Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association, 27(3), pp.75-80 (2019)
ISSN 1225-6498 eISSN 2508-3015 https://doi.org/10.17137/korrae.2019.27.3.75

Original Paper

물 난류에서의 암모니아 흡수 거동 해석

이상룡[a], 박진원[b†]

Interpretation of Ammonia Absorption Behavior in Water Turbulent Flow

Sang-Ryong Lee[a], Jin-Won Park[b†]

(Received: Aug. 5, 2019 / Revised: Sep. 16, 2019 / Accepted: Sep. 16, 2019)

ABSTRACT: The article is devoted to the interpretation of ammonia, one of the fine dust precursors, absorption behavior in water turbulent flow. The water flow was considered as a turbulent flow with Reynolds number more than 10^4, because ammonia gas penetration depth was deeper at turbulent flow compared to laminar flow. For the interpretation, the dimensionless mass transfer governing-equation and the constant physical-properties at room temperature were used. The diffusivity of ammonia in water and the kinematic viscosity of water were 2×10^{-9} m^2/s and 1×10^{-6} m^2/s, respectively. The concentration distribution of ammonia in water was estimated with respect to the position from the point where the water started to be exposed to ammonia. The quantitative distribution as a function of the mixing length was also acquired. The quantitative interpretation may provide the insight how much the turbulent flow was more efficient to remove ammonia rather than the laminar flow.

Keywords: Ammonia absorption, Water turbulent flow, Dimensionless mixing depth, Concentration distribution, Average concentration

초 록: 본 연구는 난류로 흐르는 물에서 미세먼지 전구체 중 하나인 암모니아가 흡수되는 거동을 해석하였다. 물의 흐름이 층류보다 난류인 조건에서 암모니아의 침투 깊이가 더 깊으므로 레이놀즈 수가 10^4보다 큰 난류 조건이 고려된다. 거동 해석을 위하여, 무차원 물질전달 지배방정식과 상온 기준의 일정한 물성치들이 사용되었다. 물에서의 암모니아 확산계수와 물의 동점도계수는 각각 2.45×10^{-9} m^2/s와 1×10^{-6} m^2/s이었다. 물에서의 암모니아 농도 분포는 암모니아에 노출되기 시작하는 지점으로부터의 위치에 대하여 산출되었다. 혼합 깊이에 따른 정량적인 분포 또한 도출되었다. 이와 같은 정량적인 해석은 난류로 흐르는 물이 층류로 흐르는 것과 비교하여 얼마나 더욱 효율적으로 암모니아를 제거할 수 있는지에 대한 통찰력을 제시할 수 있다.

주제어: 암모니아 흡수, 물 난류 흐름, 무차원혼합깊이, 농도 분포, 평균농도

[a] 동국대학교 바이오시스템대학 바이오환경과학과 조교수(Assistant Professor, Department of Biological and Environmental Science, College of Life Science and Biotechnology, Dongguk University)
[b] 서울과학기술대학교 에너지바이오대학 화공생명공학과 정교수(Professor, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, College of Energy and Biotechnology, Seoul National University of Science and Technology)
† Corresponding author(e-mail: jwpark@seoultech.ac.kr)

1. 서 론

암모니아는 질소와 수소로 이루어진 화합물로, 표준 온도와 압력에서 독성을 가진 자극성 이 강한 무색의 부식성 알칼리성 기체이다. 축산분야에서 암모니아 기체의 주요 배출원은 주로 농업 부문 의 가축사육 및 분뇨처리, 비료 사용과 생산공정시설 등으로 알려져 있다. 암모니아는 직접적으로 피부와 호흡기관에 자극을 줄 수 있으며, 간접적으로 화학반응을 통해 미세먼지를 생성시킨다. 수도권에서 측정된 미세먼지의 구성성분은 황산암모늄과 질산암모늄이 전체 미세분진 농도의 25.9~35.2%를 차지하는데, 이 물질들은 암모니아가 황산화물 혹은 질소산화물과 반응하여 생성된 물질들이다. 황산암모늄과 질산암모늄과 같은 에어로졸의 대기 중 체류시간은 약 15일로서, 멀리 떨어진 지역에 영향을 줄 수 있으며 다양한 형태로 화학반응을 일으킬 수 있음을 시사한다.[1)]

기체 상태의 암모니아를 줄이기 위한 여러 방법들이 제시되어 왔다. 그 중 대표적인 것들이 스크러빙, 분해, 그리고 산화공정들이다.[2-4)] 스크러빙은 낙하하는 물방물에 암모니아가 흡수되는 현상을 이용한 것이고, 분해는 고온에서 금속촉매 조건하에 암모니아가 질소 기체로 분해되는 반응이며, 산화는 암모니아를 질소산화물로 전환시키는 원리를 토대로 개발된 공정이다. 이 공정들은 각각의 개념들로부터 파생되는 특징들을 가지고 있다.

