

<論 文>

액체연료표면에서의 화염 확산에 관한 연구

김 한 석* · 백 승 욱** · 문 정 기*

(1988년 10월 18일 접수)

An Experimental Investigation on Flame Spreading Over Liquid Fuel Surface

H. S. Kim, S. W. Baek and J. K. Moon

Key Words : Flame Spreading Velocity(화염 확장속도), Barrier(장애물), Forced Convection(강제대류), Surface Flow(표면유동)

Abstract

Flame spreading over a hydrocarbon fuel surface has been investigated for liquid fuels such as kerosene and diesel, using thermocouple. Without forced convection, it was clearly found that the flame spreading was mainly controlled by the liquid fuel surface flow. Furthermore, the radiative heat transfer was dominant over a conductive heat transfer in kerosene. But in diesel the latter was found to be more influential than the former, when the direction of windflow was the same as that of flame spreading. The oscillation period and amplitude of the flame spreading velocity increase if the windflow is blowing in the direction of the flame spreading velocity, and decrease if the direction of windflow is blowing against the flame spreading direction.

1. 서 론

자동차나 선박, 로켓 등에서 연료의 누출, 사무실이나 공장에서 난방용 연료가 었질러지는 경우 자연점화나 강제점화에 의하여 생긴 화염이 연료의 표면을 따라 번져 나가게 되는데 이것이 유류저장소나 폭발성 물질에 접촉하게 되면 재해가 일어나게 된다. 이것의 방재에 대한 연구의 일환으로 화염확장 속도에 대한 정보가 필요하며, 이에 대한 명확한 이해와 정확한 예측을 하기 위한 규명이 필요하다. 액체연료의 화염확장의 기구는 초기온도가 연료의 인화점(flash point)보다 낮은 경우, 화염으로부터의 열전달에 의하여 산소와 반응을 하는 화

산이 반응을 지배하게 되는 확산화염을 형성하게 된다. 또한 액체연료의 경우 국부적 온도변화에 의한 연료의 내부유동이 존재하게 된다. 따라서 화염의 확산은 화염으로부터의 열전달뿐만 아니라 연료의 유동도 영향을 미친다.

공기의 유동이 없는 경우 화염으로부터의 전도, 복사에 의한 열전달 그리고 연료의 표면유동에 의하여 화염확장이 결정된다. 전도는 연료고유의 성질에 관계되며, 복사열전달은 화염의 형상에 따라 결정된다.

액체표면에 있어서 온도의 변화에 의하여 표면장력이 변화하게 되는데 이것이 액체의 표면유동을 일으키는 주원인이 된다. 공기의 유동이 있는 경우 공기의 방향과 속도는 대류열 전달과 표면유동 화염형상의 변화에 의한 복사열 전달 등에 영향을 미친다.

*한국기계연구소 방폭기기실

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

연료의 초기온도가 연료의 인화점보다 높은 경우에는 자연기화된 연료가 공기와 미리 혼합된 상태에서 화염이 확장되어 나간다. 따라서 화염의 확장속도는 화염으로부터의 열전달뿐만 아니라 초기 온도의 영향을 많이 받는다.

화염확장에 대한 연구는 여기에 관여되는 각 열전달 및 표면유동들을 각 경우에 따라 분류하여 수행되어 왔다. K. E. Torrance⁽²⁾와 R. L. Mahajan은 화염확장에 중요한 영향을 주는 표면유동의 원인인 표면장력, 부력, 화염확장속도, 프란틀(Prandtl)수, 연료의 깊이 등을 열거하였으며, 표면유동에 영향을 주는 주된 요인은 표면장력이라는 것을 이론적인 방법으로 예상하였다.

연료의 표면유동은 K. Akita⁽³⁾가 메타놀(Methanol)을 사용하여 사진촬영을 하였으며, 메타놀에 대해 외부 공기흐름의 방향과 속도, 연료의 초기온도가 화염확장속도에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서도 실험이 수행되었다⁽⁴⁾.

