

# 선형분무노즐로부터 분무되는 에폭시계 도료의 분열기구에 대한 실험적 연구

강승익\* · 이상용† · 안상모\*\* · 류성욱\*\*

## An Experimental Study on Breakup Mode of Epoxy Paint Discharging from a Fan Spray Nozzle

S. I. Kang, S. Y. Lee, S. M. An, S. U. Ryu

**Key Words:** Epoxy Paint (에폭시계 도료), Breakup Mechanism(분열기구), Solid Particles(고형성분), Fan Spray Nozzle(선형분무노즐), Breakup Length(분열길이)

### Abstract

In the present work, the breakup mechanism of highly viscous epoxy paints discharged from a fan spray nozzle was examined experimentally. The paints tested were non-Newtonian fluids, composed of epoxy resin, solid particles and other additives. The paint spray discharged from the nozzle was visualized and recorded using a digital camera with back illumination. Due to presence of the solid particles, perforation of liquid sheet was observed in most cases, even at low-Reynolds number conditions ( $Re < 15,000$ ) where the aerodynamic-wave breakup mode is used to be dominant for pure liquids. However, with the increase of the particle concentration, the sheet became longer and the thickness at breakup became thinner to some extent. This is because, with higher concentration of solid particles, the stabilizing effect by the viscosity increase predominates over the destabilizing effect by perforation.

기호설명		$\rho$	밀도	$[\text{kg/m}^3]$
$C_p$	고형성분비율			
$t$	분열지점에서의 액막 두께			
$W$	질량유속	$p$	고형성분	
$V$	속도	$l$	액체	
$\theta$	분무각			
$B$	분무폭			
$r$	액막 분열길이			

### 이래첨자

### 1. 서 론

에폭시계 도료는 높은 내마모성과 내부식성으로 인하여 철 구조물, 특히 선박의 도장공정에 널리 사용되고 있다. 일반적으로, 에폭시계 도료는 안료 등의 고형성분을 포함하는 고점도의 비뉴턴 유체의 거동을 보인다. 한편, 고점도의 에폭시계 도료를 미립화하기 위해서는

(2007년 7월 19일 접수 ~ 2007년 9월 8일 심사완료)

\*책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : sangyonglee@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3026 FAX : (042)869-8207

\*르노삼성자동차

\*\*한국과학기술원

높은 분사압력이 요구된다. 이러한 높은 분사압력으로 인하여 발생하는 과잉분사는 공기오염을 유발시키며, 도착 효율을 감소시켜 추가적인 생산비용을 초래할 뿐 아니라 도막품질관리를 어렵게 하는 등의 심각한 문제들을 야기시킨다. 이러한 과잉분사로 인한 문제점들을 해결하기 위해서는 과잉분사로 인한 손실량을 최소화함으로써 도착효율을 향상시켜야 하며, 이를 위해서는 도료 액적들의 운동량(입경 및 속도)에 대한 정보가 요구된다. 부착 대상물에 충돌하는 액적들의 부착 여부 및 부착되는 양은 충돌 전의 액적들의 운동량에 의해 지배적인 영향을 받기 때문이다.<sup>(1)</sup> 이와 더불어 이러한 액적들의 운동량에 대한 정보를 얻기 위한 사전연구로서, 액막의 분열기구와 입경분포의 상관성에 대한 이해가 선행되어야 하는데, 이는 일반적으로 입경분포와 같은 분무특성이 액막의 분열기구에 지배적인 영향을 받기 때문이다.

미립화된 액적들의 정보에 관련된 기존연구는 대부분 비교적 해석이 용이한 뉴턴 유체의 입경예측 및 분열현상을 중심으로 진행되어왔다. Snyder 등<sup>(2)</sup>은 Wang과 Lefebvre<sup>(3)</sup>가 사용하였던 실험유체의 물성범위 보다 넓은 범위에서의 실험을 수행하여 그들이 제시한 상관식의 계수를 수정함으로써, 선형분무노즐로부터 분사되는 뉴턴 유체에 관한 입경예측식을 제안하였다. 그밖에 선형분무노즐로부터 분사되는 비뉴턴 유체의 분열에 관한 연구는 Janna와 John<sup>(4)</sup>과 Xing 등<sup>(5)</sup>의 연구자들에 의해 수행되었다. Janna와 John<sup>(4)</sup>은 빙햄(Bingham)유체인 도료를 선형분무노즐로 분사시켰을 때 노즐벽면에서의 전단응력을 고려하여 입경 예측식을 제안하였다. 한편, Xing 등<sup>(5)</sup>은 선형분무노즐에서의 라텍스 도료와 혼합하는 라텍스 입자의 크기와 경화제 종류 및 혼합 비율의 영향을 고려하여 입경 예측식을 제안하였다. 이러한 기존연구들은 미립화된 액적들의 입경의 예측에 관한 정보를 제공하고는 있지만, 이들로부터 액막의 분열현상과 입경분포의 상관성에 대한 정보를 얻는 데에는 한계가 있다.

