

해수취수시스템에 적용된 2중구조 유공관의 형태에 따른 취수효율에 대한 연구

김수영¹, 이승오^{2*}

¹한국건설기술연구원 수자원하천연구소, ²홍익대학교 건설도시공학부

A Study on Inflow Rate According to Shape of Dual Structure Perforated Pipe Applied to Seawater Intake System

Sooyoung Kim¹, Seung Oh Lee^{2*}

¹Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building
Technology

²School of Urban and Civil Engineering, Hongik University

요약 지구상에 존재하는 물의 97%는 해수로 존재한다. 따라서 해양자원을 어떻게 활용하는 가는 최근 가장 중요한 이슈 중 하나이다. 해수의 이용은 해수담수화, 원자력 발전소의 냉각수, 해양심층수 활용 등 다양한 분야로 확대되고 있다. 깨끗한 해수를 취수하기 위해 여과사를 이용한 해수취수시스템이 활발하게 사용되고 있으며 이러한 시스템에 적용되는 취수관의 경우 각 취수구 별로 균등하게 취수될 때 취수효율뿐만 아니라 여과의 효율도 높일 수 있다. 본 연구에서는 해수취수시설에 적용된 2중관 구조의 취수효율 향상 효과를 3차원 수치모의를 통해 확인하였으며 상부유공의 간격변화에 따른 구간별 취수량을 분석하였다. 그 결과 관 말단부로 갈수록 상부유공의 간격이 감소되는 경우가 전체적인 취수량은 큰 차이가 없었으나 상부유공을 통한 취수량의 구간별 표준편차가 최소로 나타났다. 또한 이 경우에 관내 흐름이 안정적이어서 취수의 효율도 향상되는 것으로 나타났다. 추후 본 연구의 결과를 바탕으로 다양한 조건 및 영향인자에 대한 민감도 분석이 수행된다면 개별 환경에 적합한 최적설계안을 도출하는데 활용될 수 있을 것이라고 생각한다.

Abstract 97% of water on earth exists in the form of seawater. Therefore, the use of marine resources is one of the most important research issues at present. The use of seawater is expanding in various fields (seawater desalination, cooling water for nuclear power plants, deep seawater utilization, etc.). Seawater intake systems utilizing sand filters in order to take in clean seawater are being actively employed. For the intake pipe used in this system, assuring equal intake flows through the respective holes is very important to improve the efficiency of the intake and filtering process. In this study, we analyzed the efficiency of the dual structure perforated pipe used in the seawater intake system using 3D numerical simulations and the inflow rate according to the gap of the up holes. In the case of decreasing gaps in the up holes toward the pipe end, the variation of the total inflow rate was small in comparison with the other cases. However, the standard deviation of the inflow rate through the up holes was the lowest in this case. Also, stable flow occurred, which can improve the efficiency of the intake process. In the future, a sensitivity analysis of the various conditions should be performed based on the results of this study, in order to determine the factors influencing the efficiency, which can then be utilized to derive optimal designs suitable for specific environments.

Keywords : Seawater intake, Dual structure perforated pipe, Sand filter, Numerical simulation, CFX

*Corresponding Author : Seung Oh Lee(Hongik Univ.)

Tel: +82-70-7778-3046 email: seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received February 5, 2016

Revised (1st April 19, 2016, 2nd May 23, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

