

대형서점 적재가연물의 초기 연소발열성상 Heat Release Characteristics of Typical Live Fire Load in Large Bookstore

남동군

Dong-Gun Nam

한국소방산업기술원 소방산업연구소
(2010. 12. 6. 접수/2011. 4. 8. 채택)

요 약

건축물 적재가연물의 연소성상 및 발열특성은 건물 내부의 화재전파속도와 화재규모 등을 크게 좌우하는 중요한 요인이다. 그러나 대형 서점의 적재가연물은 다른 건축용도에 비해 다량 적재되어 있기 때문에 화재시 건물 전체의 화재피해가 대형화할 가능성이 있지만 연소발열성상이 화재실험 등으로 파악되어 있지 않다. 따라서 본 연구는 대형서점의 적재가연물인 목재 서가 등을 재현한 시험체를 대상으로 연소실험을 실행하여 연소발열성상을 파악하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 대형서점의 화재시 화재안전성을 검토하고 대형 서점의 화재안전설계에 필요한 적재가연물의 연소표면적당 최대열방출률과 화재성장률 등을 제시하였다.

ABSTRACT

Heat release characteristics of live fire load are an important parameter for performance oriented fire safety design of a building. While investigations have been carried out on the fire load and its burning behavior in office, residential and commercial buildings and so on, little effort has been paid for the rational treatment of fire load in bookstore. In this report, burning behavior of typical combustible objects in bookstore are studied by measuring heat release rates of bookshelf with book. Based on the results, it has reviewed fire safety when a fire accident occurs on the large bookstore and suggested peak heat release rate per burning surface, fire growth rate, etc of the live fire load required for fire safety design in bookstore.

Key words: Bookstore, Live fire load, Heat release rate, Fire safety design

1. 서 론

화재시 건축물 내부의 연기유동제어와 화재최성기의 지속시간 등은 실물규모의 화재실험을 토대로 건물의 제반조건을 입력하면 예측할 수 있는 수치해석모델이 개발되어 성능위주설계 등의 실무에 반영되고 있다. 그러나 화재초기의 연소확대와 화재최성기의 지속시간을 결정하는 가장 중요한 인자인 설계화원, 즉 가연물의 양과 연소성상을 파악하기 위한 실태조사와 연소실험의 사례가 많지 않다.

특히 적재가연물의 연소발열성상은 건물의 화재확대

속도와 화재규모 등을 지배하는 중요한 요인이므로 일반주택의 가구 등을 대상으로 연소발열성상의 측정을 위하여 화재실험이 실행되어 왔다. 그러나 대형서점의 적재가연물량은 다른 건물에 비해 많기 때문에 화재 발생시 건물 전체의 피해가 대형화할 가능성이 있음에도 연소발열성상 등이 충분히 파악되어 있지 않다.

그러나 한편으로는 대형서점 내부의 서적은 밀도가 크고 서가의 수납 상태에서 단위질량당 공기접촉표면적이 작고 연소해도 탄화층이 형성되기 때문에 화재시 연소가 완만하다는 추측도 있다. 이런 추측은 실제 화재에서 서적의 일부분만이 연소한 상태로 잔존한 다수의 화재사례로부터 지지되고 있지만 실험 등으로 정량적으로 검증되지 않았다. 이와 같은 서적의 연소성

상을 대형서점의 화재안전설계에 합리적으로 반영시키기 위해서는 연소실험에 의해 연소발열성상을 실증적으로 파악할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 대형 서점의 적재가연물을 대상으로 연소실험을 통해 연소발열성상을 파악하고, 그 결과를 바탕으로 대형 서점의 성능위주설계에 필요한 적재가연물의 연소표면적당 최대열방출률 등을 제시한다.

2. 실험 개요

서점의 적재가연물인 서가 등을 제작하여 집연후드의 하부에 설치하고 점화시켰다(Figure 1 참조). 실험에서는 실화 등의 출화 상황을 재현할 목적으로 소규모 화원으로 시험체를 점화하고 산소소모법에 의해 열방출률을 측정하고 연소 형상을 관찰하였다.