Mulhem 등<sup>(6)</sup>은 고형성분의 크기 및 혼합비율이 액막 분열에 미치는 영향을 정성적으로 연구하였으나, 그들의 연구에서 고형성분과 액막 분열기구간의 상관성에 대해서는 논의되지 않았다. 이러한 기존 연구현황을 고려할 때, 에폭시계 도료와 같이 고형성분을 포함하고 비뉴턴 유체의 복잡한 물성을 갖는 유체의 분무특성에 관한 연구는 미미한 실정이며, 따라서 이러한 유체의 분열기구를 규명하기 위한 기초연구가 필요하다.

선형분무노즐에서 분사되는 액막의 분열기구는 공기역학적 파의 성장에 의한 분열과 천공에 의한 분열로 구분된다.<sup>(7)</sup> 공기역학적 파의 성장에 의한 분열의 경우, 액막은 주변공기와 분사되는 액막간의 속도차에 의해 형성된 공기역학적 파의 성장에 의해 작은 액적들로 분열되는 반면, 천공에 의한 분열의 경우, 액막 내부의 국부적인 점교란과 잔물결 등으로부터 형성된 작은 구멍들이 표면장력에 의해 성장하면서 최종적으로 작은 액적들로 분열된다. Dombroski와 Fraser<sup>(8)</sup>는 물, 물과 글리세린 혼합물, 알코올, 수은 등의 유체를 이용하여 액막의 분열현상을 관찰하고, 레이놀즈 수(노즐 오리피스의 수력 직경과 액막의 속도를 기준으로 정의)와 액체의 속도를 기준으로 공기역학적 파의 성장에 의한 분열과 천공에 의한 분열을 구분하는 선도를 제시하였다. 그러나, Dombroski와 Fraser<sup>(8)</sup>가 제시한 분열영역에 대한 선도가 고형 성분이 포함된 비뉴턴 유체의 경우에도 적용가능한지의 여부에 대해서는 아직 확인된 바가 없다. 따라서, 현재까지 진행되어 온 액막의 분열기구에 대한 결과들은 유체의 특성이나 실험내용의 차이로 인하여 고형 성분을 포함한 비뉴턴 유체의 분열기구를 예측하는 자료로서 활용되기는 어렵다.

본 연구에서는 고형성분을 포함하며 비뉴턴유체의 복잡한 거동을 보이는 에폭시계 도료가 선형분무노즐로부터 분사되었을 때의 분열기구 및 분무특성을 가시화 기법을 이용하여 관찰하였다. 특히, 고형성분이 분열길이와 분열지점에서의 액막 두께와 같은 분무특성에 미치는 영향에 자세히 알아보았다.

## 2. 실험 장치

Figure 1은 실험 장치의 개략도로서 크게 도료 공급부, 가시화 장치, 그리고 환기부로 이루어져 있다. 도료 공급부는 도료에 높은 압력을 가해주는 펌프(air-operated pump, Asahi-Sunac Co., Model: Super bear 45), 펌프에서 나오는 도료의 압력을 원하는 압력으로(분사 압력범위: 1.7~31 MPa) 조절하여주는 고압 레귤레이터(air-operated high-pressure regulator, Graco Inc., Model: C56156), 도료를 분사시켜주는 스프레이건(spray-gun)으로 구성된다. 펌프는 공기 모터 구동방식으로, 최대 31.5 MPa까지 유체의 가압이 가능하며, 가압된 도료는 호스를 통하여 스프레이건에 공급된다. 한편, 고점도의 페인트가 긴 호스를 지나면서 발생하는 레귤레이터와

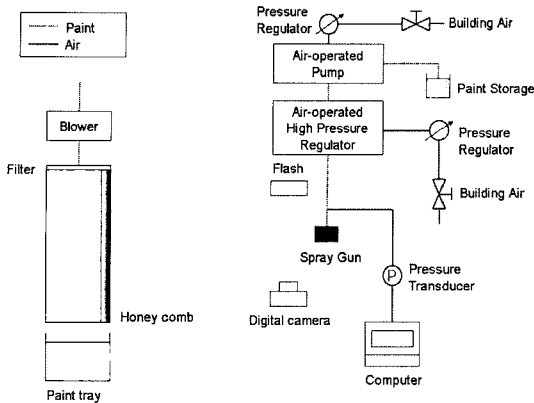


Fig. 1 Experimental setup

스프레이건 사이의 큰 압력강화로 인하여 실제 스프레이건에 부과되는 압력은 훨씬 작다(2 MPa~12 Mpa). 스프레이건에 공급된 가압된 도료를 미립화하기 위해 수력직경이 0.38 mm이고, 단면적이  $1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$  인 선형 분무노즐이 사용되었다. 또한, 디지털 카메라와 발광시간이 0.8  $\mu\text{s}$ 인 순간광을 이용한 배후 조명법으로 가시화창을 통하여 스프레이의 순간상의 가시화가 가능하도록 하였다.

