



지난 10년간 하천유사 연구실적과 최근의 연구동향(Ⅲ)

우 호 섭 (한국건설기술연구원 수자원환경부 연구위원)

이 논문은 크게 1) 서론, 2) 연구 분야의 구분, 3) 분야별 연구실적과 동향, 4) 우리의 연구방향(제언), 5) 결론 등으로 구성되어 있다. 논문 분량이 많기 때문에 제1부에서는 서론, 연구 분야의 구분, 분야별 연구실적과 동향(유사론 기초/하상형태와 흐름 저항); 제2부에서는 분야별 연구실적과 동향(계속)(유사이송 관계식/유사량 측정/하상변동); 제3부에서는 분야별 연구실적과 동향(계속)(유역침식과 저수지 퇴사/제방 침식과 유사 조절/하천형태와 안정하도의 설계/과농도류), 우리의 연구방향, 결론 등으로 나누어 게재될 예정이다. 특히 참고문헌은 분량이 많음에도 불구하고 본 논문의 특성 상 말미에 전체를 수록하였다.

· 차 례 ·

1. 서론
2. 연구 분야의 구분
3. 분야별 연구실적과 동향
4. 우리의 연구방향(제언)
5. 결론

제 3 편

3.6 유역 침식과 저수지 퇴사

빗물과 흐르는 물에 의한 유역의 토양 침식 문제와 그로 인한 하류 저수지 퇴사 문제는 유사 문제에서 큰 비중을 차지한다. 다행히 우리 나라는 노년기 지형으로 대부분의 산지 지표면은 침식에 저항하는 암석이 노출되어 있고, 하천 연변의 충적층의 두께도 비교적 얇기 때문에 미국의 서부나 중국의 황하와 같이 대규모 침식 문제는 발생하지 않는다. 이에 따라 저수지 퇴사 문제도 상대적으로 적다. 그럼에도 불구하고, 국

부적인 유역 침식과 특히 소규모 농업용 저수지의 퇴사 문제는 상존하고 있다. 더욱이 최근 산지 개발, 신도시 개발 등 대규모 개발로 인한 가속화된 침식은 여전히 국지적인 문제를 일으킨다. 이에 따라 최근 개정된 자연재해대책법(1996)에서는 일정 규모 이상의 개발 사업에 홍수, 산사태 유발 문제와 함께 토사 재해의 가능성에 대해서도 사전 검토하여 필요한 대책을 세우는 것을 의무화하고 있다.

♣ 유역 침식과 유사 유출량

'90년대 들어와 유역 침식과 유사 유출량(sediment yield)¹⁾에 관한 연구는 적어도 ASCE와 IAHR에는 많이 보이지 않았다. 이 문제는 순수 수리학적 문제라기보다는 농업 토목, 지구 물리학, 수문학적 문제이기 때문에 이 분야 연구 결과는 상기 두 학회지에 상대적으로 적게 게재되었을 것이다.

Mizumura(1989)는 대부분의 유량-유사량 관계 곡선에서 나타나는 '루프' 형상의 불확실성을 대체하는 방법으로 수문학적인 접근을 시도하였다. 그는 하천

1) 'sediment yield'는 1년과 같은 장기간에 걸쳐 상류 유역에서 침식, 이송되어 하류 한 하천 단면을 통과하는 유사 유출량이며, 'water yield'와 같은 의미이다. 'specific sediment yield'는 상류 유역의 단위 면적당 단위 기간당(통상 1년) 유사량을 말하며 우리나라에서는 '비유사량'으로 쓰이고 있다. 여기서 초당, 혹은 하루 당 유사 유출량을 의미하는 '유사량(sediment discharge)'과 상기 유사 유출량과는 구분할 필요가 있다.

유량 대신 유역의 지표면 유출(overland flow runoff)을 이용하여 유사량 관계를 제시하였다. 그러나 그의 제안은 Hudson(1989)의 토론 논문에서 비판을 받았다. Hudson은 대규모 유역에서 하천 유사량을 유역의 지표면 유출과 직접 연관시키는 것은 물리적으로 불가능함을 강조하면서, 그는 전체 유역 중 특히 호우에 의한 유사 생성이 활발한 지역에 국한하여 유사이송의 제한 조건과 결부하여 호우와 유사의 침식, 이송과의 관계를 규명하는 것이 바람직하다고 주장하였다.

도시 하천의 유사 이송에 관한 연구로서 Solo-Gabriele과 Perkins(1997)는 보스톤의 한 도시 하천을 대상으로 물과 유사 이송을 모의하였다. 그들은 도시 하천의 흐름 특성은 1) 빠르고 센 흐름, 2) 느린 호우 흐름, 3) 장기적 기저 유출 등으로 나눌 수 있으며, 유사 이송도 이러한 세 가지 흐름 특성에 직접적으로 관련되어 있음을 강조하였다.

호우로 인한 유역의 유출과 유사 유출을 적절히 모의하는 모형 개발은 이 분야 연구자들의 꿈이 되어 왔다. CREAMS, AGNIPS 등은 그 동안 개발된 대표적인 모형들이다. Arnold 등(1995)은 유역 면적 수십km²에서 수천km²에 걸친 다양한 유역 규모에 적용할 수 있는 유역 유출과 유사 추적 모형(water and sediment routing model)을 개발하였다. 한편 콜로라도 대학 연구 팀도 GIS에 의한 raster 자료를 이용하여 2차원적으로 유역의 흐름과 유사 이송을 추적하는 모형(CASC2D)을 개발하였다(Ogden, 1997).

♣ 저수지 퇴사 및 조절

저수지 퇴사(堆砂)에 대해서는 '50년대부터 미국을 중심으로 퇴적 특성과 장기 예측 등에 관한 연구가 이루어졌다. 그 결과 미 개척국의 '경험적 면적 감소법(empirical area reduction method)' 등 연구 결과는 댐 설계에 직접 이용되고 있다. 남은 문제는 어떻게 하면 효과적으로 저수지 퇴사를 줄일 수 있는가이다. 이에 대해 '80년대 들어 미국보다는 중국을 중심으로 저수지 퇴사 조절에 대한 연구가 본격적으로 진행되었다.

'90년대도 중국의 저수지 퇴사 조사 연구가 돋보인다. Fan과 Morris(1992a)는 중국의 저수지 퇴사 문제를 소개하면서, 이러한 퇴사가 주는 문제로 1) 배수 구역의 하상 상승과 그로 인한 홍수위 증가, 2) 지하수위의 상승, 3) 수운에 악 영향, 4) 지류 유입부에 퇴사, 5) 발전 터빈에 유사 유입, 6) 유효 저수량의 감소 등을 들었다. 그들은 자매 논문(1992b)에서 퇴사 조절책으로 1) 홍수시 유사 잠긴 흐름의 우회, 2) 홍수시 배사(排砂), 3) 저수지를 비우며 배사(排砂), 4) 밀도류 방출 등 실제 중국에서 이용되고 있는 방법들을 소개하였다. 또한 그들은 밀도류의 방출량을 추정하는 방법과 저수지 내 홍수터의 경사와 주 하도의 경사를 가지고 장기적인 저수량 변화를 예측하는 경험식을 제안하였다.

Lai와 Shen(1995)은 저수지 배사에 관한 실험실 연구를 통해 배사 효율은 배사구를 통한 방출 유량, 수면 경사, 배사 수로의 폭이 커질수록 같이 커지는 것을 확인했다. 나아가 그들은 배사 효율을 추정하는 1차원 모형을 개발하여 실험 결과와 비교하여 폭이 좁은 저수지에 대해서는 좋은 결과를 얻었다. 그들은 폭이 넓은 저수지에 대해서는 1차원 모형보다는 2, 3차원 모형의 개발이 바람직하다고 결론지었다.

