

콘칼로리미터법과 화염전파 시험법의 발열량 평가 비교

Comparison of the Heat Release Rate between the results of Cone-Calorimeter and flame spread tester

이덕희* 정우성** 이철규*** 조희기**** 이동우*****

Lee Duck-Hee, Jung Woo-Sung, Lee Cheul Kyu, Cho Hee-Ki, Lee Dong-Woo

ABSTRACT

We generally get the Heat Release Rate by two other method. One is the calculation method from the Oxygen consumption rate and another is the calibration curve method of Temperature rising rate. In this study we compare the results of both test methods with five same specimens. From the test result we get the difference of reproducibility and checked some reasons of the difference. This paper includes some points to be careful for more creditable results for each test method.

1. 서론

철도차량이나 터널의 화재거동에 가장 중요한 영향을 미치는 요인 중 하나가 공간 내에 존재하는 가연성 물질로부터 발생하는 발열량이다. 따라서 발열량은 특정한 내장재가 사용될 수 있는 지를 가름하는 가장 중요한 평가요소로 판단되어 지고 있는 추세이다. 국내에서도 이러한 측면을 반영하여 콘칼로리미터법(ISO 5660-1)을 이용한 건축물 내장재 발열량 평가 방법이 한국산업규격(KS F ISO 5660-1)으로 작성되어 사용이 권고되고 있다. 현재 발열량 평가방법으로 가장 보편적이며 신뢰성 있는 방법으로 사용되고 있는 것은 콘칼로리미터법이라고 할 수 있다. 콘칼로리미터법은 연소과정에 사용되는 산소소비량을 측정하여 발열량을 계산하는 방법이다. 그러나 칼로리미터법 이외에도 온도검지기를 활용하여 온도상승률을 이용한 발열량 평가방법이 사용되어 왔는데 국제해사기구(IMO)의 IMO Res. A.653 기준이 이 경우에 해당한다.

본 연구에서는 발열량 평가를 위하여 사용되는 산소소비량 측정법과 온도상승률 측정법을 상호 비교평가 하여 시험법의 신뢰성과 상관성을 조사하여 보았다. 이를 위하여 5종의 동일 재질의 시편을 각각의 시험방법에 따라 평가하였으며 이 결과를 통하여 두 장비에서 평가된 시험결과를 비교하고 상관성을 유추해 보았다.

* 책임저자 : 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정희원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정희원

**** 한국철도기술연구원 연구원, 정희원

2. 본문

2.1 시험방법 및 장비

2.1.1 산소소비량을 이용한 측정법(ISO 5660-1)

산소소비량 측정을 이용한 발열량 평가 방식은 연소과정이 근본적으로 산소와 결합하는 화학 방정식에 의하여 결정된다는 것에 착안한 것이다. 이때 이론적으로 연소방정식에 포함되는 산소의 단위 무게당 발생하는 열량이 정해져 있으므로 다른 재료의 연소과정에서도 산소소비량을 정확하게 측정할 수 있다면 발열량을 계산할 수 있다. 이에 근거하여 작성된 시험법 및 시험기가 바로 ISO 5660의 콘칼로리미터이다. 콘칼로리미터의 발열량 계산은 다음 식에 의한다.

$$q(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o}\right)(1.10)C\sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5X_{O_2}}$$

여기서 $\Delta h_c/r_o$ 는 단위질량의 물질이 연소할 때 발생하는 발열량으로 순수한 메탄의 경우 12.54 kJ/g, 산소의 경우 13.1 kJ/g의 상수이며 배연 덕트 내부의 오리피스에서의 압력차(Δp)와 가스온도 및 산소소비량($X_{O_2}^0 - X_{O_2}$)에 의하여 결정된다. 순수한 메탄을 연소시켜서 측정되는 산소 소비량 계산을 통하여 시험기의 신뢰성을 검증하도록 설계되었으며 하였으며 이에 대한 보정치를 C 값으로 반영하도록 하였다. 따라서 위의 식에 나타난 각 요소들을 어느 정도 정확하게 측정할 수 있는가가 이 장치의 신뢰성을 결정하는 요인이다. 이 시험 장치는 콘 형태의 열복사 히터, 산소분석 장치, 유량조정이 가능한 배연시스템, 연기농도 평가를 위한 레이저, 시편의 질량감소를 측정하기 위한 로드셀 장치 등으로 구성되어있다.

