

입자 완화 유체 동역학 해석 기법을 이용한 스크류 디켄터형 원심분리기의 슬러지 이송 효율 향상 분석

박 대 응^{*†}

* 한국화학융합시험연구원 신뢰성본부 기계엔지니어링팀

Smoothed Particle Hydro-dynamic Analysis of Improvement in Sludge Conveyance Efficiency of Screw Decanter Centrifuge

Dae Woong Park^{*†}

* Mechanical Engineering Team, Reliability Headquarters, Korea Testing & Research Institute

(Received March 12, 2014 ; Revised November 11, 2014 ; Accepted December 11, 2014)

Key Words: Smoothed Particle Hydro-Dynamics(입자 완화 유체동역학), Sludge Conveyance Efficiency(슬러지 이송 효율), Decanter Centrifuge(디켄터 원심분리기)

초록: 원심분리기는 밀도가 다른 입자들이 관내에서 고속의 회전에 의해 발생하는 원심력을 받게 되면 원심력에 비례하는 속도로 밀도가 큰 입자는 빠르게 침강하고, 밀도가 작은 입자는 느리게 침강하여 관내에서의 이동거리에 차이가 발생하는 원리를 이용하는 장치이다. 본 연구의 대상이 되는 디켄터형 원심분리기는 수 처리 공정에서 탈수된 농축 오물을 제거하는 장치로서 사용되는 것으로 슬러지 이송의 향상이 그 핵심 기술이다. 이에 본 논문에서는 이를 향상시키기 위하여 보울 플레이트 레일을 적용한 모델을 제안하였고, 슬러지 이송 효율 향상을 평가하기 위하여 입자 완화 유체동역학 기법을 이용하여 분석하였다. 수행된 해석은 보울 플레이트를 적용하지 않은 모델과 적용한 모델에 대하여 각각 적용하여 그 개선 정도를 정량화 하였다.

Abstract: A centrifuge works on the principle that particles with different densities will separate at a rate proportional to the centrifugal force during high-speed rotation. Dense particles are quickly precipitated, and particles with relatively smaller densities are precipitated more slowly. A decanter-type centrifuge is used to remove, concentrate, and dehydrate sludge in a water treatment process. This is a core technology for measuring the sludge conveyance efficiency improvement. In this study, a smoothed particle hydro-dynamic analysis was performed for a decanter centrifuge used to convey sludge to evaluate the efficiency improvement. This analysis was applied to both the original centrifugal model and the design change model, which was a ball-plate rail model, to evaluate the sludge transfer efficiency.

- 기호설명 -

- δ : Dirac Delta 함수
- W : 핵함수
- h : 완화길이
- $\langle \nabla f(x_i) \rangle$: 입자에 대한 공간도함수

1. 서론

원심분리기는 원심력과 혼합물의 밀도차를

이용하여 특정물질을 분리, 정제 시키는 기계장치이다. 이러한 원심분리기의 특성을 활용하여 최근 환경관련 산업에서 슬러지를 정제하고 무해한 상태로 폐기하기 위한 처리장치로서 그 사용이 확대되고 있다.

본 논문의 연구 대상인 디켄터형 원심분리기에 대한 연구는 주로 유럽과 일본을 중심으로 성능향상을 위한 핵심인자와 연관된 기하학적 구조, 함수율 (Percentage of water content), 내부의 유동현상, 소요동력, 부유 및 침강 등에 관한 연구가 수행되고 있다. Leung 등⁽¹⁾은 디켄터의 효율성 향상과 함수율 최소를 위한 최적의

