

물분사가 대향류 화염의 NO_x 생성에 미치는 영향

정선욱* · 민병혁* · 김호영** · 정진택**

The Effects of Water Spray on the NO_x Formation of a Counterflow Flame

Sun Wook Jung, Byoung Hyouk Min, Ho Young Kim,
and Jin Taek Chung

Key Words: Counterflow Diffusion Flame, Water spray, NO_x, SMD

Abstract

Various technologies for the reduction of atmospheric pollution have been developed. One of which is to inject fine-water droplets directly on the flame. This way decreases the formation of thermal NO_x due to the temperature drop during evaporation of droplets. There is another effect of reducing prompt NO_x, which is resulted from delay of response time and the flow of droplets. In this experiment, it has been investigated the effects of changes of water droplets size and flow rate on temperature and formations of NO_x at the counterflow diffusion flame.

1. 서론

현재 가장 많이 사용되고 있는 탄화수소 계열의 연료들은 연소 후 유해물질을 배출한다. 이러한 유해물질을 감소시키기 위하여 다양한 기술개발이 널리 수행되어져 왔으며, 특히 NO_x에 대한 환경규제와 인체에 미치는 악영향으로 이에 대한 관심이 더 고조되고 있다.[1]

탄화수소계열 연료의 NO_x 생성은 높은 온도에서 발생하는 Thermal NO_x와 연료가 농후하거나 반응시간이 짧은 상태에서 생기는 Prompt NO_x의 생성이 대부분을 차지하고 있는 것으로 널리 알려져 있다. 또 연료에 포함되어 있는 N₂로 인하여 생기는 Fuel NO_x가 있다.[2]

유해 물질을 줄이기 위한 방법으로 연소실의 형상을 바꾸거나 순수 산화제를 사용하기도 한다. 또 연소실내에 반응억제제나 비활성 기체를 첨가함으로써 연소실 내에 온도를 낮추어주어 NO_x의 생성을 줄이는 연구가 수행되고 있다.[3,

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

4, 5]

천연가스는 탄화수소 계열의 연료 중에 유해물질의 배출이 적고, 산업용 기관이나, 발전소, 가정, 그리고 자동차등의 연료로서 사용량이 점차 증가하고 있어 연료에 대한 에너지의 효율적인 사용과 배기가스 문제에 대한 연구의 필요성이 증대되고 있다.

본 연구는 대향류 확산화염 내에 물을 분사하였을 때, 미세한 물 입자가 화염 특성에 미치는 영향과 NO_x생성의 변화를 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 대향류 확산화염을 형성하기 위하여 연료는 천연가스를 사용하며, 공기를 공급하는 부분에 크기와 유량이 다른 물 액적을 혼합하여 공급하여, 이때 형성된 대향류 확산화염의 온도, NO_x성분을 측정하여 물 액적의 영향을 분석한다. 또한 연료의 유량을 일정하게 하고, 공기의 유량을 변화시켰을 때, 연료가 희박 또는 농후할 때의 Prompt NO_x의 생성과 물 분사의 영향을 알아본다.

2. 실험장치 및 방법

2.1. 대향류 실험장치

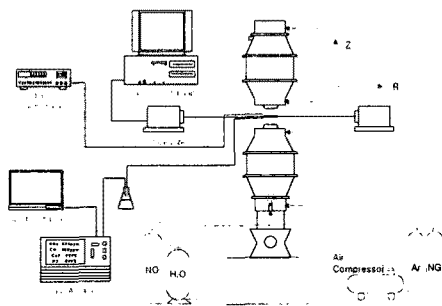


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig.1은 실험장치를 개략적으로 표현한 그림이다. 수직방향(Z)으로 두 개의 버너를 마주보게 설치하여 위쪽 버너에서는 연료를 공급하며, 아랫쪽 버너는 공기와 물액적을 공급하게 하였다.

대향류 버너의 설계는 버너 중심의 직경이 큰부분에서 버너의 출구까지의 단면적이 완만하게 변화하여, 역압력구배가 생기지 않도록 Batcelor - Shaw(BS) Nozzle의 형태를 참조하여 설계하였다. 이것은 출구속도 분포의 비균일도를 2% 이하로 감소시킨다.

