

석유류 POOL FIRE에 있어서의 열적인 영향(I)

Thermal Effects in the Pool Fire of Fuels(I)

정 국 삼* · 강 민 호** · 이 덕 영**

Kook-Sam Chung · Min-Ho Kang · Doug-Young Lee

ABSTRACT

This paper was concerned with pool fire about many used kerosene and diesel oil. In order to know the thermal effects of kerosene and diesel oil, temperature change in the pool fire of these fuels were obtained as a variation of combustion time and the tank's height and diameter by using the data acquisition system. And fuel combustion velocity were derived as a function of the diameter and wall thickness of tanks and combustion time.

As a result, when the tank's height was 15cm, the greater diameter the higher temperature rising regardless of tank's wall thickness and fuels. But, when the tank's height is 30cm, temperature rising was not higher than 15cm. Also, temperature rising in the pool fire of kerosene much higher than diesel oil. Kerosene's combustion velocity was about two times faster than diesel oil. And, kerosene's combustion velocity was increased according to the increasing of tank's diameter and combustion time. But, diesel oil's combustion velocity was a little increased or not. Surrounding temperature change of tank with the pool fire was obtained temperature distribution of 0~35°C according to the change of tank's diameter and distance from the tank's wall.

1. 서 론

가연성 액체류의 저장탱크는 저장하고자 하는 내용물의 용도와 위험도에 따라 여러 형태의 것이

사용되나, 소용량을 저장하여 취급하는 경우에는 주로 open형태의 것을 사용하며, 이러한 open형태의 경우는 발화원에 의한 착화의 위험성을 가지고 있으며, 또한 연소 확대의 위험성을 지니고 있다.

* 충북대학교 공과대학 안전공학과

** 충북대학교 대학원 안전공학과

그리고, 탱크에 저장되는 가연성 액체류는 인화점에 따라 그 위험도가 달라지며, 위험성을 구분하는 경우에 있어서도 중요한 기준으로 작용한다. 이러한 가연성 액체류 중에서 석유류는, 1기압, 20°C에서 액상이며 인화점이 21°C~70°C로서, 소방법 구분에 의해서도 제2석유류에 포함되는 휘발성이 강하여 매우 주의해야 하는 물질로서 일단 발화되면 급작스러운 연쇄작용에 의해 화재로 전이할 수 있으며, 밀폐계에서는 발화원에 의해 가스폭발을 일으킬 수 있는 물질이다^{1~3)}.

이러한 석유류를 저장하는 탱크에서 발생하는 연소현상은 가연성 액체의 연소형식의 하나인, 액면화재(pool fire)의 형태를 취하며, 이러한 액면화재의 연소구조는, 발생된 화염으로부터 액면에 전달된 열로 인해 액온이 상승하여 가연성 증기가 발생하고 이 증기가 확산연소하는 과정을 반복하는 구조⁷⁾를 가지고 있다.

이러한 액면화재에 대한 연구는 국내에서는 전무한 실정이지만, 일본의 경우 지진에 의한 제반 저장탱크의 화재 발생에 따른 피해 예측 및 예방에 필요한 대책수립의 차원에서, 江守一郎⁴⁾은 바람을 받는 경우의 탱크화재에 대한 相似則을, 早坂洋史⁵⁾은 열 데이터를 이용하여 등유 pool fire의 방사열을 측정하였고, 다양한 축소형 모델의 탱크^{6,8~11)}를 이용하여 액면화재에 의해 나타나는 여러 현상들을 고찰한 湯本⁶⁾은 사진 및 방사열 데이터를 사용하여 화염의 높이를 추정^{12,13)}하는 등 여러 형태의 연구가 진행되었다. 그러나, 실제 저장탱크의 직경이 수십m에 달하여서 실제의 저장탱크에 의해 실험을 하는 것은 매우 어렵기 때문에, 대부분의 연구가 이러한 축소형 탱크를 제작하여 실험을 행하였었다.