그림 1에 콘칼로리미터의 개략도와 시험 장비를 나타내었다.

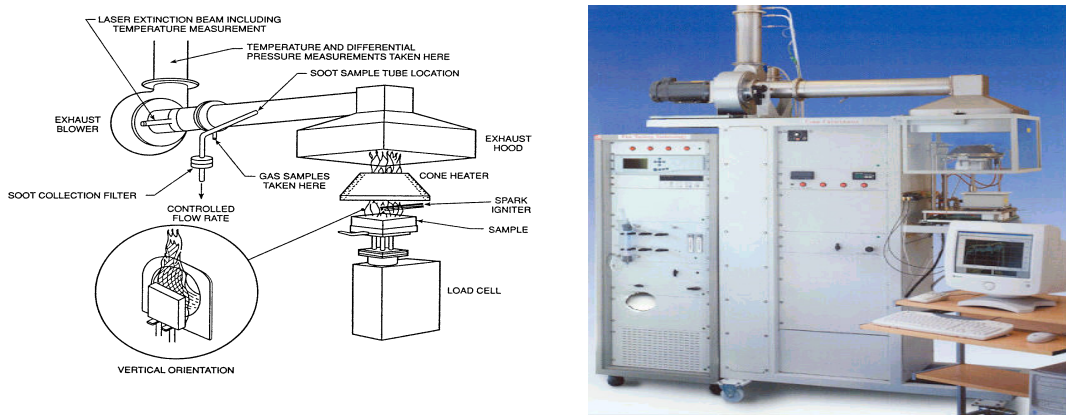


그림 1. 콘칼로리미터 구성도 및 장비 사례

2.1.2 온도상승률을 이용한 측정법(IMO Resolution A.653)

온도상승률을 이용한 발열량 측정법은 특정한 설정의 시험 장치에 대하여 순수한 연료가스를 연소시키면서 얻어진 발열량-온도의 표준그래프를 활용하는 방법이다. 즉 순수한 연료로 사용되는 메탄의 유량을 변경시켜 가면서 얻을 수 있는 발열량의 변화에 대하여 배기 duct 내에 설치된 온도계측기를 통하여 배기가스의 온도를 측정하여 변화량을 그래프로 그리는 방법을 사용한다. 이러한 방법을 활용하여 IMO Resolution A.653과 같은 시험장치가 제작되었다. 온도계측기는 보편적으로 사용되는 열전쌍(Thermocouple)을 활용하도록 설계되었다. 따라서 그림2와 같이 열전쌍으로부터 측정되는 전압신호와 가스에 혼합되는 열량사이의 관계를 그래프로 얻을 수 있으며 다른 재료의 연소에서도 열전쌍으로부터 측정되는 계측 값에 대하여 해당 시편으로부터 발생하는 열량을 유추할 수 있다.

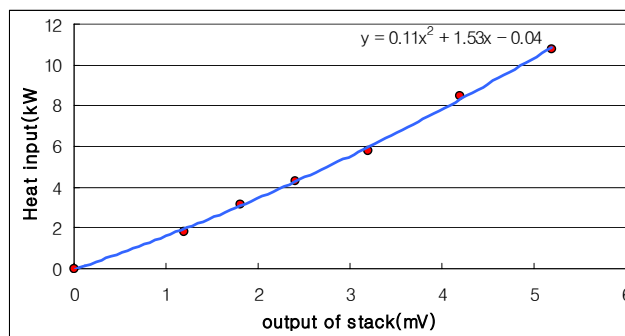


그림 2. 표준 발열량-온도 표준그래프 사례

그러나 온도를 계측하는 방법은 시편의 연소로부터 발생한 열량이 배연장치나 시험기의 몸체에 누적되었다가 재복사 하면서 발생하는 열량에 의하여 교란되기 때문에 매우 신중한 장치 관리가 필요하다. 그 중의 하나에 해당하는 것이 배연 패널의 온도 상승에 의한 가열을 보정하기 위하여 설정하는 보상 설정이다. 시험규격에는 다음과 같은 형상의 그래프가 얻어지도록 온도계측기로부터 얻어지는 전압을 감쇠 보상하도록 하고 있다.

