

Computational Fluid Dynamics를 활용한 점/접착 생산 공정 내 Jacketed Vessel 설계 최적화

주종효*** · 박현도**** · 조형태* · 김정환*.[†]

*한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹, **건국대학교 화학공학부, ***연세대학교 화공생명공학과
(2020년 9월 7일 접수, 2020년 9월 25일 수정, 2020년 9월 28일 채택)

Optimization of Plain Jacketed Vessel Design in Adhesive Production Process Using Computational Fluid Dynamics

Chonghyo Joo***, Hyundo Park****, Hyungtae Cho* and Junghwan Kim*.[†]

*Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of International Technology, Ulsan 44413, Korea

**Department of Chemical Engineering, Konkuk University, Seoul 05029, Korea

***Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

(Received September 7, 2020; Revised September 25, 2020; Accepted September 28, 2020)

초 록

점/접착제 생산 공정은 배합 과정에서 mineral insulated (MI) cable을 통해 내부 용액을 76 °C까지 가열 및 혼합 후 제품 출하를 위해 30 °C까지 상온 냉각을 진행한다. MI cable을 이용한 반응기의 경우, 냉각시간이 평균 10 h 소요되어 생산 효율이 낮은 문제점이 있지만, jacketed vessel을 설치하면 위의 문제를 효과적으로 해결할 수 있다. 그러나 jacketed vessel의 종류가 다양해 jacket을 설치하기 전, 배합 공정조건에 적합한 종류를 찾아야 한다. 본 연구에서는 생산효율에 영향을 주는 냉각시간을 최소화하기 위해 computational fluid dynamics (CFD)를 이용하여 jacket 종류에 따른 냉각시간을 비교해 공정에 적합한 jacketed vessel 모델을 개발하고, 점/접착제 생산 공정에 최적화된 jacketed vessel을 설계하였다. 연구 결과, jacket의 높이가 같을 때, half-pipe coil jacket보다 plain jacket의 냉각 성능이 32.7% 더 우수하였고, plain jacket에 60% spiral baffle을 설치하여 냉각 공정에 이용할 경우 냉각시간을 80.4%, 작업시간을 25.1% 단축 가능하다.

Abstract

Blending process of adhesive production has a cooling process to cool down the temperature of the solution which was heated up to 76 °C with a mineral insulated (MI) cable by 30 °C at room temperature. Using a MI cable in the adhesive production process makes the production inefficient because it takes about 10 h for the cooling process. If a jacketed vessel is used instead of the MI cable, it would shorten the cooling downtime without any additional cooling system by using cold water. However, there are various types of jacketed vessels, and thus the most suitable type should be found before set up. In this study, we designed the optimized jacketed vessel for the adhesive production process by calculating the cooling downtime, which impacts production efficiency, as a function of the jacket types using computational fluid dynamics. As a result, the cooling performance of the plain jacket was 32.7% superior to that of the half-pipe coil jacket with the same height. In addition, the plain jacket with 60% spiral baffle reduced the cooling downtime and operating time by 80.4% and 25.1%, respectively.

Keywords: Computational fluid dynamics, Cooling process, Baffle, Jacketed vessel, Optimization

1. 서 론

배합 공정이란 용매와 재료를 반응기에 넣고 가열과 교반을 반복하여 제품을 생산하는 공정으로, 아스팔트 생산 공정이나 점/접착제 생

산 공정 등 여러 분야에 이용되고 있다[1]. 점/접착제 생산 공정은 용매에 고분자 수지를 가열, 용해하여 제품을 생산하는 배합 공정을 사용하는데, 기존 공정에서는 반응기 가열에 mineral insulated (MI) cable을 사용해왔다[2]. MI cable을 이용한 공정은 반응기 전체에 MI cable을 용접형태로 붙인 후 전기에너지를 이용하여 열을 가하는 방식으로, 반응기의 일부가 과열되어 hot spot이 발생하는 문제가 있다. 반응기의 일부가 과열되면 제품의 불량률이 높아지며, 이상반응이나 폭발반응 등의 안전문제까지 발생할 수 있다[3]. 또한, 냉각 시스템을 따로 설치하지 않으면 냉각시간이 증가하기 때문에 생산성이 줄어들어

[†] Corresponding Author: Korea Institute of International Technology, Green Materials and Processes R&D Group, 55, Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Korea
Tel: +82-052-980-6629 e-mail: kjh31@kitech.re.kr

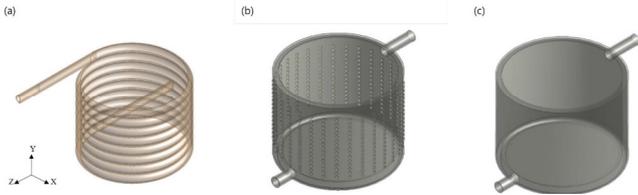


Figure 1. Geometry of jackets (a) half-pipe coil jacket, (b) dimple jacket, (c) plain jacket.

경제적 손실을 입을 수 있다[4].