1. 서론

지구온난화 및 이상기후의 영향으로 해수는 지구상에 존재하는 물의 97%로 그 양은 물론 해수개발의 발전가능성 또한 무한대에 가깝다고 할 수 있다. 최근 해수는 해수담수화, 원자력발전소의 냉각수 등으로의 활발한 활용으로 그 관심이 증가하고 있는 실정이다. 그러나 자연상태의 해수를 그대로 사용하기에는 해수에 포함되어 있는 해조류나 미생물 등이 큰 문제가 될 수 있다. 원자력발전소의 경우 냉각탑이나 열교환기의 효율을 떨어뜨릴 수 있고, 해수담수화시설 내 분리막의 효율 및 수명을 단축시키는 원인이 되기도 한다[1, 2]. 이러한 문제는 비단 대규모 처리시설에 국한되지 않는다. 국내의 경우 어류의 섭취가 활발하여 항구 주변에 수산물시장이나 횃집 등이 매우 발달되어 있어 어류를 보관하기 위한 수족관에 해수를 공급하기 위해 많은 노력을 하고 있다. 특히 살아있는 어류를 보관하는 만큼 안정적이고 풍부한 해수의 공급이 어느 곳보다 중요하다고 할 수 있다. 그러나 자연상태의 해수를 그대로 사용하여 세균이나 해조류에 수족관이 오염되면 어류의 집단 폐사를 야기할 수 있다. 또한 처리공정이 복잡하고 가격이 비싼 별도의 취수시설을 설치하는 경우에는 그 시설을 유지관리하기 어려운 측면이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 항내에 여과사로 여과층을 조성하고 여기에 유공관을 매설하여 해수를 직접취수하는 방식이 제안되어 사용 중에 있으나 일반 유공관을 사용하는 경우 유공별 취수량이 불균등하여 여과사의 폐색이 자주 발생하거나 유속이 집중되어 관이 손상되는 등의 문제가 발생된다[3]. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 제안된 2중구조 유공관의 성능 및 취수효율향상 방안에 대해 분석하고자 한다. 2중구조 유공관은 큰 유공을 가진 유공관의 외부에 작은 유공을 가진 관재를 둘러싼 2중구조를 갖는다. 이러한 2중구조 유공관의 초기형태는 1940년 미국의 Johnston에 의해 개발되었다[4]. 최초에는 펌프로 유입되는 모래 등의 이물질을 제거하기 위해 유공관 주위를 철망으로 감싸는 형태로 개발되었다. 이후 다양한 형태로 발전해왔으며 2011년 동부건설 등은 격포항에 2중구조 유공관을 근거리 해수취수시설에 적용하여 신기술을 획득하였으며 홍익대학교 과학기술연구소는 3차원 수치모의를 통해 성능을 검증하였다[5, 3]. 이후 Kim et. al 은 취수관의 다열배치에 의한 간섭현상을 분석하였다[6].

본 연구에서는 상부유공의 간격변화에 따른 취수의 안정성과 여과효율을 구간별 취수량의 변화를 통해 분석하였다.

2. 기본이론

2.1 2중구조 유공관의 형상 및 성능

본 연구에서 검토하고자 하는 2중구조 유공관(DPP, Dual structure Perforated Pipe)은 모래여과를 이용한 취수시에 적용가능한 일반적인 유공관을 변형하여 여과 효율을 증가시키기 위해 고안되었다. 내부의 큰 유공을 가진 관을 유공이 작은 외부관으로 둘러싼 형태로써 2중구조 유공관의 경우 내부관과 외부관 사이의 공간으로 인해 외부관 바깥의 압력을 균일하게 분포시켜 여과사 내의 흐름이 한쪽으로 치우치지 않도록 하는 효과가 있다 (Fig. 1 참조).

단일 구조 유공관(SPP, Single structure Perforated Pipe)와 같이 흐름이 한쪽으로 집중되면 여과사의 일부만 사용되어 폐색이 될 수 있어 역세 주기가 짧아진다. 이로 인한 취수일수의 감소로 전체적인 취수효율이 감소하게 된다. 2중구조 유공관은 내부관의 압력분포도 분산시켜 압력에 의한 유공의 손상을 방지하여 관 자체의 내구성의 향상도 기대할 수 있다.

조영만 등은 정수처리장의 확산현상에 대해 3차원 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 향상된 균등유출 조건을 제안하였다[7]. 유공의 면적비가 작을수록 유출 균등성이 비례하여 증가함을 제시하였으며 유공관의 길이가 길수록 균등성이 약화되지만 압력손실은 크게 증가한다고 제시하였다. 이에 따라 본 연구에서는 상부유공의 간격을 통해 유공 면적비를 조절하였으며 등간격일 때와 취수부에서 멀어질수록 간격을 좁게 설정한 경우에 대해 비교하였다.

