

# HVAC 덕트 내에 설치된 광촉매코팅 모듈의 형상이 압력강하에 미치는 영향

황광일<sup>†</sup> · 구재혁<sup>1</sup> · 김다혜<sup>1</sup> · 이현인<sup>1</sup> · 최영국<sup>2</sup>

(원고접수일 : 2011년 6월 28일, 원고수정일 : 2011년 8월 5일, 심사완료일 : 2011년 10월 5일)

## A Numerical Analysis of the Pressure Drop according to the Shape of TiO<sub>2</sub> Photocatalyst-coated Module in a HVAC Duct

Kwang-il Hwang<sup>†</sup> · Jae-Hyoek Koo<sup>1</sup> · Da-Hye Kim<sup>1</sup> · Hyun-In Lee<sup>1</sup> · Young-Guk Choi<sup>2</sup>

**요약**: 본 연구는 실내 환경오염물질 제거성능 향상을 목적으로 공조기 덕트 내에 착탈 가능한 광촉매 코팅 모듈의 형상을 개발하는 것이다. 본 연구에서는 광촉매코팅 모듈로 적용 가능한 사각, 원, 마름모 등 기둥형 세 가지와 마름모, 사각 등 흰부착형 두 가지 등 총 다섯 가지 형상의 모델을 개발하였다. 속도변화에 대한 수치해석결과, 대부분 모듈 전후 0.3m 범위 이내에서 속도변화가 발생하였지만, 마름모기둥형(Type A-3)의 경우에는 모듈 뒷부분 0.4m까지 속도가 변하였고 모듈 전후에서의 속도 변동 폭이 가장 컸다. 다섯 가지 형상 중 속도변화가 가장 안정적인 것은 마름모 흰부착형(Type B-1)으로 평가되었다. 또한 국부적인 압력강하에 대한 비교에서도 비슷한 결과가 도출되었다. 즉, 다른 형상에 비해 마름모기둥형(Type A-3)의 압력강하계수가 2.44로 가장 크게 나타났으며, 마름모 흰부착형(Type B-1)은 0.59로 가장 변화량이 적었다. 한편, 모듈 수 증가에 따른 덕트 내 유동해석에서는, 모듈 수 증가에 따라 기류 충돌이 발생하여 압력이 증가하였다. 특히 모듈 수가 3개 이상이 되면 모듈 뒷부분은 변화가 없지만 앞부분에서 압력이 상승함을 알 수 있었다.

**주제어**: 선박공조, 실내공기질, 광촉매, 환경오염물질, 쾌적, 건강

**Abstract**: The purpose of this study is to develop the shape of photocatalyst-coated module for improve the IAQ, which is installed at inside of ductwork and detachable. Including 3 column types(square, circle, diamond) and 2 fin types(diamond and square), totally 5 types are previously declared for numerical analysis and comparison, 5 types are. As the results of numerical analysis, almost the velocity varied at the range of  $\pm 0.3m$  from the module, except the Type A-3(diamond column type) which is affected to  $\pm 0.4m$  range and shows the biggest velocity differences. Among the 5 types, the diamond fin type(Type B-1) is analyzed as the most stable in velocity. And the results of local pressure drop show that the difference of pressure coefficient of Type B-1 is computed as 0.59, and that of Type A-3 is 2.44. Meanwhile, from the effect analysis of the number of module, the flow conflict happens and the pressure difference between before and after the module increases if there are over 3 modules inserted.

**Key words**: Marine HVAC, IAQ (Indoor air quality), Photocatalyst, Contaminant, Comfort, Health

### 1. 서론

#### 1.1 연구 배경과 목적

산업화, 도시화의 영향으로 일반인들의 하루 중

80% 이상의 시간을 실내에 거주하게 됨에 따라 쾌적하고 건강한 실내환경에 많은 관심을 갖게 되었다. 실내공간이란, 일반가정, 사무실뿐만 아니라 공

<sup>†</sup> 교신저자(한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부, E-mail:hwangki@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4368)

<sup>1</sup> 한국해양대학교 기계에너지시스템공학부

<sup>2</sup> (주)종합엔텍

공건물, 병원, 지하상가, 교통수단, 실내작업장 등 외부와 구분되는 모든 활동공간이 광범위하게 포함된다. 이처럼 다양한 실내공간이 오염될 경우 그 실내에서 장시간 생활하는 사람은 인체에 위대한 영향을 받게 된다. 이에 정부는 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”[1] 등의 법률을 제정하여 많은 사람들이 활동하는 다양한 공간에서의 실내공기질, 즉 실내 오염물질 발생량을 일정수준 이하로 관리하고 있다.

