다상유동해석을 이용한 파일럿규모 혼합확산장치의 운영인자 도출에 관한 연구

A Study on the Operational Parameters of Pilot Scale Diffusion Mixer using Multi-phase Flow Analysis

오 대 민
Daemin Oh

한국건설기술연구원
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received July 16, 2018; Revised August 14, 2018; Accepted August 20, 2018)

Abstract : The purpose of this study was to derive operational parameters by predicting the effect of mixed diffusion by operating the pilot-scale device's impeller applied to the actual lake. This device is installed to prevent the eutrophication of the reservoir due to the occurrence of algae. The diffusion mixer's impeller of this study has the function of raising the lower water and diffusing to the atmospheric contact and water surface by the jet flow at the water surface, and it is manufactured with a diameter of 700 mm. In this study, the multi-phase flow analysis technique was applied and the operating characteristics of the impeller were predicted under the steady state conditions and the influence radius was predicted under the un-steady condition. The maximum velocity of the impeller was about 6.78 m/s. The height and velocity vector of the free surface generated by the impeller showed a increase in the pressure level of the wing and a decrease in the water level on the suction side. The discharge flow rate was directly proportional to rpm, and the discharge amount and energy efficiency of the mode conversion were the same. Also, after 3 minutes from the operation of the water circulator, the radius of influence was 40 m. After 13 minutes, the free surface was spread about 90 m and the radius of influence was increased to about 40 m below the free surface.

Key Words : Flow Characteristics, Multi-Phase, Impeller, CFD, Diffusion Mixer

요약 : 본 연구의 목적은 녹조발생으로 인한 호소의 부영양화를 최소화하기 위해 설치하고 있는 혼합확산장치 임펠러를 실제 호소에 적용하기 위해 파일럿 규모의 혼합확산장치를 개발함에 앞서 임펠러 운전으로 인한 혼합확산영향에 대한 운영인자를 도출하고자 한다. 본 연구대상 혼합확산장치 임펠러는 하부의 물을 상승시키고 수표면에서 Jet흐름에 의한 대기접촉 및 물표면으로 확산하는 기능을 가지고 있으며 직경 700 mm로 제작된다. 다상유동해석기법을 적용하여 정상상태 조건에서 임펠러의 운전특성을 예측하고 비정상상태 조건으로 영향반경을 예측하였다. 임펠러의 최대속도는 약 6.78 m/s로 나타났으며, 임펠러에 의해 발생하는 자유표면의 높이와 속도벡터는 날개의 압력면에서 수위상승과 흡입면에서 수위가 하강하는 것으로 나타났다. 토출량은 회전수에 정비례하였고 모드전환에 따른 토출량 및 에너지효율은 거의 동일하였다. 또한, 혼합확산장치 운전 후 3분후에는 40 m의 영향반경을 나타냈고 13분 경과 후 자유표면에서 약 90 m 확산되며, 자유표면 하부에서는 약 40 m까지 영향반경이 확대되는 것으로 나타났다.

주제어 : 유동특성, 다상, 임펠러, CFD, 혼합확산장치

1. 서론

우리나라에서 상수원은 지표수에 크게 의존하고 있으며, 이중에서 호소수의 의존도가 40%를 차지하고 있다.¹⁾ 이와 같이 주요 수자원인 호소의 경우 외부의 농축산농가로부터 미처리된 축산분뇨, 화학비료, 생활하수 등이 유입되어 수질을 악화시키고 있는 실정이다.

정제수역인 호소로 지속적으로 오염원이 유입될 경우, 영양염류가 증가되어 호소는 부영양상태가 된다. 이러한 부영양화는 조류의 이상변식이 발생되며, 수리학적 구조인 저수면적, 평균수심, 체류시간과 내부오염부하(퇴적물), 외부에서 유입되는 비점오염원과 수문기상학적 특성에 의해 발생될 수 있다.²⁾ 또한 호소 내부에서 발생하는 부영양화는 수심이 얇은 호소에서 쉽게 발생되고 있다.³⁾ 이는 호소 내부 퇴적층에서 영양염류인 인이 용출되고 바람에 의해 수

직으로 혼합되기 때문이다.⁴⁾ 따라서 수심이 얇고 내부오염부하가 큰 호소에서는 외부오염을 적극적으로 차단할 뿐만 아니라 호소 내부에도 수질개선방안을 마련해야 한다. 이렇게 호소의 오염이 지속적으로 진행되고 있는 호소의 경우 생태계 파괴를 최소화하며 최소한의 인위적 간섭을 통하여 수계의 자연정화 및 생태회복기능을 유도할 수 있는 친환경적인 수질개선 방법이 요구되고 있는 실정이다.⁵⁾

