

코안다효과가 적용된 빗물받이에 관한 연구

정용신*, 김용선*, 신희재**, 고상철***,#

*전주대학교 탄소연구소, **전주비전대학교 기계과,

***전주대학교 기계자동차공학과

A Study on Rain Gutters with Coanda Effect

Yong Sin Jung*, Yong Sun Kim*, Hee Jae Shin**, Sang Cheol Ko***,#

*Institute of Carbon Technology, Jeonju UNIV., **Department of Mechanical Engineering, VISION

College of Jeonju, ***Department of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju UNIV.

(Received 14 January 2020; received in revised form 24 February 2020; accepted 1 March 2020)

ABSTRACT

Large-scale flooding due to extreme weather and typhoons causes heavy damage. This is especially true in urban areas where accumulated debris prevents the smooth drainage of rainwater in sewage facilities such as rain gutters installed near roads. In this study, to improve the drainage performance and effectively remove foreign substances by applying the dust screen used in rivers, the rain gutter with Coanda effect was simulated and compared with the experiment. The simulation was performed by setting the parameters to the fillet radius R_1 and R_2 at the top of the screen filter, the fillet radius R_3 at the bottom of the screen filter, and the height H of the gap W from the bottom. W is the gap at the backside of screen filter which is applied to stimulate the Coanda effect. According to the simulation results, the highest drain performance was 87.99% derived from $R_1=30\text{mm}$, $R_2=5\text{mm}$, $R_3=85\text{mm}$, $H=75\text{mm}$, and $W=2\text{mm}$. The error rate of simulation results refer to the 4.89%~7.36% compared to the experimental results. In the future, by considering the slope according to the installation environment, the simulation results can be applied to the actual roadside to help prevent flood damage.

Key Words : Coanda Effect(코안다 효과), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Rain Gutter(빗물받이), Drain Performance(배수 성능), Heavy Rainfall(집중 호우)

1. 서 론

최근 세계적으로 기상이변과 태풍에 따른 계절 라성 폭우, 집중 호우 등에 의하여 대규모 홍수 피해, 인명피해 등 막대한 재산피해를 입고 있다.

이러한 원인은 지구 온난화 현상도 있지만, 무엇보다도 집중호우나 홍수가 발생하였을 때, 물을 막아주는 역할을 하는 저수지, 댐, 하천의 보, 도시의 배수시설 등이 제 기능을 하지 못하거나 효율적인 배치 또는 운영이 부족한 실정에 기인하는 것도 무시할 수 없다. 특히 도심지역에서 집중 호우에 의한 피해는 도로변에 설치되어 있는 빗물받이 등과 같은 하수도시설에서 빗물이 원활하게 배

Corresponding Author : scko@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-2623, Fax: +82-63-220-3161

수되지 않음으로 정체된 노면수가 인근으로 유입됨으로써 침수피해, 악취 등을 가중시키는 중요한 요인이 되는 경우도 많다.

이러한 문제점들을 고려할 때 침수피해에 의한 시민들의 재산을 보호하고, 악취 등의 불편을 덜어주기 위하여 합리적이며, 효과적인 배수시설이 필요하며, 이런 배수시설로 부합되는 빗물받이 형상을 만들어 실험을 통하여 관찰하고 이를 바탕으로 도로 조건에 따라 배수 능력은 향상시키고 이물질 또한 효과적으로 걸러 도시 홍수피해의 경감 대책이 필요하다.

외국의 경우 경사, 빗물받이의 간격 등에 대한 빗물받이 배수능력을 실험에 의해 연구 적용함으로써 도심배수연구를 계속 진행해왔지만 국내에서는 침투형 빗물받이에 대해 간격, 경사에 따른 연구만 진행되어 왔을 뿐 빗물받이의 형상에 대한 연구는 따로 진행이 되지 않았다. 따라서 도로의 간격, 폭원을 고려한 형상을 개발하여 실험을 통해 검토함으로써 합리적인 설치방안을 제시하여 도로의 빗물받이 배수능력과 이물질 제거능력을 향상시켜서 홍수피해 및 악취피해를 경감시켜야 한다¹¹⁾.