† Corresponding Author, dwpark@ktr.or.kr

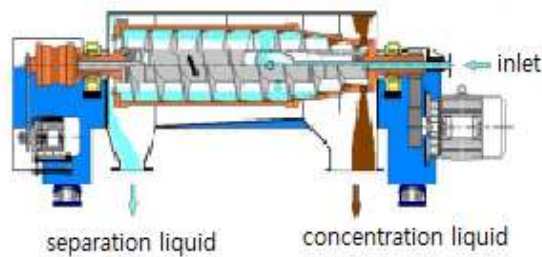


Fig. 1 Structure and mechanism of the decanter Centrifugal

기하학적 구조를 제시하였고, 스크류와 보울의 속도차이에 대한 디켄터 소요 토크 관계를 제시하였으며, 디켄터의 용적과 함수율에 관한 관계를 제시하였다. Bart 등⁽²⁻⁴⁾은 conical beach 각도에 따른 최적의 pool 깊이를 제시하였다. 국내 관련 선행연구로는 Suh 등⁽⁶⁾은 원심분리기 설계를 위한 기초공식으로 입자의 직경에 대해 언급하였고, 현장 적용이 가능한 원심분리기 소요동력 예측을 정식화하였다. 그러나, 대부분의 선행 연구들은 유동해석, 강도해석, 고액분리 성능에 관한 것으로 디켄터형 원심분리기의 슬러지 이송 효율 및 입자 가시화에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문의 연구 대상인 디켄터형 원심분리기는 수처리 공정에서 발생하는 슬러지를 분리, 농축, 탈수처리 하는 장치로 이에 대한 이송 효율과 이를 개선하는 방안이 그 핵심 기술이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 입자 완화 유체동역학 기법을 이용하여 디켄터형 원심분리기에 있어서 슬러지 이송 효율의 향상 정도를 평가하고자 한다. 본 연구에서는 슬러지 이송 효율 향상을 위해 기존의 원심분리기에 보울 레일 플레이트를 적용하였고, 이에 따른 슬러지의 축방향 이송 효율을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 스크류 디켄터형 원심분리기

원심분리기는 다양한 밀도의 입자들이 존재하는 관내에서 고속의 회전에 의해 발생하는 원심력의 작용을 받게 되면 원심력에 비례하는 속도로 밀도가 큰 입자는 빠르게 침강하고, 밀도가 작은 입자는 느리게 침강하여 관내에서의 이동거리에 차이가 발생하는 원리를 이용하는 장치이다. 입자의 침강속도는 점도, 물리적 특성 등에 의해 결정되지만 다른 조건이 일치할 때에는 입자의 크기(혹은 분자량) 및 용액의 밀도와 입자밀도의 차이에 비례하여 침강속도가 달라진다. 디켄터형 원심분리기는 공급과 분리, 탈수 및 배출을 연속적으로

행하는 원심분리기로서 석유화학 공업, 광업, 식품, 의약품 공업, 하수, 오물, 상수, 상업폐수 처리 등 각종분야에서 고체, 액체 분리는 물론 액체, 액체 분리에도 사용되고 탈수, 정제, 분류, 농축, 추출 등 여러 공정에서 사용된다.

스크류 디켄터형 원심분리기의 구조 및 슬러지 이송 메커니즘은 다음과 같다. 상부의 입구 파이프를 통하여 슬러지가 혼합되어 있는 원수가 공급되면, 이 혼합액은 회전하는 스크류 로터 내부로 모여 스크류 표면에 있는 구멍을 통해 분출된다. 분출된 혼합액은 보울 로터에 갇히게 된다. 보울의 회전으로 인하여 혼합액은 원심력에 의하여 자유표면을 가진 pool 을 형성 하며, pool 내부에는 액체보다 비중이 높은 고체가 가까운 슬러지가 보울 내면에 모인다. 보울보다 약간 높은 속도로 회전하는 스크류는 보울에 대한 상대운동으로 인하여 보울 내면에 모인 고체 이송물을 이송, 압축, 탈수시켜 케이크 형태로 배출시키게 되며, 동시에 액체는 적정수위에 도달하면 액체배출구를 통해 배출된다.

2.2 입자 완화 유체 동역학

상기의 메커니즘을 가지는 원심분리기 장치에 대하여 설계 변경에 따른 장비의 효율 향상 정도를 분석하기 위하여 본 이송체 입자의 거동을 효과적으로 모사하기 위하여 입자 완화 유체 동역학 해석 방법을 적용하였다. 전산모사를 통한 기존의 유체현상을 해석하는 방법에는 격자구조를 이용하여 해석하는 유한차분법(Finite Difference Method), 경계요소법(Boundary Element Method), 유한요소법(Finite Element Method) 등이 주로 이용되었다. 그러나, 이 방법들은 격자들을 통해서 몇 개의 절점을 선정하고 이들의 연관성을 찾는 과정이 우선시 되어야 하기 때문에 움직이는 물질의 접촉면, 경계의 변형, 자유표면을 처리하기 위해서는 근본적인 어려움을 가지고 있다. 최근에 격자를 선정해야 하는 번거로움과 어려움을 없애고 전체 계산 영역에서 흩어져 있는 입자만을 이용하여 기존의 방법들이 지닌 어려움을 해결해 보기 위하여 무격자입자법(Mesh-free Particle Method)들이 많이 개발되고 있는 중이며, 이 중 입자 완화 유체 동역학 해석 기법이라 불리는 Smoothed Particle Hydrodynamics(SPH)법은 격자대신 입자를 이용한 순수 Lagrangian 기법이다. 입자 완화 유체동역학 방법은 무격자 방법의 장점을 살려 이산적인 공간에서 보간점들로서 격자구조 대신에 완화입자들을 사용하여 물질의 대변형에

