

# A Study on the Droplet Formation of Liquid Metal in Water-Mercury System as a Surrogate of Molten Salt-Liquid Metal System at Room Temperature

## 용융염-액체금속 계의 대용물인 물-수은 계에서 액체금속 액적의 생성에 대한 연구

Yong-il Kim and Byung Gi Park\*

*Soonchunhyang University, 22, Soonchunhyang-ro, Sinchang-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do, Republic of Korea*

김용일, 박병기\*

*순천향대학교, 충청남도 아산시 신창면 순천향로 22*

(Received September 18, 2017 / Revised January 2, 2018 / Approved January 26, 2018)

---

As an approach for estimation of the droplet size in the molten salt-liquid metal extraction process, a droplet formation experiment at room temperature was conducted to evaluate the applicability of the Scheele-Meister model with water-mercury system as a surrogate that is similar to the molten salt-liquid metal system. In the experiment, droplets were formed through the nozzle and the droplet size was measured using a digital camera and image analysis software. As nozzles, commercially available needles with inner diameters (ID) of 0.018 cm and 0.025 cm and self-fabricated nozzles with 3-holes (ID: 0.0135 cm), 4-holes (ID: 0.0135 cm), and 2-holes (ID: 0.0148 cm) were used. The mercury penetration lengths in the nozzles were 1.3 cm for the needles and 0.5 cm for the self-fabricated nozzles. The droplets formed from each nozzle maintained stable spherical shape up to 20 cm below the nozzle. The droplet size measurements were within a 10% error range when compared to the Scheele-Meister model estimates. The experimental results show that the Scheele-Meister model for droplet size estimation can be applied to nozzles that stably form droplets in a water-mercury system.

Keywords: Molten salt-liquid metal extraction, Water-mercury, Droplet, Scheele-meister model, Room temperature

---

\* Corresponding Author.

Byung Gi Park, Soonchunhyang University, E-mail: [byunggi@sch.ac.kr](mailto:byunggi@sch.ac.kr), Tel: +82-41-530-4723

### ORCID

Yong-il Kim

<http://orcid.org/0000-0003-2155-2114>

Byung Gi Park

<http://orcid.org/0000-0003-0136-1011>

용융염-액체금속 추출공정에서 형성되는 액적 크기를 추정하는 방안으로 용융염-액체금속 계를 상온에서 유사한 물-수은 계로 대체하여 액적 형성 실험을 노즐의 종류에 따라 수행하여 Scheele-Meister 모델의 적용성을 평가하였다. 실험에서 액적의 크기 측정은 디지털카메라와 이미지분석 소프트웨어를 사용하였으며 노즐은 0.018 cm과 0.025 cm의 구멍 크기를 가지며 수은의 통과 길이가 1.3 cm인 상용 니들과 두께가 0.5 cm이며 0.0148 cm 구멍 2개, 0.0135 cm 구멍 3개, 0.0135 cm 구멍 4개인 것을 제작하여 사용하였다. 각각의 노즐에서 형성된 액적은 노즐 아래 20 cm까지 안정적인 구형을 유지하였다. 액적 크기의 측정치를 Scheele-Meister 모델의 추정치와 비교하였을 때 10% 오차 범위 안에서 일치하였다. 실험 결과는 물-수은 계에서 액적을 안정적으로 형성시키는 노즐에 대해 액적 크기 추정을 위한 Scheele-Meister 모델이 적용될 수 있음을 보였다.

중심단어: 용융염-액체금속 추출, 물-수은, 액적, Scheele-Meister 모델, 상온

## 1. 서론

사용후핵연료를 관리하는 방법으로 선진핵연료주기기술로 파이로공정이 개발되고 있다. 파이로공정은 용융염 매질을 기반으로 사용후핵연료에서 피복관을 분리하는 공정, 산화물을 금속으로 환원하는 전해환원 공정, 우라늄을 선택적으로 회수하는 전해정련 공정, 우라늄과 초우라늄을 동시에 회수하는 전해제련 공정 및 폐기물 처리 공정으로 구성된다 [1]. 전해정련 및 전해제련으로 우라늄과 초우라늄을 회수하더라도 전기화학적 공정의 특성으로 미량의 악티니드가 용융염에 잔류하여 폐용융염은 독성이 강한 폐기물로 분류된다. 폐용융염에 잔류하는 미량의 악티니드를 회수하여 폐기물의 독성을 저감시키기 위하여 환원추출 및 산화추출 등을 이용하는 용융염-액체금속 추출공정을 활용할 수 있다. 용융염-액체금속 계에서 악티니드로부터 란타니드를 산화와 환원 원리로 추출하는 방안에 대해 다양한 연구가 시도되었다 [2-4].

