

불연성 시험방법에서의 산소소비량 측정에 의한 열량 계산법 적용

任 弘 淳 / 연소시험실

1. 서 론

불연성시험은 건축재료의 방화성을 평가하는 가장 일반적인 시험의 하나이다. 이 방법은 각국마다 기준 또는 기준안에 규정되어 있고 화재 관련 규제상 불연재와 가연재를 구분하는데 사용되고 있다.

그러나 이 시험결과가 불균일하여 각국마다 서로 다른 판정기준이 사용되고 더우기 그 결과가 조악한 외부조건에 의해 지나치게 예민하여 그 재현성에 큰 문제를 야기시킨다.

이러한 이유 때문에 본 연구에서 기존의 불연성 시험방법에 산소 소비량 측정에 의한 열량계산법 적용 가능성을 제기하였다. 물론 연소는 물질과 산소의 결합반응이기 때문에 시험체의 연소과정에서의 산소소비량을 측정하는 것이 불연성시험의 당연한 귀결이나 기존 시험방법에 의해 발생하는 로내온도 상승의 불균일성에 따른 차이를 줄이기 위함이다.

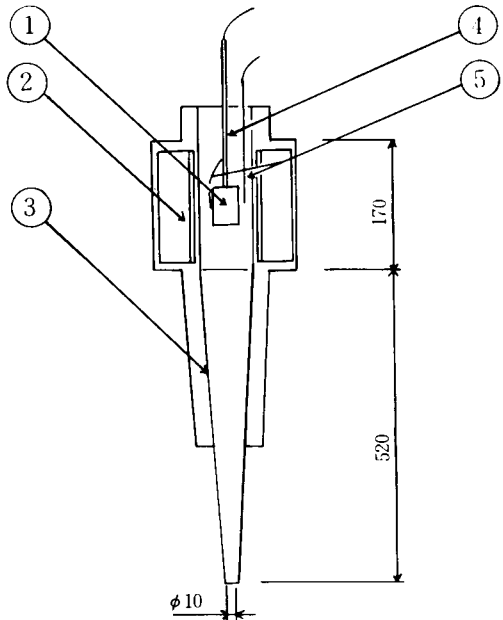
우선 기존의 불연성시험방법의 원리를 불연성 결성의 단서가 되는 온도상승에 영향을 주는 다양한 열교환체계(heat exchange-mechanisms)를 중심으로 설명하였고 산소소비량 측정에 의한 열량계산법의 원리와 그 시험장치를 상세하게 언급한 후, 산소 소비량을 위한 필요공식을 유도하고 마지막에서는 10종류의 서로 다른 재료에 대한 산소소비량을 기존의 시험방법에 의한 온도상승값과 비교 분석하였다.

2. 기존 시험방법 분석

기존의 불연성시험 장치의 기본 구성이 [그림 1]

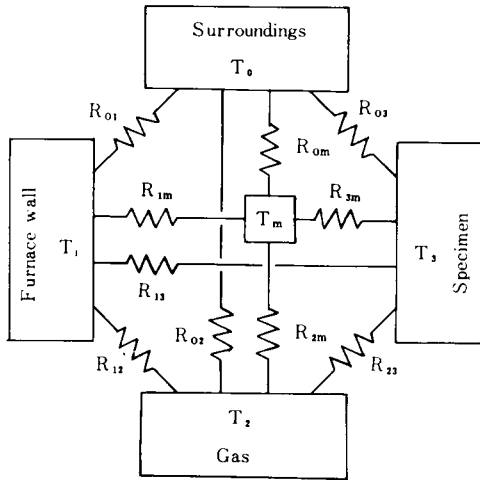
에 설명된다.

직경 75mm의 로내에 직경 45mm, 높이 50mm의 원통형 시험체가 설치되고, 이 때 로내 중간지점의 로표면온도는 840℃로 유지되며 가열로와 더불어 차폐안정통풍관내의 온도가 상승함에 따라 내부압력이 발생하여 외부 공기가 안정통풍관 아래 끝에 있는 직경 10mm의 구멍을 통해 유입된다. 이러한



[그림 1] 기존의 불연성시험장치 구성

- 1. 시험체 2. 로분체(tube furnace)
- 3. 안정통풍관 4. 시험체 삽입봉
- 5. 시험체 표면 및 로내 열전대



[그림 2] 기존의 불연성 시험장치에서 열전대 온도 T_m 를 결정하는 열저항(thermal resistances)

대류에 의한 관류가스와 외부로의 복사에 의한 열손실로 인해, 시험체가 설치되기 직전의 로내열전대 온도는 750°C 이다. 이곳의 직경 1.5mm의 시이스-로내열전대 (sheathed-furnace thermocouple)는 그 중심축이 로벽에서 10mm이격 되도록 하여 설치된다.

불연성시험의 시험체가 로내에 삽입된 후, 로내 열전대와 시험체의 내부 및 표면열전대 온도가 안정상태에 도달될 때까지 기록되며 그 온도 상승은 초기 로내온도 또는 종료시 로내온도에서부터 산정되는데 불연재료인 경우 최대온도 상승은 일반적으로 50°C 미만이어야 하며 이에 부가하여 산열시간, 시험후 감량이 기록된다.

기존 불연성시험에서 열전대와 그 주변과의 열교환은 몇 가지 다른 경로를 통해 일어나며 그 상호관계가 [그림 2]에 나타나 있는데, 로내 및 시험체 표면열전대 온도에 미치는 열적인 상호 관계를 나타낸다. 온도 T_m 의 열전대로의 연결은 로벽 (furnace wall), 주위온도 T_0 에서의 외부 (surroundings), 시험체표면, 관류가스 등과의 열적 접촉을 나타낸다. 그 열전대로부터 로벽 및 외부로의 열적 접촉은 완전 복사이며 [그림 2]에 열저항 R_{1m} 및 R_{0m} 으로 표시된다. 그러나 열전대와 관류가스 사이의 열교환은 대류에 의하여 [그림 2]에 열저항 R_{2m} 으로 표시되는데 일부 그을음 등 연소생성물로 인한 복사도 이루어진다. 로내 열전대는 시험체와

