3차원 수치모형을 이용한 저수지 퇴사분포 해석

Analysis of Reservoir Sedimentation Using 3-D Numerical Model

김기철*, 김현식**, 이동훈***, 이용택****, 김동훈*****

Ki Chul Kim, Hyeon Sik Kim, Dong Hun Lee, Yong Taek Lee, Dong Hun Kim

요 지

본 연구에서 퇴사량조사 실적 및 유량-유사량 관측 자료, 상·하류 수위-유량 자료를 보유하고 있는 B 저수지를 대상으로 3차원 수치모형을 이용하여 저수지 퇴사분포를 분석해 보았다. 또한 수치모형의 검증을 위하여 저수지내 6개 지점에 대한 시추 샘플링을 통해 퇴적토의 깊이를 측정하였다. 퇴적토 샘플링시 시료의 교란을 방지하기 위하여 동일지점에서 2회 샘플링 작업을 수행하였다. 샘플링 시료는 원지반과 퇴적지반의 구분을 위하여 시료분석 이전에 각 단면별 깊이를 측정하였으며, 시료는 각 단면별로 물리적 특성시험을 통해 압밀도를 측정하여 퇴적토의 깊이를 산정하고 수치모형시 검증 자료로 사용하였다. 본 연구에서는 3차원 수리해석과 함께 유사의 이송, 침식, 퇴적현상을 연동하여 모의 가능한 Delft3D 모형을 이용하여 B 저수지에 대한 유사 이송모의를 수행하였다. 모의 결과 저수지의 하폭이 넓어지는 지형 및 만곡부 인근에서 퇴적이 진행되는 결과를 보였으며, 퇴적토 시료와 비교한 결과 퇴적토 깊이는 일부 차이가 있었으나, 퇴적분포 양상은 유사한 결과를 보였다.

핵심용어 : 퇴사, 수치모형, 저수지, 유사이송

1. 서론

저수지내 발생되는 퇴사는 홍수조절용량, 유효저수용량 감소로 인한 홍수조절능력 및 용수공급능력 저하 등 다양한 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 사전에 예방하기 위해서는 주기적인 퇴사량 조사를 통한 퇴사패턴 분석 및 저수지내 퇴사 거동해석을 통한 검토가 필수이다. 본 연구에서는 국내 지형자료 및 수문자료 확보가 가능한 B저수지를 대상으로 3차원 수치해석을 적용하여 퇴사분포를 분석해 보았다. 저수지 퇴사분포 해석에 대한 연구는 주로 일본, 유럽, 미국 등 토사의 유출이 많은 국가에서 주로 수행하였으나, 최근 국내에서도 댐의 물리적 수명이 점차적으로 다가오면서 저수지 퇴사에 대한 관심과 연구가 많이 진행되고 있다 국내의 저수지 퇴사량 예측은 퇴사량 자료를 보유한 저수지를 대상으로 연평균 비퇴사량 산정을 위한 경험공식을 유도하는 방법(Ministry of Construction, 1978; Ministry of Construction and Transportation, 2002; Kim et al., 1993a, 1993b;)이 주로 이용되고 있다. 그러나 경험공식의 대부분은 유역면적이 100 ㎢ 이하의 농업용 저수지를 대상으로 하고 있고 대규모 저수지에 대한 퇴사량 산정에 대한 연구(Ministry of Construction and Transportation, 2002; Yoon, 1981)는 미미한 실정이다. 이 밖에 저수지 퇴사량 산정에 대한 연구로는

* 정회원 · K-water 통합물관리처 연구원 · E-mail : kkc@kwater.or.kr
** 정회원 · K-water 통합물관리처 처장 · E-mail : hyeonsik@kwater.or.kr
*** 정회원 · K-water 통합물관리처 차장 · E-mail : endgnsx@kwater.or.kr
**** 정회원 · K-water 통합물관리처 과장 · E-mail : mcytaek@kwater.or.kr
***** 정회원 · K-water 통합물관리처 대리 · E-mail : 3369sun@kwater.or.kr