현재 호소 수질개선을 목적으로 수중폭기장치를 설치 운영하고 있으며 인위적인 기계적인 혼합과 공기의 주입에 의한 방법으로 분류되며 설치가 용이하고 운전이 간편한 후자가 널리 사용되는 경향이다.⁶⁾ 하지만 공기주입을 통한 수중폭기의 경우 폭기량에 따른 운영비가 많이 소요되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 공기주입방식에 따라 표면류, 순환류, 밀도류 등을 활용한 혼합확산장치가 개발되고 있다. 특히, 수표면포기와 더불어 하부흐름을

* Corresponding author E-mail: daeminoh@kict.re.kr Tel: 031-995-0867 Fax: 031-910-0291

유도할 수 있는 혼합확산장치를 활용한 연구가 진행되고 있으며, 이를 활용한 녹조발생으로 인한 긴급한 방제활동을 지원할 수 있도록 급속혼합기술도 함께 연구되고 있다. 특히, 오^{7,8)}는 급속혼합기술을 활용한 혼합확산장치를 설계하기 위해 대기층-수층의 유동확산흐름을 해석할 수 있는 Multi-phase CFD기법으로 운전인자를 최적화하는 연구가 수행되었고, 방사성 동위원소를 활용하여 실제 수중에서의 혼합확산장치의 유동특성을 검증하였다.

따라서, 본 연구에서는 기존 연구에서 적용한 급속혼합기술을 활용한 혼합확산장치를 파일럿 규모로 제작하여 실제 호소에 적용하기 위해 다상유동흐름분석 기법을 활용하여 혼합확산장치 운전에 따른 영향분석을 예측하고자 한다. 이를 통해 유사한 수질문제를 겪고 있는 국내 호소의 조류 발생 및 오염호소의 수질개선을 하는데 기초자료로서 활용하고자 한다.

2. 실험 방법 및 재료

2.1. 실험장치

본 연구에 적용된 혼합확산장치는 아래 Fig. 1과 같이 구동부, 임펠러, 부유체, 약품주입장치 및 수위조절장치로 구성된다. 본 파일럿 규모의 혼합확산장치는 전체직경 3.5 m, 높이 3.2 m의 STS 304 재질로 제작하며, 상시 2.2 kW의 소요동력을 외부로부터 케이블을 통해 공급을 받는다. 본 장치 중 급속혼합을 위한 임펠러는 다수의 날개와 단일 케이싱으로 구성되며, 오(2018)에서 도출된 설계인자를 반영하여 직경 700 mm로 제작하였다. 임펠러 내부 핀 갯수는 11개, 핀각도는 상부는 90°/-10.8° 전면부는 -19.7°/-40.1°로 제작되었으며, 채널높이/크기는 1 : 3.9, 직경/토출구는 1 : 0.6의 비율로 제작되었다. 임펠러의 수로유도부를 증가시켜 토출면적을 증가시킬 수 있게 하고 이를 통해 유입상승유속 및 토출유속, 수질방향의 회전유속을 증가시켰으며 상부 토출부로부터 배출된 물의 재유입을 방지하기 위해 하부

유입구 길이를 길게 제작하였다.

임펠러의 회전속도는 100 - 200 rpm으로 운전하며, 6.5 m/s 이상 토출속도를 가지며(토출유량: 35 m³/min), 약 5 - 18 kg O₂/hr으로 직접 산소전달을 할 수 있다. 특히, 임펠러의 운전수위는 평상시(Mode 1)에는 수표면에서 약 10 cm 내려서 운전하고, 녹조발생시(Mode 2)에는 응집제를 투입하기 위해서 수표면보다 약 10 cm 올려서 운전한다.

2.2. 다상유동 해석기법을 이용한 혼합확산장치의 운전 특성분석

본 연구에서는 파일럿규모 혼합확산장치 임펠러의 성능분석을 위해 다상유동 해석기법인 VOF (Volume of Fraction)을 활용하여 혼합확산장치의 운전특성을 분석하였다. 다상유동해석은 CFD 상용코드인 ANSYS CFX를 사용하였다.^{9,10)}

