creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

전산유체역학을 이용한 교반탱크 내 효율적인 가스 분산을 위한 모델 제안 및 검증

2018 년 월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

정 성 윤

전산유체역학을 이용한 교반탱크 내 효율적인 가스 분산을 위한 모델 제안 및 검증

지도 교수 이 종 민

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
년 월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
정 성 윤(성명)

정성윤의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
년 월

위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문초록

교반탱크(Stirred Tank)는 다양한 형태의 회전하는 임펠러로부터 단상(single-phase) 또는 다상(multiphase)의 유체를 혼합하는데 사용되고 있다. 이러한 교반탱크는 식품, 의약, 화학업종 등 다양한 분야에서 재료의 가공 및 화학적 반응을 위하여 사용되고 있으며, 재료의 물성과 상(phase)에 따라 여러 가지 형태의 적합한 임펠러가 사용된다. 일반적인 액상형태의 재료를 혼합하는 교반탱크의 성능은 임펠러 블레이드의 크기와 형태 및 피칭된 각도에 따라 변화하며, 회전하는 임펠러로부터 교반기 내 다양한 형태의 유동을 만들게 된다. 그리고 이러한 유동의 성능은 다양한 방법으로 평가 할 수 있다.

한편 탱크 내 두 가지 상 (액체_연속상, 기체_분산상)이 존재하고 서로 상호작용을 일으킨다고 가정 할 때 교반의 목적은 교반탱크 내 존재하는 액체에 가스의 분산을 최대화 하는 것으로 생각 할 수 있다. 가스 분배기 (Sparger)로부터 교반탱크 내부로 주입된 가스는 회전하는 임펠러의 의해 확산 및 분산되며 탱크 내 액상의 원료와 접촉하게 된다. 주입된 가스는 임펠러의 의해 내부의 유동을 띄며 존재하기도 하지만, 부력이 작용하여 탱크 상부의 배기를 통해 배출되게 된다. 따라서 교반탱크 밖으로 배출되지 않고 교반탱크 내부에 머물고 있는 가스의 총량(체적분률의 총합)과, 분산의 형태를 확인함으로써 다상의 유체를 혼합하는 교반탱크의 성능을 평가 할 수 있다.

본 연구에서는 전산유체역학 (CFD)을 사용하여 실제 현업에서 사용중인 교반탱크를 모델링 하고, 회전하는 임펠러의 난류에 의한 가스의 분산상을 확인하였다. 그리고 가스 분산을 최적화하기 위해 보다 효율적인 교반탱크를 설계하고자, 다양한 임펠러와 가스분배기를 모델링하여 해석함으로써, 적합한 모델을 찾을 수 있었다. Disk Turbine, Pitched Blade, Rushton Turbine, 총 3가지 형태의 임펠러와, 파이프 및 링 형태의 가스분배기를 모델링하여 해석을 진행하였으며, Pitched Blade와 링형태의 가스분배기를 구성한 교반탱크에서 가장 가스의 분산

성능이 뛰어난 것을 확인 할 수 있었다. 임펠러의 끝단 아래에 파이프 형태의 가스분배기와 달리 링 형태의 가스분배기는 임펠러의 수직 하부에 위치하여 액체의 유동장을 따라 탱크 전체로 확산하여 가스가 분산되는 것을 확인 할 수 있었다.

전산유체역학 해석기법으로는 액체와 같은 연속상에 기체 분산상이 존재 할 때 가스의 분산형태를 해석하는 Eulerian 모델을 사용하였으며, Standard k-ε 모델을 사용하여 난류해석을 하였다. 다상난류유동 해석 모델로는 Mixture 모델을 사용하였으며, MRF (Multiple Reference Frame) 모델을 사용하여 회전하는 임펠러의 해석을 진행하였다.

주요어 : 전산유체역학, 다상유동, sparger, 가스 분산, 교반탱크
학　번 : 2017-24308

1

목 차

제 1 장 서 론 1
제 1 절 연구 배경 1
제 2 절 연구 내용 4
1. 연구 목적 4
2. 연구 필요성 7
3. 연구 결과 9
4. 연구 동향 11
제 2 장 전산 해석 13
제 1 절 실험 모델 13
제 2 절 격자 생성 20
제 3 절 해석 기법 및 이론적 배경 23
1. 다상유동 해석 25
2. 난류유동 해석 29
제 3 장 해석 결과 32
제 1 절 임펠러 난류유동 해석 32
1. Disk Turbine 모델의 난류유동 해석 32
2. Pitched Blade 모델의 난류유동 해석 34
3. Rushton Turbine 모델의 난류유동 해석 35
제 2 절 다상유동 해석 39
1. Disk Turbine 모델의 다상유동 해석 39
2. Pitched Blade 모델의 다상유동 해석 45
3. Rushton Turbine 모델의 다상유동 해석 53
제 4 장 결론 59
제 1 절 요약 59
참 고 문 헌 61
Abstract 65

표 목차

[표 2.1] Tank 및 가스분배기 사양. 15
[표 2.2] 임펠러 모델 별 사양. 15
[표 2.3] Disk Turbine 모델의 격자 품질 Data. 21
[표 2.4] Pitched Blade 모델의 격자 품질 Data. 21
[표 2.5] Rushton Turbine 모델의 격자 품질 Data. 22
[표 2.6] 다상유동 CFD 해석 기법.....24
[표 3.1] 임펠러 별 최고 유속 및 운동에너지.....37
[표 3.2] 다상교반탱크 모델 별 Gas Hold Rate. 58

그림 목차

[그림 2.1] 교반탱크 형상.....13
[그림 2.2] 임펠러 모델 별 형상. 14
[그림 2.3] Disk Turbine의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상. 17
[그림 2.4] Pitched Blade의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상. 18
[그림 2.5] Rushton Turbine의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상. 19
[그림 2.6] 교반탱크 및 임펠러 모델 별 격자 형상..... 20
[그림 3.1] Rushton Turbine의 유동 속도장 분포..... 33
[그림 3.2] Rushton Turbine의 유동 Streamline..... 33
[그림 3.3] Pitched Blade의 유동 속도장 분포..... 34
[그림 3.4] Pitched Blade의 유동 Streamline..... 34
[그림 3.5] Rushton Turbine의 유동 속도장 분포. ... .36
[그림 3.6] Rushton Turbine의 유동 Streamline.....36
[그림 3.7] 임펠러 모델 별 운동에너지 분포. 37
[그림 3.8] Disk Turbine + Pipe sparger 1 유동해석결과.....40
[그림 3.9] Disk Turbine + Pipe sparger 2 유동해석결과. 41
[그림 3.10] Disk Turbine + Ring Sparger 유동해석결과. 42
[그림 3.11] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합. 43
[그림 3.12] Pitched Blade + Pipe Sparger 1 유동해석결과.....46
[그림 3.13] Pitched Blade + Pipe Sparger 2 유동해석결과.....47
[그림 3.14] Pitched Blade + Ring Sparger 유동해석결과.....48

[그림 3.15] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합. 49
[그림 3.16] Disk Turbine 모델의 0~5%의 가스체적분률 해석결과. 51
[그림 3.17] Pitched Blade 모델의 0~5%의 가스체적분률 해석결과. 52
[그림 3.18] Rushton Turbine + Pipe Sparger 1 유동해석결과. 53
[그림 3.19] Rushton Turbine + Pipe Sparger 2 유동해석결과. 54
[그림 3.20] Rushton Turbine + Ring Sparger 유동해석결과. ...55
[그림 3.21] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합. 56
[그림 3.22] 다상교반탱크 모델 별 내부 공기의 부피총합. 58

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

우리가 흔히 사용하는 모바일 폰, 노트북, 대화면 TV의 디스플레이 장치로 사용되는 TFT-LCD와 같은 디스플레이 패널의 제조공정은 크게 Color Filter, TFT(Thin film Transistor), Cell 공정으로 이루어져 있다. 이중 Color Filter와 TFT 공정은 고분자 화합물 또는 금속재료를 원하는 패턴의 얇은 박막의 형태로 기판(Substrate)에 적층하고자 Photolithography 공정을 진행한다. Photolithography 공정은 간략히 기판 세정 → PR[①]코팅 → Post Bake → 노광 → 현상 → 패턴형성의 순서로 이루어 지며, 이 중 PR은 빛의 UV파장 영역에 화학적으로 반응하는 재료로써, UV를 조사하는 노광 장치에 의해 선택적으로 빛을 받게 되며, 빛을 받지 않은 부분과 화학적 성질의 차이에 의해 용해되거나 용해되지 않음으로써 원하는 패턴을 형성하게 된다.

오늘날 디스플레이 장치는 실제의 사물보다 더 뚜렷하고, 실감나는 영상을 소비자에게 전달하고자 고휘도, 고색재현, 고해상도의 제품을 만들기 위해 끊임없이 기술 발전을 거듭하고 있다. 이러한 기술발전은 디스플레이 패널을 보다 효율적으로 생산할 수 있는 신공정의 개발 그리고 코팅, 노광 장치와 같은 핵심 기계설비와 더불어 다양한 PR 재료들의 기술발달로 인해 실현이 가능하게 되었다.

이러한 PR재료는 TFT와 Color Filter 공정 모두에서 사용되지만 그 쓰임과 역할은 조금씩 다르다. TFT 공정에서 사용되는 PR재료는 금속 박막의 패턴을 형성하기 위해 사용되며, 금속 재료 위에 코팅 된 후 금속박막 형성에 사용된 후 현상되어 모두 제거되지만, Color Filter

---

① Photoresist : 빛의 UV영역에 반응하여 화학적 변화를 일으키는 고분자 화합물로써, 반도체 Wafer제조, Display Panel과 같은 얇은 기판 위에 여러 가지 재료를 적층하기 위해 진행되는 Photolithography 공정에 사용되는 핵심적인 재료이다. 빛이 조사된 영역의 패턴이 형성되는 Positive Type의 PR과 빛을 받지 않은 영역의 패턴이 형성되는 Negative Type의 PR로 구분한다.

공정의 PR재료는 코팅 된 후 빛의 삼원색 Red, Green, Blue의 형태로 기판 위에 존재하며 백라이트의 백색광원을 다양한 색으로 변환하여 재현하는 역할을 담당하고 있다. Color PR은 디스플레이 장치 중 사용자에게 여러 가지 영상을 재생하기 위하여 다양한 색상으로 직접적으로 표현되어 사람의 시각으로 전달되기에, 재료에 불량이 발생할 경우 이는 곧 제품의 심각한 불량으로 연결된다. 뿐만 아니라 고휘도, 고색재현과 같은 품질특성을 개발하기 위해서는 Color PR 내부의 색을 표현하는 안료입자들을 더욱 미립화하여야 한다. 그리고 기존의 무기 안료입자들과 더불어 유기 염료 입자들을 섞어 제품을 생산하기에 더욱 품질관리 항목이 다양해지며, 그 관리 기준이 엄격해지고 있다. 특히 기존의 안료를 기반으로하여 색을 나타내는 PR에 비해 안료와 염료를 혼합하는 Hybrid type의 PR 경우 염료가 수분에 매우 취약한 특성을 가지므로 PR에 포함되어 있는 수분을 관리하는 것이 무엇보다 중요하게 되었다.

이와 같이 PR에 포함되어 있는 수분을 제거하여 제품의 잠재적 불량요인을 제거하고 품질의 수준을 향상시키기 위하여 원부자재의 관리강화, 공정개선 등의 다양한 노력이 진행되고 있다. 화학 공정에서는 수분을 제거하기 위하여 일반적으로 증류, 정제, Filtration과 같은 방법들을 진행하지만 이와 같은 공정들은 열을 가해야 함으로 PR과 같은 고분자화합물의 품질 변동을 유발하고, PR의 용매로 사용되는 인화성 유기용제의 폭발을 유발할 가능성이 있으므로 적합한 방법으로 고려되지 않는다. 따라서 이러한 방법의 대안으로 교반탱크에 100~500㎛의 고압 질소 가스를 불어넣어 수분을 제거하는 Sparging[②] 공정을 진행하고 있으며, 제품의 품질에 영향을 끼치지 않고 공정 프로세스가 안전하며, 비용을 최소할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 교반탱크의 크기가 증가함에 따라 수분제거 효과가 감소되는

[②] Sparging : 일반적으로 Metallurgy 산업에서 용융된 금속에 질소, 아르곤과 같은 불활성 기체를 불어넣어 금속 내부에 존재하는 기체를 제거하는 공정을 말한다. 화학, 바이오, 제약 산업에서도 Solution 혼합용액에서 끓는점이 낮은 물질을 제거하는데 사용된다.

문제점을 가지고 있으며, 이러한 문제점을 개선하기 위하여 다양한 공정 및 설비변경 테스트를 필요로 한다. 그러나 이 또한 많은 시간과 비용의 증가를 가져옴으로 보다 자원을 절약 할 수 있는 방안을 모색하여야 한다. 뿐만 아니라 이러한 설비 및 공정변경으로 수분제거의 효과를 높이기 위해서는 변경에 따른 교반탱크 내부에서의 가스의 분산이 어떠한 유동을 보이는지 확인이 가능하여야 하고, 이러한 유동에 따른 결과를 예측할 수 있어야 하나, 실제 양산 교반탱크에서 이러한 유동 현상을 관찰하는 것은 불가능하므로 공정 및 설비 변경으로 얻을 수 있는 효과를 확신 할 수 없게 된다. 하지만 최근에는 컴퓨팅 기술의 발달로 인하여 전산유체역학을 통한 실험 모델링과 수치해석을 통하여 결과를 분석할 수 있게 되어 이러한 어려움의 해결이 가능해졌으며 수치해석의 결과를 사전에 공정, 설비에 반영함으로 보다 신뢰 할 수 있는 변경이 가능하게 되었다.

이번 연구에서는 Sparging 공정 진행 시 양산 교반탱크에서 겪고 있는 수분제거 감소현상에 대한 문제를 개선하고자 전산유체역학을 사용하여 현상과 원인을 파악하였다. 수분제거효과를 높이기 위하여 화학산업에서 활용되는 다양한 임펠러에 대한 모델링을 수행하고 몇 가지 가스 분배기를 조합함으로써 가스의 분산을 최대화 하는 교반탱크를 설계하고자 한다.

제 2 절 연구 내용

1. 연구 목적

PR을 제조하기 위한 공정을 진행함에 있어 다양한 경로로 제품에 수분이 유입된다. 원부자재 자체에 0.05~0.1% 정도의 수분이 포함되어 있으며, 공정을 진행하는 과정 중 제조실의 외기로부터 수분이 유입되기도 한다. 이와 같은 수분의 유입을 차단하기 위하여 원부자재의 품질수준을 강화하지만, 재료의 운송, 보관, 생산과정 중 미량의 수분이 유입되는 것을 완전히 차단하는 것은 불가능하다. 뿐만 아니라 다양한 유해화학물질 및 유기용제와 같은 폭발위험물질을 취급하는 공장은 산업안전관리법에 의하여 위험물제조공장으로 지정되어 설비의 스파크 발생으로 인한 유증기, 또는 분진의 폭발가능성을 제거하기 위하여 공정 내 모든 설비를 방폭설비로 갖추어야 한다. 따라서 제조공정을 약 50%의 습도로 유지하여야 하며 이러한 이유로 제품 제조과정 중 필연적으로 수분이 유입되게 된다.

PR의 제조과정 중 제품에 약 0.1~0.2%의 수분이 유입되게 되며 이를 제거하기 위하여 Sparging 공정을 진행한다. PR이 제조 된 교반탱크 내부에 5~6kgf/㎠ 질소가스를 불어넣고 PR의 주용제로 쓰이는 PGMEA(Propylene Glycol monomethyl ether acetate)와 수분의 끓는점 차이를 이용하여 끓는점이 낮은 수분의 증발을 먼저 유도하는 공정이다. 공정에는 0.1~3㎥까지 다양한 사이즈의 교반탱크가 존재하며, 용량이 작은 파일럿 교반탱크에서는 주로 테스트용 샘플이나, 신규 공정의 테스트를 진행한다.

테스트 단계의 샘플의 수분제거를 위하여 Sparging 공정을 파일럿 탱크에서 진행하게 되면 수분의 제거가 시간이 지남에 따라 1차함수의 기울기로 Linear하게 감소하다 Saturation된다. 하지만 제품의 양산을 위하여 Sparging 공정을 2, 3㎥ 탱크에서 진행하게 되면 수분의 감소 효과가 급격히 줄어들어 Linear한 감소를 관찰 할 수 없게 된다. 본

연구에서는 이러한 교반탱크 Scale-up 시 일어나는 수분제거 감소 현상에 대한 원인을 찾고자 전산유체역학을 사용하여 실제 사용하는 양산 교반탱크를 모델링하고 유동해석을 진행하여 현상과 문제점을 파악하였다.

해석을 진행함에 있어 질소의 공급유량은 변수에서 제외하였다. 수분제거 효과를 높이기 위해서 반응물의 양과 교반탱크의 크기가 커지면 공급되는 유량도 그에 비례하여 증가시켜야 한다. 하지만 수분제거 메커니즘이 교반탱크 내부로 공급된 질소가스가 탱크 내 잔류하고 있는 수분입자와의 접촉하게 되며 이를 통하여 수분이 질소입자에 흡착 및 운반되어 외부로 배출되는 것이라고 가정 할 때, 수분제거 효과를 극대화 하기 위해서는 질소 가스 유량의 증대와 더불어 가스의 분산을 최대화 할 수 있는 임펠러와 가스 분배기의 모델을 찾는 것이 중요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 산업에서 일반적으로 다양하게 활용되고 있는 Pitched Blade, Disk Turbine, Rushton Turbine와 같은 임펠러를 전산유체역학을 사용하여 모델링하고, 여기에 Pipe, Ring type의 가스 분배기 형태에 따라 임펠러의 난류에 의한 가스의 분산상을 확인하고 가스의 분배를 최대화하는 모델을 찾는 것을 목적으로 하였다.

실제 임펠러와 블레이드 형태에 대하여 전산유체역학을 활용하여 수치해석을 통한 연구는 다양하게 진행되었다. 최영욱, 최종락은 교반기 내 Flat Turbine의 블레이드 피칭각에 따른 유동장과 토출유동의 속도 프로파일을 비교 분석하였다[1], 그리고 최영욱, 허남건은 임펠러 블레이드 길이와 임펠러 반지름의 비에 따라 교반기의 성능을 평가하였으며[2], 김상원, 강현수는 Flat Turbine과 Curved Blade Turbine 구조의 임펠러에 대하여 교반성능을 전산유체역학을 활용하여 해석하였다[3]. 이승엽, 전현태는 Pitched Blade와 Rushton Blade 임펠러에 대해서 임펠러의 회전속도가 증가함에 따라 교반기 내부 유동의 속도장에 대해서 CFX를 통하여 수치해석을 진행하였다[4].

다상 교반탱크의 교반 목적은 분배되는 가스를 탱크전체로 분산을 최대화 하여, 탱크내부에서 균일한 가스의 분포를 갖는 것이기 때문에 탱크 전체에 잔류하고 있는 가스의 총량(체적분율의 총합)을 계산함으로써 교반탱크의 성능을 정량적으로 평가하였다[5].

위와 같은 성능평가 방법을 통하여 가스의 분산을 최대화 하는 다상 교반탱크 모델을 선정하고 현업에 적용함으로써, 수분으로부터 발생하는 불량 요인을 제거하고 고객의 엄격한 품질관리 기준에 부합하는 제품을 생산하는 것이 본 연구의 목적이라고 할 수 있겠다.

2. 연구 필요성

PR과 같은 화학물질을 제조하기 위한 다양한 동력설비들이 존재하며, 이 중 핵심설비는 반응의 역할을 수행하는 교반탱크이다. 반응기는 교반기능에 추가하여 물질의 합성, 중합에 필요한 열원을 공급하며, 이를 제어 할 수 있는 설비를 말한다. 산업에는 회분식, 연속형, 관형, 촉매형 등 매우 다양한 종류의 반응기가 존재하며, 이 중 회분식, 연속형 반응기의 경우 생산하고자 하는 제품의 물성을 균일하게 만들기 위하여, 1차적으로 반응물을 잘 섞어 상태를 균일하게 하는 것이 중요하다.

