



배수문에서 실내모형실험에 의한 무동력 토사제거시스템의 수리 특성

Hydraulic Characteristics of the Non-power Soil Cleaning and Keeping System by the Large-Scale Model Test at the Dike Gate

박찬근* · 오범환** · 이달원***,†

Park, Chan Keun · Oh, Beom Hwan · Lee, Dal Won

Abstract

In this study, the large-scale hydraulic model test was performed to investigate the hydraulic characteristics for development of the non-power soil cleaning and keeping system at the dike gate. The outlet height, outflow number, outflow discharge, and outflow cycle were compared and analyzed. The non-power soil cleaning and keeping system was most effective at 11.2 mm in the outlet height. And then the mean outflow cycle was 1.09 sec, and the mean outflow discharge was 0.00164 m³/s. The total outflow number increased gradually as the water level of a water tank increased, and the outlet height decreased. As a level of water tank decreased, the mean outflow cycle was lengthened, and the unit outflow discharge increased. This result showed this system was most effective. To remove the silty clay deposited in facilities, the methods of excavation, dredging, high pressure washing, etc have been applied to the tidal facilities such as land reclamation, a small size fishing port, and a harbor for maintenance. However, this is extremely cost-ineffective, whereas the non-power soil cleaning and keeping system will bring about an enormously positive economic effect. In addition, when the non-power soil cleaning and keeping system is applied to the dike gate of land reclamation, a thorough examination of the local tidal data and the careful system planning are required to prevent the disaster damage caused by flooding.

Keywords: Soil cleaning and keeping system; Dike gate; Outflow cycle; Model test; Outlet height; Water tank

1. 서론

우리나라 서·남해안지역은 리아스식 해안으로 조수간만의 차가 세계적으로 큰 지역 중에 하나이며 갯벌퇴적이 활발히 이루어지고 있다. 갯벌면적은 2487.2 km²로 전체 국토면적의 2.5%를 차지하고 있고, 풍부한 어족자원과 토지를 제공해 주기도 하지만 해안지역에 위치한 감조구조물의 기능을 보전하는 데는 큰 장애요소가 된다.

서·남해안지역은 오래전부터 간척사업이 많이 이루어졌다. 간척사업의 주요 시설물로는 해수와 해일을 차단하는 방조제, 담수호와 함께 조성된 농경지, 재해예방과 수자원 활용 및 통제에 필요한 배수문 등이 있다. 그 중 배수문은 그 기능을

극대화하기 위해 대부분 간척지의 가장 낮은 곳에 위치해야 하는데, 대부분의 서·남해안지역 배수문은 토사퇴적문제가 끊임없이 발생하고 있으며, 배수문 작동불능으로 인한 침수 피해 위험성이 항상 내재되어 있다.

토사퇴적이 심한 배수문은 기능을 보존하기 위해 정기적으로 장대뚝(Boom) 포크레인에 의한 굴착, 바지선을 이용한 준설, 고압분사에 의한 세척, 선박스크루우에 의한 교란유하방법 등을 이용하여 퇴적토사를 제거하고 있다. 이와 같이 현재까지 개발된 퇴적토사 제거방법은 인위적인 방법으로 반복적이며 지속적인 비용이 발생하는 일시적인 제거방법이기 때문에 시설물관리자로서는 큰 재정 부담이 되고 있다. 가장 최근에 개발된 퇴적토사제거시스템 또한 인위적으로 바닷물을 배출시키는 방식으로 지금까지의 개발된 방법은 에너지공급 없이는 작동이 불가능 하였다. 오늘날 배수문, 항포구 등 농업 및 수산어업시설이 갯벌퇴적으로 그 기능과 역할이 퇴색하여 시설폐쇄 또는 축소로 지역경제에 악영향을 끼치는 경우가 빈번히 발생하고 있어 이에 대한 대책이 절실히 요구된다.

우리나라 서해안에서 방조제 건설 후 대조차 조간대의 계절별 퇴적학적 특성과 퇴적환경은 계절풍, 파랑과 조석작용에 의해 영향을 받고, 강한 조류, 파랑, 태풍 등에 의해 시간이 경과함에 따라 조립화 되는 현상을 나타내고 있으며, 조석사

* Manager, Korea Rural Community Corporation(KRC), Gongju, Chungnam, 314-802, Korea

** Director, Korea Rural Community Corporation(KRC), Daejeon, 302-828, Korea

*** Professor, Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea

† Corresponding author

Tel.: +82-42-821-5793 FAX: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

Received: July 21, 2014

Revised: September 17, 2014

Accepted: September 17, 2014

주가 잘 발달되어 있는 해역에서 사질토의 이동방향은 침투 조류의 방향에 의해 결정된다는 연구가 수행되었다 (Shin et al., 2004; Choi, 1985; Jung, 2008).

Lee and Park (2013)은 군산항의 유사퇴적 현상을 정량적으로 파악하고 합리적인 대책을 마련하기 위하여 유사이송모형을 기초로 퇴적고를 계산하였다. Lee et al. (2012)은 우리나라 조간대의 36%를 차지하고 있는 경기만 일원에서 연약지반의 형성 환경에 따른 퇴적단위를 구분하고, 각 단위 지층의 광물조성과 물리화학적 특성을 제시하였다. Jung et al. (2010)은 항만구조물 설계 시 태풍에 의한 피해를 방지하기 위하여 장대 케이슨 방파제에 작용하는 다방향 불규칙파랑의 파력감소계수를 산정하였고, Kim et al. (2010)은 직립 케이슨 전면에서 파랑증폭에 의해 발생하는 월파랑 산정식을 제시하고 수리모형실험을 통하여 비교분석하였다.

