

지난 10년간 하천유사 연구실적과 최근의 연구동향(Ⅱ)

우 호 섭 (한국건설기술연구원 수자원환경부 연구위원/(현) 미 콜로라도 주립대 토목공학과 방문교수)

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 1 편

3.3 유사 이송 관계식

충적하천에서 흐름에 의해 이송되는 유사량을 정확히 결정하는 문제는 유사론의 중심 과제이다. 지금까지 수많은 유사량 공식들이 제안되었지만 아직 충분한 신뢰도를 가지고 하천 유사량을 추정하는 방법은 없다. 과거 10년 동안 또 다른 유사량 공식들이 제안되어 왔다.

본 논문에서는 전통적 방법에 따라 유사량을 소류사량(*bed load*)과 부유사량(*suspended load*)으로 나누어 각각의 추정 방법에 관한 연구를 검토하고, 마지막으로 총유사량 추정에 관한 연구 성과와 동향을 검토한다.

♣ 소류사량 추정

지난 10년간에도 소류사량 추정 방법에 대한 연구는 계속되었다. Wilberg와 Smith(1989)는 사립자의 도약 모형을 이용하여 소류사량 추정 모형을 제안하였다. 그들 모형의 특징은 실측 자료에 의한 경험계수를 정할 필요가 없다는 것이다. 그들은 기존의 소류사량 자료와 비교하여 비교적 양호한 결과를 얻었다. 반면에 McDowell(1989)은 소류력(전단응력), 하상 마찰계수, 사립자의 특성 등을 가지고 경험적인 방법으로 소류사량을 추정하는 방법을 제안하였다. 그의 모형은 부정류에도 적용할 수 있기 때문에 하구나 해안에서 소류사량 추정에 적합하다고 주장하였다. 그밖에 Nalluri와 Kithsiri(1992), Patel과 Raju(1996) 등도 새로운 소류사 공식의 제안을 하였다.

기존 소류사량 산정 공식의 비교 분석은 특정한 흐름 조건에 적합한 공식을 찾는다는 점에서 새로운 공식의 개발만큼 중요한 의미가 있다. Low(1989)는 실험실에서 직경 3.5mm, 밀도 1.0~2.5 정도의 가벼운 재료를 이용하여 유사량을 실측하여 기존 공식과 비교하였다. 그 결과 그렇게 가벼운 재료의 경우 Einstein-Brown 공식과 일부 수정된 Smart 공식 등의 적합함을 보여주었다. 한편, Damgaard 등(1997)

은 경사가 아주 급한 경우의 소류사 이송 실험을 통해 기존 소류사량 공식의 적용성을 검토하였다. 그들은 실험실에서 0.2mm 정도의 세사를 가지고 바닥 경사가 모래의 안식각 32° 정도까지 ±되도록 조정하여 실험 결과를 얻어 기존 소류사량 공식과 비교한 결과 Meyer-Peter-Muller(MPM) 공식의 계수를 조정하면 이러한 고속 흐름에서 소류사량의 추정도 가능함을 보여주었다.

Reid 등(1996)은 사막 지역의 건천에서 실측한 자료(중앙 입경은 6mm 정도)를 이용하여 MPM 공식 등 기존 소류사량 공식을 비교 분석하여 MPM 공식이 가장 우수하고 다음 Parker공식이 비교적 잘 맞음을 보여주었다.

Sekine과 Parker(1992)는 만곡부 등 흐름 방향에 가로질러 경사가 진 하도에서 소류사량의 이송에 대해 실험 연구하였다. 그들은 흐름에 가로지른 방향으로 소류사량과 흐름 방향의 소류력의 비율은 경사가 급할수록 커지나 흐름 방향의 소류력이 커질수록 적어짐을 관찰하였다. 나아가 Parker(1990)는 자갈 하상의 소류사 이송 연구에서 이른바 '이동(mobilization)' 개념을 제안하여 하상 표면 입자 (bed surface particle)의 이송과 표면 밑 저층 입자 (substrate particles)의 이송을 구분하였다. 그는 저 유속의 흐름에서 자갈 하상도 점차 장갑화(armoring)되어 이른바 "이동 장갑(mobile armor)"이 되지만, 흐름이 점차 세지면 장갑화 현상은 점차 줄어들어 이송되는 자갈 분포는 하상 저층의 자갈 분포와 실질적으로 같게 됨을 보였다. 그는 기존 자갈 하상에서 소류사량 공식을 표면 입자의 이송 공식으로 전환하였다.

Hsu와 Holly(1992)도 자갈 하천에서 하상 표면 입자의 특성과 이송 입자의 특성과의 차이에 대한 보정 방법을 제안하였다. Hardwick와 Willetts(1991)는 이러한 초기 소류사 이송 특성(소류사량과 입도)을 실측하기 위해 시간 변화에 따른 소류사량 측정 기기를 제안하였다.

충적하천의 소류사량을 추정하기 위해서는 소류사 이송의 특성을 정확히 파악하여야 한다. '80년대까지

는 흐름이 한계 조건을 넘은 후 소류사 이송이 시작되어 이른바 '소류사 층 (bed layer)' 이라는 얇은 층(아인쉬타인에 의하면 입자크기의 두 배 두께)이 형성되는 것으로 개념화했다. 그러나 흐름이 상당히 세어 사구 등이 쓸려 내려가서 하상이 평탄해지는 경우 소류사의 이송 현상은 소류사 층보다는 이른바 '소류 층 (shear layer)', 또는 '박층류 층(sheet-flow layer)'의 개념이 더 적합한 것으로 인식되고 있다. Nnadi와 Wilson(1992)은 실험실에서 관내 고속 흐름에서 소류사의 이송과 마찰을 연구하여, 하상 마찰은 소류층 내 소류사 이송이 커질수록 급격히 커지는 것을 확인하였다. 여기서 개수로 대신에 관 수로를 채택한 것은 개수로에서는 고속 흐름 모의가 어렵기 때문이다.

최근에 Sumer 등(1996)은 실험을 통해 소류층에서 유속, 농도 분포 등을 관찰하였다. 그들은 소류층의 유속은 지수 법칙(power law)을 따르나, 바깥은 대수 법칙을 따른다고 보고하였다. 농도 분포의 경우 층 내에서는 하상부터 위로 선형적으로 변하고, 바깥에서는 Rouse 분포를 따른다고 보고하였다. 아주 최근에 Pugh와 Wilson(1999)은 이러한 실험을 계속하여 소류층 경계에서의 유속 및 유속 기울기 등을 조사하였다.

충적 하천에서 상류 경계 조건이 변하는 경우 그에 즉시 대응하지 못하는 현상을 '지체 효과(lag effect)'라 한다. 지체 효과란 구체적으로 기존 소류사량 공식들은 평형 상태의 유사량을 산정하지만 실제 흐름은 대부분 평형 상태가 아니기 때문에 생기는 시간적, 공간적 유사 이송의 차이를 말한다. 이러한 지체 효과는 소류사량을 산정하여 하상 변동 등을 모의하는 수학 모형에 고려되어야 할 사항이지만 이에 대해 충분한 지식이 없기 때문에 아직 수학 모형에 잘 고려되지 못하고 있다. Phillips와 Sutherland(1989, 1990)는 시간적, 공간적 지체 효과에 대해 이론적으로 설명하고 이론 모형에 관련된 계수를 실험을 통해 제안하였다. 또한 Jain(1992)은 기존 소류사량 공식과 하상 변동 모형 등에 이용할 수 있는 시간적, 공간적 지체 모형을 제안하였다.

'90년대 소류사량 추정 연구를 요약하면, '40년대

말 제안된 MPM 공식이 비교적 잘 맞는 것이 재확인되었다. 또한 소류사 연구의 중심이 모래 하상에서 자갈 하상으로 옮겨간 것을 볼 수 있다.

♣ 부유사량 추정

하천에서 부유사량 추정은 총유사량 추정 방법의 분류와 비슷하게 1) 사립자의 부유 및 이송에 드는 에너지(소비율) 개념, 2) 확산-대류 개념, 3) 경험적 방법 등 크게 3개로 나눌 수 있다. 지난 10년간 부유사량의 추정 방법에 대한 연구는 새로운 방법의 개발보다는 기존 방법의 보완 쪽에 노력을 더 경주한 것으로 보인다.