용융염-액체금속 추출공정은 두 상 사이의 계면에서 산화환원반응에 의한 화학종의 교환반응이 주축이 된다. 용융염과 액체금속이 용융된 상태인 고온에서 화학반응속도가 빠르다고 가정하면 교환반응은 대상 화학종이 용융염과 액체금속 상에서 계면으로 확산되는 현상에 의해 제어되며 계면의 면적이 넓어질수록 반응속도는 비례하여 증가할 것이다. 따라서 용융염-액체금속 추출공정에서 잔류 악티니드를 회수하는 처리량은 용융염과 액체금속의 접촉면적과 밀접하게 연관된다. 용매추출공정과 같은 화학공정에서 접촉면적을 넓히기 위하여 연속상에 분산상을 액적 형태로 분산시키고 이를 다시 분리하는 기술이 사용되고 있으며 액적과 연속상

사이의 물질전달은 액적의 표면적과 액적의 유동에 의존하는 것으로 알려져 있다. 용융염-액체금속 추출공정에서 추출 효율을 향상시키는 방법으로 액적을 형성시키는 추출기 유형이 고려될 수 있다 [5]. 용융염-액체금속 추출공정에서 용융염을 연속상으로 하여 액체금속을 액적으로 분산시키는 장치를 개발하여 이용하면 잔류 악티니드를 효율적으로 회수하는데 기여할 수 있을 것이다. 이러한 공정장치의 설계에서 용융염-액체금속 계에서 액체금속의 액적 크기는 주요 인자가 된다. 액적크기에 대한 대부분의 연구는 수용액-유기용매 계에서 수행되어 충분한 실험 자료가 발표되었지만 용융염-액체금속 계에 대한 연구는 빈약하다. 수용액-유기용매 계에서는 액적의 크기를 추정하기 위한 다양한 모델이 개발되었으며 이론을 기반으로 하는 준경험식이 활용되고 있다. 상관식 중에서 밀도가 다른 두 액체상에서 무거운 액체가 가벼운 액체에서 분산되어 형성되는 액적의 크기를 예측하는 대표적인 모델인 Scheele-Meister 모델 [6]을 광범위하게 적용하고 있다.

Scheele-Meister 모델은 수용액과 유기용매에 대해 개발된 모델로 점성이 낮은 액체-액체 계에서 액적 부피를 15%의 정확도로 예측한다. 용융염과 액체금속 계에서 형성되는 액적의 크기를 추정하기 위하여 새로운 모델을 수립하기 전에 기존 모델의 적용성을 평가할 필요가 있다. 특히 Scheele-Meister 모델은 밀도 차이가 큰 계에서 적용성이 높기 때문에 이 모델의 용융염-액체금속 계에 대한 적용성을 평가할 필요가 있다. 용융염-액체금속 계에 대한 액적 형성 연구는 고온 실험을 요구하므로 모델의 적용성 평가를 위하여 상온에서 용융염과 액체금속에 대응하는 유사한 계로서 용융염을

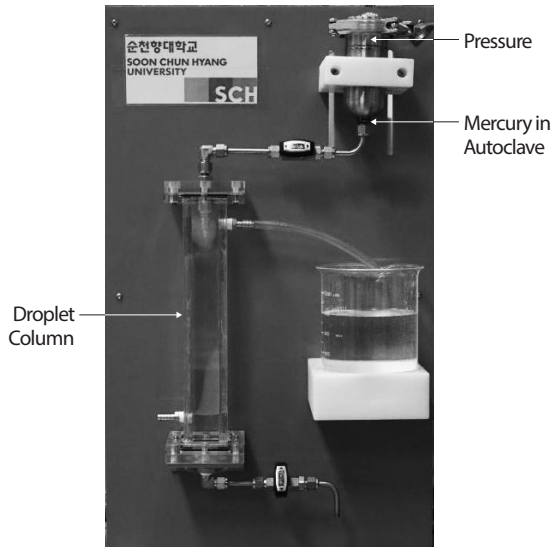


Fig. 1. Experimental apparatus for measurement of droplet size in the water-mercury system.

대체하는 가벼운 액체로 물을 사용하고 상온에서 액체인 수은을 이용하여 물과 수은 계에 대해 액적 형성 특성에 대해 조사하였다. 이 논문에서는 물-수은 계에 대해 수은 액적의 크기를 변화시킬 수 있는 장치를 제작하여 수은 액적의 크기를 사진법을 이용하여 측정하고 액적 크기의 측정치를 Scheele-Meister 모델과 비교하였다.

## 2. 실험 방법

Fig. 1은 수은의 액적크기를 측정할 수 있게 제작된 실험 장치를 나타낸다. 가압 기체로 질소를 사용하였으며 YUTAKA 사의 2단 레귤레이터를 사용하여 압력을 조절하여 노즐을 통과하는 액체 수은 금속의 속도를 조절하였다. 물 속에서 수은 액적을 촬영하고 관찰할 수 있는 컬럼은 가로 3 cm, 세로 3 cm, 높이 30 cm 직육면체 구조를 가지도록 투명한 PMMA 아크릴을 사용하여 제작하였다. 수은 용기는 지름 4.8 cm, 높이 10 cm의 스테인리스강으로 제작하였으며 상부의 덮개는 분리 조립이 쉽게 클램프를 이용하여 밀봉할 수 있도록 하였다. 용기의 하부를 통해 측정부로 이동하여 액적을 형성시키는 노즐 연결은 스테인리스강의 튜브로 구성하였다.

