

매립호안의 유사 거동특성과 유실률에 관한 실험연구

김동현* · 조재남** · 김규선*** · 이승오****

Kim, Dong Hyun* · Cho, Jae Nam** · Kim, Kyu-Sun*** · Lee, Seung Oh****

A Experimental Study on Behavioral Characteristics and Loss Ratio of Sediment for Reclaimed Revetment

ABSTRACT

Recently, several construction projects have been built to create residential area, industrial complex and agricultural land on reclaimed on- and offshore regions. Estimating the quantity of filling materials during reclamation is the most crucial factor of the total construction cost of reclamation project. However, the estimation of loss ratio, defined as the ratio of loss amount to overall dumped amount, mostly depends on the empirical methods and formulae based on the material characteristics due to the lack of sufficient literature about the loss ratio according to hydraulic conditions. In this studies the loss ratio of materials considering flow conditions and material characteristics were examined through hydraulic experiments. A series of hydraulic experiments was conducted using five different hydraulic conditions and two types of materials such as sand and anthracite in a horizontal rectangular flume (13.0 m × 5.0 m × 0.10 m), in which a round type revetment was installed. It is found that the loss ratio generally tends to increase with increasing the particle Froude number regardless of the types of materials. Also, when the flow velocity(u) becomes higher than the critical flow velocity (u_c), the loss ratios of sand and anthracite are dramatically increased up to 7.4% and 24.4%, respectively. As a future work, more specific mean velocities will be considered to figure out the loss ratio and more accurate estimation of amount of filling materials will be possible to present with confidence.

Key words : Revetment, Landfill, Dumping sand, Experimental study, Ratio of loss

초 록

최근 해양 및 항만지역의 매립을 통하여 주거공간, 산업단지, 농업용지 등의 부지를 확보하는 공사가 다수 진행되고 있다. 해상 매립공사에서 매립 재료의 물량산정은 공사 원가를 결정하는 중요한 요소이다. 그러나 흐름조건을 고려한 정량적 유실률 산정에 관한 국내 연구는 부족한 실정이며, 주로 현장여건하에서 매립토 재료적 특성 및 종류에 따른 경험적 방법에 의존하고 있다. 본 연구에서는 수리실험을 통하여 기존의 연구와는 달리 흐름조건과 재료의 특성을 고려하여 유실률을 평가하였다. 5가지 유입 흐름 조건과 비중이 다른 일반모래와 안트라사이트 두 가지 재료를 이용하여, 직사각형 수로(13.0 m × 5.0 m × 0.10 m)에 원형 호안을 설치하여 수리실험을 수행하였다. 두 가지 재료 모두 입경 Froude number가 증가함에 따라 유실률이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 접근유속(u)이 각 재료의 한계유속(u_c)보다 높을 때, 일반모래는 7.4%, 안트라사이트는 24.4%로 유실률이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 향후 보다 세밀한 유입조건에 따른 유실률을 산정한다면 보다 정밀한 유실률 산정이 가능할 것이다.

검색어 : 매립공사, 유사 유입, 호안, 실험연구, 유실률

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (Hongik University · uou543@gmail.com)

** 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정 (Hongik University · changbo2001@gmail.com)

*** 중신회원 · 삼성물산(주) 건설부문 수석연구원 (Samsung C&T Corporation · kyusun@empas.com)

**** 중신회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Hongik University · seungoh.lee@hongik.ac.kr)

Received December 5, 2015/ revised April 21, 2016/ accepted May 16, 2016

1. 서론

동남아시아를 중심으로 해상 매립을 통한 주거공간, 산업단지, 농업용지 확보를 위한 매립공사가 활발하게 진행되고 있으며, 이에 따라, 준설매립 프로젝트 수행 시 소요되는 물량예측에 대한 관심이 증대되고 있다. 해상 매립공사 수행 시 공급된 토사의 일부는 부유되어 매립구간 외부로 유실되는데, 이러한 매립재료의 유실은 공사의 경제성과 직결되는 물량산정에 중요한 요소이다. 그러나, 해상 매립공사의 특성상 여러 가지 시공 환경적 요인의 영향으로 정확한 물량을 산정하기에 어려움이 있기 때문에 통상적으로는 경험적인 방법에 의존하고 있다. 이와 같은 수중 매립거동과 관련한 공학적 거동특성 규명을 위해 국내외 다양한 연구가 수행되어 왔지만, 해상 시공 환경을 고려한, 즉, 현장 흐름특성을 고려한 유실량의 정량적인 연구는 상대적으로 미미한 실정이다.

국내 외의 매립 유실을 관련 연구로는, 매립지역의 시료에 대한 입도분석 결과를 토대로 Marsal의 수정과쇄율을 적용한 방법을 이용하여 유실률 평가에 관한 연구를 진행한 바 있다(Kim et al., 2000). 이후 Kim et al. (2002)은 선행 연구의 방법론을 현장에 적용하여, 준설토를 단계적으로 투기했을 때 유실률에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과는 유입된 매립토나 준설토의 퇴적 형상도 간접적으로 유실률과 관계가 있는 것을 제시하고 있다. Ahn et al. (2014)은 펌프에 의한 투기 속도와 준설토의 특성에 따른 준설토의 침강-퇴적 양상이 변화하는 것을 실험으로 확인하였다. 그 외에도 준설토의 종류에 따른 역학적 특성과 시간경과에 따른 강도 특성에 관한 연구가 진행되었다(Kim et al., 2013). 수치해석적 연구로는, Shin (2014)이 준설토의 유동해석을 위한 수치모의를 통해 유한요소 수식화에 관한 연구를 수행하였다. 해당 연구에서는 준설토사 이송 및 최적 거동 특성 예측 시뮬레이터 개발을 위해 준설토 투기장에 펌핑에 의한 준설토의 유동에 관한 지배방정식을 SU/PG (Streamline Upwind/Petrov-Galerkin) 수식화를 기반으로 수치해석 결과의 안정성을 확보하는 수치해석 기법을 제안하였다.

