방파제 내부 공동현상 적용을 위한 샌드매스틱 아스팔트 혼합물 시공성에 대한 수치해석

Numerical simulation of sand mastic asphalt workability for adaptation of repairing the cavitation in the breakwater

정효준* · 유형주* · 양성린** · 이승오*

*홍익대학교 건설환경공학과

**건설기술연구원 미래인프라연구센터

Hyo Jun Jung* · Hyung Joo Yoo* · Sung Lyn Yang** · Seung Oh Lee*

*Department of Civil Engineering, Hong ik University, Seoul, Korea

**Future Infrastructure Research Center Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Ilsan, Republic of Korea

Abstract

As a breakwater gradually becomes obsolete, it becomes vulnerable to loss of its original functions and finally occurs corruption due to cavitation, scours inside, etc. The mortar grouting method, which has been in general applied in many cases, would invoke serious issues such as coastal environmental pollutions because of spilled-out cement before curing on the near sea. Thus, the sand mastic that utilizes the mastic asphalt becomes focused on as a substitute. However, the related study is hard to find in the domestic literature. In this study, therefore, the workability of sand mastic when filling up the cavitation inside a breakwater was evaluated with a 3-D numerical model, FLOW-3D software. It was intended to propose the workability index (WI) of sand mastic based on the diffusion diameter. It has been shown that the temperature and the fractions of the asphalt are the most significant parameters on the rheologic characteristics of the sand mastic. As a result, it is recommended that the asphalt mixture above 16% and the initial temperature above 150°C when applying with a breakwater with inside cavitation.

Keywords : Sand mastic, Cavitation, Numerical simulation, breakwater, Diffusion diameter

1. 서론

방파제와 호안 등과 같은 외곽시설물은 파랑으로부터 배후 지 세굴방지 및 시설물을 보호하기 위해 설치되며(Park, 2012), 해양수산부 통계자료(2019)에 따르면 국내 방파제의 길이는 총 84.6 km에 달한다. 콘크리트 및 골재가 주성분으로 구성되어 있는 방파제는 시간이 경과함에 따라 침식작용으로 인해 점차적으로 내외부 크랙이 발생하며 해안의 외곽 시설물에 발생하는 지속적인 파도 또는 설계파 등 큰 파는 상부구조물 전면에 큰 파압을 미치게 하여 내륙에 콘크리트 구조물보다 구조물 손상을 촉진시킨다.(Oh et al., 2014), (Oh et al., 1999). Jayaratne et al.(2016)은 쓰나미 등 대형 파도에 의한 방파제의 붕괴형태를 6가지로 정의하였으며, 방파제 붕괴형태는 공통적으로 방파제 외부 피복재의 파손이나 균열로 인해 구조물 내부로 해수가 침투하여 사석 또는 채움재를 유출시킨다. 내부 채움재의 유출은 방파제 내부 공동현상을 발생시켜 강도를 저하, 붕괴시키며 또한, 해수에 포함된 염소이온이 해안 구조물 내부의 산성도를 높여

철근을 부식시키는 화학작용이 발생하여 내구도가 감소를 촉진한다(Page, 1975). 시간이 경과됨에 따라 콘크리트의 염소이온 농도가 높아져 노후화는 구조물의 내구도를 더욱 악화시킨다(Song et al., 2007). 따라서, 해안구조물은 파도와 같은 외부응력에 의한 손상과 해수에 포함되어 있는 화학 물질이 콘크리트 또는 철근과 화학반응을 통한 부식이 동시에 발생할 수 있는 구조물로 지속적인 관심과 대책이 필요하며 특히, 방파제 공동 현상에 대한 채움재를 활용하는 등의 보수방안이 필요하다.

기존 방파제에 발생하는 공동현상은 몰탈 그라우팅 공법을 주 보수 방안으로 사용하였으나, 몰탈은 일반적으로 60%의 강도를 발현하는데 24시간의 양생시간이 필요하다. 또한, 양생되지 않은 해안구조물 내부 공동에 몰탈에 해수가 침투하면, 해수희석으로 인해 점착력이 약화되거나 공동 충전 효과가 미확보될 수 있고 또는 바다 석회화 등의 환경 문제를 유발할 수 있다. 이러한 원인으로 해양생태계로 유입되는 몰탈은 해양생물 및 해안주변 거주민들에게 악영향을 미칠 수 있다. 따라서, 이에 대한 대안으로 샌드매스틱

아스팔트 혼합물을 보수재료로 사용하는 샌드매스틱 공법을 방파제 등 항만시설물에 활용하는 방안을 국내에서도 필요하다.