오염물질 제거방법은 일반적으로 자연식 혹은 기계식 환기에 의한 방법과 화학반응에 의한 방법으로 구분할 수 있는데, 화학반응방법 중 VOC를 분해시키는 가장 최신기술은 빛(光)을 받으면 촉매반응을 일으키는 광촉매를 응용하는 것이다. 그러나 아직까지 광촉매 활용기술은 소형 유닛 적용에 초점을 맞추고 있기 때문에 중대형 공조설비(Heating, Ventilation and Air Conditioning System, HVAC)가 도입된 공간에서는 필요에 따라 별도로 설치해야하는 경제적, 공간적 부담이 발생한다. 또한 공조설비에 광촉매 필터를 내장시켜 공조설비의 환기과정 중에 오염물질 제거효율을 향상시킨 기술이 일부 개발되었으나 광촉매 필터가 공조설비 본체에 위치하기 때문에 공간별 오염수준을 제어할 수 없는 문제가 있다[2-3].

이에 본 연구는, 공조설비 본체와 각 공간 사이를 연결하는 덕트 내부에 착탈 가능한 광촉매코팅 모듈을 삽입함으로써 환기와 화학반응을 모두 활용하여 오염물질 제거성을 향상시키고 각 공간별 오염수준을 제어할 수 있는 시스템 개발을 위해, 형상이 다른 착탈형 광촉매코팅 모듈 설치에 따른 덕트 내 유동특성을 수치해석을 통해 비교분석한 것이다.

## 1.2 기존연구 고찰

[4]은 사각덕트 내의 원형 실린더를 지나는 정상상태 난류유동에 대한 레이저 도플러 유속계 측정 실험결과와 표준 K-ε 모델, RNG K-ε 모델, Chen K-ε 모델 등 대표적 난류모델에 의한 수치해석결과를 비교했을 때 덕트 중앙면에서 표준K-ε 모델의 수치해석 결과가 실측결과와 가장 유사한 것으로 분석하였다. [5]은 표준 K-ε 모델 등 다양한 난류모델을 사용한

수치해석으로 HVAC 덕트 내의 속도, 압력분포, 유출유량 및 재순환 영역 등을 해석하였다.

한편 [6]은 중횡비가 1.0인 덕트에 연속요철과 단락요철이 설치될 때의 열전달 분포와 회전에 따른 압력강하 특성을 밝히고 성능계수를 구하였는데, 열전달은 큰 차이가 발생하지 않지만 압력손실은 크게 감소하는 결과를 얻었다. 그러나 가열된 바닥 위에 5° 경사진 두 개의 배플(baffle)에 설치된 직경 2cm인 비교적 큰 구멍들이 열전달과 마찰계수에 미치는 효과에 관한 [7]의 연구에서는 유속, 구멍 수, 구멍의 직경과 열전달 사이에는 매우 많은 상관관계가 존재하며, 구멍의 수가 증가할수록 열전달 계수는 증가하나 마찰계수는 감소한다는 결과를 제시한다. 이상과 같은 연구결과로부터 덕트 내 매설물의 형상에 따라 유체유동 특성이 다를 수 있다.

## 2. 수치해석 범위와 방법

### 2.1 지배방정식과 난류 모델

본 연구에서는 덕트 내 유동을 3차원 정상상태, 비압축성 난류유동이고 모든 물성치는 일정하다고 설정하였다. 다양한 난류모델 중 본 연구에서는 가장 기본적인 표준 k-ε 모델을 이용하여 해석을 수행하였고, k-ε 모델의 기본방정식은 연속방정식, 운동량방정식, 난류운동에너지와 난류에너지감쇄율에 관한 2개의 전달방정식으로 구성된다. 비압축성 정상유동에 대한 연속방정식은 식 (1), 운동량방정식은 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i u_j}) \quad (2)$$

$$\text{단, } -\overline{u_i u_j} = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K$$