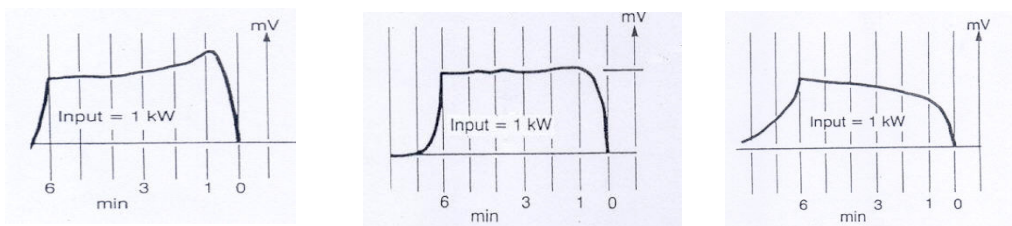


그림 3. 배기관 온도 보정(좌:미흡한 보상, 중앙:정상적인 보상, 우:과잉된 보상)

그림 4에 화염전과 시험기의 개략도와 시험 장비를 나타내었다. 화염전과 시험기는 그림 4와 같이 방열판을 시편과 경사지도록 설치함으로써 시편의 위치에 따라 다른 복사열($55\text{kW/m}^2 \sim 1.5\text{kW/m}^2$)을 받는 조건에서 시험하도록 개발되었으며 점화시간, 연소거리와 이에 따른 소화점 임계 열류량, 화염전과 속도 등을 동시에 평가할 수 있다.

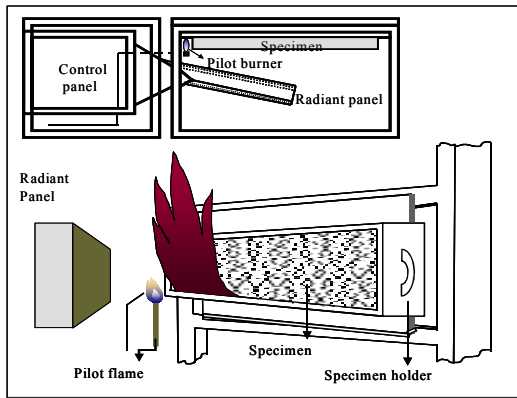


그림 4. 화염전과 시험기 구성도 및 장비 사례

2.1.3 시험조건

콘칼로리미터와 화염전과 시험기는 영국 FTT사의 장비를 이용하였으며 시험법은 앞서 기술한 바와 같이 ISO 5660-1과 IMO 기준에 따랐다. 시편은 기존 전동차에 적용하고 있던 내장판과 시트커버 등의 동일재료를 사용하였고 동일 시편당 3회의 실험을 수행하여 평균값을 사용하였다. 실험은 실험실 내부온도 $23 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 5\%$ 인 상태에서 수행하였으며 콘칼로리미터의 경우 규정된 시편의 경우 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 크기로 준비하였고, 화염전과 시험의 경우 $155 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 로 하였다. 콘칼로리미터의 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition and growth, fully developed and decay)중 fully developed에 해당되는 복사열수준인 50 KW/m^2 로 설정하였다. 시험기준에 의하여 콘칼로리미터법에서는 질량변화율, 착화시간, 총발열량 등을 측정하였고 화염전과 시험에서는 착화시간, 소화점 연소지속열(CFE) 등을 측정하였으나 본 연구에서는 발열량 평가에 관하여만 수록하였다.