USLE, RUSLE와 같은 토사 발생량 산정공식을 이용 하거나, 유량-유사량 관계곡선식을 이용하는 방법 및 수치모의를 이용한 퇴사분포 연구(Holly, 1990), 강우량과 퇴사량의 상관관계를 분석하여 경험식을 개발한 연구도 수행되고 있다. USLE 모형은 지표면 및 실개천에서 발생하는 연평균 토사침식량을 산정하기 위해 1970년대 개발된 식이며, 사면이나 평지와 같은 소유역에 대한 토사침식량 산정에 있어 적합하지 못하다는 단점이 있어 Renard et. al(1991)이 USLE 모형에 수정인자를 사용하여 RUSLE 모형을 개발하였다. 그러나 이 같이 경험식에 의한 방법 및 토사발생량 산정공식을 이용한 퇴사량 산정은 불확실성이 높기 때문에 실측자료를 바탕으로 한 방법이 신뢰도가 가장 높을 수 밖에 없다(Ahn et al., 2006). 그러나 대부분 저수지 인근 유량-유사량, 수문자료 및 지형자료가 부족하여 실측자료를 활용한 퇴사량 산정은 어려움이 있다. 이에 대한 대안으로 수치모형을 활용하여 퇴사량을 계략적으로 산정하고 있다. 그러나 수치모의로 퇴사량을 산정하는 경우 모의 결과에 대한 검증이 쉽지 않은 실정이다. 이에 본 연구에서는 3차원 수치모의를 수행하고 단면 코어채취를 통하여 모의 결과에 대한 검증을 실시해 보았다.

2. 기본이론

2.1 수치모형의 지배방정식

본 연구에서 활용된 수치모형은 Delft3D 모형으로 Deltares에서 개발한 유동해석 모형이다. 지배방정식은 2차원 천수방정식으로 비압축성유체에 대한 Navier-Stokes 방정식으로 유도된다. 적용된 수치모형의 연속방정식은 식 (1)과 같이 수심적분된 연속방정식으로 비압축성유체에 대한 3차원 연속방정식을 적분하여 도출되었으며, 수심에 대한 좌표계는 좌표계로 산정된다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{G_{\zeta}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial((d+\zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} + \frac{1}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial((d+\zeta)V\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \eta} = (d+\zeta)Q \qquad (1)$$

여기서, ζ는 수위(water level), d는 수심(depth), Q는 유입, 유출, 강우, 증발로 인한 단위면적당 유량, G_{ζ}는 곡선좌표에서 직사각형 좌표로의 변환계수, U와 V는 수평방향(ζ, η)유속 성분의 평균 유속이다.

운동량 방정식은 식 (2a,b)와 같이 밀도변화를 고려하지 않은 Boussinesq을 가정하여 수평방향(ζ, η)에 대한 운동량 방정식이다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}\frac{\partial u}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}P_{\zeta} + F_{\zeta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \rho}(\nu v\frac{\partial u}{\partial \rho}) + M_{\zeta}\partial \quad G_{\zeta} \qquad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}\frac{\partial v}{\partial \zeta} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d+\zeta}\frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{uv}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \zeta} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\zeta\zeta}}\sqrt{G_{\eta\eta}}}\frac{\partial \sqrt{G_{\zeta\zeta}}}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\zeta\zeta}}}P_{\eta} + F_{\eta} + \frac{1}{(d+\zeta)^2}\frac{\partial}{\partial \rho}(\nu v\frac{\partial v}{\partial \rho}) + M_{\eta}\partial\sqrt{G_{\zeta\zeta}} \qquad (2b)$$

