발포 폴리스티렌의 연소성 시험방법에 대한 연구

Study on the flammability testing methods of foamed polystryrene

고분자섬유과 공업연구사 최미애
02) 509 - 7269 machoi@ats.go.kr

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

오늘날 기존의 목재 및 금속재 소재의 많은 부분이 플라스틱으로 대체되면서 건축용 재료와 사무용 기기를 비롯한 각종 생활용품에 사용되는 플라스틱 제품의 수요가 날로 증대되고 있다. 플라스틱은 신소재의 개발 또는 물성 개선 등으로 건축용, 자동차용, 전기제품, 항공기, 선박 등으로 그 용도가 광범위하게 확대되면서 화재 발생시 그로 인한 인명피해도 상대적으로 커지고 있는 실정이다. 국내외적으로 화재시의 안전에 대한 관심과 요구가 증대되면서 화재에 대한 안전성을 고려하여 제품을 생산하고자 하는 생산자와 안전성을 요구하는 소비자의 요구에 부응하기 위해서는 플라스틱 소재의 연소 특성에 대한 연구는 필수적이다. 한편, 쉽게 연소되는 특성을 가지고 있는 대부분의 플라스틱을 물리· 화학적인 방법으로 개선하여 화원과의 접촉시에 잘 타지 못하도록 난연 기능을 부여하는 연구뿐만 아니라 연소성에 대한 평가기법의 개발도 함께 병행되어야 할 것이다.

최근에 발생한 대형 화재에서 문제화된 건축 단열재용 발포 폴리스티렌에 대하여 기존 규격의 연소성 시험방법의 문제점을 고찰하고 개선방안을 모색하고자 한다. 최근의 새로운 평가장비에 의한 시험을 병행하여 이론적 근거자료를 토대로 재현성과 정확성을 확보한 연소성 시험방법을 개발하고자 한다.

발포 폴리스티렌은 가격이 저렴하고 우수한 단열 효과로 인하여 국내의 건축 단열재용으로 가장 널리 사용되고 있으며, 국내 시장 규모는 수천억원대에 이르고 있다. 소규모의 가공업체가 원료회사로부터 공급받은 EPS(Expanded polystyrene)를 발포가공하여 건축용 단열재로 제품화한다. 해당 KS인 KS M 3808(발포 폴리스티렌 보온재)의 KS 인증업체도 90여 업체가 있다. 원료회사는 금호석유화학을 비롯하여 6개의 대기업이 있으며, 생산량 중 상당량은 국외로 수출하고 있다.

발포 폴리스티렌은 발포에 의한 표면적의 증가

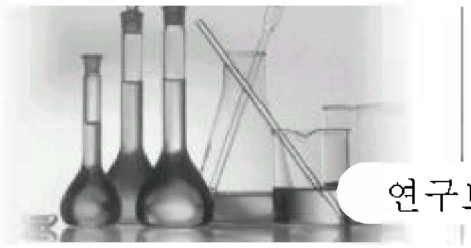


표 1. KS M 3808의 연소성 시험의 문제점 및 대책

항 목	문 제 점	대 책
시험편의 전처리	· 전처리 시간이 짧음 - 표준환경(23±2℃, RH 50±5%)에서 16시간 이상 방치 - 성형품내 잔류되어 있는 발포제 가스의 함량정도에 따라 연소시간에 영향을 줌	상태조절 시간 연장 및 건조 온도 올림 (건조기에서 70℃에서 건조)
연소시험 조건	· 시험장소에 대해 명확하게 표현되지 않음 -"촛불이 흔들리지 않는 조건"으로만 되어있음 - 통풍차단 유무에 따라 연소에 영향이 큼	제한된 공간 즉 통풍이 차단되는 시험장비 또는 산소지수시험으로 대체 필요
불꽃 발생 장치	· 화원용으로 양초를 사용함 - 직경이 20mm이고, 심지 10mm 불꽃길이가 50mm 이상 (시판중인 양초의 직경 : 25 ~ 35mm) - 현재 국내에서 심지 10mm일때 50mm 이상의 불꽃길이를 얻을 수 없음 - 시험 중 시험편에 심지가 접촉 또는 가까울수록 양초의 주성분인 파라핀의 영향을 받아 시험결과에 영향을 미칠 가능성 있음	불꽃크기 조절이 가능한 장치 사용 (분젠버너 사용)
시험방법	- 불꽃길이에 따라 시험결과가 달라질 수 있음 : 불꽃이 짧을수록 연소시간은 길어짐 - 불꽃접염위치에 따라 시험결과가 달라질 수 있음 : 심지에 가까울수록 연소기간은 길어짐 - 불꽃접염속도에 따라 시험결과가 달라짐(착화지시선까지 일정한 속도로 진행하기가 용이하지 못음) : 속도가 빠를수록 연소시간은 길어짐	시험편에 불꽃에 접촉시킨 후 일정한 시간동안 체류시켜 시험
판 정	· 연소시간이 3초이내이어야 하고, 찌끼가 없어야하며, 연소한계지시선을 지나 연소되지 않아야 한다. - 시험편이 타면서 용융찌끼는 반드시 발생 - 착화연소지시선을 초과할 수 있음 - 착화연소지시선을 초과할 수 있음 - 잔류가스에 의한 표면연소로 인해 연소한계지시선을 초과할 수 있음	찌끼발생 여부로 판정하기보다는 용융물 낙하로 인한 2차 발화 유무로 판정 필요

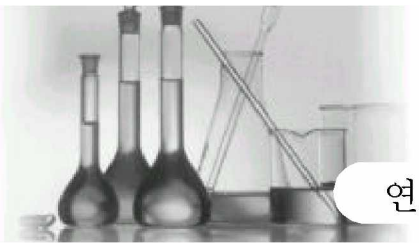
로 인해 물질 전달이 용이한데다 고분자 소재 자체의 가연성으로 인하여 급격한 연소반응을 유발시키기 때문에, 쉽게 착화되고 착화 후 연소가 매우 빠르게 진행된다. 이러한 특성 때문에 난연제를 첨가하여 발포 폴리스티렌에 난연성을 부여하고 있음에도 불구하고 발포 폴리스티렌에 기인한 화재사고가 종종 발생하고 있다.

