

하상간극수역의 형성을 위한 하상공법의 적용과 평가*

최 정 권

가천대학교 조경학과

A Study on Application & Evaluation of Riverbed Techniques for the Formation of Hyporheic Zone*

Choi, Jungkwon

Dept. of Landscape Architecture, Gachon University.

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop riverbed techniques to activating ecological function of hyporheic zone. Hyporheic zone maybe simply defined as an active eco-tone between surface water and groundwater, which facilitates to exchange water, nutrients and aquatic habitat occur in response to variation in discharge and bed geomorphology. The aim of this study is to evaluate the effectiveness of an applied riverbed technique for two years since its installation in the hyporheic zone. The experimental riverbed technique has been implemented on Anyang stream penetrating Anyang city in Gyunggi province. The dimension of the installed structure is 5.0 m in width, 46 m in length. Bottom layer is filled with rip-rap covered with gabion. After the implementation of the technique, the study conducts follow-up monitoring in two years of between 2011 and 2012. The results of follow-up monitoring for two years are as follows : 1) In Hydro geomorphic process, the riverbed technique maintains hydraulic stability despite of several flood events in 2011, 2012. 2) After transformation to form pool-and-riffle habitat, for aquatic community composed of freshwater fish, macro invertebrate, and attached algae, the species diversity and population gradually increased. 3) The riverbed technique achieved desired effect on enhancement of ecological function in hyporheic zone.

Key Words : *Hyporheic zone, Experimental stream, River bed techniques, Follow-up monitoring.*

* 본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(수생태복원사업단) “수생태계를 위한 자연하상 복원기술 개발”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

First author : Choi, Jung-Kwon, Dept. of Landscape Architecture, Gachon University,
Tel : +82-31-750-5285, E-mail : choijk@gachon.ac.kr

Corresponding author : Choi, Jung-Kwon, Dept. of Landscape Architecture, Gachon University,
Tel : +82-31-750-5285, E-mail : choijk@gachon.ac.kr

Received : 21 October, 2013. **Revised** : 4 December, 2013. **Accepted** : 22 November, 2013.

I. 서 론

하천은 흐르는 물의 속성이 두드러진 유수생태계(running water ecosystem, lotic)로서 고인 물로 이루어진 정수생태계(standing water ecosystem, lentic)인 호소와 구분된다. 유수생태계는 경사진 하천 바닥면을 따라 지표수가 흘러내리면서 지표수와 지하수의 교환이 발생하는 하상간극수역(hyporheic zone)을 형성하고, 이에 의해 하천생태계의 고유한 특성이 발현된다. 하상간극수역은 유속, 수심, 하상재료와 함께 계절적 강우에 영향을 받아 공간적, 시간적 변동이 심한 역동적 추이대(active ecotone)에 해당된다. 이에 대한 과학적인 연구는 약 40년 전부터 진행되었으며, 근년에 들어 하천 생태계를 재생·복원하려는 연구와 사업이 활발해지면서 그 중요성이 새롭게 조명되고 있다.

하상간극수역(hyporheic zone)이라는 용어는 그리스어의 ‘hypo’(below : 아래)와 ‘rheos’(flow : 흐름)의 합성어로 하천바닥면에서 지표수와 지하수가 혼합되는 수역을 지칭한다. 그 동안 하천의 지표수와 지하수는 각기 다른 속성을 지닌 구분된 환경으로 이해되어 왔으나 하상간극수역의 존재가 밝혀지면서 지표수와 지하수의 전이대로서 그 환경적 특성을 연구하게 되었다. 하상간극수역은 독일의 하천학자 Orghidan (1959)에 의해 구분되는 하나의 수역으로 최초 정의되었으며, Schwoerbel (1961a : 1951b)에 의해서 하상간극수역에 대한 생태학적인 접근 방법의 연구가 비롯되었다.

생태학적 접근으로 하천연구가 진행되면서, 하천은 독립적인 수체가 아닌 주변 환경과의 상호관계를 중시하게 되었다. 초기에는 하천과 수평적 연결관계를 이루는 수변 완충대(riparian buffer zone)에 관한 연구가 활발하였다. 수변은 육상과 수체의 생지화학적 역할의 중간 전이대(ecotone)로, 식생의 천이와 영양물질의 교환이 발생하는 중요한 지역으로 밝혀졌다(Gregory *et al.*,

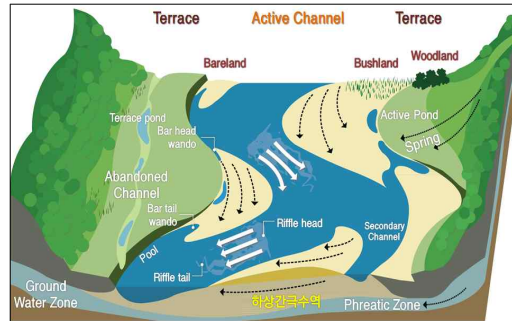


Figure 1. Latitudinal section and hyporheic zone.

1991). 한편 하천과 그 바닥면 아래에 형성된 지하수와 수직적 연결관계에 관한 연구는 상대적으로 미미했다. 그러나 실제 하천생태계는 수로와 수변의 수평적 연결뿐만 아니라 수로와 하천의 바닥층에 형성된 대수층을 통해 수직적으로도 연결되어 있음이 밝혀지면서 (Stanford and Ward, 1998) 하상간극수역에서는 하천변과는 또 다른 생지화학적 기작이 일어나는 것으로 연구되고 있다. (강호정, 2009)

하천 바닥면의 물리적 환경이 자갈사주, 연속된 여울과 소, 천변 범람원의 하단부에 투수성이 높은 재질로 구성되어 있을 경우, 지표수와 지하수가 혼합이 원활하게 일어나 중간조건의 환경에 적응한 하이포레오(hyporheos)로 부르는 특정 생물군집의 서식처가 형성된다. 그래서 하상간극수역은 하천생태계를 이루는 온전성의 총합(Integrity)으로 해석되고 있다 (김종원, 2009).

