

CFD를 이용한 진공가압함침공정 내 유해가스 배출시스템 설계

장준규*** · 유 업**** · 박현도**** · 문 일*** · 임백규**** · 김정환*,† · 조형태*,†

*한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹

44413 울산광역시 중구 중가로 55

**동국대학교 화공생물공학과

04620 서울시 중구 필동로 1길 30

***연세대학교 화공생명공학과

03722 서울시 서대문구 연세로 50

****주엠백

44428 울산광역시 중구 중가로 362-11

(2021년 4월 22일 접수, 2021년 5월 18일 수정본 접수, 2021년 5월 25일 채택)

Design of Hazardous Fume Exhaust System in Vacuum Pressure Impregnation Process Using CFD

Jungyu Jang***, Yup Yoo****, Hyundo Park****, Il Moon***, Baekgyu Lim****, Junghwan Kim*,† and Hyungtae Cho*,†

*Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 55, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44413, Korea

**Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, 30, Pildong-ro 1-gil, Jung-gu, Seoul, 04620, Korea

***Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul, 03722, Korea

****MVEC Co., Ltd., 362-11, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44428, Korea

(Received 22 April 2021; Received in revised form 18 May 2021; Accepted 25 May 2021)

요 약

진공가압함침공정(Vacuum Pressure Impregnation, VPI)은 발전기, 전동기 등 대형 회전기에 사용되는 고정자 권선에 에폭시 계열의 레진을 코팅시켜 물성을 강화하는 공정이다. VPI 공정 중 진공과 가압과정에서 에폭시 레진의 기화에 의해 레진 가스가 발생하고, 함침공정이 끝나고 경화를 위해 탱크 개방 시 레진 가스가 제거되지 않고 탱크 밖으로 유출된다. 유출된 레진 가스가 작업장 전체에 확산 시 화재, 폭발 및 호흡기 문제와 같은 안전 환경 문제가 있으므로 공정 내 레진 가스 배출시스템이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 VPI 공정에서 발생한 레진 가스를 배출하는 시스템을 설계하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하여 공기 유입구·배출구의 위치에 따른 배출효율에 대한 사례연구를 진행하였다. 본 연구의 최적의 배출시스템을 활용 시 1,800초 이내 90%이상의 레진 가스를 배출할 수 있으며, 레진 가스의 폭발하한계(Low Explosive Limit, LEL)이하로 레진 가스의 분율을 낮출 수 있었다.

Abstract – Vacuum Pressure Impregnation (VPI) is a process that enhances physical properties by coating some types of epoxy resins on windings of stator used in large rotators such as generators and motors. During vacuum and pressurization of the VPI process, resin gas is generated by vaporization of epoxy resin. When the tank is opened for curing after finishing impregnation, resin gas is leaked out of the tank. If the leaked resin gas spreads throughout the workplace, there are safety and environmental problems such as fire, explosion and respiratory problems. So, exhaust system for resin gas is required during the process. In this study, a case study of exhaust efficiency by location of vent was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) in order to design a system for exhausting resin gas generated by the VPI process. The optimal exhaust system of this study allowed more than 90% of resin gas to be exhausted within 1,800 seconds and reduced the fraction of resin gas below the Low Explosive Limit (LEL).

Key words: Vacuum pressure impregnation, Computational fluid dynamics, Fume, Epoxy resin

1. 서 론

전동기, 발전기 등의 회전기는 회전하는 회전자 부분과 고정된 고정자 부분으로 이루어져 회전자의 회전력을 통해 전기에너지를 기계적 회전에너지 또는 기계적 회전에너지를 전기에너지로 변환

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: htcho@kitech.re.kr, kjh31@kitech.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한다. 회전기의 고정자 권선은 작동 중 하중이나 기계적, 전기적, 열적, 환경적 영향으로 절연파괴가 이루어질 수 있다[1]. 따라서 회전기는 기계적, 전기적으로 우수한 물성과 열적, 환경적 높은 저항을 위해 신뢰성 높은 절연과정을 필요로 한다[2].

대형 회전기의 절연방식 중 진공가압함침(Vacuum Pressure Impregnation, VPI)방식은 고압 회전기의 절연에 가장 많이 사용되는 방식으로 산포가 적고, 강인한 기계적 특성을 가지며, 균일한 절연층을 형성하는 장점이 있다[3]. VPI 공정은 회전기의 고정자를 탱크에 투입하고 고정자에 함유된 공기나 수분 등을 진공 작업을 통해 완전히 흡출한 뒤, 에폭시 계열의 레진을 가압하여 함침시켜 고정자의 물성을 강화하는 공정이다. 에너지 분야에서 발전기의 수요가 증가함에 따라 VPI 공정의 필요성은 점차 증가하고 있지만, 공정 내 발생하는 유해한 레진 가스로 인한 화재 및 폭발 문제와 작업자의 호흡기 문제가 제기되고 있다.

현재 VPI 공정에서 고정자 전동기나 발전기를 절연하기 위해 에폭시 계열의 레진을 주로 활용하고 있다. 에폭시 레진은 경제적 비용이 적고 가공성이 좋아 코팅, 접착 등 다양한 산업에 사용되지만, 에폭시 레진에 의해 발생한 가스로 인해 작업자 호흡기 문제와 폭발 위험이 존재한다[4]. Timo 등이 행한 연구에 따르면, 에폭시 계열 레진 중 하나인 BADGE (Bisphenol A Diglycidyl Ether)는 직업성 천식(Occupational asthma)과 호흡곤란을 일으키는 것으로 보고되었다[5]. 또한, 경화제로 레진에 포함되어있는 PAA (Phthalic Acid Anhydride)의 경우에도 호흡기 자극과 천식 증상을 일으키는 것으로 보고되었다[6]. 대부분의 에폭시 레진은 제한 산소 지수(Limited Oxygen Index, LOI)가 매우 낮아 화재의 위험이 있다[7]. LOI는 특정 물질이 연소하는데 필요한 산소와 질소 혼합물의 최소 산소 농도로 일반적으로 값이 작을수록 연소되기 쉬우며, 높을수록 연소되기 어렵다. LOI가 낮은 에폭시 레진은 가연성 물질로 적은 산소 농도에도 연소되기 쉬워 화재의 위험이 높다.

VPI 공정에서 고정자 회수를 위해 탱크 도어 개방 시 작업장 전체에 에폭시 레진 가스가 확산되어 화재 및 폭발의 위험이 존재한다. 그러나 현재 VPI 공정에는 레진 가스의 확산을 방지할 수단은 거의 없는 실정이다. 따라서, 공정 중 발생한 에폭시 레진 가스의 확산을 최소화하기 위해 레진 가스를 배출하는 시스템의 설치가 필요하다. 최근에는 이와 같은 배출시스템을 설치하기에 앞서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델링이 많이 사용되고 있다[8]. K.Y. Lee 등은 코팅 룸에서 배기시스템의 성능을 평가하고 개선하기 위해 CFD를 활용하였으며, Torano 등은 CFD를

이용하여 광산 도로에서 발생하는 분진을 배출하는 환기시스템을 최적화하였다[9,10]. 또한, J.W. Lee 등은 폭발 위험성이 높은 수소를 배출하는 시스템을 최적화하기 위해 CFD를 이용하여 배출성능을 평가하였으며, C.H. Park 등은 continuous mixer의 교반 성능을 최적화하기 위해 CFD를 활용하였다[11,12]. 이와 같이 CFD를 활용하는 것은 직접 시스템을 설치하지 않고 컴퓨터를 이용해 시뮬레이션 할 수 있어 시스템 디자인의 문제점을 파악하고 개선하기에 용이하여 많이 사용되는 방법이다.

본 연구에서는 CFD를 활용하여 VPI 공정에 사용되는 함침탱크를 모델링하고 기존 탱크에 존재하던 2개의 배관과 새로 설치한 1개의 배관을 가지고 총 6가지의 사례 연구를 진행하였다. 각 case의 탱크 내부 유동을 분석하고, 탱크 내 남아있는 레진 가스의 체적분율을 비교하였다. 배출효율을 구하여 최적의 배출시스템을 도출하였으며 해당 공정에 사용되는 에폭시 레진의 폭발하한계(Low Explosive Limit, LEL)이하로 레진 가스의 분율을 낮출 수 있었다.

2. 공정 개요 및 CFD 시뮬레이션

2-1. VPI 공정 및 유해 레진가스

VPI 공정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 먼저 ①고정자를 투입하고, 약 30 Pa 이하의 압력으로 6시간동안 1차 진공을 통해 고정자 표면의 기포, 수분 등을 제거한다. 그 후 ②에폭시 레진 함침액을 투입한 뒤 다시 5시간동안 2차 진공을 가해 함침액 내부에 있는 기포를 제거하고, ③750,000 Pa 이상으로 8시간을 가압함침한다. 함침이 완료된 후, ④가압 폐기 및 레진 함침액을 회수하고 ⑤탱크를 개방하여 함침이 완료된 고정자를 수거한 뒤, ⑥오븐으로 옮겨 경화과정을 거친다.

