[Research Paper]

ABS 나노복합재료와 이를 적용한 내화창호시스템의 개발 – 파트 II: 커튼월구조 내화창호시스템의 개발

강성욱 · 권민재* · 최정윤**† · 박재완***

한국건설생활환경시험연구원 건설본부 방재기술센터 책임연구원, *한국건설생활환경시험연구원 건설본부 방재기술센터 주임연구원,

한국건설생활환경시험연구원 건설본부 방재기술센터 수석연구원, * (주)동양정공 상무

Development of an ABS Nanocomposite Material and Its Application to a Fire-Resistant Glazing System – Part II: Development of a Curtain-Wall-Type Fire-Resistant Glazing System

Sungwook Kang · Minjae Kwon* · J. Yoon Choi**† · Jae Wan Park***

Senior Research Engineer, Fire Protection Technology Center, Korea Conformity Laboratories,

*Junior Research Engineer, Fire Protection Technology Center, Korea Conformity Laboratories,

**Principal Research Engineer, Fire Protection Technology Center, Korea Conformity Laboratories,

***Vice President, Dongyang Junggong Ltd.

(Received August 14, 2020; Revised September 7, 2020; Accepted September 7, 2020)

요 약

본 연구에서는 건축물의 구성재 중 하나인 커튼월구조 창호시스템의 저단열성 알루미늄 프레임 부분에 대해 가연성이 개선된 고단열성 ABS-나노클레이 복합재료(이하 나노복합재료)를 적용하여 건축물의 에너지 효율성과 화재안전성 확보 모두에 기여하고자 한다. 파트 I(i.e. 기 논문)에서는 ABS의 가연성 개선을 위한 나노복합재료의 개발 과정을 다뤘다. 본 논문(i.e. 파트 II)에서는 연구실 단계에서 개발된 재료를 생산 단계로 스케일업하고자 환경조건과 배합비를 세부 조정하였고, 펠렛을 생산하여 내화창호시스템 파일럿 모델을 제작하였다. 벤치스케일 내화성능 실험에서는 프레임 부분 나노복합재료의 용융에 따른 흘러내림을 관찰하지 못했고, 열전달 지연효과를 확인하였다. 실 스케일 실험에서는 커튼월 타입 창호시스템의 종합적인 내화성능으로 차열 30 min (국내)과 EIW30 (유럽)을 확인하였다. 파일럿 모델 제작을 위한 유리세트는 단열수치해석 결과를 기반으로 설계하였고 실 스케일 실험에서 창호시스템의 전체 단열성능으로 일반창호 단열 2등급을 확인하였다. 이 성능은 커튼월에 대해서 방화지구 내 설치 시 요구되는 내화 성능과 고효율인증제도에서 검토되고 있는 열관류 요구성능을 만족하는 수준이다.

ABSTRACT

This study is focused on the development of a curtain-wall-type fire-resistant glazing system to contribute to both energy efficiency and fire safety of a building. The development of an ABS nanocomposite material and its improvement in flammability are presented in Part I (the authors' companion paper). In this study, the ABS nanocomposite material was scaled up for application to a fire-resistant glazing system in industries. A bench-scale test was designed to quantitatively analyze the frame's heat transfer performance. To manufacture a pilot model of the glazing system, a glazing part was designed based on numerical simulations of thermal insulation. The performance of the entire glazing system was tested on a full scale in terms of thermal resistance and insulation.

Keywords : Fire-resistant glazing, Fire retardant polymer, Nanoclay, Flammability, Fire resistance test

† Corresponding Author, TEL: +82-43-210-8904, FAX: +82-43-210-8985, E-Mail: j.yoon.choi@kcl.re.kr

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1. 서 론

본 연구에서는 건축물의 구성재 중 하나인 커튼월을 포함한 창호(이하 창호시스템)가 건축물의 에너지효율성과 화재안전성 확보에 모두 기여할 수 있는 방안을 찾고자 한다. 본 연구의 파트 I에서는 일부 강철로 보강된 알루미늄 창호시스템(i.e. 커튼월구조 단일고정창호)의 단열성 확보를 위해 고분자수지(i.e. Acrylonitrile-butadiene-styrene terpolymer, ABS)를 도입하였으며, 본연의 가연성 개선을 위해서 유기화된 클레이를 수지 내 나노 분산시키고 팽창형 수지(Intumescent material)를 첨가하였다⁽¹⁾. 가연성이 개선된 고단열성의 ABS-나노클레이 복합재료(이하 나노복합재료)를 창호시스템 프레임에 적용하였다. 이 프레임을 유리세트와 결합시켜 결과적으로 적절한 수준의 단열성과 내화성을 동시에 확보할 수 있는 파일럿 모델 제작을 목표로 설정하였다.

