

集團燃燒 모델

金 皓 永
 <高麗大 機械工學科>

1. 서 론

1973 년과 1974 년에 아랍산유국들에 의하여 야기되었던 유류파동 이후 대량의 고급에너지를 필요로 하는 산업 사회에서는 유류의 사용절감 및 효율적 이용이라는 과제가 많은 과학기술자들에 의하여 연구 되어오고 있다. 금년 들어서의 원유가격의 하락은 전세계의 에너지 수급면에서 볼 때 일시적인 현상으로 풀이되고 있으며 대체 에너지원 즉 원자력, 풍력, 소수력(小水力), 해양에너지(OTEC), 지열에너지와 태양에너지 등은 그들의 이용시 발생하는 여러가지 문제점들, 또는 낮은 효율로 인하여 더욱 연구되어야 할 과제들이다. 또한 많은 매장량을 보유하고 있는 석탄도 연소, 운반 및 취급과정에서 발생하는 폐기물 및 복잡성으로 고급의 에너지원으로 사용하기 위하여는 많은 연구가 요망된다. 그러므로 이 에너지원들은 연소, 운반 및 취급에 용이한 원유로부터 얻어지는 액체연료를 대체하지 못하고 있는 실정이다.

현재 사용중인 내연기관, 가스터어빈, 로켓엔진과 발전소 및 주거용 난방에 이용되는 증·소

형연소기에서는 고가(高價)의 액체연료들을 사용하고 있다. 이 액체연료를 고급동력으로 바꿀 때는 필연적으로 연소라는 과정을 거치게 되는데 연소과정을 단계적으로 나누어 보면 첫째, 액체연료의 표면적을 크게하여 연소를 촉진시키기 위한 연료의 미립화(atomization) 과정, 둘째, 미립화된 액적들의 증발 및 기체화한 연료와 공기와의 혼합으로 생성되는 가연성 혼합기 생성과정과 셋째, 가연성 혼합기의 점화, 연소 및 화학반응으로 인한 공해물질의 생성과정들로 대별된다. 그림 1은 이 과정들을 도표화 한 것이다. 이들 연소준비 및 연소과정들은 연소효율의 증대 및 공해물질의 생성저하를 위해서는 꼭 이해되어야 할 선결요건이며, 이 과정들의 정확한 해석으로부터 보다 효율적인 새로운 연소기의 개발도 기대될 수 있다. 최근에 액체연료분사시 연소과정들에 대한 연구들은 새로운 실험기구들 즉 레이저도플러 실험장치, 레이저굴절에 의한 액적 크기의 측정장치, 홀터그리퍼등의 개발 및 대형화된 전자계산기의 등장으로 인하여 실험 및 이론적으로 많은 과학기술자들이 행하여 왔으나 정확한 해석을 하기에는 미비한 실정이며, 더욱 많은 연구가 요망된다. 이 과정들은 액적의 크

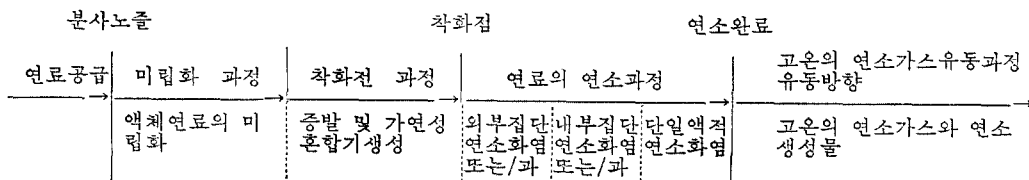


그림 1 액체연료 분사시 액적군의 연소과정

기, 분포 및 분사각이 결정되는 미립화 과정, 증발 및 혼합기 형성을 수반하는 혼합과정, 여러 단계의 화학반응, 화염, 액적, 연소실 벽과 연소 가스간에 일어나는 대류 및 복사열 전달과정, 액적들과 기체간의 2상유동시 수반되는 와류 및 난류유동의 과정들로 복합되어 있으므로 현재까지 나온 이론이나 실험적 결과들로는 이 복합적 연소유동을 정확히 해석하기는 불충분한 실정이다.