문제는 ②진공과 ③가압의 공정에서 에폭시 레진 함침액의 기화에 의해 레진 가스가 발생한다는 점이다. 고정자를 회수하기 위해 ⑤탱크 개방 시 내부의 에폭시 레진 가스가 작업장 내부로 유출되고 확산되어 호흡기 문제, 화재 및 폭발 위험이 있다.

해당 VPI 공정에 사용되는 에폭시 레진은 HER-100 물질로 Table 1과 같은 물질 성분을 가진다. 이 중 1,3-isobenzofurandione는 냄새를 흡입 시 알레르기 반응과 천식 증상을 일으킬 수 있을 뿐만 아니라 폭발하한계(LEL)가 1.7%, 폭발상한계(Upper Explosive Limit, UEL)가 10.5%로 해당 체적 범위에서 레진 가스의 화재 및 폭발 위험성이 있다. 따라서 이 물질을 활용한 공정에서 충분한 환기 조건을 확립하는 것이 필요하다. 또한, 1-chloro-2,3-epoxypropane의

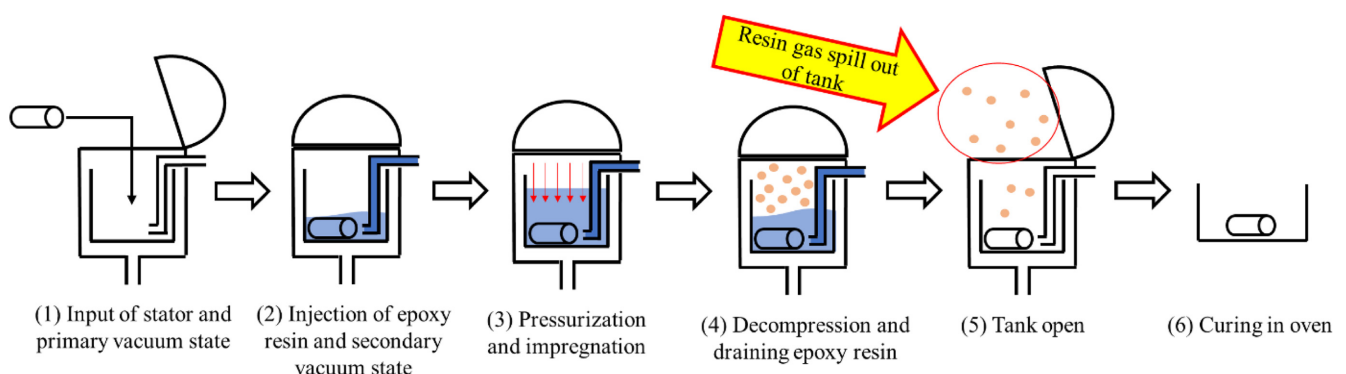


Fig. 1. Overview diagram of VPI process and fume problem.

Table 1. Composition of HER-100 resin

Substance name	Common name	CAS number	Ratio (%)
Hexahydro-4-methylphthalic anhydride	1,3-isobenzofurandione	11070-44-3	60%
Diglycidyl ether bisphenol F epoxy resin	Oligomeric reaction products with 1-chloro-2,3-epoxypropane and phenol	9003-36-5	40%

경우도 역시 흡입 시 여러 호흡기증상을 일으킬 수 있으므로 배기 시스템 확보가 필요하다.

2-2. CFD 모델링

본 연구에서는 발전기 고정자의 절연에 사용 중인 VPI 탱크를 대상으로 CFD 해석을 진행하였다. Fig. 2와 같은 해석모델을 작성하였으며, 해석모델은 크게 외부함침탱크, 내부탱크, 고정자로 이루어진다. 외부함침탱크는 4,500 mm의 직경(D1)과 3,400 mm의 높이(H1)를 가지는 실린더에 탱크 바닥면과 탱크 도어를 고려하여 총 5,200 mm의 높이(H2)로 모델링 하였다. 내부탱크는 3,100(L) × 3,100(W) × 3,400(H3) mm인 직육면체 형태의 용기로 모델링 하였으며 내부탱크 벽면의 두께는 100 mm로 설정하였다. 또한, 함침 대상인 발전기 고정자가 내부탱크 속에 위치한다. 고정자는 원통형 코어와 이에 감겨져 있는 권선으로 구성되는데, 해석모델의 간소화를 위해 중공원통의 형태로 가정하였다. 고정자는 외경 1,400 mm(D2),

내경 1,065 mm(D3), 높이 1,700 mm(H4)로 설정하였다. 이에 따라 생성된 탱크 내부의 유동공간은 72.93 m³의 부피를 가진다. 또한, 기존에 진공펌프가 설치된 250 ϕ 배관이 외부탱크 상단부에 위치하며, 내부탱크 하단부에는 에폭시 레진을 주입 및 회수하는 80 ϕ 배관이 위치한다.

유동해석을 위한 mesh 설정에는 복잡한 형상에 더 적합한 tetrahedral 격자구조를 사용하였다. Mesh를 생성하기 위한 Sizing function으로는 Uniform, Proximity, Curvature, Proximity & Curvature 등이 있다. 이 중 Uniform은 형상의 곡률이나 근접성을 고려하지 않고 일정한 크기의 격자를 생성하는 방법이다. 반면 Proximity는 형상간의 간격이 좁은 부분, Curvature는 곡면에서 격자의 조밀도를 높일 수 있으며, Proximity & Curvature는 두 가지 기능을 혼합하여 격자를 생성하는 방법이다. VPI 탱크의 내부탱크 벽면과 외부탱크 간의 간격이 좁고 고정자와 외부탱크의 곡면을 고려해볼 때, 간격이 좁은 부분과 곡면에서 해석의 정확성을 높이기 위해

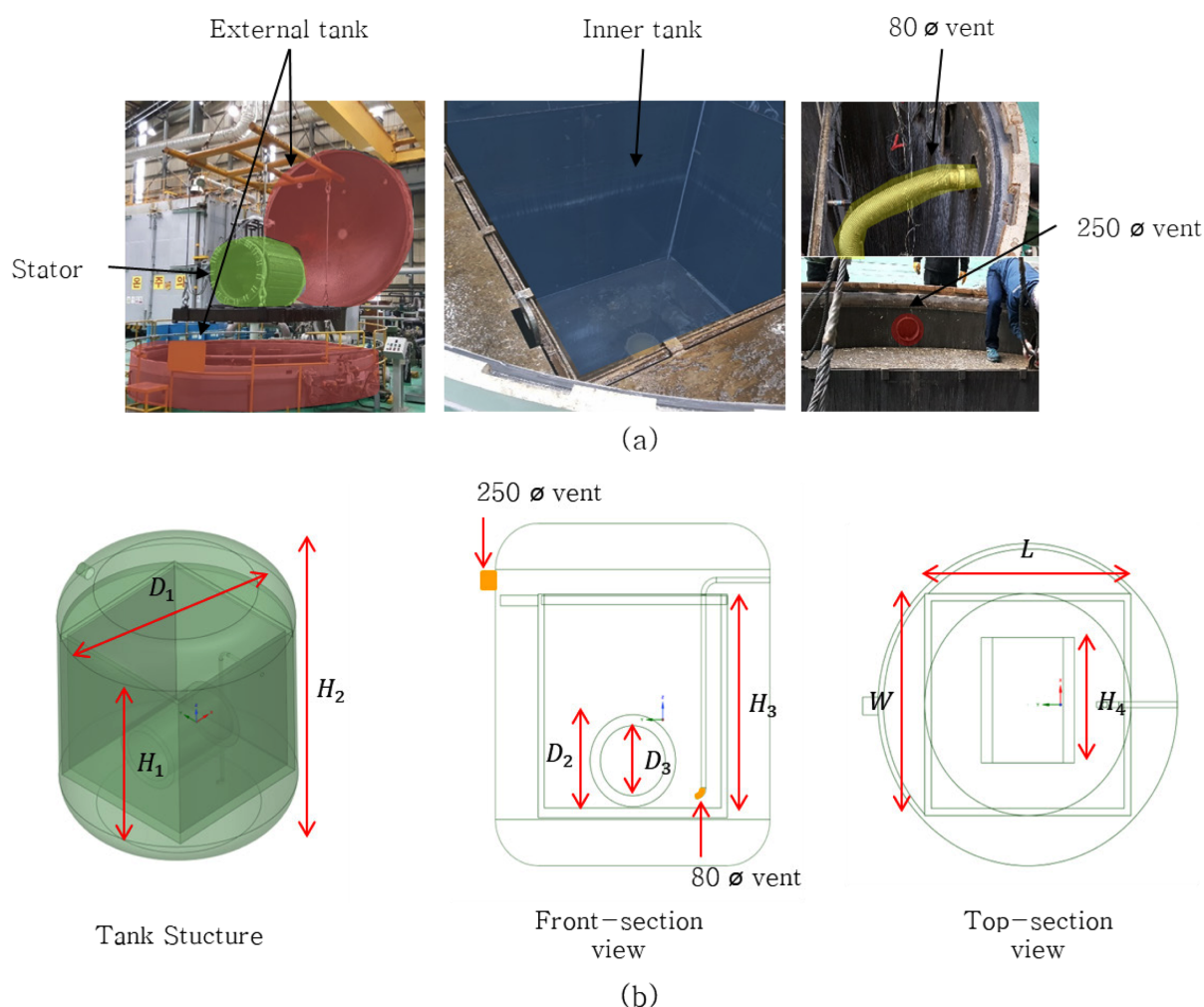


Fig. 2. VPI tank: (a) tank components; (b) structure and front/top-section views.

