

생태하천 복원 후 모니터링과 적응관리

- 안양시 학의천을 중심으로 -

최정권¹⁾ · 최미경²⁾ · 최철빈³⁾

¹⁾ 가천대학교 조경학과 · ²⁾ 충남대학교 국제수자원연구소 · ³⁾ 가천대학교 대학원 조경학과

Follow-up Monitoring & Adaptive Management after Ecological Restoration for the Stream

- Focused the Hakui Stream in Anyang City -

Choi, jungkwon¹⁾ · Choi, mikyung²⁾ and Choi, cheolbin³⁾

¹⁾ Dept. of Landscape Architecture, Gachon University,

²⁾ International Water Resources Research Institute, Chungnam National University,

³⁾ Dept. of Landscape Architecture, Graduate School, Gachon University.

ABSTRACT

Recent years, nationwide projects for ecological restoration are implemented with emerging issues on the stream ecosystem. In order to enhance effectiveness of the ecosystem restoration and reduce negative impact, the appraisal of effectiveness through the follow-up monitoring and the adaptive management process are executed in consecutive phase. In this study, planning phase, monitoring and adaptive management in Hakui stream which is part of An Yang stream restoration project is introduced as representative ongoing case of effective adaptive management. The aim of this study is to verify the adaptive management process and suggest direction of effective restoration. Restoration project of Hakui stream resulted in increasing number and diversity of species (vegetation, fish, bird, invertebrates, amphibian and reptilia) according to monitoring from 2004 to 2013, and enhancing natural river landscape by evaluation of river naturalness among 2001(before restoration), 2007 (after), 2015

First author : Choi, jungkwon, Dept. of Landscape Architecture, Gachon University,

Tel : +82-31-750-5288, E-mail : choijk@gachon.ac.kr

Corresponding author : Choi, mikyung, International Water Resources Research Institute, Chungnam National University,

Tel : +82-42-821-7745, E-mail : choi.mk1981@gmail.com

Received : 30 October, 2015. **Revised** : 28 December, 2015. **Accepted** : 30 December, 2015.

(recent). However, excessive vegetation expansion or sediment deposition on channel over time caused unexpected results such as terrestrialization or degradation of habitats. Adaptive management action such as removing disturbance species (*Humulus japonicus*)(2007), coppicing willow (2007), release of march snail (2007), creation of wetland (2014) were implemented based on monitoring results. And then appraisal of management action was discussed.

Key Words : *Stream restoration, Implementation, Uncertainty, Post-project appraisals.*

I. 서 론

1990년대 중반부터 하천생태계의 중요성이 부각되면서 지난 20년간 생태계 복원을 목적으로 하는 자연형 하천정비 사업이 전국적으로 광범위하게 진행되어 왔다. 하지만 하천생태계는 그 구성요소간의 상관관계가 복잡하고 홍수와 가뭄 같은 유황변화에 연동하여 지속적으로 변화하는 교란생태계이므로 복원성과에 있어 불확실성을 가진다(Lee, 2011). 또한 공사 과정에서 인위적 교란 발생이 불가피하여 하천생태계에 악영향을 줄 수 있고, 공사 직후 초기 정착 단계에서 의도치 않은 생태적 변화를 수반할 가능성도 있다. 따라서 생태복원의 유효성 향상, 성과의 불확실성을 보완, 부정적 영향 경감을 위해 정기적인 모니터링을 통한 평가와 그에 따른 적응관리 과정이 순차적으로 진행되어야 한다(Choi, 2013).

적응관리(Adaptive Management)란 복잡하고 불확실성이 큰 환경에 대한 관리에 있어 순환적 접근방법으로(Jacobson, 2003), 복원 실행후의 모니터링과 유효성 평가로부터 습득한 현장지식을 근거로 지속적 관리·개선을 해나가는 체계적인 과정이다(Nyberg, 1999). 일본에서는 적응관리를 순응관리라 명명하며 자연재생사업에 있어서 불확실성을 대처하기 위한 수법이라고 정의한다(The Ecological Society of Japan, 2005). 미국 캘리포니아의 생태하천 복원사업에서는 유효성 증진을 위해 실행 후 평가(Post-Project

Appraisals)를 정례화 하고 있다 (Kondolf, 2002). 하천연구를 선도하면서 자연형 하천 연구성과를 축적하고 있는 한국건설기술연구원에서는 적응관리란, 하천사업에 대한 사후 관리방안의 하나로써 복원사업의 초기단계에 예상하지 못했던 불확실성과 위험성이 사후에 발생할 수 있으므로 반드시 사후 모니터링 및 평가를 정기적으로 실시하여 관련 환경정보를 구축함으로써, 이를 반영한 효율적인 관리 개선이 가능하도록 하는 순환형 관리방법이라고 정의하면서(KICT, 2002), 적응관리의 중요성을 언급한 바 있다.