현재까지 이들 현상 및 과정에 대한 개별적 또는 복합적인 연구결과가 많은 과학기술자들에 의하여 보고 되었으며, 이 결과들은 Feath^(1,2), Williams⁽³⁾, Chigier⁽⁴⁾와 Bellen⁽⁵⁾들에 의하여 총괄적으로 분류 또는 종합 검토 되었다. 여기에서는 Chiu 그룹^(6,7,8,9,10)이 제안해 온 소위 “집단연소모델(Group Combustion Model)”을 종합 정리 하였다.

2. 집단연소모델 (Group Combustion Model)

액체연료가 분사노즐을 통하여 계속하여 미립화될 때나, 주기적으로 분사하여 액적군(droplets cloud)을 이루어 연소할 때 화염은, 각 액적의 주위에서, 각 액적들이 그들 하나하나의 주위에 형성되는 화염에 대한 연료공급으로 이루어져 연소하는 단일액적연소(single droplet combustion)라는 견해가 지배적이었다. 이 견해는 액적군내의 액적의 수밀도(number density)가 적고 액적의 크기 또한 미세한 경우에만 나타나는 현상으로, 일반적으로 어느 경우에도나 사용된다는 것은 의문시 되어 왔다. 실제 연소기에서의 액적군은 수밀도가 상당히 크기 때문에 액적들 서로 간의 집단적 상관작용(collective behavior)으로 인하여 액적군내에는 산소가 침투할 수 없는 농축 기체화된 연료층을 형성함과 동시에 액적군 주위로부터의 열전달을 저지당하여 착화온도 이하의 불가연성 혼합기를 형성한다. 그러므로 액적군내에 존재하는 불가연성 혼합기는 액적군 밖으로 확산되어 액적군 경계에서부터 얼마간 떨어진

위치에서 산소 또는 공기와 혼합하여 가연성 혼합기를 형성, 커다란 외피화염(envelope flame)으로 연소한다. 이 때의 연소상황은 액적군이 하나의 기체연료 공급원 구실만 하고 기체연료와 산소가 따로따로 공급되는 가스확산화염(gaseous diffusion flame)과 비슷하다. 이 연소상태를 단일액적연소와 구별하기 위하여 개괄적으로 “집단연소(group combustion)” 또는 “외부집단연소(external group combustion)”라 한다. 또한 액적군내의 수밀도가 감소하면 액적들로부터 증발, 확산되어 나오는 연료량이 감소하며 주위에 나타났던 외피화염은 액적군 경계로 접근한다. 수밀도가 더욱 감소하면 외피화염은 마침내 액적군 내부로 침투, 어떤 위치에 나타나며 이때 외피화염 외부에 있는 액적들은 각각이 단일액적연소상태로 되고 내부의 액적들은 증발하여 외피화염에서 집단적으로 연소한다. 이 때의 상태를 내부집단연소(internal group combustion)라 부른다. 또한 액적군내의 수밀도가 매우 클 때는 액적군이 하나의 액체연료 덩어리 같은 역할을 하므로써 액적군 내부에서는 증발이 없고, 단지 경계면에서만 기체화된 연료를 공급하여 외부집단연소와 비슷하게 연소하는 경우도 생각할 수 있으며, 이 경우를 외부피복연소(external sheath combustion)라 한다.

Chiu 그룹은 집단연소이론(group combustion theory)^(6~10)으로 위에 언급한 현상들을 예측 해석 하였으며 이 이론은 과거의 여러실험^(11,12,13)들에서 보고된, 두 개 또는 그 이상의 액적들이 연소할 때의 현상들을 이론적으로 설명 하였다. 이 보고들에 의하면 두 개의 액적이 연소할 때 어떤 경우에는 두 액적이 외피화염에 의하여 연소한다고 관측되었다. 집단연소모델은 내부집단연소, 외부집단연소 또는 단일액적연소가 일어날 수 있는 경우를 집단연소수(group combustion number)라는 무차원수로 도입, 예측하였다. 집단연소 수는 액적군이 정지상태에 있을 때와 계속 유동하고 있을 때의 두가지 경우가 있는데 그들을 각각 첫번째집단연소수(1st kind group combustion number)와 두번째집단연소수(2nd

이며, N 은 액적군내의 모든 액적 수를 의미한다. 위의 결과들은 정상 상태하의 연소상태이며 비정상 상태에 대한 집단연소 모델은 현재 연구 진행 중이다. 위의 결과들을 이용, 현재 산업에 이용되고 있는 중소형 액체연료 연소기의 운전조건을 검토한 결과 집단연소 수가 1 또는 그보다 큼으로 해서 외부집단 연소 또는 내부집단 연소상태로 연소하며, 터보연진 연소기의 경우 G_1 이 10보다 큼으로 해서 외부집단연소가 일어난다.