본 연구에서는 강 혹은 하천에서 적용되는 제진기 스크린에 코안다 효과를 적용시킨 형상을 빗물받이에 도입하여 배수성능을 높이고 이물질 제거를 효과적으로 할 수 있도록 최적의 형상을 찾아 시뮬레이션을 진행, 분석한 후 모형실험장치를 설계하고 제작하여 실험하였다.

2. 이론적 배경 및 수치해석

2.1 코안다 효과

코안다 효과는 벽면 주변을 이동하는 유체가 벽면에 붙어 그 면을 타고 흐르는 현상이다. 이 현상은 추가적인 장치가 없어도 유동의 흐름 변화를 유도할 수 있기 때문에 엔진의 추력 편향 에어포일의 유동제어, 양항비 등과 같이 공력특성을 향상시키기 때문에 연구가 진행되어 왔다. 코안다 효과의 유체의 압력과 입자거동을 유도하는 공식은 Bernoulli 방정식으로부터 식(1)과 같이 유도된다.

$$p_0 = p_\infty - \frac{\rho U^2}{a} \quad (1)$$

여기서 U 는 평균유속, ρ 는 분출되는 유체의 밀도이며, a 는 곡면의 회전반경을 나타낸다. 식 (2)와 같은 조건에서 비 점성 유체의 압력은 주변 압력보다 낮으며, 여기서 b 는 분출하는 슬롯의 간격을 의미한다.

$$\frac{\rho U^2 b}{a} \leq p_\infty \quad (2)$$

평균속도는 유선형의 면을 따라 표면 압력이 증가하는 동안 감소하며 대기 압력과 같아진다. 표면 압력 p_s 의 조건이 $p_s = p_\infty$ 일 때 곡면으로부터 유동박리가 일어난다. 코안다효과는 몇 가지 물리적 매개변수로 설명할 수 있다. 식 (3)은 Newman에 의해 높은 레이놀즈수에서 코안다 유동분석을 통해 실린더를 따라 흐르는 유동을 다음과 같은 방정식으로 제안하였다.

$$\theta_{sep} = f \left[\left(\frac{(p_0 - p_\infty) \cdot b \cdot a}{\rho \cdot \nu^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (3)$$

여기서 b 는 슬롯의 너비, θ_{sep} 는 제트유동이 분리되는 각도, $(p_s - p_\infty)$ 는 벽 표면의 압력과 대기압의 차, a 는 곡률반경을 나타내며, 유동박리 각도 θ_{sep} 가 실린더의 기하학적인 특성과 압력차, 유체의 특성함수임을 의미한다⁸⁻⁹⁾.

2.2 수리학적 상사법칙

일반적인 유체흐름에서 적용하는 힘의 성분은 중력, 압력, 표면장력, 탄성력, 점성력등으로 구분할 수 있다. 이런 힘의 성분 크기의 비가 실물과 모형에서 일정하여야 역학적 상사법칙이 성립한다. 유동에 작용하는 힘에 따른 역학적 상사법칙의 성립은 이론적으로 가능한 일이나 실제에서는 매우 힘든 일이다. 실제 사용하는 경우 상황에 따라 지배적인 영향을 미치는 큰 힘에서 상사법칙을 논하며, 영향이 작은 힘에서는 무시할 수 있다.

관수로의 유체흐름은 점성을 고려하여 상사성을

적용하며, 개수로의 유동흐름은 중력만 고려하여 역학적 상사법칙을 적용한다. Froude 상사법칙은 자연 하천과 같은 개수로에서 모형과 실물사이 유동에 대하여 신뢰할 수 있다. 따라서 서술한 힘의 성분 중 중력이 지배하고 개수로에서 역학적 상사가 성립되고, Froude수(F_r)를 같게 한다면 Froude 상사법칙을 적용하여 실험을 진행하게 된다.