복원사업 이후의 불확실성 대처와 복원 효과 증진을 위해서, 이러한 순환형 적응관리와 개선이 관리방안의 일환으로 필요함에도 불구하고, 현재 생태복원 사업에서는 일반적인 토목공사의 관행적 유지관리 방식을 적용하고 있다. 일반적인 토목공사의 실행과정에 따른 준공 후 유지관리는 준공시점의 물리적 상태를 고정시켜 관리하는 방식이기 때문에 지속적으로 변화하는 하천생태계의 특성을 반영하는 데는 여러 한계점을 드러내고 있다. 또한, 생태복원 사업 이후 지속적인 모니터링과 적응관리가 이루어지고 못하고 있고, 사업의 평가 및 적응관리에 관한 연구가 진행되고 있으나 (Lee et., 2012; An, 2009; Lee, 2015), 실제로 적응관리의 실행은 이루어지고 있지 않는 실정이다.

본 연구에서는 생태하천복원의 효용성을 개선시키기 위한 지속가능한 적응관리의 실제 사례를 제시함으로써, 복원사업에서의 지속적인

하천 관리와 향후 하천생태복원 사업의 방향성을 제시하고자 한다. 복원사업 이후부터 현재까지 지속적인 모니터링과 그에 따른 관리가 적극적으로 이루어지고 있는 대표적인 하천인 안양천의 지천 학의천을 대상으로, 계획과정과 함께 복원 후 모니터링 과정을 시계열로 서술하고, 모니터링 결과와 그에 따른 적응관리 실행 사례 및 실행된 적응관리방안에 관한 평가를 진행하였다.

II. 연구내용 및 방법

1. 연구대상지

본 연구의 공간적 범위는 경기도 안양천의 지류인 학의천 중하류의 안양시계 내 구간이다 (Figure 1). 대표적 도시하천인 학의천은 의왕시 백운산(564.2m)에서 발원하여 백운저수지를 거쳐 안양시계를 가로지르는 유로연장 11.6km의

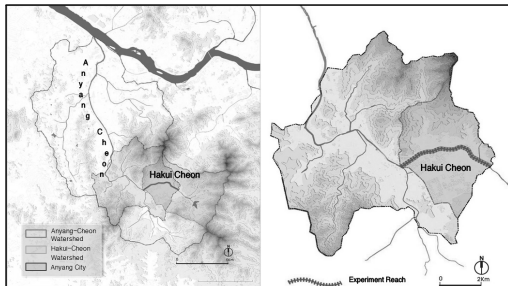


Figure 1. Anyang stream watershed & Hakui stream corridor.

지방 하천이다. 학의천은 산림 및 농지, 공장이 밀집된 도심부를 지나 주거지역에 이르는 다양한 주변 토지이용과 정비 상태를 보이는 전형적인 도시하천이며, 평촌신도시 조성 시 직강화되면서 인공 수로화 된 하천으로서 생태복원이 시급한 하천구간이었다. 2000년도에 수립된 안양천 살리기 사업에서 초기단계인 2001, 2002년에 학의천 시범구간이 복원사업으로 가장 먼저 실행되었다(Figure 2). 이후 사후 모니터링을 통해 초기 복원 성과와 수리적 안정성을 확인한 후 2003년부터 2010년까지 5개소 유입지천을 대상으로 단계별로 복원사업을 전개하였다(Anyang city, 2001).

2. 학의천 자연형 하천 사업

학의천 자연형 하천 시범사업은 친환경적 자연형 하천공법의 적용으로 하천생태계를 재생하고, 자연에 가까운 하천경관의 조성을 목적으로 2001년 7월 공사를 시작하여 2002년 9월에 완공하였다. 시범사업구간은 내비산교에서 학운교까지 530m 구간이다. 시범사업의 내용으로는 자연형 호안정비, 낙차공 철거 및 개량 6개소, 수제, 여울, 천변습지조성, 하중도 설치 2개소, 징검다리 설치 6개소 등을 들 수 있다(Figure 3). 시범사업 시행을 통해 검토된 공법과 하천정비 기본방침을 바탕으로 2003-4년에 걸쳐 시범사업 구간을 포함한 학의천 안양시계 내의 4.5km

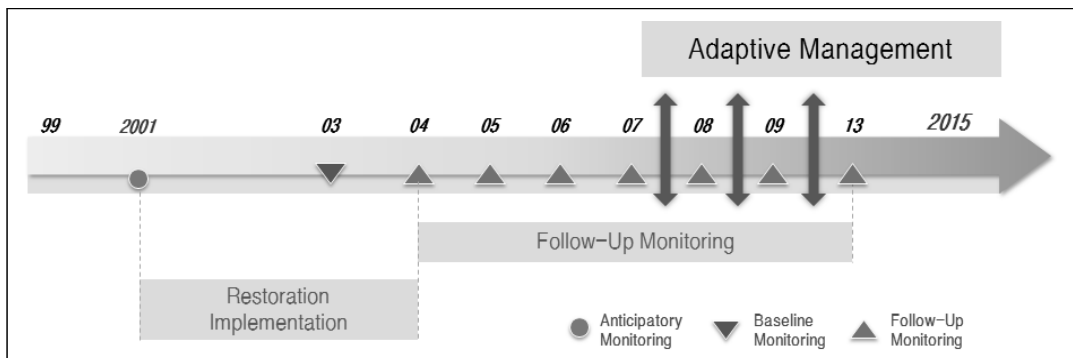


Figure 2. The process of restoration project in Hakui stream.

