

반응표면 기법을 이용한 생물반응조 표면포기기 최적설계

윤정환[†]

Optimum Design of Surface Aerator Using Response Surface Method

Jong-Hwan Yoon

Abstract. In this study, we optimized the shape of the surface aerator that will be installed in a biological reactor using the response surface method. Response surfaces of mass flow rate, impeller torque, mass flow rate per impeller torque are generated and used to track the optimum shape of the aerator. MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)method is adopted to find the optimum results. By increasing the mass flow rate per impeller torque, increase of oxygen supply efficiency to a reactor is anticipated. To verify the usability of the surface aerator, PIV measurements on flow fields inside a scale-downed biological reactor model are carried out.

Key Words: Biological reactor(생물반응조), Aerator(포기기), RSM(반응표면기법), CFD(전산유체역학), PIV(입자영상유속계)

1. 서 론

생물반응조 표면포기기(biological reactor surface aerator)는 생물반응조에 대한 효과적인 용존산소 공급과 교반(mixing)에 그 목적이 있다. 대부분의 생물반응조는 장방형 형상을 가지며 하부 산기관(air diffuser)에 의한 용존산소 공급에 의존하여 포기(aeration)와 교반이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 산기관에 의한 포기 시스템은 압축공기의 전달율이 낮은 끝부분에 위치한 산기관으로부터의 용존산소 공급이 원활치 않아 반응조의 일부가 혐기(anaerobic)상태로 부패하는 경우가 빈번하다. 그럼에도 불구하고 아직까지 압축공기를 이용한 포기 시스템이 주로 사용되는 이유는 표면포기 장치의 특성상 반응조 전반에 걸쳐 고른 산소의 공급이 불가능하기 때문이다⁽¹⁾.

Fig. 1에 본 연구의 대상인 표면포기기의 형상을 나타내었다. 표면포기기는 하부 임펠러(impeller)와 상부 임펠러, 그리고 장방형 생물반응조의 형상을 고려한 흡이 있는 상부 충돌 플레이트(impinging plate), 하부

의 선회 유동을 방지하는 가이드 플레이트(guide plate)로 이루어진다. 포기 시에는 상하부 임펠러가 부착된 축을 정방향으로 빠르게 회전시켜 하부의 임펠러에서 유입된 유동이 파이프를 따라 상부로 가속된 다음, 상부 임펠러에 의해 공기 층으로 상승하여 유동이 분출된다. 분출된 유동은 충돌 플레이트에 부딪힌 다음 얇은 막의 형태로 비상한 후 생물반응조의 측면에서 자유표면의 하부로 낙하한다. 낙하시의 운동량으로 인해 유동은 자유표면을 교란시키고 자유표면 아래로 진행하며 산소의 전달과정이 이루어진다.

교반은 포기시와는 반대방향으로 축을 느린 속도로 회전하여 생물반응조 내부 유동을 혼합하는 역할을 수행한다. 상부 임펠러는 포기 시에는 하부에서 상승한 유동을 가속하는 역할을 수행하지만, 교반 시에는 수면밖에 위치하여 특별한 기능을 수행하지 않는다.

본 표면포기기는 포기시 산소전달기능과 혐기/무산소 교반기능을 동시에 가지며, 단일 장치로 모든 공정이 제어됨은 물론 기타 산기장치를 사용할 경우보다 시설이 간단하고, 이동성이 좋은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 반응표면 기법(RSM, Response Surface Method)을 이용하여 생물반응조 표면포기기 운전성능을 최적화하였다. 상용 CFD코드인 ANSYS

[†]대구대학교
E-mail : jhyoon@daegu.ac.kr

CFX V.12를 이용하여 생물반응조에 설치된 표면포기기의 유동을 해석하였으며, CFD프로그램과 Design Xplorer프로그램을 병용하여 반응표면을 생성하고 최적점을 탐색하였다.

표면포기기의 포기 및 교반 기능을 확인하게 위하여 1/5 축소모델을 제작하였으며, PIV실험을 통하여 운전 성능을 확인하였다.