본 연구는 재료 개발에서부터 창호시스템 제작에 이르기까지 다음의 일련의 과정을 거쳐 수행되었다:

- 1) ABS 복합체 재료의 준비(파트 I);
- 2) ABS수지 내 클레이 나노분산(파트 I);
- 3) 나노복합재료 가연성 개선을 위한 배합비 결정(파트 I);
- 4) 알루미늄-나노복합재료 프레임 개발(파트 II);
- 5) 창호시스템의 내화성능 및 단열성능 검토(파트 II).

본 지에서는 (4)-(5)에 해당하는 내용을 집중적으로 다룬다. 참고로 커튼월에 대한 고효율인증제도와 시험방법은 정책화를 위한 논의가 현재 진행 중으로 일반창호 단열 2등급 정도($1.0\text{--}1.4 \text{ W/(m}^2\text{K)}$)의 열관류율을 검토 중이며, 커튼월을 방화지구 내 설치할 경우에 한정하여 외벽 중 비내력벽으로 연소할 우려가 없는 부분에 30 min 내화성능을 요구하고 있다⁽²⁻³⁾.

2. 본 론

2.1 알루미늄-나노복합재료 프레임 설계

커튼월 구조 단일고정창의 단열성과 내화성을 모두 만족시키기 위해서는 유리 부분의 성능 뿐만 아니라 프레임 부분의 성능 확보도 중요하다. 커튼월 프레임은 기본적으로 유리 및 자체 무게에 기인한 수직하중과 바람에 의한 수평하중을 견딜 수 있는 강성을 가져야 하므로 기본프레임의 재료로 알루미늄을 선택하였다. 단열성과 내화성 확보의 방안으로 ABS 나노복합재료를 적용하였으며 재료의 개발을 기 논문에 설명되었다⁽¹⁾.

Figure 1은 최종 완성된 실험체의 구조를 보여준다. 빌트업 공법으로 제작한 알루미늄 프레임의 외부에 압출성형한 나노복합재료를 결합시켰고 미려한 외관을 위해서 알루미늄 재질의 얇은 내부 라이닝(Lining)으로 마감했다. 프레임 간격 유지와 더불어 단열효과를 극대화하기 위한 목적으로 볼트-너트 시스템을 설계하였고 시스템의 너트 안에 열전달을 방해하는 폴리아미드 단열바를 삽입하였다. 유리 부

Figure 1. A curtain wall-type fixed window composed of aluminium and nano-composite.

분과 프레임이 맞닿는 부위는 내화 및 단열에 취약한 부위이다. 이에 내화스트립으로 유리 주변을 감싸 1차적으로 화염에 의한 유리 간봉을 보호하였고 2차적으로 내화실란트를 적용하여 유리를 보호하였다. 또한 고온조건에서 알루미늄 프레임이 용융된다고 하더라도 창호시스템이 화재차단의 역할을 더 오래 지속하게 하기 위해 용융점이 더 높은 철 스트립으로 보강하였다.

앞서 설명한 실험체는 다음의 주요 세부과정들을 거쳐 완성된다:

- 1) 나노복합재료의 대량 압출 및 펠렛화를 통해 얻어진 다량의 펠렛으로 나노복합재료 프레임 압출;
- 2) 알루미늄-나노복합재료 프레임의 내화성능 검토를 위한 벤치스케일 내화실험;
- 3) 최적 유리세트 설계를 위한 단열수치해석.

2.2 나노복합재료 대량 압출 및 프레임 제작

실험실 단계에서 소량의 재료를 이용하여 개발된 나노복합재료의 최적 배합비를 제품화 단계에 적용하기 위해서는 이중압출기(Twin screw extruder)를 이용하여 재료들을 배합비에 따라 혼합하고 펠렛화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 Table 1에 정리된 압출기를 이용하여 소용량에서 대용량으로 3단계에 걸쳐 규모를 확대해가며 압출조건을 조정하였으며 그 결과는 Table 2에 정리하였다. 참고로 이중압출기에서는 재료 종류별 최적 압출조건 구현을 위해 일반적으로 기계적 혼합 구간을 세부 구간(i.e. zone)으로 나누어 온도조건을 조절할 수 있도록 하고 있다.

