

발효조 내의 유동특성 최적화 설계

박상규*, 김기성*, 양희천*

The Optimum Design of Flow Characteristics in Fermentation

S.K. Park*, K.S. Kim*, H.C. Yang*

* 여수대학교 기계공학과

Abstract : A numerical simulation was conducted to investigate the effect of height position of Rushton type Impeller in the fermentation. The computational method was based on the CFX code. The simulation was performed for 3 height differences(25, 30, 35mm) between Rushton type impeller and bottom of fermentation. The instantaneous flow fields showed that the bulk flow consisted of large scale vortices. However the main flow results showed that the formation of ring vortices above and below the impeller depended on the height of the impeller.

Keyword : Rushton Type Impeller(러시톤형 임펠러), Fermentation(발효조), Ring Vortex(링형 와류), Bulk Flow(거대유동), Optimum Design(최적설계)

1. 서론

발효조는 생물분야에서 아미노산 및 단백질 등과 같은 발효생산물 생산과 직접적인 관계가 있으며, 산업설비에서는 오폐수 및 산업 폐기물 처리를 위한 설비등으로 산업분야의 활용범위를 다양하게 적용할 수 있다^[1]. 생물 발효공정분야에서는 균주의 개발, 조업조건 최적화가 중요한 요소이지만 기본적으로 발효조내의 농도를 높이기 위해서는 최적화된 발효조시스템의 개발이 매우 중요하다^[2-5].

생물분야에서 발효조의 효율 향상을 위해서는 세포고정화, 세포재순환 및 세포여과 시스템 개발 등과 같은 연구는 꾸준히 수행되어 온 반면에, 기계적으로는 발효조내의 산소의 공급시스템은 효율 향상에 직접적으로 영향을 받기 때문에 이에 대한 연구가 이루어지고 있다^[6-7].

산소는 대소산물의 생산, 단백질, 효소의 생산, 미생물 생체 유지에 필요한 에너지의 공급 등 여러 가지 생체 반응에 필수적인 요소이다. 발효조내의 미생물에 충분한 산소를 공급해 주는 것이 발효 산물의 생산속도, 미

생물의 고농도 배양, 생존도 등을 높이는 데 필수적이다. 그러나 산소는 물이나 배양액에 용해도가 매우 낮기 때문에 극히 일부분의 기상의 산소만이 액상으로 전달 될 뿐이다^[8-10].

이러한 산소 용해도의 근본적인 한계 때문에 지금까지 개발한 획기적인 고농도 발효조 시스템의 경우라 할지라도 응용 분야가 매우 제한적일 뿐만 아니라, 일반적인 대용량 발효조의 경우에 있어서도 효율적인 산소 공급 문제로 인하여 생산성에 많은 제약을 받고 있는 실정이다. 지금까지 대부분의 발효조에서는 배양액으로의 산소전달을 위해 압축공기를 사용하고 있으며 경우에 따라서는 압축 공기 대신 순수산소를 사용하기도 한다. 전자의 경우 압축공기 내의 산소는 air sparger를 통하여 기포로 형성되며, 상승하는 기포속의 산소가 발효액에 녹아 미생물이 이를 흡수하는 형태를 취하고 있다. 그러나 기포로부터 미생물까지의 산소 전달과정에서 수반되는 물질저항 때문에 air sparger를 이용한 기존의 산소 공급 시스템은 발효조에서 많은 한계점을 보이고 있는 실정이다^[12].

따라서 본 연구의 궁극적인 목적은 발효조 내에서 압축공기를 이용하여 발효배지를

hexa multi structure로 구성된 matrix를 통하여 액상으로의 산소전달 효율을 높이고자 하는 것이다. 먼저 선행연구로서 압축공기를 이용하고 발효조내의 러시톤형 임펠러(Rushton type Impeller)의 높이변화에 따른 발효조내의 최적의 유동장을 수치해석을 통하여 구하고, 추후에 유동장과 발효조내의 발효효과등의 관계를 정립하여 최적의 발효조를 개발하는데 목적이 있다.

2. 실험

Fig.1은 발효조의 시스템을 나타낸다. 스파저튜브(sparger tube), 임펠러(impeller), 워터자켓(water jacket)과 베플(baffle) 등으로 이루어졌다. 산소공급을 위해 스파저튜브(sparger tube)를 통하여 압축된 공기를 불어 넣게 되면 임펠러에 의해 기포가 미세하게 나뉘어 지게 된다.