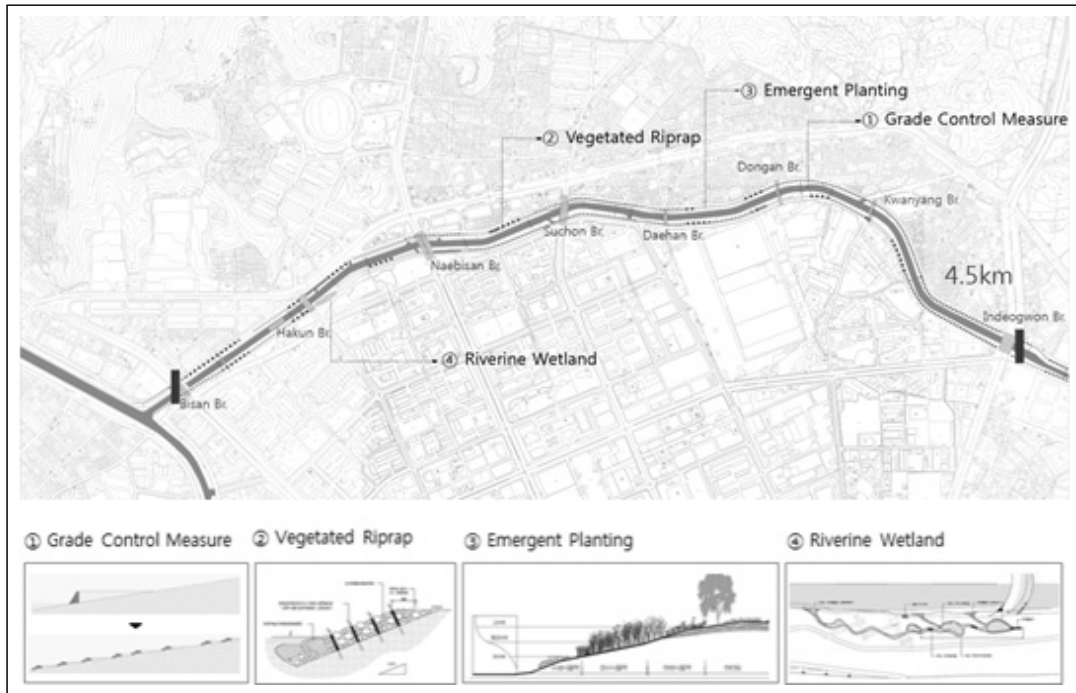


Figure 3. Restoration implement in Hakui stream.

구간의 저수호안을 자연형 호안으로 정비하였다. 또한, 사업구간 내 콘트리트 낙차공을 제거하고 다단계 자연형 낙차공, 여울과 소, 수제, 거석, 하중도 등의 하도 내 공법을 적용하고, 하류구간에 위치한 학운교 상류에 수질정화 및 생물서식환경 형성을 위해 고수부지의 지반고를 낮추고 하천수를 유입하여 천변습지를 조성, 호안에는 갯버들을 식재하여 어류, 조류의 은신처로 사용할 수 있게 하였다. 학의천 시범사업은 다양한 공법을 통해 공법별 목표 달성뿐만 아니라, 다양한 공법을 토대로 학의천의 생물다양성을 높이는 것을 목표로 하였다(Table 2)(Anyang city, 2001).

3. 하천자연도평가와 사후모니터링

2007년도에 식생 자료와 경관 자료를 바탕으로 학의천 4.5km구간의 하천자연도 평가가 실시되었다(Hong, 2007). Hong(2007)의 연구는 기존의 물리적 요소와 구조적 질을 고려하는 경관

적인 자연도 평가뿐만 아니라, 어류, 조류의 종 다양성과 식생피복도 및 귀화식물의 피복도 등의 항목을 추가하여, 종합적인 자연도 평가를 수행하였다 (총 17가지의 세부항목에 대해 1~5 등급으로 구분). 또한, 일반적으로 일정 구간내 구간 전체의 횡단과 종단에 대하여 진행되는 하천 자연도 평가 (Jo, 1997; Jung, 1996)와는 다르게, 횡단면을 세부적으로 구분 (좌안과 우안, 저수로로 구간을 분류하였고, 좌안과 우안을 다시 제내지, 제방사면, 고수부지 등으로 세분화)하여 소규모 구역의 평가, 관리가 가능한 종합 하천 자연도 평가가 가능하도록 하였다. 따라서 본 연구에서는 시간에 따른 하천 경관 및 자연성의 변화를 설명하기 위하여 2007년도 Hong(2007)의 학의천 하천자연도 평가 기준을 이용하여, 하천정비 전(2001년), 최근(2015년) 자연도 평가를 실시하여 하천 변화를 비교하였다. 2001년의 자연도평가를 위해서는, 당시의 경관사진과 2001년 이전의 생태계자료(Anyang city, 2001)를 이

용하였다. 2015년도의 자연도 평가는 2015년 직접 촬영한 경관 사진과 가장 최근의 자료인 2011년 생물상(Anyang city, 2013)를 이용하였다. 본 연구에서는 학의천 전 구간을 100m 간격으로 나누어 Hong(2007)의 기준에 맞추어 1~5등급