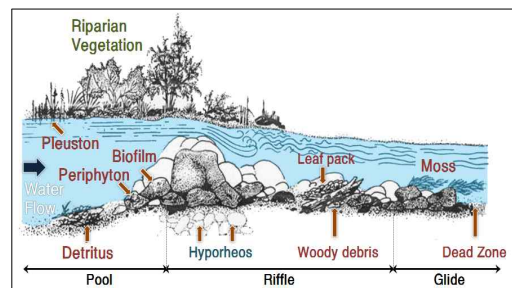


Figure 2. Longitudinal section of hyporheic zone in natural channel.

하상간극수역의 주요 생태적 기능은 수서와 육상생태계를 연계할 뿐만 아니라 지표수와 지하수를 전이하며, 하천생물종의 서식기반을 제공해준다. 하상간극수역이 형성된 하상은 담수어류종과 수서무척추동물의 산란처로서 기능을 하며 알의 부화과정에 적합한 환경을 제공해 준다는 연구결과가 발표되면서 하상간극수역이 지닌 생태적 기능 연구가 지속되고 있다(Takemon, 1989, 1991, 1993).

이와 같은 하상간극수역이 갖는 생태적 기능은 치수위주의 관행적인 하천정비사업으로 인해 교란되고 있다. 하천의 직강화, 콘크리트 횡단구조물로서 보와 낙차공의 설치 그리고 하상의 준설 등으로 하상의 수리적 물리적 조건을 지속적으로 교란하면서 하상간극수역이 지닌 생태적 기능은 손상되거나 약화된 것이다.

근년에 들어 인공적으로 정비되어 획일화 단순화된 하천을 하상지형의 복잡성을 증대시키면서 후속적으로 하천생태계를 복원하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 복원공법의 구체적인 내용은 하도내에 자연적으로 이루어진 날개수제(rock vane)와 연속된 여울과 소(pool-riffle sequence)를 도입하여 하상 지형의 복잡성을 증대시키고 하상간극수역의 형성을 촉진시키는 것이다(Crispell & Endreny, 2009).

최근 들어 한국에서도 다양한 형태의 생태하천 복원사업이 활발하게 진행되고 있다. 생태하천 복원사업을 통해 저수로 가장자리에 식생호안을 도입하고 하천변에 습지를 조성하는 방식으로 진행되고 있으나 하상구조를 복원하여 하상간극수역이 지닌 생태적 기능을 활성화시키려는 시도는 아직 본격화되고 있지 않은 상태이다.

본 연구의 목적은 하상간극수역의 생태적 기능을 활성화시키기 위한 하상공법을 실험하천에 적용하고 사후 모니터링을 통해, 생태적 기능을 활성화하는 하상공법의 유효성을 평가하는 것이다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 하천

본 연구의 공간적 범위는 경기도의 대표적인 도시하천인 안양천 중하류 구간이다. 안양천은 한강의 제 1지류로서 경기도 의왕시 백운산자락에서 발원하여 군포시를 경유, 안양시 도심을 중앙으로 관류하여 광명, 서울시를 거쳐 한강에 유입된다. 유역 면적 286.0km², 하천 연장 32.5km에 달하는 중규모 하천으로 학의천, 삼성천, 수암천, 삼막천, 삼봉천, 목감천, 도림천 등 대소지천이 형성되어 있다. 안양천 상류지역에 고도가 높은 관악산, 수리산, 모락산, 백운산, 청계산 등 산지가 다수 분포되어 있다.

공법적용 대상지역은 안양지역 내의 안양천 하류 일부구간(충훈고등학교 부근~화창교 구간)이다. 공법 적용구간의 상류부에는 호현천이 합류하며 하천 곡류부에 비교적 규모가 큰 모래사주가 발달해 있으며 공법적용 구간의 하류부에는 박달하수처리장과 석수하수처리장이 위치하여 처리수의 유출로 유량이 풍부하

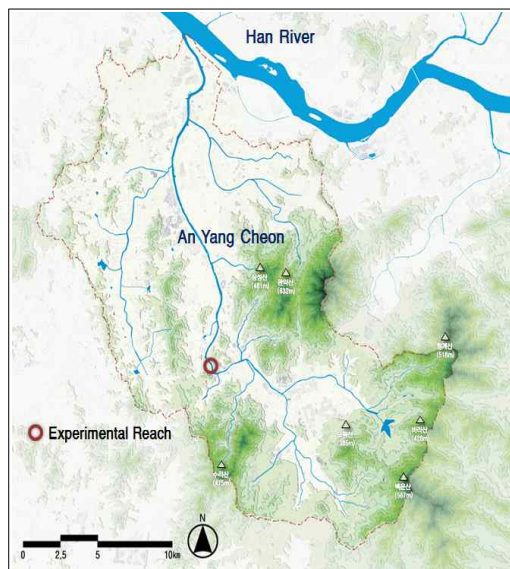


Figure 3. Anyang cheon Watershed & Experimental Reach.

고 여울이 광범위하게 형성되어 있다.

하상공법은 안양시 안양천의 중·하류 구간으로 안양시 박달하수처리장과 와룡산을 횡단하는 지점에 설치되었다. 이 구간의 하천은 하폭 140~160m, 저수로 폭은 80~100m이며, 양안에 고수부지가 15~25m 폭으로 형성되어 있다. 하천 종단경사는 1/550로서 완만한 하천 경사를 이루며 수심은 평균 30cm 이내로 수심이 얇은 평여울이 전반적으로 형성되어 있다. 하상재료는 자갈, 잔자갈, 모래가 5 : 3 : 2로 자갈이 다소 많으며, 저수로의 가장자리에는 자갈과 모래로 노출된 부분이 많다.