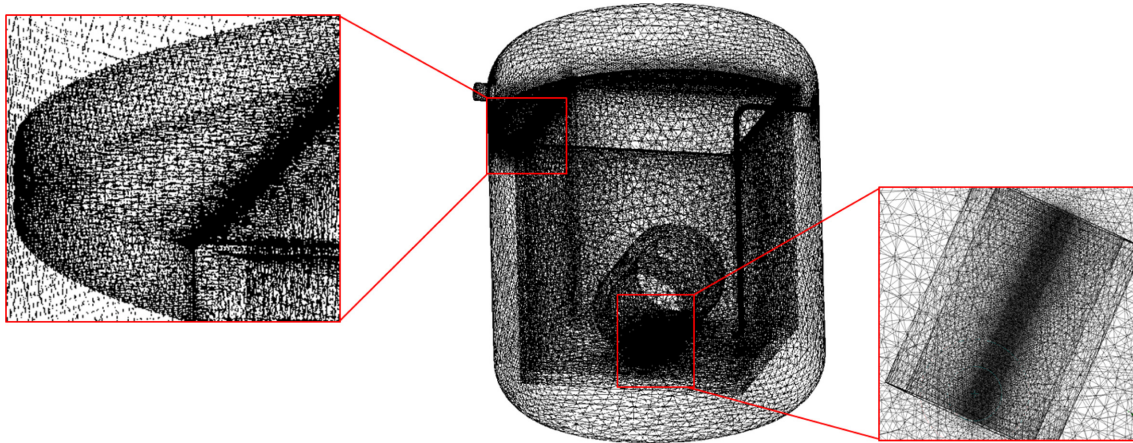


Fig. 3. Mesh of VPI tank.

Proximity & Curvature 방법을 이용하여 mesh를 생성하였다. Mesh는 Fig. 3과 같이 생성되었으며, 총 292,478개의 노드와 1,526,350개의 격자를 가진다.

유동의 정확한 해석과 해의 수렴을 위해서는 mesh의 품질이 매우 중요하다. Mesh의 품질은 왜도(skewness)와 직교품질(orthogonal quality)로 판단하는데, skewness는 0과 1사이의 값을 가지며 0에 가까울수록 좋다. Orthogonal quality의 경우 0과 1사이의 값을 가지며, 1에 가까울수록 품질이 좋은 격자이다. 일반적으로 skewness는 0.25 이하일 때 높은 품질의 mesh가 생성되었음을 나타내며, orthogonal quality는 최소 0.3 이상을 권장한다[13,14]. 본 연구에 사용된 VPI tank의 mesh는 average skewness가 0.23174이고, average orthogonal quality가 0.76674로 높은 품질의 mesh가 생성되었다 (Table 2).

2-3. 지배방정식

탱크 내부의 유동은 비정상상태, 비압축성, 3차원 난류로 해석하였다. 사용된 지배방정식은 질량보존의 법칙과 운동량 보존 법칙으로 그 식은 다음의 (1), (2)과 같다[15-17].

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

Table 2. Mesh statistics and quality

Statistics	
Nodes	292,478
Elements	1,526,350
Quality	
Mesh Metric	Skewness
Min	3.6344e-009
Max	0.84765
Average	0.23174
Standard Deviation	0.12201
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0.15235
Max	0.99396
Average	0.76674
Standard Deviation	0.11994

(1) 식은 연속 방정식이라고도 불리며, 유체역학에서 유체의 질량 보존을 수학적으로 나타낸 것이다. ρ 는 유체의 밀도를 의미하고, $\vec{v}$ 는 유체의 속도벡터, t 는 시간이다. (2) 식은 나비에-스토크스 방정식이라고도 불리며, 점성을 가지는 유체의 운동을 기술하는 비선형 편미분방정식이다. p 는 압력을 의미하고, $\vec{\tau}$ 는 응력 텐서를 의미하며 식 (3)과 같이 주어진다. $\rho \vec{g}$ 와 $\vec{F}$ 는 각각 중력에 의한 체적력과 외력을 의미한다.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} \right] \quad (3)$$

μ 는 점도를 의미하고, $\vec{\tau}$ 는 단위 텐서이다.

본 연구에서는 탱크 내부 유동을 해석하기 위해 Realizable k- ϵ 난류모델을 사용하였다. Realizable k- ϵ 모델은 Standard k- ϵ 모델과 비교해 경계층의 특징을 더 잘 묘사할 수 있으며, 유체의 굽음, 소용돌이, 회전 등을 해석하기에 더 적합하다[15,18].

Realizable k- ϵ 모델의 2가지 변수 k(난류 운동에너지)와 ϵ (난류 운동에너지 소산율)에 대한 수송방정식은 다음의 (4), (5)과 같다 [15,19].

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + v \epsilon} \quad (5)$$

C_1 , C_2 는 상수이며, σ_k , σ_ϵ 는 각각 k, ϵ 값에 대한 난류 Prandtl number를 의미한다. G_k , S 는 각각 평균 속도 구배에서 난류 운동에너지 생성량, 평균 변형률 텐서의 계수이며 (6), (7)식과 같이 주어진다.

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$S \equiv \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (7)$$

2-4. 시뮬레이션 조건 및 Case study

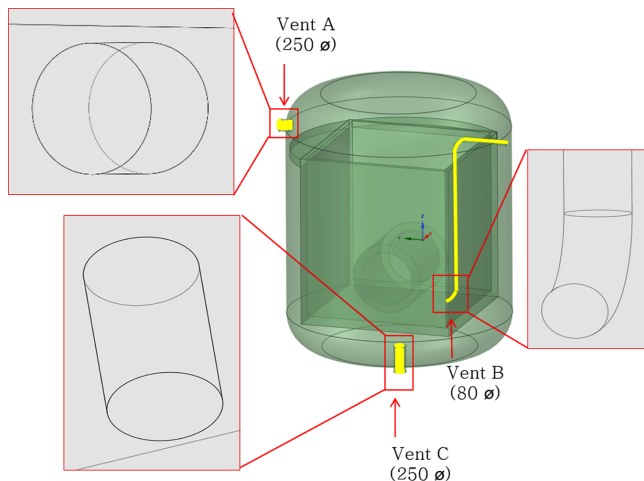
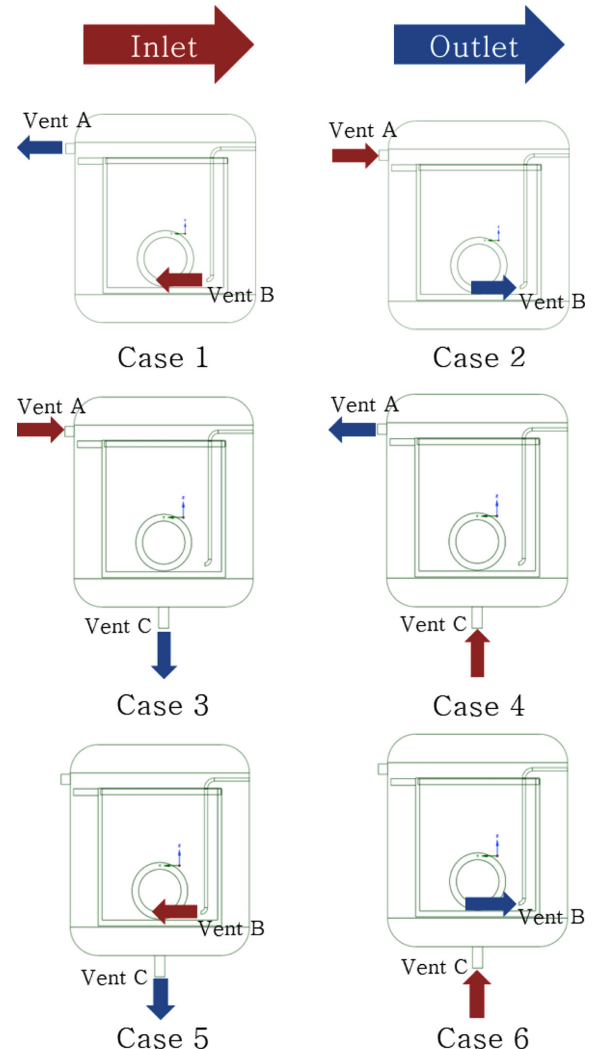
본 연구에서는 시간에 따른 탱크 내 레진 가스 체적의 변화를 관찰하기 위해 transient(과도상태)로 해석을 진행하였으며, 온도는 300 K로 일정하다고 가정하였다. 전체 시뮬레이션 시간은 1번의

