

더스트 클라우드 내에서의 화염 진행과 연소 한계

문인상* · 윤영빈** · 김문기** · 조태영**

Flame Propagation in Dust Cloud and its Flammability Limits

Moon, I. Yoon, Y. Kim, M. and Cho, T.

ABSTRACT

Wheat dust cloud를 $5 \times 5 \times 214.1 \text{ cm}^3$ square tube내부에 발생시켜 화염의 전달과 연소 한계에 관한 연구를 수행하였다. 사용된 미립자는 $106 \mu\text{m} - 300 \mu\text{m}$ 의 크기로 분류되어 주로 사용되었고 $300 \mu\text{m} - 325 \mu\text{m}$ 크기의 미립자가 더불어 사용되었다. 연소 튜브는 연료로 사용되는 미립자를 튜브의 상단에서부터 컨베이어 벨트를 사용해서 공급받아 튜브의 하단에서 전기코일을 사용하여 점화시키는 구조로 고안되었다.

화염의 최대 진행속도는 작은 크기와 보다 큰 크기의 미립자를 사용했을 때가 각각 523 cm/sec 와 373 cm/sec 로 측정되었다. 연소 속도는 입자의 크기와 집적도(concentration)에 따라 변화를 보였는데 최소 3 cm/sec 에서 최대 7.5 cm/sec 로 관측되었다. 그러나 화염의 두께는 놀랍게도 입자의 집적도와 큰 연관이 없어 보였는데, 이는 앞으로도 보다 많은 연구를 통한 검증이 필요하리라 생각된다. 끝으로 fuel rich flammability는 790 g/m^3 으로 stoichiometric mixture 230 g/m^3 에 비교해 월등히 높은 값으로 관측되었다.

Key Words : dust, flammability limits, flame propagation

1. 서론

여러 가지 안전사고 방지와 연소 효율을 높이는 일환으로 미립자 연소에 관한 연구가 시작된 것은 homogeneous combustion에 비해 최근의 일이다. 산업 현장에서 바닥에 쌓인 미립자는 주의의 작은 교란에서도 쉽게 부유하게 되고 보다 커다란 사고로 이어질 위험가능성을 내포하게 된다.

1906년, 프랑스에서 일어나 1099명의 생명을 앗아간 Curriers 광산의 사고는 석탄 가루로 인해 발생한 대표적인 재해로 기록되었다. 그리고 최근 1998년 미국 켄사스 주의

Debruce Grain에서 일어난 grain elevator 폭발 사고 역시 분진에 의한 사고로 밝혀졌다. 이 때 발생한 폭발로 인해 6명의 인부가 사망하였고 12명이 부상을 입는 등 커다란 인명 피해가 발생했었다. 이렇듯 미립자는 커다란 사고를 유발할 수 있는 물질이기도 하지만 동시에 연료도 많이 사용되며 연소 효율을 높이는 중요한 역할을 하기도 한다. 일 예로 고체 연료에 알루미늄 입자를 첨가하면 연소 효율과 안정성을 높일 수 있다.

따라서 사고의 예방과 연소 효율 증대라는 두 가지 목적을 위해서는 연소시 화염의 두께라든가 연소속도 혹은 연소한계 등의 기본적인 연소 특징을 살펴보는 것이 우선 과제라 하겠다. 이러한 연소 특징들은 종종 homogeneous combustion 과 비교가 되고는 하는데, 일반적으로 이러한 입자들의 연소는 homogeneous combustion 보다 훨씬 더 복잡한 연소 양상을 보이게 된다.

* 서울대 기계항공 공학부 로켓 추진 실험실

† 서울대 기계항공 공학부 로켓 추진 실험실

** 서울대 기계항공 공학부 로켓 추진 실험실

이 연구의 기본 목적은 연소 튜브 내부를 따라 진행되는 wheat dust flame을 관측하여 연소 특성을 알아보는 데 있다. 이 실험은 몇 가지 가정을 토대로 실행되었는데, 첫 번째는 화염의 진행은 2차원적인 현상이라고 가정한 것이다. 실제로 화염은 3차원적인 현상이지만 간단한 비디오카메라에 담을 수 있는 사진은 2차원적인 것이므로 모든 자료는 2차원적으로 해석되었다. 그리고 화염은 단히 아래쪽으로부터 열린 위쪽으로 진행하므로 연소 속도를 측정하기 위해서는 팽창하는 가스의 속도를 알아야 하는데 이를 위해서 dynamic pressure는 pressure transducer가 사용되었고 static pressure는 대기압이라고 가정하였다. 그리고 마지막으로 튜브를 통해서 손실되는 열에너지와 점화가 화염의 진행속도나 연소 속도에 미치는 영향은 무시하였다.