국외의 수치모의 연구로는 Ziegler and Lick (1988)은 모래 세사의 재부유, 퇴적, 이송의 수치모형을 개발하고 적용하였다. 정확하고 물리적으로 현실적인 하상의 거동을 모의하기 위하여 실내실험과 현장 데이터를 근거로 하였다. 이후 Syvitsk et al. (1998)에 하천의 유사퇴적을 예측하는 수치모형을 제시하였고, Imran et al. (2002)은 해저선상지 형상에 대한 실험과 수치모의를 동시에 수행하여 비교하였다. 최근 연구로는 Souza et al. (2010)가 좁은 저수지에서 유사퇴적의 발달 과정을 2차원 수치모형을 이용하여 분석하였다. 국외 실험적 연구로는 토사의 특성에 따른 유사의 퇴적형상 연구가 진행되었다. Yauchi and Katch (1992)는 상사를 고려한 비직선 모형으로부터 함수비가 다른 점토를 투입하여 입자

의 확산과정과 정착 패턴을 관찰하였다. 매립토의 특성 외에도 수중에서의 거동 특성은 대상 구간의 흐름 특성이 큰 영향을 미친다. 앞서 언급한 연구들은 흐름 특성을 고려하지 않은 한계점이 있다. Rajaratnam and Mazurek (2006)은 원형 난류제트를 이용하여 물과 모래의 혼합물을 분사하여 형성되는 모래더미를 관찰하는 실험을 수행하였다. Gu et al. (2008)은 개수로 흐름의 속도를 변화시키기에 따라 유입한 모래 입자의 혼합과 이송을 관측하였다. Bhuiyan et al. (2010)은 흐름조건을 달리하여 조립질 흙의 유입으로 인한 퇴적물 더미의 형성과정과 모습을 관찰하는 실험을 수행하였고, 흐름 특성에 따른 형성과정과 모습을 분석하였다. Azimi et al. (2014)은 제트를 통해 분사하는 유사를 초기 분사속도, 유사 크기, 하상 기울기의 변화에 따라 형성되는 더미의 퇴적 양상을 분석하였다. 이러한 선행 연구들은 형상 위주의 분석만을 수행하였기 때문에, 물량산정에 중점을 둔 정량적인 유실률을 평가하기 어렵다는 한계점이 있다.

매립공사 시 국내에서는 항만 및 어항 설계기준(2014)에 유실률이 토질별 유보율과 입경별 유실률로만 기준을 제시하고 있으나, 흐름특성에 대한 고려는 제외되어 있다. 반면 미공병단(U.S. Army Corps of Engineeris, 1983)의 Dredging and Dredged Material Disposal Engineer Manual에서는 흐름을 고려한 준설-매립토의 투여와 관련된 내용이 기술되어 있다. 대상 유사에 대해서 지역별로 현장경험에 의한 유실률이 나타나 있으나, 이를 조건별로 정량화하여 제시하고 있지는 않은 실정이다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 한계점을 극복하기 위해, 흐름이 있는 개수로에 원형 호안을 설치하고 비중이 다른 두 가지 종류의 재료에 대해 흐름 조건에서의 유실률을 정량적으로 산출하여, 흐름 특성과 매립토의 특성의 영향에 대해 고찰하였다.

2. 실험 설계

해안분야의 수리실험에서 염도에 영향을 받는 인자를 주요인자로 하는 연구를 제외하고 일반적으로 염도의 영향이 미비하다 가정하여 그 영향을 무시하고 실험을 수행한다. 본 연구에서도 염도의 영향을 거의 받지 않는 사질토를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수리실험은 길이 13.0 m, 폭 5.0 m, 높이 0.3 m를 가지는 광폭 개수로에서 수행하였다. 개수로 공사 시 바닥경사는 없도록 시공하였고, 순환식 계통구조로 개수로 상류측에서 용수가 공급된다. 지하 저수조에서 펌프(30 HP × 3대)를 이용하여 고수조로 이동되고 일정한 수두를 유지한 상태로 송수배관을 통해 개수로에 공급되며, 개수로 상류부에 세 칸의 저류조를 구성하여 안정화된 흐름으로 공급되도록 개수로를 설계하였다. 송수배관을 통해 개수로로 유출되는 최대유량은 약 0.150 m³/s이다. 개수로 하류부에

설치되어 있는 하류부 수문을 이용하여 실험 구간 내 수위를 0.1 m로 유지하여 거의 등류 흐름 조건으로 유지하였다. 개수로 좌안에 설치된 원형 호안은 방수 처리된 합판을 사용하여 일반적으로 사질토사의 사면경사에 사용하는 경사를 갖도록 제작하였으며, 밑면의 지름 2.0 m, 윗면 지름 0.8 m, 높이 0.2 m로 1:3(V:H)의 경사를 가진다. 유사는 진동장치와 시간조절기가 설치되어있는 유사공급장치로부터 일정량으로 공급된다. 유사공급장치와 호안은 상류로부터 6.5 m 떨어진 좌안에 설치되어 있다. Fig. 1은 실험개수로의 모습과 좌표계를 나타낸 것이다. 호안으로 인하여 영향을 받지 않는 구간($X=4.0$ m)에 2차원 전자식 유속계(ACM2-RS)와 초음파식 수위계(MI-WS16)를 설치하여 대표평균유속(u)과 평균수심(h)을 측정하였다. 유속계는 $\pm 2\%$ (약 0.5 cm/s)의 측정오차를 가지고 수위계는 최소 0.1 mm단위로 측정 가능하고, 또한 측정결과의 재현성을 확인하기 위하여 최소 3회 이상 반복측정을 수행하여 측정결과의 신뢰성은 충분히 확보하였다. 유사공급장치는 일정한 양의 유사를 각각 16.6 g/s, 35.4 g/s로 설치된 호안 밑면의 경계면 위치에 유입시킨다. 실험이 진행되는 동안 유사공급장치의 컨베이어벨트는 유입유사 두께(T)를 5 mm로 유지한 채 일정한 속력으로 작동한다(Fig. 1(b)).

