

역류식 충전탑에서 Raschig Super-ring Random Packing의 수력학적 특성에 대한 연구

강성진^{1,*}, 임동하^{2,*}

¹(주)엔티아이이엔씨

46742 부산광역시 강서구 과학산단1로 60번길 31

²한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹

44413 울산 중구 중가로 55

(2020년 6월 8일 접수; 2020년 6월 22일 수정본 접수; 2020년 6월 23일 채택)

A Study on the Hydraulic Characteristics of Raschig Super-Ring Random Packing in a Counter-Current Packed Tower

Sung Jin Kang^{1,*}, and Dong-Ha Lim^{2,*}

¹NTI E&C

31 Gwahaksandan 1-ro, 60beon-gil, Gangseo-gu, Buasn, 46742, South Korea

²Green Materials & Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

55 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, 44413, South Korea

(Received for review June 8, 2020; Revision received June 22, 2020; Accepted June 23, 2020)

요 약

오늘날 석유화학, 정밀화학, 대기오염 방지산업 등에서 증류, 흡수, 추출, 탈거 등 물질분리 단위공정으로 주로 충전탑을 사용해 왔다. 충전탑은 가스-액체, 가스-가스 시스템에서의 물질들과의 접촉에 의해 운전되어 진다. 이러한 충전탑은 낮은 압력손실, 경제적 효율, 고온성 액체물질 적용, 유지보수 용이, 유해가스 처리 등의 운영에서 장점들을 가진다. 충전탑의 성능은 충전물을 통해 가스와 액체를 고르게 분산함으로써 우수한 성능을 보이며, 이는 충전탑 설계에 있어 중요한 인자로 고려되어진다. 본 실험에서는 충전물에 대한 액체부하 및 가스용량인자에 따른 건조압력손실, 수력학적 압력손실, 액체함량 변화에 대한 기하학적 특성에 대하여 연구하였다. 결과로부터 설계인자와 운전조건 등의 유해가스 처리에 필요한 인자를 도출하였다. 임의 충전물인 raschig super-ring에 대한 건조압력손실을 측정된 결과, 가스용량인자가 증가할수록 일정하게 선형적으로 증가하였고, 가스용량인자가 0.630 ~ 3.448 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹에서 건조압력손실은 1.892 ~ 47.312 mmH₂O m⁻¹로 기존 산업현장에서 보편적으로 사용되는 35 mm pall-ring보다도 낮은 압력손실을 보였다. 그리고 raschig super-ring에 대한 수력학적 압력손실을 측정된 결과, 고유 액체부하에 대하여 가스용량인자가 증가할수록 압력손실도 함께 증가함을 확인하였고, 액체부하 변화에 따른 가스용량인자가 1.855 ~ 2.323 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹으로 20% 증가할 때, 압력손실은 약 17% 증가하는 것으로 나타났다. 마지막으로, 충전물 체적에 관한 액체함량은 가스용량인자에 의존된 액체부하 매개변수로서 액체부하 변화에 따른 가스용량인자 약 3.84 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹까지는 거의 일정한 액체함량을 보였으나, 그 이상에서는 급격하게 증가하였다.

주제어 : 충전탑, 충전재, 수력학 특성, 압력강하, 가스용량인자

Abstract : In recent years, packed column has been widely used in separation processes, such as absorption, desorption, distillation, and extraction, in the petrochemical, fine chemistry, and environmental industries. Packed column is used as a contacting facility for gas-liquid and liquid-liquid systems filled with random packed materials in the column. Packed column has various advantages such as low pressure drop, economical efficiency, thermally sensitive liquids, easy repairing restoration, and

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sjkang@ntienc.com; Tel: +82-51-974-9666; Fax: +82-51-974-9668

E-mail: dongha4u@kitech.re.kr; Tel: +82-52-980-6714; Fax: +82-52-980-6669

doi: 10.7464/ksct.2020.26.2.102 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

noxious gas treatment. The performance of a packed column is highly dependent on the maintenance of good gas and liquid distribution throughout a packed bed; thus, this is an important consideration in a design of packed column. In this study, hydraulic pressure drop, hold-up as a function of liquid load, and mass transfer in the air, air/water, and air-NH₃/water systems were studied to find the geometrical characteristic for raschig super-ring experiment dry pressure drop. Based on the results, design factors and operating conditions to handle noxious gases were obtained. The dry pressure drop of the random packing raschig super-ring was linearly increased as a function of gas capacity factor with various liquid loads in the Air/Water system. This result is lower than that of 35 mm Pall-ring, which is most commonly used in the industrial field. Also, it can be found that the hydraulic pressure drop of raschig super-ring is consistently increased by gas capacity factor with various liquid loads. When gas capacity factor with various liquid loads is increased from 1.855 to 2.323 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹, hydraulic pressure drop increases around 17%. Finally, the liquid hold-up related to packing volume, which is a parameter of specific liquid load depending on gas capacity factor, shows consistent increase by around 3.84 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹ of the gas capacity factor. However, liquid hold-up significantly increases above it.