2. 실험 기구 설치

2.1 Flame Tube

제반 실험은 그림 1과 같이, 길이 2.41 m와 크로스 섹션 $5 \times 5\text{cm}^2$ 그리고 두께 1.3cm의 flame tube를 사용해 실행되었다. 튜브는 크게 두 부분으로 나뉘어져 있는데, 윗부분은 작은 입자들이 최종속도에 도착시키기 위함과 보다 균질한 dust cloud를 얻기 위해서 마련되었다. 가장 상층부에는 유실되는 입자를 최소화하기 위한 집진기가 있고 그 아래에는 입자를 분산시키기 위해서 바이브레이터와 메쉬를 설치해 가능한 양질의 dust cloud를 만들었다. 가장 아랫부분에는 댐퍼를 설치하여 바이브레이터로 인한 상부의 진동이 하부, 즉 테스트 섹션에 전달되지 않도록 하였다.

하부 구조는 화염이 진행할 수 있는 테스트 섹션으로 아래에서 1.27 m 인 곳에 pressure transducer를 설치해 dynamic pressure를 측정하도록 하였다. 한쪽 면을 따라있는 3개의 photodiode를 통해 화염의 진행속도를 측정할 수 있도록 하였는데 일

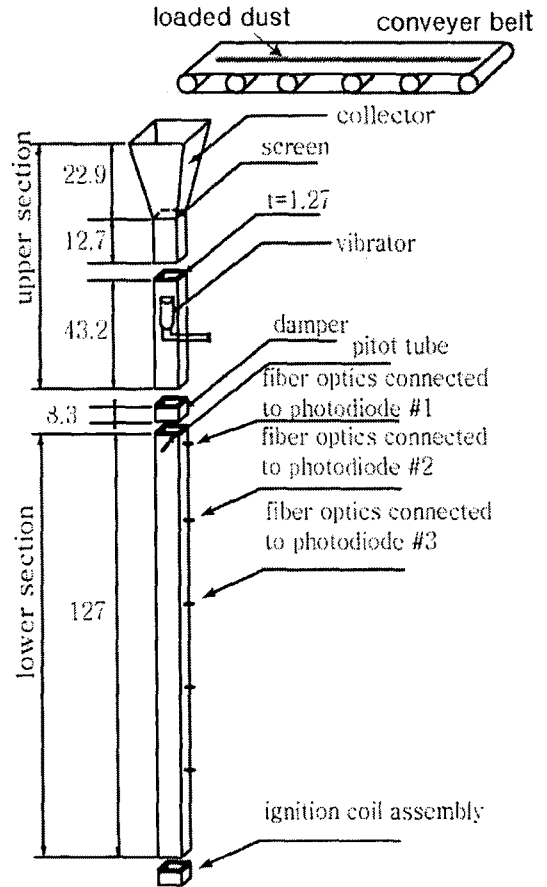


그림 1 Schematic diagram of the flame tube (mm).

반적으로 photodiode가 넓은 viewing angle을 가지고 있으므로 photodiode를 직접 사용하지 않고 광섬유를 통해서 화염의 빛이 photodiode로 유도되도록 구성하였다. 광섬유를 이용해서 viewing angle이 줄어들었다는 것은 그림 2를 통해서 알 수 있는데 이 test는 작은 광원을 튜브 내부를 정속도로 움직이게 한 뒤 이 광원의 위치를 측정함으로써 수행되었다. 이 때 광원의 속도가 미리 주어진 값을 사용하였지만 photodiode로 결정된 광원의 속도와 비디오카메라로 측정된 속도를 비교하기 위해 비디오카메라로부터 구해진 속도(실선)도 같이 표시하였다.

