

## 환경 에너지 시설 내 발효조, 소화기 및 건조기 유동해석

전용한<sup>†</sup>

상지영서대학교 소방안전학과<sup>†</sup>

## Flow analysis of fermenter, digester and dryer environmental in energy facilities

Yong-Han Jeon<sup>†</sup>

Department of Fire & Protection, Sangji-Youngseo College<sup>†</sup>

(Received December 13, 2019 / Revised December 28, 2019 / Accepted December 31, 2019)

**Abstract:** In this study, the flow analysis of fermentation tank, digester and dryer, which are the main equipment in environmental energy facilities, was carried out. Numerical analysis was carried out with the size of the actual plant, and 3D modeling program CATIA V5 R16, grid generation program Gambit, and general purpose flow analysis package ANSYS-FLUENT (v13) were used. Simulation results of the carrier gas flow analysis in the STD dryer using the computational fluid dynamics program showed that the carrier gas smoothly circulated between the shells of the dryer and the flow was uniformly distributed without stagnation or flow. It is also predicted that rotational flow due to shell rotation is active. The average flow velocity of carrier gas in the STD dryer was estimated to be about 0.196m / s, and the average temperature of the carrier gas was calculated to be 424K. Due to the relatively slow carrier gas velocity and high average temperature, the water content of the sludge can be effectively lowered.

**Key Words:** Digester, Fermentation tank, Numerical analysis, STD dryer

### 1. 서 론

교반기는 용기 안에 들어있는 단상 혹은 다상의 물질을 효과적으로 혼합하기 위한 장치로서 주로 화학공업, 생화학공업, 금속공업, 제지공업, 식품공업, 수처리 및 환경관련 공정 등 여러 산업분야에서 꼭넓게 활용된다. 특히 수처리 및 환경관련 공정에서는 소화 및 발효목적으로 사용된다. 이러한 다양한 활용분야에 따른 교반기는 사용 용도와 혼합되는 물질의 특성에 따라 사이즈 및 교반형태 그리고 교반형태에 따른 임펠러의 선정 및 설계가 이루어진다.

건조기의 경우 슬러지에 포함된 물을 제거하기 위한 장치이다. 일반적으로 슬러지의 평균 함수율은 약 80%에 달해 슬러지를 직접 소각하면 불필요한 에너지가 많이 가해지게 되고 불완전 연소가 증가

하는 등 슬러지의 소각 · 용융 처리공정에서 건조기를 이용하는 것이 공정 전체의 에너지 절약에 매우 필수적인 공정으로 부각되고 있다.

최근에는 전산해석 모델의 발전과 하드웨어의 성능향상으로 인하여 전산유체역학을 통한 성능예측 시뮬레이션이 실제 현상 및 성능을 수용 가능한 오차범위 이내에서 일치한 결과를 보이며, 따라서 상기의 교반기 혹은 건조기와 같은 다양한 목적의 기기의 설계 및 성능예측 시 전산유체역학을 이용한 시뮬레이션이 선행되고 있다<sup>[4]</sup>.

환경 에너지 시설 내 주요 기기들은 설치 지역, 장소 및 기기의 특성에 따라 운영방식이 크게 다르게 나타날 수 있어, 기기 등을 설계 단계에서 반드시 유동해석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 ○○ 시에 설치 예정인 환경 에너지 시설에 대한 주요 기기에 대한 유동해석을 실시하였다.

\* 교신저자: 상지영서대학교 소방안전학과  
E-mail: kcv76@hanmail.net

## 2. 수치해석

### 2.1. 프로그램 및 지배방정식

본 연구에서 전산해석의 수행은 해석대상의 Grid 작성과 작성된 Grid를 이용하여 계산, 검토 및 분석하였다. 전기 집진기에 대한 수치해석은 실제 플랜트의 크기로 수행하였으며, 해석에 사용된 Tool은 수치해석형상 생성을 위한 3d 모델링 프로그램인 CATIA V5 R16과, 격자생성프로그램인 Gambit, 범용 유동해석package인 ANSYS-FLUENT(v13)를 이용하였다<sup>5)</sup>.

