

## 3D 프린팅에 의한 충전물 제조 및 성능평가

이 화 영<sup>1)</sup> · 최 영 민<sup>2)</sup> · 홍 연 기<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국교통대학교 화공생물공학과 · <sup>2)</sup>한국교통대학교 에너지시스템공학과

### Manufacturing of Packing Materials for 3D Printing and Evaluation of their Performances

Hwa Young Lee<sup>1)</sup> · Young Min Choi<sup>2)</sup> · Yeon Ki Hong<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Chemical and Biological Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

<sup>2)</sup>Department of Energy System Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2015. 11. 02 / Accepted 2015. 11. 23)

**Abstract :** In this paper, the development history of random packings for several generations was briefly introduced. We demonstrate the application of 3D printing to the fabrication of Pall rings, directly using computer aided design (CAD) models. The CAD was used to design Pall rings with different number of blades. The models were then printed by using UV curing of acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) resins. The results show that 3D printing is a promising method for producing precisely controlled packing materials. It is also expected that 3D printing is helpful for the fundamental studies of highly efficient packing materials with complex geometrical shapes.

**Key words :** Packing materials, 3D printing, Packed column, Packing efficiency

### 1. 서 론

충진물(packing)은 흡착, 흡수, 크로마토그래피, 여과 등을 포함한 단위조작(unit operation)에서 유체와 기체의 접촉에 중요한 역할을 한다. 충전입자는 칼럼(column)에 충전되어 충전입자 사이의 공극 또는 충전물 내부를 통한 흐름이 발생하여 유체가 충전물 표면에서 다른 유체상과의 접촉을 가능하게 한다. 충전탑(packed column)의 효율은 충전물의 기하학적 모양에 따른 물질전달, 유체의 분배, 압력강하와 같은 흐름과 관련된 특성에 의해 결정된다. 충전물에서 표면적의 증가는 높은 물질전달 효율 및 열전달 효율에 따른 분리효율의 증가를 의미하며 높은 공극률은 높은 용량을 의미한다. 결국 좋은 충전물이란 물질전달 효율과

로딩용량의 증가, 그리고 압력강하를 최소화 시킬 수 있어야 한다.

충진물은 크게 불규칙 충전물(Random packing), 구조 충전물(Structured packing)로 분류할 수 있고, 기술의 발전 단계에 따라 1세대, 2세대, 3세대 충전물로 나눌 수 있다.

1세대 불규칙 충전물은 1950년대까지 사용되었던 Raschig ring 및 Lessing ring, Berl saddle이 있다. Raschig ring은 금속관을 관의 지름과 동일한 간격으로 절단하여 제작되는 충전물로, 제작이 용이하고 가격이 저렴하다는 장점을 갖고 있다. Raschig ring 제작을 위해 사용될 수 있는 소재는 세라믹, 메탈, 플라스틱 등이 있다. Lessing ring은 접촉면적 증가를 위해 Raschig ring의 중간에 격벽을 설치한 충전물이며 Berl saddle은 말안장과 비슷한 형상을 갖고 있으며 압력손

\*Corresponding author, E-mail: hongyk@ut.ac.kr

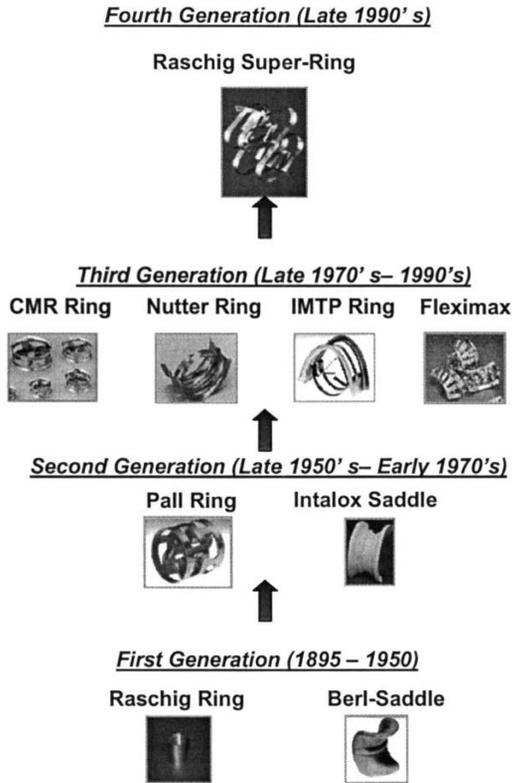


Fig. 1 Development history of the random packings of three generations.<sup>1)</sup>

실이 작지만 공극률이 낮다. 이들 충전물들은 현재 사용되는 각종 고효율 충전물의 기초가 되고 있다.