그림 2에서 알 수 있듯이 3개의 photodiode에서 나오는 신호는 거의 동일한 것으로 간주할 수 있고 비디오카메라에서

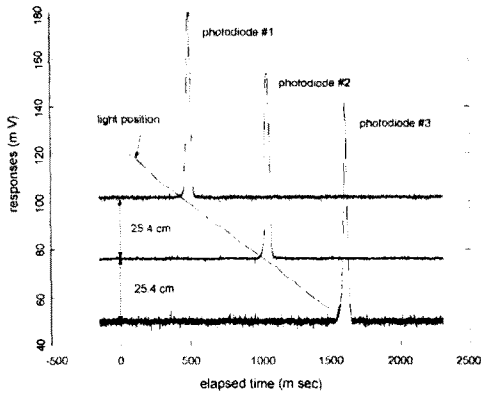


그림 2 Responses of the photodiodes. The light position is determined from video camera images.

구한 속도와 일치하는 것을 알 수 있다.

2.2 Dust feeding system

DC 모터로 구동되는 컨베이어 벨트를 사용하여 dust를 튜브 내에 흩뿌리는 방식을 사용하여 dust cloud를 생성하였다. 튜브 내부의 dust concentration은 컨베이어 벨트 위에 놓인 dust의 양과 벨트의 속도를 가지고 구할 수 있는데, 컨베이어 벨트 위에 놓여있는 dust의 양을 제외하고는 모두가 정해진 값이므로 튜브 내부의 dust concentration은 컨베이어 벨트위에 놓여있는 단위길이당의 dust질량의 함수로 나타낼 수 있다(식 1, 2).

$$\rho = \sigma m_{total} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{v_c}{v_t} \frac{L}{l} \frac{1}{V_M} \quad (2)$$

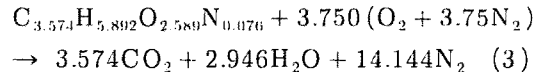
여기서 v_c , v_t , L 그리고 V_M 은 각각 컨베이어 벨트의 구동 속도, 자유 낙하하는 dust의 최종속도, flame tube main section의 길이 컨베이어 벨트위에 놓인 dust의 길이 그리고 main tube의 부피를 의미한다. 식 1과 2에 등장한 σ 의 단위는 부피의 역수가 되고, 파라미터 중 실험장비의 고유값인 L 과

V_M 을 제외하면 오로지 l 과 v_c 의 함수만으로 나타난다. 또한 컨베이어 벨트의 속도는 미리 결정된 값이 사용되기 때문에 식 1에서 구할 수 있는 dust concentration은 전체 dust의 질량과 컨베이어 벨트 위에 놓여있는 길이만의 함수가 된다.

2.3 Dust properties

Wheat는 사용되기 전에 ASTM의 표준체 (standard sieve)와 자동 웨이커 (mechanical shaker)를 사용하여 4 가지의 크기로 분류한 뒤 106-300 μm 그리고 300-325 μm 두 가지의 크기만을 사용하였다.

Wheat dust의 특징은 Martin[7]에 소개되어 있는데 stoichiometric equation은 식1과 같다.



그리고 the heat of reaction은 -14760 KJ/Kg이며 the heat of formation은 -8301 KJ/Kg [5]이다.

3. 결과와 토의

3.1 dust cloud의 점화와 화염 진행

Dust cloud에 점화가 되면 화염은 잠시 동안 튜브의 아래쪽에 위치한 점화 코일에 머물다가 위쪽방향으로 진행하게 된다. 그림 3은 화염이 점화되고 나서 진행되는 한 가지 보기이며 그림상의 프레임당 간격은 1/30sec이다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 화염은 점화가 된후 점화 코일 위에서 머물면서 점차 진화하다가 어느 순간 갑자기 위로 치솟아 올라가게 된다. 이런 현상에 대해서 Pu[8]은 처음 불안정한 단계를 the first stage로 다음에 오는 화염이 진행되는 단계를 the

second stage로 구분하였다.