Lee et al. (2007)은 배수갑문 주위의 흐름현상을 수리모형실험과 3차원 수치해석을 통해 비교분석하였다. Kim et al. (2005)은 방류능력 개선을 위해 수치해석을 실시한 결과, 구조물의 형상, 도류벽의 접근각도 및 사면경사의 영향을 받는다고 하였다. 이와 같이 기존의 연구들은 항만구조물에 영향을 미치는 퇴적환경 특성, 수치해석 등에 대해 주로 연구되었고, 토사제거시스템에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

이에 대한 대처방안으로 개발된 토사제거시스템은 하루 평균 2차례 발생하는 조석현상을 이용하기 때문에 인위적인 에너지가 필요 없는 친환경적인 토사제거시스템으로서 반영구적인 시스템이다. 이와 같이 조석시마다 쌓이는 토사를 자연의 대기압, 조석현상, 관성의 법칙 등 물리-해양학적 현상을 공학적으로 응용하여 간척농업, 수산업, 해운업 등 여러 분야에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 중소규모 항-포구 토사퇴적방지사업, 어촌생활환경개선사업, 해양환경복원사업, 배수문 토사퇴적방지사업 등 해양자원과 관련된 인프라 개발의 기초기술이 될 것으로 판단되고, 배수문 및 항-포구 시설의 기능을 항상 최적의 상태로 유지할 수 있도록 개발된 무동력 토사제거시스템에 대한 연구를 통하여 현장적용기준을 마련할 필요성이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 우리나라 서-남해안에 설치된 감조 시설물의 토사퇴적으로 인하여 기능과 역할이 쇠퇴하고, 막대한 경제손실을 가져오고 있는 현실에서 친환경적인 무동력 토사제거시스템을 개발하여 수리모형실험을 실시하고, 시스템의 메커니즘에 영향을 미치는 요소들을 비교분석하여 최적의 현장적용조건을 찾고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 분석대상지구

본 연구에서는 충남 보령시에 위치한 대천방조제 제2호 배수문 (1990년)을 대상으로 하였고, Fig. 1은 배수문 양안에 토사제거시스템의 설치예를 나타낸 것이다. 대천항의 2년간 조위자료를 바탕으로 분석을 실시하였고, 배수문 Sill 표고 (-2.00 m)를 기준으로 시스템의 제반제원을 검토하였다 (Fig. 2).

최고조위는 수조 높이를 결정하는 데 적용되고, 수조 높이는 시스템이 자연재해로부터 안전을 확보하는 데 기초자료가 된다. 조사기간내 대천항의 평균고조위는 (+)246.25 cm 이고 최고조위는 (+)407.00 cm 이었다. 저조위는 시스템의 설치고, 규모 및 가동률을 결정하는 데 적용되며 조사기간내 평균저조위는 (-)236.98 cm, 최저조위는 (-)395.00 cm 이었다.

배수문 Sill 표고는 시스템 바닥계획고와 직접적인 관련이 있으며, 서-남해안지역에 간척사업으로 설치된 배수문에 대한 내역은 자료수집에 한계가 있어 한국농어촌공사 관리시설로 국한시켰으며, 실제로는 지방자치단체에서 관리하는 배수문은 이보다 훨씬 더 많다고 알려져 있다 (Table 1).

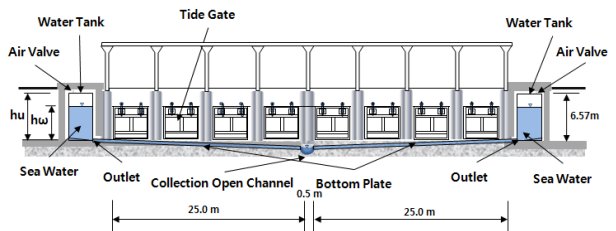


Fig. 1 Non-power soil cleaning and keeping system at the dike sluice

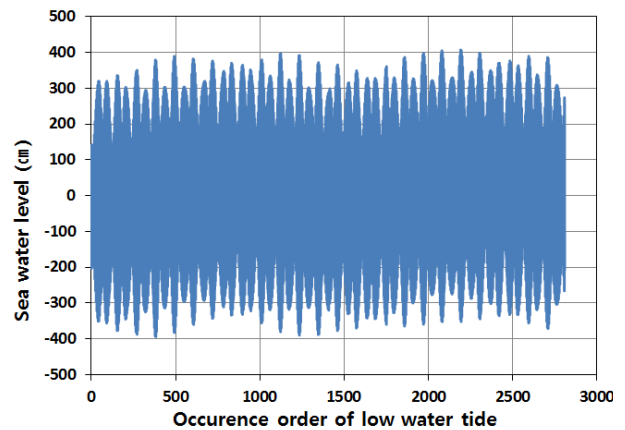


Fig. 2 Tidal curve in Taecheon port (2012.1.1~2013.12.31)

Table 1 Regional distribution of sea dike gate

| Classification | Gate sill elevation (m) | | | | | | | |
|----------------|-------------------------|------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Total | >0.0 | 0.0~1.0 | -1.0~-2.0 | -2.0~-3.0 | -3.0~-4.0 | -4.0~-5.0 | -5.0~-6.0 |
| Total | 150 | - | 47 | 53 | 34 | 12 | 2 | 2 |
| Incheon | 30 | - | 10 | 10 | 10 | - | - | - |
| Gyeonggi | 8 | - | 1 | 2 | - | 5 | - | - |
| Chungnam | 19 | - | 6 | 5 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| Jeonbuk | 2 | - | - | 1 | 1 | - | - | - |
| Jeonnam | 91 | - | 30 | 35 | 19 | 5 | 1 | 1 |



Fig. 3 The tide distribution map in Korea

대전방조제 배수문 전면부에 퇴적한 토사도 대부분의 서남해안지역의 갯벌과 같이 통일분류법상 실트질점토 (ML)로 큰 입경은 0.2 ~ 0.7 mm 이다. 또한 본 시스템은 조석간만의 차가 클수록 효과적이는데 적용가능지역은 주로 서남해안이다.

