

관내 분무액적의 유동특성에 관한 실험적 연구

박대식*, 최혁준*, 박상균*, 김명환**, 오 철**, 윤석훈**

An Experimental Study on the Dynamic Behavior of Spray Droplets in the Wind Tunnel

Dae-Sick Park, Heok-Jun Choi, Sang-Gyun Park
Myoung-Hwan Kim, Cheol Oh, Seok-Hun Yun

* 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

Abstract

This study was experimentally performed to investigate flow characteristics of spray droplets in the wind tunnel. Behavior of the spray droplets in the pipe was observed and the deposition rate of droplets on the surface of pipe as liquid film was measured. The experiments were carried out for a variety of parameter, such as velocity of feed air, spray angle of nozzle, and diameter of droplet. From the visual observation of the spray droplets in the pipe and the measurement of deposition rate on the pipe, the general understanding of droplets behavior for desuperheater was provided.

Keywords : desuperheater, spray droplets, nozzle, wind tunnel, dynamic behavior, spray angle, diameter of droplet, liquid film

1. 서론

일반적으로 과열증기는 포화증기에 비하여 열전달 효과가 극히 나쁘기 때문에 고온 고압의 과열증기를 열교환기 등에서 가열 목적으로 사용하기 위해서는 소정의 온도로 감열시켜서 포화증기로 전환시킨 다음, 응축되면서 발생하는 상변화 에너지를 주로 이용한다. 이때 가열 목적의 유용성에 부합하도록 과열증기를 포화증기로 변환시키는 장치를 감열기(Desuperheater)라 한다.

감열기는 사용목적 및 용도에 따라 노즐타입, 벤츄리 타입, 이중 벤츄리 타입, 스팀 분사형,

가변 노즐형 등으로 나뉘어 진다. 이러한 감열기 중에서도 사용운전 조건의 범위(turn down ratio)가 큰 이중 벤츄리형 및 가변 노즐형에 대한 관심이 최근 증대되고 있다.

감열기는 석유화학 시설 및 스팀 동력원이 필요로 하는 많은 플랜트에서 잉여의 과열증기를 가열 목적으로 사용하기 위하여 빈도 있게 채택되고 있다. 그러나 그 유동과정 및 열·물질전달에 대한 체계적인 연구는 부족한 실정으로 고효율을 요구하는 최근의 감열기 설계에 많은 어려움이 있어 왔다. 특히, 수요의 증가에도 불구하고 국내에서 감열기와 관련되어 연구가 수행된 사례를 찾기 어렵다.

이러한 감열기를 효과적으로 설계하고 제작하기 위해서는 감열기 내의 유동특성과 열·물질전달 메카니즘의 파악이 최우선적으로 요구된다. 따라서, 본 연구는 감열기의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되는 감열기 내의 액적 유동 특성에 대한 기초자료를 확보하기 위하여 수평관내 급기중에 분무되는 액적의 유동특성을 실험적으로 관찰하여 감열기내 액적의 유동 메카니즘을 규명하고자 한다. 특히 관내 액적 유동중에 존재하여 액과 급기 사이의 전열면적 감소를 유발하는 액막류의 형성과랑에 대하여 중점적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2.1과 Fig. 2.2는 본 실험장치의 계통도와 전경을 나타낸다. 실험장치는 크게 액적의 유동특성을 관찰하기 위한 시험부, 일정 조건의 급기를 공급하기 위한 송풍부 및 분무되는 작동수를 일정 조건으로 유지하기 위한 제반 장치들로 구성되어 있다. 시험부는 내경 200mm, 길이 4700mm의 투명 아크릴 원관으로 약 1m 단위마다 액막유량 수집장치를 4개소에 설치하여 액적 유동 특성을 관찰하고 액적의 벽면부착율을 측정하였다. 작동수는 항온조를 사용하여 일정 온도 조건으로 유지되고 Float 타입 유량계를 거쳐 노즐로 공급된다. 액적분무용으로 사용된 노즐은 감열기에서 주로 사용하는 와류분무형 노즐(Spraying Systems Co., Korea)로서 압력별 분무량, 분사각도, 평균액적경 및 액적경 분포도 등의 시험을 거쳐 사용되었다.

Fig. 2.3과 Table 2.1은 실험에 사용된 증공원형 노즐(AB/4TT-SS+D1-25HSS)에 대한 시험전경과 결과를 나타낸 것이다.

