

# 하구둑에서의 퇴사저감 방안



**이 상 진** | 선임연구원, 한국수자원공사 수자원시스템연구소/  
sjlee@kowaco.or.kr

**황 만 하** | 책임연구원, 한국수자원공사 수자원시스템연구소/  
hwangmh@kowaco.or.kr

**고 익 환** | 연구위원, 한국수자원공사 수자원연구소/  
ihko@kowaco.or.kr

## 1. 서론

저수지내로 유입된 유사의 퇴적은 저수지 기능에 여러 장애를 초래하며 구조물의 수명을 단축시킨다. 일반적으로 상류에 댐을 축조하는 경우 하류의 하상 변동을 피할 수 없으며, 또한 하천의 한 지점에서 유로변경이나 대량취수 등으로 유황을 변화시키는 경우 그 지점의 상·하류는 지속적인 하상변동이 발생하게 된다. 특히 하구둑 건설로 인한 퇴사문제는 저수용량을 직접적으로 감소시키는 원인이 되며 하구부의 수리·수문학적 안정과 환경 생태 등의 관점에서 볼 때 좀 더 세밀한 유지 관리가 필요하다. 하구둑에

서의 퇴사현상에는 여러 인자가 복잡하게 관련되어 있으나 퇴사현상을 명확하게 이해하고 효과적인 퇴사저감을 위한 구조적인 시스템을 확립하여 하구둑의 수명을 연장시키는 것이 앞으로의 수자원을 지속적으로 관리해 가는데 반드시 수반되어야 할 과제라 판단된다.

따라서 본 기고에서는 댐 저수지의 퇴사요인, 특히 하구둑에서의 퇴사문제를 효과적으로 대처할 수 있는 퇴사저감 방안을 국내·외 사례를 중심으로 검토하여 그 적용기법에 대한 기술적인 특성을 파악하고자 한다.

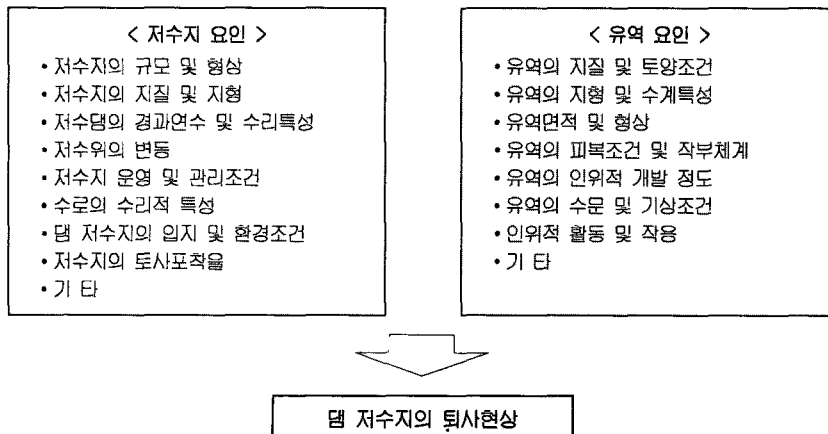


그림 1. 퇴사현상의 지배인자

## 2. 퇴사요인과 구성인자

퇴사의 지배인자로는 크게 댐 저수지와 무관한 유역요인과 댐 저수지의 요인으로 구분 할 수가 있다. 그림 1과 같이 유역인자는 댐 저수지의 유무에 관계 없이 댐 저수지 지점의 유사에 의한 요인이며, 저수지 인자는 댐 저수지 건설에 따라 저수지에 담수되는 물의 작용 등에 의하여 발생된다.

저수지내에서 퇴사의 거동은 유사 입경이 큰 경우, 유속감소와 저수지 환경에 의하여 상류부근에 퇴적되어 단구를 형성하면서 점차 댐 부근으로 확산 진행된다. 점토성분 미립자들은 일반적으로 저수지 하상으로 이동하여 밀도류를 발생시켜 하상과 거의 평행하게 퇴적되거나 댐과 가까운 상부에 수평으로 퇴적된다.