2세대 충전물은 1950년대 후반부터 1970년 초반까지 개발되었으며 1세대 충전물에 비해 액체의 흐름성과 기체 통과면적을 증가시키고 압력손실을 줄임으로써 충전물의 효율 및 용량이 증가되었다. 2세대 충전물의 대표적인 사례가 Intalox saddle과 Pall ring이다. Norton사는 Berl saddle을 개량한 Intalox saddle을 개발하였다. 이는 두 개의 서로 다른 반지름을 가진 곡면으로 구성되어 있어 충전층에서 더 큰 randomness를 제공한다. 또한 Intalox saddle은 액체가 충전물에 고이는 현상을 방지하고 액체의 흐름을 개선함은 물론 기체의 방향변화를 크게 할 수 있다.

1970년대 중반 독일의 BASF사는 Raschig ring의 벽면 일부를 개방하고 해당 면을 안쪽으로 밀어 넣은 Pall ring을 개발하였다. Raschig ring과 동일한 기하학적 면적을 가짐에도 불구하고 벽면의 개방구조로 인해 기체와 액체 흐름이 원활하고 이전의 충전물에 비

해 압력손실이 낮다. Pall ring의 개량 형태는 Hy-Pak이며 이는 기-액 접촉 계면을 더 넓혔다.<sup>2)</sup>

앞서 서술한 바와 같이 충전물은 충전탑에서의 기액접촉 효율을 높이기 위해 발전해 왔다. 특히 3세대 이후에는 탑 내의 효율 증가를 위해 더욱 복잡한 기하학적 구조를 갖는 충전물에 대한 연구가 진행되었고, 다양한 업체에서 각기 다른 제품이 생산되고 있다. 그러나 새로운 시제품 제작이 수작업으로 이루어지기 때문에 다양한 형태를 가진 충전물 또는 보다 복잡한 형태의 기하학적 구조를 갖는 충전물이 연구와 개발에 한계가 존재한다. 또한 고효율 충전물의 제작 및 성능에 관한 자료는 각 제조회사에서 독자적인 방법으로 실험하여 일관적인 비교가 어렵다. 그러므로 충전탑 내의 효율 증대를 위한 체계적인 충전물 연구를 위해서는 새로운 제작 패러다임이 요구되며 본 연구에서는 이를 위한 도구로서 3D 프린팅 기술을 이용하고자 한다.

## 2. 충전물의 제조 및 성능평가

### 2.1 충전물의 제조 및 특성

충전물 제작을 위한 3D 프린터로 FORTUS 360mc (Stratasys, Ltd.) 모델을 사용하였으며 사용된 소재는

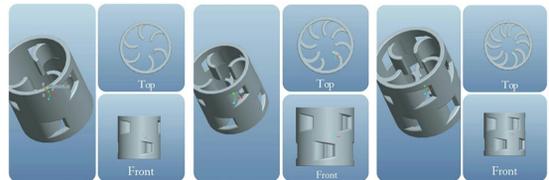


Fig. 2 3D modeling of Pall rings using an auto CAD

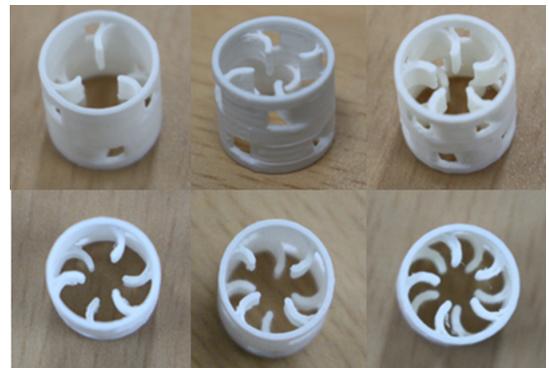


Fig. 3 Pall rings made by a 3D printer. Raw material is ABS resin.