여기서, 는 물의 밀도, P는 정수압 경사, F는 수평방향 Reynold's stress의 불균형에 의해 발생하는 힘이며, M은 모멘텀 생성항이다. 또한, v 는 연직방향 와점성계수(vertical eddy viscosity coefficient), w는 연직방향 유속으로 연속방정식으로 계산이 가능하다. 또한 유사 이송에 대한 계산은 식(3)과 같이 3차원 이송-확산 방정식을 적용하고 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(uc)+\frac{\partial}{\partial y}(vc)+\frac{\partial(\omega-\omega_s)c}{\partial z}-\frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_{s,x}\frac{\partial c}{\partial x})-\frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_{s,y}\frac{\partial c}{\partial y})-\frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_{s,z}\frac{\partial c}{\partial z})=0 \qquad (3)$$

여기서, c는 유사량 농도비(mass concentration of sediment fraction, kg/㎥), u, v, w는 각 방향 유속 흐름, $\epsilon_{s,x}$, $\epsilon_{s,y}$, ϵ_z는 와 확산계수, ω_s 는 침강속도 계수 이다.

3. 모형의 적용

본 연구에서는 낙동강 지류인 B 저수지를 대상으로 수치모형을 이용하여 저수지 퇴사분포를 해석해 보았다. 또한 수치모형의 검증 및 유사의 특성 분석을 위하여 6개 지점에서 시료 샘플링을 실시하였으며, 샘플링한 시료는 공인된 시험기관에 의뢰하여 물리적 특성실험을 통해 시료 분석을 실시하였다.

3.1 대상지역의 선정

본 연구의 대상지역은 1989년에 준공된 이후 경상남도 지역의 용수공급, 하류 홍수조절, 수력발전, 생산 등을 담당하는 B 저수지로 선정하였다. 저수지 유역은 북위 35°29′ ~ 35°35′과 동경 127°41′ ~ 128°06′ 사이의 한반도 남중부에 위치하고 있으며, 유로연장이 107.6 km, 유역면적은 1,329 ㎢이며, 총 저수용량은 790×106 ㎥, 평균 유입량은 23.5 ㎥/sec 이다. B 저수지를 대상지역으로 선정한 이유는 한국수자원공사에서 저수지 퇴사영향 분석을 위해 1회/10년 주기로 실측한 수심자료와 지형자료가 구축되어 있고, 3차원 수치모의시 필요한 수위, 유량, 유사량 관측 자료의 확보가 가능하여 대상지역으로 선정하였다

3.2 경계조건

대상구간의 모의 조건은 2002년 1월 ~ 2012년 12월로 10년간 모의를 수행하였으며, 모형에 적용된 수위, 유량 자료는 한국수자원공사에서 제공하는 저수지 상·하류 수위 유량 자료를 경계조건으로 입력하였다. 또한 하천 및 저수지 본류의 조도계수는 B저수지 하천기본계획 보고서에 제시된 값과 동일한 0.023 ~0.027로 설정하였다. 적용대상 지역의 퇴사분포 해석을 위한 유사량 입력자료는 표 1과 같이 대상지역 상류 경계지점 인근에서 실측한 유량-유사량 관측 자료를 활용하였다.

표 1. 수치모형시 적용된 상류 유량-유사량 곡선식

Classification	Case 1	Case 2
Simulation Time	Jul. 2010 ~ Aug. 2010	Mar. 2011 ~ Dec. 2011
Observation Section	1	2
Sediment Rating Curve Eq. (Sediment-discharge)	Qs = 15.138 × Q1.2505	Qs = 9.3736 × Q1.1533