PR과 같은 액상의 재료를 생산하기 위해서는 회분식의 반응기가 사용된다. 투입되는 원재료는 일반적으로 고상, 액상의 형태를 띄며 비중, 점도, 분말 입자의 상태 등 다양한 물성의 재료가 존재한다. 그리고 반응을 돕거나 중단하기 위하여 질소, 산소와 같은 기체가 반응기내로 투입되기도 한다. 따라서 교반의 성능을 높이기 위해서는 투입되는 재료의 상태와 물성에 따라 그에 적합한 임펠러를 선택한 후 교반을 진행하여야 균일한 물성의 제품을 생산할 수 있다

또한 생산현장에는 다양한 크기의 반응기가 존재하며, 제품의 생산단계와 목적에 따라 사용하는 반응기의 크기가 달라진다. 제품의 샘플을 생산하는 파일럿 단계의 수십 리터 크기의 반응기부터 수십 톤의 양산 반응기가 존재하기도 한다. 테스트 단계의 샘플이 양산을 진행함에 따라 반응을 Scale-up 하여야 하며, 반응물의 양과 반응기의 크기를 증가시킨다. 파일럿 반응기와 양산반응기의 기하학적 형태나 제품을 생산하는 공정조건이 서로 상이하기 때문에 이에 따라 품질의 변동이 수반되며. 이러한 품질의 변동을 최소화 하기 위하여 반응기의 기하학적 형태의 변동이나 공정조건의 변경으로 일어날 품질 변동을 예측하고 이를 개선하는 것은 중요하다고 할 수 있다. 하지만 실제 공정에서는 이러한 공정이나 재료의 변경으로 일어날 수 있는 품질 변동을 최소화 하기 위하여 설비 또는 공정을 변경 할 때 시행착오를 통하여 얻은

경험적 방법 또는 직관에 의존하는 경우가 많다. 따라서 이러한 경험적 방법에 의존한 시행 착오와 그에 따른 비용 손실을 최소화 하기 위하여 이를 사전에 검증할 수 있는 능력을 갖추는 것이 필요하다.

최근 컴퓨팅 기술의 비약적인 발달에 따라 전산유체역학을 사용하여 공정을 모델링하고 이를 해석하여, 발생 가능한 문제를 사전에 예측하여 개선 할 수 있게 되었다. 재료, 설비, 공정의 변동으로 발생 가능한 교반성능의 저하, 이로 인한 품질변동 요인을 예측하는 것이 가능해졌으며, 이를 실제 공정에 적용하여 많은 시간과 비용을 절감하고자 한다. 뿐만 아니라 PR과 같은 재료를 합성함에 있어 공정의 시작 단계라 할 수 있는 교반탱크의 물리적 교반능력에 대한 연구를 수행함으로써, 다양한 재료와 상에 대한 교반탱크의 교반능력을 평가하고자 하며, 이를 통하여 향후 사용되는 원재료의 물성과 상(phase)의 종류에 따라 적합한 교반탱크를 선정 할 수 있는 능력을 갖추고자 한다.

3. 연구 결과

교반탱크 내부 액체의 연속상에 기체의 분산상이 존재하는 다상 유동의 경우 기체의 효율적인 분산, 즉 교반탱크 내부에 기체의 확산 및 분산을 최대화 하기 위하여, 다양한 임펠러와 가스 분배기 모델에 대한 다상유동해석을 진행하고, 탱크내부에서 외부로 배출되지 않고 남아있는 기체의 총량(체적분율의 총합)을 계산함으로써 다상 교반탱크의 교반성능을 평가하였다.

전산유체역학 프로그램은 Ansys Fluent 18.2를 사용하였으며 실제 반응에 사용되는 액상 재료는 물로 가정하고, 질소 가스는 공기로 대체하여 해석을 진행하였다. 해석의 순서는 1차로 임펠러 회전에 의한 난류의 유동에 대하여 수치해석을 진행하였으며 각 임펠러 별 반응기 내부의 액체 유동에 대한 속도장과 최대유속을 확인하였으며, 2차로 여기에 Pipe, Ring 형태의 가스 분배기에서 가스를 공급할 때 임펠러의 난류에 의하여 기체가 어떠한 유동을 보이는지 확인하였다. 비정상 상태에서 10초동안 해석을 진행하였으며, 교반탱크 내부의 기체의 총량의 변동을 모니터링하였다.

실험 모델은 공장에서 가동중인 2톤의 교반탱크에 Pitched Blade, Disk Turbine, Rushton Turbine의 임펠러와, Pipe 1개, Pipe 2개, Ring type을 적용하여 9개 형태의 반응기를 모델링 하였다. 교반탱크 내부에 약 80%의 물이 존재하는 경우를 가정하여 해석을 진행하였으며, Ansys Workbench의 Automesh Program을 사용하여 격자를 구성하였다. 복잡한 형상을 지니고 있는 임펠러는 Tetra mesh를 사용하여 격자를 구성하였으며, 반응기는 Hexa mesh를 사용하여 mesh를 구성하였다. Mesh의 품질은 모든 모델에 대하여 orthogonality가 0.1이상으로 Accept 가능한 수준으로 진행하였다.

다상유동해석을 위하여 액체의 연속상에 기체의 분산상이 버블의 형태로 존재 할 때, 이를 해석하기 위하여 사용되는 Eulerian 모델을 적용하였으며, 난류해석을 위하여 비교적 복잡하지 않은 전단응력이

유체에 작용하고 이에 따라 낮은 변형률을 갖는 유동을 해석할 때 적합한 Standard K−ε 모델을 사용하였다, 다상난류유동 해석을 진행하기 위하여 Mixture 모델을 사용하였으며, 임펠러의 회전에 의한 유동은 MRF 모델을 사용하여 해석을 진행하였다.

다상유동해석을 진행하기 앞서 임펠러의 회전에 따른 난류운동에너와 물의 유동에 대한 속도장을 파악하였으며, Pitched Blade 형태의 임펠러에서 가장 높은 유속과 운동에너지를 보이는 것을 확인하였다. 다상유동해석 결과에서는 Pitched Blade 형태의 임펠러가 Tank 전체로 가스를 가장 효율적으로 분산하였으며, 가스 분배기에 따른 분산능력은 Pipe 형태보다 임펠러 하부에 설치된 Ring 형태의 가스 분배가 효율적으로 진행되었다. 결과에 대한 보다 상세한 기술은 제 2 장과 제 3 장에서 진행하였다.

4. 연구 동향

임펠러의 난류를 이용하여 가스(분산상)를 액체(연속상)에 분산하는 형태의 반응기는 산업에서 매우 다양한 형태로 활용되고 있다. 화학, 제약, 생명공학, 음식산업 등에 널리 사용되고 있으며, 기체-액체의 반응을 통하여 산화, 수소화, 발효를 일으킨다. 이러한 반응은 임펠러의 회전에 의한 난류유동 조건에서 일어나기 때문에 임펠러의 형태의 따른 난류유동의 특성을 분석하고 예측하는 것은 다양한 반응의 효율을 증가시키기 위하여 매우 중요하다고 할 수 있다.

반응기를 설계하고 Scale-up을 위해서는 실험을 진행하거나 과거의 설계 경험으로 얻은 정보를 활용한다. 하지만 이러한 방법은 기존의 사용하였던 몇 가지 형태의 반응기와 공정조건에만 한정되기 때문에 새로운 형태와 공정조건의 반응기를 설계 함에 있어 제약이 따른다. 기체, 액체 다상 교반탱크의 성능 즉 기체의 효율적인 분산과, 가스의 포집능력은 임펠러 난류에 의한 영향뿐만 아니라, 기체, 액체간의 물질 전달률, 기체의 버블 크기에도 영향을 받기 때문에 이러한 모든 것들이 종합적으로 고려되어 반응기가 설계되어야만 하며, 이러한 사항 등은 전산유체역학(CFD)를 통하여 보다 상세하게 유체의 유동을 분석하는데 사용이 가능하다.

CFD 모델링은 처음에 액체의 단상유동에 대한 2차원 해석 (Harvey and Geaves, 1982[6]; Placek et al., 1986[7]; Pericleous and Patel, 1987[8])에 주로 사용되었으며, 후에 삼차원에 대한 해석 (Ranade et al., 1989[9]; Ranade and Joshi, 1990[10]; Kresta and Wood, 1991[11])에 의해 진행되었다. 최근의 CFD의 임펠러와 같은 회전영역에 의한 유동해석기법은 주로 MRF (Multiple Reference Frame)과 SM (Sliding Mesh)이 주로 사용되고 있다.

난류유동을 해석하기 위한 다양한 해석기법들이 존재한다. 실제 자연현상에서 일어나는 난류유동은 매우 급변하며, 예측이 불가능하기 때문에, 어떤 특정 시점에서 난류유동의 형상을 정확히 아는 것은 큰

의미가 없다. 따라서 이러한 난류유동의 평균값을 계산하여 유동을 해석하는 Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS) 기법이 일반적으로 널리 사용(Ahlstedt and Lahtinen,1996[12]; Jaworski etal.,1997[13])된다. 다른 해석의 방법으로는 Large Eddy Simulation (LES), Direct Numerical Simulation (DNS)와 같은 해석기법이 좀더 정확하게 유동을 모사 할 수 있으나, 해석에 많은 컴퓨팅 자원을 필요로 하므로, 잘 사용되지 않는다.

다상유동의 모델링은 단상유동의 결과를 단순히 확장함으로써 진행할 수 없다. 이유는 연속상 내부에 존재하는 분산상의 움직임을 추적하고 모사할 수 있어야 하며, 이러한 유동해석을 위해서는 Largrangian-Eulerian 모델과, Eulerian-Eulerian 해석기법이 사용된다. Largrangian 기법은 연속상에 존재하는 분산상 입자를 하나씩 추적하는 해석기법이며, Eulerian 기법은 입자추적방법과 달리. 공간차분 영역 내에 존재하는 분산상의 체적분률 값을 구하여 분산상의 유동을 모사한다.

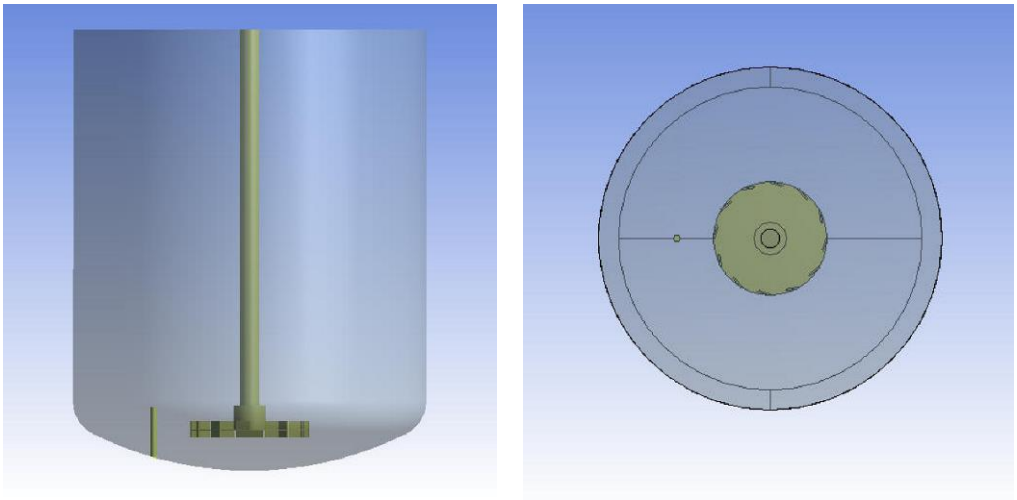
다상유동해석을 진행하기 위해서는 기체, 액체 상호간의 물질 전달 뿐만 아니라 상호작용하는 힘에 대한 해석이 필요하다. 이러한 힘은 Drag와 Non Drag Force로 구분 지을 수 있으며, Scargiali et al. (2007)[14]는 그의 연구에서 교반탱크에서 Drag Force가 교반 탱크 내부의 가스 Hold-up의 관계를 기술하였다. Bakker and vanden Akker (1994)[15]는 처음으로 기체 bubble의 크기에 따른 bubble 밀도 함수를 정의하고 그 해를 구함으로써 기체, 액체 간 상호 물질 전달 및 가스의 Hold-up를 결정짓는 계수를 구하였다.

위와 같이 다상 교반탱크의 교반성능에 영향을 끼치는 물질의 주요 성질과 상호간의 힘, 그리고 CFD 해석기법에 대한 연구를 살펴보았다. 이번 연구에서는 위의 논문을 바탕으로 해석에 필요한 여러 인자들의 값을 정의하였으며, 임펠러와 가스 분배기의 형태에 따른 가스분산을 모사하고, 가스 Hold-up을 측정하여 교반탱크의 분산능력을 평가하였다.

제 2 장 전산 해석

제 1 절 실험 모델

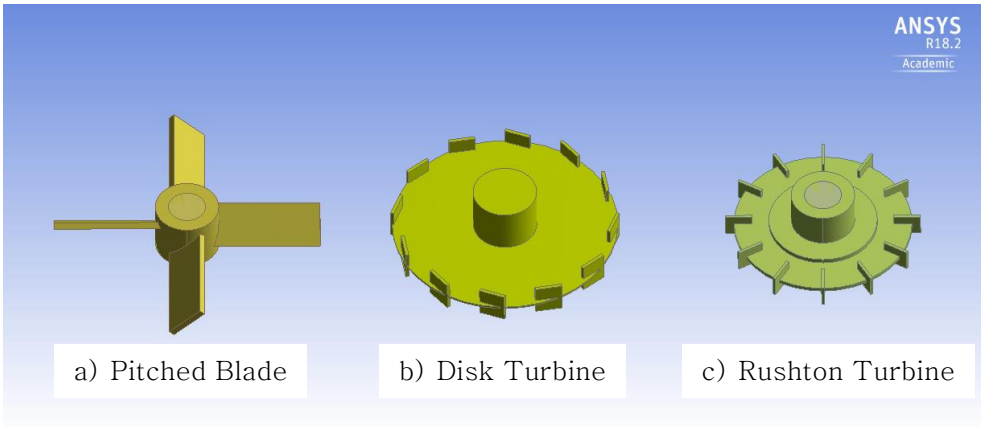
[그림 1]에 공정에서 사용하고 있는 교반탱크의 형상에 대한 개략도를 표시하였다. 탱크의 용량는 2루베이며, 높이는 1.61m, 지름은 1.28m이다. 현재 공정에서는 Disk Turbine 형태의 임펠러를 사용하고 있으며 블레이드의 수는 12개이다. 소량생산을 가능하게 하기 위하여 일반적인 교반탱크의 설계기준보다 임펠러의 높이가 교반탱크의 바닥으로 근접하게 설계되어 있다. 임펠러의 직경은 430㎜이며 임펠러와 교반탱크의 바닥간격은 150㎜이다. 이와 같은 설계를 통하여 최소생산가능 수량을 낮추었다. [그림 1]



[그림 2.1] 교반탱크 형상.

가스 분배기는 실제로 탱크 상부로부터 연결되었으나, 해석의 편의를 위하여 [그림 2.1]과 같이 바닥으로부터 연결 된 것으로 모델링하였다. 가스 분배기의 직경은 25㎜이며, 길이는 70㎜이다. [표 2.1] 분출되는 가스의 입자사양은 100~500㎛이다

이번 연구를 진행하기 위하여 모델링한 임펠러의 형상과 사양을 [그림 2.2]와 [표 2.2]에 나타내었다. Pitched Blade와 Disk Turbine은 Blending, Suspension, Dissolving의 용도로 일반적으로 사용되며, Rushton Turbine은 Pitched Blade 대비 큰 전단력을 필요로 하여 Gas를 분산하는 용도로 주로 사용된다. [그림 2.2]



[그림 1.2] 임펠러 모델 별 형상.

Disk Turbine의 Blade 수는 12개이며 Pitching 각도는 70도이며 Blade의 길이는 50㎜, 높이는 44㎜이다. Pitched Blade의 Blade는 4개, Blade의 길이는 200㎜, 높이는 80㎜로 모델링하였다. Rushton Turbine은 Disk Turbine과 동일하게 Blade 수는 12개, 길이와 높이는 각각 50㎜, 45㎜로 모델링 하였다. [표 2.2]

[표 2.1] Tank 및 가스분배기 사양.

구분(㎜)	높이	직경	임펠러 샤프트 직경	임펠러 탱크 바닥 간격
교반탱크	1,610	1,280	70	150
Pipe 가스 분배기	70	25	–	–
Ring 가스 분배기	–	400	–	–

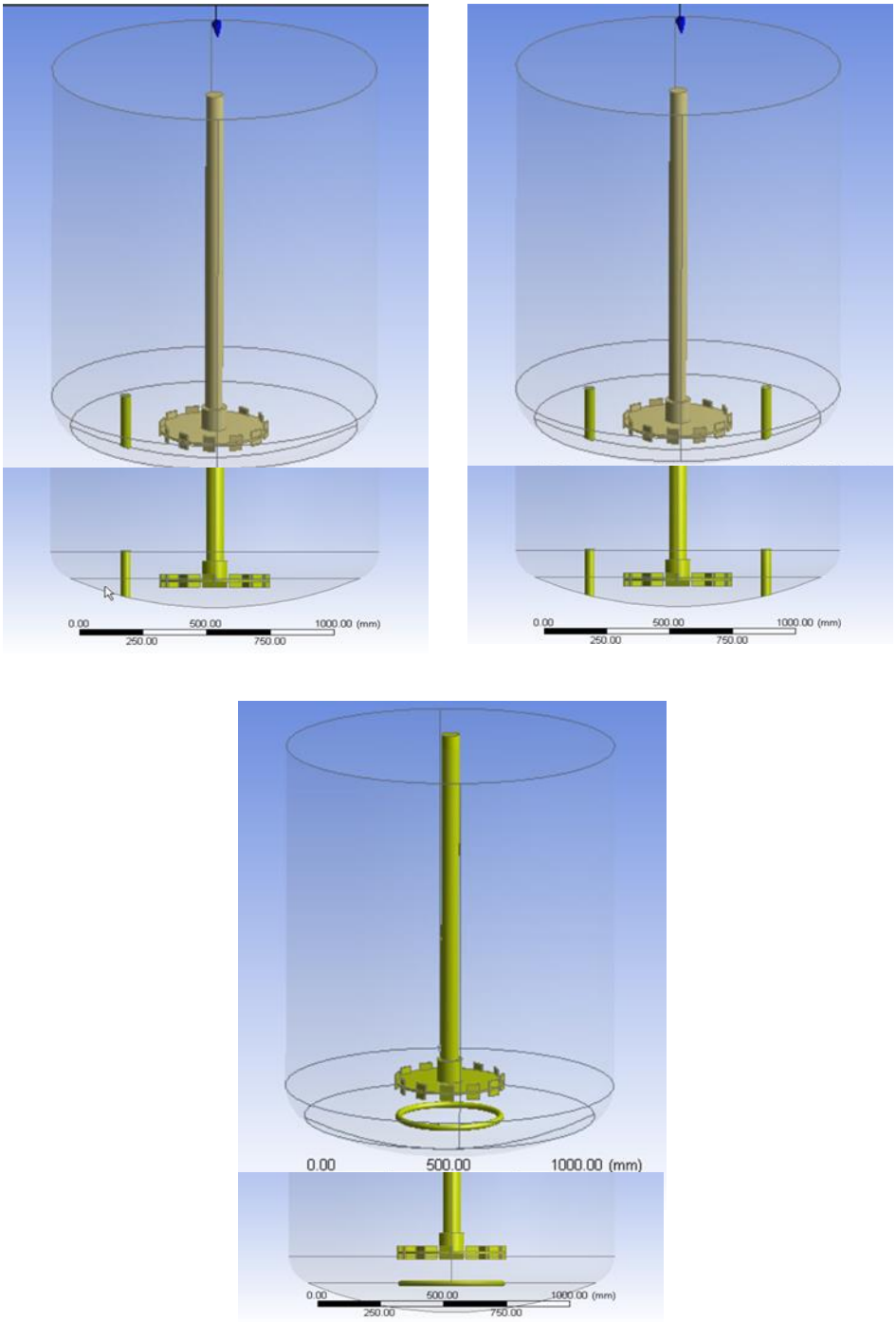
[표 2.2] 임펠러 모델 별 사양.