확산-대류 개념은 1950년 아인슈타인이 그의 '소류사 함수'에 적용한 이래 가장 많은 관심이 모아진 모형이다. Dyer와 Soulsby(1988)는 그 때까지 확산-대류 모형의 검토를 통해 이 모형에 의한 부유사량 추정에서 유사 확산계수(sediment diffusivity)의 영향은 비교적 적으나 물의 운동량 확산계수(momentum diffusivity)의 영향은 매우 큰 것으로 보고하였다. 그러나 유속의 대수 분포식과 부유사 농도의 Rouse 분포식의 곱을 수심에 대해 적분하기 위해서는 해석적 방법으로는 안되고 원래 아인슈타인이 제안한 도식적 방법이나 Nakado(1984)의 수치 해석 등을 이용하여야 한다. 이 점에 대해 Guo와 Wood(1995)는 Rouse수가 1보다 적은 세사(細砂)의 부유에 대해 해석적인 방법을 이용하여 유속과 농도의 곱의 적분 방법을 제안하였다. 한편 Aziz(1996)는 아인슈타인 방법에서 물과 사립자간의 상대 속도를 고려하지 않고 계산함에 따른 오차는 40%까지 날 수 있음을 보여주었다. 참고로 McLean(1991)은 확산-대류 모형에 의한 부유사 이송에 있어 밀도류, 부유사 입경 분포, 하상 형태 등이 미치는 영향에 대해 해석적으로 검토하였다.

확산-대류 개념을 이용한 새로운 부유사량 추정 모형의 개발에 대해서 Wang(1992)는 Galappatti와 Ureudqehil(1985)가 제안한 확산-대류 모형을 수

심에 대해 적분하여 부유사 이송에 관한 이론적 해석을 시도하였다. 또한 Ouillion과 Guennec(1996)은 평형 상태와 비평형 상태 모두에 대해 수심 방향으로 2차원 부유사 이송에 관한 수학 모형을 제안하였다.

에너지 모형을 이용한 부유사량 추정 방법으로 Celik과 Rodi(1991)는 사립자의 부유에 드는 에너지는 난류 운동 에너지에 비례한다는 전제에서 경험적인 부유사량 추정식(정확히는 부유사 이송 능력)을 제안하였다.

♣ 총 유사량(total sediment discharge)¹⁾

추정

지난 '80년대까지 수많은 총 유사량 추정 방법들이 소개되어 왔다. '90년대 들어서도 몇 개의 새로운 방법들이 소개되었다. 새로운 방법들은 에너지 개념을 이용한 방법과 경험적 방법들이다.

에너지 개념을 이용한 새로운 총 유사량 추정방법으로, Pacheco-Ceballos(1989)는 이른바 'balance power' 개념을 이용하여 해석적 방법으로 총 유사량 추정 방법을 제시하였다. 그는 이 방법은 기존의 Shields 공식이나 DuBoys 공식, 나아가 Yang 공식 등으로 축소되어짐을 보여주었다.

Ingram 등(1991)은 기존의 수정 아인슈타인 방법(Modified Einstein Procedure, MEP)의 단점을 보완하기 위하여 점적분 유사채취기를 이용한 1점 부유사 농도를 가지고 총 유사량을 추정하는 방법을 제안하였다. 점적분 유사채취에 의한 총 유사량 추정 방법의 장점은 수심 적분 유사 채취에 의한 총 유사량 추정 방법에 비해 채취의 용이성, 비용 절감, 자동 측정 가능, 연속 자료 가용 등을 들 수 있다. 참고로 MEP는 하천에서 부유사 채취기로 채취가 가능한 수심까지(통상 하상에서 10cm 정도) 부유사를 채취하고, 이 자료를 토대로 아인슈타인 방법으로 그 하천의 총 유사량을 추정하는 방법이다.

Swamee와 Ojha(1991)는 소류사와 부유사, 나아가 총유사량을 추정하는 새로운 경험식들을 제안하였

1) 'total sediment discharge'는 소류사량과 부유사량을 합한 총량, 혹은 전체 유사량이라는 의미로, 따라서 '전 유사량(全 流砂量)'이라고도 한다(일본에서는 전 유사량이라는 용어를 쓴다).

다. 그는 특히 비균일 유사의 이송을 다루면서 입경 분포의 특성을 나타내는 3변수 경험식도 제안하였다.

사실 비균일 유사의 이송에서 이송되는 유사량 총량도 중요하지만, 특히 하상변동 등을 예측하는 모형에서는 입경별로 유사량을 추정하는 것이 중요하다. 이에 대해 최근에 Karim(1998)는 입경별 유사량 추정 방법을 제안하였다. 그는 1)하상 면적 기준의 재료의 입경 분포와 2) 큰 입자에 가려 작은 입자들이 보호를 받는 'sheltering' 효과 등 두 가지를 고려하여 기존의 Karim과 Kennedy(1981) 방법을 수정 보완하였다. 그는 이 방법이 기존 방법들에 비해 우수함을 주장하였다. 또한 Molinas와 Wu(1998)는 비균일 유사량 추정을 위해 입자 분포의 기하 표준편차를 고려한 '이송 보정 계수(transport compensation factor)' 라는 계수를 제안하였다. 그는 이러한 계수를 이용하면 Engelund & Hansen, Yang, Ackers & Whites 등 기존의 유사량 공식들이 상당히 개선되는 것을 보여주었다.

'90년대에도 그 전과 같이 여전히 유사량 공식들의 비교, 검토가 계속되었다. Nakado(1990)는 캘리포니아 새크라멘토 강 유사량 자료를 가지고 기존의 유사량 공식 11개에 대해 비교 분석하였다. 유상 입경은 고은 모래(fine sand)에서 굵은 자갈(coarse gravel)까지 망라하였다. 그 결과 기존의 유사량 공식들은 실제 유사량을 추정하는데 만족스럽지 못함을 보여주었다. 그는 그래도 Toffaleti 공식과 Yang 공식이 비교적 적합한 것으로 결론지었다. 반면에 Woo and Yu(1994)는 Brownlie의 유사량 자료집에 망라된 자료를 엄선하여 기존의 총 유사량 추정 공식들을 비교한 결과 Engelund & Hansen, Ackers & White, van Rijn 공식들이 비교적 우수함을 보였다. 그들은 공식의 비교에 쓰일 유사량 자료점 선정 시 각 흐름 사상별 유량-유사량 관계도에서 1:1 관계 곡선을 크게 벗어나는 자료점들은 제외하였다. 그 이유는 기존의 유사량 관계식들은 이른바 유사의 공급과 이송이 균형을 이루는 평형 상태를 대상으로 성립된 것으로, 실험실이나 야외에서 실측한 자료 중 이러한 평형 상태에서 벗어난 자료점들은 비교에서 제외시키는 것이

공식간 비교를 공정하게 하는 것이다.

또한 Yang과 Wan(1991)은 기존에 있는 319개의 하천 자료에서 1,119개의 실험실 자료를 이용하여 기존 유사량 공식들을 비교, 검토하였다. 그 결과 실험실 자료에는 Yang, Engeund & Hansen 공식 등이 비교적 잘 맞고, 하천 자료에는 Yang, Toffaleti 공식 등이 비교적 잘 맞는 것으로 보고하였다. 나아가 Yang과 Kong(1991)는 에너지 개념에 의한 유사량 공식들의 각 이론에 대한 비교 분석도 하였다. 최근에 Yang 등(1996)은 중국 황하(Yellow River)의 유사량 이송을 추정하기 위해 Yang공식의 적용을 시도하였다. 그들은 황하의 유사 농도가 매우 높아 물-유사 혼합물의 점성, 밀도, 입자 침강속도 등이 다름을 고려하였다. 이러한 Yang 자신의 노력과 제 3자에 의한 객관적인 결과로 Yang 공식이 비교적 우수함은 점차 인정되고 있다.

한편 Voogt 등(1991)은 실험실에서 최대 유속 2.7m/sec까지 빠른 흐름에서 유사량을 측정하여 기존의 총 유사량 공식들과 비교하였다. 그 결과 이러한 고속 흐름에서는 Engelund & Hansen 공식과 van Rijn 공식 등이 비교적 잘 맞는다고 주장하였다.

