

# 자가 치유 캡슐 제작을 위한 off-chip 방식의 드랍렛 제작 기술

## Off-chip droplet manufacturing technology for self-healing capsule production

지동민<sup>1</sup> · 송원일<sup>2</sup> · 이자성<sup>1</sup> · 아르만도<sup>3</sup> · 박세진<sup>4</sup> · 최건<sup>4</sup> · 김성훈<sup>5\*</sup>

Ji, Dong-Min<sup>1</sup> · Song, Won-Il<sup>2</sup> · Lee, Ja-Sung<sup>1</sup> · Ramos-Sebastian, Armando<sup>3</sup> · Park, Se-Jin<sup>4</sup> · Choi, Geon<sup>4</sup> · Kim, Sung-Hoon<sup>5\*</sup>

**Abstract** : The microfluidic controlled droplet production system is one of the most powerful methods for capsule manufacturing. However, stable production is not possible when the powder is included. We solved the above problem by developing an off-chip droplet production system. we checked the droplet creation mechanism and created a simple repair model. It was possible to produce a uniform and stable droplet regardless of the powder content.

**키워드** : 캡슐, 미세유체, 액적, 치유 캡슐

**Keywords** : capsule, microfluidic, droplet, healing capsule

## 1. 서론

### 1.1 연구의 목적

콘크리트는 건설 산업에서 널리 사용되는 재료이다. 하지만 다양한 외부 요인에 의해 발생하는 콘크리트 표면의 미세 균열은 열화 요인의 침투 경로로써 콘크리트의 내구성을 저하시킨다. 따라서 콘크리트 설비의 내구성이 저하되고 보수 비용이 증가하는 문제가 있다. 따라서 캡슐 구조를 통한 콘크리트 자가 치유에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 캡슐 제작의 보편적인 방법으로 미세유체 제어 방식이 있다. 하지만 미세유체 채널 방식의 액적 제작 시스템은 유속을 조절하여 액적 사이즈를 제어할 수 있지만 채널 크기에 따라 제어 가능한 범위의 한계가 있다. 또한 미세 유체 채널을 사용해 분말 혼합 액적을 제작할 경우 분말이 묻쳐 채널 내부를 막아 안정적인 액적 생성이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 미세유체 채널 없이 안정적인 분말 혼합 액적 생성이 가능한 새로운 캡슐 제작 방식을 제안한다.

## 2. 실험 방법 및 결과

대표적인 액적 제작 방식으로는 T 정션(T-junction), 플로우 포커싱(Flow-focusing)이 있다. 본 논문에서는 분산상 용액이 흐르는 바늘을 연속상 유체에 침지하여 바늘이 빠져나오며 발생하는 저항에 의해 분산상 용액을 분리하였으며, 이는 기존 액적 제작 방식 중 플로우 포커싱 방식과 유사한 제작 특성을 가진다.

액적 생성 원리와 액적의 하강 특성은 액적에 작용하는 힘을 통해 분석할 수 있다. 바늘에서 액적이 분리될 때 액적에 작용하는 힘은 각각 중력  $F_g$ , 액적에 발생하는 항력  $F_d$ , 바늘 끝단의 항력  $F_{de}$ , 부력  $F_b$ , 표면장력  $F_s$  등이 있다. 분리 후 액적이 하강하는 동안은 항력  $F_D$ , 부력  $F_B$ , 중력  $F_G$ 가 액적에 작용한다. 각 액적에 작용하는 힘의 방향은 그림 1 A와 같다. 그림 1 B와 같이 연속상 용액에 침지되는 바늘로 분산상 용액을 토출하면 액적은 바늘이 공기중에 있을 때 성장하고, 유체 내부에서 빠져나오며 분리된다. 바늘의 침지 속도와 분산상 용액의 유속을 일정하게 제어하여 균일한 액적 제작이 가능하다. 생성된 액적이 서로 합쳐지는 문제를 해결하기 위해 그림 1 C와 같이 바늘 위치를 옮겨가며 액적을 생성하였으며, 그림 1 D의 갠트리 로봇 시스템을 통해 바늘의 위치 이동과 상하 운동을 수행하였다.