Jacketed vessel이란 반응기를 가열하거나 냉각하기 위하여 외부에 열 교환에 이용할 유체가 흐르는 jacket을 설치한 반응기로, 과열로 인한 문제와 긴 냉각시간으로 인한 생산효율 감소 문제를 효과적으로 해결할 수 있다[5]. Jacket을 이용하면 steam과 냉각수 모두를 이용할 수 있어 별도의 냉각장치가 필요 없으며, 운전 온도가 MI cable에 비해 낮기 때문에 과열위험도 상대적으로 낮아진다[6]. Jacketed vessel에 사용되는 jacket의 종류로는 크게 half-pipe coil jacket, dimple jacket, plain jacket이 있으며, Figure 1에 각각의 종류와 구조를 그림으로 나타냈다[7]. Half-pipe coil jacket은 반응기 외부에 파이프를 나선형으로 말아 부착하여, 파이프 내의 유체와 반응기가 열 교환을 하는 jacket이다. 주로 고압 혹은 고온의 반응기에 사용하며, 파이프가 용접되어있어 다른 jacket에 비해 설치비용이 저렴하다는 장점이 있다. Dimple jacket은 얇은 판을 이용하여 만든 jacket으로, dimple이 열 교환 면적을 넓혀주어 열 교환 성능이 우수하다. 그러나 jacket을 공정에 적용할 때 저속의 유체를 사용해야 하며, 얇은 판으로 이루어져 있어 운전조건이 까다로운 단점이 있다. Plain jacket은 jacket의 기본 모델로 traditional jacket 또는 conventional jacket이라고도 불리며, 반응기 전체 혹은 일부를 jacket으로 덮어 반응기와 jacket 사이의 유체가 순환을 통해 열 교환을 하게 된다. 주로 저용량의 반응기나 고압 반응기에 사용한다. 하지만 plain jacket의 경우 유체가 반응기와 고르게 열 교환을 하지 못하여 냉각 효율이 감소하는 문제점이 있다. 냉각 효율 저하의 문제를 해결하기 위해 baffle jacket이 개발되었는데, plain jacket에 baffle을 설치함으로써 유체의 흐름을 개선하여 문제를 해결할 수 있다. 대표적인 예시로 spiral baffle jacket을 들 수 있는데, 이 jacket은 plain jacket에 나선형(spiral)의 baffle을 적용시킨 모델로 냉각수를 강제로 jacket 전체에 흐르게 함으로써 plain jacket의 성능을 향상시킬 수 있다[8].

Baffle이란 유체의 흐름을 방해하는 칸막이로, 열교환기 내부의 유체 흐름을 제어하기 위해 사용해왔다[9]. Baffle은 설치 방법에 따라 열교환기의 성능을 향상시킬 수 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. Rabat 대학의 Ghandouri는 baffle 비율에 따른 열교환기의 성능을 연구하여, shell and tube 열교환기는 baffle 사이의 간격과 baffle cut 등을 조절함에 따라 열 교환 성능이 달라진다는 것을 확인하였다[10]. 최근 baffle의 원리를 이용하여 고리형(ring) baffle을 설치한 jacketed vessel이 개발되었으며, 일본의 반응기 제조 회사 Glaskelle는 고리형 baffle을 이용하여 반응기를 20 °C에서 -60 °C까지 냉각하는 시간을 35% 단축하였다[11]. 이처럼 baffle에 따른 열 교환 성능 향상에 대한 연구는 국외에서 활발하게 진행되고 있으며, baffle의 효과에 대해서는 여러 연구들로부터 검증되었다[10-12].

Jacketed vessel을 배합 공정에 이용하면 hot spot 생성 문제와 긴 냉각시간으로 인한 생산 효율 감소 문제를 해결할 수 있다. 그러나 냉각 효과는 jacket의 종류와 baffle의 유무에 따라 달라지기 때문에, jacket

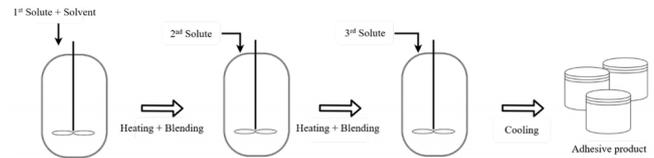


Figure 2. Schematic process flowsheet of adhesive production process.

을 선택할 때 어떤 종류의 jacket이 가장 최적의 냉각 효율을 갖는지 연구가 필요하다[8]. 세 가지의 jacket 종류(half-pipe coil, dimple, plain) 중 dimple jacket의 경우 고압, 고속의 스틱과 냉각수를 이용하는 점/접착제 생산공정에는 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 jacket 종류에 따른 점/접착 생산 공정의 성능을 평가하기 위해 half-pipe coil jacket과 plain jacket을 각각 CFD (computational fluid dynamics) 기법을 통해 모델링 하였다. Jacket 종류에 따른 냉각 시간을 비교한 뒤 plain jacket의 우수성을 확인하고, 최적화를 위한 사례연구를 진행하였다.

