

관로내부에서 질소기체치환과정의 흐름특성에 대한 수치해석

리성혁, 박명진

우리는 섬유의 열처리에 이용되는 관로식열처리장치에서 질소기체치환과정의 흐름특성에 대한 수치모의연구를 진행하였다. 고온기체가 흐르는 관로에서 질소기체치환과정을 정확히 해석하는것은 장치의 운영을 합리적으로 하는데서 중요한 문제로 나선다.

선행연구[1]에서는 관로내부에서 질소기체치환과정에 대한 1차원해석을 진행하여 류량증가에 따르는 질소소비량의 감소특성을 밝혔으며 선행연구[2]에서는 원기둥형구역에서 수소분포에 대한 CFD모의를 진행하여 다성분매질의 농도분포해석에 수치모의를 적용하는 방법론에 대하여 밝혔다.

본문에서는 2성분매질의 3차원흐름에 대한 비정상 CFD해석을 진행하여 관로에서 류량증가에 따르는 질소기체치환시간의 감소특성과 소비량의 변화특성, 흐름특성을 평가하여 장치의 초기가동시 가장 적합한 질소주입류량을 결정하였다.

1. 기본방정식과 문제설정

수치모의를 위하여 관로안의 류체는 질소와 산소 2성분매질로 구성되어있다고 가정하고 혼합모형에 대한 기본방정식을 리용하였다.[3] 즉 혼합모형에서 연속방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

이다. 여기서 \vec{v}_m 은 질량평균속도이고 ρ_m 은 혼합매질의 밀도이다. 즉

$$\vec{v}_m = \frac{\alpha_n \rho_n \vec{v}_n + \alpha_o \rho_o \vec{v}_o}{\rho_m}, \quad \rho_m = \alpha_n \rho_n + \alpha_o \rho_o \quad (2)$$

여기서 α_n 은 질소의 체적분률이고 α_o 는 산소의 체적분률이다.

운동방정식은

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_{dr,l} \vec{v}_{dr,l} + \alpha_v \rho_v \vec{v}_{dr,v} \vec{v}_{dr,v}) \quad (3)$$

이다. 여기서 μ_m 는 혼합매질의 점성계수이다. 즉

$$\mu_m = \alpha_n \mu_n + \alpha_o \mu_o \quad (4)$$

또한 매 성분의 이류속도는 다음과 같다.

$$\vec{v}_{dr,n} = \vec{v}_n - \vec{v}_m, \quad \vec{v}_{dr,o} = \vec{v}_o - \vec{v}_m \quad (5)$$

계산에 리용되는 관로는 길이가 3m이고 내경이 28mm이며 관로의 가운데부분에 있는 주입구를 통하여 순도가 99.99%인 고온질소기체가 주입된다.(그림 1)

주어진 대상에 대한 3차원흐름해석을 위하여 먼저 그물작성프로그램인 Gambit를 리용하여 계산그물을 작성하였다. 흐름의 대칭성을 고려하여 한쪽부분에 대해서만 그물을 작성하였다. 외부계산구역은 관로끝부분을 중심으로 직경과 높이가 300mm인 원기둥구역으로 설정하였으며 전체 계산구역에 대하여 대략 30만개의 정규그물을 작성하였다.(그림 2)

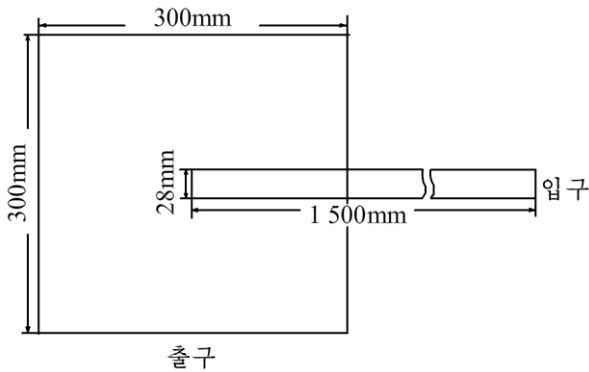


그림 1. 관로흐름계산을 위한 계산구역

였다. 비정상계산의 정확도를 보장하기 위하여 쿨란트수가 20보다 작도록 시간걸음을 취하고 매 시간걸음당 반복수를 100으로, 잔차한계를 모든 물리변수들에 관하여 10^{-5} 으로 취하였다.