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \rho \frac{K^2}{\epsilon}$$

$U_{(j)}$  : i(j) 방향 평균유속 성분

$u_{(j)}$  : i(j) 방향 난류속도 성분

$P$  : 압력

- $f_{\mu}$  : 마찰계수
- $C_{\mu}$  : 난류상수
- $\rho$  : 유체밀도
- $\nu$  : 동점성계수
- $\mu_t$  : 난류점성계수
- $K$  : 난류운동에너지
- $\epsilon$  : 난류소산에너지

2.2 평가방법

덕트 내 유동특성을 속도와 압력변화량을 이용하여 평가하였다. 속도는 덕트 내 광촉매코팅 모듈 주변의 전반적인 속도변화를 비교하였다. 덕트 내 특정 위치에서의 국부적인 압력강하는 덕트 바깥면의 기준압력( $P_{std}$ )과 특정 지점의 차압을 주유동(Main stream)의 동압으로 무차원화한 식 (3)을 이용하여, 또한 마찰계수는 시험부 입구측과 출구측 사이의 국부차압( $\Delta P$ )을 식 (4)에 대입하여 계산하였다.

$$C_p = \frac{P_x - P_{std}}{\frac{1}{2}\rho u_{avg}^2} \tag{3}$$

$$f = \frac{\Delta P}{4 \left( \frac{\Delta L}{D_h} \right) \left( \frac{1}{2} \rho u_{avg}^2 \right)} \tag{4}$$

단,  $D_h = \frac{4A_c}{P_r}$

- $u_{avg}$  : 구간 내 평균유속
- $D_h$  : 수력직경
- $A_c$  : 덕트 단면적
- $P_r$  : 덕트 둘레길이

2.3 수치해석 모델과 조건

광촉매코팅 모듈은 일반적으로 사용되고 있는 열교환기 모델을 참고하고 또한 향후 제품의 생산성과 시공성을 고려하여 Figure 1과 같이 5가지 형상으로 설정하였다. Type A는 형태별 무수히 많은 구멍이 뚫려있는 기둥 내부에 원형 광촉매코팅 봉(Rod)이 위치하는 구조이고, Type B는 환(Fin) 부착형으로 원형 광촉매코팅 봉 외부에 환을 부착한 형태이다. 마름모기둥형인 Type A-3는 공기 유입구측이 길이 방향으로 개방된 형상이다. 각 광촉매코팅 모듈의 크기는 40mm×40mm×336mm이고, 수치해석을

위한 덕트의 크기는 한국공기청정협회 PA인증기준 [8]의 풍량시험장치 구조를 참고하여 400mm×400mm×2000mm로 정하였다. 광촉매 모듈은 시공성을 고려하여 Figure 2에 나타난 것과 같이 덕트 정중앙에 유체의 흐름과 직교되는 방향으로 설치하였다.

광촉매코팅 모듈이 삽입된 덕트 내 유동특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 상용 CFD 해석프로그램인 Fluent를 사용하였다[9]. 모델링 메시는 형상에 따라 조금 차이가 있지만 220만개 내외이다. 덕트 입구측 공기의 유입속도는 2.5m/s을, 난류 모델은 전술한 바와 같이 표준 K-ε 모델을 적용하였고, 정상상태의 해석방법으로 수치해석을 수행하였으며 반복계산을 통하여 잔여오차는 0.001% 이하가 되도록 설정하였다.


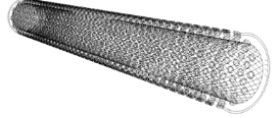
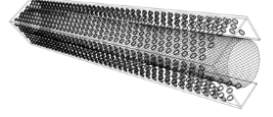
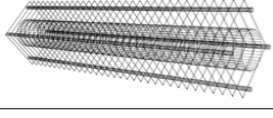
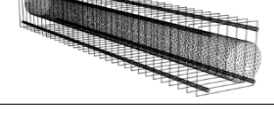
Type	3D modelling
A-1	
A-2	
A-3	
B-1	
B-2	

Figure 1: Types for Numerical CFD

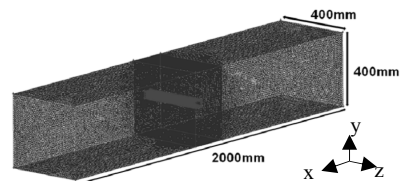


Figure 2: A sample of 3 dimensional model

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 형상별 속도변화 비교

광촉매코팅 모듈에 의한 5개 형상의 덕트 내부

주속도 U, V 성분(x-y단면) 변화를 Figure 3에 등속도를 연결한 등속도선(velocity contour)으로 나타내었다. 또한 Figure 3에는 유체 유동속도 변화량을