2. 실 험

2.1. 공정 개요

점착제와 접착제는 물질과 물질을 부착한다는 점에서 공통점이 있으며 편의상 물질과 물질을 부착하는 것을 “접착”이라고 칭하기 때문에 일반적으로 구분하여 사용하지는 않는다. 그러나 점/접착제는 물질의 특성에서 여러 차이점들이 존재한다. 특히 점착제는 시간이 경과하면 고화현상이 발생하지 않지만 접착제는 시간이 지남에 따라 고화현상이 발생하며, 점착제의 경우 온도가 높을수록 인장력과 유지력 감소, 끈적임과 유동증가, 응집력 감소, 수명 감소 등의 단점이 존재한다. 점착제는 원료로 고분자 물질들을 사용하기 때문에 점착제와 접착제 모두 생산 공정에서의 온도 조절이 상당히 중요하다[13].

점/접착제 생산 공정의 개략도를 Figure 2에 나타내었다. 용매인 toluene과 고분자수지(석유수지, 고무계, 아크릴계 등)로 이루어진 1차 재료를 투입하고, 반응기 승온과 교반을 진행한다. 같은 방법으로 2차 재료투입 후 가열 및 교반, 3차 재료투입 후 가열 및 교반 과정을 진행한 후 마지막으로 제품의 포장을 위해 숙성과 냉각 과정을 거친다. 1 batch 당 작업시간은 승온 및 혼합 20 h, 냉각 10 h, 기타 작업시간 2 h으로 총 32 h이 소요된다.

2.2. CFD modeling

본 연구에서는 ANSYS Design Modeler를 이용하여 steel 재질 200 L 용량의 점/접착제 생산 공정에 사용되고 있는 상업용 반응기(D₁: 1,500 mm × H₁: 1,700 mm, 두께: 50 mm)를 설계하여 simulation에 이용하였다[Figure 3(a)].

연구에 이용한 jacket과 pipe의 재질은 steel, pipe의 지름과 두께는 각각 120 mm, 10 mm로 설정하였다. 연구에 사용한 jacket의 종류는 half-pipe coil, plain 두 종류이며 half-pipe coil jacket의 half-pipe 지름과 두께는 pipe와 동일하게 120 mm, 10 mm로, coil의 길이는 37.7 m로 설정하였다.

Half-pipe coil jacket과 plain jacket의 냉각성능을 비교하기 위하여 모든 case에 대해 jacket의 높이를 1,256 mm, 반응기와 jacket사이의 거리를 60 mm로 조건을 동일하게 설정하였다. 반응기는 물질의 출입 없이 열에너지만 교환되는 closed system이기 때문에 뚜껑이 닫혀있는 반응기를 modeling 하였고, 실제 공간은 opened system에 해당되기 때문에 공기 유량이 존재하는 공간(D₂: 3,700 mm × W: 2,400 mm ×

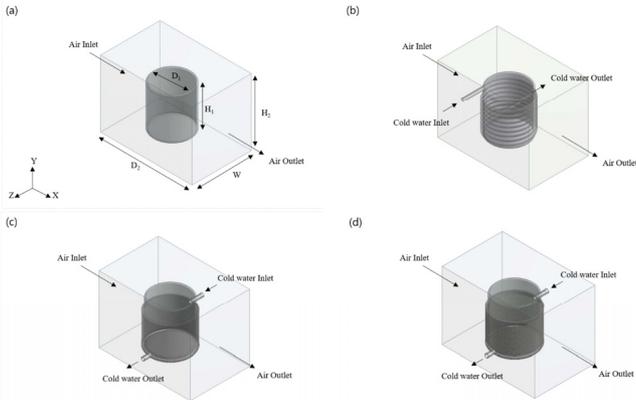


Figure 3. Vessel geometry (a) vessel, (b) half-pipe coil jacketed vessel, (c) plain jacketed vessel, (d) spiral baffle jacketed vessel.

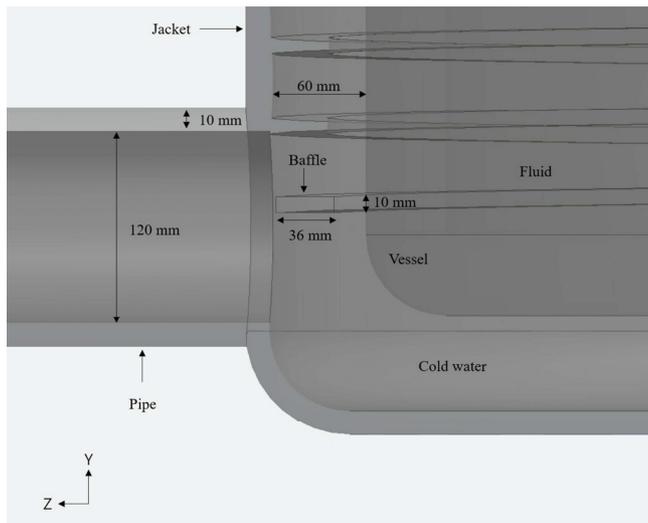


Figure 4. Detail geometry of jacketed vessel with 60% spiral baffle.

H₂: 2,700 mm)을 modeling하였다. 모델의 정확도를 높이기 위해 공업용 환풍기의 사양을 이용하여 공기 유량을 설정하였으며, simulation은 반응기 하나에 대하여 진행하였다(Figure 3).