물 속에서 수은 액적의 형성은 수은 용기를 가압하여 노즐을 통과하는 수은의 속도를 조절할 수 있도록 설계하였다. 수은 용기가 가압되면 수은은 스테인리스강 튜브를 통해 니들 또는 노즐까지 이동하여 컬럼 안에서 액적을 형성하며 하강한다. 노즐을 통하여 물속에서 형성되는 수은의 액적을 디지털카메라를 이용하여 촬영하고, 디지털 이미지는 영상분석 소프트웨어를 이용하여 분석하여 물속에서 형성된 수은의 액적크기를 측정하였다. 액적 크기 측정에 사용된 카메라는 소니사의 알파 ILCE-A7R이며 렌즈는 ZALZZ FE 55 mm f/1.8za를 사용하였다. 측정된 이미지에서 정확한 액적크기를 측정하기 위해서 정밀 자와 영상분석 소프트웨어인 iSolution을 이용하였다. 이미지의 화질과 빠른 순간을 포착하기 위해 조리개 5.6, 셔터 1/8000s, ISO 1600으로 설정하였으며 추가적인 조명(60 W × 4EA)을 설치하여 액적의 형상을 측정할 수 있도록 하였다.

실험에서 액적을 형성시키기 위하여 니들과 노즐을 이용하였다. 니들은 0.018 cm와 0.025 cm의 직경을 가지며 길이가 1.3 cm인 상용 제품을 구입하여 사용하였다. 다양한 크기에서 액적 형성 실험을 수행하기 위하여 두께가 0.2 cm인 원판에 직경 0.01 cm, 0.02 cm, 0.03 cm의 구멍을 가지도록 가공하여 노즐로 사용하였다. 단일 구멍에서 뿐만 아니라 여러 개의 구멍을 가진 노즐에서 액적 형성을 관찰하기 위하여 두께가 0.5 cm인 원판에 0.0148 cm 직경이며 2개의 구멍을 가지는 노즐과 0.0135 cm 직경이며 3개 또는 4개의 구멍을 가지는 노즐을 제작하여 실험을 수행하였다.

상온에서 액체 상태인 수은을 이용하여 노즐 및 니들의 직경, 수은 용기의 압력을 변화시키며 수은 액적크기를 측정하였다. 실험에서 노즐을 통과하는 수은의 속도는 가해지는 압력을 이용하여 조절하였다. 압력을 유속으로 변화하기 위하여, 점성이 있는 비압축성 액체가 관을 통과할 때 사용될 수 있는 Hagen-Poiseuille 방정식을 이용하였다[6]. 액체 금속 수은이 관을 통과할 때 압력과 속도의 상관관계는 다음과 같이 주어진다.

$$v = \frac{\Delta p}{8\mu} \left( \frac{R^2}{L} \right) \frac{1}{n} \quad (1)$$

여기서  $R[cm]$ 은 노즐의 반지름,  $\mu[g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1}]$ 는 수은의 점도,  $L[cm]$ 은 관의 길이,  $\Delta p[pa]$ 는 압력차,  $n$ 은 노즐에서 구멍의 개수이다. 노즐을 통과하는 액체 수은의 속도를 변화시키기

Table 1. Physical properties of water and mercury at 25 °C

	Surface Tension (g·s <sup>-2</sup> )	Density (g·cm <sup>-3</sup> )	Viscosity (g·cm <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Water	71.99	0.99705	0.890×10 <sup>-2</sup>
Mercury	485.48	13.53359	1.526×10 <sup>-2</sup>

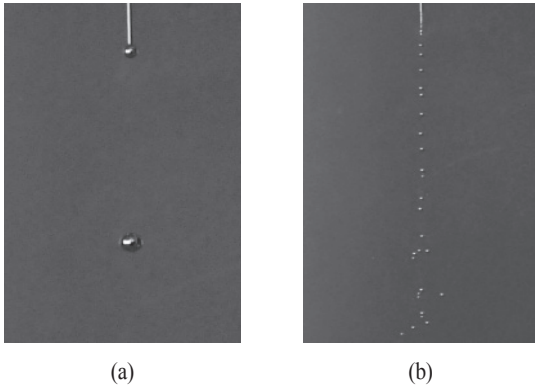


Fig. 2. The shape of the mercury droplet formed when the mercury container was pressurized at different pressures to change the needle through rate of mercury (a) 4 kPa and (b) 20 kPa.