Table 3. Properties of fluids

Fluid	Density (kg/m ³)	Viscosity (kg/m·s)	Molecular weight (kg/kmol)
Air	1.225	1.7894e-05	28.966
1,3-isobenzofurandione	6.7375	7e-06	166.17

time step을 0.1초로 하여 총 1,800초 동안만 유동해석을 진행하였다. 레진 가스 배출에 할당되는 시간은 전체 공정 시간이 약 19시간 이므로 고정자의 생산성에 영향이 적도록 레진 가스 배출시간을 1800초 이내로 제한하였다. 해석 과정에서 각 변수들의 residual은 0.001이하면 해가 수렴한 것으로 판정하였다. 탱크 내 레진 가스는 HER-100 에폭시 레진의 주성분인 1,3-isobenzofurandione의 기체 성분으로 가정하였다. 또한, 초기조건(initial condition)으로 탱크 내 공기는 존재하지 않으며, 오직 레진 가스만 존재한다고 가정하여 탱크 내부 영역의 초기 레진 가스의 체적 분율을 1로 가정하였다. 온도가 일정하므로 공기와 1,3-isobenzofurandione의 밀도(ρ)와 점도(μ)는 상수로 가정하였으며, 본 연구에 사용된 물성치는 Table 3과 같다.

기존에 탱크 내 진공을 걸어주기 위해 사용하던 배관(Vent A), 에폭시 레진을 주입하는 배관(Vent B)을 레진 가스 배출에 사용할 수 있도록 하였고, 탱크 바닥에 250 ϕ 배관(Vent C)을 설치하였다 (Fig. 4). 총 6가지의 case에 대해 시뮬레이션을 진행하였으며, 각 case의 유입 및 배출에 대한 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 각 case에서 유입구와 배출구는 1개로만 지정하였다. Case 1은 Vent B를 유입구 Vent A를 배출구로, case 2는 Vent A를 유입구 Vent B를 배출구로 활용하였다. Case 3은 Vent A를 유입구 Vent C를 배출구로, case 4는 Vent C를 유입구 Vent A를 배출구로 활용하였으며, Case 5는 Vent B를 유입구 Vent C를 배출구로, case 6는 Vent C를 유입구 Vent B를 배출구로 활용하였다. 압력 경계조건은 VPI 설비 내 설치된 집진기의 운전압력 data를 바탕으로 지정되었다. 해당 VPI 설비 내 설치된 집진기의 운전압력은 250 mmAq (2452 Pa)이며, 탱크 내부의 레진 가스를 배출구에서 집진기로 흡입하여 배출시키고, 유입구에서 외부로부터 공기가 유입된다. 따라서, 모든 case에서 배출구 게이지 압력을 -2452 Pa의 음압으로, 유입구에서 게이지 압력을 0 Pa의 대기압으로 지정하였으며, 해당 압력은 운전 중 일정하게 유지된다. 추가적으로 유입구에서 탱크로 유입되는 레진 가스는 없으므로 유입되는 기체의 공기 분율을 1로 설정하였다(Table 4).

**Fig. 4. Geometry including additional Vent C under out tank.****Fig. 5. Schematic diagram of case study.****Table 4. Boundary conditions for 6 cases**

	Inlet Gauge pressure : 0 PaG	Outlet Gauge pressure : -2452 PaG
Case 1	Vent B	Vent A
Case 2	Vent A	Vent B
Case 3	Vent A	Vent C
Case 4	Vent C	Vent A
Case 5	Vent B	Vent C
Case 6	Vent C	Vent B

3. 결과 및 해석

Case 1은 Vent B를 유입구 Vent A를 배출구로, case 2는 Vent A를 유입구 Vent B를 배출구로 활용한 경우이다. Fig. 6은 case 1, 2에서 300초, 900초, 1500초일 때 탱크 내 존재하는 레진 가스의 체적 분율에 대한 contour (a)와 1800초에서 공기의 속도에 대한 contour

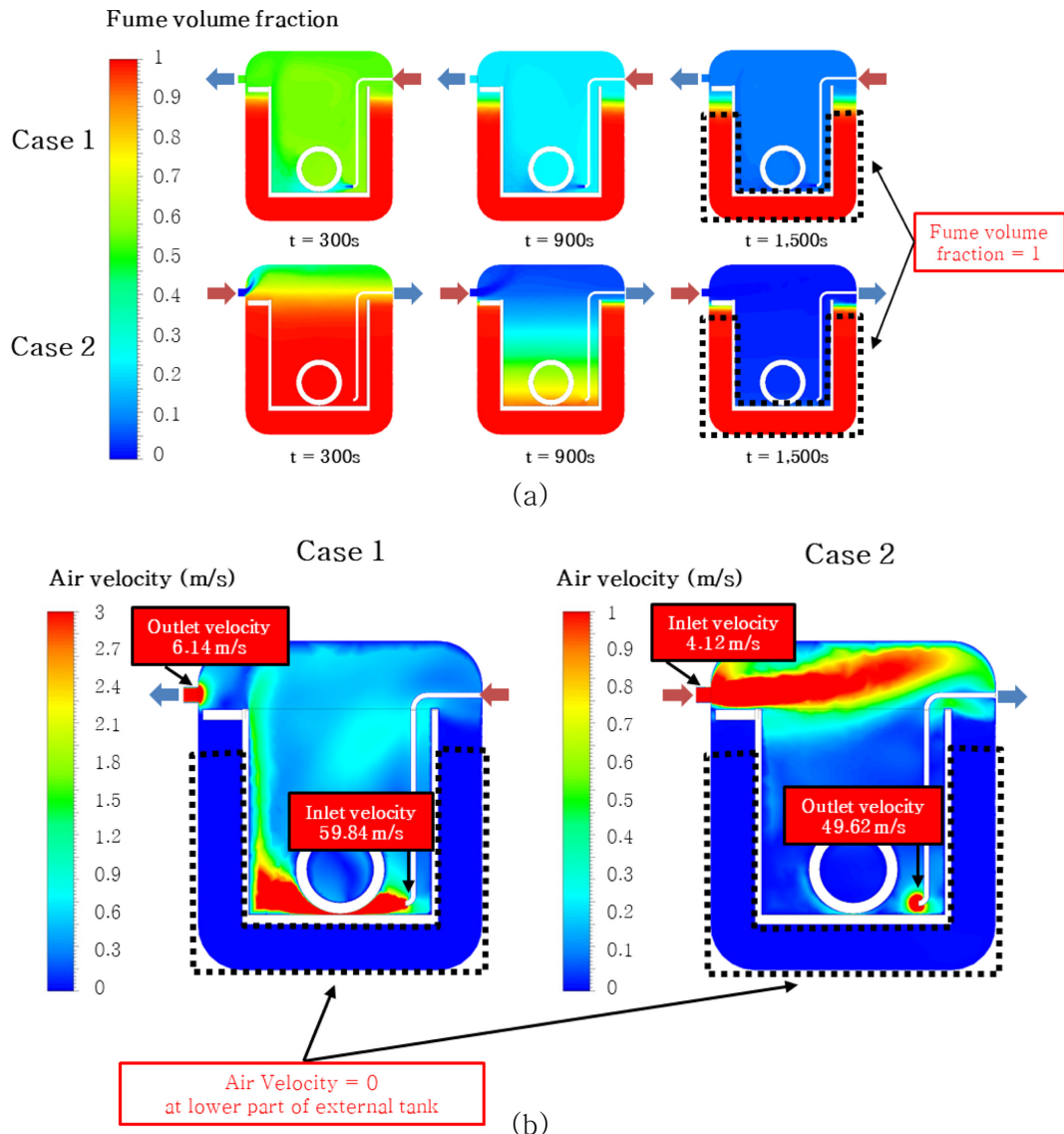


Fig. 6. Simulation results in case 1, 2: (a) fume volume fraction contours at 300s, 900s, 1500s; (b) air velocity contours at 1800s.