오직 복사를 통해 열을 교환하나 시험체 표면열전대는 시험체와 직접 열전도에 의해 열을 교환한다. 이 경우 모두 [그림 2]에 열저항 R_{3m} 으로 표시된다. 불연성시험 중 주위온도 T_0 는 일정하다고 보며 로본체 (furnace tube)의 큰 열용량으로 인해 로벽온도도 일정하다고 본다. 관류가스의 온도는 주로 로벽과의 대류에 의한 열교환과, 상지를 통과하는 관류공기에 지배된다. 부분적으로 시험체의 특이연소도 가스에 에너지를 직접 전달함에 의해 관류가스 온도를 상승시킨다. 시험체 표면에서 로벽 및 외부로의 열-접촉은 오직 복사이며 [그림 2]에 열저항 R_{13} 및 R_{03} 으로 표시된다. 시험체 표면은 대류를 통해 관류가스와 열교환하며 일부 연소생성물로 인한 복사로도 이루어 진다. 마지막으로 시험체의 열용량은 시간에 따른 시험체 표면온도 성상에 영향을 주며 시험중 시험체의 형상 및 표면성상의 변화는 열전대들의 열적 접촉에 직접 영향을 주어 그 시험결과에 차이를 나타낸다. 예를들면 시험체가 수축하여 열전대로부터 외부로의 복사열 저항 ([그림 2]의 R_{0m})이 감소하면 그 시험체는 뜨거워진 표면으로 인해 그 주위 (surroundings)와 차단된다. 마찬가지로 시험체의 수축은 시험체가 제 형상을 유지할 때의 관류가스 경로를 확대시켜 로벽과 관류가스 사이의 유효열저항을 증가시킨다.

위에서 언급한 내용이 [그림 3]의 a, [그림 3]의 b에 명확히 나타나 있으며, 여기서 기존의 불연성시험방법에 의한 저밀도유리섬유 단열재를 시험한 결과가 빈 시료홀더를 로내에 삽입하여 측정된 온도 상승값과 비교되나 구분할 수 없을 정도로 유사하여 유리섬유에 혼입된 가연성 유기결합재의 연소를 구분해 낼 수 없다. [그림 4]는 고온에서도 본래의 형상을 유지하는 세라믹 섬유판에 대하여 2회를 시험한 결과로서 [그림 4]의 a에서의 시험체는 가연성 유기결합재를 포함하며 이 결합재는 모두 연소된다. 또한 [그림 4]의 b는 완전불연재로 생각되는 시험체를 시험하여 얻은 온도곡선이다. [그림 3] 및 [그림 4]에 나타난 두 경우 모두 열전대의 온도상승으로는 불연성결정에 어려움이 있다는 것을 예시해 주고 있다.

온도 상승이 초기 로내온도에서부터 산정되면 [그

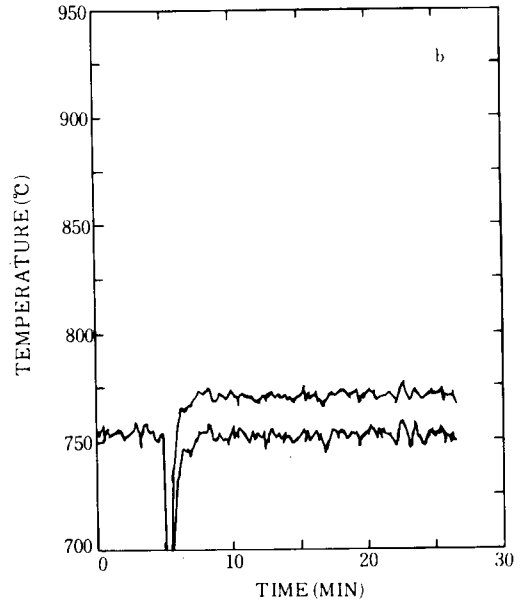
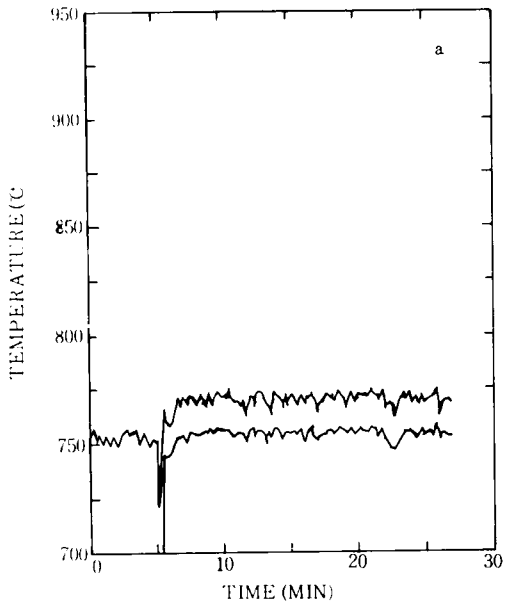


그림 3 | 기존 시험방법에 의한 로내열전대(위쪽) 및 시험체 표면 열전대(아래쪽)의 온도성상
(a) 저온도 유리섬유질 보드 (b) 빈 시험체 홀더

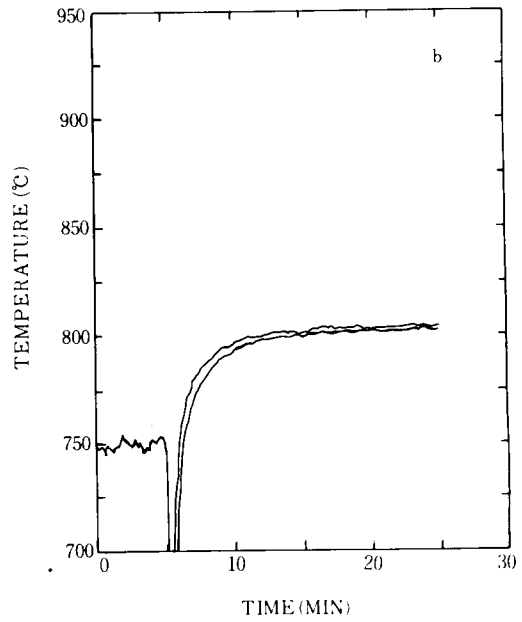
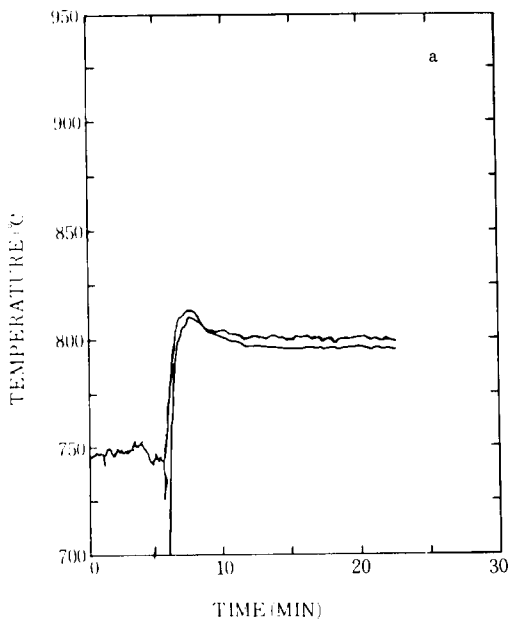