샌드매스틱 아스팔트 혼합물은 160℃ 이상의 고온에서 혼합되어 유출시키며 지반, 구조물, 수온 등 사용하는 환경에 따라 달라지는 변수에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 국내 실정에 적합한 샌드매스틱 공법 적용을 위한 조건이 요구된다. 샌드매스틱 혼합물은 기존 해외에서 해안에 자주 사용되어 왔고 Van de Velde et al.(1985), Van Asbeck(1954)는 샌드매스틱의 물리적인 특징으로 인해 해수 내 위치한 해안구조물에는 아스팔트 등이 유용하게 활용될 수 있다고 언급하고 있다. 국내에서는 도로의 포장에서 주로 사용되는 샌드매스틱 혼합물은 온도에 민감한 재료로 방파제 내부에 공동에 해수가 차있다는 가정하에 낮은 온도에서 급격히 경화작용이 일어날 수 있다. 방파제 내부에 발생하는 공동을 보수하는데 샌드매스틱 공법이 적절히 활용될 수 있는 방안을 모색하고자 샌드매스틱 혼합물의 시공성을 FLOW-3D 수치해석 소프트웨어를 통해 확인하였다. 샌드매스틱 혼합물의 배합 비율과 온도 등, 샌드매스틱 혼합물의 물성치를 결정하는 요소에 따라 수중 유출 시 수중에서의 샌드매스틱 혼합물의 유동성 및 거동 특성을 수치해석을 통해 파악했다. 이를 통해 적절한 샌드매스틱 공법 활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

양생 이전 콘크리트 등의 거동은 기존에도 수치해석을 통한 연구는 계속되어 왔다(Gram, 2009). 샌드매스틱 혼합물의 거동을 실험을 통해 판단하려면 과도한 시간과 비용이 소모되며 수치해석을 통해 해석을 수행하게 되면 다양한 경우의 거동특성을 경제적으로 연구하기 용이하다. 아스팔트 함유량과 온도에 따라 점성이 변동되는 샌드매스틱 혼합물은 점성유체로 가정하였으며, 관을 통해 유출되는 샌드매스틱 혼합물은 유출량을 점성과 관압력에 따라 Poiseuille 법칙을 통해 산정하였다. 아스팔트 함유량, 초기 온도, 관압력에 따라 Case를 구분하여 3차원 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모형인 FLOW-3D를 이용하여 해석하였다. 이를 통해 샌드매스틱 혼합물이 방파제 내부에 발생하는 공동을 복구하는 채움재로서 사용할 때 발생하는 거동을 연구하였다. 점성 유체의 거동과 온도에 대한 경화작용이 시공에 미치는 영향을 확인하고자 하며, 수치해석 결과를 통해 방파제 공동 발생에 대한 보수·보강을 수행함에 있어 시공을 위한 확산범위, 샌드매스틱 혼합물 유출 초기온도 등과 같은 초기 결정 지표를 제시하고자 한다.

2.1 지배방정식

FLOW-3D는 온도와 시간에 따른 경화에 대해 수치해석

을 수행할 수 있으며 기본적으로 비정상 유동상태를 모의하여 연속방정식과 3차원 운동량 보존 방정식과 에너지 방정식을 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 해석에 대해서는 난류 에너지 모형, $k-\epsilon$ 모형, RNG(ReNomalized Group) 모형, LES 모형 등을 적용할 수 있으며, 본 연구에서는 호환성이 높은 RNG 모형을 사용하였다(Flow Science, 2003). 직육면체 형상의 격자계를 사용 시 일반 형상 기술을 보다 정확히 하기 위해 FAVOR(Fractional Area Volume Obstacle Representation)기법을 각 방정식에 적용하고 있으며 비압축성 및 압축성의 계산시 해석 속도를 증진시키기 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용하고 있다(Flow Science, 2003). 열전달 및 유체흐름의 지배방정식은 질량, 운동량, 에너지의 보존관계를 나타내는 연속방정식, 운동량방정식 그리고, 에너지방정식이다. 동일한 유체로 이루어지는 계(system)에 질량보존의 법칙, 뉴턴의 운동 제 2법칙, 열역학 제 1법칙을 적용함으로써 유도된다. 유동에서는 보통 공간에 고정된 Euler좌표계가 사용되며 3차원 수치해석에 사용된 FLOW-3D는 Eq. (1), Eq. (2)와 같이 유동에 관련된 지배방정식들을 직교좌표계(x, y, z)로 나타낸다. 점성유체해석을 위해서 Elasto viscoplastic model을 사용하였다. 변형과 병형률의 적합식으로 구성되어 있으며, 점성에 대한 초기조건이 적용되며 Eq(3)과 같이 표현된다. 실험을 통해 산정된 매스틱 아스팔트의 점성을 토대로 탄성응력이 산정되어 점성유체의 거동을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho} \quad \text{Eq. (1)}$$