일반적인 개수로에서 흐름을 지배하는 기초 미분방정식은 유체의 속도와 물의 깊이를 함수로 나타낼 경우 식(4)와 식 (5)와 같이 표시 할 수 있다.

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial L} - I + \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial L} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

여기서 g 는 중력가속도, V 는 평균속도이고, t 는 시간, n 은 Manning의 조도계수, R 은 경심, y 는 수직거리, L 은 수평거리 I 는 동수반경, A 는 단면적 Q 는 유량이다. 기하학적 상사로 제작된 모형의 경우 실물과 모형의 유동이 상사성이 일치하기 위해서는 식(6)의 각 항 대응비가 일정해야 한다.

$$\frac{V_r}{t_r} = \frac{y_r}{L_r} = I_r = \frac{V_r^2}{L_r} = \frac{n_r^2 V_r^2}{R_r^4} = Const. \quad (6)$$

여기서 $V_r = \frac{V_p}{V_m}$, $t_r = \frac{t_p}{t_m}$, $y_r = \frac{y_p}{y_m}$, $L_r = \frac{L_p}{L_m}$,

$n_r = \frac{n_p}{n_m}$ 이며 첨자 p 는 실물, m 은 모형이다^[9-10].

3. 경계조건 및 모델링

3.1 시뮬레이션 형상 설계

빗물받이에 코안다효과를 적용하기 위하여 코안다 효과가 적용된 제진기 스크린 형상을 토대로 한 빗물받이 모델링을 Fig. 1에 나타내었으며, 모델링에 대한 치수와 코안다 효과에 영향을 미칠 수 있는 변수에 대하여 Table 1에 도시하였다^[8].

Screen angle은 지면과 스크린필터의 각도이며,

Table 1 Boundary condition of CFD

Screen angle	30°
Number of screens	11 EA
Inlet Velocity	1 m/s
Fillet radius R_1	0 ~ 40 mm
Fillet radius R_2	0 ~ 20 mm
Fillet radius R_3	0, 80, 85 mm
W	2 mm
H	45 ~ 75 mm

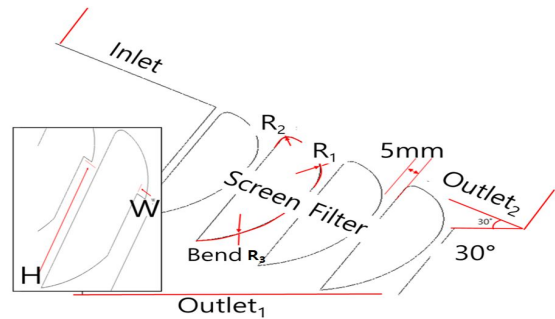


Fig. 1 Schematic of the screen shape variable

스크린필터 상단의 Filler 반경 R_1 과 R_2 를 변수로 지정하였으며 효과에 직접적인 영향을 주는 변수는 R_1 이다^[8]. 변수 R_3 는 스크린필터 하부 배면의 Fillet 반경을 의미하며, W 는 코안다 효과를 촉진하기 위해 스크린필터의 배면에 생성한 Gap을 의미한다. 또한 H 의 경우 스크린필터 하단에서부터 W 위치까지의 길이를 의미한다. 스크린필터의 개수는 11개, 그리고 스크린필터 사이의 간격은 5mm로 고정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

빗물은 Inlet에서 1 m/s의 속도로 유입되어 스크린 필터를 거쳐 Outlet₁ 또는 Outlet₂로 흘러 나가게 되며, 해석 공간 내의 초기압력은 대기압으로 설정하였다. 스크린의 배수성능이 우수하다면 Outlet₁로 흘러나가는 유량이 많아지게 된다. 스크린의 배수성능은 식(7)과 같으며 Inlet 대비 Outlet₁로 흘러간 비율로 구한다.