본 실험에서는 유동현상의 가시화를 위하여 실험의 편의상 과열증기 대신 공기(최대유속 35m/s)를 사용하였다. 즉, 상변화 열전달을 배제하여 실험하였다.

실험은 일정조건의 공기를 시험부내로 송풍시킨 후, 일정조건의 급수를 노즐을 통해 시험

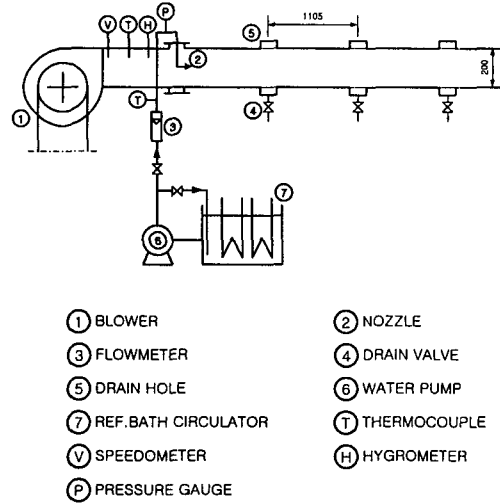


Fig. 2.1 Schematic of experimental apparatus

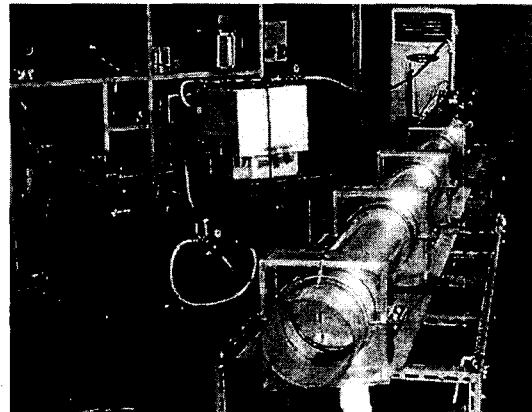


Fig. 2.2 Picture of experimental apparatus

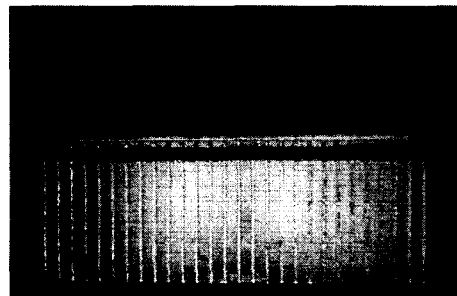


Fig. 2.3 Picture of nozzle spray test

Table 2.1 The data of nozzle spray test

NO	SPRAY NOZZLE SPE'C NO	WATER PRESS.	WATER FLOWRATE	SPRAY ANGLE	DROP SIZE
1	ABI/4TT-SS +D1-25HSS	3kg/cm ²	0.35 l/min	35 °	131.5μm
2	ABI/4TT-SS +D1-25HSS	6kg/cm ²	0.49 l/min	47 °	108.45μm
3	ABI/4TT-SS +D1-25HSS	10kg/cm ²	0.66 l/min	60 °	92.86μm

Table 2.2 Experimental conditions

Condition	Range		
Angle of Spray (a, °)	40		61
Diameter of Water droplet (D _w , μm)	67	71	124
Velocity of Feed Air (V, m/s)	15	25	35

부에 분사시킨 시점을 실험의 시작으로 하였다. 실험 종료후 수집장치에 포집된 액막류를 계측하여 각 부분별 액적의 벽면 부착율을 계산하고, 풍속, 분사각도 및 액적경 등이 액적 유동 특성에 미치는 영향 등을 검토하였다. 실험범위는 Table. 2.2와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 감열기내의 열·물질전달 거동

Fig. 3.1은 본 실험을 통해 확인된 유동특성을 바탕으로 하여 감열기 내의 액적의 유동 및 과열증기와의 열전달 현상을 예측하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 유동영역은 크게 이상류역(Tow phase flow) 및 단상류역(One phase flow)으로 구분된다. 세부적으로는 노즐전단에