발포 폴리스티렌의 연소성은 국민의 안전생활과 직접적인 관련이 있는 만큼 엄격한 규제를 통한 화재 사고를 미연에 방지하여야 하고 철저한 품질관리에 의해 불량품의 유통이 근절되어야 한다. 이러하기에 발포 폴리스티렌은 1년 정기심사 대상품목으로 지정되어 1년마다 사후관리를 받게 되어 있다. 그러나 표 1에 정리된 바와 같이 KS M 3808 (발포 폴리스티렌 보온재)의 연소성 시험방법의 고질적인 문제점으로 인하여 이해 당사자간에 시험결과에 대한 시시비비가 항상 발생하고 있다. 관련 업계나 학계에서도 꾸준히 개정 논의가 있어 그 해결방안으로 본 연구를 수행하게 되었다.

건축 단열재용 발포 폴리스티렌의 연소성 시험방법으로는 KS M 3808 양초시험, ISO 9772 수평연소시험, DIN 18164-1 45°연소시험, ISO 4589 산소지수시험, ISO 5660-1 콘칼로리미터 시험 및 UL-94 규격 등이 있다. 건축 단열재용 발포 폴리

표 2. 발포 폴리스티렌의 연소성 시험방법

시 험	인용 규격	시험편 크기	특 징	비 고
양초시험	KS M 3808	200×25×10 mm	장치 간단 (연소시간, 길이 측정)	양초이용
수평연소시험	KS M 3809 ISO 9772	150×50×13 mm	2차발화 (잔염연소, 무염연소, 연소속도 측정)	분젠버너이용
45°연소시험	DIN 18164-1	edge: 90×190×25 surface: 90×230×25	2차발화 (연소시간, 길이, 무염연소 측정)	분젠버너이용
산소지수시험	KS M 3032 ISO 4589	150×10×10mm	수치확인 (연소시간, 길이 측정)	산소지수 확인
콘칼로리미터	ASTM E 1354 ISO 5660-1	100×100×50mm	연소시 발열량 확인	산소 소비량 측정



스티렌의 연소성을 평가하기 위해 각 시험방법을 표 2에 정리하였다. 각 시험방법은 시료크기와 측정방법 등이 다르기 때문에 상호 시험결과에 대한 연관성을 검증으로부터 새로 개발된 시험방법에 따라 그 품질기준도 설정하고자 한다.

1.2 연구내용

본 연구에서는 M 3808의 연소성 시험방법을 대체할 수 있는 재현성과 반복성이 확보된 시험방법을 개발하여 규격 수요자로부터 신뢰받을 수 있는 규격안을 작성하고자 한다. 건축 단열재용 발포 폴리스티렌의 연소성 시험으로 국외에서 널리 사용되고 있는 시험방법에 대한 국내 도입의 타당성을 검증하고, 기존 규격에서 정하고 있는 품질 기준과의 상관관계를 밝혀 보고자 한다. 한편 연소성 평가의 최신 기술인 콘 칼로리미터 시험을 수행하여 수집한 연소거동 및 특성자료에 의한 이론적 근거를 토대로 시험결과를 검증하고 시험방법 개발에 반영하고자 한다. 나아가 향후 플라스틱 연소성 시험방법 및 제품 기준에 관련한 ISO규격의 제·개정시에 우리나라의 입장을 반영 할 수 있는 기초자료를 확보하는데 있다.

2. 실 험

2.1 재료

본 연구에서는 발포 폴리스티렌의 겉보기 밀도와 난연제 함량에 따른 연소성의 영향을 알아보기 위하여 발포제와 난연제의 함량을 변화시키면서 발포 성형하였다. 발포제의 함량은 부탄과 펜탄 혼합가스를 이용하여 겉보기 밀도를 15~30 kg/m^{3}으로 하였고, 난연제의 함량은 브롬계인 HBCD (hexabromocyclododecane)를 0~0.8 wt%로 조절하여 시판중인 제품의 밀도와 난연제 함량이 범위에 속하도록 조절하였다.

2.2 전처리

발포 폴리스티렌은 발포제로 펜탄과 부탄 등을 사용하기 때문에 상태조절 조건이 연소성 시험결과에 많은 영향을 준다. 실험에 앞서 건축 단열재용 발포 폴리스티렌과 기타 건축용 재료에 대한 각국별 규격을 검토하고 상태조절 조건을 표 3에 비교 분석하였다.