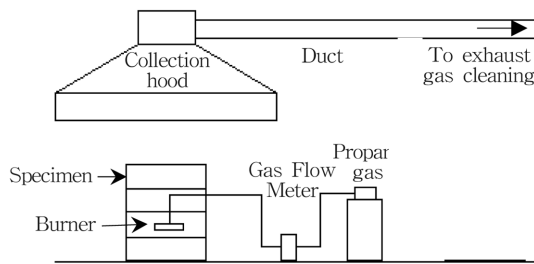


Figure 1. Overview of test apparatus.

2.1 시험체 개요

시험체의 개요를 Table 1에 나타내었다. 일반 서점의 서가의 크기가 실험장치의 수용한계를 초과하기 때문에 실험에서는 서가의 일부분을 재현하여 실행하였다. 실험 1, 2에서는 일반 서점에서 사용되는 서가 부분을 4단 제작하고 서적을 최대한으로 수납한 상태로 실행하였다. 단 실험 1, 2에서는 서가의 뒤판 유무에 따른 연소성상을 파악하기 위하여 실험 1은 뒤판을 부착하고 실험 2는 뒤판을 부착하지 않았다. 또한 실험 3, 4는 진열대의 서적의 연소확대성상을 조사하기 위하여 진열대를 제작하고 그 상부에 서적을 진열한 상태로 실행하였다. 두 실험에서는 서적의 종류에 따른 연소성상을 파악하기 위하여 실험 3, 4의 서적 종류를 각각 문고본과 잡지를 설치하였다.

최근 서점 등에는 CD(컴팩트디스크) 진열대가 증가 추세이며, 현재까지 CD 진열대의 화재안전성에 대해 검토된 적이 없으므로 실험 5는 CD 케이스(CD 포함)를 나열하여 실행하였다.

2.2 점화 조건

실험에서는 실화 등에 의한 소규모 출화에서 주변의 화재확대특성을 조사하기 위하여 화원의 열방출률을 가능한 소규모 값으로 제어하였다. 예비실험에서는 시험체의 최하단 부분을 소규모 화원(열방출률 16kW)으로 1분간 가열하였지만 수직 및 수평방향으로 전혀 연

Table 1. Test Condition

Test No.	Specimen	Bookshelf & Display Stand			Book				Ignition Source (Propane Gas)		Ignition Burner	
		Size (mm)	Mass (kg)	Material (Thickness: mm)	Type	Mass (kg)	Quantity (Volume)	Dimension	Flow Rate (l/min)	Time (min)	Type	Ignition Position
1	Bookshelf (Rear Panel) + Books	802 × 262 × 1141	27.84	Wood (30)	Technical Books	57.64	153	A5	10	20	T-Type Burner (Fig. 2)	30 cm above from bottom center of bookshelf
2	Bookshelf (No Rear Panel) + Books	802 × 237 × 1141	17.54		Technical Books	44.77	167	A5	20	40		
3	Book Display Stand + Books	802 × 645 × 450	10.45		Pocket Edition	20.81	123	A6	20	20	CSB Burner (Fig. 2)	30 cm above from top of books at the center of display stand
4	Book Display Stand + Books	802 × 645 × 450	10.45		Magazine	14.18	35	A4	20	20 + reignition 10		
5	CD Display + CD	570 × 175 × 925	15.50		CD	20.9	258	-	10	1	T-Type Burner (Fig. 2)	30 cm above from bottom center of bookshelf

※ California State Bulletin 133, Furniture Burning Test.