본 실험에서는 액체연료인 석유와 등유를 사용하여 전도, 복사, 대류, 연료의 표면유동 등이 각각 어느 정도 화염확장에 영향을 주는가를 예측하기 위하여 위의 각각을 제어할 수 있는 장애물을 설치하였으며, 연료의 깊이에 의한 화염확장의 영향을 알아보기 위하여 3가지 종류의 깊이에 대하여 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같으며, 기름그릇의 깊이를 5cm, 10cm, 15cm의 3종류로 하였으며, 옆면에

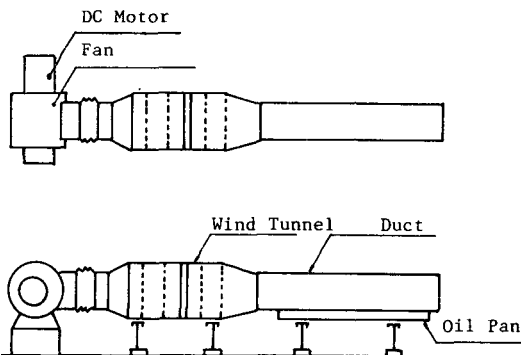


Fig. 1 Description of wind tunnel, duct and pan

의한 화염확장의 방해물 피하기 위하여 너비를 15cm로 하였고, 그릇의 바깥으로의 열손실을 억제하기 위하여 그릇을 이중구조로 하여 그 사이에 단열재를 넣었다. 액면 위의 공기의 유동을 조절하기 위하여 관로를 설치하였으며, 관로 내의 공기의 난류강도를 줄이고 속도를 균일하게 하여 주기 위하여 풍동을 송풍기와 관로 사이에 설치한다. 원하는 바람속도를 얻기 위하여 속도조절의 쉬운 직류전동기(7.5kW)를 사용하며, 여기에 RPM controller를 설치하였다. 초기점화는 직경 0.6mm의 열선을 연료표면과 평행하게 설치하였으며, 연료에 따라서 적당한 전압을 가해주기 위하여 전압조정장치를 설치하였다. 화염의 확장속도의 측정은 응답속도 1/20sec인 직경 0.3mm의 C-A(Chromel-Alumel) 열전대를 사용하였는데 열전대로부터의 신호는 직류증폭기를 통하여 응답속도가 700Hz의 오실로그래프로 받는다.

2.2 실험방법

화염의 확장속도를 측정하기 위하여 열전대를 연료표면 위에 10cm 간격으로 11개를 설치하였다. 화염의 확장속도는 10cm 구간의 평균화염확장속도를 측정하여 초기 점화위치로부터 10cm의 간격으로 화염확장속도를 측정하였다. 열선에 가해주는 전압은 등유의 경우 55V, 8A, 경유의 경우 80V, 11A로 하였으며, 유온이 25°C인 상태에서 실험을 수행하였다. 바람의 속도는 마이크로 마노메터를 사용하여 관로 중심에서 피로트튜브를 사용하여 측정하였다.

화염확장에 영향을 미치는 화염으로부터의 복사, 대류열전달, 연료면 내의 열전도, 그리고 연료의 표면유동 등이 화염확장에 각각 어느 정도 작용하는가를 예측하기 위하여 각각의 작용을 조절할 수 있는 형상과 재질로 장애물을 Fig. 2와 같이 만들었다. 장애물이 있을 때와 없을 때의 화염이 통과하는데 걸리는 시간의 차이로 지연시간을 계산하여 각각의 영향을 예상하였다.

