
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*

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. 서 론

일반적으로 과열증기는 포화증기에 비하여 열전달효과가 극히 나쁘기 때문에 고온 고압의 과열증기를 열교환기 등에 사용하기 위해서는 일정한 온도로 감열시켜서 포화증기로

전환시킨 다음, 이 포화증기가 응축되면서 발생하는 상변화 에너지를 이용하여 열교환이 이루어진다. 이때 과열증기를 포화증기로 감열시키는 장치가 감열기(Desuperheater)이다.

감열기는 사용목적 및 용도에 따라 노즐타입, 벤츨리타입, 이중 벤츨리타입, 스팀 분사형,

* 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과

** 한국해양대학교 기관시스템공학부

가변 노즐형 등으로 나뉘어 진다. 이러한 감열기 중에서 노즐타입 및 벤츄리타입은 이미 국산화 개발을 완료하였으나, 사용운전 조건의 범위가 비교적 큰 고가의 이중 벤츄리형 및 가변 노즐형 등은 아직 국산화가 이루어지지 않았다.

한편, 최근 원유가의 급등 및 중국의 경제 성장에 힘입어 멕시코 등 산유국과 중국 등을 중심으로 한 정유 플랜트의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 특히, 중국에서는 급속한 산업활동의 증가로 인하여 석유화학 및 이에 따른 정유시설 등이 급격하게 증가하고 있으며, 지속적인 시설 투자계획을 가지고 있다.

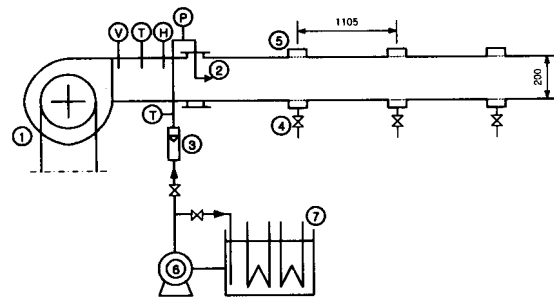
석유화학 시설은 다량의 증기를 필요로 하는 장치 산업으로 필수적으로 고압 대용량의 보일러를 필요로 하며, 여기서 발생된 증기는 필요에 따라 감압시켜 각종 사용처로 보내어 진다. 석유화학공정에 필요한 증기는 일반적으로 과열증기와 포화증기로 나뉘어지는데 과열증기가 사용되는 곳은 동력을 얻기 위한 터어빈 등에 공급되는 것이 대부분이고, 포화증기는 주로 히터 등의 열교환기에 공급되며 이는 석유화학공정에서 사용되는 증기의 약 80%정도이다. 일반적으로 보일러에서 생산되는 증기는 포화증기지만 석유화학공정에서는 전체 증기사용량의 20%정도가 동력발생용으로 사용되기 때문에 석유화학 공정용 보일러에서는 과열증기를 생산하고 있다. 따라서, 과열증기를 포화증기로 전환시키는 역할을 하는 감열기는 석유화학 공정에는 없어서는 안 될 필수적인 기기로서 통상적으로 한 공정에서 20~50여기가 필요로 한다.

이러한 감열기를 설계하고 제작하기 위해서는 감열기내의 유동특성과 열전달 메카니즘의 파악이 최우선적으로 필요로 한다. 그러나, 그 유동특성과 열전달 메카니즘이 매우 복잡하고 까다롭기 때문에 국내에서는 이에 관한 연구가

대단히 미진한 형편이다. 따라서, 본 연구는 감열기의 개발과 설계기술의 확립에 있어서 요구되는 감열기내의 액적 분사 메카니즘과 열계산을 위한 기초자료 확보를 위하여 각 인자들의 영향에 따른 관내의 분무 액적의 유동특성에 대하여 고찰하였다. 특히 관내 액적 유동에서 반드시 존재하여, 감열기의 열전달에 영향을 미치는 환상 분무류에서의 액막유량 비율에 대하여 중점적으로 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 2.1과 Fig. 2.2는 본 실험장치의 계통도와 전경이다. 실험장치는 크게 액적의 유동특성을 파악하기 위한 시험부, 일정 조건의 공기를 공급하기 위한 송풍부, 분무되는 작동수를 일정 조건으로 유지하기 위한 제반 장치들로 구성되어 있다. 시험부는 직경 200mm, 길이 4700mm의 아크릴 원관으로 약 1m 단위마다 액막 유량



