

자연과 함께하는 하천복원기술 동향

- 이코리버21 국제워크숍 발표내용을 중심으로 -



김 원 |

한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원
wonkim@kict.re.kr



최 성 욱 |

연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
schoi@yonsei.ac.kr



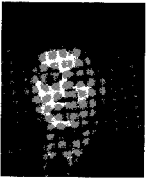
박 문 형 |

한국건설기술연구원 하천해안연구실 박사후연수생
moon@kict.re.kr



여 흥 구 |

한국건설기술연구원 수자원연구부 책임연구원
yeo917@kict.re.kr



안 흥 규 |

한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원
ahnhk@kict.re.kr



장 항 래 |

충주대학교 토목공학부 조교수
cljang@cjnu.ac.kr

이 기사는 '이코리버21연구단'이 '자연과 함께하는 하천복원기술개발 사업'의 일환으로 국제 공동연구와 최신 선진기술의 습득을 위해 지난 2009년 4월 개최한 '하천복원 국제워크숍'에서 발표된 6명의 외국 전문가들의 논문을 요약한 것이다.

1. 머리말

최근 사회에서 하천 분야에 대한 환경적 욕구가 급속히 커짐에 따라 전통적인 이치수 관리와 더불어 생태적 관점에서도 지속가능한 하천관리 전략의 개발을 요구하고 있으며, 이러한 경향은 앞으로 지속될 것이다. 지난 4월에 열린 국제워크숍은 이치수와 같은 하천의 공학적 기능과 서식처, 수질자정, 심미 등과 같은 자연적 기능을 동시에 만족시킬 수 있는 선진 기술을 소개하였다는 점에서 그 의의가 있다. 이번에 초청된 외국 발표자들은 독일 1인, 오스트리아 1인, 미국 2인, 일본 2인 등 모두 6인으로서, 이들은 지난 1~2년 동안 이코리버21연구단과



공동연구를 수행하였다.

본 고에서는 먼저 홍수터 보전/복원 분야에서 “독일기준에 의한 수목영향 평가(독일 Braunschweig 공과대학의 Dittrich 교수)”, “댐에 의한 하류 하천의 식생변화 모델링 평가(오스트리아 하천식생모형 전문가 Egger 박사)”, “충적하천과 수리기하학적 장기변화 관한 분석(미국 콜로라도 주립대학 Julien 교수)”의 발표 논문을 요약하여 소개한다. 다음 생물서식환경 조성 분야에서 “생물서식처로서 수계활용방안(일본 나고야대학 Tsujimoto 교수)”, 하천평가 및 적응관리 분야에서 “Tidal creek의 지형변화에 관한 수치모의(일본 북해도 대학 Schmitzu 교수)”와 “하천복원의 과학적 접근(미국 미네소타 대학 Sotiropoulos교수)”에 대해 요약 소개한다. 당시 워크숍에서 발표한 원 자료는 이코리버 21연구단 홈페이지(<http://ecoriver21.or.kr>)에서 받을 수 있다.

2. 홍수터 보전/복원 분야

(1) 독일기준에 의한 수목영향 평가방법(Dittrich 교수, 독일 Technical Univ. of Braunschweig)

식생은 흐름저항을 증가시키고 수면곡선을 변화시켜 홍수위에 상당한 영향을 미친다. 최근까지 이 연구 분야에 상당한 발전이 이루어져 왔지만, 식생이 흐름에 미치는 영향 또는 그 반대영향은 충분히 이해되지 못하고 있다. 전통적인 접근방법에서는 식생은 흐름저항의 모든 요소를 혼합한 주수로 또는 홍수터의 매닝조도계수를 조정함으로써 전체 저항으로 변환된다. 이러한 조도계수는 실무에서 폭넓게 활용되었고, Chow(1959), Arcement와 Schneider(1989), 그리고 Hicks와 Mason(1999)과 같은 참고자료를 이용하여 결정되었다. 그러나 하상재료에 의한 저항과 식생에 의한 저항을 분리하여 결정하기 위해서는 흐름과 식생의 유형(정수 식물과 침수식물), 식생밀도, 식생의 물리적 특성

(수종, 수령, 식생의 성장 및 상태), 그리고 유속의 증가에 따른 식생의 형상변화와 같은 식생과 관련된 특성을 설명하는 것이 필요하다.

하상저항과 식생저항을 분리하는 일반적인 접근 방법은 항력 접근법이다. 이러한 접근은 항력에 미치는 식생밀도의 영향을 검토하기 위하여 사용되었다. 그러나 유연한 식생과 식생군에서 항력계수의 거동은 완전히 해석되지 못하였다. 식생흐름과 관련된 또 다른 중요한 이슈는 난류흐름 구조와 흐름장의 공간적 이질성이다. 최근 몇몇 연구는 식재된 하도와 홍수터의 유속분포 그리고 난류 특성에 집중되었다. 이러한 연구들은 대부분 침수식생 위의 흐름에 대하여 대수 연직유속분포를 채택하고 있다. 다만 접근상의 차이점으로는 ‘zero’ 유속이 발생하는 지점과 조도높이를 수정하는 것이다. 지금

표 1. 기존 흐름-식생 관련 연구

Data-Type	Sources
Drag force measurements	Oplatka(1998), Freeman 등(2000), Fischenich & Dudley(2000), James 등(2001), Plew 등(2008), Schoneboom 등(2009)
Compound channel with floodplain vegetation	Pasche(1984), Schnauder(2004), Yang(2007), Sun & Shiono(2009)
Bank vegetation	Felkel(1960), Kaiser(1984), Bertram(1985), El-Hakim & Salama(1992), James 등(2001), Specht(2002)
Channel full resistance	Kouwen 등(1969), Lindner(1982), Haber(1982), Kaiser(1984), Dunn 등(1996), Elliot (2000), James 등(2001), Freeman 등(2000), Ghisalberti & Nepf(2004), Carollo 등(2005), Cirraolo 등 (2006), Schoneboom 등(own data)

까지 흐름과 식생과 관련된 연구는 표 1과 같다.