화염으로부터의 복사열을 제어하기 위하여 두께 5mm 석고판을 A와 같이 duct 전면에 설치하였고, 액체표면 유동의 장애를 피하기 위하여 연료표면과 최소한의 간격을 두었다. 액체표면 유동의 제어는 두께 0.1mm 철판을 연료표면에 수직으로 C와 같이 설치하여, 그 철판을 통한 아랫면의 열손실을 줄이고, 철판의 열용량을 작게하기 위하여,

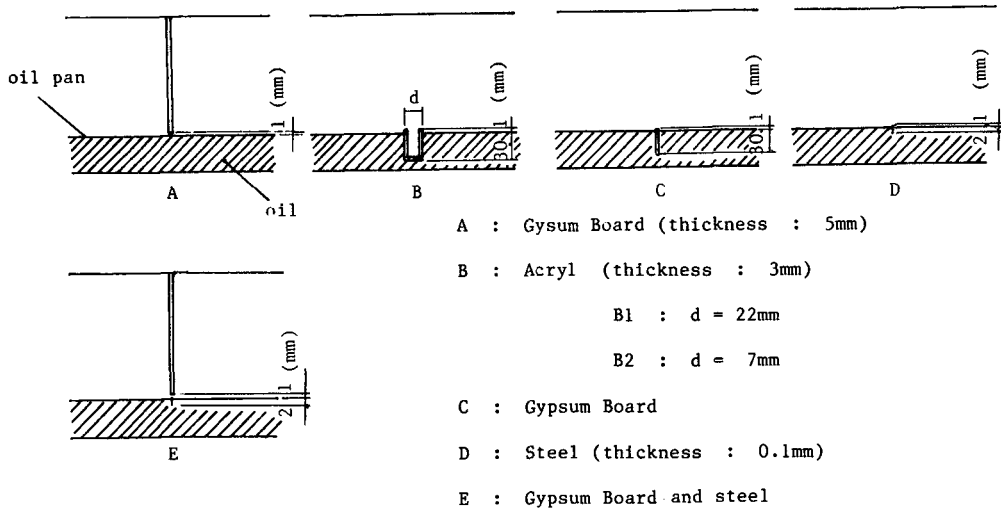


Fig. 2 Installation of flame barrier

그리고 연료의 소모율을 고려하여 폭을 최소한(3 mm)으로 하며, 복사열의 방해를 고려하여 철판 끝을 연료표면 위 최소한으로 낮추어 설치하였다.

액체 내의 전도에 의한 열전달의 영향을 알아보기 위하여 연료표면에 전도성이 다른 3가지의 장애물을 사용하여 지연시간의 차이를 비교한다.

바람의 속도에 의한 복사열전달의 변화와 대류열전달의 영향을 알기 위하여 표면유동을 장애물로 제어했을 때 바람의 세기와 화염의 지연시간의 관계, 그리고 복사에 의한 화염확장에의 영향을 알기 위하여 표면유동을 차단한 상태에서 복사열전달을 제어했을 때와 제어하지 않았을 때와의 지연시간을 비교하였다. 또한 장애물의 너비에 대한 복사열전달의 감소량을 알아보기 위하여 B와 같이 전도와 표면유동을 제어한 상태에서 복사열전달의 감소량을 2가지의 너비에 대하여 장애물에 의한 화염확장 지연시간의 차이로 비교하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 화염확장에 대한 전도, 대류, 복사의 영향

연료의 전도성의 영향을 알아보기 위하여 열전달 계수비가 $1 : 54.5 : 2.27 \times 10^6$ 인 장애물 B2, C, D를 사용하여 연료의 표면유동을 억제한 상태에서 연료면의 열전도만을 조절하였다. Fig. 3에서와 같이 등유의 경우 세 장애물에 의한 지연시간의 차이는 2% 미만이었다. 따라서 표면유동이 없는 상태에서

등유의 경우 장애물의 열전달계수에 관계없이 지연시간이 거의 일정하므로 이 경우 복사에 의한 열전달이 화염의 확장에 커다란 영향을 주는 것으로 보여진다. 경유의 경우에는 위의 장애물을 사용하였을 때 화염확장의 지연시간의 차이가 20%, 100%이었다. 따라서 경유는 화염확장에 있어서 등유보다는 전도가 차지하는 비율이 크다고 생각된다. 그러나 열저항계수의 비에 비하여 시간지연율이 적다는 것과 표면유동만을 제어한 장애물 D와 복사열전달을 제어한 장애물 E의 지연시간의 비교로 전도 뿐만 아니라 복사열전달도 무시할 수 없음을 알 수 있다.