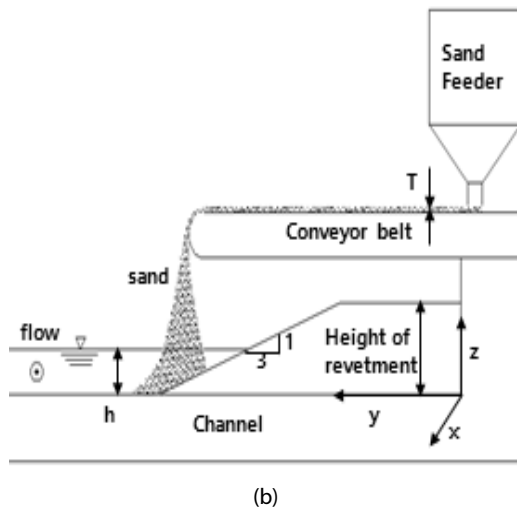
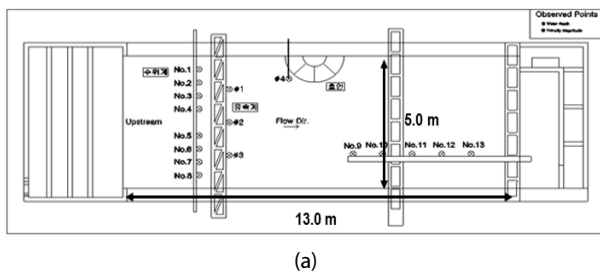


Fig. 1. Experimental Setup (a) Experimental Channel (b) Coordinate System

실제로 매립공사에서 사용되는 매립토는 매립공사의 지역에 따라 그 특성이 다르기 때문에 대표적으로 사용되는 일반모래($D_{50} = 0.621$ mm)와 안트라사이트($D_{50} = 1.547$ mm)를 실험용 유사로 사용하였다. 또한 본 실험에서 사용하는 안트라사이트는 수리실험 시 중력의 영향을 고려한 비중에 따른 유사의 상사성에 대한 문제를 해결하고자 할 때 일반적으로 사용하는 것이다. 본 연구는 수리실험을 통하여 흐름이 존재하는 구간에서 매립토의 퇴적에 대한 현상을 규명하는 연구로 유사 특성이 다른 두 가지 유사를 사용하여 그 영향을 관찰하였고, 그 결과를 무차원화를 통하여 제시하고 있다. 이러한 관계를 이용하여 유실률과 매립토의 특성의 관계를 분석하고자 하였다. 그러나 본 연구결과가 현장에 적용되기 위해서는 원형의 축척효과 및 유사의 상사성에 대한 분명한 한계가 있으므로, 이를 신중히 고려하여 적용하여야 한다.

시간에 따른 종단면도 분석을 위해 호안이 설치된 지점 연직방향에 디지털 캠코더를 설치하였다. 또한 실험 종료 후 수면에 도달했을 때의 형상을 관측하기 위하여 정확도 ± 0.03 mm의 3D 스캐너(HDI Scanner)를 사용하였다. 스캔한 이미지는 FlexScan 3D 소프트웨어를 이용하여 변환 후 AutoCAD에서 후처리가 가능하다. 유실률은 점정을 통해 도출한 유사유입량 식($1 \text{ min} < t < 30 \text{ min}$)을 이용하여 측정된 실험시간으로 유입량(Q_i)을 산출하고, 실험종료 후 유실되지 않은 유사를 수거하여 건조한 후 유보량(Q_b)을 산출하였다(Fig. 2). 또한 유실의 기준은 매립 공사 시 호안을 형성해나가는 것을 고려하여 원형호안의 지름의 폭만큼(y 축 방향)으로 설정하였다.

총 10회의 수리실험이 수행되었으며 실험조건은 Table 1에 상세히 나타내었다. 일반모래(실험 S)와 안트라사이트(실험 A)는 서로 다른 실험유사를 사용한 것으로, 각각 5가지 유속에 대해 실험을 수행하였다. x 방향으로의 유속 u 는 0.10~0.26 m/s의

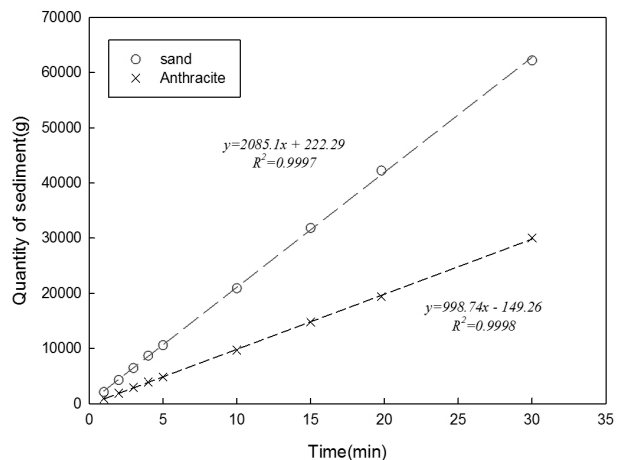


Fig. 2. Calibration of Sediment Feeder

값을 가지고 한계유속은 $u_c = 0.53(\gamma_s/\gamma - 1)^{1/2} D_{50}^{4/9}$ 을 이용하여 산출하였다(Mavis and Laushey, 1948). 참고문헌상 유사이송과 관련된 한계유속을 정의하는 많은 식이 제안되어 있다. 대표적으로 Shields (1936) and Yang (1973) 등이 있으나, 본 연구에서는 매립도를 달리하여 실험을 수행하였기에, 흙의 특성을 반영하고자 Mavis and Laushey (1948) 식을 사용하였다. 여기서, γ_s/γ 는 물의 단위중량에 대한 실험유사의 단위중량으로 비중을 나타낸다. 개수로의 유속, 실험유사의 특성을 반영하기 위하여 입경 프루드수 (particle Froude number, F_D)를 산출하였다. 입경 프루드수(F_D)는 개수로 흐름의 유속과 비중을 고려한 중력가속도와 입경으로 구성된 $F_D = u/(g'D)^{0.5}$. 여기서 u 는 흐름의 유속, $g' = g(\rho_s - \rho)/\rho$ 이며 ρ_s 는 흙 입자의 밀도, ρ 는 물의 밀도를 나타낸다. D 는 유사의 입경이다. Table 1에 각각의 실험에서 사용된 유속, 유사의 입경, 입경 프루드수 등의 값을 요약하여 정리하였다.

