



Received: 2019/11/15  
Revised: 2020/01/18  
Accepted: 2020/02/10  
Published: 2020/03/24

**\*Corresponding Author:**

**Jae-Hoon Lee**

Tel: +82-51-400-5154

Fax: +82-51-400-5110

E-mail: jlee24h@gmail.com

**Abstract**

녹아웃드럼은 압력용기의 일종으로 잔여가스의 안전한 처리를 위한 설비 중의 하나이며 가스 배출/연소 시스템에 액적 및 기타 입자들이 흘러가지 않게 사전 분리하는 역할을 한다. 녹아웃드럼은 고온, 고압의 작동 조건에서 운용되므로 이러한 조건을 반영한 녹아웃드럼의 설계가 반드시 요구되며, 본 연구는 구조적 안정성과 액적 제거 성능 모두를 만족하는 녹아웃 드럼을 설계하고 평가하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이에 따라 먼저 구조 안전성을 갖는 설계를 목적으로서 ASME 코드에 기반한 FEM 구조해석 방법 및 평가 방법에 관한 내용을 다루고, 녹아웃드럼의 액적제거 성능을 평가하기 위해서는 CFD를 활용한 입자추적법을 적용한 사례를 제시하고자 한다.

A knock out drum is a type of pressure vessel, which is one of the facilities for the safe treatment of residual gas, and serves to pre-separate droplets and other particles from flowing into the gas exhaust/combustion system. Knockout drums are operated under high temperature and high pressure operating conditions, so it is essential to design a knockout drum that reflects these conditions. This study intends to propose a method for designing and evaluating a knockout drum that satisfies both structural stability and droplet removal performance. Accordingly, for the purpose of design with structural safety, FEM structural analysis and evaluation methods based on ASME code are presented. And to evaluate the droplet removal performance of knockout drum, a case of applying particle tracking method using CFD is presented.

**Keywords**

Pressure Vessel(압력용기),  
Knock Out Drum(녹아웃드럼),  
Finite Element Method(유한요소법),  
Structural Analysis(구조해석),  
CFD Analysis(전산유체역학해석),  
Particle Tracking Method(입자추적법)

**Acknowledgement**

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 '산업기술혁신사업'의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 10077495).

김한울·이재훈 두 저자는 본 논문에 동등하게 기여하였습니다.

본 논문은 해군과학기술학회 2019년 추계학술대회 발표논문을 기반으로 작성되었습니다.

# 전산해석을 이용한 잔여가스 처리용 압력용기의 구조 및 성능 평가

## Structural and Performance Evaluation of Pressure Vessel for Residual Gas Treatment Using Computational Analysis

김한울<sup>1</sup>, 최주형<sup>2</sup>, 허태욱<sup>3</sup>, 김명환<sup>4</sup>, 황태규<sup>2</sup>, 공길영<sup>5</sup>, 이재훈<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>(재)한국조선해양기자재연구원 연구원

<sup>2</sup>(재)한국조선해양기자재연구원 책임연구원

<sup>3</sup>(주)경성정기 부장

<sup>4</sup>(주)경성정기 차장

<sup>5</sup>(재)한국조선해양기자재연구원 원장

<sup>6</sup>(재)한국조선해양기자재연구원 선임연구원

Han Ul Kim<sup>1</sup>, Joo Hyung Choi<sup>2</sup>, Tae Uk Heo<sup>3</sup>, Myoung Hwan Kim<sup>4</sup>,  
Tae Gyu Hwang<sup>2</sup>, Gil-Young Kong<sup>5</sup>, Jae-Hoon Lee<sup>6\*</sup>

<sup>1</sup>Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute

<sup>2</sup>Principal Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute

<sup>3</sup>General Manager, Kyung Sung Precision Machinery Co., Ltd.

<sup>4</sup>Deputy General Manager, Kyung Sung Precision Machinery Co., Ltd.

