

나선형 냉각 코일이 설치된 교반기에서 임펠러 배치가 교반과 열전달에 미치는 영향

김인선^{1*}, 송현섭¹, 한상필¹

THE EFFECTS OF IMPELLER CONFIGURATION ON MIXING AND HEAT TRANSFER IN A STIRRED TANK WITH A HELICAL COOLING COIL

I.S. Kim, H.-S. Song, and S.P. Han

CFD analysis has been conducted to find the two stage impeller configuration which is the most suitable for a stirred tank with an internal helical cooling coil and a cooling jacket, which is frequently used in chemical industries for highly exothermic reactions ranged from low to medium viscosity. Two typical types of impellers are considered; pitched paddle impellers and Rushton turbine impellers. Interestingly, pitched paddle impellers show a good mixing performance for multi-species, whereas Rushton turbine impellers achieve a good mixing performance for multi-phases. Besides the type of an impeller, the location of an impeller is another important factor to be considered in order to accomplish an effective mixing. The best set of types and locations of two impellers is recommended based on the coefficient of variation(CoV) value and the heat removal capability obtained from CFD results. The former is a measure to quantify the degree of mixing.

Key Words: 교반기(Stirred tank), 임펠러(Impeller), 혼합(Mixing), 대류(Convection), 제열(Heat removal), 변이계수(CoV), 다종물질(Multi-species), 다상물질(Multi-phases), 단위 체적당 제열 속도

1. 서 론

임펠러를 사용하는 교반기는 화학 산업 분야에서 반응과 열전달을 목적으로 가장 흔하게 사용되는 단위 장치 중의 하나이다. 이러한 교반기가 발열 반응 공정에 사용되는 경우반응 중에 발생하는 반응열을 제거하기 위한 목적으로 냉각 재킷(cooling jacket)이나 냉각 코일(cooling coil)이 설치된다.

반응과 열전달이라는 공정 목적을 성공적으로 달성하기 위한 가장 기본적인 전제 조건은 교반기 내에서 정체 영역(dead zone)의 형성이 없이 전체적으로 원활한 유동 순환(flow circulation)이 이루어지는 것이다. 즉 반응물이 교반기 내에 균일하게 분산되어 분자 수준까지 완전하게 섞인 후 원하는 반응이 잘 이루어지는 동시에, 이때 발생한 반응열은 유동에 의

해 냉각 재킷이나 냉각 코일 등과 같이 열교환이 일어나는 표면으로 빨리 운반된 후 외부로 제거됨으로써 교반기 내 반응물의 온도가 열점(hot spot)의 발생이 없이 잘 제어되기 위해서는, 원활한 전체 혼합(global mixing)이 필히 확보되어야 한다.

교반기 내에 설치되는 냉각 재킷은 대체로 원활한 유동 순환을 방해하는 역할을 하기 때문에 원하는 공정 목적을 달성하기 위해서는 냉각 코일의 부정적 영향을 극복하면서 효율적인 전체 혼합이 이루어지도록 적절한 임펠러 형태를 선정해야 한다. 또한 교반하고자 하는 반응물의 특성은 크게 miscible과 immiscible로 나눌 수 있는데, 이러한 반응물의 특성에 의해서도 임펠러 형태에 따른 교반기의 성능이 크게 영향을 받기 때문에 임펠러 선정에 주의를 기울여야 한다.

본 논문에서는 반응물의 혼합과 반응열의 제거가 주요 공정 목적인 교반기에 대해 교반기 벽면의 길이를 확장하여 용량을 증가시킬 때 개조후 반응기에서도 기존 공정 목적이 성공적으로 달성될 수 있도록 하는 적절한 임펠러 형태와 설치 위치를 제시하였다. 본 논문에서 고려한 모든 교반기 계산 경

¹ 비회원, LG화학 기술연구원

* Corresponding author E-mail: sjiban@lgchem.com

우는 반응물의 혼합을 위해 2단 임펠러가 장착되어 있고, 반응열의 제거를 위해서는 나선형 냉각 코일과 냉각 재킷이 설치되어 있다. 반응물 특성은 다상성질과 다종성질 등 두 가지 경우로 나누어 각각의 특성에 맞는 최적 조건을 탐색하였다.

본 논문의 전산유체해석은 유한체적법에 기반을 둔 범용 CFD 상용 코드인 FLUENT 6.2.16을 사용하였으며, 각각의 교반기 계산 경우들에 대하여 임펠러 형태와 설치 위치의 변경에 따른 혼합 효율의 상대적인 변화를 비교하기 위하여 CoV(Coefficient of Variation)라는 정량적 변수를 도입하였고, 제열 효율의 상대적인 변화의 비교는 반응물 단위 체적당 대류에 의한 제열 속도를 통하여 살펴보았다.