실험유체는 에폭시계 도료(epoxy paint, 고형성분과 액체의 혼합물인 주재(main fluid)와 경화제(hardener)가 5.18:1의 무게비로 혼합된 혼합물), 희석제 (thinner) 및 에폭시 수지(epoxy resin)와의 다양한 혼합비로 구성된다(실제 도장공정에서는 에폭시계 도료와 희석제만이 혼합되나, 본 연구에서는 유체의 물성을 조절하기 위한 목적으로 특별히 에폭시 수지가 추가되었다). 한편, 에폭시계 도료의 구성성분은 실제로 거의 변화가 없기 때문에 희석제와 에폭시 수지의 혼합비율을 조절하여 고형성분비율( $C_p$ )과 점도의 변화가 가능하도록 하였다.

Table 1. Components ratio of the test fluids (wt%)

Test Fluid	Epoxy Paint			Epoxy Resin	Thinner
	Main Fluid		Hardener		
	Solid Particles	Liquid			
A	0	0	0	0	100
B	8.7	8.7	3.4	0	79.2
C	23.1	23.0	8.9	0	45.0
D	39.4	39.2	15.2	0	6.2
E	0	0	0	10	90
F	19.6	19.5	7.5	48.6	4.8

Table 2. Properties of the test fluids

Test Fluid	$C_p$ [wt%]	Density [ $\text{kg/m}^3$ ]	Surface Tension [mN/m]	Viscosity at 1000/s $\times 10^3$ [Ns/m <sup>2</sup> ]
A	0	820.5	25.6	1
B	8.7	881.1	28.2	3
C	23.1	1008.5	29.9	18
D	39.4	1207.5	30.0	660
E	0	1107.8	41.6	760
F	19.6	1189.9	36.8	454

Table 1은 고형성분과 점도가 액막의 분열기구에 미치는 영향을 파악하기 위해 조제된 6종류의 실험유체에 대한 성분비를 정리한 것이며, Table 2는 각 실험유체의 물성치를 측정하여 나타낸 것이다. Table 2에서 알 수 있듯이 고형성분비율이 0에서 39.4%로 증가하면서 동시에 유체의 점도도 급격히 증가하는 반면, 밀도와 표면장력은 평균값(밀도평균: 32.0  $\text{kg/m}^3$ , 표면장력평균: 1035.9 mN/m)을 중심으로 약  $\pm 20\%$  이내에 분포함으로써 상대적으로 일정한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. Fluid A는 순수한 희석제로서 표준시료로 사용되었다. 반면, fluid B, C, D는 모두 에폭시계 도료와 희석제와의 혼합물로서 순서대로 작은 희석비율을 갖는다. 따라서, fluid D는 가장 큰 고형성분비율을 갖는다. 한편, 앞서 언급한 바와 같이 고형성분비율이 증가 할수록 점도가 동시에 증가하므로 fluid A, B, C, D만으로는 고형성분비율과 점도가 액막의 분열기구에 미치는 독립적인 영향을 파악하기 어렵다. 따라서, 우선 고형성분비율만의 독립적인 영향을 파악하기 위하여 fluid D와 유사한 점도를 갖지만, 고형성분비율이 각각 다른 fluid E와 F를 조제하였다. Table 2에서 보듯이 fluid E는 단순히 에폭시 수지와 희석제만의 혼합으로 구성되어 고형성분을 포함하지 않는 반면, fluid F는 에폭시 수지와 희석제뿐만 아니라 기본적으로 고형성분이 포함되어 있는 에폭시계 도료가 함께 혼합되어, fluid D에 비하여 상대적으로 작은 고형성분비율을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, 고형성분을 포함하고 있지 않지만 점도가 서로 다른 fluid A와 E, 그리고 약 20%의 고형성분비율을 갖고 점도가 서로 다른 fluid C와 F를 비교함으로써 점도만의 독립적인 영향에 대한 분석이 가능하다.