기존 연구의 식생영향 평가방법을 상대적인 침수 정도, 식생에 대한 상대적인 하천폭, 흐름방향 식생의 상대적 길이 등으로 구분하면 그림 1~3과 같다.

- 수목영향 평가방법의 유형화(상대적인 침수정도)
 - $h/h_p < 5 \sim 10$: 키가 작은 식생, 유속분포의 수직이동
 - $1 < h/h_p < 5$: 중간 키의 식생, 식생층과 표층에서 상이한 유속분포
 - $1 < h/h_p$: 키 큰 식생, 연직유속분포 변화 적음, 침수된 수관부 고려 필요
- 수목영향 평가방법의 유형화(식생에 의한 상대적인 하천 폭)
 - $w/h < 2(?)$: 강턱식생이 있는 좁고 작은 하도, Specht(2002) 방법

- $2 < w/h < (?)$: 강턱식생이 있는 작은 하도, Mertens(2006) 방법
- $(?) < w/h < 50$: 넓은 복단면 하천, Pasche (1984) 방법
- 수목영향 평가방법의 유형화(흐름방향 식생의 상대적 길이)
 - 식생이 홍수터에 가득 참(Cross-bar) : Klaassen과 van Urk(1985) 방법
 - 한 줄이나 몇 줄로 난 식생 : 매우 넓은 홍수터의 경우 식생영향은 무시 가능, Becker(1999)
 - 식생 군락 : Jarnes et al.(2001) 실험연구

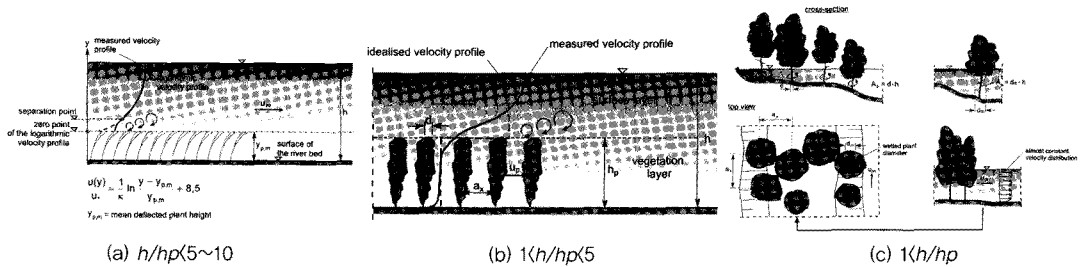


그림 1. 수목영향 평가방법의 유형화 (상대적인 침수정도)

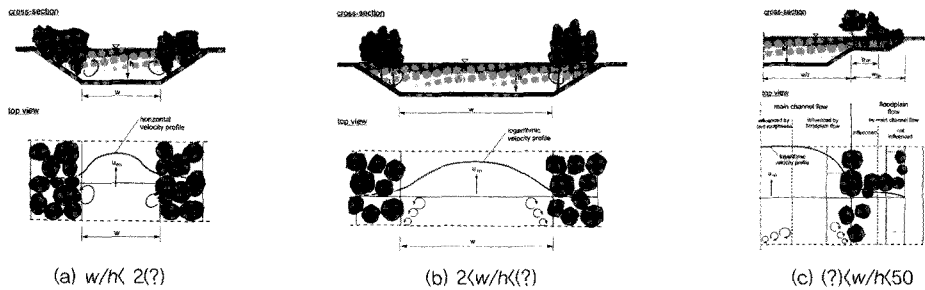


그림 2. 수목영향 평가방법의 유형화 (식생에 의한 상대적인 하천 폭)

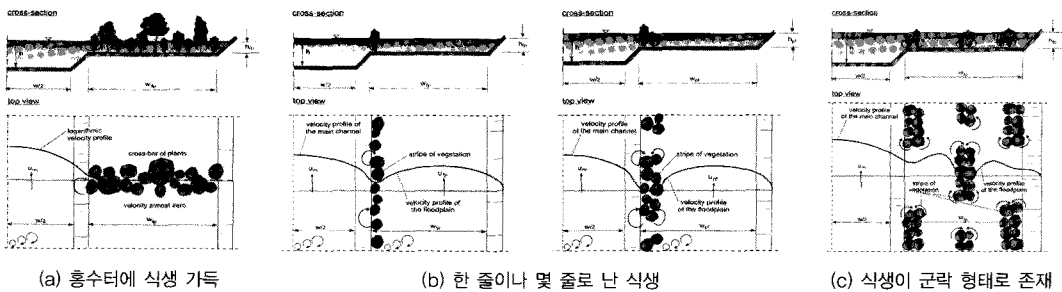


그림 3. 수목영향 평가방법의 유형화 (흐름방향 식생의 상대적 길이)



지금까지 살펴본 바와 같이 항력접근법에 의한 식생영향평가는 식생 수치모형 연구의 보정과정에서 발생하는 불확실성을 감소시킨다. 동시에 전통적인 에너지 손실계수의 사용보다 흐름장의 특성에 더욱 물리적이고 현실적인 접근법을 제공함은 분명하다. 그러나 이러한 접근법을 사용한 하천식생 저항의 적절한 모델링은 여전히 다양한 수종의 항력계수, 식생밀도, 그리고 수관부의 투영면적에 관한 진전된 연구가 필요할 것이다.

(2) 댐에 의한 하류하천의 식생변화 모델링 평가 (Egger 박사, 오스트리아 수변식생천이 전문가)

하천은 흐름, 유사이송, 그리고 생태계 천이과정의 상호작용에 의하여 끊임없이 변화한다. 즉 수리, 수문적 변화에 의하여 하천의 지형이 변화되며 변화된 지형은 지하수 및 토양조건에 영향을 미친다. 이러한 일련의 변화는 하천 내 식생의 성장에 영향을 미치며, 식생의 성장은 조도를 증가시켜 유속을 감소시키고 유사량을 변화시킨다. 하천은 이러한 흐름-유사-식생의 상호작용을 반복하면서 환경에 적응한다.