2.2 시험결과

철도차량에 사용되고 있는 폴리에스터 FRP 내장판, 폴리에스터 모켓, 폴리우레탄 쿠션, 염화비닐 바닥재, 난연고무 통로연결막 등 다양한 종류의 시편에 대하여 두 가지 시험법의 발열량 평가를 수행하였다. 각각의 시험 결과 중 최고 발열량을 비교하여 표 1에 정리하였다. 화염전과 시험법을 이용한 평가방법의 경우 공기흡입량이 많고 배연 덕트가 시험경과 시간에 의하여 영향을 받아 배연 덕트 관넬에 대한 온도보정 및 주변 환경조건의 변화에 대하여 시험결과에 대한 보정을 병행해야 했다. 그럼에도 불구하고 콘칼로리미터법에 의한 시험결과에 비하여 동일시편에 대한 편차의 폭이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 시편의 크기와도 연관이 있는 것으로 추정되는데 시편이 크기가 커짐으로써 균질성 확보가 어렵고 연소과정이 동일하게 재현되지 않는 점등이 그 이유로 작용하고 있다고 판단된다. 그림 5에는 각 시험을 통하여 평가된 결과에 대하여 상관성 분석을 조사하기 위하여 두 시험결과를 그래프로 나타내 보았다. 다섯 종류의 시편에 대한 시험결과에 대하여 3종의 경우만을 보면 일차적인 선형 상관성을 가지는 것으로 나타났지만 나머지 두 종의 경우는 상관성을 기대할 수 없었다.

구분	콘칼로리미터법		화염전파 시험기법	
	Peak HRR(kW)	Peak HRR(kW)	Peak HRR(kW)	Peak HRR(kW)
내장판	3.45	1.77		
바닥재	2.65	1.26		
의자	커버	2.97	0.19	
	쿠션	1.34	1.24	
통로연결막	1.36	0.97		

표 1. 최고 발열량 측정치 비교

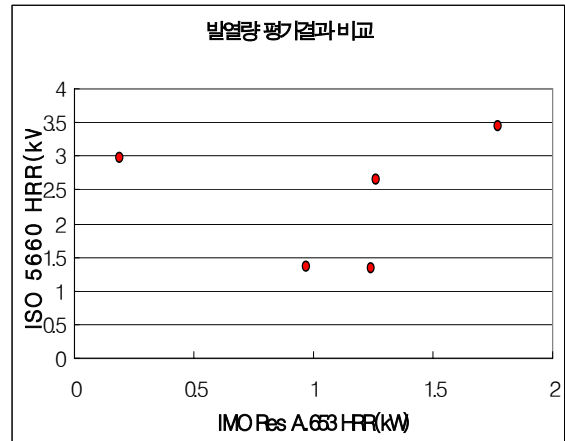


그림 5. 콘칼로리미터법과 화염전파법 결과 비교

결론적으로 본 연구에서 수행된 5종의 시편만으로는 두 시험간의 상관식을 유추할 수 없었다. 그러나 이론적으로 같은 재료의 연소과정에서 발생하는 발열량이므로 평가 방법이 다르다고 하더라도 어느 정도의 상관성을 유도할 수 있을 것으로 예상되므로 이에 대하여는 보다 다양한 종류의 시험결과를 통하여 재고할 여지가 있다고 보인다. 콘칼로리미터의 경우 콘히터에 설정된 복사열이 시험이 종료될 시점까지 일정하게 종료되지만, 화염전파 시험기의 경우 화염이 진행하면서 시편이 받고 있는 복사열이 감소하는 것도 시험의 결과에 대한 상이성의 중요한 이유가 된다고 할 수 있겠다. 그림 6에는 시험에 사용된 재료중에서 대표적인 사례로 FRP 내장판의 발열량 방출곡선을 시간에 따라 비교하여 보았다. 착화시간의 경우 콘칼로리미터 시험에서 더 빠르게 나타났는데 시편의 크기가 작으므로 발화온도까지 도달하는 데 걸리는 시간이 더 작기 때문일 것이다. 시편의 크기가 더 큰 화염전파 시험법에서 최고 발열량이 더 많이 나타날 것으로 기대했으나 시험결과는 이와 상반되게 나타났다. 이는 콘칼로리미터 방법에 의한 측정법이 손실되는 콘칼로리미터 방법의 경우 Peak H.R.R로 보이는 Peak 2개를 볼 수 있는데 이것은 연소로 인하여 생성된 탄화물질이 높은 복사열로 인하여 바로 재연소 되는 현상과 FRP 시편의 복층구조에 기인한다고 보인다.