으로 평가 후, 크게 좌안과 우안(제내지, 제방, 고수부지), 저수로 (저수호안, 하도 내)를 기준으로 세부항목의 등급을 평균하여 수치화한 것으로 경관 변화과정을 살펴보았다. 등급을 수치화 한 것은 경관의 변화를 상대적으로 평가하기

Table 1. Landscape process of Hakui stream landscape and the assessment of river naturalness.

| Experimental Reach (Nae-bisan Br. Lower Point) | | | | | | | | | |
|--|---------------|------------|-----------------|------------------|---------|-----------|-----------------|------------|---------------|
| Before implementation (2001. 5) | | | | | | | | | |
| | The left bank | | | Low-flow Channel | | | The right bank | | |
| The Assessment of River naturalness | Adjacent land | Embankment | High flow plain | Revetment | Channel | Revetment | High flow plain | Embankment | Adjacent land |
| | 2.0 | 4.6 | 3.2 | 5.0 | 3.8 | 5.0 | 3.0 | 5.0 | 5.0 |
| After implementation (2007. 10) | | | | | | | | | |
| | The left bank | | | Low-flow Channel | | | The right bank | | |
| The Assessment of River naturalness | Adjacent land | Embankment | High flow plain | Revetment | Channel | Revetment | High flow plain | Embankment | Adjacent land |
| | 2.0 | 2.3 | 2.7 | 2.0 | 3.4 | 3.0 | 3.5 | 4.5 | 5.0 |
| After implementation (2015. 10) | | | | | | | | | |
| | The left bank | | | Low-flow Channel | | | The right bank | | |
| The Assessment of River naturalness | Adjacent land | Embankment | High flow plain | Revetment | Channel | Revetment | High flow plain | Embankment | Adjacent land |
| | 2.0 | 1.6 | 3.0 | 2.0 | 3.2 | 1.3 | 3.5 | 3.0 | 5.0 |

Degree of The Assessment of River naturalness: 1.0 (Good)~5.0 (Bad). Photo taken by author

위함이며, 값이 작을수록 경관의 질이 양호하며, 높을수록 불량하다.

2004년부터 2009년, 이후 2013년까지 10여년간 학의천의 인덕원교 상류 500m지점을 시점으로 안양천 합류점을 종점으로 하는 4.5km구간에 대한 생태계와 수질 그리고 경관변화 모니터링이 진행되었고(Figure 2)(Anyang city, 2004; 2005; 2006; 2007; 2008; 2009; 2013; Lee, 2011), 본 연구에서는 당 보고서를 토대로 생물종수의 변화를 종합하여 제시하였다.

4. 적응관리의 실행

2004년부터 2006년의 모니터링 결과를 토대로, 2007년부터 적응관리 방안이 실행되었다. 예측을 수반한 계획의 진행이었음에도 불구하고, 환삼덩굴과 같은 위해식물이 넓게 활착하여 다른 정수식물의 활착을 방해하거나, 시간 경과에 따른 식생의 과도한 활착이나 하도 퇴적 등의 변수가 발생하였다. 이에 관한 자세한 내용을 결과 및 고찰에서 설명하고자 한다.

III. 결과 및 고찰

1. 학의천 모니터링 결과 분석

1) 하천경관 모니터링

Table 1은 대표적인 학의천 시범 구간인 내비산교에서 학운교의 경관변화와 하천자연도를 보여준다. 정비 후 (2007년) 하도 내 공법 적용을 통해 저수로 유속이 다양해짐에 따라 양쪽 하안부에 자갈, 모래 등 하상재료의 퇴적이 발생하여 하상미지형이 형성되었고, 저수로 공법이 유량변화에도 유실되지 않고 안정성을 확보하면서 식생활착이 양호하여, 저수로(channel)와 제방(retvetment)의 자연도는 시간경과에 따라 양호해져. 2001년도의 호안(retvetment)수치 5.0에서 2015년에는 2.0과 1.3으로 감소하였다. 고수부지(high flow plain)와 고수제방(embarkment)의 식생활착도 두드러져 2001년도의 3.0~5.0

의 수치에서 2015년도에는 1.6~3.5 수치로 감소하여 자연도가 증가하였다. 우안의 자연거도로 건설에도 불구하고 고수부지의 자연도는 증가한 것으로 나타났다. 하지만, 두드러진 식생활착과 버드나무와 같은 목본류의 과대성장은 경관측면에서는 양호한 자연성을 나타내지만, 홍수시 수리적 안정성을 저해하고, 하도의 유동성을 저하하여 육역화 현상을 촉진할 가능성이 제기되었다.