## 3. 퇴사저감대책

저수지 퇴사로 인한 가장 큰 문제점은 저류용량의 감소로 이는 각종 목적을 위한 가용 수자원의 감소를 의미하며, 이외에도 상류하천의 하상상승, 하천수질 및 생태학적 변화, 하류하상의 변화, 준설토의 처리 등과 같은 문제점이 발생한다(윤용남, 1988). 그러나 이러한 저수지 퇴사로 인한 막대한 영향에도 불구하고 퇴사문제에 있어서는 쉽게 대처할 수 있는 획기적인 신기술은 개발되어 있지 못한 실정이다. 특히 해역과 직접적으로 연결되어있는 하구둑과 같은 경우에는 하류부 전면해상의 수질문제와 생태계 환경에 미치는 영향이 크게 부각되고 있어 퇴사와 환경을 함께 고려한 종합적인 퇴사관리 시스템의 확립이 중요한 의미를 갖게 되었다.

하구둑에서의 효과적인 퇴사저감을 위한 기법으로는 배사의 원리를 이용하는 방법, 베인을 사용하는 방법, Water Injection 방법, Dike를 설치하는 방법 및 직접 준설하는 방법 등이 있는데 이를 이용한 실제 사례와 방법별로 기술적인 특성을 파악하여 향후 퇴사저감기법에 활용하고자 한다.

## 3.1 저수댐 및 배사의 원리에 의한 방법

유사로 인한 저수지내의 퇴사량을 최대한 줄임으로서 효율적인 저수용량확보와 저수지운영이 가능하도록 하기 위해 많이 사용되는 기법이다.

먼저, 소류사포착(Trapping)은 대규모 저수지의 상류 하천으로부터 홍수시 유출되는 다량의 토사를 저사댐을 통하여 분류시킴으로서 하류저수지의 퇴사를 막는 방법이 있으며, 즉시배사(Sluicing)은 홍수시 저수지내로 유입하는 부유사를 댐 저수지의 경우 여수로나 방수로로, 하구둑의 경우 수문을 통하여 배사시키는 방법으로 유입하는 토사가 퇴적하기 전에 부유상태로 하류로 방류 될 수 있도록 하는 것이 중요하다.

강제배사(Flushing)에 의한 방법은 퇴적된 토사를 댐의 배사문이나 수문을 통해 방류량과 함께 강제배사 시키는 방법으로 저수지 수위가 낮게 하여 소류력을 증가시키면 효율을 높힐 수 있으며, 홍수시 저수지로의 토사유입을 억제시키기 위해 수류를 우회시키는 방법인 우회배사(Bypassing)기법은 터널건설 등 소요비용이 막대하므로 특별한 경우를 제외하고는 경제성이 없는 것으로 알려져 있다.

배사에 대한 수치모형에 대해서 미국 캘리포니아 버클리 대학의 Shen교수 등(1993)은 배사를 Local Flushing과 Drawdown Flushing으로 구분하여 후자에 대해 1·2차원 모형을 제시한 바 있다. Local Flushing이란 저수지 수위변화가 없는 상태에서의 배사를 의미하며 Drawdown Flushing은 저수지 수위를 하강시키면서 저수지 바닥과 수면을 평행으로 하여 수류에 의한 세굴효과를 증진시켜 back-cutting을 유발시키는 배사를 말한다. 이러한 모형은 저수지내 퇴사의 배사현상을 비교적 잘 모의하는 것으로 알려져 있다. Shen과 Lai 등(1995) 등은 배사과정을 부정류로 모의하는 모형을 제안하였다. 이들은 배사구에서의 유량과 유사량, 저수지 내의 퇴적토 하상의 저하 등을 모의하는 부정류 모형을 개발하고 실험에서 얻어진 결과와 비교하여 비교적 양호한 결과를 얻었다.

배사에 의한 퇴사저감 효과는 세계적으로 실무에 상당한 적용성이 있는 것으로 알려져 있으며, 배사에 관한 수치모형과 물리모형에 관한 연구도 미국과 중국등지를 중심으로 활발히 수행되고 있다. 그러나 이러한 배사기법을 적용할 때에는 저수지 수위를 낮추면서 수행되어야 하기 때문에 취수원이 중요시되는 지역에서는 주의가 필요하다. 특히 하구둑의 경우에는 일반적으로 하상경사가 완만하고 만수위가 되었다고 하여도 배사구에서 큰 수두를 얻기는 쉽지 않다. 다만 배사와 동시에 배사구 주위로 토사가 집중될 수 있도록 유도할 수 있는 장치를 병행하여 운용하면 어느 정도 배사효과를 상승시킬 여지가 있다. 예를 들어 하구둑에 적절한 배사구를 설치하고 동시에 하구둑 상류저수지 바닥에 베인과 같은 유사( 유사)의 이송방향을 조절할 수 있는 장치를 연속적으로 설치하여 유사 이송을 배수구로 집중시키는 방안도 생각할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 배사구와 베인의 연계운동을 위해서는 반드시 수리모형과 같은 실험을 통하여 배사구와 베인위치, 크기 등을 결정하여 그 효과를 극대화하여야 할 것이다

