과냉각수조 내의 제트에 의한 용융우드메탈 미립화에 관한 실험적 연구

허 효* · 정동욱** · 방인철*,†

Experimental Study of Molten Wood's Metal Jet Breakup in Subcooled Water

Hyo Heo, Dong Wook Jerng and In Cheol Bang

Key Words: Debris size(파편 크기), Jet breakup(제트 미립화), Jet velocity(제트 속도), Molten wood's metal(용융우드 메탈), Nozzle diameter(노즐 직경)

Abstract

The liquid jet breakup has been studied in the areas such as aerosols, spray and combustion. The breakup depends on several physical parameters such as the jet velocity, the nozzle inner diameter, and the density ratio of the water to the jet. This paper deals with characteristics of the jet breakup according to the jet velocity and the nozzle diameter. In order to consider only hydrodynamic factors, all the experiments were conducted in non-boiling conditions. The jet behavior in the water pool was observed by high-speed camera and PIV technique. For the condition of the inner diameter of 6.95 mm and the jet velocity of 2.8 m/s, the debris size of 22 mm gave the largest mass fraction, 39%. For higher jet velocity of 3.1 m/s, the debris size of 14 mm gave the largest mass fraction, 36%. For the nozzle with inner diameter of 9.30 mm, the debris size distribution was different. For jet velocity of 2.8 m/s and 3.1 m/s, the debris size with the largest mass fraction was found to be 14 mm. It was identified that the debris size decreased as the diameter or the jet velocity increased.

1. 서 론

액체 제트 미립화 현상은 에어로졸, 분무 및 연소 영역에서 광범위하게 연구되어 왔다. 이와 관련된 초기의 연구들은 주로 가스 환경 내 수 밀리미터 직경의 저밀도 액체 제트를 분사하여 수행되었다. 이에 반해 고밀도 액체 제트 미립화에 관한 연구는 주로 원자로 사고 관련 분야에서 진행되어 왔다⁽¹⁾. 이 분야에서 미립화는 노심 용융물과 냉각수 사이의 상호반응에 기인한다. 이 상

호반응은 고속로(Fast Breeder Reactor, FBR) 가상노심 파손사고(Hypothetical Core Disruptive Accident, HCDA)와 같은 심각한 중대사고로 이어질 수 있는 초기단계에서, 노심 용융물이 냉각수로 분출될 때 일어난다. 일반적으로 이 상호반응 과정에선 노심 용융물 미립화가 일어나고, 이로 인해 용융물과 물 사이의 열전달 면적은 증가한다. 만약 이 때 충분한 열전달 면적이 확보되어 상당한 냉각수 증기압이 형성된다면 이것은 분출된 용융물을 노심 외부로 배출시켜 원자로 건전성을 증진시킬 수 있다. 그러므로, 이 상호반응을 분석하기 위하여 노심 용융물과 냉각수 사이의 미립화 현상을 파악하는 것은 중요하다^(2,3).

고밀도 액체 제트 미립화와 관련된 실험은 주로 냉각수 수조에 용융물을 제트 형태로 분사하여 수행되어왔다.

Kolev⁽⁴⁾는 제트 미립화 및 입자화의 수치적 모델을 개발하기 위하여, 선행 실험 결과와 이론적 내용을 종합적

Received: 01 Oct 2014, Received in revised form: 16 Dec 2014, Accepted: 17 Dec 2014)

*울산과학기술대학교 (UNIST)

**중앙대학교

†책임저자, 회원, 울산과학기술대학교(UNIST) 기계 및 원자력 공학부

E-mail : icbang@unist.ac.kr

TEL : (052)217-2915 FAX : (052)217-3008

Table 1 Physical properties of metallic fuel and wood's metal

	Metallic fuel	Wood's metal
Density [kg/m^3]	14100	938
Surface tension [N/m]	0.573	~ 1.0
Viscosity [$\text{mPa}\cdot\text{s}$]	$5\cdot 10^{-3}$	$1.877\cdot 10^{-3}$
Melting point [$^{\circ}\text{C}$]	1077	72

으로 정리하였다. 이를 통해 Kelvin-Helmholtz instability 혹은 Rayleigh-Taylor instability와 같은 표면과 불안정성으로 인한 제트 미립화 거동에 대해 보고하였다.