<sup>5</sup>President, Korea Marine Equipment Research Institute

<sup>6</sup>Senior Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute

### 1. 서론

녹아웃드럼(knock out drum)은 압력용기(pressure vessel)의 일종으로서 가스의 안전한 처리를 위한 설비 중의 하나로 가스 배출/연소 시스템에 액적 및 기타 입자들이 흘러가지 않게 사전에 분리하는 역할을 한다. 녹아웃드럼은 고온, 고압의 작동 조건하에서 운용되므로 적합한 녹아웃드럼을 설계하기 위해 구조적 설계 적합성은 ASME 코드[1]에 기반한 FEM(finite element method) 구조해석을 통해 평가되어야 하고, 액적 제거를 위한 설계는 API RP 521(Sec 5.7.5)과 KOSHA Guide(D-36-2014)를 참고할 수 있다. 본 연구는 구조적 안정성과 액적 제거 성능 모두를 만족하는 녹아웃드럼을 설계하고 평가하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이에 따라 먼저 구조 안전성을 갖는 설계를 목적으로 구조해석 방법 및 평가에 관한 내용을 다루고, 구조 설계가 완료된 녹아웃드럼의 액적제거 성능을 평가하기 위한 CFD(computational fluid dynamics)를 활용한 기법과 사례를 제시하고자 한다.

## 2. FEM을 활용한 구조안정성 평가

### 2.1 해석 모델

Fig. 1은 녹아웃드럼 초기설계의 3D 모델을 보여준다. 해석의 효율성을 위해 XY평면 대칭 모델을 사용하였고, 재료 물성은 ASME Boiler and Pressure Vessel code Sec. II, Part D[2]를 참고하여 적용하였다. 초기모델의 파이프는 외경 24 inch, 두께 10 t, 용접각자 10 t로 설계되었다. 플랜지는 SA182-F304를, 나머지는 SA240-304로 재질을 적용하였고 ASME 코드 상의 재료 허용응력(S)는 138 MPa로 동일하다.

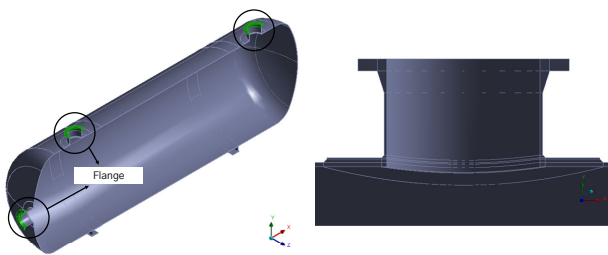


Fig. 1. Initial design of pressure vessel

식 (1)에서 식 (4)는 ASME Code Sec. VIII, Div.2, 2013[3]에 따른 압력용기 구조해석 평가기준을 보여준다.  $P_m$ (일반 막응력),  $P_L$ (극부막응력),  $P_b$ (굽힘응력),  $Q$ (이차응력) 개별 혹은 조합을 ASME 코드에 있는  $S$ (허용응력)를 기준으로 평가한다. 굽힘응력이 발생하는 부분이라도 평가부위에 따라 이차응력으로 간주될 수도 있으므로, 평가부위 및 응력기준 모두를 고려한 구조안전성 평가가 필요하다.

$$P_m \leq S \tag{1}$$

$$P_L \leq 1.5S \tag{2}$$

$$P_L + P_b \leq 1.5S \tag{3}$$

$$P_L + P_b + Q \leq 3S \tag{4}$$

### 2.2 해석조건

Table 1은 해석 조건을 보여준다. Case 1은 설계조건, Case 2는 구동조건에서의 상황을 나타낸다. 보수적인 하중 상황을 부여하기 위해 온도조건을 제외하고는 구동조건용 하중을 설계조건용 하중과 동일하게 적용하여 해석 조건을 설정하였다.

Table 1. FEM analysis cases

Case	Pressure	Hydrostatic pressure	Temp.	Support condition
#1	10 bar	Full of water	-	Fixed left support & sliding right support
#2			232°C	

### 2.3 해석결과

Fig. 2는 구조평가가 이루어진 파트와 path를 보여주고, Table 2는 평가부위에 대한 결과를 보여준다. 평가부위는 높은 막, 굽힘, 이차응력강도를 보이는 부위를 기준으로 선정하였다. 해석결과, Path 2의 용접부 각장이 있는 부분에서 416.5 MPa의 응력강도가 나타났다. 이는 규정상 허용응력 414 MPa를 초과하는 것으로 구조적으로 안전하지 않다고 판단되어 설계 수정이 요구된다.

