

Oscillatory flow reactor

고부가가치의 specialty chemical 생산은 주로 소규모이기 때문에 연속공정보다는 회분식 반응기를 사용하는 것이 일반적이다. 회분식 반응기는 널리 사용되고 있기는 하지만 성능면에서 많은 제한이 있다. 예를 들면, scale-up 하였을 경우 혼합 효율과 발생하는 열을 제어하는 능력이 떨어짐으로 제품의 품질에 영향을 준다. 또한 회분식 반응기 한 cycle은 반응물을 반응기내에 채우고 가열하고 반응 후 다음 반응을 위해 비우고 깨끗이 닦아 놓아야 하는 일련의 작업이 뒤따라야 한다.

관형반응기 (tubular reactor)의 단점은 혼합이 유속에 의하여 결정된다는 것이다. 효율적인 혼합을 위해서는 난류가 필요하며 이를 위하여 높은 Reynolds number 얻기 위해 빠른 유속을 유지 하여야 한다. 그러나 반응의 종류에 따라서 오랜 체류시간을 요구하는 반응에서는 혼합을 위해 유속을 빠르게 유지해야 하므로 반응기 부피 또는 길이를 길게 해야만 한다. 그러므로 이 한계 때문에 관형반응기를 사용할 수 없게 된다.

Oscillatory flow reactor는 위의 단점들을 보강한 반응기로서 그 구조는 그림 1과 같다.

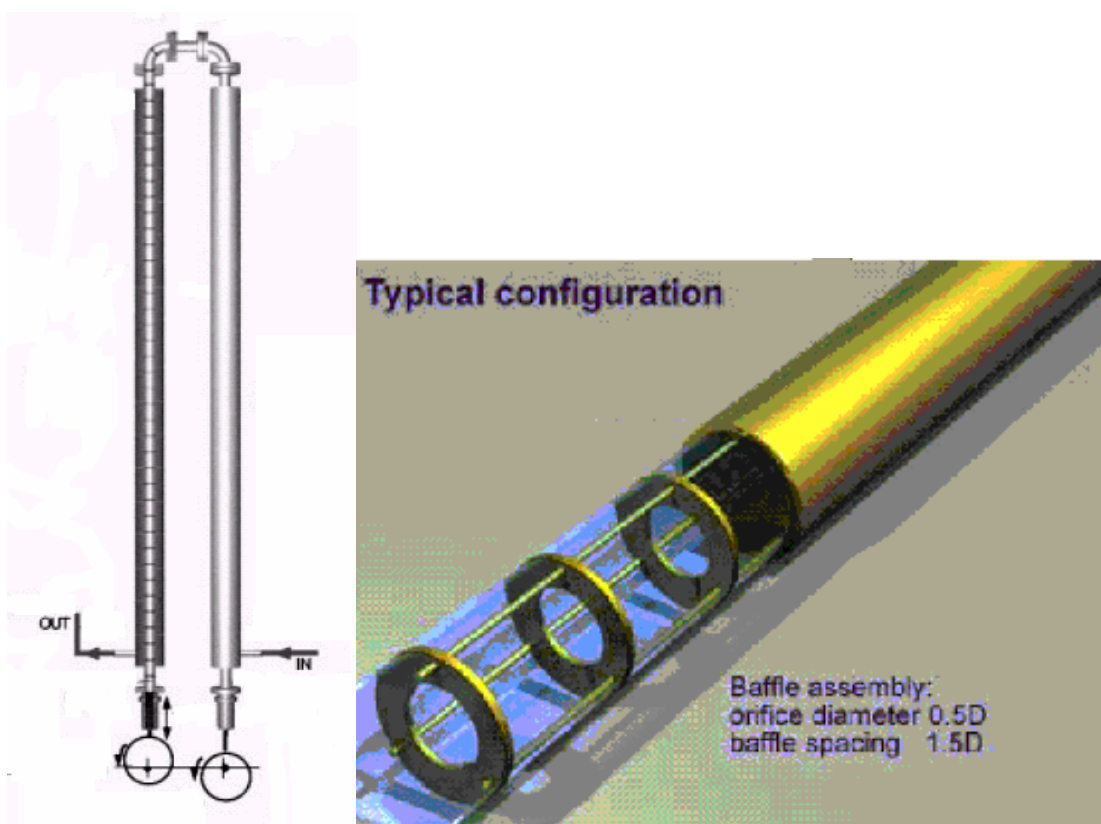


그림1. Oscillatory flow reactor

Oscillatory flow reactor는 Oscillator를 이용하여 낮은 유속에서도 긴 체류시간과 완전한 혼합을 구현할 수 있다. 그림 2에서 살펴 볼 수 있듯이 baffle에 의하여 oscillating flow 가 축 방향과 radial방향으로 eddy를 형성시킴으로써 완전한 혼합을 유도한다.