2.3 연소시험

(1) 양초시험

양초시험은 국내 시판중인 직경 20 mm의 양초로는 KS M 3808의 연소성 시험에서 규정한 불꽃의 길이 50 mm 이상, 불꽃의 굵기 약 7 mm 이상이 되지 않는다. 시험시 불꽃의 길이가 중요한 요소이므로 규격에 맞는 불꽃의 길이를 맞추기 위하여 양초의 굵기가 50 mm인 양초를 사용하여야 KS M 3808에 규정한 불꽃의 길이 및 불꽃의 굵기를 얻을 수 있었다. 시험편 치수는 200mm × 25mm × 10mm로 준비하고, 시험편에 대고 약 5초 동안 양초를 같은 속도로 착화 한계 지시선까지 밀어 보내었다. 착화 한계 지시선에 도달하였으면 불

꽃을 재빨리 후퇴시키고, 그 순간부터 불꽃이 꺼질 때까지의 시간(초)과 길이(cm)를 측정하였고 남은 심지의 유무 및 연소의 정지 위치를 확인하였다.

(2) 수평연소시험

ISO 9772에서는 연소시 발포 폴리스티렌의 용융물 낙하에 의한 화재의 발생 여부를 확인하기 위해 탈지면을 이용하고, 연소 시간과 경과 시간을 측정하여 연소속도를 확인한다. ISO 9772의 부속서에는 연소 상태에 따른 난연 등급이 나타나 있다. 시험편은 150mm×50mm×13mm로 준비하고, 불꽃을 60초간 댄 후 분젠 버너를 시험편에서 떼어내고 연소상태를 확인한다.

(3) 45° 연소시험

45°연소시험은 불꽃 접촉위치를 변화시키는 모서리 점화시험과 표면 점화시험 두 부분으로 나눠진다. 모서리 점화시험인 경우는 시료에서 190mm×90mm의 시험편을 5개 절취하고 길이 150 mm에 기준 표시선을 표시한다. 표면 점화시험인 경우는 시료에서 길이 230mm×90mm의 시험편을 5개 절취하여 길이 40mm 와 190mm에 각각 기준 지시선을 표시한다.

(4) 산소지수시험

고분자 재료의 연소 시험방법에 따라 투명한 유리 원통안에 산소와 질소의 혼합기체를 일정하게 유지한다. 시료에서 150mm×10mm×10mm의 시험편을 절취하고 시험편에 50 mm 기준선을 표시하였다. 점화 연료는 프로판 가스를 사용하여 불꽃의 길이를 20mm로 조절한 뒤, 산소 및 질소 유량 조절 밸브를 열어 연소 원통 내에 약 30초동안 가스를 방출한 후 시험편 상부에 점화한다. 시험편의 상부를 점화시켜 연소가 가능한 산소의 최저농도를 구한다.

(5) 콘칼로리미터 시험

콘칼로리미터 시험은 시험편의 가연성과 연소동안에 발생되는 연기를 평가하기 위해 사용하였다. 100mm×100mm×25mm의 시험편을 준비하고 측정조건으로 열유량은 45 kW/m², 기체 유속은 24 l/s로 유지하였다. 점화기로 전기적 spark를 사용하고 시험편의 위치는 수평방향으로 시험편의 지지대에 장착한 뒤, spark igniter에서 점화가 되면 점화시간을 기록하고 시험편의 불꽃이 사라지면 측정을 멈춘다. 연소의 열방출 속도는 산소 소모량으로부터 산출한다.

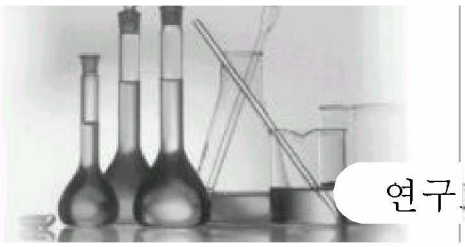


표 3. 건축 단열재용 발포 폴리스티렌 및 건축용 재료의 상태조절 조건

국 명	규 격 명	시험 방법	시험편 상태조절 조건	숙성 시간	측정항목	기 준 치
국제 규격	ISO 4898 Cellular plastics - Specification for rigid cellular materials used in the thermal insulation of buildings	-	(23±2℃)(45-55%)에서 48시간	28일	burning characteristics	각국의 규정을 따르며 규격 제정중임
	ISO 9772 Cellular plastics - Determination of horizontal burning characteristics of small specimens subjected to a small flame	수평연소 시험	(i)(23±2℃)(50±5%) 48시간 (ii)(70±2℃)(168±2시간)	24시간	combustibility characteristics	각국의 규정을 따름
	ISO 1622 Plastics - Polystyrene(PS) moulding and extrusion materials - Part 2 : Preparation of test specimens and determination of properties	수평· 수직연소· 산소지수 시험법	(23±2℃) (50±5%)에서 16시간	-	reaction to fire	각국의 규정을 따르며 규격 제정중임
영 국	BS 3837 - Expanded polystyrene boards Part 1. Specification for boards manufactured from expandable beads BS 3837 - Expanded Polystyrene boards Part 2. Specifications for extruded boards	수평연소 시험	part 1: (23±2℃)(50±5%) 16시간 part 2: (23±2℃)(50±5%) 12시간	part 1: 72시간 part 2: -	combustibility characteristics	24이상
	BS 6203 Fire characteristics and fire performance of expanded polystyrene materials used in building applications	-	-	-	combustion characteristic	24이상
독 일	DIN 18164-1 Rigid cellular plastics insulating building materials-Thermal insulating materials DIN 18164-2 Rigid cellular plastics insulating building materials-Polystyrene foam impact sound insulating materials	45°연소 시험 (edge, surface test)	24시간	42일	burning characteristics	연소길이가 125 mm 이내
캐나다	CAN/CGSB-51.20-M87 Thermal Insulation, Polystyrene, Boards and Pipe Covering	산소지수	(23±2℃)(50±5%)에서 (88-96)시간	28일	fire characteristics	-
미 국	ASTM C 578 Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation	산소지수	(23±2℃)(50±5%)에서 40시간	-	ignitability test	20초내에 연소길이 150mm 이내
유 럽	EN 13164 Thermal insulation products for buildings - Factory made products of extruded polystyrene foam - Specification	-	(23±5℃)(50±5%)에서 6시간	-	연소성	3초이내 소화, 난연 한계지시선 물초과
일 본	JIS A 9511 Preformed cellular plastics thermal insulation materials	양초시험	(23±5℃)(50-0-10%)에서 16시간	24시간		