발효조 및 소화조에 대한 해석 발효액 및 소화액에 대하여 해석을 수행하였고 이때 발효액 및 소화액에 침전물이 충분히 분산되어있는 것으로 가정하였다. 건조기의 경우 유체유동과 회전체(disk shaft 및 shell body)의 회전운동을 고려하였다. 건조기 내부의 슬러지 분포가 건조기에 미치는 영향은 전체 기체유동에 비하여 크지 않기 때문에 본 해석에서는 무시하였다. 또한 소화조, 발효조 및 건조기 내부의 유체유동을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 화학중간 화학적 반응은 없다.
- 유체와 벽 사이에서 마찰로 인한 온도변화는 없다.
- 비압축성 3차원유동으로 정상상태

위의 가정에 따라 이 계에 적용되는 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{연속방정식: } \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

운동량방정식:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

난류유동의 계산을 위하여 RNG k-ε 모델을 사용하였다.

### 2.2. 발효조 해석 조건

기계식 교반기는 사용 용도에 따른 임펠러의 선정 및 임펠러의 사이즈와 회전속도 설정이 중요하다. Fig. 1에 본 시설의 발효조로 설치 될 기계식 교반기의 개략도 및 격자 형상을 나타내었다. 발효조 하부 흡입관에서 빨아들인 내부 발효액을 볼테스 펌프를 이용하여 상부의 토출관으로 순환시킨다.

교반기 내부는 전체적인 사이즈가 크고 상대적으로 구경이 작은 노즐과 임펠러의 회전부로 구성된 복잡한 시스템이기 때문에 정확한 해석을 위해서는 충분한 수의 격자로 구성되어 져야 한다. 따라서 노즐 주변에 보다 작은 격자를 많이 배치하였으며, 그 주변부에서 멀어질수록 격자사이즈를 성장시켰다. 격자의 종류로는 신뢰도가 가장 높은 정렬 다각형 구조의 육면체(hexahedral)격자를 이용하여 형상을 재현하였다. 또한, 교반기의 벽과 경계면에서 일어나는 물리적 특성이 교반기의 회전 유동에 큰 영향을 미치게 되므로 벽면 및 경계면의 정확한 계산을 위해 경계층레이어를 사용하였으며, 노즐 및 교반기 내부 격자수는 약 480,000개 이다.

교반기 내부 격자를 hexahedral 격자를 이용하였기 때문에 Gradient interpolation 방법은 Green-Gauss Cell-Based 방법을 사용하였으며, 압력에 대한 Interpolation은 가장 안정적인 Standard방법을 사용하였다. 또한, 기타 운동량 및 난류 관련식에 대한 Interpolation은 정확도를 향상시키기 위하여 Second-Order Upwind로 계산하였다.

교반기 내부 유동해석의 전산해석에 대한 수렴조건은 mass imbalance < 10<sup>-6</sup>, 연속방정식, 운동방정식 및 난류관계식의 residual 값이 10<sup>-3</sup> 이하로 하였다.

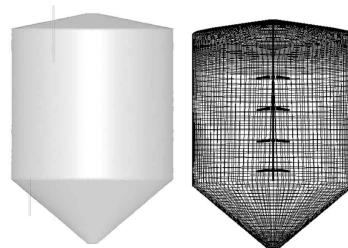


Fig. 1 Mechanical stirrer shape and lattice for fermenters

### 2.3. 소화조 해석 조건

노즐식 교반기는 교반 및 혼합 효과를 최대로 하기 위한 노즐의 배치관계로 인해 내부 배관의 위치 및 노즐의 각도 및 위치 설계가 중요하다. Fig. 2는 본 연구에서 해석한 노즐식 혼기성 소화조의 내부 및 외부 형상을 나타낸 것이다. 내부 소화액을 순환시키기 위한 두개의 흡입구가 소화조 하단에 위치하며 각각의 순환출구는 외부에 설치된 펌프를 통하여 상응하는 토출구로 소화액을 펌핑 시킨다. 이러한 순환과정을 통하여 교반을 소화조 하부에 침전물이 생기는 것을 방지하고, 교반을 최대화 할 수

