

디젤연료의 액면화재로부터 화염온도와 복사열 측정 Measurements of Flame Temperature and Radiation Heat Flux from Pool Fire with Petroleum Diesel Fuel

임우섭 · 최재욱[†]

Woo-Sub Lim · Jae-Wook Choi[†]

부경대학교 안전공학부
(2007. 6. 21. 접수/2007. 8. 22. 채택)

요 약

석유류 중에서도 차량, 선박, 보일러 등에 많이 사용되고 있는 디젤유는 휘발유나 등유보다도 연소시에 발열량이 높기 때문에, 화재 발생시에 큰 피해를 초래한다. 따라서 본 연구는 시중에 판매중인 디젤유를 이용하여 액면화재 실험을 하였으며, 연소시에 화염의 내부온도와 화염으로부터 발생하는 복사열에 대해서 측정하였다. 디젤유의 순간 최대화염온도는 900 °C 이상되는 것으로 나타났으며, 평균 최대화염온도는 800 °C 이상으로 나타났다. 또한 최대화염온도는 가연성 액체의 표면으로부터 5 H/D에서 나타났으며, 이 거리 보다 멀어질 수록 화염의 온도는 낮아졌다. 복사열의 경우 저장용기의 크기와 시료의 량에 따라서 크게 달라지는 것을 알 수 있었으며, 실험 용기의 크기가 0.5 m이고, 시료량이 13 mm와 20 mm에서는 각각 92.29 kW와 117.43 kW로 나타났으며, 크기가 1.0 m의 용기에서는 각각 364.35 kW와 405.88 kW로 나타났다.

ABSTRACT

Diesel, a kind of petroleum, which is used in vehicles, vessels, boilers etc causes great damage when a fire happens, because it has higher caloric value than gasoline or kerosene has at burning. Therefore, pool fire experiment was carried using diesel which is sold on the gas station and radiation heat flux that occurs from flame and inner temperature of flame at burning was estimated. The maximum instantaneous flame temperature of diesel was more than 900 °C, and the average of maximum flame temperature was 800 °C which occurred at 0.5 H/D distance from the surface of inflammable liquid, the distance has more long that has the lower the temperature of flame. In case of radiation heat flux, it grew to vary according to the size and amount of sample. When the size of a container for experiment was 0.5 m and sample layer was 13 mm and 20 mm, the radiant heat was 92.29 kW and 117.43 kW each. When the container was 1.0 m, it was 364.35 kW and 405.88 kW each.

Keywords : Petroleum diesel, Pool fire, Flame temperature, Radiation heat flux

1. 서 론

화석연료는 인류문명과 더불어 오랫동안 사용되어져 왔으며, 생활양식의 변화로 인하여 석탄에서 석유로 그리고 천연가스의 형태로 생활에너지의 형태가 바뀌어져 왔다. 이것은 보다 다루기 쉽고, 깨끗한 형태의 연료로 개선되어져 왔음을 의미한다.

그러나 최근에는 화석연료에 대한 환경오염 문제와

한정된 자원에 대한 문제가 부각되면서 친환경, 신개념의 바이오에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 바이오연료는 국내에서 2010년까지 전체 화석연료 소모량의 5%까지 확대하는 것을 목표로 하고 있으며, 국외에서는 이보다 높은 10%까지를 목표로 하고 있으나, 현재로서는 전체 화석연료 대비 5%를 넘지 못하는 실정이다.¹⁾

따라서 현재까지 화석연료는 산업사회의 주요 에너지원으로 자리잡고 있으며, 그 중에서도 자동차나 선박과 같은 운송기기를 비롯해서 보일러, 발전기 등과

[†] E-mail: jwchoi@pknu.ac.kr

같은 기관설비에 이르기까지 디젤엔진이 많이 사용되고 있다. 또한 휘발유나 등유 보다 연소시 발생하는 열량이 높기 때문에 화재로 인한 손실 및 위험성이 상대적으로 높은 것으로 나타나 있다.²⁾ 그러므로 디젤유에 대한 화염내부의 온도분포와 화염으로부터 발생하는 복사열에 대한 연구가 필요하며, 이러한 연구는 화재 발생시에 화염에 직접적으로 접한 부분에 대한 변형의 위험성이나, 화염 주변에 있는 물질의 열적 안정성에 대한 평가 자료로 사용되어 질 수 있다.