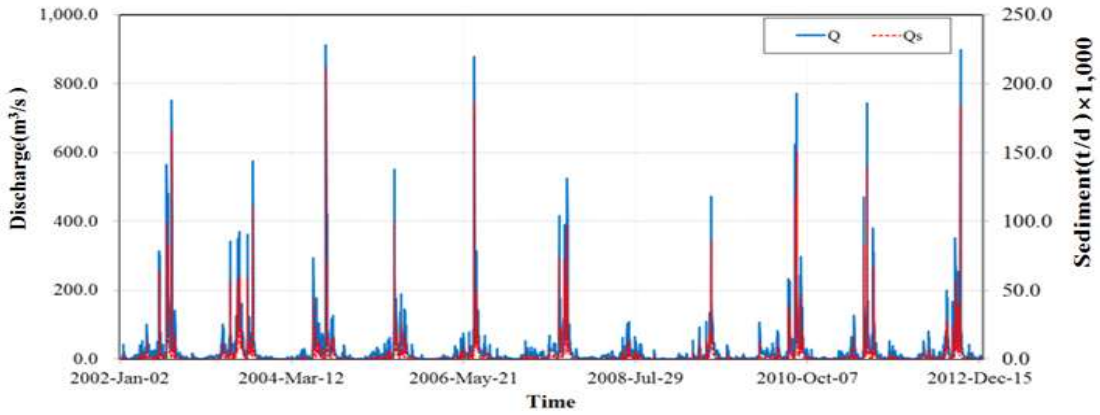


그림 1. 유량-유사량 입력자료

3.3 지형 및 격자의 구성

연구대상 영역의 지형 자료는 한국수자원공사에서 2002년 조사된 B댐 퇴사량조사용역 보고서에서 단빔으로 측량된 100 ~ 400m 간격의 단면자료를 이용하여 지형자료를 구축하였으며, 저수지의 지형적 특성상 본류 구간의 중심부에 위치한 섬 지형의 경우 과거 수심측량 계획측선에 일부 포함되지 않아 모형에 적용하기 어려웠다. 이에 2012년 한국수자원공사에서 조사된 B댐 퇴사량조사 측량용역시 산정된 1m 간격의 DEM자료를 이용하여 일부 섬구간의 표고 자료를 취득하고 모형에 적용하였다. 모형의 격자간격은 3m×3m로 구축하였고, z방향(수심)은 15개 격자로 구분하여 모형을 구축하였다. 대상구간의 수심 분포도 및 격자 구축은 그림 2, 3과 같다.

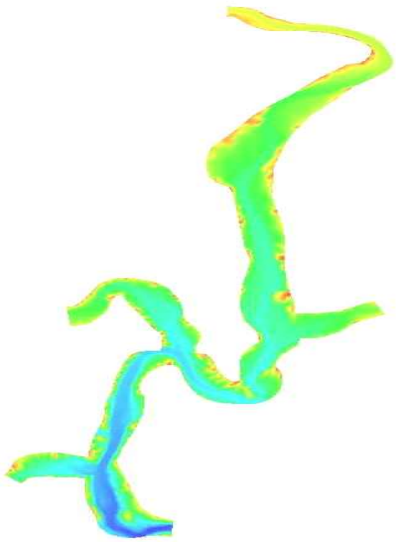


그림 2. 대상구간 수심 분포도

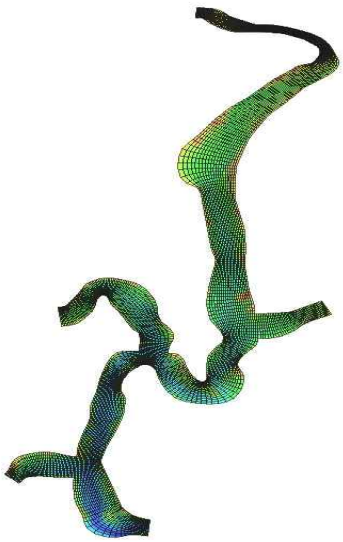


그림 3. 수치모형 격자 구축

4. 모형 결과

B 저수지에 대한 모형적용 결과 흐름해석의 유속분포는 갈수기 0.02~0.05m/s, 홍수기 0.1~2.8m/s 산정되었다. 퇴사분포 모의 결과는 상류유역(상류 경계지점에서 1km) 구간에서는 0.5~0.16m의 퇴적이 발생하였으며, 하폭이 넓어지는 구간에서는 약 2m의 퇴적이 발생하였다. 또한 하

류유역에서는 0.04~0.65m로 나타났다. 이는 저수지의 지류가 길고 하류로 하폭이 넓어지는 저수지의 특성으로 인해 상류 일부 구간 및 하폭이 넓어지는 지형적 특성이 있는 구간에서 퇴사가 진행되는 것으로 보이며, 하류로 갈수록 하폭 및 수심으로 인한 유속이 느려지기 때문에 하류로 갈수록 퇴적이 낮게 나타난 것으로 보인다.