2. 교반기 형상 및 CFD 해석 기법

2.1 교반기 형상

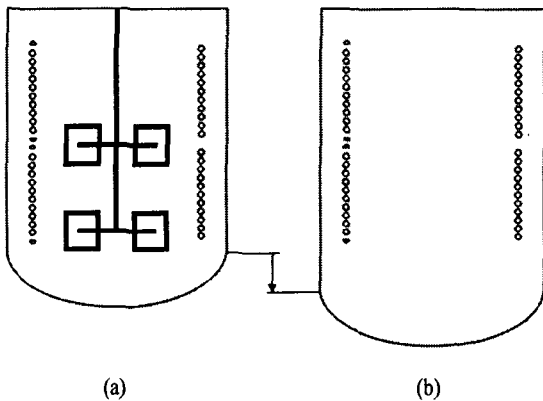


Fig. 1 Schematic diagram of the geometry of the stirred tank
(a) before modified: case 1 (b) after modified: case 2~7

본 논문에서 고려한 교반기의 개조전/후 기하학적 형상은 Fig. 1에 도시되어 있다. (a)는 개조전 교반기를 나타내는데, 2단 Rushton turbine(RT) 임펠러, 나선형 냉각 코일과 냉각 재킷이 설치되어 있다. (b)는 개조방향을 나타내는데, 개조전 교반기와 비교하여 냉각 코일의 위치와 형상은 동일하게 유지되고 용량 증대를 위해 교반기 벽면 길이만 확장된 상황이다. 본 논문에서는 Table 1에 나열되었듯이 Fig. 1의 (b)에 2단 임펠러 형태의 다양한 조합 방법과 설치 위치를 고려함으로써 Fig. 1의 (a)에 준하는 혼합 효율 및 제열 효율을 갖는 개조후 교반기를 제시하는 것이 목표이다.

교반기 내에서 반응물의 투입은 다음의 순서로 진행이 된다고 가정하였다. 먼저 다량의 첫 번째 반응물이 유입되어 교반기를 채우고, 이후 소량의 두 번째 반응물이 액면으로 유입되면서 발열 반응이 진행된다. 이 때 두 번째 반응물은 첫 번

Table. 1 The considered stirred tanks

	up stage impeller	down stage impeller	remark
case 1	Rushton turbine	Rushton turbine	
case 2	Rushton turbine	Rushton turbine	the installation locations of the two impellers are the same as case 1
case 3	pitched paddle	pitched paddle	
case 4	pitched paddle	pitched paddle	
case 5	Rushton turbine	Rushton turbine	the installation location of the down stage impeller is lowered
case 6	Rushton turbine	pitched paddle	
case 7	pitched paddle	Rushton turbine	

째 반응물에 대해 miscible(다종물질)과 immiscible(다상물질)한 특성을 가지고 있는 두 가지 경우를 고려하였으며, 어떤 경우든 두 번째 반응물이 가능한 빨리 교반기 내에 고루 분산되어야 반응에 유리하다고 가정하였다.

2.2 CFD 해석 기법

본 논문에서는 유한체적법에 기반을 둔 열유체해석 범용 CFD 코드인 FLUENT 6.2.16을 이용하여 전산유체해석을 수행하였는데, 해석 순서는 다음과 같다.

먼저 액면으로 소량 유입되는 두 번째 반응물은 첫 번째 반응물로 채워진 교반기 내의 유동에 미치는 영향이 거의 미미하다는 가정 하에 교반기 내의 유동 해석을 위해 3차원, 비압축성, 정상유동에 대한 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식과 난류를 위해 standard k-ε 모델을 사용하였다.

다음에 두 번째 반응물이 교반기 내에서 섞이는 현상을 분석하기 위해 액면에 일정량의 두 번째 반응물을 뿌린 후, 두 번째 반응물의 특성에 따라 다상물질(multi-phases) 또는 다종물질(multi-species) 기법 등을 이용해 두 번째 반응물의 농도 분포 변화를 시간의 흐름에 따라 추적하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 임펠러 형태 및 위치가 유동에 미치는 영향

여기서는 교반기의 개조전/후 교반 능력의 변화를 유선을 통해 살펴보고자 한다. Fig. 2는 모든 계산 경우들에 대해 속도 크기 분포와 유선을 도시하고 있다. 교반기 (a)의 RT 임펠러는 radial 형태이지만 나선형 냉각 코일과의 상호 작용에 의해 축방향 유동을 형성시키고 있으며, 이는 액면으로 투입되는 두 번째 반응물을 교반기 하부까지 전달하는 측면에서 반경 방향 유동보다 유리하다. 임펠러 위치는 고정시키고 단순히 벽면의 길이만을 확장한 교반기 (b)는 전체적으로 축 방향 유동을 형성시키고 있기는 하지만, 하단 RT가 개조전에는 축 방향 유동을 형성시켰던 반면에 개조후에는 반경 방향 유동을 형성시킴으로 인해 교반기 상부 영역과 하부 영역을 분리시키고 있다.