하천 내의 시스템(흐름, 지형, 식생) 변화를 정량적으로 예측하는 것은 하천복원을 계획하고 복원된 하천을 유지·관리하는데 중요한 기술이다. 특히 우리나라의 경우, 온대 몬순기후의 특성상 과거 흰 모래밭이 끝없이 펼쳐져 있던 하천(white river)이 댐, 보, 제방 등과 같은 하천구조물을 포함한 다양한 하천사업에 의해 녹화(green river)되고 있어 결과적으로 자연 하천에서 멀어져 가고 있다. 이러한 변화는 중국적으로 하천에 서식하는 종에 직접적인 영향을 미치고 심미적, 접근성 면에서도 바람직하지 못하다. 이러한 인위적인 변화에 적응하고 필요시 변화된 '녹색하천'을 '백색하천'으로 복원하기 위해서는 하천식생의 천이양상을 파악하고 조절할 수 있는 기술개발이 필요하다. 한국과 하천환경이 유사한 일본에서는 식생이 번성한 하천을 과

거 모래/자갈 하천으로 복원하는 연구가 진행 중이다(Meano와 Watanabe, 2008). 그러나 한국에서는 흐름 및 지형변화에 대한 단편적인 연구는 많이 수행되어 왔으나, 하천 시스템의 전반적인 변화 및 식생의 천이에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않고 있다.

이번 워크숍에서 Egger 박사는 미국/오스트리아 등에서 다년간의 연구 경험을 토대로 'rule-based succession model'을 소개하였다. 'Riparian Vegetation Model'로 명명된 이 모형은 각 식생의 천이단계별 지속기간을 정의한다. 예를 들어 어느 지역에 갈대가 도입된 후 3년이 경과하면 다음 단계인 관목류로 천이한다고 예상한다. 천이단계별 지속기간에 대한 규칙(rule) 이외에 식생의 성장 및 천이에 지장을 주는 요소(홍수시 유속 또는 전단속도, 홍수위, 침수기간 등)들에 대한 규칙을 별도로 정립해야 한다. 각 요소를 결정한 후, 전문가 판단에 의하여 각 요소들의 한계조건을 정의한다. 전단속도를 예로 들면, 갈대는 전단속도가 10cm/s이하인 경우 생존하며, 이 보다 큰 전단속도가 발생하면 퇴행(retrogression)한다고 가정한다. 이러한 규칙을 적용한다면 갈대가 성장하는 지역에서 발생한 3년간의 홍수시의 전단속도가 10cm/s이하라면 관목단계로 천이하게 된다.

이 모형은 매개변수(천이단계별 지속기간과 한계조건)에 대하여 전문가적 판단이 필요하다는 단점이 있지만, 계산이 비교적 간단하다는 장점이 있다. 또한 전문가적 판단에 주관적 판단이 개입될 여지가 많으므로 반드시 매개변수의 검정 절차를 거쳐야 한다.

또한 본 워크숍에서는 이 모형을 낙동강 안동댐 하류구간에 시험 적용한 결과를 함께 발표하였다(이는 이코리버21연구단과 공동연구 중간성과임). 이 지역 상류에는 1976년과 1992년에 각각 안동댐과 임하댐이 준공되었다. 이 구간은 임하댐이 건설된 후 식생의 도입이 활발하게 진행되고 있는 구간으로서, 2007년 현재 많은 지역에 교목류가 자라고

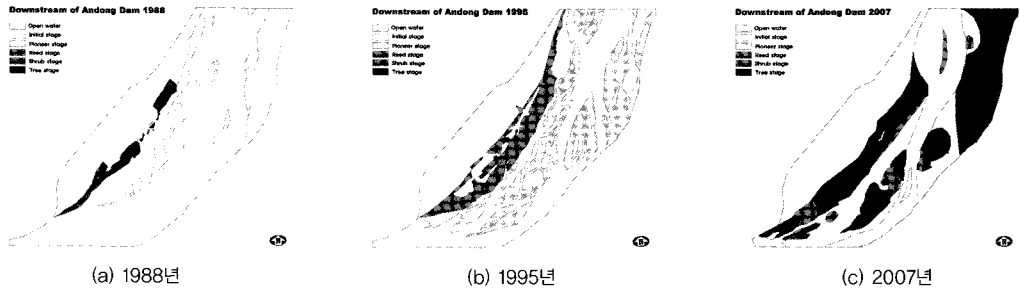


그림 4. 대상구간 식생분포 변화 양상

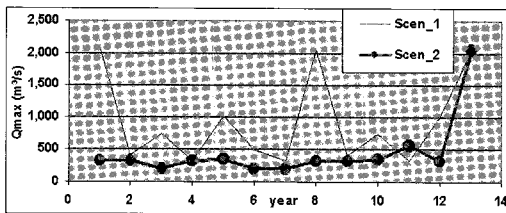
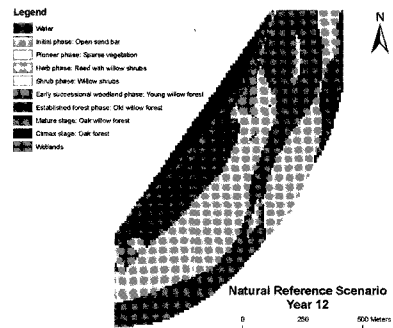