2. 반응표면 기법을 이용한 생물반응조 표면 포기기 형상 최적화

2.1 반응표면 기법

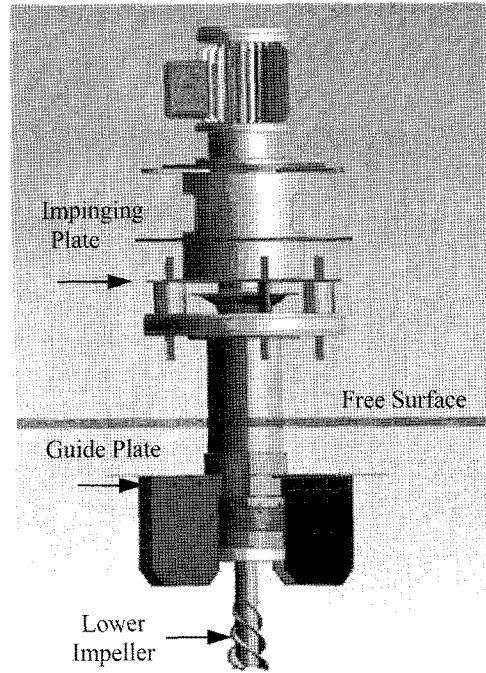
반응표면 기법은 1951년 Box와 Wilson⁽²⁾에 의해 처음 소개된 방법이다. 그 이후, 반응표면을 근사화하기 위한 적절한 실험계획법(DOE, Design of Experiments)들에 관한 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 최근 CAE의 급속한 발전에 힘입어 반응표면법과 CAE를 이용한 공학적인 문제해결에 많은 연구들이 진행되고 있다^(3,4).

반응표면 기법은 여러 가지 반응(response)들이 설계변수들에 의해 영향을 받을 때, 설계변수에 따른 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 수학적, 통계적인 기술들의 집합을 의미한다. 반응표면 기법은 반응치를 구하기 위한 실험 혹은 해석조건을 선정하는 DOE, 근사함수를 생성하기 위한 최소자승법(least square method)과 변수선택법(variable selection method), 분산분석(ANOVA) 등으로 이루어 진다.

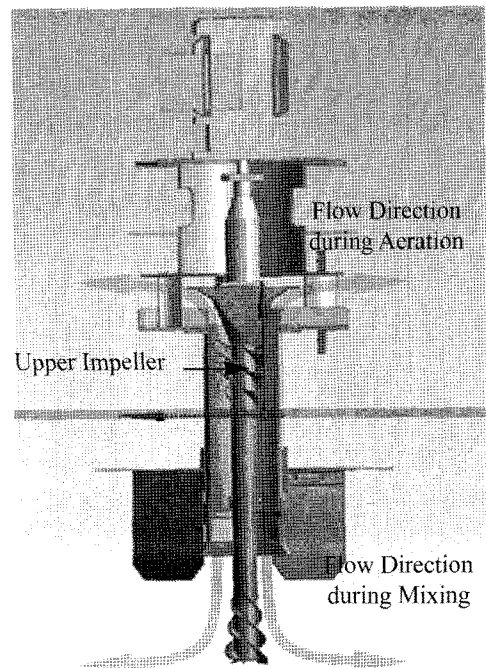
2.2 표면포기기 설계인자 도출

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 표면포기기는 상하 임펠러와 충돌 플레이트, 가이드 플레이트, 연결축, 모터 등으로 구성된다. 임펠러는 포기과 교반시 생물반응조의 유동을 제어하며, 표면포기의 성능을 좌우하는 가장 중요한 요소이다. 상부의 충돌 플레이트는 임펠러에 의해 가속된 유동의 형태를 결정하여 생물반응조의 모양에 따라 형태를 가변적으로 적용하여야 한다. 하부의 가이드 플레이트는 포기 및 교반시 유동의 급격한 교란을 방지하며, 특히 교반시 수면에서 발생하는 와류를 억제하는 역할을 수행한다.

본 연구에서는 생물반응조의 형상에 따라 새로운 설계를 필요로 하는 충돌 플레이트와 표면포기기의 성능에 직접적인 영향을 미친다기 보다는 표면포기기의 원



(a) Surface aerator assembly



(b) Inner view of the surface aerator

Fig. 1. Surface aerator in a biological reactor

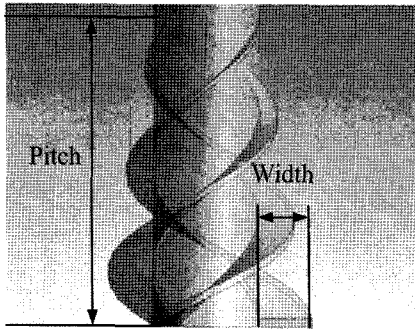


Fig. 2. Definition of pitch and width of an impeller

Table 1. Input factors and their variation ranges

| Name | Upper Pitch | Upper Width | Lower Width | Lower Pitch |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Reference | 175.00 | 30.00 | 30.00 | 175.00 |
| Minimum | 155.00 | 20.00 | 20.00 | 155.00 |
| Maximum | 195.00 | 40.00 | 40.00 | 195.00 |

활한 운전을 위한 부가적인 구조물의 성격을 지닌 가이드 플레이트는 고정된 설계값을 적용하였다. 반면, 표면포기기의 운전성능에 가장 중요한 영향을 미치는 상부 임펠러의 피치와 폭, 하부 임펠러의 피치와 폭을 설계변수로 선택하였다. Fig. 2에 임펠러의 피치와 폭의 정의를 나타내었으며, Table 1에 4가지 설계변수와 변경 범위를 나타내었다.