실험유체의 겉보기점도(apparent viscosity)는 회전식 레오미터(rotational rheometer, HAAKE, Model: RS600)

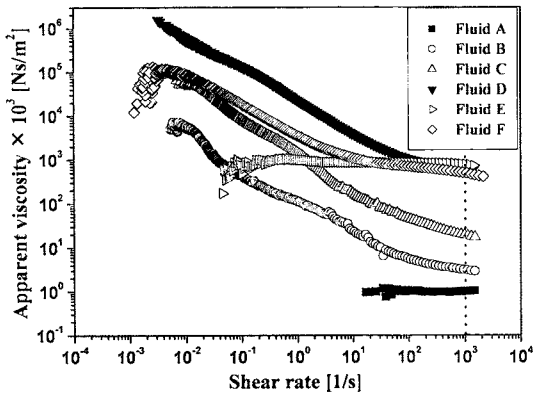


Fig. 2 Variation of apparent viscosity with shear rate

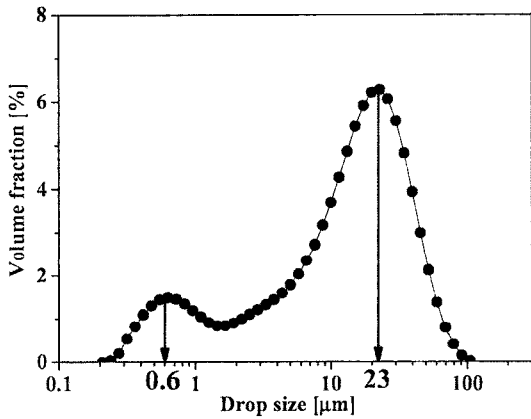


Fig. 3 Drop size distribution of solid particles in main fluid of epoxy paint

로 전단속도에 따라 측정하였다(Fig. 2). 점도측정결과, 순수 희석제인 fluid A와 에폭시 수지와 희석제만의 혼합물인 fluid E는 뉴턴 유체의 거동을 보이는 반면, 에폭시계 도료와의 혼합물인 fluid B, C, D, F는 모두 전단 희석(shear thinning)유체임이 확인되었으며, 본 연구에서는 측정된 전체 전단속도 범위에서 점도의 변화를 무시할 수 있는 전단변형률 범위인 1000/s 부근에서의 점도를 실험유체의 점도로 사용하였다(실제 본 연구에서 분무되는 실험유체의 유속도 1000/s 이상의 전단변형률 범위에 해당된다).

에폭시계 도료의 주재에 포함되어 있는 고형성분의 입경분포는 0.02 μm에서 2000 μm 범위내의 입자크기의 측정이 가능한 입도 분석기(particle size analyzer, Malvern Instruments Ltd., Model: Mastersizer 2000)를 이용하여 측정하였다. Figure 3은 측정된 고형성분의 크기에 따른 체적분율을 나타내는 것으로써, 약 0.6과 23

μm에서 높은 체적분율을 나타내어, 이 두 입경이 고형성분의 주요성분임을 알 수 있다. 한편, 23 μm의 체적분율은 0.6 μm의 체적분율에 비하여 매우 크므로 23 μm를 고형성분의 대표입경이라고 보는 것은 타당하다고 할 수 있다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 액막의 분열과정

에폭시계 도료에 포함되어 있는 고형성분이 액막의 분열에 미치는 영향을 알아보기 위하여 분열하는 액막의 순간상을 가시화하였다. Figure 4와 5는 fluid A, B, C, D를 각각 2, 12 MPa로 분사시킨 경우의 가시화 결과들이다. 가시화 결과, 분사압력이 2 MPa인 경우 순수한 희석제(fluid A)는 공기역학적 파의 성장에 의해 액막이 분열되었지만(Fig. 4(a)), 고형성분을 포함하는 희석제와 에폭시계 도료의 혼합물의 경우에는(fluid B, C, D) 천공에 의해 액막이 분열되었다(Fig. 4(b)~(d)). 분사압력이 12 MPa인 경우에도(Fig. 5) 이와 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 분사압력이 낮은 경우에는 작은 액막에 존재하는 천공의 수가 적지만(Fig. 4(d)), 분사압력이 증가하면서 천공의 수도 증가하였으며 액막 전체에 고르게 분포하는 경향을 보였다(Fig. 5(d)). 이는 분사압력이 증가할수록 국부적인 교란이 커져 액막에 고르게 분포하는 고형 성분들이 천공현상을 촉진시키기 때문인 것으로 해석된다. 천공에 의한 분열

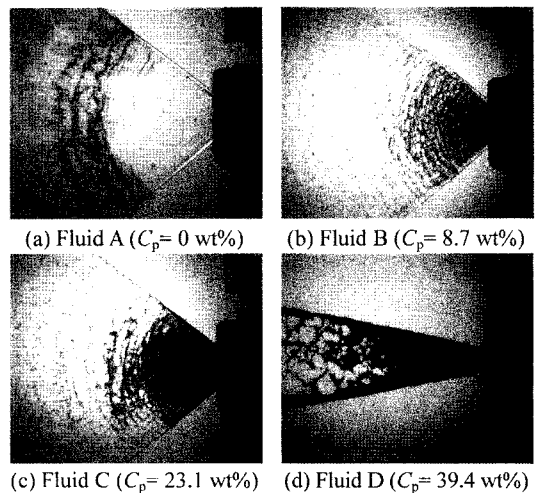


Fig. 4 Liquid sheet breakup (P=2 MPa)