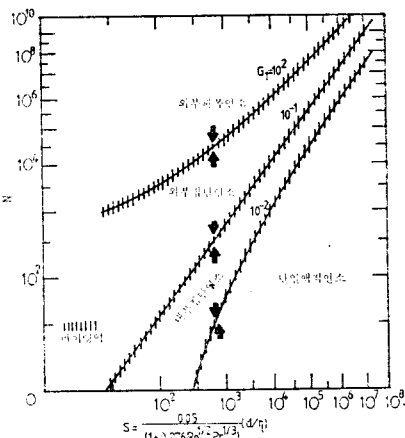


그림 4 액적의 수밀도와 액적간의 거리에 따른 연소상태의 변화

2.2. 분사유동하는 액적군의 경우 (Group Combustion of Liquid Fuel Spray)

분사된 액적들이 유동하며 연소할 때 유동장은 액적들과 주위의 혼합기로 구성된 2상유동(two phase flow)이다. 이를 유체역학적으로 해석하는 데는 두가지 모델, 즉 부분균질유동모델(locally homogeneous flow model: LHF)과 2상유동모델(two phase flow model: TPF)이 있으며, LHF 모델은 각 상간의 질량, 운동량 및 에너지의 전달이 전체적인 유동에 비하여 매우 빠르므로, 2상이 운동학적으로나 열역학적으로 평형상태를 이룬다는 가정에 기본을 두었다. LHF 모델은 분산(disperse)된 상의 운동량이 연속상(continuous phase)의 그것에 비하여 적을 때, 즉 액적의 크기가 작고, 수밀도가 적을 때만 사용가능하며, 이 모델은 TPF 모델에 비하

여 계산과정이 간단하며 안정되어 있는 것이 장점이다. TPF 모델은 각 상간의 질량, 운동량 및 에너지의 전달을 고려함으로써 어느 경우이나 사용가능하나 계산과정이 복잡, 불안정하며 또한 액적의 크기 및 분포상태, 초기 2상간의 상대속도와 액체 미립화에 대한 자료가 요구된다.

Chiu 그룹은 분사유동하는 액적들에 대하여도 집단연소모델을 적용, 화염의 구조 및 성질등을 해석하였다^(9,10,14). 분사유동연소에 대하여 집단연소이론을 적용하였을 때도 정지된 액적군의 연소와 같이 외부집단연소, 내부집단연소와 단일액적연소로 대별되며, 그림 5는 여러가지 연소상태들을 간략하게 도시한 것이다.

Chiu et. al⁽⁹⁾에 의한 분사시 집단연소모델은 촉매칭의 분사제트화염에 대하여 TPF 모델에서 각 상간의 상대속도가 없다는 가정하에 시도되었다. 또한 연소시 화학반응은 일단계 발열반응이고, 반응시간이 유동시간에 비하여 매우 짧으며, Lewis 수가 1이라는 가정하에 Schvab Zeldovich 변형을 채택했다. 액

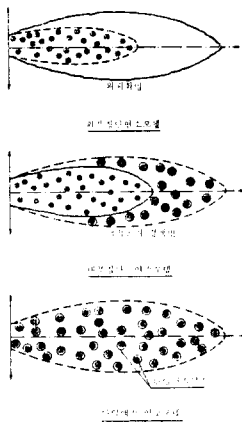


그림 5 분사된 액적군의 여러가지 연소상태

$$G_2 = \frac{G_1 D}{L U_0}$$

여기에서 G_1 은 첫번째 집단연소 수, L 과 U_0 는 연소가 시작되는 위치의 액적군의 반경과 중심선에서의 유동속도이다. G_2 는 액적들과 혼합기 간의 열전달과 유동속도에 의한 대류열전달의 비를 의미하며, 정지된 액적군의 연소상태와 같이 G_2 가 큰 값에서 감소하면 액적들은 외부피복연소, 외부집단연소, 내부집단연소 및 단일액적

연소의 순으로 연소상태가 변한다.