3. 결과 및 토론

3.1 양초시험

난연제 함량과 겉보기 밀도의 변화가 연소성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 KS M 3808에 규정한 양초에 의한 연소성 시험을 수행하였다. 그림 1과 같이, 난연제 함량이 증가할수록 연소시간과 연소길이가 짧아지며, 동일한 난연제 함량하에서 겉보기 밀도가 증가할수록 연소시간이 증가함을 확인하였다. 비난연제품은 밀도차에 따라 연소시간의 차이가 뚜렷하였지만 시험편이 동일한 부피를 갖고 있으므로 연소길이에 있어서는 비슷한 결과를 얻었다.

난연제 함량 및 겉보기 밀도에 따른 시험방법의 정밀도를 검증하기 위하여 ISO 5725-2 Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 2 : Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method에 따라 시험을 수행하고 결과를 분석하였다. 반복성 시험은 시험자, 실험실 및 실험장치를 모두 동일하게 하여 반복성 시험을 수행하고, 동일 5개의 시험편으로부터 평균, 표준편차, 최대 및 최소값을 구하였다. 재현성 시험은 실험실, 시험자 및 시험장치를 모두 달리하여 시험기관 및 관련업계를 포함한 7곳 시험소간의 상호비교시험을 수행하였다. 반복성 시험에서 사용된 동일 시료를 시험을 하여 연소길이 및 연소시간을 측정하였다

그림 2와 3에서는 시험결과의 표준편차에서도 알 수 있듯이 최소· 최대값의 차이가 심한 것으로 보아 KS M 3808의 연소성 시험이 가지고 있는 정확성과 재현성이 문제가 심각함을 시사한다. 그림 3에서 보면 동일한 시험편임에도 불구하고 연소시간이 시험소간에 최소 0.6초부터 최대 3.6초로 그 차이가 컸다. 이는 KS에서 정하는 품질기준인 3초에 적합하는 경우와 부적합한 경우를 모두 보여주어 표준 시험방법으로는 적합하지 않음을 보여준다. 시험결과인 연소길이와 연소시간의 표준편차가 크게 나타나기 때문에 양초시험은 반복성이 부족함으로 판단되었다. 즉 연소시간 및 연소길이의 최소· 최대값이 크게 나타났으며, 시험소에 따라 재현성이 떨어짐을 볼 수 있었다. 동일한 시료임에도 불구하고 반복성· 재현성 시험결과 최소· 최대값이 현저한 차이가 있음을 확인하였다.

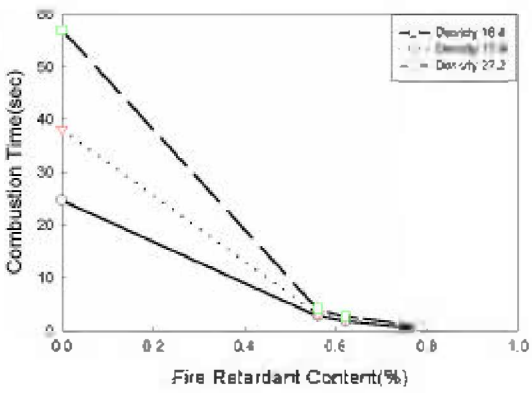


그림 1. 양초시험에서 난연제 함량과 밀도에 따른 연소시간의 영향

양초시험 대체하여 적용할 수 있는 연소성 시험 방법을 찾기 위하여 수평연소시험, 45°연소시험 및 산소지수시험을 수행하고, 연소특성에 대한 기본자료를 확보하기 위하여 콘칼로미터 시험을 통하여 열방출속도, 일산화탄소· 이산화탄소 발생량에 대한 시험자료를 확보하였다.