Fig. 3은 우리나라 서해안의 조석간만의 차를 나타낸 것으로 인천부근이 8.0 ~ 8.2 m, 충남 보령부근이 6.0 ~ 8.0 m, 전북 군산부근이 4.5 ~ 6.5 m, 전남 목포부근이 3.2 ~ 4.0 m 범위이다(Lee, 2008). 대상지구 선정 요인은 간만의 차가 인천항과 목포항의 중간치인 6.0 m 범위로 향후 시스템을 현장에 적용함에 있어 수리학적 대표값을 얻을 수 있으리라 판단되었다. 또한 토사퇴적량이 해마다 70 ~ 80 cm 이상에 이르러 토사 퇴적방지시스템이 조속히 설치돼야 하는 농업시설로 판단하였기 때문이다.

2. 사용시료

Fig. 4는 대전방조제 제2호 배수문 전면부 퇴적토사의 입

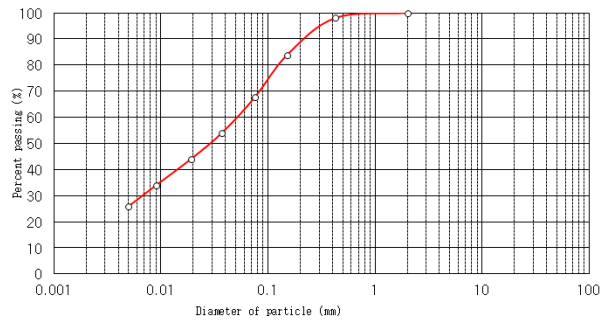


Fig. 4 Grain size distribution (Taecheon tide-gate)

도곡선을 도시한 것이다. 바다판위에 침적하는 토사는 지역별, 계절별로 차이는 있지만, 일반적으로 실트질 점토 (ML)가 대부분이다. 또한, 입경은 0.074 mm 이하가 60 ~ 70 % 이상, 0.15 mm 이하는 약 80 % 이상을 차지한다.

일반적으로 퇴적은 토립자가 1일 2회 발생하는 조석해류에 혼합되어 부유하다가 유속이 적은 곳에 이르러 침강하여 발생하며, 압밀은 토립자 자중과 해수중량에 의해 진행되어 대단히 영성한 구조를 갖는 과소압밀상태이다. 통일분류법상 퇴적토사는 대부분 과포화상태의 실트질점토 (ML)로 전단강도와 자중이 대단히 작아서 흐르는 물에 대한 저항력이 극히 약하다. Hjulström's diagram (1942)의 자료에 의하면 입경 0.3 ~ 0.4 mm의 토사는 0.3 m/s 이상의 유속에서 떠내려가는 것으로 판명되었다. 본 연구에서는 시스템 설치 후 썰물시 해수위가 강하여 유출구 (outlet)가 노출될 때 수조내부 해수가 자연적으로 유출되어 퇴적토사를 제거하는 일련의 작동과정을 재현하였다. 시스템 바다판위에 건조된 실트질 점토를 균등하게 침강시킨 후 유출구의 높이, 유출횟수, 유출시간, 유출량 등의 변화에 따른 실험을 실시하였다. 토사제거 효율 평가는 포설된 실트질 점토가 유출구의 높이, 유출횟수, 유출시간, 유출량 등을 어느 정도 변화시켰을 때 바다판 밖으로 제거되는지를 확인 하였다.

3. 실내모형실험

가. 수리모형실험

수리모형실험장치는 수조, 바닥판, 공기밸브, 보호구조물로 구성되며 현장에 설치되는 수조 (water tank)의 규모는 조석간만의 차이, 유출구 계획고, 바닥판의 길이, 경사도 및 조도계수와 수조 유출구 (outlet)의 높이 (h_o)에 따라 결정된다. 실제로 현장에 설치되는 수조는 높이 (h_u)가 3 ~ 8 m 내의,

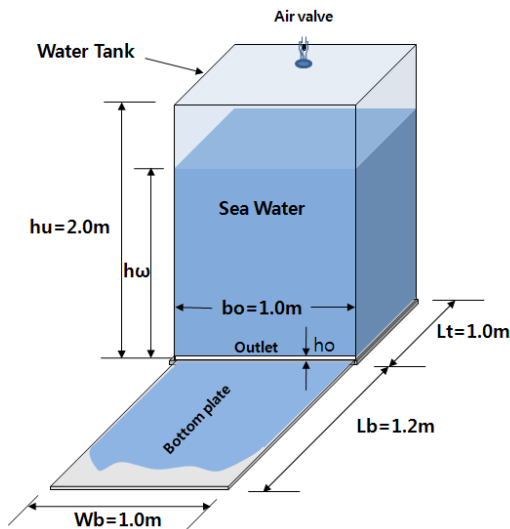


Fig. 5 Model test apparatus of the non-power soil cleaning and keeping system

Table 2 Size of laboratory model apparatus

Unit : mm

| Classification | Width (b_o, W_b) | Height (h_u) | Length (L_o) | Material | Remark |
|----------------|----------------------|------------------|------------------|----------|-----------|
| Water tank | 1000 | 2000 | 1000 | Steel | Air valve |
| Bottom plate | 1000 | - | 1200 | Concrete | Concrete |