암모니아가 물에 매우 흡수가 잘 되는 현상을 이용하려는 노력은 계속 이어져 왔다. 위에 언급된 바 있는 스크러빙도 그 중 하나의 사례에 해당된다. 그러나, 암모니아는 증기압이 낮으므로 물에 녹은 후에는 최대한 계면으로부터 깊게 분포되는 것이 유리하다. 따라서, 암모니아의 침투를 증가시키는 관점에서는 층류보다는 난류에서 유리할 것으로 판단된다. 그런데, 난류 조건을 다른 관점에서 고려하면, 빠른 흐름이 암모니아 기체에 대해 노출될 수 있는 시간의 감소를 의미할 수도 있다. 따라서, 물의 겉보기 흐름이 느리되 난류가 될 수 있도록, 관에 방해판을 설치하여 노출시간을 확보하면서 침투가 증가될 수 있는 방안을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 층류와 비교하여 난류에서의 암모니아 흡수 거동을 해석하고자 한다.

2. 연구방법

위치에 따른 암모니아 농도의 분포를 계산하기 위하여 다음의 상황을 고려한다. 반지름이 R인 원통관 안에 물이 흐르고 있으며, 물은 원통관의 반지름만큼의 높이까지 채워져 있다. 원통관의 위 부분은 대기중에 열려 있어 암모니아 기체가 물로 흡수될 수 있도록 한다. 아래의 Fig. 1은 본 상황의 단면도를 나타낸 것이다.

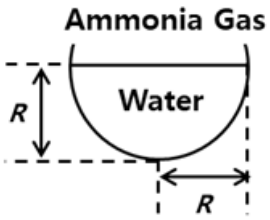

Fig. 1. Side view of water flow exposed to ammonia gas.

난류와 층류에 대해 무차원 물질전달식을 아래와 같이 각각 고려하였다. 물의 흐름을 z방향, 물의 흐름과 수직이며 원통관의 중심으로부터 멀어지는 방향을 r방향으로 가정하고 한다.

$$v^+\frac{\partial C}{\partial z^+}=\frac{1}{r^+}\frac{\partial}{\partial r^+}\left[r^+\left\{\frac{1}{Sc}+(l^+)^2\left|\frac{dv^+}{dr^+}\right|\right\}\frac{\partial C}{\partial r^+}\right] \quad (1)$$

$$\left\{1-\left(\frac{r^+}{R^+}\right)^2\right\}\frac{\partial C}{\partial z^+}=\frac{1}{ReSc}\frac{1}{r^+}\frac{\partial}{\partial r^+}\left[r^+\frac{\partial C}{\partial r^+}\right] \quad (2)$$

$v^+=\frac{v_z}{v_*}$, v_z는 z방향으로 흐르는 물의 속도, $v_*=\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$, τ_0는 관 벽에 작용하는 전단응력, ρ는 물의 밀도, C는 암모니아 농도, $z^+=\frac{zv_*}{\nu}$, ν는 물의 동점도, $r^+=\frac{rv_*}{\nu}$, $Sc=\frac{\nu}{D}$, D는 물에서의 암모니아 확산계수, $l^+=\frac{lv_*}{\nu}$, l은 혼합깊이, $Re=\frac{2R\langle\overline{v_z}\rangle}{\nu}$, 그리고 $\langle\overline{v_z}\rangle$는 z방향으로 흐르는 물의 평균 속도

식(1)은 난류에 적용되는 식이며, 식(2)는 층류에 해당된다. 이 식들은 해석적인 해를 얻을 수 없는 형태이므로, 수치해석에 의해 관계를 구한다. 이를 위하여 차분근사법이 적용된다. 차분근사법 (finite difference method) 가운데서도 전개항의 수렴안정성을 확보하기 위하여, 후진차분근사법 (backward finite difference method)을 수행한다. 이에 대한 z방향으로의 1차항과 r방향으로의 1차와 2차 미분항을 다음과 같이 고려한다.

$$\frac{\partial C}{\partial z^+} = \frac{C_{n,j+1} - C_{n,j}}{\triangle z^+} \tag{3}$$

$$\frac{\partial C}{\partial r^+} = \frac{C_{n+1,j+1} - C_{n-1,j+1}}{2\triangle r^+} \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial r^{+^2}} = \frac{C_{n+1,j+1} - 2C_{n,j+1} + 2C_{n-1,j+1}}{(\triangle r^+)^2} \tag{5}$$

n은 r방향에 대한 분획, 그리고 j는 z방향에 대한 분획의 서수이다.