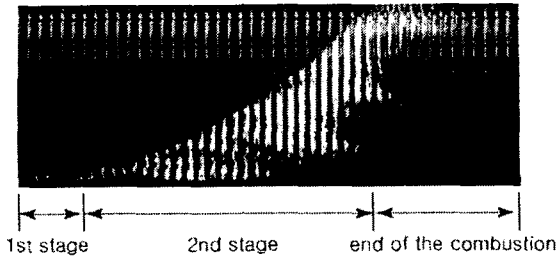


그림 3 A typical sequence of the flame propagation in the flame tube.

The first stage에 있는 화염과 dust concentration 과의 연관성에 대해서 많은 조사가 이루어졌지만 결국 어떠한 연계성도 밝혀내지 못하였다. 또한 the second stage에 있는 화염조차도 때로는 semi-ellipse의 모양으로 또 때로는 무정형의 모양을 하는 등 화염이 진행하는 동안 이러한 불규칙성이 혼하게 관측되었다.

화염의 진행속도는 그림 3과 같은 일련의 사진을 통해서 구해졌는데, 앞서 밝힌 바와 같이 화염의 끝 면이 불규칙한 모양을 가지고 있으므로 사진으로부터 화염진행속도를 직접 구하는 대신에 여러 장의 사진을 토대로 평균값을 구했다. 그림 4과 같이 화염의 끝단을 시간의 함수로 표현한 뒤 이 모든 점들을 사용해 2차, 3차 그리고 지수 함수의 line fitting을 사용해 속도를 구했는데 찾수가 낮을수록 초기 값에, 찾수가 높을수록 나중 값에 편중되어 2차함수는 시간이 지날수록 undershoot을 지수함수는 overshoot하는 경향을 보였다. 따라서 그 중간 값으로 3차함수를 사용해 속도가 결정되었다. 그림 4는 여러 concentration중에서 한가지인 190 g/m³에 해당하는 화염의 진행속도를 나타낸 것으로 왼쪽 그림의 x축은 시간이고 오른쪽 그림의 x축은 frame number다. 그리고 두 x축은 같은 scale로 맞춰졌다.

3.2 Burning velocity

Wheat dust의 burning velocity를 측정하

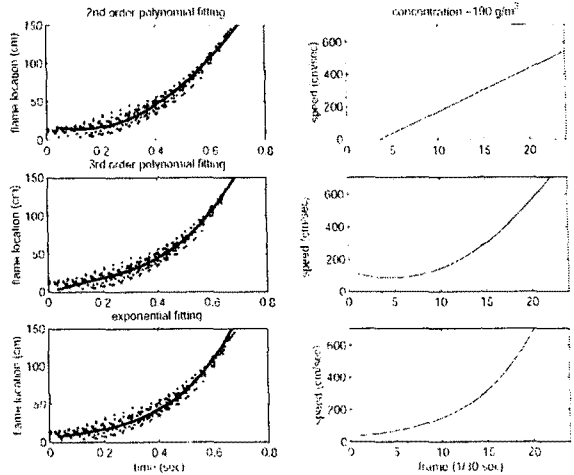


그림 4 The locations of the flame front and the flame speed. Each point shown in the left three plots represents flame position for a given frame and the bold solid lines are data fits. The solid lines in the right three plots represent speed of the flames. Each series of the plot represents one flame propagation. Flame locations were determined with digitized pictures. The concentration is 190 g/m³

는데는 여러 가지 어려움이 있지만 그중에서 앞서 언급한 바와 같이 dust가 heating coil에 접촉을 한 뒤 곧바로 점화가 되지 않고 또 점화가 되었다 하더라도 바로 화염이 위로 진행하는 것이 아니므로 화염의 출발시점을 찾는다는 것은 상당히 모호한 문제가 있다. 따라서 base를 elapsed time 혹은 the second stage로 부터의 시간으로 사용한다면 출발점이 다르기 때문에 원치 않는 일이 생기기도 한다. 그림 3을 예로, 3차 다항식을 사용해서 fitting을 한 것을 예로 들면 초기에는 오히려 화염의 진행속도가 줄어드는 기이한 현상을 발견할 수 있는데, 이런 것들은 모두다 출발점 선정의 모호성 때문이라고 할 수 있다. 따라서 이런 시점의 모호성을 제거하기 위해 결정된 속도는 모두 시간의 함수에서 위치의 함수로 바꾸었다. 다시 말하면 모든 속도는 화염의 전면의 위치 따른 함수로 치환된 뒤, pressure transducer가 위치한 122 cm의 높이에서 속도가 계산되었다. 다음에 측정된 압력을 바탕으로 팽창하는 가스의 속도가 계산된 뒤

화염전면의 profile을 고려하여 burning velocity가 계산되었다. 그림 5는 높이 122 cm에서의 화염진행속도와 팽창하는 가스의 속도를 구한 것이다.