(b)를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)로부터 두 경우 모두 내부탱크와 외부탱크 상단부의 레진 가스만 배출되고, 외부탱크 하단부의 가스는 체적분율이 1로 유지되고 있어 레진 가스의 배출이 원활하지 않음을 알 수 있다.

외부탱크 하단부의 레진 가스 체적분율이 감소하지 않는 이유를 확인하기 위해 외부탱크 하단부의 Fig. 6(b)는 최대 속도를 각각 3 m/s, 1 m/s로 하여 velocity contour를 작성하였다. Case 1의 유입구인 Vent B에서 속도는 59.84 m/s, 배출구인 Vent A에서 속도는 6.14 m/s 이고, case 2의 유입구인 Vent A에서 속도는 4.12 m/s, 배출구인 Vent B에서 속도는 49.62 m/s 이다. Case 1과 2 모두 외부탱크 하단부에서 공기의 velocity가 0 m/s로 외부탱크 하단부에 공기의 흐름이 발생하지 않기 때문에 하단부 레진 가스의 배출이 원활하지 않다. 외부탱크 하단 부에 공기의 흐름이 없는 이유는 레진 가스로 가정 한 1,3-isobenzofurandione의 기체상 성분의 밀도가 6.7375 kg/m^3 로 공기에 비해 5.5배 높기 때문이다. 외부탱크 바닥에 배관이 존재하지 않아 높은 밀도로 인해 외부탱크 하단부에 가라

앉아 있는 레진 가스를 배출하는 것이 어렵다.

Fig. 7은 case 1, 2의 시간에 따른 레진 가스의 배출율 변화 그래프이다. 각 time step에서 탱크 내 남아있는 레진 가스의 부피를 (8)식에 대입하여 구한 배출율을 시간에 따라 그래프로 나타내었다.

Exhaust percentage (%)

$$= \left(1 - \frac{\text{Residual fume volume of each time step (m}^3\text{)}}{\text{Initial fume volume (m}^3\text{)}} \right) \times 100 \quad (8)$$

그리고 각 case에서 배출율을 1,3-isobenzofurandione의 폭발하한계(LEL)와 비교하였다. 1,3-isobenzofurandione의 LEL인 1.7% 이하로 레진 가스의 분율을 낮추기 위해서는 배출율 98.3%이상을 달성해야 한다. 그러나 case 1, 2는 1800초동안 각각 58.17%, 58.54%의 배출율로 LEL이하로 레진 가스 분율을 낮출 수 없다. 두 가지 case 모두 1200초 이후 기울기가 0에 가까워지므로 레진 가스의 배출이 이루어지지 않는다. 1200초 이후 레진 가스의 배출이 없는 이유는 Fig. 6(b)와 같이 외부탱크 하단부에 유동이 발생하지 않기

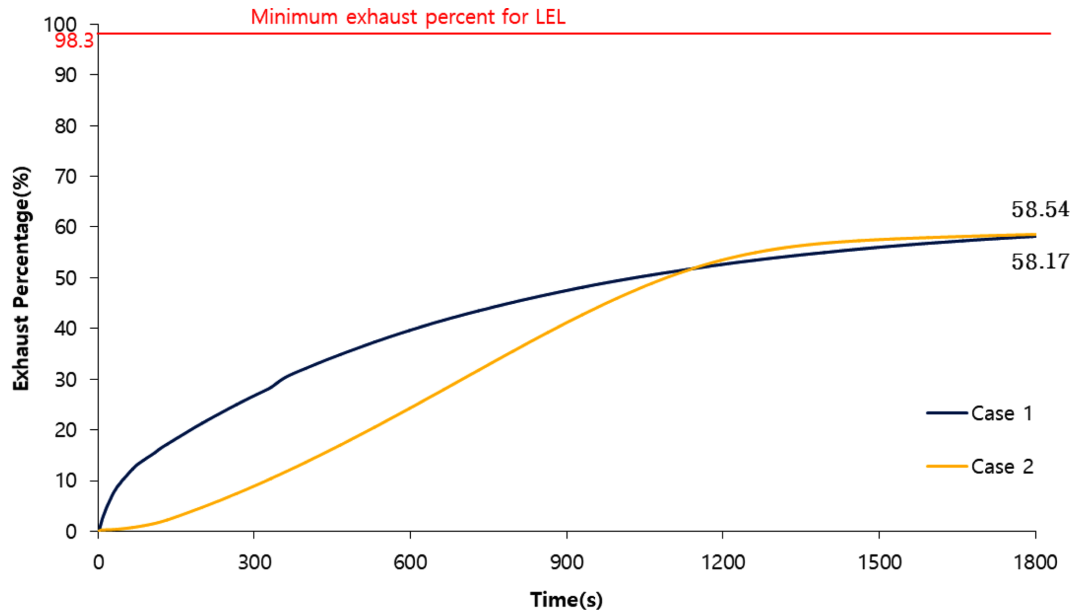


Fig. 7. Plot of fume exhaust percentage for flow-time in case 1, 2.

때문이다. 1800초에서 case 1의 배출구인 Vent A를 통해 배출되는 흐름의 레진 가스 체적분율이 0.059, 공기의 분율이 0.941이고, case 2의 배출구인 Vent B를 통해 배출되는 흐름의 레진 가스 체적분율은 0.023, 공기의 분율은 0.977이다. 두 경우 모두 탱크로 유입된 공기가 외부탱크 하단부에 유동이 발생하지 않고 배출구를 통해 그대로 빠져나가 레진 가스의 체적분율이 매우 낮다. 따라서, 기존의 존재하던 배관(Vent A, B)을 활용하여 배출시스템을 구성하는 것으로는 레진 가스 체적 분율이 LEL보다 높아 화재 및 폭발 위험의 해결이 어렵다.

Case 1, 2에서 레진 가스가 외부탱크 하단부에 잔류하는 경향을 보였으므로, 하단부 레진 가스를 효율적으로 배출하기 위해 추가적인 배관은 외부탱크 바닥의 중앙에 250 ϕ 크기의 Vent C를 설치하였다.

Case 3은 Vent A를 유입구 Vent C를 배출구로, case 4는 Vent C를 유입구 Vent A를 배출구로 활용한 경우이다. Fig. 8에 case 3, 4의 300초, 900초, 1500초에서 레진 가스의 체적분율에 대한 contour (a)와 1800초에서 공기의 속도에 대한 contour (b)를 나타내었다. Fig. 8(a)에서 case 3, 4 모두 900초일 때, 외부탱크의 레진 가스 체적분율이 0인 것으로 보아 외부탱크의 레진 가스는 배출이 원활하다. 그러나 내부탱크의 레진 가스는 case 3에서 배출이 되지만, case 4에서는 배출되지 않는다. Case 3의 경우 시간이 지남에 따라 내부탱크 속 레진 가스의 체적이 감소하여 1500초 일 때, 전체 탱크에 걸쳐 레진 가스의 체적분율이 0.033이다. 반면 case 4의 경우 내부탱크의 속 레진 가스의 체적이 감소하지 않아 1500초일 때, 전체 탱크에 걸쳐 0.275의 체적분율을 보인다.

Case 3에서는 내부탱크 속 레진 가스가 배출되고, case 4에서는 배출되지 않는 이유를 확인하기 위해 Fig. 8(b)는 최대 속도를 각각 8 m/s, 3 m/s로 하여 velocity contour를 작성하였다. Case 3의 유입구인 Vent A에서 속도는 36.56 m/s, 배출구인 Vent C에서 속도는 36.58 m/s이다. Case 3은 Vent A를 통해 유입된 공기가 내부탱크에 1~5 m/s의 유속으로 유동을 발생시키며, 내부탱크 벽면을 통해 내

부탱크 하단부로 공기가 이동하기 때문에 내부탱크 속 레진 가스의 배출이 원활하다. Case 4의 경우 유입구인 Vent C에서 속도는 36.81 m/s, 배출구인 Vent A에서 속도는 36.84 m/s이다. 그러나 case 4는 case 3과 달리 내부탱크에서 공기의 velocity가 0 m/s로 유동이 발생하지 않는다. Vent C를 통해 탱크로 유입된 공기가 내부탱크의 바닥의 외벽과 부딪혀 유동이 퍼지게 되고 외부탱크 상단으로 상승했을 때, 유속이 1 m/s 이하로 감소하여 내부탱크로 유입되지 않고 음압이 걸려있는 Vent A를 통해 빠져나간다.