$$Performance(\%) = \frac{Outlet_1 \text{ flow rate}}{Inlet \text{ flow rate}} \times 100 \quad (7)$$

3.2 실험을 위한 형상 설계

최적의 효율로 도출된 빗물받이 형상의 신뢰성을 확보하기 위하여 Fig. 2와 같이 아크릴을 이용하여 실험 장치를 설계하고 제작하였다. 본 실험 장치는 상사성에 대한 식을 적용하고자 식 (6)의 평균속도 V , 물의 높이 y 항을 시뮬레이션과 실험장치의 대응비가 일정하도록 제작하였다. 유속측정은 유속계를 이용하여 속도가 일정해질 때까지 상단수조에 연결된 밸브를 조절하여 측정했으며, 유량은 면적 A 와 측정된 유속 V , 그리고 통과한 시간 t 를 이용하여 계산하였다. 그리고 식 (7)에 의해 배수성능을 계산하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

최적화된 빗물받이 스크린은 3D 프린터를 이용하여 제작하였다. 시뮬레이션 결과, 변수 R_1 , R_2 , R_3 를 통한 최적의 배수성능을 가진 필터 Case 11과 또한 추가로 코안다효과를 촉진시키기 위하여 변수 W 와 H 로 최적 설계한 필터 Case 16의 두 가지 스크린필터를 제작하였다. 제작된 두가지 스크린필터는 Fig. 3에 나타내었다.



Fig. 2 Rain gutter experiment

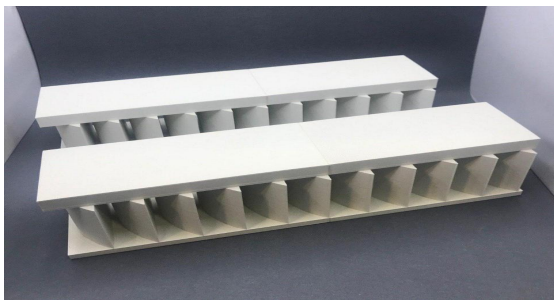


Fig. 3 Rain gutter screen made with 3D printer

4. 결과

4.1 시뮬레이션 결과

Fillet 값에 대한 코안다효과를 확인하기 위하여 변수 R_1 , R_2 및 R_3 대한 최적치를 확인하고자 하였다. 또한 코안다효과를 촉진시키기 위하여 스크린필터 배면에 $W=2\text{mm}$ 의 간극을 주고, 스크린필터 하단으로 부터의 거리 H 에 대한 시뮬레이션을 수행하여 배수성능에 미치는 영향을 계산하였다. 대표적인 Case 3, 6, 9에 대한 Contour 값을 Fig. 4에 도시하였다.