Fig.2는 대향류 버너의 단면도이다. 버너의 직경이 30mm이며, 아래쪽의 대향류 버너는 안쪽에 물을 분사할 수 있도록 노즐 직경이 0.3mm인 물분사 노즐을 설치하였다. 화염이 외부공기에 접촉하여 확산되는 것을 방지하기 위하여 불활성 가스인 아르곤, Ar을 Fig.2와 같이 버너 입구의 주변으로 공급하여 화염 주위를 차단하였다. 대향류 버너에 분무된 물 액적들은 버너의 출구를 통하여 공기와 함께 나가는 것도 있지만 버너 벽에 충돌하여 흘러내리거나, 직경이 비교적

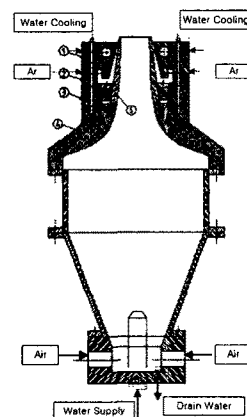


Fig.2 Cross section of counterflow nozzle

큰 무거운 액적들 중에는 중력의 영향을 받아 아래쪽으로 떨어지게 되므로 버너 아랫부분에 배수구를 설치하여 이곳을 통하여 배출되는 물의 양을 측정하였다.

2.2. 실험방법

본 실험에서는 대향류 버너사이의 간격을 12mm로 고정하여 대향류 화염이 두버너의 중심에 위치하도록 하고 연료의 양과 공기의 양을 조정하여 연료 11.7 ℓ/min , 공기는 12 ℓ/min 의 유량으로 공급하였다. 이러한 경우, 공기-연료비는 화염이 형성된 부분에서 이론공기비에 가까워지게 된다. 또한 연료의 유량은 고정하고 공기의 유량을 $\pm 8 \ell/\text{min}$ 정도 변화를 주었을 경우에 대하여도 실험을 하였다. Table.1은 본 실험의 조건으로 화염면에 도달하는 연료, 공기 그리고 물에 가해진 압력과 유량을 각각 나타낸 것이다. 이때의 물의 유량은 물 분사노즐을 대향류 버너에 설치하기 전에 압력 변화에 따른 측정된 값에서 대향류 버너 아랫부분의 배출되는 물의 유량을 뺀 값이다.

물 분사노즐의 분사압력 변화에 대한 화염면에서의 물 액적의 SMD와 체적농도는 Malvern Particle Sizer를 이용하여 반경방향으로 측정하였다. 이때 측정간격은 버너 중심으로부터 3mm이다. 화염면에서 온도 측정의 경우, 열전대의 두께와 그 움직임에 따라 화염의 형상이 변하므로 이때의 영향을 최소화하면서 온도를 측정하였다. 화염면에서 측정부분은 Fig. 3과 같다.

NO_x 는 화학발광법의 원리를 사용한 가스분석기를 사용하였고, 흡입관의 영향을 줄이기 위하여 직경 1/16 inch인 Probe를 제작하여 사용하였다.

Table.1 Cases of experiment with Various combination of parameters

Q_{fuel}	Q_{air}	P_{water}	Q_{water}
11.7 ℓ/min	12 ℓ/mi n	no injection	
		3 bar	0.17 ml/min
		4 bar	0.60 ml/min
		5 bar	0.95 ml/min
	20 ℓ/mi n	no injection	
		3 bar	0.51 ml/min
		4 bar	0.78 ml/min
		5 bar	1.30 ml/min
	28 ℓ/mi n	no injection	
		3 bar	0.80 ml/min
		4 bar	1.32 ml/min
		5 bar	1.60 ml/min
		6 bar	1.80 ml/min

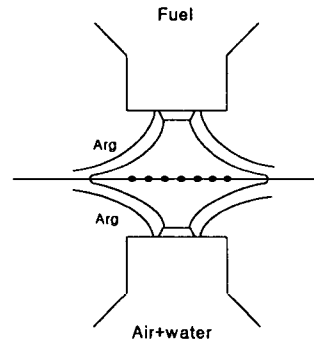


Fig.3 Measuring point

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 액적의 크기 및 체적농도의 분포

Fig.4 ~ Fig.6은 연료의 유량은 11.7 ℓ/min 이고 공기의 유량이 각각 12 ℓ/min , 20 ℓ/min , 28 ℓ/min 으로 변화시켜 화염을 형성시켰을 때의 조건과 같게 하여, 비 연소시 액적의 크기 변화를 반경방향에 따라서 측정된 것이다.