있도록 하였다. 소화 하부의 토출관은 회전유동을 최대화하기 위하여 약 120° 각도로 대칭적으로 위치한 세 개의 노즐에서 분배된다. 3분할로 배치된 세 개의 노즐은 교반기 내부의 회전유동 및 중심부의 교반을 최대화하기 위하여 설계하였다. 또한 하부 침전을 방지하기 위하여 하부에서 흡입된 소화액은 상부 노즐을 통하여 순환되도록 하였다.

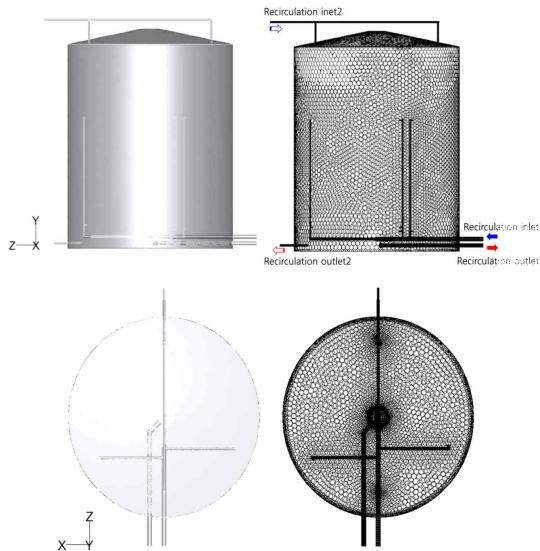


Fig. 2 Digester shape

노즐식 교반기인 소화조 내부의 격자 역시 발효조와 같은 방식으로 구성하였으며, 격자의 종류로는 복잡한 형상에 대해 해석결과가 보다 정확한 비정렬 다각형 구조의 폴리헤드럴(Polyhedral) 격자를 이용하여 형상을 재현하였다. 노즐 및 교반기 내부 격자수는 약 710,000개이다.

### 2.3. 건조기 해석 조건

IDD건조기는 혼합 및 건조 효과를 최대로 하기 위한 상부 캐리어가스 입구의 배치와, 내부 디스크 형상의 설계가 중요하다. Fig. 3은 해석을 위한 IDD 건조기의 내부 및 외부 형상을 나타낸 것이다. 4열의 disk shaft가 배열되고 각각의 disk가 서로 엇갈려 교차되어 슬러지가 디스크에 쌓이는 것을 방지한다. 또한 캐리어가스가 슬러지와 최대한 접촉할 수 있도록 회전유동을 발생시킨다.

IDD건조기의 내부는 디스크 두께방향으로 엣지에서의 미세한 격자가 필요한 반면 형상 전체적으

로는 사이즈가 큰 형상이기 때문에 보다 정확한 해석을 위해 많은 양의 격자가 필요하다. 이러한 이유로 Size function 기능을 이용하여 디스크 주변에 작은 격자를 보다 많이 배치하였으며, 그 주변부에서 멀어질수록 격자사이즈를 성장시켰다. 격자의 종류로는 복잡한 형상에 대해 격자 수 조절이 용이한 사면체(Tetrahedral) 격자를 이용하여 형상을 재현하였다. 노즐 및 교반기 내부 격자수는 약 1,866,000개이다.