포기기의 산소전달 효율을 가장 정확하게 표현할 수 있는 변수는 단위 동력 및 단위 시간당 공급되는 산소량[kg/(kW hr)]이다. 실제 생물반응조에서는 통상적으로 아황산나트륨으로 산소를 완전히 제거한 후 포기기에 의해 생물반응조에 공급되는 산소량을 비정상 상태에서 측정하여 포기기의 성능을 검증한다.

본 연구에서는 CFD해석을 통해 포기기의 성능을 최적화하였다. 현재의 CFD해석수준으로는 생물반응조에 공급되는 산소량을 직접 예측하는 것은 현실적으로 난해하기 때문에 본 연구에서는 해석결과에서 표면포기기의 상부 플레이트에 부딪힌 뒤 사각형의 생물반응조로 분사되는 물의 질량유량, 임펠러가 부착되어 있는 모터 축에 가해지는 토크, 축의 단위 토크당 질량유량의 3가지 반응을 관찰하였다. 포기기에 의해 상부로 분출되는 물의 유량이 증가함에 따라 생물반응조 표면을 통한 산소 공급이 증가할 것이라는 가정은 충분한 설득력을 가진다. 또한, 단위 토크당 질량유량의 반응을

Table 2. Design points used to generate response surfaces

| No. | Upper Pitch | Upper Width | Lower Width | Lower Pitch |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 175.00 | 30.00 | 30.00 | 175.00 |
| 2 | 155.00 | 30.00 | 30.00 | 175.00 |
| 3 | 195.00 | 30.00 | 30.00 | 175.00 |
| 4 | 175.00 | 20.00 | 30.00 | 175.00 |
| 5 | 175.00 | 40.00 | 30.00 | 175.00 |
| 6 | 175.00 | 30.00 | 20.00 | 175.00 |
| 7 | 175.00 | 30.00 | 40.00 | 175.00 |
| 8 | 175.00 | 30.00 | 30.00 | 155.00 |
| 9 | 175.00 | 30.00 | 30.00 | 195.00 |
| 10 | 160.92 | 22.96 | 22.96 | 160.92 |
| 11 | 189.08 | 22.96 | 22.96 | 160.92 |
| 12 | 160.92 | 37.04 | 22.96 | 160.92 |
| 13 | 189.08 | 37.04 | 22.96 | 160.92 |
| 14 | 160.92 | 22.96 | 37.04 | 160.92 |
| 15 | 189.08 | 22.96 | 37.04 | 160.92 |
| 16 | 160.92 | 37.04 | 37.04 | 160.92 |
| 17 | 189.08 | 37.04 | 37.04 | 160.92 |
| 18 | 160.92 | 22.96 | 22.96 | 189.08 |
| 19 | 189.08 | 22.96 | 22.96 | 189.08 |
| 20 | 160.92 | 37.04 | 22.96 | 189.08 |
| 21 | 189.08 | 37.04 | 22.96 | 189.08 |
| 22 | 160.92 | 22.96 | 37.04 | 189.08 |
| 23 | 189.08 | 22.96 | 37.04 | 189.08 |
| 24 | 160.92 | 37.04 | 37.04 | 189.08 |
| 25 | 189.08 | 37.04 | 37.04 | 189.08 |

계산하여 포기효율을 개선하는 것이 CFD기법을 가장 적절하게 활용할 수 있는 방안이라고 판단하였다.

본 연구에서는 DOE과정에서 중심합성계획법(central composite design)을 이용하였다. 중심합성계획법은 반응표면분석의 가장 대표적인 DOE방법으로, 2차 모형의 제곱항들의 효율적인 추정이 가능하고, 직교 블록화(orthogonal blocking) 및 회전성(rotatability)의 구현이 용이한 장점이 있다. 중심합성계획법의 실험점은 중심점을 포함한 요인실험점과 축점으로 이루어진다. 독립변수의 개수가 k 라면, 요인실험점의 개수는 2^k , 축점의 수가 $2k$ 이다. 그러므로 전체 해석횟수는 2^k+2k +중심점에서의 해석 횟수로 정해진다. 본 연구에서는 4개의 변수를 사용하여 총 25회의 해석을 실행하였다. Table 2에 DOE를 통해 선정된 해석조건을 나타내었다. 상하 임펠러의 형상이 동일하며 피치가 175 cm, 폭이 30 cm 인 첫 번째 해석조건을 중심점으로 선정하였다.

2.3 CFD 유동해석

표면포기기의 유동해석을 위해 물과 공기의 자유표면을 고려한 이상유동 CFD해석을 수행하였다. 표면포기기 임펠러와 축의 회전을 고려하기 위하여 축과 상하부 임펠터를 포함하는 내부의 rotating frame과 외부의 유체를 모사하기 위한 stationary frame의 두 계산영역(domain)을 생성하였다.