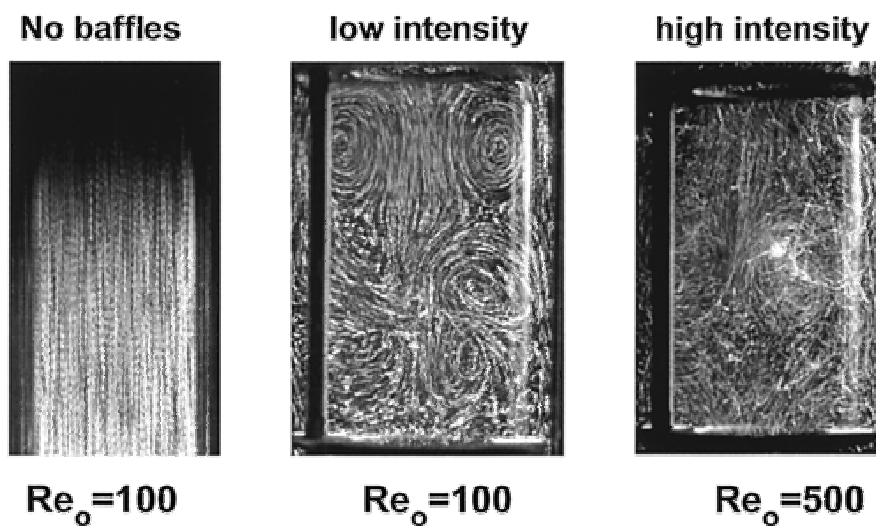
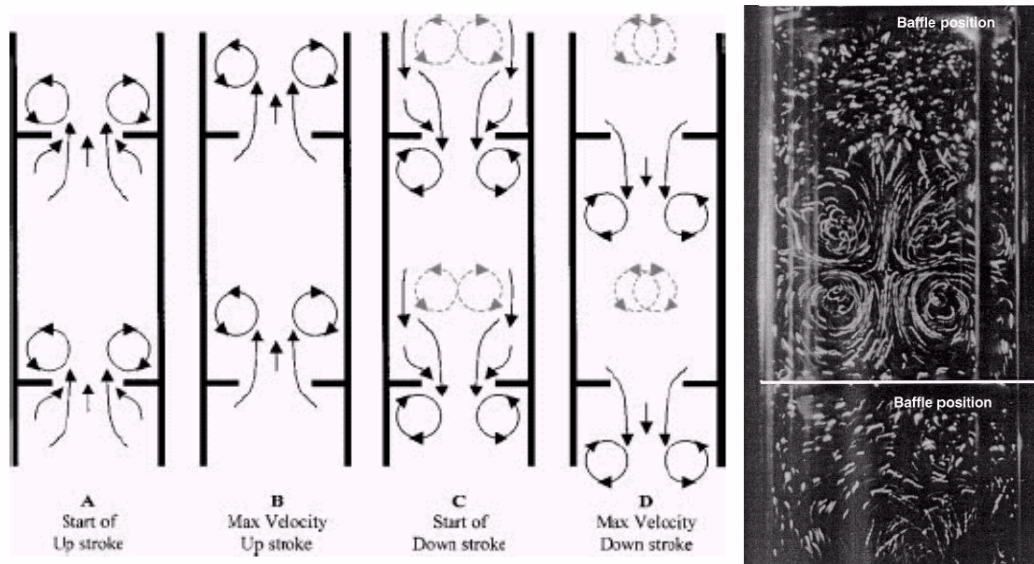


그림2. Flow pattern

운전 조건에 따라 Axial dispersion coefficients는 $0.11 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 이며 Peclet number가 70 에서 2.5 로 넓은 범위로 걸쳐있어 유체의 흐름을 PFR

형태로 만들거나 CSTR 과 유사하게 만들 수도 있다. 이러한 이점은 여러 가지 응용을 가능하게 하는데 그 중의 하나는 continuous emulsion polymerization 반응기로서 CSTR보다 좋은 장점이 있다.

Ester hydrolysis 반응을 예로 들면 50리터 반응기를 0.5미터의 Oscillatory flow reactor으로 대체한 결과 혼합효율의 증대로 체류시간이 회분식 반응기의 1/8로 줄일 수 있었다.