길이 (L_T)는 2 ~ 5 m 내외가 제작은반성, 시공성을 고려할 때 적절할 것으로 사료되고, 대천 2호 배수문의 경우 수조의 실제 크기는 길이 (L_T) 3.0 m × 폭 (W_T) 3.0 m × 높이 (h_u) 6.0 m 로 이에 대한 축척은 실험실의 실내공간을 고려하여 1/3 크기로 결정하였다. 수리모형의 규모는 Fig. 5와 같이 길이 (L_T) 1.0 m × 폭 (W_T) 1.0 m × 높이 (h_u) 2.0 m 로 재질은 철판으로 제작하여 외부압력 (대기압)에 대한 변형을 최소화하고 수밀성을 확보하였다. Table 2는 실내수리모형실험장치의 제원을 나타낸 것이다

바닥판은 실제와 동일한 조도계수 (n)를 나타낼 수 있도록 현장타설 콘크리트로 제작하였다. 실제로 설치되는 바닥판의 길이는 수 m 에서 수십 m 에 이르므로 유출구로부터 멀어질수록 흐름은 물결이 잔잔한 상태가 된다. 본 수리모형실험에서는 바닥판의 길이가 1.2 m 로 짧아 유출시 발생하는 물결은 여러 입경의 시료를 교차배열하여 최대한 안정화 시켰다.

수리모형실험은 유출구의 높이를 9.0 ~ 15.0 mm 범위, 수조내부평균수위는 0.1 ~ 1.7 m 범위로 변화시키면서 유출횟수, 유출주기, 유출소요시간, 유출량 등의 변화를 고찰하였다.

나. 토사제거 시스템의 메커니즘

Fig. 6은 토사제거시스템에 작용하는 내외부의 힘을 도시한 것이다. 경계면 내외부에 작용하는 힘의 크기에 따라 대기압의 공기가 유입되거나 수조의 바닷물이 유출된다. 이러한 압력변화에 따른 체적변화 특성으로 해수위 (h_s)가 유출구 (h_o) 이하로 내려가면 유출구를 통해 공기유입과 바닷물의 유출이 관성력을 갖고 주기적인 유출입운동을 발생시키고, 이러한 유출입운동은 수조 내부 바닷물이 소진될 때까지 연속적으로 이루어진다. 그러나 이러한 운동은 유출구의 높이 (h_o)가 일정높이 미만이면 발생하지 않으며, 높이가 크게 높아지면 주기적인 메커니즘이 깨어지고 불규칙하게 또는 혼합

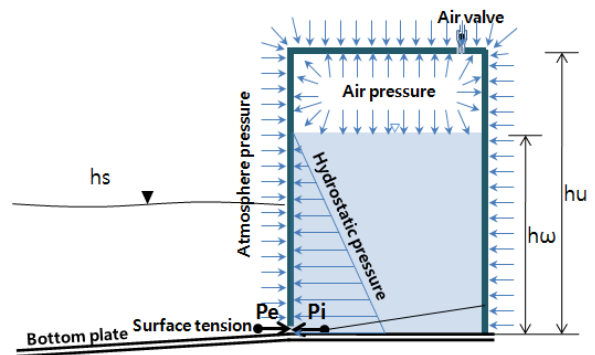


Fig. 6 The distribution of pressure around the non-power cleaning and keeping system

Table 3 System mechanism

| Progression | | External force of the water tank (Pe) | Internal force of the water tank (Pi) | Air valve | Boundary surface force | Internal water level |
|-------------|---|---|---|-----------|--|----------------------|
| Ebb Tide | | Atmosphere pressure | Internal air pressure | Close | $P_e = P_i$ | - |
| Ascending | $h_s \langle$ Outlet | Atmosphere pressure | Internal air pressure | | $P_e = P_i$ | - |
| | $h_s \rangle$ Outlet | Atmosphere pressure Hydrostatic pressure | Internal air pressure Hydrostatic pressure | Open | $P_e < P_i$ | Ascend |
| High Tide | | Atmosphere pressure Hydrostatic pressure | Internal air pressure Hydrostatic pressure | Close | $P_e = P_i$ | Stop |
| Descending | $h_s \rangle$ Outlet | Atmosphere pressure Hydrostatic pressure | Internal air pressure Hydrostatic pressure | | $P_e = P_i$ | Stop |
| | Outlet $\rangle h_s \rangle$ Bottom plate | Atmosphere pressure Surface tension | Internal air pressure Hydrostatic pressure | | $P_e > P_i$ \updownarrow $P_e < P_i$ | Descend |
| | $h_s \langle$ Bottom plate | Atmosphere pressure | Internal air pressure | | $P_e = P_i$ | - |
| Ebb Tide | | Atmosphere pressure | Internal air pressure | | $P_e = P_i$ | - |

하여 동시에 발생한다 (Park, 2013).

본 수리모형실험의 목적은 퇴적토사제거시스템의 이러한 자연현상에 따라 만조 시 대기압을 이용하여 수조 (water tank)에 최대 10.33 m 높이까지 바닷물을 유지하다가 썰물 시 유출구를 통해 적정량을 반복적으로 유출시켜 퇴적된 토사를 제거하는 무동력 시스템의 거동을 파악하는 데 있다.

Table 3 은 토사제거시스템이 간조에서 만조 또는 만조에서 간조에 이르는 메커니즘을 설명한 것으로 썰물 시 유출구를 통해 해수가 유입되고, 폐쇄된 수조 내부공간에는 공기압이 증가하여 수조 상단의 공기밸브가 열리게 된다. 만조에 이르면 공기밸브는 중력에 의해 자동으로 닫히고 수조 내부의 압력은 외부 대기압과 거의 일치한다. 썰물 시 공기밸브가 닫힌 수조 내부 수위는 정지한 상태로 유지되고, 해수위가 낮아질수록 내부공기압은 정수압만큼 감소하게 된다. 해수위가 계속 하강하여 유출구 이하로 내려가면 유출구를 경계면으로 외부측면에는 대기압과 표면장력이 작용 (P_e)하고, 내부측면에는 정수압과 공기압이 작용 (P_i)하게 된다 (Stewart, 2011).