Fig. 3은 기본 형상의 메쉬를 보여주고 있다. CFD 계산구간은 직경 4 m, 높이 1.7 m의 원통형 구조이다. Rotating frame의 메쉬 elements개수는 95만개이며, stationary frame에서는 224만개로 전체 약 320만개 정도로 설정하였다. 임펠러와 축, 파이프의 벽면에는 inflation기능을 사용하여 경계층에서의 계산 정확도를 향상 시켰다. 반응표면을 생성하기 위한 모든 해석과정에서 동일한 조건하에 메쉬를 생성하여 메쉬에 의한 영향을 최소화 하였다.

작동유체로는 물과 공기를 사용하였으며, 등온조건으로 가정하여 계산을 수행하였다. 이상유동을 계산하기 위하여 homogeneous multi-phase model과 surface

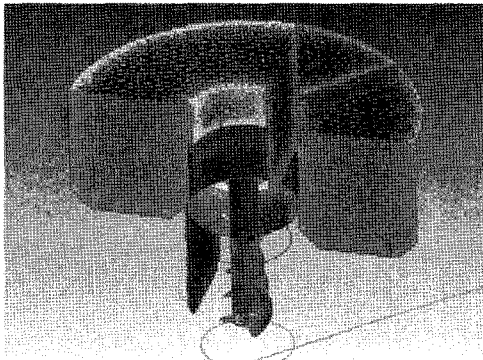
tension model을 사용하였으며, 부력조건은 density difference를 직접 계산하도록 하였다. 임펠러의 회전 속도는 2000RPM으로 고정하였으며, 두 도메인은 rotor/stator interface조건으로 연결되었다. 모든 벽면은 smooth no-slip wall로 가정하였으며, SST난류모델을 사용하였다.

2.4 반응표면 결과분석

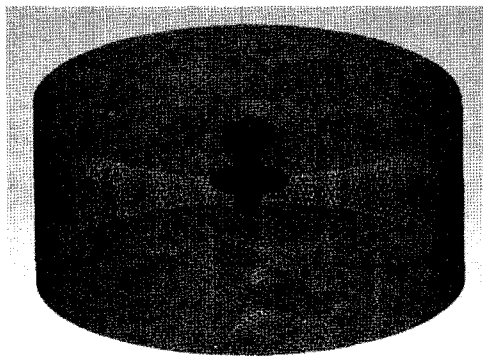
Fig. 4는 반응표면 결과 계산을 통해 구해진 민감도(local sensitivity)결과이다. 모터에 작용하는 토크는 하부 임펠러의 폭에 의해 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 폭이 증가함에 따라 토크가 증가함을 알 수 있다. 하부 임펠러의 폭 다음으로는 상부 임펠러의 폭, 하부 임펠러의 피치, 상부 임펠러의 피치 순으로 토크에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 네 가지 변수 모두 값이 증가함에 따라 토크 또한 증가하는 결과를 보인다. 결과적으로 상부 임펠러 보다는 하부 임펠러의 형상이 토크결과에 더 크게 영향을 미치고 있으며, 임펠러의 폭이 피치에 비해서 토크에 미치는 영향이 큰 것으로 결론지을 수 있다.

질량유량 결과는 토크 결과와 마찬가지로 임펠러의 폭과 피치가 증가함에 따라 값이 커지고 있음을 보여 준다. 이는 유동을 가속하는 유효 면적의 증가로 인한 것으로 판단된다. 상부 임펠러의 폭과 피치가 하부 임펠러의 형상 변수에 비해 상대적으로 많은 영향을 미치고 있으며, 하부 임펠러의 피치는 미세한 영향을 미치고 있다.

포기기의 성능을 표현하는 대표적인 값인 단위 동력 및 단위 시간당 공급되는 산소량의 예측에서 가장 중



(a) Surface meshes on the aerator



(b) Surface meshes on the outer domain

Fig. 3. Surface meshes on the basic aerator model

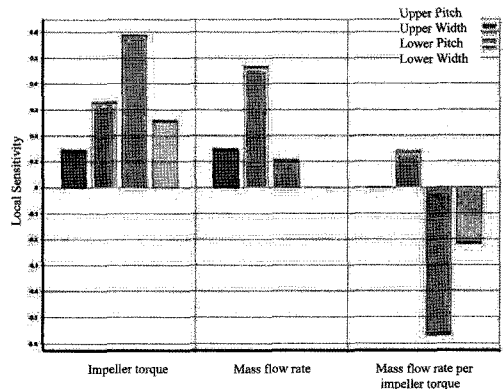
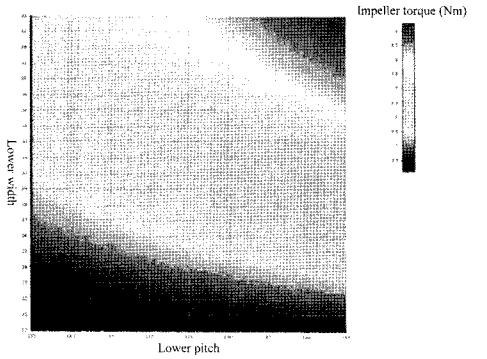