Table 1에서, q_s 는 유사공급장치의 초당 유입량을 의미(g/s)하며 실험시간(t_d)는 실험 수행시간으로 최소 3.15 min에서 최대 22.20 min까지 나타났다. 실험 S와 실험 A-1, A-2는 유입한 유사가 쌓여 형성한 퇴적물의 높이가 수면에 도달하였을 때 실험을 종료하였고, 실험 A-3과 같은 경우에는 형성된 퇴적물의 꼬리가 더 이상 흐름방향으로 진행하지 않는다고 판단되었을 때를 평형시간으로 보고 실험을 종료하였다. 또한 A-4와 A-5는 3D 스캔 범위의 경계선까지 꼬리가 진행되었을 때를 평형시간으로 설정하였다.

본 실험에서는 대표유속 단면에서 전자식 2차원 유속계를 사용하여 단면대표 유속을 측정하였고, 호안중심에서 45° 방향, 1.3 m 지점 떨어진 부분에 초음파식 3차원 유속계를 설치하여 접근유속을 관측하였다.

Table 1. Detailed Experimental Conditions and Results

Test	u (m/s)	d_{50} (mm)	F_D	u_c (m/s)	q_s (g/s)	t_d (min)
S-1	0.11	0.621	1.0746	0.232	35.4	3.32 ^a
S-2	0.16	0.621	1.5631	0.232	35.4	5.43 ^a
S-3	0.21	0.621	2.0515	0.232	35.4	9.73 ^a
S-4	0.25	0.621	2.4423	0.232	35.4	15.02 ^a
S-5	0.26	0.621	2.5400	0.232	35.4	22.20 ^a
A-1	0.10	1.547	1.0393	0.207	16.6	3.15 ^a
A-2	0.16	1.547	1.6629	0.207	16.6	6.47 ^a
A-3	0.21	1.547	2.1826	0.207	16.6	14.35 ^b
A-4	0.25	1.547	2.5983	0.207	16.6	20.17 ^c
A-5	0.26	1.547	2.7023	0.207	16.6	16.53 ^c

^a mound reached water surface

^b length of tail reached area of scanning

^c length of tail became constant

3. 실험 결과 및 분석

3.1 형상 결과 및 분석

실험결과 기본적으로 유속이 증가하면 초기($t = 1$ min)에 형성되는 매립도 더미가 점진적으로 하류 쪽으로 위치한다(Fig. 3). 최고점의 위치는 초기에 형성되어 점점 상류 쪽으로 거슬러 올라 형성된다. 그러나 안트라사이트의 경우에 저유속에는 유사한 양상을 보이지만 고유속에서는 초기에 형성된 최고점이 거의 유지하는 양상을 보인다. 또한 일반모래의 경우 더미가 형성되는 경계가 하류쪽으로는 거의 변하지 않고 상류쪽으로 거슬러 올라오는 반면에 안트라사이트는 고유속일 경우 반대로 하류쪽으로 진행이 이루어진다(Fig. 4).

유사의 형성이 진행되는 각도는 유속에 따라 확연히 차이를 보였다. 일반모래의 경우 초기의 진행각에서 점점 감소하여 개수로의 x방향과 평행한 방향으로 더미 형성이 진행되었다. 그러나 안트라사이트의 경우에는 반대로 진행방향이 점점 증가하여 호안으로 인하여 변화한 유향으로 향하는 것으로 나타났다(Figs. 4 and 5). 진행방향으로 이송되는 모래의 양은 유속이 증가함에 따라 두 가지 유사 모두 증가하였다. 실험 종료 시에 고유속인 $u = 0.25$ m/s 실험에서, 안트라사이트의 경우 형성된 더미의 x 방향 길이(l_x)가 1.013 m, 일반모래의 경우 0.730 m로 나타났다. 또한 일반모래의 경우 형성된 더미의 l_x 은 더미의 시작점이 $X = -0.097$ m, $l_x =$

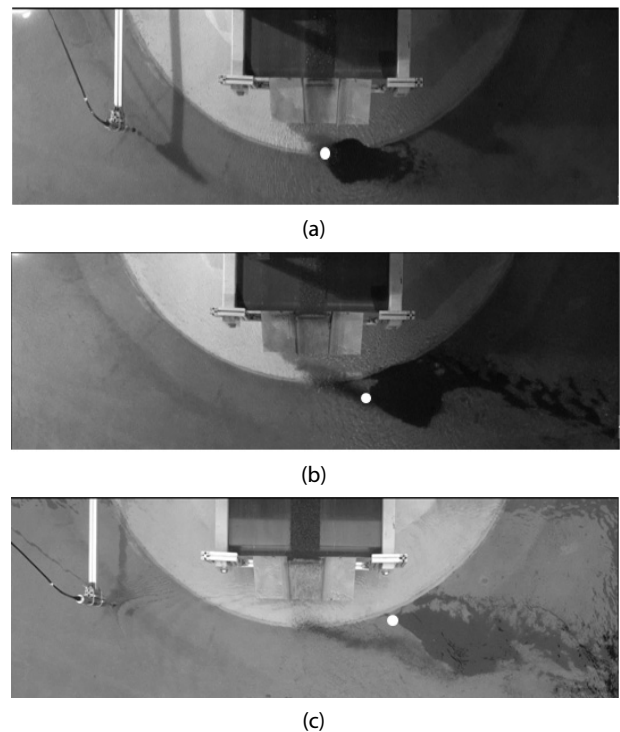


Fig. 3. Instantaneous Images of Planar Profiles for Anthracite ($t = 1$ min) (a) Test A-1 (b) Test A-3 and (c) Test A-5