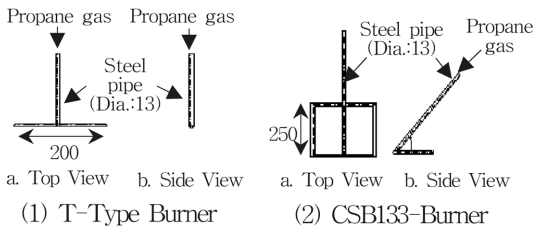


Figure 2. Fire test burner (unit: mm).

소확대하지 않았기 때문에 본 실험에서는 화원규모와 가열시간을 증가시켰다. 각 실험의 화원강도는 실험 1, 5가 16kW, 실험 2~4가 32kW이며, 이와 같이 화원 강도를 변화시킨 이유는 다음과 같다(Table 1 참조).

실험 1, 2에서는 시험체의 연소성상을 비교하기 위하여 동일한 점화조건으로 실험 계획을 수립하였다. 그러나 실험 1에서는 서가와 서적의 일부만 연소하고 자연소화하였으므로 동일한 점화조건으로 실험 2를 실행해도 시험체의 대부분이 연소하지 않는다고 판단하고, 실험 2에서는 화원규모와 가열시간을 실험1보다 2배 증가시켰다(열방출률 32kW). 실험 3, 4에서는 실험 2와 동일한 화원규모로 시험체를 20분간 점화하였다. 단, 실험 관찰에 따르면 문고본은 대부분 연소하지 않았으나 잡지의 연소는 문고본보다 진행하고 있었기 때문에 점화시간의 증가로 잡지의 연소가 진행할 것으로 판단하고, 실험 4에서는 시험체를 10분간 재점화하였다. 실험 5에서는 CD가 소규모 화원에도 쉽게 인화할 가능성이 있으므로 16kW의 화원 규모로 1분간 가열하였다. 실험 5를 제외한 모든 실험의 가열시간이 10분 이상으로 장시간인 것은 시험체가 쉽게 연소확대하지 않았기 때문으로 특수한 출화상황을 설정한 것은 아니다.

실험 1, 2, 5에서는 수직 상태인 시험체의 최하단을 점화하기 위하여 T자형버너를 사용하였고, 실험 3, 4에서는 수평 상태인 시험체의 상면을 점화하기 위하여 CSB133버너를 사용하였다(Figure 2 참조).

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소초기 발열성상의 결과

3.1.1 실험 1(서가[뒤판 부착], 서적: 전문서)

점화와 동시에 서적 표면이 인화하였으나 연소확대하지 않았다. 실험 4분 후 두번째 단의 서적이 연소하기 시작하였고, 실험 16분 후 서적 전체가 화염에 노출되었으나 완만히 연소하고 있었다. 점화종료와 동시에 시험체의 연소가 급격히 감소하고 자연소화하였다.

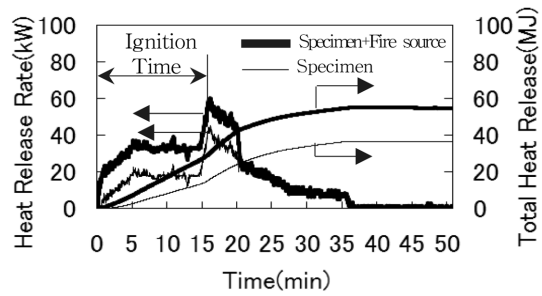


Figure 3. Heat release rate in test 1.

시험체의 소손상태는 최상단의 서적 표면이 일부만 탄화하였고 두번째 단의 서적은 심하게 손상되었다(Figure 8 참조). Figure 3의 열방출률을 보면 실험 16분 후 열방출률의 상승이 약간 보이지만 점화종료와 더불어 30kW 이하로 급격히 하강하는 것을 알 수 있다. 목재 서가와 서적이 자연소화하는 것을 보면 실제 서적의 경우 실화 등의 소규모 화재로는 화재성장과 확대가 어렵다는 것을 알 수 있다.

