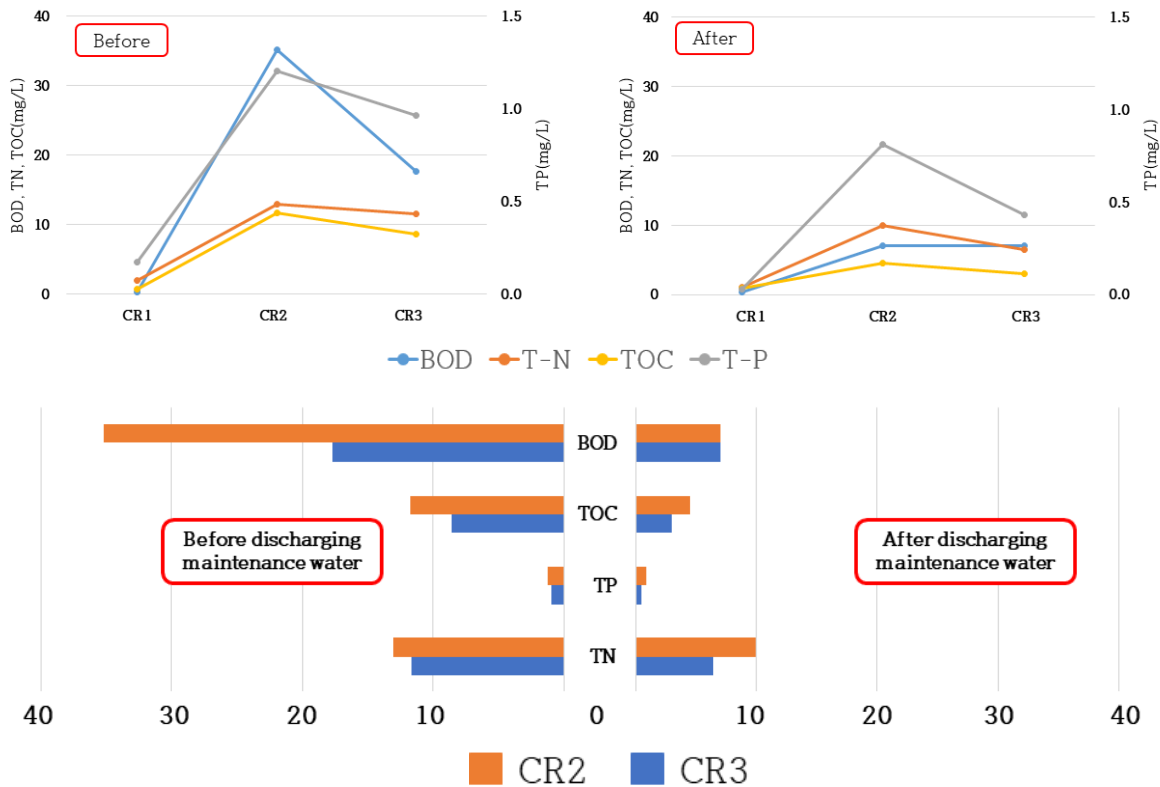


Fig. 4. Average water quality before and after discharging maintenance water in Choryang stream.

대연천의 발원지(DY1)는 BOD 0.5 mg/L, TOC 0.9 mg/L, TN 0.632 mg/L, TP 0.036 mg/L로 나타나 전반적으로 양호한 수질을 보였다.

대연천 미복개 구간의 유지용수 전, 후의 각 항목 농도 변화를 살펴보면, 유지용수 방류 전 BOD 평균 농도는 DY2에서 3.6 mg/L, DY3에서 15.7 mg/L로 하천 수질 생활환경기준 ‘보통’ ~ ‘매우나쁨’ 수준을 보였으나, 방류 후 DY2에서 4 mg/L, DY3에서 3.1 mg/L로 ‘보통’ 수준을 보였고, DY3의 경우 BOD 평균 농도가 약 5배 이상 감소된 것을 보였다.

TOC 평균 농도는 유지용수 방류 전 DY2에서 4.9 mg/L, DY3에서 6.3 mg/L을 보였으며, 방류 후 DY2

mg/L, DY3에서 0.330 mg/L을 나타내었고, 방류 후 DY2에서 0.535 mg/L, DY3에서 0.583 mg/L을 나타내어 방류 후 평균 농도가 약 2배 높아진 값을 보였다.