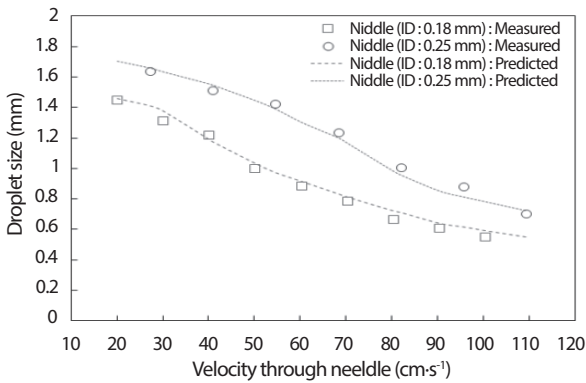


Fig. 3. Variation of droplet size in the nozzles with hole sizes of 0.018 cm and 0.025 cm, respectively. Symbols is measured values in the experimental apparatus and lines are the estimated values with Scheele-Meister model.

위하여 질소 압력을 2 ~ 20 kPa까지 설정하여 측정하였다. 압력이 높아 속도가 증가하면 수은액적이 스프레이 형태로 분사하게 되는데, 분사할 때 수은 액적끼리 접촉하여 결합하는 형태를 보이는 지 확인하기 위해, 0.02 cm 직경의 단일 노즐, 0.0148 cm 직경의 멀티노즐, 0.0135 cm 직경의

멀티노즐에서 액적의 하강 위치에 따라 액적 크기를 측정하여 액적의 크기 변화를 관찰하는 실험을 수행하였다.

액적 크기를 추정하는 상관식으로 밀도가 다른 두 액체 상에서 무거운 액체가 가벼운 액체에서 분산되어 형성되는 액적의 크기를 예측하는 대표적인 모델인 Scheele-Meister 모델을 선정하고 측정치와 추정치를 비교하였다. Scheele-Meister 모델은 다음과 같다[7].

$$\frac{\pi}{6}d_p^3 = F \left[ \frac{\pi\sigma d_N}{g\Delta\rho} + \frac{5\pi\mu_c d_N^3 u_N}{d_p^2 g\Delta\rho} - \frac{\pi\rho_d d_N^2 u_N^2}{3g\Delta\rho} + 4.5 \left( \frac{\pi^2 d_N^6 u_N^2 \rho_d \sigma}{(4g\Delta\rho)^2} \right)^{1/3} \right] (u_N < u_{NJ}) \quad (2)$$

여기서,  $d_p[cm]$ 는 액적의 직경,  $d_N[cm]$ 는 노즐의 직경,  $\sigma[g\cdot s^{-2}]$ 는 분산상의 표면장력,  $g[cm\cdot s^{-2}]$ 는 중력가속도,  $\rho_d[g\cdot cm^{-3}]$ 는 분산상의 밀도,  $\Delta\rho$ 는 분산상과 연속상의 밀도 차,  $\mu_c[g\cdot cm^{-1}\cdot s^{-1}]$ 는 연속상의 점도,  $u_N[cm\cdot s^{-1}]$ 은 분산상의 노즐 통과 속도,  $u_{NJ}[cm\cdot s^{-1}]$ 는 노즐에서 분산상의 줄기 형성 속도,  $F$ 는 Harkins-Brown's 보정계수를 나타낸다. Scheele-Meister 모델을 적용하기 위한 연속상인 물과 분산상인 수은의 물성치는 참고문헌 [8]에서 찾아 Table 1과 같이 정리하였다.

### 3. 결과 및 논의

단일 니들(ID 0.18 mm)의 경우에 형성된 액적의 모양은 Fig. 2와 같다. Fig. 2(a)는 수은 용기를 4 kPa로 가압하여 컬럼에서 형성된 수은 액적을 나타내며 액적이 구형을 유지하며 흔들림 없이 수직으로 하강하는 것을 관찰할 수 있다. 수은 용기의 가압하는 압력을 높이면 노즐을 통과하는 수은의 통과 속도가 증가함으로서 더 작은 크기의 수은 액적이 형성됨을 확인하였다. 그러나 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 수은 용기를 20 kPa로 가압하여 수은을 노즐로 통과시키면 형성된 액적은 니들로부터 8 cm 까지 구형의 형상으로 흔들림 없이 하강하지만 10 cm 이상 하강하면 수은 액적이 좌우로 흔들리는 것이 관찰된다. 이것은 수은 액적의 직경이 작아져 중력에 의한 하강과 물의 부력이 상호작용하여 일어나는 현상으로 추정된다. 일반적으로 실험 조건에서 4 ~ 20 kPa까지 압력을 변화시키며 노즐을 통과하는 수은의 속도를 변화

