

생태 서식 환경을 위한 큰돌 군 (boulder cluster)의 구조

김 규 호 (건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원)

제1장 개 요

- 1.1 연구 목적
- 1.2 연구 방법
- 1.3 기대 효과

제2장 자연 친화적 하천 설계

- 2.1 자연 친화적 하천정비
- 2.2 일본의 디자인형 하천 가꾸기
- 2.3 우리나라에서 자연 친화적 종횡단 계획

제3장 큰돌 군의 구조에 관한 생태환경 이론과 기법

- 3.1 자연 친화적 하천공법과 큰돌 군의 역할
- 3.2 외국의 큰돌 군 조성 기법

제4장 실제 하천 조사

- 4.1 대상 구간과 큰돌 군 특성
- 4.2 수리학적 인자 조사

제5장 결 론

참고문헌

제1장 개요

1.1 연구 목적

사회가 발전하고 인구가 늘어나면서 사람들은 스스로의 생명과 재산을 보호하기 위하여 하천을 개조해 왔고 특히 도시의 발달은 토지이용 증대 등을 목적으로 하천을 더욱 제한된 공간 안으로 구속시켜 왔다. 홍수 등이 발생할 경우, 사회가치가 높아짐에 따라 자산피해는 상대적으로 더욱 커졌고 이를 막기 위한 하천의 정비가 그간 하천사업의 주요 내용 중의 하나였다.

과거 하천정비사업은 주로 이수·치수 목적으로 시행되어 왔다. 하천정비사업은 대부분 비슷한 형태로 시행되어 왔다. 하천에 계획홍수위를 방어할 수 있도록 제방을 축조하여 콘크리트 블록으로 호안을 하였고, 하도는 빠른 홍수의 소통을 위하여 직강화하였다. 홍수소통 단면을 확대하기 위하여 하상을 굴착하고, 저수로 폭을 넓히고, 하도내 식생과 하상재료를 제거하였다. 도시지역은 일률적인 복단면 또는 복복단면으로 고수부지를 형성하거나 하천을 복개하여 주차장이나 도로로 사용하기도 하였고, 농촌지역에서는 하천의 곳곳에 농사를 위해 하천을 가로질러 보를 만들어 물을 확보하려 하였다. 이는 대부분 자연의 일부로서 하천이 갖고 있는 특성을 고려하지 않은 채 인간의 편리에 따라 지배하고 이용하려는 시도였다.

이러한 인간의 욕심은 하천 및 생태환경에 미치는 영향이 크게 작용하여 왔다. 하천은 하·폐수로 오염되고 콘크리트로 뒤덮여 버린 삭막한 모습으로 변하였고, 결국 예전에 볼 수 있었던 많은 생물들이 어우러진 아름다운 모습의 자연하천은 거의 사라지게 되었다. 이러한 정비형태는 하천이 갖고 있는 환경기능을 훼손하며 때로는 하류에 홍수부하를 심해지게 하기도 한다. 자연하천이 갖는 다양성과 연속성이 상실되면 하천은 이미 자연환경이 아니라 단순히 물을 이동시키는 수로의 역할만을 하게 된다.

반면에, 하천은 과거 자연상태에서는 자연스런 여울과 웅덩이, 큰돌 주변의 난류와 와류가 형성되어 하천생태계 서식에 적합한 조건을 제공하였다. 그러나 앞서와 같은 하천정비와 골재채취 등으로 형성된 평탄 하상(glide streambed)은 흐름의 역동성이 소멸함으로써 하천 생태 서식 조건을 위한 용존산소와 조류, 무척추 동물 등이 서식할 수 있는 공간이 부족하고, 동시에 서식 활동과 피난을 위한 공간이 부족하다. 이와 같은 하천에서 생태 서식 환경을 제공하기 위한 큰돌 군(boulder clusters; 轉石 또는 巨石으로 불리고 있음)의 구조를 수리학, 수질, 구조와 배치, 형태 등을 기준으로 구분하여 제시하고자 한다.

1.2 연구 방법

외국과 국내에서 적용되는 기법을 조사하고 실제 자연하천에 평탄 하상과 여울 하상, 큰돌 군의 구조 등에 대해 조사하여 그 특성을 제시한다.

1. 자연 친화적 하천 설계의 요구 조건과 외국의 자연 친화적 하천정비 기법을 조사한다.
2. 국내 하천 형태의 다양성 조성 기법과 큰돌 군의 관계를 조사한다.
3. 큰돌 군의 구조에 관한 생태환경 이론과 기법은 (1) 자연 친화적 하천공법과 큰돌 군의 역할, (2) 외국의 큰돌 군 조성 기법을 위주로 조사한다.
4. 국내 하천에서 큰돌 군의 형성과 그 수리 조건을 조사하여 특성을 분석한다.

1.3 기대 효과

본 연구 조사를 통해 얻어진 연구 결과는 하천 형태의 다양성을 통한 하천생태계 종 다양성, 그리고 하천 수질 개선을 위한 자연 친화적 하천정비기법의 일환으로 활용될 수 있을 것이다.

제2장 자연 친화적 하천 설계

2.1 자연 친화적 하천정비

자연 친화적 하천정비계획이란 간단히 자연하천에 가깝게 하천을 정비하는 것이라 할 수 있다. 자연하천의 자연성을 살리기 위한 가장 좋은 방법은 자연상태의 하천 그대로 보전하는 것이다. 그러나 때로는 홍수피해 방지 등 하천을 정비할 필요성이 대두된다. 자연 친화적 하천정비계획이란 이러한 하천을 정비할 때 그 하천이 갖고있는 원래의 특성을 최대한 보전하여 그 하천이 갖고 있는 건전한 생태계를 보장하도록 하는 것이다.

이와 같이 자연 친화적 하천 정비는 하천의 환경 기능을 부분 또는 전체적으로 유지, 보전, 복원, 또는 창출하면서 치수와 같은 하천의 공학적 기능을 개선하는 하천정비 사업이다. 이는 하천의 공학적 기능과 환경 기능을 동시에 고려함으로써 두 기능이 서로 충돌되지 않는 범위 내에서 환경 기능을 최대한 고려하는 것이다. 자연 친화적 하천정비의 기본 방향은 다음과 같다.

- (1) 자연 하천 고유의 매력(생태, 경관)이 유지되는 하천 정비
- (2) 자연과 조화를 이루는 하천 정비
- (3) 지천과 상하류의 생물적 연속성을 고려하여 하천 정비
- (4) 하천 형태의 분류와 자연도 평가에 의한 구역 구분
- (5) 자연형 하천공법(형태와 재료의 자연형)의 적극적 활용
- (6) 도시 하천 등 수요가 있는 경우 다양한 수변 공간의 창출(친수성 강조)
- (7) 사후 유지관리의 고려

하천 사업은 이수·치수나 기타 다른 목적으로 하천을 주요 대상으로 하는 하천 공사를 말한다. 그런데 ‘자연 친화적’의 의미는 하천의 환경 기능의 유지·보전하는 것이므로, 자연 친화적 하천 사업은 결국 이수·치수나 기타 다른 목적으로 하천 사업을 하는 경우 하천의 환경 기능을 고려하는 것이다. 여기서 특별히 자연 친화적 하천 정비는 이수·치수 목적으로 자연 상태나 개수가 안된 하천을 정비하는 경우 하천의 환경 기능을 고려하는 것이다. 자연 친화적 하천정비에는 이른바 하천환경 정비사업, 하천공원화사업, 하천정화사업, 하천복원사업 등 유사한 사업들이 있다.

2.2 일본의 다자연형 하천 가꾸기

일본에서 하천환경에 관련된 주요 사업으로 먼저 수변 국세 조사가 있다. 다음 하천환경을 고려한 하천계획과 설계의 주요 도구로서 ‘다자연형 하천 가꾸기’가 있다. 이는 독일의

근자연형 하천공법을 소화·개량한 것으로, 이를 간략히 소개하면 다음과 같다.

다자연형 하천 가꾸기는 하천이 본래 가지고 있는 생물의 양호한 생육 환경을 고려하고 동시에 아름다운 자연경관을 보전 및 창출하는 하천정비이다. 이는 치수기능의 정비를 중심으로 풍요로운 자연과 하천경관의 보전, 재생 및 창출을 위한 다양하고 풍요로운 자연환경조건의 창출을 기본 이념으로 한다.

다자연형 하천 가꾸기 사업에는 다양한 하천의 생태를 보전 및 창출하기 위해 어류의 서식을 위해 중요한 여울(瀨, riffle)과 소(沼, pool)의 창출, 나무와 돌을 사용한 공극이 많은 다양한 수제환경의 창출, 호안 표면의 복토 등에 의한 녹화, 다단식과 경사식의 어도조성, 반딧불 생식을 고려한 반딧불 호안의 채용 등 여러 가지 다양한 방식을 채택하고 있다. 다자연형 하천 가꾸기를 시행할 때는 하천과 하천생태계의 특성과 지역주민의 요구에 대해 조사하고 이를 종합적으로 평가하여 대상하천구간을 적절한 정비공법을 선택하여 적용한다. 일반적으로 다자연형 하천 가꾸기에는 기본적인 하도계획 단계에서부터 자연특성을 배려하여 계획하고 시설물 설치 시에도 하천생태계를 배려하고 있다. 나아가 유지 및 관리상에 있어서도 하천환경요소가 보전 및 창출될 수 있도록 계획하고 있다. 다자연형 하천 가꾸기의 주요 내용은 다음과 같다.