III. 결과 및 고찰

1. 유출구의 높이 (h_o)에 따른 유출횟수 (N)의 변화

실제의 수조는 콘크리트구조물 내부에 위치하므로 직사광선에는 노출되지 않으나, 항상 높은 염도의 바닷물에 접하므로

내염성이 강한 재질로 만들어져야 한다. 또한 수조의 재질은 공기침투가 발생하지 않도록 완전한 기밀성이 요구되고, 외부면에 작용하는 대기압에 대해 구조역학적으로 안전해야 한다.

시스템은 구조가 크게 수조와 유출구, 공기밸브로 구성되며, 유출구는 시스템이 작동될 때 바닷물과 공기의 입출통로 역할을 하게 된다. 유출구의 높이 (h_o)는 시스템의 성능에 직접 영향을 미치므로 설치지역의 여러 조건을 적절하게 고려하여 결정하여야 한다. 유출구의 높이는 토사퇴적량, 토사의 입도분포, 조석의 크기, 바닥판의 경사도 (I_b)와 조도계수 (n) 등에 따라 결정한다.

토사퇴적은 유역의 토질, 강우특성 및 피복식재상태 등의 육상조건, 해안의 지형 및 해류의 흐름, 너울성 파도 등의 해상조건과 태풍, 해일 등의 기상조건에 따라 다르다. 퇴적량은 작게는 연간 수 mm 부터 크게는 수십 cm 에 이르며, 태풍이나 해일 등 조건에 따라서는 일시적으로 작은 면적에 집중적으로 퇴적하는 경우도 있다.

토립자의 크기는 퇴적조건에 따라 다르게 나타나는 데, 평상시에는 점토질 또는 유기질의 미세입자가 주로 퇴적되지만 태풍이나 해일 시에는 실트질이나 모래와 같은 비교적 큰 입경의 토립자가 다량으로 퇴적한다. 시스템 운영에 있어 퇴적량이 많이 발생하는 경우 일시적으로 시스템을 조정하여 유출구의 높이를 크게 하여 유출량을 증대시키거나, 공기밸브를 개방하여 수조의 상부공간을 대기압력으로 환원하여 정수압으로 퇴적토사를 제거할 수 있다.

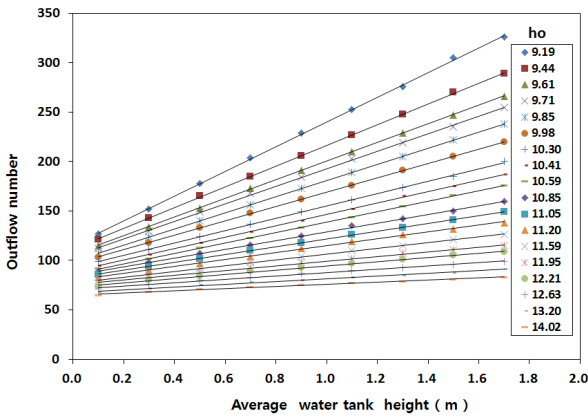


Fig. 7 Variation of outflow number and height of water tank according to outlet height

Fig. 7은 유출구의 높이 (h_o)에 따른 수조 내부수위 (h_w)와 총유출횟수 (N)와의 관계를 나타낸 것이다. 수리모형실험은 2.0 m 높이 수조에 1.8m 높이까지 물을 채우고, 수조 내부수위를 0.2m 간격으로 구간을 설정한 후 각 구간별 소요시간과 유출횟수 등을 측정하였다. 유출구의 높이는 9.0 ~ 15.0 mm 범위 내에서 적정 간격으로 증감하여 각 구간별 소요시간과 유출횟수를 측정하였고, 높이는 유출구 양단높이의 평균값을 적용하였다.

수조 내부수위 (h_w)가 높을수록 유출횟수 (N_i)는 증가하고, 반대로 유출구의 높이 (h_o)가 낮을수록 유출횟수는 증가하는 것으로 분석되었다. 유출구의 높이가 낮을수록 1회 유출량도 적어지고, 이에 연동하여 1회에 유입공기량도 적어지는 것으로 분석되었다. 유출로 수조 내부수위가 낮아질수록 공기로 채워지는 상부공간은 확대되며, 공기는 기체로서 액체와는 달리 압력변화에 따른 체적변화가 탄력적이다. 또한, 체적변화의 폭은 수위가 낮아질수록 증대되므로 1회 유출량은 내부수위가 낮아질수록 증대되고, 유출관성이 커져 유출주기 (T_L)가 길어지며 유출횟수 (N_i)는 감소하는 것으로 분석되었다. 수중에서 공기방울은 일정한 속도로 상승하며 상승 속도는 보통 0.4 ~ 0.6 m/s 정도이다. 수위가 높을수록 공기방울이 상부공간에 도달하는 소요시간이 길게 걸리므로 유출주기도 길어진다.

즉 유출횟수는 수조에서 유출구로 반복적으로 흘러나오는 횟수를 의미하며, 유출구에서 유출횟수가 많아질수록 바닥 판에서 제거되는 토사량은 많아진다. 퇴적된 실트질 점토는 포화된 상태이므로 작은 물결의 충격에도 쉽게 교란되므로 유출횟수를 최대한 많이 일으켜 충격횟수를 증대하는 것이 토사제거에 더욱 효과적이다.