물 분사 노즐의 공급압력이 증가함에 따라 대향류 버너 출구로 분출되는 액적의 크기가 점차로 작아지며, 공급압력에 대한 액적 크기들의 차이는 공기의 유량이 증가함에 따라 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 공기의 속도와 물 액적사이의 상대속도가 점차 커지기 때문에 물 액적의 미립화가 촉진되기 때문으로 사료된다. 또한 각 경우의 반경 방향에 대한 변화는 크게 나타나고 있지 않으므로 화염면에 공급되는 물 액적의 크기는 일정하다고 가정할 수 있다.

Fig.7 ~ Fig.9는 위의 세가지 경우의 공기측 버너의 유량에 대한 반경방향의 체적농도분포를 나타낸 것이다. 각각의 경우 모두 물 분사 노즐의 공급압력이 증가하면 액적의 체적농도가 증가한다. 또한 공기측 버너의 유량이 증가하면 물 분사 노즐의 공급압력에 대한 체적농도의 차가 커진다.

그러므로 공기유량이 증가하면 물 공급압력의 증가에 대한 액적의 크기의 차이는 없지만 체적농도 차이가 커지므로 화염면에 공급되는 물의 유량 Table1에 서와 같이 점차 증가함을 알 수 있다.

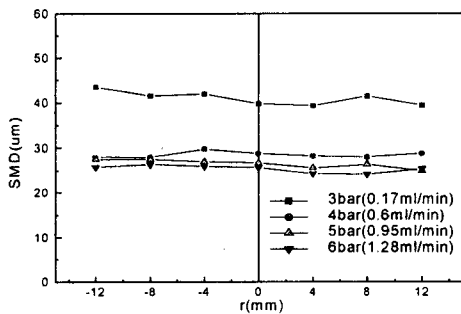


Fig.4 Distribution of SMD along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=12 \ell / \text{min}$

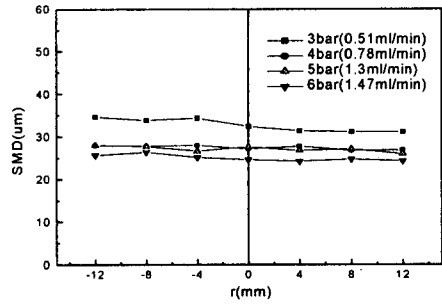


Fig.5 Distribution of SMD along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=20 \ell / \text{min}$

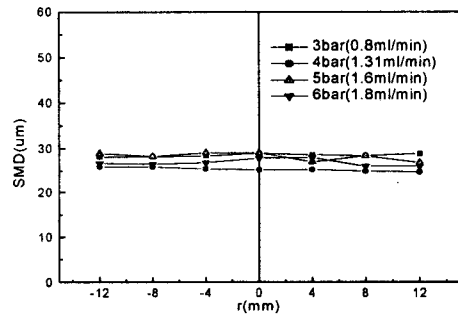


Fig.6 Distribution of SMD along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=28 \ell / \text{min}$

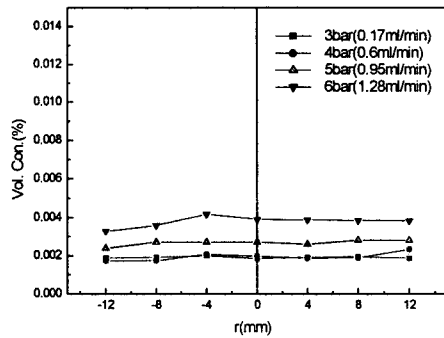


Fig.7 Distribution of volume concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=12 \ell / \text{min}$

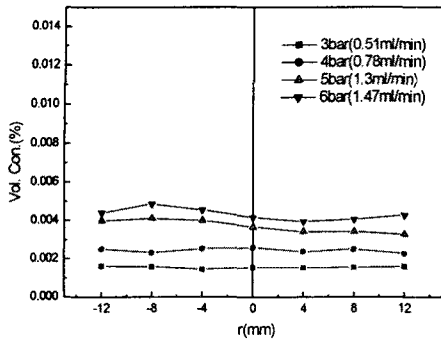


Fig.8 Distribution of volume concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=20 \ell / \text{min}$

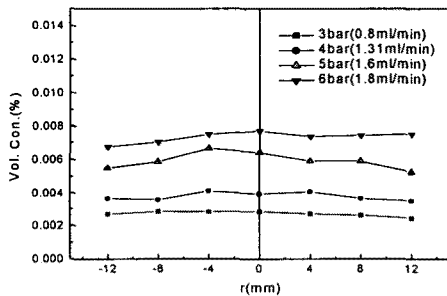


Fig.9 Distribution of volume concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=28 \ell / \text{min}$

3.2. 온도의 분포

Fig.10~Fig.12는 3가지 공기-연료의 유량비 변화에 대하여, 물을 분사하지 않았을 때와 물을 압력에 따라서 분사하였을 때의 온도분포를 반경방향에 대하여 측정한 것이다. 물 분사하지 않았을 경우, 공기의 유량이 $20 \ell / \text{min}$ (Fig.11)일 때의 온도가 다른 공기 유량에 비하여 높은 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다.