Hotchkiss 등(1995)은 야외 실측을 통해 저수지 수위와 하류 하천 수위 차를 이용한 '수리흡입 퇴사제거 시스템(hydrosuction sediment removal system, HSRS)'을 개발하였다. 그들은 이러한 사이펀 식 방법의 적용 절차에 대해서 10단계로 나누어 자세히 소개하였다.

Chang 등(1996)은 North Fork Feather River의 수력발전 저수지 배사 효율에 대해 자신이 개발한 FLUVIAL12 모형을 적용하여 연구하였다. 그들은 모형 적용 결과를 이용하여 1) 방출량과 저수지 수위 변화 곡선(유량 곡선), 2) 저수지 배사 수문 조작 규칙 등을 제시하였다.

마지막으로, Ziegler와 Nisbet(1995)는 장기 저수지 퇴사 예측을 위한 SEDZL 모형을 Watts Bar 저수지에 적용하여 1961년부터 1991년까지 30년간 저수지 퇴사를 모의하였다. 그 결과 실트 등 점착성 퇴

사의 세굴과 퇴적에 대해 비교적 양호한 결과를 제시하였다.

♣ 밀도류

밀도류(密度流)의 연구는 두 가지 면에서 실용적으로 중요하다. 첫째는 저수지 퇴사로서, 실트나 점토 등 미립 토사는 모래와 달리 저수지 유입부에 퇴적되지 않고 바닥을 따라 밀도 층을 이루면서 하류 댐체 부근까지 와서 퇴적하거나 하류로 방출된다. 따라서 밀도류의 해석은 저수지 수질, 퇴사 양상과 특히 배사 효율의 연구에 중요하다. 두 번째는 수 처리 과정에서 침전지의 설계에 밀도류의 거동이 중요한 위치를 차지한다. 여기서도 이 둘을 구분하여 검토한다.

Alavian 등(1992)은 그 때까지 밀도류 연구 결과를 종합적으로 검토하였다. 그들은 1) 각 흐름 영역에서 잘 이용되는 분석 방법을 구분하고, 2) 밀도류의 응용 방법의 예를 제시하고, 3) 밀도류 관련 기술 수준과 필요한 연구 분야를 제시하였다.

'90년대 중반 밀도류에 관한 실험적 연구로 Garcia(1993)는 경사면에서 평탄면으로 갈 때 생기는 밀도류의 도수 현상에 대해 연구 결과를 제시하였다. 그는 소금물과 유사 혼합물의 도수는 수리적인 면에서 같은 현상으로 결론지었다. 특히 유사 혼합물에 도수가 나타나면 소류사는 대부분은 즉시 퇴적되나, 부유사는 점프 높이의 1,000배 이상 더 나가서 퇴적되는 것을 관찰하였다.

Altinakar 등(1996)은 밀도류의 실험에서 특히 유속과 농도 관계 등 기본적인 흐름 구조에 대해 조사하여, 밀도류의 흐름 구조에 관한 몇 가지 물리량을 제시하였다. Lee와 Yu(1997)는 Kaolin 점토를 사용하여 밀도류 실험을 하여, 특히 최초 하강점(plunge point, 밀도류가 주변 물밀로 가라앉기 시작하는 점)과 안정 하강점에 대해 초점을 맞추었다. 그 결과 최초 하강점은 밀도 후르드 수가 1.0에서, 안정 하강점은 0.6에서 발생함을 보여주었다. 그들은 또한 밀도류 층의 평균 유속과 농도가 감소할수록 밀도류의 두께는 증가하는 것을 보여주었다.

밀도류에 관한 수학 모형도 미국 일리노이 대학의

Choi와 Garcia(1995)에 의해 제시되었다. 그들은 1차원, 부정류 밀도류의 거동을 물의 연속, 운동량 방정식과 유사의 연속식 등 세 방정식을 유한 요소법으로 풀어 그 결과를 실험치와 비교하였다. 밀도류의 전파는 댐 붕괴 파가 마른 하상 위로 전파하는 현상에 적용되는 dissipative Galerkin 방법을 이용하여 모의하였다. 이들의 모형은 또한 밀도류의 내부 수리 점프 현상과 그에 따른 소류사의 퇴적 현상도 잘 모의하는 것으로 나타났다. Choi(1998)는 1차원 모형을 확대하여 층 두께에 대해 평균한 평면 상의 2차원 모형을 개발하였다. 그는 개발한 모형을 질량 보전에 대해 검증한 후, 실험치와도 비교하여 그 적용성을 확인하였다(Choi, 1999).

다음 침전지의 밀도류 거동에 대해 Guetter와 Jain(1991)은 물과 유사의 연속식, 물의 운동량 방정식과 에너지 방정식을 풀어 그 해를 실험치와 비교하였다. 침전지의 밀도류의 이동 속도는 그 주변 흐름의 속도에 비해 10배 정도로 빠를 수 있기 때문에 침전지의 침전 효율에는 주변 흐름보다는 밀도류가 지배적이다. 그들의 해석 결과는 흐름 방향으로 밀도류 속도와 농도의 변화 등을 보여주었다. Lyn과 Rodi(1992)도 침전지에서 밀도류의 거동과 전단 유발 응집 현상을 수치적으로 모의하였다. 그들은 물과 유사의 지배 방정식과 $x - \epsilon$ 난류 모형을 이용하여 밀도류를 모의하였다. 그들은 침전지의 효율에 대해서 전단유발 응집(shear-induced flocculation)은 상대적으로 중요하지 않고 입자의 침강속도의 분포가 큰 역할을 한다고 주장하였다.

3.7 제방 침식과 유사 조절

♣ 제방 침식

제방 침식은 크게 1) 제방 구성재료의 사면 불안정에 의한 것(유수에 의한 체체나 제방 발꿈치(toe)의 세굴은 이러한 불안정을 가속화 시킴), 2) 제방 재료 사이로 물이 스며 나와서 관공(貫孔, piping/sapping)을 만들어 생기는 것, 3) 제방의 월류에 의한 세굴(breaching) 등으로 나눌 수 있다. 여기서 제방(bank)은 우리의 인공 제방(levee)이 아닌 불가의

자연 강덕, 또는 둔덕을 의미한다.

Hasegawa(1989)는 만곡부에서 유수에 의한 제방의 침식 문제를 이론적으로 접근하였다. 그는 만곡부 바깥쪽 제방의 세굴은 하천 중심선에서 유속과 바깥 제방 부근의 유속과의 차이인 '초과 유속'에 비례하는 것으로 보았다. Maynard(1996)는 모래 하천에서 만곡부의 세굴 수심을 예측하는 경험적 방법을 제시하였다. 그의 연구 결과 최대 세굴심은 곡률 반경과 하쪽의 비, 폭과 수심의 비, 평균 수심 등에 관계하는 것으로 나타났다.

Millar와 Quick(1993)은 자갈 하천의 수리 기하 특성을 해석적으로 분석하는 데 있어 제방의 안정성이 미치는 영향을 검토하였다. 그들은 제방은 재료의 압밀, 점착성 재료에 의한 시멘트 효과, 식물 뿌리에 의한 흙 입자의 결합 등으로 시간이 갈수록 안정해진다는 점을 강조하며, 제방 안정 해석에 기본적인 인자로 1) 제방 재료의 중앙 입경과 2) 제방 재료의 수정 마찰각을 들었다. 참고로 그들은 제방이 식물의 뿌리에 의해 견고해지면 그 영향이 하천의 수리 기하 특성에 미쳐 제방에 식생이 없는 유사한 하천에 비해 폭이 좁아지고, 수심은 깊어지고, 하상 경사는 약간 완만해지는 것을 보여주었다.