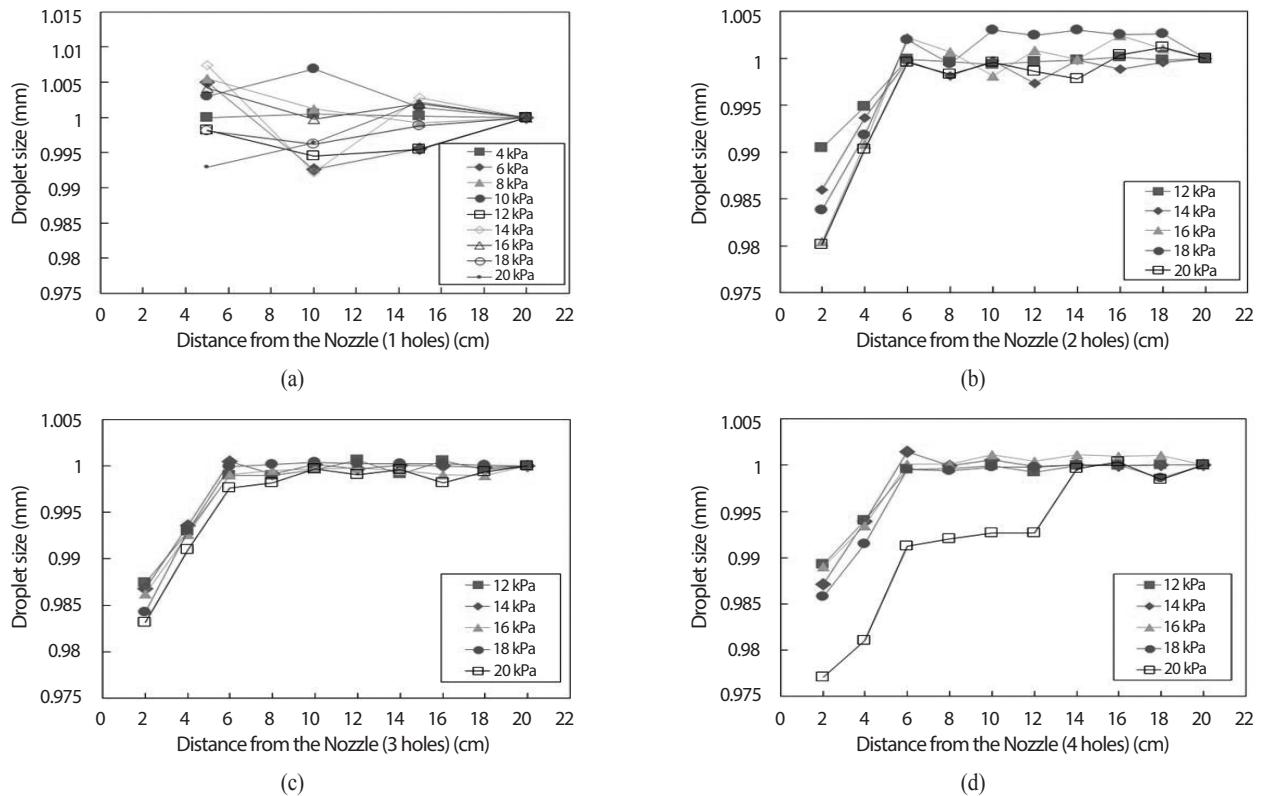


Fig. 4. Variation of droplet sizes measured at the position below the nozzle (Droplet sizes were normalized with droplet size at 20 cm) (a) Nozzle (ID: 0.2 mm, 1 hole), (b) Nozzle (ID: 0.148 mm, 2 holes), (c) Nozzle (ID: 0.135 mm, 3 holes), (d) Nozzle (ID: 0.135 mm, 4 holes).

시키면 수은 액적은 압력이 증가함에 따라 크기가 감소하며 구형을 잘 유지한다.

노즐의 구멍 크기가 액적에 주는 영향을 파악하기 위하여 노즐의 구멍 직경이 0.018 cm과 0.025 cm인 니들을 액적 형성을 위한 노즐로 사용하였을 때 측정된 수은액적의 크기를 Fig. 3에 도시하였다. 니들은 수은이 통과하는 통로가 상대적으로 길어 가장 안정적으로 수은 액적을 형성하며 아래로 하강하였다. 수은 용기를 질소로 가압하여 2 ~ 20 kPa의 압력 범위에서 실험을 수행하였다. 니들의 구멍 직경과 통과 길이를 이용하여 가해진 압력에 대한 수은의 통과 속도를 계산하면 2 ~ 20 kPa의 압력에서 20.1 ~ 109.43 cm·s<sup>-1</sup>가 된다. 수은의 통과 속도에 따라 니들 구멍이 0.018 cm인 경우 액적의 크기는 1.45 mm에서 0.55 mm로 작아지며, 니들 구멍이 0.025 mm인 경우 액적의 크기는 1.63 mm에서 0.7 mm로 작아진다. 즉, 니들의 구멍 크기가 작을수록, 수은의 통과 속도가 커질수록 액적의 크기는 작아짐을 알 수 있다. 실험

조건에 대해 Scheele-Meister 모델을 이용하여 액적의 크기를 추정하여 측정치와 같이 선으로 Fig. 3에 같이 도시하였다. Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 액적 크기의 측정치는 Scheele-Meister 모델의 추정치와 같은 경향으로 노즐의 통과 속도에 따라 감소하는 것으로 나타나며 추정치와 측정치는 약 8% 이내에서 일치함을 보였다.