그림 4 | 기존 시험방법에 의한 로내열전대(위쪽) 및 시험체 표면(아래쪽) 열전대의 온도성상 - 세라믹 섬유질 보드로서 (a) 가연성 유기결합재 포함된 것 (b) 가연성 유기결합재가 모두 연소된 후의 동일시험체

림3)의 a 및 [그림 4]의 a와 같이 두가지 재료의 유사한 난연성능에 비하여 상당한 차이를 보이고 있으며 온도상승을 종료시 로내열전대 온도에서 부터 산정해 보면 시험체에 혼입된 가연물질이 거의 연소되는 시험종료 단계에서의 시험체 수축으로 인해 그 연소성상이 구분이 되지 않는다.

3. 산소소비량의 결정

가. 산소소비량 측정에 의한 열량계산법의 원리

산소소비량 측정에 의한 열량계산법은 어떤 주어진 산소량이 소비되었을 때 그 연소과정에서 방출된 에너지의 양이 거의 일정하다는 관찰에 근거한다. 이러한 에너지방출(energy release)이 일정하다는 것은 연소과정에서 일련의 에너지방출이 탄소-탄소 및 탄소-수소 결합체의 산화작용에 의해 발생된다는 것을 이해하므로써 설명될 수 있다. 또한 에너지 방출은 연소반응의 완전성과는 무관하다. 예를들면 셀룰로즈가 불완전연소 되어 탄소의 절반이 산화되지 않고 남을 때 산소소비량에 대한 에너지 방출은 완전 연소시의 결과와는 단지 2.4% 정도 밖에 차이가 나지 않는다. 대부분 재료에서

에너지 방출량 Q 산소소비량의 NTP상태에서의 부피 V_{O_2} 에 대한 가일정비(Constant ratio)로 식(1a)에 주어진다. 단, $\pm 5\%$ 의 허용범위를 가진다.

$$E_{NTP}^v = \frac{dQ}{dV_{O_2}} = 17.3 \text{ MJm}^{-3} \dots\dots\dots (1a)$$

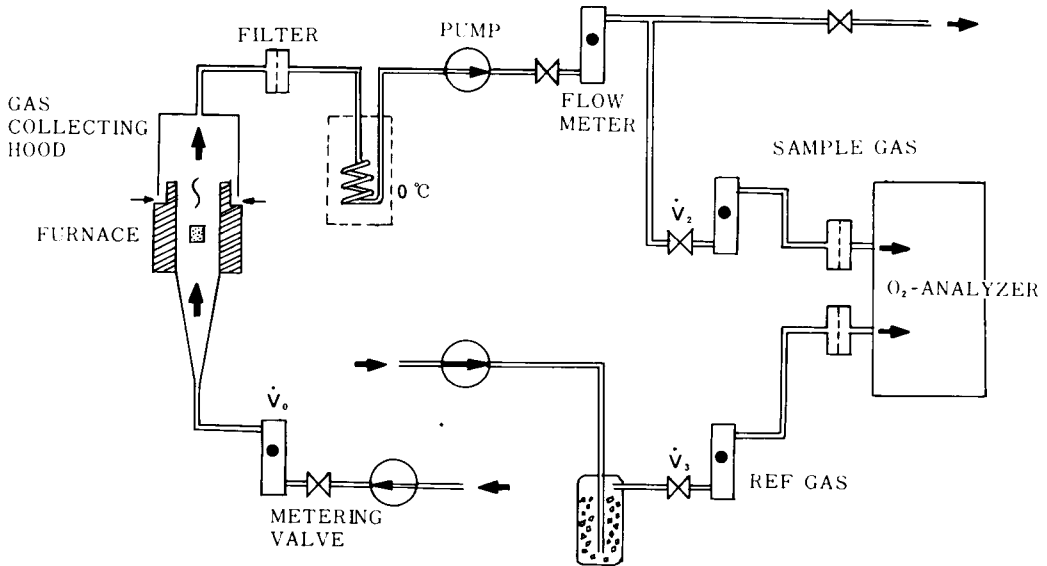
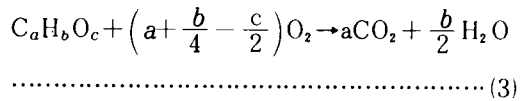
또한 산소소비량 1몰에 대한 에너지 방출율은 식(1b)와 같다.

$$E^m = 416 \text{ kJ mole}^{-1} \dots\dots\dots (1b)$$

기존 불연성시험의 로에서 나온 모든 연소생성물이 한 닥트에 모아져 그곳에서의 NTP상태의 유량 \dot{V} , 산소농도 x 가 측정되면 그 연소과정의 열방출율(heat-release rate) \dot{Q} 가 다음 식(2)에 의해 계산될 수 있다.

$$\dot{Q} = E^v \dot{V} (x_0 - x) \frac{1}{1 + Kx_0} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 x_0 는 주위 공기속의 산소농도이고 K 는 소비된 산소 몰수에 대한 관류가스의 총 몰수의 변화율이며 연소반응을 알면 계산될 수 있다. 그 전형적인 연소반응을 보면 식(3)과 같다.



[그림 5] 기존 불연성시험에 부가된 산소소비 측정을 위한 장치 개요

계수 K 는 식 (4) 에 주어진다.