대연천은 유지용수 방류 전 상류(DY2)에서 하류(DY3)로 갈수록 유기물질의 평균 농도가 높아지는 경향을 보였다가, 방류 후 유사한 농도를 보였으며, 유지용수의 수질 결과와도 유사함을 보였다. 이는 대연천의 건천화 현상으로 발생한 일부 구간의 정체구역과 생활오수의 유입으로 인해 악화되었던 하류 수질이 유지용수의 유입으로 인해 정체구역의 해소와 전반적인 하천 수질에 영향을 미친 것으로 보여진다.

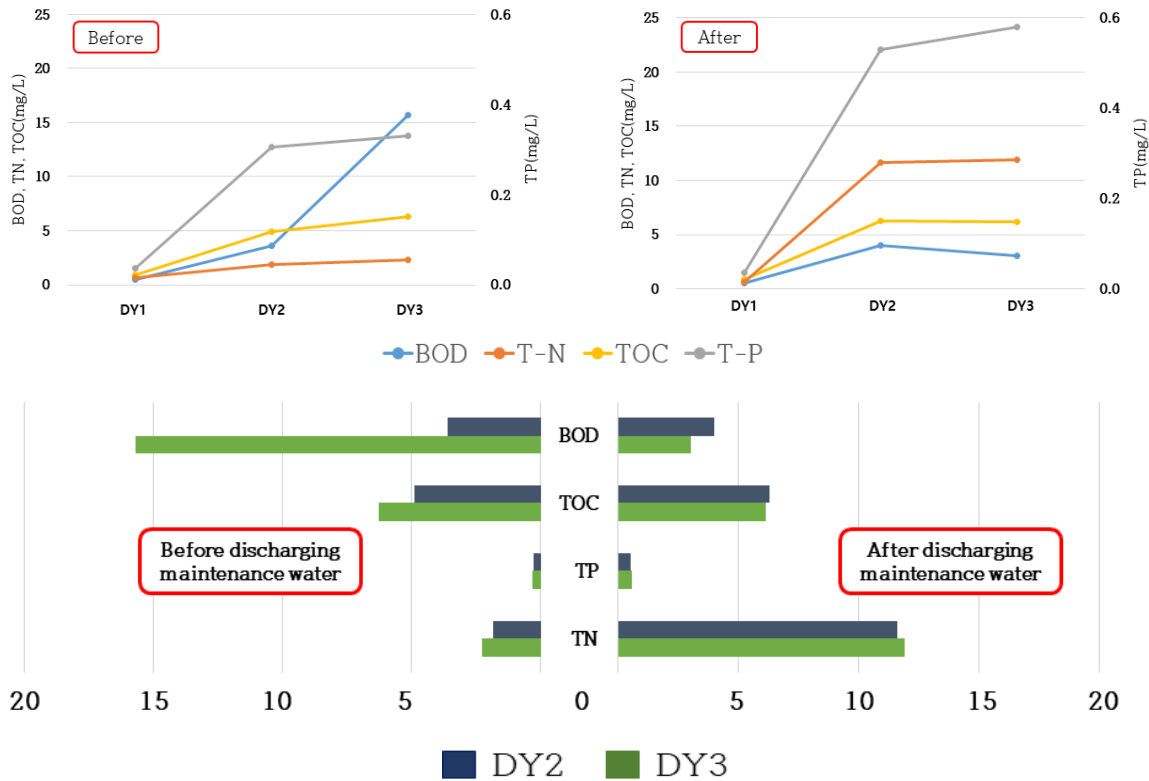


Fig. 5. Average water quality before and after discharging maintenance water in Daeyeon stream.

3.2. 저서성 대형무척추동물 군집

3.2.1 저서성 대형무척추동물 군집 변화

초량천의 저서동물은 총 23,730개체, 137개 종을 채집하고 동정하였으며, 이 중 절지동물문이 12,819개체(54.0%), 연체동물문이 6,993개체(29.5%), 환형동물문이 3,700개체(15.6%), 편형동물 218개체(0.9%)가 채집되었다.