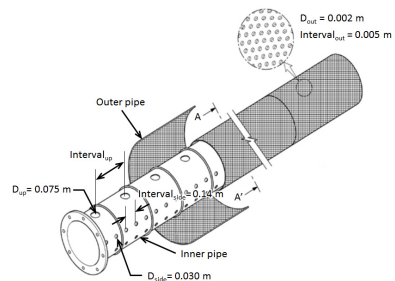


Fig. 1. Dual Structure Perforated Pipe(DPP)[3]

2.2 CFX의 지배방정식 및 난류모델

본 연구에서 사용된 3차원 수치모형은 CFX이다. CFX는 ANSYS사에서 개발한 상용프로그램으로 비구조적 사면체 및 육면체 격자를 사용하여 복잡한 형상을 구현할 수 있어 고체와 유체의 접촉면에서의 흐름해석이 정확하여 2중구조 유공관의 벽면에 작용하는 압력을 분석하기에 적합한 모형이다. 지배방정식으로는 연속방정식, 운동량방정식을 따르며 각각 식(1), (2)와 같다[8].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (2)$$

여기서, ρ 는 해수밀도(kg/m^3), U 는 유속성분, p 는 압력이다. $\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U)$ 는 변형률과 관련된 응력텐서이며, S_M 은 외부 모멘텀 생성항이다.

유공을 통과하는 흐름은 고유속의 복잡한 흐름이 예상되므로 난류모형을 적용하였으며 가장 보편적으로 사용되는 $k-\epsilon$ 모형으로 선정하였다. 난류운동에너지(k)와 점성소산(ϵ)을 통해 특성속도와 특성길이를 간접적으로 산정해 난류의 평균운동장을 도출한다.

2.3 여과사의 저항계수(K_q) 산정

여과사 내 흐름을 모의하기 위해 여과사를 공극이 존재하는 다공성 물체로 단순화하여 해석하였다. 다공성 물질을 통과하는 유체는 저항을 받으며 흐름의 속도와 공극의 크기에 따라 압력의 손실이 발생한다. 이를 계산하기 위해 저항계수가 필요하며 식 (3)과 (4)를 통해 구할 수 있다.

$$K_q = \frac{dp}{dz} \cdot \frac{1}{V_0^2} \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dz} = \frac{1}{K} \frac{Q}{A} \cdot \rho \cdot g \quad (4)$$

여기서, K_q 는 저항계수(Quadratic resistance Coefficient), K 는 투수계수(m/s), Q 는 여과유량(m^3/s), A 는 여과면적(m^2), V_0 는 여과사내 유체속도(m/s)($= Q/(A \cdot e_{sand})$), e_{sand} 는 여과사 공극률, g 는 중력가속도(m/s^2)이다.

여과사의 투수계수는 현재 투수계수 추정을 위해 가장 많이 사용되는 Creager가 제안한 표를 통해 산정하였다[9]. 여과사는 D_{50} 이 0.002 m 인 표준여과사로 적용하였으며 여과사의 경우 균등계수가 1.7 이하로 입도가 좋기 때문에 D_{30} 과 D_{20} 값의 차이가 크지 않아 두 값이 같다고 가정하여 표에서 투수계수를 산정하면 0.018 m/s이며 식(3)에 대입하여 계산하면 저항계수는 1.341×10^8 이다.

3. 연구방법

3.1 취수시설개요

3.1.1 취수시설 재원

본 연구에서 적용한 취수시설은 전라북도 부안군에 위치한 격포항의 취수시설이다. 취수시설의 취수관은 여과사에 묻혀있는 형태로 여과사의 두께는 취수관을 중심으로 상부로 2.0 m, 하부로 1.0 m 포설되어 있어 총 3.0 m 높이의 모래층으로 이뤄져 있다. 총 3열로 각 관당 길이는 20 m이다. 취수관은 펌프에 연결되어 필요한 곳으로 해수를 이송한다(Fig. 2 참조).