본 연구에서도 이와 같이 축소형 탱크를 제작하여 가연성 액체인 석유류 중 일반적으로 널리 이용되는 등유(kerosene) 및 경유(diesel oil)를 사용하여, 탱크벽의 두께(Th)와 탱크 직경(D), 탱크의 높이(H)를 변화시켜 액면화재의 시간 경과에 따른 탱크 내의 온도(T)와 일정한 시간 간격 변화에 따른 액면강하속도⁶⁾(V), 그리고 탱크의 지름 및 탱크로부터 일정 거리의 변화에 따른 액면화재에 의한 대기온도의 변화 등의 열적인 면을 측정·해석하여 봄으로써, 탱크에 저장된 가연성 액체의 액

면화재에 따른 열적 영향을 고찰하여 보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같으며 세부적인 사항은 다음과 같다.

2.1.1 탱크

축소형 모델의 저장탱크인 탱크는 원통형으로서, Table 1에 그 종류를 나타냈으며, 탱크의 재질은 stainless-steel을 사용하였다.

Table 1 Classification of tanks

Height(cm)	Diameter(cm)	Thickness(mm)
15	25	1.2
	25	2.0
	30	1.2
	30	2.0
	45	1.2
	45	2.0
30	30	1.2
	30	2.0
	45	1.2
	45	2.0
	60	1.2
	60	2.0

2.1.2 Thermocouple

탱크 중심에서의 온도 변화값을 측정하기 위하여 지름이 3.2mm이고 길이가 45cm이며, 최고온도 900°C까지 측정 가능한 봉 구조를 한 K type의 CA (Cromel-Alumel) 열전대(thermocouple)을 사용하였다.

2.1.3 Data Acquisition System

열전대에서 측정되는 온도의 변화값을 LAB-TECK(software+hardware)이라는 Data Acquisition System을 사용하여 data화 하였다.

2.1.4 Hot-Wire Anemometer

액면화재가 일어나는 동안 풍속에 따른 액온의 변화 등을 알아보기 위하여 열선유속계(range : 0~30[m/s])를 사용하였다.

2.2 실험방법

본 연구에서는 액면연소에 따른 탱크 중심에서의 액내 온도의 변화, 시간 및 탱크의 지름 변화에 따른 액면강하속도의 변화, 탱크 지름의 변화 및 탱크로부터 일정거리의 변화에 따른 대기온도 변화 등을 측정하기 위하여 다음과 같은 방법으로 실험을 행하였다.

2.2.1 액면연소에 의한 탱크 중심에서의 액내 온도의 변화

액면연소가 진행되고 있을 때의 탱크 중심에서의 액내 온도 변화를 알아보기 위하여 다음과 같이 장치를 설치하였다. 우선, 탱크의 상단에서 부터 3cm간격으로 열전대를 삽입하기 위한 구멍을 뚫어 열전대의 끝을 수평으로 탱크의 중심에 일치시킨다. 탱크의 상단에서부터 1.5cm 떨어진 지점까지 경우 및 등유를 주입하고, 주입된 석유류에는 버너를 이용한 확산화염으로 발화를 일으킨 후, 10분 동안 연소시키며 2초 간격으로 탱크 중심에서의 액면강하에 따른 온도 변화값을 Data Acquisition System을 이용하여 data를 처리하고자 하였다.

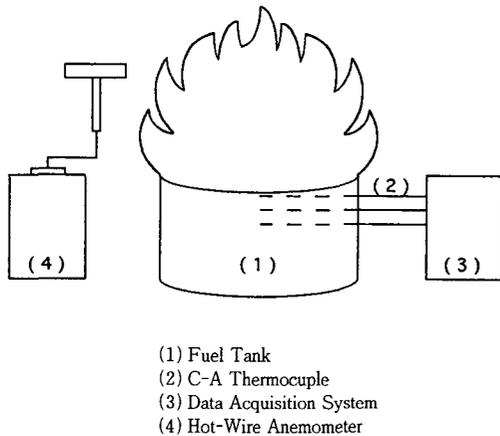


Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

2.2.2 액면강하속도의 측정

액면화재의 연소속도인 액면강하속도를 탱크의 지름 변화, 탱크벽 두께의 변화 그리고 일정 시간의 변화에 따라 살펴보기 위하여, 탱크에 일정량의 유류를 주입한 후 2분 연소후 소화, 4분 연소후

소화, 6분 연소후 소화, 8분 연소후 소화, 10분 연소후 소화 등 2분 간격으로 소화와 점화를 반복하여 액면강하속도의 변화를 측정하였다. 소화 후 다시 연소를 일으킬 때에는 최초의 양과 동일하게 맞춘 후 연소를 시행하였다.