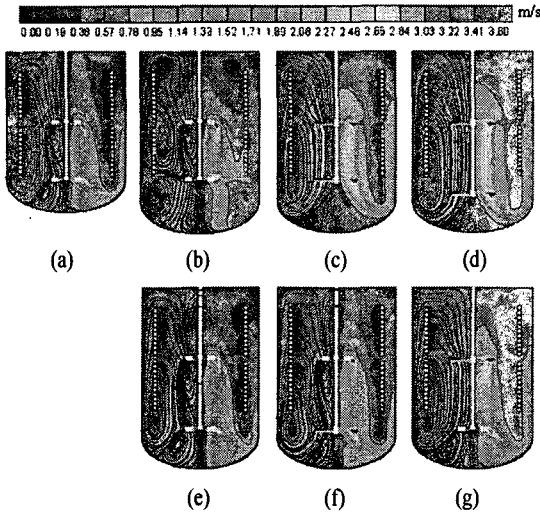


Fig. 2 Velocity magnitude distribution and streamlines
(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4 (e) case 5
(f) case 6 (g) case 7

즉 하단 RT가 설치된 위치를 기준으로 교반기 하부 영역에는 상부 영역과는 완전히 분리된 독립 유동 영역이 형성되고 있고, 이러한 독립 유동 영역은 액면으로 유입된 두 번째 반응물을 교반기 내 전체에 균일하게 분포시키는데 부정적인 영향을 주게 된다. 이런 현상을 개선하기 위해 하단 RT를 교반기 하부로 하향 조정하거나 축 방향 유동을 형성시키는데 사용되는 pitched paddle(PP) 형태 임펠러를 도입하면 독립 유동 영역이 사라지게 된다. 이때 PP 형태 임펠러의 경우 (f)와 (g)에서 보듯이 RT 형태 임펠러와 혼용하여 사용하게 되면 상단보다는 하단에 설치하는 것이, 그리고 (c)와 (d)에서 보듯이 개조전 하단 임펠러위치보다 하향 조정하여 설치하는 것이 독립 유동 영역을 개선하는데 더 효과적이다.

3.2 임펠러 형태 및 위치가 혼합에 미치는 영향

여기서는 액면을 통해 유입된 두 번째 반응물이 교반기 내에서 퍼져 나가는 현상을 정량적으로 계산하기 위하여, 두 번째 반응물이 첫 번째 반응물에 대하여 잘 섞이지 않는 다상물질인 경우와 잘 섞이는 다중물질인 경우로 나누어 각각에 대하여 시간에 따른 농도 분포의 변화를 추적하면서 CoV를 계산하였다. CoV는 식 (1)과 같이 정의되며, 두 번째 반응물이 교반기 내에서 가지는 농도 분포의 표준 편차를 나타내는 인자로서, CoV 값이 작을수록 두 번째 반응물이 교반기 내에 더 균일하게 분포하고 있음을 의미한다.

$$CoV = \frac{\sqrt{[(c - c_m)^2]_m}}{c_m} \quad (1)$$

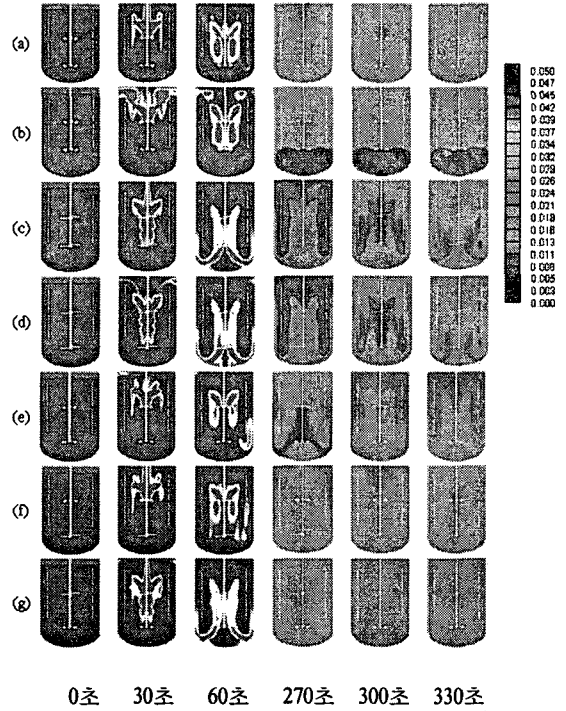


Fig. 3 Volume fraction of the second reactant (multi-phases)
(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4
(e) case 5 (f) case 6 (g) case 7