2) 생태계 모니터링

자연도평가 수치에서 볼 수 있듯이 정비 전후에 경관의 극명한 변화뿐만 아니라, 경관 변화에 따른 양호한 서식처의 증가로 어류나 조류의 종수도 증가하였다. Lee(2011)와 Anyang city (2009, 2013)에 따르면, 저수호안과 고수부지의 정수식물 식재로 인해, 식생은 자연형 하천 공사가 완료된 직후인 2002년 94종에서 2011년 230여종으로 급격하게 증가하였다 (Figure 4). 저수호안 공법의 적용과 미지형 형성으로 갯벌들 군락의 활착이 매우 양호하여 물총새(*Alcedo atthis bengalensis*), 해오라기(*Nycticorax nycticorax*) 등 조류의 서식환경기반이 형성되어 2002년 15종에서 2007년 63종까지 꾸준히 증가하였다가, 2011년 30종까지 다시 감소 추세를 보인다. 어

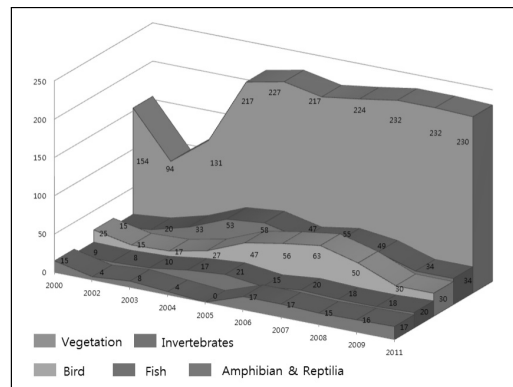


Figure 4. Annual change in number of species by Restoration implementation. Data modified from Lee(2011)and Anyang city(2013).

류는 자연형 하천 정비사업 전(2000년) 붕어 (*Carassius carassius*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*), 버들치(*Moroco oxycephalus*), 버들매치(*Abbottina rivularis*), 피라미(*Zacco platypus*) 등 9종의 단순한 어류상이 조사되었으나 정비사업 이후 치어방사와 어류서식처 조성 등으로 2005년 21종이 확인되었고, 2011년 조사 시 모래무지(*Pseudogobio esocinus*)가 포함된 총 20종이 조사되었다. 저수로 내 다단계낙차공, 여울과 소, 수제, 거석 등의 하도 내 공법은 계획단계의 목적에 부응해서 다양한 유수의 흐름을 유도하여 어류뿐만 아니라 저서무척추동물과 양서류의 생물 서식처를 제공하고 있는 것으로 판단된다. 저서무척추류는 공사 직후(2002년)에는 15종에서 2007년 55종까지 꾸준히 증가하였으나, 이후 감소하는 경향을 보인다. 하지만, 2006년 어류 모니터링에 의하면, 어류 산란처인 작은 돌과 자갈 틈

이 모래로 메워져, 피라미뿐만 아니라 저서성 어류의 서식과 산란을 어렵게 만들고 있음이 드러났고, 저서무척추류의 종수 감소 역시 하상의 변화에 의한 것일 것으로 추측되었다. 양서류는 공사 직후 급격히 감소하였으나, 2000년대 후반부터 공사 이전의 종수로 증가하였다.

2. 적응관리 방안의 실행

복원초기 단계에서는 예상치 못한 식물종의 활착이나 일부종의 과도한 식생활착이 문제로 지적되어 적응관리 방안이 진행되었고, 이 후 시간 경과에 따라 모래의 과도한 퇴적 등으로 인한 하도의 변화로 인한 적응 관리방안이 진행되고 있다.

학의천 복원사업에 적용된 각각의 공법은 자연도평가를 통해 소기의 목적은 달성하였다고 판단되며 (Table 2), 앞서 언급한 생물종다양성

Table 2. Evaluation of restoration practices & adaptive management.

| Restoration Practices | | Objective | Attainment | Issues after Implementation | Practices for adaptive Management |
|-----------------------|--|------------------------|------------|---|---|
| In-Stream Practices | • Riffles • Grade control measures | • Diverse flow | △ | • Land formation in channel • Degradation of aquatic habitat | • Partial dredging • Release of aquatic life (marsh snail, fish) |
| | | • Provides habitat | △ | | |
| | | • Continuous flow | ○ | | |
| | • Boulder cluster | • Diverse riverbed | ◎ | | |
| • Dyke | • Protect river edge | ◎ | | | |
| | • micro landform | ◎ | | | |
| Revetment | • Riprap + willow planting • Coconut fiber + vegetation | • Retard erosion | ◎ | • Increase of disturbed species such as invasive vines • Over-growth of willow • Alluvial deposition on the high-flow plain | • Emergent planting after removing disturbed species • Pollarding of willow • Coppicing of willow • Dredging • Emergents replanting |
| | | • Vegetated revetment | ○ | | |
| Riparian terrace | • Emergent Planting | • Vegetation structure | ○ | | |
| | | • Riverscape | ◎ | | |
| Riverside wetland | | • Natural purification | △ | • Algae blooming • Degradation of aquatic habitat | • Creation of graded bed wetland • Enlargement of inlet & outlet |
| | | • Provide habitats | ○ | | |