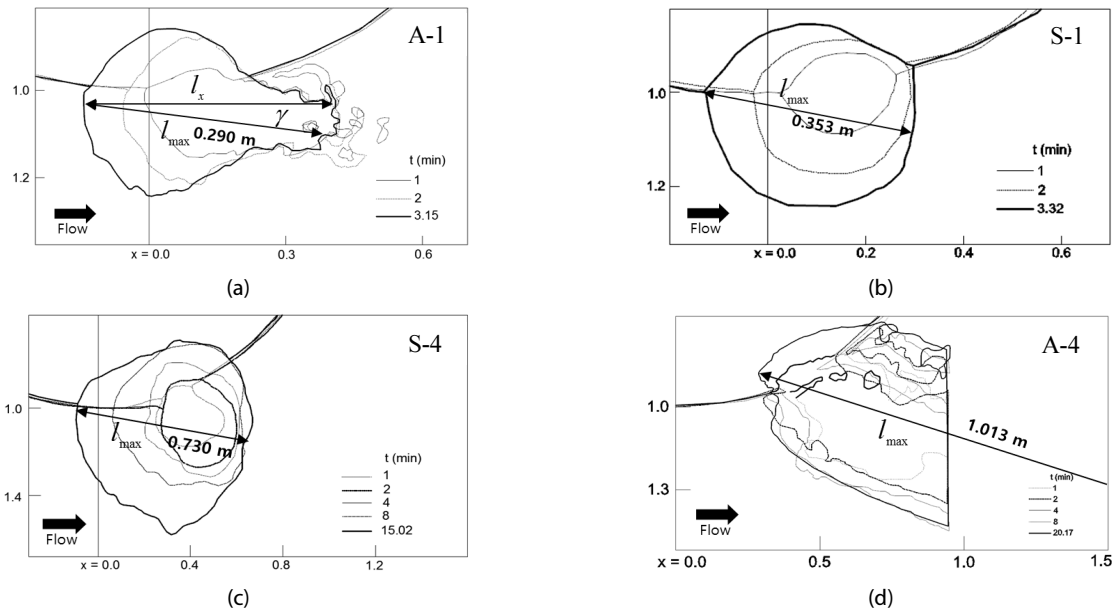


Fig. 4. Sequential Change of Planar Profiles for Two Sediments (a) Test A-1 (b) Test S-1 (c) Test S-4 and (d) Test A-4

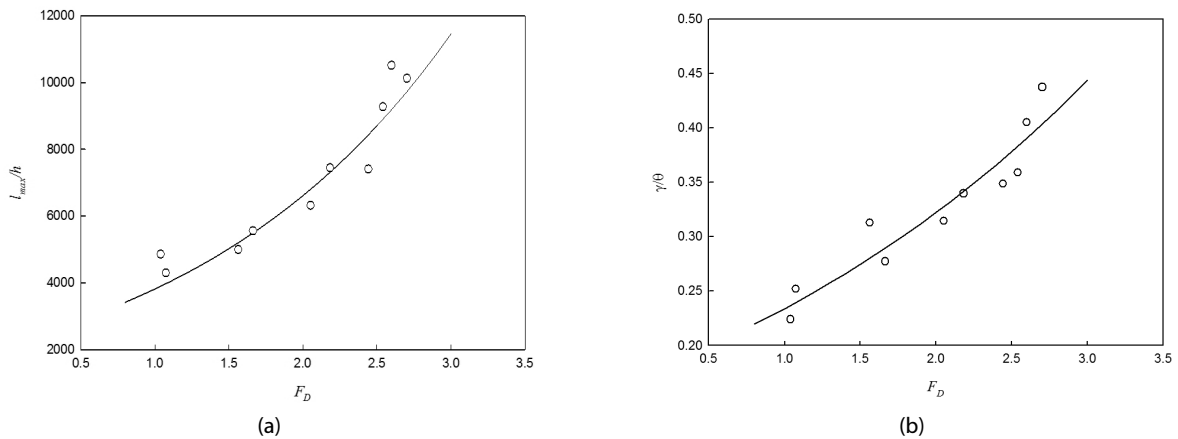


Fig. 5. Dimensionless Analysis of Experimental Data (a) Normalized Maximum Length with Particle Froude Number (b) Normalized Angle with Particle Froude Number

0.730 m로 유보구간 내(-1.0 m < X < +1.0 m)에 분포하는 반면 안트라사이트의 경우 형성된 더미의 시작점이 X = 0.287 m, $l_x = 1.013$ m로 x 방향으로 0.3 m 구간만큼 유실구간에 위치하였다.

일반적으로 모래의 안식각은 입경 및 함수비에 따라 다르다. 일반적으로 물에 잠긴 모래의 안식각은 41.5°, 안트라사이트의 안식각은 35.0°이다. 형성된 더미를 최고 높이에서 진행 각도로 자른 단면을 보면, 두 가지 유사 모두 상류부 경사가 하류부 경사에 비해 크지만 일반모래는 상·하류부 경사가 각각 30.09°~32.22°, 27.76°~30.54° 거의 비슷한 반면 안트라사이트는 상류부 경사가 저유속일 경우 35.70°, 고유속에서 10.03°의 상류부 경사를 갖는다. 하류부 경사도 마찬가지로 33.76°에서 7.02°로 감소하였다. Fig.

4는 유속에 따른 형상인자의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 5(a)의 l_{max} 는 더미의 최장 길이를 말하고, l_{max}/h 으로 무차원화 하였다. l_{max} 를 매립토의 특성을 반영한 입경 프루드수(F_D)로 관계를 나타내었다(Fig. 5(a)). 입경 프루드수는 두 개의 다른 입경과 비중에 대하여 유사한 지수분포를 보였다. 그 관계는 다음과 같다.

$$\frac{l_{max}}{h} = A \cdot \exp(B \cdot F_D) \quad (1)$$

여기서 A는 2200, B는 0.55의 값을 가진다. 이 수식의 결정계수 (R^2) 값은 0.903이다.