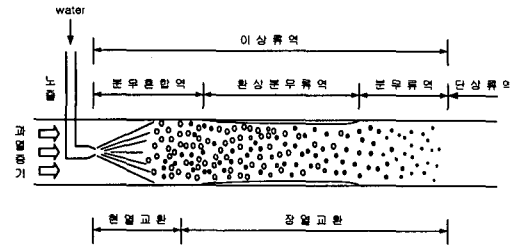


Fig. 3.1 Characteristic of flow and heat transfer in the desuperheater

해당하는 과열 증기 단상류역, 노즐에서 분무되는 액적과 과열증기가 혼합되어 흐르는 분무혼합역, 분무된 액적의 일부가 벽면에 부착하여 액적군과 함께 유동하는 환상 분무류역, 벽면의 액막류가 소멸된 후 액적군 유동만이 존재하는 분무류역, 액적의 증발이 완료된 후의 흐름인 포화증기 또는 낮은 과열도의 단상류역으로 나누어진다. 아울러 열전달 영역은 노즐에서 분무된 액적을 포화온도까지 가열하는 현열교환 영역과 그 후 액적이 증발하는 잠열교환 영역으로 나눌 수 있다. 그러나, 현열교환은 직경이 대단히 작은 분무액적(50~200μm)의 표면만을 포화온도로 가열하는데 작용하며, 대부분의 급수는 노즐에서 분무되기 전에 포화온도로 가열시키는 경우가 많으므로 현열교환영역은 노즐 후단의 매우 짧은 구역으로 한정될 것으로 사료된다. 노즐에서 분무된 직경이 작은 분무액적들은 과열증기와 혼합되어 흐르면서 과열증기는 포화증기로 감열된다.

이와 같은 액적 유동과 열전달 양식으로부터 감열기에서는 액적의 증발현상 및 액적의 벽면 부착에 따른 제반 거동이 대단히 중요하게 작용할 것으로 평가된다.

3.2 감열기내의 액막류 거동 특성

Fig. 3.2와 Fig. 3.3은 2종류 노즐(DI-13형, LNN-0.6형)에 대한 액적의 벽면 부착율 변화를

나타내고 있다. 그림에서 X좌표는 노즐 출구단에서 부터의 거리를 나타내고, Y좌표는 각 구간에서의 분무액적의 벽면 부착율을 백분율로 나타낸 것으로 X좌표의 1, 2, 3, 4m 지점은 각각 액막유량 수집장치에서 수집한 액막유량을, 5m 지점은 시험부의 벽면에 부착되지 않고 시험부 밖으로 토출되는 액적량을 의미한다. 그림으로부터 DI-13형의 경우 노즐 후단 1m 범위 내에서 큰 벽면 부착율을 나타내며 시험부의 입구영역에서부터 다량의 액막류를 형성하여 관내를 흘러가는 반면, LNN-0.6형의 경우는 시험부 전반에 걸쳐 낮은 벽면 부착율을 보이며 대부분의 분무액적들은 급기와 함께 외기로 토출된다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 실험결과와 비교로부터 액적과 급기 사이의 전열면적 감소로 이어지는 액적의 벽면부착율은 분무조건에 따라 크게 달라짐을 알 수 있다.

3.2 급기 유속의 영향

Fig. 3.4는 분사각과 액적경 일정 조건에서 급기 유속이 분무액적의 벽면부착율에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림으로부터 전반적인 경향은 전술의 그림들과 같이 분사에 따른 액적의 1차 벽면 충돌점 부근에서 큰 부착율을 나타내다가 급격히 줄어들음을 알 수 있다. 즉, 액적의 1차 충돌점 이후 와류에 의한 액적의 벽면 재부착율은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

그리고 그림으로부터 급기 유속이 증가할수록 액적의 1차 충돌점 부근에서 낮은 벽면 부착율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 급기 유속이 클수록 급기가 분무액적에 작용하는 항력(drag)이 커져서 분무액적이 반경방향으로 비산하지 못하고 급기의 유동방향으로 동반되어 나가기 때문이라 생각된다. 그러나, 1차 충돌점 이후에서는 반대로 급기 유속이 큰 쪽이 낮은 쪽보다 높은 벽면 부착율을 나타내는 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 급기 유속이 증가할수록 난류강도(turbulent intensity)가 커지기 때