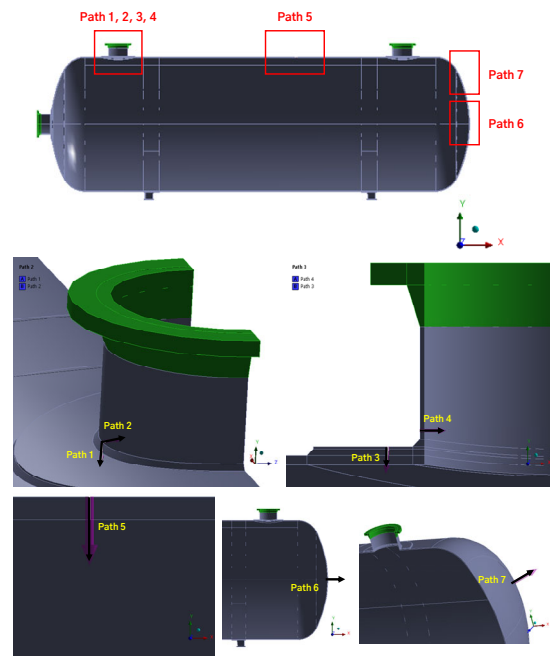


Fig. 2. Evaluation part and path

Table 2. Analysis results for initial design

Path	Case			
	Case 1	Case 2		
	$P_m$ (MPa)	$P_L$ (MPa)	$P_L + P_B$ (MPa)	$P_L + P_B + Q$ (MPa)
Path 1	-	71.3	-	223.0
Path 2	-	161.5	-	416.5
Path 3	119.7	-	-	181.2
Path 4	80.0	-	-	91.9
Path 5	117.0	-	-	150.2
Path 6	107.4	-	108.0	108.0
Path 7	-	198.2	-	287.7
Criteria (MPa)	138 (S)	207 (1.5S)	207 (1.5S)	414 (3S)

2.4 설계 수정

Fig. 3은 녹아웃드럼의 설계수정 모델을 보여준다. 해석 조건과 재료 물성은 초기 모델과 동일하나, 초기모델의 용접 각장 부분에서 높은 응력이 나타나므로 노즐 파이프에 대하여 외경 24 inch, 두께 10 ton, 용접각장 15 ton으로 설계 수정하였다. 해석조건은 초기모델에 대한 조건과 동일하게 수행하였다.

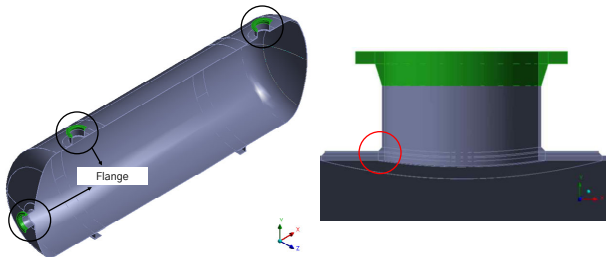


Fig. 3. Modified design of pressure vessel

2.5 수정된 설계의 해석결과

Table 3은 수정된 설계 모델에 대한 ANSYS[4] 구조해석 결과를 보여준다. 초기 모델에서 형태적인 변경이 많지 않으므로 평가부위는 동일하게 선정되고 평가되었다. 해석 결과 모든 평가부위에서 규정을 만족하는 결과를 보여 구조적으로 안전하다고 판단되었다.

Table 3. Analysis results for modified design

Path	Case			
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
	$P_m$ (MPa)	$P_L$ (MPa)	$P_L + P_B$ (MPa)	$P_L + P_B + Q$ (MPa)
Path 1	-	56.5	-	188.8
Path 2	-	162.0	-	390.1
Path 3	119.4	-	-	178.8
Path 4	80.6	-	-	89.7
Path 5	117.3	-	-	149.5
Path 6	107.5	-	108.1	108.1
Path 7	-	203.3	-	300.1
Criteria	138 (S)	207 (1.5S)	207 (1.5S)	414 (3S)

3. CFD를 활용한 액적제거 성능 평가

3.1 녹아웃드럼 형상 및 CFD 격자 모델

본 연구에서의 녹아웃드럼은 약 300  $\mu\text{m}$  이하의 액적만

을 배출하고 그 이상은 포집할 수 있는 성능을 지녀야 한다. Fig. 4는 녹아웃드럼 본체 내의 내부 유동영역에 대하여 실시한 3D 모델링 결과를 보여준다. 모델링은 범용 다물리계 전산해석 도구인 ANSYS(V18.0, USA) 내의 SpaceClaim을 활용하였으며[4], 용기 내에 차있는 수위를 고려하여 용기 내에서 기체가 유동할 수 있는 영역만을 반영하였다. 효율적인 해석 수행을 위해 형상 및 경계조건이 대칭인 점을 고려하여 1/2 대칭모델을 사용하였다.