Table 2. Experimental Results for Symmetry of Deposited Area

Test	$S_L (\times 10^3 \text{mm}^2)$	$S_R (\times 10^3 \text{mm}^2)$	$S_{com} (\times 10^3 \text{mm}^2)$	$S_{total} (\times 10^3 \text{mm}^2)$	S	M
S-1	0.510	3.860	125.0	129.3	0.966	-
S-2	1.083	7.568	182.6	191.2	0.955	-
S-3	9.191	4.906	295.8	309.9	0.955	-
S-4	6.965	10.168	457.2	474.4	0.964	-
S-5	25.631	41.866	674.7	742.2	0.909	-
A-1	2.620	7.509	118.4	128.6	0.921	-
A-2	10.256	10.932	255.5	276.7	0.923	+
A-3	33.301	44.678	417.3	495.2	0.843	+
A-4	30.446	30.392	317.4	378.3	0.839	-
A-5	28.537	23.371	225.6	277.5	0.813	-

Fig. 5(b)는 형상인자 중 각도와 관련된 α 와 β 의 관계를 나타낸 것이다. α 는 상류부 각도를 의미하고, β 는 하류부 각도를 의미하는데, β/θ 로 무차원화 하였고, θ 는 각 실험유사의 안식각을 의미한다. l_{max} 와 마찬가지로 입경 프루드수(F_D)와의 관계를 나타내었고 Fig. 5(b)에 나타나있다. 또한 실험유사의 입경과 비중을 고려하는 입경 프루드수(F_D)와의 관계도 지수분포의 관계를 보였다.

$$\frac{\gamma}{\theta} = C \cdot \exp(D \cdot F_D) \quad (2)$$

여기서 C 는 0.17, D 는 0.32, 결정계수(R^2) 값은 0.893이다. 앞서 형성된 더미는 흙의 특성에 따라 기하학적 특성이 다르다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 이러한 기하학적인 특성을 대칭도(S)를 이용하여 각각 분석하였다. 대칭도 S 는 l_{max} 를 기준으로 좌우 면적을 비교하여 산정하였고 도식적 방법론은 Fig. 6(a)에 나타나있다. 대칭도 S 는 공통면적을 전체면적으로 나누고 공통면적을 제외한 후 좌우의 남은 면적을 이용하여 구한 모멘트(M)로 유사 더미의 발달방향을 판단하였다. 대칭도에 대한 자세한 결과는 Table 2와 Fig. 6(b)에 나타내었다. 일반모래의 경우 유속이 증가함에 따라 평형시간이 늘어나기 때문에 형성 면적이 넓어지는 것을 알 수 있으나, 안트라사이트의 경우 고유속에서 유실이 형성 면적에 영향을 미칠만큼 늘어나 면적이 감소하는 것을 알 수 있다. 대부분 형성된 더미의 발달방향은 대칭축을 중심으로 오른쪽(음의 M)으로 형성되었으며 A-2와 A-3은 예외로 왼쪽으로 발달하였다. 대부분 오른쪽으로 형성되는 것은 설치된 호안으로 인한 유속의 방향변화 및 난류의 영향으로 판단되어진다. 유속을 한계유속으로 무차원화한 값에 대하여 대칭도를 살펴보면, u/u_c 이 "1.0"을 넘어서는 순간부터 대칭도 값이 떨어지는 것을 두 실험유사 모두 나타내었다. 또한 모멘트를 분석하였을 때 두 실험유사 모두 대체적으로 음의 모멘트를 가져 S_R (우안 방향)로 발달하는 경향을 나타냈다.

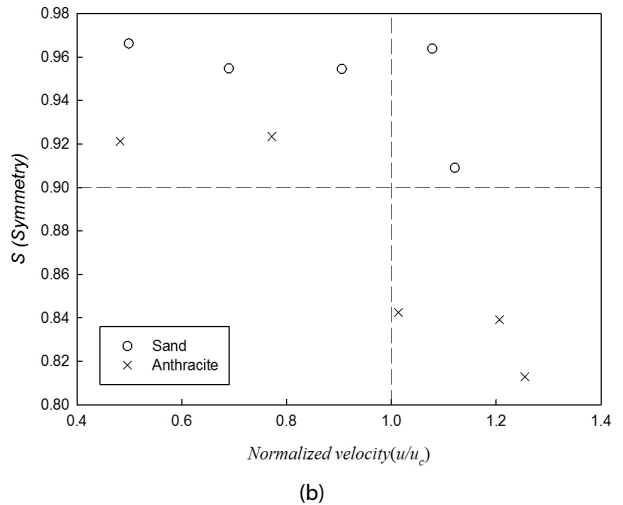
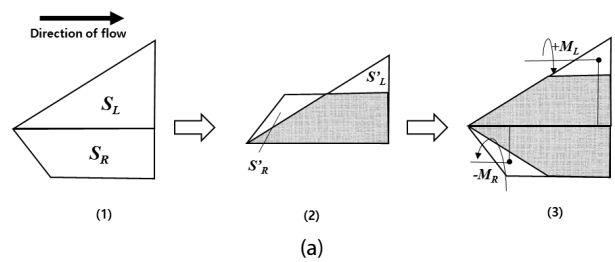


Fig. 6. Symmetry of Deposited Sediments (a) Method to Estimate Symmetry (b) Symmetry with Normalized Velocity

3.2 유실률 결과 및 분석

본 연구에서는 모래의 유실량을 유보구간 외에 존재하는 모래의 양이라고 정의하였고, 원시적인 방법으로 유실률 산정을 수행하였다.

$$Q_t = 60q_s t_d - Q_r \quad (3)$$

여기서, Q_t 은 유실량(g), q_s 은 유사공급장치에 의해 유입된 양(g/s),

Table 3. Results of the Experiments for Loss

Test	u (m/s)	q_s (g/s)	t_d (min)	Q_s (g)	Q_r (g)	Q_l (g)
S-1	0.11	35.4	3.32 ^a	7054	6857	197
S-2	0.16	35.4	5.43 ^a	11537	11247	290
S-3	0.21	35.4	9.73 ^a	20673	18603	2070
S-4	0.25	35.4	15.02 ^a	31913	28934	2979
S-5	0.26	35.4	22.20 ^a	47168	42012	5156
A-1	0.10	16.6	3.15 ^a	3009	2792	217
A-2	0.16	16.6	6.47 ^a	6328	5780	548
A-3	0.21	16.6	14.35 ^b	14185	12937	1248
A-4	0.25	16.6	20.17 ^c	19993	13958	6035
A-5	0.26	16.6	16.53 ^c	15363	9978	5385

t_d 는 실험시간(min), Q_s 은 유보구간 내에 존재하는 모래의 양(g)을 의미한다. 유입된 모래와 유보구간에 남아있는 모래는 모두 건조시킨 모래를 사용했으며 최소단위 0.5 g인 저울을 이용하여 무게를 측정하였다. Table 3은 실험결과가 상세하게 나타나 있다.