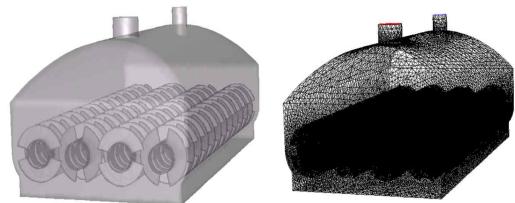


Fig. 3 IDD analysis geometry and grid geometry

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 발효조

Fig. 4는 발효조 하부에서 상부로의 수직 축방향의 normal한 단면들 (수평단면, Y=2, 4, 6, 8, 10, 12m)에 대한 속도분포 contour 및 각 단면에서의 평균을 나타낸 것이다. 발효조 내부 전체 volume 영역에 대한 평균속도는 0.2426m/s로 나타났고, 발효조 내부 전체적으로 고른 유속을 나타내고 있다. 발효조 내부 평균속도가 활성 슬러지의 최저 침강속도인 0.008m/s 이상이므로 슬러지의 적체도 없을 것으로 나타났다. Fig. 4에서 수직단면 전체에 고른 유동이 형성되는 것을 확인 할 수 있다. 특히 임펠러 수직 하단에서 가장 느린 유속분포가 보이도록 설계되었기 때문에 침강된 협잡물들은 임펠러 수직하단으로 모이게 되고 침강된 협잡물을 따로 협잡물 흡입 펌프를 통하여 흡입 시킬 수 있다.

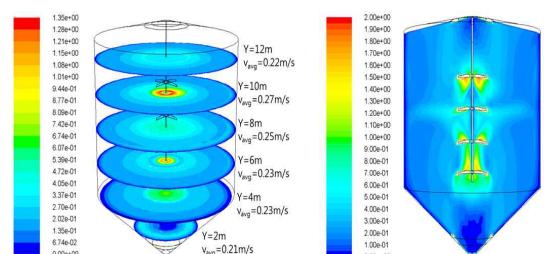


Fig. 4 Fermenter internal velocity vector (m/s)

Fig. 5은 속도에 대한 등가면(iso-surface)를 나타낸 것으로 각각  $0.01\text{m/s}$  및  $0.5\text{m/s}$ 에 대한 등가면을 나타내었다. 특히 원쪽의  $0.01\text{m/s}$ 에 대한 등가면은 deadzone을 가시적으로 나타낸 것으로 no-slip 경계 조건에 따른 소화조 내벽을 제외하고, 임펠러 하부의 협잡물 흡입펌프 구간에 deadzone이 미약하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 5의 오른쪽 등가면은 임펠러의 회전에 의한 주변의 빠른 유속을 가시적으로 보여주고 있다.

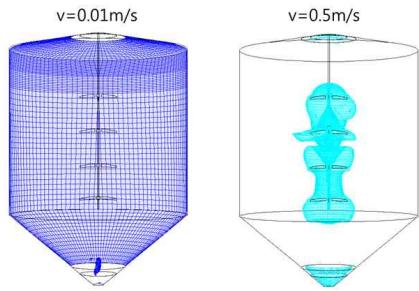


Fig. 5 Fermenter internal speed iso-surface

### 3.2. 소화조

소화조 내부 유동에 대한 pathline을 Fig. 7에 나타내었다. 하부 토출관에 연결된 3개의 수직관과 수직관에 부착되어있는 노즐들에서 시작된 회전유동이 매우 활발히 나타나는 것을 pathline을 통하여 명확히 확인할 수 있다.

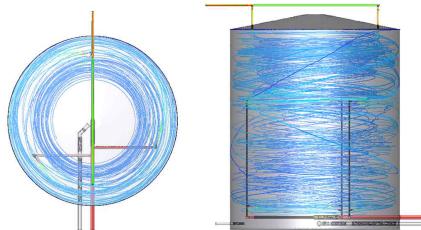


Fig. 6 Pathline of fluid in the digester

Fig. 7은 소화조 하부에서 상부로의 수직방향에 normal한 수평단면들( $Y=2, 6, 10, 12, 14, 18\text{m}$ )에 대한 속도벡터 및 각 수평단면에 대한 평균속도를 나타내었다. 전체 유체영역에 대한 유동속도는  $0.6641\text{ m/s}$ 로 예측되었다. 소화조 내부의 유동은 노즐부를 제외한 모든 영역에서 고른 유속이 나타났고, 평균 유속이 활성 슬러지의 최저 침강속도인  $0.008\text{m/s}$  이상이므로 슬러지의 적체도 없을 것으로 사료된다.

특히 소화액이 순환 공급되는 하부 및 상부 노즐 근처에서 강한 회전유동을 발생시키는 것을 확인 할 수 있다.