Baffle 사례 연구에는 나선형baffle, 두께는 10 mm로 설정하였다. Baffle의 길이는 94.2 m이며 jacket과 연결되어있다. Baffle의 길이란, 나선형으로 말려있는 baffle을 직선으로 폈을 때의 길이를 의미하며, geometry에서 나선의 회전수를 20바퀴로 설정하여 구현하였다. Baffle 비율은 식 (1)로 계산하고, Figure 4에 baffle 비율 60%의 jacket 그림을 나타내었다.

$$\frac{\text{Baffle 단면의 가로 길이}}{\text{반응기와 jacket 사이의 거리(60 mm)}} \times 100(\%) \tag{1}$$

Geometry의 격자(mesh) 생성을 위해 sizing function으로 proximity & curvature를 이용하였는데, 좁은 간격에 대한 묘사가 우수한 proximity 함수와 곡률 묘사에 적합한 curvature 함수를 혼합하여 격자를 생성하는 함수이기 때문에 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있으나 정확한 해석이 가능하다는 장점이 있다[14]. 본 연구에서는 곡선이 많고 baffle 두께가 10 mm인 geometry를 사용하므로 proximity & curvature

Table 1. The Number of Meshes by Vessel Type

	Number of nodes	Number of elements
(a)	394,434	1,275,494
(b)	368,300	1,469,436
(c)	414,448	1,455,245
(d)	596,722	2,214,524

Table 2. Case Study

Case	Vessel type	Figure
1	Vessel	Figure 3(a)
2	Half-pipe coil jacketed vessel	Figure 3(b)
3	Plain jacketed vessel	Figure 3(c)
4	10% spiral baffle jacketed vessel	Figure 3(d)
5	20% spiral baffle jacketed vessel	
6	30% spiral baffle jacketed vessel	
7	40% spiral baffle jacketed vessel	
8	50% spiral baffle jacketed vessel	
9	60% spiral baffle jacketed vessel	
10	70% spiral baffle jacketed vessel	
11	80% spiral baffle jacketed vessel	

함수 사용이 적합하며, Figure 3에 대한 vessel 종류 별 격자수를 Table 1에 나타내었다.

Geometry 설계부터 격자 생성까지 총 11개의 case에 대해 CFD modeling을 수행하였다(Table 2). Case1의 결과와 상용 반응기의 냉각시간과 온도를 통하여 모델을 검증하였고, 냉각성능이 더 우수한 vessel 종류를 선택하기 위하여 half-pipe coil jacketed vessel (case 2)과 plain jacketed vessel (case 3)의 냉각시간을 비교하였다. 마지막으로 jacket의 냉각성능 최대화를 위한 최적화된 baffle 비율을 찾기 위하여 spiral baffle 비율을 10% 간격으로 변화를 주면서 baffle 비율 10~80% (case 4~11)에 대한 냉각시간을 비교하였다.

2.3. 지배 방정식

본 연구에서는 열과 유체의 유동을 해석함에 있어서 시간과 비용을 단축하기 위해 CFD (computational fluid dynamics)를 이용하였다 [15-17]. 사용한 프로그램은 ANSYS FLUENT이며 CFD 해석을 위한 지배 방정식은 다음과 같다[18,19].

2.3.1. 연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \tag{2}$$

2.3.2. 운동량 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j u_i) = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} + S_u \tag{3}$$

Table 3. Simulation Conditions

Domain	Value	
Air	Temperature	25 °C
	Inlet velocity	0.06 m/s
Cold water	Temperature	25 °C
	Inlet velocity	0.5 m/s
Fluid (toluene)		
Jacket	Initial temperature	76 °C
Vessel		

2.3.3. 난류 운동 에너지 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \mu_t G - \rho \epsilon \quad (4)$$

2.3.4. 에너지 보존 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + S_T \quad (5)$$

식 (2)는 질량이 보존되는 상태로 이송되는 것을 기술한 방정식으로, 질량 보존 방정식 또는 연속 방정식이라고 불린다. ρ 는 밀도, \vec{v} 는 속도, t 는 시간을 의미한다. S_m 은 계에 추가된 질량을 표현한 문자로, 설정한 하나의 계에 대하여 총 질량이 보존됨을 의미한다. 식 (3)은 물리계에서 물체의 운동을 기술하는 방정식으로, 압력 p 와 i 와 j 방향의 stress tensor를 의미하는 τ_{ij} 를 포함하고 있다. S_u 는 연속상에 추가된 질량을 의미하며 압력변화, stress tensor 변화 및 연속상에 추가된 질량을 고려했을 때 유체의 총 운동량이 보존된다. 식 (4)와 (5)는 난류 모델 중 standard k-epsilon model에 사용되는 방정식들이다[20,21]. 여기서 k 는 난류 운동 에너지(turbulent kinetic energy), ϵ 는 난류의 소산속도(rate of dissipation)를 의미하고, σ 와 Pr_t 은 Prandtl number, C 와 u 는 상수와 속도를 뜻한다. μ_t (turbulent viscosity)는 다음과 같이 위의 식에서 도출된 k 와 ϵ 를 통해 식 (6)에 의해 계산이 된다. Standard k-epsilon model은 완전 난류와 입자들에 의한 점성 효과 무시를 가정 한 반 경험적 모델이기 때문에 완전 난류 흐름에 대해서만 유효하다.