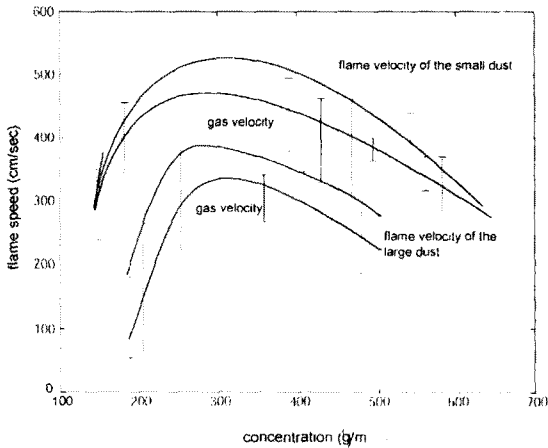


그림 5 Speed of flame at the height of 122 cm and gas velocities ans a function of concentration for wheat dust. The error bar denotes $\pm 1\sigma$ where σ is the standard variation.

그림 5에서 볼 수 있다시피 각 화염의 속도는 dust의 크기에 따라 2 m/sec에서 5.2 m/sec로 나타났는데 이는 homogeneous combustion의 경우보다 그 차이가 훨씬 작게 나타난 것이다. 일반적으로 homogeneous combustion 경우에는 최고 속도와 최저 속도가 매우커서 methane-air 혼합기인 경우에는 20 cm/sec부터 260 cm/sec까지 나타난다([1]).

두 particle의 최고 속도는 532 cm/sec와 373 cm/sec로서 두 입자의 평균 크기에 비해 꽤 많은 차이가 나는 것을 알 수 있는데, 이는 지금까지 잘 알려진 결론인 여러 크기의 입자가 섞여있을 때 화염의 속도를 결정 짓는 것은 가장 작은 입자라는 것을 확인시켜주는 증거가 될 수 있을 것이다.

앞서 잠시 언급한 바와 같이 open end로 화염이 진행할 때면 팽창하는 가스의 속도가 화염진행속도에 더하여지게 되므로 이러한 가스 속도를 제거해야 하는데, 이런 가스의 팽창속도는 pressure transducer를 사용해 측정하였다. 그리고 burning는 화염면에

직각으로 화염이 진행하는 방향으로 구해야 하는데 간단한 방법으로는 식(4)와 같은 tube method가 있다.

$$S_L = (u_f - u_g) \frac{A_f}{A_0} \quad (4)$$

여기서 u_f 는 화염의 진행속도, u_g 는 가스속도, A_f 는 화염의 전면면적 그리고 A_0 는 튜브의 단면적이다.

Dust flame은 homogeneous flame과는 달리 표면이 대단히 불규칙하므로 식(4) 사용해서 burning를 구할 때 화염의 표면은 두 가지 방법으로 결정되었다. 하나는 불규칙한면 그대로 따라 직접 측정하고 또 하나는 화염의 표면을 semi-ellipse라고 가정 한 뒤에 면적을 구한 것이다. 하지만 이들의 차이는 거의 없이 모두 대략 11-20 cm 정도로 측정되었다.

그리고 사진에 찍힌 것은 실제 2차원 표면이 아닌 1차원적인 화염의 경계이므로(그림 6) 화염의 경계선의 길이와 튜브한쪽 면의 비의 제곱을 두 면적의 비로 가정하였다.