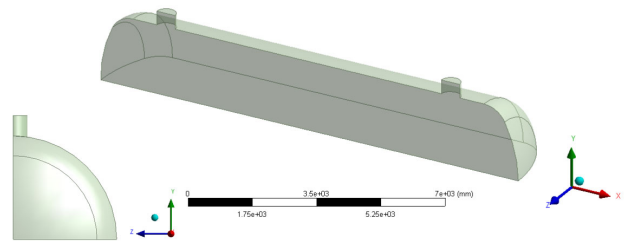


Fig. 4. 3D model for CFD analysis

Fig. 5는 형상 모델을 바탕으로 생성된 CFD 해석을 위한 격자를 보여준다. 노즐 및 드럼부의 최외곽에는 벽면 표면의 유동효과를 잘 반영할 수 있도록 경계층을 부여하였으며 절점과 요소가 각각 약 80만, 330만 개로 이루어졌다.

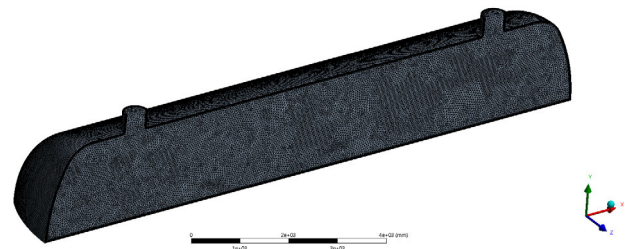


Fig. 5. Mesh for CFD analysis

3.2 물성 및 경계조건

유동해석은 ANSYS의 CFX[4]상용코드를 활용하였고, Table 4와같이 해석을 위해 용기로 유입되는 가스의 물성을 정의하였고 액적의 모사를 위해서 주로 메탄 액적이 용기 내로 유입되는 것을 참고하여 액체 상태의 메탄입자로 물성을 설정하였다. 유입되는 액적은 50  $\mu\text{m}$ 에서 500  $\mu\text{m}$ 까지 50  $\mu\text{m}$ 의 간격으로 총 10가지 크기의 입자들이 각각 0.001 kg/s로 유입된다고 가정하였다. Fig. 6에 CFD 해석에 적용된 경계조건을 간략히 묘사하였으며, 입구의 경계조건은 녹아웃드럼의 구동 및 유입가스의 조건을 기준으로 적용하였고, 출구는 상대압력을 0으로 설정하였다. 액적 입

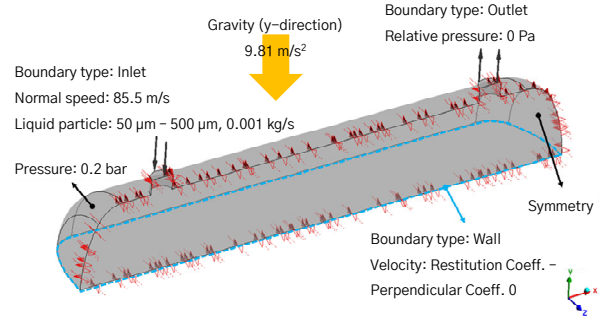
자들이 내부유동 중 침강하여 수면에 정착되는 현상을 모사하기 위하여, 입자의 경로를 추정할 수 있는 Lagrangian particle tracking 모델을 이용하고 최하부의 수면에서 표면의 수직방향 반발력을 0으로 설정하였다. 이는 입자가 이동 또는 자유낙하에 의해 수면과 접촉 시 탈출하지 못하고 포집된다는 것을 가정한 것이다.

**Table 4.** Material and domain properties

Material	Molar mass (kg/kmol)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Well gas	20.53	-
Methane droplet	16.04	410

3D Domain

- Material: Well gas
- Buoyancy
  - Gravity: Y direction -9.81 m/s<sup>2</sup>
  - Reference density: 0.966 kg/m<sup>3</sup>
- Fluid Pair Models : One-way particle coupling