### 3.2 베인을 이용한 방법

베인이 설치된 초창기에는 하천 만곡부에서 2차류의 흐름에 의한 만곡부 바깥부분 제방의 침식을 억제하기 위한 시설로 제작되었다. Odgaard와 Kennedy

(1983)의 이론에 의하면 베인이 만드는 2차류는 만곡에 의한 하천 2차류를 상쇄시켜 제방침식을 억제한다는 것이었는데 하천의 퇴사문제를 해소시키는 데에도 적용되었다(Odgaard와 Spoljaric, 1986). 이 때에도 베인에 의한 2차류는 베인의 측면 한쪽을 퇴적시키고 다른 한쪽을 세굴시킴으로써 하천의 단면형을 변화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

베인의 원리는 그림 2와 같이 흐름에 일정한 각도로 놓여진 판은 좌측면에 높은 압력을 주고 우측면에는 낮은 압력을 형성시킨다. 이에 따라 좌측면에서는 상향류를 만들고 우측면에서는 하향류를 발생하게 함으로써 베인의 꼬리부분에 와류를 형성시키고, 이 와류는 하천의 평균유속에 실려 하류로 이송된다. 이에 따라 베인 좌·우측은 세굴과 퇴적이 교차될 수 있도록 하천횡단면에 대해 평행하게 설치함으로써 퇴적을 일정하게 유지시킬 수 있다.

이러한 베인의 원리에 대한 구체적인 이론은 Odgaard와 Wang(1991)에 의해 제시되었다. 이에 의하면 하천횡방향으로의 수심변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dy}{dz} = \frac{m}{\rho\kappa VB\sqrt{\theta\Delta gD}} \tau_{bn}$$

여기서,  $y$  = 수심

$z$  = 횡방향좌표

$m$  = Darcy-Weisbach 마찰계수와 von Karman 상수 관련계수

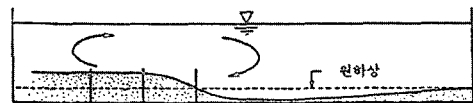
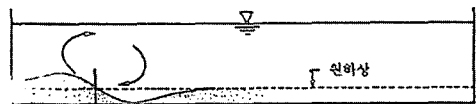
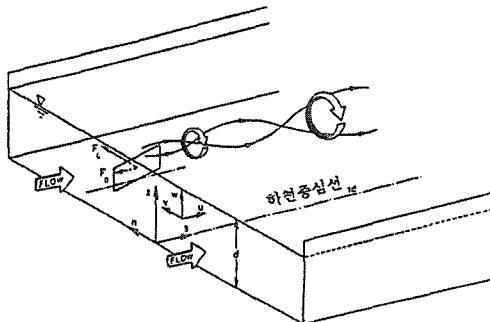


그림 2. 베인에 의한 회전류와 하상변동 개념도

- $\rho$  = 물의 밀도
- $\kappa$  = von Karman 상수
- $\theta$  = 한계 Shields 응력
- $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ ,  $\rho_s$  = 하상재료의 밀도
- $g$  = 중력가속도
- $B$  = 하상재료에 대한 Coulomb의 마찰과 양력/항력 비의 함수( $\approx 4$ )
- $V$  = 흐름방향의 평균유속
- $\tau_{bn}$  = 횡단방향의 하상소류력
- $D$  = 하상재료의 크기

이 식을 적용하는데 있어 기본적인 베인 파라메타들은 베인의 높이  $H$ , 길이  $L$ ,  $H/L$ , 수류의 엽사각  $\alpha$ , 베인의 잠수깊이  $T$ , 베인간의 간격  $\delta$ , 베인과 인접 제방간의 간격  $\delta_s$  등이 있다. 수리 및 유사관련 파라메타들은 원수심  $d$ , 유속  $V$ , 저항계수  $m$ , 폭과 수심비  $b/d$ , 만곡부 곡률반경과 하폭비  $r/b$  등이며, 이러한 베인의 설계변수는 그림 3에 나타나있다.