따른 이동경계, 자유수면, 물질의 접촉면을 쉽게 추적하여 처리할 수 있는 장점을 지니고 있다. SPH 기법은 1970년대 천체물리학 분야에서 Gingold와 Monaghan⁽⁵⁾에 의해 처음 제시 되었으며, 그 후 자유수면의 유동문제와 점성을 고려한 유체해석 문제에 적용되었다. 또한, 파동문제에 적용되었으며, 최근에는 해양구조물에 작용하는 파압 연구 등에 적용되는 등 다양한 분야로의 적용이 계속 확장되어 가고 있는 추세이다.

입자 완화 유체 동역학 해석 기법은 요소나 격자가 아닌 입자를 통해 해석대상을 구성하고, 핵함수를 이용하여 인접한 입자들의 물리량과 입자간의 관계로부터 각 입자들의 물리량(밀도, 속도, 에너지 등)을 계산한다. 임의 입자의 물리량을 결정하기 위하여 핵함수를 이용하는 핵함수 근사(Kernel Approximation)와 연속계의 적분을 이산계 입자의 총합으로 근사하는 입자근사(Particle Approximation)를 사용하고 있다. 일반적으로 SPH의 함수는 적분형으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x')\delta(x - x')dx' \quad (1)$$

식 (1)에서, $\delta(x - x')$ 는 Dirac Delta 함수이며, Dirac Delta 함수와 유사한 형태를 취하는 핵함수(W)를 이용하면 식 (2)와 같은 핵함수 근사식을 얻을 수 있다.

$$\langle f(x) \rangle = \int_{\Omega} f(x')W(x - x', h)dx' \quad (2)$$

식 (2)에서, $W(x - x', h)$ 는 핵함수이고, h 는 완화길이로서 핵함수가 값을 가지게 되는 영역의 길이를 나타낸다. SPH 기법은 유한개의 이산적인 입자들로 해석 영역이 구성되므로, 연속계의 영역 적분을 유한개의 입자들의 합으로 치환하면 핵함수 근사식 (2)는 다음과 같은 입자 근사식의 형태로 나타낼 수 있다,

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j)W(x_i - x_j, h) \quad (3)$$

여기서 입자 i 에서의 입자 근사함수 $f(x_i)$ 는 주변 입자 j 의 함수와 핵함수에 의하여 표시되며, m_j 와 ρ_j 는 각각 입자 j 의 질량과 밀도이고, $\frac{m_j}{\rho_j}$ 는 입자 j 의 체적을 나타낸다. 그리고 공간도 함수 형태로서 입자근사식을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j)\nabla_j W_{ij} \quad (4)$$

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h) = W(|x_i - x_j|, h)$$

$$\nabla_j W_{ij} = \frac{x_i - x_j}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}} = \frac{x_{ij}}{r_{ij}} \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}$$

완화길이는 핵함수의 효과가 미치는 유효폭을 나타내며, 동시에 한 입자에 대한 다른 입자의 영향거리를 나타낸다. 이 완화 거리는 계산의 효율성과 정확성에 직접적으로 영향을 주게 된다. 완화거리가 너무 작을 때에는 가하는 힘에 비해 지배면적에 입자가 너무 적어 낮은 정확성을 초래하고, 그와 반대로 완화거리가 너무 길 때에는 너무 많은 입자들로 인해 계산시간이 많이 걸려 효율성이 떨어지며, 또한 입자들 사이에 완화 되는 경우가 발생하게 되어 정확성이 오히려 나빠지게 된다.

SPH 법에서는 2 차원일 경우 자신을 포함한 이웃하는 입자의 수가 20~30 개 분포되는 것을 최선으로 하고 있다. 그리고 입자들이 격자 안에 놓여지게 되는 경우에는 초기입자 간격의 1.2 배 정도를 최선으로 한다. 이것은 유한 차분법에서의 Grid-Cell의 폭과 같다.

입자 완화 유체 동역학 해석 방법의 신뢰성이 입증된 선행연구 사례로는 다음과 같다. Hong⁽⁷⁾은 이중 알루미늄 마찰 교반 용접에 있어서 물질 혼합 거동에 대해 입자 완화 유체 동역학 해석 기법을 적용하여 실험치와 유사한 결과를 나타냄을 입증하였고, Moon 등⁽⁸⁾은 Hagen-Poiseuille 유동 문제에 대하여 입자 완화 유체 동역학 해석 기법을 적용하여 이론해와 유사한 결과를 얻어 내었다.

2.3 스크류 디켄터형 원심분리기의 입자 완화 유체 동역학 해석

본 연구의 대상에 되는 스크류 디켄터형 원심분리기의 이송 성능 분석을 위한 입자 완화 유체 동역학 해석 모델 구성을 위하여 원심 분리기 내의 이송 구간 중 곡면부를 평면화 하였다. 고속 회전하는 원심분리기의 유체 전체 모델 상태를 파악할 수 없으므로, 물과 슬러지가 섞이지 않는 요소로 분리하여 해석을 진행하였다. 본 해석에서는 레일 플레이트의 적용에 따른 성능 차이를 분석하기 위하여 보울 레일 플레이트 적용 전과 적용 후의 모델에 대하여 슬러지의 축방향 이송 효율을 분석하였다. 본 해석은 상용 해석 프로그램인 Hyperworks 제품군을 이용하였다.

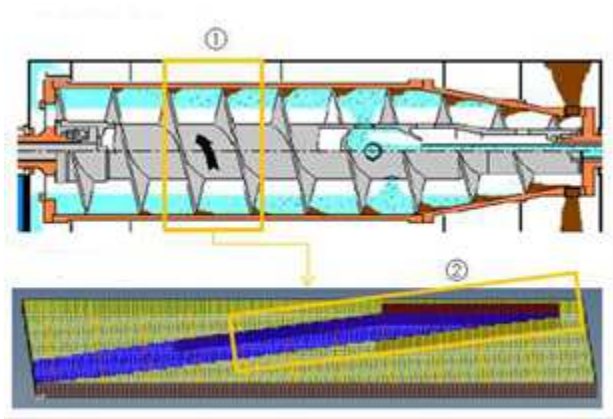


Fig. 2 Centrifugal model & flattened analytical model

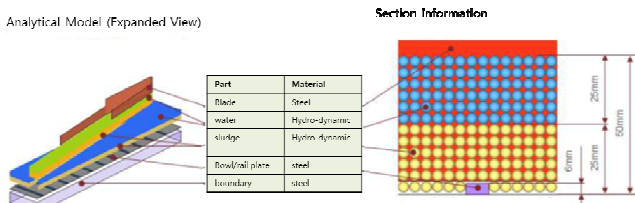


Fig. 3 Information of the analytical model

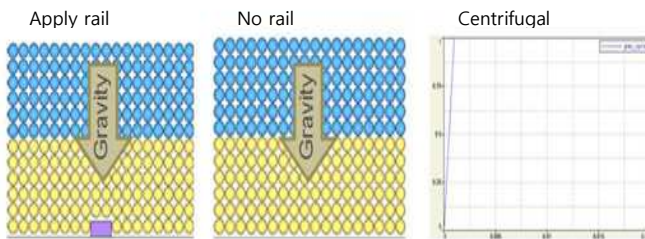


Fig. 4 Applied Centrifugal force direction and curve information

상기 과정을 보다 상세하게 기술하면 다음과 같다. Fig. 2 에 나타난 바와 같이, 표시 부(①) 블레이드의 이동 경로를 평면(②)으로 묘사하였다. 각각의 입자들을 모두 묘사하는데 연산 cost 가 많이 소요되는 관계로 이송 시 관심면적을 1/16(해석 모델 이동 면적/ 스크류 1 Pitch 면적)로 적용하였다. 하중 및 속도 조건은 물과 슬러지에 작용하는 원심력에 대하여 중력으로 변환하여 적용하였다. 블레이드 회전 속도를 평면 모델에서 병진 속도로 변환하여 적용하였다.

해석에 사용한 입자는 5mm 간격으로 생성하여 총 110,280 개를 생성하였다. 슬러지층과 물층은 25mm 높이로 하여 해석이 수행되었다. Fig. 3 에서 도시된 바와 같이 평면화된 해석모델에서는 원심력은 중력 형태로 변환하였으며, 각 계산 조건은 운용 조건으로 주어진 2750rpm, 반지름 250mm 를 적용하였으며, 원심력 적용은 초기 시간부터 적용하였다.

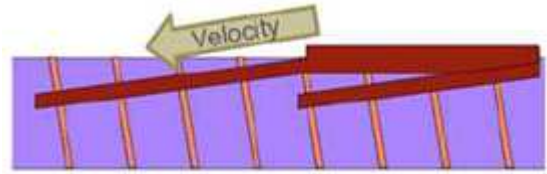


Fig. 5 Applied velocity for the angular direction

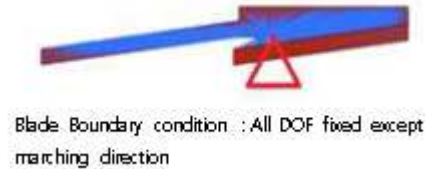
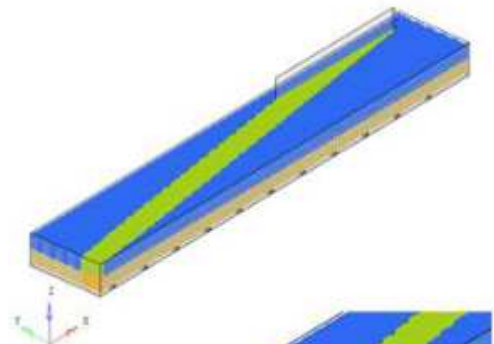


Fig. 6 Boundary conditions for the analytical model



Boundary region
Upper layer : water
Lower layer : sludge

Interest region
Upper layer : water
Lower layer : sludge

Fig. 7 Model composition for the water and sludge

Screw 와 Bow 의 상대 속도는 구성된 해석모델에 맞추어 병진속도로 환산하여 적용하였다. 회전 방향 속도(Imposed Velocity)는 0.003ms 로 중력방향으로 안정화된 이후 적용하여 해석을 진행하였다.

경계 및 구속 조건은 Fig. 6 과 같다. Screw 의 Blade 는 진행방향 이외에 자유도는 모두 구속하였다. 레일 플레이트 및 보울 전체도 모든 방향의 자유도를 고정하였다. Screw 의 Blade 와 particle 진행방향의 자유도만이 불구속조건으로 적용되었다.

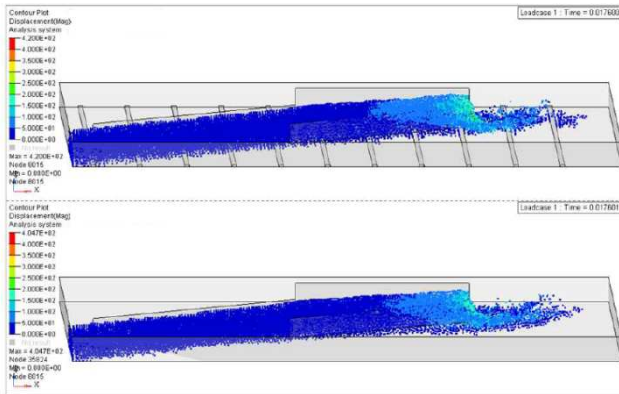


Fig. 8 Comparison of the sludge particle transfer for the centrifugal design change (iso-view)

해석모델 구성은 Fig. 7 에서와 같이 물층과 슬러지 층을 같이 고려하였으며, 각각 25 mm 씩 총 50 mm 를 구성하였다.

2.4 설계변경 전후 스크류 디센터형 원심분리기의 해석 결과

Fig. 8 은 레일 플레이트 적용 모델 및 미 적용 모델에 대해서 스크류가 슬러지를 이송할 때의 해석 결과를 나타내고 있다. 파티클이 많아 질수록 기하급수적으로 해석소요시간이 증가되어 병렬 처리를 하여 해석을 진행하였다.

슬러지의 축방향 거동을 파악 하기 위하여 Fig. 9 와 같이 Rear view 에서의 입자 거동을 모사하였다. 이를 통하여 원심분리기 이송 성능을 비교해 보울 수 있다. 이 결과를 확인해 보면 레일 플레이트 적용 시의 경우 이송량이 보울 플레이트 미 적용 대비 많이 발생한다는 것을 알 수 있다. 회전 시 레일 플레이트가 있는 경우 축방향으로 슬러지의 이송거리가 더 발생하는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 이송을 더 잘 하는 것으로 판단할 수 있다.

다른 축방향 이송 결과를 확인해 보면 다음과 같다. 해당 영역에 대한 해석결과를 비교 영역으로 선정한 이유는 슬러지 관심 영역 중 블레이드 가운데 부분이 경계면의 영향이 작아서 회전 시 슬러지의 거동을 파악하기에 용이하기 때문이다. Fig. 10 에 나타난 축방향 이송 결과를 고찰해 보면 다음과 같다. 레일 플레이트를 적용한 경우 40 mm 이상 이송된 슬러지 입자의 개수가 155 개 이고, 레일 플레이트를 미적용한 경우 40 mm 이상 이송된 슬러지 입자의 개수는 132 개로 약 17.4 % 정도 효율이 개선된 것으로 판단된다.

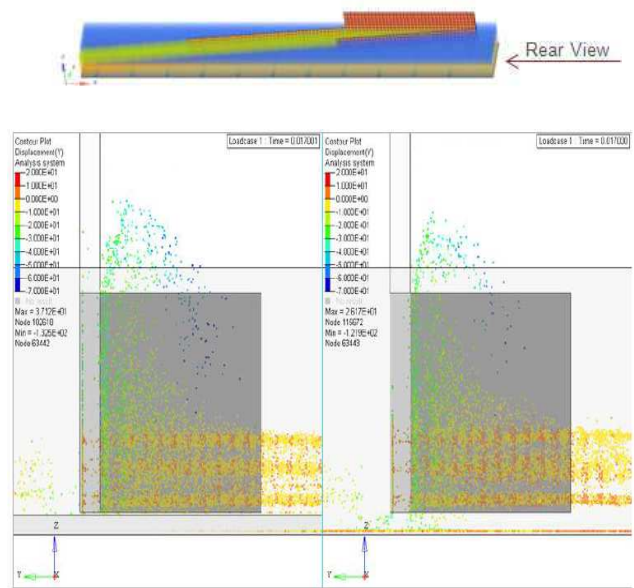


Fig. 9 Comparison of the sludge particle behavior for the centrifugal design change (rear side view)

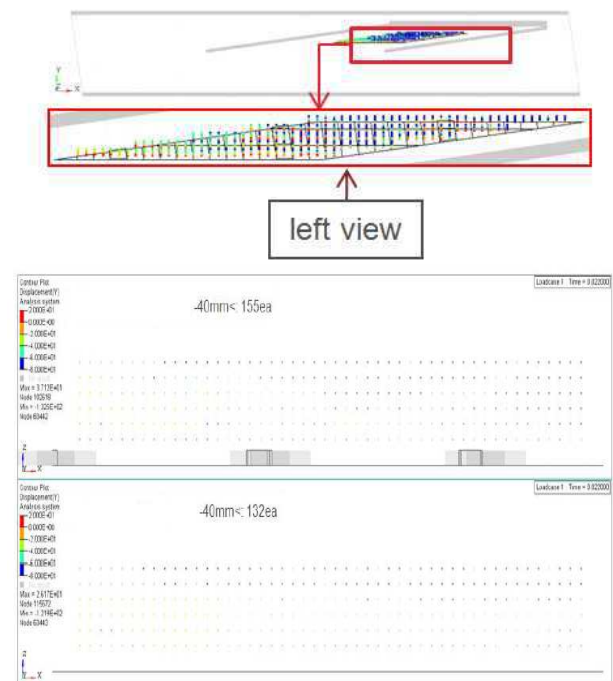


Fig. 10 Comparison of the sludge particle behavior for the above 40mm displacement (left side view)

다음은 Rear View 에서 슬러지의 이송을 확인한 결과이다. Fig. 11 에서 축방향 이송 결과를 확인해 보면 다음과 같다. 레일 플레이트를 적용한 경우 40 mm 이상 이송된 슬러지 입자의 개수가 42 개 이고, 레일 플레이트를 미적용한 경우 40 mm 이상 이송된 슬러지 입자의 개수는 29 개로 나타났다.

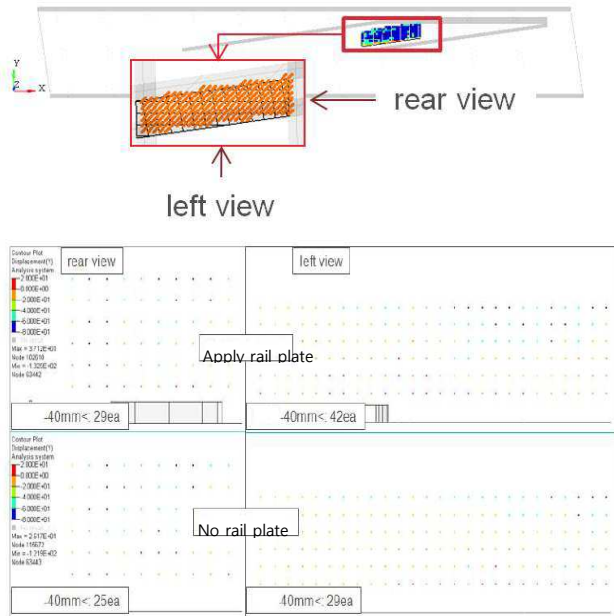


Fig. 11 Comparison of the sludge particle behavior for the above 40mm displacement (rear side view)

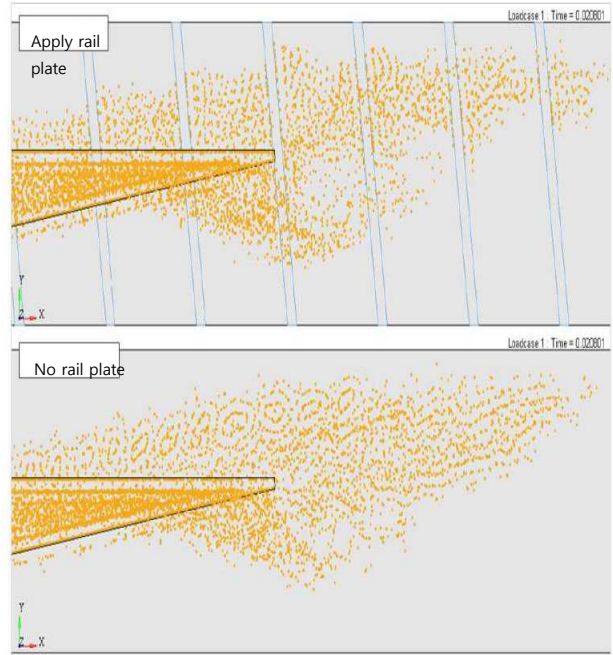
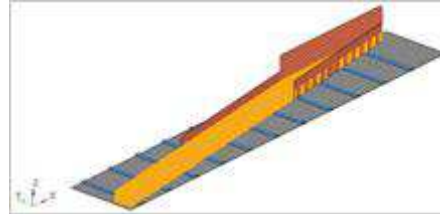


Fig. 13 Vortex comparison of the sludge particle for the design change (top view)

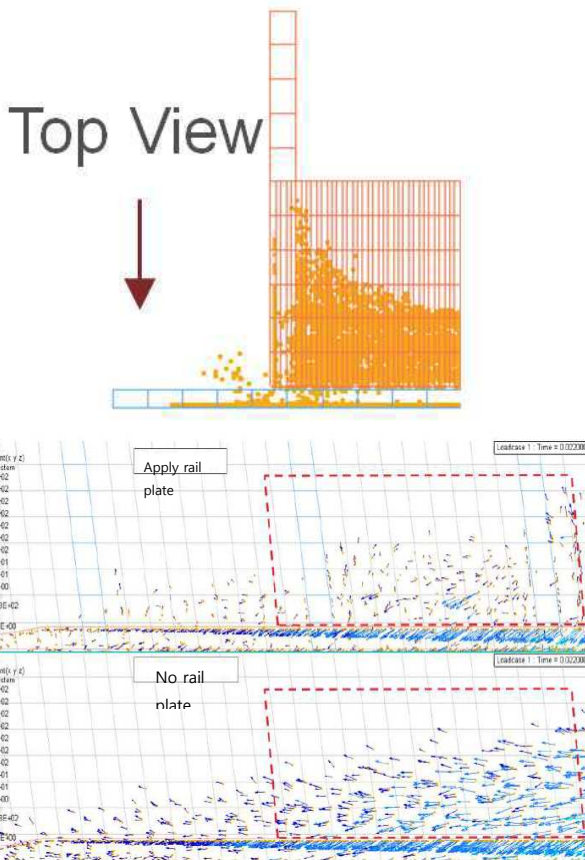


Fig. 12 Comparison of the sludge particle behavior between screw and bowl (top view)

다음은 위에서 본 Top View 에서의 결과이다. Fig. 12 는 Blade 와 보울의 좁은 간격에서의 슬러

지 이동 특성을 나타내고 있다. 해석 결과를 보면, 보울 레일 플레이트 적용 시 슬러지와 접촉이 발생하여 좁은 간격에서 슬러지가 Blade 뒤로 빠지는 경향이 적게 발생한다. 이 결과 역시 보울 레일 플레이트 적용 시 슬러지 이동이 더 좋다는 것을 알 수 있다.

다음은 Top view 에서의 Screw 주변의 슬러지 유동에 대한 결과이다. Fig. 13 에서 보면 Screw 주변의 유동을 살펴보면 보울 레일 플레이트가 적용된 경우에는 슬러지의 이동 시 정상적인 유동현상을 보이지만 보울 레일 플레이트가 미적용된 경우에는 Screw 주변으로 소용돌이 현상이 관찰된다. 소용돌이 현상의 경우, 발생시 입자의 이송을 지연시키는 원인이 될 수 있다. 소용돌이 현상으로 보이는 Fig. 13 의 아래 (Top View) 결과는 마모 및 이송에 대한 차이점을 보여 줄 수 있다. 소용돌이로 인하여 다른 슬러지의 이송을 방해할 수 있을 뿐만 아니라, 스크류나 보울 등의 제품에도 마모를 발생시킬 가능성이 크다. 따라서 소용돌이 현상이 상대적으로 적게 나타나는 설계 변경안 모델이 슬러지 이송 효율을 보다 향상시킬 수 있음을

알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 입자 완화 유체동역학 해석 방법에 의해 고효율 디켄터형 원심분리기를 주어진 구동조건을 적용하여 설계 변경 전후의 모델에 대하여 슬러지의 이송효율에 대한 비교분석을 수행하였다. 입자 완화 유체동역학 방법을 적용하여 입자의 변위를 각각의 모델에 대하여 분석하여 이송 효율을 확인한 결과, 약 17.4% 정도 효율이 개선된 것으로 판단된다. 스크류가 슬러지를 이송시킬 때 레일 플레이트가 없는 경우 소용돌이 현상이 발생하는 것도 해석결과 알 수 있었다. 이를 통해 보울 플레이트를 적용함으로써 주어진 운용조건 하에서 보다 이송효율 및 성능이 향상된 것으로 사료된다. 추후 레일 플레이트가 없는 기존 제품과 레일 플레이트가 적용된 제품의 현장시험을 통하여 각각의 함수율을 비교함으로써 제품 성능을 검증할 예정이다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학협력 기술개발사업(No. C0213576)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌 (References)

- (1) Leung, W. W.-F., 1998, "Industrial Centrifugation Technology," McGraw-Hill Professional
- (2) Adams, B., Keiser, R., Bazzi, P. and Dutré, P., 2005, "A Unified Lagrangian Approach to Solid-fluid Animation," SPBG'05 Proceedings of the Second Eurographics / IEEE VGTC conference on Point-Based Graphics, pp. 125~133
- (3) Adams, B., Pauly, M., Keiser, R. and Guibas, L. J., 2007, "Adaptively Sampled Particle Fluids," *ACM SIGGRAPH papers*, 05-09, 2007, San Diego, California
- (4) Lenaerts, T., Adams, B., and Dutré, P., 2008, "Porous Flow in Particle-based Fluid Simulations," *SIGGRAPH '08: SIGGRAPH 2008 papers*
- (5) Gingold, R.A. and Monaghan, J.J., 1977, "Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and Application to Non-spherical Stars," *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(2), pp.375~389
- (6) Suh, Y. K., 2003, "Analysis of the Power for a Decanter-type Centrifuge," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 27, No. 7, pp. 123~180
- (7) Hong, S. T., 2009, "Mixing of Materials in FSW of Dissimilar Aluminum Alloys," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33, No. 2, pp. 108~113
- (8) Moon, W., You, S. and Min, O., 2002, "Analysis of Hagen-Poiseuille Flow Using SPH," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 395~402