여기서, u, v, w 는 각각 x, y, z 또는 방향의 속도성분을 나타내고, A_x, A_y, A_z 는 각 방향의 면적율을 나타낸다. 또 ρ 는 밀도, R_{SOR} 는 질량생성 및 소멸항을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} u \end{aligned} \quad \text{Eqs. (2)}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} w \end{aligned}$$

여기서, G_x, G_y, G_z 는 체적력(body force)에 의한 가속항이며 f_x, f_y, f_z 는 점성 가속항, b_x, b_y, b_z 는 다공성격벽

(porous baffle)과 같은 매질 통과시 유동 감/가속향을 나타낸다.

$$\sigma = -pI + \tau_V + \tau_E \quad \text{Eq. (3)}$$

여기서, σ 총 응력, p 는 국부압력, τ_V 편향응력, τ_E 탄성응력을 나타낸다.

2.2 수치실험 조건

국내 사용되는 방과제의 종류는 경사식, 직립식, 혼성식으로 구분되며 최근에는 기존 3가지 종류 외 다양한 형태의 방과제가 사용되고 있으며 기본적으로 외부 피복재와 내부 채움재로 구성되는 형태는 동일하다. 상치콘크리트 피복재 하단에 사석이 채워지는 형태로 구축된 방과제 내부에 균열된 피복재나 침투로 인해 해수가 유입됨을 가정하여 샌드매스틱 혼합물의 경화속도가 촉진될 경우를 모의하였다. 여기서, 초기 수온은 10°C로 국내 평균 해수온도인 13°C ~ 15°C 보다 낮은 온도로 시공환경이 열악한 동계를 기준으로 수온을 선정하였으며 수심은 1.0 m로 샌드매스틱 혼합물의 유출과 동시에 해수와 접촉하였을 때 혼합물의 유동특성을 확인하였다. 120°C 이상의 혼합물 유출 초기온도보다 낮은 온도의 해수에 접촉이 경화되는 시간과 형상을 결정짓는 변수로 작용한다. 상치콘크리트 혼합물의 유출구로부터 바닥까지의 높이는 1.0 m로 해수의 수심과 동일하며, 유출관은 직경 200 mm, z방향 경계조건은 지면 기준 2.0 m의 높이만큼 이격되어 있다. 샌드매스틱 혼합물을 유출시키면 수

직낙하하는 구조로 구축하였으며, 방과제 내부의 사석의 분포에 따라 확산형태가 상이할 수 있으므로 혼합물의 유출 환경의 이상화를 위해 평평한 바닥면에 유출되는 혼합물의 거동을 분석하였다. 샌드매스틱 혼합물의 거동을 수치해석하기 위한 지형자료는 Fig. 1과 같다.

2.3 경계조건

FLOW-3D 점성유체를 해석하기 위해 Elasto-Visco-Plasticity 내부모듈을 통해 점성 유체를 흐름을 구현하였다. Elasto-Visco-Plasticity 내부 모듈 중 Elasto-viscoplastic 모형을 통해 샌드매스틱 혼합물의 흐름을 수치해석하였다. 샌드매스틱 혼합물의 초기조건으로 사용되는 점성은 측정하는데는 다양한 방법이 있으며, 재료에 따라 점도의 측정방법은 다르게 적용될 수 있다. 샌드매스틱 혼합물의 점도를 산정하는 방식 중 대표적으로 Kerkhoven(1965)는 샌드매스틱 혼합물의 점성을 산정하기 위한 2가지 방법의 경험식을 제안하였다. 첫 번째는 Kerkhoven Viscosity meter에 4 리터의 혼합물을 투입하고 1리터의 혼합물이 낙하하는 시간에 따른 점성을 산정하는 방법을 제시하였으며, 두 번째는 혼합물의 재료구성비에 따라 점성을 산정하는 방법을 제안하였다. 재료 구성비를 통해 점성을 산정하는 방식은 온도를 고려하지 않아 본 연구에서는 온도에 따른 샌드매스틱 혼합물의 거동을 분석하기 위해 Kerkhoven Viscosity meter를 통한 점성을 산정하였다. Table 1은 아스팔트와 채움모래의 구성비에 따른 낙하시간을 초기온도(120°C, 150°C, 180°C)와 모래의 구성비(18%, 22%, 25%)를 기준으로 각각 나타난 결과이다.