Dinh⁽⁵⁾ 등은 다양한 쌍의 액체 상사물질들을 이용하여 제트 미립화 실험을 수행하였다. 그들은 제트 미립화에 미치는 주요 변수가 유동의 점성이 아닌 두 유체의 밀도비인 것으로 보고하였다.

Duan⁽⁶⁾ 등은 Moving Particle Semi-implicit(MPS)법을 이용한 수치해석을 통하여 불용성 유체 사이의 제트 미립화에는 세 가지 모드가 존재하며, 제트 미립화 거동은 이 세 가지 모드에 의해 영향을 받는 것으로 규명하였다.

본 연구에서는 거시적 제트 미립화 거동을 관찰 및 비교하기 위하여 용융우드메탈과 물을 각각 제트 물질과 냉각수 물질로 선정하였고, 이 물질을 사용하여 설정된 실험조건에 따라 제트 미립화를 실험적으로 규명하였다. 우드메탈은 노심 핵연료와 비슷한 밀도를 가지며, 대기압에서 물의 비등점보다 낮은 저융점을 갖는다. 우드메탈의 물리적 물성치 중 일부를 Table 1에 나타내었다. 실험은 비등에 따른 제트 미립화에 미치는 영향을 배제하기 위하여 비등이 발생하지 않는 조건을 전제하였다. 또한 수력학적 측면에서 미립화 특성을 확인하기 위하여 분사노즐 직경 크기, 제트 분사 속도 변화에 따른 과냉각수조 내의 제트 미립화 거동을 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Figure 1은 물 수조 내의 용융우드메탈 제트 미립화 거동을 알아보기 위한 실험 장치를 나타낸 것이다. 실험 장치는 용융우드메탈을 담는 부분과 물이 들어있는 수조 탱크 부분으로 구성된다. 이 수조 탱크는 용융우드메탈 분사 시, 제트 거동에 대한 가시성을 확보하기 위하여 아크릴로 제작하였다. 수조 탱크는 $0.07\text{ m} \times 0.07\text{ m}$

Fig. 1 Schematic diagram of experimental diagram

의 사각형 단면과 0.4 m의 높이를 갖는다. 사용된 노즐은 원형 실린더관 형태의 스테인리스 316이며, 실험 조건에 따른 용융우드메탈의 거동을 비교하기 위하여 노즐의 출구 각도를 90도로 고정시켰다. 또한 제트가 분사되는 동안 용융우드메탈의 온도를 유지시키기 위해 노즐 외부에는 열선(heating cable)을 설치하였다.

실험을 통한 제트 미립화는 고속카메라(Phantom, v9.1)를 이용하여 관찰하였으며 각 제트 미립화 이미지를 0.01초 간격으로 취득하였다. 더불어, 제트 미립화에 따라 변화하는 각 유체의 속도장 측정을 위해 Nd:YAG 레이저와 CCD카메라를 이용하여 PIV(Particle Image Velocimetry)기법을 적용하였다. 사용된 Nd:YAG 레이저는 532 nm의 파장(frequency doubled)을 가지며, 펄스당 최대 110 mJ의 에너지를 가지는 레이저를 사용하였다.

2.2 실험 방법

본 연구는 수력학적 측면에서 제트 미립화를 파악하기 위하여 Table 2와 같은 실험 조건을 설정하였다. 실험 조건은 제트 거동에 대한 가시화 결과를 용이하게 얻기 위하여 분사노즐 내부 직경을 6.95 mm, 9.30 mm

Table 2 Experimental conditions

Molten wood's metal jet			Water
Diameter [mm]	Impinging velocity [m/s]	Temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
6.95	2.80	90	22
6.95	3.10	90	22
9.30	2.80	90	22
9.30	3.10	90	22