2.2.3 지름의 변화 및 일정거리에서의 대기온도의 변화

탱크의 액면연소에 의한 대기의 온도 변화를 살펴보기 위하여, 탱크로부터 일정거리(1.0m, 1.5m, 2.0m, 2.5m, 3.0m)에 저장탱크와 같은 높이로 8개의 지점(동, 서, 남, 북, 북동, 북서, 남동, 남서)에 열전대를 설치한 후, 10분 동안 연소시키며 Data Acquisition System을 이용하여 대기온도의 변화값을 4초 간격으로 data화 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료의 물성

본 연구에 사용되는 Y회사 제품의 경유 및 등유의 물성을 알아보기 위하여 각각의 연료에 대해 인화점, 발화점, 밀도, 비중 등을 측정하였으며, 일반 문헌값과 비교하여 보았다. 인화점은 대체로 문헌에 표기된 범위에 존재하였으나, 발화점은 다소 높게 나타났으며, 비중은 다소 차이를 나타내었다. 측정된 이들 물성치는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Comparison experiment and reference data of fuels specification

Specification	Fuel	
	Kerosene	Diesel oil
Specific Gravity	0.89	0.91
	*0.79~0.83	*0.85~0.89
Flash Point	52°C	67°C
	*30~60°C	*50~70°C
Ignition Point	510°C	655°C
	*490°C	*640°C

*reference data

3.2 탱크의 높이 및 직경에 따른 액내의 온도분포

3.2.1 높이가 15cm일 때의 액내의 온도분포

Fig. 2 및 Fig. 3은 등유 및 경유가 저장된 높이

×직경=15cm×25cm의 탱크에 액면연소를 일으켰을 때, 각 열전대에서의 시간에 따른 액내 온도 변화를 나타낸 것이다. 이 경우, 액면화재에 의해 상승된 액내 온도가 등유는 130~210℃이었고, 경유는 100~135℃로 그다지 높지 않은 액내 온도를 나타내었다. 이는 탱크가 비교적 작은 직경을 가진 소용기이므로 액표면적이 작아, 이로 인한 단위시간당 연소되는 양이 적어 연소에 의해 발생하는 연소열이 적기 때문에 액내 온도가 높게 상승하지 못한 것이며, 그로 인해 화염의 성장도 크게 일어나지 않았다. 또한, 용기벽의 두께가 두꺼운 것이 얇은 것보다 액내 온도가 높게 나타났는데, 이는 용기벽의 두께가 얇은 것이 두꺼운 것 보다 탱크벽을 통한 열 손실이 크기 때문에 일어난 결과로 사료된다.

그리고, 등유의 액면연소가 경유의 경우보다 액내 온도가 30~90℃정도 높게 나타났는데, 이는 등유와 경유의 발열량은 비슷하나 등유의 연소성이 경유보다 우수하여, 등유의 단위시간당 연소하는 양이 경유보다 많아 발생하는 연소열의 차이에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

3.2.2 높이가 30cm일 때의 액내의 온도분포

Fig. 4~Fig. 9는 등유 및 경유가 저장된 탱크에

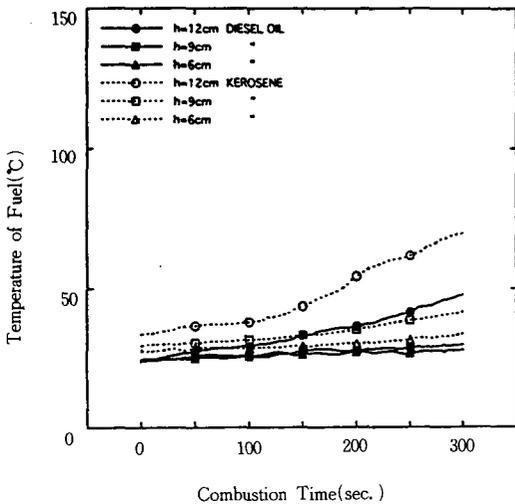


Fig. 2 Temperature change of pool fire tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=15cm, D=25cm, Th=1.2mm)