Fig. 1. Simulation system of 3-D numerical simulation system

Table 1. Results of the sand-mastic mixture outflow time(sec) at Kerkhoven viscosity meter

Outflow Temperature	Composition of Asphalt					
	16%			20%		
	Composition of Filler					
	18%	22%	25%	18%	22%	25%
180℃	9.8	10	11	4.8	6.3	3.4
150℃	14	13.3	24.7	5.7	9.2	5
120℃	80	74	42.1	34.3	12.5	17.8

이를 Kerkhoven(1965)이 제시한 경험식 Eq. (4)를 통해 점성 η 를 산정하였다. 산정한 결과는 Table 2와 같이 나타났다. 채움모래에 따른 점성은 비선형적인 분포를 나타냈으며, 따라서 온도별 최대 점도를 샌드매스틱 혼합물의 입력조건으로 사용하였다. 점성에 미치는 영향은 아스팔트 함유량이 지배적이며 채움모래의 비율 중 높은 점성을 Fig. 2와 같이 나타냈으며, 초기조건으로 선정하였다.

$$\eta = 43.5 \times 10^{-5} \rho g t \quad \text{Eq. (4)}$$

여기서, η 는 점성(Pa · s), ρ 는 체적밀도(kg/m³), g 는 중력가속도($\frac{m}{s^2}$), t 는 유출시간(sec)이다.

관압력에 대한 유량 산정은 Eq. (4)과 같이 Poiseuille 법칙을 적용하여 산정하였으며 그 결과는 Table 3, Fig. 3과 같

Fig. 2. Influence of initial temperature on sand-mastic viscosity

다. 이를 초기 유량으로 산정하여 확산범위를 분석하였다. 여기서, Q 는 유량, R 은 관경, Δp 는 펌프압력, μ 는 점성계수, l 은 관의 길이를 나타낸다. 압력이 2.0 kgf, 4.0 kgf, 6.0 kgf, 8.0 kgf, 10.0 kgf 인 경우를 기준으로 압력에 따른 유출량을 산출하였으며, 아스팔트의 배합비율이 16%인 경우와 배합비율이 20%인 경우를 나누어 Case를 구분하였다.

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu l} \quad \text{Eq. (4)}$$

Fig. 3. OutFlow of sand mastic asphalt mixture per pipe pressure which the fractions of asphalt are 16% and 20% (SM_A# : Fraction of asphalt is #% in mastic asphalt, A means the initial)

Table 2. Viscosity(Pa · s) of the each sand-mastic fraction

Outflow Temperature	Composition of Asphalt					
	16%			20%		
	Composition of Filler					
	18%	22%	25%	18%	22%	25%
180°C	88	90	98	43	56	30
150°C	125	119	221	51	82	45
120°C	716	662	377	307	112	159

Table 3. Outflow flowrate per pipe pressure & simulation case

Pressure	Outflow[ton/hr]			
	Asphalt 16%	Case(SM_A16)	Asphalt 20%	Case(SM_A20)
2.0 kgf	5.58	Case1A	9.77	Case1B
4.0 kgf	11.16	Case2A	19.53	Case2B
6.0 kgf	16.74	Case3A	29.30	Case3B
8.0 kgf	22.32	Case4A	39.06	Case4B
10.0 kgf	27.90	Case5A	48.83	Case5B