Keywords : Packed tower, Internal packing, Hydraulic characteristic, Pressure drop, Gas capacity factor

1. 서론

오늘날 석유화학, 정밀화학, 대기오염 방지산업 등에서 증류, 흡수, 추출, 탈거 등 물질분리 단위공정으로 주로 충전탑을 사용해 왔다[1-3]. 충전탑은 높은 물질전달, 낮은 압력손실, 높은 분리효율 등 기능적 우수성을 가질 뿐만 아니라 높은 처리용량, 에너지 절감 및 유지보수 용이 등 설비 운영에 있어서도 우수한 장점을 가진다[1-3]. 대기환경산업에서도 산업 활동을 통해 발생하는 배기가스와 암모니아, 황화수소 등과 같은 독성 가스를 처리하는데 충전탑 공정이 많이 적용되고 있다. 특히, 충전탑 내부에는 충전물을 충전하여 기체-액체 간에 접촉면적을 크게 함으로써 효율적인 물질전달 및 수력학적 특징을 가지게 되어 운전비용 절감효과를 가지게 된다[4]. 충전물(internal packing)은 기본적으로 구(sphere), 링(ring), 새들(saddle) 등 원형형태의 다양한 재질 및 크기로 사용되고 있다. 이러한 충전물은 높은 공극률, 넓은 비표면적, 낮은 압력손실 등 장점을 가지고 있어 경제적으로도 우수한 특징을 가진다[4].

충전탑 내부에 사용되어진 충전물은 초기에는 raschig rings 과 berl saddles이 주로 사용되었고, 이후에는 변형된 형태인 pall-ring과 intalox saddle 등이 많이 사용되고 있다[5]. 최근 선진국에서는 재래식 충전물보다도 작은 크기, 넓은 기체-액체 접촉면, 낮은 압력손실을 가지는 새로운 형태의 충전물을 개발하여 사용하고 있으며, 대표적으로 hiflow-ring, vas-ring, super-ring, super saddle, hackette, top-pacing, envi-pac 등이 있다[3,6-9]. 이러한 충전물들은 충전 대비 충전층 내에서 높은 비표면적과 균일한 액체분포로 인해 기체-액체 접촉면을 증대시키고 압력손실을 최소화함으로써 수리학적 및 물질전달 특성을 높여 충전탑의 분리효율 및 처리능력을 향상시켜 준다. 따라서 충전물의 물리적 특성에 의해 물질분리 성능을 좌우하므로 고효율 충전물의 사용은 충전탑 설계 및 운전에서 있어 매우 중요한 역할을 한다[3,10].

본 연구에서는 산업공정에서 배출되는 대기오염물질 및 독성가스를 보다 강화된 환경규제 대응을 위한 대기오염 방지설비인 충전탑의 효율적인 설계를 위하여 물리적 특성이 다른 두 가지 형태의 pall-ring과 Raschig super-ring을 충전하여 실험하였다. 특히, 이들의 기하학적 특성에 따른 충전탑 내

부에서의 수력학적 거동을 고찰하기 위하여 액체부하(liquid load) 및 가스용량인자(gas capacity factor)에 따른 건조압력손실(dry pressure drop), 수력학적 압력손실(hydraulic pressure drop), 액체함량(liquid hold-up) 변화를 통해 충전탑 설계인자를 도출하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 충전탑 파일럿 설비는 높이(H) 1400 mm, 직경(D) 300 mm의 충전탑을 기반으로 충전탑 내외부로 급수 및 배수를 위한 액체저장탱크(B1, B2), 액체를 충전탑 상부로 전달하는 급수펌프(P1), 상부에 전달된 액체를 균일하게 분사하기 위한 분배기(D), 충전탑 하부에 모인 액체를 재순환하는 펌프(P2) 등으로 구성되어 있다. 그리고 액체 및 가스 유입·배출 조절장치를 이용하여 유체의 유속을 조절하였고, U-마노미터, 경사마노미터, 자동 비분산적외선 가스분석기를 통해 압력 및 가스농도를 측정하였다. 이러한 충전탑 파일럿 설비에 대한 도식도 및 사진을 Figure 1에 나타내었으며, 이들 사양에 대하여 Table 1에 간략히 제시하였다. 본 연구에서는 기체-액체 간의 접촉 면적을 높이기 위하여 물리적 특성이 다른 두 가지 충전물인 pall-ring과 raschig super-ring을 사용하여 충전탑 내부에 960 mm 높이로 충전하여 실험하였다. 두 가지 충전물에 대