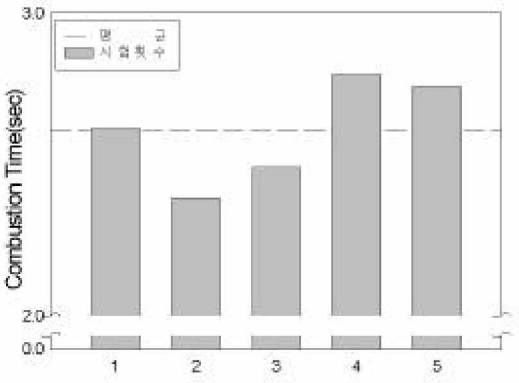


그림 2. 양초시험에서 연소시간 측정결과에 대한 반복성 분석

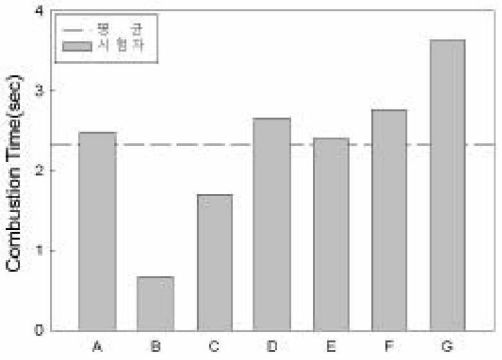


그림 3. 양초시험에서 연소시간 측정결과에 대한 재현성 분석

3.2 수평연소시험

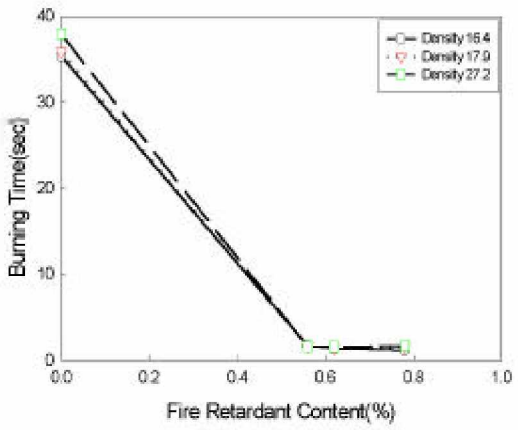
겉보기 밀도와 난연제 함량을 변화하면서 수평연소시험을 수행하기 위하여 시험편을 상온 (23±2 ℃) 상대습도 (50±5%)하에서 48시간이상 상태조절하였다. 실제 화재 발생시 상온이므로 연소성을 간접적으로 확인하기 위하여 상온에서 상태조절하여 사용하였다. 연소시 폴리스티렌의 용융면이 탈지면 위에 떨어졌을 때 2차 발화성은 폴리스티렌에 포함되어 있는 난연제 함량의 차이와 각 시료마다 녹는 온도가 다르게 나타난다.

그림 4와 같이, 비난연제품인 경우 밀도가 증가함에 따라 경과시간이 증가하였는데 이는 밀도가 높으면 불꽃이 확산되는 속도가 느려지지만 불꽃이 꺼지지 않고 계속적으로 연소되므로 최종 경과시간은 증가된다. 또한 난연제품인 경우 밀도가 증가함에 따라 60mm까지 도달하는 경과시간이 감소하였는데 이는 밀도가 높으면 불꽃이 확산되는 속도가 느려지면서 자기소화성 성질 때문에 경과시간이 단축된다. 그러나 25mm 연소길이부터 측정하는 연소시간은 밀도가 증가함에 따라 비난연제품인 경우에는 경과시간과 같은 결과를 보이나 난연제품인 경우에는 금방 꺼져 거의 차이가 나지 않았다.

난연제 함량 및 겉보기 밀도에 따른 시험편의 재현성과 반복성을 검증한 결과, 경과시간과 연소시간은 그 경향이 차이를 보이지 않았다. 양초시험은 동일한 시료로 시험한 재현성· 반복성 시험 결과, 연소성의 적합여부에 있어서 일치성을 보이지

않았지만 수평연소시험은 그림 5, 6에서 보는 바와 같이 난연등급과 표준편차 값이 작아짐을 확인하였다. 이에 수평연소시험방법이 발포 폴리스티렌의 연소성 시험에서 적절한 시험방법임을 확인할 수 있었다.

발포 폴리스티렌에 잔존하는 발포 가스는 연소성 결과에 상당한 영향을 준다. 특히 밀도가 큰 경우에는 상태조절 조건에 의한 영향이 적합여부를 결정지을 수 있으므로 이를 확인하기 위해 시험을 수행하였다. 시험편으로 취한 뒤 상온에서 48시간 건조후 시험과 70℃ 하에서 비강제순환식 건조기 또는 강제순환식 건조기를 이용하여 168시간동안 상태조절 후 수행한 시험결과, 건조기에 의한 차이는 보이지 않았지만 온도와 시간에 따라 그 영향이 크게 변화함을 확인할 수 있었다.