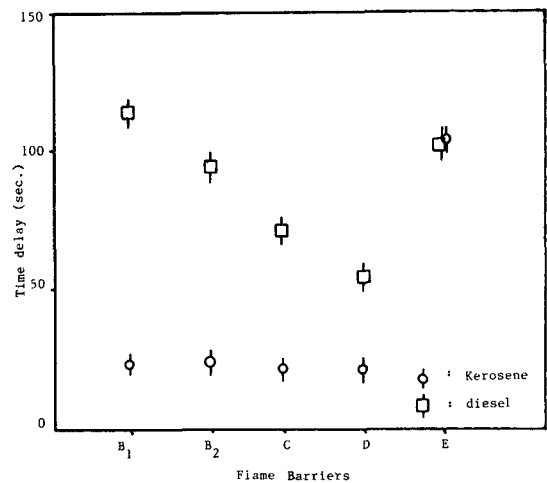


Fig. 3 Delay time of flame spreading with barriers

3.2 화염확장에 대한 연료의 표면유동의 영향

장애물 A는 연료면에는 아무런 영향을 주지않고 유면 위의 대기부분만을 차단하므로써 복사에 의한 열전달을 차단하고자 하였다. 연료보다 전도성이 큰 철판을 사용하여 연료의 표면유동만을 차단한 장애물 D의 경우 Fig. 3에서의 같이 지연시간은 등유의 경우 22.8sec, 경유우 경우 49.3sec이다. 장애물 A에 의한 지연시간은 등유와 경유 각각 1sec 미만이었다. 앞에서의 결과에서 보듯이 등유에 있어서 전도보다는 복사가, 경유에 있어서는 전도와 복사가 차지하는 비율이 거의 같으므로 위의 두 결과로 보면 표면유동은 등유와 경유의 화염확장에 있어 절대적인 영향을 미친다고 볼 수 있다.

2.3 바람의 영향

연료의 표면유동을 차단하기 위하여 장애물 C를 사용하였고 바람의 방향을 화염의 확장방향과 같게 하여 바람의 속도를 조절하였으며 바람의 속도와 지연시간은 Fig. 4에 나타나 있다. 등유의 경우 바람속도가 0.8m/sec 이상에서는 장애물에 의한 지연시간은 0에 가깝다. 따라서 등유의 경우 바람속도가 0.8m/sec 이상에서는 화염의 확장은 연료의 표면유동보다는 복사와 대류에 의한 열전달이 지배

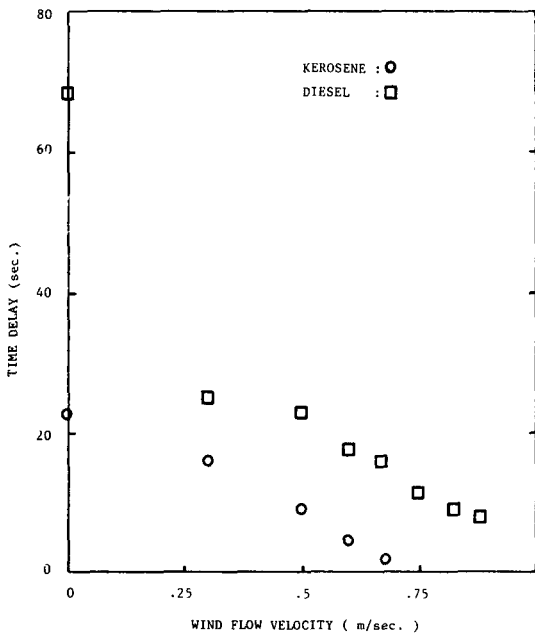


Fig. 4 Delay time of flame spreading with wind flow and flame barrier (c)

적이라고 볼 수 있다. 그러나 경유는 속도 0.5m/sec 이상에서 장애물에 의한 지연시간이 바람속도의 증가에 비하여 등유는 경유보다 감소되지 않는다.