1) 홍수시 외력 경감

- 댐 등 하도내 저류, 유수지 및 조절지 등 하도의 저류에 의한 홍수유량의 경감
- 수제와 Vane공(날개 수제) 등에 의한 외력의 집중 완화
- 낙차공의 설치로 종단경사를 완화하여 외력 경감

2) 자연하천의 동적 특성 고려

- 하천의 원래상태를 최대한 살려 굴곡성 등을 배려한 제방과 저수로 범선형의 채택
- 여울과 소의 형성 등 흐름의 특성을 고려한 중횡단형의 계획
- 사행성을 조성하기 위한 다양한 시설의 설치 등

3) 기존 하천시설물에 하천생태계를 배려

① 제방

- 제방법면의 완경사화로 구릉과 같은 제방 조성
- 제내지 범면의 확충과 식재에 의한 제방 녹화
- 식재에 의한 제방법면의 보호

- ② 고수부지
 - 수목의 조밀지, 초원지, 습지, 작은 만 등 다양한 수변환경 조건의 창출
- ③ 저수호안, 비탈멈춤공
 - 수리특성에 따른 식생, 돌, 나무 등을 사용한 호안
 - 돌망태, 잡석 등 다양한 다공질 구조를 가지는 재료의 선택
- ④ 수제
 - 작은 만 등에 의한 다양한 흐름의 형태를 살리는 형태
 - 다공질 구조물을 가지는 재료 사용
- ⑤ 낙차공
 - 자연적인 흐름의 형태, 하천경관에 적합한 다단식 낙차공, 경사식 낙차공 등 전단면 어도화
 - 다양한 어종의 유도, 도약, 휴식을 배려한 어도 설치

4) 하천 생태계를 고려한 하천 공사

- 여울과 소의 개선, 어류의 피난과 휴식장소를 연계해 거석을 보전한 하상의 굴착
- 제2차 수질오염을 야기시키지 않는 공법의 채용
- 수변의 식생 보전

5) 하천생태계를 고려한 하천유지 및 관리

- 하천생태계를 배려한 공법 실시 시기의 선택
- 하천생태계를 배려한 수변의 수목, 초목에 대한 계획적 벌채
- 다양한 하상형태를 유지할 수 있는 하상관리

2.3 우리나라에서 자연 친화적 종횡단 계획

우리나라에서 자연 친화적 종횡단 계획은 「하천설계기준(한국수자원학회, 2000)」에 다음과 같은 사항이 제시되어 있다.

1) 기본원칙

- ① 하천의 평면설계는 치수를 위한 제방과 고수부지, 그리고 저수로에 대한 공간 조성 및 유지를 위한 계획으로서 자연 하천에서 형성되는 여울과 웅덩이(沼)를 치수와 생

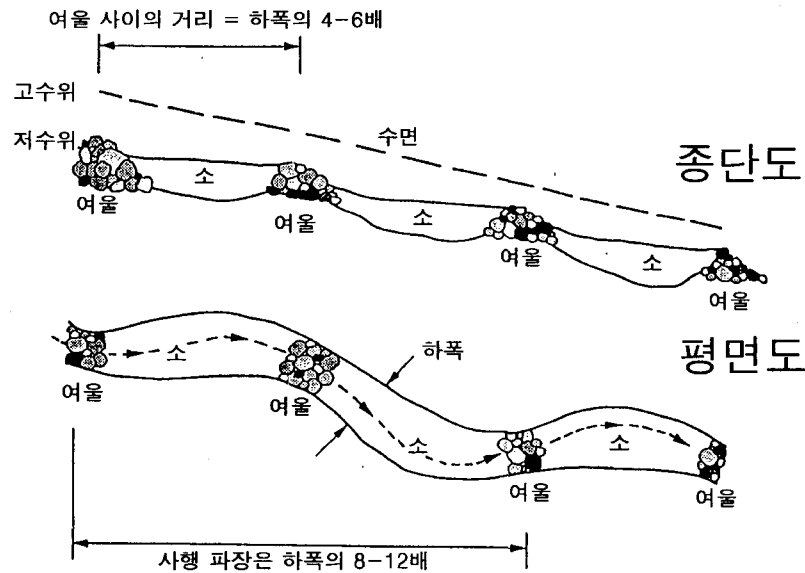
태 측면을 고려할 수 있다.

- ② 여울과 웅덩이(沼)의 구조는 자연상태에서 하천의 안정성이 하상이 일정하게 유지되어 달성되지 않고, 시간 및 공간이 주기적으로 퇴적과 침식을 반복하면서 그 하천 구간의 특성(하천규모, 하상경사, 유량 등)에 맞는 하상과 하도를 형성되도록 하여야 한다.
- ③ 하천의 흐름과 유사의 침식, 퇴적 현상을 충분히 고려하지 못하고 설계되는 평탄화되고, 직선화된 인공하도가 지형학적 관점에서 구조적으로 안정된 하도라 할 수 없다. 기존의 하도 설계 방법에서는 이와 같은 여울과 웅덩이(沼) 구조를 고려하지 못하여 하도 조성 후의 흐름(유속과 수위)의 변화에 능동적으로 대처하여야 한다.
- ④ 하천 생태계에 영향을 미치는 일차적인 요소는 수량과 수질이나, 수생 생물에 필요한 물리적 환경이 갖추어지지 않으면 생존이 불가능하다. 하천에서 수생생물이 생존할 수 있는 환경을 만들어 주는 가장 간편하고 효과적인 방법은 여울과 웅덩이(沼)가 형성되도록 해야 한다.
- ⑤ 하천생태계의 기반이 되는 것은 물과 하상재료이며, 수질, 흐름의 상태(유속, 수심)와 하상재료의 종류에 많은 영향을 받는다. 일반적으로 여울과 웅덩이(沼) 구조는 다양한 흐름 상태와 하상재료를 제공하므로 종의 다양성에 유리한 환경을 제공하여야 한다. 유속이 빠른 여울은 폭기 작용을 통하여 용존산소량을 증가시키며, 유속이 빠른 구간에 정착되는 부착조류 등에 의해 특정 수생생물의 먹이를 제공하기도 한다. 유속이 느린 웅덩이(沼)는 각종 영양물질과 부착조류 등이 풍부하여 어류를 비롯한 수생생물의 서식처를 제공하며, 홍수시에는 피난처를 제공하기도 한다.

2) 자연형 여울과 웅덩이(沼)의 설계

- ① 자연형 여울과 웅덩이(沼) 설계는 기본적으로 자연하천의 여울과 웅덩이(沼)의 구조를 흉내내는 것이다. 즉 여울의 형태, 재료, 기능 등을 자연하천에 근사하도록 설계한다. 이 때에 이용되는 방법은 자연하천에서 조사된 여울과 웅덩이(沼)의 통계적 특징을 이용한다.
- ② 수리적 안정성은 소류력의 발생이 큰 저수로 만제 수위(bankfull water level)를 기준으로 여울과 웅덩이(沼) 자체의 안정성을 검토하며, 수위 계산을 통하여 홍수위에 대한 영향을 파악한다. 이를 통해 적절한 여울과 웅덩이(沼)의 형태, 재료 등을 결정한다.
- ③ 자연형 여울과 웅덩이(沼)의 평면 설계에서 필요한 설계인자는 하폭, 여울 사이의 간격, 사행파장, 하도의 곡률 등이다. 기본이 되는 설계 인자는 하폭을 기준으로 하며 하폭은 여울 사이의 간격, 사행파장 등을 결정하는 기본 변수이다. 하천의 하상재료와 지형학적 특성에 따라 다르지만 대체적으로 여울 사이의 간격은 하폭의 4~6배 정도이며, 사행 파장은 8~12배 정도이다(<그림 2.1> 참조).

- ④ 설계시 하폭과 여울사이의 간격, 사행 파장을 결정할 때는 반드시 현장조사를 실시하여야 한다. 설계 대상이 되는 하상 경사, 하상재료, 유역면적, 주변 구조물 등을 고려하여 적절히 재조정되어야 한다. 현장 조사시에 침식과 퇴적 흔적을 조사하여 대략적인 그 하천의 사행특성을 파악하고, 이를 통해 제시된 기준 내에서 재설계하여야 한다.
- ⑤ 인위적으로 하도의 곡률을 조정할 경우에는 일반적으로 자연하천의 곡률반경·하폭 = 2~3으로 알려져 있다. 인위적으로 하도의 곡률반경을 적게 할 경우 저수로의 안정성에 문제가 발생할 수 있다. 곡률반경 산정시에는 최심선이 아닌 하도의 기하학적인 중앙선을 취한다.



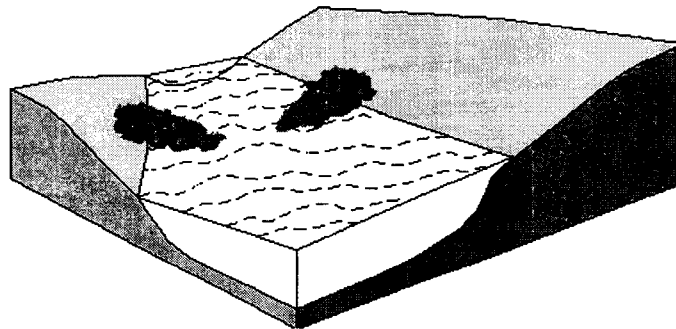
〈그림 2.1〉 여울과 웅덩이(소)의 종단 및 평면 구조

- ⑥ 자연형 여울의 형상 설계에서 중요한 변수인 여울의 높이는 하상과 고수부지의 표고, 하천의 경사, 저수시의 웅덩이(沼)의 수심 등에 따라 결정한다. 여울이 충분한 기능을 수행하기 위해서 하류 여울의 정상부 표고는 상류 여울의 정상부 표고를 초과해서는 안된다.
- ⑦ 저수로 만제 수위에서 여울 지점에 한계류가 발생한다고 가정할 수도 있다. 홍수시의 통수능을 계산하여 통수능에 문제가 있을 경우에는 여울의 높이를 조정하거나 위치를 조정하여 필요한 통수능을 확보하도록 설계한다.
- ⑧ 전체적인 여울의 형상은 V자로 설계되는데 이는 V자 형태의 여울(V자 여울과는 구별됨)이 여울 주변부 호안의 세굴을 감소시키며, 여울 위와 아래 하도의 양안에 와류를 형성하여 물고기의 피난처를 제공한다.