일반모래의 경우 모든 유속 조건에 대하여 형성된 퇴적물 높이가 수면에 도달하여 실험이 종료되었지만 안트라사이트의 경우 높은 유속에서는 최고점이 수면에 도달하지 못하고 지정한 스캔 범위에 도달하였을 때를 실험 종료시간으로 하였다. 또한 두 가지 유사 모두 동일한 유입위치에 동일한 폭으로 유입시키기 위하여 동일하게 유사 유입두께와 유입 폭을 설정하였지만 입경과 비중의 차이로 인해 초당 유입량이 약 2배의 차이를 보였다(Table 3).

일반모래와 안트라사이트 모두 유속조건이 한계유속을 넘어서었을 때 유실률이 급격히 증가함을 보였다. 앞서 언급한 초당 유입량의 차이로 인한 한계를 극복하기 위하여 유실률을 산출하였고 유실률은 유입량에 대한 유실량으로 정의하였다. 한계 입경 프루드수 ($F_{Dc} = u_c / \sqrt{g' D_{50}}$)를 넘어서기 전에는 두 가지 실험유사 모두 유실률의 변화가 크게 없지만, 한계 입경 프루드수를 넘어서면 유실률이 일반모래의 경우 약 7.4%, 안트라사이트의 경우 약 24.4% 정도 증가하였고 안트라사이트는 일반모래에 비해 증가율 약 3배 정도로 나타났다(Fig. 7).

입경 프루드수의 경우 일반모래와 안트라사이트의 특성의 차이를 고려할 수 있지만, 일반모래와 안트라사이트는 비중 뿐만 아니라 입경에서도 큰 차이를 보이기 때문에 본 연구의 실험유사가 아닌 다른 모래에 대해서 적용하기 위해서는 입경이나 비중이 동일한 흙으로 실험을 수행하고 분석이 이루어져야 한다. 앞서 언급한 Mavis and Laushey (1948)의 한계유속도 유사와 유사와 입경을 고려한 값이며, 유속 항을 한계유속으로 무차원화하여 유실률과의 관계를 하나의 그래프로 나타낼 수 있었다(Fig. 8). Fig. 8에서 $u/u_c < 1.0$ 이면 유실률이 10% 이내인 반면, $u/u_c > 1.0$ 을 넘어서면

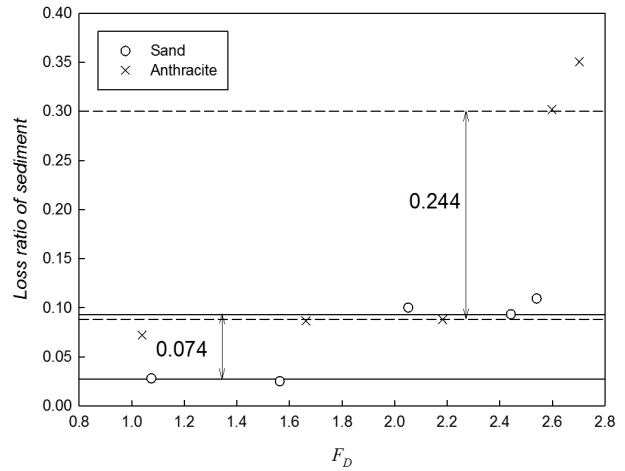


Fig. 7. Loss Ratio of Sediment with Particle Froude Number

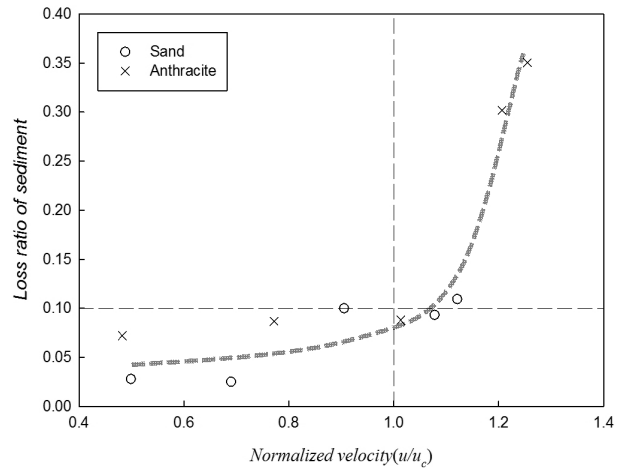


Fig. 8. Relationship between Loss Ratio of Sediment and Normalized Velocity

유실률이 급격히 증가하는 것을 나타내고 현장의 한계유속이 매립공사에 있어 매우 중요한 영향 요소라는 것을 나타내는 결과이다.

4. 결론

본 연구는 해상 매립공사 수행 시 일반적인 1:3 경사를 가지는 원형호안 모형으로 수리실험을 통하여 매립공사에서 물량산정에 중요 인자인 유실률을 분석하였다.

유입된 유사와 형성하는 모래 더미의 형상은 비중이 작은 안트라사이트의 경우 유속에 따라 안식각보다 낮아지는 경향을 보인 반면에, 일반모래는 상·하류부 쪽으로 이루는 각도가 일정한 결과를 보였다. 유속 크기뿐만 아니라 매립토의 특성에 따라 퇴적 형상에 영향을 나타내었다. 유입 유사의 꼬리의 진행각도와 진행길이를

관측한 결과, 일반모래는 진행각이 감소하는 경향을 보였고, 유속이 증가할수록 진행각이 증가하다 일정한 각도를 유지하였다. 진행 길이는 일반모래는 일정하게 증가하는 반면에, 안트라사이트의 경우 한계유속을 지나면 급격히 증가하는 것으로 나타났다 또한, 최대 진행길이, 진행각을 무차원화하여 분석한 결과 모두 입경 프루드수(F_D)에 의해 지수분포를 갖는 것을 알 수 있었다. 형상의 기하학적인 특성인 대칭도(S)를 분석한 결과는 유속이 증가할수록 대칭성이 떨어지는 경향을 보였고, 일반모래의 경우 개수로의 우안 방향(S_R 방향)으로 더미가 발달하는 것을 알 수 있었다.