반면에 Chang (1994)은 Stone Creek의 하천 형태 변화 자료를 기준으로 기존의 자갈 이송 공식을 비교, 분석하였다. 여기서 그는 한 하천 단면에서 유사량 자료를 이용하여 공식들을 비교한 것이 아니라, 하천 형태 변화를 모의하는 모형의 모의 결과를 가지고 그 모형에 이용된 유사량 공식을 검토한 것이다. 그는 하천 모형으로 자기가 개발한 FLUVIAL-12를 이용하였다. 그 결과 Yang 공식과 Parker 공식이 비교적 적합한 것으로 보고하였다.

'90년대에 행해진 이러한 유사량 공식의 비교 분석 결과는 전체적으로 Yang 공식이 우수한 것으로 보인다. 그러나 '80년대 이전의 비교 분석 결과나 Woo and Yu(1994)의 비교 분석 결과는 Yang 공식보다는 Engelund & Hansen 공식과 van Rijn 공식 등이 상대적으로 더 우수한 것으로 나타났다. 유사량 공식의 중요성을 감안한다면 이러한 상충된 결과에 대해서는 앞으로 철저한 재검토가 필요하다.

3.4 유사량 측정과 수로 실험

야외에서 유사를 채취하여 유사량과 기타 관련 자료를 만들어 내는 것은 두 가지 점에서 중요하다. 우선 실측된 자료 자체가 그 유역의 유사 이송 특성을 나타내는 것으로 하천 관리와 하천 구조물의 설계에 기본적인 자료가 된다. 다음 유사량 실측 자료는 총적 하천의 유사 이송 특성을 연구하는데 기본적인 검증 및 검증 자료가 된다. 그러나 유사량 측정은 흐름 측정에 비해 상당히 어렵고 비용이 많이 든다. 그에 비해 측정 정도는 아직 흐름 측정의 정도를 따라가지 못하고 있다.

다음 실험실에서 유사 이송을 모의하는 것은 물의 흐름만 있는, 이른바 고정성 흐름 모의에 비해 상당히 복잡하고 어렵다. 사람의 크기 특성 때문에 이동상 모형 실험 자체도 고정상 모형 실험에 비해 복잡할 뿐더러 모의 정도도 낮다. 더욱이 후르드 수와 침강 속도/마찰 속도의 비를 동시에 만족시키는 상사는 현실적으로 불가능하기 때문에 이동상 하천 모형 실험은 근본적으로 한계가 있다.

이런 점에서 아직 유사량 측정과 수로 실험은 지속적인 연구개발 대상으로, '90년대에도 이 분야의 연구 논문이 상당수가 발표되었다.

♣ 유사 채취

흐름에 의해 이송되는 유사의 채취(sampling)²⁾는 소류사와 부유사로 나누어 하는 것이 보편적이다. 소류사 채취기는 미국에서 '70년 초 개발되어 계속 개선된 Helly-Smith 채취기가 미국뿐만 아니라 세계적으로 널리 쓰인다. Gaudet 등(1994)은 헬리 스미스 채취기의 채취 방향과 크기가 채취 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

부유사 채취는 통상 수심적분 채취기(depth-integrated sampler)와 점적분 채취기(point-

integrated sampler)로 구분한다. 이러한 부유사 채취기들은 '50년대 미국에서 집중적으로 개발되어 보급되었다. Beverage와 Williams(1989)는 네덜란드 Delft에서 개발된 Bottle 식 부유사 채취기와 미국의 대표적인 점 적분 채취기인 P-61 채취기의 채취 효율을 실험실에서 비교 분석하였다. 그 결과 P-61 채취기가 Delft 채취기보다 정확도가 뛰어나며, 반면에 Delft 채취기는 통상 과소 채취하는 것으로 나타났다.

부유사 채취기와 소류사 채취기를 한 틀에 묶어 한번에 채취하는 기기에 대한 연구도 수행되었다. van Rijn과 Gaweesh(1992)는 나일강의 유사 채취를 위하여 기존의 Helly-Smith 채취기의 단점을 보완하고 부유사도 한번에 채취할 수 있는 새로운 총 유사량 채취기를 개발하였다. 그 채취기는 소류사 채취기의 노즐을 위 아래로 움직이게 만들어 채취 효율을 높였다.

Kuhnle와 Willis(1998)는 소류사 측정의 정도와 적정 측정 회수 등에 대해 Goodwin 하천의 소류사 측정 결과를 통계 분석하여 제시하였다. 그들은 소류사량의 무차원 확률 밀도 함수는 감마 함수의 형태가 적합한 것으로 보고하였다. 그들은 소류사 측정치의 표준 편차는 소류력에 기초한 소류사량의 평균치와 거의 같음을 보였다. 이러한 정보를 가지고 그들은 소류사 측정치의 정확도를 검토할 수 있는 방법을 제시하였다.

♣ 하상토 채취

모래나 실트로 구성된 하상의 경우 하상토 시료 채취는 비교적 간단하고 대표성이 높은 작업이다. 그러나 자갈 하상의 경우 하상 재료가 평면적으로 한쪽으로 치우쳐 분포될 뿐만 아니라 표면과 심층의 입경 분포가 서로 다르기 때문에 대표성 있는 채취가 어렵다. 따라서 이에 대한 연구는 아직도 진행 중이다.

자갈 하상은 표면층(surface layer), 또는 장갑층

2) 여기서 측정(measurement)이라는 용어와 채취(sampling)라는 용어를 구분한다. 전자는 재서 정한다는 의미이고, 후자는 야외에서 대표 시료를 적절한 방법으로 수집한다는 의미로 쓰인다. 현장에서는 대부분 적절한 방법으로 유사 시료만 방법으로 채취하고, 유사 농도라든지 유사량 자체는 실험실에서 분석하여 결정되기 때문에 야외에서는 채취라는 용어가 적합하고, 야외 채취를 포함하여 실험실에서 분석하여 정량화 시키는 전체 과정은 측정이라는 용어가 적합하다.

(pavement or armor layer)과 그 밑의 저층(subsurface layer), 그리고 그 밑의 바닥층(bottom layer)로 나뉜다. 표면층과 저층은 통상 각 층의 가장 큰 입자 크기 정도이다. 이러한 자갈 하상에서 대표성 있는 하상 재료를 채취하기 위해서는 세 층을 망라한 부피 채취 방법이 이상적이다. Diplas와 Fripp(1992)는 표면에서 면적 기준의 채취 결과를 부피 채취로 전환하는 방법을 제시하였다. 그들은 또한 기존의 자갈 하상 채취 방법이 가지는 단점인 "가장 크고, 가장 작은 입자들은 채취에서 제외되는" 문제를 보완하는 채취 방법을 제시하였다(Fripp과 Diplas, 1993). 또한 요구되는 채취 정도에 맞는 채취 크기도 제시하였다.

Fracalolo와 Marion(1995)은 기존의 자갈 하상의 시료 채취 방법인 '격자 틀 방법(grid method)'이 가지는 비 대표성을 보완하기 위해 여러 특성의 자갈 분포에 대해 통계적인 방법으로 부피 채취로의 전환 계수를 제시하였다. 또한 그들은 기존의 왁스 방법에 의한 시료 채취 결과를 부피 채취로 전환시키는 계수도 제시하였다(Marion과 Fracalolo, 1997).

Crowder와 Diplas(1997)는 한 하천 구역 전체를 대표하는 기존의 자갈 하상재료 특성 분석 방법의 근본적인 문제를 제시하였다. 이를 개선하기 위하여 그들은 각 소구역별로 시료를 채취하여 인접 소구역의 시료와 통계적으로 비교 분석하는 방법을 제시하였다.