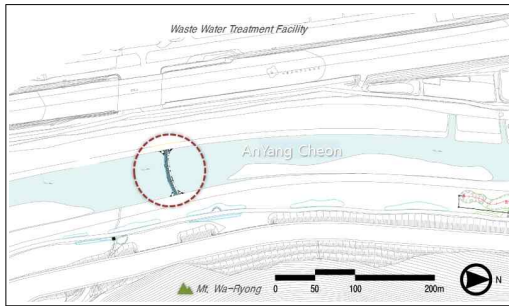


Figure 4. Experimental reach of riverbed techniques.

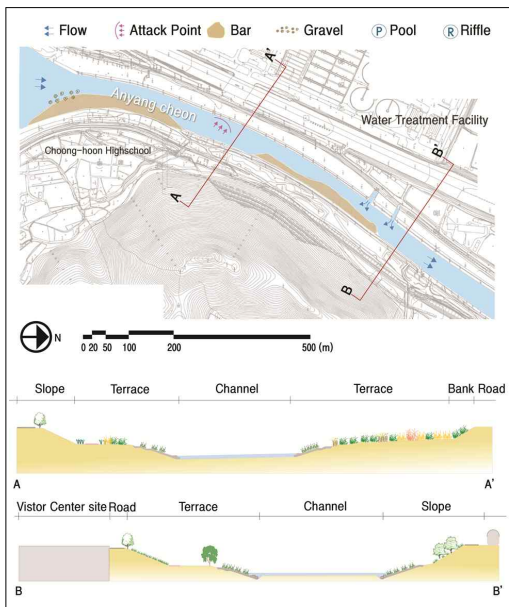


Figure 5. River corridor survey on experimental reach.

2. 하상공법의 적용

본 공법의 설계내용은 다음과 같다. Figure 6, Figure 7은 하상에 설치한 공법의 평면과 단면도이다. 저수로의 폭원은 약 55m이며 공법의 설치패턴은 저수로 상류방향으로 완만한 호형을 이루게 하여 공법을 통과한 지표수의 흐름이 하도내부의 중심방향으로 유도할 수 있게 하였다. 하상공법의 종단폭은 5.5m이며, 하상에서 1.2m 깊이로 사석과 이불형 돌망태를 설치하였다. 하천수를 간극흐름(hyporheic flow)으로 유도하기 위하여 15~20cm의 사석을 돌망태 내부에 채웠는데 이는 하상재료간의 간극을 확보하면서 한계소류력에 안정성을 확보하기 위한 조치였다. 공법 설치 전후 구간의 바닥고를 완만하게 잇는 선형으로 직경 25cm 내외의 호박돌을 깔아 자갈하천의 장갑화된 하상구조와 유사하게 처리하였다. 여울머리에 공법의 주된 구조체를 이루는 돌망태 2개를 75°정도로 가파르게 세운 것은 하강류(downwelling flow)가 유입이 원활하게 하기 위해서이고, 여울꼬리 부분에 돌망태 2개를 바닥면으로 15°로 완만하게 누인 것은 상승류(upwelling flow)의 원활한 유출을 유도하기 위한 것이다.

본 공법의 설치과정은 다음과 같다. 2010년 11월에 안양천 중하류역인 인접한 저수로 내부에 공법을 설치하였다. 본 공법의 설치구간은 완만한 곡류사주의 직상류부로서 강한 수류와 함께 빠른 유속이 형성될 경우 하상의 세굴이 예상되어 이를 방지하기 위해 저수로의 유흠방향으로 완만한 호형으로 설치하였다. 공법의 단면형태는 하천수의 흐름과 수두압에 의해 발생하는 하강류와 상승류의 연속적 교환을 촉진시키기 위하여 하천종단방향에 기울어진 ‘L’자 형태로 설치하였다.

3. 공법적용 후 모니터링

모니터링 기간은 공법실행 전후를 구분하여 3년간에 걸쳐 시행하였다. 공법적용 전 상태를

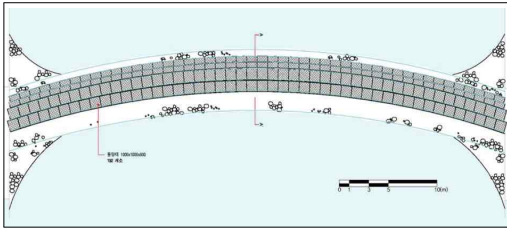


Figure 6. Plane plan of techniques.

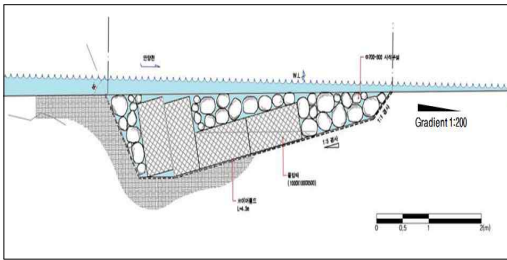


Figure 7. Longitudinal section of techniques.

설정하는 기준선 모니터링(baseline monitoring)은 2010년에, 공법적용 후의 변화과정을 측정하는 사후 모니터링(follow up monitoring)은 2011년, 2012년에 걸쳐 2년간 실행하였다.

모니터링의 대상은 무생물적 환경과 생물적 환경으로 구분하여 시행하였다. 무생물적 환경은 하천지형경관 변화에 따른 물리적 형태를 중심으로 모니터링 하였다. 생물적 환경은 수서생태계 구성요소인 어류, 부착조류, 저서성 대형무척추동물에 대상으로 모니터링 하였다.

모니터링 체계는 Table 2와 같으며, 주요 내용은 다음과 같다. 우선 하천지형경관의 변화 과정이다. 이 모니터링은 하천지형경관의 변화 과정을 통해 하상공법의 안정성을 간접적으로 확인하는 것이다. 본 공법이 하상에 설치한 공법이므로 직접적으로 설치형태가 드러나지 않으므로, 주로 유수면에 형성된 파랑에 의한 경관 변화과정을 모니터링 하였다. 하상지형이 변화하게 되면 하천수의 수표면에 형성된 파랑에 변화가 생겨나게 된다. 본 공법을 설치한 2010년부터 2년간의 경관변화 양상을 파악하여 공법설치 후 수리적 안정성을 확인하였다.