Fig. 4. Local sensitivity at the original shape

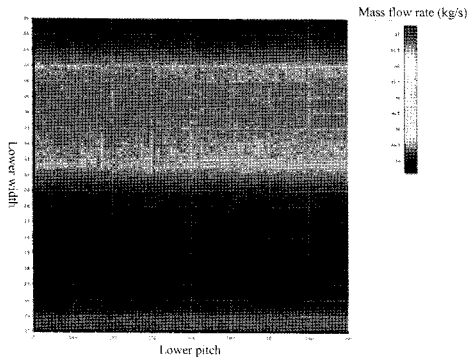
요한 인자로 생각되는 단위 토크당 질량유량의 결과는 토크와 질량유량의 결과와는 상이한 반응을 나타낸다. 상부임펠러의 폭을 제외한 나머지 세 가지 변수의 값이 증가함에 따라 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 하부 임펠러의 폭과 피치, 상부 임펠러의 피치가 증가함에 따라 토크와 질량유량이 모두 증가하지만, 질량

유량에 비해 토크의 민감도가 상대적으로 크기 때문에 기인하는 결과이다. 다른 변수들과는 달리 상부 임펠러 폭의 경우, 질량유량의 민감도가 토크의 민감도에 비해 큰 것을 확인할 수 있다.

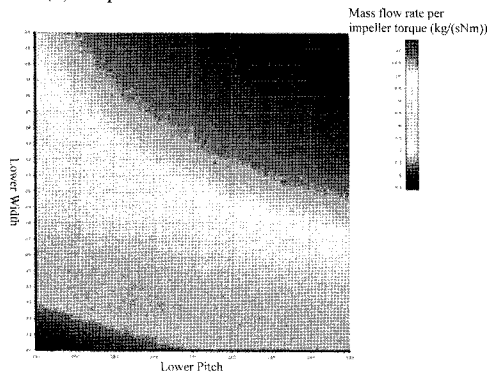
Fig. 5와 Fig. 6은 하부와 상부 임펠러의 피치와 폭



(a) Response surface of impeller torque

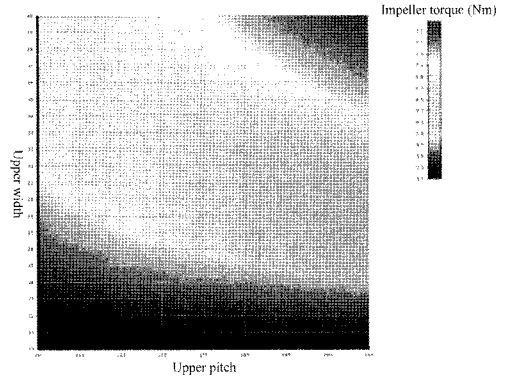


(b) Response surface of mass flow rate

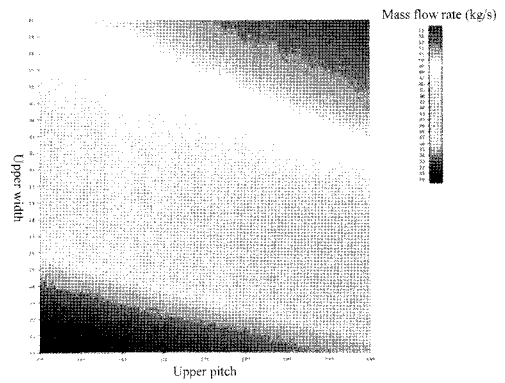


(c) Response surface of mass flow rate per impeller torque

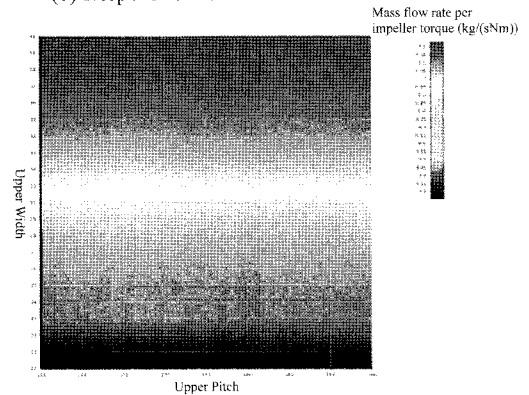
Fig. 5. Response surfaces with pitch and width variations of the lower impeller



(a) Response surface of impeller torque



(b) Response surface of mass flow rate



(c) Response surface of mass flow rate per impeller torque

Fig. 6. Response surfaces with pitch and width variations of the upper impeller

Table 3. Optimum candidates from MOGA method

| Name | Upper Pitch | Upper Width | Lower Width | Lower Pitch | Shaft Torque | Mass Flowrate | MassPer Torque |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| Original | 175.00 | 30.00 | 30.00 | 175.00 | 6.17 | 43.83 | 7.11 |
| Candidate A | 177.78 | 29.49 | 20.07 | 155.15 | 4.10 | 43.91 | 11.40 |
| Candidate B | 166.17 | 31.21 | 20.07 | 155.15 | 4.01 | 44.02 | 11.31 |
| Candidate C | 155.23 | 32.79 | 20.05 | 155.07 | 3.79 | 43.96 | 11.26 |