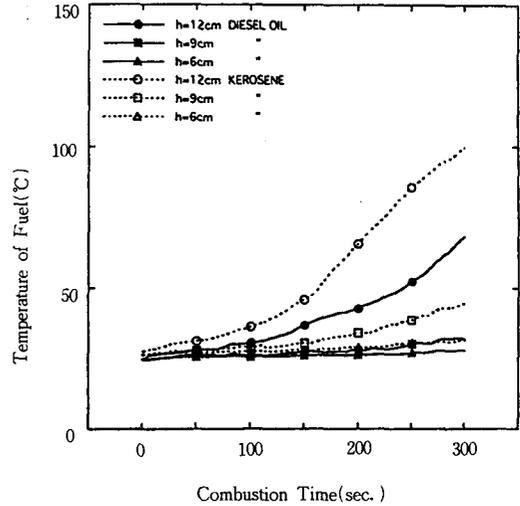


Fig. 3 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=15cm, D=25cm, Th=2.0mm)

액면연소를 일으켰을 때, 각 열전대에서의 시간에 따른 액내 온도 변화를 나타낸 것이다.

즉, Fig. 4 및 Fig. 5는 D=30cm일 때의 액내 온도 변화를 나타내는 경우로서, 등유인 경우, 용기의 벽두께가 1.2mm인 것은 220℃정도의 액내온도가 나타났으나, 용기의 벽두께가 2.0mm인 것은 220℃가 나타났었다. 그리고 경유인 경우, 용기의 벽두께가 1.2 및 2.0mm의 경우, 각각 160 및 170℃를 나타내었다. 이는 탱크 높이의 변화에 기인하는 것으로 보이며 높이에 대한 지름의 비(H×D=15cm×30cm일 때 1:2, H×D=30cm×30cm일 때 1:1)와 실험조건에 차이가(H×D=15cm×30cm일 때 습도:67%, 대기온도 27℃이고, H×D=30cm×30cm일 때 습도:44%, 대기온도 31℃)인 것으로 생각되나, 정확한 고찰은 어려웠다.

Fig. 6 및 Fig. 7은 D=45cm일 때의 온도변화를 나타내는 경우로서, 등유인 경우, D=30cm에 비하여 용기의 벽두께가 1.2mm인 것은 약 120℃정도 높은 345℃가 나타났으나 두께가 보다 두꺼운 2.0mm의 것은 변화가 나타나지 않았으며, 또한 경유인 경우에는, D=30cm에 비하여 용기의 벽두께가 1.2mm의 것은 약 두배인 320℃가 나타났으나 두께가 2.0mm의 것은 온도의 변화가 나타나지 않았다.

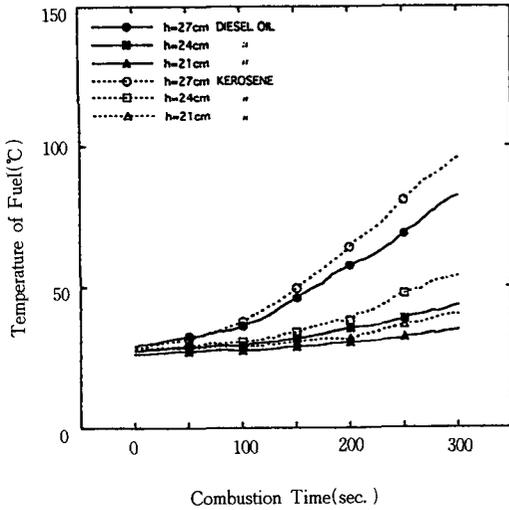


Fig. 4 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=30cm, Th=1.2mm)