◎ : Good ○ : Fair △ : Poor

역시 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있다. 초기 계획대로 자연식생대가 상당수 복원되어 경관이나 종다양성 증가 측면에서 양호한 환경을 조성하였고, 전변습지의 조성과 정수식물 군락의 식재 등으로 고수부지의 식생구조와 활착률은 매우 양호하게 나타난 반면에, 이용밀도가 높은 구간은 답압에 의한 인위적인 간섭에 의해 교란되어 무식생역이 나타나는 구간이 확인되거나, 야자섬유를 이용한 사주부에는 갈대 (*Phragmites communis Trin*)가 식재되었지만 환삼덩굴(*Humulus japonicus*)을 포함한 육상식물이 우점하였고, 갈대는 부분적으로나마 확인할 수 있었다. 초기 발달한 환삼덩굴로 인하여 복원사업 단계에 식재한 정수식물 군락이 확장하지 못한 일부 구간이 나타났으며, 이에 대해 환삼덩굴의 인위적 제거 작업을 2007년 8월에 시행하였다(Table 2; Figure 5). 유묘의 발생 초기에 환삼덩굴을 제거한 후 생육억제를 위해 밀도 높은 대체 식물종인 갈대와 물억새(*Miscanthus sacchariflorus*) 등 2년생 이상 식물종을 식재하였다 (Figure 5). 하지만 환삼덩굴은 인위적으로 제거하여도 한 개체라도 살아남으면 다시 증가하는 경향을 보이므로, 생장기 동안 여러 차례에 걸친 지속적 제거가 필요하다(Kim, 2007). Kim(2007)의 실험에 의하면, 환삼덩굴은 개체 전체가 물에 잠기고 빛이 잘 투과되지 않을 경우 감소하는 경향을 보였기 때문에 수위조절을 통한 제거방식도 적응관리 방안의 하나로 제시하였다. 그래서 장기적으로 하천의 육역화를 방지하고, 환삼덩굴 생육부에 잦은 침수가 가능한 방법 (일시적이거나 지속적인 유량의 증가 등)을 추후 강구하여야 한다.

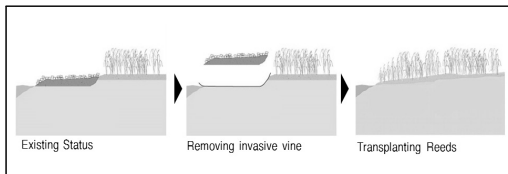


Figure 5. The practices for removal of invasive vine.

호안뿐만 아니라, 학의천 고수부지의 버드나무류 군집은 자연 경관의 형성 및 하천자연도의 증가 뿐 아니라 잠재 자연식생의 하나로서 조류를 비롯한 다양한 생물종의 서식처로서 역할을 하고 있으나, 자생하는 수목이 지나치게 과밀상태로 성장하게 되면 하천단면이 축소되어 홍수통수능이 감소하게 되고 일부 수목이 유실되면 교량에 걸려 통수장애물이 되면서 수리적 재해를 유발할 수 있다. 이처럼 홍수 시 수목 유실 피해를 줄이기 위해 2007년 4월 학의천 내 버드나무 근원경 10cm 이상인 수목 약 300주를 밀둥치기 하였다(Lee, 2011). 하지만 버드나무의 생장억제 방법에서는 성공적이었으나, 예상과 다르게 일부 밀둥치기한 버드나무에서 새로운 맹아가 발생하지 않아 하천식생 재생에 있어서 새로운 문제점이 대두되었다(Figure 6) (Lee, 2011). 일본의 홋카이도 버드나무 재배 매뉴얼(Hokkaido, 2002)에 따르면, 버드나무의 밀둥치기 (台切り)는 다음해 봄에 성장을 위해 늦겨울 맹아가 발생하기 전인 초겨울에 실시하는 것을 권장하고 있다. Lee(2002)는 버드나무 맹아 발생에 관한 관찰을 통해, 하천 제방 및 사주 등에서 버드나무속을 효과적으로 증식시키기 위해서는 2~4년생의 기저 부위를 잘라 맹아를 형성시키는 것이 적당하다고 제시하였으며, 그루터기의 단면 직경(0-2cm, 2-4cm, 4-6cm, 6-8cm, 8-10cm)을 기준으로 새로운 맹아의 치사율을 비교한 결과, 8-10cm의 경우 45.0%의 치사율을 보였다. 실험 대상 전체의 치사율은 47.2%로 가지치기를 한 버드나무의 절반정도에서만 맹아가 발생한 것을 볼 수 있



Figure 6. Coppiced willow. Photo taken in October 2015.

다. 따라서 학의천의 버드나무 역시 환경적 요인에 따라 맹아 발생이 차이를 보이는 것으로 추정되며, 맹아가 발생되지 않은 버드나무에 대해서도 앞으로 지속적인 모니터링이 필요하다.

환삼덩굴이나 버드나무의 번성은 수리적 재해 발생 뿐 아니라, 호안부와 고수부지의 유사 퇴적을 유도하기 쉽다. 지엽이 발달하게 되면서 홍수 시 유하하는 세류사들이 식생부에 퇴적되기 쉽고, 퇴적된 유사는 호안이나 고수부지의 상대비고를 더욱 높게 만들어 고수부지의 침수 기회를 낮추어 육역화를 촉진한다. 학의천 고수부지에서도 유사퇴적이 누적됨에 따라 고수부지의 높이가 10-50cm까지 돋우어져 홍수단면을 축소하면서 홍수위를 상승시키는 요인이 되었다. 이에 대한 관리방안으로 학의천 일부구간을 대상으로 2010년부터 고수부지와 하상에서 누적된 유사 퇴적부를 제거하기 위한 준설 사업이 진행되었다(Table 2). 유사의 퇴적은 호안이나 고수부지 뿐만 아니라 저수로 내에서도 발생하여, 다단계 낙차공 역시 육역화가 진행되고 있다. 다단계 낙차공의 좌안부의 분산류가 형성되는 구간에 유사 퇴적되고 퇴적부위에 식생 피복부가 형성되어 하도 육역화가 발생하여(Figure 7), 적절한 관리방안을 모색하고 있다.