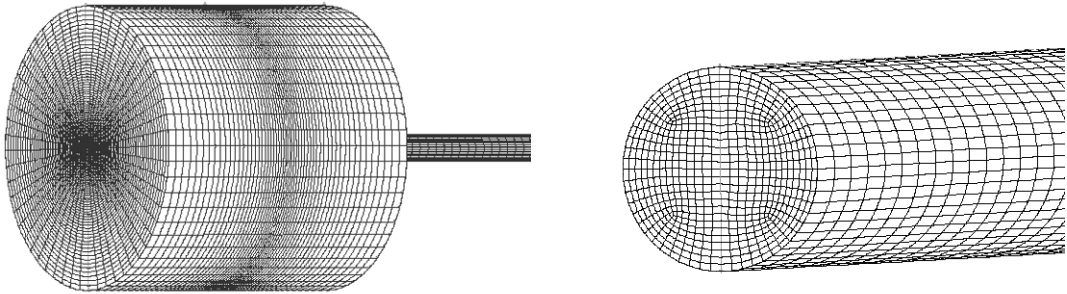


그림 2. 관로흐름계산을 위한 계산그물

경계조건으로서 입구질소농도가 99.99%, 산소농도가 0.01%로 되게 질량류량입구경계조건을 취하였으며 전체 류체구역에 대하여 초기질소농도를 79%, 초기산소농도를 21%로 취하였다.

2. 계산결과 및 분석

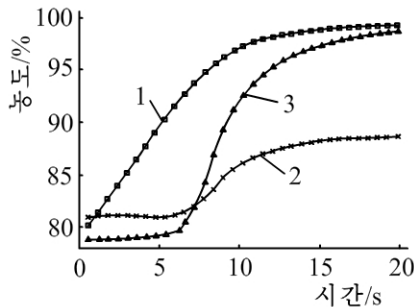


그림 3. 류량이 0.1g/s일 때 시간에 따르는 질소기체평균농도변화특성

1—체적평균농도, 2—출구자름면평균농도,
3—내부자름면평균농도

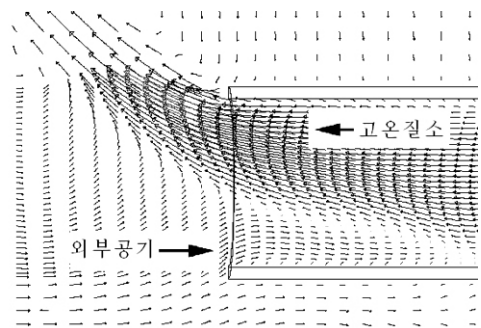


그림 4. 류량이 0.1g/s일 때 관로출구부분에서 외부공기의 침습현상

그림 3은 류량이 0.1g/s일 때 관로내부에서 질소기체의 농도변화특성을 보여주고있으며 그림 4는 관로출구부분에서 외부공기의 침습현상을 보여주고있다. 그래프에서 알수 있는 것처럼 관로출구자름면에서 질소기체의 평균농도값은 외부공기의 침습현상으로 인하여 아무리 시간이 지나도 일정한 값이상으로 증가하지 못한다. 그래서 외부공기의 침습이 충분히 없다고 볼수 있는 면 다시말하여 출구로부터 50mm 위치에서의 질소기체의 평균 농도값을 평가하여 그래프로 보여주었다.