3.1.2 해석영역설정

관의 길이는 20 m 이고 내부관의 두께 및 내외부관의 간격은 0.006 m 이므로 취수관 3열을 모두 해석하기에는 격자수의 한계가 있으므로 각 열의 취수량은 모두 동일하다는 가정으로 1열만 해석하였다. 각 Section 및 유공별 취수량 및 유속분포를 분석하였다.

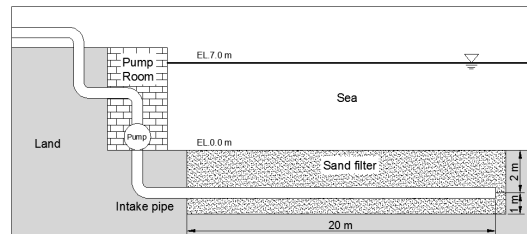


Fig. 2. Schematic of seawater intake system

3.2 수치모의 조건

3.2.1 입력변수

1일 필요수량은 7,500 m^3 이며 3개의 취수관에서 취

수가 이루어지므로 1개 취수관에서의 유량은 $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$ ($= 29.75 \text{ kg/s}$)이다. 격포항의 수위조건은 취수량이 가장 많고 관의 압력도 최대일 것으로 예상되는 만조위인 EL.+7.0 m로 설정하였고 해수는 부유사를 포함하지 않는 깨끗한 해수로 가정하였다. 기타 해석조건은 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Conditions of numerical simulations

Variable	Value
Intake discharge(m^3/s)	0.029
Tidal level(EL,m)	7.0
Density of seawater(kg/m^3)	1,028
Porosity of outer pipe(%)	16.0
Porosity of filtering sand(%)	30.0
permeability coefficient of filtering sand(m/s)	0.0018

3.2.2 케이스별 경계조건

본 연구에서는 상부유공의 간격이 변함에 따라 취수부에서의 흡입력이 취수관 말단까지 동일하게 전달되는지를 확인하기 위해 총 4케이스로 상부유공의 변화를 주었다. 등간격으로 각각 0.5 m, 0.6 m, 0.8 m 일 때와 간격변화 케이스이다. 간격변화 케이스는 20 m 단일관을 2.5 m 길이의 8개 Section으로 나뉘었을 때 Section 1은 0.8 m 간격, Section 2는 0.6 m 간격, 나머지 Section 3~8은 0.5 m 간격으로 설정한 것이다(Fig. 3 참조). 이는 관의 말단으로 갈수록 간격을 좁게 설정한 것으로 취수부의 흡입력이 취수부 부근에서만 작용하지 않도록 하였다. Section 별 상부유공의 개수는 0.8 m 일 때 3개, 0.6 m 일 때 4개, 0.5 m 일 때 5개이다. 취수부 경계조건은 유량으로 설정하였다.

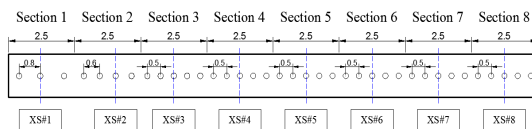


Fig. 3. Intervals of up holes for varying interval case and locations of cross-section for each section

모든 Case에 대해서 상부경계조건은 만조위 조건인 EL.+7 m에 해당하는 정수압 조건으로 설정하였다. 전체 수치해석의 Case는 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Cases of numerical simulations

Case	Tidal level (EL,m)	Interval between Inner and outer pipe(m)	Intervals of up holes	Boundary conditions	
No outer pipe	7.0	0.006	Varying interval	Intake discharge $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$ Pressure	
Case 01					0.5
Case 02					0.6
Case 03					0.8
Case 04			Varying interval		

3.3 격자 생성 및 경계조건

해석의 경제성을 위해 유속이 느린 여과사 부분은 상대적으로 격자의 크기를 크게 설정하였고 2중 유공관의 유공부근은 내외부관 사이의 유동까지 해석하기위한 취수관의 격자는 조밀하게 구성하였다(Fig. 4 참조). Table 3에 각 케이스별로 해석에 사용한 격자의 Node 수와 Element 수를 나타내었다.