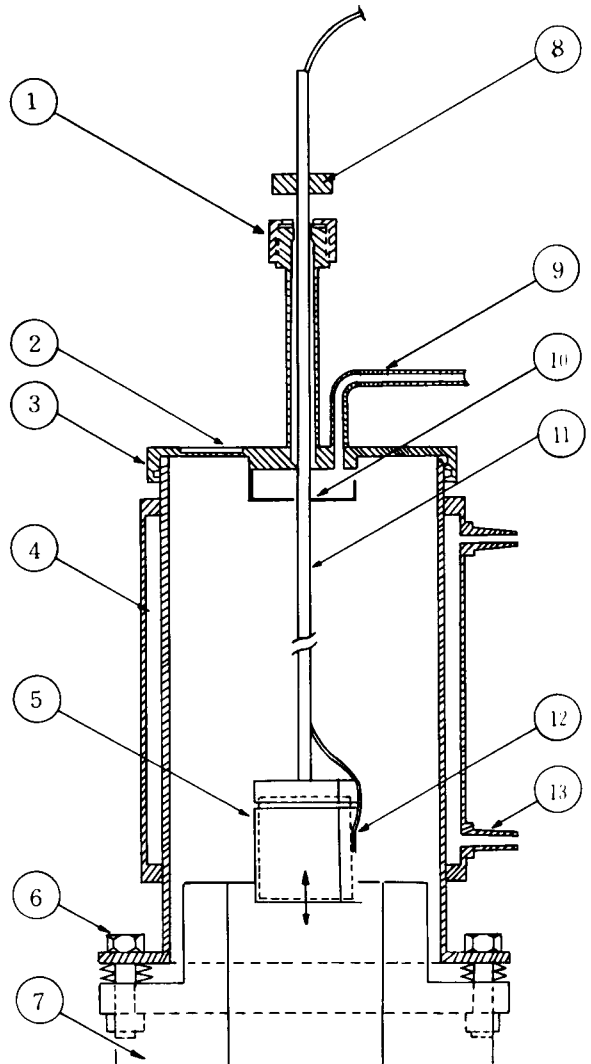
$$K = \frac{b+2c}{4a+b-2c} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 일반적으로 K 는 $0 \leq K < 1$ 범위에 있으며 따라서 어떤 미지의 연소반응에서 식 (2)의 최대 오차는 20% 미만이다.

나. 시험장치

본 연구에 사용된 시험장치가 [그림 5]에 나타나 있다. 기존 시험장치의 열적조건과 차이가 없도록 하여 로 상부를 통과한 모든 가스는 외부공기와 희석되어 로 위에 설치한 원통형 후드내에 포집된다. 이 가스포집 장치로 인한 가스흐름의 장애를 보완하기 위해 소형 경질막 펌프 (small membrane pump) 로 로내에 급기되도록 하고 이 급기량은 자연통풍과 유사하게 조절된다. 이 때 대류되는 공기 유속은 $1.3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$, 가스포집 후드를 통과하는 공기유속은 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$ 로 유지된다. 포집된 가스들은 먼저 필터를 거쳐 내경 8 mm 이고 수분 분리를 위한 6 m의 스텐레스 튜브관으로 된 냉각트랩을 통과하는데, 이 냉각트랩을 통과하는 가스에 포함된 수분은 일정하며 그 응결점이 0°C 로 가성된다. 건조된 후 포집된 가스유량 \dot{V}_1 은 테이퍼튜브식 유량계로 측정되며 산소농도는 유량 \dot{V}_2 로 포집된 샘플가스를 상자성산소 분석장치 (paramagnetic oxygen analyser)로 유도하여 측정된다.

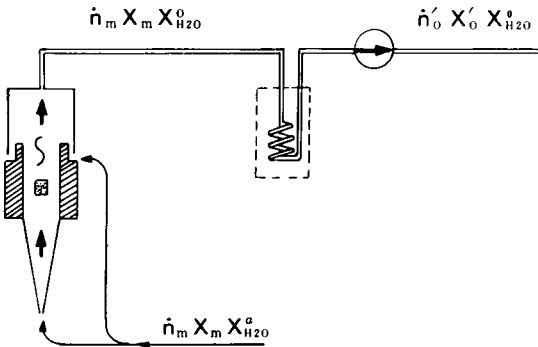
이 분석장치는 서로 다른 2개의 샘플 농도를 비교하여 그 차이를 측정하기 때문에 참고가스 (reference gas)가 유량 $\dot{V}_3 = \dot{V}_2$ 로 별도의 계통으로 인입되는데 산소농도가 20.95%인 건조된 주위 공기를 참고가스 (reference gas)로서 이용한다. 한편 포집된 가스 중의 CO농도도 측정되나 CO의 생성은 극히 적은 것으로 알려졌다. 가스포집후드의 구성도가 [그림 6]에 나타나 있다. 수냉식 원통형 덮개 (water-cooled cylindrical jacket; ④)가 가열로 (furnace; ⑦) 위에 부착되며 3개의 조절 스프링 볼트 (adjustable spring loaded bolt; ⑥)로 쥘다. 뚜껑 (lid; ③)에는 육안 관찰을 위한 유리창 (glass-window; ②)이 부착되며 뚜껑 ③과 덮개 ④ 사이의 인질은 O 링으로 압착된다. 가스는 포집후드에



[그림 6] 수냉식 가스포집장치 구성 (각 부분 설명은 본문 참조)

서 펌핑 (pumping) 되어 나와 시험체삽입봉 (specimen insertion rod; ⑪) 주위에 좁은 틈 (Slit; ⑩) 사이를 통과하여 가스관 (gas-line; ⑨)에 흡입된다. 삽입봉은 가이드튜브 (guiding tube; ①)에 의해 포집후드 중심축 상에 설치되며 시험체홀더 (specimen holder; ⑤)는 삽입봉의 아래 끝단에 부착되어 시험체와 함께 로 중간지점으로 내려지는데 이 때 정지점 (end stop; ⑧)이 가이드튜브 (guiding tu-

be; ①)에 지지된다. 시험체 표면열전대 (specimen surface thermocouple; ②)는 삼입봉 내부구멍을 통해 로내로 인입된다. 시험체와 그 주변사이의 복사열 접촉에 있어 기존 시험장치와 차이가 없도록 하기 위하여 수냉식 가스포집장치를 사용하였으며, 이 가스포집후드 내면은 방사율(emissivity)이 거의 1에 가깝도록 무광택 검정색 페인트칠을 하였다.