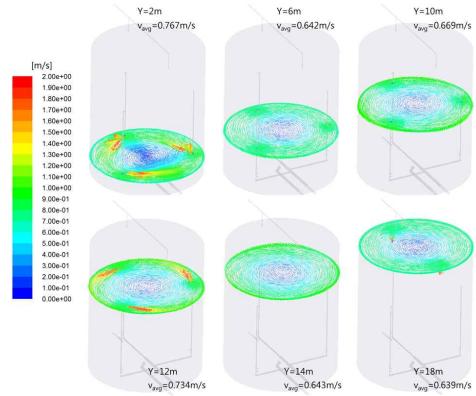


Fig. 7 Speed distribution inside digester (m/s)

Fig. 8은 소화조 내부의 수직단면에 대한 속도분포를 나타낸 것으로 전체적으로 고른 유속 나타났고 특히 노즐에서 분사되는 소화액의 회전유동으로 인하여 소화조 중심부 보다 바깥부분의 속도가 더 높은 분포를 확인 할 수 있다. 이러한 속도분포 경향은 소화액이 조 내부에서 회전운동을 통하여 충분히 교반되었으며, 추가적으로 소화조 벽면의 파울링을 낫출 수 있다. 또한 소화액의 순환을 위한 하부 흡입관이 유속이 느린 소화조 하부의 중심에 위치하고 있기 때문에 침전물의 발생을 근본적으로 방지하는 것을 확인 할 수 있다.

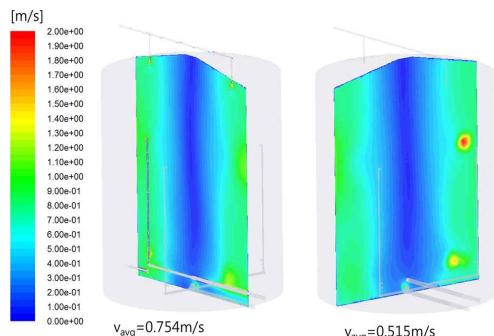


Fig. 8 Speed distribution inside digester (m/s)

### 3.2. 건조기

IDD내부 캐리어가스의 유선을 Fig. 9에 나타내었다. 캐리어 가스는 디스크 사이를 원활이 이동하

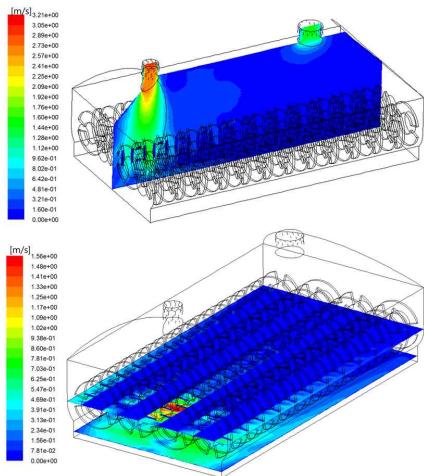


Fig. 9 Carrier gas velocity distribution in vertical and horizontal cross sections

여 순환하고, 디스크의 회전운동에 entrain되어 함께 회전하는 경향도 나타내고 있다. 이러한 경향은 슬러지 투입 시 슬러지와 혼합되어 우수한 물질전달 및 열전달 효율을 나타낼 수 있다.

Fig. 9에는 IDD내부 캐리어가스의 속도분포를 각각 x, z축의 중앙단면에 대하여 나타내었다. IDD 내부 x축 중앙 단면(수직단면)의 캐리어가스 평균 속도는 약 0.31m/s이고 maximum velocity는 캐리어 가스 노즐에서 약 3.2m/s로 나타난다. 반면 디스크 중심부의 z축 단면 (수평단면)의 평균속도는 약 0.073m/s로 나타났고, 이때 최고속도는 약 1.56m/s로 나타난다.