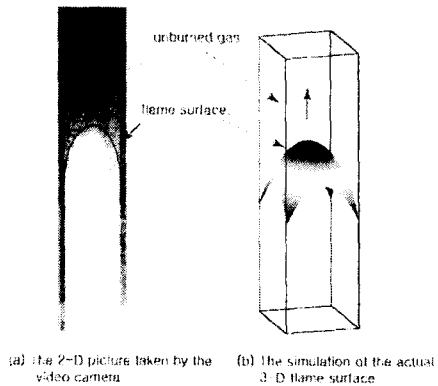


그림 6 The picture can only provide the information of borderline between the unburned gas and the reaction zone. The black line in (a) denotes the flame surface which is actually not a two-dimensional area but a one-dimensional line and (b) is a simulation of the actual three-dimensional flame.

따라서 화염면의 크기가 여러 가지가 나올 수가 있는데 그 중 대표적인 값을 골라 계산된 burning velocity는 그림 7에 나타난

다. 그림 7에서보면 최고 속도가 equivalence ratio 1인 경우인 240 g/m^3 근방에서 나타나는 것이 아닌 400에서 500 g/m^3 사이에서 나타나는 매우 특이한 현상이 발견되었다. 이렇듯 burning velocity가 lean limit에서부터 급격히 증가하다가 stoichiometric mixture 근방에서 속도가 둔화되는 것은 Seshadri *et al.*[9]에서도 같은 결과가 발견되었다.

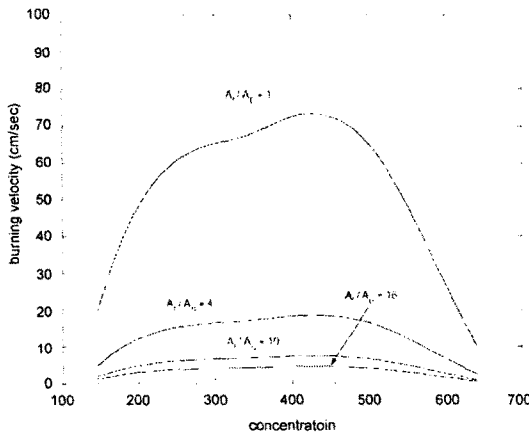


그림 7 Burning velocities as a function of concentration. A_0 and A_f are the cross-sectional area of the flame tube and the area of flame front, respectively.

그림 7의 여러 가지 면적 비율중 사진분석을 토대로 구한 여러 면적의 중간값인 10을 취한다면 burning velocity는 2 cm/sec에서 6.5 cm/sec의 값을 가지게 된다. 발표된 wheat dust의 burning에 관한 자료가 지극히 적기 때문에 많은 비교가 불가능했지만 면적의 비를 고려한 Krause *et al.*[3]은 concentration 120 g/m^3 에서 23 cm/sec 그리고 Gieras *et al.*[2]은 면적의 비를 고려하지 않고 9 cm/sec에서 95 cm/sec까지의 값을 구했다. Gieras *et al.*[2]의 값은 매우 크기는 하지만 면적의 비를 고려하지 않은 값이라는 것을 상기할 때 이러한 값들은 모두 대동소이하다는 것을 알 수 있다.

3.3 Flame thickness

매우 두꺼운 화염의 두께는 dust flame의 또 하나의 특징이지만 그림 3에서 알 수 있듯이 종종 화염내부에 공동이 생긴다던가 혹은 여러 개의 작은 화염으로 나누어진다고 하기 때문에 직접 화염의 두께를 측정하게 되면 실제보다 높은 값을 얻게 된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 화염 부분과 아닌 부분을 구별하는 정측화 작업이 필요하다. 이렇게 구한 결과와 Gieras *et al.*[2]의 결과가 비교를 위해 그림 8에 같이 나타나있다. 그림 8에 나타난 결과를 살펴보면 이 연구와 Gieras *et al.*[2]의 결과가 모두 화염의 두께는 dust의 concentration과 무관한 듯한 결과를 보이거나 이것이 진정한 wheat dust flame의 특성인지 아니면 단순한 우연의 일치인지를 밝혀내기 위해서는 좀더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