베인을 이용하여 하천 침식과 세굴을 방지하는 대표적인 적용 예는 Odgarrd와 Wang(1991)에 의해 구체적으로 제시되었다. 이들에 제시한 그림 4(a)는 만곡부의 제방침식을 방지하기 위하여 베인은 설치한 전형적인 예이다. 그림 4(b)는 하천에 교량이 가설된 경우 홍수터를 수용하기 위해 제방폭을 넓히는 경우 교각 및 교대의 침식방지를 위한 베인의 설치 형태이다. 그림 4(d)는 저수로의 만곡을 감소시켜 제방이나 기타 하천시설물을 보호하기 위한 베인이며, 그림 4(e)는 하천에 취수를 하는 경우 유량감소에 따라 하류에 생길 수 있는 퇴사현상을 억제하기 위한 베인의 설치 예이다. 취수구 반대 하안을 따라 베인을 설치함으로써 물길을 취수구 쪽으로 유지시키고 적절한 단위 폭당 유량을 확보하여 취수에 의행 감소된 단위 폭당 유량을 보상함으로써 하류의 퇴사현상을 억제하는 것이다. 그림 4(f)는 유사유입이 큰 지류가 유사가 적은 본류에 유입하는 경우 생기는 지류사주를 억제하기 위한 베인 설치의 예이다. 이러한 베인설치는

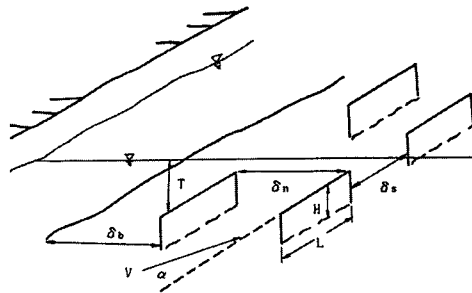


그림 3. 베인의 설계변수

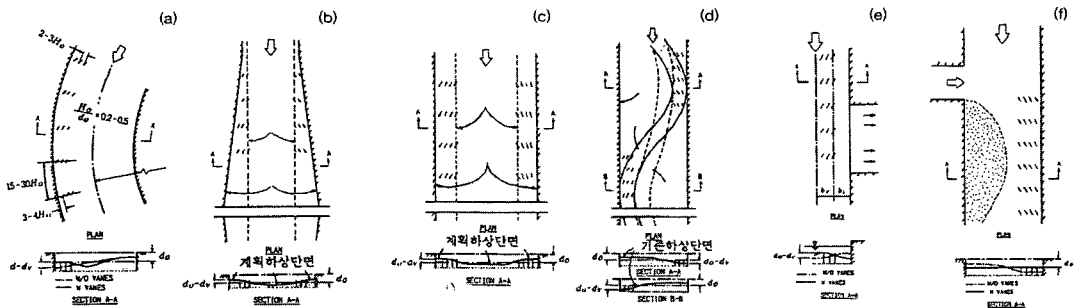


그림 4. 베인을 이용한 침식과 세굴조절

지류사주가 형성되는 하천의 대안쪽에 퇴사를 진행시키고 사주쪽의 유속을 증가시켜 퇴사를 저감시킬 수 있다.

임창수 등(1997)은 국내 취수장에서 발생되고 있는 일반적인 유사관련 문제점은 파악한 후, 선정취수장에 대한 유역의 수문자료, 유사량 및 하상도 입도 분포 그리고 취수구 주변의 하상변동 조사 및 퇴사 발생특성을 분석하여 배인의 원리를 이용한 기법 등을 이용하여 최적의 퇴사저감방안을 제시하였다.

### 3.3 Water Injection에 의한 준설

Water Injection Dredging(WID)방법은 유럽에 있는 한 회사에서 특허를 갖고 있는 방법으로 원리는

단순하다. 배위에 장착된 펌프로 긴 수평펌프를 통하여 jet를 형성시켜 수중의 하상토를 교란시키는 것이다. 교란된 유사는 밀도류를 형성하게 되며 완만한 경사의 하상을 따라서 움직일 수 있다. 이 밀도류는 유사를 선박의 항해에 지장을 주지 않으면서 더 깊은 곳에서 침전할 수 있으며 강한 유속에 의해 더 멀리 운반할 수 있다.

이 방법은 장비가 간단하여 준설선을 운용하는 선원수가 적으로 준설토를 사토장에 직접 운반할 필요가 없으므로 종래의 준설방법보다 비용이 저렴하다.