- ⑨ 여울 조성에 사용되는 재료는 일반적으로 다양한 크기의 돌을 사용할 수 있으며, 가장 큰 소류력을 받는 여울 정상부에는 저수로 만제 유량에서 떠내려가지 않는 크기의 거석을 사용한다. 여울의 하류부에는 일정 구간까지 하상에 돌을 깔아서 과도한 침식이 발생하지 않도록 한다.

3) 공법의 종류

- ① V자 여울 : <그림 2.2>와 같이 V자 여울은 인공여울의 한 형태로서 하상 전부분에 설치하는 구조물이 아니고 하안 부분에서 하도 중앙까지의 일정 부분에만 설치된다.
- 가. V자 여울은 일반적인 여울의 하안보호 효과 등이 있지만, 그 설치목적은 적극적인 어류 보호 및 서식처 제공에 두어야 한다.
- 나. V자 여울 중앙 직하류부에는 홍수시 수류가 집중된다. 이곳은 수심이 깊은 웅덩이가 형성되어 갈수기 어류의 서식처 또는 피난처로서의 역할을 한다. 홍수시에 중앙에는 유속이 빠른 흐름이 집중되지만 양안의 상하류부에는 와류가 형성되면서 유속이 약한 구간이 생기게 되는데, 홍수시에 어류가 피할 수 있는 피난처의 역할을 하게 된다. V자 여울 조성시에는 수류가 집중되는 하도 중앙부의 안정성에 유의하여야 하는데, 저수로 만제 유속을 구하여 적절한 돌의 크기를 산정하여야 한다.

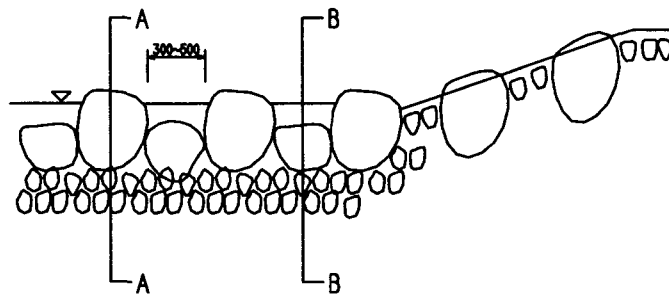


<그림 2.2> V자 여울

- ② 징검다리형 여울 : <그림 2.3>과 같이 큰 돌과 작은 돌을 교대로 배치하여 징검다리로서의 기능과 경관 측면에서 친수성 향상, 폭기에 의한 산소량의 증가 등 다양한 목적으로 계획할 수 있다.

4) 여울과 큰돌 군

지금까지 국내에 제시된 하천 중횡단 형태의 다양성은 위에서 보는 바와 같이 주로 여울 배치와 조성 기법이다. 이는 주로 큰돌 군과는 다른 인위적 조성기법 성격에 가깝다. 그러나 이 기법은 하상재료 분포나 하천 여건에 따라 적용할 수 있다. 단지, 큰돌 군은 자연 상태 하천에서 쉽게 볼 수 있고 이는 하천 다양성 형태를 조성할 수 있는 기법이라는 점에서 차이가 있고 최대의 장점을 갖을 수 있다.



〈그림 2.3〉 징검다리형 여울

제3장 큰돌 군의 구조에 관한 생태환경 이론과 기법

3.1 자연 친화적 하천공법과 큰돌 군의 역할

하천은 시간과 공간 측면에서 지극히 다양하고 이질적인 생태 공간이기 때문에 서식 환경 적용 대상에 맞는 수리 조건이 대단히 중요하다. 즉, 지형, 수리, 수문학적 이질성을 갖는 하도 뿐만 아니라 대상 어종과 각종 무척추 동물의 서식처 지위에 따라 별도의 수리 조건 등이다.

수심방향에서 흐름이 난류이고 유사 거동에 대한 전단 응력, 그리고 하상 부근 경계층은 유속과 수심, 그리고 하상 재료가 동시에 작용한다. 하상 경계층에서 서식하는 저서성 또는 부착성 어류에게는 평균 유속보다 하상 부근에서 점 유속(Nose velocity)이 적합한 수리 조건이다. 또한, 하도 전체가 아닌 부분적인 어류 서식 환경, 즉 산란과 부화를 위한 어류 산란 장소의 수심과 유속 조건, 자갈이나 호박돌 틈에서 먹이를 구하고 산란 장소를 마련하기 위해 느린 유속 공간이 필요할 때의 조건, 또는 자갈과 큰 돌 표면에 부착된 풍부한 무척추 동물과 부착 조류를 섭취하는 어류 서식 조건에는 평균 유속보다 점 유속이 더 중요한 인자이다.

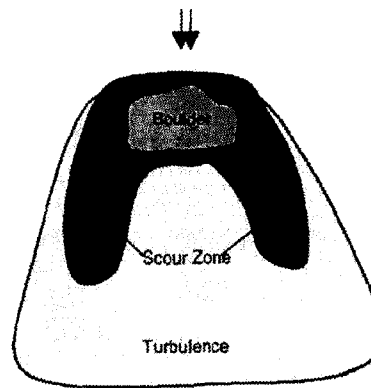


〈그림 3.1〉 큰돌 군과 서식처 형성

이와 같은 측면에서 큰돌 군은 하천 생태계의 서식처 구조와 기능을 향상시키는 큰 돌 (또는 호박돌로 지름 10 in, 256mm 이상)로 된 군집을 말한다(<그림 3.1> 참조). 큰돌 주위의 흐름분리는 큰돌 후면에서渦(eddies)나渦度(vortices)를 발생시킨다. 이와 같은 와도는

직사광선을 확산시키고 물고기에게 머리 위 서식처와 피난처(overhead cover)를 형성해 준다. 또한 와와 와도는 수심을 깊게 해주는 세굴을 발생시키며 하도 구간의 물리적 다양성을 증가시키는 조립질 하상재료와 직접 관계한다.

큰돌과 난류, 세굴에 의해 형성된 서식처는 청년기와 성어기 어종 모두, 특히 연어과 물고기의 서식처로 이용된다. 연어과 청년기 어류에게 선호되어지는 여름철 미소 서식처(microhabitat)는 수중 피난처와 서식처(submerged cover)와 함께 깊은 수심을 형성한다. 이러한 수중 피난처와 서식처는 포식자의 위협으로부터 피하는데 이용된다. 또한 성어는 세굴로 만들어진 소(scour pool)에서 휴식과 은신한다. 산란기 성어는 서식과 피난처 근처를 중심으로 산란장소를 선택하기 위하여 나타난다(<그림 3.2> 참조).



<그림 3.2> 큰돌 주변에서 세굴과 흐름 발생 형상

3.2 외국의 큰돌 군 조성 기법

하천생태계에서 최상위에 위치한 어류 서식처 개선사업의 평가는 하천 큰돌의 이점내에 있는 높은 다양성으로 이루어진다. 이와 같은 다양성은 각종 생물 다양성 뿐만아니라 하천 생태계의 지표종인 어류간 생식단계, 종과 나이, 계절, 사업의 설계, 시공기간, 그리고 표본 방법의 차이에서 온다. 본 연구에서는 미국 공병단(US Army Corps of Engineers)의 수리실험연구소(Waterways Experiment Station)에서 Fischenich and Seal(2000)이 제시한 기법을 다음과 같은 내용으로 소개한다. 이들이 제시한 큰돌 군의 조성 기법은 크게 기본방향과 목적에 따른 계획, 대상 지점 선택, 설계, 시공, 그리고 유지관리로 구분되어 있다.

1) 계획

먼저, 해당 하천에서 서식과 피난처의 다양성이 제한을 받는 서식처 특성을 갖고 있다

면, 계획과정에서 첫 번째 단계는 우선순위(priori)의 결정이다. 제한을 받지 않고 적절한 서식처 특성을 갖고 있다면, 어류밀도는 현재 또는 잠재된 서식처를 완전히 이용할 수 있을 정도로 충분해야 한다. 큰돌에 의해 창조된 서식처를 매우 적은 어류만이 점유하여 활용한다면, 어류 개체증가나 상태를 증가시키기 위한 노력은 실패하거나 시기상조일 수 있다. 궁극적으로 조급한 판단을 통해 우선순위에서 배제할 수 없는 것이 하천의 환경 조성 결과이다.

밀집도나 생체량(either in density or biomass)에서 어류 개체량(fish abundance)의 한계단계는 확인하는 것이 어렵다. 존재하는 개체량(abundance)은 체계적인 전류어법(electrofishing)이나 다양한 분할구역에 어망설치(pole seining)로부터 추정할 수 있다. 특히 다른 요소들 중에서도 하천바닥 생산성의 기능, 후미 부분 서식처의 복잡성, 목표 어종(targeted fish species)의 다양성으로 인해 개체량의 최소 단계는 정의되기가 어렵다.