유지용수 방류 전 CR1, CR2, CR3의 평균 개체는 각각 1,200개체, 110개체, 281개체가 채집되었으며, 방류 후 CR1, CR2, CR3의 평균 개체수는 각각 744개체, 7,286개체, 2,547개체로 채집되어 생태하천 복원 구간인 CR2와 CR3의 평균 개체수가 방류 전에 비해 눈에 띄게 증가한 것으로 나타났다.

생태하천 복원 구간의 저서동물 평균 분포를 보면 유지용수 방류 전 CR2와 CR3에서 각각 절지동물문이 72개체(65.5%), 255개체(90.4%), 환형동물문이 29개체(26.4%), 20개체(7.1%), 연체동물문이 9개체(8.2%), 7개체(2.5%)로 나타나 두 지점 모두 절지동물문의 점유율이 높았다. 유지용수 방류 후 CR2, CR3에서 각각 절지동물문이 5,693개체(61.0%), 742개체(29.1%), 연체동물문이 2,048개체(21.9%), 1,342개체(52.7%), 환형동물문이 1,593개체(17.1%), 463개체(18.2%)가 채집되어 CR2에서는 방류 후에도 절지동물문의 점유율이 우세하였으나, 그 비율이 약 4% 감소하였고, CR3에서는 절지동물문의 비율이 60% 이상 감소하였으며, 연체동물문이 50% 이상 증가하

Table 2. Average individuals of benthic macroinvertebrate community before and after discharging maintenance water in Choryang stream

item	Before			After		
	CR1	CR2	CR3	CR1	CR2	CR3
Platyhelminthes	60	-	-	37	-	-
Mollusca	214	9	7	193	2,048	1,342
Annelida	114	29	20	126	1,593	463
Arthropoda	812	72	255	389	5,693	742

여 우점하였다. 이는 방류 전 두 지점에서 우점한 절지동물문의 붉은 깔따구의 개체수가 다소 감소하고, 연체동물문인 원돌이물달팽이의 출현에 의한 것으로 판단된다.

개체, 681개체, 211개체가 채집되어 생태하천 복원 구간인 DY2와 DY3의 평균 개체수는 DY2에서 증가한 반면, DY3는 약간 감소한 것을 보였다.

생태하천 복원 구간의 저서동물 평균 분포를 보면,

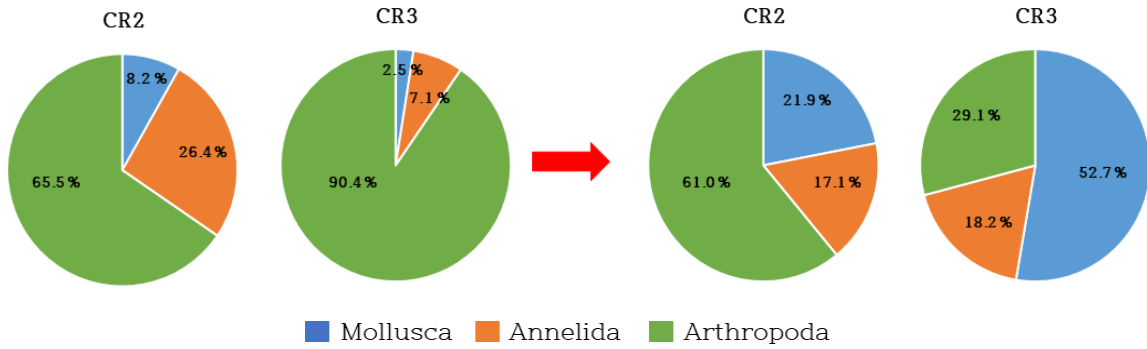


Fig. 6. Benthic macroinvertebrate community composition of Choryang Stream.

Table 3. Average individuals of benthic macroinvertebrate community before and after discharging maintenance water in Daeyeon stream

item	Before			After		
	DY1*	DY2	DY3	DY1*	DY2	DY3
Platyhelminthes	-	-	-	-	-	-
Mollusca	15	5	40	15	11	52
Annelida	0	271	410	0	137	52
Arthropoda	1326	74	191	1326	533	107