3. 수치해석 결과

3.1 유량에 따른 흐름특성

샌드매스틱 혼합물은 온도 변화에 따른 점도의 변화폭이 크기 때문에 해수로 유출시키면 급격하게 점도가 증가되고 경화된다. 따라서 서로 다른 유량으로 동일한 혼합물이 유출시킬 때 나타나는 형상을 통해 초기유량이 시공에 미치는 영향을 검토하여 유량에 따라 작업의 효율을 검토하였다. 급격히 경화되는 샌드매스틱 혼합물의 특성상 초기 유량을 유지하는 것이 시공의 능률을 높일 수 있다. 유출량을 0.35 m^3 으로 고정하여 서로 다른 유량에 대해서 검토한 결과는 Fig. 4와 같다. 아스팔트 함유량이 20%인 Case 2와 Case 4에 대해서 유출량이 0.35 m^3 가 되는 15초와 30초에 대해서 확산지름을 확인한 결과, 각각 1.08 m와 1.42 m로 나타났다. 이를 통해 초기 샌드매스틱 공법을 적용할 때는 시공 환경에 따라 초기 유량을 조절할 필요가 있다는 사실을 확인할 수 있다. 초기온도는 180°C 로 동일한 조건에 대해 수행하였으며, X-Z 평면을 통해 확산된 샌드매스틱 혼합물의 단면을 확인하여 Fig. 4와 같이 나타났다. 여기서 Fig. 4(a)은 초기유량이 19.53 ton/hr 이며, Fig. 4(b)는 초기유량이 39.06 ton/hr 이다. 샌드매스틱 혼합물이 받는 관압력은 유량과 선형적인 관계를 갖지만, 온도의 영향으로 인해 확산범위의 증가는 선형적으로 나타나지 않는다. 따라서, 단기간에 샌드매스틱 혼합물을 배출함으로써 시공효율을 높일 수 있다. 그러므로 샌드매스틱 혼합물 유출관을 설계함에 있어 제트식으로 초기유량을 급격히 증가하는 방식을 적용할 필요가 있다.

3.2 초기온도에 따른 흐름특성

온도에 민감한 샌드매스틱 혼합물의 유출 초기온도에 따라 해수의 온도로 인해 급격히 샌드매스틱 혼합물이 경화되므로 수치해석을 통해 초기온도는 실험을 통해 점성이

높아 시공재료로 활용하지 못하는 조건으로 판단되는 초기 온도 120°C 를 제외하고 150°C 와 180°C 2가지 조건에 대해서 각각 거동을 분석하였다. 겨울철 해수를 기준으로 선택한 10°C 의 해수에 유출시킬 때, 아스팔트 함유량은 20%이며, 결과를 X-Z 평면으로 Fig. 5에 5초와 30초에서의 샌드매스틱 혼합물의 거동을 나타냈다. 초기온도 150°C 에서 5초일 때 바닥면에 도달한 혼합물의 면적이 30초에서도 유지되었으며, 초기온도 180°C 에서는 5초에서의 바닥면에 도달한 혼합물의 면적이 추가적인 확산이 일어나고 일정 범위의 확산범위에 도달하면 혼합물이 확산되지 않고 위로 축적되면서 두께가 증가하는 현상이 나타났다. 이러한 원인은 바닥면에서 해수와 접촉하는 면이 경화되면서 모양이 고정되게 되고 더 이상 확산되지 않기 때문이다. 따라서 초기온도가 고온에서 시작되는 경우에는 모양이 고정되는 시간을 지연시켜서 액체상태로 유지되는 시간을 연장하므로 원활히 확산되는 것으로 판단된다. 또한 바닥면의 확산되는 면적이 작기 때문에 초기온도가 150°C 인 혼합물은 본 연구의 초기조건과 유사한 상황에서는 적합하지 않은 것으로 판단되며, 초기온도는 180°C 이상에서 작업이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 파이프 압력에 따른 흐름특성

초기 유출 온도와 아스팔트 함유량에 따라 달라지는 점성을 갖는 샌드매스틱 혼합물에 대해서 수치해석을 수행하였으며, 혼합물이 적절히 공동을 충전시키기 위해서 유동성을 확보해야 한다. 온도에 따른 유동성의 변화로 볼 때, 샌드매스틱 혼합물의 조건에 따라 Fig. 6과 같은 형상으로 혼합물이 거동을 할 것으로 유추가 가능하다. 유동성이 클수록 바닥면에 가까워질 때, 확산범위가 넓게 샌드매스틱 혼합물이 확산되어서 불규칙한 공동을 효율적으로 채울 수 있으며, 바닥면에 채움재가 확산되기 이전에 경화가 진행

Fig. 4. The same amount sand mastic mixture diffusion shape of each initial flowrate (left : Case2, right : case4)

Fig. 5. Sand mastic mixture diffusion shape per initial temperature at $t=5s$ & $t=30s$