그림 5. 시나리오 별 수문곡선

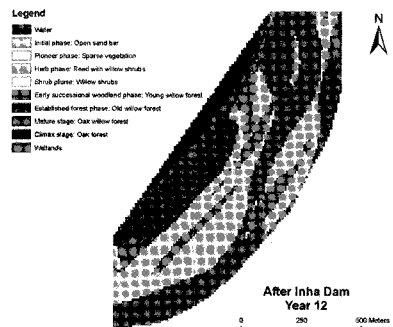
있다(그림 4 참조). 즉 상류 댐에 의해 홍수 규모가 줄어들어 식생이 이입, 성장할 수 있게 되었다. 이러한 가설을 확인하기 위하여 임하댐 유무에 따른 식생천이를 예측하였다. 이 예측에서 한계조건은 홍수시 전단속도만을 고려하였다. 2007년의 식생 분포를 초기조건으로 부여하였으며, 1988년 이후의 실제 수문곡선을 바탕으로 임하댐이 존재하지 않는 경우(그림 5의 시나리오 1)와 임하댐이 존재하는 경우(그림 5의 시나리오 2)에 대한 가상의 수문 곡선을 생성하여 13년간 모의하였다. 12년 경과한 후에 예측된 식생분포는 그림 6과 같다. 임하댐이 없다고 가정한 시나리오 1의 경우에 식생이 거의 없는 것으로 나타나 이 구간의 활발한 식생 활착은 상류 댐에 의하여 홍수가 조절되기 때문이라는 가정을 뒷받침하였다.

여러 가지 한계조건 중 전단속도만을 고려하고 수문사상도 단순화 한 시험 적용이기는 하지만 이러한 결과로부터 'rule-based succession model'의 국내 적용 가능성을 확인할 수 있다. 이 코리버21연구단에서는 국내 하천에 자생하는 식생의 한계조건 및 적절한 수리모형을 조합하여 우리

나라 하천에 적합한 식생천이 예측모형을 개발하고 있다. 이를 위하여 국내 수리학과 생태학자, Egger 박사 연구팀과 공동연구를 수행 중이며, 이 코리버21의 연구가 종료되는 2011년경에는 우리 여건에 맞는 식생천이예측 모형을 출시할 수 있을 것이다.



(b) Scenario 1: Natural Hydroregime



(c) Scenario 2: Current Hydroregime

그림 6. 식생천이 예측 결과

(3) 충적하천의 수리기하학적 장기 변화에 대한 분석(Pierre Y. Julien 교수, 미국 콜로라도 주립대학교)

충적하천에서 장기변화예측에 대한 주제들은 수문학, 수리학, 유사이송의 지식을 포함하고 있으며, 그 해석이 매우 복잡하고 앞으로 변화에 대한 이해와 정확한 예측이 요구된다. 삼림 벌채 또는 도시화 등 토지이용변화에 따른 지표유출과 유사이송 과정의 인위적 변화를 예측하기는 매우 어렵다. 본 논문에서는 미국과 한국의 사례를 통해 하상침식으로 인한 장기변화, 그리고 댐 하류의 수리기하적 변화에 대한 미국 뉴멕시코 주 리오그란데 강(그림 7 참조)과 한국 황강의 사례와 수치모형의 성공적인 활용에 대한 몇 가지 의견을 제시한다.

첫 번째 사례는 지난 20여 년 동안 연구해 온 미국 뉴멕시코 주에 위치한 리오그란데 강으로 Cochiti 댐과 Elephant Butte 저수지까지 구간에 대한 것이다. 이 구간에서는 1935년에 하폭이 넓어지고 수심이 얕은 다지 하천 형태였으며, 1972년까지 하천 형태가 하나의 직선하도로 변화하였다. 1992년에는 하천 만곡이 커지면서 사행하천으로 변화하기 시작하였으며, 따라서 지난 60년 동안 하천형태가 다지하천에서 폭이 좁고 수심이 깊은 자갈하상의 사행하천으로 변화한 것으로 나타났다. 주된 의문점은 과거의 수리기하적 변화분석을 통해 어떻게 미래에 나타나는 변화를 예측하는 가이다.

평형상태의 하천 형태 및 기하를 예측하는 여러 방법을 이용하여 예측 결과를 제시하였다. 특히 Julien and Wargadalam(1995) 방법을 이용한 예측 값이 리오그란데 강의 사례에 잘 맞는 것으로 나타났다. 현재 많은 토사가 발생하는 구간인 Elephant Butte 저수지 상류의 리오그란데 강 200km 구간 내에서는 이처럼 유사가 부족한 형태의 하천에서 지나치게 많은 양의 유사가 발생된 형태로 변화할 수 있음을 잘 보여주고 있는 사례이다. 또한 비슷한 한국의 사례는 콜로라도 주립대학교에서 수행된 '낙동강 하구둑에서 배사를 위한 수치모형 연구'(Ji, 2006)이다. Richard 등(2005)에 의해 개발된 시간에 따른 하폭의 점진적인 변화를 예측하는 새로운 방법에서는 리오그란데 강의 중류 구간과 합천댐 하류의 황강 구간에서 예측 모형의 결과가 실제 현상과 매우 유사한 것으로 나타났다. 특히 황강의 경우 콜로라도 주립대학교의 Yang 교수에 의해 개발된 GSTAR 모형도 유사이송, 하상침식, 종단하상고 등에 있어서 지난 과거 변화를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 지난 20년 동안 발생한 흐름 조건이 앞으로 20년 동안 동일하다고 가정했을 경우 황강의 변화는 2013년 이후에 상당히 작을 것으로 예측되며 2013년에서 2023년까지 하천 기하적 변화는 1987년에 댐이 건설된 이후 지금까지 발생한 변화에 비해 매우 작을 것으로 예측되었다(그림 8 참조).