DY1* : Replaced with one data by dryness

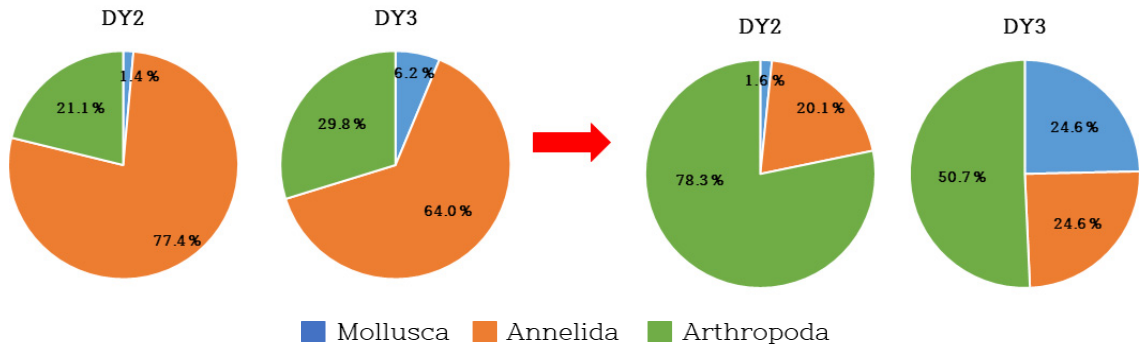


Fig. 7. Benthic macroinvertebrate community composition of Daeyeon Stream.

대연천의 저서동물은 총 8,178개체, 93개 종을 채집하고 동정하였으며, 이 중 환형동물문이 4,274개체(52.3%)로 가장 높았고, 절지동물문 3,556개체(43.5%), 연체동물문 348개체(4.2%)로 채집되었다.

유지용수 방류 전 DY1, DY2, DY3의 평균 개체수는 각각 1,341개체, 350개체, 641개체가 채집되었으며, 방류 후 DY1, DY2, DY3의 평균 개체수는 각각 1,341

유지용수 방류 전 DY2와 DY3에서 각각 환형동물문이 271개체(77.4%), 410개체(64.0%)로 높은 점유율을 보였고, 절지동물문이 74개체(21.1%), 191개체(29.8%), 연체동물문이 5개체(1.4%), 40개체(6.2%)의 분포를 보였다. 방류 후 DY2, DY3에서 각각 절지동물문이 533개체(78.3%), 107개체(50.7%)로 높은 점유율을 보였고, 환형동물문이 137개체(20.1%), 52개체

(24.6 %), 연체동물문이 11개체(1.6 %), 52개체(24.6 %)를 보여 유지용수가 방류 후 두 지점 모두 환형동물문의 비율이 감소하고, 절지동물문의 비율이 현저히 증가하였다(Fig. 7). 이는 방류 전 두 지점에서 우점한 환형동물문의 실지렁이류 개체수가 현저히 감소하고, 절지동물문의 깔따구류의 개체수 증가에 의한 것으로 보여진다.

3.2.2 생태지수 변화

초량천의 유지용수 방류 전 평균 종수는 CR1, CR2, CR3에서 각각 14종, 3종, 4종으로 나타나 CR1에 비해 상대적으로 CR2와 CR3에서 빈약한 종수를 보였으나, 방류 후 평균 13종, 8종, 11종으로 나타나 CR1의 종수는 조사기간 동안 큰 변화 없이 일정함을 보였으며, 생태복원 구간인 CR2, CR3에서 평균 종 수가 2배 이상 증가한 것을 보였다.

종 다양성 지수의 경우 CR1, CR2, CR3에서 유지용수 방류 전 각각 평균 2.322, 1.088, 1.254로 나타났고, 방류 후 평균 2.653, 2.074, 1.886으로 나타나 CR1은 조사기간 동안 유사한 값을 보였으나, CR2, CR3에서 종 다양성 지수가 증가된 것을 보였다.

우점도 지수는 유지용수 방류 전 CR1, CR2, CR3에서 각각 평균 0.681, 0.64, 0.838였으나 방류 후 평균 0.572, 0.627, 0.788로 나타나 약간 감소한 값을 보였다.