노즐을 통해 형성된 수은 액적의 크기가 작아질수록 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 물속에서 하강하면서 액적의 중력에 의한 낙하와 물에 의한 부력이 균형을 이루며 수직으로 하강하지 못하고 흔들리는 경향이 나타난다. 따라서 수은 액적이 하강하는 동안 서로 달라붙어 크기의 변화를 주는 지 또는 구형의 모양이 변하는지 확인하기 위해 하강 위치에 따라 액적의 크기를 측정하여 비교하였다. 다양한 노즐에서 형성된 액적에 대해 수은 용기에 가압된 압력 4 ~ 20 kPa에 따라 노즐에서 20 cm 아래까지 수은 액적 크기를 20 cm에서 측정된 액적의 크기로 나눈 값으로 Fig. 4에 도시하였다.

직경이 0.02 cm인 구멍을 하나 가진 노즐에 대해 하강 위치를 5 cm 간격으로 구분하여 액적의 크기를 측정하였으며 Fig. 4(a)에 나타냈다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 하강 위치에 따라 액적 크기의 차이는 크게 나타나지 않는다. 0.02 cm 직경을 가지는 단일 노즐을 사용하였을 때, 액적 크기의 하강 위치별 변화가 가장 큰 위치는 노즐로부터 20 cm 하강한 위치에서 0.005 cm의 오차를 보인다. 수은액적이 하강하면서 일부의 액적은 결합하기도 하지만 전반적으로 수은액적이 분사될 때 측정되는 표준편차 범위 안에 포함되기 때문에 수은액적의 크기가 크게 차이난다고 볼 수 없다. 직경 0.0148 cm인 구멍이 4 mm 간격인 2개 멀티노즐에서 나오는 수은액적은 하강함에 따라 물의 저항 때문에 앞, 뒤, 좌, 우로 흔들리게 된다. 이 때 수은액적이 2개의 구멍에서 나오기 때문에 흔들리게 되면 수은액적이 결합할 수 있으므로 2 cm 간격으로 구간을 정해 위치별로 수은액적의 크기를 측정하여 Fig. 4(b)에 나타내었다. Fig. 4(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 노즐 아래 6 cm까지 미소하지만 액적 크기가 증가하며 그 아래에서는 균일한 크기를 보였다. 가압된 압력에 따라 노즐 통과 속도의 차이로 액적의 크기는 다르지만 미소한 변화를 보이고 있으므로 노즐 아래에서 형성된 액적 크기의 미소한 증가를 고려하여 Scheele-Meister 모델과 비교를 위한 액적의 크기는 노즐 아래 6 cm 지점에서 측정된 액적 크기를 사용하였다. 노즐을 직경이 0.0135 cm 구멍 3개인 경우 (Fig. 4(c))와 4개인 경우(Fig. 4(d))에 대해 액적의 하강 위치별 크기를 측정하여 비교하였다. 구멍이 2개인 노즐에서 보인 바와 같이 노즐 아래로 6 cm까지 액적 크기는 미소한 증가를 보였으며 이후 균일한 크기를 가지는 것으로 관찰되어 6 cm에서 측정된 액적의 크기를 모델의 추정치와 비교하는데 사용하였다.

노즐의 직경이 각각 0.01 cm, 0.02 cm, 0.03 cm이며 수은의 통과 길이가 0.2 cm인 노즐을 사용하여 물속에서 수은액적 형성을 관찰하여 수은 용기를 가압한 압력에 따라 노즐 아래 5 cm에서 측정된 수은액적의 크기를 Fig. 5에 도시하였다. 노즐의 구멍 크기로 0.01 cm를 사용했을 때, 작은 구멍 직경으로 인해 비교적 낮은 압력(4 ~ 10 kPa)에서는 액적이 생성되지 않았고 12 kPa 이상의 높은 압력에서 액적이 생성되었으며 생성된 수은액적의 크기도 불안정하며 상대적으로 액적 크기의 차이를 보였다. 노즐 구멍의 직경이 0.02 cm일 때 안정적인 액적을 관찰할 수 있었지만 노즐 구멍의 직경이

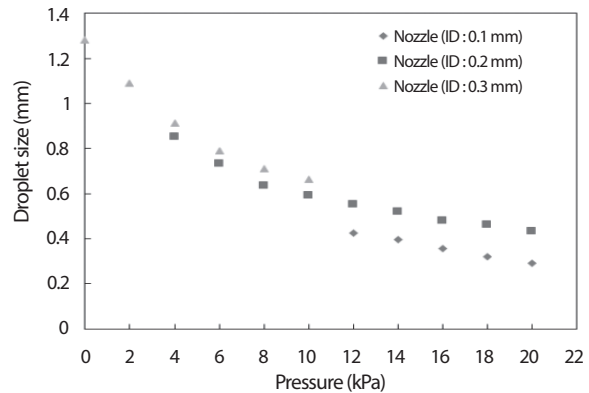


Fig. 5. Variation of droplet size formed in the nozzles with single hole (ID 0.01, 0.02, 0.03 cm) depending on the pressure at the mercury container.