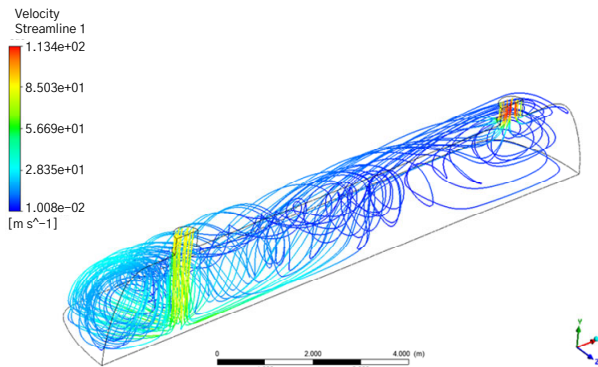


**Fig. 6.** Boundary conditions for CFD analysis

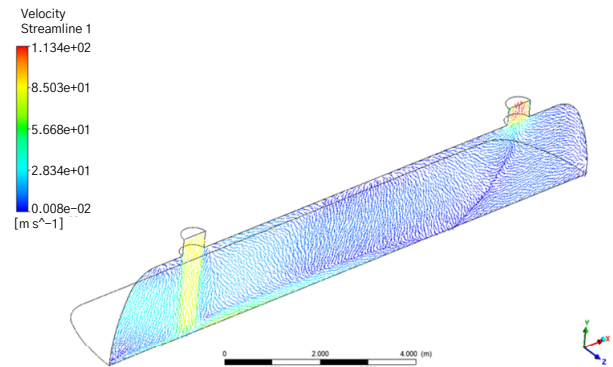
3.3 CFD 해석 결과

Fig. 7은 대상의 내부유동 해석결과를 보여주며 입구에서 들어온 가스 유동이 바닥면에서 수면을 따라 수평으로 빠르게 이동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 가스 유동의 영향으로 입구로 들어온 액적들은 그 크기별로 서로 다른 이동 경로를 나타낸다.