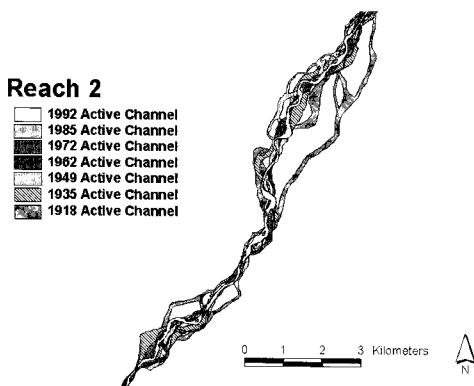
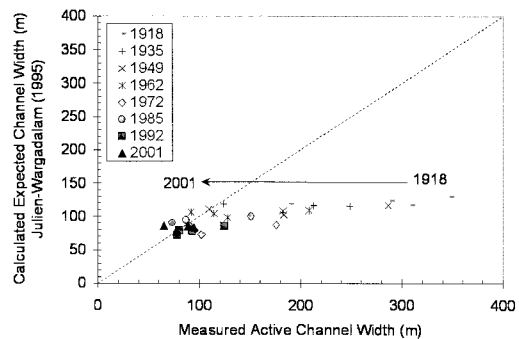


그림 7. 평형상태로 진행되는 Rio Grande 강의 하폭 변화



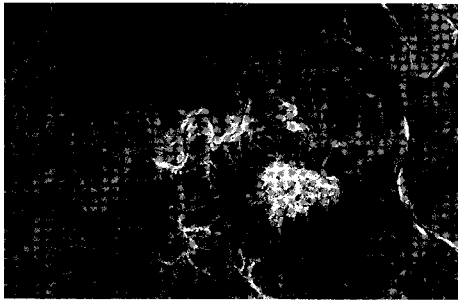


그림 8. 합천댐 하류의 황강 45km 구간에서 댐 건설로 인한 댐 하류의 하천 지형 변화 (Shin, 2007)

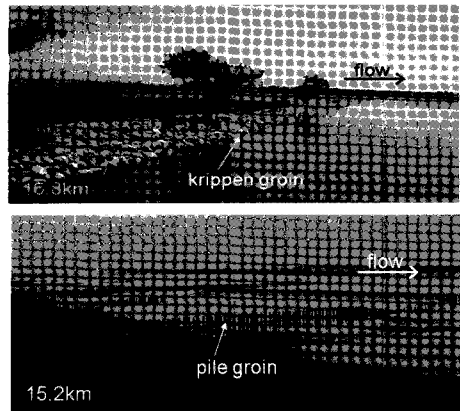
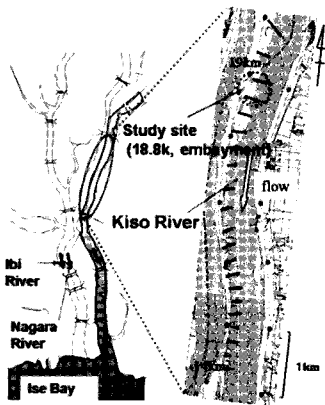
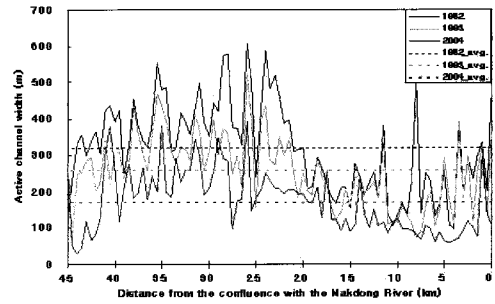


그림 9. 연구대상지(키소카와)와 적용된 수제의 형태

3. 생물서식환경 조성기술

(1) 생물서식처로서 수제활용방안(Tsujimoto Tetsuro 교수, 일본 나고야대학)

수제의 본래 기능은 물의 흐름 조절, 퇴적 조절, 하상변동 조절, 하상선(thalweg) 조절, 홍수제방의 보호, 홍수저항, 하구폐색 방지 등이다. 그러나 최근에 과거 광범위한 하천개수사업이나 댐 건설 등을 통한 하천관리가 아닌, 하천 생태계관리가 중요하게 부각되고 있다. 따라서 수제 기능 역시 이러한 최근 변화에 맞추어 하천에서 생태적인 기능을 띠고 있다. 수제의 형태와 크기 등은 각각의 하천에서 요구하는 기능과 퇴적물에 따라 결정된다. 본 연구에서는 일본 키소카와 감조구역에 대상으로 수제군을 설치하여 사주와 개방형습지(완도)를 만들고,

다양한 물리환경을 가지는 수제군이 해류 소상(遡上)에 미치는 영향과 이러한 새 환경이 재첩 서식처에 어떻게 기여하는지에 대하여 조사하였다.

유로연장이 229km이며, 유역면적이 5,275km²인 일본의 키소카와를 대상으로 하구 기수역에 설치된 수제군을 대상으로 분석하였다(그림 9 참조). 수제의 다양한 생태적 기능의 통합적 평가를 위하여, 조수 지역에서 미세지형의 변천과정, 경관형성 과정 및 경관 유형분류, 사주에서 조수에 의한 수위변화 및 수질측정을 하였으며, 나아가 서식처 제공 기능에 대한 평가를 하였다(그림 10 참조).

재첩의 서식량은 해수가 거슬러 올라가는 하류 측 방향으로 많아진다. 재첩의 서식처를 규정하는 해수의 소상특성을 고려하려면 해수의 도달거리, 체류시간 등을 고려하여야 한다. 수치해석으로 수

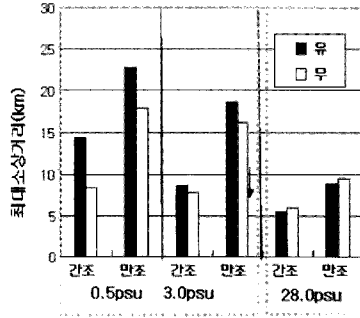
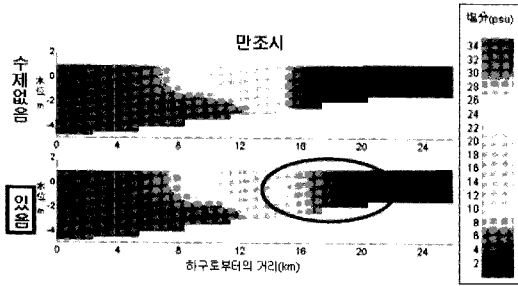