$$\mu_t = \rho C \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

2.4. Simulation 조건 설정

CFD simulation을 위해 점/접촉제 냉각 공정의 조건들을 이용하였다. 실제 반응기 내부의 물질은 toluene과 여러 고분자수지로 이루어져 있지만, simulation에서는 용매인 toluene을 대표물질로 선택하여 냉각 시간을 확인하였다. 외부공기의 온도는 25 °C, inlet velocity는 공업용 환풍기의 유량인 25 m³/min에 맞추어 0.06 m/s로 설정하였고, 냉각수는 온도 25 °C, inlet velocity는 유량 0.339 m³/min에 해당하는 0.5 m/s로 설정하였다(Table 3). Table 3의 조건들을 설정한 cases 2와 3의 단면 사진을 Figure 5에 나타내었다.

이후 fluid의 처음온도 76 °C에서 목표온도 30 °C까지 도달하는데 걸리는 냉각시간을 비교하였고, 냉각시간 단축이 냉각성능 향상을 의미

Table 4. Simulation Result of Fluid Temperature at 10 h

	Real temperature	Simulation temperature
At 10 h	30 °C	28 °C
Error	6.7%	

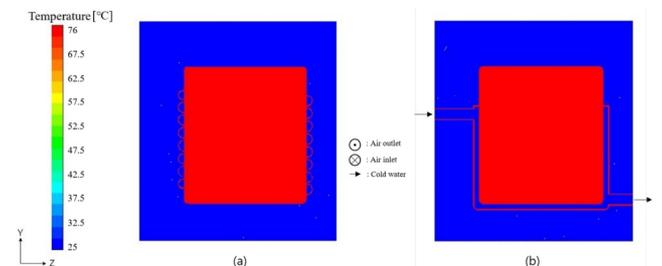


Figure 5. Cross section in the initial condition (a) case 2, (b) case 3.

하기 때문에 냉각시간이 짧은 모델을 열전달 성능이 우수한 모델로 선택하였다.

2.5. Validation

Validation은 computer simulation model 개발 과정에서 신뢰할 수 있는 모델을 만들기 위해 반드시 선행되어야 하는 과정이다[22]. Validation을 통해 simulation 결과와 상용 공정 운전 데이터와의 비교를 통해서 CFD 해석 결과를 신뢰할 수 있는지 검증할 수 있다[23].

본 simulation에서는 “상온 냉각 시간이 10시간”이라는 상용 공정 운전 데이터에 대해 validation을 진행하였다. 반응기 외부 공기가 0.5 m/s로 흐르는 조건에서 jacket이 없고, toluene을 넣은 vessel (반응기)을 상온냉각 하였다. 프로그램 내에서 10 h의 상온 냉각을 simulation한 결과, 반응기 내부 액체의 온도는 약 28 °C로 계산되었으며 실제 데이터인 30와 2 °C의 차이를 보였다(Table 4). Validation을 위해 오차율에 대한 식 (7)을 이용하여 실제값과 simulation값 사이의 오차를 계산하였다. X_{real} 은 실제값을 의미하며, $X_{ulation}$ 은 simulation을 통해 계산된 값을 의미한다. 계산결과는 6.7%로 simulation에 대한 신뢰성을 확보하였다.

$$\text{Error (\%)} = \frac{|X_{real} - X_{ulation}|}{X_{real}} \times 100 \quad (7)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. Jacket 종류별 simulation

냉각시간은 반응기 내부 액체의 평균온도가 76 °C에서 30 °C까지 도달하는 데 걸리는 시간으로 정의하였으며, 시간에 따른 온도변화 그래프는 Figure 6에 나타내었다. 그래프의 개형은 서로 비슷하게 나타났으나, plain jacket이 half-pipe coil jacket에 비해 전 구간에서 기류가 커져 냉각속도가 빠름을 확인하였다.

Simulation 결과인 jacket 종류별 냉각시간은 Table 5에 나타내었다. Table 5의 냉각시간을 비교하면 plain jacket의 냉각시간이 7,208 s로 half-pipe coil jacket의 냉각시간 10,714 s보다 32.7% 짧았다. 본 연구에서는 냉각시간의 감소가 냉각성능의 향상을 의미하므로 plain jacket이 half-pipe coil jacket보다 냉각성능이 32.7% 더 우수하다.

Figure 7에 plain jacket 내부 냉각수의 stream line을 분석한 결과,

Table 5. Cooling Downtime of cases 2 and 3

Jacket type	Cooling downtime (s)
Case 2 (half-pipe coil jacket)	10,714
Case 3 (plain jacket)	7,208

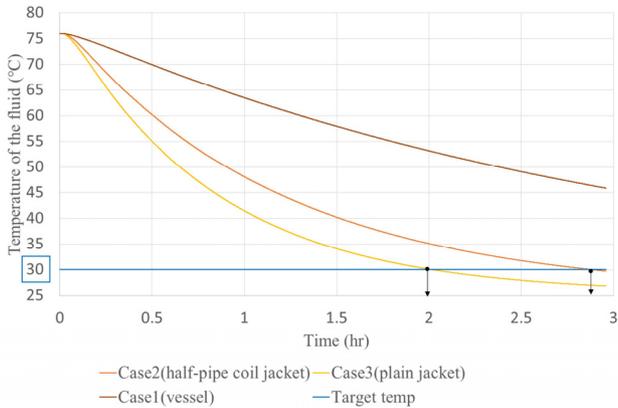


Figure 6. Cooling down graph of cases 2 and 3.