식(3)-(5)를 식(1)과 (2)에 대입하고, 경계조건을 적용한다. 경계조건은 다음과 같은 조건들을 이용하였다. 기체에 노출되기 시작하는 지점에서의 암모니아 농도를 0으로 두었고, 기액계면에서의 농도는 용해도를 이용하였으며, 계면으로부터 멀리 떨어진 지점에서의 농도는 0인 조건으로 계산을 수행하였다. 또한, 계산에 필요한 물성치인 확산계수와 동점도는 각각 2.45×10^{-9} m^2/s와 1×10^{-6} m^2/s이었다.

위의 지배방정식에서, 속도값은 이미 완전히 위치에 따른 속도값은 완전확립이 된 것으로 고려하여 초입 및 말단 효과가 없는 것으로 가정한다. 따라서, z의 위치에 따른 속도값의 변화는 없다. 그리고, 물 흐름의 겉보기 속도는 동일하게 10^{-3} m/s로 두고 관의 직경은 1 m로 가정하여, 난류의 발생은 순수하게 방해판에 의해서 나타나도록 설정한다. 이 속도에서는 방해판이 없는 상황에서 레이놀즈 수가 1×10^3에 해당되는 층류이다. 그리고, 난류의 속도분포는 아래의 식들로 나타낸다.

$$v^+ = (R^+ - r^+)\left[1 - \frac{1}{4}\left(\frac{R^+ - r^+}{14.5}\right)^3\right] \quad \text{for } 0 < R^+\text{-}r^+ < 5 \tag{6}$$

$$v^+ = 5\ln(R^+ - r^+ + 0.205) - 3.27 \quad \text{for } 5 < R^+\text{-}r^+ < 30 \tag{7}$$

$$v^+ = 2.5\ln(R^+ - r^+) + 5.5 \quad \text{for } 30 < R^+\text{-}r^+ \tag{8}$$

각 상황에 따른 계산값들을 정량적으로 비교하기 위하여 무차원 물질전달 지배방정식의 무차원 반지름 값이 0.05인 지점의 암모니아 농도가 용해도에 가까운 상황을 무차원 길이가 1이 되도록 기준을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

정성적으로 예상한 바와 같이, 무차원혼합깊이(l^+)가 증가함에 따라 물 속에 녹는 암모니아의 농도가 증가하는 결과가 도출되었다. 이 결과는 Fig. 2에 제시되어 있다. Fig. 2의 (A)는 원통관의 무차원 길이에 따른 암모니아의 농도분포를 보이고 있다. 비교를 위한 기준을 다음과 같이 설정하였다. 첫 번째로 무차원깊이를 0.05인 지점으로 고정시켰다. 지나치게 깊은 지점을 고려할 경우에, 계산 자체는 가능할지라도 실험적인 변수로서의 의미는 퇴색될 수 있기 때문이다. 그 후, 무차원깊이가 0.05인 지점에서 용해도 대비 농도(무차원농도)가 1에 가까운 원통관의 무차원길이를 1로 가정하였다. 무차원농도가 1인 경우는 무차원길이가 무한대가 되어야 하므로, 1에 가까운 값(0.9가 초과되는 값)에 해당될 때로 무차원길이를 1로 설정하였다. 계산 결과는 난류조건에서 원통관의 무차원길이가 1에 가까울수록 암모니아의 농도가 점차 완만하게 증가하는 양상을 보이고 있다. 이 양상은 예상된 결과로서, 용질의 농도가 용해도에 가까울수록 증가되는 폭이 둔화되기 때문이다. 둔화되는 정도는 무차원혼합깊이가 클수록 더욱 뚜렷하게 관찰된다. 이 결과 역시, 무차원혼합깊이가 큰 값에서 용질의 농도가 용해도에 더 가까운 것에 기인한 것으로 판단된다. 제시된 결과를 해석하면, 무차원혼합깊이의 증가폭과 물 속에 녹아있는 암모니아의 무차원농도 값이 거의 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

난류에서의 암모니아 무차원농도 분포는 층류에서의 결과와 명확히 다른 것을 알 수 있다. Fig. 2 (A)의 그래프에서 그 차이가 제시되어 있다. 층류의