Photographic chemicals (James Robinson Ltd.) 생산을 예로 들면, 이 공정은 wetting 과 diazotisation이 첫 번째 3000리터 반응기에서 14시간 동안 이루어진 후 cyclization 공정이 13000리터 반응기에서 1시간동안 진행됨으로 하루에 1 batch 공정을 진행할 수 있다. 이 공정에 oscillatory flow reactor를 사용한 경우 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

표1. 공정 비교

	The existing batch stirred tank production	The converted continuous OBR manufacturing
Reactor volume (litre)	16000	270
Factory space (m ³)	1200	60
Wetting stage (hr)	12	0.3
Diazotisation (hr)	2	0.3
Cyclisation stage (hr)	0.3	0.3
Yield (%)	83	83
Product purity (%)	99.5	99.5
Output/kg@100%/day	180	150

바이오디젤은 식용기름 등 여러 가지 natural oil을 이용하여 transesterification 반응을 진행시켜 제조한다. 일반적으로 이 반응은 회분식 반응으로 많은 시간이 필요하나 이를 연속반응 특히 pilot scale의 oscillatory flow reactor를 사용한 연속반응에 적용하여 표 2와 같은 결과를 얻었다. DIN 51606은 디젤의 독일 표준 값으로 Cetane 값이 표준에 약간 못 미치고 glycerol값이 높게 나왔으나 현재 영국의 fiscal standard 에는 적합한 수치이다.

표2. 바이오 디젤 샘플 분석 (J Chem Technol Biotechnol 78:338–341)

<i>Temp</i> (°C)	<i>Residence time</i> (min)	<i>Cetane number</i>	<i>Triglyceride</i> (%)	<i>Diglyceride</i> (%)	<i>Monoglyceride</i> (%)	<i>Glycerol</i> (%)
50	10	42.0	0.34	0.15	0.42	0.16
50	15	43.4	0.00	0.02	0.37	0.25
50	30	45.3	0.00	0.01	0.40	0.46
60	10	43.3	0.00	0.02	0.37	0.28
60	15	44.6	0.00	0.02	0.39	0.37
DIN	51606	49.0	0.40	0.40	0.80	0.02

Oscillatory flow reactor는 생물 반응기로도 사용된다. 대장균을 이용한 recombinant biopharmaceuticals 생산에는 단백질의 refolding 반응공정이 중요한 단위 공정이다. 전체 수율은 이 공정에 의하여 결정된다. 이 반응의 최적 수율은 물론 denaturant 의 종류와 농도, 단백질의 농도 등이 최적인 조건에서 얻을 수 있다. 그러나 이외에도 denaturant 의 종류에 따라서 혼합의 형태가 수율에 영향을 준다. 즉 oscillatory flow reactor를 이용할 경우 회분식 반응기와 비교 하였을 때 더 좋은 결과를 얻었으며 이는 oscillatory flow reactor의 균일한 혼합효과가 보여 주는 결과이다.

아크릴아마이드나 MMA (methylmethacrylate) 폴리머 합성에도 사용되고 있으며 입자의 크기를 oscillation 속도로 제어할 수 있으며 입자 분포도 회분식 반응기 보다 우수하다.

기액 반응의 경우에도 많은 연구가 이루어졌으며 일반 교반기보다 그 성능이 우수한 것으로 나타났다.

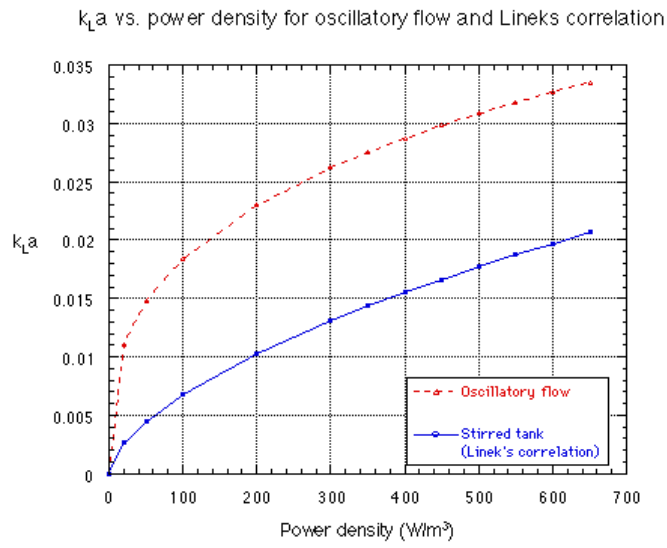


그림3. Gas liquid mixing

Continuous Oscillatory flow reactor 는 multiphase이고 multi input인 반응에 아주 적합하며 그 적용을 살펴보면 상분리가 있는 합성, 결정, 분말, 염료, 페인트, pigments, 의약 중간체 등의 반응이 있다.