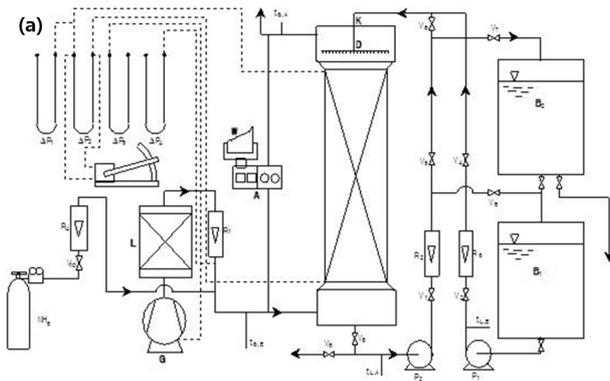
Table 1. Specifications of experimental equipments

Equipments	Specification
Packed bed	Ø300 mm × H960 mm
Blower	30 m ³ min ⁻¹
Liquid distributor	Ø260 mm Pipe distributor (B = 730 m ⁻²)
Demister	Ø350 mm, Polypropylene
Packing material	STS 304
Feed pump	0.5 HP. Richard Halm (Germany)
Gas analyzer (NH ₃)	BINOS (Germany)
pH meter	Range 1~14
Liquid storage vessel	600 L × 2

Table 2. Characteristics of Pall-ring and Raschig Super-ring

Packings	d_p (m)	N (m^{-3})	ϵ (%)	S_a (m^2m^{-3})
Pall-ring	0.035	13,800	94.5	153.0
Raschig Super-ring	0.025	18,428	93.1	150.0

d_p : Diameter of packing
 N : Number of packing per unit volume
 ϵ : Relative void fraction of packing
 S_a : Surface area of packing per unit volume



dP1, dP2, dP3, dP4 : U-manometer, S : Inclined-manometer,
 R1, R2, R3, R4 : Rotameter, L : Humidifier, V1~V10 : Valve,
 G : Gas blower, W : Recorder, A : Gas analyzer, K : Column,
 P1, P2 : Pump, B1, B2 : Liquid storage vessel, D : Distributor

Figure 1. (a) Schematic diagram and (b) photograph of absorption and desorption apparatus.

한 물리적 특성에 대하여 Table 2에 나타내었다.

2.2. 실험방법

본 연구에서는 충전탑의 수력학적 특성을 연구하기 위하여 건조압력손실은 air 시스템을 적용하였고, 수력학적 압력손실 및 액체함량은 air/water 및 air-NH₃/water 시스템을 적용하여 실험하였다. 건조압력손실은 가스 송풍기(gas blower)를 통해 공기를 충전탑 하부로부터 일정 유량의 공기를 유입시키고, 정상상태에 도달하면 U-마노미터를 이용하여 충전탑 상하부의 압력차를 통해 측정하였다. 수력학적 압력손실은 일정 유량의 액체를 다기관 액체 분배기(분배밀도 730 m²)를 통해 충전탑 상부에서 하향식으로 균일하게 공급하고, 동시에 일정 유량의

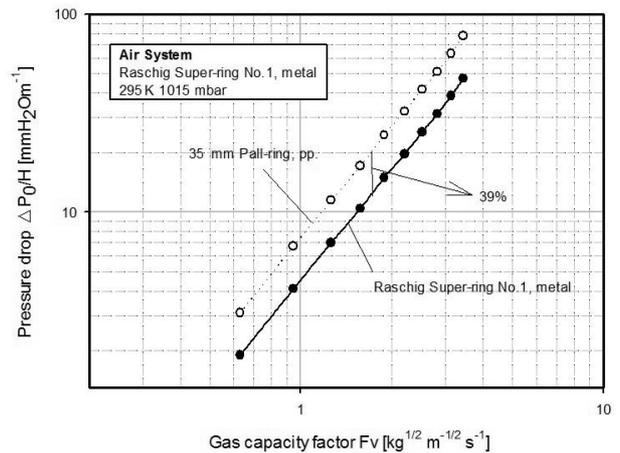


Figure 2. Pressure drop of dry bed filled with 35 mm Pall-ring and 25 mm Raschig Super-ring as a function of gas capacity factor in air system.

공기를 충전탑 하부로부터 상향식으로 공급하다가 정상상태에 도달하면 그 때의 압력차를 측정하였다. 이때 공기 및 액체유량을 변화시키면서 각각의 압력차를 U-마노미터와 경사-마노미터를 이용하여 측정하여 수력학적 압력손실을 측정하였다. 마지막으로 액체함량은 충전탑 상하부로 일정 유량의 액체와 기체를 각각 공급하다가 정상상태에 도달하면 유출입 밸브를 차단하여 충전탑 내부에 액체 체류량을 측정하였다.

