

질소로 희석된 LPG 연료의 가연한계와 화염 안정성

안태국* · 남연우** · 이경우** · 이원남*

Flammability Limit and Flame Instability of Nitrogen-Diluted LPG Fuel

Taekook Ahn*, Younwoo Nam**, Kyung-Woo Lee**, Wonnam Lee**

ABSTRACT

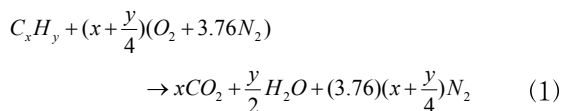
The flammability limit and the flame instability of nitrogen-diluted LPG fuel was experimentally studied on a co-flow flame configuration. The combustion reaction of nitrogen-diluted hydrocarbon with air could be interpreted as the equivalent reaction of pure fuel with nitrogen-diluted air. Nitrogen-diluted LPG with nitrogen up to 90 % of nitrogen mole fraction in fuel, which is close to the flammability limit, could form a co-flow flame. Various parameters such as laminar or turbulent flame, the existence of diffusion flame with pure fuel, air temperature could affect the limit of flame formation.

Key Words : Flammability Limit, Flame Stability, Nitrogen Dilution, LPG Fuel.

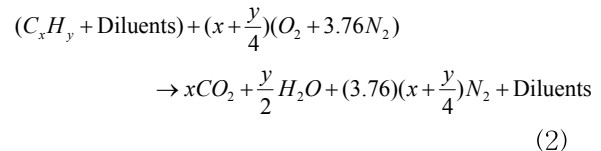
기체상 연료를 공기로 연소시키는 과정에는 확산, 부분 예혼합 또는 예혼합 화염이 형성된다. 이때 연소반응이 이루어지는 영역에서 연료와 공기의 혼합조건이 가연한계를 벗어나지 않아야만 한다. Fig. 1은 프로판이 불활성기체가 포함되는 공기로 연소되는 경우의 가연한계를 보여주고 있다.⁽¹⁾ 공기에 포함되는 불활성기체의 농도가 증가하면 연소 가능한 당량비 범위가 줄어들고 일정 농도 이상에서는 가연한계를 벗어나게 된다. 일반적으로 탄화수소/공기 혼합기의 연소 여부는 혼합기에 포함되는 산소의 농도 감소를 기준으로 해석된다. 따라서 연료가 불활성기체로 희석되는 경우는 이와는 다른 해석이 필요하다.

탄화수소 C_xH_y 가 공기와 이론 당량비로 혼합되어 연소하는 반응을 정리하면 다음과 같다. 여기에서 식 (1)은 stoichiometric 반응, 식(2)는 희석제가 연료에 혼합된 반응, 식 (3)은 공기가 희석제로 희석된 연소 반응식을 나타낸다.

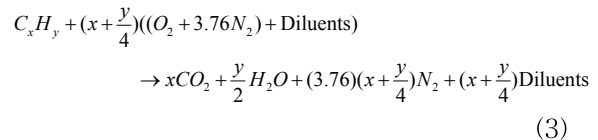
Stoichiometric 화염:



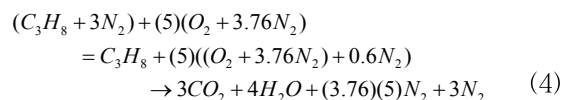
연료/희석 화염:



공기/희석 화염:



따라서 Fig. 1은 프로판/공기 혼합기에서 공기가 질소로 희석되는 화염, 즉 식(3)을 기준으로 나타낸 도표가 된다. 질소가 포함되어 있는 연료의 연소는 식(2)와 같이 진행되므로 연소 조건은 동일한 생성물 조성을 보이는 식(3)의 반응으로 해석해야만 한다. 예로 질소로 희석된 프로판에 75.0 %의 질소가 포함되어 있는 경우 식(4)와 같이 질소가 추가된 공기에 포함되어있는 희석 질소의 체적비가 11.2 %인 조건에 해당한다.



이와 같은 해석으로부터 산화제인 공기가 불활성기체로 희석되는 경우 상대적으로 가연한계를

* 단국대학교 기계공학과

** 한국전급

† 연락처자: wlee@dgu.edu

Tel : (031)8005-3503 Fax : (031)8005-4003

벗어나기 쉬운 반면, 불활성기체가 포함되어 있는 기체상 탄화수소를 순수한 공기로 연소시킬 경우 비교적 넓은 범위에서 연소가 가능함을 알 수 있다.