액면화재(pool fire)에 관한 연구는 국내에서 이 등³⁾이 작은 풀화재에서의 연기 특성에 관한 연구를 하였으며, 오 등⁴⁾은 헵탄을 이용한 액면화재의 연소특성에 관한 연구를 하였다. 국외에서는 원유의 액면화재 실험을 통한 화염의 온도분포에 관한 연구를 H. Koseki 등⁵⁾이 하였으며, F. Ferrero 등⁶⁾은 액면화재에서 발생하는 보일오버 현상에서 복사열을 측정하였다.

본 연구에서는 이러한 연구 결과들을 토대로 시중에서 판매되는 디젤연료를 이용하여, 화염의 온도분포와 순간최대화염온도, 평균최대화염온도를 측정하였다. 또한 거리에 따른 복사강도를 측정하여 복사열을 계산하였으며, 이러한 자료들은 국내에서 생산, 저장 및 취급되는 디젤연료에 대한 위험성 예측 및 화재 발생시에 대응 방안을 강구하는 기초 자료로 활용되기를 바란다.

2. 실험

2.1 실험장치

2.1.1 화염의 온도

화염의 온도를 측정하기 위하여 직경 0.32 mm의 K-type 열전대 온도계를 사용하였으며, 열전대 온도계의 위치는 시료 용기의 중심부에 설치하여 화염의 수직면에 있도록 하였고, 서로 다른 크기의 시료용기를 이용하여 화염내부의 온도분포를 측정하였다.

실험용기는 직경 0.5 m와 1.0 m 크기의 원형판(pan)을 사용하였으며, 용기의 깊이는 20 cm로 둘다 동일하다. 먼저 0.5 m 용기에는 4개의 열전대를 각각 액면을 기준으로 수직 높이 0.25 m, 0.50 m, 0.75 m, 1.00 m에 설치하였으며, 직경 1.0 m의 용기는 0.50 m, 0.75 m, 1.00 m, 1.25 m, 1.50 m, 1.75 m의 높이에 열전대 6개를 각각 설치하였다.

2.1.2 복사열

화염으로부터 발생하는 복사강도를 측정하기 위하여 RE-2, Tokyo Seiko Co.에서 제작된 라디오메타(radiometer)를 사용하였다. 이 라디오메타는 검출관이

Platinum Black으로 도금되어져 있고, 집광범위는 평균각으로 119.4°까지 검출할 수 있으며, 검출속도는 최고 0.3 sec까지 측정이 가능하다. 본 연구에서는 실험의 효율성을 위해서 검출속도를 1 sec 간격으로 하였으며, 시간변화에 따라서 연속적으로 측정되도록 하였다.

2.2 실험방법

Figure 1의 A와 B에 실험장치의 사진과 배치도면을 나타내었다. 도면에 있는 실험용기(pan)는 철판강판으로 제작된 것으로 중심부에 지지대(pole)를 설치하여 열전대를 장착하였고, 라디오메타와 열전대를 컴퓨터에 연결시켜 실시간으로 자료를 전송받았다.

실험 순서는 컴퓨터에서 열전대로부터 검출되는 온도와 라디오메타로부터 얻어지는 복사강도를 확인한 다음, 상온에서 나타나는 온도와 복사강도를 기록하고, 시료용기에 점화를 시켜서 실험을 하였다.

시료는 시중에서 판매중인 디젤연료를 사용하였으며, 시료의 양을 13 mm와 20 mm로 나누어서 실험을 하였고, 각 실험은 3회 이상 반복 실험을 하였다.