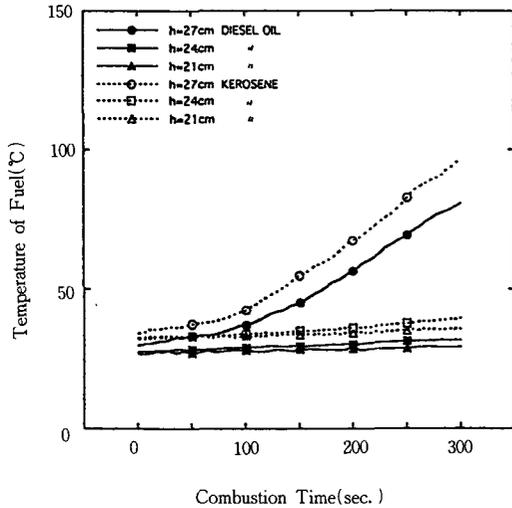


Fig. 5 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=30cm, Th=2.0mm)

Fig. 8 및 Fig. 9는 D=60cm일 때의 온도변화를 나타내는 경우로서, Fig. 6의 경우 보다 높은 액내 온도가 예상되었으나, 실제로는, 보다 낮은 온도

분포로서 등유가 약 270°C, 경유가 130°C로 파동형상의 온도변화를 나타내었다. 이는 탱크 직경이 크게 증가함에 따른 액표면적의 증가로 인한 화염

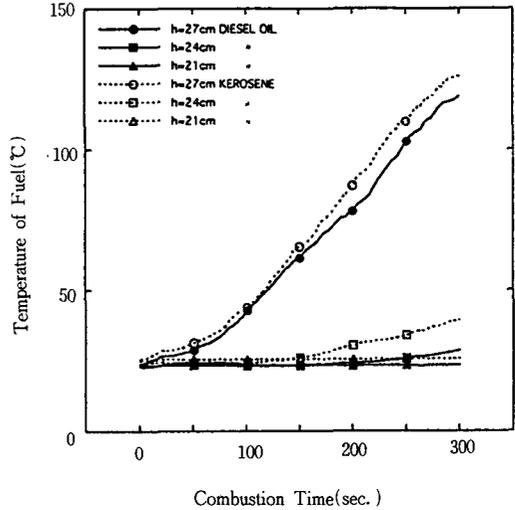


Fig. 6 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=45cm, Th=1.2mm)

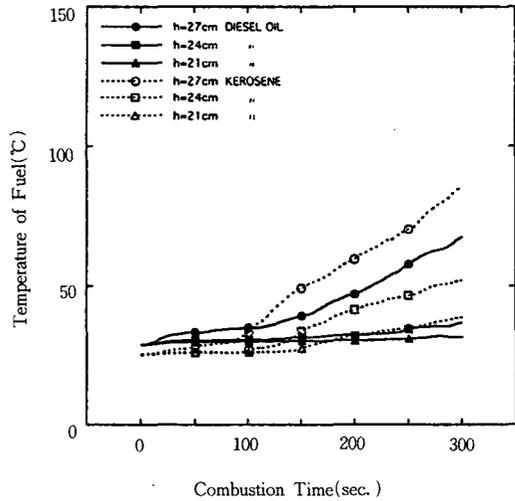


Fig. 7 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=45cm, Th=2.0mm)

의 난류현상과 바람에 의한 영향, 즉 풍속에 의한 영향으로 액표면에 유동이 발생되어 화염에서 가까운 상층부분의 물질과 화염에서 멀리 떨어진 하

층부분의 물질과의 물질교환이 일어났기 때문이다. 즉, 열전달 과정을 통한 화염에서 액내로의 열전달보다는 물질교환에 의한 열의 전달이 주로 지배하였기 때문에 파동모양의 온도변화를 나타낸 것으로 사료된다.

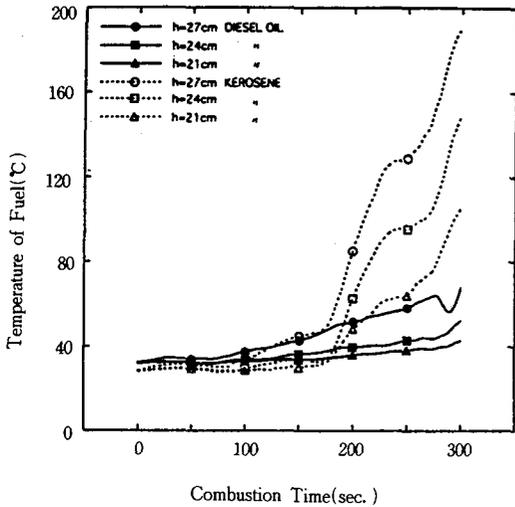


Fig. 8 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=60cm, Th=1.2mm)