Table 4. Comparison between MOGA and CFD results

| Name | Upper Pitch | Upper Width | Lower Width | Lower Pitch | Shaft Torque | Mass Flowrate | MassPer Torque |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|----------------|
| MOGA | 177.78 | 29.49 | 20.07 | 155.15 | 4.10 | 43.91 | 11.40 |
| CFD | 177.78 | 29.49 | 20.07 | 155.15 | 3.65 | 43.41 | 11.89 |

변화에 따른 토크, 질량유량, 단위토크 당 질량유량의 반응표면 결과를 나타내고 있다. 민감도 결과를 통해 입력변수들이 각각의 반응표면 결과에 미치는 영향을 확인하였지만, 설계자가 원하는 최적점을 찾기 위해서는 반응표면 결과를 확인할 필요가 있다.

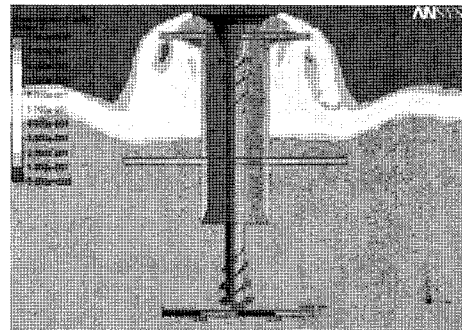
Fig. 5에 나타난 바와 같이 하부 임펠러의 폭과 피치가 증가함에 따라 토크가 증가하고 있으며, 질량유량의 경우 임펠러의 폭에만 반응하고 있다. 단위 토크당 질량유량은 폭과 피치가 가장 작은 좌측 하단 부분에서 가장 큰 분포를 보인다.

Fig. 6의 결과에서는 토크와 질량유량 모두 상부 임펠러의 피치와 폭이 증가함에 따라 큰 값을 보이고 있으며, 단위 토크당 질량유량은 상부 임펠러 폭의 증가에 따라 상단으로 갈수록 증가하고 있다. 단위 토크당 질량유량은 상부 임펠러의 피치에 영향을 받지 않고 있다. 상단 임펠러는 하단 임펠러에서 유입된 작동유체를 임펠러 하부에 음압(negative pressure)을 생성시켜 더욱 가속시킴과 동시에 상부의 충돌 플레이트로 작동유체를 상승시켜 비산되도록 해주는 역할을 수행하기 때문에 매우 중요한 설계인자인 것을 확인하였다.

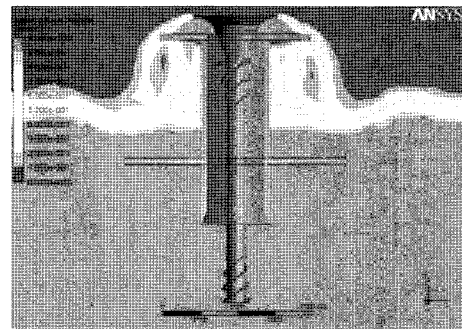
2.5 최적형상 탐색

본 연구에서는 반응표면정보를 이용하여 기준 형상과 동일한 질량유량인 44 kg/s를 만족함과 동시에 가장 높은 단위 토크당 질량유량을 갖는 최적형상을 탐색하였다. 광범위한 범위의 최적화에 적합하다고 알려진 MOGA(Multi-Objective Genetic Algorithm)최적화기법을 적용하였다. Table 3에 MOGA 기법을 이용하여 탐색된 3 가지의 최적조건을 나열하였다. 3가지 후보조건(candidate) 모두 최적의 효율을 유지하기 위하여

하부 임펠러의 폭과 피치를 최소화 한 반면, 상부 임펠러의 폭과 피치의 적절한 조합을 이용하여 설정된 유량을 유지하고 있다. 상부 임펠러의 폭이 증가함에 따라 질량유량이 증가하기 때문에 동일한 질량유량 조건에서는 임펠러의 폭이 증가함에 따라 피치가 감소하고 있음을 알 수 있다. 3가지 후보조건 중 첫 번째 형상을 최종 형상으로 선정된 후, 이를 검증하기 위하여 선정된 최종형상을 이용하여 새로이 CFD해석을 수행하



(a) Original shape



(b) Optimized shape

Fig. 7. Comparison of volume of fraction contours

였다.

Table 4는 MOGA 최적화 결과와 CFD 해석결과를 비교하고 있다. 비교결과 토크의 경우 약간의 오차를 보이지만, 전반적으로 유사한 결과를 나타내고 있다. 이를 통해 생성된 반응표면 결과가 최적화에 적합한 신뢰수준임을 확인할 수 있다.