[그림 7] 산소소비량 계산을 위한 변수

다. 산소소비량 계산방법

측정값과 이미 알고 있는 값에서 산소소비량계산을 위한 공식의 변수가 [그림 7]에 나타나 있다. 포집장치내로 직접 흡입된 주위 공기와 로내로 흡입된 공기의 총 몰수는 \dot{n}_0 이고, 산소농도는 x_0 , 주위공기의 상대습도에 따른 수분농도는 x_{H2O}^0 이다. 연소생성물을 포함한 포집관내의 관류가스의 몰수는 \dot{n}_m 이며, 그 때의 산소농도와 수분농도는 x_m 와 x_{H2O} 이다.

시험시 외부조건에 맞추어 주위공기의 응결점은 항상 0℃ 이상으로 가정하며, 포집가스들의 수분은 분리기에서 부분적으로 응축되고 이 가스들은 다시 테이퍼튜브식 유량계를 통과하는데 이 때의 몰유량은 \dot{n}_m , 부피 유량은 \dot{V}_1 이고 응결점 0℃에서의 수분농도 x_{H2O}^0 는 6.03×10^{-3} 이며, 수분분리기를 거친 후 측정된 산소농도는 x'_m 이다.

$$x_0 = 0.2095 (1 - x_{H2O}^0) \dots\dots\dots (5)$$

이 분석과정에서의 산소소비량은 측정값 또는 이미 알고 있는 값 \dot{n}_m , x'_m , x_{H2O}^0 , x_0 와 그 연소반

응식으로부터 계산되는데 그 연소반응이 식 (3)에 주어진 형태로 된다고 가정한다. 여기서 1몰의 산소가 식 (3)에 주어진 형태로 소비된다면 가스의 총 몰수의 변화율은 식 (6)에 주어진다.

$$K = \frac{b+2c}{4a+b-2c} \dots\dots\dots (6)$$

고로 산소소비량은 식 (7)과 같고 또한

$$\dot{n}_{O2} = x_0 \dot{n}_0 - x_m \dot{n}_m \dots\dots\dots (7)$$

식 (7)을 식 (8)로 변환할 수 있다.

$$\dot{n}_{O2} = \dot{n}_m (x_0 - x_m) \frac{1}{Kx_0 + 1} \dots\dots\dots (8)$$

냉각트랩 (cold trap)을 통과하기 전 수분농도는 식 (9)와 같다.

$$x_{H2O} = \frac{x_{H2O}^0 + k[(x_0 - x_m)/(1 + Kx_m)]}{1 + K[(x_0 - x_m)/(1 + Kx_m)]} \dots\dots (9)$$

여기서 계수 k 는 소비된 산소 1몰당 생성된 수분의 몰수로서 식 (10)과 같다.

$$k = \frac{2b}{4a + b - 2c} \dots\dots\dots (10)$$

냉각트랩 (cold trap)을 통과한 후 측정된 값 \dot{n}'_m 및 x'_m 는 식 (8)에서의 \dot{n}_m 및 x_m 과 거의 차이가 없고 평형관계식으로 부터 수분분리기를 통과하기 전과 후의 산소농도는 식 (11)로 얻는다.

$$x_m \dot{n}_m = x'_m \dot{n}'_m \dots\dots\dots (11)$$

이것을 몰 유속에 대하여 풀면 식 (12)와 같다.

$$\dot{n}_m = \dot{n}'_m \frac{1 - x_{H2O}^0}{1 - x_{H2O}} \dots\dots\dots (12)$$

또한 식 (8)에 언급된 산소소비량은 이미 알고 있거나 측정값으로 이루어진 형태의 식으로 나타낼 수 있다. 즉 식 (8)~(12) 및 식 (5)로부터 소비된 산소의 몰수를 산출하기 위한 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$\dot{n}_{O2} = \frac{\dot{n}'_m}{1 + (K - k)x_0^0} [(1 - x_{H2O}^0)x_0^0 - x'_m] \dots\dots (13)$$

여기서 $x_{H2O}^0 = 6.03 \times 10^{-3}$, 건조공기중의 산소농도 $x_0^0 = 0.2095$ 이다. 한편 산소소비량 및 유량을 몰비 (molar rate) 대신에 NTP 조건의 체적비 (volumetric rate)로 식 (13)에 똑같이 나타낼 수 있다. 식 (13)에서 보면 0℃ 이상의 노점을 가진 주위 공기의 수분농도와 산소농도는 무관하여 식 (8)에서 냉각

트랩을 통과하므로써 나타나는 차이는 상당히 작다.

상기 분석에서 포집된 가스유량을 측정하기 위해 테이퍼튜브식 유량계를 사용하는데 관류가스의 압력, 온도 또는 NTP 농도에서 유량계 보정조건과 차이를 보인다면 테이퍼튜브식 유량계에 표시된 유량은 실제 NTP 상태에서의 유량 \dot{V}_m^{NTP} 으로 보정되는데 이 때 식 (14)가 사용된다.

$$\dot{V}_m^{NTP} = \dot{V}_0 \sqrt{\left(\frac{\rho_0}{\rho_m^{NTP}}\right)} \sqrt{\left(\frac{p T_0}{p_0 T}\right)} \dots \dots \dots (14)$$

여기에서 ρ_0 는 표준부피유량 (nominal volumetric flow)이 \dot{V}_0 일때 유량계 보정농도이며, ρ_m^{NTP} , T , P 는 가스의 NTP농도, 절대온도, 압력이다. 여기서 NTP조건은 압력 $P_0 = 101.32 \text{ Pa}$, 온도 $T_0 = 273.15^\circ \text{K}$ 로 규정된다. 대부분의 경우 공기와 연소 생성물의 혼합체 밀도는 건조공기밀도와 유사하며 포집가스의 NTP 밀도는 식 (15)에 의해 산출된다. 이는 이상기체법칙에 근거한다.