Fig. 8 은 유출구의 높이에 따른 총유출횟수와와의 관계를 나

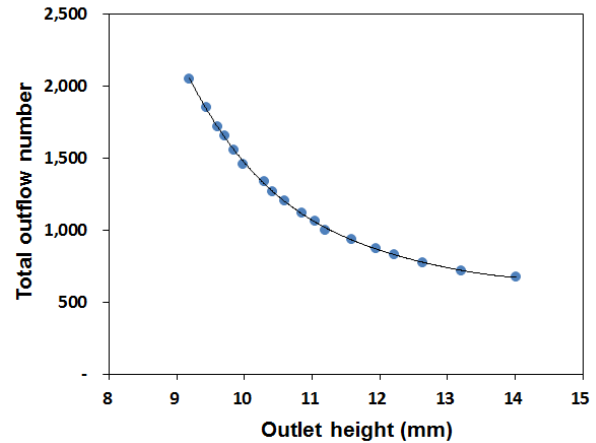


Fig. 8 Total outflow numbers according to outlet height

타낸 것이다. 실험결과로부터 수조 내부수위가 1.80 m 일 때 유출구의 높이 (h_o)와 총유출횟수 (N)의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = 3h_o^4 - 158h_o^3 + 3090h_o^2 - 27166h_o + 91587 \quad (1)$$

($h_w : 1.80 \text{ m}$)

여기서, N : 총 유출횟수, h_o : 유출구의 높이

2. 유출구의 높이 (h_o)에 따른 유출주기 (T_L)의 변화

바닥물속에 퇴적한 실트질점토는 완전히 포화되어 있고 결합력이 미약하여 작은 충격에도 쉽게 교란되므로 퇴적토사 제거 시 물결을 일으켜 충격을 가하는 것이 효과적이다. 따라서, 동일용량의 수조로부터 유출구의 높이 (h_o)를 결정할 때 유출주기 (T_L)를 짧게 하여 단위유출량을 적게 하는 것 보다 유출주기를 길게 하여 단위유출량을 크게 하는 것이 더 큰 물결을 일으킬 수 있으므로 퇴적토사제거에 훨씬 효과적이다. 즉 침식유속을 확보할 수 있는 최소유출량 이상으로 가능한 유출주기를 길게 하는 것이 가장 이상적인 시스템 운영방법이라 할 수 있다.

Fig. 9는 유출구의 높이에 따른 유출주기를 나타낸 것으로 유출구의 높이에 따른 평균유출주기는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_L = -0.0256h_o^2 + 0.5782h_o - 2.1651 \quad (h_w = 1.8 \text{ m}) \quad (2)$$

여기서, h_o : 유출구의 높이, T_L : 평균유출주기

그림에서 보는 바와 같이 평균유출주기의 최대값은 유출구의 높이가 11.2 mm 일 때로 그 값은 약 1.09 초이다. 이것은 바닥판 위로 유출수를 가장 효과적이며 경제적으로 흘러내릴 수 있는 하나의 조건이 된다. 이 결과는 실험실내 모형실험에 의한 것으로 현장에 실제 적용 시 지형적, 기상학적, 시스템운영 여건 등 퇴적상황에 대해 객관적인 타당성을 갖추어야 한다.

본 연구에서는 모형실험규모에 맞추어 유출구의 높이를 9.0 ~ 15.0 mm 범위 내에서 적정 간격으로 증감하여 가장 적합하고 경제적인 유출구의 높이를 찾아내는 것이 중요한 목적이다. 현장에서 유출구의 높이는 시스템의 규모 및 위에서 언급한 여러 가지 조건에 따라 변하지만 관계식으로부터 적정한 높이를 추정할 수 있다.

실내모형실험에서 적용률 10 % 일 경우에 유출구의 높이는 10.2 ~ 12.4 mm 범위로 나타났고, 유출수는 이 범위 안에 있을 때 1.06 ~ 1.09 초 유출주기로 물결을 바닥판 하류로 전파하면서 퇴적된 토사층을 교란시킨다. 이 때 단위폭 (b_o)당 유출량은 0.00128 ~ 0.00198 m^3/sec 정도이다.

1회의 밀물에 의한 퇴적량은 미량이지만 장기간 누적되면 시설물의 기능을 저하시키므로 제거의 대상이 된다. 토사퇴적은 수중상태에서 침강하여 발생하고 입경이 미세하고 결합력이 아주 약하여 전단강도가 거의 "0"에 가깝다. 토사제거시스템은 현재의 장기간 퇴적된 갯벌을 제거하는 것이 아니라, 시스템 설치 후 밀물 시 바닥판위에 퇴적한 토사를 썰물 때마다 무동력으로 제거하여 토사가 시설물에 침적되지 않도록 하는 것이다. 썰물 시 바닷물 수위가 바닥판위를 벗어나는 동안 물을 반복적으로 흘러내려 보내 미세토사를 썰물과 함께 제거되는 것으로 모형실험 시 2%의 바닥판 경사에서 완전히 제거되는 것을 확인하였다.

그러나 현장에 시스템을 설치할 경우는 감소시설물의 기능을 고려하여 설치하여야 하며, 유출량을 증가시키면 수조

규모가 과대해져 비경제적이고 되고, 바닥판의 경사도 (t_b)는 한계침식유속 이상이 되어야 가장 효과적이며 경제적인 최적의 퇴적토사제거시스템이 된다.