Darby와 Thorne(1996)는 제방의 안정성을 해석하는 새로운 방법을 제안하여 기존의 방법들과 비교하였다. 그들은 기존 방법이 가지는 단점으로 1) 순전히 토질 역학적으로 접근하며 유수에 의한 제체나 발꿈치의 세굴 효과를 고려하지 못하고, 2) 붕괴 평면이 발꿈치를 지나는 것을 전제하나 항상 그렇지 않으며, 3) 토양 간극수 압력과 유수면의 정수압 '불투수 압력 (confining pressure)' 이 제대로 고려되지 못하고 있고, 4) 붕괴면 경사가 제대로 평가되지 못하고 단순히 제체 재료의 마찰각과 제방 경사각만 가지고 개략적으로 추정되는 점을 들었다. 그들은 이러한 단점을 보완하여 '평면 붕괴면(planar failure surface)'을 가지는 급경사, 점착성, 층이 없는 하천 제방에 대한 안

정성을 해석하는 방법을 제시하였다. 그들의 방법에는 간극수와 정수압 불투수 압력 항이 고려된다. 그들의 방법은 기존의 다른 방법에 비해 '제체 활동(mass sliding)'에 대해 가장 효과적인 안정 해석 방법임을 강조하였다.

제방에서 물이 스며 나오면서 작은 구멍을 만들고 그 안에 흐르는 물에 의해 점차 세굴되면서 마침내 제방이 붕괴되는 현상을 '파이핑' 또는 '새핑'이라 한다²⁾. 제방의 파이핑 붕괴에 대해서 Hagerty(1991a,b)는 파이핑 현상이 일어나기 쉬운 현장을 보이면서, 이러한 파이핑 현상의 발생에 필요한 조건을 제시하였다. 그는 하천 실무자들이 이용할 수 있는 파이핑 현상의 확인과 평가 방법을 제시하였다.

미 토목학회 수리 분과 위원회는 영국과 공동으로 제방, 댐, 도로 등이 월류되어 침식되는 현상에 대해 특히 PMF 상황에 초점을 맞추어 광범위한 자료 조사와 연구를 수행하였다(Powledge 등, 1989a,b). 그들은 풀이 자란 제방이나 여수로로부터 시작하여 토목 섬유(geotextiles), 돌 상자(gabion), 사석(riprap), 콘크리트 블록, '흙시멘트' 등 다양한 세굴 보호장치에 대해 평가하였다. 그들은 실무 기술자들이 이러한 정보를 토대로 경제적인 월류세굴 보호 방법을 검토할 수 있을 것을 기대하였다.

♣ 유사 조절과 하천 정비

과거부터 하천에 국부적인 유사 퇴적과 세굴 문제를 해소하는 방법으로 다양한 유사 조절책들이 이용되었다. 이중 최근에 소개된 것 중 주목할 만한 것은 미 아이오와 대학의 '날개 수체(vane)'와 '와관(渦管) 유사 제거기(vortex tube sediment extractor)'이다.

한편, 하천의 홍수 소통, 선형과 최심선의 유지, 호안, 기타 구조물의 보호 등을 위한 방법으로 넓은 의미에서 '하천 정비(river training)'³⁾에 대한 조사 연구도 진행되었다.

2) 이러한 파이핑 현상은 1990년 9월 한강 대홍수 시 일산 제방 붕괴의 원인으로 알려졌다.

3) 하천 정비(河川 整備)는 일본에서 도입된 하천 홍수방지 위주의 하천 개선 관행을 의미하며, 주로 통수능 확보를 위해 수목 제거를 포함한 하천 단면의 폭단면화와 고수부지 조성 등 하상 정비, 하천 선형의 직선화나 완만한 곡선화, 호안 및 제방의 설치, 수제 등 흐름 및 유사 조절 기구의 설치 등을 망라한다. 이러한 개념은 미국 등에서 통용되는 'river training' 과도 아주 다르지 않으나, 다만 미국 하천

Odgaard와 Wang(1991a)는 하천의 세굴과 퇴적 등 유사 조절을 위한 베인의 이론적, 실험적 연구를 수행하여 실제 실무에 쓸 수 있는 설계 지표를 제시하였다. 베인은 하상 위에도 물에 잠기도록 설치하는 얇고 긴 일종의 수제로서 흐름에 2차류를 발생시켜 하천 단면에서 유사를 재분포시키는 역할을 한다. 베인은 통상 흐름에 대해 15~25도 경사지게 설치하고, 높이는 수심의 0.2~0.4배 정도 되게 한다. 그들은 이러한 베인에 대한 실험과 하도 선형 변화, 제방 침식, 교대주위 세굴 등에 관한 현장 자료를 통해 이론의 타당성을 확인하였다. 그들은 제방 침식, 수운 하도의 천수화(shoaling), 취수구 퇴사, 교량 세굴, 하천 합류 및 분류 등에 대해 구체적인 설계 자료를 제시하였다(Odgaard와 Wang, 1991b).

Atkinson(1994a)은 (인공) 수로에서 효과적으로 유사를 제거할 수 있는 외관 유사 제거기를 개발하였다. 외관 유사 제거기는 위 부분이 일자(一字)로 열린 관으로, 수로의 바닥에 가로질러 설치된다. 유사는 흐름에 의해 관을 넘어 이송되다 위의 구멍으로 빠져 수로 바깥으로 연결된 관을 따라 나가서 제거된다. 그는 이러한 미케니즘에 대한 이론적 검토를 거쳐 제거 효율을 예측하고 이를 실험치와 비교하여 120개의 측정치에 대해 양호한 결과를 얻었다. 그는 이러한 외관 제거기의 설계 절차도 제공하였다(Atkinson, 1994b).

취수구 주위 모래 퇴적으로 인한 취수 장애는 모래 하천에서 취수를 하는 경우 빈번히 일어나는 문제이다. Wang 등(1996)은 Odgaard 등이 개발한 날개 수제를 제시된 설계 지침에 따라 취수구 주변에 설치하여 그 효과를 검토하였다. 그 결과 취수구 주위에 설치된 2개의 날개 수제는 하상을 적절히 세굴, 퇴적 시킴으로써 취수구 퇴사를 효과적으로 억제하는 것으로 나타났다. 이어 Nakado와 Ogdan(1998)은 미주리 강을 연해 있는 5개의 취수구 퇴사 억제 방법에 대해 물리 모형 실험을 통해 확인하였다. 그 결과 취수

구와 강쪽 중간에 날개 수제를 설치하면 효과적으로 퇴사 문제를 억제할 수 있고, 날개 수제와 취수구 사이에 유사 차단 벽을 설치하면 그 효과는 더 나은 것을 확인하였다. 그들은 이러한 결과를 토대로 취수구 주위 퇴사 억제를 위한 날개 수제 설계 지침을 제시하였다.

마지막으로, Maynard 등(1989)은 호안 세굴 방지에 가장 흔하게 쓰이는 사석의 설계 절차에 대해 구체적으로 소개하였다. 이 설계 절차에는 사석의 입도(입경 분포), 피복(blanket) 두께, 사면 경사, 반곡 등을 고려한다. 그들의 방법은 미 공병단의 하천 공사 매뉴얼(USACE, 1991)에 채택되었다.

3.8 총적하천 형태의 변화와 안정 하도의 설계

♣ 총적 형태와 과정

총적 형태와 과정(fluvial forms and processes)은 넓게는 물에 의한 지각의 침식, 이송, 퇴적을 다루는 분야로서, 기본적으로 공학이기보다는 자연 과학 분야이다. 그러나 공학적으로 관심이 있는 총적 하천의 변화를 이해하기 위해서는 유수에 의한 지각 변화의 과정을 기본적으로 이해하는 것이 필요하다.

이 분야는 그 특성 상 수리학 논문집보다는 다른 지구 물리학이나 지리학 분야의 논문집에 더 많은 연구 동향이 실렸을 것으로 추정된다. 실제로 이 분야 전문가 중 하나인 David Knighton이 최근에 쓴 책(Fluvial Forms and Processes, 1998)에는 이 분야 최근 연구 성과들이 다수 소개되고 있다.