3.4 화염의 평균 확장속도

등유와 경유의 평균화염 확장속도는 Fig. 5, Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 5와 Fig. 6으로부터 등유의

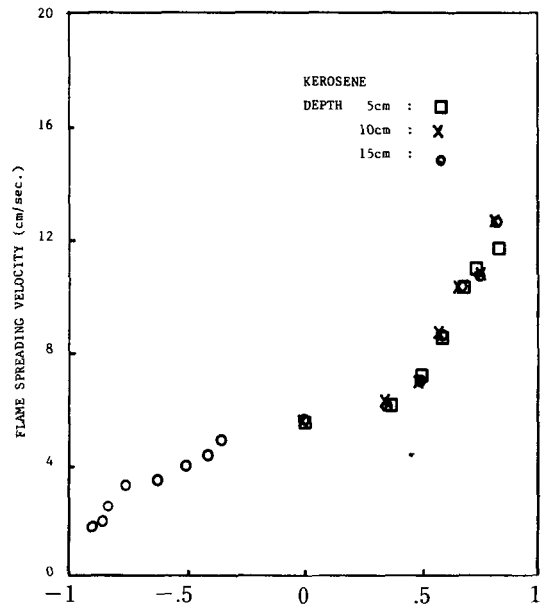


Fig. 5 Flame spreading velocity in kerosene

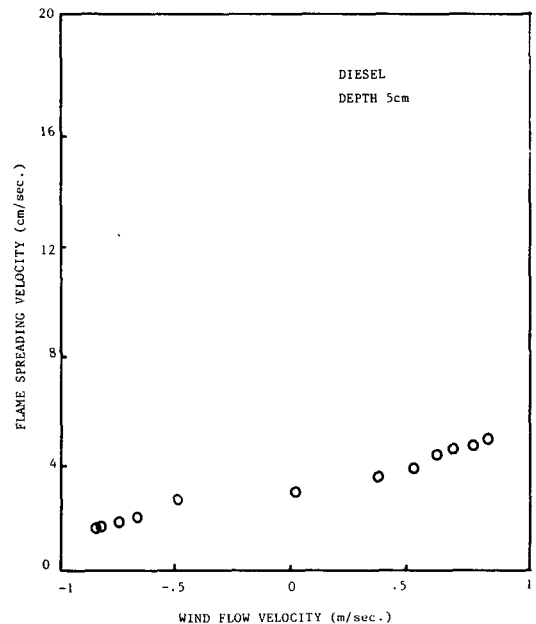


Fig. 6 Flame spreading velocity in diesel

경우 바람속도가 0.5m/sec 이상에서는 화염확장속도가 급격히 증가하나 경유의 경우에는 완만히 증가함을 알 수 있다. 바람이 화염확장과 반대인 경우에는 화염의 확장속도는 감소한다. 전도나 복사가 화염의 확장에 미치는 영향은 3.2의 결과로 표

면유동에 비하여 아주 작으므로 화염확장속도의 감소는 바람이 표면유동에 영향을 줌으로써 일어나는 것으로 생각된다. 연료의 깊이에 대한 평균화염확장속도는 Fig. 5와 같다. 이것으로 보면 깊이 5cm 이상에서 연료의 깊이는 화염의 확장에 영향을 미