2006년 어류 모니터링에 의하면, 어류 산란처인 작은 돌과 자갈 틈이 모래로 메워져, 피라미뿐

만 아니라 저서성 어류의 서식과 산란을 불가능하게 만들었다. 그래서 학의천에서는 양호한 생물다양성을 위해 2007년부터 생물 방류 작업을 시행하였다. 학의천 상류부에 장기적으로 다슬기를 먹이로 하는 반딧불의 서식공간을 조성할 수 있고 수질이 양호하며 다슬기가 부착 할 수 있는 바위나 돌이 많고 일정량의 유량이 유지되는 지점을 선정하였다. 이후 방류 지점에 서식 가능한 종을 선정하였다. 2007년 5월 23일에 100,000마리의 꽃체다슬기(*Semisulcospira gottschei*)와 참다슬기(*Semisulcospira coreana*)를 학의천 3개의 지점(인덕원 대우아파트 앞, 관양2동 인도교 하류, 동안교 부근)에 방류하였다 (Lee, 2011). 하지만 2009년부터 서식개체를 확인할 수 없었고 2010년 7월 조사 시에도 확인할 수 없었다. 특히 2010년 조사에서는 당시 학의천의 상류 쪽에 위치한 대형 택지개발 현장(관양 지구, 의왕시 포일 지구 등)에서 흘러든 토사 유입으로 다슬기가 은신 할 수 있는 공극률이 급격하게 감소한 것이 다슬기 미발견의 원인으로 제시되었다. 이렇게 지속적인 하상의 유사퇴적은 다슬기뿐만 아니라, 저서무척추류의 종수가 2008년 이후부터 감소되는 요인의 하나로도 판단된다.

천변습지도 식생의 과도한 발달과 토사 퇴적으로 습지의 수면이 축소되고 유입·유출부가 폐색됨에 따라 습지 본연의 기능이 점차 저하하게 되었고, 천변습지의 기능을 향상시키기 위해 적응관리 방안을 실시하였다. 2013년 4월에 학

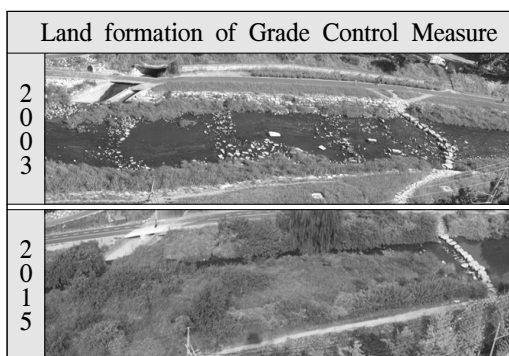


Figure 7. The process of grade control measure. Photo taken in (up) 2004 and (down) 2015.



Figure 8. Gravel bed channel & enlargement of outlet in wetland. Photo from Eco Innovation, 2013.

의천 시범구간에 조성되어 있던 습지구간에 수로형 습지를 연장하고 습지의 바닥면에 20-30cm 깊이의 강자갈을 포설하여 자정기능을 강화하면서 본류와의 유수 소통이 원활히 이루어지도록 유출입부를 확폭하였다(Figure 8). (Eco Innovation, 2013). 그래서 상류로부터 유입되는 토사가 재퇴적 되지 않고 자연스럽게 흘러가면서 하상의 공극률을 유지하고, 고수부지에 부유사 퇴적량을 최소화 하면서 저수로의 흐름과 수위변동에 연동하는 천변습지가 지닌 고유의 기능이 향상되었다. 나아가 국부적인 하천구간뿐만 아니라 중장기적인 유역관리 차원에서 유량의 조절과 유사관리가 실행되면 보다 적극적인 하천생태계 복원이 이루어 질 수 있을 것이다.

IV. 결 론

지속적으로 변화하는 하천생태계는 그 변화 과정이 불확실하다. 그래서 관리계획에 의해 미리 사후관리를 하더라도 변수요인의 작용으로 어느 정도의 예상치 못한 결과가 발생하기도 하고, 시간에 경과함에 따라 완벽한 실행도 그 타당성을 잃게 되는 경우가 있다(Margoluis and Salafsky, 1998). 자연형 하천 사업 이후 복원효과를 증진시키고 예상치 못한 결과를 보완하고자, 학의천 하천복원 사업 이후 10여 년 동안 지속적인 모니터링을 실시하였으며, 본 연구에서는 그간의 모니터링의 결과와 적응관리를 실행한 사례, 그에 대한 평가까지 간략히 서술하였다. 학의천 자연형 하천사업은 식생의 양호한 활착과 콘크리트 호안 철거로 인해, 경관 향상과 생물 서식처 확보를 통한 생물다양성 증가와 같은 계획 본연의 목표를 달성하였다. 하지만, 시간 경과에 따라 유사의 퇴적이나 식생의 과도한 생장으로 서식처 본연의 기능이 저하되거나, 치수방재적인 문제를 초래하였다는 것을 모니터링 과정을 통해 알게 되었으며, 그에 따라, 버드나무나 환삼덩굴과 같은 식물의 인위적인 관

리나 습지의 재조성, 하상 준설과 같은 적응관리를 진행하였으며, 기 실시된 적응관리에 대한 평가를 실시하였다.