큰돌군의 잠재성은 일반적으로 목표 어종이 필요로 하는 국부적 하천상태와 서식처에 대한 충분한 지식을 갖춘 어류생태학자를 포함하는 사업단에 의해 결정된다. 사업단은 서식처 향상을 위해 설치한 큰돌의 생존 능력(viability)을 결정하기 위한 조사지역에서 수집되어 해석된 자료에 의존한다. 하천은 지배 유심선(dominant thalweg), 불안정 단면, 그리고 존재하는 서식처의 양을 기록하기 위하여 갈수기(low flow)동안에 정밀히 조사하고, 가능하다면 평수기(normal flow)와 홍수기(maximum flow)에도 조사한다. 각각의 구역(reach)은 소, 런(run, 여울과 소 사이에 형성된 흐름 형상), 그리고 여울로 구분되며 다음과 같이 추정한다:

- (1) 소, 런(run), 여울의 길이
- (2) 각 서식처 분류의 평균깊이
- (3) 하천내에 돌출된 큰돌 백분율
- (4) 하천내 수목(logs)과 유송 부유물(debris) 백분율
- (5) 수면에서 3 ft이상에 있는 머리 위 서식과 피난처(overhead cover) 백분율
- (6) 지역과 단면 평균유속(Local and cross section average velocity)
- (7) 저질 자료 구성의 단계(class)나 등급(gradation)에 의한 백분율

어류와 무척추동물 표본조사(sampling)는 지역조사와 병행하여 완벽히 수행되어야 한다. 위에서 요약하여 언급한 조사노력(inspection effort)은 측정기법이 필요하기 때문에, 설계에 필요한 정보의 공동 수집대상(concurrent collection)이 제시되었다. 연구팀은 사업과 지점에 큰돌 설치 활용성이 고려된 정확한 판단을 수행하기 위해 사업목적에 관련한 정보 수집물을 평가하여야 한다. 서식처 평가에 도움을 주는 정량적 기법을 포함하는 것으로 Fish Index of Suitability (Habitat) (FIS(H)), Habitat Evaluation Procedure (HEP), Physical Habitat Simulation Model (PHABSIM)(Bovee, 1982, 1986; 김규호, 1999, 2000), and River Community Habitat Assessment and Restoration Concept (RCHARC) 등이 개발되어 적용되고 있다.

FIS(H)와 RCHARC는 참조구간(reference reach)의 서식처 분포와 일치시키기 위해 필요한

큰돌의 설치 갯수를 결정하기 위해 선택된 참조구간과 병행하여 사용되어질 수 있다. 한편, HEP와 PHABSIM은 난류 커버, 세굴 주머니(scour pockets), 저질 재료, 그리고 유형물질의 커버(physical cover)와 같은 큰돌 서식처의 주요 요소와 관련한 서식처 이점을 보다 직접적으로 해석하는데 필요하다.

2) 큰돌 배치를 위한 지점 선택

큰돌군은 a) 소보다는 여울이 지배적이고 b) 적은 양의 큰돌과 다른 관련있는 서식과 피난처를 가진 호박돌 저질재료(substrate, cobble substrate)에 굵은 자갈로 이루어진 여울과 같은 하천구역 단면에 지정될 수 있다. 대안으로는 유심선(thalweg)의 안정성을 확보하고 이익을 최적화하기 위한 날개 수제(wing deflector)와 제방 보호공과 같은 다른 하천 시설물과 바로 연계한 복합 큰돌 배치(multiple boulder grouping)가 유리할 것이다. 통상적으로 잠정적인 큰돌 위치 선택을 위해 추가적인 고려 사항은:

- (1) 큰돌은 서식과 피난처와 다양성이 제한된 장소에만 사용하여야 한다.
- (2) 요구되는 서식처를 만족시키는 가능한 최소한의 큰돌을 사용하여야 한다.
- (3) 큰돌은 만제유량(bank-full flow)시 흐름지역의 10% 이하로 점유되어야 한다.
- (4) 소와 느린 런(run)은 피해라. 유속은 만제유량시 4 fps를 초과하여야 한다.
- (5) 현실적으로 모래 하상 하천에서 사용하기 위해 제시된 것은 없다.
- (6) 하천 합류부나 분류부(braid)와 같은 불안정 단면에는 설치를 피해야 한다.
- (7) 만제유량에 안정한 큰돌크기를 사용하여야 한다.
- (8) 여울의 윗 끝(upper end) 근처에 큰돌배치를 피해야 한다.
- (9) 곤충이 최대한 표류할 수 있도록 구조물로 유도하는 충분한 여울(예를 들어 16 ft)을 허용해야 한다.
- (10) 갈수기에 서식처 활용성을 확보하기 위하여 유심선 안이나 근처에 큰돌을 집중시킨다.

3) 설계

큰돌군에 대한 주요 설계 고려사항은 a) 구조물의 수량, 형태, 위치와 b) 안정성을 갖추기 위해 필요한 큰돌 크기이다. 서식처 보전과 개선을 통한 편익을 정량화 시켜야 하거나 유속의 증가와 수면상승에 따른 잠재적인 악영향이 나타날 때는 큰돌의 수리학적 영향을 확인하여야 한다.

(1) 수량, 형태, 위치(Number, Configuration, and Location)

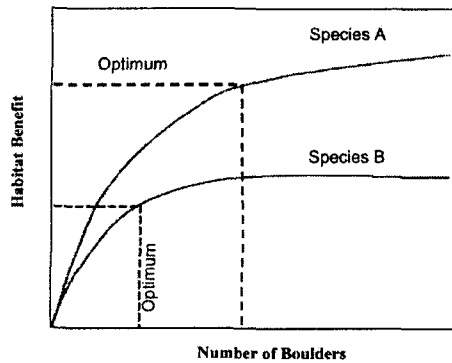
여울이나 빠른 run에 엇갈린 형태의 그룹(staggered group)이나 군집안의 3-5개의 큰돌로

이루어진 삼각형 형태는 서식처 제공에 매우 효율적이다. 왜냐하면 각 그룹은 하류 그룹에 난류 피난과 서식처(turbulent "overhead cover")를 유도(guide)하기 때문이다. 큰돌군에서 난류와 세굴을 극대화하기 위해서는 적절히 형성된 공간(well-spaced; 대략 큰돌과 큰돌 사이를 큰돌 지름 만큼 형성)을 제공할 수 있어야 한다.

상류 큰돌의 후류(wake)에 위치한 큰돌은 적은 이점을 가지므로, 연속적인 하류측 큰돌은 상류측 큰돌 후류의 말단에 위치 시켜야 한다. 만일 큰돌이 제방에서 몇 ft 내에 위치한다면, 제방의 장갑화(armoring)가 필요할 수 있다. 추가적인 지침은 계획 부분에 요약되어 있다. <그림 3.3>은 큰돌 수와 서식처 편익과의 상관 관계를 보여준다.

(2) 큰돌 안정성(Boulder Stability)

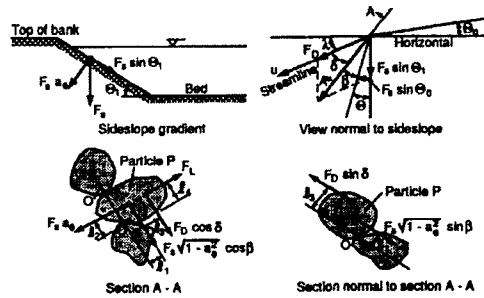
흐르는 물에 잠수된(immersed) 큰돌은 압력에 의한 정수압에 의한 표면력(hydrostatic surface force of pressure), 중량(F_w)과 부력(F_B)의 체적력, 압력(표면에 수직방향)과 점성 전단력(표면에 접선방향)과 같은 동수력(hydrodynamic force)에 지배된다(<그림 3.4> 참조).



<그림 3.3> 큰돌 수와 서식처 편익과의 일반 관계

수직방향과 접선방향의 동수력은 항력(F_D)과 양력(F_L)로 나눌 수 있다. 만일 잠수된 물체가 하상(streambed)에 놓여 있다면, 마찰력(F_R)은 흐름방향에 반대 방향으로 작용한다. 항력, 양력, 그리고 부력과 같은 활동력이 중량과 마찰력의 저항력보다 작다면, 큰돌은 정지 상태를 유지할 것이다.

항력과 양력은 2차력(second power)에 의해 유발되는 접근유속의 기능을 가지기 때문에, 유속이나 전단력은 때때로 안정성 해석을 위한 대안으로 사용된다. 큰돌, 호박돌, 그리고 굵은 자갈에 대한 한계유속과 전단력 값은 <표 3.1>에 제시되어 있다. 큰돌이 완전히 침수되어 있고 거친 수평면(rough horizontal surface)을 가진 완전 난류 조건(for fully turbulent flow)에서 초기 활동은 다음 식 (3.1)과 같이 발생한다.



〈그림 3.4〉 큰돌에 작용하는 힘

$$d_s = \frac{(18 y S_f)}{G - 1} \tag{3.1}$$

여기서 d_s = 최소 큰돌 직경 (ft), y = 수로 만수위 (ft), S_f = 마찰경사, 그리고 G = 큰돌의 단위중량(~ 2.65)을 각각 나타낸다.

〈표 3.1〉 한계 조건(Julien, 1995)

Class name	d_s (in)	ϕ (deg)	τ_c	τ_c (lb/ft)	V_c (ft/s)
Boulder					
Very large	>80	42	0.054	37.4	25
Large	>40	42	0.054	18.7	19
Medium	>20	42	0.054	9.3	14
Small	>10	42	0.054	4.7	10
Cobble					
Large	>5	42	0.054	2.3	7
Small	>2.5	41	0.052	1.1	5
Gravel					
Very coarse	>1.25	40	0.050	0.54	3
Coarse	>0.63	38	0.047	0.25	2.5

〈표 3.1〉과 식 (3.1)은 대상 사업구간에 대해 안정한 큰돌의 계략적 크기를 조사하는데 유용한 예비해석기법으로 사용될 수 있다. 그렇지만 보다 상세한 해석방법은 일반적으로 공인되어야 한다. 가장 보편적으로 활용되는 접근방법은 모멘트 안정성 해석(moment stability analysis)이다. 모멘트 안정성 해석에서 단독 큰돌은 부근 큰돌이나 하천의 하상을 가진 바위와 맞닿는 지점에 관하여 입자의 전도에 저항하는 모멘트와 전도를 야기하는 모멘트의 비율에 기초하여 평가되어진다.