- | | |
|------------------------|----------------|
| ① BLOWER | ② NOZZLE |
| ③ FLOWMETER | ④ DRAIN VALVE |
| ⑤ DRAIN HOLE | ⑥ WATER PUMP |
| ⑦ REF. BATH CIRCULATOR | Ⓣ THERMOCOUPLE |
| Ⓥ SPEEDOMETER | Ⓜ HYGROMETER |
| Ⓟ PRESSURE GAUGE | |

Fig. 2.1 Schematic of experimental apparatus

수집장치를 4개소 설치하여 액적의 벽면부착율을 측정하였다. 작동수 공급부는 항온조를 사용하여 일정 온도 조건을 유지하였으며 Float 타입 유량계를 사용하여 작동수의 유량을 조절하여 액적분무용 노즐을 통해 시험부에 분무액적을 공급하였다. 액적분무에 사용한 노즐은 감열기에서 주로 사용하는 와류 분무형 노즐 (Spraying Systems Co., Korea)을 선택하였고 압력별 분무량, 분사각도, 평균액적경 및 액적경 분포도 시험을 행하여 사용하였다.

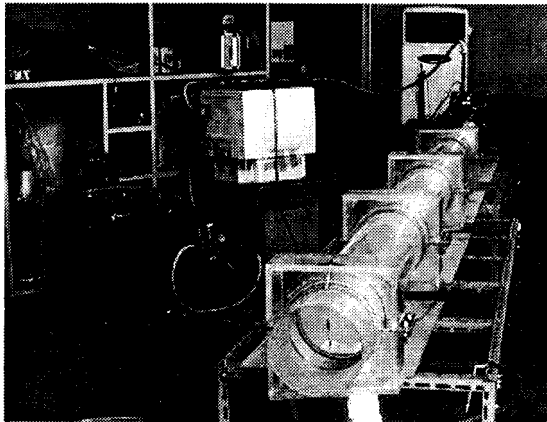


Fig. 2.2 Picture of experimental apparatus

Fig. 2.3과 Table 2.1은 실험에 사용된 증공원형 노즐(AB1/4TT-SS+D1-25HSS)에 대한 시험 전경과 결과를 나타낸 것이다.

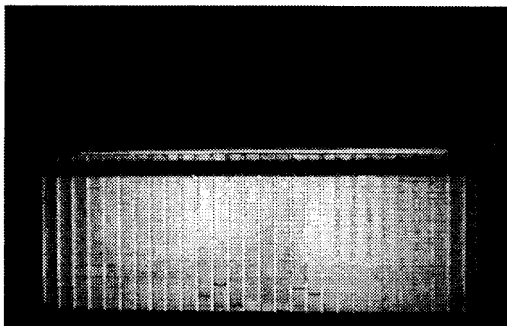


Fig. 2.3 Picture of nozzle spray test

Table 2.1 The data of nozzle spray test

NO	SPRAY NOZZLE SPEC NO	WATER PRESS.	WATER FLOWRATE	SPRAY ANGLE	DROP SIZE
1	AB1/4TT-SS +D1-25HSS	3kg/cm ²	0.35 l/min	35 °	131.5 μ m
2	AB1/4TT-SS +D1-25HSS	6kg/cm ²	0.49 l/min	47 °	108.45 μ m
3	AB1/4TT-SS +D1-25HSS	10kg/cm ²	0.66 l/min	60 °	92.86 μ m

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

실험은 일정조건인 공기를 시험부내로 송풍시킨 후, 일정조건인 작동수를 노즐을 통해 시험부에 분사시킨 시점을 실험의 시작으로 하였으며, 각 구간별 유동특성을 디지털 캠코더를 통해서 가시화하였다.

실험 종료후 수집장치에 모인 액적을 디지털 저울로 측정하여 백분율로 환산하여 각 부분별 액적의 벽면 부착율을 계산하고, 풍속, 분사각도 및 액적경서 과열증기로부터 다량의 열을 흡수하여 기화이 관내 액적 유동특성에 미치는 영향을 검토하였다. 실험조건은 Table. 2.2와 같다.