하천에 유입하는 물과 유사에 변화가 있는 경우 하천의 반응은 1차적으로 하폭의 변화이다. Darby와 Thorne(1996a,b)은 이러한 하폭과 하상 형태의 변화에 관한 구체적인 연구에서, 직선 하천의 수심과 하폭이 흐름 방향으로 변하는 경우 모래 하상과 점착성 제방의 침식과 퇴적을 모의하였다. 여기서 하폭의 확대는 제방의 안정성을 흐름과 유사 이송 알고리즘을 연계시켜 모의하였다. 이 모형은 미 테네시 주의 13.5

실무에서 의미하는 river training은 호안, 유심선 유지 등에 국한되지 우리처럼 하천을 완전히 인공화시키는 것은 아니다. '60년대 이후 계속된 기존의 하천 정비 관행이 우리의 하천을 완전히 인공화 시켰다는 점에서 이러한 하천 정비 관행은 시대에 뒤떨어지는 것으로, 국토 환경의 보전과 복원 차원에서 재검토 되어야 할 것이다.

km구간 하천에 적용되어 그 적용성이 검증되었다. 그 결과 흐름의 수심/폭과 수심이 커지는 율은 관측치의 15% 범위 내에서 모의하나, 하폭의 증가율은 관측치의 1/3 정도로 과소 예측되는 것으로 나타났다.

미 미네소타 대학의 Parker는 선상지(扇狀地, fan)의 지형학적 생성 과정을 수학적으로 모의하였다는 점에서 공학적 기술을 자연 과학에 적용시킨 좋은 사례를 보였다. Parker 등(1998a)은 선상지를 그 생성 원인에 따라 1) 지속적으로 유로가 바뀌는 하천이나 흐름에 의한 것, 2) 박층류에 의한 것, 3) 토석류의 연차적인 퇴적에 의한 것 등으로 나누고 있다. 이 중 그들은 1)과 2)에 의해 생성되는 선상지에 대한 수학 모형을 개발하였다. 그들은 상류에서 이송된 토사의 퇴적은 물론 하류 기준면의 침강과 상승 등 지각 변동에 의한 것과 해수면의 변화 등을 고려하였다. 선상지의 재료로서 모래와 자갈을 구분하였고, 박층류에 의해 생성되는 것은 하천에 의한 것의 제한 조건으로 모의하였다. 그들의 모형은 철 광산의 침전지(tailing basin)에 적용되어(Parker 등, 1998b) 선상지의 형성 과정과 침전지 수명기간 동안의 중국적인 형상을 모의하였다.

♣ 안정 하도의 설계

안정 하도(stable channel, channel in regime/equilibrium)란 한 하도 구간에 유사의 퇴적과 침식이 전체적으로 균형을 이루어 어느 한 방향으로 지속적으로 침식이나 퇴적이 일어나지 않고 하상 경사, 재료, 하폭 수심 등 원 하도의 기하 특성을 유지하는 하천을 말한다. 이러한 하천의 특성을 규명하는 것은 자연 과학 측면에서만뿐만 아니라 안정된 수로의 설계나 하도의 정비 등 공학적으로도 중요한 의미가 있다. 안정 하도의 모형에 대해서는 금세기 초 Lacey의 Regime 방정식이 소개된 이후 많은 경험적, 반 경험적 모형들이 제시되었으나 아직 충분한 신뢰를 가지고 이용할 수 있는 방법은 찾기 어렵다.

Stevens와 Nordin(1990)은 1930년에 소개되어 지속적으로 이용된 Lacey의 Regime 방정식에 대한 새로운 해석을 하여 원 방정식의 실트 요소(silt

factor)를 유사 농도로 해석하였다. 이를 토대로 새로운 Lacey 방정식을 제안하였다.

Chang(1990)은 이동상 하천의 수학 모형을 가지고 평형 하도의 수리 설계 제원을 도출하려고 하였다. 그는 물과 유사 추적을 통해 유사량의 공간적 변화를 추정하여 침투 유량 시 퇴적과 세굴이 균형을 맞는 수리적 기하 특성을 도출하였다. 그는 이러한 과정을 홍수터의 홍수로 설계에 적용하였다. 한편 Diplas와 Vigilar(1992)는 한계 이송 상태에서 총적 수로의 단면형과 기하 특성을 이론적으로 도출하였다. 그들은 한계 이송 조건 시 단면형 방정식으로 물의 운동량 방정식과 하상 유사 입자의 힘 방정식을 이용하여 5차 폴리노미얼 지수 방정식을 도출하였다. 그들은 또한 기존의 코사인, 포물선, 지수함수로 나타내는 단면형은 기본적으로 불안정하며, 자신들이 제시한 단면형이 충분히 안정하다는 것을 실험실 자료로 비교 설명하였다.

Julien과 Wargadalam(1995)은 총적하천의 하류 수리기하(水理幾何, hydraulic geometry) 특성에 관한 해석적 연구를 통해 만제방(滿堤防, bankfull) 하폭, 평균 수심, 평균 유속, 마찰 경사 등에 대한 관계식을 도출하였다. 그들은 비점착성 재료의 총적 하천에서 유량, 흐름 저항, 이차류, 입자 운동성 등 4개의 방정식을 유량과 유사 입자의 함수로 표시하였다. 그들의 해석 결과는 835개의 야외 자료와 45개의 실험실 자료와 비교되어 만족할 만한 결과를 얻었다.

1998 년은 안정 하도의 수리기하 특성 연구의 해라고 할 수 있을 정도로 많은 논문이 발표되었다. Cao와 Knight(1998)는 총적하천의 안정 하도 설계를 위한 수리기하 특성을 도출하였다. 그들은 이른바 '안정 하도의 모순(stable channel paradox)' 문제에서 이차류가 경계면 소류력의 재 분포에 미치는 영향을 운동량 확산 개념으로 고려하여 그 해를 엔트로피에 기초를 둔 단면형 방정식, 흐름 연속식, 흐름 저항식, 유사 이송식을 푸는데 이용하였다. 이러한 모형을 이용한 안정 하도의 설계 절차는 컴퓨터 모형으로 만들어져 단면형, 수심, 폭 등 수리적 기하 특성을 계산하도록 하였다.

Vigilar와 Diplas(1997)는 측방 운동량 확산을 고려하여 수리적 기하 특성과 경계면의 응력 분포를 결정하는 모형을 개발하였다. 그들의 모형은 평탄 하상에 양측 곡선 제방 형태의 하천을 대상으로 하였다. 그들의 모형에서 하상의 소류력은 하상 재료를 충분히 이송시키나 제방에서는 한계 상태를 상징하였다. 그들은 모형은 가용한 실험 및 야외 자료와 비교되어 검증되었다(Vigilar와 Diplas, 1998). 이 모형을 이용한 설계 절차는 기술자들이 사용하기 쉽게 방정식과 도해적으로도 제시되었다. 이 모형의 한계는 직선 하도로 비점착성이고, 부유사 이송이 없는 굵은 재료로 되어 있고, 비교적 일정한 단면형을 가지는 하천에 국한된다. 또한 제방의 식생, 이차류의 영향 등은 고려되지 않는다.

Millar와 Quick(1998)은 점착성 재료의 제방으로 된 자갈 하천의 안정하도 특성을 해석적으로 제시하였다. 그들은 안정 하도의 폭은 소류사를 최대로 이송시키는 최적 조건이라는 전제에서 출발한다. 이러한 최적 조건은 제방이 제체 붕괴되거나 세굴될 때 나타나는 것으로 보았다. 또한 그들은 제방의 식생 효과도 검토하여 뿌리가 잘 발달된 식생 제방은 그렇지 않은 제방보다 한계 조건이 3배나 큰 것으로 보고하였다.