입자 전도를 저항하는 모멘트(M_R)와 전도를 유발하는 모멘트(M_P)의 비율은 입자 안정성 지표에 제시된 안전계수 $SF = \Sigma M_R / \Sigma M_P$ 로 정의된다. 비율이 1(unity)보다 크면 안정된 사석 입자를 나타내는 것이고, 비율이 1보다 작으면 불안정한 입자를 나타내며, 비율이 1이라면

중립 상태 안정 입자(neutrally stable particle)를 나타내는 것이다. 여기에 제시된 모멘트 안정성 해석 절차는 경사면에 위치한 큰돌의 해석과 유선이 수로와 평행하지 않은 경우(즉, 2차류를 말함)를 포함한 일반적인 경우에 대한 방법이다.

<그림 3.4>는 횡방향(across-stream) 경사각 θ_1 과 하상 경사(bed slope) θ_2 를 가지는 하상이나 제방에 놓여 있는 큰돌에 작용하는 힘을 나타낸다. 수면경사가 0.1보다 작은 경우에 부력은 큰돌 중량에서 큰돌의 수중중량(submerged weight)을 빼면 된다, 즉 $F_S = F_W - F_B$ 이 된다. 나머지 힘들은 본 장의 첫 번째 문단에 정의되어 있다. 유선은 2차류(직선 단면에서 $\lambda=0$)를 설명하기 위한 각도 λ 에 의해 수평면으로부터 분리되어 진다. 불안정해진다면 큰돌이 움직이는 방향은 제방면에 수직선으로부터 각도 β 에 의해 기술되어 진다. 간단한 기하학적 관계로부터 정의하면 식 (3.2)와 같다.

$$a_\theta = \sqrt{\cos^2 \theta_1 - \sin^2 \theta_0} \quad (3.2)$$

그리고

$$\tan \theta = \frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} \quad (3.3)$$

위에 나타난 관계를 이용하여, 안식각 ϕ ($\phi \cong 42$)가 결정되며, $90A = (l_4/l_2)(F_L/F_S)$ 와 $B = (l_3/l_4)(F_D/F_S)$ (여기서 모멘트 길이 l_n 은 <그림 3.4>에서 정의된다.)를 정의하여 다음과 같은 4가지 방정식은 안전계수를 결정하기 위해 연속적으로 구할 수 있다.

$$SF = \frac{a_\theta \tan \phi}{\eta_1 \tan \phi + \sqrt{1 - a_\theta^2} \cos \beta} \quad (3.4)$$

$$\eta_1 = \eta_0 \left[\frac{(A/B) + \sin(\lambda + \beta + \theta)}{1 + (A/B)} \right] \quad (3.5)$$

$$\eta_0 \cong \frac{18 \tau_0}{(\gamma_s - \gamma_w) d_s} \quad (3.6)$$

$$\beta = \tan^{-1} \frac{\cos(\lambda + \theta)}{\left[\frac{(A+B)\sqrt{1-a_\theta^2}}{B\eta_0 \tan \phi} + \sin(\lambda + \theta) \right]} \quad (3.7)$$

위 방정식은 이와 같은 비율에 민감하지 않기 때문에, 실용적인 관점에서 $A=B$ 로 사용되어 질 수 있다. 이와 같은 방정식은 $\lambda \geq 0$ 일 때만 적용가능 하다. 만일 큰돌이 만곡의 내측에 위치하고 2차류가 제방 위($\lambda < 0$)에 있다면, 다른 방정식이 요구되어 진다. 예를 들어, $d_s = 2 \text{ ft}$, $\lambda = 15 \text{ deg}$, $\theta_1 = 20 \text{ deg}$, 수평 하상경사, 그리고 $\theta = 42 \text{ deg}$ (<표 3.1>로부터)의 예제에 대하여 EXCEL의 스프레드 쉬트를 이용한 해석을 <표 3.2>에 나타낸 바와 같다.

〈표 3.2〉 안정 해석용 스프레드 쉬트의 예

d_s (ft) = 2
 ϕ (deg) = 42
 θ_1 (deg) = 20
 θ_2 (deg) = 0
 λ (deg) = 15

(1) τ_c (lb/sf)	(2) η_0	(3) β	(4) η_1	(5) SF
6.00	0.612	32.777	0.533	1.103
6.25	0.638	33.660	0.558	1.075
6.50	0.663	34.514	0.584	1.048
6.75	0.689	35.339	0.609	1.022
7.00	0.714	36.137	0.635	0.998
7.25	0.740	36.908	0.661	0.974
7.50	0.765	37.653	0.687	0.952
7.75	0.791	38.373	0.712	0.930
8.00	0.816	39.070	0.738	0.909

스프레드 쉬트 사용자는 전단력의 범위와 SF=1.0에 근접하는 수치를 선택하여야 한다. 이와 같은 수치는 개축 하도(reconstruction channel)를 위한 설계 목적에 사용되어지거나, 만일 수로에서 계산된 전단력 값이 일관되지 않는다면 다양한 큰돌크기가 선택되어 질 수 있다. 다시 말해, 큰돌은 SF ≥ 1.0일 때 안정상태이다. 스프레드 쉬트에 있는 방정식은 다음과 같다.

$$\text{Col 2} = (0.204/d_s) * (\text{Col 1})$$

$$\text{Col 3} = \text{ATAN}(\text{COS}(\theta_2 * \text{PI}() / 180) / ((s * \text{SIN}(\theta_1 * \text{PI}() / 180)) / ((\text{Col 2} * \text{TAN}(\phi * \text{PI}() / 180)) + \text{SIN}(\theta_2 * \text{PI}() / 180))) * 180 / \text{PI}()$$

$$\text{Col 4} = (\text{Col 2}) * ((1 + \text{SIN}((\theta_2 + (3)) * \text{PI}() / 180)) / 2)$$

$$\text{Col 5} = \text{COS}(\theta_1 * \text{PI}() / 180) * \text{TAN}(\phi * \text{PI}() / 180) / ((\text{Col 4}) * \text{TAN}(\phi * \text{PI}() / 180) + \text{SIN}(\theta_1 * \text{PI}() / 180) * \text{COS}((\text{Col 3}) * \text{PI}() / 180))$$

4) 시공

큰돌 설치방법은 지점 접근성과 공사 장비의 가용 정도에 좌우된다. 큰 용량으로 접근이 가능한 대형 굴착기로 상단 하안에서 공사할 경우는 통상 선호되는 기법이다. 큰돌은 하안에서 하천으로 덤프하지 (end-dumped) 않아야 한다.

거친 하상 재료로 된 공사 지점에서는 아래 바닥과 하류 큰돌을 설치할 수 있는 포켓을 만들기 위해 사전에 하상 재료를 굴착할 필요가 있다. 설계자는 굴착시 장갑층을 훼손하지 않도록 할 필요가 있다.

5) 운영과 유지

큰돌 군의 운영과 유지를 위한 요구 조건은 최소화한다. 큰돌 군은 안정 여부를 최종 결정하기 위해서 매년 조사되어야 한다. 몇 ft 파고 들어가(dislodged)거나 이동한 큰돌은 안정성 문제가 야기되지 않는다면 다시 설치할 필요는 없다. 더욱 확연히 이동했다면 이는 설계상의 결함을 암시하며, 큰돌을 낮은 유속 구간으로 이전(harvesting)하고 재설치(relocating)하는 방안을 고려할 수 있다. 갈수 상태(low flow condition) 동안 큰돌이 자리잡아(perch) 발생된 수로 유심선 변화는 큰돌을 재설치하기 위한 원인으로 또한 간주할 수 있다. 큰돌군의 효율성 결정을 위한 어류와 무척추동물의 표본추출은 언제나 권장 시행된다.

6) 적응성과 한계

본 기술 지침에 기술된 기법은 어류 서식처 향상의 목적을 포함한 하천복원사업에 일반적으로 적용될 수 있다. 큰돌군의 이용은 일반적으로 굵은 자갈(coarse gravel)(또는 큰) 하상 재료로 구성된 하천에 제한된다. 해석 기법내에서 큰돌의 단위중량 추정값은 대략 2.65라는 것을 내포한다. 방정식의 타당성을 가지기 위한 하천경사는 0.10을 초과할 수 없다.

모멘트 안정성 방정식은 단독 큰돌과 전면(blanket)에 위치한 큰돌들에 적용될 수 있다. A와 B에 대한 값은 각 경우에 대해 모멘트 길이(l_n)을 고려하여 조정된다.

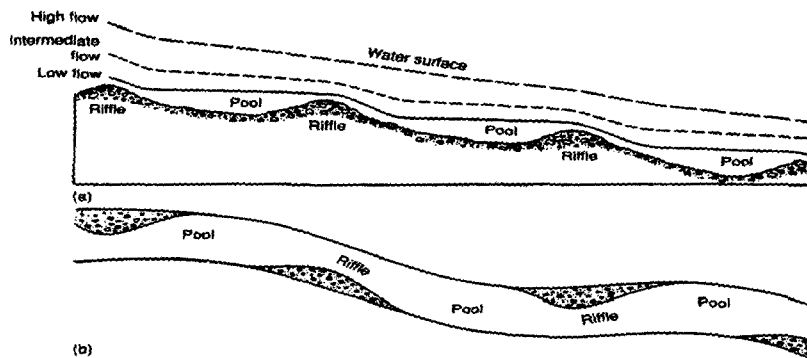
큰돌군의 이점은 매우 다양하다. 하천 시스템내에서 이 같은 형태의 장소에서는 이점이 없거나 적을 수도 있다. 큰돌은 안정성에 위험성을 가질 수 있으며, 설계자는 큰돌 설치 지점을 선택하기에 앞서 해당 구간내 여가 활동(recreational boating requirements)에 주의할 필요가 있다.