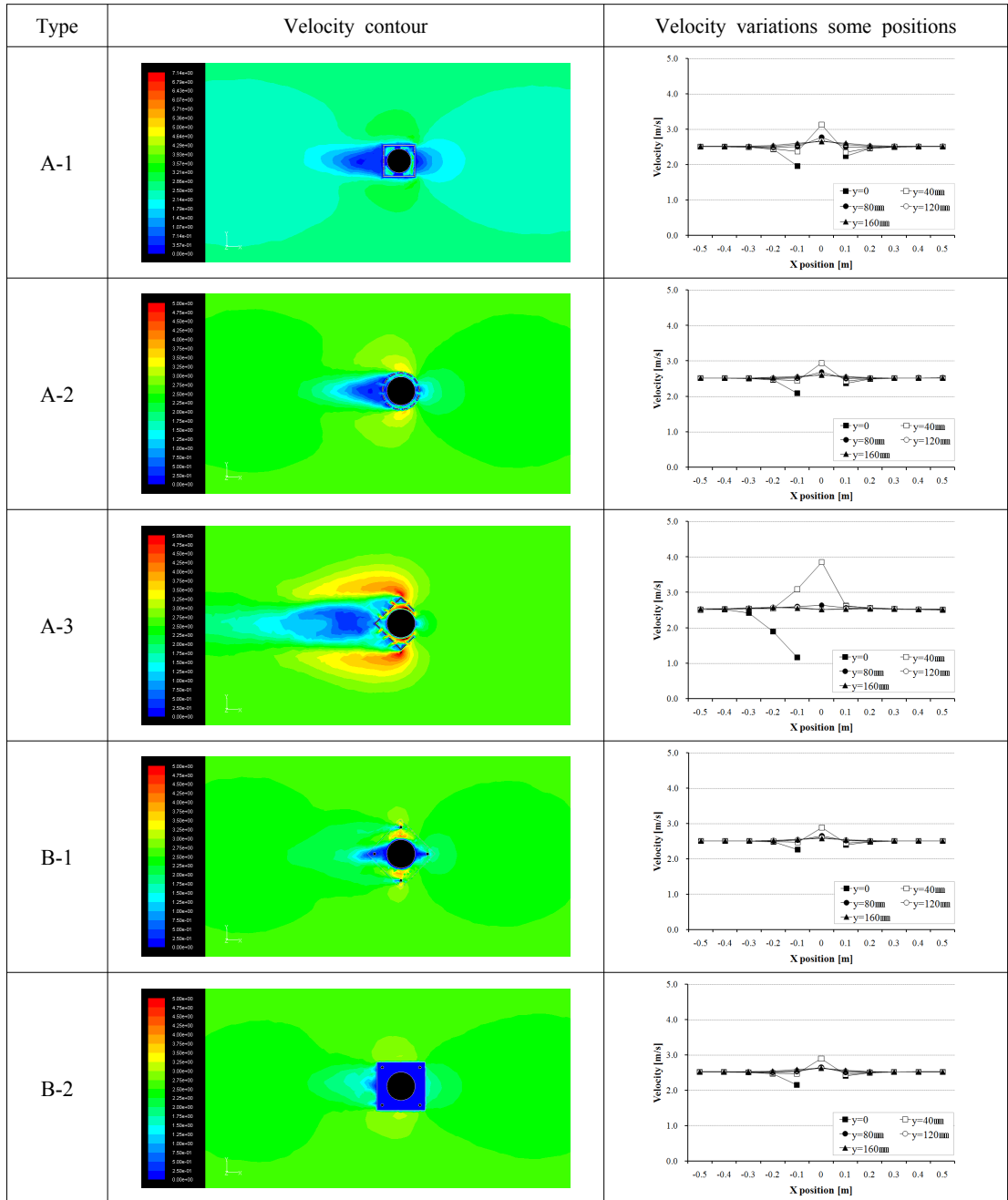


Figure 3: Velocity contour and velocity variations in x-y section of each type

정량적으로 표시하기 위하여 모듈 주변의 x-y 단면 상 55개 지점의 속도값을 그래프로 비교하였다. 55개 지점은 모듈을 중심으로 유선방향으로  $\pm 0.1\text{m}$ 씩

떨어진 간격에 11개 지점과 모듈을 기준으로 유선 위 방향으로 0mm,40mm,80mm,120mm,160mm의 다섯 간격으로부터 지정되었다.