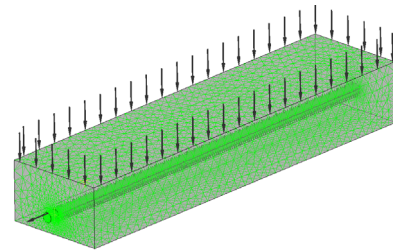


Fig. 4. Generated meshes for simulation

Table 3. Numbers of nodes and elements

Case	# of nodes	# of elements
No outer pipe	1,241,535	6,751,046
Case 01	699,215	3,613,500
Case 02	701,256	3,624,924
Case 03	695,317	3,593,229
Case 04	696,671	3,599,445

4. 수치모의 결과

상부유공변화에 따른 취수량 변화를 분석하기위해 각 구간별 유입유량을 구간별 유입량과 상부유공의 유입량을 산정하여 취수부로 부터의 거리에 따른 경향을 분석하였다. 또한, 각 구간별 대표단면(XS#1, 3, 6, 8)에 대한 유속분포를 도시하고 취수시 흐름양상을 비교하였다.

4.1 유속분포

4.1.1 x-z 단면

x-z 단면 분석 결과 외부관이 없는 경우가 외부관이 있는 경우들에 비해서 취수관 가까이의 유속이 크게 나타났다. 또한, 외부관이 없는 경우 취수부에서 멀어질수록 유속이 감소하면서 흐름이 안정되는 것으로 나타났으나 외부관이 없는 경우에는 흐름의 교란이 크게 발생하였다. 정량적인 확인을 위해 8번 단면에 대해 평균 난류 에너지를 산정한 결과 외부관이 없는 경우 $3.8E-05$ J/kg, 외부관이 있는 경우 $2.3E-04$ J/kg 로 외부관이 있을 때보다 외부관이 없을 때 약 6배 큰 난류에너지가 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 외부관이 취수관 내 흐름을 균일하게 만들어 안정적인 취수가 가능하도록 한다는 것을 의미한다.

4.1.2 y-z 단면

구간별 대표단면에 대한 유속분포 및 유속벡터를 Table 5에 도시하였다. 그 결과 취수부에서 가장 가까운 XS#1과 XS#3에서는 Case 02, Case 03, Case 04는 관의 좌우로 대칭되어 회전하는 흐름으로 유사하게 나타났으나 Case 01의 경우 유속이 상부로 집중되는 현상이 나타났다. 이는 상부유공의 간격이 좁고 개수가 많아 상부유공을 통해 유입되는 양이 많기 때문으로 판단된다. 취수부로부터 10 m 이상 떨어진 XS#6과 XS#8에서는 Case 03의 유속이 크게 나타났으며 이는 상부유공의 개수가 가장 작기 때문에 취수부의 압력이 관의 말단까지 전달되었기 때문으로 판단된다. 이는 Case 03의 경우 XS#8에 까지 대칭되는 회전류가 확인되는 반면 다른 Case들에서는 회전류보다 관 내부로 유입되는 흐름이 지배적인 것으로도 확인이 가능하다.