Puri and Seshadri⁽²⁾는 대향류 버너에서 연료를 질소로 희석한 경우와 공기를 질소로 희석한 경우에 대한 확산화염의 소멸한계를 실험적으로 제시하였다. 질소로 희석된 프로판이 확산화염을 유지할 수 있는 연료에 포함되는 질소 농도의 한계는 92.0 %라고 하였다. 이를 식 (2)와 (3)을 이용하여 공기에 포함되는 질소의 농도로 환산하면 32.6 %에 해당하며, 이 값은 Fig. 1의 당량비 1에 대한 가연한계에 거의 근접하고 있음을 알 수 있다. 반면에 공기가 질소로 희석된 조건에서 순수 프로판으로 형성된 화염이 유지되는 공기에 포함된 질소 농도는 34.8 %라고 하였다. 이 결과들로부터 확산 또는 부분 예혼합 화염이 유지되는 연료에 포함되는 불활성기체의 농도는 가연한계 이내에서 어떤 값을 갖게 되며, 이 값은 버너의 연소 특성에 의해 정해질 수 있다는 것을 알 수 있다.

질소로 희석된 LPG(프로판 92 %와 n-부탄 8 %) 연료의 연소를 위한 화염의 안정성에 대한 연구는 이중동축류 버너를 사용하여 수행하였다. Fig. 2는 이중동축류 버너에서 형성되는 난류 확산/부분예혼합 화염을 보여주고 있다. 외부 노즐로 프로판이 공급되고 내부 노즐로는 공기가 공급되었다. 내부 노즐의 공기 유속은 19.94 m/s로 *Re* 수가 2933이고 난류 예혼합/부분예혼합 화염을 형성하는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 내부 노즐의 위치에 따른 화염 형상의 변화를 보여주며, 내부 노즐의 높이가 외부 노즐보다 낮거나 비슷하면 부분예혼합 화염/예혼합 화염, 외부 노즐보다 높으면 확산화염/예혼합 화염의 특성이 나타나는 것을 알 수 있다. 내부 노즐의 위치를 변경하면서 화염이 유지되는 질소 희석 농도의 한계를 측정하였다.

Figure 4는 화염이 유지되는 한계에서의 연료에 첨가된 질소 몰 분율을 나타내고 있다. LPG 연료의 경우 질소 몰분율이 75% 이상, 즉 LPG 연료가 체적비 1:3 이상의 질소로 희석되어도 안정적인 동축류 화염을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

이중동축류 버너에서 형성되는 화염 조건의 한계는 다양한 인자에 의해서 결정될 수 있다. Fig. 5는 내부 노즐로 공급되는 공기의 유량/출구 속도에 따른 화염 형상 변화를 보여준다. 내부 노즐의 공기 유속이 낮으면 층류 화염이 형성된다. 그러나 공기 유속이 증가하면 난류 동축류 화염으로 전이 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 6은 내부 노즐로 공급되는 공기의 출구 속도 변

화에 따라 화염이 형성되는 질소 희석 한계를 보여 주고 있다. 이때 LPG 연료에 질소가 추가 되었으며 이를 공기에 포함되는 질소의 양으로 해석하여 비교 하였다. 층류의 경우(3, 4) 화염이 형성되는 범위가 넓게 나타나지만 화염의 길이가 길어지고 소멸이 발생하기 전에 화염의 날림이 발생하였다. 그러나 난류 화염이 형성되면 (1, 2) 화염의 길이가 짧아지고 화염의 날림이 발생하기 전에 소멸이 발생하였다. 또한 일단 난류 화염이 형성되면 공기 유속이 작을수록 더 많은 질소로 희석된 연료로도 화염을 형성할 수 있다는 것을 알 수 있다.

질소로 희석된 연료 노즐 외부로 소량의 순수한 연료를 사용하여 확산화염을 형성하면 내부에 질소로 희석된 확산화염이 형성되는 범위를 크게 늘릴 수 있다. 이중동축류 버너를 이용한 예비 실험 결과는 외부에 확산화염을 형성하면 92 %이상이 질소인 희석된 LPG 연료로도 화염을 유지할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이는 질소가 추가된 공기에 포함되어있는 희석 질소의 체적비가 34 %인 조건에 해당한다. Fig. 1과 비교하면, 이 조건은 당량비 1의 조건에 대한 가연한계에 근접하는 것을 알 수 있다. 따라서 연료가 불활성기체로 희석되는 경우 산화제로 순수 공기가 사용되면 매우 넓은 희석 조건에서 안정된 화염의 유지가 가능하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 방법에는 난류 조건의 최적화, 공기의 예열 및 외부 화염과 같은 화염 안정화 조건의 추가 등이 포함되며 이에 대한 연구가 계속 수행될 예정이다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 연구장비 개발 및 인프라구축사업의 “선박 유증기 회수설비(SVRU) 개발 및 회수제품 연료화 사업”지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] B. Lewis and G. von Elbe, Combustion, Flames and Explosions of Gases, 3rd ed., Academic Press, 1987.
- [2] I. K. Puri and K. Seshadri, "Extinction of Diffusion Flames Burning Diluted Methane and Diluted Propane in Diluted Air," Combust. and Flames, 65, 137-150, 1986.