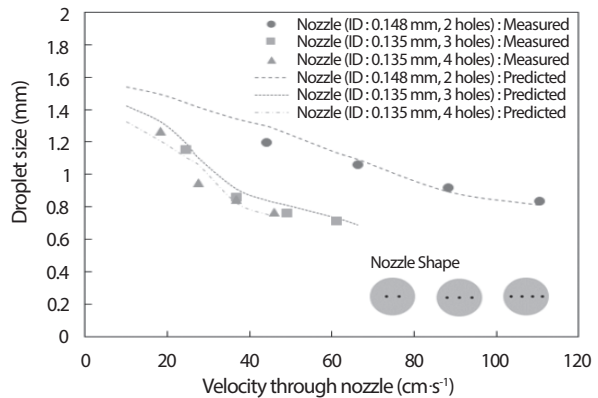


Fig. 6. Variation of droplet size in the nozzles with multi-holes. Symbols is measured values in the experimental apparatus and lines are the estimated values with Scheele-Meister model.

0.03 cm인 경우 별도의 압력이 가해지지 않아도 중력에 의해 수은액적이 형성되어 아래로 하강하였다. 압력이 0 kPa에서 10 kPa까지 액적 크기 측정을 실시하였고, 10 kPa 이상의 압력에서는 수은 줄기가 길게 형성되며 줄기에서 떨어진 액적의 크기도 다양하여 대표적인 수은액적 크기를 측정하는 것이 어려웠다. 또한 노즐에서 수은의 통과 길이가 0.2 cm로 매우 짧아 단순한 계산으로 속도를 추정하기 어려워 압력에 따른 액적 크기를 비교하였다. Fig. 5에서 볼 수 있는 바와 같이 수은액적의 크기는 노즐의 구멍 크기에 따라 액적이 생성되는 압력 범위가 존재함을 나타낸다. 노즐의 구멍 크기에 따라 액적이 생성되는 압력 범위는 제한되지만 용기를 가압한 압력이 증가함에 따라 액적의 크기는 일정한 경향성을 가지고

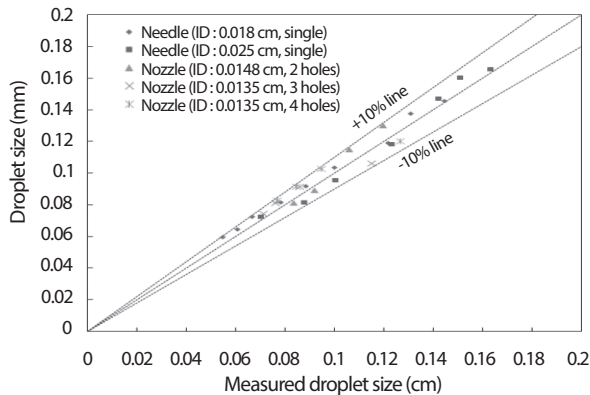


Fig. 7. Comparison of the estimated values with Scheele-Meister model and the measured value in the experimental apparatus.

감소하고 있음을 확인할 수 있었다. 실험에 사용된 노즐에서 수은이 통과하는 유로의 길이가 짧아 Scheele-Meister 모델의 적용성을 평가하는 것은 어려웠다.

노즐의 수은 통과 유로 길이로 2배 정도 확대하고 노즐의 구멍이 하나 이상인 경우에 대해 액적 형성을 관찰하기 위하여 구멍이 2개이며 직경이 각각 0.0148 cm 노즐과 구멍이 3 또는 4 개이며 각각의 직경이 0.0135 cm 인 노즐을 제작하여 노즐에 따라 형성되는 수은액적의 크기를 측정하여 비교하였다. 실험에 사용된 노즐의 구멍 배치는 Fig. 6에 삽입된 그림과 같이 동일한 4 mm의 간격을 가지며 노즐 크기 측정을 위하여 일자형으로 제작하여 사용하였다. 수은 용기에 가압된 압력이 12 kPa 이상인 경우에는 수은 액적이 분무 형태로 분산되면서 다양한 액적이 형성되어 액적 크기를 정량화하는 것이 어려워 이보다 낮은 압력에서 압력을 변화시키며 수은 액적의 크기를 측정하였다. 실험은 Fig. 3(c)와 Fig. 3(d)에 나타난 바와 같이 안정한 액적이 형성되는 노즐 아래 6 cm 지점에서 측정된 액적 크기를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 수은 액적의 측정치는 Scheele-Meister 모델과 유사한 경향으로 노즐 통과 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 노즐 구멍의 직경이 0.0148 cm이며 2개의 구멍을 가진 경우에 Scheele-Meister 모델을 사용해 추정치를 계산하여 비교하면, 측정치와 추정치는 약 8% 이내에서 일치하였다. 노즐의 구멍 직경이 0.0135 cm 이며 3개와 4개의 구멍을 가진 노즐에서도 유사한 경향을 보였지만 추정치와 측정치는 표준편차 약 10% 이내에서 일치하였다.