류량에 따르는 외부공기의 침습정도는 각이하므로 치환시간을 공통적으로 관로내부 구역에서의 질소기체평균농도값이 98%이상으로 되는 시간으로 규정하고 흐름해석을 진행하였다.(표)

표. 류량에 따르는 치환시간 및 소비량

류량/(g·s ⁻¹)	치환시간/s	소비량/g
0.01	191.10	1.911
0.05	23.70	1.185
0.1	11.64	1.164
0.15	7.85	1.178
0.2	6.06	1.212
0.25	4.96	1.239
0.3	4.23	1.269
0.35	3.70	1.295
0.4	3.31	1.323
0.45	2.99	1.347
0.5	2.74	1.368

표와 그래프로부터 질소주입류량이 증가함에 따라 치환시간은 작아지며 이때 치환에 소비되는 질소량은 처음에는 크게 감소하다가 0.1g/s이상의 류량에서는 다시 점차적으로 증가하는 경향성을 띠는것을 알수 있다.(그림 5, 6)

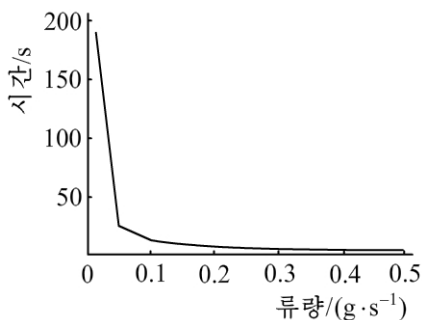


그림 5. 류량에 따르는 치환시간

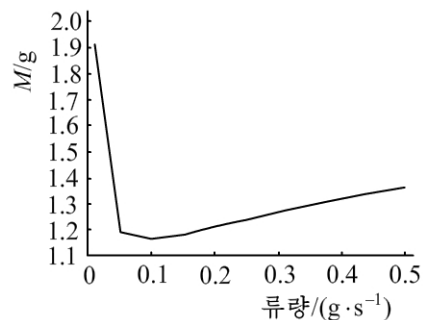


그림 6. 류량에 따르는 질소소비량

관로에서 질소기체치환과정은 주입질소의 이류확산에 의한것이다. 그런데 관로에서 흐름이 진행될 때 주입되는 질소는 밀도가 작으므로 관로안에 이미 있던 공기와 층으로 분리되게 된다. 그러므로 관로의 반경방향으로의 치환은 확산에 크게 의존한다고 볼수 있다. 류량이 0.01g/s로부터 0.1g/s까지 증가할 때에는 이류와 확산의 결합으로 치환이 효

를적으로 진행되어 소비량이 점점 감소하지만 류량이 0.1g/s보다 클 때에는 이류속도가 빨라서 확산이 미처 진행되지 못하고 고순도질소가 외부로 그대로 류출되기때문에 소비량이 많아진다고 볼수 있다. 그러나 1차원해석에서는 이러한 특성이 고려되지 않고 관로의 반경방향에서는 농도값들이 다 같다고 가정하기때문에 소비량이 단조감소하는 경향성이 나타나게 되는것이다.

관로내부에서 질소기체치환에 대한 3차원해석결과 류량이 비교적 작을 때에는 1차원 해석결과가 만족되지만 류량이 클 때에는 만족되지 않는다는것을 알수 있다. 즉 1차원해석결과에서는 질소소비량이 주입류량이 커질수록 작아지지만 3차원해석결과에서는 그와 달리 질소소비량이 최소로 되는 질소주입조건이 결정된다. 주어진 열처리장치의 초기가동시 질소소비량을 최소로 하기 위하여서는 질소주입류량을 0.1g/s로 하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 리성혁 등; 기계공학, 3, 20, 주체108(2019).
- [2] D. C. Visser; Nuclear Engineering and Design, 245, 161, 2012.
- [3] K. Ueyama; J. Fluid Mechanics, 690, 474, 2012.

주체108(2019)년 9월 15일 원고접수

Numerical Analysis of the Substitution and Flow Characteristics of Nitrogen in a Duct

Ri Song Hyok, Pak Myong Jin

In this paper, using the three-dimensional unsteady CFD analysis of two-component material we estimate the decreasing characteristics of substitution time of Nitrogen, changing characteristics of consumption and flow characteristics while the mass flow rate is increasing in a duct, and determine the appropriate mass flow rate for the initial running of the device.

Keywords: CFD, duct flow, substitution