상기 세 가지 시스템에 대한 정밀한 시험 운영을 위하여 유입 및 배출되는 가스 및 액체의 유속은 조절장치를 통해 유입 및 배출 가스 및 액체의 유량을 일정하게 조절하고 로터미터를 통해 정확한 유속을 측정하였다. 또한 자동온도 측정계를 통해 유입 및 배출 가스 및 액체의 온도를 0.1 °C까지 정밀하게 측정하였다. 그리고 배출가스 농도는 자동 비분산적외선 가스분석기를, 액체부하 농도는 적외선 가스분석기, pH 미터, 이온분석기를, NH₃ 농도는 적외선 가스분석기를 통해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조압력손실(dry pressure drop)

건조압력손실($\Delta P_0/H$)은 충전탑 설계에 중요한 인자로서 충전탑 내 가스물질 처리효율에 대한 정량적 평가를 위하여 임의 충전물인 pall-ring과 raschig super-ring에 대한 물리적인 특성

을 조사하였다. 건조압력손실은 air 시스템을 적용하여 충전탑 내로 액체 유입 없이 공기만을 유입시켜 유입되는 공기의 속도 변화에 따라 발생하는 충전탑 상부와 하부의 압력차를 U-마노미터를 통해 압력변화를 측정하였다. 이러한 건조압력손실은 이론적으로 마찰계수(ψ), 공극률(ϵ), 유체유입속도(U_v), 충전물 직경(d_p), 벽계수(K)에 의해 Equation (1)로 부터 계산되어진다 [3,11,12].

$$\Delta P_0/H = \psi \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \cdot \frac{U_v^2}{d_p \cdot g} \cdot \frac{1}{K} \quad (1)$$

여기서 벽계수(K)는 충전물 표면적(S_a), 충전물 직경(d_T)에 의해 Equation (2)로 부터 얻어진다[3,11,12].

$$\frac{1}{K} = 1 + \frac{4}{S_a \cdot d_T} \quad (2)$$

Figure 2는 충전탑 내에 액체 유입 없이 오직 공기유입량의 변화, 즉 가스용량인자(gas capacity factor, F_v) 변화에 따른 pall-ring과 raschig super-ring의 건조압력손실에 대한 변화를 비교한 결과이다. 여기서 가스용량인자는 다른 표현으로 가스 부하인수(gas load factor)로 표현하기도 하며, 이는 충전탑 하부로부터 유입되는 가스유속, 즉 가스유량 조절을 통해 가스용량인자를 구할 수 있으며, Equation (3)과 같이 수식으로 나타낸다. U_v 는 충전물이 충전된 충전탑 단면적에서의 유체유입속도이고, ρ 는 유체밀도를 나타낸다[3,11,12].

$$F_v = U_v \sqrt{\rho} \quad (3)$$

충전탑 내로 유입되는 가스용량인자를 0.630, 0.945, 1.259, 1.572, 1.887, 2.201, 2.514, 2.825, 3.137, 3.448 $\text{kg}^{-1/2} \text{m}^{-1/2} \text{S}^{-1}$ 로 증가시키기에 따라 raschig super-ring에 대한 건조압력손실도 1.892, 4.091, 7.002, 10.419, 14.945, 19.642, 25.364, 31.256, 38.601, 47.312 $\text{mmH}_2\text{O m}^{-1}$ 로 일정하게 증가되었다. 또한 비교 대상 충전물인 pall-ring도 동일한 가스용량인자 변화에 따라 건조압력손실이 3.102, 6.709, 11.594, 17.083, 24.648, 32.331, 41.574, 51.336, 63.289, 77.554 $\text{mmH}_2\text{O m}^{-1}$ 와 같이 일정하게 증가됨을 확인하였다. 결론적으로 유입되는 가스용량인자가 증가함에 따라 건조압력손실도 비례하여 일정하게 증가하는 관계를 확인할 수가 있었다. 이는 충전층 단위 높이 당 압력손실에 대한 가스부하 의존도를 분석하기 위해 Equation (4)과 같은 가스용량인자(F_v)의 함수로 나타낼 수 있다. 결론적으로 Figure 2에 대한 수학적 해석은 Equation (1)으로부터 전개되어 계산되어진다[3,11,12].

$$\frac{\Delta P}{H} = f(F_v) = f(U_v \sqrt{\rho}) \quad (4)$$

또한 Figure 2 결과에서, raschig super-ring의 건조압력손실이 pall-ring의 건조압력손실보다도 약 39% 낮게 나타남을 확인할 수가 있는데, 이는 raschig super-ring이 pall-ring보다도 넓은 비표면적, 낮은 표면 거칠기, 높은 공극률 등의 우수한 물리

적 특성에 의해 나타난 결과임을 알 수 있었다.

3.2. 수력학적 압력손실(hydraulic pressure drop)

충전탑 설계 시에 충전탑 내 충전물의 물리적 특성에 따라 수력학적 압력손실에도 많은 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 물리적 특성이 다른 pall-ring과 raschig super-ring 충전물에 대한 수력학적 압력손실을 측정하기 위하여 air/water와 air-NH₃/water 시스템에서 가스부하 및 액체부하를 각각 변화 시킴에 따라 수력학적 압력손실이 어떻게 변화하는지 이들에 대한 영향을 분석하였다.