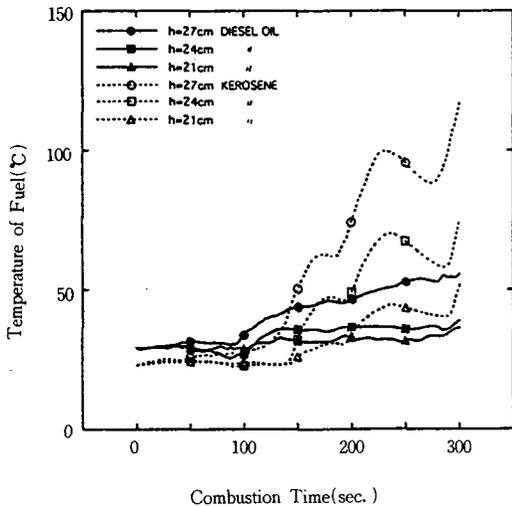


Fig. 9 Temperature change of pool fire in tank of kerosene and diesel oil as a time variation (H=30cm, D=60cm, Th=2.0mm)

3.3 액면강하속도

Fig. 10은 경유의 연소시간에서의 시간에 따른 액면강하속도의 변화를 나타낸 것이다. 용기벽의 두께가 1.2mm일 때, 일정 시간의 증가에 따른 액면강하속도는 거의 일정한 경향을 나타내었다. 그리고, 용기벽의 두께가 2mm인 경우에는, 연소시간의 경과에 따라 용기 직경별로 다소 차이가 있는 것으로 나타났는데, 이는 탱크의 상부를 피복하여 소화한 후, 탱크의 상부를 다시 개방하였을 때 대기로 발산된 증기에 의해 연소가 다소 지연됨에 따라 나타난 결과인 것으로 고찰된다. 또한, 경유의 액면강하속도 값은 산술평균으로 산출하였을 때 약 1.02~1.07[mm/min]으로 나타나 Table 3에 나타낸 문헌^{6,10)}값과는 많은 차이를 나타내고 있는데, 이는 본 연구의 실험조건이 시간을 단속적으로 행한 반면에 문헌의 실험조건은 연속적인 것이어서, 이에 따라 연소속도에 차이가 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 11은 등유의 시간에 따른 액면강하속도의 변화를 나타내는 경우로서, 경유와는 달리 시간의 증가에 따라 전체적으로 액면강하속도가 증가하다가 연소시간이 10분이 경과하면서 거의 일정한 값으로 나타났다. 그리고, 두께가 1.2mm인 경우의 탱크에서는, 탱크벽을 통한 전도 및 액체내의 대류가 열전달의 주요 역할을 하게 되어 액면강하속도 값이 두께가 두꺼운 탱크의 경우 보다 조금 큰 값을 나타내었다. 그리고, 두께가 2mm인 탱크의 경우, 8분과 10분의 연소시간에서의 값은 차이가 없이 거의 일정한 값에 이르렀는데, 이 때의 값은 2.2~2.4[mm/min]로, Table 3에 나타낸 문헌⁶⁾값과 비교적 일치하고 있었다. 그러나 전체적인 산술평균 값은 1.81~1.91[mm/min]로 나타나 경유와 마찬가지로 문헌과는 다소의 차이를 나타내고 있으며, 이것 역시 실험조건에 기인하는 것으로 사료된다. 또한, 등유의 연소속도가 경유의 경우 보다 약 2배 가량 빠르게 나타났는데, 이

는, 등유 및 경유의 탄수소가 9~19% 및 14~23%의 값을 가지고 있어 등유의 연소성이 경유보다 크기 때문에 상대적으로 액면장하속도가 빠르게 나타나기 때문인 것이다.