Table 1에는 실험에 대한 명칭과 조건을 나타내었다. 여기서 E가 의미하는 것은 실험(Experimentation)

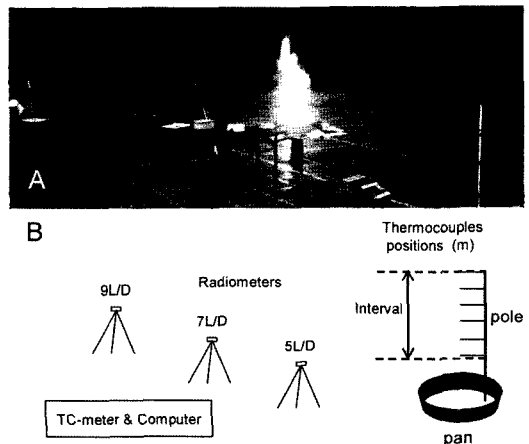


Figure 1. Layout of pool fire test.

Table 1. Test conditions of pool fire

Test Symbol	Pan Diameter (m)	Sample Thickness (mm)
E1 (D0.5-T13)	0.5	13
E2 (D0.5-T20)		20
E3 (D1.0-T13)	1.0	13
E4 (D1.0-T20)		20

의 약자를 사용한 것이고, 그 뒤에 번호를 붙여서 쉽게 구별 할 수 있도록 하였으며, D는 실험용기의 직경을 나타내고, 시료의 량은 두께 T로 나타내었다. 이하 그림 설명에서는 구체적인 조건 설명을 대신해서 Table 1의 Test Symbol로 나타내고자 한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화염온도

가연성 액체는 일정한 용기에 담겨 있는 상태로 저장 또는 취급되므로, 착화되어 연소가 일어나면 대부분이 액면화재의 형태를 지니게 된다. 디젤의 경우 다른 물질들 보다 화염이 강하게 형성되기 때문에 화염 내부의 온도 분포를 파악하는 것은 대단히 중요한 것으로서, 시간에 따른 화염의 온도분포 그래프로부터 순간최대화염온도와 평균최대화염온도를 찾을 수 있다.

Figure 2는 직경 0.5 m, 시료의 두께 13 mm에서 실험한 결과를 나타낸 것으로, 화염내부의 평균온도 분포는 액면으로부터 0.25 m에서 838 °C, 0.50 m에서 735 °C, 0.75 m에서 518 °C를 나타내었으며, 1.00 m에서

380 °C를 구하였다. 즉 액면으로부터 멀어질수록 화염 내부의 온도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 이러한 결과는 휘발유와 알콜류의 연소에 있어서 화염내부의 온도 분포와 유사한 경향을 나타내고 있다는 것을 알 수 있었다.⁷⁾ 또한 평균최대화염온도는 평균화염온도 분포 중에서 가장 높은 온도를 나타낸 것으로 0.25 m에서 측정된 838 °C이며, 여기서 가장 높은 온도인 순간최대화염온도 908 °C를 구하였다.

Figure 3은 직경 0.5 m, 시료의 두께 20 mm에서 평균온도분포를 나타낸 것으로 829 °C, 732 °C, 501 °C, 361 °C의 평균온도분포를 각각 나타내었으며, 순간최대화염온도는 912 °C로 나타났다.

Figure 4와 Figure 5는 동일한 용기의 크기인 직경 1.0 m에서 시료의 량이 서로 다른 13 mm와 20 mm를 나타낸 것으로서, 열전대의 위치는 각각 0.5 m, 0.75 m, 1.0 m, 1.5 m, 1.75 m로서 Figure 4의 조건하에서 평균 화염의 온도는 802 °C, 701 °C, 606 °C, 532 °C, 430 °C, 272 °C이었으며, 이때 순간 최대화염온도는 920 °C로 나타났다.

Figure 5에서 나타난 평균 화염온도는 801 °C, 695 °C,

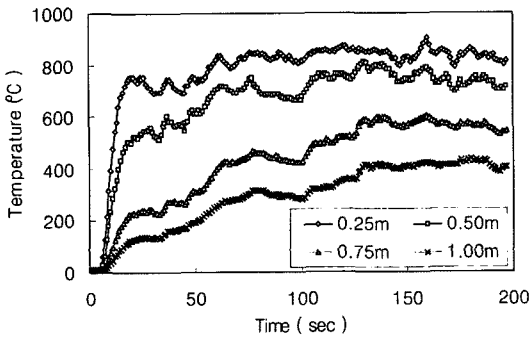


Figure 2. History of the flame temperature in E1(D0.5-T13).