구분(㎜)	임펠러 사양		
	Pitched Blade	Rushton Turbine	Disk Turbine
임펠러 직경	500	370	430
Disk 두께	–	7.3	4
Disk 직경	–	336	430
Blade 높이	80	45	60
Blade 길이	200	50	50
Blade 두께	12	5.1	6
Blade 수(개)	4	12	12
Blade Pitching 각도(°)	45	0	70

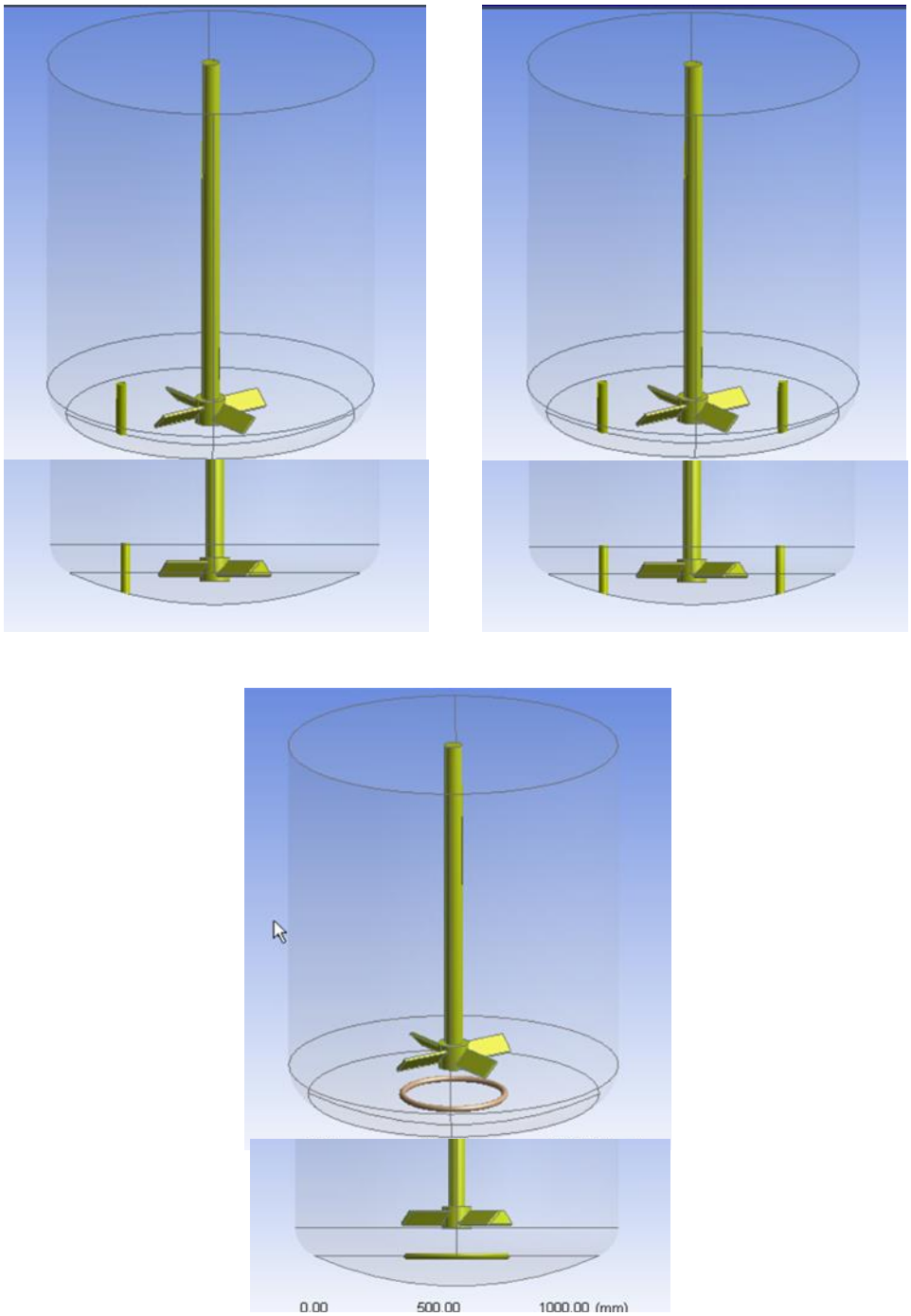
Disk Turbine, Rushton Turbine, Pitched Blade의 3가지 형태의 임펠러와 Pipe 형태의 가스 분배기가 Tank 내부에 1개 또는 2개 존재 할 경우 그리고 Ring 형태로 임펠러의 수직 하부에 존재 할 경우의 3가지 경우로 나누어 총 9가지 교반탱크의 형상에 대한 모델을 진행하였다. [그림 2.3], [그림 2.4] [그림 2.5]

실제 공정에는 Pipe type의 가스 분배기가 1개 설치 되어있는 Disk Turbine 형태의 교반탱크가 설치되어 있다. Ring 형태의 가스 분배기를 설치하기 위해서는 교반탱크를 다시 제작하여야 함으로 비용을 절감하기 위해 Pipe 형태의 가스분배기가 2개 설치되었을 때 가스의 분산효과가 Ring 형태의 분배기와 동일한지 여부를 확인하고자 한다.

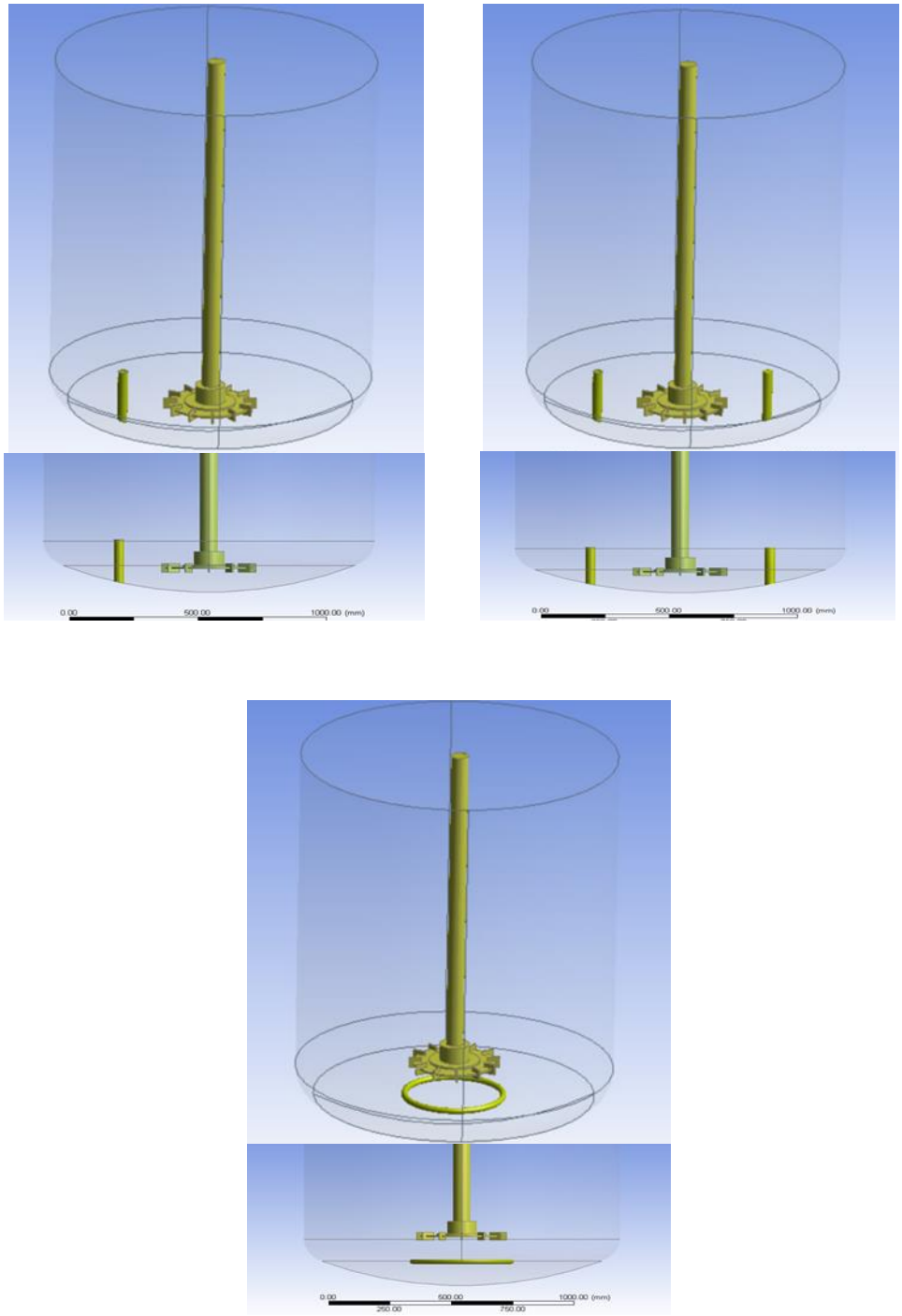
Ring 형태의 가스분배기를 설치하기 위해서 임펠러와 교반탱크의 바닥간격 설계를 300㎜로 변경하였으며 Ring 가스 분배기는 바닥으로부터 150㎜에 위치시켰다.



[그림 2.2] Disk Turbine의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상.



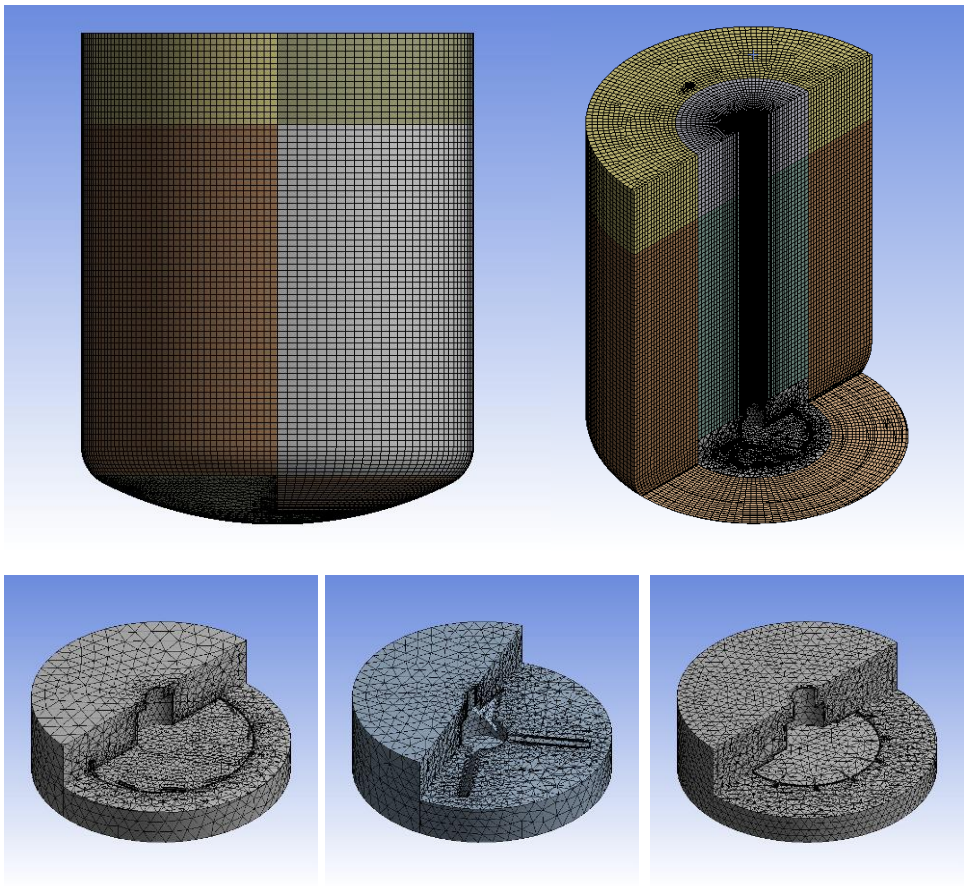
[그림 2.3] Pitched Blade의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상.



[그림 2.4] Rushton Turbine의 각 가스 분배기 모델 별 교반탱크 형상.

제 2 절 격자 생성

Ansys Workbench의 mesh 생성 프로그램을 사용하여 위의 9가지 실험 모델에 대해서 격자를 생성하였으며 격자의 크기는 교반탱크와 임펠러 모두 15~20 ㎜로 구성하였다. 임펠러는 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 Workbench의 mesh 생성 프로그램으로는 품질이 높은 Hexa mesh 생성을 지원하지 않으므로 다소 격자의 품질은 떨어지나 격자 생성이 용이한 Tetra mesh로 격자를 구성하였다. 교반탱크와 내부의 유체영역은 모두 Hexa mesh로 격자를 구성하였다. [그림 2.6]



[그림 2.5] 교반탱크 및 임펠러 모델 별 격자 형상.

[표 2.3] Disk Turbine 모델의 격자 품질 Data.

모델	구분	Nodes	Elements	Min	Max	평균	표준편차
Disk Turbine + Pipe 1개	임펠러	21,125	68,523	0.11	0.99	0.62	0.18
	교반탱크	517,504	553,234	0.15	1.00	0.97	0.09
	계	**538,629**	**621,757**	**0.11**	**1.00**	**0.93**	**0.15**
Disk Turbine + Pipe 2 개	임펠러	24,980	87,162	0.11	0.99	0.65	0.17
	교반탱크	527,135	606,282	0.10	1.00	0.94	0.11
	계	**552,115**	**693,444**	**0.10**	**1.00**	**0.90**	**0.15**
Disk Turbine + Ring	임펠러	16,840	60,247	0.11	0.99	0.61	0.19
	교반탱크	16,840	60,247	0.11	0.99	0.61	0.19
	계	**671,001**	**751,926**	**0.11**	**1.00**	**0.94**	**0.14**

[표 2.4] Pitched Blade 모델의 격자 품질 Data.

모델	구분	Nodes	Elements	Min	Max	평균	표준편차
Pitched Blade + Pipe 1개	임펠러	10,084	37,208	0.13	0.99	0.70	0.18
	교반탱크	420,722	441,094	0.11	1.00	0.97	0.09
	계	**430,806**	**478,302**	**0.11**	**1.00**	**0.95**	**0.12**
Pitched Blade + Pipe 2 개	임펠러	5,361	26,590	0.24	0.99	0.76	0.12
	교반탱크	445,183	501,482	0.13	1.00	0.95	0.11
	계	**450,544**	**528,072**	**0.13**	**1.00**	**0.94**	**0.12**
Pitched Blade + Ring	임펠러	11,553	43,451	0.15	0.99	0.69	0.19
	교반탱크	386,693	410,333	0.17	1.00	0.97	0.10
	계	**398,246**	**453,784**	**0.15**	**1.00**	**0.94**	**0.14**

[표 2.5] Rushton Turbine 모델의 격자 품질 Data.

모델	구분	Nodes	Elements	Min	Max	평균	표준편차
Rushton Turbine + Pipe 1개	임펠러	15,054	56,855	0.11	0.99	0.71	0.18
	교반탱크	428,530	463,521	0.13	1.00	0.96	0.10
	계	**443,584**	**520,376**	**0.11**	**1.00**	**0.93**	**0.14**
Rushton Turbine + Pipe 2 개	임펠러	16,448	68,941	0.10	0.99	0.69	0.18
	교반탱크	453,678	506,341	0.12	1.00	0.95	0.11
	계	**470,126**	**575,282**	**0.10**	**1.00**	**0.92**	**0.15**
Rushton Turbine + Ring	임펠러	5,424	26,613	0.16	0.99	0.74	0.14
	교반탱크	402,679	431,361	0.16	1.00	0.96	0.11
	계	**408,103**	**457,974**	**0.16**	**1.00**	**0.95**	**0.12**

9개의 실험모델에 대한 격자 Orthogonal 품질 값을 표로 나타내었다. 모든 모델에서 격자의 평균 Orthogonality 품질 값이 0.9이상으로 뛰어난 품질의 격자를 구성하였으며, 교반탱크의 전체 격자의 수는 50만개 내외로 구성하였다.

제 3 절 해석 기법 및 이론적 배경

이번 연구는 PR의 수분 제거를 위하여 교반탱크 내부의 액상 PR에 질소가스를 Sparging하였을 때 질소가스가 회전하는 임펠러의 난류에 의하여 분산되어, 어떠한 유동 형상을 보이는지 기체-액체 다상유동 해석을 통하여 확인하는 것이다. 실제 공정에서 수분을 제거하기 위해서는 액상의 PR에 질소가스를 Sparging 한다. 하지만 금번 다상유동해석을 진행함에 있어 PR은 물, 질소가스는 공기로 대체하여 해석을 진행하여도 그 결과가 유사할 것으로 예상되기에 위와 같이 물질 변경을 가정하여 해석을 진행하였다, Ansys Fluent 18.2를 사용하여 해석을 진행하였으며, 다상유동으로는 Eulerian 모델을 사용하였고 난류해석으로는 standard k-ε 모델을 적용하였다.

다상난류해석으로는 액체와 기체를 하나의 상으로 가정하고 난류해석을 진행하는 mixture 모델을 선택하였으며, 회전 임펠러의 해석은 회전하는 임펠러의 영역과 주변의 정지해 있는 영역의 인터페이스에서의 흐름이 복잡하지 않고, 급격한 유동의 흐름변화가 없을 때 사용이 적합한 multiple reference framed 모델을 사용하였다. [표 2.6]

[표 2.6] 다상유동 CFD 해석 기법.

구분	CFD 해석 모델	비고
시간 해석	임펠러 난류 해석	Steady
	다상유동해석	Transient
다상유동해석	Eulerian	Primary phase : water Secondary phase : air Phase interaction : 설정안함
다상난류해석	mixture	-
난류해석	Standard k- ε	Near-wall treatment - standard wall function
회전 임펠러 해석	Multiple reference frame	시계반대방향 100rpm
Solution method	scheme	Phase coupled simple
	Spatial Discretization	Gradient - green gauss cell based
		Momentum - second order upwind
		Volume fraction - first order upwind
		Turbulent kinetic energy - second order upwind
		Turbulent dissipation rate - second order upwind

1. 다상유동 해석

일반적으로 상(phase)란 명확한 경계를 가지고 있으며, 물리적으로나 화학적으로 균일하고 균등한 물질의 양을 의미한다. 상은 일반적으로 입자, 액체, 기체상으로 구분되며, 같은 상이라 하더라도 물리적, 화학적 특성이 다른 경우, 다른 상으로 표현 될 수 있다. 동일한 상태 또는 상에서도 다른 화학적 특성을 가진다. [16]

다상유동 해석을 진행하기 위하여 상을 구분하여야 하며, 시스템에서 많은 양을 차지하며 연속상의 형태를 보이는 것을 primary phase라고 정한다. 시스템에서 연속상에 분산이 되어 있으며 primary phase대비 양이 적은 상을 secondary phase라 한다. [16]

다상유동은 서로 구분되는 두 개 또는 그 이상의 상(phase)들이 서로 혼합되어 있거나, 또는 분자 레벨단계에서 서로 층을 이루어는 성층(separated)류가 있으며, 이와 같이 혼합된 유체가 유동하는 것을 말한다. 다상유동은 다양한 형태로 존재하며, 두 가지 상의 다상유동은 가스-액체, 액체-고체, 기체-고체, 그리고 서로 섞이지 않는 액체의 혼합으로 정의 할 수 있다. 가스-고체의 다상유동은 가스-Droplet으로 정의 할 수 있으며, 가스를 연속상으로 고체를 분산상으로 움직이는 유동을 말한다. 고체 입자의 밀도에 따라 Dense, Dilute로 가스-고체의 다상유동의 성격을 나눌 수 있다. 액체-고체의 다상유동은 일반적으로 액체가 연속상이며 고체의 분산상이 Slurry 형태를 띄며 유동하는 것을 말하며 음식, 광물 처리, Oil Sand 처리가 액체-고체의 다상유동의 예라고 할 수 있다. 액체-기체의 다상유동은 연속상에 분산상의 양이 적게 분산 된 경우 Dispersed 유동으로 정의하며, 서로 층을 이루는 성층(separated)유동의 경우 그리고, 혼합(mixture)되어 있거나, 분산상이 천이(transitional)하는 유동으로 나눈다. 분산상이 기체인 경우 일반적으로 Bubble의 형태를 띄며, 분산상이 액체인 경우는 Droplet의 형태로 정의한다. 그리고 이러한 Bubble이나 Droplet은 구,

타원, 찌그러진 형태의 구 등 다양한 형태를 나타낼 수 있다.