저서성 대형 무척추동물평가지수(이하 BMI)는 유지용수 방류 전 CR1, CR2, CR3에서 각각 평균 81.2, 17.2, 22.4를 보였고, 방류 후 평균 76.8, 27.5, 28.8을 보였다. CR1은 조사기간 동안 BMI 등급 ‘ 좋음 ’ ~ ‘ 매우 좋음 ’ 을 나타내었고, 생태하천복원 사업 구간인 CR2, CR3에서 방류 전, 후 모두 BMI 등급은 ‘ 매우나쁨 ’ 수준을 나타내었다. 하지만 BMI 지수의 증가와 방류 전·후 눈에 띄는 수질개선과 생물 종수 및 개체수 증가를 보임에 따라 유지용수의 지속적인 방류 시 BMI 지수는 보다 개선 될 것으로 보여지며, 이에 따른 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

대연천 유지용수 방류 전 평균 종수는 DY1, DY2, DY3에서 각각 12종, 5종, 6종으로 나타났으며, 방류 후 평균 12종, 9종, 9종으로 나타나 생태하천 복원 구간인 DY2, DY3의 평균 종수가 소폭 증가한 것으로 나타났다.

종 다양성 지수의 경우 DY1, DY2, DY3에서 유지용수 방류 전 각각 평균 1.778, 0.969, 1.049 로 나타났고, 방류 후 평균 1.778, 1.921, 2.724로 나타나 DY2와 DY3의 종 다양성 지수가 약 2배 이상 증가한 것으로 나타났다.

우점도 지수는 유지용수 방류 전 DY1, DY2, DY3에서 각각 평균 0.793, 0.753, 0.857였으나, 방류 후 평균 0.793, 0.734, 0.474로 나타나 DY2에서는 유사한

Table 4. Average ecological indexes before and after discharging maintenance water in Choryang stream

Items	Before			After		
	CR1	CR2	CR3	CR1	CR2	CR3
Species	14	3	4	13	8	11
Individuals	1,200	110	281	744	9,333	2,547
Diversity	2.322	1.088	1.254	2.653	2.074	1.886
Dominance	0.681	0.64	0.838	0.572	0.627	0.788
BMI	81.2	17.2	22.4	76.8	27.5	28.8

Table 5. Average ecological indexes before and after discharging maintenance water in Daeyeon stream

Items	Before			After		
	DY1*	DY2	DY3	DY1*	DY2	DY3
Species	12	5	6	12	9	9
Individuals	1,341	350	614	1,341	681	211
Diversity	1.778	0.969	1.049	1.778	1.921	2.724
Dominance	0.793	0.753	0.857	0.793	0.734	0.474
BMI	82.7	18.7	18.5	82.7	25.5	23.9

DY1* : Replaced with one data by dryness

값을 보였고, DY3에서 약 2배 감소 한 값을 보였다. BMI 지수는 방류 전 DY1, DY2, DY3에서 평균 82.7, 18.7, 18.5를 보였고, 방류 후 평균 82.7, 25.5, 23.9을 보였다. 조사기간 동안 DY1에서는 BMI 등급은 ‘매우 좋음’ 등급을 보였고, DY2와 DY3에서는 초량천과 마찬가지로 방류 전, 후 모두 BMI 등급은 ‘매우나쁨’ 수준을 나타내었으나, BMI 지수의 증가와 방류 후 개선된 수질과 하류부 정체 현상의 해소에 따라 BMI 지수는 점차 개선될 것으로 보여진다. 더불어 방류수의 영양물질 농도의 감소가 병행된다면 저서성 대형무척추동물 군집의 다양성과 건강성이 증진될 것으로 판단되며 이에 따른 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 보인다.

두 하천의 생태하천복원 사업 구간의 방류 전, 후의 수질과 저서동물 군집의 생태지수 변화를 보면, 유지용수 방류 후 BOD 수질등급이 ‘매우나쁨’에서 ‘약간나쁨’ ~ ‘보통’으로 개선됨과 더불어 종 다양성의 증가, 우점도 감소를 보였는데, 이는 오염물질이 유입되었을 때 생물군집의 형태는 종 다양성의 감소, 우점도 증가의 방향으로 변하는 양상을 보인다¹¹⁾는 결과에 상응하는 결과를 보였다. 또한 방류 전과 후의 BMI 등급은 ‘매우나쁨’ 수준으로 나타났으나 BMI 지수가 소폭 상승한 것으로 보아 앞으로의 지속적인 유지용수 방류가 생물 건강성에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.1.3 우점종 변화

초량천 발원지(CR1)에서 유지용수 방류 전 깔따구 sp.1(32.9 %)와 옆새우 속(17.6 %)이 우점하였고, 방류 후 옆새우 속(32.9 %)과 다슬기(24.4 %)가 우점하여 1 ~ 2급수(매우 좋음 ~ 좋음)에 상응하는 지표생물의 출현을 보였다.