Table 2.2 Experimental conditions

Condition	Range		
	Angle of Spray(α , °)	40	61
Diameter of Water droplet (D_w , μ m)	67	71	124
Velocity of Feed Air (V , m/s)	15	25	35

3. 실험결과 및 고찰

3.1 감열기내의 열·물질전달 거동

Fig. 3.1은 본 실험을 통해 확인된 유동특성을

바탕으로 하여 감열기 내의 유동 및 열전달 현상을 예측하여 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 유동영역은 크게 이상류역(Tow phase flow) 및 단상류역(One phase flow)으로 구분된다. 세부적으로는 노즐전단에 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(50~200 μm)의 표면만을 포화온도로 가열하는데 작용하며, 대부분의 작동수는 노즐에서 분무되기 전에 포화온도까지 가열시키는 경우가 많으므로 현열교환영역은 노즐 후단의 매우 짧은 구역으로 한정된다. 노즐에서 분무된 직경이 작은 분무액적들은 과열증기와 혼합되어 흐르며, 과열증기는 포화증기로 감열된다.

이와 같은 유동 및 열전달 양식을 가지는 감열기에서는 액적의 증발현상 및 액적의 벽면 부착에 따른 제반 거동이 대단히 중요하게 평가된다.

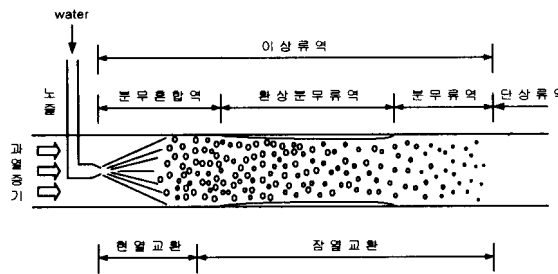


Fig. 3.1 Characteristic of flow and heat transfer in the desuperheater

3.2 감열기내의 액막류 거동특성

Fig. 3.2와 Fig. 3.3은 2종류 노즐(DI-13형, LNN-0.6형)에 대한 액적의 벽면 부착율을 나타내고 있다. 그림에서 X좌표는 노즐출구단에서부터의 거리를 나타내고, Y좌표는 각 구간에서의 분무액적의 벽면부착율을 백분율로 나타낸 것으로 X좌표의 1-4m 구간은 각각 액막유량 수집장치에서 수집한 액막유량을, 5m 지점은 시험부의 벽면에 부착되지 않고 시험부 밖으로 빠져나가는 액적량을 의미한다. 그림으로부터 DI-13형의 노즐은 노즐후단의 초기 1m 범위에서의 벽면부착율이 대단히 커서 분사 초기부터 다량의 액막류를 형성하여 관내를 흘려가는 반면, LNN-0.6형의 분무노즐의 경우는 시험부 전반에 걸쳐 낮은 벽면부착율을 나타내며 대부분의 분무액적들은 급기와 함께 외기로 빠져나가는 것을 알 수 있다. 두 결과의 비교로부터 액적의 벽면부착율은 조건에 따라 크게 달라짐을 알 수 있으며, 전열면적의 급격한 감소로 이어지는 액막류의 형성 관점에서 보면, 벽면부착율의 증가

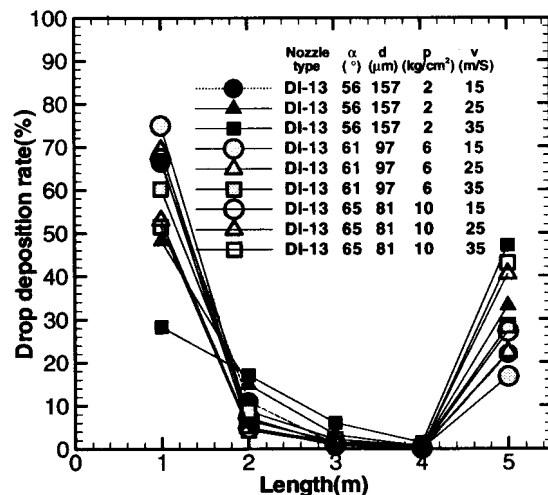


Fig. 3.2 The deposition rate of water droplets

는 감열기 성능에 지대한 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서, 액적의 벽면부착율에 관련하는 요소들을 파악하고 그 인자들이 미치는 영향 등에 대한 검토가 요구된다.