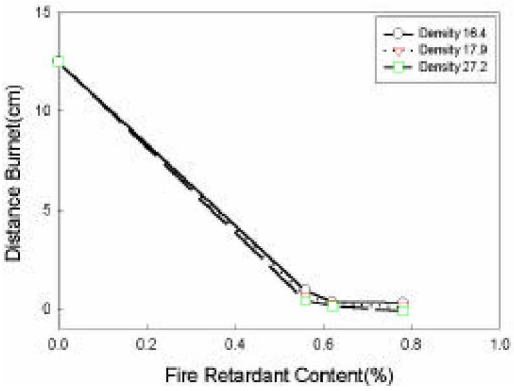


그림 4. 수평연소시험에서 난연제 함량과 밀도에 따른 연소시간과 연소길이의 영향

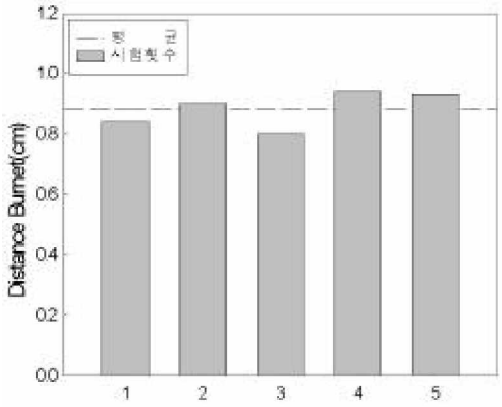


그림 5. 수평연소시험에서 연소길이 측정결과에 대한 반복성 분석

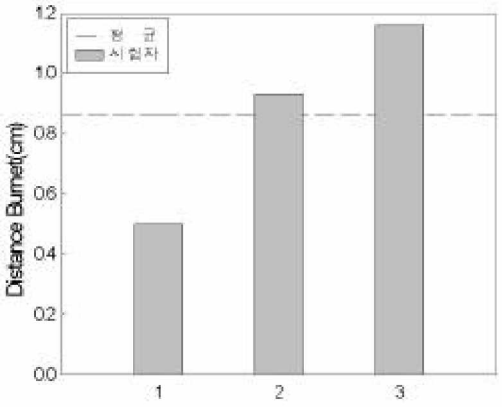
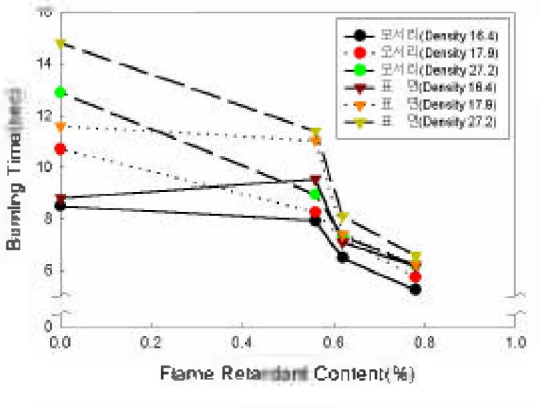


그림 6. 수평연소시험에서 연소길이 측정결과에 대한 반복성 분석

3.3 45°연소시험

45°연소시험은 작은 규모의 실험실에서 화재 발생시 발생원의 위치에 따른 영향을 확인할 수 있는 시험방법이다. 난연제 함량 및 겉보기 밀도가 다른 두 종류의 시험편에 대하여 두께를 25mm, 50mm로 변화시켜 시험한 결과, 두께에 따른 차이가 없음을 확인하였다. 화원의 접촉위치를 달리한 모서리연소와 표면연소 시험을 수행하고 그 영향을 고찰하였다. 그림 7과 같이, 화원의 접촉위치가 모서리일 때 표면연소보다 연소면적이 감소하고, 연소시간도 감소함을 확인하였다. 이는 불꽃의 확산 때문에 접촉 위치가 시험편 중간에 있으면 아래위로 확산되기 때문에 표면연소시험인 경우 연소시간도 증가된다.



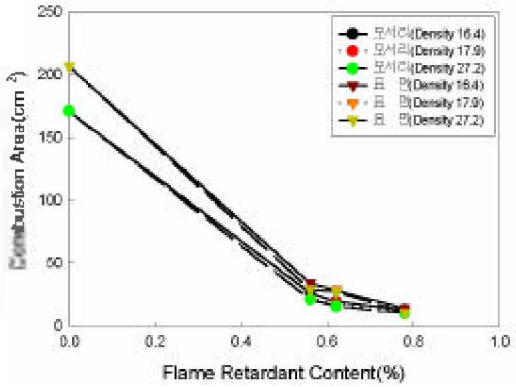


그림 7. 45°연소시험에서 난연제 함량에 따른 연소시간과 연소면적의 영향

3.4 산소지수시험

난연제 함량이 증가할수록 산소지수는 증가하였으며, 동일한 난연제 함량하에서 겉보기 밀도가 증가할수록 산소지수는 낮아짐을 확인하였다. 이는 밀도가 크면 같은 난연제 함량이라도 난연효과가 그만큼 적어져 산소지수는 감소하는 것으로 예상된다. 그림 8에서 보는 바와 같이 난연제 함량에

따라 산소지수가 선형적으로 증가함으로써 난연 특성이 우수해짐을 확인하였다. 그림 9, 10과 같이, 반복성, 재현성을 분석한 결과 시험소에 따른 오차가 있으나, 대체적으로 유사한 값을 얻을 수 있는 방법으로 판단할 수 있다. 특히 양초시험이나 수평 연소시험에 비해 재현성이 높은 시험방법임을 입증할 수 있었다. 따라서 산소지수는 시험편의 난연 특성을 평가하는데 있어서 정밀도가 높은 시험방법이다.