미국 미시시피강의 중상류에 위치한 Lower Zombro Savanna에서 적용한 사례가 있는데 이곳의 특징과 수심이 표 1과 그림 5 및 그림 6에 표시되어 있다. 사용된 선박은 바지선위에 WID장비를 장착

표 1. WID 적용 지역 특성의 일예

특 징	Lower Zumbro (Minnesota/Wisconsin)	Savanna(Illinois/Iowa)
유하길이	744.2	539.2
하상 물성치	Sand (D50=0.3mm)	Sand (D50=0.3mm)
준설면적	750by 150ft	700by 200ft
준설깊이	11ft LCP*	11ft LOP**
하상물 제거 평균두께	1.5ft	2ft

\* Lower Control Pool elevation - 659.8ft

\*\* Lower Operation Pool elevation - 583.0ft

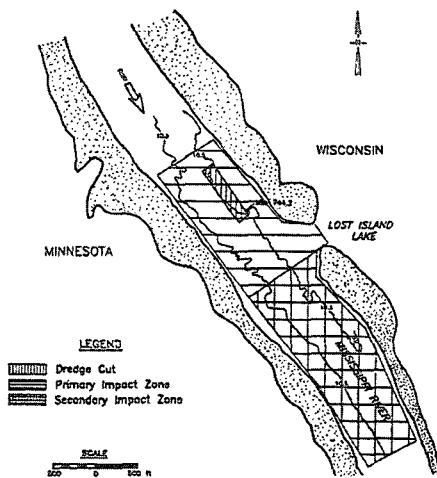


그림 5. Lower Zumbro 지역 평면도

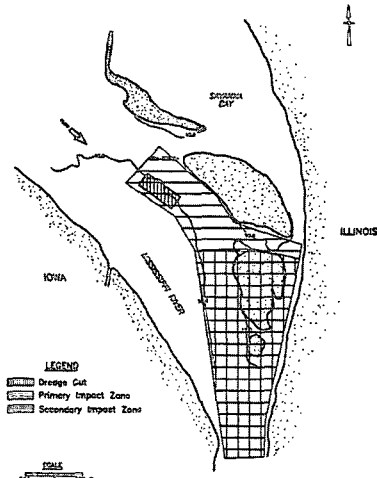


그림 6. Savanna 지역 평면도

한 것으로 준설할 수 있는 깊이는 2.1m에서 최고 12.6m까지이다.

90년대 초반 미시시피강 하류에 있는 Baton Rouge지역에서 WID이 사용된 사례에서 약 51시간 동안 91,000이 준설되었으며, 평균 준설효율은 1,800였다.

### 3.4 Dike를 이용한 방법

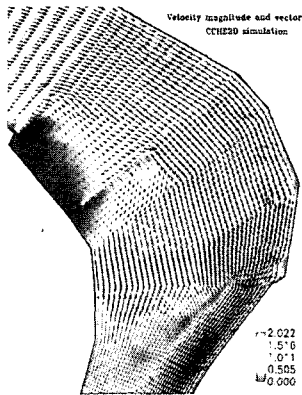
Stephen .등(2001)은 미국의 미시시피강의 빅토리아 하도 만곡부(Victoria Bendway)에서 퇴사조건을 반영하기 위해 수치모형을 사용하였으며, Dike 설치에 대한 평가를 위해 3차원 수치모형을 이용하여 적용한 사례가 있다. 그림 7(a),(b)는 수치모형 분석의 일례 및 Dike 설치후 전경을 보여주고 있다. 그림

8(a), (b), (c)는 차례로 1976년과 1984년 그리고 1995년의 Cottage Bend의 Dike 설치공법에 의한 적용모형 분석의 일례를 나타내고 있다. 그 결과 구조물 설치 후 하천기능이 지속적으로 유지될 수 있는 유속을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

Combs Et Al.(1994)는 미국 Red 강의 Lock&Dams Project에서 퇴사를 효과적으로 저감시킬 수 있는 방안을 제시하였는데 이것은 소위 'Hinged Pool' 이라고 불리는 운영방식, 즉 상류수위를 낮추어 하천기능이 원활히 지속될 수 있는 유속을 발생시키는 비구조적인 기법을 적용하여 실효를 거둔 사례가 있다.