앞서 설정된 압출조건 아래에서 생산된 나노복합재료 펠렛들은 Figure 2a에서 보이는 형상으로 제작된 금형을 통과함으로써 프레임 형상으로 압출되었고 Figure 2b에서와 같이 알루미늄 프레임과 결합되었다. 압출장비로는 스크류 지름 80 mm의 Single Screw Hyundai Rexma 모델을 사용하

Table 1. Specifications of Twin Screw Extruders

Name	Capacity (per day)	Screw diameter	Extruder
BA-11	~2.5 kg	11 mm
TEACH-L INE ZT 25T	~6 kg	25 mm
UNI-40	200~ kg	40 mm

Table 2. Thermal Conditions for Palletizing ABS-nanoclay Composite

Zones	Extruder model		
	BA-11	TEACH-LINE ZT 25T	UNI-40
Zone#1	180 °C	180 °C	210 °C
Zone#2-3	200 °C	200 °C	220 °C
Zone#4	220 °C	220 °C	
Zone#5	230 °C	230 °C	
Zone#6-9	-	-	230 °C
Zone#10	-	-	235 °C
Header	230 °C	230 °C	
Drying	80 °C for 2 h	80 °C for 2 h	80 °C for 2 h
Speed	12-15 rpm	12-15 rpm	400 rpm

(a) Extrusion

(b) Assembly

Figure 2. ABS-nanoclay composite extrusion and Al-nanocomposite assembly.

였다. 압출과정에서 zone 별 설정된 온도조건은 Table 3에 정리하였다.

2.3 알루미늄-나노복합재 프레임의 내화성능

나노복합재료가 적용된 알루미늄 프레임이 유리세트와

Table 3. Thermal Conditions for Extruding Frames

Zones	Temperature
Zone #1	170 °C
Zone #2	175 °C
Zone #3	180 °C
Header	190 °C
Dies	200 °C
Drying	70 °C for 1h
Speed	530-550 rpm

함께 최종 창호시스템으로 결합되기 전에 프레임의 내화성능을 확인하기 위해 자체 개발된 복사가열장비를 이용한 벤치스케일 내화실험이 수행되었다. 본 실험을 통해서 확인하고자 하는 항목은 다음과 같다:

1) 알루미늄 프레임에 적용된 나노복합재료의 열 노출 시 용융에 의한 흐름성;

2) 실스케일 내화시험의 화재곡선(이하 ISO 834 화재곡선) 가열조건 하에서 나노복합재료의 유무와 단열바 재료 종류에 따른 프레임의 가열 전면(Inside in Figure 1)과 비가열 후면(Outside)의 온도변화;

3) 프레임의 전면이 ISO 834 화재곡선에 노출 시 단열바 재료의 온도변화.

본 벤치스케일 실험에서 원하는 가열조건은 KS F 2845(4)에서 제시된 대로 KS F 2257-1⁽⁵⁾ 기반 실스케일 내화시험에서 사용하는 ISO 834 화재곡선으로서 이 화재곡선은 비내력 수직구획 부재를 포함한 건축구조부재의 내화성능을 확인할 때 적용되는 표준곡선이다. 2017년 10월 국토교통부에서 시달한 건축법령운영지침에 따르면 커튼월은 방화지구 내 설치에 한정해서 내화구조로 취급되는 바, 본 연구에서 개발한 커튼월구조 창호시스템의 내화성능은 이 기준에 따라 검토하고자 하였다⁽¹⁾.

Figure 3은 벤치스케일 내화실험에 사용된 다목적 복사가열장비의 구조를 보여주며, 크게 가열부, 수냉부, 실험체 설치부, 전력부, 측정부로 구분된다. 복사가열기(Radiant heater)의 가열부는 36개의 석영램프(Infrared halogen tubular quartz lamp, AC380V / 3 kW)로 구성된다. 개개의 램프튜브 간 요구간격에도 램프를 배열하고자 2개 층으로 나누고 엇갈려 배열시켜 발열 집적도 및 균일도를 향상시킨 대신 수냉시스템을 적용하여 가열기의 안정성을 확보하였다. 실험체는 가열기 전면에서 일정거리 떨어진 위치에 고정되며, 이 위치에 입사하는 복사열류량은 예비실험을 통해 동일한 위치에 고정시킨 열유속센서(Schmidt-Boelter gauge, model: SBG01)를 이용하여 측정하였다. 온도는 0.2 s 마다 측정되었다.