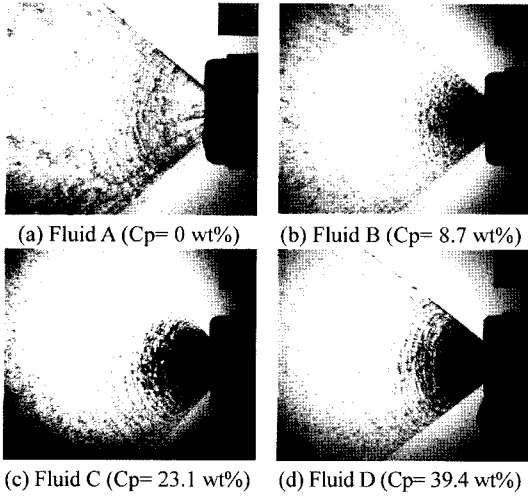
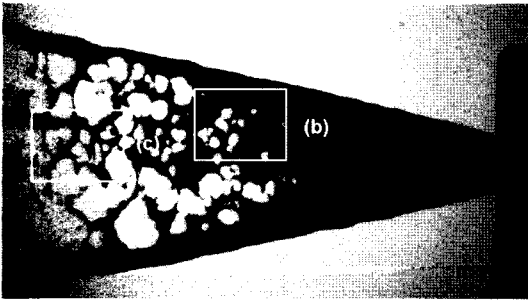


Fig. 5 Liquid sheet breakup ( $P=12$  MPa)



(a) Overview of sheet breakup by perforation



(b) Formation and growth of perforation



(c) Ligaments and droplets

Fig. 6 Perforation of liquid sheet ( $P=2$  MPa, Fluid D ( $C_p=39.4$  wt%))

을 세부적으로 관찰하기 위하여 fluid D를 2 MPa에서 분사시킨 액막의 분열 가시화 사진(Fig. 4(d))을 Fig. 6에 확대하여 나타내었다. 액막에서 발생한 작은 천공들은 표면 장력에 의해 성장하고(Fig. 6(b)), 다른 천공들과 만나 액줄을 생성시킨 후 액적으로 분열되었다(Fig. 6 (c)).

고형성분이 액막의 분열에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 유사한 점도를 갖지만 고형성분 비율이 다른 fluid E와 F가 각각 6 MPa(Fig. 7(a), (b))과 10 MPa(Fig. 7(c), (d))의 분사압력으로 분사되었을 때의 액막의

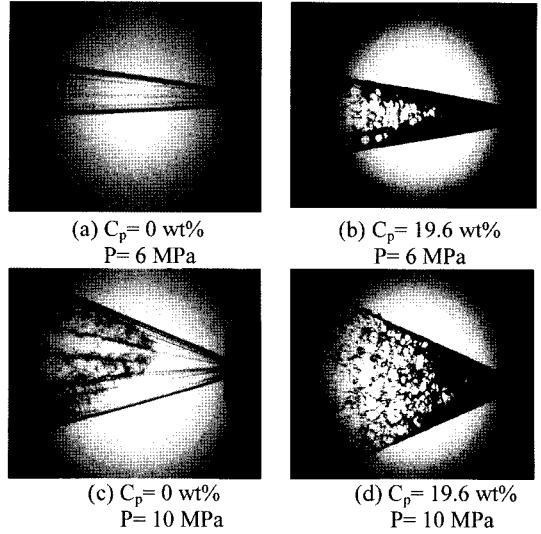


Fig. 7 Effect of solid particles on liquid sheet breakup (Fluids E and F)

모습을 비교하여 보았다. 위의 비교로부터 고형성분을 포함하고 있는 유체의 경우, 분사압력에 관계없이 공기역학적 파의 성장에 의한 액막의 분열기구보다 천공에 의한 액막의 분열기구가 지배적으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

### 3.2 액막의 분열기구

Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>는 상대적으로 낮은 점도를 갖는 뉴턴 유체를 이용하여 선형분무노즐에서 분사되는 액막의 분열기구를 관찰하고, 액막 속도와 레이놀즈 수를 이용하여 공기역학적인 파에 의한 분열 영역과 천공에 의한 분열영역을 구분하는 선도를 제시하였다. 본 절에서는 고형성분을 포함하는 고점도의 비뉴턴 유체에 대한 액막 분열기구가 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>의 선도에 의해 예측가능함을 판단하고, 천공의 생성 원인에 대해서도 함께 알아보았다.