Fig. 10에는 IDD내부 캐리어가스의 속도분포를 디스크 샤프트 회전축 방향인 y 축 단면에 대하여 분할하여 나타내었으며, 각 단면에 대한 평균속도를 나타내었다. 캐리어가스의 입출구가 위치한 2번 및 3번 디스크 회전축 사이의 유속이 높게 나타나는 경향이 있으나, 그 절대값은 크지 않고 전체 디스크 단면에서의 유속을 분포를 보면 크기가 균일하게 잘 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉 캐리어가스가 특정 한쪽으로 쏠리지 않고 고르게 디스크 사이를 지나간다는 것을 확인할 수 있다. IDD내부 전영역에서의 캐리어가스 평균속도는 0.158m/s로 예측되었다.

Fig. 11에는 IDD내부 온도분포를 각각 x, z축의 중앙단면에 대하여 나타내었으며, Fig. 12에는 회전 축방향에 대한 단면들의 온도분포와 각 단면의 평균온도를 나타내었다. 캐리어가스는 입구의 분사모멘텀과 낮은 온도로 인하여 디스크 하단에 우선적

으로 위치하며, 캐리어가스 출구쪽으로 갈수록 디스크를 통한 가열 및 회전모멘텀으로 인하여 디스크 상부로 이동한다. 캐리어가스의 평균온도는 약 375K으로 예측되었다.

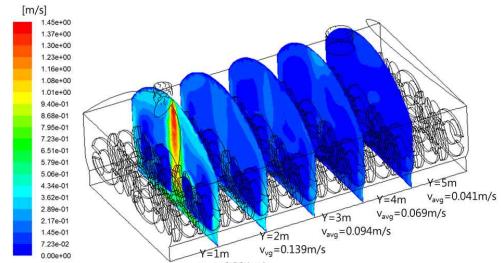


Fig. 10 IDD Internal Rotation Axial Section Carrier Gas Velocity Distribution

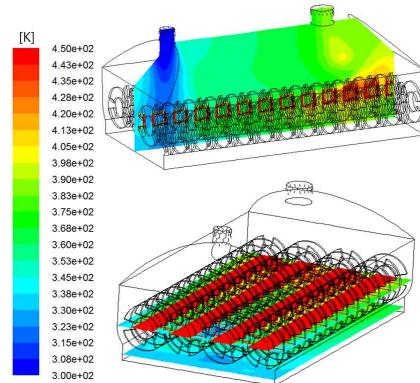


Fig. 11 IDD internal vertical and horizontal cross section temperature distribution

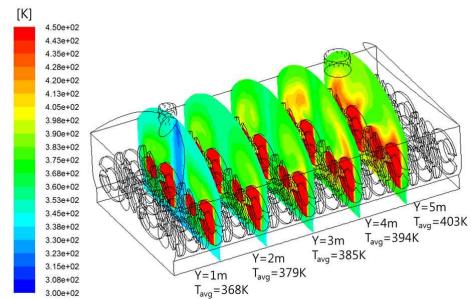


Fig. 12 IDD Internal Rotation Axial Temperature Distribution

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 환경에너지 시설에 설치될 유체 기계 중 2종의 교반기와 2종의 건조기에 대한 유동 해석을 수행하였다. 2종의 교반기는 발효조 및 소화

조로 사용된 기계식 및 노즐식 교반기로 내부 deadzone이 발생하는지, 발생 시 얼마나 교반성능을 저하시키는지 예측하는 것이 중요하다. 반면 건조기의 경우 디스크형 건조기(IDD) 및 튜브형 건조기(STD) 두 가지 타입의 건조기에 대하여 해석을 수행하였으며, 교반기와 마찬가지로 캐리어가스와 슬러지의 혼합여부가 중요하다. 신뢰성이 가장 높은 전산유체역학 프로그램인 ANSYS-FLUENT를 이용하여 상기 4 가지 해석을 수행하였으며, 시뮬레이션을 통한 내부 유동해석 결과 특별한 성능감소 요인 및 문제발생요인 없이 우수한 성능을 나타낼 것으로 예측되었다.