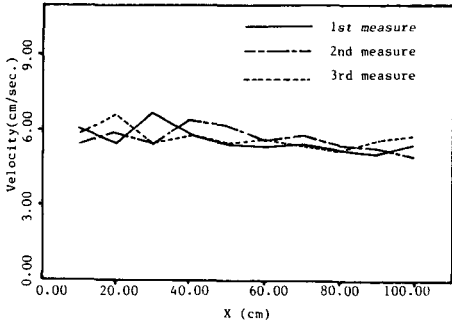


Fig. 7 Flame spreading velocity in kerosene from ignition point at natural state

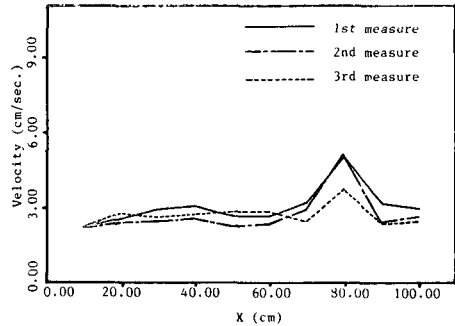


Fig. 10 Flame spreading velocity from ignition point at natural state

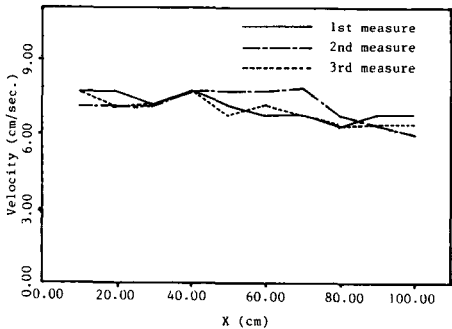


Fig. 8 Flame spreading velocity with distance from ignition point in kerosene when the direction of flame spreading is the same as that of wind flow (0.6m/sec) in kerosene

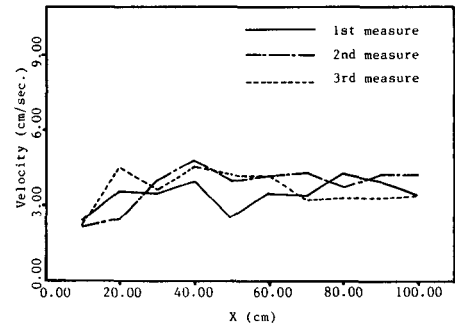


Fig. 11 Flame spreading velocity with distance from ignition point when the direction of flame spreading is same as that of wind flow (0.6m/sec) in diesel

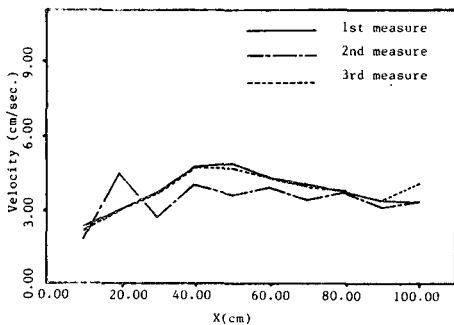


Fig. 9 Flame spreading velocity with distance from ignition point when the direction of flame spreading is against that of the wind flow (0.6m/sec) in kerosene

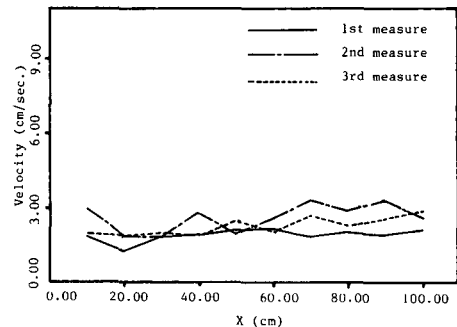


Fig. 12 Flame spreading velocity with distance from ignition point when the direction of flame spreading is against that of wind flow (0.6m/sec) in diesel

치지 않음을 알 수 있다.