Fig. 6. Diffusion evaluation by bottom diameter of outflow shape

되면 하단으로 갈수록 공동을 채우지 못하게 되어 시공에 불리하다. 이러한 경우에는 바닥면에 닿는 즉시 혹은 유출과 동시에 경화가 진행되어 상단 부피가 커지는 형태로 나타난다. 따라서, 각각의 형태를 판정하는 기준은 바닥면의 지름으로 샌드매스틱 혼합물의 유동성을 판단하였으며 바닥면의 지름을 확산지름(D_1 , D_2 , D_3 , Diffusion Diameter)으로 정의하여 샌드매스틱 혼합물의 유동성을 확인하였다. 즉, 확산지름이 클수록 유동성이 높은 상태임을 알 수 있다. 이에 따라 Case 별 관 압력에 따른 확산지름을 도출한 결과, Fig. 7, Fig. 8과 같이 나타난다. 결과는 동일하게 30초를 기준으로 확산지름을 산정하였으며 확산지름은 압력과 선형적인 관계를 나타내고 있다. 하지만 아스팔트 함유량에 따라 서로 다른 기울기를 가지며 압력이 증가할수록 아스팔트 함유량이 적으면 효율이 저하될 것으로 판단된다.

Fig. 7. Diffusion diameter per pipe pressure each fractions of asphalt.

3.4 시간에 따른 혼합물 유동성 변화

각기 다른 압력에 따른 샌드매스틱 혼합물의 확산지름은 상이하게 나타났으며, 이러한 변화의 기준을 확립하기 위해서 시간에 따른 유동성의 변화를 확인하였다. 확인 결과 시간이 지남에 따라 Diffusion Diameter로 정의한 거동상태는 일정하거나 증가량이 급격히 감소하는 구간이 발생하며, 이러한 구간을 토대로 샌드매스틱 공법이 적용되면 최하단부는 확산지름만큼 확산이 진행되며 그 이상에 대해서는 더 이상 확산이 일어나지 않는다. Fig. 9은 시간에 따른 확산지름의 크기를 나타낸 것으로 각 케이스 별로 일정한 범위의 압력이 증가할수록 확산지름의 값이 일정해지는 확산지름의 양은 커지며, 삼각형으로 나타낸 아스팔트 함유

Fig. 8. Sand mastic diffusion shape per pressure(Asphalt fractions are 16% in left line and 20% in right line)

Fig. 9. Diffusion diameter per time at Case A & B

량 20%의 혼합물이 확산지름이 더 커지는 것을 확인 할 수 있다. 관압력의 증가에 따른 확산지름의 증가폭은 그래프의 간격을 통해 거의 일정하게 나타난 것을 확인 할 수 있다. 샌드매스틱 공법을 시공함에 있어 공동을 충전시킬 수 있는 범위를 평가하기 관압력에 따른 확산지름을 토대로 샌드매스틱 공법의 시공성을 검토할 수 있으며, 각 아스팔트 함유량에 따른 확산지름을 나타냈다. 아스팔트 함유량은 압력에 따른 확산지름의 증가량과 연관이 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 주요 목적은 샌드매스틱 공법을 국내 방파제 보수공사에 적용하기 위한 시공성 지표를 도출하는 것으로, 먼저 FLOW-3D를 통해 비점성유체의 거동 특성을 갖는 샌드매스틱 혼합물을 수치해석을 통해 분석하였으며, Cao and Li(2017), Shin et al.(2016)의 점성유체 거동에 대한 시험을 기반으로 점성에 따른 매개변수를 결정하였다. 또한, 사전 시험을 통해 나타난 샌드매스틱 혼합물의 배합조건에 따른 물성치를 산정하였다. 이에 따라 120℃, 150℃, 180℃에 따른 점성의 변화를 제시하였으며, 사전 시험 결과, 초기 온도 120℃ 이하의 샌드매스틱 혼합물은 점성유체의 거동이 나타나지 않으므로 시공성이 없는 것으로 가정하였다. 이에 따라 초기온도 150℃와 180℃의 아스팔트 함유량 각각 16%와 20% 그리고 샌드매스틱 혼합물 유출관 압력조건에 따른 샌드매스틱 혼합물의 유출량을 산출하였다.