Figure 8은 액막 속도와 레이놀즈 수를 양 축으로 하는 선도에 현재의 실험 결과와 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>의 실험결과를 함께 표현한 것이다. 액막 속도는 실험에서 측정된 체적유량을 노즐 오리피스의 단면적으로 나눈 값을 사용하였다. 그림의 실선은 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>가 제시한 분열영역을 구분하는 경계선이며, 점선은 경계선을 본 연구의 실험조건까지 확장한 것이다. 선도상에서 볼 때, 본 실험의 경우(fluid A, B, C, D) 모두 공기역학적 파의 성장에 의해 액막이 분열되는 영역

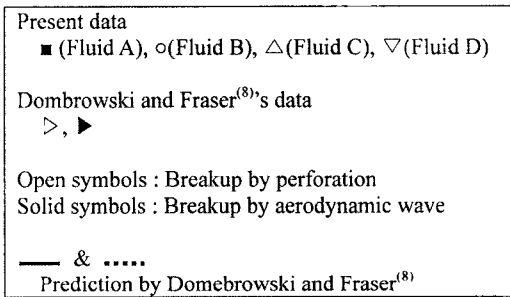
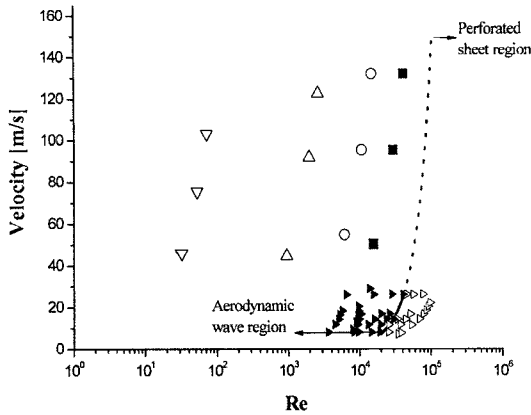


Fig. 8 Disintegration of liquid sheet by aerodynamic wave and perforation modes

에 포함되었다. 그러나, 가시화 결과는 다른 경향을 보여주고 있다. 다시 말하여, 고형 성분을 포함하지 않는 fluid A는 모든 압력 범위(2, 7, 12 MPa)에서 공기역학적 파에 의해 액막이 분열되어 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>가 제시한 기준에 의해 예측되는 결과와 일치하였으나, 고형성분을 포함한 fluid B, C, D는 모든 분사압력 조건에서 천공에 의해 액막이 분열됨으로써 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>의 예측과는 다른 결과를 나타냈다.

Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>는 오리피스 내의 난류효과에 의한 국부적인 점교란이 천공 현상의 원인으로 작용한다고 하였으나, 위의 관찰결과로부터 확인할 수 있듯이, 고형성분을 포함하는 액막(fluid B, C, D)의 경우 난류에 의한 점교란이 발생하지 않더라도(fluid A, B, C, D의 레이놀즈 수는 15,000이하로서 상대적으로 작으므로 난류에 의한 점교란의 영향은 무시할 수 있다). 액막 내의 고형성분이 점교란의 근원으로 작용하여 천공 현상이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이는 고형성분이 포함된 예측시계 도료의 경우 고형 성분에 의한 점교란이 천공 현상의 주된 원인임을 나타내는 것이며, Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>의 분열 기구 예측 선도는 고형성분이

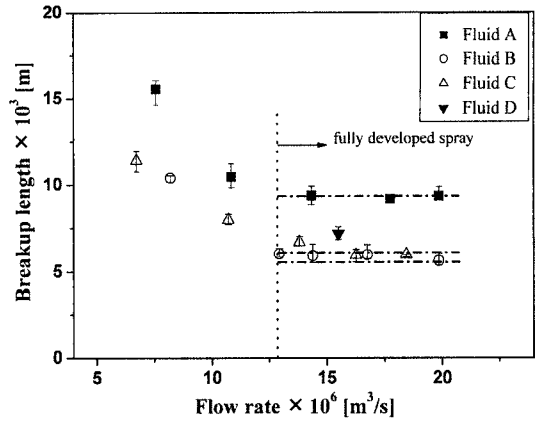


Fig. 9 Variation of breakup length with liquid flow rate

포함되지 않은 유체의 경우에만 국한해야 함을 의미하는 것이다.