Figure 4의 검은색 실선은 ISO 834 화재곡선으로 실스케일 가열로 내 시간별 가스온도의 변화를 의미하며, 이 가열조건을 벤치스케일 장비에서 구현하기 위해서는 가스온도

Figure 3. Radiant heating apparatus structure for bench-scale thermal resistant tests.

Figure 4. Heating condition setup in bench-scale tests.

값을 실험체 표면에서의 입사열유량값으로 변환하는 작업이 필요하다. 이와 관련해서 Castle은 3종류의 가열로 내 가스 온도를 ISO 834 화재곡선에 따라 증가시켰을 때의 열유량을 측정하였다(6) (Figure 4의 파란색 점). 본 실험에서의 복사가열기가 열원으로부터 15 cm 떨어진 위치에서 Castle의 측정데이터를 구현할 수 있도록 시간별 전력변화 설정을 하였으며, 그 측정 결과는 Figure 4의 붉은 실선으로 나타내었다.

실험체는 Figure 5에서의 Type A와 B 프레임의 전면에 2 mm 두께의 나노복합재료 스트립 설치 유무에 따라 총 4종류로 구분되며 이는 Table 4에 정리되어 있다. 앞서 설명된 가열조건에서 실험체 각 부분의 시간별 온도변화를 측정하기 위해 k타입 열전대를 Figure 6과 같이 설치하였다. 일방향 열전달을 구현하기 위해서 Figure 3에서처럼 실험체의 가열 전면과 비가열 후면을 제외한 모든 면을 글라스울로 감싸 단열처리하였다.

Figure 7은 네 종류(S1-S4)의 실험체로부터 얻어진 결과들을 취합한 그래프로 20 min의 가열시간동안 각 위치별 (TC1-TC4) 온도변화를 보여준다. 전반적으로 ISO 834 화재곡선에서 초기 5 min간의 급격한 열유량 증가에도 불구하고 알루미늄의 높은 열용량(약 244 kJ/(m³K))로 carbon steel의

(a) Type A: Al frame with polyamide

(b) Type B: Al frame with polyurethane

Figure 5. Type of specimens for bench-scale thermal tests.

Table 4. Window Frame Specimens Tested with the Bench-scale Apparatus

Name	Specimen
S1	Polymer composite (2 mm thk.) + Type A (Al frame with polyamide)
S2	Bare Type A (Al frame with polyamide)
S3	Polymer composite (2 mm thk.) + Type B (Al frame with polyurethane)
S4	Bare Type B (Al frame with polyurethane)

Figure 6. Specimen dimensions and setup for bench-scale thermal tests.

약 72% 수준)으로 인해 실험체의 온도는 50 °C 이내로 급격히 증가하진 않았다. 약 20 min이 경과한 시점에서의 실험체 온도는 최고 210.3 °C 정도까지 증가하였다.

Figure 7. Time-temperature profiles obtained from bench-scale thermal tests.

Figure 8. Specimen status after testing.

첫 번째 항목인 나노복합재료의 복사열 노출 시 용융에 의한 흐름성 확인을 위해서 온도변화에 따른 복합소재의 변화를 육안으로 확인하였다. Figure 7에 표시된 바와 같이 나노복합재료가 적용된 S1과 S3은 각각 6 min 10 s, 5 min 35 s에 착화되었다. 착화시점 이후 가열 전면 전반에 걸쳐 검은색 탄화층이 형성되기 시작하여 가열 이후에는 Figure 8의 S1과 같은 표면 상태를 보였으며 가열도중 용융에 의한 흘러내림은 관찰되지 않았다.

두 번째 항목인 나노복합재료 유무와 단열바 재료 종류에 따른 가열 전면 및 비가열 후면 온도변화(TC1 및 TC4)를 살펴보면, 전반적으로 가열 전면온도(TC1)의 경우 실험체 $S4 > S2 > S1 \approx S3$ 순으로, 비가열 후면온도(TC4)의 경우 $S2 \approx S4 > S3 > S1$ 순으로 높은 온도를 보였다(Figure 7). Figure 9에서의 실험체별 가열 전면과 비가열 전면 온도증가율(dT/dt)을 살펴보면, 초반 5 min은 가열기의 급격한 전력 상승으로 증가율 변동폭이 심했으나 차차 안정화되었다. 안정화된 시점(약 7 min 후)에서는 비가열 전면 온도증가율($d(TC4)/dt$)은 앞서 설명한 실험체별 TC4의 고온순위($S2 \approx S4 > S3 > S1$)와 유사한 경향을 확인하였다. 다만, 가열 전면 온도증가율($d(TC1)/dt$)의 경우는 7 min 이후에도 실험체별 온도증가율이 유사하여 순위가 명확하게 확인되지 않았다.