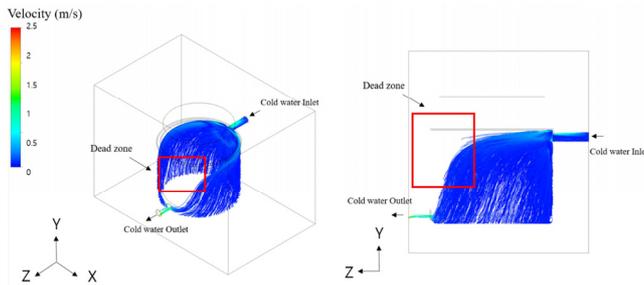


Figure 7. Stream line of cold water in the plain jacket.

냉각수의 흐름이 없는 dead zone이 존재하기 때문에 plain jacket의 경우, 냉각수가 반응기 외부 전체와 열 교환을 하지 못하는 문제점이 있다. Dead zone의 냉각수는 다른 위치의 유체에 비해 상대적으로 고여 있기 때문에 jacket의 열 교환 성능을 감소시키고 냉각시간을 증가시키므로, jacket의 냉각성능 향상을 위해서는 jacket 내부의 유체 흐름을 개선해야 한다. 따라서 baffle 설치를 통해 유체의 stream line을 조절하여, 냉각수가 반응기 외부 전체와 열 교환을 하면 plain jacket의 냉각성능을 향상시킬 수 있다.

3.2. Baffle 비율에 따른 simulation

Baffle 비율이란 유체의 통과 면적 중 baffle이 차지하는 면적을 의미한다. 열교환기에 사용되는 baffle은 baffle 비율이 클수록 열교환기의 열 교환 효율을 향상시키는 것으로 알려져 있다[24]. 특히, shell and tube 열교환기에서 baffle의 비율이 증가하면 액체가 jacket 내부에 체류하는 시간이 길어지고, 부분적인 난류 생성으로 열 교환 성능이 향상된다.

그러나 scale이 더 작은 jacket의 경우, baffle의 비율이 지나치게 커지면 냉각수의 체류시간이 길어짐에 따라 체류하는 냉각수의 온도가 시간이 지날수록 증가하고, 결국 반응기와 냉각수의 온도차이(ΔT)가 감소하여 열 교환 성능이 감소하게 된다. 따라서 baffle을 jacket에 적용시킬 경우, 냉각수의 유속 등 외부 조건에 따라 baffle의 영향력이

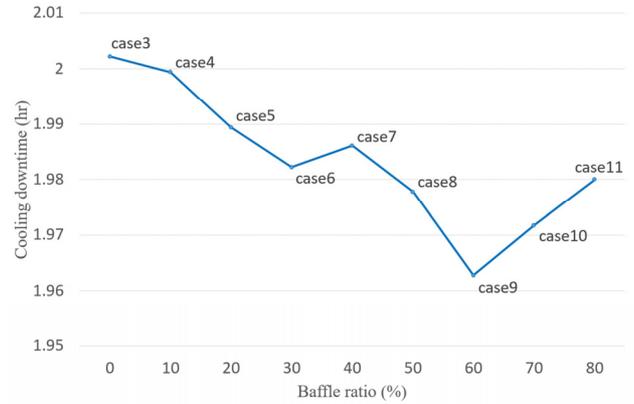


Figure 8. Cooling downtime according to baffle ratio.

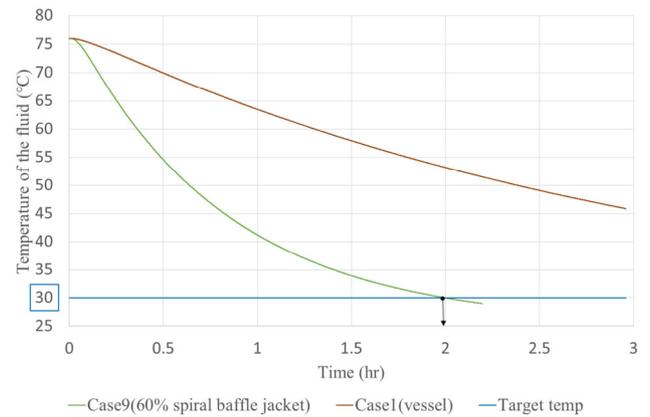


Figure 9. Cooling down graph of case 1 and case 9.

달라지기 때문에 jacket의 열 교환 성능을 최대화하기 위해서는 적용시킬 공정에 적합한 최적의 baffle 비율을 찾아야 한다.