그리고 제트 분사속도를 2.8 m/s, 3.1 m/s로 설정하였다. 각 실험에서는 50 g의 일정한 용융우드메탈을 분사시켰으며, 대기압 조건에서 실험을 수행하였다. 실험 시 용융우드메탈의 온도는 90°C, 물의 온도는 22°C로 동일하게 유지하였다. 일반적으로 제트 분사속도는 가압에 의한 방법과 노즐 내 자유낙하에 의한 방법으로 조절될 수 있다. 가압에 의한 방법은 실험 장치의 공간적 제한이 적은 대신 분사 시 가압에 의한 난류 효과가 노즐 주위에서 발생한다. 이 난류 효과는 제트 미립화에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으므로, 본 실험에서는 이를 최소화하기 위하여 노즐을 통한 자유낙하로 제트 분사속도를 조절하였다⁽⁷⁾. 실험은 Fig. 1과 같이 수직방향으로 설치된 노즐에 용융우드메탈을 수조 탱크로 분사하여 제트 미립화를 일으켰으며, 이 미립화 특성을 분석하기 위하여 실험 후 미립화된 우드메탈 파편(debris)들을 수거해 파편 크기를 측정하였다. 그 후, 이 파편들을 크기에 따른 질량 분율로 도식화 시켰다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 제트 미립화 가시화 결과

Figure 2에서 5까지는 각 실험 조건 하에서 동일한 분사 장치를 이용하여 용융우드메탈의 제트 미립화 거동을 나타낸 그림이다. Fig. 2와 3은 분사노즐 직경이 6.95 mm일 때, 제트 분사속도가 각각 2.8 m/s, 3.1 m/s인 제트의 거동이며, Fig. 4와 5는 분사노즐 직경이 9.30 mm일 때, 제트 분사속도가 각각 2.8 m/s, 3.1 m/s인 제트의 거동이다.

모든 실험 조건에서 제트는 물에 분사되는 동시에 곧바로 미립화되는 거동이 관찰되었다. 또한 미립화에 의해 생성된 파편들은 반경방향으로 퍼져나가는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 2와 3을 보면, 분사노즐 직경이 6.95 mm일 때 제트 거동은 분사속도 변화에 따라 큰 차이가 관찰되지 않았다. 그 이유는 해당 실험 조건에 따른 것으로 판단된다. 일반적으로 제트 미립화는 제트 분사속도에 크게 의존한다. 하지만, 제트 분사속도가 상대적으로 작은 조건(<4.5 m/s)에서는 제트 분사속도 보다 제트와 물 사이의 밀도비가 더 주요하게 미립화에 영향을 줄 것으로 판단된다⁽⁸⁾.

분사노즐 직경이 9.30 mm인 경우, 직경이 6.95 mm

Fig. 2 Breakup behavior of molten wood's metal for jet diameter of 6.95 mm and jet velocity of 2.8 m/s

Fig. 3 Breakup behavior of molten wood's metal for jet diameter of 6.95 mm and jet velocity of 3.1 m/s

Fig. 4 Breakup behavior of molten wood's metal for jet diameter of 9.30 mm and jet velocity of 2.8 m/s

Fig. 5 Breakup behavior of molten wood's metal for jet diameter of 9.30 mm and jet velocity of 3.1 m/s

일 때에 비해 광범위하게 미립화 거동이 관찰되었다. 이는 노즐 직경이 확대됨에 따라 상대적으로 많은 양의 제트가 노즐로부터 분사됨으로써, 상당수의 제트 파편들이 반경방향으로 퍼지면서 비롯되었다. 또한 제트가 물 수면 아래로 들어갈 때 함께 끌려 들어가는 제트 주위의 공기와 물 속에 포함된 비응축성 기체에 의해 더 활발하게 미립화 거동이 일어나는 것처럼 관찰되었다.

3.2 파편 크기 측정결과

Fig. 6 Debris of molten wood's metal

제트 미립화 실험 후 미립화된 우드메탈 파편들은 수조 탱크 하단부에 쌓인다. 실험 후, 이 파편들을 수거하여 파편 크기 별로 분류하였다. Fig. 6은 미립화 실험에서 수거한 파편들을 나타내었다. 이 파편들은 건조과정을 거친 후 다양한 메시 크기를 가진 체를 통해 크기 별로 분류되었다. 미립화를 통해 형성된 파편들은 매우 다양한 크기를 가지고 있기 때문에, 파편을 특정 크기별로 일일이 분류하는 것에는 큰 무리가 있다. 따라서, 본 실험에서는 6 mm, 14 mm, 22 mm, 30 mm의 메시 크기를 가진 체를 이용하여 총 4가지 크기 범위를 설정하고 파편을 크기 별로 분류하였다. 분류된 파편들의 크기는 걸러진 메시 크기에 해당하도록 정의하였다. 미립화된 파편은 Fig. 6(a)와 같이 구형의 모양부터 평평한 모양까지 다양한 형상으로 관찰되었다. 이 파편의 형상은 보통 제트의 표면 고화 및 두 유체간의 접촉 조건에 따라 결정된다⁽⁹⁾.