변수 R_2 와 R_3 가 0mm으로 고정된 상태에서 변수 R_1 의 값을 10mm 간격으로 40mm까지 시뮬레이

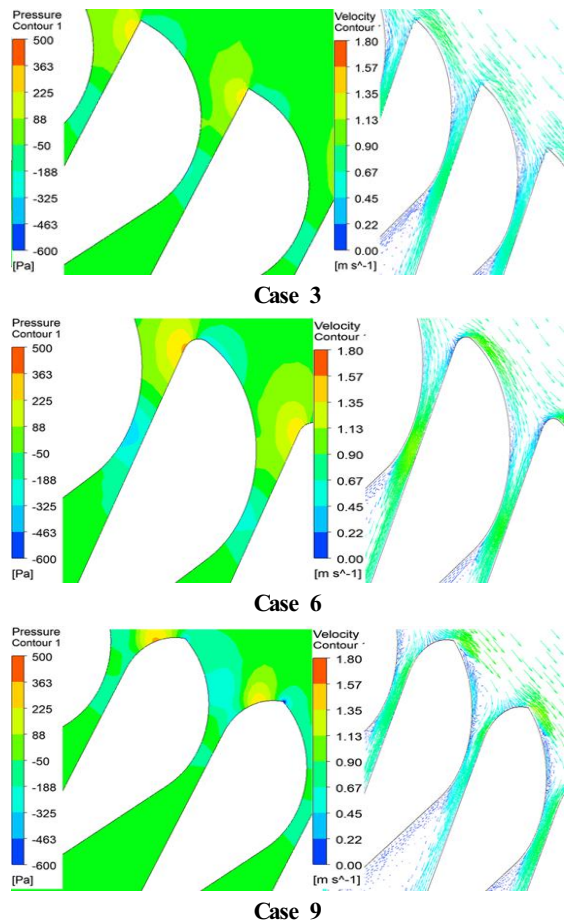


Fig. 4 Contour of pressure and vector

선 한 결과 R_1 값이 증가할수록 10mm에서 급격히 배수성능이 증가하였고, 30mm일 때 79.32%로 가장 높은 성능이 나오고, 40mm일 경우에는 오히려 배수성능이 낮아졌다.

변수 R_1 을 30mm, R_3 를 0mm로 고정하고 변수 R_2 를 5mm 간격으로 변화시켜가면서 시뮬레이션 수행한 경우에는 5mm일 때 80.90%로 가장 성능이 높은 것으로 나타났으며, R_2 값이 증가할수록 오히려 성능이 감소되었다. R_1 과 R_2 에 따른 배수성능 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

스크린필터 배면의 곡률 R_3 의 경우 코안다효과에 간접적으로 영향을 줄 수 있기 때문에, $R_1=30mm$ 와 $R_2=5mm$ 에서 80.90%로 가장 배수성능이 좋은 변수값을 기준으로 설계가 가능한 R_3 값인 80, 85mm 두 가지 경우를 비교하였으며, $R_3=85mm$ 일 때 82.65%로 높은 배수성능을 확인하였다. 이상을 정리하여 Fillet 반경의 변화에 따른 배수성능을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Comparison of flow according to R_1 , R_2 and R_3

Case	R_1, R_2, R_3 (mm)	Drain performance(%)
1	0, 0, 0	7.11
2	10, 0, 0	75.62
3	20, 0, 0	77.53
4	30, 0, 0	79.32
5	40, 0, 0	64.52
6	30, 5, 0	80.90
7	30, 10, 0	70.43
8	30, 15, 0	60.95
9	30, 20, 0	47.29
10	30, 5, 80	81.77
11	30, 5, 85	82.65

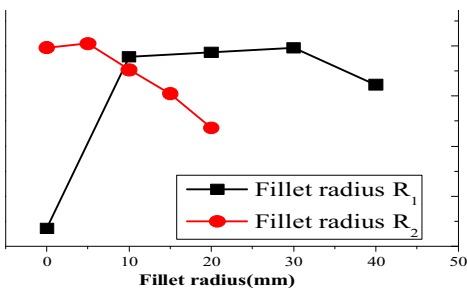


Fig. 5 Drain performance for R_1 and R_2

Table 3 Comparison of flow according to H and W

Case	H, W	Drain performance(%)
12	45, 2	84.55
13	50, 2	84.99
14	60, 2	85.62
15	70, 2	85.76
16	75, 2	87.99

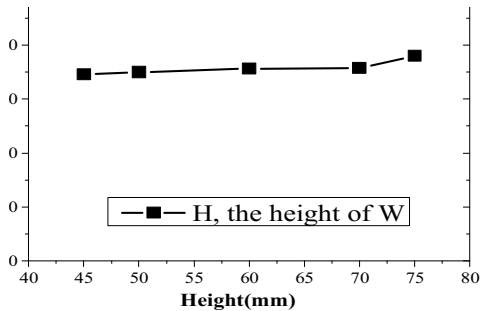


Fig. 6 Drain performance for H and W

코안다효과 적용을 위한 변수 R_1 , R_2 및 R_3 대한 시뮬레이션 결과 변수 $R_1=30mm$, $R_2=5mm$ 그리고 $R_3=85mm$ 일 때 가장 높은 배수 성능을 확인 할 수 있었다.