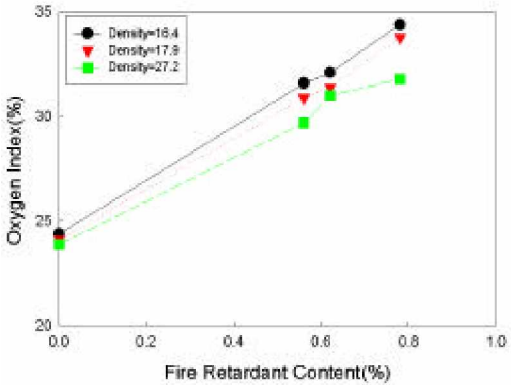


그림 8 난연제 함량과 밀도에 따른 산소지수의 영향

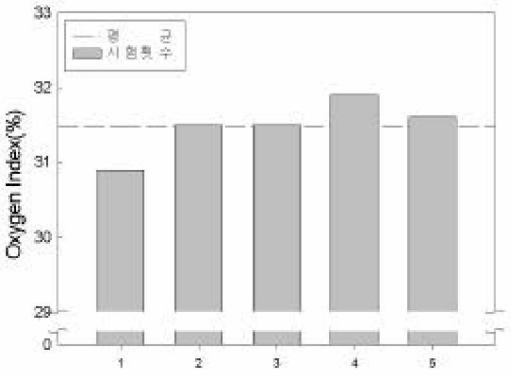


그림 9. 산소지수 측정결과에 대한 반복성 분석

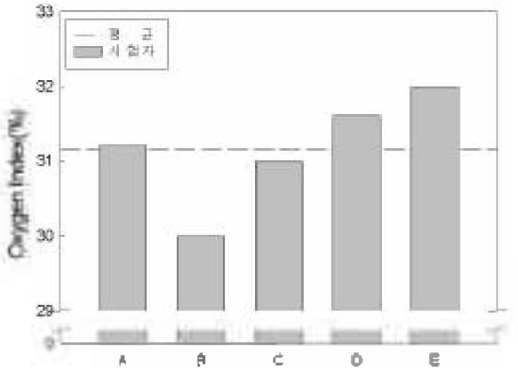


그림 10. 산소지수 측정결과에 대한 재현성 분석

3. 5 콘칼로리미터 시험

콘칼로리미터 시험은 종합적인 난연성 평가방법으로써 제품의 연소성을 평가할 수 있는 우수한 연소성 시험방법이다. 발포 폴리스티렌의 난연제 함량과 겉보기 밀도에 따라 연소거동을 측정하고자 콘칼로리미터 시험을 수행하고 다른 시험방법의 타당성을 검증하는 과학적 시험자료를 확보하였다. 난연제 함량을 변화시켰을 때 최대 열방출속도는 감소하였으며, 동일한 난연제 함량시 겉보기 밀도가 증가할수록 최대 열방출속도가 증가함을 보였다. 높은 최대 열방출속도는 시료가 연소하면서 산소소비량이 많다는 것이며, 이는 결국 겉보기 밀도가 클수록 난연효과가 적음을 알수 있는데 이러한 결과는 산소지수 측정결과와 일치하는 경향을 보여준다.

그림 11은 발포 폴리스티렌의 난연제 함량을 변화하였을 때 연소시간에 따른 열방출속도를 측정한 것이다. 난연제 함량이 증가할수록 최대 열방

출속도가 감소함을 확인하였으며 이러한 결과는 연소이론과 일치함을 보여주었다. 난연제 함량 증가시 CO발생률은 증가하며 CO_2 발생률은 감소하는데 난연제 함량이 증가할수록 연소에 필요한 산소공급원이 할로겐 라디칼($Br\cdot$, $Cl\cdot$)이나 불연성 가스에 의한 방해로 인하여 불완전 연소가 됨으로 일산화탄소의 발생률은 증가하여 이산화탄소의 발생률은 감소하는 것이다. 그림 12는 연소시간에 따른 총 열방출량을 나타내었다. 기울기가 완만하다는 것은 flashover 현상을 억제하면서 서서히 소화되어 가는 것으로 일반적으로 난연제 함량이 많고 겉보기 밀도가 낮을수록 기울기가 완만하다. 그림 13에서 보여주는 열방출속도와 유효연소열 측정 결과는 난연제 함량이 증가할수록 유효연소열의 피크를 낮아진 것을 보이는데 이는 시험편이 연소 분해되어가면서 생성되는 가연성 가스가 연소에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 즉 연소에 필요한 연소열이 감소된다는 것을 의미하므로 난연제의 함량이 증가할수록 난연제의 거동으로 인한 연소열이 감소하게 되는 것이다. 따라서 콘칼로리미터 시험은 난연제 함량이 증가함에 따라 열방출속도 및 유효 연소열이 선형적으로 비례하고 난연제 함량이 클수록 난연효과가 있음을 연소 거동을 연소시간에 따라 실시간으로 수치화하여 측정할 수 시험방법이다.