본 연구에 적용된 다상유동해석에 필요한 혼합확산장치 임펠러의 운전조건을 Table 1에 나타내었으며, 이를 통해 파일럿 규모의 혼합확산장치 임펠러의 운전특성과 영향반경을 예측하였다. Grid 크기는 정상상태 조건의 경우, 혼합확산장치 주변으로 직경 8 m와 수심 3 m의 크기로 격자를 구축하였으며, 비정상상태 조건은 직경 300 m, 수심 7 m의 실제 호소조건과 유사하도록 격자를 구축했다. 메쉬를 생성하기 위하여 미리 생성된 3차원 캐드파일에서 추출한 step 파일을 이용하였으며, 메쉬 생성은 ANSYS의 기본 메쉬 생성 프로그램인 ANSYS mesh를 사용하였다. Inflation 기능을 적용해 임펠러 벽면의 경계층을 모사하였으며, 해석에 사

Table 1. Operating conditions of Steady and Un-steady state analysis

Analysis type	Steady state	Un-steady state
Model size	φ 700 mm	
Grid size	φ 8 m × 3 mH	φ 300 m × 7 mH
RPM	100 - 200	
Mode	Mode 1, Mode 2	Mode 2
Interface model	Frozen rotor	Transient rotor stator

Fig. 1. Composition of diffusion mixer in Pilot scale

용된 element의 개수는 200 - 300 만개 수준으로 조정하였다. 임펠러의 회전을 고려하기 위하여 임펠러를 포함하는 내부의 rotating domain과 수조를 포함하는 외부의 stationary domain 두 영역을 나누어 형상을 만들어 각각 메쉬를 생성하였다.

VOF 기법을 이용한 혼합확산장치 임펠러의 유동해석은 정상상태와 비정상상태로 구분하여 분석하였다. 정상상태 조건에서는 자유표면에서의 VOF 결과를 통해 속도벡터와 유선흐름 분석을 하였고, 비정상상태 조건에서는 시간변화에 따른 속도, 온도 및 밀도의 공간적 변화를 지속적으로 계산하여 임펠러의 회전에 따라 자유표면에서의 흐름형태에 대해 분석하였다. 또한, 혼합확산장치의 Mode 2의 기계적 성능 목표범위를 90 m로 설정하고, 이를 도달될 때까지의 시간을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파일럿규모 혼합확산장치 운전특성분석

3.1.1. 정상 유동해석을 이용한 유동흐름분석

Fig. 2는 수직 단면에서의 속도벡터 및 자유표면의 높이를 나타낸 결과이다. 가속된 유동이 회전축에서부터 약 2 - 3 m 이상 거리에 도달할 때까지 수위가 상승하는 분사형태의 유동현상을 관찰할 수 있다. 하부에서는 유동이 전체적으로 회전축 방향으로 모인 후 임펠러 유입구 쪽으로 상승하는 현상을 나타냈다. 이 때 강한 와류가 생성되어 임펠

Fig. 2. Pilot models free surface height and speed vector for vertical plane.

러의 회전방향과 동일하게 회전하며 상승하였다. 자유표면으로 분사된 유동은 하류로 진행함에 따라 주위의 유동을 지속적으로 유입시키고 있으며, 주변 유동의 유입으로 인해 임펠러에서 분사된 제트 유동의 폭이 하류로 진행할수록 증가한 후 다시 감소하는 특성을 보였다. 본 결과의 자유표면은 360도 전체의 평균값이 아니라 임의의 각도에서 관찰된 값으로 날개의 위상에 따라 달라질 수 있으며, 압력면에서는 높은 수위, 흡입면에서는 낮은 수위를 나타냈다.

Fig. 3은 정면에서 관찰한 자유표면의 높이와 자유표면에서의 속도벡터 결과이다. 임펠러 회전에 따라 날개의 압력면에서는 수위가 상승하고 흡입면에서는 수위가 하강하는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 상부에서 관찰한 자유표면의 높이와 자유표면에

(a) Free surface height

(b) Free surface speed

Fig. 3. Pilot models free surface height and free surface speed (front view).

(a) Free surface height

(b) Free surface speed

Fig. 4. Pilot models free surface height and free surface speed (top view).

서의 속도벡터 결과이다. 회전축 부분에서 속도벡터는 거의 반경방향의 성분만을 포함하고 있으며, 임펠러 내부에서 가속되어 임펠러 끝단에서 최대 속도를 갖는다. 최대속도는 약 6.78 m/s 값을 보이며, 날개 끝에서 유출되는 속도벡터 또한 반경방향 성분이 크고 원주방향 성분이 크지 않은 특성을 나타냈다.