추가적으로 코안다효과를 촉진하여 배수성능을 높이고자 스크린 필터 배면에 Gap W를 주어 시뮬레이션을 진행하였다. W는 2mm로 고정된 상태에서 스크린필터 하단으로부터 W의 위치 H를 변수로 45~75mm의 5가지 경우에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 배수성능에 대한 결과를 Table 3에 나타내었고, 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 또한 대표적인 Case에 대한 Pressure과 속도 Vector의 Contour 값을 Fig. 7에 도시하였다.

시뮬레이션 결과 H의 높이가 증가할수록 배수성능이 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며, 최적의 성능은 $R_1=30mm$, $R_2=5mm$, $R_3=85mm$, $H=75mm$, $W=2mm$ 일 때 87.99%로 Case 16의 경우임을 확인하였다. 따라서 Fillet 값의 최적 형상인 Case 11과, 코안다효과를 촉진하기 위해 스크린필터 배면에 Gap을 형성한 Case 16의 경우에 대한 스크린필터를 3D프린터를 이용하여 Fig. 3과 같이 제작하였다.

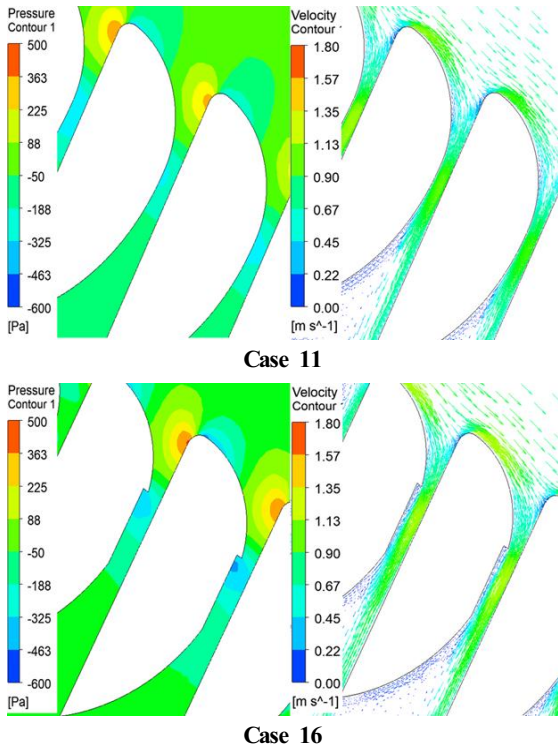


Fig. 7 Contour of Pressure and Vector

3D 프린터로 제작된 빗물받이 스크린 필터를 실험 장치로 상단수조에 물을 채워 빗물이 흐르는 현상을 재연하고, 수치해석 결과와 오차율을 비교하여 그 결과를 Fig. 8과 Table 4에 도시하였다. 실험과 시뮬레이션 결과 값에 대한 오차율은 각각 4.88%, 7.36%로 계산되었다.

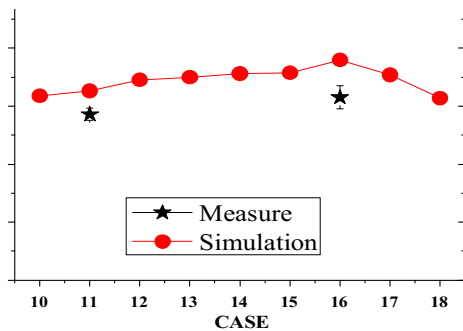


Fig. 8 Comparison of experimental and simulation results

Table 4 Comparison of experimental and simulation results

Case	Measure	Simulation	Error rate
11	78.61	82.65	4.89
16	81.51	87.99	7.36

5. 결론

빗물받이에서 이물질을 효과적으로 제거하기 위하여 하천에서 사용되는 제진기를 응용하여 시뮬레이션을 실시하고 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 분석하였다. 코안다 효과는 Outlet₁으로 흐르는 유동에 스크린필터 배면부에서 저압을 형성하게 되고 그로 인해 배수성능이 증가하게 되는 효과를 확인하였다.