이것은 공기-연료비가 화염을 형성하는데 가장 적절한 조건임을 알 수 있다.

각각의 경우 물 분사 유량이 점차 증가함에 따라 전반적으로 화염면의 온도가 감소하고 있으며, 이때 공기 유량이 증가하면 이러한 감소의 폭이 커지게 된다. 이는 앞에서 언급한 공기유량의 증가에 따라 화염면으로의 물 공급량이 증가하는 실험결과에 의하여 위와 같은 결과가 나타난다.

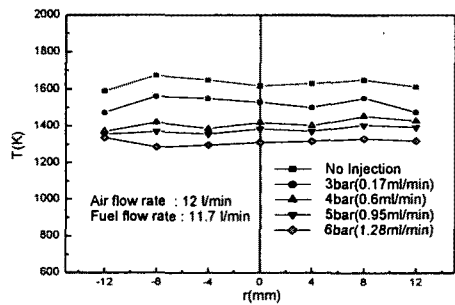


Fig.10 Distribution of temperature along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=12 \ell / \text{min}$

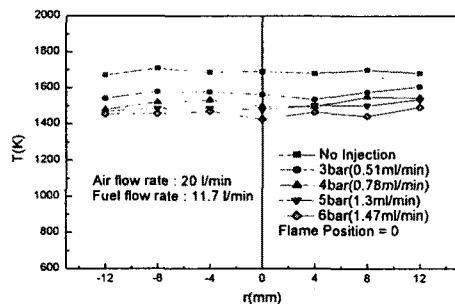


Fig.11 Distribution of temperature along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=20 \ell / \text{min}$

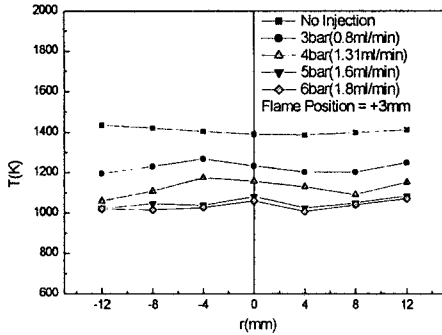


Fig.12 Distribution of temperature along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=28 \ell / \text{min}$

3.3. NO_x성분의 농도분포

Fig.13 ~ Fig.15은 3가지 공기-연료의 유량비 변화에 대하여 반경방향의 NO_x 농도의 분포를 나타낸 것이다. 물을 분사하지 않은 상태의 NO_x농도에 비하여 물분사 노즐의 공급압력을 증가하면 전반적으로 NO_x농도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

물 분사를 하지 않았을 경우의 3가지 공기-연료의 유량비에 대한 반경방향에 대한 NO_x농도 분포를 비교하면, 앞 절에서 언급한 온도분포에서 가장 높은 상태의 조건인 Fig.14에서보다 Fig.13과 Fig.15에서 NO_x가 크게 분포한다. 이는 Fig.13에서는 다른 공기유량 조건일 때보다 공기의 유량이 상대적으로 적어져 화염면에서의 연료가 농후하게 되고, 이러한 영역에서의 NO_x생성에 지배적인 Prompt NO_x가 많이 발생하기 때문으로 사료된다. 여기에 액적을 분사하면 반응 시간이 지연되어 Prompt NO_x의 생성이 급격히 줄어들어 전체 NO_x의 생성량이

현저히 줄어든다.