### 3.3 액막의 분열길이

앞선 논의들로부터 고형성분이 천공에 의한 분열의 주 원인임을 알았다. 한편, 이처럼 고형성분에 의한 천공의 분열이 발생하였다면, 고형성분비율이 높아질수록 분열길이는 짧아질 것이라고 예상해 볼 수 있다. 이러한 예상이 옳은지 확인하기 위하여 fluid A, B, C, D의 분열길이를 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림으로부터 알 수 있듯이 분열길이는 체적유량이 증가할수록 감소하며 완전히 발달된 부분이 나타나는 높은 유량조건(대략  $13 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  이상)에서는 순수 회석제(fluid A)의 경우 9 mm이고, 예측시계 도료를 포함하는 혼합유체(fluid B, C, D)의 경우 약 6~7 mm로 나타났다. 위의 결과로부터 고형성분을 포함하는 유체의 경우에는(fluid B, C, D) 천공에 의해서 분열이 발생하여, 공기역학적 파의 성장에 의해서 분열되는 순수한 유체(fluid A)보다 짧은 거리에서 분열된다는 것을 알 수 있다. 한편, 고형성분을 포함하는 경우를 좀더 자세히 살펴보면 fluid B에 비하여 fluid C와 D는 많게는 4배 이상의 고형성분을 포함하고 있지만 분열길이는 거의 유사하거나 오히려 약간 큰 값을 보임으로써, 고형성분비율의 추가적인 증가가 분열길이에 미치는 영향은 애초의 예상과는 달리 미미하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 다음과 같은 해석이 가능하다. 즉, 고형 성분비율이 증가함으로써 액막은 불안정해지고 따라서 분열길이가 짧아질 수 있지만, 동시에 걸보기점도가 급격히 상승하여(약 200배까지) 액막이 안정화되면서 고형성분비율이 분

열길이에 미치는 영향이 상대적으로 미미해 진 것이다. 이와 같은 해석은 고형성분 비율이 증가하면서 유체의 점도도 함께 증가하여 액막이 안정화된다고 주장하였던 Mulhem등<sup>(6)</sup>의 기존 연구와도 일맥상통한다. 한편, 유사한 점도 범위를 갖는 fluid A와 B에 대하여, fluid A의 분열길이는 B에 비하여 상대적으로 크게 나타남으로써, 이 경우 고형성분의 존재가 점도증가보다 분열길이에 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 위의 논의를 정리하면, 적은양의 고형성분에 의해서 분열길이는 짧아 질 수 있으나, 고형성분비율이 증가할수록 점도도 동시에 상승하여 결과적으로 고형성분비율은 분열길이에 거의 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다. (고형성분만이 분열길이에 미치는 독립적인 영향을 파악하기 위하여 fluid E와 F의 분열길이를 비교하고자 하였으나, 이들의 높은 점도로 인하여 현 실험장치로는 선형의 액막을 얻을 만큼의 높은 분사압력을 가할 수 없었다. 따라서, fluid E, F의 경우, 분열길이의 신뢰성 있는 결과를 충분히 얻기 어려웠다. 이와 같은 이유로, fluid E, F와 거의 유사한 점도를 갖는 fluid D의 경우에도 신뢰할만한 측정결과를 오직 하나뿐이었다.)

선형분무의 경우, 액막이 분열되는 지점에서 액막의 두께는 일반적으로 분열길이가 길어질수록 얇아지며, 노즐에서 분사되는 액체의 질량유량과 하류위치에서 액막단면을 통과하는 액체의 질량유량이 같다는 질량 보존식(식 (1))으로부터 구해진다. 단순화를 위해 노즐로부터 같은 거리만큼 떨어진 선형 액막단면상에서는 액막의 두께가 동일하다는 가정을 하였다(식 (2)).

$$t = \frac{W}{\rho_1 V_1 B} \quad (1)$$

$$B = r\theta \quad (2)$$

위 식에서  $W$ 는 분사되는 액체의 질량유량,  $\rho_1$ 은 액체의 밀도,  $V_1$ 은 액막 유속,  $B$ 는 분무폭,  $r$ 은 액막의 분열길이,  $\theta$ 는 분무각을 의미한다. 액막의 두께를 구하는데 필요한 분무각과 분열길이는 가시화 사진에서 측정하였다. 분무각은 액막의 가장자리가 이루는 각도를 측정하였고, 액막의 분열길이는 액막에 구멍이 발생하기 시작하는 위치까지의 거리로 정의하고 이를 측정하였다.