3.1.2. 임펠러의 토출량 및 에너지효율분석

본 연구에 적용된 혼합확산장치의 Mode 1, Mode 2에 따른 임펠러의 토출량 및 축동력을 산출하였다. Fig. 5는 모드별 회전속도 변화에 따른 임펠러의 축동력 결과이며, 축동력은 회전속도의 증가에 따라 급격하게 상승하는 결과를 나타냈다. Fig. 6은 모드별 회전속도 변화에 따른 임펠러의 토출유량 결과로 모드와 상관없이 토출량은 회전수에 정비례하며 증가하였다.

Fig. 7의 축동력 당 토출량 결과는 토출량 증가에 비해 과도한 축동력 증가로 인해 회전수가 증가함에 따라 감소하는 특징을 나타냈다. 또한 상대적으로 Mode 2가 Mode 1에 비해 축동력 소모가 크지 않아 우수한 에너지 효율을 보였다. Fig. 6과 Fig. 7의 결과들을 축동력 기준으로 다시 표현한 Fig. 8의 결과에서는 Mode 변화에 관계없이 하나의 그래프로 수렴되는 특징을 나타냈다. 이 결과들은 Mode 변화에 따라 임펠러의 혼합 및 토출특성은 변화되지만 토출량

및 에너지 효율면에서는 거의 동일한 특성을 유지함을 의미한다.

3.2. 비정상 유동해석을 이용한 파일럿규모 혼합확산장치의 영향반경 예측

Fig. 9는 파일럿규모 혼합확산장치의 운전시간에 따른 자유표면의 속도크기를 나타낸 결과이다. 해석결과에서 거리를 표현하기 위하여 임펠러로부터 10 m 간격은 노란색, 50 m 간격은 초록색 십자모양을 표시하였다. 자유표면에서의 유동의 영향반경을 결정하는 여러 가지 방법들이 있지만 본 연구에서는 속도의 크기를 이용하였다. 이는 CFD 해석의 오차 수준보다 충분히 큰 값으로 정확도를 유지할 수 있으며, 실제 설치현장에서도 측정 가능한 값인 30 cm/min을 기준으로 영향반경을 설정하였다. 모든 속도 크기 결과에 나타난 방사형 일직선 구간은 유동해석 시 주기조건(periodic condition)으로 설정한 인터페이스에서 보간(interpolation)에 의해 필수적으로 발생하는 오차에 의한 것이다.

운전 1분 후의 결과는 20 m 근처의 매우 명확한 원형 영향반경을 나타내며, 2분 후에는 30 m, 3분 후에는 약 40 m 근처로 확산되고 있다. 운전시간이 지남에 따라 영향반경이 넓어짐과 동시에 경계($V = 30$ cm/min)의 형상이 완전한 원형을 유지하지 못하게 된다. 또한 경계선이 지그재그 형태로 일그러진 형태로 지속적으로 진행하고 있다. 운전 후 5

Fig. 5. Variation of shaft power by RPM.

Fig. 6. Variation of flowrate by RPM.

Fig. 7. Variation of flowrate by shaft power.

Fig. 8. Discharge flowrate per shaft power by Shaft power.

Fig. 9. Variation of free surface size with operating time.

분까지 급격하게 증가하던 영향반경은 그 이후 진동하면서 약간 느려진 속도로 증가하는 특징을 보인다. 운전 후 13분에는 90 m 근처까지 영향범위가 확대되는 것으로 나타났다. 따라서, 비정상상태에서 Mode 2 운전시 13분 이후부터 목표 성능범위에 도달 하는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 수직단면에서 운전시간에 따른 속도분포 변화를 나타낸 결과로 임펠러에서 분사된 유동이 자유표면을 따라 하류로 진행하고 있으며, 자유표면을 따른 영향반경의 확대가 자유표면 근처의 매우 얇은 영역에서 이루어지고 있음을

관찰할 수 있다.

자유표면을 따른 영향반경의 확대와 더불어 상대적으로 느린 속도로 자유표면 하부에서도 영향반경이 확대되는 현상을 확인할 수 있다. 임펠러에서부터 먼 거리에 위치한 곳에서는 영향반경이 확대되기 전에는 속도벡터가 좌우로 진동하는 특성을 보이다가, 영향반경이 확대된 후 부터는 임펠러에서 토출된 유동의 영향을 받아 유동의 형태가 고착되는 특성을 보인다. 자유표면 수 십 cm 하부에서 하류로 진행하고 있는 시계방향의 와동이 관찰되며, 와동의 중심부

Fig. 10. Variation of vertical section velocity of pilot scale diffusion mixer with operating time

Fig. 11. Variation of radius influence in pilot scale diffusion mixer.