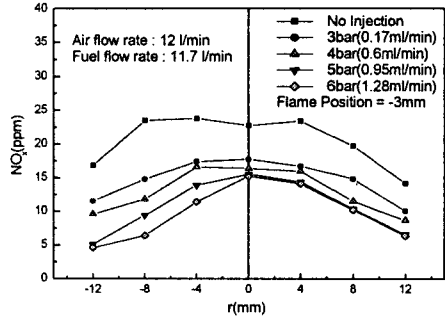


Fig.13 Distribution of NO_x concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=12 \ell / \text{min}$

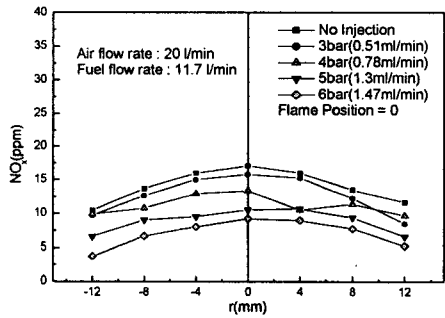


Fig.14 Distribution of NO_x concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=20 \ell / \text{min}$

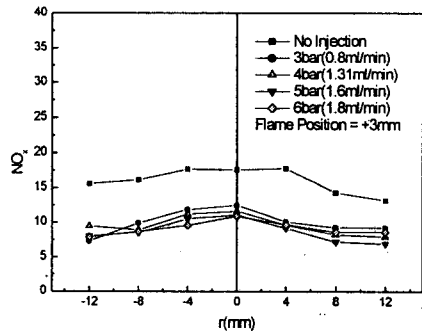


Fig.15 Distribution of NO_x concentration along the radial distance at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{air}=28 \ell / \text{min}$

Fig.15에서는 물의 공급유량이 증가하여도 NO_x 농도감소가 적게 나타난다. 이는 다른 경우보다 공급되는 물의 유량이 많아져 반응자연현상 보다 반응억제현상이 나타나 생성되는 NO_x 의 양이 적어지기 때문으로 사료된다.

3.4. 화염의 형상변화

Fig.16 ~ Fig.18은 각 공기유량에 대한 화염을 가시화 한 것이다. 물 분사 유량을 증가시키기에 따라 화염의 위치가 미소하게 변하며 두께도 얇아지고 있으며, 화염의 색깔도 백색에서 청색 그리고 적색으로 순차적으로 변화하였다.

Fig.16에서 물을 분사하지 않은 화염의 형상에서 화염의 두께가 일정하게 나타나고 있으며 끝 부분을 제외한 화염의 색은 가장 높은 온도인 백색이다. Fig.17과 Fig.16을 비교하여 보면 화염의 색과 두께는 근사하지만 물을 분사하였을 때는 화염의 크기가 반경방향으로 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 물의 액적이 많아지면서 반응을 지연시키면서 반응영역이 넓어지는 것으로 사료된다.

Fig.18은 공기의 유량이 다른 조건보다 상대적으로 많으므로 희박연소에 가까우며 이로 인하여 화염의 온도가 낮고 화염의 반경도 작게 나타나고 있다.

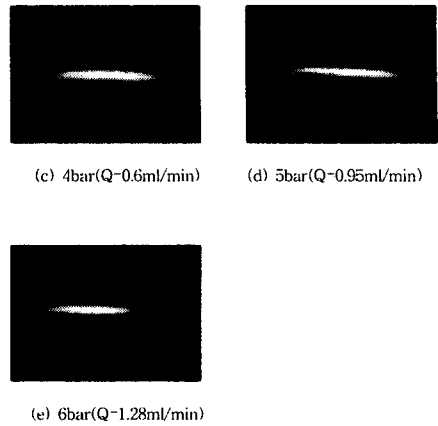
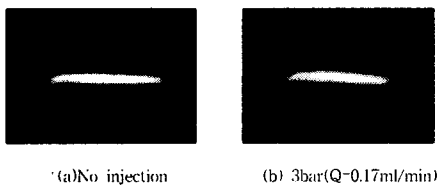


Fig..16 Image of flame at $Q_{\text{fuel}}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{\text{air}}=12 \ell / \text{min}$

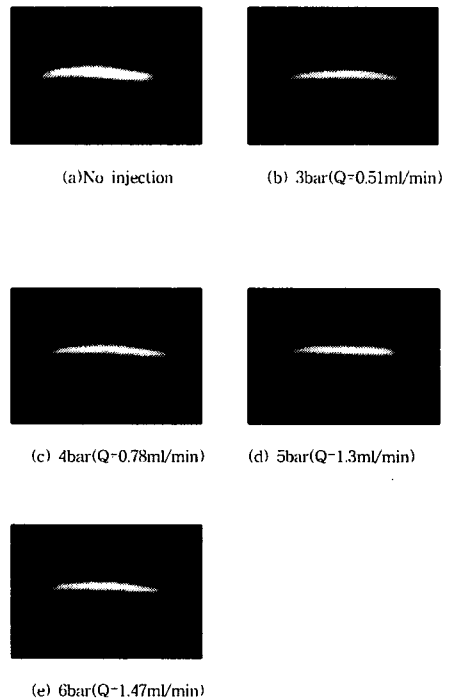


Fig..17 Image of flame at $Q_{\text{fuel}}=11.7 \ell / \text{min}$, $Q_{\text{air}}=20 \ell / \text{min}$