하천지형경관 변화 조사방법은 지점별 경관 포인트를 고정하여 Nikon -D80, Sony NEX-5N 카메라 초점 200mm로 주기적으로 촬영하였다. 특히 공법 적용구간은 근접 촬영하여 정밀도를 높였다. 조사지점은 하상공법이 적용된 구간을 제방상단에서 펼쳐진 전망(panoramic view)을 촬영하였다. 경관 촬영지점 우안 제방부 상단에서 공법 설치한 부위와 주변환경을 전체적으로 파악할 수 있어 촬영지점과 화각을 일정하게 하여 지속적인 변화과정을 파악하였다. 공법적용 구간에 대한 상세조사는 저수호안 상단부에서 근접 촬영하여 보다 상세하게 경관 변화과정을 기록하였다.

다음은 생물적 환경, 어류, 부착조류, 저서성 대형 무척추 동물에 대한 모니터링 내용이다. 이 모니터링은 생물종의 변화 과정을 통해 하상공법의 적용이 수서생태계에 미치는 영향을 간접적으로 예측하는 것이다. 조사는 2010년부터 2012까지 3년간에 걸쳐 실행하였다. 조사지점은 Figure 9와 같이 하상 공법이 설치된 구간의 상류지점 1개소와 하류지점 1개소로 총 2개소에 대해 조사하였다.

어류 모니터링 조사 시기는 2010년부터 2012년까지이며, 조사지점은 Figure 9의 2개소이다. 어류 채집은 투망(망목 5×5mm), 족대(망목 4×4mm)을 사용하였다. 채집된 표본은 현장에서 동정 확인 후, 바로 방류하였으며, 일부 개체는 10% 포르말린용액으로 고정하여 실험실로 운반한 다

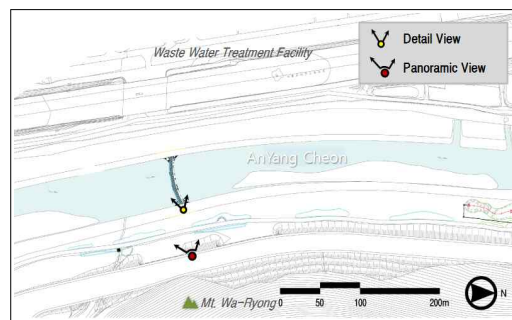


Figure 8. Location map of View point.

음에 동정·분류하였다. 어류의 동정과 분류에는 현재까지 발표된 검색표(内田, 1939; 정, 1977; 김, 1997; 김 등, 2005; 최 등 2002)를 참조하였고, 분류체계는 Nelson(2006)을 따랐다.

부착조류 모니터링 조사 시기는 2010년부터 2012년까지이며, 조사지점은 2개소로 어류 조사지점과 동일하다. 부착조류채취방법은 하상의 조약돌을 가능한 한 평면적인 부분(상면)으로 5×5cm의 방형구를 설치하고, 방형구 안의 부착물을 쓸어내어 채취하였다. 채취 후, 생물 분석용 시료는 그 중 5ml를 원심분리용 튜브에 넣고 오븐에 넣어 반응시킨다. 산처리로 세포질이 제거된 시료는 300~600배의 광학현미경으로 동정하였다.

저서성 대형무척추동물 모니터링 시기는 2010년부터 2012년까지이며, 조사지점은 어류 조사지점과 동일하다. 저서성 대형무척추동물의 채집은 지점별로 정량시료를 얻었다. 그리고 채집된 재료 중 동정하기가 어려운 미소개

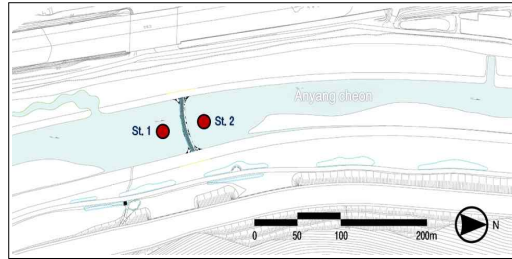


Figure 9. Survey points of biotic environment.

체 등은 실험실로 이동 후 한국동식물도감 수서곤충편(윤, 1988), 동물편~새우류, 동물편-연체동물(권, 1990) 등에 준하여 해부현미경 또는 광학현미경(Nikon Eclipse 80i) 하에서 분류하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 하천지형경관

하천지형경관 모니터링은 공법이 적용된 지점의 직상하류부 구간에 대한 파노라믹 사진촬영

Table 1. Survey points of biotic environment.

Items	Location
St. 1	Immediate upper point of technique
St. 2	Immediate lower point of technique

Table 2. Monitoring system.

Items	Sub	Contents	Method	Period / Frequency
Abiotic Env.	Fluvial Geomorphology	• Micro Landform	• Field Survey • R . C . S • Panoramic View	• before and after Flooding
		• Visual Landscape		
Biotic Env.	Fish	• Species Name • Species Composition • Species in Microhabitat	• Field Trap • Laboratory	• Twice in a year • Summer/Autumn
	Attached Algae	• Species Name • Species in Microhabitat	• Sampling Method • Laboratory Analysis	• Twice in a year • Summer/Autumn
	Bentic Macroinvertebrate	• Species Name • Species Composition • Species in Microhabitat	• Dominant Species • Biological Community Analysis	• Twice in a year • Summer/Autumn

영을 통해 공법 적용 전과 후의 경관변화과정을 비교 분석하였다. 2010년 공법 적용 이후, 2011년에 4차례, 2012년에 6차례 현장 관찰을 통해 홍수 및 강우에 의한 유량 및 수위 변화 과정을 거치면서 공법이 설치된 위치에 그 형상을 유지하고 있으면서 유실되지 않아 수리적 안정성을 확인할 수 있었다.