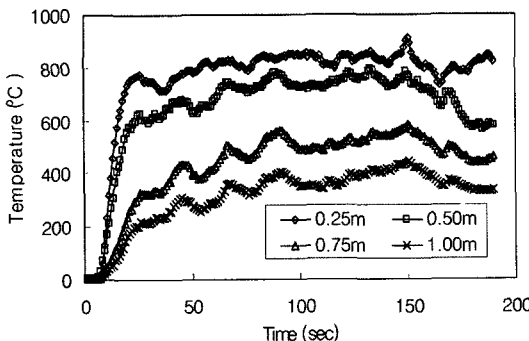


Figure 3. History of the flame temperature in E2(D0.5-T20).

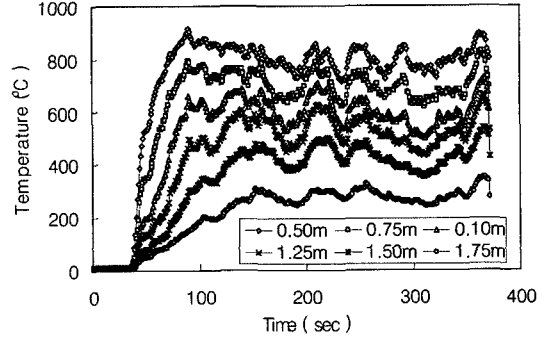


Figure 4. History of the flame temperature in E3(D1.0-T13).

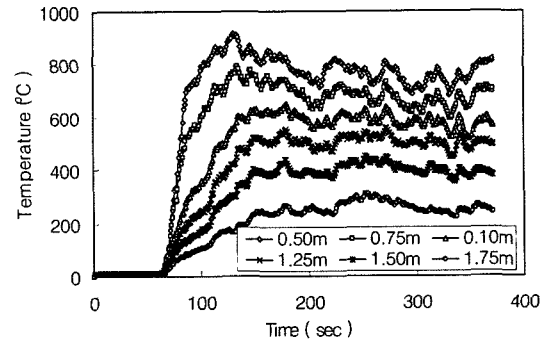


Figure 5. History of the flame temperature in E4(D1.0-T20).

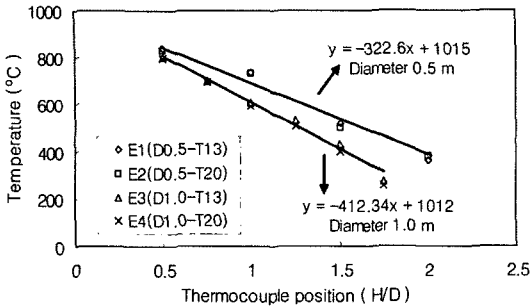


Figure 6. Temperature distribution along thermocouple position.

592 °C, 507 °C, 397 °C, 254 °C이었으며, 이때 순간 최대 화염온도는 926 °C로 나타났다.

Figure 6은 디젤연료의 평균화염온도 분포에 대한 변화를 나타낸 것이다. 여기서 x축의 H/D가 의미하는 것은 열전대의 위치(H; 높이)를 실험용기의 직경(D)으로 나누어준 값이다.