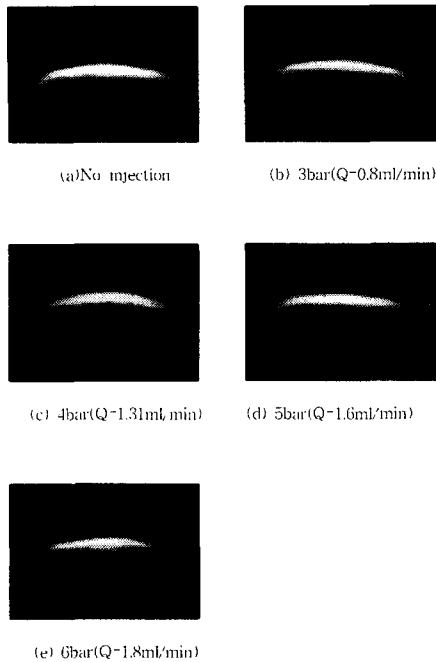


Fig.18 Image of flame at $Q_{fuel}=11.7 \ell / \min$, $Q_{air}=28 \ell / \min$

4. 결론

본 실험은 대향류 화염에 물을 분사하였을 때 물 분사 압력에 따른 유량 변화와 공기-연료비의 변화가 연소특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연료가 $11.7 \ell / \min$ 이고 공기의 유량이 $12 \ell / \min$ 일 때 :

액적의 크기와 농도가 증가함에 따라 온도가 감소하는 폭이 다르게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 온도의 변화는 물 분사 압력이 5bar까지는 큰 차이로 감소하였으며 6bar부터는 감소의 폭이 줄어들었다.

NO_x 는 물을 분사하지 않았을 때와 물을 분사하기 시작했을 때의 차이가 가장 크게 나타났으며 액적의 크기와 농도가

증가함에 따라서는 감소의 폭이 줄어든다.

2) 연료가 $11.7 \ell / \min$ 이고 공기의 유량이 $20 \ell / \min$ 일 때 :

온도의 변화는 물 분사 초기에 가장 많은 감소의 폭을 나타냈으며 액적의 크기와 농도가 증가함에 따라 나타나는 온도 감소의 차가 점차 줄어든다.

NO_x 는 물을 분사하지 않았을 때와 물을 분사하기 시작했을 때의 분포가 동일한 형태의 분포를 나타내며 이때 연료와 공기의 유량비가 알맞게 되어 Prompt NO_x 의 농도가 가장 낮아진다.

3) 연료가 $11.7 \ell / \min$ 이고 공기의 유량이 $28 \ell / \min$ 일 때 :

물 액적의 농도 증가에 따른 온도감소의 폭이 점차로 감소한다.

NO_x 는 물을 분사하지 않은 때의 분포가 위에서 언급한 2)의 상태보다 농도가 증가하였으며 물 분사 초기부터 급격히 감소하여 물의 체적농도가 증가하여도 일정한 분포를 가진다.

참고문헌

1. A. M. Lentati and H. K. Chelliah
"Dynamics of Water droplets in a Counterflow Field and their Effect on Flame Extinction" Combustion and Flame Vol.115:pp158-179(1998)
2. S. C. Li and N. Ilincic and F. A. Williams "Reduction of NO_x Formation by Water Sprays in Strained Two-Stage Flames" Transactions of the ASME Vol:119,

- pp836-843 OCTOBER(1997)
3. Stephen R. Turns, "An Introduction to Combustion" McGRAW-Hill International Edition, Chapter 9. p305-355(2000)
 4. Continillo, G. and Sirignano, W. A., "Counterflow Spray Combustion Modeling" Combust and Flame Vol.81:pp325-340(1990)
 5. Chen, N.-H., Rogg, B., and Bray, K. N. C.,(1992) "Influence of droplets Number-Density on the" Twenty-Fourth Symposium(International) on Combustion, The combustion Institute, Pittsburgh, pp.1513-p1521(1992)
 6. 김 호영 "연소이론" 대우학술총서480, p271 -326(2000)