3.1.2 실험 2(서가[뒤판 미부착], 서적: 전문서)

점화하면 서가와 서적의 표면이 서서히 연소하기 시작하였다. 실험에는 뒤판이 미부착된 서가의 사용으로 인해 버너의 화염은 서가 뒷면으로 확대하였고 바로 상부의 단에 있던 서적의 앞뒷면을 가열하였다. 실험 5분 35초 후 화염은 서가의 최상단에 도달하였으나 서가와 서적의 표면은 서서히 연소하고 있었다. 실험 35분 후 상부에서 두번째 단의 서가의 목재판이 버너로 직접 가열되어 붕괴하였고 버너 화염은 붕괴한 서적에 접촉하면서 서가 최상단의 서적에 도달하였다. 실험 40분 후 점화 중지와 더불어 시험체가 자연소화하였다.

Figure 4를 보면 점화중지와 동시에 열방출률이 급격히 하강하고 있는데, 이는 목재 서가와 서적은 착화원이 없으면 자력으로 연소확대하지 않는다는 것을 의미한다.

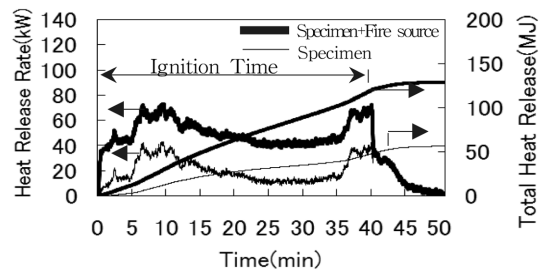


Figure 4. Heat release rate in test 2.

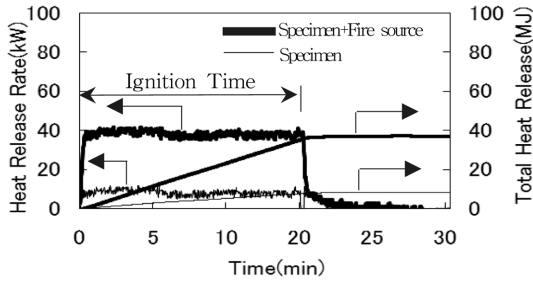


Figure 5. Heat release rate in test 3.

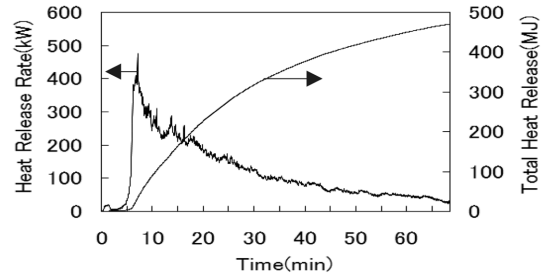


Figure 7. Heat release rate in test 5.

3.1.3 실험 3(서적 진열대, 서적: 문고본)

점화와 동시에 문고본이 인화하였으나 단시간 연소한 후에 탄화층의 형성으로 인해 자연소화하였다. 버너의 화염에 의해 가열된 서적에서 수평방향으로 연소확대하지 않았다. 점화 중지와 동시에 서적은 자연소화하였다. 시험체의 손상상태는 진열대가 전혀 연소하지 않았고 서적 내부가 대부분 연소하지 않았다(Figure 8 참조).

실험 2와 3의 시험체는 형태가 다르지만 동일한 화원 규모로 점화하였는데, 실험 3의 열방출률이 실험 2보다 작은 것은 시험체의 수직면이 수평면보다 화염의 노출 면적이 크고 공기로 인한 냉각 면적이 작기 때문이다.