물속에서 수은이 액적을 형성하는 계에서 액적을 형성시키는 도구로 구멍의 직경이 0.018 cm와 0.025 cm이며 수은의 통과 길이가 1.3 cm인 니들을 사용한 경우, 원판형 디스크에 노즐 구멍을 가공하여 0.0148 cm인 구멍 2개를 가진 경우와 0.0135 cm의 직경을 가진 구멍 3개와 4개를 가지며 수은의 통과 길이가 0.5 cm로 제작된 노즐을 사용한 경우 수은 액적의 측정치와 Scheele-Meister 모델을 이용하여 액적의 크기를 추정한 추정치를 비교하여 Fig. 7에 도시하였다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 측정치는 추정치의  $\pm 10\%$ 의 오차 범위 이내에 있음을 알 수 있다. 이러한 실험 결과는 Scheele-Meister 모델이 물-수은 계에서 액적이 안정적으로 형성되는 노즐을 사용하는 경우에 대해 수은 액적 형성 크기를 추정하는데 사용할 수 있음을 보인다.

#### 4. 결론

용융염-액체금속 추출공정에서 반응 효율을 높이기 위하여 액적 형성에 의한 반응면적 확대를 고려할 수 있다. 고온의 용융염-액체금속 계에서 액적 형성 실험에 앞서 유사한 계로 고려될 수 있는 물-수은 계에 대해 액적 형성 실험을 수행하고 액적 크기를 추정하는 Scheele-Meister 모델의 적용성을 평가하였다. 물-수은 계에서 수은 액적의 형성과 크기를 측정할 수 있는 실험 장치를 구축하고 최근 성능이 향상된 디지털카메라와 이미지해석 소프트웨어를 이용하여 액적의 크기를 측정하는 실험을 수행하였다. 액적의 측정에서는 노즐의 통과 길이가 상대적으로 긴 상용 제품인 니들과 여러 개의 구멍을 가진 노즐을 제작하여 사용하였다. 실험에 사용된 노즐에서 형성된 수은 액적은 구의 형태를 유지하였으며, 수은의 노즐 통과 유속이 빨라질수록 수은 액적의 크기는 작아지며 Scheele-Meister 모델과 유사한 경향을 보인다. 수은 액적의 크기에 대해 Scheele-Meister 모델을 이용한 추정치와 측정치를 비교를 하였을 때 약 10%의 오차 이내에 있음을 확인하였다. 따라서 물-수은 계에서 액적을 안정적으로 형성시키는 노즐을 사용하는 경우에 대해 Scheele-Meister 모델을 액적 크기 추정에 적용할 수 있음을 알 수 있다. 향후 물-수은 계와 유사한 액체금속과 용융염 계에서 실험과 유사한 조건에서 액적 형성에 대한 Scheele-Meister 모델의 적용성을 확인할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2016M2B2B1945263).

## REFERENCES

- [1] K.C. Song, H. Lee, J.M. Hur, J.G. Kim, D.H. Ahn, and Y.Z. Cho, “Status of Pyroprocessing Technology Development in Korea”, *Nuclear Engineering and Technology*, 42(2), 131-144 (2010).
- [2] W.G. Ginell, “Oxidative Extraction of Lanthanide Metals from Molten Bismuth by Fused Salts”, *Industrial and Engineering Chemistry*, 51(2), 185-188 (1959).
- [3] P. Chiotti and S.J.S. Parry, “Separation of Various Component from Uranium by Oxidation–Reduction Reactions in a Liquid Potassium Chloride-Lithium Chloride/Zinc System”, *Journal of the Less-Common Metals*, 4, 315-337 (1962).
- [4] M. Adachi, M. Harada, Y. Kai, and K.I. Koike, “Extraction of Lanthanide Elements and Bismuth in Molten Lithium Chloride-Liquid Bismuth-Lithium Alloy System”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 25(10), 798-797 (1988).
- [5] M. Adachi, K.I. Koike, and M. Harada, “Extractor type in liquid metal-molten salt extraction system”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 25(9), 712-720 (1988).
- [6] J. Pfitzner, “Poiseuille and his law”, *Anaesthesia*, 31, 273-275 (1976).
- [7] G.F. Scheele and B.J. Meister, “Drop Formation at Low Velocities in Liquid-Liquid Systems”, *AIChE Journal*, 14(1), 9-15 (1968).
- [8] D.R. Lide and W.M. Haynes, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90th edition, CRC press (2009).