가 하류로 이동함과 동시에 점차 수심이 깊은 방향으로 진행되는 것으로 나타났다. 또한, 위의 Fig. 11은 혼합확산장치 운전시 자유표면과 자유표면 아래의 영향반경을 나타낸 결과, 운전 후 13분 경과됨에 따라 자유표면에서는 수평으로 약 90 m, 자유표면 하부에서는 약 40 m까지 영향반경이 확대됨을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 혼합확산장치 임펠러의 급속혼합기술을 파일럿 규모로 제작하기 위해 다상유동해석기법을 활용하여 혼합확산장치의 운전특성을 분석하고 영향반경을 예측하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 혼합확산장치 임펠러에 의해 발생하는 자유표면의 높이와 속도벡터 결과에서 회전에 따라 날개의 압력면에서의 수위상승과 흡입면에서의 수위하강하는 것으로 나타났다. 또한, 임펠러 끝단에서 최대 속도는 약 6.78 m/s 값을 보이며, 날개 끝에서 유출되는 속도벡터 또한 반경방향 성분이 크고 원주방향 성분이 크지 않은 특성을 나타냈다.
- 2) 토출량은 회전수에 정비례하며 증가하는 결과를 나타냈고 상대적으로 Mode 2가 Mode 1에 비해 축동력의 과도한 증가가 없어 에너지 효율적으로 우수했다. 반면, 축동력을 기준으로 보면 모드전환에 관계없이 하나의 그래프로 수렴되고 있어 모드 전환에 따라 혼합확산장치 임펠러의 혼합 및 토출특성은 변화되지만 토출량 및 에너지 효율면에서는 거의 동일한 특성을 유지하는 것으로 판단된다.
- 3) 혼합확산장치 운전 3분 후에는 40 m의 매우 명확한 원형 영향반경을 나타냈고, 운전시간이 지남에 따라 영향반경이 넓어지나 완전한 원형을 유지하지 못하고 일그러진 형태로 지속적으로 진행되었다. 또한, 혼합확산장치 운전 13분 경과 후 자유표면에서는 수평으로 약 90 m, 자유표면 아래에서는 약 40 m까지 영향반경이 확대되었다.

Acknowledgement

본 연구는 국가과학기술연구회 창의형 융합연구사업(CAP-15-07-KICT)의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Kim, G. H., Jeong, W. H. and Choi, S. H., "Effects of Water Circulation on the Phosphorus Release Rate from Sediments in the Lake," *J. Korean Soc. Water Qual.*, **21**(6), 595~601 (2005).
2. Chung, S. W., Kim, Y. K., Lee, H. S. and Jung, Y. R., "Numerical Modeling Effects of a Skimmer Weir Method on the Control of Algal Growth in Daecheong Reservoir," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **23**(5), 581~590(2007).
3. Volenweider, R. A., "Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication," *OECD Tech. Report(DAS/CSI/68.27)*, **159**, 34(1968).
4. Choi, G. Y., "A study on the water quality purification using Solar-powered circulation," Master Thesis, Hanseo University (2009).
5. Kang, C. M. and Jung, S. Y., "Remediation of Water Quality Using Up-Flow Circulation Apparatus (UFCA) in a Reservoir," *Korean J. Environ. Health Sci.*, **34**(3) 255~260(2008).
6. Seo, D. I., Song, M. S., Hwang, H. D. and Choi, J. H., "Design Method of diffuse Bubble Plume Aerator for Water Quality Management of Reservoirs," *J. Korea Soc. Water and Wastewater*, **18**(4), 437~444(2004).
7. Oh, D. M., Kim, Y. S., Kang, S. W. and Yoo, S. J., "Optimization of the underwater radial impeller using multi-phase CFD analysis," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(4), 171~178 (2018).
8. Oh, D. M., Kang, S. W., Kim, Y. S., Jung, S. H., Moon, J. H. and Park, J. G., "Flow characteristics analysis of the decontamination device with mixing and diffusion using radio-isotopes tracer," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(5), 282~287(2017).
9. Medvitz, R. B., Kunz, R. F., Boger, D. A., Lindau, J. W., Yocum, A. M. and Pauley, L. L., "Performance Analysis of Cavitating Flow in Centrifugal Pumps Using Multiphase CFD," *Pumping Machinery*, pp. 377~383(2002).
10. Delele, M. A., Weigler, F., Franke, G. and Mellmann, J., "Studying the solids and fluid flow behavior in rotary drums based on a multiphase CFD mode," *Powder Technol.*, **292**, 260~271(2016).