3.1.4 실험 4(서적 진열대, 서적: 잡지)

점화와 동시에 잡지가 표면에서 내부로 연소하였으나 주변 잡지에는 연소확대하지 않았다. 1분 후 가열된 잡지에서 주변 잡지에 화염 전파되면서 완만하게 연소하였다. 점화 중지와 동시에 곧바로 자연소화하였다. 시험체의 손상상태는 진열대의 손상은 거의 없고 잡지의 손상도 경미하였다. 실험 후 시험체를 재활용하여 10분간 재점화해도 시험체는 연소확대하지 않았다. Figure 6을 보면 점화중지 후에는 열방출률이 급격히 감소하고 있으며, 이 결과에서 서적은 인화해도 의

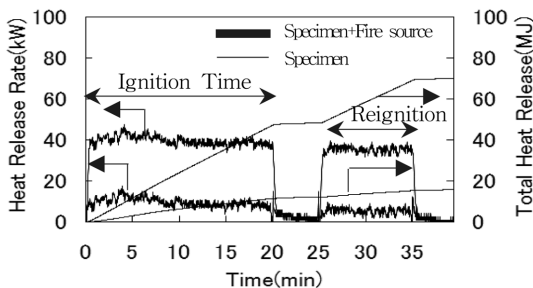


Figure 6. Heat release rate in test 4.

부가열이 없으면 자력으로 연소확대하지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.1.5 실험 5(CD 진열대, CD와 CD케이스 포함)

점화와 동시에 버너의 화염에 의해 CD 케이스가 용해하기 시작하였으나 곧바로 연소확대하지 않았다. 점화를 중지해도 CD 케이스가 용해하면서 완만히 연소하고 있었다. 실험 5분 후 서가 앞부분에 용해한 CD 케이스와 진열대 내부의 CD 케이스가 동시에 급격히 연상하였고, 실험 6분 후 진열대 정면 전체가 연상하면서 현저히 연소하기 시작하였다. 실험 1시간 50분 후 자연소화하였다. CD 진열대의 화염 높이는 최대 2.3m이었다. 시험체의 손상상태는 CD, CD 케이스가 전소하고 목재 서가의 측판과 뒤판이 잔존하였으나 다른 부분이 전소하였다(Figure 8 참조).

CD 진열대의 최대열방출율이 크고 화염높이가 높은 것을 보면 만약 실제 서점에서 CD 진열대가 연상하면 화염이 천장에 접하여 열방출률이 증가함으로써 주위 가연물에 착화하여 화재확대할 가능성이 크다.

3.2 연소초기 발열성상의 고찰

성능위주 피난안전설계에서는 건물용도별 적재가연물의 화재성장률에서 열방출률을 구해 연기 하강시간 등을 예측하여 성능위주설계를 수행한다. 이 화재성장률은 피난안전설계의 평가결과를 크게 좌우하기 때문에 정확하게 파악하여 건축물의 성능위주설계에 이용할 필요성이 크다. 따라서 본 장에서는 서점의 성능위주설계에 활용할 목적으로 3.1에서 기술한 적재가연물의 열방출률에 근거하여 화재성장률을 산정한다. 단, 목재 서가와 진열대는 시간 경과에 따라 연소의 진행이 보이지 않고 점화 중지와 동시에 자연소화하기 때문에 열방출률에서 화재성장률을 산정할 수 없다. 따라서 목재 서가와 진열대에 대해서는 화재성장률을 산정하지 않고, 적재가연물의 노출표면적에서 적재가연