♣ 수로 실험

실험실에서 유사 이송을 실험하기 위한 수로(flume)는 통상 유사주입 수로(sediment-feeding flume)와 재순환 수로(recirculating flume)가 있다. 그 동안 이러한 두 수로의 유사 이송 특성은 동일한 것으로 사료되었다. 그러나 Parker와 Wilcock(1993)은 균일 유사의 경우 두 수로는 그 특성이 같으나 비균일 유사의 경우 서로 다름을 보여주었다. 비균일 유사 실험에서 유사주입 수로의 경우 주입되는 유사 특성을 사전에 알기 때문에 최종 평형 상태의 조건은 초기 조건에 관계없이 동일하나, 재순환 수로의

경우 주입되는 유사 특성을 조절할 수 없기 때문에 최종 평형 상태의 조건은 초기 조건과 서로 다를 수 있고 완전 유사 이송이 아닌 부분 이송의 가능성도 있음을 보였다.

한편 McNeil 등(1996)은 매우 빠른 흐름에서 유사 깊이에 따른 소류력을 측정할 수 있는 특별한 수로를 고안해냈다. 그들은 'Sedflume'이라고 명명된 이 수로를 이용하여 현장에서 떠온 시료를 놓고 깊이에 따른 소류력의 변화를 측정하였다. 최근에 러시아의 Shvidchenko와 Kopliani(1998)는 야외에서 실측한 소류사 자료와 실험실에서 실측한 자료와 비교하여 소규모 모형 실험에서도 충분한 정도의 소류사 이송을 재현할 수 있음을 보였다.

3.5 하상 변동

충적 하천에서는 흐름에 의해 하상 재료가 세굴, 퇴적되고 그에 따라 하상은 끊임없이 변한다. 흐름에 의한 하상 형태의 변화를 이해하고 예측하는 것은 충적 하천을 다루는 하천 공학적 입장에서 사실상 가장 중요한 과제중 하나이다. 여기서는 1, 2, 3차원 하상 변동의 예측 기법이나 모형 개발에 대해 검토하기 전에 하상 변동과 밀접히 관련되어 있는 하상 장갑화 현상부터 검토한다.

♣ 하상 장갑화

하상 장갑화(bed armoring)란 자갈과 모래가 섞인 하천에서 상류 유사 공급이 차단되는 경우하류 하상 재료 중 모래와 같이 작은 입자들만 세굴 되고 자갈과 같이 큰 입자들은 남아 하상 위를 얇게 덮음으로써 흐름에 의한 세굴로부터 그 밑 재료를 보호하여 더 이상의 하상 세굴이 억제되는 현상이다. 이러한 현상은 충적 하천의 하상변동을 모의하는데 필수적인 고려 사항이다. 여기서는 하상 장갑화 현상에 관한 연구를 먼저 검토하고, 다음에 장갑화 주제와는 조금 거리가 멀지만 자갈 하상의 특성이라는 점에서 공통점이 있는 하상 재료의 마모와 분급 현상에 대한 Parker의 연구를 소개한다.

'90년대 들어와서도 장갑화 현상에 대한 연구는 계

속 진행되었으며, 이 중 미네소타 대학의 Parker 교수의 연구가 가장 돋보인다. Parker와 Sutherland(1990)는 하상 장갑화 현상을 모의하면서 흐름이 점차 세어짐에 따라 처음에는 하상 재료의 이송이 커졌다 다시 줄어들면서 마침내 유사 이송이 없어지는 상태에서 하상 장갑화가 완성되는 것으로 보았다. 그들은 이러한 과정을 그들 자신이 개발한 수치 모형으로 모의하여 계산된 장갑 하상의 구성과 실측치를 비교하였다. 한편 Jain(1990)은 하상 장갑화 현상을 해석하는데 용어 사용의 신중함을 강조하였다. 그에 의하면, 장갑화(armor)와 포장(pavement)은 구분되며, 전자는 움직이지 않는 장갑층을 가리키고 후자는 움직이는 장갑층을 가리킨다.

Chin 등(1994)은 샌 흐름에서 비균일 사립자에 대한 실험을 통해 이른바 한계 장갑층(critical armor layer)과 한계 소류력의 형성에 대해 연구하였다. 한계 장갑층이란 그 이상의 소류력이 작용하게 되면 장갑층의 형성이 깨지면서 모든 입자들이 이송되는 한계 상태의 장갑층을 의미한다. 그들은 한계 장갑층의 구성은 최대 입경을 1.9로 나눈 값이 그 구성 재료의 평균 입경에 해당하며, 이는 기하 표준편차로 보면 1.5에 해당한다고 보고하였다. Berezowsky와 Jimenez(1994)는 혼합 재료가 흐름에 의해 점차 이송되다 유사 이송이 끝나고 하상이 완전히 장갑화 되는 데 걸리는 시간을 추정하는 방법을 제안하였다.

하상 상승과 저하 현상을 모의하는데 있어 하상표면 층(surface layer)과 저층(substrate) 재료의 상호교환을 고려하여야 한다. 세굴에 의한 하상 저하의 경우 저층 재료가 그대로 흐름에 의한 이송 대상이 되는 반면에, 퇴적에 의한 하상 상승의 경우 하상 표면층과 소류사는 모두 하상 저층으로 묻히게 된다. Toro-Escobar 등(1996)은 하상 변동 모형에서 이러한 점을 고려하기 위해 광범위한 실험을 통해 하상 상승 시 밑에 묻혀서 저층 재료가 되는 것은 표면층 재료와 소류사의 무게 평균 정도이지만, 소류사 층으로 약간 기울어져 있다고 보고하였다.

총적 하천에서 하류로 갈수록 하상 재료의 크기 줄어들어 자갈에서 모래로 바뀌는 현상은 잘 알려진 사

실이다. 이러한 현상의 원인으로 하상 재료의 선택적 세굴에 의한 크기별 나뉘짐(分級, sorting) 현상과 하상 재료간의 충돌에 의한 마모(磨耗, abrasion) 현상을 들고 있다. Parker(1991, I 과 II)는 분급과 마모를 모형화하여 하상 재료 크기가 하류로 갈수록 적어지는 현상을 모의하였다. 그는 마모 현상은 움직이는 소류사와 정지되어 있는 하상재료 간의 충돌로 모의하였고, 분급 현상은 숨음(hiding) 효과를 고려한 소류사 이송 식으로 모의하였다. 그의 모형은 실제 하천에 적용되어 비교 검토되었다. 그 결과 화강암 재료 하천에서는 분급 현상이 지배적이며, 석회암 하천에서는 마모와 분급 현상이 대략 같은 정도로 지배적이며, 화강암과 석회암이 섞인 하천에서 마모 현상은 석회암이 완전히 마모되는 지점 넘어서부터는 더 이상 중요하지 않게 됨을 보였다.

재미있는 현상은 이러한 자갈-모래의 변화는 점진적으로 되지 않고 어느 한 지점에서 급속히 진행된다는 것이다. 그 이유는 자연에서는 콩알만한 크기의 자갈(2~9mm)이 없기 때문이다. 최근에 Parker와 Cui는 이러한 자갈-모래 변환 지점이 변하지 않고 안정되어 있는 이유에 대해 해석적인 방법(1998)과 수치 모형의 적용(Cui와 Parker, 1998)을 통해 설명하였다. 그들은 이러한 현상의 주 요인으로 1) 해수면을 기준으로 유역의 침강(subsidence)과 상승(base-level rise)이 퇴적과 완전히 균형을 이루거나, 2) 자갈의 마모 현상을 들었다.

♣ 하상 상승과 저하 모의

장단기 유사 이송에 따라 하상이 침식과 퇴적을 되풀이하면서 하천의 경계면이 변하는 현상은 흐름 자체는 물론 하천 구조물에 직접적인 영향을 주기 때문에 공학적으로 중요하다. 특히 댐 축조 등 하천에 인위적인 변화를 주었을 때 이러한 하천 변화 중에서 현저하게 변하는 것은 하상고의 변화, 즉 하상 상승(aggradation)과 저하(degradation) 현상이다. 하천의 흐름과 유사량의 변화에 따른 하상 상승과 저하 문제는 '70년대부터 야외 관찰과 실험을 통해 상당한 연구가 진행되었으며, 특히 '80년대 이후 수학 모형을

이용한 하상 상승과 지하 모의가 활발히 진행되었다. 하상 변화의 수학 모형은 결국 1) 흐름의 연속식, 2) 흐름의 운동량 방정식, 3) 유사의 연속식을 연립하여 푸는 것으로, 여기에 추가로 하상 마찰과 유사 이송에 관한 정보가 필요하다. 하상변동 모형은 위 세 개의 방정식을 한 시간 단계에서 한 번에 푸는 연계 방법(coupled method)과 흐름 방정식을 먼저 풀고 그 결과를 이용하여 유사 이송을 구하고 다음 이 결과를 처음 결과와 비교하여 필요하면 반복적으로 계산하는 비 연계 방법(uncoupled method)으로 나뉜다. 여기에 수치 모형의 알고리즘으로는 유한차분법이나 유한요소법 등이 이용된다.