생태하천 복원 구간인 CR2, CR3에서 유지용수 방류 전 우점종은 모두 붉은 깔따구로 전체 저서동물 중 각각 49.6 %, 40.9 %로 우점하였고, 실지렁이(25.2 %)와 깔따구 sp.1(9.4 %)이 아우점하여 두 지점 모두 5급수(고도의 오염수)에 출현하는 생물들이 주 우점종으로 출현하였다. 유지용수 방류 후 원돌이물달팽이의 개체수 증가로 CR2에서 붉은 깔따구(40.9 %), 원돌이물달팽이(21.9 %) 순으로 우점하였고, CR3에서 원돌이물달팽이(52.3 %), 붉은 깔따구(15.3 %) 순으로 우점하였다.

유지용수 방류 전 대표적인 오염수역의 지표종인 붉은 깔따구(오탁치^① : 3.4)와 실지렁이(오탁치 : 3.5)가 우점 출현하여 전형적인 오염된 도시하천의 모습을 보였으나, 방류 후 그 비율이 감소하고 상대적으로 양호한 수역의 지표종인 원돌이물달팽이(오탁치 : 2.7)의 비율이 증가함에 따라 악화된 수질이 어느정도 완화된 것으로 판단된다.

대연천 발원지(DY1)에서는 깔따구 sp.1(62.2 %)이 최우점하였고, 먹파리 속(17.1 %)이 아우점하여 2급수(약간 좋음)에 상응하는 지표생물의 출현을 보였다.

생태하천 복원 구간인 DY2, DY3에서 유지용수 방

Table 6. Dominant and subdominant species in Choryang stream

Items		Dominant species	Subdominant species	Individuals (inds/m ²)
Before mainten water	CR1	Chironomidae sp.1(깔따구 sp.1) (32.9 %)	<i>Gammarus</i> sp.(옆새우 속) (17.6 %)	606
	CR2	Chironomidae sp.4 (붉은 깔따구) (49.6 %)	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이) (25.2 %)	82
	CR3	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (74.5 %)	Chironomidae sp.1(깔따구 sp.1) (9.4%)	236
After mainten water	CR1	<i>Gammarus</i> sp.(옆새우 속) (32.9 %)	<i>Semisulcospira libertina</i> (다슬기) (24.4 %)	744
	CR2	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (40.9 %)	<i>Physa acuta</i> (원돌이물달팽이) (21.9 %)	5,856
	CR3	<i>Physa acuta</i> (원돌이물달팽이) (52.3 %)	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (15.3 %)	2,547

① 오탁치 : 유기물질에 대한 저서성 대형무척추동물의 내성치 (범위 : 0.0~0.4) 오탁치가 낮을수록 청정한 상태를 의미

류 전 우점종은 실지렁이가 전체 저서동물 중 77.1 %, 63.4 %로 우점하였고, 붉은 깔따구가 각각 13.2 %, 14.5 %로 아우점하여 두 지점 모두 5급수(고도의 오염수)에 출현하는 생물들이 우점종으로 나타났다. 유지용수 방류 후 DY2, DY3에서 각각 붉은 깔따구가 48.9 %, 26.3 %로 우점하였고, DY2에서 깔따구 sp.1(24.5 %), DY3에서 원돌이물달팽이(21.1 %)가 아우점하였다(Table 6).