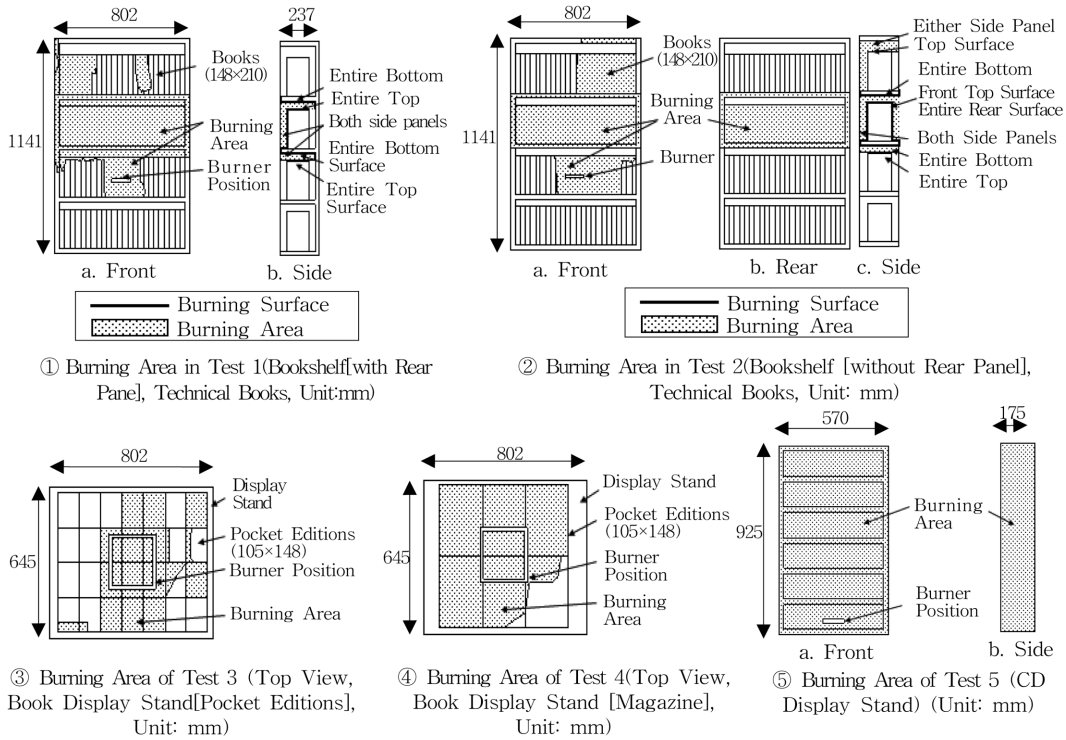


Figure 8. Burn area of specimen after test (test 1~5).

물의 연소로 발생 가능한 열방출률의 한계를 예측할 수 있도록 연소표면적당 최대열방출률을 산정하였다.

3.2.1 목재 서가와 진열대(서적 포함)의 연소발열성상과 연소표면적당 최대열방출률
 실험 1~4에 대한 시험체의 최대열방출률과 연소표

면적당 최대열방출률을 Table 2에 나타내었다. 연소표면적당 최대열방출률은 시험체의 최대열방출률을 시험체의 연소 표면적으로 나누어 산정하였다(Figure 8 참조). 또한 일반적인 설계에서는 서가의 치수와 수납 서적의 규격 등에서 화재시의 열방출률을 예측할 필요가 있으므로 서가의 폭 1m당 최대열방출률을 산정하여

Table 2. Peak Heat Release Rate Per Burning Surface Area (Test 1~4)

Test No.	Specimen	Ignition Duration Time (min)	HRR of Fire Source (kW)	Burning Surface Area (m ²)	Peak HRR (Specimen, kW)	Total Heat Release (Specimen, MJ)	Peak HRR per Burning Surface Area (Specimen, kW/m ²)		Total Heat Release per Burning Surface Area (Specimen, MJ/m ²)		Peak HRR per 1 m in width of Bookshelf (Specimen, kW/m ²)	
							Average		Average		Average	
1	Bookshelf (with Rear Panel)+ Technical Books (A5)	20	16	1.02	44	36.66	43.14	37.1	35.94	39.24	55	53
2	Bookshelf (without Rear Panel)+ Technical Books (A5)	40	32	1.32	41	56.15	31.06		42.54		51	
3	Book Display Stand+ Pocket Editions (A6)	20	32	0.22	10	8.35	45.45	46.97	37.95	42.8	-	-
4	Book Display Stand+ Magazines (A4)	20	32	0.33	16	15.72	48.48		47.64		-	

Table 2에 나타내었다.