1) 원광대학교, 박사과정

2) 원광대학교, 석사과정

3) 전북대학교, 박사과정

4) 원광대학교, 학부과정

5) 원광대학교, 교수, 교신저자(kshoon@wku.ac.kr)

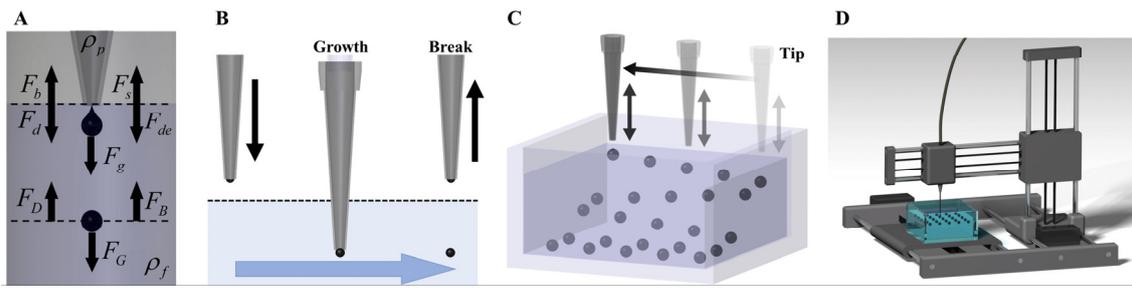


그림 1. 미세유체 제어 시스템 설계 모델 및 개념도

액적의 사이즈는 분산상 용액의 유속과, 침지 속도를 조절하여 제어가 가능하다. 액적 사이즈 계산을 위한 간단한 수리 모델은 다음과 같다.

$$R = \sqrt[3]{\frac{10Q_1}{36\pi D_s}} \quad (1)$$

$Q_1$ 은 분산상 용액의 유속 (mL/hr),  $D_s$ 는 침지 속도 (Hz),  $R$ 은 액적의 반지름이다. 액적 제작 실험을 위해 Cement, fly ash, blast furnace slag를 4:3:3 비율로 혼합해 분말을 제작하였다. 분산상 용액은 Anycubic의 clear 레진에 분말을 각각 10, 15, 20wt% 혼합해 3종류로 제작하였다. 수조에 채워질 연속상 용액은 KF-96-1000cSt 실리콘 오일을 사용하였다. 분산상 용액의 유속은 1.1mL/hr, 바늘 침지 간격은 6초로 동일한 조건에서 3종류의 액적을 제작하였다. 10, 15, 20wt% 3종류의 액적은 그림 2와 같이 제작되었으며, 평균 사이즈는 각각 1.66, 1.64, 1.65mm, 표준편차는 0.023, 0.030, 0.016mm로 높은 정밀도와 정확도로 제작되었다.

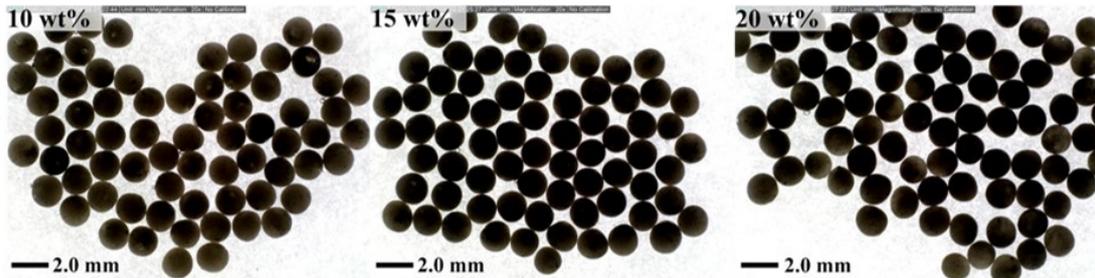


그림 2. 캡슐 제작 및 분석

### 3. 결론

채널없이 균일한 액적 제작이 가능함을 확인하였으며, 분말 혼합 비율이 다름에도 약 0.01mm의 낮은 오차로 동일한 크기의 액적을 제작하였다. 또한 분말에 의한 막힘 없이 1시간 이상 안정적인 제작이 가능했다. 본 시스템은 침지 속도와 분산상 용액의 유속을 제어해 액적의 크기를 조절한다. 따라서 연속상 유체 내부에서 바늘을 정지하여 액적의 크기를 제한없이 증가시킬 수 있다. 미세유체 채널이 필요하지 않음으로 경제적이며, 빠른 생산이 가능한 장점을 가진다.

### 감사의 글

본 논문은 2022년 한국연구재단 기초연구실 지원사업 (과제번호:2020R1A4A3079595)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Arif Z. Nelson, Binu Kundukad, Wai Kuan Wong, Saif A. Khan, Patrick S. Doyle. Embedded droplet printing in yield-stress fluids. PNAS. 2020. p. 5671.