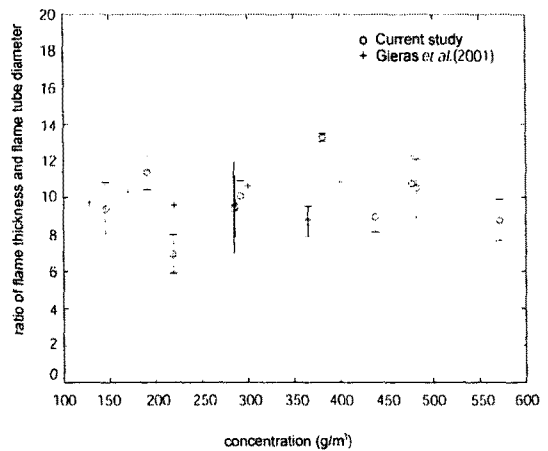


그림 8 Flame thickness as a function of concentration. The error bars denote $\pm \sigma$, where σ is the standard deviation, 'o': current study, '+': Gieras *et al.*[2]

3.4 연소한계

Heterogeneous combustion뿐만 아니라 homogeneous combustion에서도 flammability에 관한 연구가 시작 된 것은 그리 오랜 된 것이 아니며 초창기에

Spalding[10]이나 Linnett and Simpson[6] 등은 flammability가 생기는 원인으로 각각 복사와 대류에 의한 열전달이라는 주장을 폈으나 실험의 결과가 상반되게 나온다거나 실험으로 증명할 수 없는 문제들 나타났다. 후에 homogeneous combustion flammability에 관한 실험적 연구가 미국의 U.S. Bureau of Mines에서 공인된 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 의 튜브를 사용해서 상당량 이루어졌다.

Flammability 중에서 rich limit은 기체의 연소일 경우에 과도하게 많은 연료로 인해 산화제의 부족에서 발생하는 것인데 dust가 연료로 사용될 때에는 dust자체의 밀도가 산화제보다 훨씬 높기 때문에 과도하게 높은 equivalence ratio라 할지라도 산화제가 차지하는 비율을 그리 많은 차이가 나지 않는다. 따라서 dust combustion은 homogeneous combustion과는 비교할 수 없을 만큼 높은 equivalence ratio에서도 발생하며 극단적으로 연료의 비율이 높은 경우에도 smoldering의 형태로 연소가 일어나는 경우도 있다.

Dust combustion의 경우에 rich limit을 구하기 위해서는 점차적으로 fuel의 비율을 높여주어야 하는데, 연료의 비율이 높아질수록 튜브 내에 균질한 dust cloud를 만들 수 없다는 문제점이 발생한다. 만일 dust cloud가 균일한 concentration을 가지지 못한다면 국지적으로 화염의 진행속도가 달라지고 이것은 다시 화염의 안정성에 영향을 미쳐 원하지 않는 곳에서 더 이상 점화가 되지 않는다거나 화염의 진행이 멈춰버리는 현상이 생긴다.

이 실험에서도 가장 중점적으로 노력한 부분이 바로 이 균질한 dust cloud를 만드는 것이었는데, 그림 7에서 보드시피 어느 정도는 이러한 목적에 부합된다고 할 수 있겠지만 앞으로는 개선할 여지가 많을 것으로 보인다.

그림 9는 작은 입자가 사용되었을 때에 화염의 진행이 실패한 경우의 예이다. 두 가지 경우 모두 전기 코일에서 계속적으로 에너지가 공급되기 때문에 점화에는 성공하고 계속해서 화염이 유지는 되지만 위쪽으로 진행하지 못하는 것을 볼 수 있다.

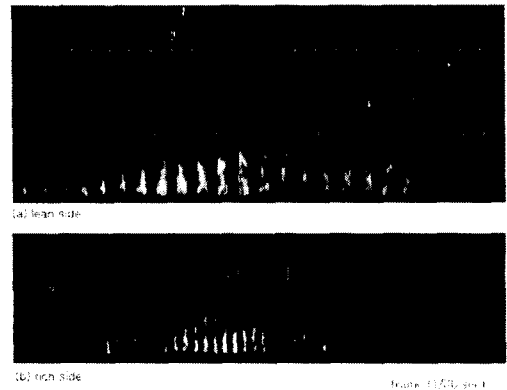


그림 9 Wheat dust-air mixture ignites but fail to propagate at lean, 136 g/m^3 (a) and rich concentration(b), 620 g/m^3

튜브내의 연료의 양을 점차로 증가시키면 concentration이 620 g/m^3 을 넘어서면 서부터 급격하게 점화와 화염진행이 일어나는 빈도수가 줄어든다. 이러한 실험적 결과를 바탕으로 rich limit은 아마도 이 결과와 그리 다르지 않다고 가정할 수 있을 것이다.