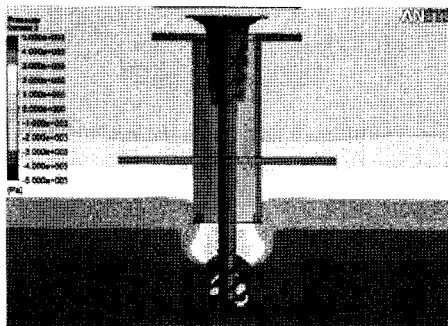
Fig. 7은 기준형상과 최적화된 형상의 VOF (Volume of Fraction) 결과를 보여주고 있다. 동일한 유량으로 설정했기 때문에 두 결과에서 큰 차이를 발견하기 어렵다.

Fig. 8의 압력 비교결과에서는 최적화된 형상에서 하부 임펠러 상부의 저압영역이 크게 감소한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 9의 속도벡터 비교결과 하부 임펠러 상단의 저압부분이 상부로 이동함에 따라 최적형상에서 파이프 입구에서의 박리가 감소하였음을 알 수 있다.

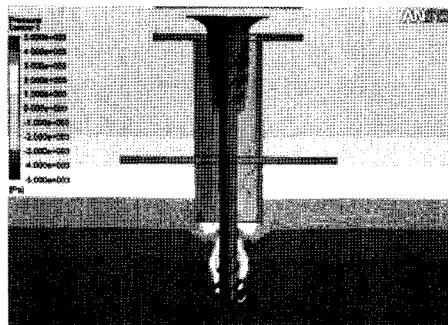
3. PIV실험을 통한 생물반응조 내부유동 측정

3.1 PIV실험장치 구성

본 연구에서는 CFD 및 반응표면 기법을 이용하여 표면포기기의 형상을 최적화하였다. 그러나, CFD를

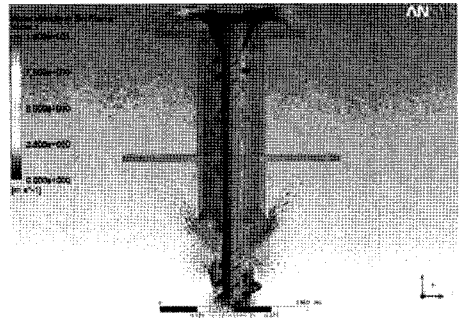


(a) Original shape

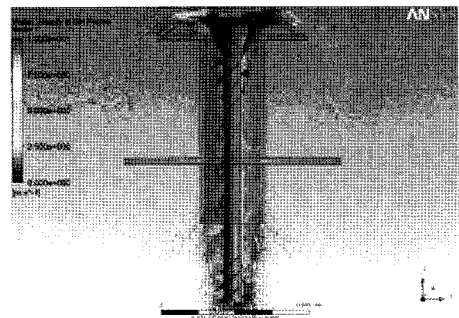


(b) Optimized shape

Fig. 8. Comparison of pressure contours



(a) Original shape



(b) Optimized shape

Fig. 9. Comparison of water velocity in stationary frame

이용한 이상유동의 해석은 현재 실험에 비해 신뢰성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 본 연구에서는 표면포기기의 1/5축소모형을 제작하였으며, 장방형의 생물반응조를 모사하기 위하여 동일한 축적의 아크릴 수조를 제작하였다.

PIV실험장치는 입자영상 취득을 위한 CCD카메라, 2차원 단면조명을 위한 DPSS레이저 및 실린더 렌즈시스템, 카메라와 레이저 펄스와의 동기를 위한 펄스생성기 등의 하드웨어와 취득한 영상에서 속도를 계산하는 PIV프로그램으로 구성되었다.

Fig. 10은 포기과정의 PIV측정결과이다. 표면포기기의 작동으로 인해 포기기 내부로 유동이 유입되고 있음을 관찰할 수 있다. 포기기의 하부에서는 강한 상승 선회류가 발생하여 생물반응조 중심축($x = 0$)에서는 상승유동이 존재하고 있다. PIV측정에는 나타나지 않지만 포기기에 의해 공기 중으로 상승한 물들이 반응조의 외각의($x = 900$) 자유표면으로 낙하하기 때문에 반응조의 외각벽면을 따라 하강하는 유동이 발생한다. 벽면을 따라 하강하는 유동에 의해 시계 방향의 외류가