비 연계 방법은 다시 부정류 상태에서 흐름 방정식과 유사의 연속식을 푸는 방법과 어느 시간 단계에서 유량은 일정하다고 보고 푸는 방법 등으로 나뉜다. 후자는 특히 유량이 비교적 일정한 경우 적용되며, HEC-6은 대표적인 후자 방법이다. 그러나 Lyn (1987)은 섭동 방법(perturbation method)을 이용하여 비연계 방법은 특히 일반 경계 조건과 임의의 초기 조건을 만족시키지 못한다는 것을 보였다. 그는 경계 조건이 크게 변하는 흐름에서는 이러한 방법의 적용은 한계가 있음을 강조하였다.

'90년대 들어와서도 하상변동 모형의 개발은 계속되었다. Jain과 Park(1989)는 그들이 개발한 수치 모형의 결과(Park과 Jain, 1987)를 회귀 분석하여 하상 저하에 대한 해석적인 해를 제시하였다. 그들의 수치 모형은 미조리 강의 자료를 이용하여 경험적인 방법으로 구한 마찰식, 유사이송식 등을 이용한 비연계 모형이다.

McMurray와 Jaeggi(1990)는 준 정상류 비연계 모형을 이용하여 모래와 실트가 혼합된 한 스위스 하천 구간의 하상 변동을 검토하였다. 그들은 기존의 유사량 공식을 이용한 모형은 이 하천의 하상 저하 현상을 모의하는데 실패하였으나, 하상 재료의 40%를 차지하는 실트를 단순한 세류사(細流砂, wash load)로 보고 모의하면 모의 결과가 실측치에 근접하는 것

로 보고하였다.

Niekerk 등(1992)은 기존의 비 연계 모형을 개선하는 방향으로 1) 하상 전단 응력의 난류 특성의 고려, 2) 보정의 최소화, 3) 밀도가 서로 다른 입자의 이송 등을 제안하였다. 그들은 소류사 이송 모의에 Bagnold 공식을 수정하여 사용하였으며, 부유사 모의를 위해 확산-혼합 모형과 Rouse 공식 등을 이용하였다. 그들은 이 모형의 적용성을 야외 실측자료를 가지고 확인하면서, 모의 결과의 정확성을 보여주었다(Vogel 등, 1992).

Cui 등(1996)은 자갈 하천에서 하류로 갈수록 사립자의 크기가 줄어드는 현상과 하상 상승을 모의하는 비연계 모형을 개발하였다. 그들은 비연계 모형의 단점으로 알려진 한계류 근처에서 해의 불안정 문제를 확인하기 위해 같은 모형을 연계 모형으로 바꾸어 그 결과를 비교하였다. 그 결과 Lyn 등에 의해 알려진 것과 달리 비연계 모형은 연계 모형과 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 참고로 대부분의 이동상 하천에서는 하상 파(河床波)³⁾의 전파 속도(수 m/day)는 수파의 전파 속도(수 m/s)에 비해 매우 작으므로 하상파의 전파에 관심을 두는 경우 흐름은 준 정상류로 간주한다. 그러나 Morris와 Williams(1996)는 유사의 농도가 매우 큰 경우 이러한 가정은 성립되지 않는다는 것을 보여주었다.

HEC-6은 미공병단 수문연구소(HEC)에서 개발한 1차원, 준 정상류, 비 연계, 하상 변동 모형으로 미국에서 널리 쓰여지고 있다. Havis 등(1996)은 HEC-6 모형을 이용하여 야외 실측 자료를 가지고 자갈 하천의 하상 변동 모의를 검토하였다. 그 결과 HEC-6 모형에 의한 유사량은 저수에서는 과대평가하고 고수에서는 과소평가 하는 것으로 나타났다. 반면에 장기간에 걸쳐 자갈 사이의 모래가 씻겨 내려가는 양은 비교적 정확히 모의하는 것으로 나타났다.

점착성 유사가 있는 하천에서 침식과 퇴적에 대한 모형 개발은 점착성 유사의 침식과 퇴적 계수를 필요로 한다. Ziegler와 Nisbet(1994)는 Pawtuxet 강의

3) 여기서 하상파는 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).

세립 유사의 이송을 모의하기 위해 기존의 비점착성 유사 이송 모형에 점착성 유사의 퇴적과 침식, 응집(flocculation)을 고려한 SEDZL 모형을 개발하였다.

'80년대 말 '90년대 초의 하상 변동 모형 개발 중에서 가장 눈에 띄는 것은 아마도 미국 아이오아 대학과 프랑스 그레노블 수리 연구소의 공동 연구로 개발된 연계 모형일 것이다. Holly와 Rahuel(1990), Rahuel 등(1989)은 흐름 방정식(St. Venant 방정식)과 유사의 연속식을 Preismann의 4점 음해법을 이용하여 동시에 해를 구하는 연계 방법을 채택하였다. 이 모형에는 그밖에 하상 재료의 분급과 장갑화와 'loading law'를 이용한 소류사 이송의 공간적 지체 효과 등을 고려하였다.

Bhallamudi와 Chaudhry(1991)는 거의 같은 시기에 MacCormack 양해법을 이용하여 연계 방법으로 하상 변동 모형을 개발하였다. 그들은 다양한 경우에 대해 모형을 적용하여 시험하였다. 또한 Correia 등(1992)은 기존의 연계 모형은 여전히 물의 연속식에서 유사의 연속성은 고려되지 않았으므로 진정한 의미의 연계 모형으로 보기 어렵다는 점을 강조하며, 물과 유사 혼합물의 연속성과 유량에 따른 하상 마찰의 변화를 고려한 연계 모형(FCM)을 제시하였다.

특성법을 이용한 하상 변동 모의는 차분법에 비해 광범위하게 진행되지 못했다. 그러나 쌍곡선 편미분 방정식으로 표시되는 흐름 방정식의 특성상 특성법의 장점을 감안하여 Yeh 등(1995)은 특성법과 연계 방법에 의한 하상 변동 모형을 개발하였다. 그들은 시험 적용 결과를 통하여 기존의 차분법과 달리 이 방법은 흐름과 유사 유입의 변화가 흐름, 하상고, 하상 재료의 형성에 미치는 영향에 대한 정보를 줄 수 있음을 보여주었다. 또한 Ghumman 등(1996)은 하상 변동 모형의 보정 방법으로서 특별한 최적화 방법을 소개하였다.

하천 흐름과 유사 이송을 모의하는 데 있어 관심 있는 구역의 크기는 모형 선정에 중요하다. Menendez(1997)는 하천 형태 모형을 기본적으로 1) 수력학(hydrodynamic) 모형, 2) 유사 이송 모형, 3) 하상 변동 모형 등으로 나누어 각 모형의 적절한 크기를 제

시하였다. 수력학적 적응 길이는 수력 조건이 섭동 이후 다시 안정된 상태로 돌아오는 거리를 말하며, 수심의 20~40배 정도로 제시하였다. 유사적 적응 길이는 부유사 이송이 섭동 이후 다시 평형상태로 돌아오는 거리를 말하며, 보통 수심의 수백배 정도이다. 마지막으로 하상 변동 거리는 퇴적과 침식에 의해 일어나며 통상 매우 긴 거리에 걸쳐 일어난다. 따라서 이러한 하상 변동이 관심인 경우 수력학 모형은 시간에 대해 일정한 정상 상태를 가정할 수 있다. Menendez는 연구 대상 규모(L_s)가 수력학 길이(L_h)와 유사적응 길이(L_s)보다 큰 경우 대 규모 모형 시스템으로, 그 중간에 있는 경우 중규모 모형 시스템으로, 그들보다 적은 경우 소규모 모형 시스템으로 구분하였다. 한편 Stansby와 Awang(1998)은 부정류 유사이송을 모의하는 수치 모형에서 이른바 반응 시간(response time)에 대한 해석을 하였다. 흐름의 변화에 의한 유사 이송의 변화 시간을 반응 시간이라 하며, 이러한 해석은 특히 부정류 유사이송 수치모형에서 최소 시간 간격의 설정 등에 필요하다.