유입 유사의 유실률은 축조된 호안의 유실률과 경향은 비슷하나 그 값은 재료의 종류에 따라 차이를 나타냈다. 유실률도 형상 변화와 동일하게 한계유속을 넘는 흐름에서 일반모래는 약 7.4%, 안트라사이트는 약 24.4%로 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 유속에 따라 유실률은 각각 2.5~10.9%, 7.2~35.1%의 유실률을 나타냈고, 유실률은 현장의 한계유속의 영향이 크다는 것을 확인하였다.

본 연구는 유실량 산정에 대한 기초연구로 제한적인 변수(유사의 상사성 등)에 대한 한계가 분명히 있으나, 향후 변수를 다양화하여 추가적인 영향요소를 검토하고, 뿐만 아니라, 다양한 매립토를 대상으로 연구를 수행한다면 흙의 특성치에 대한 영향을 보다 명확하게 제시할 수 있을 것이다. 또한, 유실률과 형상변화의 유속범위가 본 실험에서 진행된 조건인 0.10~0.26 m/s에서만 유효하므로, 유속범위를 더 확장하고, 대표평균유속을 좀 더 세분화하여 유실량 변화 구간에 대한 더 정확한 평가를 수행하면, 정밀한 유실량 평가가 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 결과는 유속의 특성에 따른 유실률 변화양상을 보고자 함이었고, 이를 기초로 하여 유속 (흐름)의 특성을 포함하고, 파의 영향, 준설토의 물리적 특성 등 다양한 인자들을 고려하여 향후 추가실험을 수행하여 해안매립공사에 보다 정도높은 매립 기준을 제시할 수 있을 거라 생각한다.

감사의 글

이 논문은 삼성물산(주) 건설부문의 지원을 받아 수행된 “모래매립 호안의 수중 유사 거동특성과 유실량 평가를 위한 수리실험”의 연구결과와 일부입니다.

References

Ahn, K. K., Lee, K. H., Heo, Y. and Kang, H. S. (2014). “Sedimentation characteristics of dredged soil by geo-centrifuge.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 3,

pp. 49-55.
 Azimi, A. H., Zhu, D. Z. and Rajaratnam, N. (2014). “Experimental study of subaqueous sand deposition from Slurry Wall Jets.” *Journal of engineering mechanics*, Vol. 140, No. 2, pp. 296-314.
 Bhuiyan, F., Rajaratnam, N. and Zhu, D. Z. (2010). “An experimental study of mounds formed by dumping coarse sediment in channel flow.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, No. 3, pp. 283-291.
 Imran, J., Parker, G. and Harff, P. (2002). “Experiments on incipient channelization of submarine fans.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 21-32.
 Jie, G. U., Huang, J. and Li, C. W. (2008). “Experimental study of instantaneous discharge of unsorted particle cloud in cross-flow.” *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 20, No. 1, pp. 10-16.
 Kim, H. T., Han, Y. J. and Yu, W. D. (2013). “A study on the mechanical characteristic and shear strength characteristic on elapsed time of the western sea dredged soils.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 31-41.
 Kim, H. T., Kim, S. Y., Kang, I. K. and Park, J. E. (2000). “A study on the estimation of loss rate of dredged fills.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 1, No. 1, pp. 57-63.
 Kim, S. Y., Choi, H. P., Park, J. E. and Kim, S. W. (2002). “A study on the estimation method of loss ratio in dredged fills.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 3, No. 1, pp. 66-77.
 Mavis, F. T. and Laushey, L. M. (1948). “A reappraisal of the beginning of bed movement-competent velocity.” *Intern. Assoc. Res., 2nd Meeting*, Stockholm.
 Rajaratnam, N. and Mazurek, K. A. (2006). “An experimental study of sand deposition from sediment laden water jets.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 44, No. 4, pp. 560-566.
 Shin, H. S. (2014). “Numerical formulation for flow analysis of dredged soil.” *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 3, pp. 41-48.
 Souza, L. B. S., Schulz, H. E., Villela, S. M., Gulliver, J. S. and Souza, L. B. S. (2010). “Experimental study and numerical simulation of sediment transport in a shallow reservoir.” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 2, pp. 9-21.
 Syvitski, J. P., Skene, K. I., Nicholson, M. K. and Morehead, M. D. (1998). “PLUME1. 1: deposition of sediment from a fluvial plume.” *Computers & Geosciences*, Vol. 24, No. 2, pp. 59-171.
 United States Army Corps of Engineers (USACE) (1983). *Dredging and Dredged Material Disposal, Engineer Manual*, No. 1110-2-5025, Washington.
 Yauchi E. and Katoh, K. (1992). “Dispersion process and the settlement pattern of mud dumped in oceans.” *Proc. of 23rd Int. Conf. on Coastal Engrg.*, ASCE. Venice, Italy, pp. 2735-2744.
 Ziegler, C. K. and Lick, W. (1988). “The transport of fine-grained sediments in shallow waters.” *Environmental Geology and Water Sciences*, Vol. 11, No. 1, pp. 123-132.

Appendix. 기호

d_{50} : 중앙 입경	S_{com} : 대칭축으로 단면을 회전시킨 후 나타나는 공통된 단면
Fr : Froude number	S_{total} : 대칭축 위·아랫 단면의 합
F_D : 입경 Froude number	M : 대칭축 위·아랫 단면의 모멘트 합
h : 수심	T : 유압유사 두께
l_{max} : 형성된 더미의 최대길이	t : 실험 시간
l_x : x 방향의 형성된 더미 길이	t_d : 실험 종료 시간
Q_l : 유사 유실량	u : x 방향의 유속
Q_s : 유사 유입량	u_c : 한계유속
Q_r : 유사 유보량	X : 실험 좌표계의 x 좌표
q_s : 유사의 초당 유입량	α : 단면의 상류부 각도
S : 대칭도	β : 단면의 하류부 각도
S_R : 대칭축 아랫 단면	γ : 물의 단위중량
S_L : 대칭축 윗 단면	γ_s : 흙의 단위중량
	θ : 안식각