초량천과 마찬가지로 유지용수 방류 전 붉은 깔따구와 실지렁이가 우점 출현하여 오염된 도시 하천의 모습을 보였으나, 방류 후 실지렁이의 급격한 개체수 감소와 비교적 양호한 수역에서 나타나는 깔따구 sp.1(오탁치 : 1.7)과 원돌이물달팽이(오탁치 : 2.7)의 출현으로 건천화로 인해 악화되었던 수질이 어느정도 완화된 것으로 보이며, 앞으로의 지속적인 유지용수 방류가 긍정적인 영향을 줄 것으로 보여진다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 부산광역시에서 추진 중인 생태하천 복원 사업 구간 중 유지용수가 방류되는 초량천과 대연천의 수생태 변화 특성을 연구하기 위하여, 각 하천에 방류하는 유지용수와 상류 발원지 1개 지점, 미복개구간 상·하류 2개 지점의 수질과 저서동물 군집을 조사하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 하천에 방류 되는 유지용수를 분석 한 결과, 초량천의 KTX 금정터널 지하유출수의 BOD 기준 하천수질 생활환경 등급은 '매우 좋음'수준을 나타내었으며, TN, TP, TOC 등의 항목에서도 전반적으로 양호한 수질을 보였다. 대연천의 남부하수처리장 하수처리수 재이용수의 BOD 기준 하천수질 생활환경 등급은 '보통'수준을 나타내어 양호하였으나, TN, TP, TOC 등의 영양염류 항목의 농도가 다

Table 7. Dominant and subdominant species in Daeyeon stream

Items		Dominant species	Subdominant species	Individuals (inds/m ²)
Before maintenance water	DY1*	Chironomidae sp.1(깔따구 sp.1) (62.2 %)	<i>Simulium</i> sp.(먹파리 속) (17.1 %)	1,341
	DY2	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이) (77.1 %)	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (13.2 %)	350
	DY3	<i>Limnodrilus gotoi</i> (실지렁이) (63.4 %)	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (14.5 %)	641
After maintenance water	DY1*	Chironomidae sp.1(깔따구 sp.1) (62.2 %)	<i>Simulium</i> sp.(먹파리 속) (17.1 %)	1,341
	DY2	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (48.9 %)	Chironomidae sp.1(깔따구 sp.1) (24.5 %)	681
	DY3	Chironomidae sp.4(붉은 깔따구) (26.3 %)	<i>Physa acuta</i> (원돌이물달팽이) (21.1 %)	211

DY1* : Replaced with one data by dryness

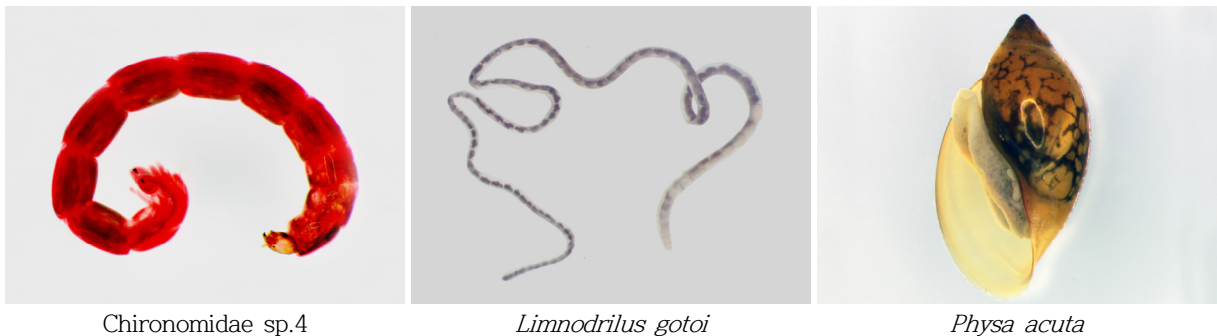


Fig. 8. Dominant species of in the Study site.

소 높은 것으로 조사되었다.