Fig.2는 본 연구에서 최적의 5ℓ 용량 발효조 개발을 위해 사용한 수치해석의

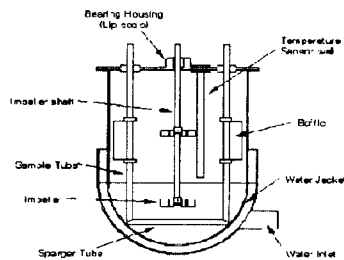


Fig. 1 Schematic diagram of fermentation system

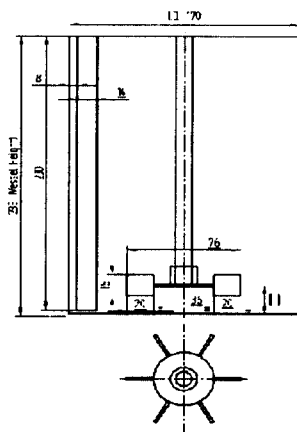


Fig. 2 Schematic details of computational domain

계산영역이다. 수치해석을 위해 상용 CFX-4 코드를 사용하였다. 베플의 수는 3개이며 러시톤형 임펠러의 수는 방사상으로 6개로 이루어 졌다. 발효조의 높이는 235mm, 내경은 ϕ 170mm이며, 230 x 14mm 크기의 오프셋베플(offsetbaffle)은 벽면에서 8mm 떨어진 곳에 고정되게 설치하였다. 임펠러의 외경은 ϕ 76mm 이다. 발효조의 바닥면에서 임펠러의 높이(H)는 25, 30, 35mm로 3가지로 변화시켜 유동장을 분석하였다. 발효조내의 물질은 다양하고 배양조건에 따라 점성이 다르기 때문에 본 연구에서는 물을 사용하였으며, 임펠러의 회전수는 450rpm으로 고정하였다.

3 결과 및 고찰

Fig.3은 임펠러의 높이가 25mm인 경우로서 임펠러의 반경과 회전속도에 의해 무차원화된 속도분포이다. 압축된 공기가 스파저를 통과하여 기포상태에서 액체와 혼합이 이루어지며 임펠러의 회전에 따른 영향으로 임펠러 주위에서의 속도가 크고, 재순환영역도 임펠러 주위에서 형성됨을 알 수 있다. 또한 러시톤형 임펠러 상부에는 촛불형상으로 길게 속도장이 형성된다. 임펠러의 높이 변화에 따라 임펠러 아래면 쪽에 형성되는 재순환유동의 영향으로 용존산소율을 높일수 있을것으로 사료된다. Fig.4와 Fig.5는 임펠러의 높이가 각각 30, 35mm인 경우의 무차원화된 속도분포이다. 임펠러의 높이가 높아짐에 따라 임펠러 상부의 재순환영역의 크기는 줄어드는 반면에 임펠러 아래쪽에 크기가 작은 재순환영역이 나타나는 것을 알 수 있다. 임펠러의 높이가 30mm와 35mm인 경우는 속도장의 차이는 거의 없는 것을 알 수 있다.

Fig.6-8은 높이 변화에 따른 속도 벡터장을 나타낸다. 일반적으로 발효조내의 거대유동(bulk flow)은 전체 유동장의 혼합형태를 지배한다. 거대유동은 임펠러 팁으로부터 야기되는 반경방향의 제트 유동이 발효조 상하로 나뉘면서 커다란 링형 와(ring vortex)를 형성한다. 높이가 25mm인 경우, 임펠러주위

의 주 유동방향이 발효조 밑면을 향하고 있으며, 속도벡터의 크기는 상대적으로 크고 윗셀 배플를 기준으로 상하로 긴 재순환영역이 나타난다. 이러한 커다란 재순환유동의 영향으로 임펠러 바로 밑에 상대적으로 크기가 작은 재순환 유동이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에 30, 35mm에서는 위에서 설명한 발효조 내 전체 유동장의 특성과 동일하게 임펠러 높이를 기준으로 방향이 서로 다른 2개의 재순환영역이 형성됨을 알 수 있다. 이는 임펠러의 높이의 증가에 따라 공기스파저에서 발생하는 기체가 액체 저항의 영향을 받아 발효조 내부의 유동장에 영향을 미치기 때문이라 사료된다. 이 영향으로 Fig.4와 Fig.5의 속도장에 속도가 낮은 영역이 커지는 것으로 사료된다.