1. 배수성능에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 R_1 이었으며, $R_1=30\text{mm}$ 일 때 가장 좋은 성능을 나타내었다. 또한 변수 R_2 및 R_3 는 코안다효과에 지배적인 영향은 미치지 않지만 부분적으로 효과를 나타내어 배수성능이 약 3%증가하는 것을 확인할 수 있었다.
2. 또한 스크린필터의 배면에 Gap을 주어 코안다 효과를 촉진하고자 하였으며, 이 Gap의 위치에 따른 효과를 검증하였다. 해석 결과, Gap의 위치인 H의 높이가 높아질수록 효율은 증가하는 경향을 보였으며 배수성능이 약 5% 정도 증가하는 효과가 있는 것을 확인 할 수 있었다.
3. 최종적으로 각 변수에 따른 최적설계의 형상은 $R_1=30\text{mm}$, $R_2=5\text{mm}$, $R_3=85\text{mm}$, $H=75\text{mm}$, $W=2\text{mm}$ 인 Case 16의 경우로, 이때의 배수성능은 87.99%를 얻었다.
4. 다양한 설계변수의 영향에 대한 조사를 통하여 빗물받이 스크린필터의 코안다 현상에 대한 효과를 확인하였으며, 실험을 통해 수치해석의 오차율을 검증하였다.

후 기

“이 논문은 한국연구재단의 2017년도 이공학 개인기초 연구사업(NRF-2017R1D1A1B03036070)과 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2016R1A6A1A03012069).”

REFERENCES

1. Kim, K. H., Lee, J. H., Park, M. S., Lee, D. W., “Prediction of the ventilation performance in a kitchen with various locations of gas range and window”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 75-82, 2000.
2. Kim, K. J., Bae, G. N., Kim, Y. I., Hur, N. K., “A Numerical Study on the Particle Collection Characteristics of a Grease Filter for Kitchen Ventilation”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 792-801, 2002.
3. Kwac, L. K., Kim, H. G., Ko, S. C., Kang, S. S., “The Development of Technology for oil Mist and Odor Removal Using Cab Type Filter”, KSMTE Spring Proceeding, pp. 452-455. 2009.
4. Kim, H. G., “A Study on the Design of Filter Assembly Automation System”, The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 111-117, 2008.
5. Kim, Y. S., Yun, S. M., Shin, H. J., Ko, S. C., “A Study on the Collecting Efficiency of Oil-mist Filter according to the Sub-filter Shape”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 1, pp. 16-23. 2019.
6. Kang, M. J., Mesev, V., Myint, S. W. “Urbanization and Quality of Stormwater Runoff: Remote Sensing Measurements of Land Cover in an Arid City”, Korean Journal of Remote Sensing, Vol. 30, No. 3, pp.399-415, 2014
7. Cho, J. Y., Go, S. H., Kim, H. G., "Analysis of Drainage Efficiency of Different Type of Drainage using Computational Fluid Dynamic Method", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 16, No. 2, pp.34-43, 2017.
8. Yun, S. M., Kim, Y. S., Shin, H. J., Ko. S. C., “A Numerical Study for Optimum Design of Dust Separator Screen Based on Coanda Effect”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 177-185. 2018.
9. Lee, D. W., Lee. S., Kim, B. J., Kwon. S. B., “A Study on Jet Characteristic using a Coanda Effect in a Constant Expansion Rate Nozzle”, Journal of the Korean society for aeronautical & space sciences, Vol. 35, No. 8, pp. 706-713, 2007.
10. Kim, K. M., Kim, Y. J., Kwac. J. S., “Improvement of Film Cooling Performance of a Slot on a Flat Plate Using Coanda Effect”, The KSFM journal of fluid machinery Vol. 20, No. 2, pp. 5-10, 2017.