산출된 유출량을 초기 경계조건으로 FLOW-3D를 통해 점성유체로 가정한 샌드매스틱 혼합물을 수온 10℃의 해수로 유출하였을 때, 발생하는 퍼짐 정도(확산지름)를 측정하여 시공성을 확인하였다. 초기온도가 동일할 때, 확산범위는 압력과 선형적인 관계를 나타내고 있으며, 초기온도 180℃에서 확산범위가 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 예를 들

어, 최대 지름이 1.0 m인 공동을 보수하는 경우를 가정할 때, 아스팔트 함유량이 16%에서 8.0 kgf 이상의 압력이 요구되며, 함유량이 20%에서 4.0 kgf 이상의 압력이 요구된다. 아스팔트 함유량이 20%이상일 때, 아스팔트 함유량이 16%일 때 보다 관 압력 증가에 대한 민감도가 큰 것으로 나타났다. 또한, 아스팔트 함유량이 16% 이하의 샌드매스틱 공법은 압력에 대한 민감도가 적어 유출 장비의 성능이 증가하더라도 효율이 감소하므로 시공성이 부족한 것으로 나타났다. 온도에 수치실험에서 샌드매스틱 혼합물이 확산되는 현상을 볼 때 150℃ 미만에서는 시공성이 다소 부족할 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 샌드매스틱 공법은 온도, 배합비율, 유량 등 다양한 조건에 따라 시공성을 확인하였으며, 해안구조물에 적용에는 조건부 활용이 가능할 것으로 판단된다. 방파제 내부 공동의 복잡성 및 다양화되는 방파제의 보수 등, 샌드매스틱 공법에 대한 지속적으로 추가연구가 수반되어 국내 방파제 등 해안 구조물의 샌드매스틱 공법의 활용 증대 및 구조물 장수명화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2013158).

References

- Cao, G. and Li, Z. (2017). "Numerical flow simulation of fresh concrete with viscous granular material model and smoothed particle hydrodynamics." *Cement and Concrete Research*, Vol. 100, pp. 263-274.
- Jayarathne, M. P. R., Premaratne, B. and Adewale, A. (2016). "Failure mechanisms and local scour at coastal structures in-

- duced by tsunami.” *Coastal Engineering Journal*, Vol. 58, No. 4, 1640017.
- Kerkhoven, R. E. (1965). “Recent developments in asphalt techniques for hydraulic applications in the Netherlands.” *Association of Asphalt Paving Technologists Proceedings*. Vol. 34, pp. 538-573.
- Oh, S. H., Oh, Y. M., Yeo, B. G. and Han, T. Y. (2014). “A case study of comparing formulae for estimating horizontal wave force on crown wall of sloping breakwater.” *Journal of Korean Society of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 1, No. 1, pp. 28-35 (in Korean with English abstract).
- Page, C. L. (1975). “Mechanism of corrosion protection in reinforced concrete marine structures.” *Nature*, Vol. 258, No. 5535, pp. 514-515.
- Shin, T. Y., Lee, J. H., Kim, J. H. and Kim, M. K. (2016). “Correlation between channel-flow test results and rheological properties of freshly mixed mortar.” *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 17, No. 7, pp. 237-244 (in Korean with English abstract).
- Song, H. W., Lee, C. H. and Ann, K. Y. (2007). “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments.” *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 2, pp. 113-121.
- Van Asbeck, B. W. (1954). “Bitumen in coastal engineering.” *Coastal Engineering Proceedings*, Vol. 1, No. 5, 39 pp. 587-620.
- Gram, A. (2009). “Numerical modelling of self-compacting concrete flow.” the doctoral dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, 53p.
- Park, S. G. (2012). “Coastal and harbor engineering,” Munundang, 339p (in Korean).
- Van de Velde, P. A., Ebbens, E. H., and Van Herpen, J. A. (1985). “The use of asphalt in hydraulic engineering,” Rijkswaterstaat, 306p.
- Oh, B. H., Jang, B. S., Jang, S. Y., Jeon, S. J., Yu, Y., Park, D. G. and Hyeong, S. S. (1999). “A study on the effects of seawater on the durable life of concrete structures (II).” KINS/HR—218, Korea Atomic Energy Research Institute, 40p (in Korean).
- Flow Science, Inc. (2018). “FLOW-3D® Version 12.0 Users Manual.” FLOW-3D [Computer software]. Santa Fe, <https://www.flow3d.com> (last date accessed: 30 Mar 2021).
- Ministry of oceans and fisheries (2019). “Harbor facilities and capabilities statistical information report.” KOrea Statistical Information Service, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=146&tblId=DT_MLTM_1334 (last date accessed: 25 March 2021).