Fig.9-11은 임펠러의 높이변화에 따른 난류운동에너지를 나타낸 것이다. 속도장의 크기와 속도구배의 영향으로 재순환영역 부근에서 난류운동에너지가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 높이가 25mm인 경우에는 임펠러 상부의 커다란 재순환유동과 임펠러 밑면의 작은 재순환유동이 상호간섭하는 영역에서 속도벡터 및 속도구배가 크게 나타나므로 난류운동에너지분포가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 높이가 30mm와 35mm인 경우에는 임펠러의 중심을 기준으로 방향이 서로 다른 2개의 재순환유동이 나타나는 영역에서 속도벡터와 속도구배가 크므로 난류운동에너지분포가 크게 나타난다.

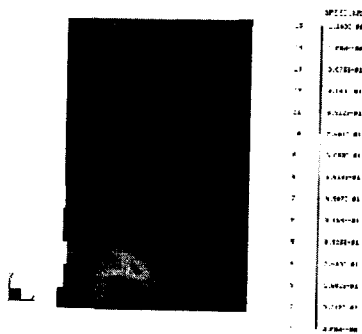


Fig. 3 Distribution of normalized speed on a vertical plane for H=25mm

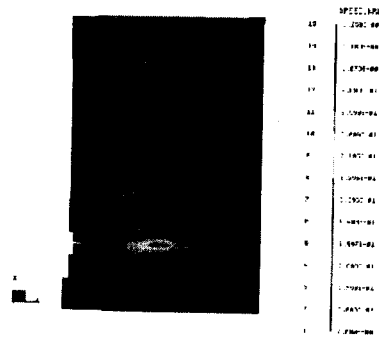


Fig. 4 Distribution of normalized speed on a vertical plane for H=30mm

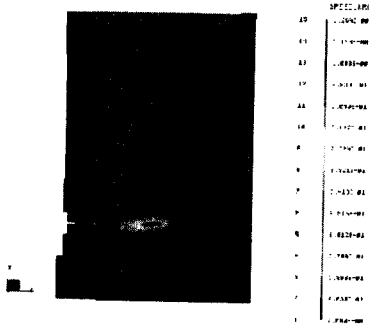


Fig. 5 Distribution of normalized speed on a vertical plane for H=35mm

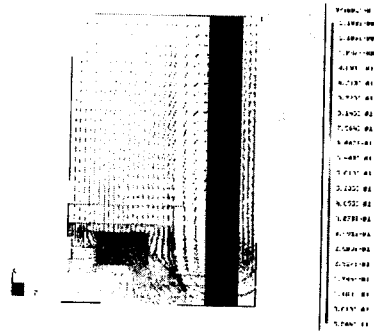


Fig. 6 Normalized velocity vectors on a vertical plane for H=25mm

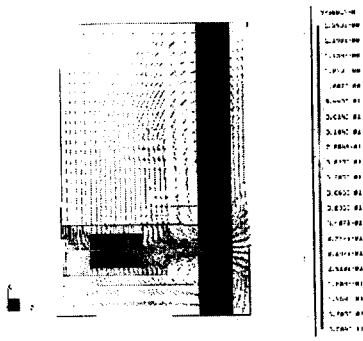


Fig. 7 Normalized velocity vectors on a vertical plane for H=30mm

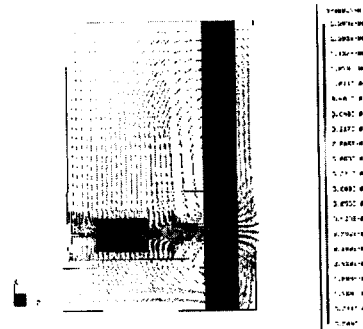


Fig. 8 Normalized velocity vectors on a vertical plane for H=35mm

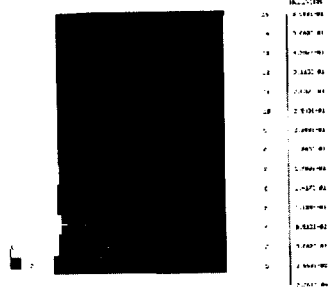


Fig. 9 Distribution of normalized turbulent kinetic energy on a vertical plane for H=25mm