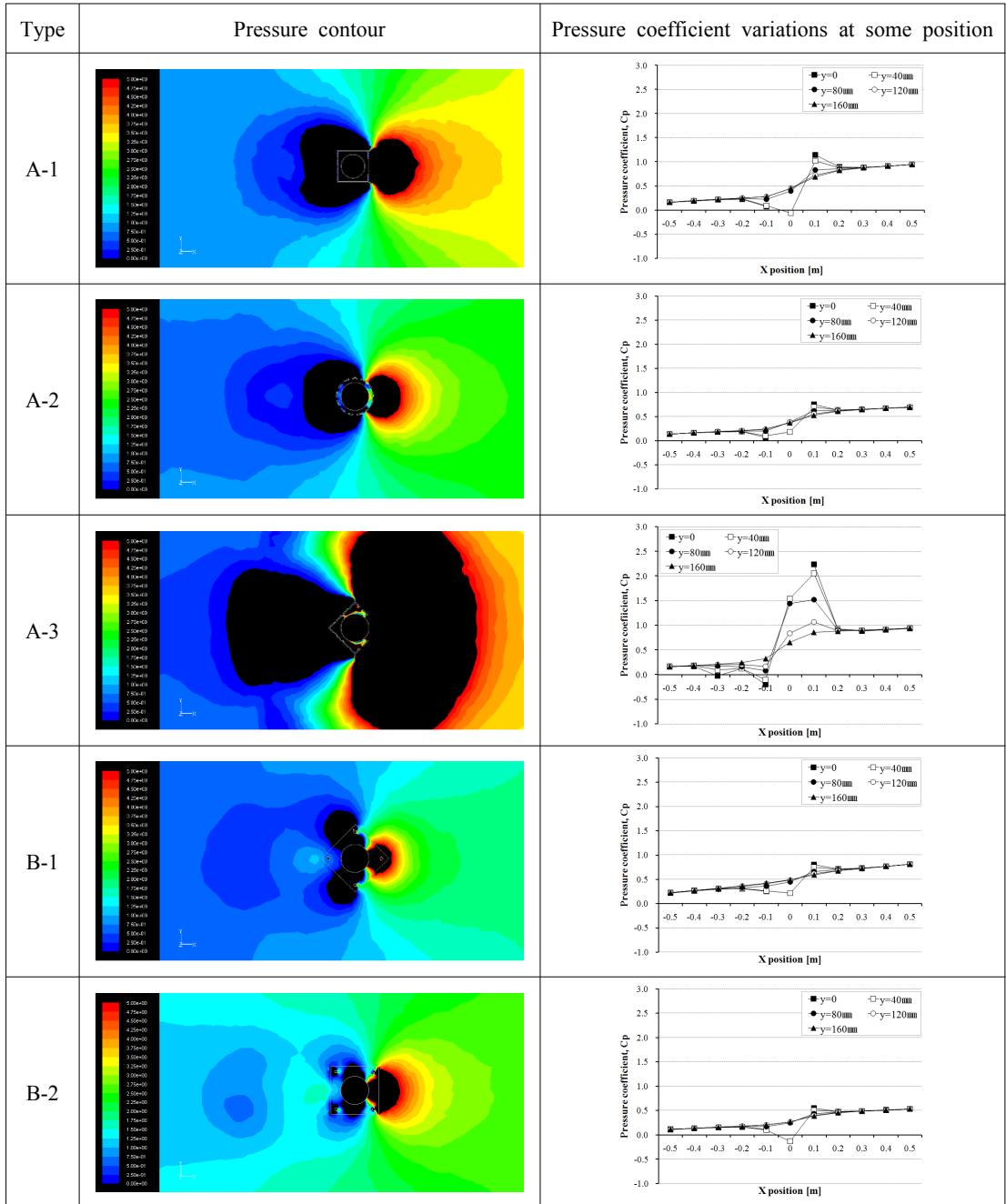


Figure 4: Pressure contour and pressure coefficient in x-y section of each type

Figure 3으로부터 대부분의 현상에서 모듈 전후 ±0.3m 범위 내에서 유체 속도변화가 발생하며, 속도 변화의 폭이 가장 큰 것은 마름모기둥형인 Type A-3에서 발생한 1.17%~3.85%의 범위였다. 또한 Type A-3는 모듈 주변에 가장 넓은 속도 영향장을 형성하고 있음을 알 수 있다. 속도변화량이 가장 작은 것은 흰 부착형 구조인 Type B-1과 Type B-2이었다. Type B-1의 속도변화량의 폭은 2.27% ~ 2.89%, Type B-2는 2.14% ~ 2.90%로 다른 형상에 비해 매우 안정적인 속도변화를 나타내었다.

3.2 형상별 압력변화 비교

Figure 4는 각 광촉매코팅 모듈의 형상에 따른 등압력 분포와 압력계수변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 마름모기둥형인 Type A-3는 모듈 주변에서 매우 넓은 저압 영역대가 형성되고 있는 것이 보이고 사각기둥형(Type A-1), 원형기둥형(Type A-2) 역시 작지 않은 범위에서 저압 영역대가 형성되었다. 이에 비해 마름모 흰부착형(Type B-1)과 사각 흰부착형(Type B-2)의 경우에는 기둥형에 비해 상대적으로 저압 영역대가 작게 나타났다. 이는 기둥형에 비해 흰부착형이 압력 저항이 작다는 것을 의미하는 것으로, 기체의 원활한 흐름이 중요한 본 연구의 설계 조건에서 볼 때 흰부착형이 더욱 유리하다고 말할 수 있다.

한편, Figure 4의 오른쪽 항에 모듈 전후 55cm 지점에서의 모듈설치에 따른 국부적인 압력계수,  $C_p$  를 비교 정리하였다. 최대 국소 압력계수는 Type A-3의 모듈 앞 0.1m 지점에서 2.24로 나타났다. 각 형상별 최대 국소 압력계수와 최저 국소 압력계수의 차이를 비교해 보면, Type A-1은 1.20, Type A-2는 0.69, Type A-3는 2.44, Type B-1은 0.59, Type B-2는 0.68로 나타남에 따라 Type B-1이 상대적으로 모듈 전후에서 가장 안정적인 압력 변화를 나타낸다고 판단할 수 있다.