총적 하천의 수리적 기하 특성에 관한 연구의 종합판 성격으로서 1998(a,b)년에 ASCE의 '하천 폭 조정의 수리학, 제방 역학, 그리고 모형에 관한 특별 위원회(ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment)'의 종합 보고서가 소개되었다. 이 보고서에는 1993년부터 시작한 특별 위원회가 연구한 하폭 조정의 과정, 미케니즘과 모형 개발에 관한 결과들이 제시되었다. 그들은 총적 하천의 하폭에 관한 기존의 연구는 주로 이른바 안정 하도에 국한되었고, 시간에 따라 변하는 특성과 특히 제방 주위의 현상은 충분히 다루지 못했다는 점을 강조하였다. 그들은 자매 논문에서 시간 의존적인 하폭 조정 현상을 모의하는 모형들은 몇 안되며, 그나마 하천 실무에서 이용되지 못하고 있는 점을 강조하였다. 마지막으로 그들은 이를 극복하고 실용적인 모형 개발을 위해 앞으로 더 연구

되어야 할 분야를 제시하였다.

3.9 과농도류

과농도류(過濃度流, hyperconcentrated flows)란 유사 농도가 매우 높아지면서 물과 유사 혼합물의 점성이 커지고 혼합물 내 입자 간의 충돌에 의한 새로운 응력이 생기는 등 물-유사 혼합물의 흐름거동 특성(rheological property)이 보통의 유사 흐름의 특성과 크게 달라지는 흐름을 말한다. 이러한 흐름은 자연에서 건조 지역에 호우로 유사 입자의 일시적 과다 유입에 의한 과농도류(hyperconcentrated flows), 급경사지에서 호우 시 산사태 등에 의한 토석류(土石流, debris flows), 화산 폭발이나 호우로 산의 눈이 일시에 녹아 생기는 진흙 흐름(mud flows) 등이 있다.

여기서 유사 농도가 무게로 10~80% 정도 되는 경우 통상 과농도류라 하며(Julien, 1995), 토석류는 특히 산사태 등으로 진흙부터 자갈까지 망라한 과농도류가 일시적으로 이동하는 흐름을 지칭하며, 유사 중 모래 이상의 크기가 50% 이상인 경우 토석류로 그 이하는 진흙 흐름으로 본다. 과농도류에 대한 연구는 1960년대 초부터 미국에서 시작하여 한동안 뜸하다가 '80년대 중반 이후, 특히 중국의 하천 수리학 연구가 국제화되면서 다시 관심을 갖게되었다. 중국 황하 중상류 건조 지역에서는 호우에 의해 황토(loess)가 씻겨 내려가면서 이러한 과농도류 현상이 중소 하천에 자주 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 중남미 등에서 화산 폭발로 산에 눈이 일시에 녹거나 큰 호우시 발생하여 큰 피해를 주어왔다.

♣ 과농도류의 흐름 거동 특성

과농도류는 1) 진흙 성분이 많은 경우 Bingham 유체 특성을 가지는 층류 현상, 2) 모래, 자갈 등 굵은 입자가 많은 경우 Bagnold의 분산 응력이 지배적인 흐름, 3) 농도가 너무 높지 않아 난류가 존재하는 흐름 등으로 구분할 수 있다(Laigle와 Coussot, 1997).

Julien과 Lan(1991)은 과농도류의 흐름 거동을 모형화하기 위하여 1) 입자 간의 충돌, 2) 유체와 유사 입자 간의 점성 마찰, 3) 입자의 충격, 4) 난류 등

4개의 응력을 합하였다. 그들의 모형은 실험 자료와 비교되어 양호한 결과를 얻었다. 또한 과농도류의 흐름 거동 모의에서 가장 중요한 인자로서 입자 간 충돌에 의한 분산 응력(dispersive stress)과 점성력의 비를 강조하였다.

Wang 등(1994)은 진흙과 물 혼합물(진흙탕 물)의 거동 특성을 실험하였다. 그 결과 진흙과 같이 입자의 크기가 작으면 진흙탕 물은 항복 응력(yield stress)을 보이나 입자의 크기가 커지면서 광물 특성이 달라지면 보통의 뉴튼 유체의 특성을 보이는 것을 관찰하였다. 특히 진흙의 포함된 광물 양 이온에 따라 점성 특성이 크게 달라지는 것을 보고하였다.

Mainali와 Rajaratnam(1994)은 경사 28.6%까지 순환 플룸에서 0.2~0.4mm의 모래를 이용하여 부피 농도 2.5~43.5%까지 연직 방향의 유속 및 농도 분포 등 흐름 특성 실험을 하였다. 그들은 실험 결과를 기존의 흐름거동 모형과 비교하여 1) 흐름은 여전히 난류이고, 2) von Karman 상수는 점차 감소하고, 3) 유속 분포는 여전히 대수식을 따르며, 4) 전단 응력 분포도 맑은 물과 같이 선형적임을 확인하였다.

Wang과 Larsen(1994)은 진흙-물 혼합물의 난류 특성을 연구하면서 이러한 흐름에 모래를 넣어 소류사를 발생시키는 경우 난류 특성의 변화를 관찰하였다. 통상 진흙탕 물의 과농도류는 바닥 근처에서는 난류, 수면 가까이에서는 층류를 보이나 모래를 넣으면 전 흐름 영역이 난류로 바뀌는 것을 관찰하였다. 결론적으로 진흙탕 물 흐름에 소류사가 있으면 난류의 강도가 증가하는 것을 확인하였다.

Wang 등(1998)은 진흙탕 물의 거동 특성이 흐름의 난류와 마찰 특성에 미치는 효과를 실험을 통해 관찰하였다. 진흙탕 물은 입자 간 응집(floc)을 형성하여 난류를 억제하여 난류 마찰을 줄이는 역할과 혼합물 자체의 점성에 의해 점성 마찰을 늘이는 상반된 역할을 하는 것으로 관찰되었다. 그에 따라 자갈 하상 등 바닥이 거친 경우 입자 간 응집은 난류를 억제하여 마찰이 줄게 되고, 부드러운 바닥에서는 점성이 커지면

서 오히려 마찰이 커진다고 보고하였다.

Aragon(1996)은 과농도류에서 입자 간 충돌로 생기는 응력과 바닥 마찰에 의한 응력을 고려하여 기존의 Bagnold 모형을 수정하였다. 그는 바닥 경사 19~23도의 플룸에서 실리카 모래를 사용하여 과농도류 실험을 수행하여 모형의 타당성을 확인하였다.

♣ 과농도류 실험과 모형화

Rickenmann(1991)는 과농도류를 물과 진흙의 혼합물 속에 모래, 자갈이 이송하는 현상으로 보았다. 이 경우 진흙탕 물은 하나의 균일한 유체로 모래와 자갈은 그 유체에 의해 부유, 이송되는 유사로 볼 수 있다. 그는 혼합물의 점성, 밀도 등 물리적 특성과 흐름 바닥의 경사가 소류사 이송에 미치는 효과에 대해 실험을 통해 연구하였다.

성격이 조금 다르지만, Winterwerp 등(1992)은 해안 간척 사업에서 체절(締切, dike closing)을 위한 준설 모래 주입 시 흘러가는 물-모래 혼합물의 거동을 연구하기 위하여 혼합물의 과농도류에 대한 실험 연구를 하였다. 특히 그들은 이러한 모래 주입에 의해 형성되는 대형 사구의 거동을 모의하는 간단한 1차원 모형도 제시하였다.

Takahashi 등(1992)은 과농도류의 유량, 농도, 연직 방향의 입경 분포 등에 대해 수치 모형을 개발하였다. 이 모형은 과농도류의 흐름을 1) 흐름에 의한 마른 하상의 세굴로 인한 과농도류의 형성과 2) 분산 응력으로 인한 굽은 입자의 상승과 빠른 속도로 전파되는 현상 등 두 단계로 구분하였다. 그들은 제 2의 모형을 개발하여 과농도류의 퇴적 형상, 두께 및 퇴적층의 입경 분포를 모의하였다. O'Brien 등(1993)은 선상지와 홍수터 등에서 일반 홍수와 과농도류를 모의하는 2차원 모형을 개발하였다. 그들은 Julien과 Lan(1991)이 개발한 4항 흐름 거동 모형을 이용하여 과농도류를 추적하였고, 특히 CAD를 이용하여 계산 결과를 도시하였다. 그들의 모형은 과거에 실제 발생한 과농도류 현상에 대해 검증되었다.