하상 변동 현상에 대한 해석적 접근에는 한계가 있기 때문에 그러한 연구는 많이 보이지 않는다. 다만 Lenau와 Hjelmfelt(1992)는 하상 저하에 대한 확산 모형과 쌍곡선 모형을 라플라스 변환하여 이에 대한 해를 해석적인 방법으로 구했다. 그들은 이러한 해석 결과를 미조리강 지류의 하상 저하(head-cutting) 현상에 대해 적용하여 비교하였다. 또한 Scarlatos와 Li(1997)는 수로에서 미립토사의 이송에 의한 하상 변동을 모의하는 해석적 방법을 제시했다. 그들은 유사 이송은 확산-대류 방정식으로, 하상 변동은 유원(source)과 흡입(sink) 항으로 모의하였다. 그들은 편미분 수학 모형을 유한 적분 변환 방법을 이용하여 Sturm-Liouville 상미분 방정식으로 전환시켜 다양한 경계 조건과 초기 조건에 대해 해를 구하였다.

최근에 Zhou와 Lin(1998)은 기존의 1차원 하상 변동 모형이 가지는 1) 조정 계수 문제와 2) 종단 방향으로 하상 변동량의 임의적 배분 등 단점을 보완한 모형을 개발하였다. 그들은 임의의 미소 단면 폭에 대해 수심 방향으로 유사 이송식을 표시하여 조정 계수

를 구하고, 이를 기준으로 단면 전체에 대한 조정 계수와 하상 변동량을 배분하였다.

단일 입경의 하상 재료에 의한 하상 변동에 대한 실험적 연구는 과거에 많이 수행되었다. 그러나 혼합 입경의 영향에 대한 체계적인 실험은 그리 많지 않았다. Yen 등(1992)은 유사 입자의 입경 분포와 유사 유입 조건의 변화에 따른 하류 하상 변동을 실험적으로 관찰하였다. 그 결과 하상 상승과 저하 현상의 반복은 기본적으로 가역 현상이 아니라는 점을 강조하였다. 그들은 유사 입경 분포가 클수록 하상 상승과 저하가 빨리 진행되나, 하상고와 경사의 회복율은 느려진다는 점을 확인하였다.

마지막으로 두부 침식(head-cut) 현상에 대한 실험적, 해석적 연구가 Stein과 Julien(1993)에 의해 소개되었다. 그들은 두부 침식 현상을 1) 상류로 진행되면서 점차 평평해지는 회전 두부 침식과 2) 연직면을 그대로 유지하는 계단 두부 침식으로 나누었다.

♣ 만곡부의 흐름과 유사 이송 특성 - 2, 3차원 하천 모형

하천 만곡부의 흐름과 유사 이송은 그 기하 특성상 1차원 흐름 해석으로는 불가능하다. 하천 만곡부는 하천의 평면 변화의 시발점이라는 점에서 공학적으로 의미 있다. 따라서 만곡부의 흐름과 유사 이송 특성을 규명하기 위해 실험적, 해석적, 수치적으로 많은 연구가 진행되었다. 이러한 연구는 특히 2, 3차원 하천 수치 모형 개발의 주요 동기가 되어 왔다.

Yen과 Lee(1995)는 만곡부에서 부정류에 의한 비균일 하상 재료의 하상 형태 변화와 재료의 분급 현상을 실험을 통해 연구하였다. 그들의 실험 결과 만곡부의 하상 형태 변화와 분급은 상류에서 유입 수문 곡선의 유량 변화율에 민감하게 작용하는 것을 발견하였다. 구체적으로 유량 증가율이 큰 경우 만곡부 안쪽의 퇴적과 바깥쪽의 침식률이 커지고, 동시에 안쪽에 퇴적된 입자의 크기는 점차 적어지고 바깥쪽에 퇴적된 입자의 크기는 굵어지는 것을 관찰했다. Odgaard(1989, I 과 II)는 2차원, 정상류, 이동상, 모형을 해석적으로 개발하여 만곡부에서의 흐름과 만곡의 평면

변화를 모의하였다. 그의 모형은 곡률 반경은 변수로 고려하여, 1) 만곡부에서 유속 및 수심 분포, 2) 하천 이동 속도와 방향 등을 예측한다. 이 모형은 파키스탄, 미국, 인디아 등지의 실측 자료와 비교되었다.

Yeh와 Kennedy(1993)는 만곡부에서 흐름 특성으로 1) 횡단 방향으로 유사 이송, 2) 접어진(wrapped) 하상 형태, 3) 주 흐름의 휜(skewed distribution), 4) 2차류의 형성 등을 그 대표적인 특징으로 꼽았다. 그들은 만곡부에서 흐름 특성을 이른바 'Moment Model' 을 이용하여 해석적으로 모의하였다. 그들은 모형을 확대하여 유사 이송이 있는 흐름에 적용하였다. 그들은 만곡부에서 하상 변동의 요인으로 1) 횡단 방향의 흐름에 의한 전단응력, 2) 횡단 방향의 단위 폭당 유량 분포 등을 꼽았다. 그들은 하상에서 종횡단 방향의 유사 이송식과 2차원 유사 연속식을 연립하여 수치적으로 풀어 두 방향으로의 유속과 수심, 하상고 등 해를 구하였다.

'80년대부터 1차원 하천 수치 모형의 단점을 극복하기 위한 노력으로 2차원 하천 모형의 개발이 가속화되었다. 대표적인 2차원 하천 수치 모형으로 TABS2(Thomas와 Mcanally Jr., 1985), GSTARS(Molinas와 Yang, 1986), MOBED2(Spasojevic와 Holly Jr., 1988) 등을 들 수 있다. 이 중 GSTARS는 유관(流管, stream tube) 개념을 도입한 준2차원 모형으로, 1차원 모형을 확대한 것이다. 최근에 Lee 등(1997)은 GSTARS모형을 개선하여 부정류 모의, 소류사와 부유사의 분리 모의에 의한 비균형 유사 이송시 부유사의 퇴적 양상 모의 등을 꾀하였다.

2차원 하천 수치 모형이 대표적으로 적용되는 곳은 만곡부에서의 흐름과 하상 변동이다. Yen과 Ho(1990)는 양쪽 제방이 고정된 하천 흐름에서 종횡단 방향으로 하상 변동을 모의하였다. 이모형은 정상류에서 균일 하상 재료의 이송을 모의한다. 그들은 이 모형의 수치 실험 결과를 회귀 분석하여 쉽게 쓸 수 있도록 제시하였다.

폭이 넓은 하구에서 하상변동을 알기 위해서는 1차원 모형으로는 한계가 있고 2차원 모형이 요구된다. Lee 등(1994)은 Erie 호로 유입하는 하천에서 유사

이송과 하구부에서의 퇴적 현상을 모의하기 위해 점토, 실트, 세사의 유원과 흡입 항을 고려한 2차원 유사 이송 모형을 개발하였다.

3차원 이동상 하천 모형은 흔하지 않다. Shimizu 등(1990)은 Shimizu와 Itakura(1989)의 2차원 모형을 확대하여 3차원 이동상 하천 모형을 개발하였다. 3차원 모형은 부유사에 의한 하상 형태의 변동 모의에서 2차원 모형과 큰 차이가 있음을 보고하였다. 최근에 콜로라도 대학 연구팀은 기존의 유체 해석용 3차원 수치 모형인 'Fluent' 에다 유사량 이송 모형을 붙여서 하천의 만곡부, 수제 주위의 흐름 및 유사 이송 등을 모의하는 모형 CH3D-SED를 개발하였다(199?). 이 모형은 미시시피 강의 하천 준설 및 주운 사업에 적용되었다. 그밖에 미공병단 수로실험소(WES)와 미시시피 대학의 계산 수과학공학 센터(CCHE)에서도 연방 정부 지원으로 각각 3차원 하천 모형을 개발하여 검증 단계에 있다.