Table 2를 보면 실험 1~4에서는 화원규모와 점화지속시간이 상이하지만 최대열방출률은 10kW~44kW로 일반 가연물의 연소에 비해 작은 수치에 머물고 있다. 상세히 살펴보면 실험 1과 2는 서가의 구조가 약간 상이하고 실험 2의 화원규모와 점화지속시간이 실험 1보다 2배이지만 최대열방출률이 거의 일치한다. 또한 두 실험의 연소범위도 서가 최상단의 정면 일부분에 머물고 있으므로 서적의 초기발열성상에는 화원규모와 가열시간이 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 서적과 서가의 목재판이 착화 후에 탄화층의 형성으로 열분해가 작아지므로, 상부의 서가와 서적에 장시간 접촉하는 화염을 형성하지 않으면 서가의 정면에서 상부에 화염확대하기 어렵기 때문으로 판단된다. 또한 실험 3과 4에서는 같은 화원규모와 점화지속시간으로 진열대 상부의 서적의 종류에 따른 연소발열성상을 조사하였는데, 두 실험에서는 시험체 전체에 연소확대하지 않고 서적 표면에 머물며 최대열방출률이 거의 일치하고 있으므로, 연소발열성상에는 서적의 종류가 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. Table 2를 보면, 시험체의 연소표면적당 최대열방출률은 40kW~50kW 전후로 진열대를 사용한 실험 3, 4와 목재서가를 사용한 실험 1, 2가 거의 일치하고 있는데, 연소면방향 즉 화염의 가열 방향에 관계없이 연소영역의 면적당 최대열방출률이 변하지 않는 것을 알 수 있다.

상기의 결과에서 서가와 수납서적은 실화 정도의 화염에 노출해도 연소가 화염에 접한 부분에 한정되고 자력으로 연소확대되지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 서점의 매장 부분에서 실화로 인한 화재시 화염이 소규모이므로 목재 서가와 수납서적이 광범위하게 연소확대하는 것이 아니라 화염에 노출된 표면만이 연소하고 자연소화할 가능성이 크다.

3.2.2 CD 진열대의 연소표면적당 최대열방출률과 화재성장률

실험 5의 연소표면적당 최대열방출률과 화재성장률을 Table 3에 나타내었다. 연소표면적당 열방출률은 CD

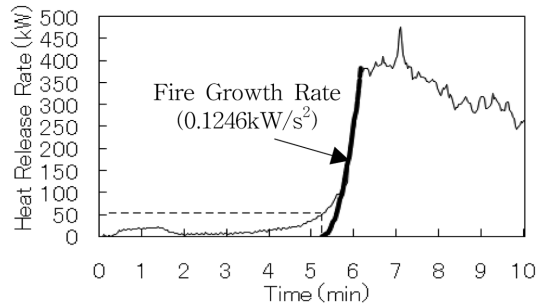


Figure 9. Fire growth rate in test 5.

진열대의 최대열방출률을 연소표면적으로 나누어 산정하였다. CD 진열대의 연소표면적은 CD 진열대가 전소한 점과 CD와 진열대 사이에 틈새가 거의 없었던 점을 고려하여 진열대 전체를 직방형으로 산정하였다 (Figure 8 참조). 또한 CD 진열대의 화재성장률은 열방출률이 50kW인 시간에서 정상 연소에 이행한 점의 시간의 제곱으로 지나는 곡선에 의한 방법으로 산정하였다.¹⁾

CD 진열대가 급속히 염상하는데 약 5분 정도가 필요하지만 일단 염상하기 시작하면 화재성장이 빠르고 대규모 화염이 장시간 형성된다. 이 이유는 CD 케이스의 재료가 폴리에틸렌으로서 인화 온도보다 저온에서 용해하는 특징을 보유하고 있는데, 일단 가열되면 온도 상승하여 용해하기 쉽고, 이 용해한 케이스가 CD 진열대 내부에서 동시에 염상하면서 CD 진열대 전체가 단시간에 급격히 연소하였기 때문이다.