Figure 3은 air/water 시스템에서 충전탑 상부로부터 액체부하(liquid load, U_L)를 각각 5, 10, 15, 20 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로 일정하게 분사하였고, 일정한 액체부하 하에서 가스용량인자 변화에 따른 수력학적 압력손실의 변화를 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이, 액체부하를 5 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로 고정하여 일정하게 분사하고, 이러한 조건하에서 충전탑 하부로부터 유입되는 가스용량인자를 변수로 각각 0.616, 0.869, 1.121, 1.252, 1.873, 2.499, 3.125 $\text{kg}^{-1/2} \text{m}^{-1/2} \text{S}^{-1}$ 로 증가시키면서 변화를 주었다. 이때 측정된 수력학적 압력손실은 각각 3.207, 5.273, 8.950, 11.027, 23.733, 40.449, 59.736 $\text{mmH}_2\text{O m}^{-1}$ 로 나타났다. 동일한 방법으로 액체부하 10 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로 증가시켜 일정하게 분사하고, 가스용량인자를 각각 0.622, 0.875, 1.128, 1.256, 1.882, 2.505, 3.128 $\text{kg}^{-1/2} \text{m}^{-1/2} \text{S}^{-1}$ 로 변화시켰을 때, 이에 따른 수력학적 압력손실은 각각 3.444, 5.548, 9.185, 11.276, 24.395, 42.093, 68.401 $\text{mmH}_2\text{O m}^{-1}$ 로 나타났다. 그리고 동일한 방식으로 액체부하를 15와 20 $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 로 각각 증가시켜 일정하게 분사하고, 유입되는 가스용량인자 변화에 따른 수력학적 압력손실을 측정하였다. 각각의 변수에 대한 실험결과를 Figure 3에 나타내었고, 결과로부터 충전탑 상부로부터 분사되는 액체부하를 일정하고 고정하고 가스용량인자를 증가함에 따라 수력학적 압력손실은 액체부하가 높을수록 상대적으로 더 높은 압력손실을 보임을 확인하였다. 다시 말해, 낮은 액체부하 5 $\text{m}^3 \text{m}^{-2}$

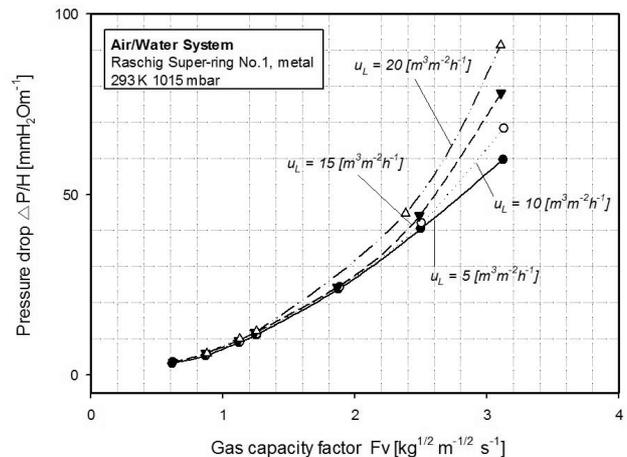


Figure 3. Hydraulic pressure drop of 25 mm Raschig Super-ring as a function of gas capacity factor with various liquid load in Air/Water system.

h^{-1} 에서는 가스용량인자 변수에 대하여 압력손실 변화가 크게 나타나지 않았지만, 액체부하가 높은 $20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 에서는 압력손실 변화가 상대적으로 급격하게 증가함을 확인할 수가 있었다. 또한 가스용량인자가 2 이상의 시점에서 압력손실이 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이는 air/water 시스템에서 가스 및 충전물의 저항으로 인하여 충전층 상부에 가까울수록 압력이 증가하는 경향과 일치한다. 따라서, 일정한 액체부하 하에서 유입되는 가스유속이 증가함에 따라 즉, 가스유량이 많아짐에 따라 액체가 충전층을 통과하여 내려오는데 저항을 많이 받기 때문에 수력학적 압력손실은 상대적으로 증가하게 된다. 이는 범람한계(flooding limit)를 초과할 때 나타나는 현상으로 충전탑 내에서의 물질전달에 매우 큰 영향을 미치게 됨에 따라 충전탑 설계 및 운전 시에 반드시 고려되어야 한다[13].