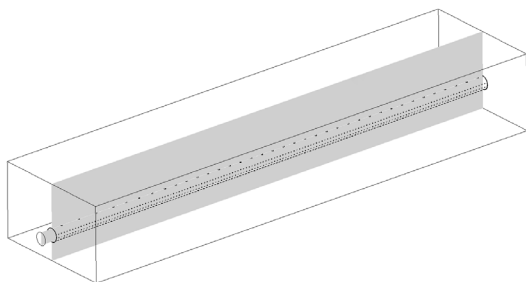


Fig. 5. x-z plane

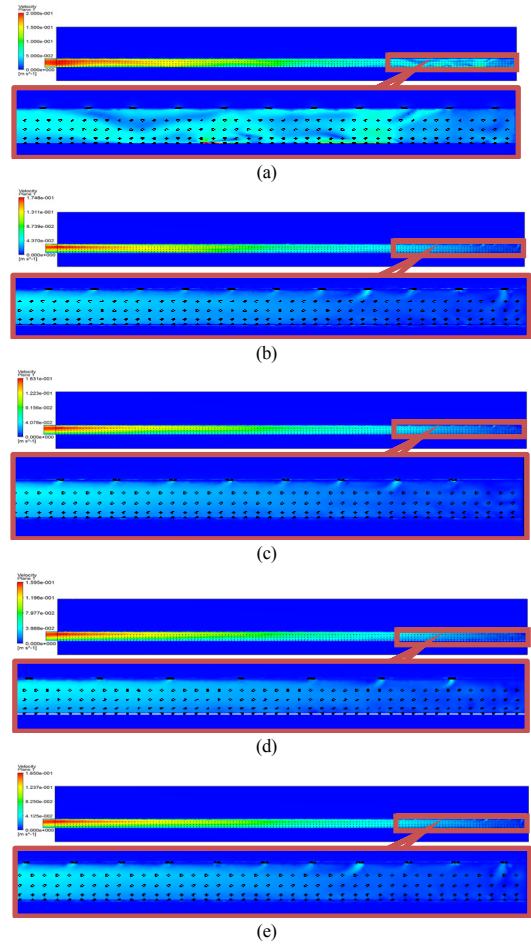


Fig. 6. Velocity distributions at x-z plane
(a) No outer pipe (b) Case 01 (c) Case 02
(d) Case 03 (e) Case 04

4.2 유입유량

4.2.1 구간별 유입유량

각 구간별 유입량을 산정하여 Table 4와 Fig. 7에 나타냈다. 전체적으로 관 말단부로 갈수록 유입량이 감소하는 경향이 나타났으며 말단부에서 조금 증가하는 경향도 모든 Case에서 동일하게 나타났다. 구간별 유입량의 차이의 정도를 나타내기 위해 표준편차를 산정하여 비교하였다. Case 02의 경우가 0.296으로 최소값을 나타냈고 단일관구조인 Case00의 경우 표준편차가 가장 큰 0.404이었다. 그러나 이 값은 총 취수량 관점에서는 1% 정도에 해당하는 양으로 상부유공의 변화가 전체 취수량에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

Table 4. Inflow rate for each sector

(Unit : $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

Case	Section								Standard Deviation
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Case 00	3.679	3.708	3.510	2.942	3.137	3.100	2.738	2.687	0.404
Case 01	3.897	3.479	3.206	3.218	3.020	2.918	2.911	3.241	0.327
Case 02	3.890	3.437	3.298	3.170	3.100	3.019	2.962	3.208	0.296
Case 03	3.903	3.431	3.232	3.136	3.188	2.915	2.983	3.215	0.307
Case 04	3.936	3.416	3.243	3.059	3.103	3.017	2.966	3.165	0.315