Figure 7과 8은 분사노즐 직경이 각각 6.95 mm, 9.30 mm 일 때 파편 크기 별 질량 분율을 나타내었다. 분사노즐 직경이 6.95 mm, 제트 분사속도가 2.8 m/s인 경우, 파편 크기가 22 mm인 질량 분율이 39%로 가장 크게 나

Fig. 7 Debris size distribution of 6.95 mm diameter

Fig. 8 Debris size distribution of 9.30 mm diameter

타났다. 같은 노즐 직경에서 제트 분사속도가 3.1 m/s 인 경우엔 파편 크기가 14 mm인 질량 분율이 36%로 가장 컸다. 반면, 분사노즐 직경이 9.30 mm 일 때 파편 크기분포는 약간 다르게 나타났다. 제트 분사속도가 2.8 m/s 인 경우 파편 크기가 14 mm인 질량 분율이 31%로 가장 컸으며, 제트 분사속도가 3.1 m/s인 경우에도 파편 크기가 14 mm인 질량 분율이 50%로 가장 크게

나타났다. 즉, 분사노즐 직경의 크기가 커짐에 따라 평균 파편 크기가 작아지는 경향을 보였으며 제트 분사속도가 증가됨에 따라 평균 파편 크기는 작아지는 경향을 보였다^(2, 10).

3.3 PIV를 이용한 속도장 측정결과

고속카메라를 이용한 제트 거동 가시화 결과를 보면,

Fig. 9 Velocity fields for the jet diameter of 9.30 mm and the jet velocity of 2.8 m/s

Fig. 10 Velocity fields for the jet diameter of 9.30 mm and the jet velocity of 3.1 m/s

분사노즐 직경이 커짐에 따라 보다 넓은 영역에서 미립화 현상을 관찰하였다. 이 결과에 대해 보다 분석적으로 접근하기 위해 본 연구에서는 PIV기법을 적용하여 제트 미립화 진행 시 물의 속도장을 측정 해 보았다. PIV기법은 주로 유체의 속도장을 계측하기 위하여 적용되며, 그 방법은 다음과 같다. 우선, 유동장 계측을 위하여 유동장 내에 마이크로 크기의 추적 입자(tracer particles)를 주입한다. 그 후, 레이저와 CCD카메라를 이용하여 순차적으로 두 장의 이미지를 얻는다. 이 때, 두 번째 이미지에서의 추적 입자 위치가 첫 번째 이미지에서의 위치 대비 얼마나 이동하였는가를 계산하여 실제 유체의 속도를 예측한다. 이와 관련하여 본 실험에서는 첫 번째 이미지와 두 번째 이미지 사이 5 픽셀 내 입자들의 평균 움직임을 얻는 것을 목적으로 2000~3000 μs 를 이미지 취득 시간 간격으로 사용하였다. 사용된 추적 입자는 9 μm 에서 13 μm 의 직경을 가진 glass hollow sphere를 사용하였으며, DaVis 소프트웨어를 통해 cross-correlation interrogation 알고리즘을 이용하여 취득한 이미지에 대한 분석을 수행하였다.

Figure 9와 10은 분사속도가 2.8 m/s이며, 노즐 직경은 각각 6.95 mm, 9.30 mm인 경우에 대해 물의 속도장을 나타내었다. 이 두 속도장을 비교해보면, 노즐 직경이 커짐에 따라 반경방향으로 향하는 물의 유동이 더욱 광범위하게 형성됨을 알 수 있었다. 이 유동의 방향성은 규칙적이지 않았으며, 이를 통해 제트 미립화는 반경 방향을 포함한 다양한 방향으로 일어날 것으로 판단된다. Fig. 9와 10을 보면, 특정 시간 프레임에 대해 수조 하단부 영역이 상대적으로 빠른 유동장으로 측정되었고, 우드메탈과 물 사이의 경계 영역 속도는 제대로 측정되지 못하였다. 이는 우드메탈의 큰 반사 계수에 의해 PIV 측정이 불완전하게 이루어졌기 때문이다. 향후 우드메탈과 물 사이의 경계 영역을 확대하여 그 경계 속도를 측정할 수 있다면, 수력학적 측면에서 제트 미립화에 대한 정량적인 분석도 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 과냉각수조 내의 용융우드메탈 제트 미립화 거동 가시화 실험을 수행하여 분사노즐 직경 및 분사속도에 따른 제트 미립화 특성을 비교분석 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분사노즐 직경의 크기가 커질수록, 제트 미립화는

물 수조 내에서 광범위하게 일어났다. 또한 노즐 크기가 커질수록 제트 미립화에 의해 생성된 용융우드메탈 파편의 평균 크기는 감소하는 경향을 보였다.