나노복합재료의 열전달지연효과를 확인하기 위해 Figure 7

Figure 9. Differential temperatures of front and rear surfaces of specimens ($d(TC)/dt$).

에서 동일한 프레임 A타입(폴리아미드 단열바)인 S1과 S2의 가열 전면 및 비가열 후면 온도변화(TC1 및 TC4)를 비교해보았다. TC1의 경우, 나노복합재료가 적용된 S1이 적용되지 않은 S2보다 최대 11.0 °C 정도, TC4의 경우, S1이 S2보다 최대 5.2 °C 정도 낮은 온도를 가졌다. 프레임 B타입(폴리우레탄 단열바)인 S3과 S4의 경우, 나노복합재료가 적용된 S3의 가열 전면 온도(TC1)와 비가열 후면 온도(TC4)는 나노복합재료가 적용되지 않은 S4보다 20 min 내 각각 최대 13.2 °C, 8.9 °C 정도 낮은 온도를 가졌다. 또한 단열바 재료의 열전달지연효과를 비교하기 위해 동일한 나노복합재료 적용 조건인 S1과 S3의 비가열 후면 온도변화(TC4)를 확인해보면, 폴리아미드가 적용된 S1이 폴리우레탄이 적용된 S3보다 최대 5.8 °C 정도 낮은 온도를 가졌다.

열전달지연효과를 확인하기 위해 앞서 살펴본 실험체별 온도증가량에 대한 절대적 비교분석은 실험체별 실험조건(가열조건, 주변온도 등)이 동일하다는 가정에서 가능하다. 본 벤치스케일 실험은 가능한 한 유사한 실험조건에서 진행되었으나 오차가 있을 가능성을 고려하여 상대적 비교분석을 수행하였다. 이를 위해 실험체별 가열 전면과 비가열 후면의 온도 차이를 계산하였고 이 상대적 차이가 클수록 열전달지연효과가 좋은 것으로 볼 수 있다. Figure 10은 이 값에 대한 증가율($d(TC1-TC4)/dt$)을 보여준다. 변동폭이 안정화된 구간(약 10 min 이후)에서의 실험체별 증가율은 $S1 > S3 > S2 > S4$ 순으로 높음을 확인하였다.

세 번째 항목인 프레임의 전면이 ISO 834 화재곡선에 노출 시 단열바 재료의 온도변화를 살펴보면, 폴리아미드의 20 min 내 최대 온도는 68.8 °C로, 73.6 °C까지 증가한 폴리우레탄보다 다소 낮았으나 큰 차이를 보이지는 않았다(Figure 7).

2.4 최적 유리세트 설계를 위한 단열수치해석

창호시스템의 구성품들 중에서 가장 넓은 노출면적을 차지하는 유리는 단열성의 척도인 열관류율에 가장 큰 영

Figure 10. Differential temperature difference between front and rear surfaces of specimens ($d(TC1-TC4)/dt$).

향을 미치는 부분이다. 본 연구에서는 창호시스템의 단열성과 내화성을 최적으로 만족시킬 수 있는 유리세트를 설계하기 위해 단열수치해석을 수행하였고, 이를 기반으로 실제 제작된 실험체에 대해 KS F 2278⁽⁷⁾에 따른 시험을 수행하여 최종 단열성능을 확인하고자 하였다. 해석프로그램으로는 미국 에너지부에서 운영하는 Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley Lab)에서 개발한 윈도우 전용 열전달해석 툴을 이용하였다. THERM V7.6을 이용하여 유리세트 구성에 따른 창호시스템 내부 2차원 열전달흐름을 해석하였고, 계산데이터를 WINDOW V7.6과 링크시켜 전체 창호시스템의 열관류율(i.e. U-value)을 예측하였다. 해석 조건으로는 KS F 2278의 시험조건을 모델링 내 반영하였다. 모델의 크기는 실제 실험체 크기인 2,000 mm × 2,000 mm로 하였고, 외기와 실내온도는 각각 0 °C와 20 °C로 설정하였다.