또한, 2년간의 하상지형 형성과정을 통해 중앙부에는 유속이 빠르고 가장자리로 갈수록 중앙부보다 유속이 느려져, 양쪽 하안에 가까운 가장자리 쪽으로 자갈 및 모래 등 하상재료의 재퇴적이 발생하였다.

평면적인 형태에 있어 저수로 가장자리에 재퇴적이 이루어져 하천지형경관의 변화가 발생하였고, 종단적 형태에서는 평여울의 구조가 점진적으로 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 공법 적용이후 2년이 경과한 2012년에 이르러

자연 하천에서 나타나는 여울과 소로 이루어진 하상미지형을 형성하게 되었다. 공법 적용지점의 상류부에는 상대적으로 유속이 느리며 수심이 70~80cm 정도 확보된 웅덩이형 지형이, 하류부에는 유속이 빠르며 수심이 20~30cm 정도인 여울형 지형이 형성되었다.

공법 설치 후, 공법 전후 구간에 유속과 수심을 달리하는 하상미지형이 어류서식처로서 기능하게 되면서 어류 포식자인 왜가리, 백로류, 민물가마우지 등이 지속적으로 관찰되었다. Figure 10에서와 같이 공법적용구간에서 고차 소비자인 육식성 조류가 반복해서 관찰된 것은 그들의 먹이가 되는 어류개체수가 대폭 증가하였음을 나타내며 공법 설치에 따라 어류 서식처로서의 기능이 강화 (habitat enhancement)되었음을 간접적으로 알 수 있었다.

Table 3. Process monitoring of fluvial geomorphology (2010).








2010'				
Oct. 5 Before implemen- tation	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	clear/foggy	10/22c	5mm/Oct. 4	
	In immediate upper reach of technique channel side bar was established. Water depth 10~20(cm), mostly riffle.			
Nov. 6 On implemen- tation	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	cloudy	10/15c	-	
	Digging the river bed. Fill up the gabion with rip-rap.			
Dec. 3 Afrer implemen- tation	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	rain	3/14c	5mm/Dec. 2	
	Afrer the implementation of the techniques. Without large artificial disturbance. Several fluvial change was not happened.			

Table 4. Process monitoring of fluvial geomorphology (2011).

2011'				
Mar. 25	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	snow	-0.5/9c	10mm/Mar. 25	
Mostly riffle was established, fluvial landscape was not changed.				
Jul. 15	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	rain	22/28c	49mm/Jul. 15	
In the flooding condition, water level was increase with bankfull flow.				
Jul. 18	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	cloudy	25/36c	-	
After the flooding event, surface water flow made active wave. Interaction between surface flow and river bed.				
Sep. 2	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	sunny	-22.5/33c	-	
After the flooding event, water-level decreasing and surface water was activated. Riffle was established in the lower reach of the techniques.				

2. 어류 모니터링







하상지형의 변화 및 공법적용의 효과를 분석·판단할 수 있는 기본적인 지표생물종은 어류이다. 수생태계 변화에 민감하게 반응하는 고차 소비자인 어류의 서식 현황을 조사하고, 이를 하상공법 적용에 따른 연간 변화과정과 공법적용구간의 전후에 따른 변화양상을 분석, 평가하였다.

공법적용 이전과 이후 2년간의 어류종의 변화는 현저하게 나타났다. 공법적용 이전인 2010년의 어류종은 3과 7종 93개체였는데 공법적용 후인 2011년에는 4과 13종 249개체가 출현하여 종수와 개체수에 있어 현저하게 증가하였음을

알 수 있다.

공법 적용 후 2년이 경과한 2012년에는 11종 68개체가 출현하여 종수와 개체수가 전년에 비해 다소 감소하였다. 공법 적용후인 2011년에 출현종이 대폭 증가하게 된 이유는 공사가 완료된 이후 수환경이 안정화되었고 하상구조가 개선됨에 따라 미소서식처가 다양하게 형성되었기 때문이다. 2012년에 어류종의 증가 폭이 감소한 것은 2012년에 여러 차례 발생한 홍수에 의한 교란에 영향을 받은 것으로 이러한 조사결과는 부착조류의 조사결과와도 유사한 점을 보이고 있다.

Table 5. Process monitoring of fluvial geomorphology (2012).

2012'				
Jan. 25	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	cloudy	-6/4c	1mm/Jan. 24	
	Drought season in winter, exposed rip-rap and gravel and surface water was frozen.			
May. 15	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	cloudy	12/22c	10mm/May. 14	
	Draught season in spring, exposed the surface of the techniques in lower water level.			
Jul. 7	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	rain	20/22c	276mm/Jul. 6	
	With severe rain storm, increasing water volume and level, mostly fast flow was established.			
Aug. 23	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	rain	22/28c	24mm/Aug. 22	
	After the flooding, active wave was established on the techniques.			
Sep. 8	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	rain	19/24c	18mm/Sep. 7	
	In the condition of lower water lever, the surface of the techniques was exposed.			
Dec. 22	Climate	Temp. (lowest/highest)	Precipitation	
	snow	-1/2c	3mm/Dec. 21	
	In winter season, the edge of the channel was frozen.			



Sep.02.2011 *Aclypeata* in Immediate upper point of technique



Sep.02.2011 *P.carbo* in Immediate upper point of technique



Jun.15.2012 *Apoecilorhyncha* in point of technique



Oct.24.2012 *Acinerea* in point of technique

Figure 10. Birds habitat in the experimental reach.

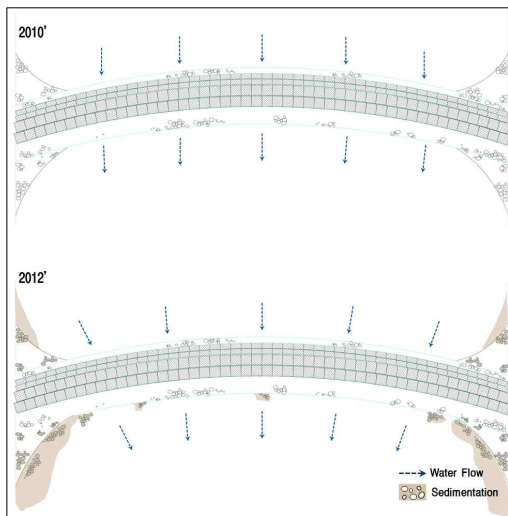


Figure 11. The change of surface flow and plane bed.