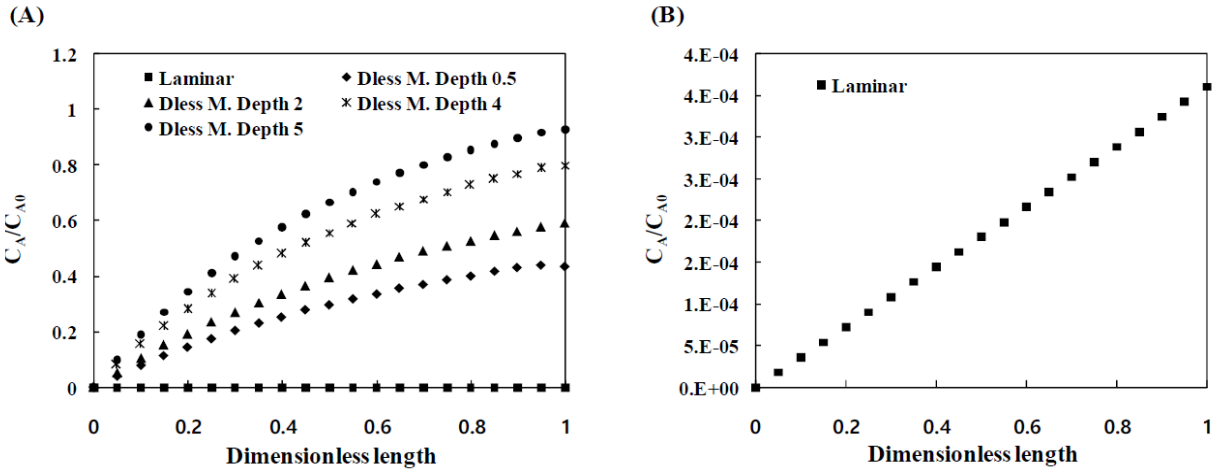

Fig. 2. (A) Dimensionless ammonia concentration distribution(C_A/C_{A0}) with respect to the dimensionless length at each dimensionless mixing depth and laminar flow, (B) distribution with expanded scale at laminar flow(dless M. depth stands for dimensionless mixing depth).

결과를 인지하기 어려우므로, Fig. 2의 (B)에 층류만을 대상으로 한 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 암모니아의 무차원농도가 무차원길이와 선형적으로 비례함을 보여주고 있다. 층류는 흐름의 뒤섞임이 없는 조건이므로 암모니아 자체의 침투깊이 값이 매우 작다. 따라서, 층류에서의 암모니아 확산은 고려되는 반지름 방향의 좌표값이 매우 작은 범위에 해당되기 때문에, 근사적으로 도출되는 해석적인 해인 에러함수의 극단 영역으로 예상된다. 즉, 층류에서의 결과는 본 연구에서 수행된 수치적인 계산방법이 적절함을 확인시켜주는 결과이기도 하다.

Fig. 3은 무차원반지름 방향으로의 값에 따른 무차원농도의 분포를 보여주고 있다. 무차원길이의 증가에 따라 농도의 증가는 Fig. 2에서와 일치된 결과이며, 반지름 방향의 값이 커질수록 농도값은 0에 수렴하고 있다. 이 경향은 농도분포 계산에 있어서 사용된 경계조건 “기액계면으로부터 멀리 떨어진 위치에서의 농도를 0으로 가정한다.”에 부합되는 결과이다. 그리고, 반지름 방향으로의 분포 결과는 특정한 조건에서 흐르는 유체가 암모니아 기체에 노출되었을 때 그 유체에 분포하고 있는 암모니아의 평균 농도를 계산하기 위해 이용될 수 있다. 평균농도의 계산은 무차원길이가 1인 지점에서 무차원반지름을 적분변수로 무차원농도에 대한 관계식을 적분하여 수행될 수 있다. 계산에 대한 수식은 식(9)와 같다.[8)]

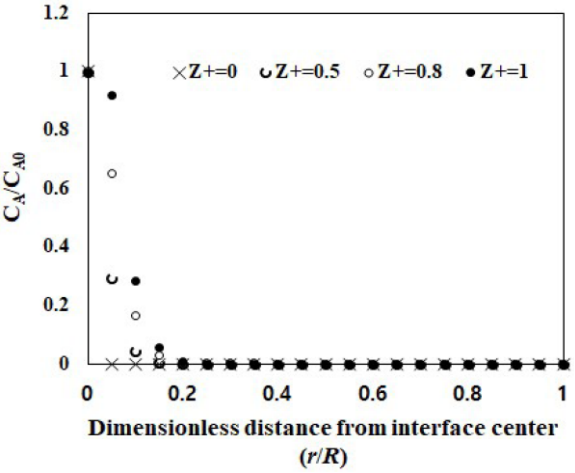

Fig. 3. Dimensionless ammonia concentration distribution (C_A/C_{A0}) with respect to the dimensionless radius at each dimensionless length of dimensionless mixing depth 5.