$$\rho_m^{NTP} = \frac{m_{O_2} x'_m + m_{H_2O} x'_{H_2O} + m_{CO_2} x'_{CO_2} + m(1 - x'_m - x'_{CO_2} - x'_{H_2O})}{V_m^{NTP} \rho_{m_{O_2}}} \dots \dots \dots (15)$$

여기서 $V_m^{NTP} = 2.24 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, 가스의 물증량은 $m_{O_2} = 0.0320 \text{ kg}$, $m_{H_2O} = 0.0180 \text{ kg}$, $m_{CO_2} = 0.0440 \text{ kg}$, 질소 및 희소가스의 유효 물증량이 $m = 0.02817 \text{ kg}$ 으로 주어진다. 또한 이산화탄소농도 x_{CO_2} 는 식 (3)과 (13)에서 유도된 식 (16)으로부터 얻는다.

$$x_{CO_2} = \frac{4a}{4a + b - 2c} \frac{(1 - x'_{H_2O}) x'_0 - x'_m}{1 + (K - k) x'_0} \dots \dots \dots (16)$$

결국 식 (13)~(16)은 측정된 산소농도와 포집가스의 유량에서 산소소비량 산출을 위한 계산식이다.

4. 시험결과

본 시험에서는 가연성 유기결합재를 함유하는 10 종류의 단열재에 대한 산소소비량을 측정하였으며 추가하여 번시험체홀더와 완전불연재료도 각 한종류씩 시험하였다.

산소소비량 측정과 함께 로내온도 및 시험체 표면온도를 기존의 시험방법으로 측정하였으며 가스 포집상치의 설치로 인한 차이를 확인하기 위해 가스포집상치 없이 기존의 시험장치를 사용하여 별도

[표 1]

Some characteristic properties of the studied materials.

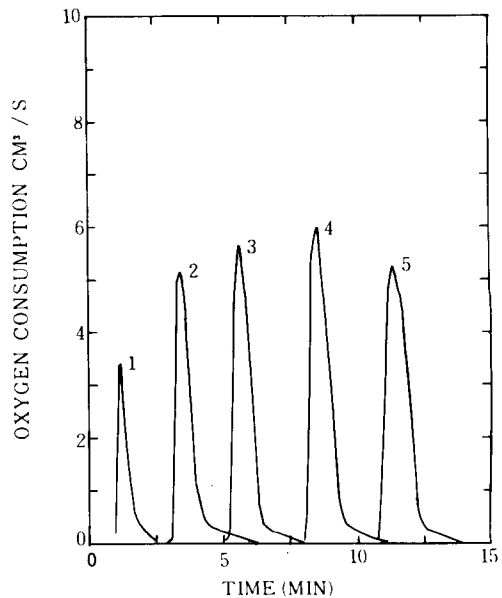
Material	Material type	The measured amount	
		Density unit volume of the material (kgm ⁻³)	Approximate softening temperature (C)
0	Empty specimen holder		
0'	Ceramic fibre board	225	1200
1	Glass wool	21	680*
2	Glass wool	57	680*
3	Rock wool	74	950
4	Rock wool	89	950
5	Silicate wool	128	900
6	Glass wool	66	4.7
7	Glass wool	68	6.3
8	Rock wool	123	5.2
9	Ceramic fibre board	243	1200
10	Glass wool	134	17.7

Material no 0 is the non combustible residue of material no 9. The densities were measured during the non combustibility tests
*Measured as defined in the standard ASTM C338.¹⁰

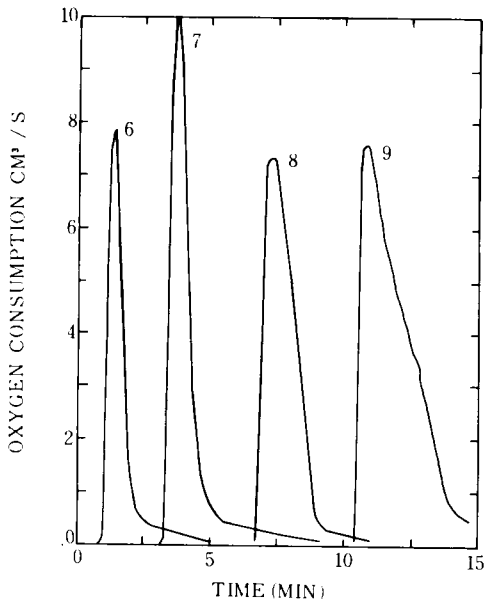
시험을 하였다.

연구대상재료의 몇가지 특성이 [표 1]에 나타나 있는데 유리섬유 단열재인 2, 6, 7, 10번 재료는 시험 중에 용융되어 작은 알갱이 형태로 수축된다. 반면 3, 4, 8번 재료는 고온용융점을 가진 무기질 섬유로서 다소 본래 형상을 유지한다. 여기서 불연 재료는 0번 재료인 시료홀더와 9번 재료인데 9번 재료는 0번 재료의 불연성 시험전 재료로서 가연성 유기결합재를 함유한 재료이다.

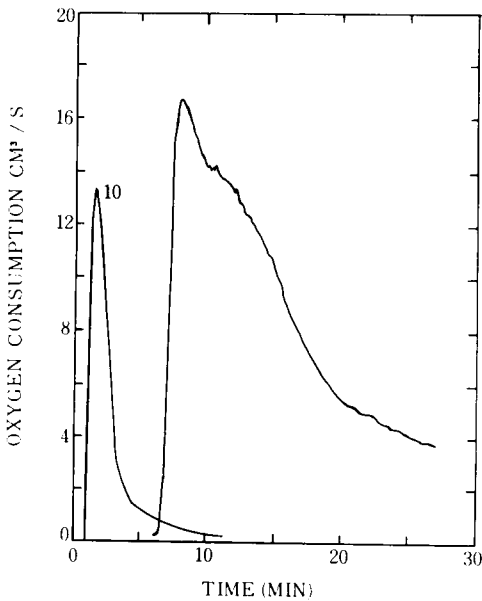
또한 수축되는 재료와 형태를 유지하는 재료를 구분하기 위해 2개의 완전불연재료가 사용되며 기



[그림 8] 1 ~ 5 번 재료의 산소소비곡선



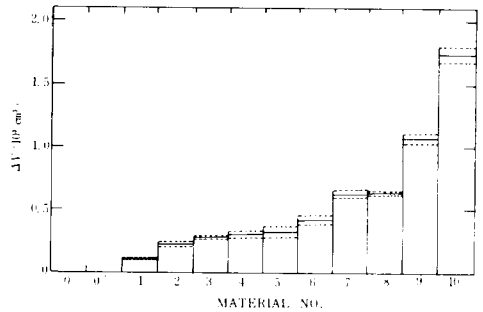
[그림 9] 6 ~ 9 번 재료의 산소소비곡선



[그림 10] 10번 재료 및 섬유질 강화 시멘트보드의 산소소비곡선

타 가연성 유기결합재를 함유한 재료는 허용기준범위 내에 있는 것으로 선택되었다.