Figure 4에서도 Figure 3과 동일한 실험조건으로 공기와 5,000 ppm 암모니아를 혼합하여 air-NH₃/water 시스템에서의 수력학적 압력손실을 분석하였다. Figure 3과 마찬가지로 액체부하 변수(5, 10, 15, 20 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)를 일정하게 분사하였고, 이때 공기와 암모니아혼합가스의 가스용량인자의 변수에 따른 수력학적 압력손실을 분석하였다. 액체부하를 5 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 일정하게 고정 분사한 후, 가스용량인자를 각각 0.665, 0.939, 1.211, 1.352, 2.023, 2.699, 3.375 $\text{kg}^{-1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 증가시켜 보았다. 이때 수력학적 압력손실은 각각 2.632, 4.327, 7.345, 9.049, 19.477, 33.196, 49.024 $\text{mmH}_2\text{O m}^{-1}$ 로 나타났다. 동일한 방법으로 액체부하를 10, 15, 20 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 일정하게 증가시켜 고정하고, 충전탑 하부로부터 유입되는 가스용량인자의 변화에 따른 수력학적 압력손실을 분석하여 Figure 4에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이, 일정 액체부하 하에서 가스용량인자가 증가함에 따라 급격하게 압력손실이 증가하는 경향을 보인 Figure 3 결과와는 달리, 공기와 암모니아 혼합가스의 가스용량인자가 증가함에 따라 선형적으로 압력손실이 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 암모니아가 용액에 흡수됨에 따라 압력

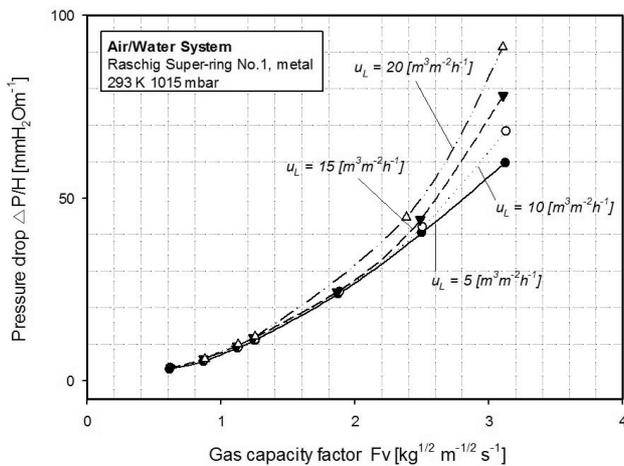


Figure 4. Hydraulic pressure drop of 25 mm Raschig Super-ring as a function of gas capacity factor with various liquid load in Air-NH₃/Water system.

손실이 다소 완화되는 효과를 보임으로써 선형적으로 증가하는 결과를 나타내고 있다. 그리고 액체부하 변화에 따른 압력손실은 가스용량인자 변화에 따른 압력손실에 비해 크지 않음을 확인할 수 있었고, 이는 혼합가스 경우 가스용량인자가 액체부하 변동보다도 수력학적 압력손실에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수가 있었다.

3.3. 액체 함량(liquid hold-up)

충전탑 내 충전물의 액체함량(h_L)은 충전탑을 정상적으로 운전하다가 상부와 하부에 있는 유입 및 배출밸브를 동시에 잠그게 되면 충전탑 내부에 있던 액체는 충전탑 하부에 모이게 되며, 이때 충전탑 하부에 모여진 액체 체적을 측정하여 확인할 수 있다. 이러한 충전물의 액체함량은 물질전달 효율에 영향을 주기 때문에 흡착탑 운전조건을 최적화하는데 중요한 인자로 작용하게 된다.

Figure 5는 air/water 시스템에서 충전탑 상부로부터 액체부하를 5, 10, 15, 20 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 각각 일정하게 고정 분사하고, 충전탑 하부를 통하여 가스용량인자를 변화시키면서 액체함량을 측정하여 이를 그래프로 표현하였다. 먼저, 충전탑 상부에서 액체부하를 5 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 로 일정하게 고정 분사하면서 하부로부터 가스용량인자를 각각 0.157, 3.097, 3.837, 5.439 $\text{kg}^{-1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 로 변화하여 얻어진 액체함량은 각각 252.4, 278.6, 285.1, 424.0%로 측정되었다. 이와 동일한 방법으로 액체부하를 10, 15, 20 $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 으로 단계적으로 증가시켜 일정하게 분사하면서 충전탑 하부로부터 가스용량인자의 변화에 따른 측정된 액체함량을 Figure 5에 도식화하였다. 결과에서 보는 바와 같이, 액체부하가 증가함에 따라 액체함량도 비례적으로 증가함을 확인할 수 있으며, 이는 액체함량이 액체부하에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 그리고 가스용량인자가 3.84 $\text{kg}^{-1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 이하에서는 가스부하에 독립적으로 일정함을 보이고 있지만, 3.84 $\text{kg}^{-1/2} \text{ m}^{-1/2} \text{ s}^{-1}$ 이상에서는 액체함량이 급격하게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 액체부하의 범람

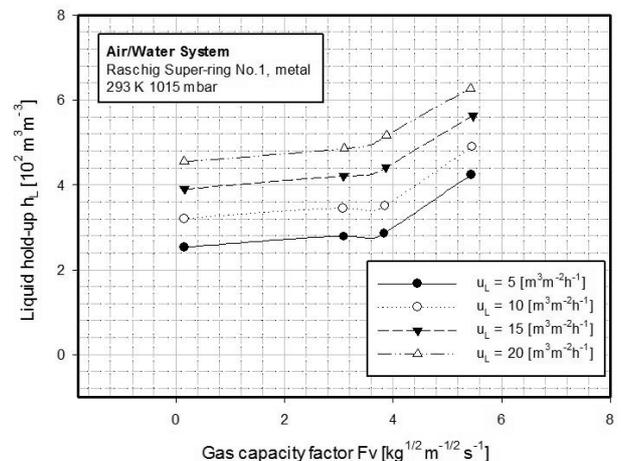


Figure 5. Liquid hold-up of 25 mm Raschig Super-ring as a function of gas capacity factor with various liquid load in Air/Water system.