Fig. 9에 case 3, 4의 시간에 따른 레진 가스 배출율 변화 그래프를 나타내었다. Fig. 7과 마찬가지로 (8)식을 이용하여 배출율을 구하였으며, 1,3-isobenzofurandione의 폭발하한계(LEL)와 비교하였다. Case 3, 4 모두 전체 부피의 61.24% 부피를 차지하는 외부탱크의 레진 가스가 빠르게 배출되기 때문에 300초까지 배출율이 가파르게 상승하는 모습을 볼 수 있다. 그 이후로는 탱크 속 레진 가스의 농도가 낮아 배출율이 이전에 비해 천천히 증가한다. Case 3은 내부탱크에 유동이 발생하여 내부탱크 속 레진 가스도 배출할 수 있으므로 600초 이후로도 배출율이 증가한다. 기울기가 이전에 비해 완만한 이유는 내부탱크 속 형성된 유동의 유속이 외부탱크에 비해 느려서 배출속도가 감소하기 때문이다. Case 3은 1800초에 98.92%의 배출율을 달성하며, 1688초 이후 탱크 속 레진 가스 농도를 LEL보다 낮출 수 있다. 반면, case 4는 내부탱크로 유동이 발생하지 않아 내부탱크의 레진 가스가 배출되지 않는다. 따라서 약 600초 이후로는 기울기가 0에 가까워 배출율 증가가 미비하고, 1800초에 배출율이 72.95%로 LEL이하로 레진 가스 농도를 낮출 수 없다.

Case 5은 Vent B를 유입구 Vent C를 배출구로, case 6는 Vent C를 유입구 Vent B를 배출구로 활용한 경우이다. Fig. 10에 case 5, 6의 300초, 900초, 1500초에서 레진 가스의 체적분율에 대한 contour (a)와 1800초일 때 공기의 속도에 대한 contour (b)를 나타내었다. Fig. 10(a)에서 case 5, 6 모두 내부탱크와 외부탱크의 레진 가스 체적분율이 탱크 전체에 걸쳐 균일한 분포를 보이며 감소한다. 그러나

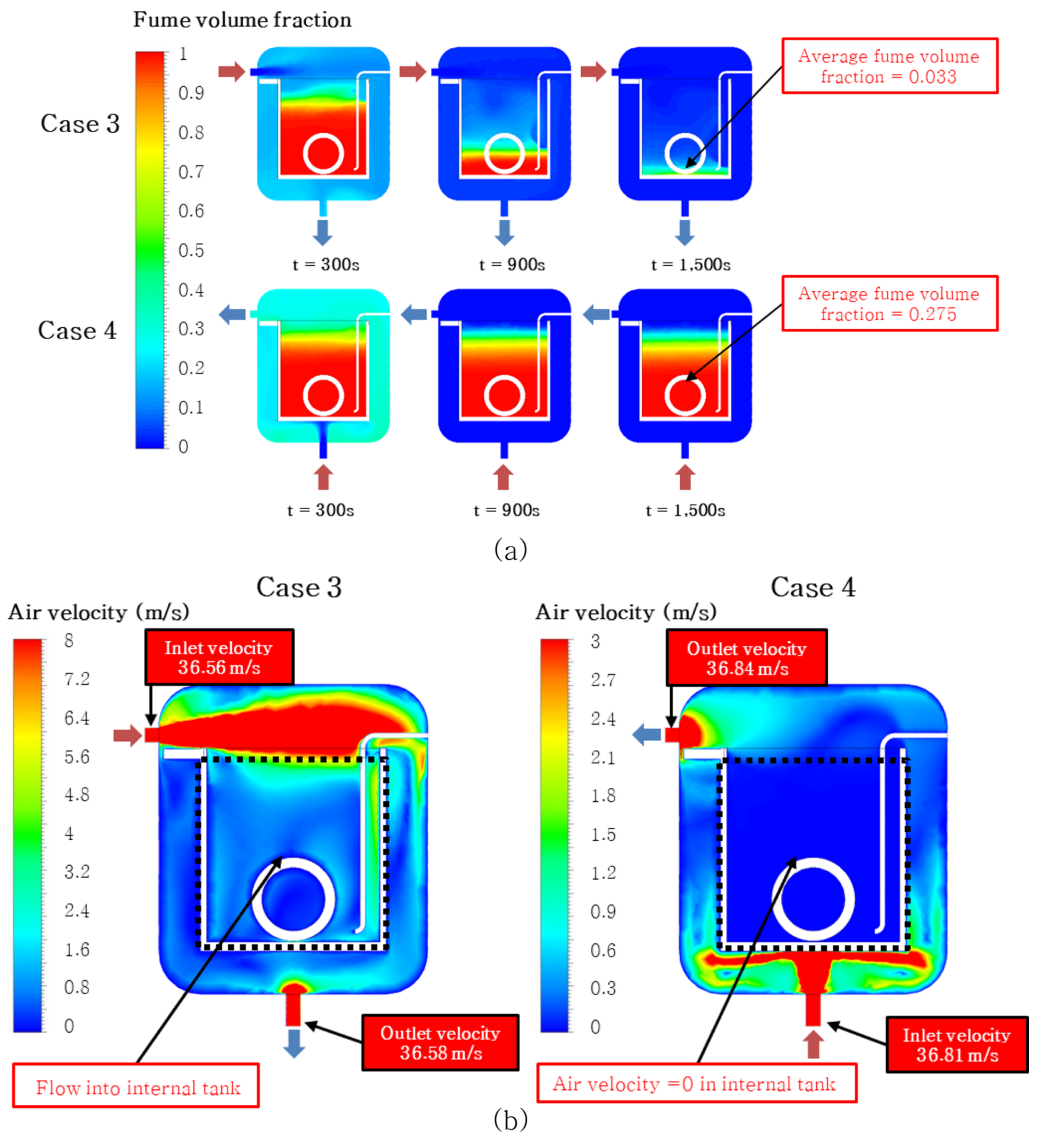


Fig. 8. Simulation results in case 3, 4: (a) fume volume fraction contours at 300s, 900s, 1500s; (b) air velocity contours at 1800s.

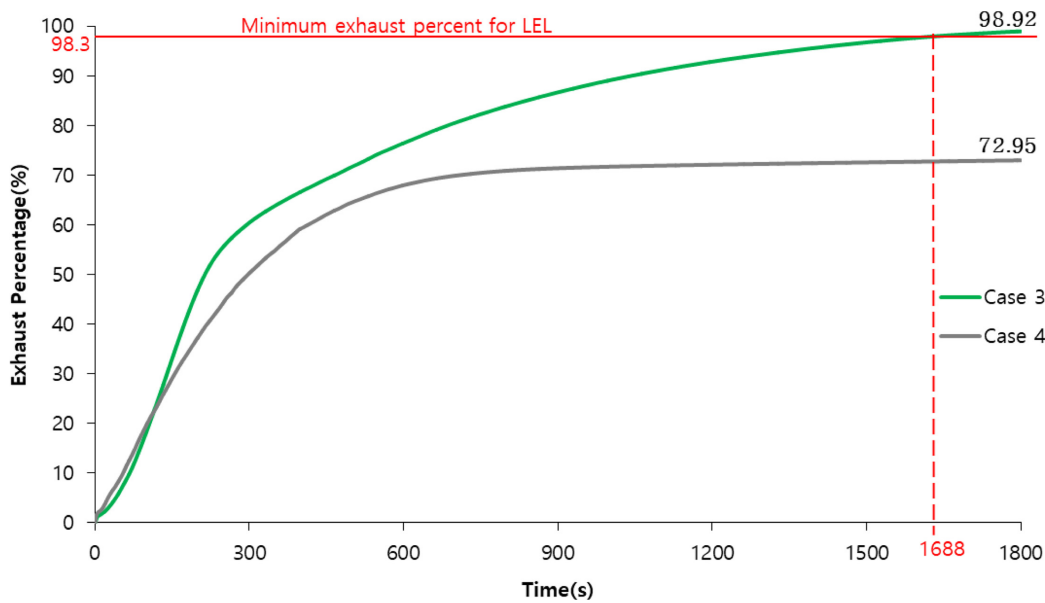


Fig. 9. Plot of fume exhaust percentage for flow-time in case 3, 4.