서남해안에서 일반적으로 퇴적되는 실트질점토는 과포화 상태에서 유수에 대한 저항력이 거의 없고, 배수문 퇴적토사의 큰 입경이 0.2 ~ 0.7 mm 범위일 때 본 시스템의 평균유출량에서는 충분히 운반이 가능하기 때문에 퇴적되지 않는 것으로 판단된다.

3. 유출소요시간 (t_o)의 산정

시스템 운영 시 바닥판위의 퇴적토사를 완전히 제거하기 위해서는 썰물 시 바닥판 전체가 노출될 때까지 연속적으로 바닷물을 흘러내려 보낼 수 있도록 충분한 유출소요시간을 확보해야만 한다. 수조 내부수위가 낮아질수록 유출소요시간은 빨라진다.

Fig. 10은 수조 내부수위가 1.80 m 일때 유출구의 높이 (h_o)와 유출소요시간 (t_o)과의 관계를 나타낸 것으로 관계식은 다음과 같다.

$$t_o = 1E+06h_o^{-2.82} \quad (\text{단, } h_o : 1.8 \text{ m}) \quad (3)$$

여기서, h_o : 유출구의 높이, t_o : 유출소요시간

모형실험 결과, 수조의 용량이 1.80 m^3 (1.0 m \times 1.0 m \times 1.8 m) 이고, 유출구의 높이를 11.2 mm 로 유지하면 유출소요시간 1,098 초 (18분 18초) 동안 바닥판 위로 물을 평균 1.09 초 주기 (T_d)로 흘러내려 보내 퇴적된 토사를 제거할 수 있었다.

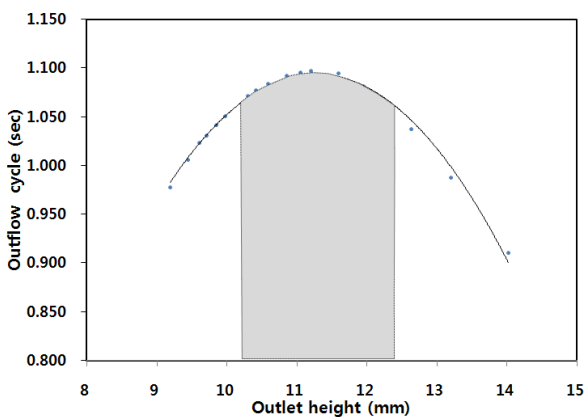


Fig. 9 Variation of outflow cycle according to outlet height

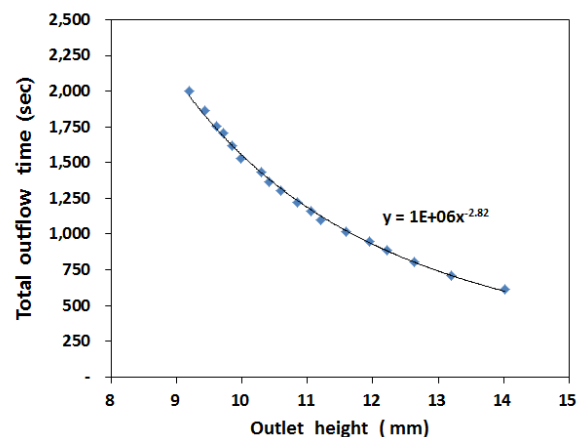


Fig. 10 Variation of total outflow time according to outlet height

4. 유출구의 높이 (h_o)에 따른 유출량 (q_o) 변화

유출구의 폭(b_o)이 일정할 때 유출구의 높이(h_o)가 증가함에 따라 단위시간당 유출량은 증가하고 유출소요시간(t_o)은 감소한다.

유출수는 침식유속으로 일정시간 지속되어야만 바닥판위 퇴적토사를 완전히 제거할 수 있으며, 침식유속을 유지하기 위해서는 적절한 바닥판 경사와 단위유출량(q_o)이 결정되어야 한다. 침식유속을 확보하고자할 때 유출구의 높이를 조절하여 유출량만을 증가시킨다거나 바닥판 경사도(I_b)만을 크게 하는 방법은 수조의 규모가 과대해져 비경제적이다. 어느 것을 우선해서 결정할 것인지는 현장여건을 고려하여 선정해야 할 것이다.

Fig. 11은 유출구의 높이에 따른 수조 내부수위와 평균유출량과의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터 유출구의 높이에 따른 수조 내부수위와 평균유출량은 다음 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$q_{av} = -3E - 05h_o^2 + 0.001h_o - 0.0058 \quad (\text{단, } h_w : 1.8 \text{ m}) \quad (4)$$

여기서, h_o : 유출구의 높이, q_{av} : 평균유출량

본 연구는 농수산업분야에서 시급한 토사퇴적문제 해소방안에 대한 연구이기 때문에 시급성을 고려하여 시스템의 최적조건을 찾기 위한 수리모형실험은 가능한 실제크기에 가깝게 제작하여 물리학적 현상과 수리학적 거동을 관찰하였다. 앞으로 대기압을 활용한 무동력 토사제거시스템에 대한 심도 있는 연구가 계속 이어지면 배수문뿐만 아니라 항구, 포구, 선착장 등 다른 감소시설물에도 광범위하게 활용이 가능할 것

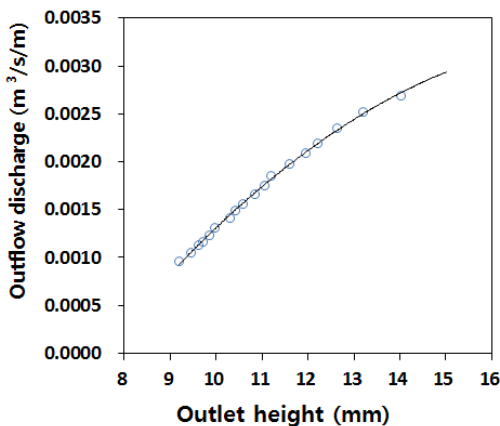


Fig. 11 Variation of average outflow discharge according to outlet height

이다. 또한, 하구둑 설치로 해수유통이 단절되어 발생한 주변 해양환경을 복원할 수 있는 방안으로 적용될 수 있을 것이다.