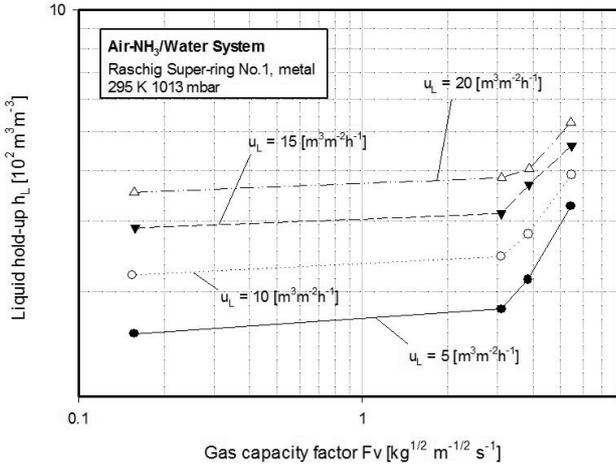


Figure 6. Liquid hold-up of 25 mm Raschig Super-ring as a function of gas capacity factor with various liquid load in Air-NH₃/Water system.

점(flooding point) 한계를 넘게 됨에 따라 가스용량인자의 영향을 받게 되어 나타난 현상이다. 이와 동일한 방법으로 공기와 암모니아 혼합가스를 사용하여 air-NH₃/water 시스템에서 액체부하와 가스용량인자의 변화에 따른 액체함량을 측정하였고, 이에 대한 결과를 Figure 6에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이, Figure 5에서 나타난 경향성과 유사한 결과를 보이고 있으나, 가스용량인자가 3.10 kg^{1/2} m^{-1/2} S⁻¹까지는 가스부하에 독립적으로 일정함을 보이지만, 그 이상에서는 액체부하의 범람점을 넘어 급격하게 증가함을 확인할 수 있다. 이는 Figure 4 결과에서와 같이, 암모니아가 용액에 흡수됨에 따라 상대적으로 압력손실을 다소 완화시키는 효과에 의한 것으로 보이며, 가스용량인자 변화에 따른 압력손실이 크지 않음에 따라 액체부하의 범람한계는 낮은 가스용량인자에서도 크게 영향을 받음을 확인할 수가 있었다.

마지막으로 Figure 7에서는 air/water 시스템에서 가스용량인자를 1.855, 2.323 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹로 각각 일정하게 고정하여 충전탑 하부로부터 유입시키고, 상부로부터 액체부하를 변화하였을 때 액체함량에 대한 변화를 나타낸 결과이다. 결과에서 보는 바와 같이, 가스용량인자를 일정하게 고정하고 액체부하를 점차 증가함에 따라 액체함량은 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 액체함량은 충전물의 기하학적인 형상에 영향을 받음으로써 gas와 액체가 충전탑 표면에 얇은 막 형태로 균일하게 분배되어 gas와 액체가 역류흐름을 이루면서 액체함량이 증가하게 된다. 하지만 액체함량이 계속적으로 증가함에 따라 범람한계점에 도달하게 되어 액체가 연속적으로 충전탑을 통과하지 못하고 범람하게 되어 충전탑의 운전이 불안정하게 된다. 결론적으로, 실험을 통해 액체부하가 높아질수록 충전탑 내의 압력손실이 증가하게 되고, 가스부하속도가 범람한계점을 넘게 되어 액체가 충전탑 외부로 범람하면서 배출가스 농도 또한 매우 불안정하게 요동치는 수치를 확인하였다. 일반적으로 실제 충전탑 설계 시에 액체부하 한계구간의 약 70% 범위 내에서 가스용량인자와 액체부하량을 결정하는 것

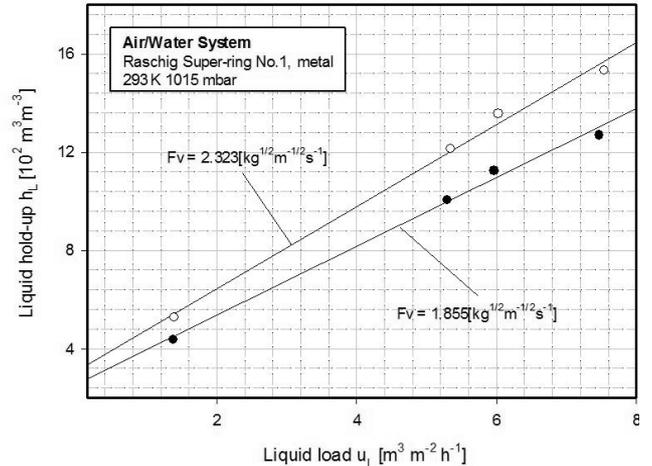


Figure 7. Experimental pressure drop ratios and values of hold-up function versus liquid load for 25 mm Raschig Super-ring.