2) 분사속도도 제트 미립화와 관련 있음을 확인하였다. 본 실험에서는 비교적 낮은 분사속도 범위에서 제트 미립화 실험을 수행하였다. 실험 결과, 분사속도가 증가될수록 파편의 평균 크기는 감소하는 경향을 확인하였다. 즉, 작은 분사속도 조건에서도 분사속도 변화가 제트 미립화에 기여한다고 판단된다.

3) 제트 미립화 가시화 실험을 통해 제트 거동의 변화를 현상학적으로 관찰하였다. 제트 미립화를 예측하고 분석하기 위해선 정량적인 제트 분석 결과 값을 바탕으로 적절한 모델링을 수립해야 한다. 이를 위한 초기 단계로서, 본 연구에서는 제트 미립화를 가시적으로 관찰하여 정성적인 수준에서 제트의 거동을 살펴보았다. 또한 PIV를 적용하여 제트 미립화에 관여하는 속도장을 측정하였으며 이를 통해 제트의 정량적 분석 가능성을 확인하였다. 향후 연구에서 제트의 반사 계수를 제어하여 제트와 물 사이의 경계 속도장을 완전하게 측정한다면, 이는 제트 미립화 연구에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) S. S. Sadhal, P. S. Ayyaswamy, and J. N. Chung, "Transport phenomena with drops and bubbles", Springer, Vol. 18, 1997.
- (2) K. H. Bang, J. M. Kim, and D. H. Kim, "Experimental study of melt jet breakup in water", Journal of Nuclear science and technology, Vol. 40, No. 10, pp. 807~813, 2003.
- (3) K. Matsumura and H. Nariai, "Self-triggering mechanism of vapor explosion for the large-scale experiments involving fuel stimulant melt", Nuclear science and technology, Vol. 34, No. 3, pp. 225~248.
- (4) N. I. Kolev, "Fragmentation and coalescence dynamics in multiphase flows", Experimental thermal and fluid science, Vol. 6, pp. 211~251, 1993.
- (5) T. N. Dinh, V. A. Bui, R. R. Nourgaliev, J. A. Green, and B. R. Sehgal, "Experimental and analytical studies of melt jet-coolant interactions: A synthesis", Nuclear engineering and design, Vol. 189, No. 1, pp. 299~327, 1999.
- (6) R. Q. Duan, S. Koshizuka, T. Takata, and A. Yamagu-

- chi, "Droplet breakup under impulsive acceleration using moving particle semi-implicit method", 11th International conference on nuclear engineering, ICONE11-36029, 2003.
- (7) Y. Abe, T. Kizu, T. Arai, H. Nariai, K. Chitose, and K. Koyama, "Study on thermal-hydraulic behavior during molten material and coolant interaction", Nuclear engineering and design, Vol. 230, pp. 277-291, 2004.
- (8) T. N. Dinh, V. A. Bui, R. R. Nourgaliev, J. A. Green, and B. R. Sehgal, "Experimental and analytical studies of melt jet-coolant interactions: a synthesis", Nuclear engineering and design Vol. 189.1, pp. 299~327, 1999.
- (9) Y. Iwasawa, Y. Abe, A. Kaneko, T. Kuroda, E. Matsuo, K. Ebihara, H. Sakaba, K. Koyama, K. Itoh, and H. Nariai, "Effect of surface solidification on fragmentation and breakup behavior of molten material jet in coolant", Nuclear engineering and design, Vol. 236, pp. 1668~1681, 2006.
- (10) E. Matsuo, Y. Abe, K. Chitose, K. Koyama, K. Itoh, "Study on jet breakup behavior at core disruptive accident for fast breeder reactor", Nuclear engineering and design, Vol. 238, pp. 1996~2004, 2008.