Baffle의 비율에 변화를 주면서 반응기 내부 액체의 온도가 76 °C에서 30 °C까지 냉각되는 데에 걸리는 시간을 simulation을 통해 확인하였다(Figure 8). Figure 8 그래프의 경향을 보면 baffle 비율이 증가함에 따라 냉각시간이 감소하다가, baffle 비율이 30%인 지점(case 6)과 60%인 지점(case 9)을 지나면서 냉각시간이 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 case 7 이후에는 baffle 비율에 따라 냉각시간이 감소하는 경향이 다시 나타나지만, case 9 이후에는 baffle 비율이 증가함에 따라 냉각시간이 증가한다. 따라서 점/접착제 냉각공정에 baffle 길이가 94.2 m인 spiral baffle jacket을 사용할 경우, baffle 비율은 80%가 아닌 60%로 설치해야 냉각시간을 최소화 할 수 있다. 즉, plain jacket의 냉각성능을 최대도 향상시키기 위한 최적의 baffle 비율은 60%이다.

Baffle 비율을 최적화한 60% spiral baffle jacket을 점/접착제 생산 공정에 적용하여 CFD를 통해 냉각시간을 계산하고(Figure 9), 시간에 따른 vessel 내부fluid의 온도를 확인하였다(Figure 10). 상온 냉각을 진행할 경우 목표온도 30 °C까지 냉각하는 데에 10 h이 소요되는 반면, 60% spiral baffle jacket을 이용할 경우 냉각시간이 1.96 g소요된다. 따라서 spiral baffle jacket을 점/접착제 생산 공정에 이용하면 냉각시간을 80.4% 단축할 수 있다.

3.3. 생산성 향상

점/접착제 생산 공정의 작업시간은 반응기 세척, 포장 등의 시간을

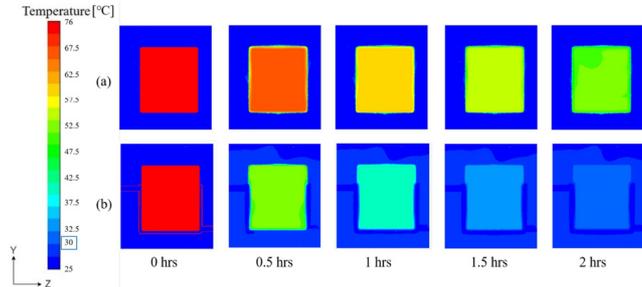


Figure 10. Cross section at different simulation time (a) case 1, (b) case 9.

제외하고 1 batch당 32 h이 소요된다. 60% spiral baffle jacketed vessel을 공정에 적용할 경우, 냉각시간을 10 h에서 1.96 h으로 단축할 수 있기 때문에, 제품생산을 위한 작업시간은 32 h에서 23.96 h으로 기존 공정 대비 25.1%의 생산시간을 단축할 수 있다. 생산시간 단축에 따라 같은 작업시간 대비 더 많은 제품을 생산할 수 있기 때문에, jacketed vessel의 최적화를 통해 생산성 향상 효과를 기대 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 점/접착제 생산 공정 중 냉각공정의 시간을 최소화 하는 jacketed vessel 모델을 제시하고, spiral baffle jacket의 냉각성능을 최대화 하기 위해 baffle 비율의 최적화를 진행하였다.

대표적으로 사용하는 half-pipe coil jacket과 plain jacket 두 종류의 jacket에 대해 점/접착제 배합 공정 조건을 이용하여 설정 온도로부터 목표 온도까지 도달하는 데에 걸리는 시간을 비교하였으며, 냉각시간을 계산하기 위해 상용 CFD 소프트웨어인 ANSYS FLUENT를 이용하였다. Simulation의 신뢰성을 높이기 위해 상온 냉각시간 데이터를 사용하여 validation을 진행하였고, 실제 데이터와의 오차율은 6.7%로 계산되었다. Simulation 결과 half-pipe coil jacket과 plain jacket 중 plain jacket의 냉각시간이 32.7% 더 짧았기 때문에, 냉각공정의 시간을 최소화하기 위한 jacketed vessel의 모델은 plain jacket이 적합하다. 하지만, plain jacket의 냉각수가 반응기 외부 전체와 열 교환을 하지 못하는 단점이 있기 때문에, plain jacket의 문제 해결 및 성능 향상을 위해 baffle을 설치한 spiral baffle jacket을 대상 공정에 적용하여 case study를 진행하였다.

Spiral baffle jacket의 냉각성능은 baffle의 비율에 따라 달라진다. 열교환기에 사용하는 baffle의 경우 baffle의 비율이 클수록 열 교환 효율이 높지만, spiral baffle jacket의 경우 baffle의 비율이 증가함에 따라 열 교환 효율이 감소하는 구간이 존재한다. Case study를 통해 baffle 비율에 따른 냉각시간을 비교한 결과 baffle 비율이 증가함에 따라 냉각시간이 감소하였지만, baffle 비율이 60% 이상의 구간에서는 냉각시간이 증가하였다. Case study에 사용한 baffle 길이가 94.2 m인 spiral baffle jacket은 baffle 비율을 60%로 적용할 때 냉각성능을 최대화 할 수 있다.