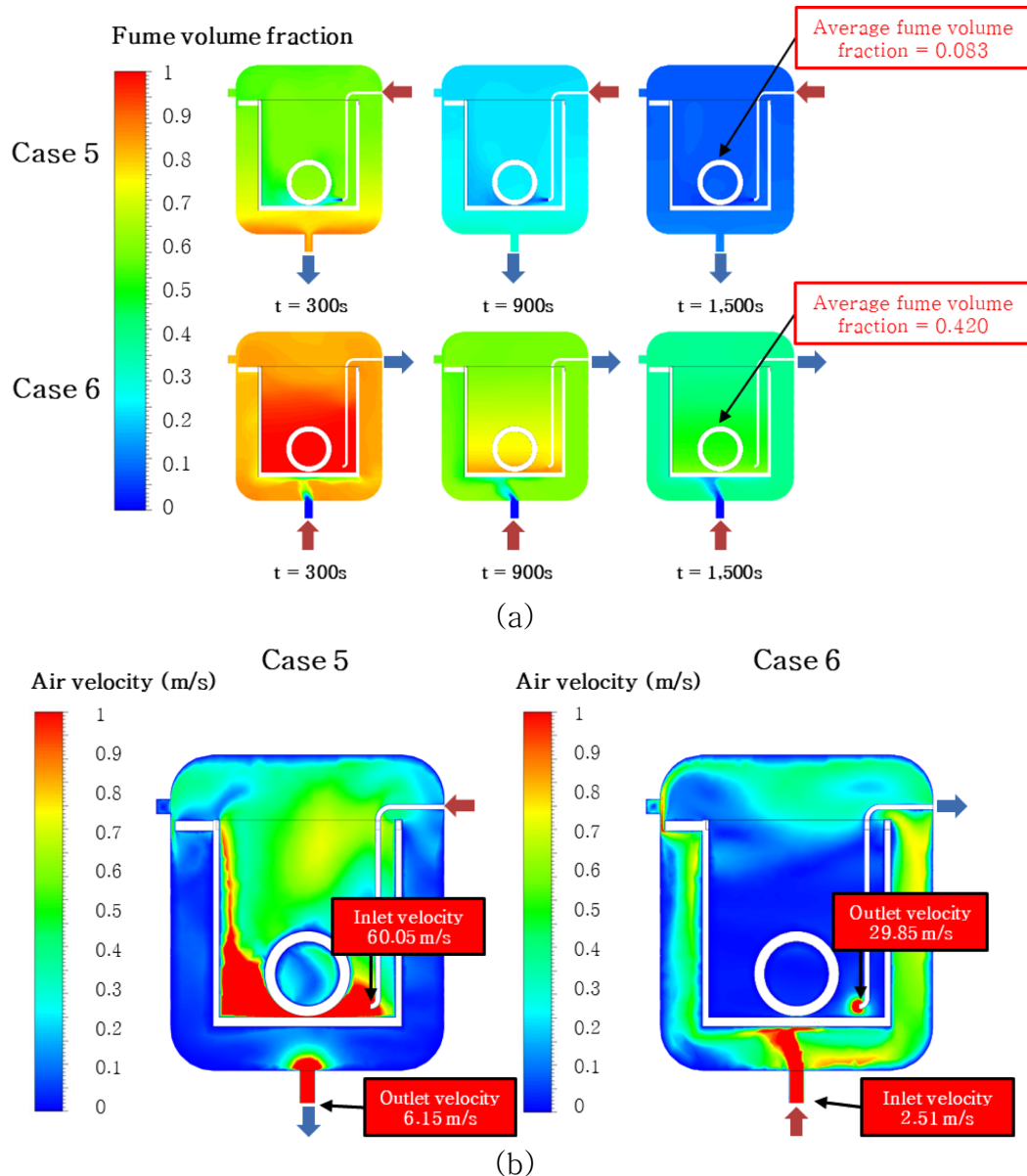


Fig. 10. Simulation results in case 5, 6: (a) fume volume fraction contours at 300s, 900s, 1500s; (b) air velocity contours at 1800s.

case 5에서는 시간에 따라 체적분율이 빠르게 감소하여 1500초에 레진 가스 체적분율이 0.083인 반면, case 6에서는 체적분율의 감소가 느려 1500초일 때 레진 가스 체적분율이 0.420이다.

Case 6의 레진 가스 체적분율 감소가 case 5에 비해 느린 이유를 확인 하기 위해 Fig. 10(b)은 최대 속도를 1 m/s로 하여 contour를 작성하였다. Case 5의 유입구인 Vent B에서 속도는 60.05 m/s, 배출구인 Vent C에서 속도는 6.15 m/s이다. 반면, case 6의 유입구인 Vent C에서 속도는 2.51 m/s, 배출구인 Vent B에서 속도는 29.85 m/s이다. 두 경우 모두 Vent B와 Vent C를 활용하지만 case 5에서는 250 ϕ 의 직경을 가지는 Vent C에 음압이 걸리는 반면, case 6에서는 80 ϕ 의 직경인 Vent B에 음압이 작용한다. Case 5에서 더 넓은 면적에 압력이 작용하게 되므로 case 5, 6은 같은 Vent를 사용 하더라도 case 5에서 각 Vent에 더 빠른 속도의 흐름이 발생한다. 따라서 case 5가 case 6보다 1 m/s 이상의 유속을 가지는 영역이 많다.

압력이 작용하는 면적의 차이는 case 5, 6에서 유량차이도 발생

시킨다. 300초마다 배출구를 통해 배출되는 공기와 레진 가스의 질량유량 값을 얻은 후, 이를 각각의 밀도를 이용하여 부피유량 값으로 변환하였다. 두 기체의 유량을 더해 전체 부피유량을 구하였으며 구하는 식은 (9)와 같다. 300초마다 구한 전체 부피유량과 레진 가스의 부피유량을 Fig. 11에 나타내었다.

$$\text{Total volume flow} = \frac{\text{Air mass flow}}{\text{Air density}} + \frac{\text{Fume mass flow}}{\text{Fume density}} \quad (9)$$

Fig. 11(a)에서 300초일 때, case 5의 전체 부피유량은 0.286 m³/s, case 6는 0.089 m³/s이다. Case 5가 case 6에 비해 약 3배정도 부피유량이 높은 이유는 Fig. 10(b)에서 case 5의 유속이 case 6에 비해 빠른 이유와 동일하게 더 넓은 면적에 압력이 작용했기 때문이다. 전체 부피유량이 case 5에 비해 작은 case 6는 전체 부피유량이 작아 배출할 수 있는 레진 가스의 부피유량도 제한적이다. Fig. 11(b)에서 전체 부피유량이 더 작은 case 6의 300초에서 레진 가스의 부

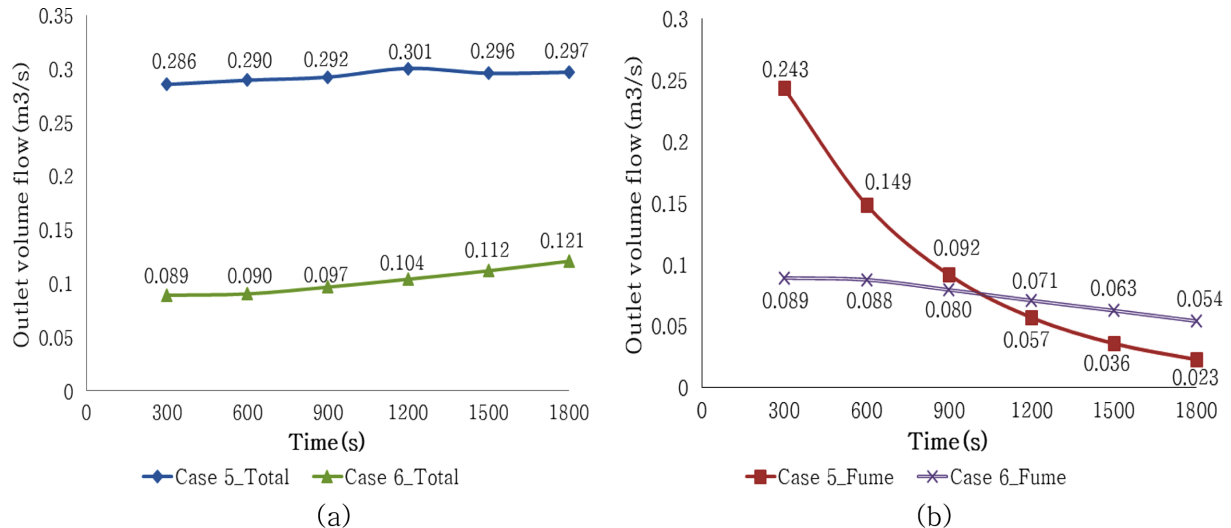


Fig. 11. Outlet volume flow from case 5, 6: (a) total volume flow; (b) fume volume flow.

피유량은 $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ 로, $0.243 \text{ m}^3/\text{s}$ 인 case 5에 비해 작은 것을 볼 수 있다. 1200초 이후에는 case 6이 더 높은 레진 가스 부피유량을 가지는데, 이는 1200초 이후 case 5는 레진 가스의 14.71%만이 탱크에 남아있어 공기가 주로 배출되기 때문이다. 또한, case 5, 6 모두 시간에 따라 배출구를 통해 배출되는 전체 부피유량은 증가함을 알 수 있다. 이는 시간이 지남에 따라 배출되는 기체 속 레진 가스의 농도가 줄어들기 때문이다. 공기보다 밀도가 높은 레진 가스의 농도가 줄어들수록, 같은 압력이 작용할 때 전체 부피유량은 증가한다.