1) 발효조를 전산유체역학 프로그램을 통한 성능 예측 결과, 발효조 내부 전체 volume 영역에 대한 평균속도는  $0.2426\text{m/s}$ 로 발효조 내부 전 영역에서 deadzone (유속  $0.01\text{m/s}$ 이하)이 거의 나타나지 않으며 deadzone의 구체적인 위치를 등가면을 통하여 가시적으로 나타내었다. 임펠러 근처에서 수직방향의 유동이 활발히 나타나고 임펠러 외부에서는 회전반경으로 유동이 활발히 나타나 교반이 활발히 일어나는 것으로 예측되었다. 침강된 협잡물들은 임펠러 하부로 모아질 수 있도록 설계되었으며 협잡물들이 모이는 위치에 협잡물 흡입구가 설계되어 있다. 발효조 내부의 유속에 대한 속도벡터 및 등가면 그래프를 통하여 유동 해석 결과 발효조 내부의 교반이 stable하게 일어날 것으로 판단된다.

2) 소화조를 전산유체역학 프로그램을 통한 성능 예측 결과, 전체 유체영역에 대한 유동속도는  $0.6641\text{m/s}$ 로 예측되었으며, 소화조 내부 전 영역에서 deadzone (유속  $0.01\text{m/s}$ 이하)이 거의 나타나지 않았다. 소화조 내부 유동의 주요 driving force는 노즐에서의 소화액 분사로 인한 회전운동이며 이러한 회전운동에 따른 소화액 흐름을 pathline을 통하여 나타내었다. 수직 교반을 통하여 불균일한 침전물의 생성을 방지해야 하는 기계식 교반기와는 소화조의 노즐식 교반기의 경우 하부 흡입관에서 상부 노즐로 펌핑한 소화액이 수직방향의 운동보다는 회전운동이 크게 설계가 되어야 한다. 해석결과의 벡터분포 및 streamline 그림을 통하여 이러한 회전운동이 활발히 나타나는 경향이 예측되었다.

2) 건조기를 전산유체역학 프로그램을 통한 IDD 건조기 내부의 캐리어가스 열전달 및 유동현상을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과, 캐리어가스의 내부 평균유속 및 평균온도는 각각 약  $0.15\text{m/s}$  와  $375\text{K}$

으로 예측되었다. 캐리어가스의 IDD 건조기 내부 유동현상에 대한 분석결과 특정영역의 정체 없이 상부 void영역 및 내부 디스크 사이를 원활이 순환하며, 디스크 회전으로 인한 회전 및 순환 유동이 활발히 일어나는 것으로 예측되었다. IDD건조기의 성능에 가장 영향을 주는 디스크의 배열설계 및 캐리어가스 출입구의 위치설계가 모두 타당한 것으로 사료된다.

추후 연구에서는 해석결과에 따른 성능 등에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) Park, S.K., Kim, K.S., Yang, H.C., "The Optimum Design of Flow Characteristics in Fermentation" Proceedings of the KOSME 2011 Spring Annual Conference, pp. 117-121, 2001.
- 2) Lee, S.Y., Jeon, H.T., Nam, C.D., and Lee, Y.H., "A study on the Industrial Mixer with Various Type of Impellers and Various Rotating Speed by CFD" Proceedings of the KSME 2010 Spring Annual Conference, pp. 29-34, 2007.
- 3) Kim, T.S., Kim, Y.H., Choi, Y.W., Lee, Y.W., and Choi, K., "A numerical analysis for the inner flow of the 3-pass rotary dryer" J. of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 9, No. 4, pp51-57, 2005.
- 4) Park, D.Y., Sung, S.C., and Oh, M.D., "Drying performance changing of temperature in the sludge dryer with disk heating" Proceedings of the SAREK 2010 Winter Annual Conference, pp931-935, 2011.
- 5) ANSYS Inc., "ANSYS Fluent 13.0 User's Guide".

## 저자 소개

### 전 용 한(Yong-Han Jeon)

### [정회원]



- 2008년 8월: 인하대학교 기계공학과(공학박사)
- 2009년 4월~현재: 상지영서대학교 소방안전과, 교수

< 관심분야 >  
열전달 유동해석