화염내부의 최고온도는 동일한 위치인 0.5 H/D에서 나타났으나, 1.0 H/D, 1.5 H/D로 갈수록 용기의 크기에 따른 화염내부의 온도 차이가 많이 나타났다. 이것은 화염내부의 온도분포는 용기의 크기에 따라서 달라지는 것으로 판단되며, 시료의 양에 대한 영향성이 적은 것으로 나타났다. 또한 직경 0.5 m에서는 화염의 온도 분포 기울기의 절대 값은 322.6이며, 직경 1.0 m에서는 412.3의 기울기를 나타내므로, 직경의 크기가 증가하면 온도분포 기울기가 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 복사열

복사열의 측정은 화염이 외부로 발산하는 열량의 변화를 계산하여 화재 발생시 화염으로부터 떨어져 있는 물체에 대한 영향성을 평가할 수 있다. 또한 보다 정확한 복사열을 구하기 위하여 서로 다른 위치에 라디오메타를 설치하여 각각으로부터 얻어지는 복사강도를 이용하여 복사열을 계산할 수 있으며, 서로 다른 위치의 값과 비교 검토함으로써 액면화재로부터 거리에 따른 피해 정도를 예측할 수 있다.

Figure 7-Figure 10은 라디오메타를 통해서 측정되어진 복사강도를 나타낸 것으로, 범례에 표시된 L/D가 의미하는 것은 시료용기로부터 라디오메타의 거리를 L이라 하고, 시료용기의 직경을 D라고 표시한 것이다. 따라서 전체 실험은 직경에 비례해서 동일한 비율인 5 L/D, 7 L/D, 9 L/D에서 실험을 하였다. 즉 용기의 직경이 0.5 m인 Figure 7, 8은 라디오메타가 시료용기로부터 2.5 m, 3.5 m, 4.5 m 떨어진 지점에 라디오메타를

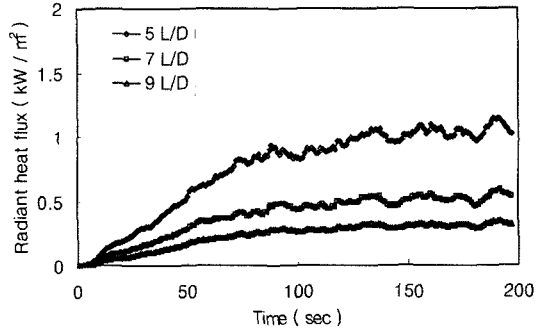


Figure 7. History of the radiant heat flux in E1(D0.5-T13).

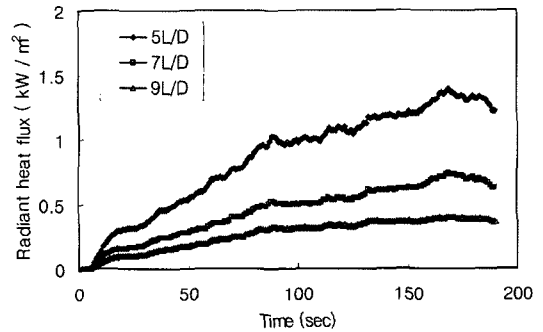


Figure 8. History of the radiant heat flux in E2(D0.5-T20).

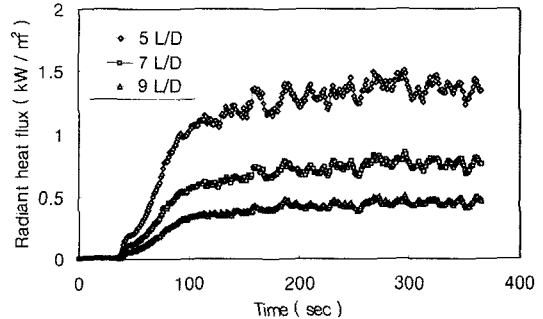


Figure 9. History of the radiant heat flux in E3(D1.0-T13).

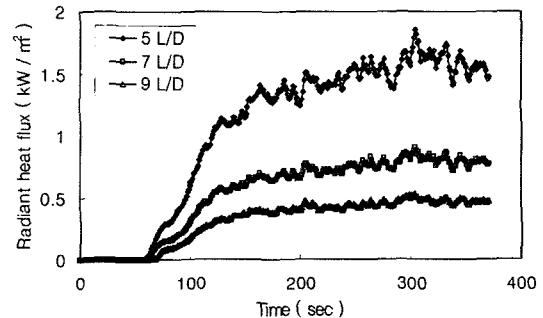


Figure 10. History of the radiant heat flux in E4(D1.0-T20).