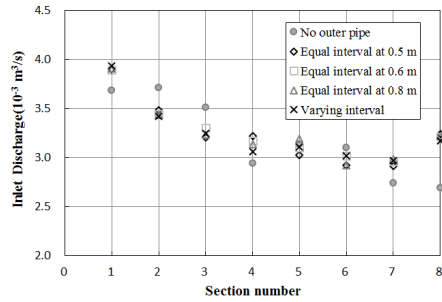
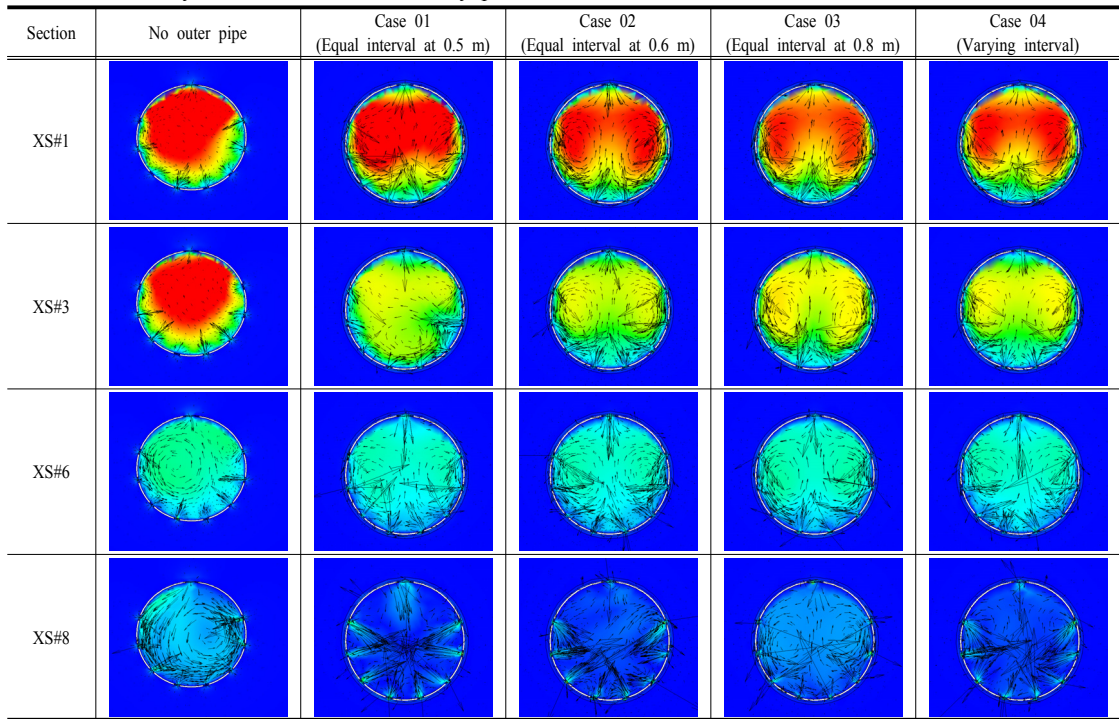


Fig. 7. Inflow rate for each sector

Table 5. Velocity contours and vectors at x-y plane



4.2.2 구간별 상부유공의 평균유입량

각 구간별 상부 유공의 평균 유입량을 산정하여 Table 6과 Fig. 8에 나타냈다. 전체적으로 Section 4까지는 취수부에서 멀어질수록 감소하다가 이후 취수관의 말단까지는 증가하는 경향을 나타냈다. 상부유공의 유입량의 표준편차는 Case 04가 0.008로 다른 Case에 비해 약 0.002~0.019 작게 나타났다. 이 값은 각 상부 유공의 평균 유입량의 약 9 ~ 31 %에 해당하므로 취수효율이나 여과효율에 영향을 미칠 수 있는 수준이라고 판단되며 결과적으로 상부유공간격의 변화가 있는 Case 04가 가장 효율적인 형상이라고 판단된다.

Table 6. Averaged inflow rate of up hole for each sector

(Unit : $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

Case	Section								Standard Deviation
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Case 00	0.144	0.117	0.089	0.081	0.070	0.070	0.070	0.076	0.027
Case 01	0.097	0.092	0.078	0.066	0.078	0.079	0.087	0.094	0.011
Case 02	0.100	0.091	0.083	0.081	0.088	0.079	0.070	0.097	0.010
Case 03	0.106	0.084	0.087	0.079	0.083	0.090	0.079	0.099	0.010
Case 04	0.096	0.092	0.084	0.075	0.075	0.081	0.084	0.091	0.008