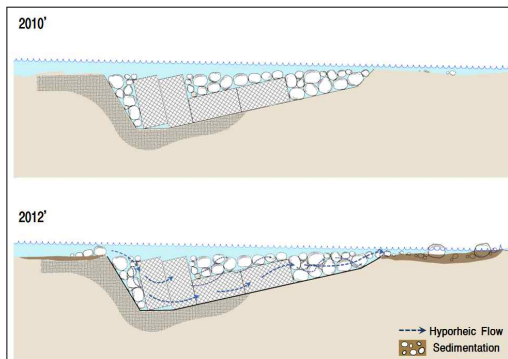


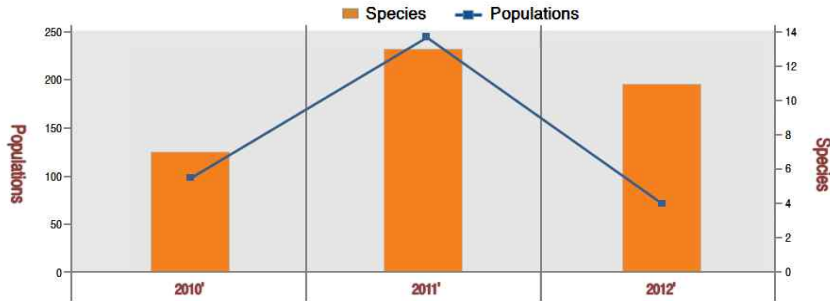
Figure 12. The change of longitudinal section.

하상공법의 적용에 따라 어류의 서식환경이 공법적용 상하류 구간으로 분화되면서 어류의 종조성이나 개체수가 달리 나타났다. 공법적용 이전인 2010년에는 상 하류의 서식환경이 동일한 얕은 수심의 평여울이 있으나 공법 적용 이후, 상류부인 St.1에는 웅덩이형 서식처가 형성되고 하류부인 St.2에는 여울형 서식처가 형성되었다.

2010년에는 상하류구간의 어류서식 특성이 구분되지 않았으나 공법 적용 이후인 2011년과 2012년에는 공법적용 상하류 구간에 따라 어류종 조성이나 다양성에 있어 차이점이 분명하게 나타났다. 2010년에는 얕은 수심의 하천에 서식하는 피라미가 우점하였고 미꾸리, 누치를 포함하여 7종이 서식하였으나 공법 적용 이후 웅덩이와 여울로 서식처가 분화되면서 2011년에는 6종이 추가되어 13종이 서식하였다.

하상공법 적용구간 상류부에는 붕어와 잉어 등 정수역에 서식하는 어류종이 주를 이루었으나, 공법 적용구간 하류부는 여울이 새롭게 형성됨에 따라 어류 미소서식처가 다양화가 이루어져 돌고기, 모래무지, 버들치, 밀어, 민

Table 6. Annual change in fish community.



Items	2010	2011	2012
Family/ Species	3 / 7	4 / 13	5 / 11
Population	93	249	68
Emergent Species	-	<i>P. parva</i> <i>C C linnaeus</i> <i>P. herzi</i> <i>P. esocinus</i> <i>A. rivularis</i> <i>O. b. GuNTHER</i>	<i>S. asotus</i> <i>C. argus</i>

물검정망둑 등 저서성 어류종이 출현하였다.

공법 적용 이후 2년간에 걸쳐, 공법 적용지점 상하류구간에 웅덩이와 여울 지형이 형성되면서 이를 서식기반으로 하는 다양한 어류종이 서식하게 되었다. 하상미지형의 형성과 함께 수심과 유속의 변화 또한 어류서식기능을 향상시킨 요인으로 평가된다.

3. 저서성 대형무척추동물

저서성 대형무척추동물군은 하천생태계의 특성을 나타내는 주요한 생물분류군이다. 하천구간에 따라 다양한 종 특성을 보여주며 양적으로도 풍부하여 정량채집이 용이하므로 양호한 생태학적 지표로 이용되고 있다(McCafferty, 1981; Ward, 1992). 이러한 저서성 대형무척추동물은 이동성이 적어 환경적 변화에 대한 군집구조를 분석하는데 이용되고 있으며, 그 가운데 수서곤충류는 환경변화에 민감하고, 하천의 특성에 따

른 독특한 군집구조를 가지고 있다. 또한 비교적 뚜렷한 내성범위를 가지고 있어, 수서생태계의 환경을 평가하는 지표생물로서 매우 효과적으로 이용되고 있다(Hynes, 1960; 박 등, 1995; 배 등, 2003).

저서성 대형무척추동물군의 종수 및 개체수 변화에 있어서 공법 적용전인 2010년에는 19종 14,974개체가 출현하였고, 공법 적용 후인 2011년에는 17종 9,515개체가 출현하였다. 2012년에는 21종 39,237개체가 출현하였다. 2010년 공법 적용이전에 비하여 2011년 공법 적용 직후에는 종수 및 개체수의 감소가 나타났다가 생태적으로 안정화 되는 시기인 2012년에 이르러서 종수 및 개체수가 증가하는 경향을 보여주었다.

군집 지수변화는 2010년부터 2012년까지 공법 적용 지점 상하류 2개 지점에 대한 군집분석 지수를 비교하면 전체적으로 다양도와 군

Table 7. Annual change in community index of benthic macro-invertebrate.

Items	2010	2011	2012
Diversity	0.96	1.31	1.31
Evenness	0.40	0.59	0.70
Richness	1.18	1.08	1.10

Table 8. Annual change of benthic macro-invertebrate.