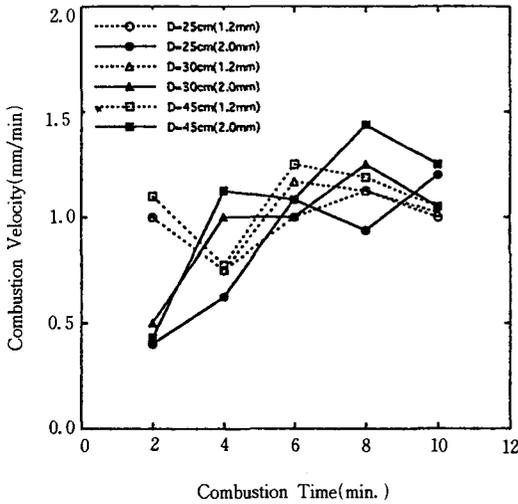


Fig. 10 Combustion velocity of diesel oil as a time variation

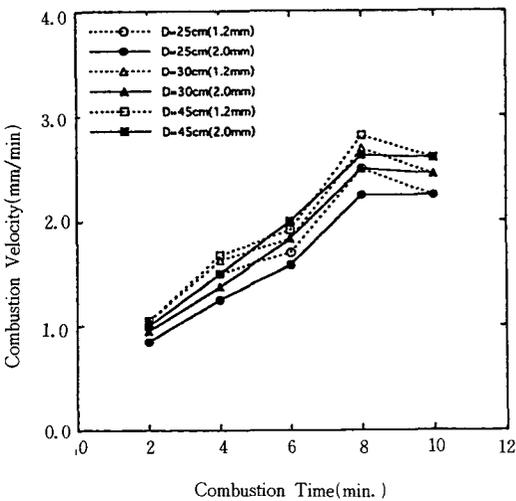


Fig. 11 Combustion velocity of kerosene as a time variation

Table 3 Combustion velocity as a variation of fuels

Fuels		Combustion Velocity [mm/min]
Experiment	Kerosene	1.81~1.91
	Diesel Oil	0.96~1.03
Reference	Kerosene	2.2
	Diesel Oil	1.5~2.0

3.4 액면연소에 따른 탱크 주위의 온도

Fig. 12는 등유의 pool fire에서의 탱크 측벽으로부터 수평거리로 일정거리(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0m)로 떨어진 8지점에서, 액면화재에 의한 복사열 및 연소열에 의해 변화되는 주위 온도의 산술평균 값을 나타낸 것이다.

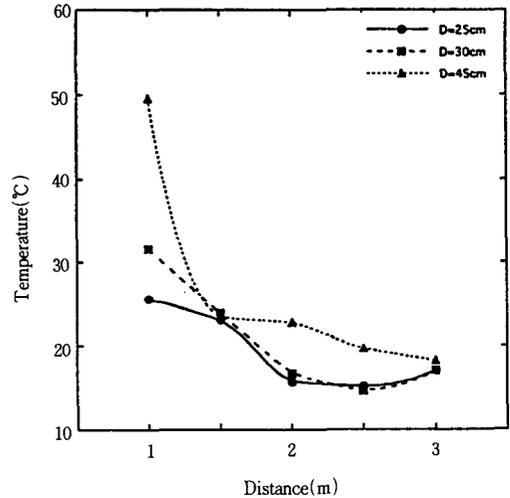


Fig. 12 Surrounding temperature change with pool fire of kerosene as a distance variation

즉, 1m의 떨어진 지점(dis. =1m)에서는 실험시의 대기온도와 주위 온도의 산술평균 값과의 차, 즉 $\Delta T = T_{\text{산술평균}} - T_{\text{대기}}$ 가 D=25cm에서는 11°C, D=30cm에서는 17°C, D=45cm에서는 35°C의 변화를 나타내었고, dis. =3m에서는 ΔT 가 D=25cm에서는 0°C, D=30cm에서는 1°C, D=45cm에서는 4°C의 변화를 나타내었다. 이는 탱크로부터 동일한 거리인 경우, 탱크 지름의 증가에 의한 화염의 성장으로 인한 연소열 및 복사열의 증가 때문에 탱

크 주위의 온도가 증가되면서 변화되는 것을 알 수 있었다. 또한, D=25 및 30cm에서는 dis. =1.5m 이상의 지점에서부터 거의 같은 변화폭을 나타내었는데, 이는 용기 직경의 차이가 크지 않아 발생하는 연소열 및 복사열의 양이 그다지 크지 않아 주위 온도의 변화가 적은 것으로 고찰된다. 그러나, D=45cm에서는 용기직경의 증대로 인하여 화염의 성장이 크게 일어나 연소열 및 복사열이 증대하여 D=25 및 30cm의 경우보다 다소 높은 온도차를 나타내고 있었다.