제4장 실제 하천 조사

4.1 대상 구간과 큰돌 군 특성

일반적으로 큰돌 군은 지배적인 하상재료가 모래나 실트로 형성된 하천에서는 찾아보기 어렵다. 이 큰돌 군은 유역 상류 지질 특성에 따라 다르게 형성되며 대부분이 하상경사가 급하며 하상재료가 큰 유역 상류 계곡(headwater)이나 중하류 협곡 구간에서 형성되는 경우가 많다. 대표적인 하천은 한강 중상류 전구간과 낙동강 최상류, 금강 중상류, 영산강 최상류, 그리고 섬진강 대부분의 여울 구간에서 찾아 볼 수 있을 것이다.

하천에서 어류나 무척추 동물의 섭식과 생활을 위한 공간상의 하도 구조는 <그림 4.1>에 나타낸 바와 같이 하천의 지형학적 특성상 웅덩이와 여울의 연속적인 형태(pool and riffle sequence)로 나타난다. 하천의 지질 특성과 인위적으로 변경된 하천 구조 등에 따라 다르지만, 대체적으로 여울은 수리학적 흐름 양상이 하천의 평균 유속보다는 크고, 평균 수심보다는 적으며 자갈과 같은 하상 재료로 구성되는 특성을 갖는다. 반면에 웅덩이는 평균 유속보다 적고, 수심은 더 깊으며 하상 재료는 가는 모래와 실트 등으로 구성되거나 피복되는 특성을 갖는다. 여울은 Froude수가 0.1 이상이고 웅덩이는 0.1 이하를 갖으나 주로 수심에 변화한다. 따라서 여울은 수심이 깊지 않기 때문에 유량 규모에 따라 나타나는 현상으로 하천 유량 변화에 가장 민감한 서식 공간이라고 할 수 있다(Allan, 1995).



<그림 4.1> 하천유량에 따른 웅덩이와 여울 연속 형태(Allan, 1995)

사행 형성과 웅덩이-여울 연속 형태는 하천 역학 원칙의 지배를 받는데, 흐름 방향에서 사행 및 여울-웅덩이 형태의 파장은 유량보다는 하폭에 더 직접 의존한다. 일반적으로 여울은 만제유량 하폭의 대략 5내지 7배의 거리를 두고 하도 한 쪽에서 다른 쪽으로 독특하

계 변경되면서 자갈 톱이 퇴적되어 형성된다(Allan, 1995). 진정한 의미에서 여울은 하상 재료가 모래와 같은 가는 입자로 분포된 하천에서는 거의 형성되지 않고, 평탄한 웅덩이를 이룬다. 하천 계곡수(폭기수, white water)와 같이 하상 경사가 아주 급한 하천에서도 여울이 형성되지 못하고 웅덩이를 이루나 흐름은 비교적 빠른 편이다.

본 연구에서는 우리나라 하천에서 큰돌 군을 쉽게 찾아 볼 수 있는 섬진강 본류와 지류 보성강의 여울을 대상으로 큰돌 군의 수리학적 특성을 조사하였다. 섬진강은 대부분이 자연 상태의 하도로서 상중하류 전 구간에 걸쳐 하천 식생, 조류, 그리고 어류가 비교적 풍부하다. 또한 흐름 방향에 대한 하도의 구조적인 면에서 보면, 섬진강댐 하류 하도는 자연스런 중규모 여울과 웅덩이 하도 형태가 형성되어 있어 하천 생태계의 유지와 보전에 큰 기여를 하고 있다(건설교통부 익산지방국토관리청, 1999).

먼저, 섬진강 본류에 위치한 조사 구간은 요천 합류후 구간이다. 이 구간은 섬진강에서 가장 빼어난 경관과 하천 생태계 서식 공간을 제공하는 계곡 하천이다. 이 구간은 비교적 하천 수질이 좋은 편이며, 급경사 여울과 웅덩이가 반복되면서 하상 재료는 암반, 큰돌과 자갈, 모래 등으로 구성되어 있다. <그림 4.2>는 이 구간에서 적성 수위관측소 상류 하도 전경에 자연스럽게 형성된 호박돌 군 자연 하상 모습이다. 이 구간은 급한 여울 등으로 인해 하류에는 장갑화된 하상이 많이 나타나며 일부 구간에서는 급류형 여울이 형성되어 있다.



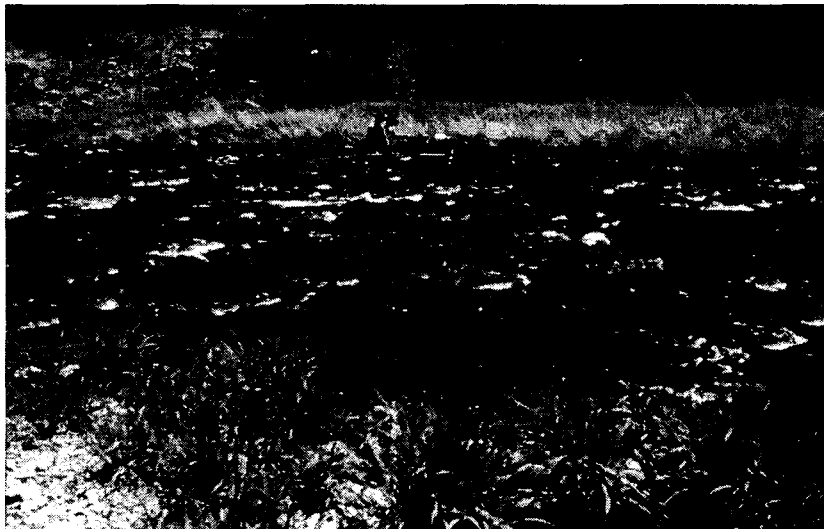
<그림 4.2> 섬진강 본류 적성 수위관측소 상류 하도 전경

이 하류에는 <그림 4.3>에서 보는 바와 같이 산지 계곡을 관류하는 하천으로 비교적 유량이 적어 보이나, 급류 하상으로 자연 상태의 대규모 여울과 웅덩이가 형성되어 있다. 특히 이 구간은 섬진강 경천에서 유입하는 오염원이 어느 정도 자정 작용으로 좋아지는 현

상을 확인 할 수 있다. 또한, 다양한 어류의 서식 조건에 맞는 하도 구간으로서 바위와 호박돌, 자갈, 모래가 혼재하여 하천구조가 생태적으로 유리함에 따라 다양한 어류, 다슬기, 조개, 달팽이, 조류가 서식하는 구간이다.



<그림 4.3> 섬진강 본류 적성 수위관측소 하류 하도의 큰돌 군 전경



<그림 4.4> 섬진강 지류 보성강 중류의 하도에서 큰돌 군과 수리 전경

한편 섬진강 최대의 지류인 보성강은 <그림 4.4>에서 보는 바와 같이 자연 하도내 다양한 서식 조건이 형성되어 있다. 특히 상당수 구간에서 여울과 웅덩이가 반복되고 호박돌

등에 의한 수류 변화가 큰 하천이다. 비교적 적은 유량이 흐르고 있으나, 여울과 웅덩이가 반복되어 나타나고 갈수기 측정이 가능하다. 또한 길고 확연한 사행 하천을 이룸으로써 어류 및 동식물 서식에 좋은 상태이다. 또한 여울과 웅덩이에 의한 하상 구조에 따라 자연스럽게 폭기된 수류가 대기중의 산소와 접촉하여 하천 수질의 개선에 기여한다.

4.2 수리학적 인자 조사

큰돌 군의 수리학적 인자를 알아보기 위해서는 어류와 무척추 동물 등의 서식처로 많이 고려되는 여울이며, 대부분이 유량에 따라 하상과 큰돌 군이 쉽게 노출되는 한계지점에서 나타난다. 이 구간에서 수리학적 특성 조사는 갈수기를 대상으로 수위(수심-유속)-유량 관계가 필요하다. 상기 계산방법은 결국 이 관계를 도출하기 위한 하나의 수단을 제시한 것이다. 따라서, 실측이나 계산 등 어떠한 방법으로도 그 지점에서 수위-유량관계가 구해지는 경우 해당 구간의 한계수심에 해당하는 유량을 구할 수 있고 유속을 평가할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 큰돌 군의 설치와 조성을 위한 수리학적 인자를 추출할 수 있다.

1) 수심-유속-유량 관계의 작성

큰돌 군이 분포하는 하천구간에서 수리조건을 산정하기 위해서는 갈수기나 풍수기 유량 측정 성과를 바탕으로 하는 한계단면의 수심-유속-유량 관계를 작성할 수 있는 유량자료가 필요하다. 이에 따라 1999년도에 큰돌 군이 분포하는 선정된 구간의 한계 여울에서 갈수기 유량과 수심, 저수로 하천단면, 그리고 하상재료와 같은 수리 특성을 조사하고, 선정된 한계단면에서 유량 측정을 실시하였는데 그 결과는 <표 4.1>과 같다.

그리고, 각 여울 구간의 측정시 횡단면과 수심-유속-유량 관계는 각각 <그림 4.5>~<그림 4.6>과 섬진강 본류 적성 수위관측소 상류와 지류 보성강의 죽곡 수위관측소 상류에 대해 각각 나타낸 바와 같다.

<표 4.1> 큰돌 군이 분포된 한계 여울에서 실측된 수리학적 특성치

구 간	조사 지점	횡수	수심 (m)	단면적 (m ²)	수면폭 (m)	윤변 (m)	동수 반경 (m)	실측 유량 (m ³ /s)	유량계 수 (C)
본류	적성 수위관측소 상류	1차	0.40	13.4	57.0	57.0	0.24	4.81	0.94
보성강	죽곡 수위관측소 상류	1차	0.37	5.2	20.7	20.8	0.25	2.67	1.31
		2차	0.32	3.5	17.5	17.6	0.20	1.92	1.59

〈표 4.2〉 적성 수위관측소 여울에서 상류 수리량 측정치(1차)

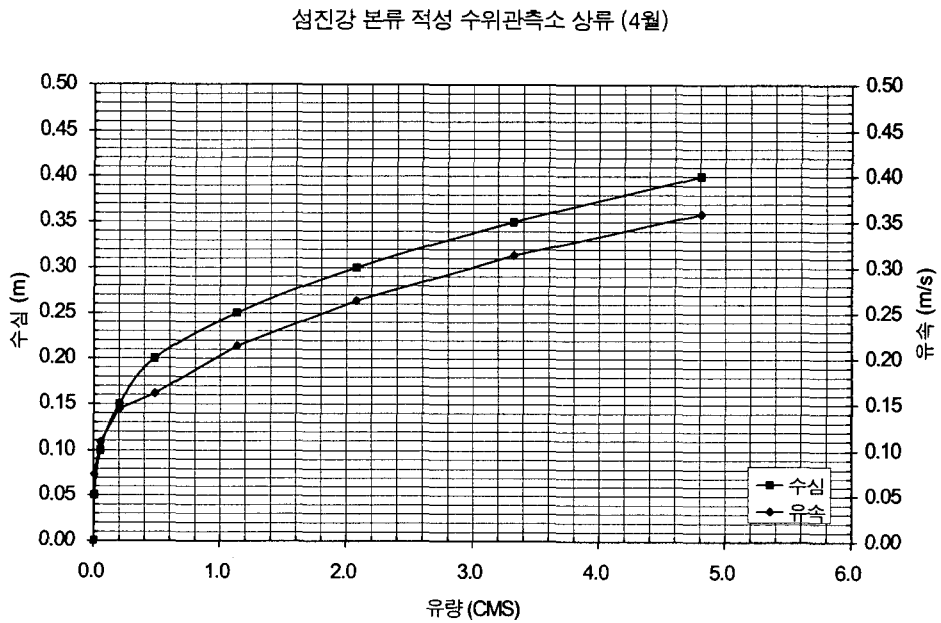
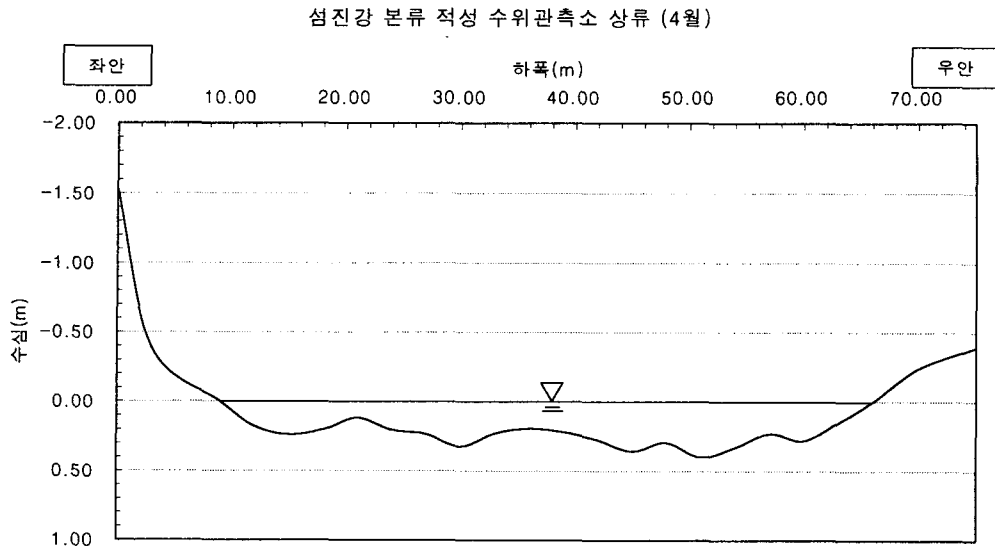
구간거리 (m)	하폭 (m)	수심 (m)	단면적 (m ²)	유속 (m/s)	보정유속 (m/s)	유량 (m ³ /s)	누가유량 (m ³ /s)	수준고 (m)
0.00	75.00	-0.390						1.070
5.00	70.00	-0.240						1.220
4.00	66.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.460
3.00	63.00	0.150	0.23	0.48	0.44	0.10	0.10	
3.00	60.00	0.280	0.65	0.73	0.67	0.43	0.53	
3.00	57.00	0.230	0.77	0.83	0.76	0.59	1.12	
3.00	54.00	0.330	0.84	0.45	0.41	0.34	1.46	
3.00	51.00	0.400	1.10	0.38	0.34	0.38	1.84	
3.00	48.00	0.295	1.04	0.30	0.27	0.28	2.12	
3.00	45.00	0.358	0.98	0.24	0.22	0.21	2.33	
3.00	42.00	0.275	0.95	0.50	0.46	0.43	2.77	
3.00	39.00	0.220	0.74	0.60	0.55	0.41	3.17	
3.00	36.00	0.195	0.62	0.28	0.25	0.16	3.33	
3.00	33.00	0.230	0.64	0.42	0.38	0.24	3.57	
3.00	30.00	0.325	0.83	0.29	0.26	0.22	3.79	
3.00	27.00	0.235	0.84	0.59	0.54	0.45	4.25	
3.00	24.00	0.205	0.66	0.39	0.35	0.23	4.48	
3.00	21.00	0.118	0.48	0.11	0.10	0.05	4.53	
3.00	18.00	0.205	0.48	0.19	0.17	0.08	4.61	
3.00	15.00	0.238	0.66	0.09	0.08	0.05	4.66	
3.00	12.00	0.179	0.63	0.27	0.24	0.15	4.81	
3.00	9.00	0.000	0.27	0.00	0.00	0.00	4.81	1.780
6.00	3.00	-0.390						1.390
3.00	0.00	-1.540						0.240

〈표 4.3〉 죽곡 수위관측소 상류 여울에서 수리량 측정치(1차)

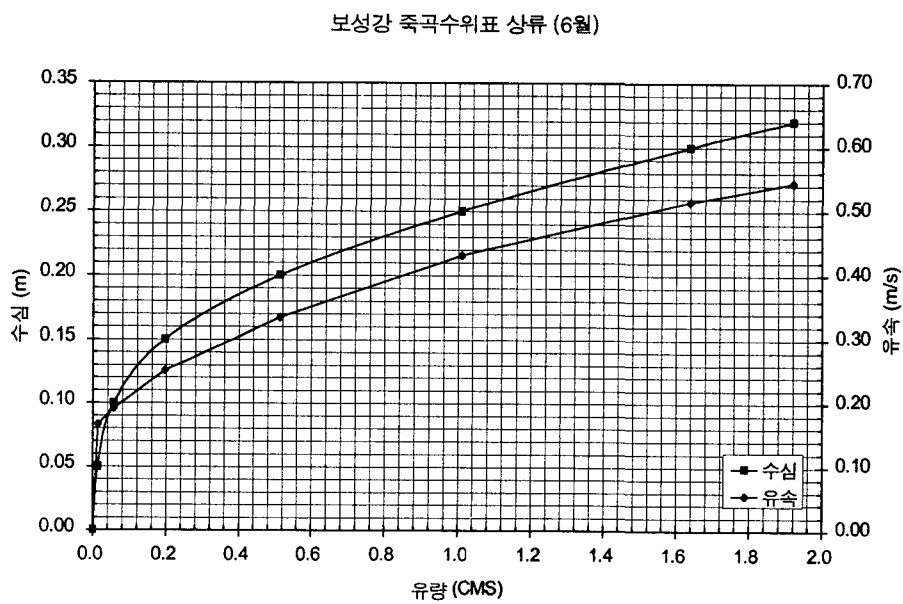
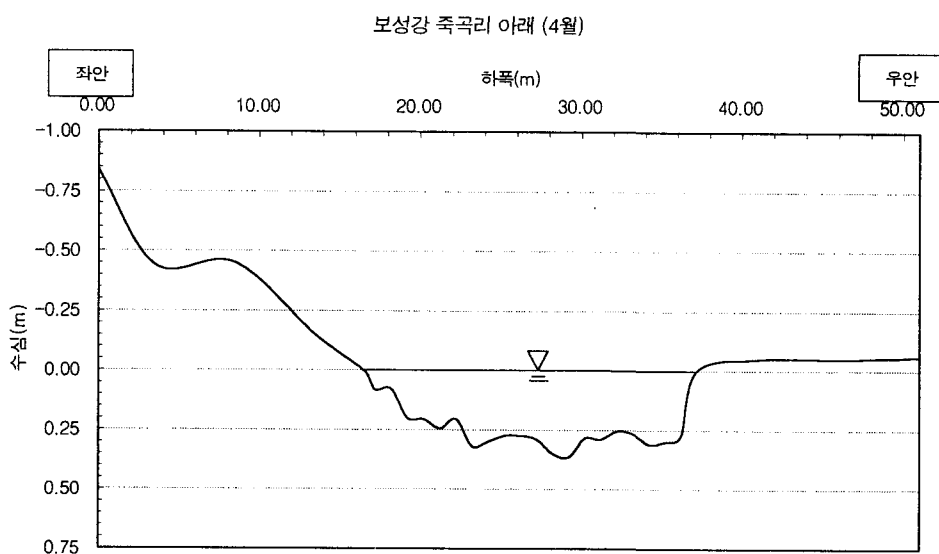
구간거리 (m)	하폭 (m)	수심 (m)	단면적 (m ²)	유속 (m/s)	보정 유속 (m/s)	유량 (m ³ /s)	누가유량 (m ³ /s)	수준고 (m)
0.00	51.00	-0.060						1.550
5.00	46.00	-0.050						1.560
5.00	41.00	-0.050						1.560
3.80	37.20	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.610
1.00	36.20	0.275	0.14	0.30	0.27	0.04	0.04	
1.00	35.20	0.300	0.29	0.78	0.72	0.21	0.24	
1.00	34.20	0.310	0.31	1.05	0.97	0.30	0.54	
1.00	33.20	0.265	0.29	0.91	0.84	0.24	0.78	
1.00	32.20	0.255	0.26	0.77	0.71	0.18	0.97	
1.00	31.20	0.290	0.27	0.78	0.72	0.20	1.16	
1.00	30.20	0.285	0.29	0.86	0.79	0.23	1.39	
1.00	29.20	0.365	0.33	0.68	0.62	0.20	1.59	
1.00	28.20	0.350	0.36	0.58	0.53	0.19	1.78	
1.00	27.20	0.290	0.32	0.51	0.47	0.15	1.93	
1.00	26.20	0.275	0.28	0.47	0.43	0.12	2.05	
1.00	25.20	0.275	0.28	0.46	0.42	0.12	2.17	
1.00	24.20	0.300	0.29	0.38	0.34	0.10	2.27	
1.00	23.20	0.320	0.31	0.47	0.43	0.13	2.40	
1.00	22.20	0.205	0.26	0.40	0.36	0.10	2.49	
1.00	21.20	0.245	0.27	0.17	0.15	0.04	2.54	
1.00	20.20	0.205	0.24	0.17	0.15	0.04	2.57	
1.00	19.20	0.200	0.24	0.17	0.15	0.04	2.61	
1.00	18.20	0.078	0.19	0.17	0.15	0.03	2.64	
1.00	17.20	0.080	0.20	0.17	0.15	0.03	2.67	
0.70	16.50	0.000	0.07	0.00	0.00	0.00	2.67	1.790
3.00	13.50	-0.150						1.640
5.00	8.50	-0.450						1.340
5.00	3.50	-0.440						1.350
3.50	0.00	-0.840						0.950

〈표 4.4〉 죽곡 수위관측소 상류 여울에서 수리량 측정치(2차)

구간거리 (m)	하폭 (m)	수심 (m)	단면적 (m ²)	유속 (m/s)	보정유속 (m/s)	유량 (m ³ /s)	누가유량 (m ³ /s)	수준고 (m)
0.00	30.50	-0.110						1.530
2.00	28.50	0.000						1.640
2.00	26.50	-0.090						1.550
1.00	25.50	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.640
1.00	24.50	0.135	0.07	0.61	0.56	0.04	0.04	
1.00	23.50	0.190	0.16	0.35	0.32	0.05	0.09	
1.00	22.50	0.178	0.18	0.72	0.66	0.12	0.21	
1.00	21.50	0.175	0.18	0.41	0.37	0.07	0.28	
1.00	20.50	0.250	0.21	0.40	0.36	0.08	0.35	
1.00	19.50	0.220	0.24	0.61	0.56	0.13	0.49	
1.00	18.50	0.205	0.21	0.80	0.74	0.16	0.64	
1.00	17.50	0.243	0.22	0.55	0.50	0.11	0.75	
1.00	16.50	0.260	0.25	0.60	0.55	0.14	0.89	
1.00	15.50	0.205	0.23	0.90	0.83	0.19	1.09	
1.00	14.50	0.315	0.26	0.80	0.74	0.19	1.28	
1.00	13.50	0.320	0.32	0.64	0.59	0.19	1.46	
1.00	12.50	0.265	0.29	0.74	0.68	0.20	1.66	
1.00	11.50	0.170	0.22	0.93	0.86	0.19	1.85	
1.00	10.50	0.168	0.17	0.32	0.29	0.05	1.90	
1.00	9.50	0.164	0.17	0.08	0.07	0.01	1.91	
0.50	9.00	0.144	0.08	0.12	0.11	0.01	1.92	
1.00	8.00	0.000	0.07	0.00	0.00	0.00	1.92	1.690
3.00	5.00	-0.255						1.435
3.00	2.00	-0.270						1.420
2.00	0.00	-0.690						1.000



〈그림 4.5〉 적성 수위관측소 상류 여울 지점의 횡단면과 수심-유속-유량 관계도



〈그림 4.6〉 보성강 죽곡 여울지점의 횡단면과 수심-유속-유량관계도

2) 수리 특성치 분석

섬진강 유역 두 여울에서 조사된 평균 수리 특성치는 앞 표와 같다. 이 두 구간에는 전체적인 큰돌 군보다는 부분적으로 큰돌 군이 분포하고 있으며 이는 통상 하천 상류와는 다른 중류 광폭 하천에서 쉽게 볼 수 있다.

각 큰돌 군 구간에서 실측된 수리 특성치는 크게 큰돌 군이 노출된 수심과 그때의 부분 유속을 위주로 살펴본다.

(1) 수심 분포

먼저 적성 수위관측소 상류 여울에서 동수 수심은 0.40m이고, 이때 유량은 4.8m³/s 정도이다. 부분 수심은 수변에서 최저를 기점으로 큰돌 군 근처에서는 최대 0.4m까지 분포하여 갈수기 유량에 비해 큰 수심이다. 이 경우 하상 재료는 안정된 상태를 유지하고 있으며 동시에 하천 흐름의 역동성 확보에 큰 역할을 하고 있다.

그리고 죽곡 수위관측소 상류 여울에서 동수 수심은 0.32-0.37m이고, 이때 유량은 1.9-2.7 m³/s 정도이다. 부분 수심은 수변에서 최저를 기점으로 큰돌 군 근처에서는 최대 0.36m까지 분포하여 갈수기 유량에 비해 비교적 적은 수심이다. 이 경우 하상 재료는 안정된 상태를 유지하고 있으며 동시에 큰돌 군 근처에서 와류 등으로 하천 흐름의 역동성 확보에 큰 역할을 하고 있다.

(2) 유속 분포

적성 수위관측소 상류 여울에서 부분 유속은 0.9-0.83m/s까지 분포하며 최대 유속은 큰돌 군 이상을 제외한 하상재료를 쉽게 움직일 수 있는 조건이다. 그러나 큰돌 군 근처에서는 0.83m/s에서나 수심이 깊은 곳에서 발생한다.

죽곡 수위관측소 상류 여울에서 부분 유속은 수변에서 최저를 기점으로 큰돌 군 근처에서는 최대 1.05m/s까지 분포하며, 이 경우 큰돌 보다는 수류가 집중된 하도에서 사류 형태를 갖는다.

제5장 결 론

하천은 과거 자연상태에서는 자연스런 여울과 웅덩이, 큰돌 주변의 난류와 와류가 형성되어 하천생태계 서식에 적합한 조건을 제공하였다. 그러나 하천정비와 골재채취 등으로 형성된 평탄 하상은 흐름의 역동성이 소멸함으로써 하천 생태 서식 조건을 위한 용존산소와 조류, 무척추 동물 등이 서식 공간을 찾기 어려워지고, 동시에 서식 활동과 피난을 위한 공간이 부족하다. 이와 같은 하천에서 생태 서식 환경을 제공하기 위한 큰돌 군은 대단히 주요한 역할을 한다.

큰돌 군은 하천 생태계의 서식처 구조와 기능을 향상시키는데 있어 대단히 중요한 자연형 하천공법이다. 특히 큰돌 주위의 흐름분리는 큰돌 후면에서 와나 와도를 발생시킨다. 이 와도는 직사광선을 확산시키고 물고기나 각종 동식물에게 머리 위 서식과 피난처를 형성해 준다. 또한 와와 와도는 수심을 깊게 해주는 세굴을 발생시키며 하도 구간의 물리적 다양성을 증가시키는 조립질 하상재료와 직접 관계된다.

이와 같은 큰돌 군을 자연형 하천에 활용하기 위해서는 사전에 대조하천에서 조사된 구조, 수리학, 수질, 구조와 배치, 형태 등을 실제 하천에서 적용할 경우에는 검증이 필요하다. 본 연구에서는 자연 친화적 하천정비와 그에 따른 중횡단 설계기법, 그리고 큰돌 군의 기능과 구조 등에 대한 기본 사항을 조사하여 제시하였다. 추후 큰돌 군의 구조와 수리, 서식 환경 등에 대한 실측과 검증 절차를 걸쳐 큰돌 군의 설치 기준이 확립되면, 큰돌 군은 하천 형태의 다양성을 통한 하천생태계 종 다양성 확보, 그리고 하천 수질 개선 등을 위한 자연 친화적 하천정비기법에 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Allan, J. D. (1995), *Stream Ecology : Structure and Function of Running Waters*, Chapman & Hall, New York, NY.
2. Bovee, K. D. (1982), *A Guide to Stream Habitat Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology*, Instream Flow Information Paper No. 12. U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado.
3. Bovee, K. D. (1986), *Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology*, Instream Flow Information Paper No. 21. U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-86/07, Fort Collins, Colorado.

3. Fischenich, C. and R. Seal(2000), *Boulder Clusters*, Ecosystem Management and Restoration Research Program(EMRRP), Technical Note EMRRP SR-11, US Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
4. Julien, P. (1995), *Erosion and Sedimentation*, Cambridge University Press, New York, NY.
5. 건설교통부 익산지방국토관리청(1999), 영산강·섬진강 수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서 : 하천유지유량 산정, 42000-58170-57-9923, 건설교통부 익산지방국토관리청, 익산, 전북
6. 김규호(1999), 하천 어류 서식환경의 평가와 최적유량 산정, 연세대학교 대학원 박사학위논문, 서울.
7. 김규호(2000), 하천 어류 서식 환경의 평가, 한국수자원학회지 제33권 제2호, pp. 10-23.
8. 한국수자원학회(2000), 하천설계기준, 건설교통부 수자원국 승인, 서울.