Items	2010	2011	2012
No. of Species	19	17	21
Populations	14,974	9,515	39,237
Diversity	0.96	1.31	1.61
Evenness	0.40	0.59	0.70
Richness	1.18	1.08	1.18

등도, 그리고 풍부도 지수가 대체적으로 증가하는 현상이 나타났다. 이는 2011년에 비해 2012년의 조사지점 수생태계가 보다 더 건강한 상태로 변화하였음을 보여주는 것이다.

하상공법 적용에 따른 여울부의 형성으로 인해 저서성 대형무척추동물의 출현 양상에 변화가 나타났다. 저서성 대형무척추동물을 이용한 군집평가에서는 년도별로 증가하는 경향을 보여주었으나, 생태지수 평가에서는 소폭으로 감소하는 경향을 보여주는데 이는 공법 적용구간의 하류부에 여울 형성에 따른 유속 증가와 집중류에 의한 영향으로 판단된다.

4. 부착조류 모니터링

부착조류(attached algae)는 하천생태계의 특성을 잘 나타내는 1차 생산자로서 광범위한 분포역을 가지고 있다. 규조류, 녹조류, 남조류로 구성되며 빛을 받을 수 있는 하상구성물이나 대형식물의 표면에서 성장한다(한국건설기술연구원, 2001). 상위 소비자의 중요한 에너지원일 뿐만 아니라 수체 내의 영양염을 생물량으로 전환하는 정화능력을 가지고 있다. 더욱이 부착조류는 수환경 변화에 대해 빠른 반응을 보이기 때문에 영양염의 공급이 지속적인 하

천의 수질평가를 위한 수질의 지표로서 유용할 수 있다. 또한 하천의 구조적인 변화가 있을 때는 생물종이나 전체 생물량의 변화를 보여주고 있어, 하천의 물리적 생태적 구조변화에 따른 상태를 대변할 수 있다.

조사기간 동안의 부착조류의 점유율 변화는 분류군에 따라 달리 나타났다. 남조류의 점유율은 2010년 10%에서 2012년 17%로 점차 증가하였고 규조류는 2010년 72%에서 50%로 대폭 감소하였으며 녹조류는 2010년 18%에서 2011년 50%로 대폭 증가하였다가 2012년 25%로 감소하였다.

종다양도의 경년변화는 공법적용 전후의 구간에 따라 상당한 차이를 보인다. 공법적용 상류지점인 St. 1에서는 공법 적용 이후인 2011년과 2012년을 거치면서 유속이 완만한 웅덩이형 수환경을 형성하면서 종 다양도는 점차 감소하였다. 공법 적용 하류지점인 St. 2에서는 공법 적용 직후 급격한 변화과정을 보여주고 있다. 공법적용 전인 2010년 1.4에서 공법적용 직후인 2011년 2.3으로 대폭 증가하였다가 2012년에는 0.4로 급격히 감소하였다. 이는 2012년 6월에서 9월까지 발생한 빈번한 홍수 교란에 의한 부착조류의 탈리현상에 기인한

Table 9. Annual change in species diversity of attached algae.

Items	2010	2011	2012
St. 1	2.6	2.4	1.8
St. 2	1.4	2.3	0.4

Table 10. Annual change in biomass of attached algae.

Items	2010	2011	2012	
			Jun	Sep
St. 1	0.6	10.0	3.9	3.2
St. 2	1.0	7.2	4.1	0.4

것으로 판단된다. 공법적용 이후 유속이 완만한 웅덩이를 형성하는 St. 1과는 달리 St. 2에서는 상대적으로 빠른 유속을 이루는 여울이 형성되어 하상을 이루는 입자가 굵은 자갈 표면에 부착되어 있던 조류가 씻겨져 내려가면서 종다양도가 현저하게 감소한 것으로 판단된다.

평균 현존량의 변화에 있어서 2012년에 문순강우(6월)과 문순강우 이후(9월)에 부착조류의 현존량은 9월에 비해 6월에 다소 높은 현존량을 보였다. 비록 위도에 따른 지역적으로 시기적인 차이는 다소 있지만 일반적으로 국내 하천에서 볼 수 있는 계절적인 양상을 본 조사는 반영하고 있다. 즉, 부착조류의 계절적인 패턴은 문순강우 이전에 높은 부착조류의 현존량을 보이고 문순강우기에는 낮은 현존량을 보인 후 다시 강우 이후 현존량의 증가를 보인다. 다시 말해서, 2012년 6월에 비해 2012년 9월에 잦은 강우로 인해 하상의 잦은 교란과 이로 인한 부착조류의 탈리현상의 형향이 발생하였음을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 하천 바닥면에 형성되는 하상간극수역의 생태적 기능 활성화를 목적으로 하는 하상공법의 구개발을 위해 수행되었다. 이를

위해 2010년 안양천 화창교구간에 실험적 하상공법을 적용하였고, 2011년과 2012년에 걸친 2년간의 사후모니터링을 통해 공법의 수리적 안정성과 함께 공법 적용 후의 생태계 변화과정을 분석하여 공법의 유효성을 평가하였다.

하상공법에 대한 사후모니터링 결과는 다음과 같다.

하천지형경관은 공법 설치 이후, 강우와 홍수에 의한 유량과 수위변동을 유발하는 다소간의 자연교란 요인은 있었으나 대규모 하상교란을 유발하는 인위적 요인이나 자연적 요인이 없어 하상세굴이나 저수로호안의 침식과 같은 하천지형의 대규모 변화는 발생하지 않았다. 또한 설치한 공법이 설치 당시의 위치를 유지하면서 그 형상을 변형시키지 않고 있어 수리적 안정성을 간접적으로 확인할 수 있었다. 한편 저수로 내부에서는 공법적용에 따른 하상미지형의 변화가 발생하면서 수서생물의 서식기반환경이 다양하게 형성되었다. 공법적용 구간의 저수로 가장자리 부분에서 자갈과 모래의 재퇴적이 이루어지고 저수로 중앙부의 직하류부로 완만한 경사면의 여울이 형성되면서 저서무척추생물을 포함한 수서생물종의 서식처가 다양화되는 하천지형 형성과정을 보여 주었다.