이 가장 이상적으로 알려져 있다.

4. 결론

본 연구에서는 STS 304 재질의 25 mm raschig super-ring의 임의 충전물을 충전탑 지름 300 mm, 충전층 높이 960 mm에 충전하여 건조압력손실, 수력학적 압력손실 및 액체함량 등의 실험을 통해 충전물의 기하학적인 특성을 분석하였다. 이러한 실험 결과들을 바탕으로 물질분리 단위공정 등에 적용하기 위한 기준을 다음과 같이 제시하였다. 임의 충전물인 25 mm raschig super-ring 대한 건조압력손실을 측정된 결과, 가스용량인자가 증가할수록 압력손실도 선형적으로 증가하였다. 특히, 가스용량인자가 0.630 ~ 3.448 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹에서의 충전탑 상부와 하부의 압력차가 1.892 ~ 47.312 mmH₂O m⁻¹로 건조압력손실을 보임에 따라 기존 산업현장에서 보편적으로 사용되는 35 mm Pall-ring보다 낮은 압력손실을 나타냄을 확인할 수 있었다.

수력학적 압력손실을 측정된 결과, 고유 액체부하에 대해 가스용량인자가 증가할수록 충전탑 상부와 하부의 압력차도 증가함을 알 수 있었고, 액체부하의 변화에 따른 고유 가스용량인자가 1.855 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹에서 2.323 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹으로 20% 증가할 때 수력학적 압력손실은 약 17% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 그리고, 충전물 체적에 관한 액체함량은 액체부하가 증가함에 따라 가스용량인자가 약 3.84 kg^{-1/2} m^{-1/2} S⁻¹까지의 거의 일정한 액체함량을 보였으나, 그 이상에서는 급격하게 증가하였다.

결론적으로 본 연구에서 사용된 STS 304 재질의 25 mm raschig super-ring은 암모니아, 황화수소 등과 같은 악취 유해가스 처리를 위한 흡착탑에의 적용이 기존 충전물보다도 우수한 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 따라서 산업현장에서 배출되는 유해가스물질 및 악취물질 등을 처리하기 위한 대기오염 방지시설에 해당 충전물을 적용하여 설계할 경우에 우수

한 제거효율, 낮은 운전비용 등으로 인하여 경제성 있는 설비가 될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Hall, S. M., Rules of Thumb for Chemical Engineers, 6th ed., Elsevier, (2018).
- Ludwig, E. E., Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants, 3rd ed., Gulf Professional Publishing, (2001).
- Kang, S. J., Park, C. K., Kil, S. J., and Lee, K. H., "High Performance Count-Current Flow in Packed Tower Design," *Appl. Chem.*, **17**, 21-24 (2013).
- Billet, R., Packed Towers in Processing and Environment Technology, Wiley-VCH, (1995).
- Furter, W. F., and Newstead, W. T., "Comparative Performance of Packings for Gas-Liquid Contacting Columns," *Can. J. Chem. Eng.*, **51**, 326-331 (1973).
- McCabe, W. L., Smith, J. C., and Harriott, P., Unit Operations of Chemical Engineering, 7th ed., McGraw-Hill, (2018).
- Bolles, W. L., and Fair, J. R., Performance and design of packed distillation columns, 3rd Int. Symp. on Distillation, London, (1979).
- Kang, S. J., Park, C. K., Kil, S. J., Lee, K. H., and Kim, J. H., "The Study of Absorption and Hydraulic Character in Packing Column," *Theories and Applications of chem. Eng.*, **19**, 308-311 (2013).
- Couper, J. R., Penney, W. R., Fair, J. R., and Walas, S. M., Chemical Process Equipment: Selection and Design, 2nd ed., Elsevier (2005).
- Mackowiak, J., Fluid Dynamics of Packed Columns: Principles of the Fluid Dynamic Design of Columns for Gas/Liquid and Liquid/Liquid Systems, Springer (2009)
- Billet, R., Packed column analysis and design, Ruhr-University bochum Department for Thermal Separation Processes, cop. (1989).
- Billet, R., and Schultes, M., "Modelling of Pressure Drop in Packed Column," *Chem. Eng. Technol.*, **14**, 89-95 (1991).
- Kim, T. S., "The Study of Absorption and Hydraulic Character in Packing Tower," *Korean J. Sanitation*, **15**, 4-13 (2000).