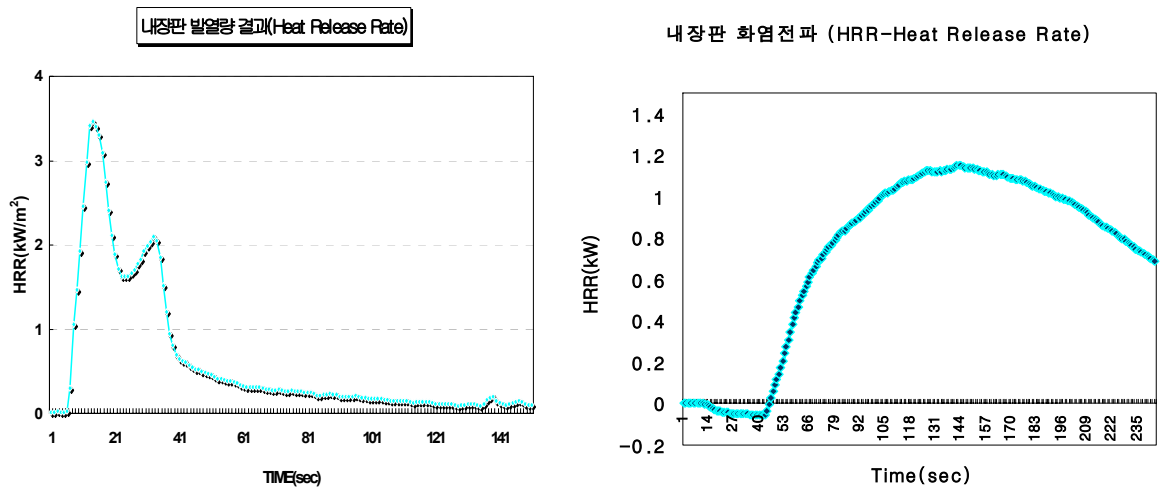


그림 6. 콘칼로리미터법과 화염전파 시험기 법의 발열량 평가 비교 사례

3. 결과고찰

산소소비량 측정법을 이용한 발열량 평가 방법으로 사용되고 있는 콘칼로리미터법과 온도상승률 측정에 의한 발열량 평가법인 화염전파 시험기 방법을 사용하여 동일한 시편에 대하여 발열량 평가를 수행하고 그 결과를 수록하였다. 시험을 통하여 콘칼로리미터 방법에 의한 평가의 재현성이 더 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 화염전파 시험기의 경우 장비 및 환경조건에 대한 보정을 병행해야 하는 점과 시편이 커짐으로써 균질성 확보가 어렵고 연소과정이 동일하게 재현되지 않는 점 등에 기인한다고 판단된다. 다섯 종류의 시편에 대한 시험결과에 대하여 각 방법의 수치 변화에 대하여 상관성을 조사하였는데 3종의 경우는 비교적 일차선형 상관성을 가지는 것으로 나타났지만 나머지 두 종의 경우는 상관성을 기대할 수 없었다. 이에 대하여는 보다 많은 시편과 다양한 종류의 재료에 대한 시험을 보완하여 판단하여야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. ISO 5660-1, "Reaction to fire tests- Heat release, smoke production and mass loss rate" Part 1 : heat release rate(cone calorimeter method)
2. IMO Res. A.653 "Recommendation on improvement fire test procedure for surface flammability of bulkhead, ceiling and deck finish materials"
3. NFPA 130, " Fixed Guideway Transit System"
4. BS 6853, "Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains"