

4대강사업이후 하도관리전략



손 광 익 ▶▶▶

영남대학교 교수
차세대홍수방어기술개발연구단 책임연구원
kison@ynu.ac.kr



황 만 하 ▶▶▶

K-Water 연구원 수석연구원
hwangmh@kwater.or.kr

1. 서론

홍수조절 및 물 확보 등을 위해 지난 수년간 전 국토에 걸쳐 시행된 4대강 살리기 사업은 4대강과 섬진강 본류 및 주요 지류 국가하천에 대하여 하천 정비사업, 댐 건설사업, 농업용저수지 증고사업, 농어촌 개발사업, 수질 개선사업, 문화관광자원 개발사업 등을 모두 포함하고 있다. 그러나 이러한 하도뿐만 아니라 유역 전반에 걸쳐 시행된 광범위한 사업은 하천 시스템에 우리가 예상하지 못한 여러 가지 영향을 미칠 수 있다.

무엇보다 4대강 살리기 사업에 포함된 하천 본류 전반에 걸친 하도준설 및 유로변경 등은 과거 4대강의 하천특성을 완전히 바꾸어 놓았다. 준설과 통수단면의 변화는 하상재료의 특성과 조도계수를 변화시켰으며 유로변경과 종단경사의 변화는 하도 안정화에

많은 영향을 초래하였다. 특히, 보 설치로 인하여 보상·하류는 배수현상과 수면저하 현상이 나타날 뿐만 아니라 수문조작 방법에 따라 흐름의 지체시간이 길어지는 등 하천의 수문학적 특성이 달라지게 되었다. 즉, 4대강의 하천환경은 사업에 의한 직접적인 하도의 특성 변화뿐만 아니라 보 운영 기법에도 영향을 받게 되었다. 4대강 살리기 사업의 준공시점이 임박한 지금 이러한 하천환경 변화 및 하천관리 관점에서 보면 4대강 사업은 끝이 아니라 이제 사실상 시작이라 해도 과언이 아닐 것이며 유사관리를 고려한 4대강의 하도관리 대책 수립은 그 어느 때 보다 중요하게 되었다.

따라서 본 기고문에서는 1) 자연하천에서의 일반적 하도관리 전략과 함께 2) 4대강 사업에 따른 하천환경의 변화 그리고 3) 하도 유지관리 전략 등 4대강 하도관리를 위해 우리가 꼭 검토해야 할 기술적 사안과 일반적 대응전략에 대해 간략히 소개하였다. 단, 수질 및 생태 환경적인 면은 기술하지 않았음을 밝혀둔다.

2. 자연하천에서의 하도관리

하천에서의 침식 및 퇴적은 자연적 현상이나 하도가 불안정해지면 이러한 현상이 가속화되게 된다. 하도의 불안정은 유로의 수리학적 특성 및 유사평형의 변화 등이 그 원인으로 여러 가지 현상들이 복합적으로 나타나는데 이 절에서는 일반적인 하도의 변화원

인과 변화과정 그리고 하도관리 전략에 대하여 기술하였다.

2.1. 하도변화 원인

일반적인 자연하도의 불안정 현상들은 다음과 같은 여러 가지 자연현상 또는 인류의 활동이 그 원인이 된다.

- 유역특성의 장기적 변화에 따른 수문학적 특성 및 유사 특성 변화
- 대재앙 수준의 홍수 또는 연속된 대규모 홍수
- 지형학적 한계조건 이탈
- 하천체계의 복잡한 반응(response)
- 하천에 직·간접적으로 영향을 미치는 인류 활동

2.2. 하도변화 과정

이상과 같은 원인으로 인하여 하천체계에 이상이 나타날 때 유역관리 및 하도관리가 필요하게 되는데 일반적으로 하도에 나타나는 하도의 변화 및 이상 현상은 다음과 같다.

- 하도의 지형학적 형태 변형
- 사행의 발전 및 진행
- 새로운 하도 형성(channel avulsion)
- 하상의 과도한 침식 및 퇴적
- 제방 침식
- 홍수범람 또는 지체현상

2.3. 하도관리 전략

하천체계 이상을 해결하기 위한 일반적 하도관리 전략 및 대책은 다음과 같다.

- 하상 조절 (bed control)
 - 에너지 조절

- 하상경사 조절
- 하도의 구조적 내구성 증대
- 하상재료의 안정성 확보
- 제방보호 및 안정화 (bank protection and stabilization)
 - 제방 호안
 - 제방 안정성 확보
 - 장애물 제거
- 하천 개수 (alignment training)
 - 사행 조절
 - 유사 관리
 - 수계 및 베인 설치
- 하도 통수능 증대
- 상류유역 토지이용도 조절
- 하도변화를 유발하는 간접적 원인 분석 및 조절

3. 4대강 사업에 따른 하천환경의 변화

4대강 사업에 따른 하천환경 변화는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 하천횡단 구조물 설치에 따른 하천환경 변화이며 두 번째는 준설 등 하도단면 및 종단경사 조정에 따른 하천환경 변화로 대별할 수 있다.

3.1. 하천횡단 구조물 설치에 따른 하천환경 변화

수자원 확보와 수력발전을 목적으로 건설된 보는 수심을 깊어지게 하고 하도단면 준설은 통수단면적을 증가시켜 유속을 느리게 하며 외형적으로는 하상계수가 작은 하천의 형태를 보이게 된다. 특히, 보는 침투 홍수량과 하천 흐름의 계절적인 분포 및 하천 특성을 크게 변화시키게 될 것이다. 또한 유사이송과 흐름의 연속성을 차단하여 상류에서는 하상고의 상승 및 하상경사를 감소시키고 배수위 경계에서는 델타를 형성하여 저류용량 감소와 함께 하중도 또는 육역화 현상이 나타날 가능성도 높다.



(a) 4대강 사업 전



(b) 4대강 사업 후

그림 1. 4대강 사업전·후의 하천경관

보 하류의 빈수(hungry water)현상은 하상 세굴과 강덕 침식현상과 함께 장감화 현상을 유발시키는 등 하상이 평형상태에 도달하여 하상도가 더 이상 이동할 수 없을 때까지 지속되는 것이 일반적이다. 만약 식생이 발달하게 되면, 하천의 안정성은 증가하나 조도의 증가에 의한 유속감소와 함께 수위가 상승하게 될 것이다. 새로운 유사 공급이 없어 하류 하천이 세굴될 때, 식생영역의 수위 또한 저하되어 하천의 모래사주는 결국 소실되고 하천에 있는 식생 군락의 구성에도 변화를 줄 수 있다. 그러나 큰 홍수사상이 없을 경우에는 하상이 상승하고 저수로가 좁아지며, 2차 하천을 되메우게 될 것이다. 총론적으로 교란된 하천이 안정을 찾기 위해서는 긴 구간, 오랜 시간에 걸쳐 본류의 유사 이송량과 지류로부터의 유입유수량이 본류의 수리적 특성에 따라 평형을 이룰 때까지는 계속 진행될 것인데 이러한 과정은 기상 수문학적 특성과의 밀접한 관계가 있다. 또한 이러한 하천의 안정화 과정을 지배하는 하천의 수문학적 특성은 보의 운영에 따라 그 특성이 달라지게 될 것이다.

3.2. 준설에 따른 하천환경 변화

일반적인 충적하천의 경우 하상재료는 자연자원의 공급원으로써 오랫동안 골재채취를 위한 준설이 이루어져 왔으며 준설이 하천에 미치는 영향에 대해서도

많은 연구들이 이루어져 왔다. 4대강 사업은 하도 전반에 걸쳐 준설이 이루어졌을 뿐만 아니라 인위적 유로변경으로 인하여 하천의 종단경사도 변하게 되었다. 따라서 이 절에서는 일반적인 준설과 유로변경이 하천환경 변화에 미치는 영향을 검토 기술하였다.

준설에 의한 대규모의 하상물질 채취는 하상을 낮추고, 하상구조와 입도분포 특성 변화, 하상경사도 증가, 하상과 제방의 침식과 같은 하천 지형에 많은 영향을 미친다. 이러한 영향은 하천 제방의 붕괴와, 인접한 토양이나 구조물의 유실 및 하상 기울기의 증가와 유속 변화를 유발하여 하도의 안정성을 깨뜨리게 된다. 본류의 하상저하는 교각의 노출 및 매몰 파이프라인의 노출 등 사회적, 경제적 피해를 줄 수 있으며 지류에도 영향을 미쳐 두부침식 현상을 유발하기도 한다. 뿐만 아니라 유로변경에 의한 하천의 직강화는 하상경사를 변화시켜 국부적인 하상저하 또는 퇴적현상이 나타나게 된다. 그림 2는 하도를 직강화할 때 수로경사가 급해져 새 수로경사가 형성되는 상류에서는 세굴이 하류에서는 퇴적이 발생하는 현상을 보여주고 있다. 그림 3(a)는 본류의 하상저하가 지류의 두부침식과 지류 홍수터 침식으로 이어져 지류 홍수터에 있던 식생의 뿌리가 드러나 있는 사진이며 그림 3(b)는 저수로의 하상저하가 호안공 앞비탈기슭 부분까지 진행되어 호안공의 안정성을 보장할 수 없게 된 사진이다.

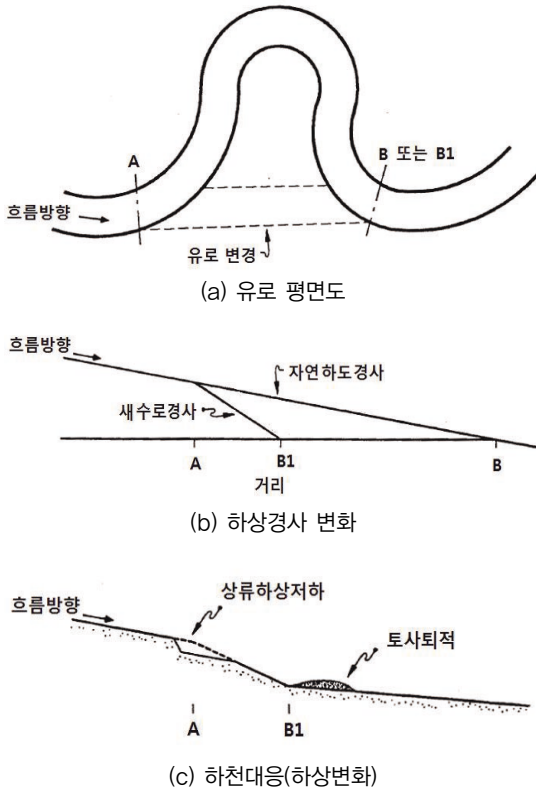


그림 2. 직강화에 따른 하상변화

이상과 같이 보 설치 또는 하도정비에 따른 하천변화가 하천환경에 미치는 영향을 요약하면 표 1과 같

표 1. 4대강 사업에 의한 하천환경의 변화

행위	1차적 영향	2차적 영향	3차적 영향
보 설치 및 운영	•유형 변화	•상류 수위상승	•상류하도 퇴적 •지류수위 상승 •지류 범람 •델타 형성
		•하류 수위하강	•분류 하상저하 •장갑화 현상 •지류 하상침식
		•첨두 홍수량 감소	•하상형태변화 •유사이송량 감소 •빈수(hungry water)현상
유역 관리	•유사이송 연속성 단절	•유사이송 단절	•하류하도 세굴 •하류의 장갑화 •저수로 수심 증가 •해안 침식
		•홍수대비 방류	•하류 탁도 증가



(a) 지류하천 두부침식



(b) 제방침식

그림 3. 하상저하로 인한 영향

다. 단, 여기서도 수질 및 생태환경에 미치는 영향은 기술하지 않았다.

•수문 조작	•유형 변화	•보 직하류 국부세굴 •수문운영에 따른 유로변화
•하천단면 변화	•수심 증가 •유속 감소	•하상형태변화 •지속적 퇴적 •하상형태 변화
•수로 직강화	•하상경사 변화	•하상 및 제방침식 촉진 •여울과 소 상실
•하상경사 변화	•유속 증가 또는 저감	•하상형태 변화
•하도 준설	•하도 불안정화 •지류 두부침식 •유사이송 저감	•하폭변화 •하상 및 강벽침식 •장갑화 •수공구조물 기초침식
•홍수터 준설	•수변공간 파괴 •굴착공 확장	•지하수위 교란 •하도형태 변화
•토지이용도 변화	•유출량 증가	•토사발생량 증가
•농업용 저수지 증고	•보 설치 영향과 유사	•보 설치 영향과 유사

4. 하도 유지관리 전략

4대강의 효율적 하도관리를 위해서는 앞에서 검토한 4대강의 하천환경 변화 예측결과에 따라 사업구간에 대한 하도유지관리(부속물 유지관리 및 유량관리) 방향이 적절하게 설정되어야 한다. 따라서 이 절에서는 일반적 자연하천과 4대강의 하천환경 변화특성을 고려한 향후 4대강의 하도유지관리 전략과 함께 하도관리 방안을 제안하고자 한다.

하천 유지관리의 일반적 정의는 하천의 기능이나 성능이 항상 적절한 상태를 유지하도록 하는 것이다. 따라서 기본적으로 하천의 기능이 보장되어야 할 뿐만 아니라 기술적으로는 수요에 부합하는 시설의 안전성을 확보하고, 시설물의 기능을 충족시키며, 이를 통해 시설물의 경제성을 제고시킬 수 있어야 한다. 또한 사회적으로는 기술적 목적을 충족시킴으로써 시설 이용자에게 적절한 서비스 수준을 보장하고, 나아가 공중의 안전을 확보하며, 국민의 복리증진에 기여하여야 한다. 이 절에서는 기술적인 면을 중심으로 하도 유지관리 전략에 대하여 기술하였다.

대부분의 4대강 전 구간이 하도의 단면과 종단경사 그리고 하상재료 등이 하도 전 구간에 걸쳐 새롭게 정비되면서 하천의 수문학적 특성이 과거와 완전히 달라졌다. 즉, 과거의 하도 유출특성, 홍수도달시간이나 조도계수 및 유량과 수위 관계, 유량과 유사량 관계, 지류영향 등 하천의 모든 수리·수문학적 특성들이 바뀌어 하천설계를 위한 기초자료가 없어져 버린 상황이다. 이 상황의 심각성을 예를 들어 소개하면 하천에서의 흐름해석 기술은 보유하고 있으나 하천의 수리적 특성을 나타내는 입력자료(예; 조도계수, 저류상수 등)도 없으며 산정결과를 간접적으로 검증할 수 있는 혼적수위 등 경험적 현장자료도 없는 실정이다. 즉, 지금의 하천관리 상황은 항해도나 나침반 없이 항해하고 있는 배와 다를 바가 없다. 우리는 이러한 현황을 빨리 인식하고 하천 흐름을 지배하는 모든 인자에 대한 기초자료 확보에 총력을 기울여야 한다.

대규모의 하천교란 이후 하천 생태환경의 안정화에 필요한 시간이 20년에 이른다는 연구결과가 있을 정도로 본류 전 구간에 걸친 하상교란은 상당시간 하도 안정화 과정을 요하게 될 것이다. 하도의 안정성 확보를 위한 장기적인 관리대책을 수립하기 위해서는 하도의 안정화 과정에 대한 세심한 모니터링을 통해 중단기적 예측결과를 수시로 비교하고 보정하여 보다 신뢰성 높은 직·간접적 대응책을 수립해 나가야 할 것이다.

3.1절에서는 보의 신설에 따른 하천환경의 변화특성에 대하여 총론적으로 검토하였다. 그러나 보다 세부적으로 검토해 보면 보의 영향은 사실상 4대강 사업의 성패를 좌우할 만큼 심각한 것을 알 수 있다. 예를 들어 하천의 기초적 설계인자로 수위-유량 관계 곡선을 들 수 있는데 보의 배수영향권에서의 수위-유량 관계곡선 개발이 어렵다는 것은 과거 하구둑 근처 배수영향권에 속한 수위관측 지점의 예만 봐도 쉽게 알 수 있다. 문제는 보의 관리수위 기준으로 4대강 전체가 거의 배수 영향권에 속해 있다는 것이다. 즉, 홍수기를 제외하면 4대강 본류에서 하천유량을 정확하게 측정할 수 있는 지점은 보 지점뿐인 것이다. 우리는 이러한 심각성을 인식하고 보 지점에서의 유량 계측을 위한 각종 기초자료 조사계획 등을 신속히 수립해야 할 것이다.

또한 보 운영기법에 따라 유로 선형 및 유사이송 특성은 물론 생태환경 특성까지도 완전히 다른 양상을 보일 수 있다는 것이다. 즉, 동일한 유량을 방류하더라도 수문조작 방법에 따라 상류의 경우 하상의 퇴적분포 및 유로가 달라질 수 있다. 또한 하류에서도 보의 운영방법에 따라 직하류의 국부적 세굴양상과 하도형성이 영향을 받게 된다. 따라서 이러한 문제들을 예측하고 해결할 수 있는 각 보들의 운영기법에 대한 심도 깊고 광범위한 분석이 따라야 할 것이다.

이상의 검토를 통해 하천공학자와 하천관리자가 관심을 가지고 조사·분석 및 대응책을 수립해야 할 하도유지관리 분야를 정리하면 다음과 같다.

- 하천의 기본기능 보강
 - 하천 기본기능을 보장하는 유량 유사관리
통수단면 확보 (준설 등)
유사이송 연속성 확보(보 운영을 통한 플러싱 등)
 - 댐-농업용 저수지-보 연계운영
 - 하천설계를 위한 기초자료 축적
본류 및 지류의 유로 등 하천특성 변화
수위-유량, 유량-유사량 관계
현재 및 미래 하천환경 예측 및 대응전략
 - 하도 안정화 과정 모니터링 및 대책 수립
구간별 침식/퇴적 양상 및 유사평형 분석
본류-지류 합류부 안정화
지류 두부침식 최소화 (낙차공 등)
준설 또는 토사투입

- 하천시설물 안정성 확보
 - 유로 안정화
유로 및 홍수터 안정성 확보 (호안, 베인 등 구조적 대책)
어도 및 소수력 발전 유입 유출부 토사퇴적 및 세굴방지
 - 시설물 안정성 확보
보 하류부 세굴방지
제방 안정성
바닥보호공, 세굴방지공, 낙차공, 유도수로 안정성 모니터링
취수장, 배수문 주변 퇴적 및 침식방지

- 하천시스템의 능동적 관리

- 유역 토사관리
토지이용 변화에 따른 홍수량 및 토사유출 관리
- 지류의 안정화

○ 보 운영방안 최적화

- 보의 수문운영 및 유량자료 축적
- 이수 및 치수기능 확보를 위한 운영방안
- 유사이송 연속성 및 유로관리를 위한 운영방안
- 생태 환경기능 확보를 위한 운영방안
- 보 운영 기법이 하천환경 변화에 미치는 영향

5. 맺음말

4대강 하천환경의 변화는 이제 시작단계로 현재의 4대강 하도는 과거와는 전혀 다른 하천특성을 지니게 되었으며 하도 안정화에 상당 시간이 소요될 것이라는 사실이다. 또한 연속적인 보 건설로 인하여 우리의 하천은 자연하천의 특성과 함께 인공하천의 특성도 동시에 지니게 되었다는 것이다. 이 같은 이중적인 성격은 하천관리에 있어 긍정적인 면과 부정적인 면을 동시에 제공하게 되었다. 즉, 보를 어떻게 운영 하는가에 따라 자연하천에서 기대할 수 없었던 긍정적인 하도의 유지관리가 가능해진 반면 잘못 운영하면 예상치 못한 인재(인명과 재산피해)를 불러올 수도 있게 되었다는 것이다. 이제 우리 하천공학자들은 이러한 양면성을 지니고 있는 지금의 하천이 사회적으로나 기술적으로 자랑스러운 하천이 될 수 있도록 기술개발과 관리를 위해 최선을 다해야 할 것이다. 