그림 10. 수제설치 유무에 따른 재첩의 서식 적성범위 평가

제의 유무가 해수소상에 미치는 영향을 분석한 결과, 수제가 있는 곳에서 재첩의 서식, 산란, 발생에 적합한 염분농도의 해수가 소상하는 범위는 하도중 단방향으로 넓어지고 체류시간이 길어진다. 따라서 수제를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하면, 12, 16, 20km의 모든 지점에서 0.5~28.0(psu)의 서식적정범위 내 해수 체류시간이 길어지며, 이러한 경향은 사수역 내, 수제 끝단, 본류의 모든 지점에서도 동일하게 나타났다. 특히 사수역 내에서는 본천과 비교하여 체류시간이 길어진다는 특징이 두드러진다. 더욱이 만조와 간조기를 비교하면 수제의 유무에 관계없이 만조 쪽이 서식적성범위 내 해수 체류시간이 길어진다. 또한 유량마다 체류시간 차이를 보면, 유량이 큰 경우에 재첩의 서식적성 범위의 해수 체류시간은 감소하며, 변동의 크기는 감소 때가 더 커진다. 이것은 조수간만의 영향이 적어서 유량에 의한 영향을 강하게 받고 있기 때문으로 판단된다.

(2) Tidal creek의 지형변화에 관한 수치모의 (일본 북해도 대학 Schmitzu 교수)

최근 지구의 온난화에 따라 기후변동, 해수면 상승에 의하여, 국지적인 집중호우 및 이상 고호(高湖)가 발생하고 있으며, 인간활동에 의한 많은 영향이 미치고 있다. 예를 들면, 2008년 12월에 이탈리아 베네치아를 기습한 기록상 최대급의 '아쿠라 아리타'로 불리는 이상 고호에 의하여, 도시 전체가

수일간 침수되었으며, 시민의 활동 및 경제활동에 지대한 피해를 입혔다(그림 11 참조). 피해를 감소시키기 위하여, 베니스에서는 라군의 항구에 독을 설계하는 등 대책이 검토되고 있다. 그러나 이러한 곳에 형성된 복잡한 수로 망은 풍부한 자연환경을 창출하고, 조류 및 어류 등의 다양한 생태환경을 창출하고 있다.

이러한 독특한 지형과 자연환경을 도시의 일부로 일체화 하여 도시환경의 개선 및 휴식의 장을 제공하려고 하고 있다. 예를 들면, 뉴욕 근처의 Staten Island는 현재까지 쓰레기를 매립하는 처분장의 기능을 달성하였다. 그러나 환경을 배려해서 자연복원 사업이 전개되고 있다. 이 중에서 tidal creek를 이용하여 대규모 공원을 조성하고, 주민에게 휴식의 장을 제공하고 있다. Tidal creek에서 다양한 생태계가 형성되므로 이것을 이용한 자연환경 창출



그림 11. 침수된 베네치아 시 San Marco 광장

Water for Future

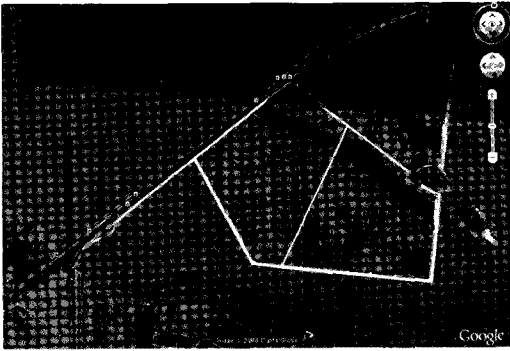


그림 12. 인천공항 부근의 Tidal Creek

및 휴식의 장을 제공하고 있을 뿐만 아니라, 이러한 복원에 의해 해안환경 개선이 기대되고 있다.

이와 같은 재해예방과 환경개선을 위해 수로망의 형성 및 발달 과정을 이해하는 것이 필요하지만, 그 메커니즘에 대해서는 분명하게 밝혀지지 않고 있다. 이와 같은 복잡한 평면형상을 갖고 있는 수로의 네트워크는 세계의 여러 곳에 존재하고 있기 때문에(한국에도 있음, 그림 12 참조), 수로 이동을 해석하고 모의하는 것이 앞으로 다가올 해수면 상승에 대한 습지 보전 및 재난을 방지하는데 유익한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

기고자의 연구에서는 수리동력학적인 거동을 고려하여 2차원 수치모형을 개발하였다. 흐름은 직교 좌표계에서 2차원 수심적분방정식을 이용하였으며, tidal creek의 지형변동은 소류사와 부유사의 거동을 고려하여 유사의 연속방정식으로 해석하였

다. 계산영역은 200 m x 400 m의 정방형 구간이고, 하상경사는 1/1,000로 가정하였으며, 하상토의 입경은 0.01mm로 가정하였다. 상류단 및 좌우안에서 흐름은 없으며, 하류단에서 정현파의 경계조건을 고려하였다. 하류단에서 부유사는 0.00005 m³/s로 가정하였으며, 350일 동안의 지형변동을 모의하였다. 그림 13은 각 시간별 모의 결과를 보여주고 있다.

수치모의를 통한 하천의 지형변동 과정은 다음과 같다. i) 초기에는 전단응력이 한계전단응력을 초과하여 하상이 침식되어 많은 수로가 발달한다. ii) 시간이 지나감에 따라, 하류단에서 유사 공급으로 수로가 합류되고 그 수가 감소한다. iii) 하류단에서 파랑에 의하여 이송된 유사가 퇴적되어 자연 강택이 생성된다. iv) 강택이 있는 하천은 사행이 시작되며, tidal creeks와 같이 하도망을 형성한다.