Fig. 8은 해석조건에서 가장 작은 액적 크기인 50 μm 입자의 이동 경로를 나타내었다. 입자 크기가 50 μm일 경우

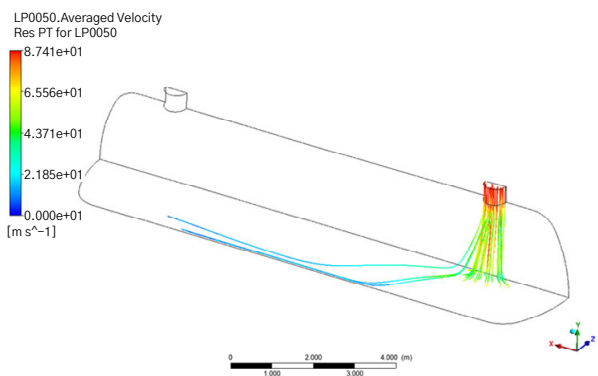


(a) Streamline plot for domain

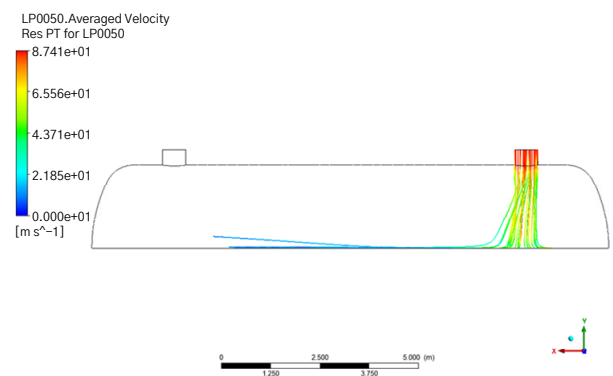


(b) Velocity vector plot on XY plane

**Fig. 7.** Modified design of pressure vessel



(a) ISO view



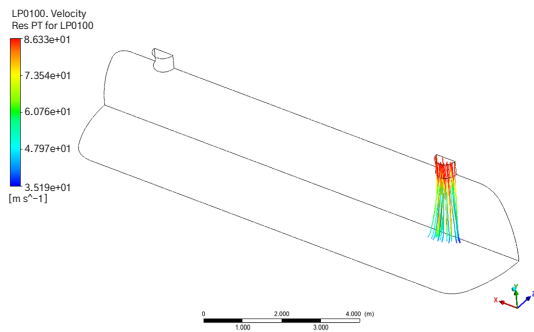
(b) Front view

**Fig. 8.** Particle tracking results - 50 μm

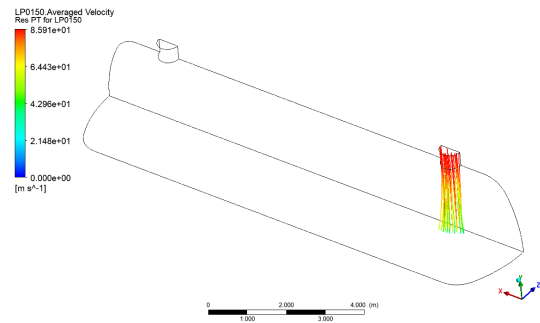
입구에서 수직으로 하강한 후 수면을 따라서 일부가 상승하는 현상이 나타난다. 작은 입자일수록 주변 유동의 영향을 더 많이 받게 되고 Fig. 7에서 나타난 유선들을 더 좇게 된다. 하지만 50  $\mu\text{m}$  크기의 입자도 초기 입구에서의 유입

속도에 따른 관성 효과가 더 크게 나타나고 있는 것으로 보였다.

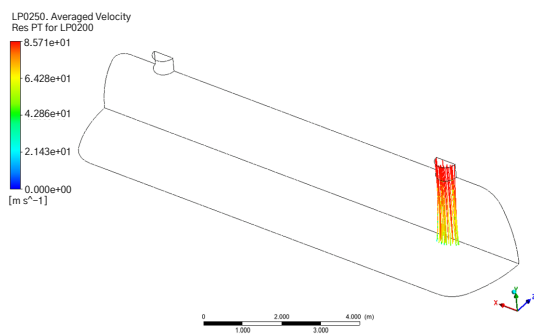
Fig. 9는 100  $\mu\text{m}$  - 450  $\mu\text{m}$  사이의 크기를 가진 입자들의 이동 경로를 추적한 결과를 보여준다. 100  $\mu\text{m}$  크기의 입자