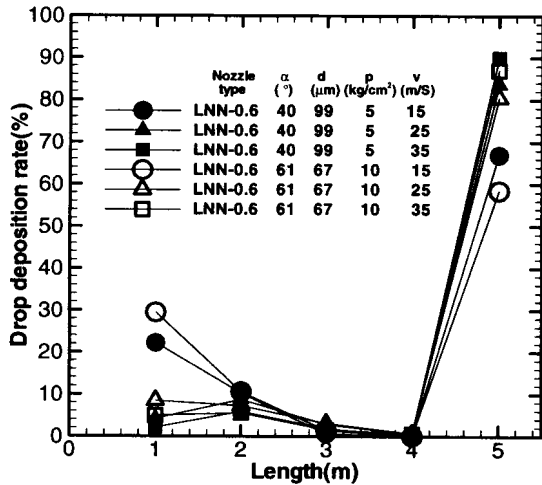


Fig. 3.3 The deposition rate of water droplets

3.2 급기속도의 영향

Fig. 3.4는 분사각과 액적경 일정 조건에서 급기속도의 변화에 따른 분무액적의 벽면부착율을 나타낸 그림이다. 그림으로부터 전반적인 경향은 앞의 그림들과 같이 분사에 따른 1차 벽면 충돌전에서 부착율이 크게 증가하다가 급격하게 줄어듦을 알 수 있다. 즉, 1차 충돌점 이후 와류에 의한 액적의 재부착율은 크게 나타나고 있지 않음을 알 수 있다.

그리고, 그림으로부터 급기속도가 증가할수록, 낮은 벽면부착율을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 급기속도가 클수록 급기가 분무액적에 작용하는 항력(drag)이 커서 분무액적이 비산하지 못하고 급기와 함께 휩쓸려 나가기 때문이라 생각된다.

그러나, 1차 충돌점 이후에서는 반대로 급기

속도가 큰 쪽이 낮은 쪽보다 높은 벽면부착율을 나타내는 경향을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 급기속도가 증가할수록 난류강도(turbulent intensity)가 커지기 때문에 이에 따른 교란작용(disturbances)에 의해 액적이 관 벽면에 부딪혀 많은 액막류를 형성하기 때문이라 생각된다. 이러한 교란작용에 의한 벽면부착율의 증가에도 불구하고, 시험부 전 구간에 걸친 액적의 벽면부착율은 공기속도가 큰 쪽이 공기속도가 낮은 쪽에 비해 비교적 낮게 나타남을 알 수 있었다.

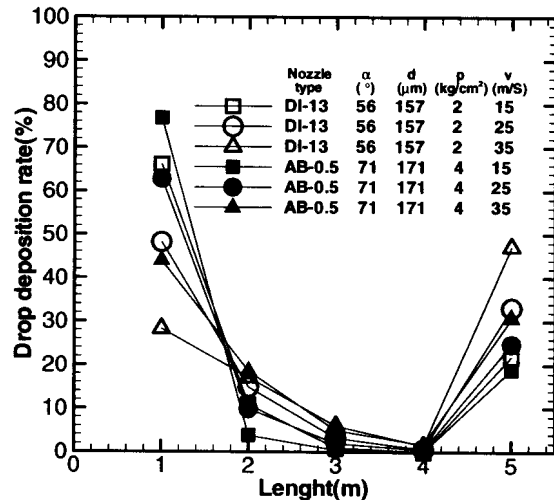


Fig. 3.4 The deposition rate of water droplets

3.4 노즐 분사각의 영향

Fig 3.5는 노즐 분사각에 따른 분무액적의 벽면부착율을 나타낸 그림이다. 그림에서 일정조건에 대하여 분사각이 큰 쪽이 작은 쪽에 비하여 분사점으로부터 초기구간에서 벽면부착율이 대단히 높아지고 시험부 전 구간에 걸친 벽면부착율이 급격히 상승함을 알 수 있다. 특히, 분사각이 40° , 급기속도가 35m/s인 경우, 벽면에 부착하지 않고 분무액적상태로 외기로 빠져 나가는 액적의 비율이 약 90%에 달하는 것을 확인할

수 있다. 이는 분사각이 커질수록 분무액적이 넓은 각도로 균일하게 비산하기 때문에 분사 초기구간의 액적의 벽면부착율이 급격히 증가하기 때문이라 생각된다.