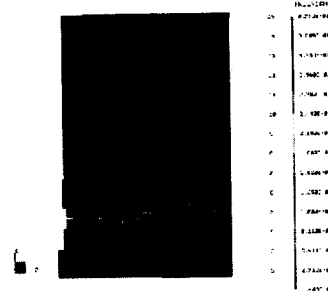


Fig. 10 Distribution of normalized turbulent kinetic energy on a vertical plane for H=30mm

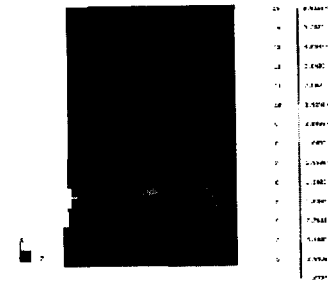


Fig. 11 Distribution of normalized turbulent kinetic energy on a vertical plane for H=35mm

4. 결론

발효조내의 리시톤형 임펠러의 높이변화에 따른 발효조내의 유동특성에 대한 수치해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 임펠러의 높이가 낮은 경우에는 임펠러 상부에 전체 유동장을 지배하는 커다란 재순환 영역과 임펠러 하단에 매우 작은 재순환영역이 나타나는 반면에, 임펠러 높이가 증가하면 임펠러 높이를 기준으로 서로 다른 2개의 재순환영역이 나타나는 것을 알 수 있다.
2. 속도장 및 속도구배가 크게 나타나는 2개의 재순환유동이 상호간섭하는 영역에서 난류 운동에너지분포가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
3. 발효조내의 공기스파저로 분사되는 기포가 물의 저항을 최소화 할 수 있는 시스템을 개발함으로써 환경분야의 각종 폐수처리조의 효율증대와 어패류 양식사업장 등에서의 응용분야에서도 적용이 가능한 발효조의 최적설계가 가능할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 여수대학교 설비자동화 및 정보 시스템 연구개발센터의 지원으로 진행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Chang, H. N., Lee, W. G. and, B. C., "Cell retention culture with an internal filter module: Continuous ethanol fermentation", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.41, pp.677-678, 1993
- [2] Park, B. G., Lee, W. G., Chang, Y. K. and Chang, H. N., "Effects of periodic backflushing with filtrate on filtration performance in an internal-filtration bioreactor". *Bioprocess Engineering*, Vol.16, pp.253-256, 1997
- [3] Lee, C. W. and Chang, H. N., "Kinetics of ethanol fermentations in membrane cell recycle fermentors", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.29, pp.1105-1109, 1987
- [4] Lee, W. G., Lee, Y. S., Chang, H. N. and Chang Y. K., "A cell retention internal filter reactor for ethanol production using tapioca hydrolysates", *Biotechnol. Tech.*, Vol.8, pp.817-821, 1994
- [5] Lee, Y. L. and Chang, H. N., "High cell density culture of recombinant *Escherichia coli* producing penicillin acylase in a membrane cell recycle fermentor". *Biotechnol. Tech.*, Vol.8, pp.837-843, 1994
- [6] Nagata, N., Herouvis, K. J., Dziewulski, D. M. and Belford, G., "Cross-flow membrane microfiltration of bacterial fermentation broth", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.34, pp.447-453, 1989
- [7] Suzuki, T., Sato, T. and Kominami, M., "A dense cell retention culture system using a stirred ceramic membrane reactor". *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.44, pp.1186-1194, 1994
- [8] Kayawake, E., Narukami, Y. and Yamagata, M. "Anaerobic digestion by a ceramic membrane enclosed reactor", *J. Ferment. Bioeng.*, Vol.71, pp.122-134, 1991
- [9] Lee, Y. H. and Taso, G. T., "Dissolved oxygen electrode". *Advances in Biochemical Engineering*, vol.13, pp.35-43, Springer, 1979
- [10] Dunn, I. J. and Einsele, A., "Oxygen transfer coefficient by dynamic method *J. Appl. Chem. Biotechnol.*, Vol.25, pp.707-713, 1975
- [11] Robinson, C.W. and Wilke, C. r., "New method for evaluation of dissolved oxygen probe response for K_{La} Determination", *Biotechnol. Bioeng.*, Vol.15, pp.755-762, 1973

- [12] Miyama, H., Uemura, Y. and Echigoya, E., "Estimation of bubble-to-liquid mass transfer rate coefficient", *J. Chem. Eng.* Vol.11, pp.456-462, 1978