(3) 하천복원의 과학적 접근 (Sotiropoulos교수, 미국 미네소타 대학)

하천과 관련하여 정밀한 실내외 실험시설을 갖추고 모의, 분석 기법 등을 연구하고 있는 미국 미네소타 대학의 St. Anthony Falls Laboratory의 'StreamLabs'(이하 'SAFL')/NCED에서는 하천 복원에 대한 과학적 접근 비전으로서 현장관측, 수생생태학, 수리 및 수리모형실험 등을 바탕으로 연구를 수행한다(그림 14 참조).

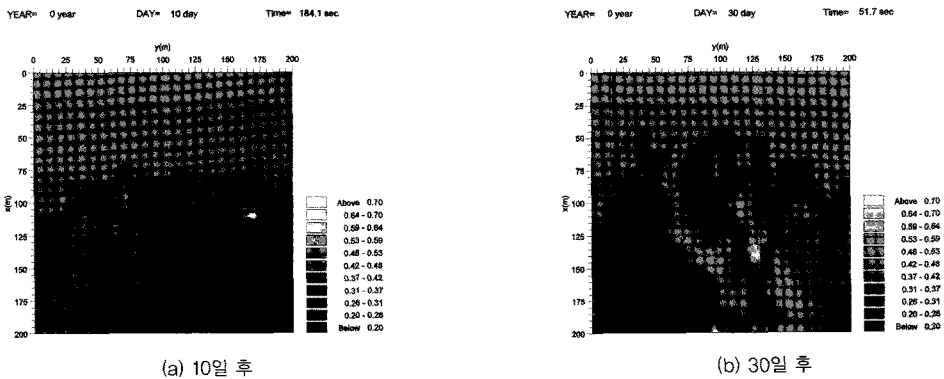


그림 13. 수리동력학적 2차원 수치모형 결과

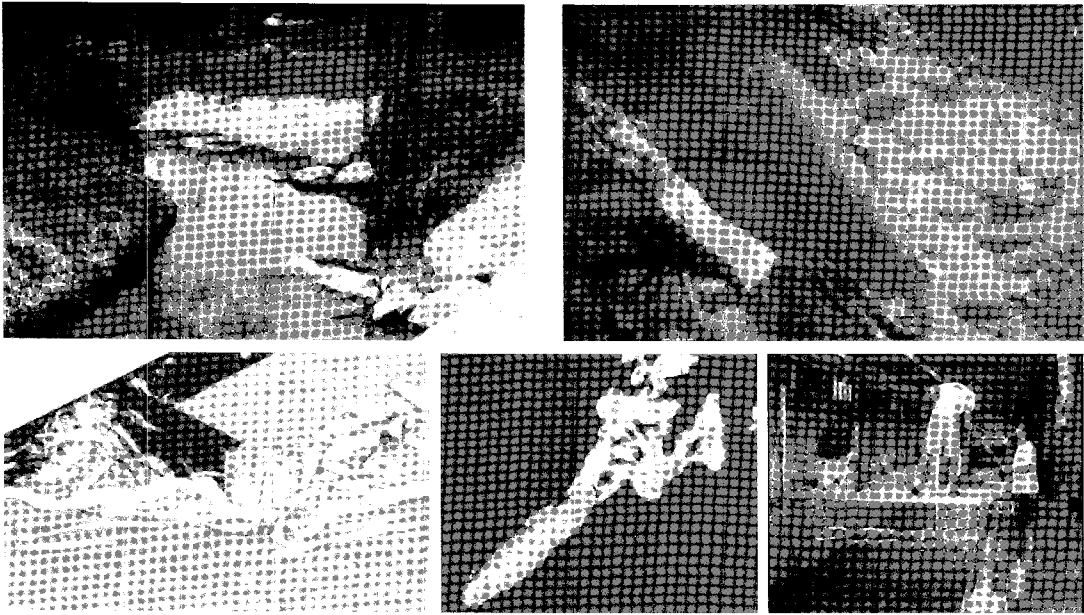


그림 14. SAFL의 연구분야

SAFL의 실외수리연구실 (Outdoor Stream Lab; 이하 OSL)은 미국 미네소타 주의 Minneapolis를 관류하는 미시시피 강에 위치하고 있다. 이곳은 Riverine Corridor와 Riparian Basin 두 개의 영역으로 구성되어 있으며, 각 영역의 제원(표 2 참조)과 수행하는 수리실험의 분야 및 내용은 다음과 같다.

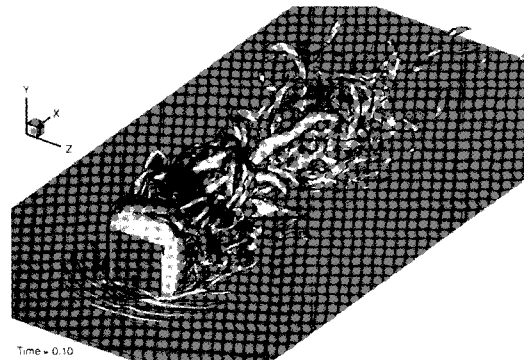
- 다양한 크기의 유역에 대한 흐름특성 분석
- 다양한 분야 및 스케일의 실험
- 수문유량곡선의 분석 및 수행
- 다양한 측정 기법 및 모형에 대한 검증
- 다양한 연구 수행 및 결과물의 가시화 기법
- 자연의 강수 및 태양광 등에 영향을 받는 유기체의 실험 연구 수행

SAFL에서 수행하는 연구는 실질적인 구조물의 형태를 구현하기 위한 Novel 알고리즘을 사용하며, 복잡한 구조물의 해석을 위한 난류모형을 구축 (URANS, URANS/LES, LES)하고, 실질적으로 Re (전단 레이놀즈수= u^*H/ν)가 105-106 인 흐름

표 2. SAFL의 실외수리연구실(OSL)의 제원

구분	Riverine Corridor	Riparian Basin
길이	120 m	40 m
폭	11 m	18 m
최대유량	8.5 cms	2.4 cms
최대수심	1.5 m	1.5 m
최대경사	0.5%	2%
최대유속	6.0 m/s	4.5 m/s

에 대하여 부정류 난류 시뮬레이션 재현하여 난류 모형을 이용한 복잡한 구조물 주위 흐름을 해석한다(그림 15 참조).