본 연구는 jacketed vessel에 사용하는 jacket 종류에 대해 냉각시간을 비교하여 성능이 가장 우수한 jacket 모델을 제시하였으며, spiral baffle의 baffle 비율에 따른 냉각시간을 비교하여 냉각성능을 최대화 할 수 있는 baffle 비율을 찾아 최적화 하였다. 최적화된 baffle 비율은 60%이며, 점/접착제 생산 공정에 이용할 경우 냉각시간을 시간 80.4%, 총 작업시간을 25.1% 단축할 수 있다. 총 작업시간을 단축함으로써,

같은 작업시간 대비 제품 생산량을 증가시킬 수 있기 때문에 생산성 향상 효과를 기대할 수 있다.

감 사

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

References

1. WAMGROUP, Specialized system components for asphalt mixing plants, Asphalt Mixing (2014).
2. D. Herres, Metal-sheathed (Type MI) Cable -Where to Use It, and Where Not to Use It, Test&Measurement Tips (2015).
3. W.-S. Han, Technical guidance on fire and explosion prevention in the mixing process of chemical plants, KOSHA GUIDE P-132-1013 (2013).
4. <https://www.kpc.or.kr/productivity/ProdIdea.asp>.
5. P. Hafezifefat, M. N. Esfahany, and Jafari, An experimental and numerical study of heat transfer in jacketed vessels by SiO₂ nano-fluid, *Heat Mass Transf.*, **53**, 2395-2405 (2017).
6. S. Hall and A. Stoker, API chemical synthesis: Trends in reactor heat transfer design, *Pharm. Eng.*, **24**(1), 1-8 (2004).
7. E. Gubskis, Design and modelling of vessel with halfpipe coil, KANUAS Univ. Faculty of Mechanical Engineering and Design, 2-41 (2016).
8. Chemical Engineering World, Oil & gas, Types of Jackets for Reaction Vessel, March, <https://chemicalengineeringworld.com/> (2020).
9. SPE Staff, SPE/ANTEC 1999 Proceedings, 163-164 (1999).
10. I. E. Ghandouri, Numerical study of shell and tube heat exchangers with different baffle cuts, *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 1-6 (2018).
11. N. Matsumoto, Baffle plate, Patent No. US D697,038d (2014).
12. <https://www.glaskeller.ch/en/products/reaction/reaction-unit-pilot-plant-fully-functional-stand/>.
13. <http://www.hyonjin.co.kr>.
14. ANSYS_CFD_Training Manual, Meshing (2019).
15. J.-S. Lee, S. Cho, K.-J. Sim, M.-S. Jang, and J.-Y. Sohn, Analysis of the water temperature stratification-maintaining conditions using CFD in case of intake of deep, low temperature water, *J. Korean Sol. Energ. Soc.*, **29**(2), 31-38 (2009).
16. ANSYS_Fluent_User Guide (2019).
17. ANSYS_Fluent_Theory Guide (2019).
18. C. M. Moon, S. G. Baek, and S. O. Park, Assessment of two-equation turbulent models in FLUENT for a turbulent heated pipe flow, *Korean Soc. Comput. Fluid Eng.*, Autumn Annual Conference of KSCFE, 158-163 (2003).
19. C.-H. Kim, S.-H. Chun, D.-W. Shin, L.-H. Kim, H.-C. Lee, and Y.-S. Baek, CFD simulation for mixture characteristic of DME-propane liquified fuels, *Korean Chem. Eng. Res.*, **50**(2), 328-333 (2012).
20. J. H. Lee and S.-B. Shim, Analysis of the gas feed distribution at the gas sweetening absorber using CFD, *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(3), 314-320 (2014).

21. I. S. Jeong, C. G. Lee, L. H. Cho, S. Y. Park, M. J. Kim, S. J. Kim, and D. H. Kim, Development and validation of inner environment prediction model for glass greenhouse using CFD, *Protected Hort. Plant Fac.*, **29**(3) 285-292 (2020).
22. R. G. Sargent, Verification and validation of simulation models, *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, L. C. Smith College of Engineering and Computer Science Syracuse, NY 13244, U.S.A. (2011).
23. J. S. Carson, Model verification and validation, John S. Carson, *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, Brooks-PRI Automation 1355 Terrell Mill Road Building 1482, Suite 200 Marietta, GA 30067, U.S.A. (2002).
24. E. Jiaqiang, D. Hana, Y. Deng, W. Zuo, C. Qian, G. Wud, Q. Peng, and Z. Zhang, Performance enhancement of a baffle-cut heat exchanger of exhaust gas recirculation, *Appl. Therm. Eng.*, **134**, 86-94 (2018).

Authors

- Chonghyo Joo; B.Sc., Researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of International Technology, Ulsan 44413, Korea; hyo156@kitech.re.kr
- Hyundo Park; B.Sc., Researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of International Technology, Ulsan 44413, Korea; phd0907@kitech.re.kr
- Hyungtae Cho; Ph.D., Senior researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of International Technology, Ulsan 44413, Korea; htcho@kitech.re.kr
- Junghwan Kim; Ph.D., Principal Researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of International Technology, Ulsan 44413, Korea; kjh31@kitech.re.kr