4. 결 론

이상과 같이 석유류의 액면화재에서, 탱크의 형상 변화에 따른 탱크 중심의 액내 온도와 액면강하 속도 및 탱크 주위 온도의 변화 등을 실험에 의해 측정하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탱크벽 두께 및 유류에 관계없이, 탱크벽의 높이가 15cm인 저장탱크의 경우에는 지름의 증가에 따라 액온은 300~390℃로 높게 상승하였으나, 높이가 30cm인 경우에는 지름의 증가에 따라 액온이 크게 상승하지 않았다.
- 2) 탱크 높이 및 탱크벽 두께에 관계없이, kerosene이 diesel oil의 액면연소보다 액온이 높게 상승하였다.
- 3) 지름 30cm이하의 탱크의 경우, 탱크벽의 높이 및 유류에 관계없이 탱크벽이 두꺼운 것이 액온이 높았으며, 지름이 60cm에서는 탱크벽 두께와 유류에 관계없이 화염의 난류현상과 바람에 의한 액표면의 유동으로 액온의 변화가 심하게 나타났다.
- 4) 등유의 액면강하속도는 연소시간과 탱크지름의 증가에 따라 일반적으로 증가하였으나, 경유는 약간 증가하거나 거의 일정한 값을 나타내었는 바, 전반적으로, 등유의 액면강하속도가 경유보다 약 2배 정도 빨랐다.

기 호 설 명

Th : Thickness of tank's wall [mm]
 D : Diameter of tank [cm]

H : Height of tank [cm]
 T : Temperature of fuel [°C]
 V : Combustion velocity [mm/min]
 h : Height of thermocouple [cm]
 dis. : 탱크 측벽으로부터 열전대까지의 거리 [m]
 T_{산술} : 산술평균 온도 [°C]
 T_{대기} : 대기온도 [°C]
 ΔT : 산술평균 온도와 대기온도와의 차 [°C]

참 고 문 헌

- 1) 鄭國三, 化學安全工學, 東和技術, pp. 40~41, 1993.
- 2) 金炳熙, 理化學辭典, 成文閣, pp. 56~268, 1983.
- 3) 金亨均, 化工藥品辭典, 韓國化學開發社, p. 1301, 1976.
- 4) 江守一郎, 風を受けた場合の液體燃料タンク火災に関する相似則, 安全工學, Vol. 17, No. 3, p. 145, 1978.
- 5) 早坂洋史, サーマルカメラによる燈油プール火災の放射熱計測, 安全工學, Vol. 31, No. 1, p. 9, 1991.
- 6) 湯本太郎, 石油火災, 安全工學, Vol. 19, No. 6, p. 360, 1980.
- 7) 金鴻, 陸演洙, 李謹悟, 鄭國三, 防火工學, p. 95, 1991.
- 8) Yumoto, T. : Heat Transfer from Flame to Fuel Surface in Large Pool Fires, Combust. Flame, 17, p. 108, 1971.
- 9) Kazutoshi Hasegawa : Experimental Study on the Mechanism of Hot Zone Formation in Open-Tank Fires, *Fire Safety Science-Proceeding of the Second International Symposium*, pp. 221~230, 1988.
- 10) Blinov, V.I. & Khudyakov, G.N. : Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 113-5, p. 1094, 1957.
- 11) Hottel, H.C. : Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids, *Fire Research Abst. and Rev.*, 1-2, p. 41, 1959.

12) 프로세스 기기구조 설계-貯槽, 世進社, pp. 55~56, 1992.

おける炎の高さの推定法, 安全工学, Vol. 19, No. 2, p. 89, 1980.

13) 湯本太郎, 放射熱データを使った石油火災に