적응관리를 구성하는 세 가지 주요 요소는 모니터링과 성과평가(monitoring and evaluation), 적응(adaptation), 학습(learning)이다. 특히 불확실한 환경 속에서의 적응관리 후 성과평가는 이전 보다 나은 계획을 세우는데 있어 매우 중요한 일이다(Margoluis and Salafsky, 1998). 성과평가를 통해 정보를 구축하였다면, 평가결과(정보)를 이용하여 관리방안을 개선하고, 지식(knowledge)을 창출하는 과정을 반복적으로 시행하여야 한다(US EPA, 2008).

생태복원 사업 이후 지속적인 모니터링과 적응관리의 부재, 평가와 적응관리의 연구는 진행되고 있으나 실제 적응관리사례의 부족 등과 같은 복원사업 이후의 과정이 원만히 이루어지지 않고 있는 실정에서 모니터링과 성과평가, 그에 따른 결과를 적응관리 방안에 반영하고, 변화를 학습하는 안양천의 적응관리과정은 향후 하천생태계에 대한 적극적 관리 방향을 제시할 것으로 기대된다. 안양천의 사례와 같이, 모니터링과 성과평가의 과정을 거치면서 문제점을 파악하고 예상되는 시나리오를 바탕으로 순차적으로 관리하여야만 복원 효과를 증진시킬 수 있으며, 향후 자연재생사업이나 자연형 하천 사업 계획 시에 발전된 계획을 세울 수 있다. 더 나아가 하천생태계에 대한 적응관리가 우리나라에서 현실적으로 잘 이루어지기 위해서는 적응관리의 개념이 우선적으로 정립되어야 하며, 적응관리도 유지관리처럼 법·제도적으로 뒷받침받기 위해 적응관리의 유용성을 밝히는 후속적 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

Anyang city. 2001. Anyang Stream Restoration Project.

- Anyang city. 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2013. "Anyang stream Monitoring".
- Ahn BC. 2013. The Constructability Evaluation of Ecological Restoration Construction Using Environment-friendly Design Factor - In the case of Construction of Gucheon Eco-River in Geoge City -. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Tecnology.
- Choi JK. 2013. A Study on Application & Evaluation of Riverbed Techniques for the Formation of Hyporheic Zone. Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology 16(6): 119-133.
- Eco Innovation. 2013. Vegetation Survey Report.
- Hokkaido. 2010. Cultivation manual of willow in Hokkaido http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/toukei/chousa/h22keikaku/04_2.pdf (Japanese).
- Hong KH. 2007. A Post-implementation Evaluation for Close-to-Nature Stream Improvement-Focused on the Hakui River. Kyungwon Univ.
- Jacobson C. 2003. Introduction to adaptive management. (Online) URL: <http://student.lincoln.ac.nz/am-links/am-intro.html>.
- Jo YH. 1997. A Study on Evaluation Method of Stream Naturalness for Ecological Restoration of Stream Corridors. Journal of Korean institute of landscape architecture.
- Jo YH. 2012. Development and Application of an Evaluation Method of Stream Naturalness. Korean Society of Water Quality.
- KICT. 2002. River Restoration Guideline.
- Kim JG. 2007. Ecological risk assessment and management of invasive vines for biodiversity and ecological functions in riverine wetland. Seoul Univ.
- Lee SO. 2011. The Practice and Evaluation of the Adaptive Management for the Stream Restoration: In the case of the Anyang Stream Restoration Project. Kyungwon Univ.
- Lee PH. 2002. Growth characteristics and community dynamics of riparian *salix* in south korea. Kyungsang Univ.
- Lee HY. 2015. Study of Adaptive Management for Ecosystem Restoration Projecte of On-Cheon Stream. Bukyung Univ.
- Lee HW, Kim DS, Lee SH. 2012. A Case Study of Post-Implementation Evaluation for Close-to-Nature Stream Improvement Work. Journal of academia-industrial technology.
- Margoluis R. · Salafsky N. 1998. Measures of Success: Designing, Managing, and Monitoring, Conservation and Development Projects. ISLAND PRESS.
- Nyberg 1999. An Introductory guide to adaptive management for project leaders and participants, BC Forest Service.
- The Ecological Society of Japan. 2005. Guideline for nature restoration projects, Japanese journal of conservation ecology 10(1): 63-75 (Japanese).
- USA EPA. 2008. Handbook for Developing Watershed Plans to Restore and Protect Our Waters: Chapter 2 Overview of Watershed Planning Process, http://www.epa.gov/owow/nps/watershed_handbook.
- Downs PW · Kondolf GM. 2002. Post-project appraisals in adaptive management of river channel restoration. Environmental Management 29(4): 477-496.