해양환경의 자연적 변화와 인위적 개발 등으로 감소시설물 주변에 토사퇴적으로 기능이 쇠퇴하여 지역경제에 악영향을 미치는 장소가 증가하고 있다. 지금까지 효과적인 방재대책이 개발되지 못하여 토사퇴적(갯벌)을 피할 수 없는 자연재해로 인식하였지만 본 시스템이 문제를 해소할 수 있는 항구적 대책방안의 하나라고 생각되고, 향후 현장 배수문에 직접 적용하여 현장 적용성을 평가하고자 한다.

IV. 결론

본 연구에서는 서남해안에 위치한 배수문, 소규모 어항, 포구 등 감소시설물에 퇴적되는 토사를 제거하기 위한 무동력 토사제거시스템을 개발하기 위하여 실내모형실험을 실시하고, 수리학적으로 적합한 인자들을 비교분석 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 유출구의 높이(h_o)가 11.2 mm 일 때 평균유출주기(T_L)는 1.09 초로 최대값을 나타냈으며, 유출주기가 최대값 일 때 물결에 의한 토사제거효과가 가장 효과적이었고, 포화된 실트질점토는 토사제거시스템에 의한 반복적인 유출에 쉽게 제거되는 것을 확인하였다.
2. 유출횟수(N)는 수조 내부수위(h_w)가 높아질수록 증가하고, 유출구의 높이가 낮아질수록 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 유출시간(t_o)은 수조 내부수위가 높아질수록 증가하고, 유출구의 높이가 증가할수록 증가비율은 감소하였다
3. 수조 내부수위가 낮아질수록 유출주기는 길어지고, 단위유출량(q_o)은 증가하였으며, 유출구의 높이가 11.2 mm 일 때 평균유출량은 0.00164 m³/s/m 로 나타났다. 유출주기가 길어질수록 단위유출량이 커져 퇴적된 토사를 더욱 더 교란시키는 것으로 나타났다.
4. 간척지 배수문, 소규모 어항, 포구 등의 감소시설물은 유지관리단계에서 시설물에 퇴적한 실트질점토를 제거하기 위해 굴착, 준설, 고압세척 등의 방법을 적용해 오고 있지만 반복적인 비용을 고려할 때 매우 비효율적이다. 그러나 무동력 토사제거시스템을 적용할 경우 경제적 효과가 매우 클 것으로 판단된다. 또한 간척지 배수문에 적용 시에는 안정적인 유지관리를 위해 지역의 조석자료를 충분히 검토한 후 시스템을 계획하여 침수로 인한 재난피해를 예방하여야 한다.

REFERENCES

1. Choi, B. H., 1985. Tidal sand banks in the west coast of Korea. *Magazine of Korea Water Resources Association* 18(3): 235-24 (in Korean).
2. Hjulstrom, F., 1942. Studien uber das Maander-Problem. *Geografiska Annaler* 24: 233-269.
3. Jung, D. K., 2008. Sedimentary effects of break-water construction on coastal environments (I). Ministry of Science, ICT and Future Planning.
4. Jung, J. S., B. H. Kim, H. J. Kim, and Y. S. Cho, 2010. Calculation of the peak-delay force reduction parameter of multi-directional random waves acting on a long caisson breakwater. *Journal of Korea Water Resources Association* 43(10): 843-850 (in Korean).
5. Kim, Y. T., J. I. Lee, Y. S. Cho, and T. M. Ha, 2010. Wave overtopping reduction coefficient of vertical wall for obliquely incident waves. *J. of Korean Society for Marine Environmental Engineering* 22(3): 149-155 (in Korean).
6. Kim, N. I., D. G. Kim, K. S. Lee, and D. S. Kim, 2005. Analysis of the discharge capacity improvement of a lock gate by using 3-dimensional numerical simulation. *Journal of Korea Water Resources Association* 38(3): 189-198 (in Korean).
7. Lee, D. J., Y. K. Park, 2013. A study on the sediment deposition height computation at Gunsan port using EFDC. *J. Korean Water Resources Association* 46(5): 531-545 (in Korean).
8. Lee, H. J., 2008. Sedimentary effects of break-water construction on coastal environments (II). Ministry of Science, ICT and Future Planning (in Korean).
9. Lee, Y. M., E. K. Choi, S. W. Kim, K. H. Lee, Y. J. Yoon, and H. D. Lim, 2012. Stratigraphic sequence and depositional environment of unconsolidated deposits in the west seacoast. *J. of the Korean Geotechnical Society* 28(10): 55-68 (in Korean).
10. Lee, S. H., E. C. Jang, and J. Y. Ha, 2007. Comparison between a 3 dimensional turbulent numerical model and hydraulic experiment model for the flow phenomenon around a lock gate. *J. of Korean Society for Marine Environmental Engineering* 19(2): 162-169 (in Korean).
11. Park, C.K., 2013. Soil and clay removing apparatus. Patent Number 10-1283249.
12. Shin, D. H., B. C. Kum, E. Y. Park, H. I. Lee, and J. K. Oh, 2004. Seasonal sedimentary characteristics and depositional environments after the construction of seawall on the Iwon macrotidal flat. *Journal of the Korean Earth Science Society* 25(7): 615-628 (in Korean).
13. Stewart, J., 2011. Essential calculus. Kyowoosa.