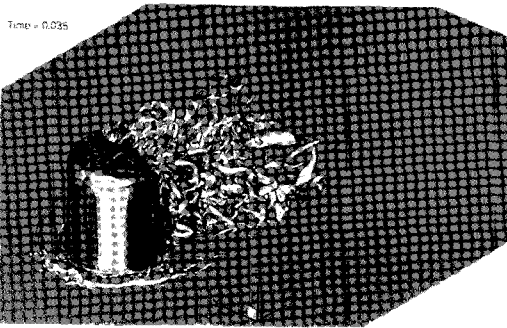


그림 15. 자연하천에 존재하는 복잡한 구조물의 LES 분석

또한 부정류 유사이동 모델링을 위해 하상형태의 변화를 예측할 수 있는 Novel Lagrangian/Eulerian 모형을 통해 바닥 근처에서 난류요동을 모의하며, bursts, saltation, streak 정보를 이용한 일시적이고 간헐적인 유사이송 예측, 다양한 차원분할을 가진 하상 형태 변화 모의, 통계적으로 하상 형태 예측이 가능하다. 더 나아가 흐름과 생물 간의 관계를 시뮬레이션 하는 기법을 수행하고 있다(그림 16 참조).

4. 맺는 말

위에 소개한 하천복원 관련기술은 결국 생태수리학(ecohydraulics)의 분야로 귀착된다. 하천복원 기술은 생태수리학의 요소기술이 결합된 종합기술이다. 생태수리학은 자연계(또는 지구물리적) 수리학과 생물 또는 생태시스템의 반응을 결합한 다학제 연구 분야로서, 수생 생태시스템의 물리적, 화학적, 생태적 과정을 통합하는 샘플링과 모델링 기술이라 정의된다. 구체적으로 1) 생물의 수생서식환경을 위해 필요한 흐름 조건을 다루는 생태 환경유량, 2) 유연하거나 딱딱한 식생에 의한 흐름저항의 변화를 다루는 식생저항, 3) 흐름/유사이송/식생 등의 상호작용을 다루는 수문지형학(또는 홍수터 식생), 4) 수생 서식처 해석을 위한 정확도 높은 2/3차원 흐름모형이나 수질, 특히 부영양화와 수리조건 관계를 다루는 수질 모델링, 5) 서식처의 물리, 화학 조건과 생물과정 관계를 다루는 서식처 수리학, 6) 하천에서 인위적 생물이동통로 조건을 다루는 생태

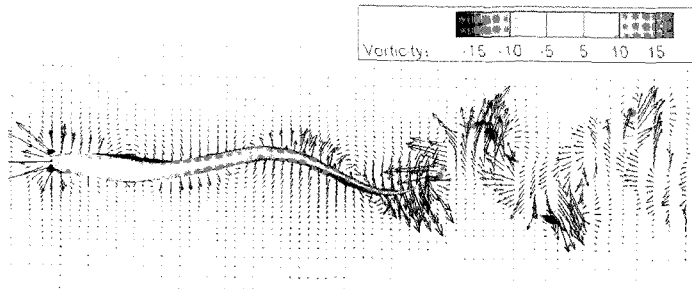
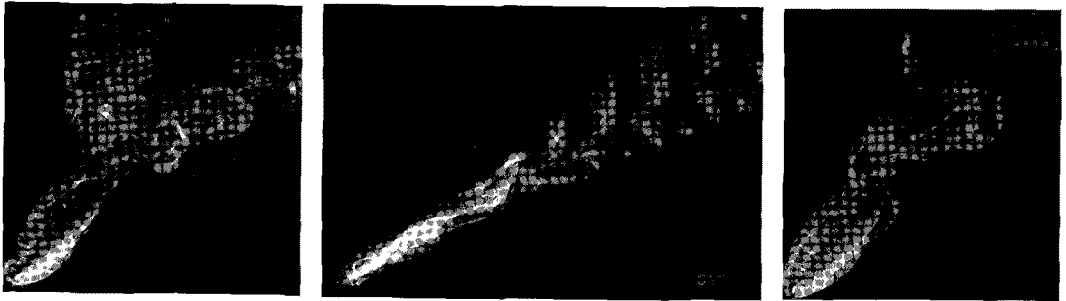


그림 16. 흐름과 생물 간의 관계 시뮬레이션

통로 수리학 등이다¹⁾. 이 지면을 통해 소개한 외국 작으나마 기여하였으면 한다. ☞
의 선진연구 정보가 국내 생태수리학 발전을 위해

이코리버21연구단은 하천의 치수, 구조적 안전성 등을 보장하면서 자연성, 생태성을 보전·복원시켜 '생태적·경제적으로 지속가능한 하천관리'를 실현하는 기술개발을 위해 국토해양부 건설기술혁신 R&D사업으로 2006년 9월 출범하였다. 주관기관은 한국건설기술연구원이며 2011년 8월까지 약 5년간 총 약 200억원, 총 45개 기관, 약 400명의 산업계, 학계, 연구계 등의 전문인력이 투입되는 본격적인 하천복원 연구 프로젝트이다. 연구단은 크게 홍수터 보전/복원, 생물서식환경, 하천평가 및 적응관리 분야 등 3개의 세부과제로 구성되어 있다.

1) 우효섭(2006). "생태수리학: 수공학자와 기술자들의 또 다른 임무", 한국수자원학회지.