Table 1 Characteristics of Pall rings used in this study

	Pall ring #1	Pall ring #2	Pall ring #3
재료	ABS-M30	ABS-M30	ABS-M30
크기 (in)	1/4 x 1/4	1/4 x 1/4	1/4 x 1/4
블레이드 수	6	8	10
충진 밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	133.84	135.95	144.57
충진 개수 (pieces/m <sup>3</sup> )	786	786	786
공극률 (%)	81.72	84.15	86.00

ABS 수지이다. 본 연구에서 제작할 충전물은 산업적으로 상용화되어 널리 사용되고 있는 Pall ring으로 선정하여 2in 소형 흡수탑에 충전 가능한 지름 1/4in 크기로 디자인 하였다. Pall ring의 geometry 변화에 따른 흡수 특성을 확인하기 위해 뚫린 벽면의 날개 수를 6개, 8개, 10개로 변형하였고 결과를 Fig. 2와 3에 나타내었다.

제작된 충전물의 기본적인 특성을 Table 1에 나열하였다. 충전 밀도 및 충전 개수는 직경 2in의 500ml Measuring Cylinder에서 반복 측정을 통해 평균 수치로 계산하였으며, 공극률 측정은 설계된 흡수탑에 충전하여 반복 측정된 평균값을 사용하였다.

### 2.2 충전탑에서의 흡수성능 평가

3D printing 기술로 제작된 충전물의 실제 성능 테스트를 위해 소형 흡수탑에 채워 이산화탄소 흡수 실험을 진행하였다. 흡수제는 일반적으로 알려진 수계 알카놀아민 흡수제 중 30wt% MEA (Monoethanolamine) 수용액과 30wt% MDEA (Methyldiethanolamine) 수용액을 사용하였고, CO<sub>2</sub> 및 N<sub>2</sub>는 99.999% 고순도 가스를 15:75 부피비의 혼합가스로 사용하였다. 흡수제 온도는 MEA, MDEA 동일하게 40 °C에서 주입하였으며, 흡수제 유량은 10mL/min, 혼합가스 유량은 3L/min으로 유지하였다.

위 조건으로 실험을 진행하여 흡수탑 내부에서 흡수제와 CO<sub>2</sub> 혼합가스를 향류 접촉시켜 1시간 동안 유지하였고, 흡수탑 상부로 배출되는 Treated gas를 기체 크로마토그래프로 Online 주입하여 분석하였다. 1cycle 종료 후 흡수탑 하부에 모인 lean흡수제를 이용하여 동일한 조건으로 재 조업하면서 더 이상 흡수제가 CO<sub>2</sub> 가스를 흡수하지 못할 때 까지 cycle을 반복했다.

기체 크로마토그래프로 측정된 흡수 후 기체에 대



Fig. 4 Column packed with Pall rings produced in this study.

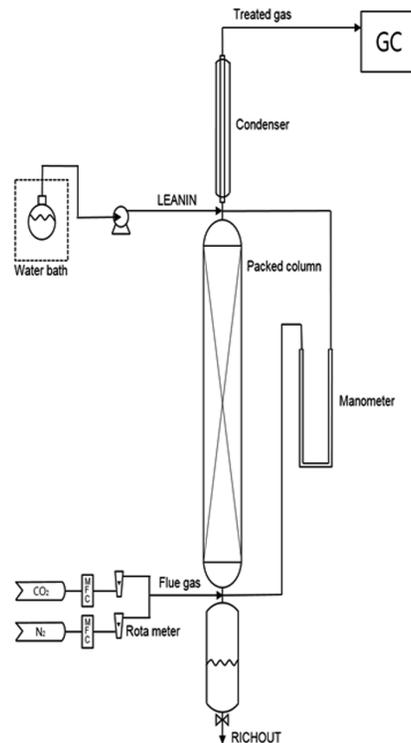


Fig. 5 Schematic diagram of CO<sub>2</sub> absorption apparatus.