3.5 화염확장속도의 변화

Fig. 7과 Fig. 12로부터 화염확장속도는 평균값을 기준으로 변화하는 것을 볼 수 있는데 이러한 변화는 각 연료의 점화점과 발화점의 차이에 의하여, 그리고 화염밀의 가열된 연료가 표면유동에 의하여 화염으로부터 밀려가고 그것에 의하여 화염이 가속되어 변화하는 것으로 생각된다. 공기속도가 증가할수록 전자는 무시할 수 있게 된다. 등유는 공기의 속도가 증가함에 따라 화염의 확장속도변화의 진폭과 주기는 커진다. 등유에 있어서 공기와 화염이 역방향인 경우 화염확장속도 변화의 진폭은 적어지며 주기는 짧아진다. 이것은 공기가 연료의 표면유동을 방해하기 때문에 생각된다. 공기속도가 증가할수록 초기 점화부분을 제외하면 화염확장은 일정속도로 접근한다. 경유의 경우에는 화염확장방향과 같은 방향인 경우에는 화염확장의 형태는 진폭은 증가하고 주기는 감소하는 결과를 얻었으며, 역방향인 경우 화염확장속도의 진폭과 주기는 짧아지는 등유와 같은 결과를 얻었다.

4. 결 론

(1) 화염확장에 영향을 미치는 화염으로부터의 복사, 연료면 열전도, 대류열전달, 연료의 표면유동 중 공기유동이 없는 경우에는 연료표면의 유동이 화염의 확장을 지배한다.

(2) 등유의 경우 순방향 바람속도 0.8m/sec 이상에서는 화염의 확장속도는 대류와 복사의 지배적 영향을 받는다.

(3) 화염확장에 있어 유면을 통한 전도의 영향은 두 연료의 열전도계수 같은데 비하여 등유보다 경유가 많이 받는다.

(4) 공기유동이 표면유동에 영향을 줌으로써 화염 확장속도 변화의 진동특성이 변한다.

(5) 기름그릇의 깊이에 의한 화염확장속도의 영향은 깊이 5cm 이상에서는 표면유동이 깊이에 영향을 받지 않는다.

후 기

본 연구는 한국기계연구소와 한국과학기술원의

지원으로 이루어진 것으로 관계되시는 분들께 감사를 드린다.

참 고 문 헌

- (1) Willams. F. A., 1977, "Mechanism of Fire Spread", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, p. 1281, The Combustion Institute.
- (2) Torrance, K. E., and Mahajan, R. L. 1975, "Fire Spread Over Liquid Fuel: Liquid Parameters", Fifteenth Symposium (International) on Combustion, The combustion Institute.
- (3) K. Akita., 1973, "Some Problem of Flame Spread Along a Liquid Surface", Forteenth Symposium (International) on Combustion, p. 1075, The combustion Institute.
- (4) Tarifa. C. S. and Torralbo. A. M., 1967, "Flame Propagation Along the Interface a Gas Reacting Medium", Eleventh Symposium (International) on Combustion, p. 533, The Combustion Institute.
- (5) A. C. Ferendes-Pello and T. Hirano., 1983, "Controlling Mechanism of Flame Spread", Combustion and Technology, Vol. 32, pp. 1~31.
- (6) A. Fernandez-Pello and F. A. Williams., 1975, "Laminar Spread Over PMMA Surfaces". Fifteenth Symposium (International) on Combustion Institute.
- (7) Toshisuke Hirano and Takuzuki., 1984, "Flame Spread Over Oil Sludge", Twentieth Symposium (International) on Combustion Institute. pp. 1611~1617.
- (8) Toshisuke Hirano and Takuji Suzuki., 1980, "Gas Movement in front of Flame Propagating Across Methanol", Combustion Science and technology, pp. 83~91.
- (9) Takuji Suzuki and Toshishuke., 1982, "Flame Propagation Across Liquid Fuel in Air", Ninteenth Symposium (International) on Combustion, p. 877, The Combustion Institute.
- (10) H. W. Emmons., 1965, "Fundamental Problems of the Free Burning Fire", Tenth Symposium (International) on Combustion, pp. 951~964, The combustion institute.
- (11) J. Quintiere. M. Harkleroad and 9. D. Walton., 1983, "Measurement of Material Flame Spread Properties", Combustion Science and Technology, Vol. 32, pp. 67~81.