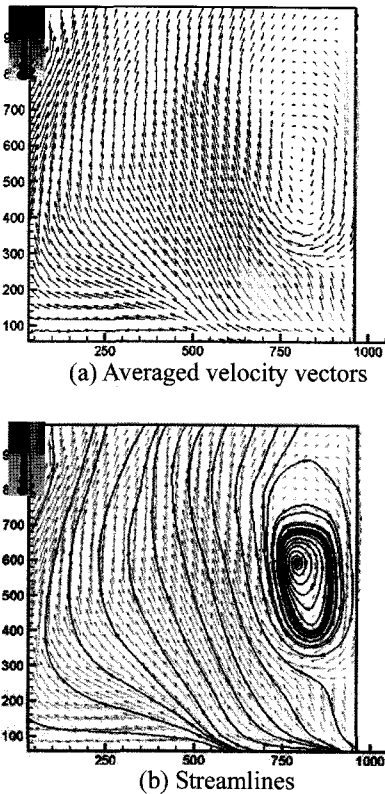


Fig. 10. Averaged velocity vectors and streamlines during the aeration process

우측 벽면의 중앙부분에서 발생하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 교반시의 반응조 내부유동을 PIV로 측정 한 결과이다. 교반과정에서는 표면포기기가 교반기로 작용하게 되며, 반응조의 중앙부분($x=0$)에서 아래로 하강하는 유동이 발생한다. 하강하는 유동은 임펠러에 의해 생성된 나선형의 선회유동으로, 하부로 이동한 유동은 반응조의 바닥에 부딪친 후 바닥 면을 따라 외측으로 진행한다. 반응조 중앙의 바닥부분에서의 유동은 분사제트(impinging jet)유동과 유사한 형태의 유동 구조를 보이며, 외부로 향한 유동은 좌우 벽면에서 상승한다. 벽면에서의 상승유동으로 인해 벽면에서 약간 떨어진 위치($y=400$)에 반시계 방향의 와류를 생성시킨다.

축소모델의 PIV유동측정을 통해 본 연구에서 최적화한 표면포기기가 장방형 생물반응조의 교반 및 포기 기능을 충실히 수행함을 확인하였다.

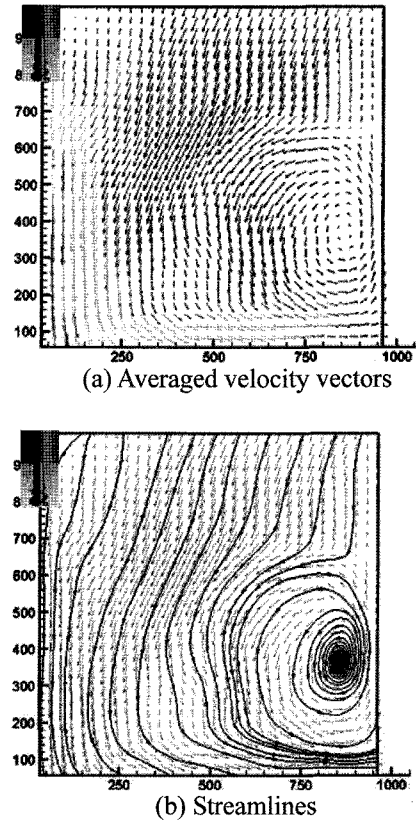


Fig. 11. Averaged velocity vectors and streamlines during the mixing process

4. 결 론

본 연구에서는 생물반응조에 적용하여 포기과 교반 기능을 동시에 수행할 수 있는 표면포기기의 형상을 반응표면 기법을 이용하여 최적화 하였으며, PIV측정 기법을 이용하여 장방형 생물반응조내의 유동을 측정하여 표면포기기의 적용성을 확인하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 포기기에 작용하는 토크는 하부 임펠러의 폭에 의해 가장 큰 영향을 받으며, 상하부 임펠러의 폭과 피치가 증가함에 따라 증가한다.
- 단위 토크당 질량유량의 최적화를 통해 산소공급 효율을 간접적으로 최적화 할 수 있다.
- 단위 토크당 질량유량은 상부임펠러의 폭을 제외한 나머지 세 가지 변수 값이 증가함에 따라 감소한다.
- MOGA기법을 이용하여 기준 형상과 동일한 질량 유량을 유지하는 조건에서 최적의 효율을 갖는 형상을

탐색하였다.

- 축소모델의 PIV유동측정을 통해 장방형 반응조에
서의 유용성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2006 학년도 대구대학교 학술연구비일부
지원에 의한 논문임

참고문헌

- 1) Burton, F. L. and Stensel, H. D., 2002, "Wastewater Engineering: Treatment and Reuse," McGraw-Hill, Newyork, pp. 315-320.
- 2) Box, G. E. P. and Wilson, K. B., 1951, "On the experimental attainment of optimum conditions," Journal of royal statistical society, Series B., Vol. 13, pp. 1-14.
- 3) Park, S., Kim, Y. and Kim, B., 2007, "A study on the noise reduction of vane-type vacuum pump mounted on alternator using design of experiments," Journal of KSTLE, Vol. 23(5), pp. 234-239.
- 4) Hong, K., Jeon, K., Choi, D., Lee, S., 2000, "A study on the construction of response surface for design optimization," Trans. of the KSME (A), Vol. 24(6), pp. 1408-1418