♣ 사주의 변화

Garcia와 Nino(1993)는 직선 및 만곡 하천에서

사주의 이동에 대한 이론적, 실험적 연구를 수행하였다. 그들은 사주의 형성, 기하 형태, 이동 등에 대한 이론적 연구 결과를 실험을 통해 검증하였다. 특히 만곡부에서 사주의 이동을 억제하는 조건에 대해서도 검토하였다.

1963년 콜로라도 강 글렌캐년 댐의 준공 하류에 있는 그랜드캐년 사주의 침식 및 소멸 문제는 '80년대 들어와 심각한 생태 환경 문제로 등장하였다(우효섭과 박성제, 1999). Budhu와 Gobin(1994)은 그랜드캐년 사주의 세굴 문제를 실험과 현장 관측을 통해 연구하였다. 그들의 연구 결과 물가 사주의 경사는 수위의 변화에 따른 침투(seepage)에 의한 포락 현상에 직접적인 영향을 주는 것으로 나타났다.

Lee 등(1993)은 하천에서 골재 채취로 인해 형성되는 웅덩이의 이동에 대한 실험을 수행하였다. 그 결과 사각형 균일 유사의 웅덩이의 이동 속도는 유사 이송 능력에 비례하고 웅덩이 깊이에 반비례하는 것으로 나타났다. ●

〈참 고 문 헌〉

- Aziz, N. M., "Error Estimate in Einstein's Suspended Load Method", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 5, May, 1996.
- Berezowsky, M. and A. A. Jim nez, "A Simplified Method to Simulate the Time Evolution of the River Bed Armoring Process", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 32, No. 4, 1994.
- Beverage, J. P. and D. T. Williams, "Comparison: US P-61 and Delft Sediment Samplers", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 12, Dec., 1989.
- Bhallaudi, S. M. and M. H. Chaudhry, "Numerical Modeling of Aggradation and Degradations in Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 9, Sep., 1991.
- Budhu, M. and R. Gobin, "Instability of Sandbars in Grand Canyon", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 8, Aug., 1994.
- Celik, I. and W. Rodi, "Suspended Sediment-Transport Capacity for Open Channel Flow", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 2, Feb., 1991.
- Chang, H. H., "Selection of gravel-Transport Formula for Stream Modeling", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 5, May, 1994.
- Chin, C. O., B. W. Melville and A. J. Raudkivi, "Streambed Armoring", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 8, Aug., 1994.
- Correia, L. R. P., B. G. Krishnappan and W. H. Graf, "Fully Coupled Unsteady Mobile Boundary Flow Model", *Journal of Hydraulic Engineering*.

- ASCE, Vol. 118, No. 3, Mar., 1992.
- Crowder, D. W. and P. Diplas, "Sampling Heterogeneous Deposits in Gravel-Bed Streams", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 12, Dec., 1997.
- Cui, Y. G. Parker and C. Paola, "Numerical Simulation of Aggradation and Downstream Finding", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 2, 1996.
- Cui, Y. and G. Parker, "The Arrested Gravel Front: Stable Gravel-Sand Transitions in Rivers. Part 2: General Numerical Solution", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 2, 1998.
- Damgaard, J. S., R. J. S. Whitehouse and R. L. Soulsby, "Bed-Load Sediment Transport on Steep Longitudinal Slopes", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 12, Dec., 1997.
- Diplas, P. and J. B. Fripp, "Properties of Various Sediment Sampling Procedures", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 7, Jul., 1992.
- Fraccarollo, L. and A. Marion, "Statistical Approach to Bed-Material Surface Sampling", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 7, Jul., 1995.
- Fripp, J. B. and P. Diplas, "Surface Sampling in Gravel Streams", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 4, Apr., 1993.
- Garcia, M. and Y. Ni o, "Dynamics of Sediment Bars in Straight and Meandering Channels: Experiments on the Resonance Phenomenon", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 31, No. 6, 1993.
- Gaudet, J. M., A. G. Roy and J. I. Best, "Effect of Orientation and Size of Helley-Smith Sampler on its Efficiency", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, Jun., 1994.
- Ghumman, A. R., P. R. Wormleaton, H. N. Hashmi and G. H. Akbari, "Parameter Identification for Sediment Routing in Rivers", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 3, 1996.
- Guo, J. and W. L. Wood, "Fine Suspended Sediment Transport Rates", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 12, Dec., 1995.
- Hardwick, R. I. and B. B. Willetts, "Changes with Time of the Transport Rate of Sediment Mixtures", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 29, No. 1, 1991.
- Havis, R. N., C. V. Alonso and J. G. King, "Modeling Sediment in Gravel-Bedded Streams using HEC-6", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, Oct., 1996.
- Holly Jr., F. M. and J. L. Rahuel, "New Numerical/Physical Framework for Mobile-Bed Modeling. Part 1: Numerical and Physical Principles", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 4, 1990.
- Hsu, S. M. and F. M. Holly, Jr., "Conceptual Bed-Load Transport Model and Verification for Sediment Mixtures", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 8, Aug., 1992.
- Ingram, J. J., S. R. Abt and E. V. Richardson, "Sediment Discharge Computation using Point-Sampled Suspended Sediment Data", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 6, Jun., 1991.
- Jain, S. C., "Armor or Pavement", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 3, Mar., 1990.
- Jain, S. C., "Note on Lag in Bedload Discharge", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, Jun., 1992.
- Jain, S. C. and I. Park, "Guide for Estimating Riverbed Degradation", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, Mar., 1989.
- Karim, F., "Bed Material Discharge Prediction for Nonuniform Bed Sediments", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 6, Jun., 1998.
- Kuhnle, R. A. and J. C. Willis, "Statistics of Sediment Transport in Goodwin Creek", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 11, Nov., 1998.
- Lee, D. H., K. W. Bedford and C. C. J. Yen, "Storm and Entrainment Effects on Tributary Sediment

- Loads", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 1, Jan., 1994.
- Lee, H. Y., H. M. Hsieh, J. C. Yang and C. T. Yang, "Quasi-Two-Dimensional Simulation of Scour and Deposition in Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 7, Jul., 1997.
- Lee, H. Y., D. T. Fu and M. H. Song, "Migration of Rectangular Mining Pit Composed of Uniform Sediments", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 119, No. 1, Jan., 1993.
- Lenau, C. W. and A. T. Hjelmfelt, Jr, "River Bed Degradation due to Abrupt Outfall Lowering", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 6, Jun., 1992.
- Low, H. S., "Effect of Sediment Density on Bed-Load Transport", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 1, Jan., 1989.
- MacMurray, H. L. and M. N. R. Jaeggi, "Modeling Erosion of Sand and Silt Bed River", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 9, Sep., 1990.
- Marion, A. and L. Fraccarollo, "New Conversion Model for Areal Sampling of Fluvial Sediments", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 12, Dec., 1997.
- McDowell, D. M., "A General Formula for Estimation of the Rate of Transport of Non-Cohesive Bed-Load", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 27, No. 3, 1989.
- McLean, S. R., "Depth-Integrated Suspended-Load Calculations", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 11, Nov., 1991.
- McNeil, J., C. Taylor and W. Lick, "Measurements of Erosion of Undisturbed Bottom Sediments with Depth", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 6, Jun., 1996.
- Menendez, A. N., "Sedimentologic Modeling Selection on Study Scale", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 10, Oct., 1997.
- Molinas, A. and B. Wu, "Effect of Size Gradation on Transport of Sediment Mixtures", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 8, Aug., 1998.
- Morris, P. H. and D. J. Williams, "Relative Celerities of Mobile Bed Flows with Finite Solids Concentrations", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 6, Jun., 1996.
- Nakato, T., "Tests of Selected Sediment-Transport Formulas", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 3, Mar., 1990.
- Nalluri, C. and M. M. A. U. Kithsiri, "Extended Data on Sediment Transport in Rigid Bed Rectangular Channels", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 30, No. 6, 1992.
- Niekert van, A., Vogel, K. R., R. L. Slingerland and J. S. Bridge, "Routing of Heterogeneous Sediments over Movable Bed: Model Development", Vol. 118, No. 2, Feb., 1992.
- Nnadi, F. N. and K. C. Wilson, "Motion of Contact-Load Particles at High Shear Stress", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 12, Dec., 1992.
- Odgaard, A. J., "River-Meander Model. I: Development", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 11, Nov., 1989.
- Odgaard, A. J., "River-Meander Model. II: Applications", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 11, Nov., 1989.
- Ouillon, S. and B. le Guennec, "Modeling Non-Cohesive Suspended Sediment Transport in 2D Vertical Free Surface Flows", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 34, No. 2, 1996.
- Pacheco-Ceballos, R., "Transport of Sediments: Analytical Solution", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 27, No. 4, 1989.
- Parker, G., "Surface-Based Bedload Transport Relation for Gravel Rivers", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 28, No. 4, 1990.
- Parker, G., "Selective Sorting and Abrasion of River Gravel. I : Theory", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 2, Feb., 1991.
- Parker, G., "Selective and Abrasion of River Gravel. II : Applications", *Journal of Hydraulic*

- Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 2, Feb., 1991.
- Parker, G. and P. R. Wilcock, "Sediment Feed and Recirculating Flumes: Fundamental Difference", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 11, Nov., 1993.
- Parker, G. and A. J. Sutherland, "Fluvial Armor", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 5, 1990.
- Parker, G. and Y. Cui, "The Arrested Gravel Front: Stable Gravel-Sand Transitions in Rivers. Part 1: Simplified Analytical Solution", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 1, 1998.
- Patel, P. and K. G. R. Raju, "Fractionwise Calculation of Bed Load Transport", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 3, 1996.
- Phillips, B. C. and A. J. Sutherland, "Spatial Lag Effects in Bed Load Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 27, No. 1, 1989.
- Phillips, B. C. and A. J. Sutherland, "Temporal Lag Effect in Bed Load Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 28, No. 1, 1990.
- Rahuel, J. L., F. M. Holly, J. P. Chollet, P. J. Belleudy and G. Yang, "Modeling of Riverbed Evolution for Bedload Sediment Mixtures", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 11, Nov., 1989.
- Reid, I., D. M. Powell and J. B. Laronne, "Prediction of Bed-Load Transport by Desert Flash Floods", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 3, Mar. 1996.
- Rijn, L. C. van and M. T. K. Gaweesh, "New Total Sediment Load Sampler", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 12, Dec., 1992.
- Scarlatos, P. D. and L. Li, "Analysis of Fine-Grained Sediment Movement in Small Canals", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 3, Mar., 1997.
- Sekine, M. and G. Parker, "Bed-Load Transport on Transverse Slope. I", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 4, Apr., 1992.
- Shimizu, Y. and T. Itakura, "Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, Sep., 1989.
- Shimizu, Y., H. Yamaguchi and T. Itagura, "Three-Dimensional Computation of Flow and Bed Deformation", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 9, Sep., 1990.
- Shvidchenko, A. B. and Z. D. Kopalani, "Hydraulic Modeling of Bed Load Transport in Gravel-Bed Laba River", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 8., Aug., 1998
- Stansby P. K. and M. A. O. Awang, "Response Time Analysis for Suspended Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 3, 1998.
- Stein, O. R. and P. Y. Julien, "Criterion Delineating the Mode of Headcut Migration", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 1, Jan., 1993.
- Sumer, B. M., A. Kozakiewicz, J. Fredsø and R. Deigaard, "Velocity and Concentration Profiles in Sheet-Flow Layer of Movable Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 10, Oct., 1996.
- Swamee, P. K. and C. S. P. Ojha, "Bed-Load and Suspended-Load Transport of Nonuniform Sediments", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 6, June., 1991.
- Toro-Escobar, C. M., G. Parker and C. Paola, "Transfer Function for the Deposition of Poorly Sorted Gravel in Response to Streambed Aggradation", *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 34, No. 1, 1996.
- Vooigt, L., L. C. van Rijn and J. H. van den Berg, "Sediment Transport of Fine Sands at High Velocities", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 7, July, 1991.
- Vogel, K. R., A. van Niekert, R. L. Slingerland and J. S. Bridge, "Routing of Heterogeneous Sediments over Movable Bed: Model Verification", Vol. 118, No. 2, Feb., 1992.

- Wang, Z. B., "Theoretical Analysis on Depth-Integrated Modeling of Suspended Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 30, No. 3, 1992.
- Wilberg, P. L. and J. D. Smith, "Model for Calculating Bed Load Transport of Sediment", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 115, No. 1, Jan., 1989.
- Woo, H. and K. Yu, "A Comparative Assessment of Some Selected Sediment Transport Formulas", *Proceedings of the 9th IAHR-APD, Singapore*, August, 1994.
- Yang, C. T., A. Molinas and B. Wu, "Sediment Transport in the Yellow River", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 122, No. 5, May, 1996.
- Yang, C. T. and S. Wan, "Comparisons of Selected Bed-Material Load Formulas", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 8, Aug., 1991.
- Yang, C. T. and X. Kong, "Energy Dissipate Rate and Sediment Transport", *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, Vol. 29, No. 4, 1991.
- Yeh, K. C. and J. F. Kennedy, "Moment Model of Nonuniform Channel-Bend Flow. II: Erodible Beds", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 119, No.7, Jul., 1993.
- Yeh, K. C., S. J. Li and W. L. Chen, "Modeling Non-Uniform-Sediment Fluvial Process by Characteristics Method", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 2, Feb., 1995.
- Yen, C. H. and S. Y. Ho, "Bed Evolution in Channel Bends", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 116, No. 4, Apr., 1990.
- Yen, C. L., S. Y. Chang and H. Y. Lee, "Aggradation-Degradation Process in Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 118, No. 12, Dec., 1992.
- Yen, C. L. and K. T. Lee, "Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 121, No. 8, Aug., 1995.
- Zhou, J. and B. Lin, "One-Dimensional Mathematical Model for Suspended Sediment by Lateral Integration", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 7, Jul., 1998.
- Ziegler, C. K. and B. Nisbet, "Fine-Grained Sediment Transport in Pawtuxet River, Rhode Island", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 5, May, 1994.

(기타 참고 문헌)

- Dyer, K. R. and Soulsby, R. L., "Sand Transport on the Continental Shelf", *Annual Review of Fluid Mechnaics*, vol. 20, 1988.
- Galappatti, R. and Ureuqdehil, C. B., "Depth-Integrated Mode for Suspended Sediment Transport", *J. of Hydraulic Research*, vol.23, no. 4, 1985.
- Karim, F. and Kennedy, J. F., *Computer-Based Predictors for Sediment Discharge and Friction Factors of Alluvial Streams*, Report no. 242, Iowa Institute of Hydraulic Research, Univ. of Iowa, Iowa, 1981.
- Lyn, D. A., "Unsteady Sediment Transport Modeling", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 1, Jan., 1987.
- Molinas, A. and Yang, C. T., *Computer Program User's Manual for GSTARS*, US Dept. of Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center, Denver, Colorado, 1986
- Nakado, T., "Numerical Integration of Einstein's Integrals", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 110, no. 12, 1984.
- Park, I. and Jain, S. C., "Numerical Simulation of Degradation of Alluvial Channels", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 113, No. 7, July, 1987.
- Pugh, F. J. and Wilson, K. C., "Velocity and Concentration Distributions in Sheet Flow above Plane Beds", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 125, No. 2, Feb., 1999.
- Spasojevic, M. and Holly, F. M., *Numerical Simulation of Two-Dimensional Deposition and*

Erosion Patterns in Alluvial Water Bodies", IIHR
Report no. 149, Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa,
1988.

Thomas, W. A. and Mcanally Jr., W. H., User's
Manual for the Generalized Computer Program
System Open Channel Flow and Sedimentation
TABS-2, Dept. of the Army Waterways

Experiment Station, Corps of Engineers,
Vicksburg, Mississippi. 1985.

우효섭과 박성제, "그랜드캐년 인공 홍수-배경 및 효과",
대한토목학회지, vol. 47, no. 5, 1999.