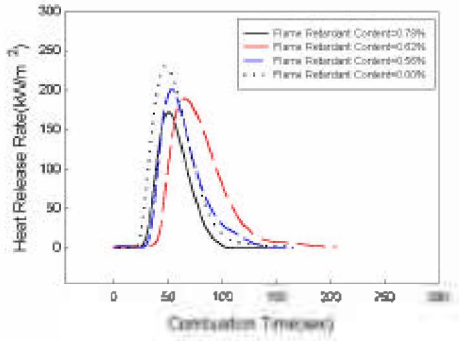


그림 11. 난연제 함량에 따른 열방출속도

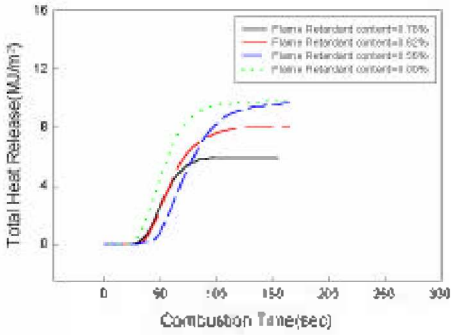


그림 12. 난연제 함량에 따른 총열방출량

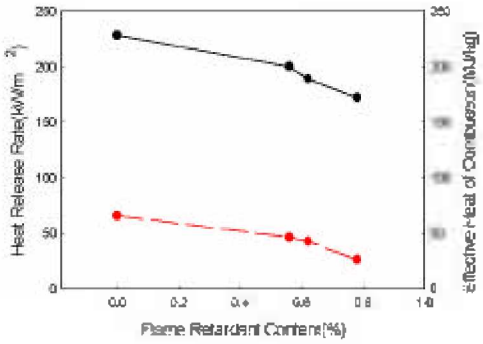


그림 13. 난연제 함량에 따른 열방출속도와 유효 연소열

4. 결 론

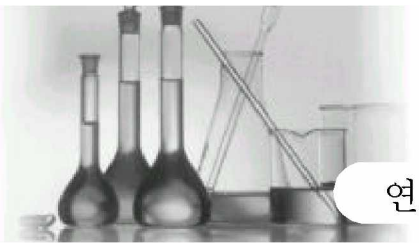
건축 단열재용으로 널리 사용되고 있는 발포 폴리스티렌 보온재에 대한 연소성 시험인 KS M3808의 양초시험을 대체할 수 있고 재현성과 반복성을 확보한 정밀도 높은 시험방법을 개발하게 되었다.

양초시험에 대한 문제점을 분석하기 위한 검증시험에서 규격에 명확하게 규정되어 있지 않아 그 결과에 영향을 미칠 수 있는 시험조건에 대해서 분석하였다. 또한 시험소간 상호비교시험으로부터 정밀도 인자인 재현성 및 반복성이 부족함을 입증하였다. KS M 3808의 연소성 시험방법을 대체하기 위한 여러 연소시험방법들을 대상으로 시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 난연제 함량 및 겉보기 밀도를 변화시킨 시료를 제작하고 수평연소시험, 45°연소시험 및 산소지수법을 대상으로 시험조건을 변화시키면서 시험을 수행하였다. 또한 콘칼로리미터 시험으로부터 열방출속도, 유효연소율 등을 측정하였다. 양초시험은 시험소간 상호비교시험에 의한 정밀도의 평가결과, 재현성 및 반복성이 떨어지는 반면에 수평연소시험과 산소지수시험은 시험결과의 경향성이 서로 일치할 뿐만 아니라 높은 정밀도를 얻을 수 있었다. 특히 산소지수 시험과 콘칼로리미터 시험에서는 난연제 함량에 따른 난연특성이 선형적으로 나타나며, 두 시험방법이 유사한 경향을 보여 주었다.

양초시험과 수평연소시험법은 시료의 연소성이 큰 차이가 있을 때는 그 결과가 뚜렷하였지만 연소거동의 차이가 미미한 경우에는 변별이 어려웠다. 그러나 수평연소시험의 장점으로 용융물의 낙하에 의한 2차 발화의 발생유무를 확인할 수 있기 때문에 상당히 중요한 시험이라고 할 수 있다. 산소지수법은 연소성의 차이가 적더라도 변별할 수 있는 정밀도가 확보된 시험방법으로 다른 시험방법에 비해 산소지수시험이 연소특성을 측정하는데 가장 적절한 것으로 판단되며, 특히 발포 폴리스티렌의 연소성 시험방법으로 가장 적절한 방법으로 평가되었다. 그러나 2차 발화의 발생유무가 연소성에 있어서 중요하므로 수평연소시험은 산소지수와 병행하는 것이 바람직할 것이다. 또한 표 4의 정밀도 평가결과에서 볼 수 있듯이 수평연소시험과 산소지수시험이 표준편차가 작으므로 표준 시험방법으로 채택하기에 적합하다고 할 수 있다.

표 4. 각 시험방법의 반복성 및 재현성의 표준편차

	반복성 평가	재현성 평가
양초시험(연소시간)	0.174	0.924
수평연소시험(연소길이)	0.060	0.335
산소지수시험	0.189	0.681



콘칼로리미터 시험은 수평연소시험 및 산소지수 시험결과에 대한 이론적 근거를 제시할 수 있었으며, 다른 시험방법보다 시험변수에 의한 오차가 적어 정밀도가 높을 뿐 아니라 일회 시험으로부터 얻을 수 있는 많은 정보 때문에 최상의 시험방법이라고 할 수 있다. 그러나 워낙 고가의 시험장비이므로 당장 KS에 적용하기에는 많은 무리가 있으며, 현재 국제 규격에서도 콘칼로리미터 시험을 규격으로 제정하는 추세에 있으므로 이러한 국제적인 추이에 따라 향후 KS에의 적용을 신중히 검토할 필요가 있을 것이다.

5. 기대효과

본 연구에서는 화재시에 그 난연성에 대한 시시비비가 발생하고 KS의 연소성 시험방법에 대하여 논란이 제기되어 온 건축 단열재용 발포 폴리스티렌을 대상으로 하였다. 연구수행 결과, KS M 3808의 연소성 시험방법에서 양초시험 대신에 수평연소시험과 산소지수시험을 적용하고자 한다. 규격의 개정을 통하여 정확도 높은 시험방법을 마련함으로써 생산자측에선 철저한 품질관리를 할 수 있고, 소비자인 국민의 입장에선 화재시에 안전성을 확보하게 되며, 소비자로부터는 KS 인증제품에 대해 확신을 주고, 규격 수요자로부터는 KS의 신뢰도를 제고할 수 있을 것이다.

본 연구를 통하여 발포 폴리스티렌 단열재뿐만 아니라 건축용 재료로 사용되고 있는 기타 소재, 폴라우레탄, 폴리에틸렌, 페놀 등의 발포제품 및 섬유 등에 대한 연소성 평가방법에도 응용할 수 있을 것이라 사료된다.