가스-액체의 다상유동은 두 가지 형태의 유동으로 분류 할 수 있다. 첫 번째는 각 상을 서로 섞이지 않는 연속상으로 정의하고, 그 경계면을 명확하게 구분 지을 수 있는 경우를 가리켜 자유수면(Free Surface) 유동이라 정의한다. 자연현상에서 볼 수 있는 자유수면 유동현상은 파도의 출렁임, 잉크젯, 기판 위에 코팅의 경우를 들 수 있다. 두 번째는 천이 유동(transitional flow)으로 액체의 연속상에 가스의 분산상이 침투하는 할 때 내부에서 일어나는 유동의 현상을 말한다. 분산(dispersed) 유동과, 성층유동 사이에서 다양한 분산형태를 보이며, 기체를 분산상이라 가정 할 때 기체의 속도와, 액체의 속도에 따라 분산상은 버블, 슬러그, churn-turbulent, annular의 형태를 띈다. [17]

일반적으로 자유수면 유동은 Volume of Fluid (VOF) 모델을 사용하여 해석을 진행하며, 연속방정식으로부터 계산되는 체적분률(volume fraction)의 값으로 상의 경계면의 유동의 상태를 확인 할 수 있다. 실제로 계산되는 체적분률의 값은 0 ~ 1의 값을 가질 수 있으나 VOF 모델은 두 개의 상이 서로 침투되지 않는 것을 가정기 때문에 공간차분영역에 체적분률 값은 0 또는 1의 값으로 표시된다. 하나 또는 두 개의 상의 연속방정식으로부터 체적분율 값을 계산하여 경계면의 유동을 추적하며, VOF 모델을 위한 지배방정식은 아래와 같다. [17],[18]

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot \partial(\alpha_q \rho_q \vec{u}) = S_q + \sum_{p=1}^{n} \dot{m}_{pq} \ , \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial(\alpha_1 \rho_1)}{\partial t} + \nabla \cdot \partial(\alpha_1 \rho_1 \vec{u}) = 0 \ , \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial(\alpha_2 \rho_2)}{\partial t} + \nabla \cdot \partial(\alpha_2 \rho_2 \vec{u}) = 0 \ . \tag{2.3}$$

S_q는 phase q로 들어오는 외부의 mass source이며, m_{pq}는 phase p에서 q로 이동하는 mass transfer rate이다. 각각의 상 내부에서는 이동하는 질량의 변화가 없기 때문에 식 (2.2), (2.3)과 같이 연속방정식의 source항은 0이며, 상 간의 경계면에서만 물질이 서로 이동함으로 경계면에서의 체적분률값을 계산하여 표면의 유동을 추적한다.

반면에 기체와 같은 분산상이 액체의 연속상으로 침투하여 반응물과 서로 화학적, 물리적 상호작용을 하는 bubble columns, 교반탱크는 천이 유동의 대표적인 예이며, 이러한 유동의 해석은 Eulerian 모델을 사용하여 진행한다. 장치의 설계, scale-up을 진행함에 있어 유체역학적 해석을 통한 유체의 regime과 유동을 예측하고 설계에 반영하는 것은 중요하며, 이러한 설계를 하기 위한 주요인자로는 가스와 액체의 상호접촉 면적, bubble의 직경, 가스와 액체의 축 회전반경 확산 계수, 열 물질 전달 계수, Gas holdup 등을 고려한다. bubble columns와 반응탱크에서 보이는 유체의 regime은 일반적으로 bubble과 churn-turbulent의 regime을 보인다. bubble은 가스의 속도가 5㎝/s이고, 직경은 2~6㎜의 범위로 존재하며. 가스의 속도가 5㎝/s, 직경은 15㎜ 이상 일 때는 churn-turbulent의 regime을 띄기 시작한다. 유동에 대한 해석은 각각의 상에 대해 개별적으로 연속방정식, 운동방정식, 에너지 방정식의 해를 구함으로써 진행되고 각 상의 계면을 추적하는 VOF 모델과는 달리 연속상 내부를 침투하는 분산상의 체적분률과 속도항 모두를 계산한다. 시간의 변화에 따른 개별 입자의 위치를 추적하는 Lagrangian 모델과는 다르게 Eulerian 모델은 각 공간차분 영역내부에서 시간에 따라 변화하는 분산상의 체적분률 값을 계산하고 이 값을 평균화하여 유동에 대한 해석을 진행한다. Eulerian 모델의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot \partial\left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{v_q}\right) = \underbrace{\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq} - m_{qp})}_{\text{Mass transfer}} + \underbrace{S_q}_{\text{Source}} \quad , \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{v_q})}{\partial t} + \nabla \cdot \partial\left(\alpha_q \rho_q \overrightarrow{v_q^2}\right) = \underbrace{-\alpha_q \nabla p}_{\text{Pressure}} + \underbrace{\nabla \cdot \overline{\overline{\tau_q}}}_{\text{Friction}} + \underbrace{\alpha_q p_q \vec{g}}_{\text{Bouyancy}} + \text{Drag Forces}$$

$$+ \text{Non Drag Forces} . \tag{2.5}$$

식 (2.4)는 Eulerian 모델의 연속방정식이다. 계면을 추적하는 VOF 모델과 다르게 좌변의 속도항이 개별 상에 대하여 모델링 되어 있으므로 연속상에 침투하는 분산상의 유동에 대한 해석을 할 수 있다. 식 (2.5)는 운동방정식으로 유체에 작용하는 힘은 크게 체적력과 표면력으로 정의된다. 체적력은 유체에 작용하는 압력, 부력이며 표면력은 상간의 상호 작용하는 힘을 나타는 항력(drag)과, 비항력(drag)이다. 각 상 상호간의 주고받는 힘을 고려하여, 그 힘이 전체 유동에 미치는 영향이 크고 중요하다고 판단되는 경우 유동해석에 활용될 수 있다.

2. 난류유동 해석

일반적으로 유동은 레이놀즈 수에 따라 층류, 난류 유동을 가진다. 레이놀즈 수는 유체의 관성에 의한 힘과, 점성에 의한 힘의 비로써 점성력에 의한 지배를 많이 받는 유체일수록 낮은 레이놀즈 수를 가지며 층류형태의 유동을 보인다. 반면에 관성력이 높은 유체일수록 높은 레이놀즈 수를 가지며 난류 형태의 유동을 보인다. 원형파이프와 같은 관수로 유동을 가정할 때 레이놀즈 수가 2,100 이하이면 층류, 4,000 이상이면 난류, 그리고 그 사이의 경우는 천이유동으로 정의한다.

난류는 시간에 따라 매우 급격히 변화하며, 불규칙적이고, 삼차원의 움직임을 갖는다. 그리고 그 안에서 전달되는 질량, 운동량, 그 외의 물리적 성질의 값들은 시간과 공간에 따라 급변하기 때문에 특정 시점에 그러한 값들을 예측하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 이러한 난류 유동은 매우 다양한 소용돌이의 형태를 보이며, 큰 유동의 형태는 비교적 예측이 가능한 반면에, 크기가 작은 소용돌이와 같은 난류의 흐름을 예측하는 것은 더욱 불가능 하므로, 복잡한 유동을 시간 평균화하여 해석하는 것이 난류해석에 있어 가장 효율적인 접근 방식이라 할 수 있겠다. Ansys Fluent 에서는 이러한 시간 평균 해석을 위하여 RANS 모델 (Reynolds Averaged Navier-stokes Simulation)접근 방식을 채택하며, 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla\cdot(p\overrightarrow{vv}) = -\nabla p + \nabla\cdot\bar{\bar{\tau}} + p\vec{g} + \vec{F}, \qquad (2.6)$$

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu[(\nabla\vec{v} + \nabla\overrightarrow{v^t}) - \frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{v}\,\mathrm{I}. \qquad (2.7)$$

식 (2.6)은 일반적인 유체의 수송방정식이며, 좌변은 가속도항 우변은 유체의 단위 질량당 작용하는 힘을 나타낸다. 식 (2.7)은 유체의 작용하는 응력텐서에 관한 식이다. RANS 모델을 정의하기 위하여 식 (2.6) 수송 방정식은 아래와 같은 RANS 운동방정식 모델로 표현 할 수 있다.

$$u_i(X,t) = \underbrace{\overline{u_i}(X,t)}_{\text{시간 평균 성분}} + \underbrace{\acute{u_i}(X,t)}_{\text{Fluctuation 성분}} \tag{2.8}$$

순간 성분

$$\frac{\partial(p\overline{u_i})}{\partial t} + \mathrm{p}\overline{u_k}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \tag{2.9}$$

$$R_{ij} = -\rho\overline{\acute{u_i}\acute{u_j}} = u_T\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu_T\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k}\delta_{ij} - \frac{2}{3}\rho k\delta_{ij} \tag{2.10}$$

난류유동하는 모델의 속도장을 식 (2.8)과 같이 시간 평균성분과 Fluctuation 성분의 합으로 표현 할 수 있다. 그리고 이 시간 평균 모델을 다시 운동방정식으로 나타내면 식 (2.9)와 같다. R_{ij}는 RANS 모델을 정의하기 위해서 가정한 응력 tensor 값으로 이 값은 식 (2.10)과 같이 정의 할 수 있다. 식 (2.10)은 전단응력과 속도 변형율 사이에 비례관계가 있는 층류 유동에서처럼 R_{ij}값도 속도 변형율 사이에 비례관계가 있다는 것을 가정함으로써 해석 될 수 있다. 식 (2.10)의 점성 계수 값을 μ_T로 정의하며 아래의 식을 통하여 얻어진다.

Turbulent kinetic energy $k = \overline{u_i' u_j'}/2$ (2.11)

Turbulent dissipation rate $\varepsilon = v\overline{\partial u_i'/\partial x_j(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i})}$ (2.12)

Standard k−e 모델 $\mu_T = f(\frac{\rho k^2}{\varepsilon})$ (2.13)

Standard k−ε 모델은 μ_T 의 값을 식 (2.13)과 같이 모델링 함으로써 난류 해석을 진행한다. [20],[21]

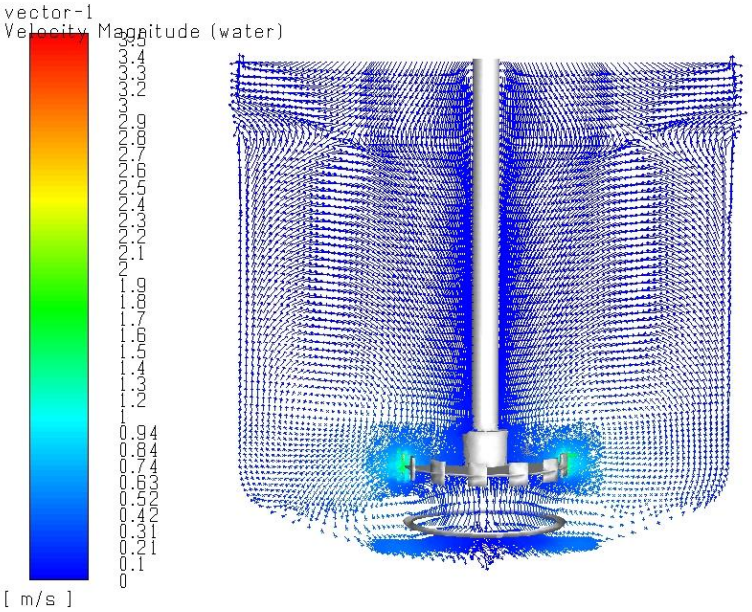
제 3 장 해석 결과

다상유동해석을 진행은 다음과 같이 두 가지 단계로 진행하였다. 첫 번째로 먼저 각각의 임펠러에 대하여 임펠러의 회전에 의한 난류해석을 진행하며 교반탱크 내부의 유동형태를 streamline과 vector장을 활용하여 확인하였다. 임펠러 난류해석은 steady 상태로 진행하였으며, 임펠러 회전속도는 시계반대방향으로 100rpm으로 설정하였다. 두 번째는 위의 난류유동해석을 바탕으로 Pipe와 Ring형태의 가스 분배기에 대해서 공기를 Sparging 할 때 임펠러의 난류에 의한 가스유동을 확인하였다. 가스의 분산정도는 교반탱크 내 분산된 공기의 체적분율을 contour로 시각화하고 질량값을 측정함으로써 파악하였다.

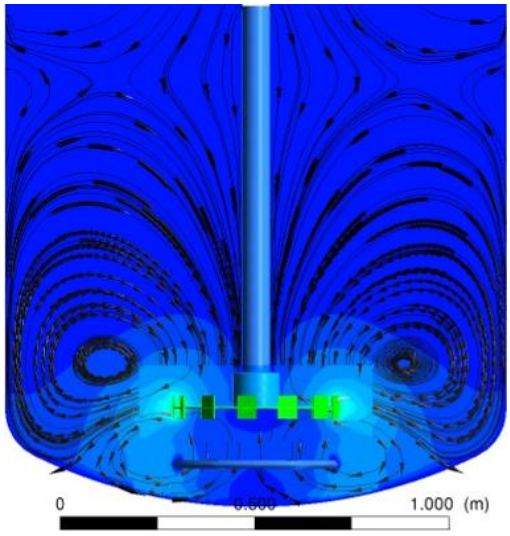
제 1 절 임펠러 난류유동 해석

1. Disk Turbine 모델의 난류유동 해석

교반탱크 내부의 유동은 임펠러의 회전에 의하여 형성되며, 유동의 형태는 임펠러의 형상에 따라서 달라진다. [그림 3.1]과 [그림 3.2]는 Disk Turbine 모델에 대한 유동의 속도장과 Streamline을 보여주고 있다. Disk Turbine의 블레이드는 회전방향에서 약 70도 피칭된 형상을 띄고 있으며, 임펠러의 회전에 의하여 유입된 유량이 임펠러와 수평한 위치로부터 벽면으로 유량을 토출시키고 있는 것을 알 수 있다. 토출 된 유량은 교반탱크 벽에 부딪혀 다시 상부유동과 하부유동으로 나뉘어 회전한 후 교반기의 중심인 임펠러로 유입되는 순환유동을 보이고 있다.



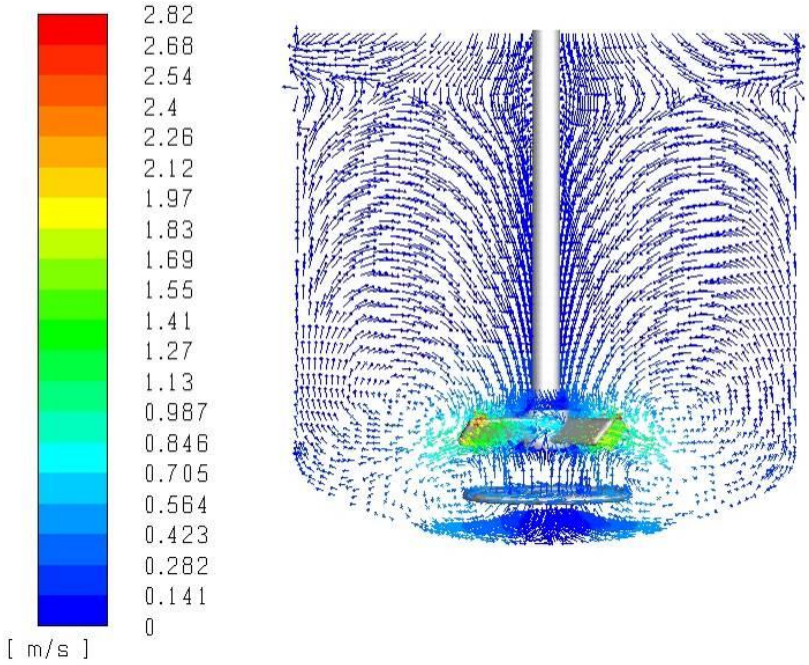
[그림 3.1] Rushton Turbine의 유동 속도장 분포.



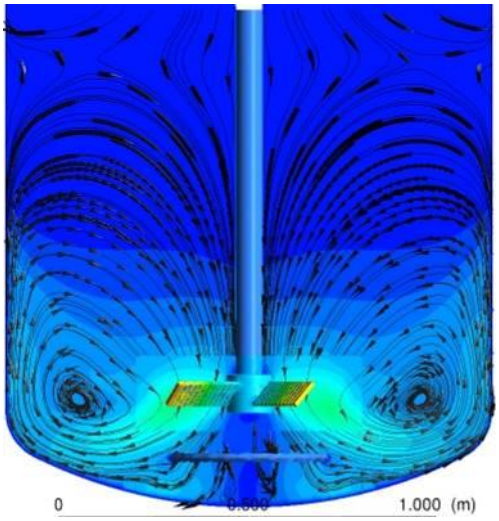
[그림 3.2] Rushton Turbine의 유동 Streamline.

2. Pitched Blade 모델의 난류유동 해석

아래의 [그림 3.3]과 [그림 3.4]는 Pitched Blade 형상의 난류유동해석 결과이다.



[그림 3.3] Pitched Blade의 유동 속도장 분포.

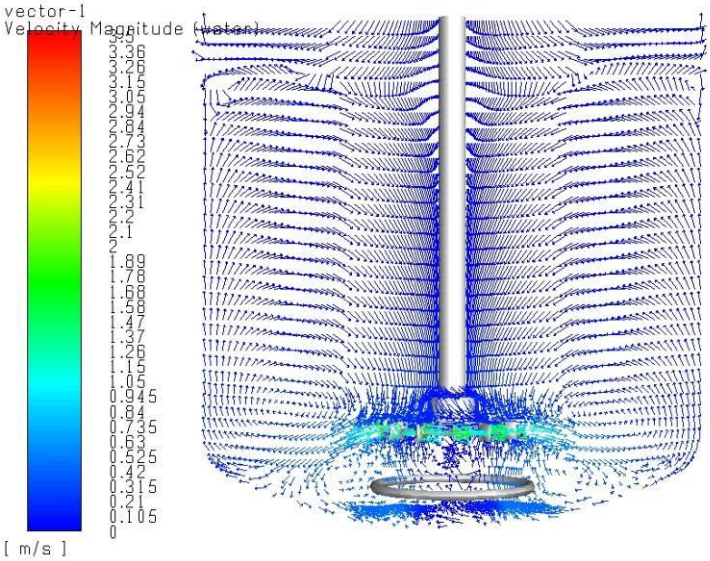


[그림3.4] Pitched Blade의 유동 Streamline.

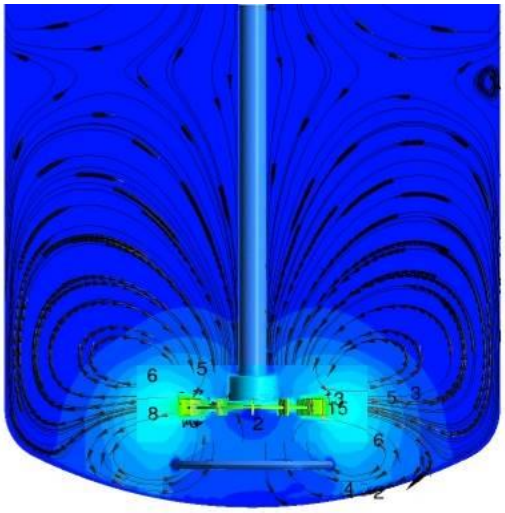
Pitched Blade 모델은 블레이드가 45도 피칭된 형상을 띄고 있으며 임펠러에 의한 유동의 형상은 블레이드 피칭각도와 유사하게 회전방향에서 축방향으로 약 45도 아래로 향하여 있는 것을 확인 할 수 있다. Disk Turbine 모델이 임펠러와 수평하게 회전반경의 유량을 발생시키고 크게 상부 유동과 하부 유동을 발생시킨 반면에 Pitched Blade 모델은 임펠러에 의해 토출되는 유량이 보다 축방향으로 형성되어 있으며, 교반탱크 바닥에 부딪히면서 전체가 하나의 큰 유동을 갖는 것을 Streamline을 통해서 확인 할 수 있다.