Kim 과 Chiu^(10,14)는 위의 모델을 보완하기 위하여 TPF 모델에서 상대속도의 고려는 물론, 어떤 연소상태에나 적용할 수 있는 집단연소모델을 개발, 수치해석으로 분사제트의 형태를 가진 연소 유동장을 해석 하였다. 이들의 결과로써 두 번째 집단연소 수가 화염의 구조 및 성질을 결정 지우며, 초기 액적의 크기와 분사속도가 수밀도에 비하여 영향이 크고, 분사각의 영향은 적다고 요약된다. 이 결과들은 Chigier⁽¹⁵⁾, Hayasi 와 Kumagi⁽¹⁶⁾과 Onuma et. al^(17,18)들이 실험으로 보여준 경향과 일치 하였다. 실험으로 관찰된 연소상태는 대부분이 조밀한(dense) 액적군을 이루므로 외부에서 가스외피화염(gaseous envelope flame)으로 연소하며, 이것은 가스의 난류확산 화염(turbulent diffusion flame)과 비슷한 현상을 보여 준다고 보고 되었다.

3. 결 언

위에서 검토한 집단연소모델은 액적군의 연소상태를 예측할 수 있는 모델이므로 더욱 발전시킴으로써 새로운 연소기의 개발에 도움을 줄 것을 기대한다. 이 모델의 발전을 위하여는 분사시 액적의 미립화 과정, 점화전과 점화시의 현상에 대한 연구가 첨가되어야 하며, 2상유동에 대한 난류유동모델과 화학반응식 및 반응속도에 대한 연구 및 복사열전달등의 첨가와 액적분포상태에 대한 자료의 이용이 요망된다. 이들을 뒷받침하기 위하여는 많은 실험적 연구가 또한 요구된다 하겠다.

참 고 문 헌

1. Feath, G.M., "Spray Combustion Models-Review", AIAA 17th Aerospace Science Meeting, Preprint No. 79-0293, 1979
2. Feath, G.M., "Current Status of Droplet and Liquid Combustion", Prog. in Energy Comb. Sci., Vol. 3, 1977
3. Williams, A., "Combustion of Droplets

- of Liquid Fuels: A Review", Comb. and Flame, 21, 1973
4. Chigier, N., Energy, Combustion and Environment, McGraw-Hill, N.Y., 1981
5. Bellen, J. and Summerfield, M., "The Theoretical Examination of Assumptions Commonly Used for Gas Phase Surrounding a Burning Droplet", Comb. and Flame, 33, 1978
6. Suzuki, T. and Chiu, H.H., "Multi-Droplet Combustion of Liquid Propellants", Proceeding of the 9th (international) Symposium on Space Technology and Science, 1971
7. Chiu, H.H. and Liu, T.M., "Group Combustion of Liquid Droplets", Comb. Sci. and Tech., 17, 1977
8. Chiu, H.H., Kim, H.Y. and Croke, E.J., "Internal Group Combustion of Liquid Droplets", 19th Symposium(International) on Combustion, Israel, 1982, to be appear on the 19th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, 1983
9. Chiu, H.H., Ahluwalia, R. J., Kho, B. and Croke, E.J., "Spray Group Combustion," AIAA Paper No. 78-75, Presented at the AIAA 16th Aerospace Science Meeting, 1978
10. Kim, H.Y. and Chiu, H.H., "Group Combustion of Liquid Fuel Sprays", AIAA Paper No. 83-0150, Presented at the AIAA 21st Aerospace Science Meeting, 1983
11. Sangiovanni, J. and Dodge, L., "Observation of Flame Structure in the Combustion of Mono-dispersed Droplet Streams", 17th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1979
12. Labowsky, M. and Rosner, D.E., "Evaporation-Combustion of Fuels", Advance (274 페이지에 계속)