Fig. 12에 case 5, 6의 시간에 따른 레진 가스 배출율 변화 그래프를 나타내었다. Case 6은 배출율이 계속 증가하는 모습을 보이지만 배출되는 유량이 작아 1800초에 66.22%에 그친다. 배출율이 증가하지만 1800초 이상의 배출시간을 부여하는 것은 경화작업으로의 전개를 늦추어 공정효율을 감소시킬 수 있으므로 적절한 배출시스템이 아니다. Case 5의 경우도 94.21%로 상대적으로 높은 배출율을

보이지만, 98.3%이상의 배출율을 보이지 못하므로 LEL이하로 레진 가스 체적분율을 낮출 수 없어 최적의 배출시스템이 아니다.

각 case의 최종 배출율은 Table 5에 나타내었으며, 6가지 조건 중 LEL이하로 농도를 낮출 수 있는 case 3이 최적의 레진 가스 배출 시스템이다.

Table 5. Final exhaust percentage in case 1~6 exhaust system

Final exhaust percentage	
Case 1	58.17%
Case 2	58.54%
Case 3	98.92%
Case 4	72.95%
Case 5	94.21%
Case 6	66.22%

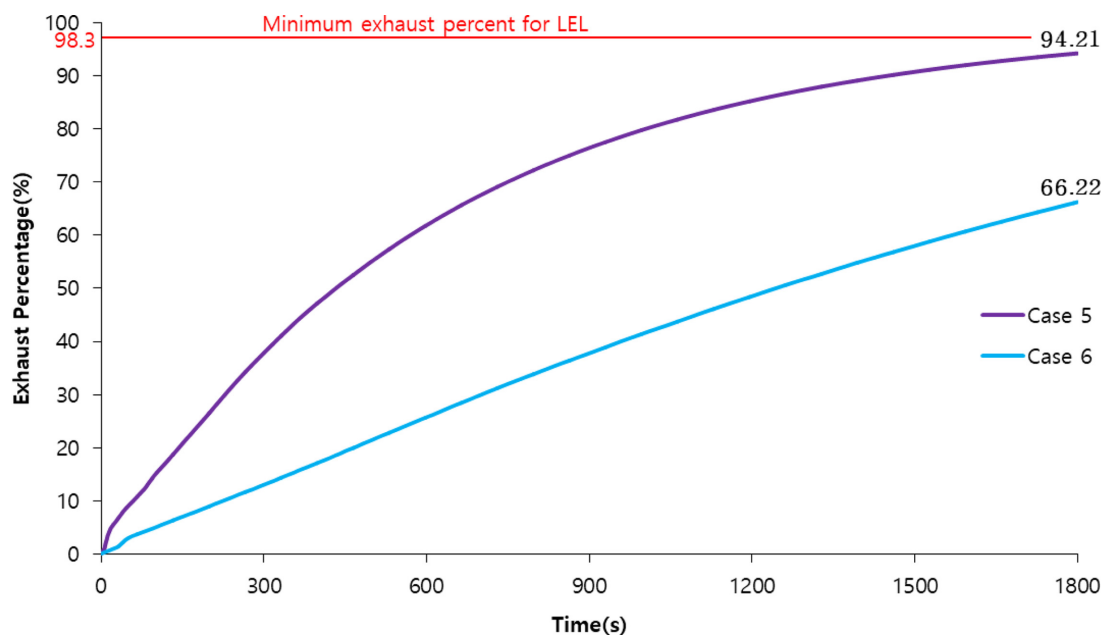


Fig. 12. Plot of fume exhaust percentage for flow-time in case 5, 6.

4. 결 론

본 연구에서는 VPI 공정 내 발생하는 유해 레진 가스를 배출하는 시스템을 구성하기 위해 3개의 배관을 가지고 6가지 case를 선정하여 case study를 진행하였으며, 최적의 배출시스템을 도출하였다. 그 결과 Vent A를 유입구, Vent C를 배출구로 활용하는 case 3이 1800s동안 98.92%의 레진 가스를 배출할 수 있고, LEL이하로 레진 가스 체적분율을 낮출 수 있으므로 가장 적합한 가스 배출시스템이다. 따라서, Case 3의 방식을 이용하여 해당 VPI 공정에 레진 가스 배출시스템을 설치 중이다.

본 레진 가스 배출시스템을 활용하면 다음과 같은 이점을 기대해 볼 수 있다. 첫째, 탱크 개방 시 해당 및 주변 작업자들의 레진 가스 노출을 최소화하여 안전 및 환경 측면에서 개선된 작업환경을 확보할 수 있다. 둘째, 30분 이내의 빠른 레진 가스 배출을 통해 경화과정으로의 신속한 전개가 가능하여 공정 효율을 향상시킬 수 있다. 셋째, 레진 가스 배출 시스템을 추가하여 국내 기업들에 적용함으로써, 해외 의존도가 높은 VPI 설비의 국산화를 달성할 수 있다.

감 사

본 논문은 한국생산기술연구원 민간수탁활성화지원사업 기업체 에너지공정 최적화 지원사업(1/1) (Kitech-EE-20-0019)의 지원으로 수행한 연구입니다.

References

- Kim, H.-D., Lee, Y.-J. and Ju, Y.-H., "Characteristics of Insulation Aging in Large Generator Stator Windings," *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers* **58**(7), 1375-1379(2009).
- Minami, Matsutaro, et al. "Recent Insulation System For Low Voltage Rotary Machines," (1979).
- Kong, T.-S., "A Study on Insulation Property of VPI Type Generator Stator Winding Through the Case Analysis of Insulation Breakdown," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, **59**(3), 311-316(2010).
- Duan, Jingkuan, et al. "Morphology and Thermal and Dielectric Behavior of Cycloaliphatic Epoxy/trimethacrylate Interpenetrating Polymer Networks for Vacuum-pressure-impregnation Electrical Insulation," *Journal of Applied Polymer Science*, **110**(5), 3096-3106(2008).
- Hannu, Timo, et al. "IgE-mediated Occupational Asthma from Epoxy Resin," *International Archives of Allergy and Immunology*, **148**(1), 41-44(2009).
- Fawcett, I. W., Newman Taylor, A. J. and Pepys, J., "Asthma Due to Inhaled Chemical Agents—epoxy Resin Systems Containing Phthalic Acid Anhydride, Trimellitic Acid Anhydride and Triethylene Tetramine," *Clinical & Experimental Allergy*, **7**(1), 1-14(1977).
- Zhang, Zinan, et al. "Synthesis of CeO₂-loaded Titania Nanotubes and Its Effect on the Flame Retardant Property of Epoxy Resin," *Polymers for Advanced Technologies*, **30**(8), 2136-2142 (2019).
- Zhang, Jianping, Wayne Johnson, and Tom Plikas, "Application of Computational Fluid Dynamics for Solving Ventilation Problems in Metallurgical Industrial Processes," *International Journal of Ventilation*, **16**(3), 200-212(2017).
- Lee, K. Y. and Kim, K. W., "A Study on Numerical Analysis and Performance Improvement of Ventilation Systems in Coating Room," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **14**(5), 2086-2091(2013).
- Toraño, J., et al. "Auxiliary Ventilation in Mining Roadways Driven with Roadheaders: Validated CFD Modelling of Dust Behaviour," *Tunnelling and Underground Space Technology*, **26**(1), 201-210(2011).
- Lee, J., Cho, S., Park, C., Cho, H. and Moon, I., Numerical analysis of hydrogen ventilation in a confined facility with various opening sizes, positions and leak quantities. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. **40**, pp. 559-564). Elsevier (2017).
- Park, Chanhoo, et al. "Novel Evaluation Method for the Continuous Mixing Process of Bimodal Particles," *Powder Technology*, **344**, 636-646(2019).
- Danielewicz, J., et al. "Three-dimensional Numerical Model of Heat Losses from District Heating Network Pre-insulated Pipes Buried in the Ground," *Energy*, **108**, 172-184(2016).
- Krawczyk, Piotr, Asfaw Beyene, and David MacPhee, "Fluid Structure Interaction of a Morphed Wind Turbine Blade," *International Journal of Energy Research*, **37**(14), 1784-1793(2013).
- ANSYS_Fluent_Theory Guide (2019).
- Cho, Hyungtae, et al. "Numerical analysis for particle deposit formation in reactor cyclone of residue fluidized catalytic cracking," *Industrial & Engineering Chemistry Research* **52.22** : 7252-7258(2013).
- Cho, Hyungtae, et al. "Uneven Distribution of Particle Flow in RFCC Reactor Riser," *Powder Technology*, **312**, 113-123(2017).
- Bulat, Mikhail Pavlovich, and Pavel Victorovich Bulat, "Comparison of Turbulence Models in the Calculation of Supersonic Separated Flows," *World Applied Sciences Journal*, **27**(10), 1263-1266(2013).
- Huang, S. H. and Li, Q. S., "Numerical Simulations of Wind-driven Rain on Building Envelopes Based on Eulerian Multiphase Model," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **98**(12), 843-857(2010).