3) 여기서 하상파은 하상 형태(bed form)의 파가 아니라 대규모 하상 형태, 즉 사주나 하상 전체의 이동 속도를 말한다. 하상 형태의 전파 속도는 상대적으로 매우 빠르다(수m/min).

과농도류는 댐 붕괴에 의해서도 발생한다. Han과 Wang(1996)는 댐 붕괴로 인한 과농도류의 거동을 모의하기 위하여 Bingham 유체 모형을 이용하였다. 이를 토대로 3차원 연속, 운동량 방정식을 유도하여 그 결과를 수심 방향으로 적분하여 2차원 흐름 방정식을 도출하였다. 그들은 이 흐름 방정식을 특성법으로 수치 해석하여 그 결과를 실제 댐 붕괴로 인한 과농도류 발생 자료와 비교하여 양호한 결과를 도출하였다. Laigle과 Cousot(1997)는 진흙이 상당히 포함된 과농도류는 기본적으로 층류로 보고 Hershel-Bulkley 흐름 거동 모형을 이용하여 천수 방정식을 풀어 과농도류의 거동을 모의하였다. 그들의 결과는 실험실 자료와 비교되었다.

Huang과 Garcia(1997)는 댐 붕괴나 급경사에서 산사태 등으로 생기는 층류 과농도류를 모의하기 위하여 Bingham 유체 모형을 가지고 2차원 부정류 방정식을 만들어 섭동법(perturbation)으로 해석 해를 구하였다. 그들의 결과 역시 실험실 자료와 비교되었다. Bathurst 등(1997)은 급경사에서 산사태에 의해 생기는 과농도류의 유사 전달비를 추정하는 모형으로 5개를 선정

하여 비교 검토하였다. 그들은 유역에서 물과 유사 및 오염물의 이송을 모의하는 SHE 모형의 후신인 SHETRAN 모형의 한 부분으로 쓸 수 있는 모형 선정을 위한 것이다.

위와 같이 1990년대에는 하천 유사 분야에서 과농도류의 연구가 상당한 비중을 차지하고 있었음을 유출할 수 있

다. 이러한 과농도류, 또는 토석류 연구의 중요성은 이러한 흐름이 치명적인 자연 재해를 일으킨다는 점이다. 이는 일반 홍수와 또 다른 재해 양상을 보인다. 따라서 2000년대에도 이에 대한 지속적인 연구가 예상된다.

4. 우리의 연구 방향(제언)

위와 같이 다양한 분야의 하천유사 연구 중에서 우리의 자연적, 사회적 여건에 직간접적으로 관련되어 있는 분야와 상대적으로 관련이 적은 분야를 나누고, 다음 국내 실정과 분야 특성을 감안할 때 집중 투자할 가치가 있는 분야를 제시하면 다음 표 1.과 같다.

따라서 국내 하천의 자연적, 사회적 여건을 감안할 때 연구의 필요성이 상대적으로 큰 분야는 1) 하상 변동(장기적, 광역적 하상 변동은 물론 사주의 이동과 같은 중기적, 국지적 하상 변동), 2) 유역의 비점 오염원과 관련된 유사추적 모형 개발, 3) 하상 근처에서 물과 사립자의 상호 작용에 관한 연구, 4) 소규모 저수지 퇴사 조절책과 제방 유지관리책 등 실용적 연구

표 1. 국내 여건 상 하천유사 분야의 상대적 중요도

분야	국내의 자연, 사회 여건과 관련성	비고(상대적 중요도)
- 유사론 기초	- 하천유사 연구의 기초 사항으로 일반적 관심 필요(특히 물과 사립자의 상호 작용에 관한 이론적, 실험적 연구에 투자 필요)	공통기초
- 하상형태와 흐름 저항	- 야외 하천 자료가 충분하여야 연구가 가능한 분야임(국내 총적 하천의 경험적 흐름저항 관계 도출 필요)	중요
- 유사이송 관계	- 이미 외국에서 상당한 연구가 진행되었음(야외 하천 자료도 충분하여야 연구가 가능한 분야이나, 아직 신뢰도 높은 유사량 공식이 없음을 감안하면 일부 집중 노력 필요)	중요
- 유사량 측정	- 국내에서는 주요 하천에서 주기적, 제도적인 유사량 측정이 선행되어야 함	보통
- 하상변동	- 국내 여건 상 하천유사 분야 중에서 가장 관심을 두어야 할 분야임(특히 야외 관측을 통한 경험적 모형과 2, 3차원 수확모형 개발 필요)	매우 중요
- 유역 침식과 저수지 퇴사	- 유사량 자체뿐만 아니라 오염 유사의 이송과 운명 등에 관한 수학적 추적모형의 개발 필요 / 소규모 저수지의 퇴사 조절책에 관한 실용적 연구 필요	보통
- 제방 침식과 유사 조절	- 인공 제방의 유지관리와 점검 방법의 실용적 연구 필요 (그 외는 상대적 중요성은 크지 않음)	보통
- 하천 형태와 안정 하도의 설계	- 국내 자연 여건 상 하천이나 인공 수로의 변화가 많지 않음	보통
- 과농도류	- 국내 자연 여건 상 발생 가능성이 적기 때문에 필요성 적음	덜 중요

등이다. 이 중 분야 1), 2)는 사회적 요구가 커서 연구 개발이 필요하며, 분야 3)은 소규모 투자로서 세계적 수준의 연구 성과의 결실이 상대적으로 가능한 분야로서 특히 대학에서 관심을 기울일 가치가 있으며, 4)는 실용성이 있는 분야로서 공공 기관에서 투자할 가치가 있는 분야이다. 그밖에 교량세굴 문제는 여기서 거론되지 않았으나, 이는 이론적, 실험적 연구보다는 야외 관측과 조사를 통한 연구가 필요한 분야로 사료된다.

참고로 필자는 다른 지면⁴⁾을 통해 국내 여건에 비추어 21세기에 수리 전문가들이 특별히 관심을 모아야 할 분야로서 다음을 제시하였다.

- (1) 홍수와 한발의 획기적 저감 방안
- (2) 댐, 교량, 상하수도 등 기존 수리 구조물의 유지관리와 보강
- (3) 유역의 종합적 관리를 위한 GIS와 Hydroinformatics의 적극적 이용
- (4) 저수지, 하구, 해안의 동수 역학과 유사 이송의 3차원적 모의
- (5) 인위적 변화에 따른 하천과 해안의 장단기적, 巨微視的 반응
- (6) 물과 유사에 의한 오염물의 이송과 운명
- (7) 수생 서식처의 보전, 복원을 위한 생태 수리학
- (8) 지구 기후 변화가 수자원에 미치는 영향

위의 분야 중에서 하천 유사에 직간접적으로 관련되어 있는 것은 (2)의 유사 침식과 퇴적 관련 구조물 유지관리, (4)의 3차원 유사이송 모의, (5)의 하천변화 예측, (6)의 유역에서 유사의 이송과 운명, (7)의 생태 서식처의 물리적 기반 조성 복원을 위한 미시적 유사의 침식과 퇴적 등이다. 이러한 관심 분야에서 공통적인 것은 유사의 침식과 퇴적 현상을 수학적으로 모형화하는 것이다. 이는 다시 1) 미시적 3차원 동수 역학 유사이송 모형의 개발, 2) 거시적 1, 2 차원 하천변화 모형의 개발, 3) 유역의 유사추적 모형의 개발 등으로 구분된다. 따라서 위 세 가지 분야에 집중적으로 노력을 경주할 필요가 있다.