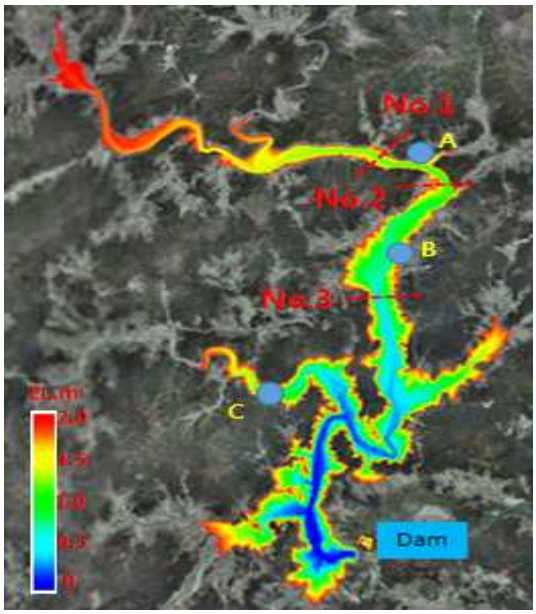


그림 4. 적용유역 퇴사분포도

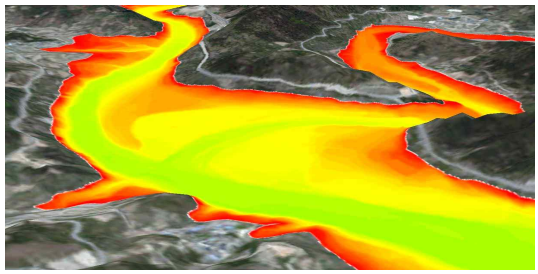


그림 5. 상류 구간 퇴사분포도

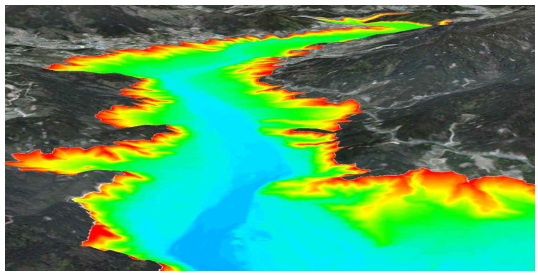
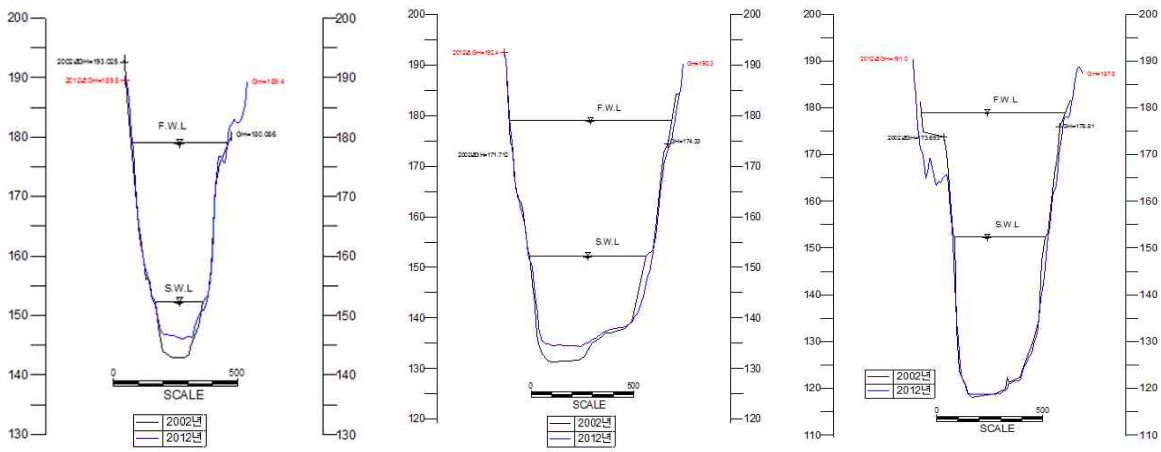