이것은 노즐에서 관측에 대하여 일정한 각도를 가지고 분사되는 액적의 운동에너지가 관측 방향으로 작용하는 급기공기의 항력보다 크게 작용하기 때문이며, 분사압력과 액적경이 클수록 이러한 경향은 크게 나타난다. 한편, 전술한 급기속도의 영향과 후술하게 될 액적경의 영향보다도 분사각의 영향이 액적의 벽면부착율에 지배적으로 작용하게 됨을 본 실험범위 내에서 확인할 수 있었다.

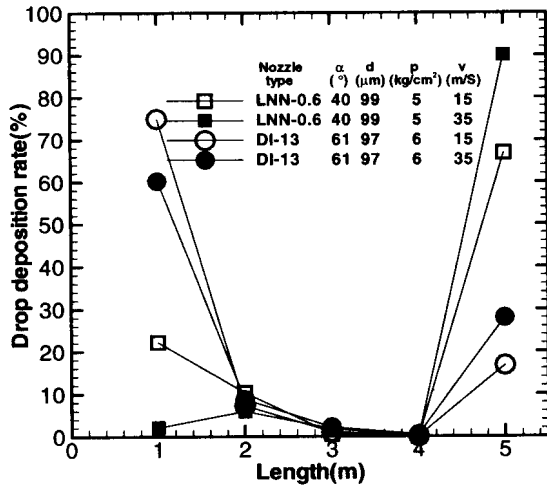


Fig. 3.5 The deposition rate of water droplets

3.5 분무 액적경의 영향

Fig. 3.6은 분무 액적경의 변화에 따른 액적의 벽면부착율을 나타낸 것이다. 그림에서 분무액적경의 크기가 감소할수록 액적의 벽면부착율이 감소함을 알 수 있다.

이것은 액적경이 작을수록 분사운동에너지가 감소하는 영향이 급기공기의 항력의 영향보다

크게 작용하기 때문이다. 또한, 그림과 다른 실험 결과들로부터 액적경이 일정 크기(약 $70\mu\text{m}$) 이상에서는 액적경에 따른 벽면부착율의 변화가 크게 나타나고 있지 않음을 확인할 수 있었다.

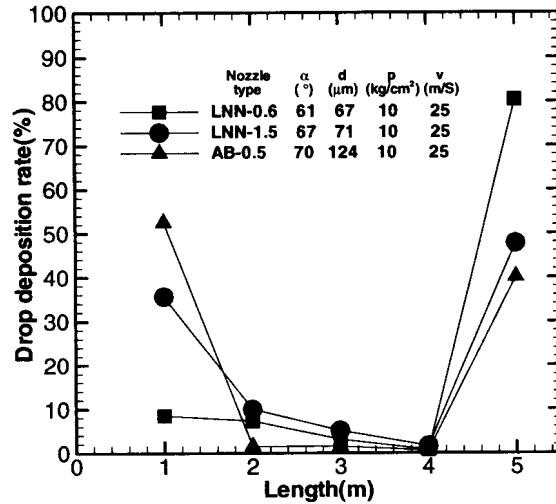


Fig. 3.6 The deposition rate of water droplets

4. 결론

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

- (1) 감열기내의 유동은 크게 단상류역과 이상류역으로 구분되며, 이상류역은 현열교환의 분무혼합역과 잠열교환의 환상분무류역, 분무류역 등으로 세분된다.
- (2) 벽면부착율은 초기구간 즉, 1차 분사총출점 부근에서 최대점을 형성하며 급격히 감소하는 경향을 주로 보인다.
- (3) 벽면부착율은 급기속도가 클수록, 분사각도가 작을수록 액적경이 작을수록 감소한다.

- (4) 벽면부착율은 분사각도가 다른 요소들보다 지배적으로 작용하며, 액적경의 경우 일정 크기(약 $70\mu\text{m}$)이상에서는 그 영향이 크게 감소한다.

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