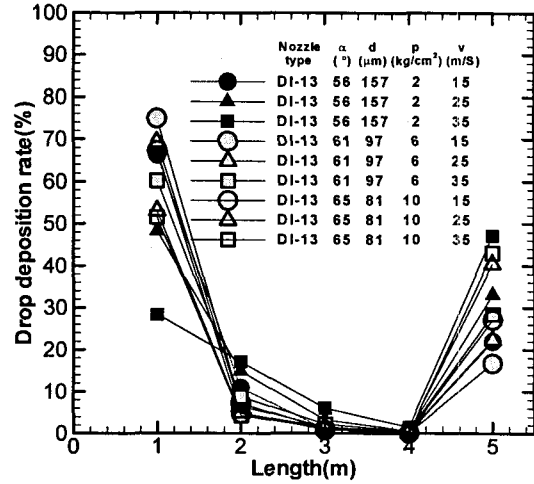


Fig. 3.2 The deposition rate of water droplets

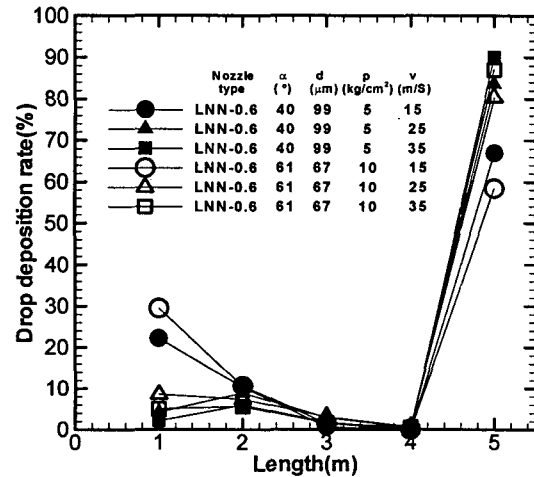


Fig. 3.3 The deposition rate of water droplets

문에 이에 따른 교란작용(disturbances)에 의해 액적이 관 벽면에 부딪치는율이 증가하기 때문이라 생각된다. 이러한 교란작용에 의한 벽면 부착율의 증가에도 불구하고, 시험부 전 구간에 걸친 액적의 벽면부착율은 급기 유속이 큰 쪽이 크게 나타남을 알 수 있다.

3.4 노즐 분사각의 영향

Fig 3.5는 노즐 분사각에 따른 분무액적의 벽

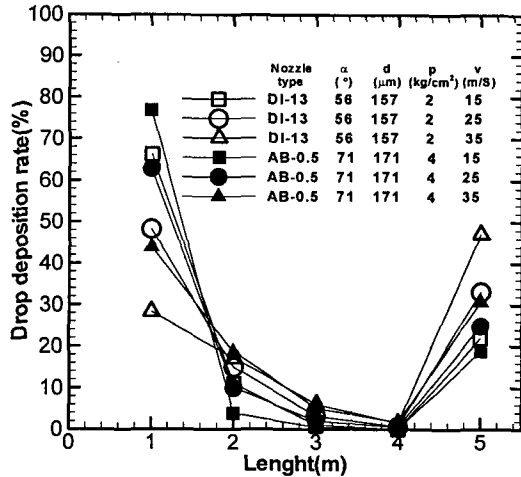


Fig. 3.4 The deposition rate of water droplets

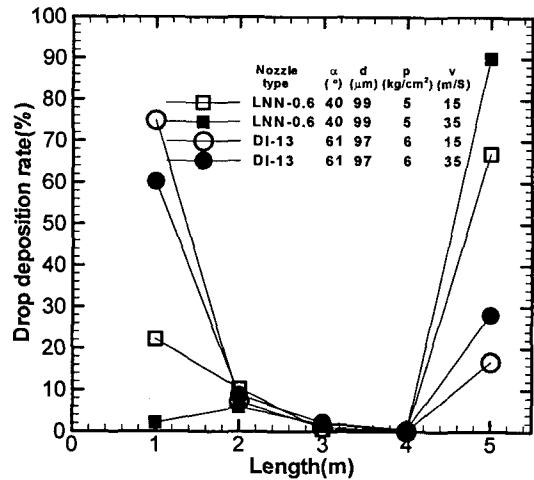


Fig. 3.5 The deposition rate of water droplets

면 부착율의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 분사각이 클수록 액적의 벽면 부착율이 대단히 높아짐을 알 수 있다. 특히, 분사각이 40°, 급기 속도가 35m/s인 경우, 벽면에 부착하지 않고 분무액적 상태로 외기로 토출되는 액적의 비율이 총 분사액의 약 90%에 달한다는 것을 확인할 수 있다. 이는 분사각이 커질수록 분무액적이 넓은 각도로 균일하게 비산하기 때문에 분사 초기구간의 액적의 벽면 부착율이 급격히 증가하기 때문이라 생각된다. 즉, 노즐에서 관측에 대하여 일정한 각도를 가지고 분사되는 액적의 반경방향 운동에너지가 관측방향으로 작용하는 급기의 항력에 비교하여 상대적으로 증가하기 때문이며, 분사압력과 액적경이 클수록 이러한 경향은 크게 나타난다.