3.3 모듈 수에 따른 속도와 압력변화 비교

일반적인 공기정화장치에서는 공간 내 환경오염물질 발생량이 급증할 경우 환경오염물질 제거성

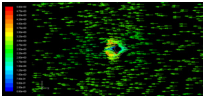
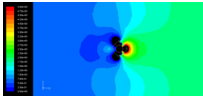
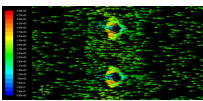
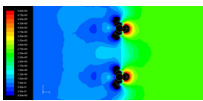
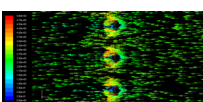
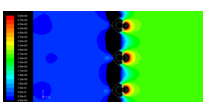
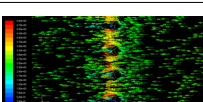
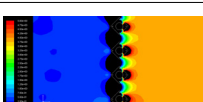
No. of module	Velocity vector	Pressure contour
1		
2		
3		
4		

Figure 5: Velocity vector and pressure contour in x-y section of Type B-1 by number of module(s)

능 향상을 위해 필터 개수를 증가시킨다. 본 연구에서는 유사한 상황에 대응하기 위해 광촉매코팅 모듈 수 증가에 따른 압력강하 특성을 검토하였다. 검토 모델은 전술한 결과를 근거로 속도변화가 가장 안정적이고 압력강하가 가장 적은 마름모 흰부착형(Type B-1)을 선정하였다. 예측결과인 Figure 5의 속도 벡터 그림으로부터 모듈수가 증가함에 따라 기류가 충돌하는 영역이 증가하고, 이는 등압력선(Pressure contour) 그림에서 압력저항으로 나타남을 알 수 있다. 특히 모듈 수가 3개 이상이 되면 모듈 뒷부분(모듈 왼쪽)에서는 변화가 없지만 모듈 앞부분(모듈 오른쪽)에서는 전반적인 압력 상승이 발생하였다.

4. 결 론

본 연구는 실내 환경오염물질 제거를 위해 공조기 덕트 내에 착탈 가능한 광촉매코팅 모듈의 형상을 개발하는 것이다. 연구성과를 정리하면 다음과 같다.