각각 설치하였고, 용기의 직경이 1.0 m인 Figure 9, 10의 경우 5.0 m, 7.0 m, 9.0 m의 거리에 라디오메타를 설치하였다.

Figure 7은 직경 0.5 m, 시료두께 13 mm에서 구하여진 복사강도이며 5 L/D, 7 L/D, 9 L/D의 지점에서 각각 1.02 kW/m², 0.51 kW/m², 0.31 kW/m²의 값을 나타내었다. 또한 Figure 8은 동일한 크기의 용기에서 시료의 양만 20 mm로 변경한 경우로 1.31 kW/m², 0.65 kW/m², 0.39 kW/m²으로 나타났다. 이 결과들을 보면 시료의 양이 증가하면 복사강도가 높아지는 것을 알 수 있다.

실험용기의 직경이 1.0 m이고, 시료의 양이 13 mm인 경우를 Figure 9에 나타내었으며, 5 L/D, 7 L/D 및 9 L/D의 지점에서의 복사강도는 각각 1.38 kW/m², 0.70 kW/m² 및 0.42 kW/m²를 나타내었다. 또한 Figure 10에는 시료의 양이 20 mm에서 1.53 kW/m², 0.78 kW/m² 및 0.47 kW/m²의 복사강도를 나타내었으며, 실험용기의 직경이 0.5 m일 경우와 동일하게 시료의 양이 증가하면서 복사강도가 증가하는 것으로 나타났다.

실험에서 얻어진 복사강도 값들을 비교하기 위하여 Figure 11에 측정위치(L/D)에 따른 복사강도를 나타내었으며, 시료의 양과 용기의 크기 및 측정위치에 따른 복사강도의 변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 복사강도는 화염으로부터 가까운 5 L/D에서부터 9 L/D로 멀어 질수록 급격히 감소하는 경향을 나타내고 있다.

둘째, 시료용기의 크기나, 시료 양에 따른 복사강도를 비교하여 보았을 때, 측정 거리가 가까운 5 L/D에서 나타나는 복사강도의 차이는 크고, 화염으로부터 거리가 멀어 질수록 복사강도의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 즉 5 L/D에 비해 9 L/D 지점에서의 곡선 간격은 적어지는 현상을 나타내었다. 이것은 복사강도가 거리에 따라 많은 영향을 미치고 있다는 것으로 이

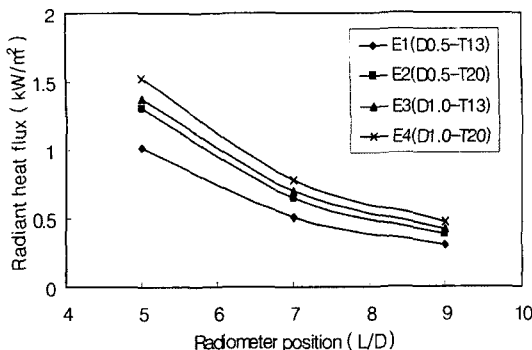


Figure 11. Relationship between the radiant heat flux and radiometer position.

Table 2. Test results of radiant heat flux and average radiant heat

Test Symbol	Radiation Heat Flux (kW)			Average Radiation Heat Flux (kW)
	5 L/D	7 L/D	9 L/D	
E1 (D0.5-T13)	93.39	91.53	91.97	92.29
E2 (D0.5-T20)	119.95	116.65	115.70	117.43
E3 (D1.0-T13)	366.76	364.64	361.66	364.35
E4 (D1.0-T20)	406.63	406.31	404.71	405.88

해 할 수 있으며, 복사열의 전도가 Stefan-Boltzmann의 법칙에 잘 적용되고 있음을 알 수 있었다. 특히 Stefan-Boltzmann의 법칙에서 나타내는 완전흑체로 가정할 Carbon Black이 최근 많이 사용되고 있는 Platinum Black과 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

셋째, 시료 용기의 크기와 시료의 양에 따라서 복사강도가 다르게 나타난다는 것을 알 수 있었다. 평균 최대화염온도의 경우는 용기의 크기나 시료의 양에 상관없이 비슷한 값들이 구하여 졌으나, 복사강도는 전혀 다른 것으로 나타났다. 이는 복사강도가 화염의 크기와도 연관성이 있으며, 연소시간과도 밀접한 관계가 있는 것으로 사료된다. 따라서 연소시간에 따른 화염의 크기와 연소속도에 대한 자료는 향후 이러한 실험을 계속 진행해야 할 것이다.