2. 유지용수 방류 전, 두 하천 모두 BOD 기준 하천수질 생활환경 등급은 '매우나쁨'수준을 보였으나, 방류 후 초량천은 '약간나쁨', 대연천은 '보통'수준을 보여 BOD 농도가 약 2 ~ 5배 이상 감소 된 것을 보였다. 초량천의 TN, TP, TOC 농도는 유지용수 방류 후 약 2배 이상 감소 되어 수질의 개선을 보였으나, 대연천은 방류 전에 비해 1 ~ 5배 이상 증가 되었는데, 이는 하천에 방류되는 남부하수처리장 하수처리수 재이용수의 수질과 유사한 것으로 나타나 유지용수의 유입이 하천 내 수질에 전반적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다.
3. 유지용수 방류 전과 후, 두 하천 모두 BMI등급 '매우나쁨'수준을 보여 BOD 기준 하천수질 생활환경 등급에 비해 저서생물의 건강성 평가는 다소 낮은 등급을 나타내었으나, BMI 지수가 초량천, 대연천 모두 방류 후 최대 1.5배까지 증가하였고, 생물 종수와 개체수 증가, 종다양성 및 우점도의 개선을 보였다. 또한 우점적으로 출현하던 오염지표생물인 붉은 갈따구와 실지렁이의 비율이 감소 됨에 따라 유지용수의 지속적인 방류 시 수생태 건강은 개선될 것으로 보여지며, 수생태계의 변화는 충분한 시간을 요하므로 이에 따른 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 보여진다.
4. 대부분의 시기에 건천화를 보이는 두 하천에 유지용수를 방류함으로써 건천화로 인해 발생하는 정체 구역의 해소와 하천 내 유입되는 오염원의 희석을 꾀할 수 있으나, 건강한 하천 생태계 유지를 위하여 첫째, 생활하수 및 비점오염원 등 하천으로 유입되는 오수의 차단이 무엇보다 중요하며, 둘째, 높은 영양염류의 유입은 각종 조류 양생 가능성이 있으므로 방류되는 유지용수의 TN, TP와 같은 영양염류에 대한 효과적인 저감 방안이 세워져야 할 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

- 1) 송병화, 양병이, “주민참여를 통한 도시복개하천의 환경친화적 복원방향설정에 관한 연구(과천 양재천 복개하천 복원사업을 사례로)”, 한국환경복원기술학회, 9(2), pp.33~44(2006).
- 2) 김필재 외 4, “경안천의 하천복원 사업 전·후 저서성 대형무척추동물 군집구조 비교 분석”. 한국물환경학회지, 32(1), pp.15~22(2016).
- 3) 박흥기 외 3, “낙동강 유지용수 공급 후 온천천의 수질 및 생물변화 특성”, 한국생명과학회, 22(8), pp.1041~1045(2012).
- 4) 이승원 외 2, “도심하천 복원 전·후의 생태적 특성 비교”, 한국환경기술학회지, 15(4), pp.255~262(2014).
- 5) 최준길, 이황구, “저서성 대형무척추동물을 이용한 수생태계 평가 방법의 소개” 물과 미래, 45(12), pp.29~35(2012).
- 6) 원두희 외 5, “저서성 대형무척추동물을 이용한 한국오수생물지수의 개발과 생물학적 하천환경평가 적용”, 한국물환경학회, 22(5), pp.768~783(2006).
- 7) 국립환경과학원, 생물측정망 조사 및 평가지침, 국립환경과학원 공고 제2017-439호(2017).
- 8) Merritt, R.W. and K.W. Cummins, An introduction to the aquatic insects of North(1996).
- 9) Pielou, E. C., An introduction to mathematical ecology. Wiley-Interscience, New York(1969)
- 10) Simpson, E.H., Measurement of diversity. Nature 163:688(1949).
- 11) 손정원, 홍정희 “부산 대천천의 저서성 대형무척추동물의 군집구조”, 환경과학학회지, 29(2), pp.18~196(2010).
- 12) 윤상훈 외 9, “도심하천 유지용수의 저서성 대형무척추동물 군집에 대한 영향 연구”, 한국환경생태학회 학술대회 논문집, 26(2), p111(2016).
- 13) 이승원 외 2, 도심하천 복원 전·후의 생태적 특성 비교. 한국환경기술학회지, 15(4), pp.255~262(2014).
- 14) 송병화, 양병이, “주민참여를 통한 도시복개하천의 환경친화적 복원방향설정에 관한 연구(과천 양재천 복개하천 복원사업을 사례로)”, 한국환경복원기술학회, 9(2), pp.33~44(2006).
- 15) Merritt, R.W. and K.W. Cummins., “An introduction to the aquatic insects of North America”. 3rd. ed. Kendall/Hunt Publ. Co.(1996).
- 16) Tiemann, J.S., Gillette, D. P., Wildhaber, M. L., and Edds, D. R., “Effects of Lowhead Dams on Riffle-Dwelling Fishes and Macroinvertebrates in Midwestern River”,

Transaction of the American Fisheries Society, 133, pp.705~717.(2004).

17) Williams, D. D. and Feltnate, B. W., *Aquatic*

Insects, Division of Life Siences, Scarborough Campus, University of Toronto, CAB International, Canada(1992).