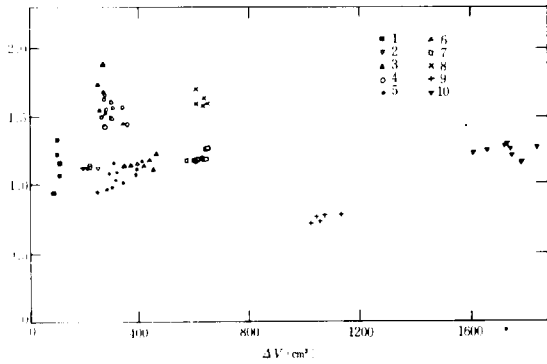
그 대상재료의 전형적인 산소소비량 곡선이 [그림 8]~[그림 10]에 시간에 대한 함수로서 나타내었다. 가연재료의 화학식은 $C_nH_{2n}O_n$ 으로 연소는, 가스포집장치에서 측정된 CO 측정값이 거의 무시해도 될 정도로 작아 완전연소로 가정되었고 식 (13)~(16)에서 상수 K 및 k 는 둘다 1.0이다. [그림 10]에 나타난 바와 같이 [표 1]에 열거된 재료이외에 방화목적으로 일반적으로 사용되는 섬유질보강시멘트보드의 산소소비 곡선도 나타내었다. [그림 8]~[그림 10]에서 보면 모든 곡선은 거의 유사한 형태이나 연소시간 즉 정점(peaks)의 중간폭은 시험대상 재료의 밀도가 증가됨에 따라 증가하여 1번 재료의 30초에서 9번 재료의 2분사이에서 변화를 보이고 있는데 가스가 포집후드에 의해 포집후



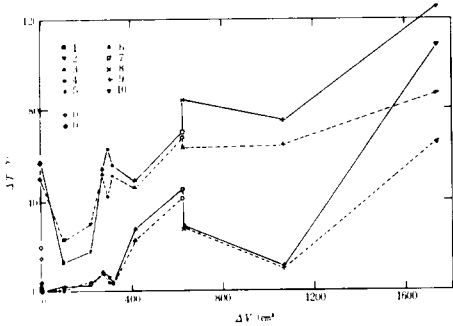
[그림 11] 시험중 소비된 산소의 총 NTP-부피 (ΔV) - 점선은 5회 시험을 한 결과와 표준편차.

드에 의해 포집되어 혼합되어 나오는 시간은 약 7초이고 산소소비의 정점(peaks)이 평활치 않아 완전연소 일때의 지속시간을 확실히 나타낼 수는 없다. 한편 분석기가 O_2 농도의 90%를 응답 하는데 걸리는 시간은 가스 혼합시간 보다 짧은 2초이다.

소비된 산소의 총 NTP 부피 ΔV 즉 [그림 8]~[그림 10]에서 나타난 시간에 대한 곡선면적이 [그림 11]에 나타나 있다. 소비된 산소의 총량은 함유된 가연 유기결합재의 양에 따라 변화하며 각 시험체마다 5회 시험하여 얻은 NTP 부피의 편차도 [그림 11]에 나타나 있다. 그 편차의 주요인이 시험방법상에 있는 것이 아니라 가연성 유기결합재의 양에 있다는 것이 [그림 12]에 나타나 있는데 1g의 감량당 산소소비량 $\frac{\Delta V}{\Delta M}$ 이 총 산소소비량의 N



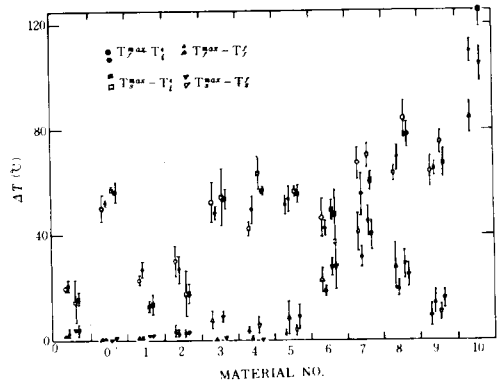
[그림 12] 시험중 소비된 산소의 총 NTP-부피 (ΔV)에 대한 재료의 단위감량당 소비된 산소의 NTP-부피 ($\frac{\Delta V}{\Delta M}$)



[그림 13] 소비된 산소의 NTP-부피에 대한 종래의 온도 상승 측정 결과 - 초기 로내온도를 기준으로 한 것(위쪽 곡선)과 종료시 로내온도를 기준으로 한 것(아래 곡선)으로 점선은 시험체 표면 온도를 나타냄.

TP 부피 ΔV 에 대한 함수로서 나타나 있다. 무기섬유탄열재인 경우 $\frac{\Delta V}{\Delta M}$ 값은 단열재에 함유된 유기결합재에 따른 특성을 잘 나타내주고 있다. 여기서 1, 2, 5, 6, 7, 10번 재료들과 3, 4, 8번 재료들은 양측이 서로 다른 종류의 유기결합재를 함유하고 있는데 후자의 유기결합재의 단위중량당 산소소비량은 전자의 것보다 40% 더 높다.