3. Rushton Turbine 모델의 난류유동 해석

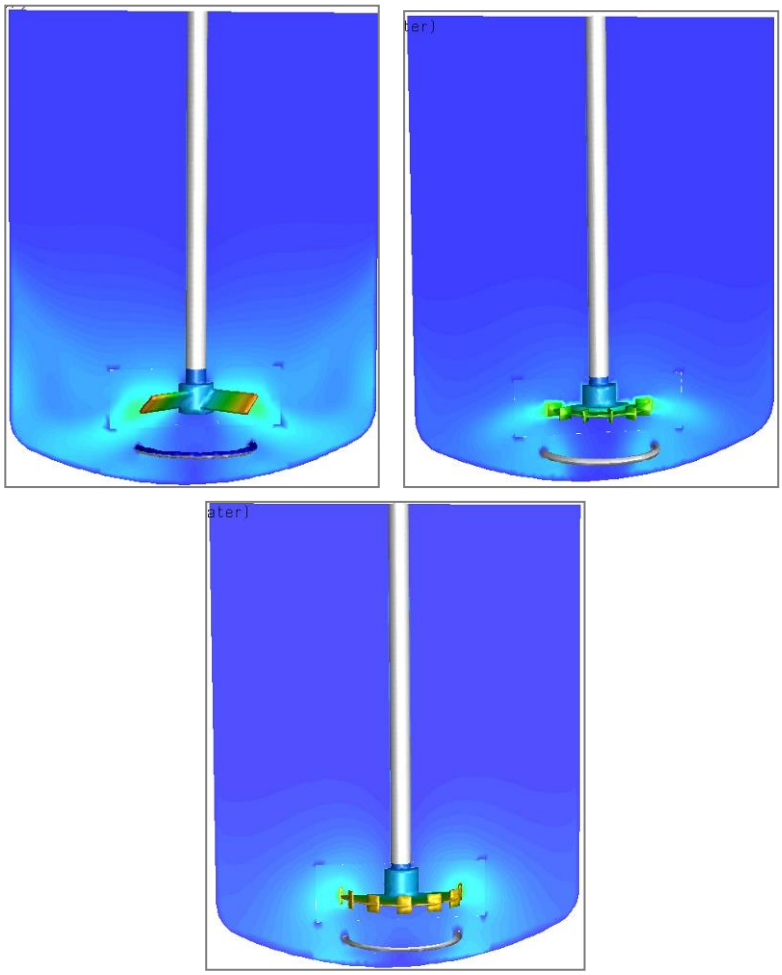
아래의 [그림 3.5]와 [그림 3.6]은 Rushton Turbine 형상의 난류유동 해석결과 이다. Rushton Turbine 모델의 형상은 회전반경으로 수평하게 블레이드가 설치되어 있으며, Disk Turbine 모델 대비 회전반경으로 토출되는 유동의 분포가 더욱 많은 것을 알 수 있다. 교반탱크 내부의 전체적인 유동의 분포는 Disk Turbine 모델과 동일하게 임펠러와 수평하게 토출된 회전반경유량이 교반탱크의 벽에 부딪혀 상부유동과 하부유동으로 나뉘어 유동장을 형성하고 있는 것을 streamline을 통하여 확인 할 수 있다.



[그림3.5] Rushton Turbine의 유동 속도장 분포.



[그림3.6] Rushton Turbine의 유동 Streamline.



[그림 3.7] 임펠러 모델 별 운동에너지 분포.

[표 3.1] 임펠러 별 최고 유속 및 운동에너지.

구분	Pitched Paddle	Rushton Turbine	Disk Turbine
최고 유속 (m/s)	3.17	2.00	2.27
Kinetic Energy (m^2/s^2)	11	6	7.5

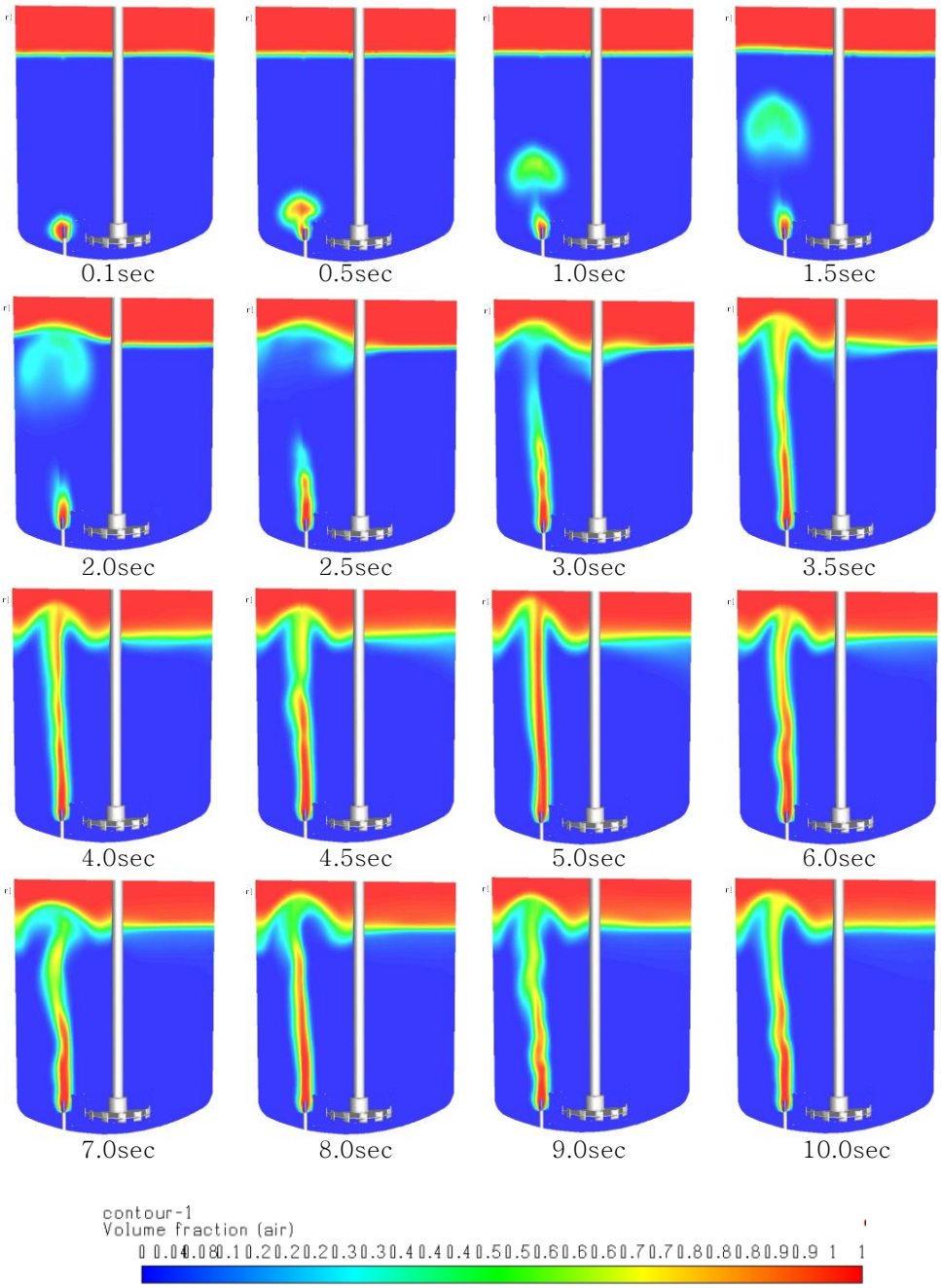
[그림 3.7]에 임펠러 별 운동에너지의 분포를 contour map을 통해서 나타내었다. 운동에너지의 분포는 앞서 확인한 속도장의 분포와 유사하게 형성되어 있음을 알 수 있다. Pitched Blade는 블레이드의 피칭각도와 유사하게 45도정도 축방향을 향하여 운동에너지가 형성되어 있으며, 블레이드를 통해서 전달된 운동에너지는 교반탱크 벽면까지 잘 전달되고 있음을 알 수 있다. 반면에 Disk Turbine과 Rushton Blade는 임펠러 부근에서만 운동에너지가 높게 형성되어 있으며, Pitched Blade 대비 임펠러에서 멀어질수록 운동에너지가 빨리 소멸되는 것을 알 수 있다. [표 3.1]은 임펠러 중심으로부터 직경 60㎝, 높이 30㎝ 영역을 설정하여 영역 내부에서의 운동에너지의 총합과, 최고속도를 표시한 값으로 Pitched Blade의 운동에너지 총합이 $11m^2/s^2$로 가장 높고 Rushton Turbine이 $6m^2/s^2$로 가장 낮다. 최고속도는 모두 임펠러의 블레이드 끝단에서 가장 높게 나타났으며, Pitched Blade의 최고속도가 3.17m/s로 가장 높고, Rushton Turbine가 2m/s로 가장 낮게 나타났다. 이와 같은 운동에너지의 분포와 최고속도의 차이는 Nienow[19]의 교반기의 형상에 따른 연구에서 보여준 바와 같이 교반기의 크기 대비 임펠러의 크기가 증가할수록 교반의 효율이 증가하여, 교반시간이 줄어들고, 임펠러의 크기가 증가 할수록 토출유량이 증가하여 혼합이 균일하게 진행되며, 유동계수가 증가 하는 결과를 통해서 알 수 있다. 토출유량은 임펠러의 직경과, 각속도에 비례하는 값으로 정의 된다.

제 2 절 다상유동 해석

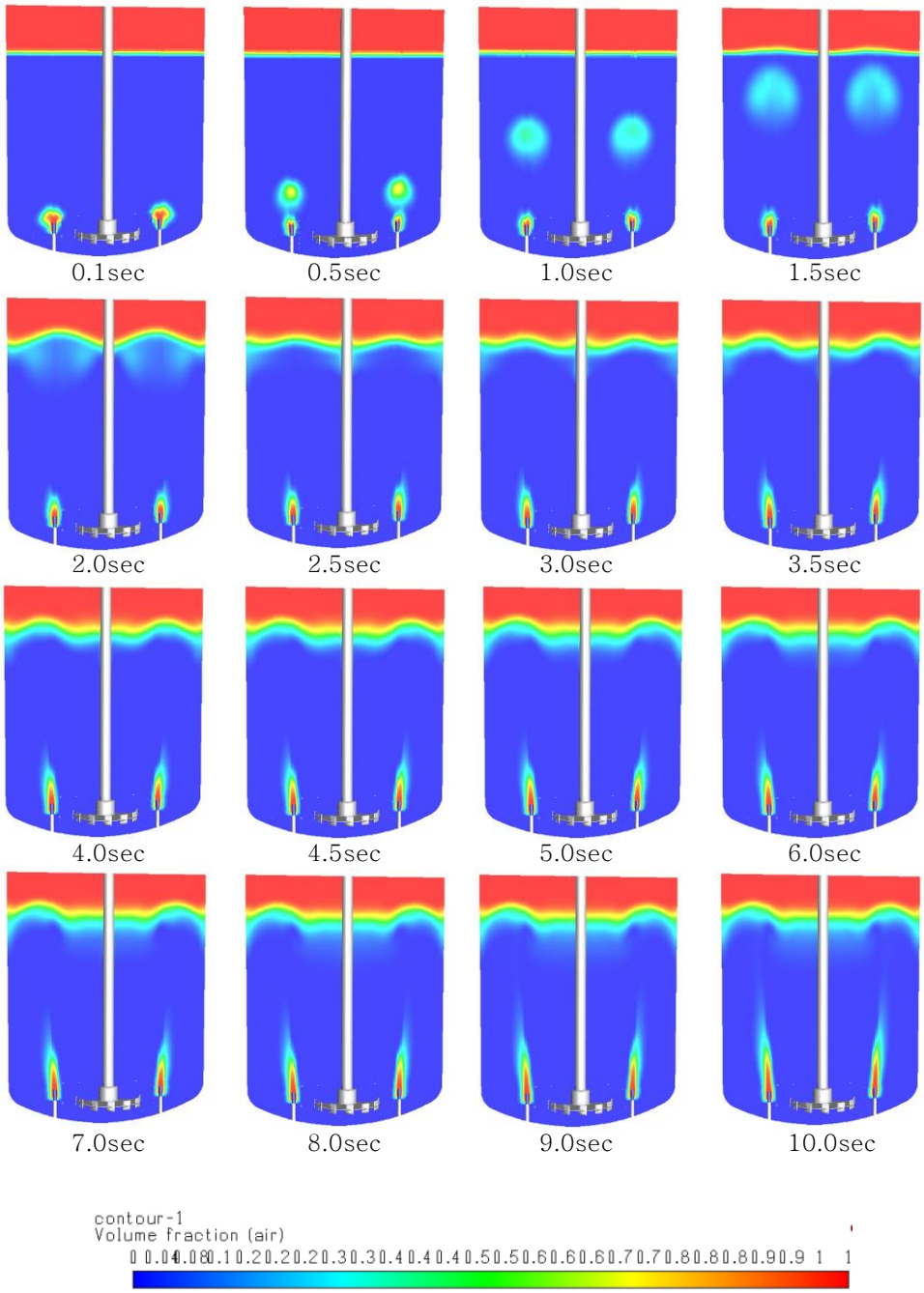
1절에서 교반탱크 임펠러의 형상 별로 발생하는 난류유동을 속도장과 Streamline을 통하여 확인하였고, 임펠러 블레이드의 크기가 가장 큰 Pitched Blade 형상이 가장 많은 운동에너지를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 2절에서는 1절의 해석결과를 바탕으로 Pipe와 Ring 형태의 가스 분배기에서 공기를 Sparging 할 때 교반탱크 내부의 가스 유동의 변화와 실제 공정에서 사용중인 다상교반탱크 모델의 문제점을 확인하였다. 교반탱크 내부 가스 분산의 확인은 공기의 체적분률 값을 contour map으로 확인하였으며, 교반탱크 내부 물에 분산되어 있는 공기의 양을 확인하여 다상교반탱크의 성능을 평가하였다. 해석조건은 unsteady 상태로 10sec동안 진행하였다. 가스 분배기의 위치, 형태 및 임펠러 난류유동에 의하여 가스가 분산되는 주된 특징적 형상은 해석 시작 후 5sec 이내에 확인이 가능하며, 10sec 이후의 가스 분산의 형상은 10sec 이전과 유사하므로, 10sec까지 해석결과를 본 연구결과에 실었다. 가스 분배기를 통하여 공급되는 공기 입자크기는 실제 공정에서 사용하고 있는 가스 분배기 사양과 동일한 500㎛로 설정하였다.

1. Disk Turbine 모델의 다상유동 해석

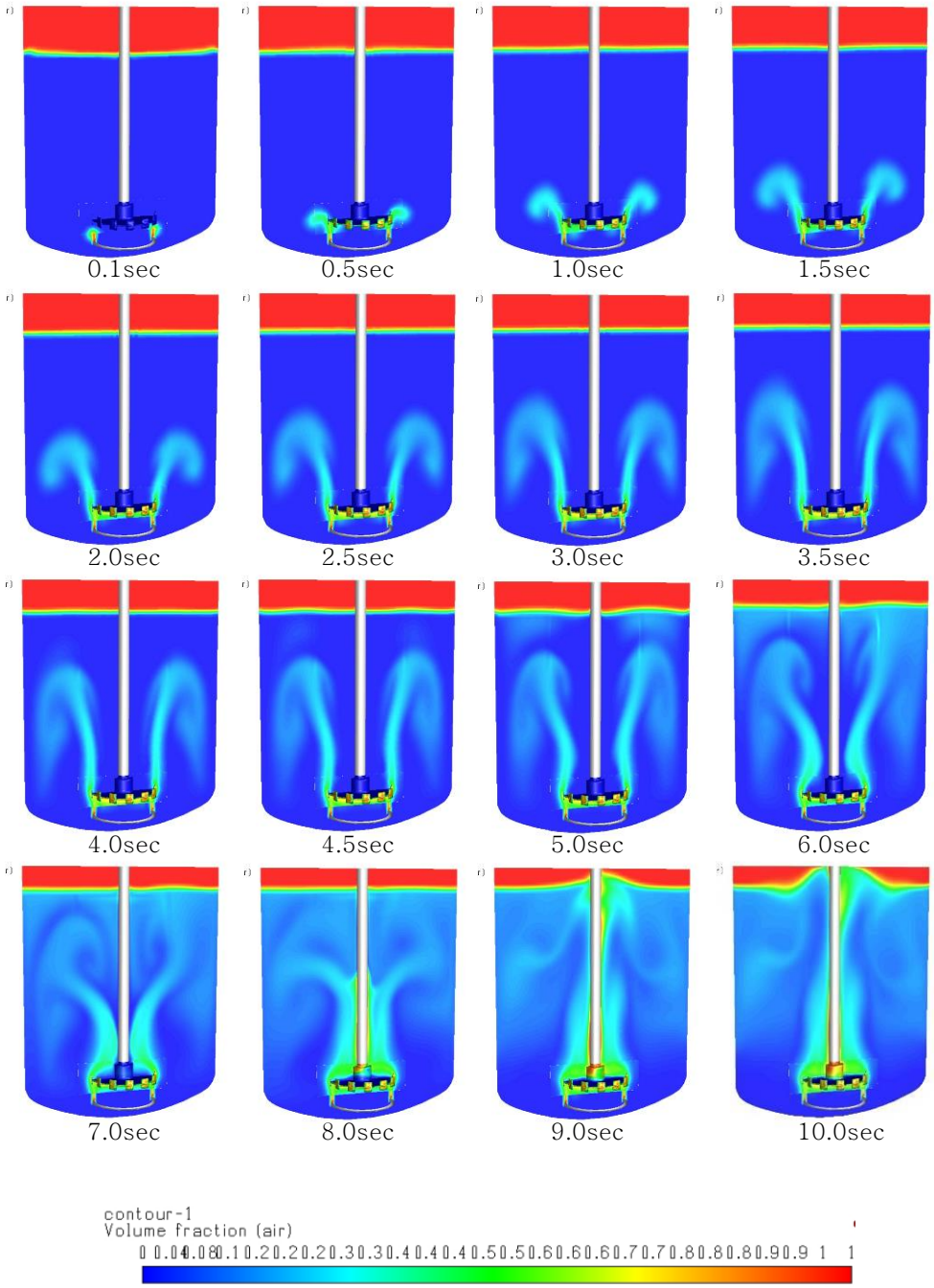
실제 공정에서 사용중인 Disk Turbine 임펠러와 가스 분배기 형상에 따라 공기를 Sparging 할 때 교반탱크 내부의 가스의 유동에 대해서 확인하였다. 공기의 공급유량은 교반탱크 내부로 공급되는 공기의 양을 동일하게 하기 위해서 Pipe가 1개일때는 3m/s, Pipe가 2개일 때는 1.5m/s, Ring 형상 일 때는 1m/s로 유지하였으며, 각 가스 분배기별로 탱크 내부로 공급되는 공기의 양은 0.2㎥/min이다. 아래의 [그림 3.8], [그림 3.9], [그림 3.10]은 Rushton Turbine을 임펠러 모델로 가스 분배기가 Pipe 형태로 1개, 2개 그리고 Ring 형태 일 경우에 대해서 해석한 결과이다.



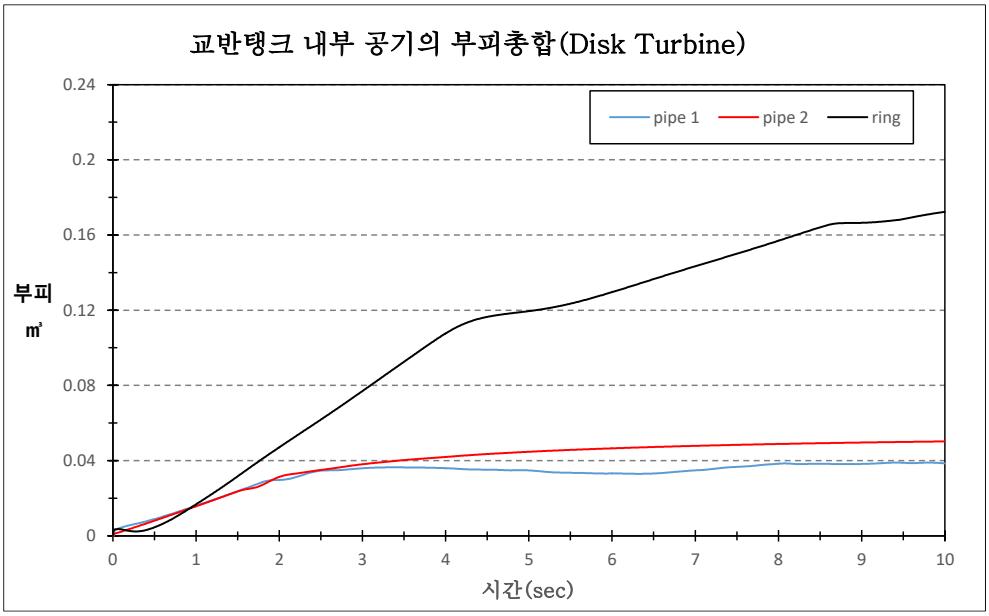
[그림 3.8] Disk Turbine +Pipe sparger 1 유동해석결과.



[그림 3.9] Disk Turbine + Pipe sparger 2 유동해석결과.



[그림 3.10] Disk Turbine + Ring Sparger 유동해석결과.



[그림 3.11] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합.

[그림 3.8]은 실제 공정에서 사용중인 Rushton Turbine 임펠러에 Pipe 형태의 가스 분배기 1개를 교반탱크 하부에 설치하였을 때 발생하는 가스유동에 대한 해석 결과이다. 임펠러 회전에 의한 난류가 생성되고 있지만 교반탱크 바닥으로부터 Sparging 되는 공기가 임펠러 난류에 의하여 탱크 전체로 분산되고 있지 않음을 확인 할 수 있다. 3m/s로 Sparging 되는 공기는 annular의 유동형상을 띄며 교반탱크 밖으로 배출되고 있다.

[그림 3.9]는 가스 분배기 2개를 탱크 바닥에 설치하였을 때 탱크 내부에 가스 유동에 대한 해석 결과이다. 가스의 공급속도를 1.5m/s로 낮추었지만, sparger를 통해서 공급된 가스는 탱크 전체로 분산되지 못하고, Pipe 1개의 모델과 유사하게 탱크 상부로 배출되고 있음을 알 수 있다. Pipe 1개 모델과는 다르게 sparger를 통해서 공급된 가스는 수면 위까지 annular의 형상을 띄며 배출되지 않고 탱크 중간 높이에서 유동형태가 bubble로 변경되는 것을 확인 할 수 있다.

[그림 3.10]은 임펠러 하부에 Ring 형태의 가스분배기를 설치했을

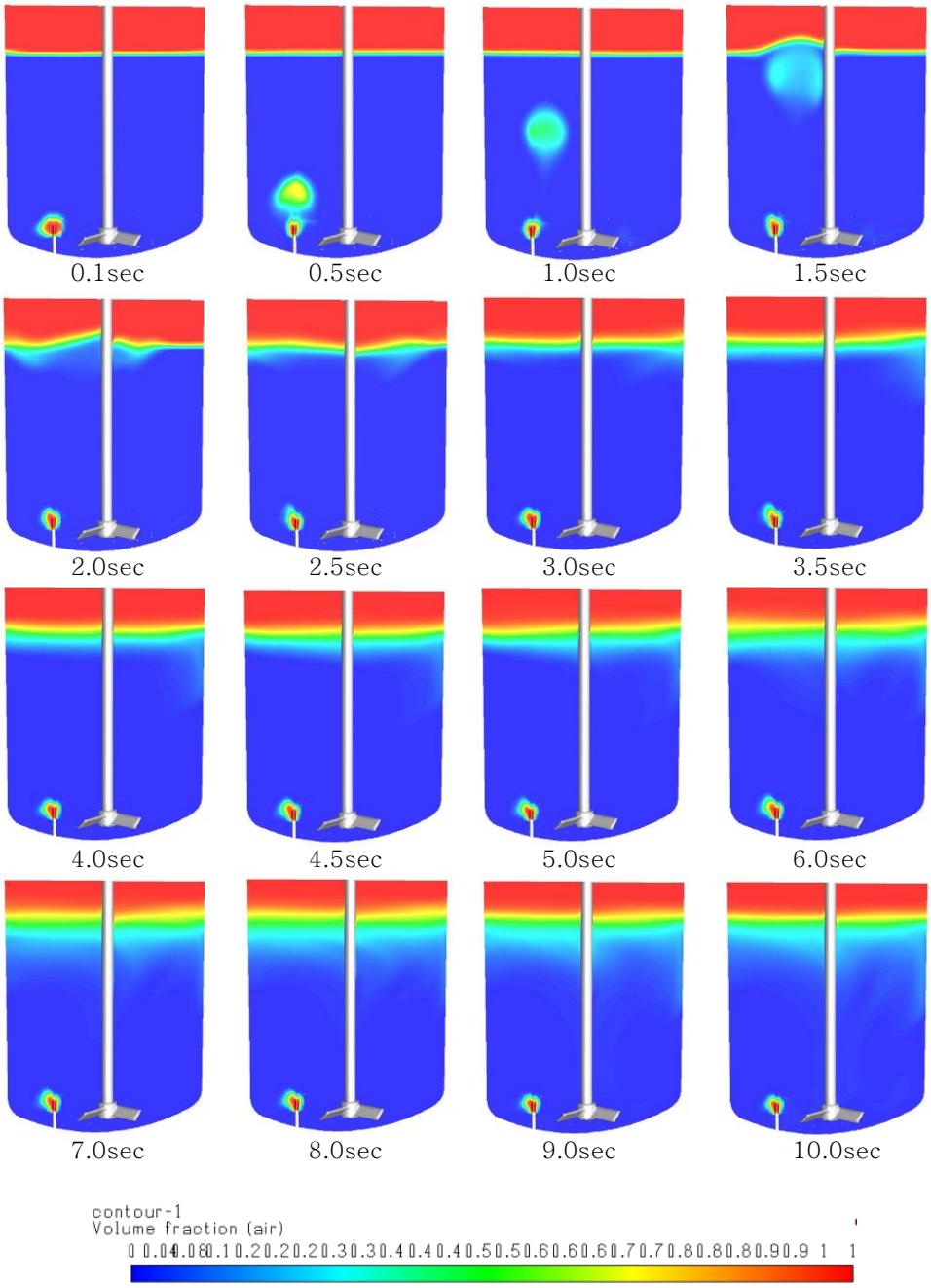
때 해석결과이다. Pipe 형태의 가스 분배기와 비교하여 공급된 가스가 임펠러의 난류에 의해 비교적 탱크전체로 원활히 분산되는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 공급된 가스가 임펠러 난류에 의해 임펠러와 수평 높이에서 탱크의 반경방향으로 분산 된 후 외벽에 부딪혀 다시 탱크 전체로 순환하는 유동의 형태를 보이지 않고, 탱크 상부로 그대로 배출되는 것은, 임펠러 난류에 의한 가스의 분산효과가 크지 않다는 것을 알 수 있다.

[그림 3.11]는 가스 분배기 형태 별 교반탱크 내부에 공급된 가스의 부피총량을 보여주는 그래프이다. Pipe 형태의 가스 분배기는 가스가 공급 된 후 약 4초가 지나면 값이 포화되는 것을 알 수 있으며, Pipe 2개 설치된 모델의 부피총량 값이 0.5㎥이며 Pipe 1개 모델대비 0.1㎥ 정도 높게 나타난다. 반면에 Ring 형태의 가스 분배기는 10초동안 가스의 부피총량이 포화상태에 이르지 않고 지속적으로 증가하고 있으며, 10초 도달 시 부피총량은 약 0.17㎥를 보이고 있다.

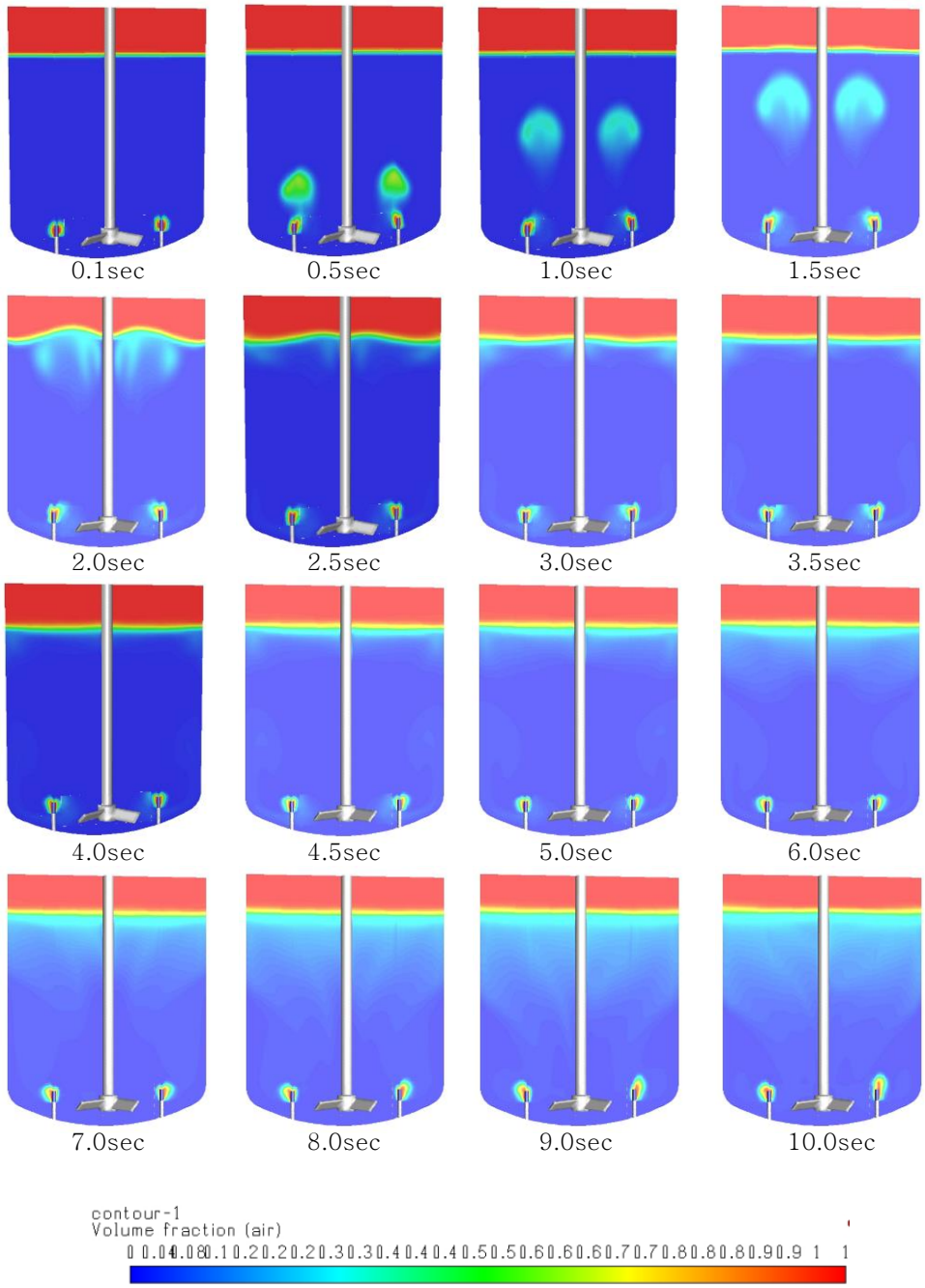
Disk Turbine 임펠러에 각각의 가스 분배기를 설치하였을 때 가스의 유동에 대해서 확인하였다. 실제 공정에서 사용하고 있는 교반탱크 모델은 가스 분산에 효율적이지 못하다는 것을 확인하였으며, Pipe 형태의 가스 분배기 2개를 설치한 모델도 Pipe 1개를 설치한 모델과 성능이 유사하다는 것을 알 수 있었다. 반면에 임펠러 하부에 설치 된 Ring 형태의 가스 분배기는 탱크 전체로 가스를 분산하는 능력이 타 모델대비 비교적 우수하며 교반탱크 내부의 전체 가스 부피총량도 약 3배 정도 높은 것을 알 수 있다. 하지만 Ring 형태의 가스 분배기 역시 임펠러 난류에 의한 분산효과는 미비한 것으로 확인되었으며, 아래의 두 가지 임펠러 형상에 대한 해석을 통하여 보다 효율적인 다상교반탱크 모델을 찾고자 한다.

2. Pitched Blade 모델의 다상유동 해석

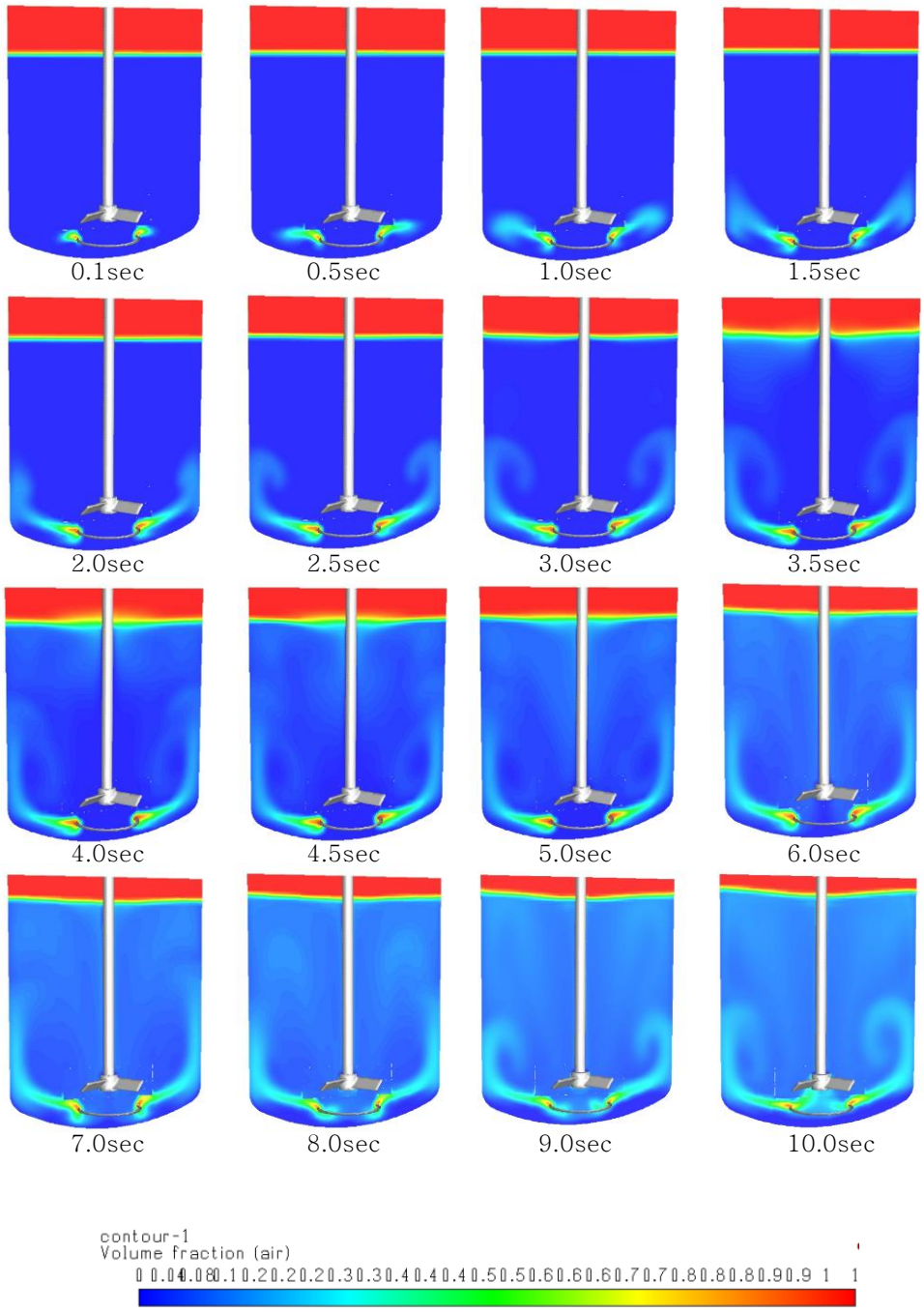
Turbine 형태의 임펠러는 Disk와 같은 원판에 블레이드가 연결되어 있어, 임펠러 하부에서 공급되는 가스가 Disk 바닥면을 따라 탱크의 회전반경으로 분산되기 용이한 구조를 가지고 있다. 반면에 Pitched Blade는 Disk가 존재하지 않기 때문에 임펠러 하부에서 공급되는 가스가 탱크의 샤프트 축을 따라 상부로 배출되기 쉬운 구조를 가지고 있다. 이와 같은 구조적 특징에 따른 가스의 유동을 확인하고자 [그림 3.12], [그림 3.13], [그림 3.14]에서 Pitched Blade 임펠러에 Pipe 형태의 가스 분배기 1,2개, 그리고 Ring 형태의 가스 분배기를 모델링하여 다상유동해석을 진행하였다.



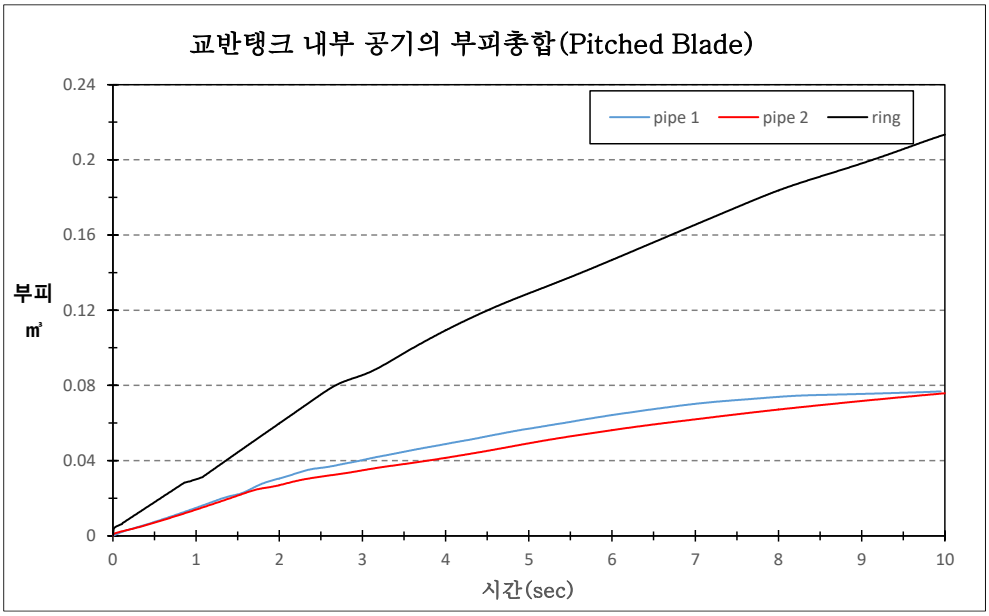
[그림 3.12] Pitched Blade + Pipe Sparger 1 유동해석결과.



[그림 3.13] Pitched Blade + Pipe Sparger 2 유동해석결과.



[그림 3.14] Pitched Blade + Ring Sparger 유동해석결과.



[그림 3.15] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합.

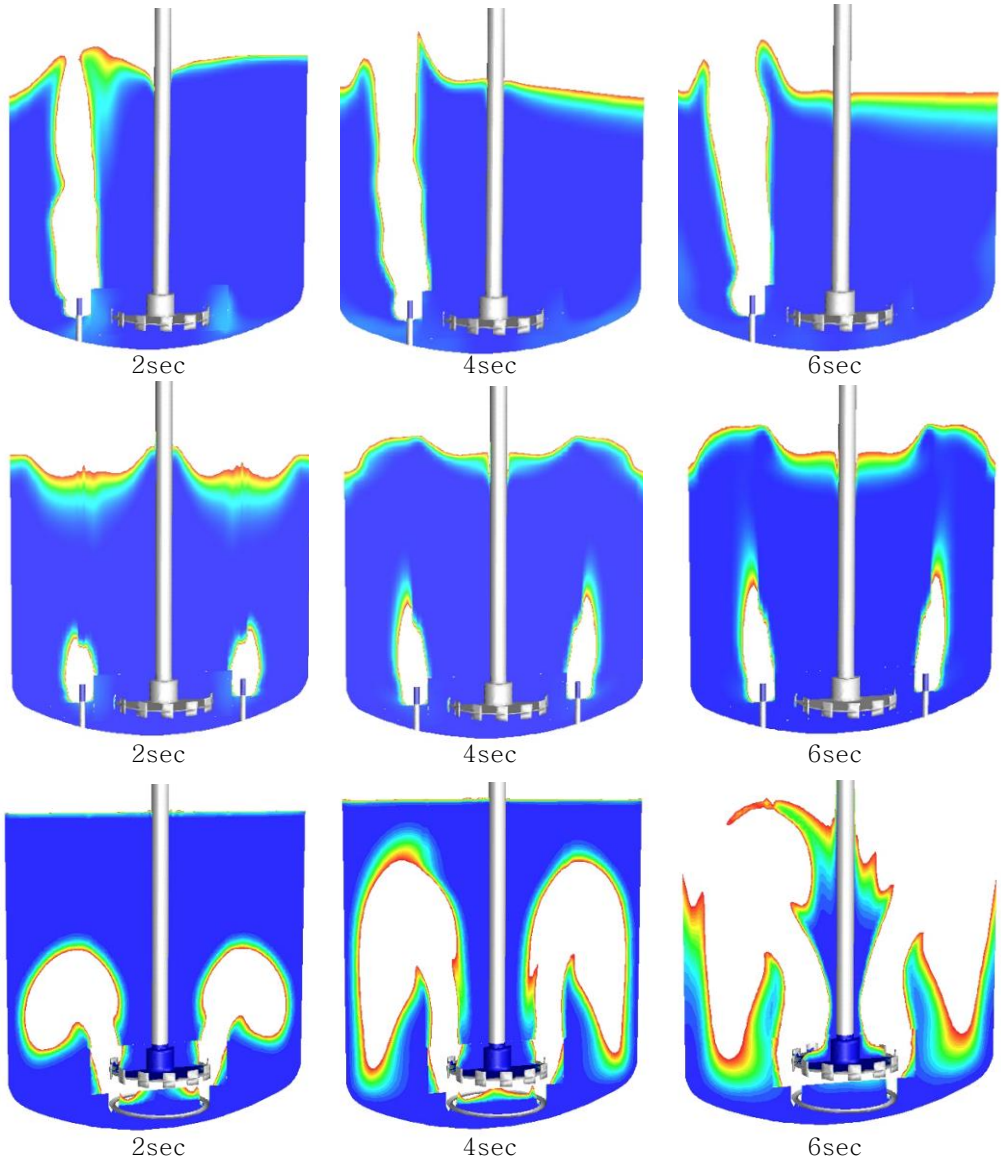
[그림 3.12]은 Pipe 형태의 가스 분배기 1개를 탱크바닥에 설치하였을 때 가스유동을 해석한 결과이다. 임펠러 난류에 의하여 공급된 가스가 탱크의 벽면으로 분산되는 뚜렷한 현상을 관찰 할 수는 없으나, 시간이 지남에 따라서 탱크내부의 공기의 체적분률이 증가하는 것을 해석을 통하여 확인 할 수 있다.

[그림 3.13]의 Pipe 2개의 모델에 대해 해석한 결과 또한 Pipe 1개 모델과 유사하게 탱크의 바닥에서 공급된 가스가 벽으로 분산되는 큰 유동을 관찰 할 수는 없으나, 교반을 진행함에 따라 탱크 내부의 공기의 체적분률이 증가하는 것을 해석을 통해서 알 수 있다.

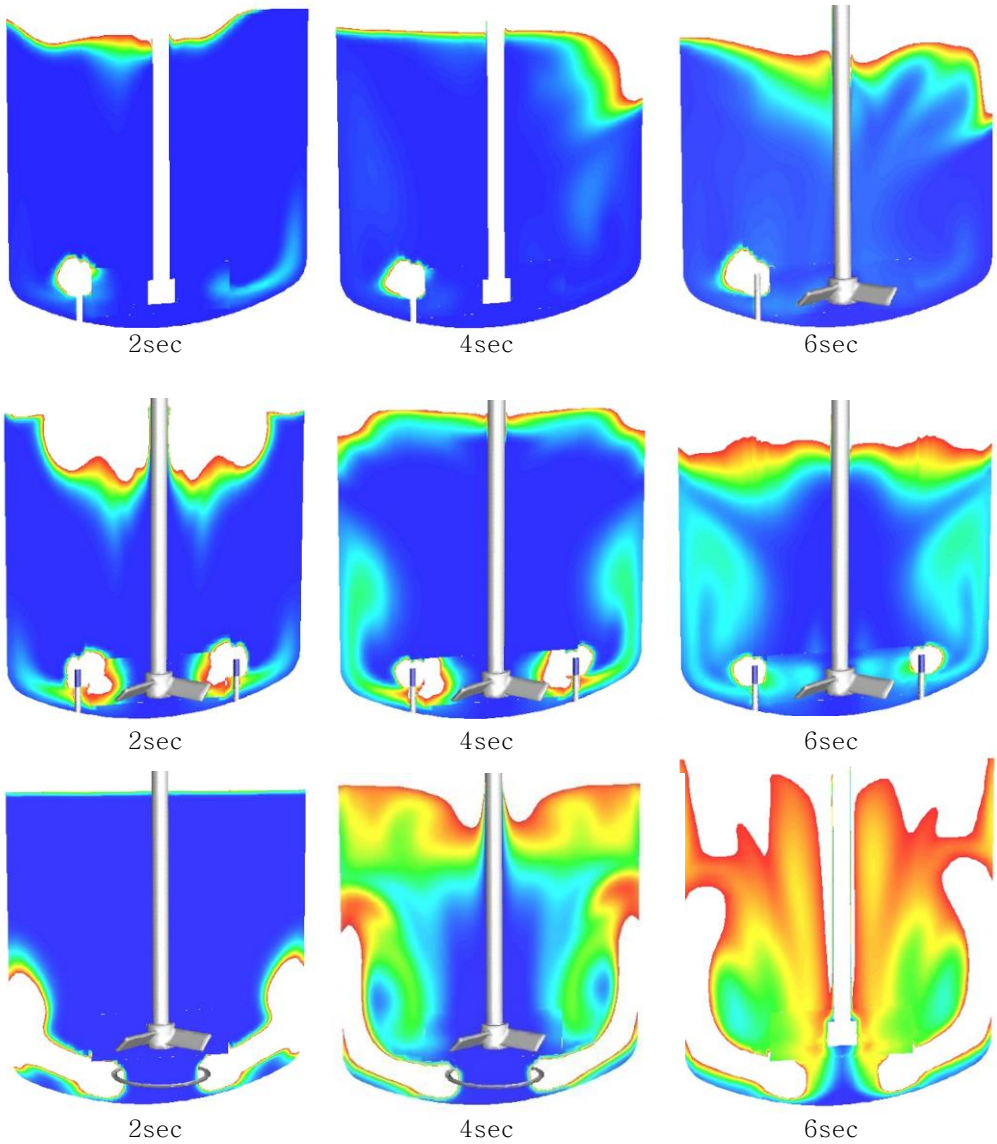
[그림 3.14]는 Ring 형태의 가스 분배기에 대한 유동해석 결과이며, 앞서 해석한 여러 모델들과는 다르게 가스 분배기에서 공급된 공기가 임펠러 난류에 의하여 탱크의 벽면으로 분산되는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 분산된 공기는 탱크의 벽면에 부딪혀 다시 탱크 내부로 유입되는 순환유동의 형상을 보이고 있다.

[그림 3.15]은 각 각의 모델 별 탱크 내부의 공기의 부피총합을 보여주는 그래프로 10초 후 Pipe 형태의 가스 분배기 모델에서의 공기의 부피총합은 약 0.075㎥을 보이고 있으며, Ring 가스 분배기는 10초 후 약 0.21㎥의 값을 보이고 있다. 이를 Disk Turbine 모델과 비교하면 Pipe형태의 가스 분배기 모델에서는 약 40% 정도 가스의 분산능력이 개선된 수치이며, Ring 형태의 가스 분배기 모델에서는 23%정도 분산능력이 개선된 수치이다. 이와 같은 값을 보이는 이유는 난류유동해석 결과에서 확인 한 것과 같이 Pitched Blade 모델이 Disk Turbine 모델 대비 난류유동에 의한 운동에너지가 약 45% 높은 값을 보이며, 난류유동이 축 하단방향으로 형성되었기 때문에 탱크 하단부에서 상부로 공급되는 가스가 탱크의 외벽으로 분산되는 효과를 갖는 것으로 판단된다.

Pitched Blade의 가스분산효과를 좀 더 자세히 파악하기 위해 탱크내부의 가스의 체적분률 값 중 0~5%의 값만을 contour map을 통해서 확인하면 Disk Turbine 대비 Pitched Blade가 난류유동으로 인하여 가스가 탱크 전체로 넓게 분산된 것을 알 수 있다. Disk Turbine은 가스 분배기에서 공급된 가스의 큰 유동 흐름 이외에 0~5% 사이의 가스 체적분률 값이 탱크 내부에 거의 존재하지 않는 반면에 Pitched Blade는 가스의 큰 유동의 흐름 이외에도 난류로 인하여 0~5%사이의 분포를 갖는 가스의 체적분률 값이 탱크 전체에 퍼져서 존재하는 것을 알 수 있다. [그림 3.16] [그림 3.17]



[그림 3.16] Disk Turbine 모델의 0~5%의 가스체적분률 해석결과.

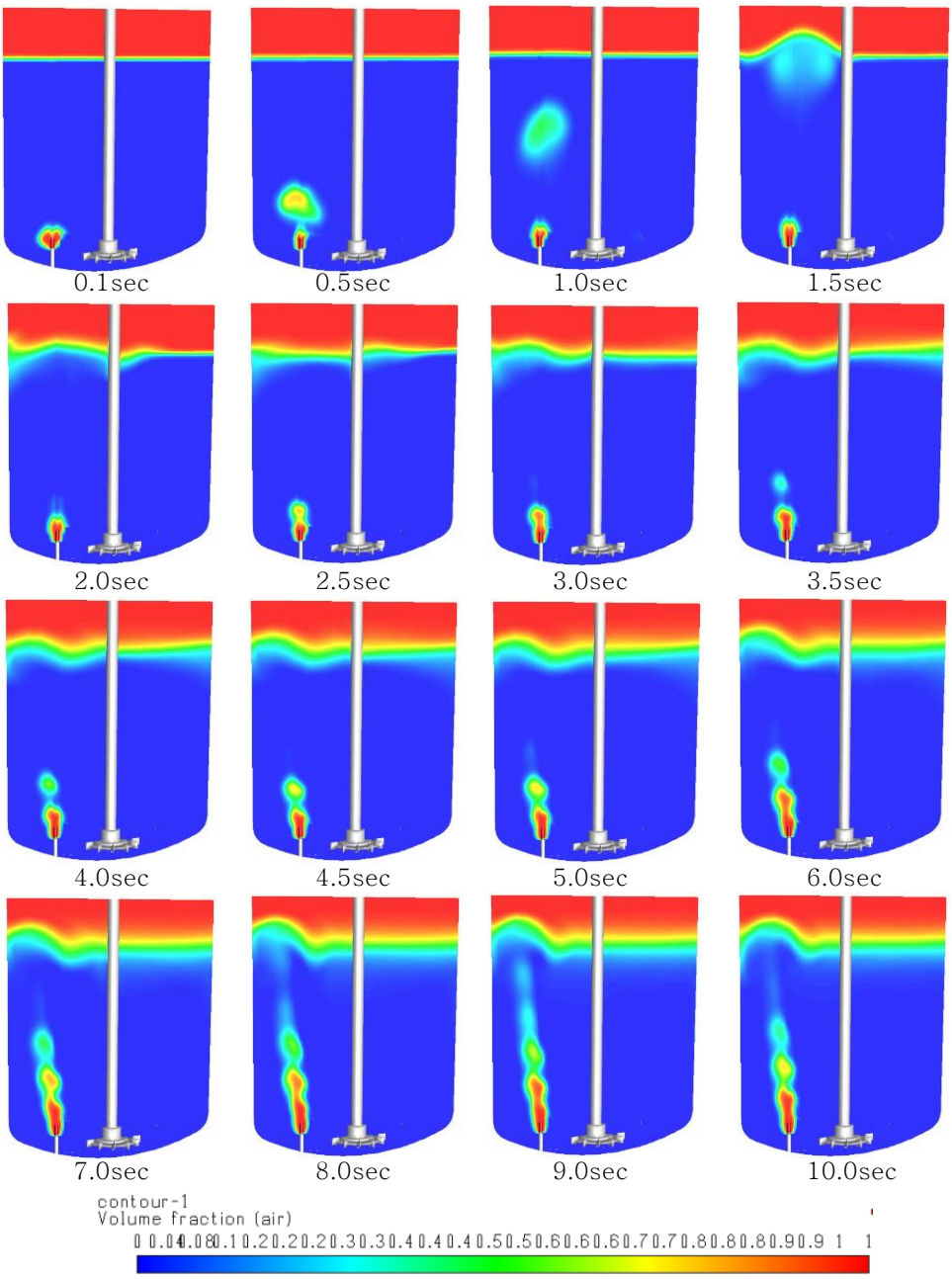


[그림 3.17] Pitched Blade 모델의 0~5%의 가스체적분률 해석결과.

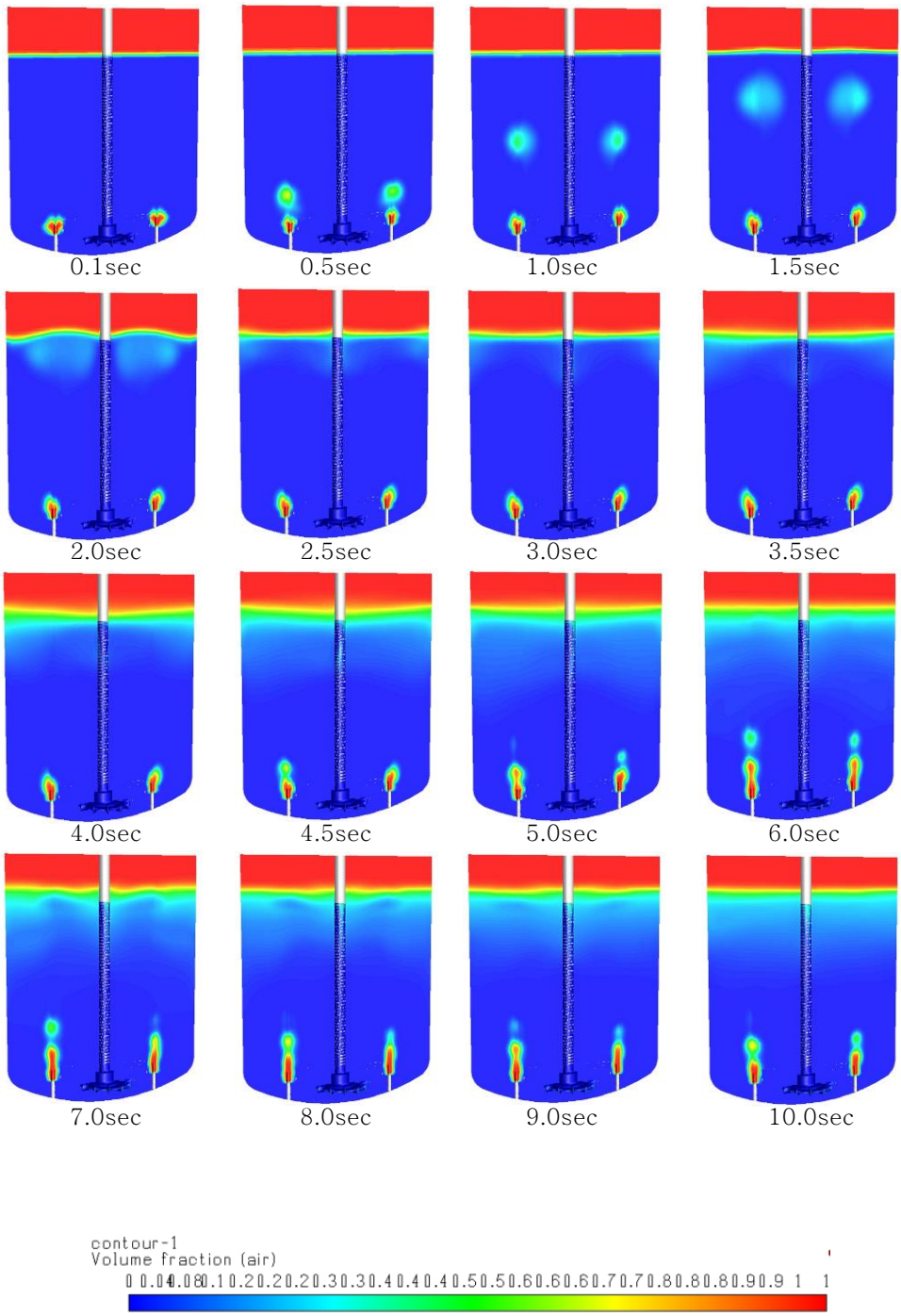
3. Rushton Turbine 모델의 다상유동 해석

아래는 Rushton Turbine 모델의 다상유동해석 결과이다.

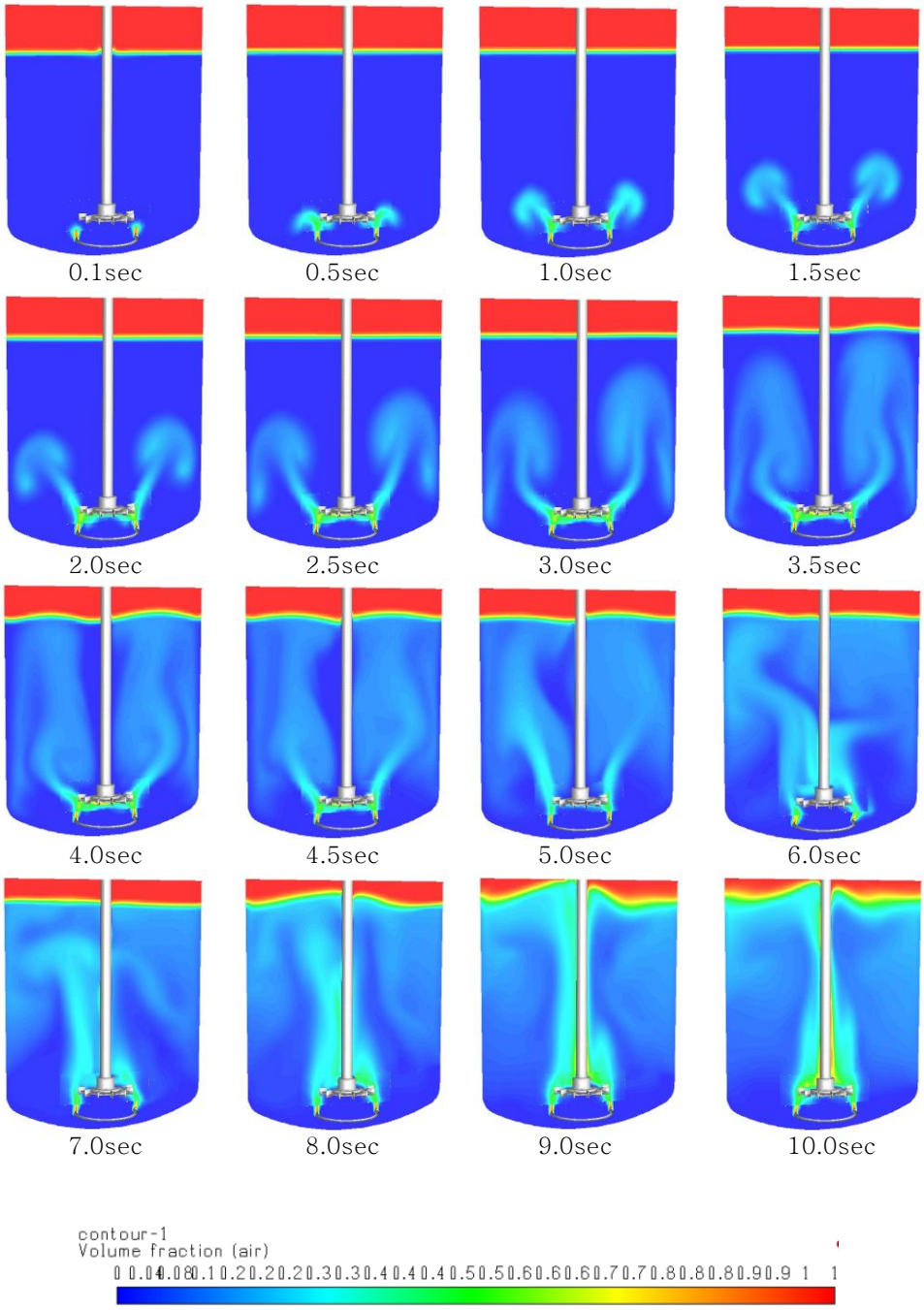
[그림 3.18], [그림 3.19], [그림 3.20], [그림 3.21]



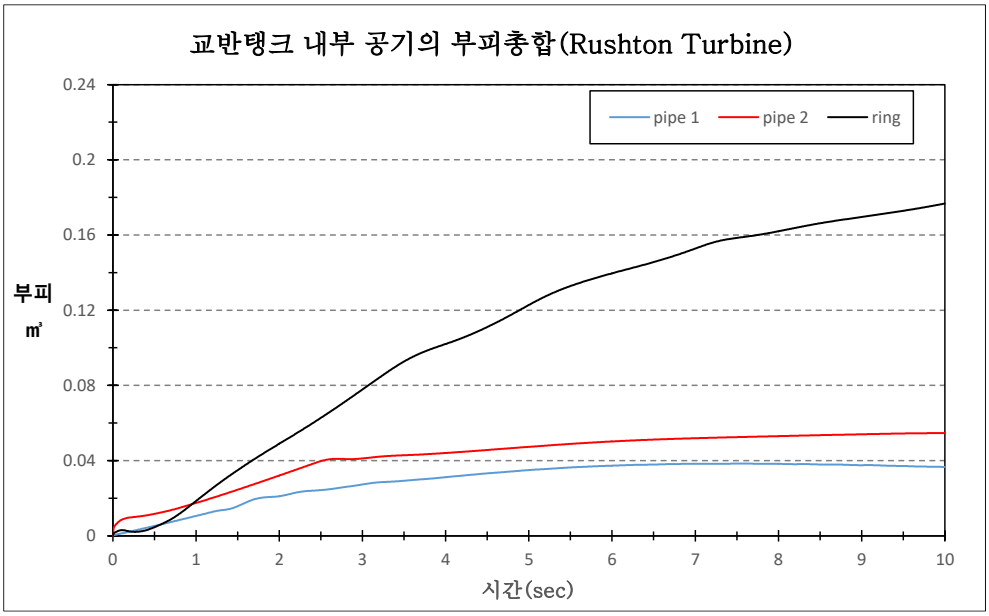
[그림 3.18] Rushton Turbine + Pipe Sparger 1 유동해석결과.