- (1)광촉매코팅 모듈로 적용 가능한 사각, 원, 마름모 등 기둥형 세 가지와 마름모, 사각 등 흰부착형 두 가지 등 총 다섯 가지 형상의 모델을 개발하

였다.

(2)속도변화에 대한 해석결과, 대부분 모듈 전후 0.3m 범위 이내에서 속도변화가 발생하였지만, 마름모 기둥형의 경우에는 모듈 뒷부분 0.4m까지 속도가 변하였고 모듈 전후에서의 속도 변동 폭이 가장 컸다. 다섯 가지 형상 중 속도변화가 가장 안정적인 것인 마름모 원부착형으로 평가되었다.

(3)국부적인 압력강하에 대한 비교에서도 비슷한 결과가 도출되었다. 즉, 다른 형상에 비해 마름모 기둥형의 압력강하가 가장 크게 나타났으며, 마름모 원부착형이 가장 변화량이 적었다.

(4)한편, 모듈 수 증가에 따른 덕트 내 유동해석에서는, 모듈 수 증가에 따라 기류 충돌이 발생하여 압력이 증가하였다. 특히 모듈 수가 3개 이상이 되면 모듈 뒷부분은 변화가 없지만 유입구측인 앞부분에서 압력이 상승함 알 수 있었다.

사업화 기술개발을 목적으로 수행된 본 연구는 기류의 원활한 흐름을 확보할 수 있는 형상을 개발하고자 다양한 형상의 모듈을 비교분석한 것이다. 향후에는 현재 개발진행 중인 광촉매의 반응특성과 모듈형상과의 관계에 관한 연구를 수행할 계획이다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 부산광역시와 부산테크노파크의 지원을 받아 수행된 산학공동기술혁신기술사업(No.201054203002) 성과의 일부임.

### 참고문헌

[1] 환경부, 다중이용시설 등의 실내공기질관리법, 법률 제10312호, 2010.05.25(일부개정)

[2] 社團法人日本建築學會, 室内空氣環境設計法, 技報堂出版, 2005.

[3] 環境科學Forum, 空氣清淨化のしくみ, Ohmsha, 1999.

[4] 김경환, 윤영환, “사각덕트 내에서 원형실린더를 지나는 유체유동의 측정 및 수치해석에 관한 연구”, 설비공학논문집, 제15권, 제12호, pp. 1095-1102, 2003.

[5] 정수진, 류수열, 김태훈, “HVAC 덕트내의 3차원 난류유동에 관한 수치해석적 연구”, 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제4호, pp. 118-129, 1996.

[6] 김경민, 이동현, 조형희, “단락요청이 회전덕트 내 압력강하에 미치는 영향”, 설비공학논문집, 제18권, 제5호, pp. 443-450, 2006.

[7] 강호근, 안수환 외, “사각 덕트 내에 설치된 2개의 경사진 베플에 의한 열전달 증진 효과에 관한 실험 및 수치해석”, 설비공학논문집, 제19권, 제11호, pp. 751-760, 2007.

[8] 실내공기청정기표준(SPS-KAACA002-132), 한국공기청정협회, 2010.12.

[9] Fluent User's Guide, Fluent Inc., 2003.

### 저 자 소 개

#### 황광일(黃光一)



1988년 고려대학교 기계공학과 졸업(학사), 1991년 고려대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1996년 Waseda Univ. 건설공학과 졸업(박사), 1996년 - 2004년 삼성건설, 삼성전자, 2004년 - 현재 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부(교수). 관심분야: 선박공조, 화재안전, 신재생에너지, 에너지시스템설계

#### 구재혁(丘載赫)



2007년 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부 학사과정

#### 김다혜(金茶惠)



2007년 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부 학사과정



### 이현인(李炫仁)

2007년 한국해양대학교 기계·에너지시스템공학부 학사과정



### 최영국(崔榮國)

1984년 한국해양대학교 박용기계공학과 졸업(학사), 1986년 한국해양대학교 대학원 박용기계공학과 졸업(석사), 1996년 한국해양대학교 대학원 선박기계공과 졸업(박사), 1993년~2003년 (주)종합폴스타 환경사업부 기술개발실장, 2003년~현재 (주)종합엔텍 상무이사