여기서 c는 특정 시간에 교반기 내의 특정 지점에서 가지는 두 번째 반응물의 농도를 의미하며, c_m 은 두 번째 반응물이 교반기 내에서 완전히 균일하게 섞였을 때의 평균 농도이다.

3.2.1 다상물질(multi-phases)

Fig. 3은 두 번째 반응물이 다상물질의 성질을 가질 때 시간의 흐름에 따른 교반기 내 농도 분포 변화를 보여주는 그림이다. 교반기 (b)의 경우 하부 영역의 독립된 정체 영역으로 인해 두 번째 반응물이 하부 영역에는 거의 분포하지 않게 되며, 교반기 (c)-(f) 경우처럼 하단 임펠러의 위치를 변경하거나 임펠러의 형태를 바꾸면 정체 영역 형성이 완화되면서 반응물이 하부 영역까지 이동하게 된다.

Fig. 4는 시간에 따른 CoV 변화를 보여주는 그래프이다. 대체로 RT 형태 임펠러가 PP 형태 임펠러보다 다상물질을 분산시키는데 더 효과적이지만, RT 형태 임펠러를 단독으로 사용하는 것 보다는 PP 형태와 섞어서 사용하되 RT 형태 임펠러를 하단에 위치시키는 것이 더 긍정적인 영향을 줄 수 있다. 즉 축 방향 유동을 일으키는 PP 형태 임펠러가 액면으로 유입되는 반응물을 교반기 하부 영역으로 빠르게 이동시킨 후, 이를 강력한 회전력을 가진 RT 형태 임펠러가 반경 방향

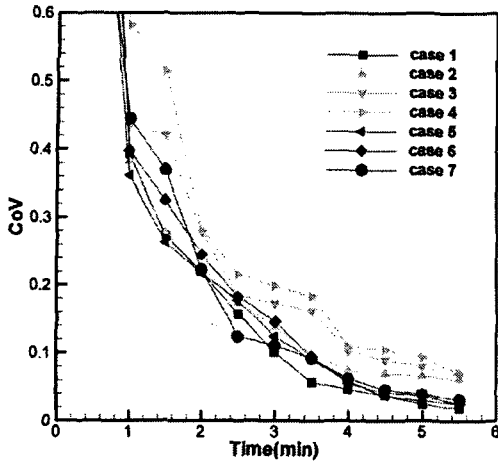


Fig. 4 CoV variation of the second reactant(multi-phases)

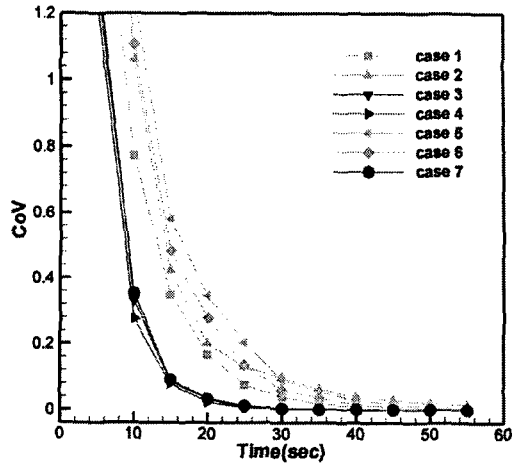


Fig. 6 CoV variation of the second reactant(multi-species)

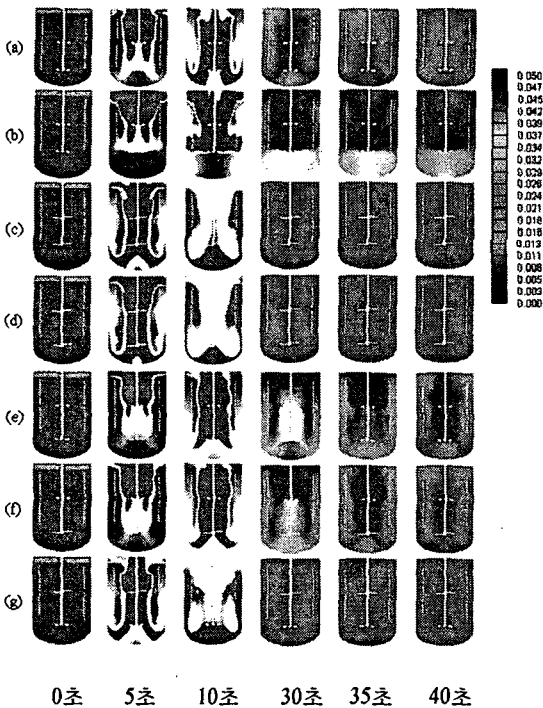


Fig. 5 Volume fraction of the second reactant (multi-species)
 (a) case 1 (b) case 2 (c) case 3 (d) case 4
 (e) case 5 (f) case 6 (g) case 7