[그림 3.19] Rushton Turbine + Pipe Sparger 2 유동해석결과.



[그림 3.20] Rushton Turbine + Ring Sparger 유동해석결과.



[그림 3.21] 가스 분배기 모델 별 교반탱크 내부 공기의 부피총합.

[그림 3.18]은 Pipe형태의 가스 분배기가 1개일 때 가스유동 해석에 대한 결과이다. Disk Turbine 모델과 유사한 형태의 유동을 보이며, 가스 분배기에서 공급된 공기가 임펠러 난류에 의하여 탱크 전체로 분산되지 못하고, 탱크의 상부로 배출되는 것을 알 수 있다.

[그림 3.19]의 Pipe 형태의 가스 분배기가 2개 설치 된 모델에서도 공급된 가스가 탱크 내부로 분산되지 못하고 상부로 배출되는 유동을 보이고 있음을 알 수 있다.

[그림 3.20]의 Ring 형태의 가스 분배기는 Pipe 형태의 가스 분배기와 비교해서 탱크 내부로 공급된 가스가 임펠러의 난류에 의해 회전반경으로 분산되는 유동을 보이나, Pitched Blade 모델과 같이 분산된 가스가 탱크 외벽에 부딪힌 후 다시 탱크 내부로 유입되는 순환 유동의 형상을 보이지는 않고 있다.

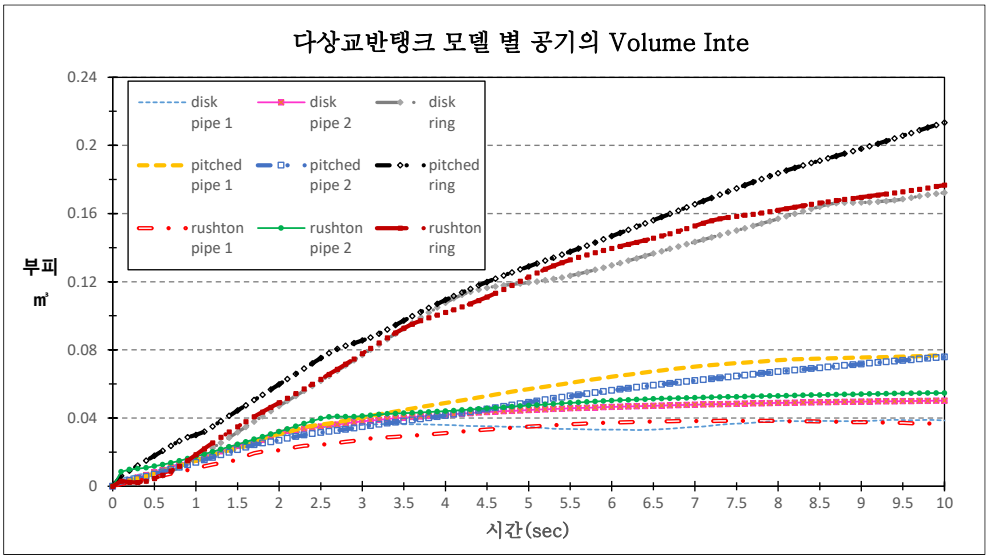
탱크 내부의 가스의 부피총합은 Pipe 가스 분배기 모델에서 약 6초 정도 교반을 진행한 후 포화되는 경향을 보이며 Pipe 1개 모델에서 부피총합은 약 0.036㎥를 보이고 있다. 그리고 Pipe 2개의 모델에서는

0.05㎥의 값을 보이고 있다. Ring 형태의 가스 분배기는 시간이 지남에 따라 가스의 총량이 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 10초 후 가스의 부피총합은 0.176㎥이다. 모든 가스 분배기 모델에 대한 부피총량의 합은 Disk Turbine 모델과 비교하여 동등한 수준이다.

Rushton Turbine 모델은 Turbine 구조로 인하여 임펠러 하부에서 공급되는 가스 분산에 효율적인 형상을 하고 있다. 뿐만 아니라 임펠러의 회전반경과 수직으로 설치된 블레이드로 인하여 유체에 큰 응력을 발생시키므로 회전반경으로 많은 토출유량을 발생시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 이번 연구에서 설계 된 Rushton Turbine 모델은 블레이드의 크기와 임펠러의 직경이 Disk Turbine과 Pitched Blade 모델보다 작게 설계되었기 때문에 임펠러 회전에 의한 유속과 운동에너지가 모두 낮은 값을 보이고 있음을 난류유동해석을 통해서 확인하였다. 이로 인하여 가스 분배기를 통해 공급되는 공기에 전달되는 응력이 약하였으며, 가스의 분산능력 또한 저하되었다.

Rushton Turbine과 같은 Disk 형태의 임펠러의 가스분산능력을 최대화 하기 위해서는 Disk에서 발생하는 전단력을 이용하여 가스를 임펠러의 회전반경으로 분산시킬 수 있어야 한다. 그러한 유동을 생성하기 위해서는 가스 분배기를 통해서 공급된 가스가 Disk에 직접 맞닿게 설계되는 것이 효율적인 방법이다. 하지만 이번 Rushton Turbine 모델의 임펠러 직경은 370 ㎜, Disk 직경은 336 ㎜로 설계된 반면, 가스 분배기의 직경은 400 ㎜로 설계되어 가스 분배기를 통해 공급된 공기가 Disk의 맞닿지 못하여 Disk의 전단력을 충분히 전달 받지 못하였기 때문에 분산능력이 저하되었다.

아래의 [그림 3.22]은 Disk Turbine, Pitched Blade, Rushton Turbine의 탱크 내부 공기의 부피총합을 종합하여 나타낸 그래프이며, Pitched Blade 모델이 Pipe, Ring 형태의 가스 분배기 모두에서 가장 우수한 가스 분산능력을 보여주는 것으로 확인되었다.



[그림 3.22] 다상교반탱크 모델 별 내부 공기의 부피총합.

[표 3.2] 다상교반탱크 모델 별 Gas Hold Rate.

구분	Disk Turbine			Pitched Blade			Rushton Turbine		
	Pipe1	Pipe2	Ring	Pipe1	Pipe2	Ring	Pipe1	Pipe2	Ring
Gas Holdup (㎥)	0.04	0.05	0.17	0.08	0.08	0.21	0.04	0.06	0.18
Gas holdup Rate(%)	2.4	3.1	10.7	4.8	4.7	13.3	2.3	3.4	11.1

제 4 장 결론

제 1 절 요약

다상교반탱크의 성능을 평가하고자 Ansys Fluent의 CFD 해석을 진행하였다. 다상유동해석을 진행하기 위하여 Eulerian 모델을 사용하였으며, 난류유동 해석을 위하여 Standard k-ε 모델을 사용하였다.

임펠러 모델 별 난류유동 해석을 진행하여 탱크 내부 유동의 속도장과 최대 유속 및 임펠러 회전영역의 운동에너지를 파악하였으며 이를 바탕으로 다상유동해석을 진행하였다. 이후 가스 분배기를 통하여 공급 된 공기가 임펠러 난류에 의하여 어떠한 유동현상을 보이는지 확인하고자 탱크 내부의 가스의 체적분률 값을 contour map을 통하여 확인하였으며 탱크 내부에 분산된 공기의 부피총합을 계산하여 임펠러와 가스 분배기 모델 별 가스의 분산능력을 평가할 수 있었다. 이번 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

첫째. 임펠러 모델 중 Pitched Blade 임펠러가 가장 큰 난류 운동에너지를 발생시키는 것을 확인하였다. 일반적으로 블레이드의 피칭각도가 증가 할수록 임펠러 부근에서 발생하는 최대 유속은 감소한다. 해석에 진행 된 Pitched Blade 모델의 블레이드 각도는 45도 피칭되어 있다. 하지만 면적이 타 모델 대비 8배 가량 넓고, 임펠러의 직경이 100㎜ 가량 길게 설계되었다. 따라서 이로 인한 임펠러 끝 단의 각속도 증가로 유체에 전달되는 응력과 운동에너지가 증가하였다.

둘째. 다상유동해석 결과 Pitched Blade 모델이 가스분산에 가장 뛰어난 성능을 보였다. 이는 해석에 사용된 Pitched Blade 임펠러가 가장 높은 난류운동에너지를 발생시켰으며, 이로 인하여 탱크에 공급된 가스에 전달되는 힘이 증가되었기 때문이다. 그리고 난류유동의 속도장 역시 가스 분배기로 45도 직접 하향하여 형성되어 있으므로 탱크상부로 배출되는 공기를 회전반경으로 분산하기 용이하였다. 반면 타 임펠러

모델의 유동의 속도장은 회전반경으로 형성되어 있으나 그 힘이 Pitched Blade 모델에 비해 약하여 쉽게 소멸되었다. 그리고 Turbine 형태의 임펠러가 가스를 분산시키기에 효율적인 구조를 하고 있음에도 불구하고 Disk의 크기가 가스 분배기의 직경보다 작게 설계되었기 때문에 공급되는 가스에 충분한 전단력을 전달하지 못하였으며, 이로 인하여 가스분산이 효율적으로 이루어지지 못하였다.

셋째, 임펠러 하부에 설치된 Ring 형태의 가스 분배기 모델의 가스 분산능력이 우수하였다. Pipe 형태의 가스 분배기는 임펠러 측면 하부에 설치되어 임펠러로부터 발생하는 응력을 충분히 전달받지 못하기 때문에 가스를 분산시키기에 더 많은 난류에너지를 필요로 하였다. 반면 임펠러 하부에 설치된 Ring 형태의 가스 분배기는 구조의 이점으로 인하여 공급된 가스가 임펠러 하단부를 직접 통과하며 난류운동에너지를 전달받아 난류유동 속도장과 동일하게 분산이 가능하였다.

향후 본 연구의 임펠러와 가스 분배기 모델에 따른 가스분산 성능을 참고로 하여 실제 공정에서 다상교반탱크 모델 설계 시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 최영욱, 최종락, 김대중, 허남건.(2013), “교반기 내 터빈 임펠러 형태에 따른 교반성능에 대한 수치해석적 연구”, 한국유체기계학회 논문집: 제16권, 제1호, pp. 47~55

2. 최영욱, 허남건, 임선영, 옥태준.(2012.11), “교반기 내 임펠러의 블레이드 형상에 따른 교반 성능에 대한 수치해석적 연구”, 한국전산유체공학회 학술대회논문집, pp 429-433

3. 김상원, 강현수 김윤제.(2015.11), “임펠러 형상 변화에 따른 교반기 성능특성 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp 3851~3856

4. 이승엽, 전현태, 남청도, 이영호.(2007.6), “교반기의 임펠러 형상 및 회전속도별 CFD 해석”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp 29~34

5. Bakker A, Smith J.M. and Myers K.J.(1994), “How to Disperse Gases in Liquids”, Vol.101, No.12

6. Harvey, P.S., Greaves, M.(1982), “Turbulent flow in an agitated vessel. 1. Predictive Model.”, Transaction of the Institution of Chemical Engineers 60, 195–210

7. Placek, J., Tavlarides, L.L., Smith, G.W., Fort, I.(1986), “Turbulent flow in stirred tanks. II. A two-scale model of turbulence.” American Institute of Chemical Engineer- ing Journal 31, 1113–1120.

8. Pericleous, K.A., Patel, M.K.(1987), “The modeling of tangential and axial agitators in chemical reactors.” Physicochemical Hydrodynamics 8, 105–123.

9. Ranade, V.V.,Joshi,J.B.,Marathe,A.G.(1989), “Flow generated by pitched blade turbines. II.Simulation using k_e model.”, Chemical Engineering Communications 81,225–248

10. Ranade, V.V.,Joshi,J.B.(1990), “Flow generated by disc turbine. PartII. Mathematical modeling and comparison with experimental data.” Transaction of the Institution of Chemical Engineers 68, 34–50.

11. Kresta, S.M., Wood, P.E.(1991), “Prediction of the three dimensional flow in stirred tanks.” American Institute of Chemical Engineering Journal 37, 448–460.

12. Ahlstedt, H., Lahtinen, M.(1996), “Calculation of flow field in a stirred tank with Rushton turbine impeller.” In: Proceedings of the Third CFX International Users Conference, Chesham, UK, 30 October–1 November, pp. 91–108.

13, Jaworski, Z., Dyster, K.N., Moore, I.P.T., Nienow, A.W., Wyszynsky, M.L.(1997), “The use of angle resolved LDA data to compare two differential turbulent models applied to sliding mesh CFD flow simulation in stirred tank.”, Re´ cent Progr_es en Ge´nie desProce´de´ s 11,187–194.

14. Scargiali, F., D'Orazio, A., Grisalfi, F., Brucato, A.(2007), "Modelling and simulation of gas–liquid hydrodynamics in mechanically stirred tanks.", Chemical Engineering Research and Design 85, 637–646

15. Bakker, A., van den Akker, H.E.A.(1994), "A computational model for the gas–liquid flow in stirred reactors.", Chemical Engineering Research and Design/Transaction of the Institution of Chemical Engineers 72 (Number A4), 573–582.

16. 김지용(2017,2), "Ansys CFD Fluent Multiphase", ㈜태성에스엔이

17. Fox, Rodney O. Marchisio, Daniele L.(2007), "Multiphase reacting flows [electronic resource] : modelling and simulation"

18. Ansys Fluent (Ansys Release Version 18.2) [Ansys Help Viewer, Fluent, Theory Guide], Ansys Inc.

19. Nienow, A. W.(1997), "On Impeller Circulation and Mixing Effectiveness in the Turbulent Flow Regime," Chemical Engineering Science, Vol. 52, Issue. 15, pp.2557～2565

20. Ranganathan, Panneerselvam ; Sivaraman, Savithri.(2011), "Investigations on hydrodynamics and mass transfer in gas–liquid stirred reactor using computational fluid dynamics", Chemical Engineering Science, Vol.66(14), pp.3108-3124

21. Cheng, D. ; Wang, S. ; Yang, C. ; Mao, Z.-S.(2017)," Numerical Simulation of Turbulent Flow and Mixing in Gas-Liquid-Liquid

Stirred Tanks", Industrial and Engineering Chemistry Research, 15 November 2017, Vol.56(45), pp.13050−13063

Abstract

Model Suggestion and Verification for Efficient Gas Dispersion in Stirred Tank Using CFD

정 성 윤(Sung-yun Jung)
Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

The Stirred tank is used to mix single-phase or multi-phase fluids using different types of rotating impeller. These stirred tanks are used for processing and chemical reactions of materials in various fields, such as food, medicine, and chemicals depending on material properties and phase. The performance of a stirred tank varies depending on the size and shape of the impeller blade and the angle at which it is pitched, creates different types of flow in the tank. And the performance of these flows can be assessed in a variety of ways.

On the other hand, assuming that there are two phases in the tank (liquid_continuous phase, gas_dispersed phase), the purpose of the mixing is to maximize the distribution of gases in the liquid present in the stirred tank. Gas injected from the gas distributor into the stirred tank is diffused and dispersed by the rotating impeller and is in contact with the liquid material in the tank. The injected gas exists making flow in the stirred tank, but the buoyancy force is applied, is released through exhaust on the top of

the tank. Therefore checking the total amount of gas (total volume fraction) and flow pattern of gas dispersion inside the stirred tank, it can assess the performance of the stirred tank that mixes multi-phase fluids.

In this study, we used Computational Fluid Dynamics (CFD) to model the stirred tank that used in chemical industry and identify the dispersion of gas by turbulence of rotating impeller. In order to design a more efficient stirred tank that optimizes the dispersion of gas, various impeller and gas distributor were modelled and analyzed by CFD.

Three types of impeller, pipe and ring gas distributors were modelled and simulated. It was assessed that Pitched Blade impeller with ring gas distributor model has most excellent performance of gas dispersion. Unlike a pipe-type gas distributor under the end of the impeller blade, the ring-type gas distributor that is located in the vertical lower part of the impeller provides a gas dispersion throughout the tank.

For the Computational Fluid Dynamics analysis technique, it used the Eulerian Multi-phase model to simulate the gas dispersion flow where gas of dispersed phase exists in liquid of continuous phase. For simulating the turbulence of liquid, Standard k-ε model was used. For Multiphase Turbulence Modeling, Mixture mode was used. MRF(multiple reference frame) model was used for simulation of rotating impeller

Keywords : Computational Fluid Dynamics, gas dispersion, stirred tank, gas-liquid multiphase flow, Eulerian model
Student Number : 2017-24308

감사의 글

쉽지만은 않은 여러 주변 환경 속에서, 예린이 임신하고 뱃속에서 자랄 때부터 출산하고, 지금까지 키우면서 누구보다 고생한 와이프에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 얼마 전 공개 석상에서 와이프에게 고맙다는 말을 전할 기회가 있었는데, 그 때 전하지 못한 말을 이 글을 빌어서 전하고자 합니다.

학업과 이런 저런 이유로 육아와 가정에 소홀하게 될 때도 있었고, 다툴 때도 있었지만 항상 먼저 이해해주고 배려해줘서 더 학업에 열중할 수 있었습니다. 고생해준 와이프 덕분에 논문도 잘 마무리 짓고, 학업도 무사히 마치게 되었습니다.

2년 동안 자기 몸 돌볼 시간도 없이, 가족 위해서 희생하느라 너무 수고했고, 무엇보다 사랑스런 우리 딸 예린이 건강하고 예쁘고 밝게 키워줘서 너무 고맙고, 앞으로는 더욱 멋지고 좋은 아빠이자, 믿음직스러운 남편이 되겠다는 다짐과 감사의 마음을 이 글을 통해서 전합니다.

그리고 항상 옆에서 큰 사랑과 관심으로 저희 가족 보살펴주신 엄마, 아버지, 장모님, 장인어른, 동생 식구들, 처형 식구들 너무 많은 도움 주셔서 정말 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

지금까지 공부하고 배운 것을 토대로 회사에 복귀하여 더욱더 많은 성과창출 하는 인재가 되도록 노력하고, 항상 주어진 소임에 책임을 다하는 성실한 아빠이자 남편이자 가족의 일원이 되도록 노력하겠습니다. 정말 감사합니다.