Table 3를 보면 CD 진열대의 최대열방출률은 476kW로 크며 간헐화염높이도 최대 2.3m로 높다. 이 높이는 일반서점의 천장 높이로 실제 점포에서 CD 진열대가 연소하면 그 화염에 의해 가열된 천장면에서 CD 진열대가 복사열을 받아 연소가 가속되거나 CD 진열대의 연소로 인한 화염이 천장에 접하면서 주위 가연물을 착화시켜 열방출률이 더욱더 증가할 가능성이 크다.

미국방화협회에서는 화재성장률을 4단계로 구분하는데,²⁾ CD 진열대의 화재성장률은 0.1246kW/s²이며, 실내에서 연소확대가 가장 빠른 Ultrafast(0.1876kW/s²)에

Table 3. Peak Heat Release Rate per Burning Surface Area (Test 5)

Test No.	Specimen	Ignition Duration Time (min)	HRR of Fire Source (kW)	Burning Surface Area (m ²)	Peak HRR (Specimen, kW)	Total Heat Release (Specimen, MJ)	Peak HRR per Burning Surface Area (Specimen, kW/m ²)	Total Heat Release per Burning Surface Area (Specimen, MJ/m ²)	Fire Growth Rate (kW/s ²)
5	CD Display Stand	1	16	1.48	476	474.7	322	320.74	0.1246

*CD 크기는 142mm × 10mm × 124mm.

가까운 수치이다.

4. 결 론

본 논문에서는 서점의 적재가연물을 대상으로 초기 연소특성을 파악할 목적으로 적재가연물을 재현한 시험체를 제작하여 소규모 화원으로 연소실험을 실행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 목재 서가와 진열대(서적 포함)는 화원 규모가 작으면 연소확대하지 않고 연소범위가 화원의 화염에 노출된 부위에 한정되지만, CD 진열대는 일단 염상하기 시작하면 화재성장이 빠르고 장시간에 걸쳐 대규모 화염이 형성되는 것을 알 수 있었다. 서점에서는 CD 진열대가 일반적인 실화에도 인명안정상 위협이 되는 규모로 급속히 화재성장할 우려가 있다.

(2) 목재 서가와 서적 진열대(서적 포함)는 일반 적재가연물과 달리 연소가 시간 경과에 따라 성장하지 않았기 때문에 화재성장률을 산정할 수 없었지만, CD 진열대의 화재성장률은 0.1246kW/s^2 인 것을 제시하였다.

(3) 목재 서가와 진열대(서적 포함)는 연소표면적당 최대열방출률이 약 40kW/m^2 이고, 목재 서가는 서가 1단의 폭 1m당 최대열방출률이 약 50kW/m^2 인 것을 제

시하였다. CD 진열대는 연소표면적당 최대열방출률이 322kW/m^2 인 것을 제시하였다.

참고문헌

1. 南東君, 長谷見雄二, 上川大輔, 山田常圭, 鍵屋浩司, “大規模郵便局の火災加重特性(その2 代表的な積載可燃物の燃焼實驗と發熱速度のモデル化)”, 日本建築學會大會公演概要集 2003年度大會(東海), pp.5-6(2003).
2. National Fire Protection Association, “Smoke Management Systems in Malls, Atria and Large Areas”, NFPA 92B, pp.54-56(1991).
3. 南東君, 長谷見雄二, 太田充, 嶋田拓, “大規模書店における収納可燃物特性と簡易調査法”, 日本建築學會論文集, Vol.613, No.1, pp.15-20(2007).
4. 이성룡, 육근환, “주택가연물의 연소특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.23, No.4, pp.25-31(2009).
5. 이봉우, 이장원, 사공성호, 김희수, 이병호, 김현중, “건축용 바닥재의 연소성능 시험”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.22, No.2, pp.30-37(2008).
6. 오규형, 최연이, 이성은, “내장벽지의 연소특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.1, pp.90-97(2007).