그러나 위와 같은 수학 모형의 개발은 관련 현상의

기초적 연구 성과를 집대성하여 수학적으로 표시하는 것으로, 그러한 기초적 연구 기반 없이는 사실상 모형 개발이 어렵다. 이 점에서 하천유사 분야는 물론 어느 연구 분야도 일부만 강조해서 종합적인 성과를 거두기 어려운 것은 사실이다. 따라서 이러한 한계를 해결하는 방안은 표 1.에서 제시한 중점 연구분야에 초점을 맞추되, 하천모형 개발에 필요한 '부품'은 외국의 연구 성과를 소화 개량하여 이용하는 것이다. 이는 국내의 하천 수리학 연구 여건을 고려할 때 불가피한 '타협'일 것이다. 모든 것을 다 잘 하기는 우리의 연구 환경이 역부족이며, 또한 그럴 필요도 없을 것이다.

5. 맺는 말

지난 10년간 한국에서 하천유사 관련 연구실적을 되돌아보면 외국에 비해 미흡하나, 나름대로 새로운 연구가 진행된 것을 볼 수 있다. 구체적으로 지난 '80년대 말부터 유사량 공식의 적용성 검토, 유사량 실측 방법과 하상변동 모형의 보급, 유역의 유사 유출량 추정, 저수지와 취수구 주변 퇴사 조사, 침사지 설계, 만곡부의 하상 변동, 교량세굴 실험, 이동상 하천 모형 실험 등이 대학과 연구소를 중심으로 꾸준히 진행되었다. 그러나 이러한 연구 성과를 자세히 보면 외국에서 개발된 기술의 적용성 검토와 확인 수준에 머물고 있다. 실험실 연구도 용역 성격의 하천모형 실험이 대부분이다. 특히 유사론 기초에 관한 이론적, 실험적 연구는 사실상 전무했다.

위와 같은 국내 하천유사 연구의 현 주소는 열악한 연구 환경이 그 원인일겠지만 동시에 하천유사 분야에서 무엇을 중점적으로 연구하여야 할 것인가에 대한 진지한 검토가 없었다는 점도 일조를 한 것으로 보인다. 대학이나 연구소의 연구는 결국 하천 유사에 관한 사회의 요구를 만족시켜 주어야 할 것이다. 물론 사회적 요구나 수요와 관계없이 순수 탐구만을 위한 연구도 가능하나, 이는 공학적 연구라는 측면에서 바람직하지 못하다. 이 점에서 현재는 물론 다음 세대에 우리 사회가 요구하는 것을 만족시켜주면서 우리 연

4) 우효섭, "환경 수리학에 눈을 돌립시다", 한국수자원학회지, 1999년 7월.

구 여건 상 노력과 투자의 가치가 있는 하천유사 분야
를 다시 제시하면 다음과 같다.

- 하상 변동 (하천의 거시적 1, 2 차원 모형과 미시
적 3차원 모형의 개발 포함)
- 유역의 비점 오염원과 관련된 유사추적 모형 개발

- 하상 근처에서 물(난류)과 사립자의 상호 작용에
관한 기초적 연구
- 소규모 저수지 퇴사 조절책과 제방 유지관리책
등 실용적 연구

지금까지 3회에 걸쳐 필자가 게재한 이 논문은 1999년 1월부터 1년 동안 연구 연가를 위해 미국 콜로라도
주립대학에 있는 동안 작성된 것으로, 이 지면을 통해 연구 연가를 지원해준 한국건설기술연구원과 미 콜로
라도 주립대학의 토목공학과에 감사를 드립니다.

〈참 고 문 헌〉

(3.6 참고문헌)

- Alavian, V., G. H. Jirka, R. A. Denton, M. C. Johnson and H. G. Stephan, "Density Currents Entering Lakes and Reservoirs", *Journal of Hydraulic Engineering(JHE)*, ASCE, Vol. 118, No. 11, Nov., 1992.
- Altinakar, M. S., W. H. Graf and E. J., Hopfinger, "Flow Structure in Turbidity Currents", *Journal of Hydraulic Research(JHR)*, IAHR, Vol. 34, No. 5, 1996.
- Arnold, J. G., J. R. Williams and D. R. Maidment, "Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins", *JHE, ASCE*, Vol. 121, No. 2, Feb., 1995.
- Chang, H. H, L. L. Harrison, W. Lee and S. Tu, "Numerical Modeling for Sediment-Pass-Through Reservoirs", *JHE, ASCE*, Vol. 122, No. 7, Jul., 1996.
- Choi, S. U. and M. H. Garcia, "Modeling of One-Dimensional Turbidity Currents with a Dissipative-Galerkin Finite Element Method", *JHR, IAHR*, Vol. 33, No. 5, 1995.
- Choi, S. U., "Layer-Averaged Modeling of Two-Dimensional Turbidity Currents with a Dissipative-Galerkin Finite Element Method. Part I: Formulation and Application Example", *JHR, IAHR*, Vol. 36, No. 3, 1998.
- Choi, S. U., "Layer-Averaged Modeling of Two-Dimensional Turbidity Currents with a Dissipative-Galerkin Finite Element Method. Part II: Sensitivity Analysis and Experimental Verification", *JHR, IAHR*, Vol. 37, No. 2, 1999.
- Fan, J. and G. L. Morris, "Reservoir Sedimentation. I: Delta and Density Current Deposits", *JHE, ASCE*, Vol. 118, No. 3, Mar., 1992.
- Fan, J. and G. L. Morris, "Reservoir Sedimentation. II: Reservoir Desiltation and Long-Term Storage Capacity", *JHE, ASCE*, Vol. 118, No. 3, Mar., 1992.
- Garcia, M. H., "Hydraulic Jumps in Sediment-Driven Bottom Currents", *JHE, ASCE*, Vol. 119, No. 10, Oct., 1993.
- Guetter, A. K. and S. C. Jain, "Analytical Solution for Density Currents in Settling Basins", *JHE, ASCE*, Vol. 117, No. 3, Mar., 1991.
- Hotchkiss, R. H. and X. Huang, "Hydrosuction Sediment-Removal Systems(HSRS): Principles and Field Test", *JHE, ASCE*, Vol. 121, No. 6, Jun., 1995.
- Hudson, H. R., Discussion of "Hydrologic Approach to Prediction of Sediment Yield", by Mizumura, K., *JHE, ASCE*, Vol. 115, No. 4, Apr., 1989.
- Lai, J. S. and H. W. Shen, "Flushing Sediment through Reservoirs", *JHR, IAHR*, Vol. 34, No. 2, 1996.
- Lee, H. Y. and W. S. Yu, "Experimental Study of Reservoir Turbidity Currents", *JHE, ASCE*, Vol. 123, No. 6, Jun., 1997.
- Lyn, D. A., A. I. Stamou and W. Rodi, "Density Currents and Shear-Induced Flocculation in

Sedimentation Tanks”, JHE, ASCE, Vol. 118, No. 6, Jun., 1992.

Mizumura, K., “Hydrologic Approach to Prediction of Sediment Yield”, JHE, ASCE, Vol. 115, No. 4, Apr., 1989.

Ogden, F. L., CSAS2D Reference Manual, version 1.17, Department of Civil Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT, 1997.

Solo-Gabriele, H. M. and F. E. Perkins, “Streamflow and Suspended Sediment Transport in an Urban Environment”, JHE, ASCE, Vol. 123, No. 9, Sep., 1997.

Ziegler, C. K. and B. S. Nisbet, “Long-Term Simulation of Fine-Grained Sediment Transport in Large Reservoir”, JHE, ASCE, Vol. 121, No. 11, Nov., 1995.

(3.7 참고문헌)

Atkinson, E., “Vortex-Tube Sediment Extractors. I: Trapping Efficiency”, JHE, ASCE, Vol. 120, No. 10, Oct., 1994.

Atkinson, E., “Vortex-Tube Sediment Extractors. II: Design”, JHE, ASCE, Vol. 120, No. 10, Oct., 1994.

Darby, S. E. and C. R. Thorne, “Development and Testing of Riverbank-Stability Analysis”, JHE, ASCE, Vol. 122, No. 8, Aug., 1996.

Hangerty, D. J., “Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations”, JHE, ASCE, Vol. 117, No. 8, Aug., 1991a.

Hangerty, D. J., “Piping/Sapping Erosion. II: Identification-Diagnosis”, JHE, ASCE, Vol. 117, No. 8, Aug., 1991b.

Hasegawa, K., “Universal Bank Erosion Coefficient for Meandering Rivers”, JHE, ASCE, Vol. 115, No. 6, Jun., 1989.

Maynard, S. T., “Toe-Scour Estimation in Stabilized Bendways”, JHE, ASCE, Vol. 122, No. 8, Aug., 1996.

Maynard, S. T., J. F. Ruff and S. R. Abt, “Riprap Design”, JHE, ASCE, Vol. 115, No. 7, Jul., 1989.

Millar, R. G. and M. C. Quick, “Effect of Bank Stability on Geometry of Gravel Rivers”, JHE, ASCE, Vol. 119, No. 12, Dec., 1993.

Nakato, T. and F. L. Ogden, “Sediment Control at Water Intakes along Sand-Bed Rivers”, JHE,

ASCE, Vol. 124, No. 6, Jun., 1998.

Powledge, G. R., D. C. Ralston, P. Miller, Y. H. Chen, P. E. Clopper and D. M. Temple, “Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. I: Research Activities”, JHE, ASCE, Vol. 115, No. 8, Aug., 1989a.

Powledge, G. R., D. C. Ralston, P. Miller, Y. H. Chen, P. E. Clopper and D. M. Temple, “Mechanics of Overflow Erosion on Embankments. II: Hydraulic and Design Considerations”, JHE, ASCE, Vol. 115, No. 8, Aug., 1989b.

Odgaard, J. and Y. Wang, “Sediment Management with Submerged Vanes. I: Theory”, JHE, ASCE, Vol. 117, No. 3, Mar., 1997.

Odgaard, J. and Y. Wang, “Sediment Management with Submerged Vanes. II: Applications”, JHE, ASCE, Vol. 117, No. 3, Mar., 1997.

US Army Corps of Engineers, Office, Chief of Engineers, Hydraulic Design of Flood Control Channels, EM1110-2-1601, US Government Printing Office, Washington, D. C., 1991.

Wang, Y., A. J. Odgaard, B. W. Melville and S. C. Jain, “Sediment Control at Water Intakes”, JHE, ASCE, Vol. 122, No. 6, Jun., 1996.

(3.8 참고문헌)

ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, “River Width Adjustment. I: Processes and Mechanisms”, JHE, ASCE, Vol. 124, No. 9, Sep., 1998a.

ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, “River Width Adjustment. II: Modeling”, JHE, ASCE, Vol. 124, No. 9, Sep., 1998b.

Cao, S. and D. W. Knight, “Design for Hydraulic Geometry of Alluvial Channels”, JHE, ASCE, Vol. 124, No. 5, May, 1998.

Chang, H. H., “Hydraulic Design of Erodible-Bed Channels”, JHE, ASCE, Vol. 116, No. 1, Jan., 1990.

Darby, S. E. and C. R. Thorne, “Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers. I: Model Development”, JHE, ASCE, Vol. 122, No. 4, Apr., 1996a.

- Darby, S. E. and C. R. Thorne, "Numerical Simulation of Widening and Bed Deformation of Straight Sand-Bed Rivers. II: Model Evaluation", JHE, ASCE, Vol. 122, No. 4, Apr., 1996b.
- Diplas, P. and G. Vigilar, "Hydraulic Geometry of Threshold Channels", JHE, ASCE, Vol. 118, No. 4, Apr., 1992.
- Julien, P. Y. and J. Wargadalam, "Alluvial Channel Geometry: Theory and Applications", JHE, ASCE, Vol. 121, No.4, Apr., 1995.
- Millar, R. G. and M. C. Quick, "Stable Width and Depth of Gravel-Bed Rivers with Cohesive Banks", JHE, ASCE, Vol. 124, No. 10, Oct., 1998.
- Nighton, D., Fluvial Forms and Processes, Arnold, London/John Wiley and Sons, Inc., New York, 1998.
- Parker, G., C. Paola, K. X. Whipple and D. Mohrig, "Alluvial Fans Formed by Channelized Fluvial and Sheet Flow. I: Theory", JHE, ASCE, Vol. 124, No. 10, Oct., 1998a.
- Parker, G., C. Paola, K. X. Whipple and D. Mohrig, "Alluvial Fans Formed by Channelized Fluvial and Sheet Flow. II: Application", JHE, ASCE, Vol. 124, No. 10, Oct., 1998b.
- Stevens, M. A. and C. F. Nordin Jr., "First Step away from Lacey's Regime Equations", JHE, ASCE, Vol. 116, No. 11, Nov., 1990.
- Vigilar Jr., G. G. and P. Diplas, "Stable Channels with Mobile Bed: Formulation and Numerical Solution", JHE, ASCE, Vol. 123, No. 3, Mar., 1997.
- Vigilar Jr., G. G. and P. Diplas, "Stable Channels with Mobile Bed: Model Verification and Graphical Solution", JHE, ASCE, Vol. 124, No. 11, Nov., 1998.
- Anhui Debris Flow", JHE, ASCE, Vol. 122, No. 5, May, 1996.
- Huang, X. and M. H. Garcia, "A perturbation Solution for Bingham-Plastic Mudflows", JHE, ASCE, Vol. 123, No. 11, Nov., 1997.
- Julien, P. Y., Erosion and Sedimentation, Cambridge University Press, 1995.
- Julien, P. Y. and Y. Lan, "Rheology of Hyperconcentrations", JHE, ASCE, Vol. 117, No. 3, Mar., 1991.
- Laigle, D. and P. Coussot, "Numerical Modeling of Mudflows", JHE, ASCE, Vol. 123, No. 7, Jul., 1997.
- Mainali, A. and N. Rajaratnam, "Experimental Study of Debris Flows", JHE, ASCE, Vol. 120, No. 1, Jan., 1994.
- O'Brien, J. S., P. Y. Julien and W. T. Fullerton, "Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation", JHE, ASCE, Vol. 119, No. 2, Feb., 1993.
- Rickenmann, D., "Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes", JHE, ASCE, Vol. 117, No. 11, Nov., 1991.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada and Y. Yamashiki, "Routing Debris Flows with Particle Segregation", JHE, ASCE, Vol. 118, No. 11, Nov., 1992.
- Wang, Z., P. Larsen and W. Xiang, "Rheological Properties of Sediment Suspensions and Their Implications", JHR, IAHR, Vol. 32, No. 4, 1994.
- Wang, Z. and P. Larsen, "Turbulent Structure of Water and Clay Suspensions with Bed Load", JHE, ASCE, Vol. 120, No. 5, May, 1994.
- Wang, Z. Y., P. Larsen, F. Nestmann and A. Dittrich, "Resistance and Drag Reduction of Flows of Clay Suspensions", JHE, ASCE, Vol. 124, No. 1, Jan., 1998.
- Winterwerp, J. C., W. T. Bakker, D. R. Mastbergen and H. van Rossum, "Hyperconcentrated Sand-Water Mixture Flows over Erodible Bed", JHE, ASCE, Vol. 118, No. 11, Nov., 1992.

(3.9 참고문헌)

- Aragón, J. A. G., "A Hydraulic Shear Stress Model for Rapid, Highly Concentrated Flow", JHR, IAHR, Vol. 34, No. 5, 1996.
- Bathurst, J. C., A. Burton and T. J. Ward, "Debris Flow Run-Out and Landslide Sediment Delivery Model Tests", JHE, ASCE, Vol. 123, No. 5, May, 1997.
- Han, G. and D. Wang, "Numerical Modeling of