생태계 변화과정의 모니터링은 하상공법 적용에 따른 서식환경의 변화를 반영해 줄 수 있는 어류, 부착조류, 저서성 대형무척추동물에

대해 실행되었다.

하상공법 적용 전후의 어류종 변화는 현저하게 나타났다. 공법적용 후 2년간 어류종수와 개체수는 점진적으로 증가하였다. 공법 적용구간의 상류부에는 웅덩이형, 하류부에는 여울형 서식처가 연속적으로 형성되면서 어류종수와 개체수 증가를 가져오게 된 것이다. 어류 종조성에 있어서도 상대적으로 유속이 완만하며 수심이 깊은 웅덩이와 유속이 빠르며 수심이 얇은 서식처로 분화되면서 다양한 서식기반환경이 형성된 결과로 보여 진다.

저서성 대형무척추동물군은 하천 구간에 따른 종 분포 특성을 예민하게 반영하는 생태학적 지표로서, 하상공법 적용전후의 시간적 변화과정과 함께 공간적 분화과정을 나타내고 있다. 저서성 대형무척추동물의 군집평가에 있어, 연도별로 증가하는 경향을 보여주었으나, 생태지수 평가에서는 소폭으로 감소하는 경향을 보여 주었다. 이는 여울 형성에 따른 유속 증가에 의한 교란에 영향을 받은 것으로 판단된다.

반면에 부착조류는 다른 수서생물군인 어류와 저서성 대형무척추동물과 달리 하천구간에 따른 종조성의 특성은 두드러지게 나타나지 않았다. 강우와 유수의 계절적인 패턴에 영향을 받아 강한 유속이 발생하는 시기에 하상경사가 상대적으로 급하여 집중류가 형성되는 여울부에서 탈리현상이 발생하였다.

이상과 같이 살펴 본 하상공법 적용에 따른 하상지형경관의 변화과정과 생물 서식처 기능 증진의 상관관계를 밝힘으로서 하상공법의 유효성(the effectiveness of techniques) 을 확인할 수 있었다. 하상공법의 생물종 부양기능의 개선은 일차적으로 하상공법 적용에 따른 다양한 하천지형의 생성에서 비롯되었다. 하상공법의 적용에 따라 하천지형이 웅덩이와 여울로 분화되는 과정을 거치면서 수서생물종을 대표하는 어류, 저서성 대형무척추동물, 부착조류의 서식처가 다양화되었고 종다양성과 함께 개체수의

점진적 증가를 가져오게 되었다. 이러한 수서생물분류군의 서식기능 향상은 안양천 현장에 적용한 하상공법의 생태적 효능을 어느 정도 반영하고 있다. 하지만 본 연구는 하상간극수역의 복원에 대한 초기 연구로서 실험공법의 현장적용에 있어 규모의 한계성과 함께 정량적 수리 분석과정이 미흡한 상태이므로 후속적 연구를 통해 보완되어야 할 것이다.

마지막으로 하천환경의 생태적 관리에 있어, 일시적이며 고정적인 유지관리가 아닌 사후 모니터링과 함께 생태적 기능을 활성화시킬 수 있는 적응관리의 중요성을 인식하여 생태적 변화과정과 역동성에 근거한 유연하고 지속적인 모니터링과 적응관리가 이루어져야 할 것이다.

인 용 문 헌

- Kang, Ho jeong. 2009. Biogeochemical Reactions in Hyporheic Zone as an Ecological Hotspot in Natural Streams, kwetland 11-1, pp. 123-130.
- Kim, Jong won etc. 2009. Stream Ecology and Nakdong river, publishing department from Keimyung Univ. pp. 60-64.
- Korea Institute of Construction Technology, Seoul Univ. Environmental Planning Institute, 2001, Stream restoration Guideline, pp. 54.
- KUSUDA Tetsuya, 1994, Reinforcement and Control of Purification Mechanism in Nature, Gihodo Books.
- Carson, M. A. 1984. Observations on the meandering-braided transition. Canterbury Plains, New Zealand Geographer, 40. 89-99.
- Crispell *et al.* 2009. Hyporheic exchange flow around constructed in-channel structures and implications for restoration design. Hydrological processes 23 : 1158-1168.
- Gregory, S. V. · Swanson, F. J. · McKee, W. A.

- and Cummins, K. W. 1991. An ecosystem perspective of riparian zones. *Journa*, 41 : 540-551.
- OHTA Takehiko, TAKAHASHI Goichiro, 1999. Ecology and Erosion Control Engineering in Mountain Stream, pp. 82.
- Orghidan, T. 1959. Ein neuer lebensraum des unterirdischen wassers : Der hyporheische biotop. *Journa*, 55 : 392-414.
- Rathnayake U. Sanjeewaa. 2010. Hyporheic Interaction.
- Schwoerbel, J. 1961a. Über die Lebensbedingungen und die Besiedlung des hyporheischen Lebensraumes. *Journa*, 25 : 182-214.
- Schwoerbel, J. 1961b. Subterrane Wassermilben (Acari : Hydrachnellae, Porohalacaridae und Stygothrombiidae), ihre Ökologie und Bedeutung für die Abgrenzung eines aquatischen Lebensraumes zwischen Oberfläche und Grundwasser. *Journa*, 25 : 242-306.
- Stanford, J. A. and Ward, J. V. 1988. The hyporheic habitat of river ecosystems. *Journa*, 335 : 64-66.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). 2000. Principles for the Ecological Restoration of Aquatic Resources. Office of Water, Washington, D.C.
- U.S. Department of Agriculture (USDA). 2001. Stream Corridor Restoration. 6 : 1-41.