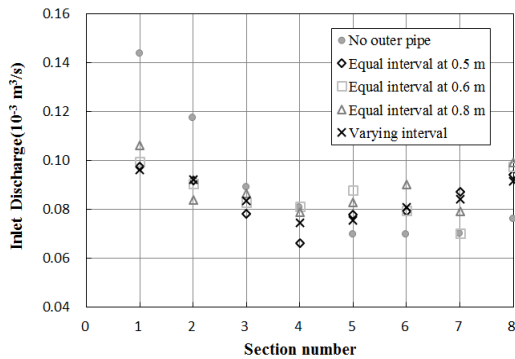


Fig. 8. Averaged inflow rate of up hole for each sector

5. 결론 및 고찰

본 연구를 통해 2중구조 유공관의 상부유공 간격 변화에 따른 흐름특성 및 취수량 변화를 분석하였다. 20 m 길이의 단일관 해석을 통해 상부유공 간격이 좁을수록 취수부 주변의 흐름이 상부로 집중되는 현상이 나타났으며 상부유공간격이 가장 큰 0.8 m 인 경우 관의 말단까지 펌프의 흡입력이 전달되는 것으로 나타났다. 전체적인 취수량은 큰 차이가 없었으나 상부유공을 통해 취수되는 양의 구간별 표준편차가 9 ~ 31 %까지 차이가 발생했다. 구간별 취수량의 표준편차가 클수록 관내 흐름이 불안정하게 발생하고 여과사의 여과효율을 감소시킬 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 관 말단으로 갈수록 상부유공간격을 좁게 변화시킨 Case 04의 경우가 가장 적절한 설계 형상이라고 판단하였다.

본 연구에서는 2중관 구조를 갖는 취수관의 상부유공 변화를 통한 3차원 수치모의를 통해 취수효율 및 여과효율을 향상시킬 수 있는 형태를 제안하였다. 그러나 이러한 결과는 여과사를 다공성재질로 가정하고 상부유공관의 간격변화에 의한 취수 흐름만을 분석하여 도출된 결론으로 해수취수시스템의 지속적인 사용에 의한 여과사의 폐색은 고려하지 못하는 한계가 있다. 또한 유공관의 길이는 20m 이고 내외부관 간격은 0.006 m로 내외부관 사이의 압력분산효과까지 확인할 정도로 조밀한 격자를 구성하지 못해 유공유입량을 통해 간접적으로만 확인하였다. 추후 다양한 조건 및 영향인자에 대한 민감도 분석이 수행된다면 개별 환경에 적합한 최적설계안을 도출하는데 활용될 수 있고 2중구조 유공관의 형상을 조밀한

격자를 통해 정밀하게 재현하여 수치모의를 수행한다면 구조적인 안전성까지 만족시킬 수 있을 것이라고 생각한다.

References

- [1] Gille, D. "Seawater intakes for desalination plants", Desalination, Vol.156, No.1, pp.249-256, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00347-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00347-3)
- [2] Pankratz, T. "Seawater desalination technology overview", Presentation to the Georgia Joint Comprehensive Desalination Study Committee. St. Simons Island, Georgia, Aug 22 - 23, 2006.
- [3] Hongik University Institute of Science and Technology, The Report of 3D Numerical Simulation for Near part Seawater Intake Facility (in Korea), 2011
- [4] Johnston, N. "U.S. Patent No. 2,217,370. Washington, DC", U.S. Patent and Trademark Office, 1940.
- [5] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement. Status of New Technology designation & certification, <http://kaia.re.kr>, 2012.
- [6] Kim, J.H., Kim, T.W., Lee, S.O. and Park, Y.J. "Analysis of Seawater Intake System using the RNG k-ε Algorithm", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.14, No.12, pp.6447-6454, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.12.6447>
- [7] Cho, Youngman, Yoo, S., Roj, J., Bin, J., Choe, K., Lee, K., Lee, G. and Lee, J. "Evaluation of Pressurized Water Diffusion in Water Treatment Process Using CFD". Journal of KSEE, Vol. 33, No. 5, pp. 359-367, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.4491/KSEE.2011.33.5.359>
- [8] ANSYS Inc., ANSYS CFX-solver theory guide. ANSYS release 13.0, 2010.
- [9] Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Handbook of Soil Mechanics. 1985.

김수영(Sooyoung Kim)

[정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원 건설도시공학부 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후연구원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험

이 승 오(Seung Oh Lee)

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 5월 : Georgia Tech. 토목 환경공학 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 8월 : 한양대학교 토목공학과 연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 건설도시공학부 부교수

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험