Figure 10은 fluid A, B, C, D의 체적유량에 따른 분열지점에서 액막 두께의 변화를 나타낸다. 체적유량이 증가하면서 액막의 분열지점에서 액막의 두께는 전체적으로 증가하다가, 고형성분을 포함하지 않는 fluid A는 약 11  $\mu\text{m}$ , 고형성분을 포함하는 fluid B, C, D

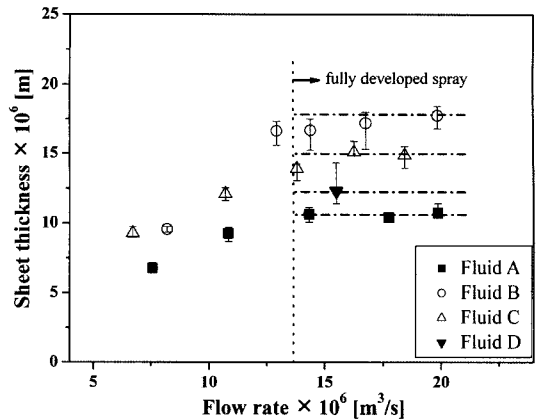


Fig. 10 Sheet thickness at breakup

는 각각 약 18, 15, 13  $\mu\text{m}$  정도로 접근하였다. 결과적으로, 고형성분을 포함하는 경우에는 천공에 의해서 액막이 분열되기 때문에 고형성분을 포함하지 않는 경우보다 두꺼운 액막에서 분열이 시작되었다. 그러나, 고형성분 비율이 높아질수록 분열되는 지점에서의 액막의 두께는 오히려 얇아진다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 고형성분비율이 증가하면서 동시에 점도가 증가하여, 노즐 입구에서 생성된 점교란들의 성장속도가 지연되고 액막이 안정화 되어 나타나는 현상으로, 점도의 증가효과가 고형성분비율의 증가에 의한 점교란의 증가효과보다 액막 두께에 지배적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

마지막으로, 천공에 의해 액막이 분열될 경우, 측정된 분열지점에서의 액막 두께와 고형성분의 대표입경을 비교해 본 결과, 액막 두께는 약 13~18  $\mu\text{m}$  정도로 고형성분의 대표 입경인 23  $\mu\text{m}$ 보다 모두 작은 값을 보였다. 이로써 천공현상은 액막두께가 고형 성분의 크기보다 얇은 조건에서 발생한다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고형성분비율과 점도 및 분사압력이 액막 분열에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 알아보았으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 고형 성분을 포함하지 않는 유체의 경우에는(순수한 희석제) 모든 압력조건에서 공기역학적 파의 성장에 의해서 액막이 분열되었으며, 이는 Dombrowski와 Fraser<sup>(8)</sup>의 선도에 의해 예측되는 결과와 일치한다.

2. 고형성분을 포함하는 유체의 경우에는(에폭시계 도료 및 희석제와의 혼합물) 고형성분에 의한 점교란이 천공 현상의 원인이 되는 것으로 파악되었다.

3. 고형성분을 포함하는 경우, 고형성분에 의한 액막의 불안정현상과 점도증가로 인한 안정화 현상이 결과적으로 상쇄되어 고형성분비율의 증가는 분열길이에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

향후 연구과제로서 본 연구를 기반으로 고형성분을 포함하고 고점도의 비뉴턴 유체 거동을 보이는 에폭시계 도료의 입경 예측에 관련된 연구가 진행될 계획이다.

## 후 기

본 연구는 선체블럭 내부도장 및 전처리 자동화시스템 기술개발사업의 연구비지원과 교육인적자원부의 BK-21 사업 출연금 일부에 의하여 수행되었다. 또한, 본 논문은 ISTP-18 국제학술대회(18<sup>th</sup> International Symposium on Transport Phenomena)에서 발표된 내용을 기준으로 작성되었다.

## 참고문헌

- (1) S. Y. Lee and S. U. Ryu, "Recent progress of spray-wall interaction research," *J. Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, 2006, pp. 1101-1117.
- (2) H. E. Snyder, D. W. Senser and A. H. Lefebvre, "Mean drop sizes from fan spray atomizers," *Trans. ASME, J. Fluids Engineering*, Vol. 111, 1989, pp. 342-347.
- (3) X. F. Wang and A. H. Lefebvre, "Mean drop sizes from pressure-swirl nozzles," *J. Propulsion*, Vol. 3, No.1, 1987, pp. 11-18.
- (4) W. S. Janna and J. E. A. John, "Drop size distributions of Bingham liquid (paint) sprays produced by fan jet pressure nozzles," *J. Eng. for Industry*, Vol. 101, 1979, pp. 449-455.
- (5) L. L. Xing, J. E. Glass and R. H. Fernando, "Parameters influencing the spray behavior of waterborne coatings," *J. Coatings Technology*, Vol. 71, 1999, pp. 37-50.
- (6) B. Mulhem, G. Schulte and A. A. Ali, "Effect of solid particles on breakup of suspension sheets," *ICLASS 2003 Sorrento, Italy*, 2003.
- (7) A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays," Hemisphere Publishing Co., New York, 1989.
- (8) N. Dombrowski and R. P. Fraser, "A photographic investigation into the disintegration of liquid sheets," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Math. and Physic. Sci.*, Vol. 247, 1954, pp. 101-130.
- (1) S. Y. Lee and S. U. Ryu, "Recent progress of spray-