$$\frac{C_{A,Average}}{C_{A0}} = \pi \int_0^1 \frac{r^+}{R^+} \frac{C_A}{C_{A0}}\Big|_{z^+=1} d\left(\frac{r^+}{R^+}\right) \quad (9)$$

흐름의 조건들에 따른 평균 농도의 값들은 아래 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1에 제시된 바와 같이, 암모니아 평균 농도와 무차원혼합깊이의 관계를 산출할 수 있다. 즉, 무

Table 1. Dimensionless Average Ammonia Concentration in Flow with Respect to Flow Condition

Flow condition	Laminar	Turbulent			
		Dless M. Depth 0.5	Dless M. Depth 2	Dless M. Depth 4	Dless M. Depth 5
Dimensionless average ammonia concentration	4×10^{-4}	0.13	0.17	0.23	0.27

차원혼합깊이는 암모니아 농도의 표지자로 활용될 수 있다. 이 무차원혼합깊이는 난류조건에서 주어진 실험조건에 따라 달라지며, 이 실험조건은 유체의 겉보기 속도값, 혹은 설치된 방해판의 상황에 의해 결정된다. 따라서, 특정 난류 조건에 대하여 무차원 혼합깊이의 값이 실험실 규모에서 도출되었을 때, 이 변수의 값을 매개로 공장규모의 공정에서 나타날 수 있는 암모니아의 농도 분포와 평균 농도를 예측할 수 있다. 그러므로, 난류 조건에서의 암모니아 분포에 대하여 스케일업의 수행을 위한 토대가 확보될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구는 난류로 흐르는 물에서 미세먼지 전구체 중 하나인 암모니아가 흡수되는 거동을 해석하였다. 물의 흐름이 층류보다 난류인 조건에서 암모니아의 침투 깊이가 더 깊으므로 레이놀즈 수가 10^4이상인 난류 조건이 고려된다. 거동 해석을 위하여, 무차원 물질전달 지배방정식과 상온 기준의 일정한 물성치들이 사용되었으며, 암모니아 농도 분포는 암모니아에 노출되기 시작하는 지점으로부터의 위치에 대하여 산출되었다. 그리고 혼합 깊이에 따른 정량적인 분포과 평균농도가 계산되었다. 이 결과로부터, 층류와 난류사이의 암모니아 분포 차이를 정량화된 관점에서 인식할 수 있다. 또한, 암모니아 분포에 대한 표지자로서의 무차원혼합깊이 값은 스케일업 과정에서의 변수로써 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림축산식품기획평가원 ”Technology Development Program for Agriculture and Forestry [318014]“와 농촌진흥청 “Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. PJ01429701)" 의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Irwin, J. G., Williams, M. L., “Acid rain: Chemistry and transport”, Environmental Pollution, 50(1-2), pp. 29~59. (1988).
2. Sørensen, L. L., Granby, K., Nielsen, H. and Asman, W. A. H., “Diffusion scrubber technique used for measurements of atmospheric ammonia, Atmospheric Environment”, 28, pp. 3637~3645. (1994).
3. Bjoerkman, E. and Sjostrom, K., “Decomposition of ammonia over dolomite and related-compounds”, Energy & Fuels, 5, pp. 753~760. (1991).
4. Lindstedt, R. P., Lockwood, F. C. and Selim, M. A., “A detailed kinetic study of ammonia oxidation”, Combustion Sci & Technol., 108, pp. 231~254. (1995).
5. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N., Transport phenomena, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 657~667. (2006).
6. Hanna, O. T. and Sandall, O. C., Computational methods in chemical engineering, Prentice Hall International Inc., New Jersey, pp. 359~369. (1995).
7. Wilke, C. R. and Chang, P., “Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions”, AIChE Journal,

1, pp. 264~270. (1955).
8. Lin, C. S., Moulton, R. W. and Putnam, G. L., “Mass Transfer between Solid Wall and Fluid Streams. Mechanism and Eddy Distribution Relationships in Turbulent Flow”, Ind. Eng. Chem., 45, pp. 636~640. (1953).
9. Higbie, R., “The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid during Short Periods of Exposure”, Transactions of the AIChE, 31, pp. 365~389. (1935).