또 다른 검증 방법으로 그림 10과 같이 flame tube내의 concentration을 둘로 나누어서 아랫부분은 연소가능 범위내의 연료를 윗부분은 rich limit이라고 생각되는 양의 연료를 주입하여 점화를 시켜본 결과 화염이 끝까지 진행하지 못하고 중간에서 소멸이 되는 현상이 관측되었다.

이러한 실험적 결과를 바탕으로 구한 rich limit은 $620-667 \text{ g/m}^3$ 이지만 dust combustion의 rich limit은 한정된 공간 내에서 연료의 양이 증가함에 따라 산화제의 양이 줄어들기 때문에 발생하는 것이 아닌, 화학반응으로 생성되는 열이 dust 내부로 전달되어 소실되기 때문에 일어난다고 생각되어지고 위에 얻은 결과는 열손실을 고려하지 않은 값이므로 실험기구의 특성에 따라 차이가 있으리라 생각된다. 그러므로 그림 7에서 결정된 burining velocity의 값을 영이 되는 지점까지 extrapolation하여 새로운 rich limit이 790 g/m^3 으로 결정되었다.

4. 결론

$5 \times 5 \times 214.1 \text{ cm}^3$ square tube를 사용하여 wheat dust cloud 내부를 따라 진행하는 화염의 특징에 관해서 연구가 진행되었는데 결과로

- dust flame은 homogeneous combustion과는 달리 burning velocity 혹은 flame velocity가 좌우 대칭형이 아닌 equivalence 1 근방까지 급격히 증가하다, 그 이후에는 증가세가 둔화되고 다시 rich limit 근방에서 다시 급격히 떨어지는 특이한 특성을 가진다.
- burning velocity는 입자의 크기가 $106 \mu\text{m}$ 에서 $300 \mu\text{m}$ 일 경우 concentration에 따라 2 cm/sec에서 6.5 cm/sec로 나타났으며 이는 일반적으로 homogeneous combustion의 경우보다 상당히 작은 값이다.
- 화염의 두께는 연료의 concentration에 관계가 없는 것으로 관측되었는데, 이는 앞으로는 논란의 여지가 있을 것으로 생각된다.
- flammability limit은 실험적으로는 $600\text{--}660 \text{ g/m}^3$ 으로 나타났으며 burning velocity를 사용해 외삽한 경우에는 790 g/m^3 으로 계산되었다.

참고문헌

- [1] G. E. Andrew and D. Bradley. The burning velocity of methane-air mixtures. *Combustion and Flame*, 19: 275-288, 1972.
- [2] M. Gieras, W. Glinka, K. Klemense, and P. Wolanski. *Investigation of Flame Structure During Laminar and Turbulent Burning in Dust-Air Mixture*. 2001.
- [3] U. Krause, T. Kasch, and B. Gebauer. Velocity and concentration effects on the laminar burning velocity of dust-air mixture. *Proceedings of the 7th International Coll. Dust Explosions*, 1996.
- [4] B. Lewis and G. von Elbe. *Combustion Flame and Explosion of Gases*. Academic Press Inc., New York and London, 1987.
- [5] Y. Li. *Deflagration to Detonation Transition Fueled by Dust Layers*. Ph.D thesis, University of Michigan Dept. of Aerospace E., Ann Arbor Michigan, 1993.
- [6] J. W. Linnett and C. J. S. M. Simpson, Limits of inflammability. *Sixth Symposium (international) on Combustion*, 1956.
- [7] C. R. Martin. Characterization of grain dust properties. *In American Society of Agricultural Engineering Summer Meeting*, No. 78. 1978.
- [8] Y. Pu. Fundamental characteristics of laminar flame in cornstarch dust-air mixture. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, p.113, 1988.
- [9] K. Seshadri, A. L. Berlad, and V. Tangirala. The structure of premixed particle cloud flames. *Combustion and Flame*, 89, 1992.
- [10] D. B. Spalding. Proc. Roy. soc., A240, 1957.