그림 6. 본류 구간 퇴사분포도



(a) No.1 (b) No.2 (c) No.3

그림 7. 주요 지점별 단면 변화도

5. 모형의 검증

수치모의 결과 검증을 위하여 퇴사가 예상되는 상·하류 6개 지점을 선정하여 코어 채취를 수행하였다. 채취된 코어 시료는 공인된 시험기관에 의뢰하여 시료 특성 분석을 실시하였다. 또한 시료 특성 분석시 원지반과 퇴적 지반의 구분을 위해 채취된 시료를 각 층별로 시험 분석하여 압밀도, 비중, 단위중량 등 물리적 특성을 분석하였다. 수치모형 결과와 샘플링된 시료의 퇴적토 깊이 비교 결과 표 2와 같이 수치모형 결과 값이 0.05~0.1m로 과소 산정되는 결과를 보였다.

표 2. 수치모형 결과와 샘플링 결과 비교

Section A			Section B			Section C		
Obs.	Cal.	Variation	Obs.	Cal.	Variation	Obs.	Cal.	Variation
0.26 m	0.21 m	-0.05 m	0.19 m	0.14 m	-0.05m	0.21 m	0.11 m	-0.1 m

그림 4. 적용

6. 결론

본 연구에서는 B 저수지의 퇴사분포를 3차원 수치모의를 통해 해석해 보았다. 모형의 경계조건 자료 및 지형자료는 실측자료를 적용하였으며, 모형의 검증을 위하여 단면 코어 채취를 수행하여 모형을 검증하였다. 비교분석 결과 상류 일부 구간에서 빠른 유속흐름에 비해 세굴현상이 작게 나타나는 구간이 있었으나, 전체적으로 상·하류 유속분포 및 유사-이송은 비교적 재현성이 좋은 것으로 나타났다. 다만 소류사의 경우 금회 분석에서는 제외되어 향후 소류사에 대한 유사 이송을 모의하여 분석한다면 전체적인 저수지 퇴사분포의 모의가 가능할 것으로 판단된다. 이러한 연구결과를 통해 저수지 퇴적 토사의 효율적 관리 및 저감방안을 수립하는 유용한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Ahn, J.H., Jang, S.H., Choi, W.S., Yoon, and Y.N., (2006). An efficient management of sediment deposit for reservoir long-term operation (1), *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 22, No. 6, pp.1088-1093.
2. Holly, F.M. and Rahuel, J.L. (1990). New numerical/physical framework for mobile-bed modeling: part 1, numerical and physical principles. *J. of Hydraulic Research*, Vol, 28, No 4, pp. 401-416.
3. Kim, J.T., Park, S.U., (1993a) Estimating sediment deposits and trap efficiencies for irrigation reservoirs. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 26, No. 3, pp.63-74.
4. Kim, J.T., Park, S.U., and Suh S.D., (1993b). Predictive equations for deposits and sediment ields at irrigation reservoirs. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 35, No.2, pp.104
5. Ministry of Construction (1978). Hydrologic investigation observation final report.
6. Ministry of Construction and Transportation (2002). Hantan River dam design criteria.
7. Renard, K.D., Foster, G.A., and Weesies P.J., (1991). Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservaation*, Vol. 46, No 1,pp.30-33.
8. Yoon, Y.N. (1981). Estimation of silting load and capacity loss rate of irrigation reservoirs. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 69-76.