Table 2는 라디오메타로부터 측정된 복사강도를 복사열로 계산하여 나타낸 것으로, 복사강도에 용기의 크기와 측정거리를 곱하여 계산한 값이다.⁸⁾ 여기서 복사열의 결과 값을 비교해 보면 측정 조건에 따라서 거의 일정한 값들을 나타내고 있다. 이것은 5 L/D, 7 L/D, 9 L/D의 복사강도(kW/m²)로부터 복사열(kW) 값으로 계산하였을 때 측정 위치에 관계없이 유사한 값을 지닌다는 것은 복사강도에 대한 자료의 정확성을 말해준다. 또한 각 지점에서의 복사열을 산술평균하여 평균 복사열을 구하여 나타내었다.

평균복사열 값을 비교해 보면 복사에너지에 대한 것은 시료의 양과 용기의 크기 모두가 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

시중에 판매중인 디젤연료를 이용하여 액면화재에

대한 실험을 실시하였으며, 화염의 온도와 복사열을 계산한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 디젤연료화염의 최대화염온도는 0.5 H/D에서 800 °C 이상이었으며, 순간최대화염온도는 900 °C 이상으로 나타났다.

2) 액면 화재에서는 가연성 액체의 표면에서부터 높이가 증가할수록 화염의 온도는 감소하는 것으로 나타났으며, 화염내부의 온도 분포는 물질의 량에는 무관하고, 용기의 크기에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

3) 디젤연료의 복사열량은 용기의 직경이 0.5 m일 경우, 시료 13 mm와 20 mm에서 각각 92.29 kW와 117.43 kW로 계산되어졌고, 직경 1.0 m에서는 364.35 kW와 405.88 kW로 구하여졌다.

4) 복사열량의 변화는 시료용기의 크기와 시료량에 따라서 많이 달라지는 것으로 나타났으므로, 저장탱크의 크기와 저장량에 따라서 위험성이 상당히 크게 달라진다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단에서 시행한 지역혁신인력양성사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 산업자원부, “에너지정책 성과분석 및 향후전략”, 청

와대 국정 정책보고서, pp.8-24(2006).
 2. H. Koseki, Y. Natsume and Y. Iwata, “Evaluation of the Burning Characteristics of Vegetable Oils in Comparison with Fuel and Lubricating Oils”, *Journal of Fire Sciences*, Vol. 19, pp.39-42(2001).
 3. 이의주, 안찬술, 신현준, 오광철, 이은도, “작은 풀화재에서 연기 특성”, *한국화재소방학회*, Vol. 19, No. 3, pp.58-63(2005).
 4. 오규형, 나선종, 이성은, “Pool 화재의 연소 특성에 관한 연구”, *한국화재소방학회*, Vol. 18, No. 3, pp.39-44(2004).
 5. H. Koseki, Y. Natsume, Y. Iwata, T. Takahashi and T. Hirano. “A Study on Large Scale Boilover Using Crude Oil Containing Emulsified Water”, *Fire Safety Journal*. Vol. 39, pp.143-154(2005).
 6. F. Ferrero, M. Munoz, B. Kozanoglu, J. Casal and J. Arnaldos, “Experimental Study of Thin-Layer Boilover in Large-Scale Pool Fires”, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 137, No. 3, pp.1293-1302(2006).
 7. B. McCaffrey, “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, *Society of Fire Protection Engineers & NFPA*, I-298(2000).
 8. D. Drysdale, “An Introduction Fire Dynamics”, *WILEY*, Second Edition, pp.160-163(1999).