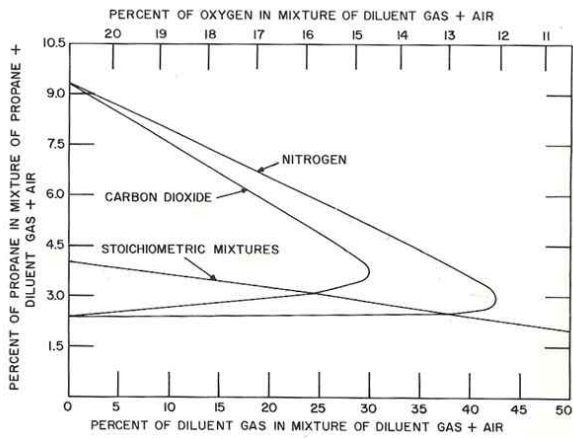


Fig. 1 Flammability limit of propane+diluted air mixture.⁽¹⁾

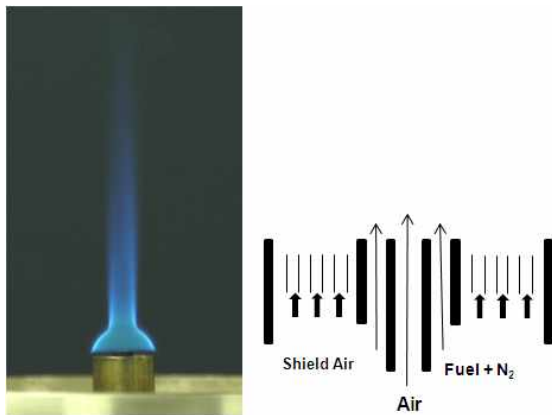


Fig. 2 A typical flame established on a concentric co-flow burner with air flow through an inner nozzle.

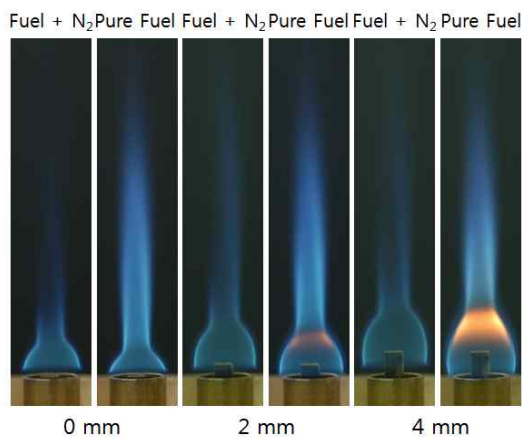


Fig. 3 Flame shape changes with the position of an inner nozzle.

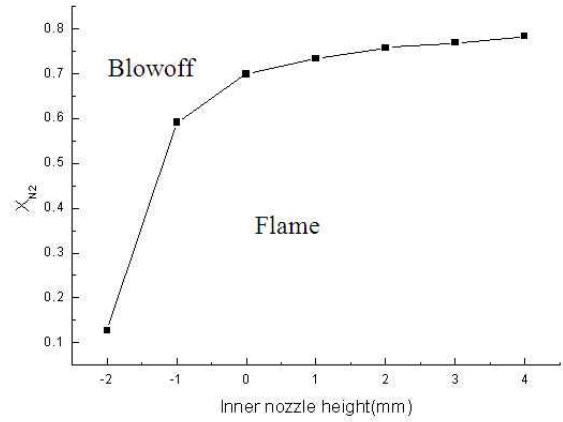


Fig. 4 Blowoff limit of percent of diluent nitrogen in mixture of nitrogen+air varied with an inner nozzle position.

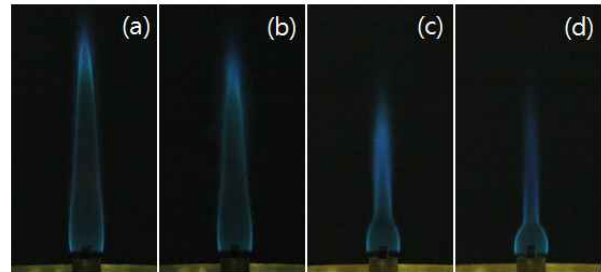


Fig. 5 Transition from a laminar flame to a turbulent flame as increase of air velocity through an inner nozzle.

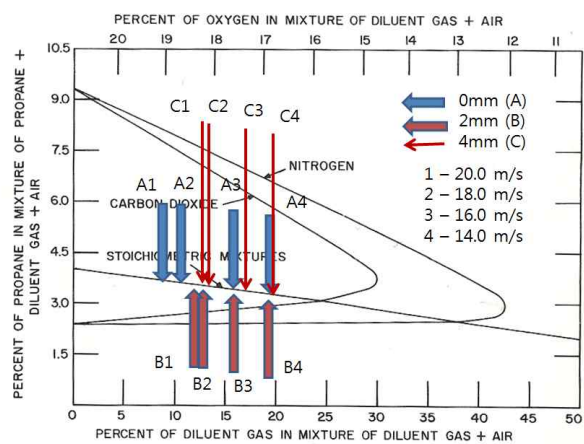


Fig. 6 Limit of percent of nitrogen dilution to maintain a flame with nitrogen diluted LPG fuel.