한편, 전술한 급기 유속의 영향과 후술하게 될 액적경의 영향보다도 분사각의 영향이 액적의 벽면 부착율에 보다 지배적으로 작용하게 됨을 본 연구의 실험범위 내에서 확인할 수 있었다.

3.5 분무 액적경의 영향

Fig. 3.6은 액적의 벽면부착율에 미치는 분무

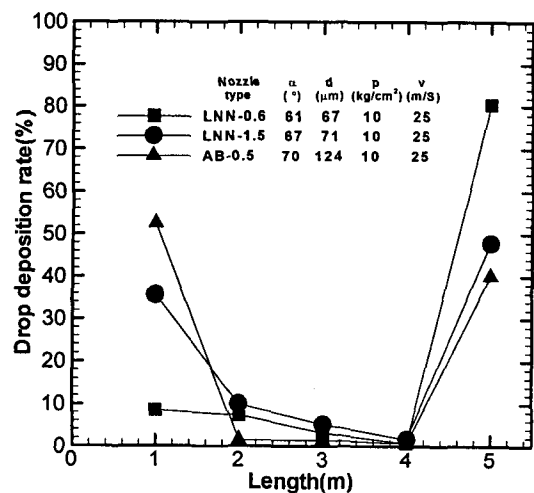


Fig. 3.6 The deposition rate of water droplets

액적경의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 분무액적경의 크기가 감소할수록 액적의 벽면 부착율이 감소함을 알 수 있다. 이것은 액적경이 작을수록 질량에 관련하는 분무액적의 운동에너지가 감소하는 영향이 급기 항력의 영향보다도 크게 작용하기 때문이다. 또한, 액적경이 일정 크기(약 70 μm)이상에서는 액적경이 벽면 부착율의 변화에 그다지 크게 작용하지 않음을 본 그

림과 전술의 결과로부터 확인할 수 있었다.

4. 결 론

관내 분무액적의 유동특성에 관한 실험적 연구를 통하여 감열기내 분무액적의 유동특성과 분무액적의 벽면 부착율에 대하여 본 실험 범위 안에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 감열기내의 유동은 크게 단상류역과 이상류역으로 구분되며, 이상류역은 현열교환의 분무 혼합역과 잠열교환의 환상분무류역, 분무류역 등으로 세분된다.
- (2) 벽면 부착율은 초기구간 즉, 1차 분무 충돌점 부근에서 최대점을 형성하며 급격히 감소하는 경향을 보인다.
- (3) 벽면 부착율은 급기 유속이 클수록 분사각도가 작을수록 그리고 액적경이 작을수록 감소한다.
- (4) 벽면 부착율에는 분사각도가 급기 유속 및 액적경보다 지배적으로 작용하며, 액적경이 일정 크기(약 70 μ m)이상에서는 벽면 부착율에 미치는 영향이 크게 감소한다.

후 기

본 연구는 산업기반기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Tatsuhiro Ueda, Takashi Enomoto and Makoto Kanetsuki, "Heat Transfer Characteristic and Dynamic Behavior of Saturated Droplets Impinging on a Heated Vertical Surface", Bulletin of the JSME, Vol.22, No. 167, 1979.
- [2] Tatsuhiro Ueda, "Two Phase Flow of Gas and Liquid", Taehwa Publishing, Pusan, 1986
- [3] Lee, K. and Ryley, D.J., "The Evaporation of Water droplets in Superheated Steam", Trans. ASME, pp. 445-451, 1968

[4] E.N.Ganic, W.M. Rohsenow "Dispersed Flow Heat Transfer" Int. J. Heat Mass Transfer., Vol.20. pp.855-866, 1977

[5] Aggarwal, S.K., "Further Results on Evaporating Bicomponent Fuel Sprays", Int. J. Heat Mass Trans., Vol 31, No. 12, pp. 2593-2597, 1988

[6] Lefebvre, A. H., "Atomization and Sprays", Hemisphere Pub. Co., 1989

[7] 이상용, "액체의 미립화", 민음사, 서울, 1996

[8] Marshall, W. R., "Atomization and Sprays Drying", Johansen Crosby and Assoc., 1986