### 4. 결론

본 기고에서는 댐 저수지의 퇴사요인과 퇴사거동

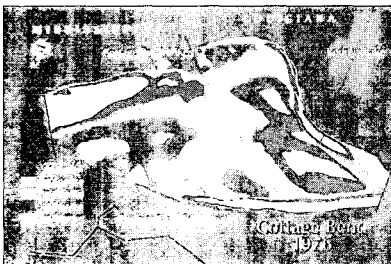


(a)

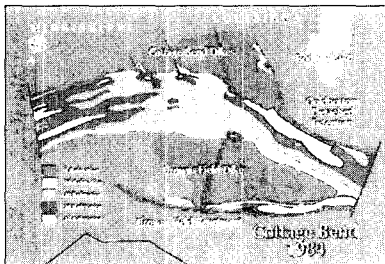


(b)

그림 7. 미시시피강 Vitoria Bendway의 수치모형 분석의 일례 및 Dike 설치후 전경



(a)



(b)



(c)

그림 8. 미시시피강 Cottage Bend의 Dike 설치후 변화(1976, 1985, 1995)

에 따른 퇴사관리 및 저감대책을 검토하였다. 댐 저수지의 퇴사문제는 유역요인과 저수지요인에 기인한 것으로 다양한 요인이 복잡하게 작용하고 있으며, 저수지 밀도성층의 형성 및 생태계에서도 중요한 지표가 된다. 따라서 퇴사요인에 대한 체계적인 규명과 기초자료 축적을 통하여 토사포착율 등을 파악하여 퇴사저감에 대한 대책을 강구하여야 할 것으로 판단된다. 특히 하구둑의 경우, 저수구역으로 유입되는 유사를 근본적으로 통제하는 것은 현실적으로 쉽지 않다. 배사구를 추가로 설치하는 방안에도 하구둑 하류의 조석영향이 배사구를 통한 유사방출을 막을 수 있다는 점 등을 고려하여 신중하게 검토되어야 한다. 수문을 통하여 가능한 많은 양의 유입유사를 방출시켜야 하는데 평수기 및 갈수기에는 유속이

작으므로 저수구역내에 많은 양이 퇴적되고 조절수문을 개방하여도 이미 침강된 유사는 재부유하지 않는 하구둑 자체의 특성파악도 중요하다. 하구둑의 퇴사문제를 해결하기 위하여 Dike등을 설치하는 구조적인 방안에도 대해서도 유역의 수리·수문학적 특성 뿐 만아니라 생태와 같은 환경문제도 고려하여 신중히 검토되어야 한다. 따라서 일련의 연구를 통하여 퇴사문제를 해결하는데 최대효과를 얻을 수 있는 방안이 적용되어야 할 것이다. 아울러 이러한 퇴사저감 기법의 적용성 검토를 위해서 필요한 자료가 절대적으로 부족한 실정을 감안하여 정부 및 유관기관에서는 각종 관련 자료의 수집 및 보완업무를 해야 할 뿐만 아니라 지속적인 자료수집 및 관리가 수행되어야 한다.

### 참고문헌

- 박종화, 댐 저수지의 퇴사대책, 한국관개배수, pp.87-93, 2003.
- 윤용남, "저수지 퇴사" 한국수문학회지, 한국수문학회, 제21권, 제1호, pp9-15, 1988.
- 한국수자원공사, 낙동강하구둑 퇴사거동 특성에 관한 연구, WRRI-WR-95-3, 1995.
- 한국수자원공사, 취수구 유사유입 저감기법 개발연구, WRRI-WR-75-2, 1997
- U.S.ARM Y, Dredging Research Technical Notes, DRP-3-10, 1933.
- Shen, H. W., Lai, J. S., and Zhao, D., "Hydraulic Desalination for Noncohesive Sediment", Hydraulic Eng., ASCE, 1993.
- Stanley, J.W., "Retrogression on the Lower Colorabo River after 1935", Transactions, ASCE, Vol., 116, 1948.
- Basson, G.R. "Mathematical Modeling of Sediment Transport and Deposition in Reservoirs", ICOLD, 2002.
- [Http://chl.wes.army.mil/library/publications/che tn/](http://chl.wes.army.mil/library/publications/che tn/)
- Richard M.S., "Hydraulic Engineering", pp.435-441, 1991.
- Daniel Gessler, "Application of 3D Mobile Bed, Hydrodynamic Model.", Journal of Hydraulic Engineering, Jury, pp.737-749, 1999.