앞서 언급한 대로 시험체의 표면 및 로내온도가 산소소비량 측정과 함께 기록되었는데 초기온도와 종료시 온도를 기준으로 하여 산정된 열전대 최대 상승온도가 [그림13]에 총 NTP부피에 대한 함수로 나타나 있다. 여기서 산소소비가 증가될 때 측정된 ΔT 값이 대체로 증가하나 산소소비가 적을수록 그 상호관계가 미미하다. 그 결과는 다시 수축



[그림 14] 로내 열전대 (T_s) 및 시험체 표면 열전대 (T_s)의 온도상승 측정 결과 - 초기 로내온도 (T_s) 및 종료시 각 열전대온도 (T_s 및 T_s)를 기준으로 측정된 것으로 종래의 장치에 의해 측정된 것(검정표시부분)과, 가스 포집장치를 가진 장치에 의해 측정된 것(흰표시 부분)이 나타나 있음.

하는 재료와 형태 유지 재료가 비교될 때 ΔT 에 차이가 있음을 나타내 주고 있다. 또한 [그림5] 및 [그림 6]에 나타난 시험장치를 구성할 때 기존의 불연성시험 장치와 열적 조건상의 차이가 없음을 확인하기 위해 기존의 시험방법대로 가스포집장치가 없이 시행되었는데 그 비교의 결과가 [그림 14]에 주어진다. 여기에서 기존의 시험방법에 의하여

[표 2]

The average temperature rise of the specimen centre thermocouple and duration of sustained flaming and mass loss in the traditional non combustibility tests

Material no.	$T_s^{max} - T_s^i$ (°C)	$T_s^{max} - T_s^f$ (°C)	Flaming (s)	Mass loss (%)
0'	23	1	0	0.3
1	20	2	4	5.3
2	17	5	0	3.9
3	69	37	0	2.7
4	42	17	0	2.6
5	85	61	0	3.1
6	66	47	21	7.3
7	91	72	17	9.3
8	310	269	7	4.2
9	110	83	14	7.5
10	91	87	55	13.2

측정된 상승온도 ΔT (검은표시 부분)가 산소소비량과 함께 측정된 상승온도 ΔT (흰표시 부분)와 함께 나타나는데 이 두가지 방법에 의한 상승온도 ΔT 사이에는 별로 차이가 없다는 것이 나타난다.

한편 기존의 시험장치를 사용한 일련의 시험중에

시험체 중심열전대온도 및 잔염, 감량 등도 측정되었는데 그 결과가 [표 2]에 주어져 있는데 (그림 13)에 나타난 바와 같이 [표 2]의 결과도 산소소비가 증가함에 따라 대체로 증가한다.

5. 결 론

시험체의 표면 및 로내열전대의 상승온도에 의한 건축재료의 불연성을 평가하는 기존의 방법은 여러 가지 불확실함 때문에 비판을 받는다. 특히 미량의 가연성 물질을 함유한 재료가 허용기준 부근에서 결과를 나타내는 경우 더욱 그렇다. 열전대와 그 주변 즉 가열로벽, 시험체, 관류가스 및 실내온도사이에서의 열교환은 연소외적인 조건에 지나치게 영향을 받는다. 예를 들면 접촉의 변화 특히 시험체 수축으로 인한 어떤 온도 상승은 연소에 의해 야기된 결과라고 볼 수 없으며 이는 열전대의 위치, 표면열전대의 접촉 상태의 변화, 시험재료의 열적성질들 모두가 복잡하게 연계되어진 결과로서 그 영향은 상당히 크다. 이는 상승온도에 의한 불연성기준 설정의 어려움을 나타내 주고 있는 것으로 어떤 일정조건하에서의 산소소비량 측정은 재료의 연소성을 시험하기 위한 당연한 선택이다. 본 연구에서 제안한 간단한 시험장치로 상당히 일정하고 재현성을 지닌 결과가 얻어지고 있어, 재료의 불연성결정에 한층 타당성을 부여하게 되고 산소소비량 산출을 위해 사용된 계산방법은 복잡하지만 결과의 정확성을 지나치게 떨어뜨림 없이 보다 실제적인 목적을 위해 쉽게 단순화 될 수 있다.

명심할 것은 재료의 불연성 결정에 산소소비량에 의한 방법은 적어도 부차적인 방법으로서 불연성시험방법의 개발에 추후 신중히 고려되어야 할 것이다.

〈참고문헌〉

1. ISO 1182-1979. Fire tests - Building materials - Noncombustibility test. International Organization for Standardization, 1979.
2. ISO 1182-1983. Fire Tests - Building materials - Noncombustibility test. International Organization for Standardization, 1983.
3. IMCO Resolution A.472(XII). Improved recommendation on test method for qualifying

marine construction materials as noncombustible. International Maritime Organization, 1982.

4. BS 476; Part 11; 1982. Fire tests on building materials and structures. Part 11. Method for assessing the heat emission from building materials. British Standards Institution, 1982.
5. ASTM E 136-79 Behavior of materials in a vertical tube furnace at 750°C. American Society for Testing and Materials, 1979.
6. C. Hugget, Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements. Fire and Materials 4, 61-5 (1980).
7. A. I. Ahonen and M. A. Kokkala, Huonetilapalojen lämmönv vapautumisnopeuden mittaaminen (Measurement of the rate of heat release in room fires). Espoo, 1982. Technical Research Centre of Finland, Research Notes 72/1982 (In Finnish).
8. W. J. Parker, Calculations of the heat release rate by oxygen consumption for various applications. National Bureau of Standards, Washington, DC, 1982. NBSIR 81-2427.
9. R. C. Weast (ed), Handbook of Chemistry and Physics, 55th edn. CRC Press, Cleveland, Ohio, 1974, p. F-151.
10. ASTM C 338-73. Softening point of glass. American Society for Testing and Materials, 1973.

Received 15 November 1984. accepted 23 April 1985

〈첨 언〉

본 연구는 「Application of oxygen-consumption calorimetry to non-combustibility testing」이라는 제목으로 Antti Ahonen과 Henry Weckman, Martti Yli-penttilä에 의해 1985년 발표된 내용으로 시험은 「Fire Technology Laboratory of the Technical Research Centre of Finland」에서 시행되었고 「N-ORTEST (project 413-83)」에 의해 후원되었다.

한편 본 논문은 불연성시험 뿐 아니라 연소시 발생하는 열량을 측정하기 위한 기타 시험방법에서도 그 원리를 이해하는데 도움이 되리라고 본다.