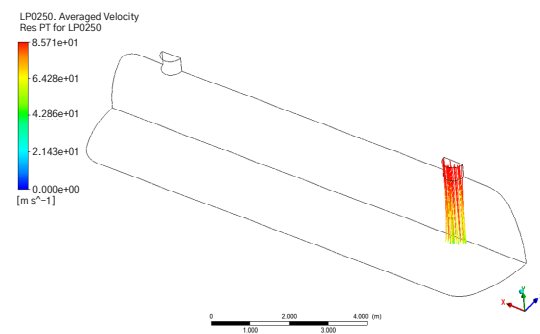
(a) Size 100  $\mu\text{m}$



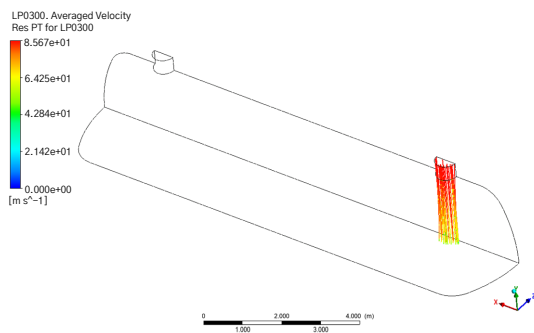
(b) Size 150  $\mu\text{m}$



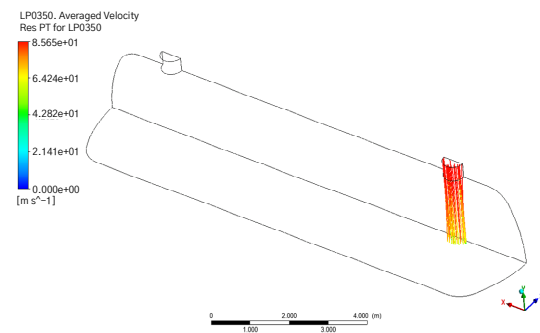
(c) Size 200  $\mu\text{m}$



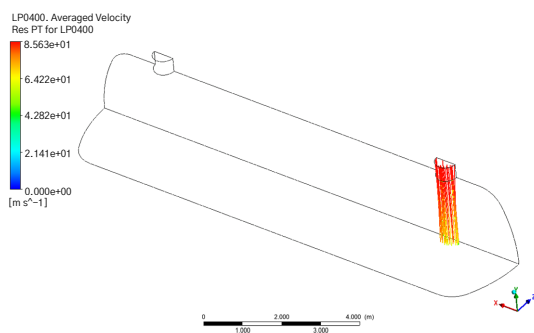
(d) Size 250  $\mu\text{m}$



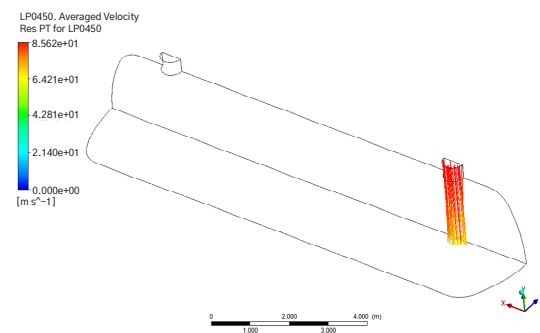
(e) Size 300  $\mu\text{m}$



(f) Size 350  $\mu\text{m}$



(g) Size 400  $\mu\text{m}$



(h) Size 450  $\mu\text{m}$

Fig. 9. Particle tracking results (100  $\mu\text{m}$  - 450  $\mu\text{m}$ )



가 이동하는 경로를 보면, 예상되는 바와 같이 50  $\mu\text{m}$  크기의 입자보다 입구로 유입된 후 수면 부근까지 이동하면서 발생하는 경로 변화가 더 적다는 것을 확인할 수 있는데 이는 관성효과가 더 커지기 때문으로 보인다. 이후의 150  $\mu\text{m}$  이상의 결과들을 보면 초기 투입속도로부터 이동하면서 발생하는 감속이 더 적어지기 시작한다는 것을 확인할 수 있다.

Table 5는 각 사이즈별로 유입된 입자와 포집되는 입자의 유량 결과를 보여주고 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 나온 결과와 유사하게 유입된 입자의 탈출 정도가 매우 낮다는 것이 확인된다. 50  $\mu\text{m}$  크기의 액적입자들은 97.9 % 정도 포집되었는데, 이는 2.1 % 정도의 입자들이 토출구로 탈출했다는 의미이다. 100  $\mu\text{m}$  크기 이상의 다른 결과들을 살펴봤을 때 녹아웃드럼의 성능 기준인 300  $\mu\text{m}$  이상의 입자는 거의 제거될 것으로 예상되었다. CFD는 통해 살펴본 액적 제거 성능에 있어서는 녹아웃드럼이 충분하거나 과한 설계가 이루어졌음을 예측할 수 있었다.

**Table 5.** Particle mass flow result

Droplet size ( $\mu\text{m}$ )	Input mass flow (kg/s)	Captured mass flow (kg/s)	Separation rate (%)
50	0.001	0.000977	97.7
100	0.001	0.001	100
150	0.001	0.001	100
200	0.001	0.001	100
250	0.001	0.001	100
300	0.001	0.001	100
350	0.001	0.001	100
400	0.001	0.001	100
450	0.001	0.001	100
500	0.001	0.001	100

## 4. 결론

본 연구는 잔여 가스를 배출하고 처리하는 안전 설비의 일부인 녹아웃드럼의 구조안정성 및 성능평가를 위해 진행되었다. 먼저 구조적 관점에서 ASME 규정의 압력용기 설계에 관한 규칙을 적용하여 녹아웃드럼의 구조설계에 대한 안정성을 검토하였으며, 이를 위해 FEM기법의 전산해석을 활용하였다. 전산해석을 이용하여 사전에 구조적인 문제점을 발견하고 이를 개선하여 새로운 설계에 반영할 수 있었다. 더불어 녹아웃드럼의 액적 포집 성능을 평가하기 위해서는 CFD 기법을 활용하는 방안을 제시하였다. 내부 기체의 유동해석과 입자추적기법을 통하여 녹아웃드럼 내 액적의 이동경로와 함께 크기별 포집율을 확인할 수 있었다. 설계된 녹아웃드럼은 기준이 되는 300  $\mu\text{m}$  이상의 액적을 잘 제거할 수 있는 것으로 예측되었다.

전산해석적인 방법을 통해 기존의 코드 기반의 한정적인 설계방법에서 벗어나 녹아웃드럼의 특성과 세부 형상 등을 달리했을 때 나타날 성능을 미리 검토할 수 있는 효과적인 방안을 제시하였으며, 기존에 일부 과설계되던 방식을 개선하는데 이용될 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

- [1] ASME, "Boiler and Pressure Vessel code Sec. II, Part D," ASME, New York, 2013
- [2] API, "API Standard 521 Pressure relieving and Depressuring Systems," API, 2014
- [3] ASME, "Rules for Construction of Pressure Vessels Code Sec. VIII, Div.2," ASME, New York, 2013
- [4] ANSYS, "Users Guide," 2019.