한 peak는 미리 측정된 순수 15vol% 혼합가스의 Calibration data에 내삽하여 농도를 계산하였다. 흡수제 및 배출가스는 단위환산 및 기체방정식을 이용하여

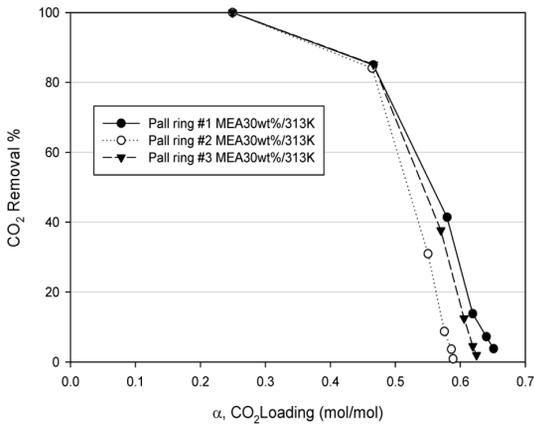


Fig. 6 CO<sub>2</sub> removal with CO<sub>2</sub> loading in packed column with each Pall rings (Absorbent: MEA).

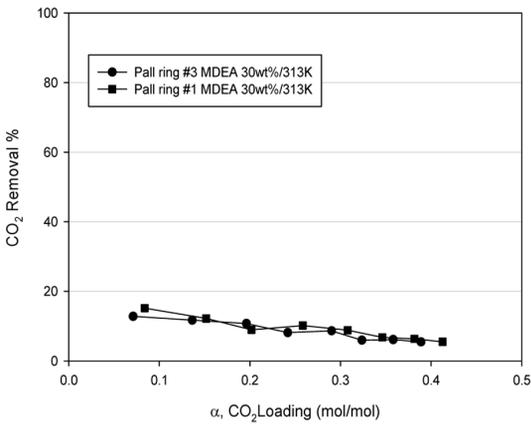


Fig. 7 CO<sub>2</sub> removal with CO<sub>2</sub> loading in packed column with each Pall rings (Absorbent: MDEA).

Loading( $\alpha$ , mol of CO<sub>2</sub>/mol of absorbent)으로 계산하였고, Loading에 대한 CO<sub>2</sub> 제거율 그래프를 도시하였다.

제작된 세 가지 충전물을 이용하여 수계 알카놀아민 흡수제 2종에 대해 흡수 실험을 진행하였다. 실험

결과 흡수 Loading에 대한 CO<sub>2</sub> 제거율에 대한 그래프를 도시하여 Fig. 5와 6 나타내었다. 흡수 결과 Loading은 기존 충전물과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 단, MDEA가 MEA에 비해 낮은 흡수능을 보이는 것은 MDEA의 낮은 반응속도로 인한 것이며 일반적으로 MDEA의 경우 반응속도 향상을 위해 피파라진을 첨가하게 된다. 본 연구에서는 충전물의 성능만을 비교하기 위한 것으로서 별도의 피파라진을 첨가하지는 않았다.

### 3. 결론

본 연구에서는 화학공정에서 접촉효율 향상을 위한 충전물 개발 과정에 대해 소개하였다. 구조적으로 복잡한 기하학적 형상을 가지는 충전물의 제조 및 시작품 제작을 위한 수단으로서 3D 프린팅을 제시하였다. 3D 프린팅을 이용하여 Palling을 제작할 경우 다양한 기하학적 특성을 가진 제품을 빠르고 신속하게 제작할 수 있었으며 이들의 접촉 성능은 기존의 제품과 유사한 것으로 나타났다. 본 연구에서 시도된 Pall ring 이외의 보다 복잡한 형태의 충전물을 개발함에 있어 3D 프린팅은 유용한 도구가 될 것으로 기대된다.

### Acknowledgement

이 논문은 2015년도 한국교통대학교 융합교육학부 기업애로기술과제의 지원을 받아 수행한 연구임

### References

- 1) M. Schultes, "Rashig Super-Ring: A New Fourth Generation Packing Offers New Advantages", Trans IChemE, 81, p.48, 2003
- 2) R. F. Strigle Jr, "Random Packings and Packed Towers", Gulf Publishing Co., 1987