으로 고르게 뿌려주는 것이 잘 섞이지 않는 다상물질의 혼합에 효과적이다.

3.2.2 다종물질(multi-species)

Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 다종물질의 경우에는 다상 물질

의 경우와 서로 상반된 결과를 보여 주고 있다. 즉 PP형태 임펠러가 RT 형태 임펠러보다 다종물질을 섞는데 더욱 효과적인데, 이는 다종물질 자체가 서로 잘 섞이는 성질을 가지고 있어서 교반기 내에 정체 영역이 형성되지 않도록 전체적으로 원활한 축 방향 유동을 형성시켜 주는 것으로도 혼합에 유리한 조건이 만들어지기 때문이다. 또한 PP 형태 임펠러와 RT 형태 임펠러를 동시에 사용하는 경우에는 RT 형태 임펠러를 하단에 위치시키는 것이 혼합에 유리하며, PP 형태 임펠러만을 2단으로 사용하는 경우와 비슷한 혼합 성능을 나타낸다.

3.3 임펠러 형태 및 위치가 제열에 미치는 영향

교반기 내에서 발생하는 반응열은 임펠러의 회전 운동을 통해 형성된 유동장의 대류열전달에 의해 냉각 코일과 냉각 재킷을 통해 외부로 제거된다. 개조후 교반기에서 반응 온도 제어에 문제가 발생하지 않기 위해서는 반응물 단위 체적당 제열 속도가 개조전과 비교해서 최소한 동일하거나 그 이상이어야 한다. Table. 2에 정리된 제열 속도에서 보는 것처럼 PP 형태 임펠러만을 2단으로 설치한 경우나 상단에 하단에 각각 PP 형태 임펠러와 RT 형태 임펠러를 설치한 경우가 제열에 아무런 문제가 없게 된다. 결국 교반기 내에서 유동 순환이 잘 형성될수록 대류열전달에 의한 제열도 잘 됨을 알 수 있다.

Table. 2 The rate of heat removal per unit volume of fluid

	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7
cooling coil(①)	2009	2101	2512	2709	1514	1750	2306
cooling jacket(②)	2382	1604	3005	3172	2143	2433	2829
total(①+②)	4391	3705	5517	5881	3665	4184	5134

Table. 3 The efficiency of the recommended stirred tanks

		case 1	case 4	case 7	unit
power		12946	13425	16569	[kW]
CoV	multi-phases (330sec)	0.019	0.071	0.032	-
	multi-species (55sec)	0.002	4e-05	2e-04	-
heat removal	h	1653	2383	2080	[W/m ² K]
		4391	5881	5134	[W/m ³ K]
	hA/V	100	134	117	%

참고문헌

[1] Marko Zlokarnik, 2001, *Stirring*, Wiley-VCH, p.1-74.
 [2] Marko Zlokarnik, 2002, *Scale-up in Chemical Engineering*, Wiley-VCH, p.1-206.
 [3] Edward, L.P. et al., 2003, *Handbook of Industrial Mixing*, Wiley-Interscience, p.345-389.

4. 결 론

본 논문에서는 임펠러를 사용한 교반기에서 다상 물질과 다중 물질을 섞을 때 임펠러의 형태와 설치 위치가 혼합과 제열에 미치는 영향을 CoV와 단위 체적당의 제열 속도라는 정량적 변수를 도입하여 살펴보았다. 다상 물질의 경우에는 대체로 RT 형태 임펠러가 PP 형태 임펠러보다 더 우수한 혼합 효율성을 보였으며, 다중 물질의 경우에는 그 반대의 결과를 나타내었다. 교반 환경 변화에 따른 교반기 호환성을 생각한다면 Table. 3에서 보는 것처럼 상단과 하단에 각각 PP 형태 임펠러와 RT 형태 임펠러를 같이 사용하는 경우가 다중 물질과 다상 물질 모두에 대해 비교적 우수한 혼합 효율성을 나타내며 제열에도 문제가 없다.