Figure 11은 두 종류의 창호시스템에 대한 수치해석을 통해 얻어진 U-value와 온도 등고선 분포를 보여준다. Type A는 두께 23 mm 차열유리의 단열성능을 확인하기 위해 모델링되었고 그 결과 4.8511 W/(m²K)의 U-value이 예측되었으며 이는 Table 5에 정리되어 있다. Type B는 단열성능 2등급을 충족하기 위해 단열층(14 mm 아르곤층 + 6 mm Low-E 유리)이 추가된 모델로서 1.3791 W/(m²K)의 U-value가 예측되었다. 이 결과들을 참고하여, 유리세트를 내화성능 만족을 위한 두께 23 mm의 차열유리와 단열성능 충족을 위한 두께 14 mm의 아르곤층 및 두께 6 mm의 Low-E 유리로 최종 설계하였다.

2.5 창호시스템의 내화성능

본 실험에서는 제품의 성능인증 목적이 아닌 실험체 내 화성능확인 목적으로 가열로를 활용하였으며 이에 기본적으로 비내력 구조의 평면 유리구획 부분에 대한 내화시험 방법인 KS F 2845⁽⁴⁾ 및 이와 연계된 KS F 2257-1⁽⁵⁾을 기반

Figure 11. Contour maps of U-value and temperature obtained from numerical simulations.

Table 5. U-values Obtained from Numerical Simulations

Type	Factor	Value			
		Glass	Frame	Edge	Total
A*	Area (m ²)	3.073	0.466	0.461	4.000
	U-value (W/(m ² K))	5.054	4.078	4.281	4.851
B**	Area (m ²)	3.073	0.466	0.461	4.000
	U-value (W/(m ² K))	1.190	2.624	1.382	1.379

*Type A: 23T Fire resistive rated glass

**Type B: 23T Fire resistive rated glass + 14T Ar + 6T Low-E glass

으로 내화성능을 확인하고자 하였다. 또한 국내에는 아직 정립되지 않은 커튼월의 내화성능에 관한 시험방법 및 기준이 영국 및 유럽에는 BS 476-20/22 (BS EN 1364-1/3)에 제시되어 있으므로 이를 고려하였다⁽⁸⁻¹²⁾. 본 실험에서 설정한 내화성능은 크게 차열성(Integrity, E), 차열성(Insulation, I), 복사열차단성(Radiation, W)으로 세부 판단방법은 Table 6에 정리하였다.

Figure 12에서 제시된 커튼월구조의 단일고정창 실험체 2개가 실크기인 600 mm × 1,500 mm로 Figure 12a와 같이 제작되었고, 가열로에 밀착시키기 위해 시험체 틀에 Figure 12b와 같이 시공되었다. 비가열면의 평균 및 최고 상승 온도를 측정하기 위해 실험체별 비가열면 유리 및 프레임에 총 8개 k타입 열전대를 설치하였는데, 유리 부분에는 4분할면 각 중앙에, 프레임에는 멀리언과 트랜섬 부위의 각 중앙에 부착하였다.

Figure 13은 실험을 통해 측정된 가열로와 실험체 부위별 온도-시간 곡선을 보여준다. 가열로는 ISO 834 화재곡선을 구현하였으며 이 가열 조건에서 실험체의 프레임 부분의 온도(검은색)가 유리 부분(붉은색)보다 빠르게 증가하

Table 6. Performance Criteria and Results

Criteria		Result
Integrity (E)	No ignition of a cotton pad	OK
	No penetration of a gap gauge	OK
	No sustained flaming	OK
Insulation (I)	Mean temperature rise from the initial temperature, less than 140 K (22.6 °C)	OK
	Maximum temperature rise from the initial temperature, less than 180 K (39.2 °C)	OK
Radiation (W)	Radiant heat flux at a distance of 1 m from the unexposed face of specimens	-

*No requirement to measure the radiation from a surface with a temperature below 300 °C⁽¹⁰⁾

(a) Specimen

(b) Test setup

Figure 12. Specimen preparations for full-scale fire resistance test. **Figure 13.** Temperature-time profiles in full-scale fire resistance tests.

였다. 프레임과 유리는 30 min 가열시간 동안 각각 60.7 °C, 37.3 °C까지 상승하였다. 30 min 가열시간 동안, 면패드에는 착화가 발생하지 않았고 균열개이지는 관통되지 않았으며 화염이 시각적으로 확인되지 않아 차염성을 만족하였다. 차열성의 경우, 시험 시작 시의 비가열면 평균온도(21.5 °C)보다 평균 및 최고 상승온도가 각각 22.6 °C, 39.2 °C 정도였으므로 만족하였다. 복사열차단성은 비가열면 온도가 300 °C보다 상당히 낮았으므로 만족함을 보였다. 이 결과들은 Table 6에 정리되어 있다.

Figure 14는 앞서 벤치스케일 실험에서 측정했던 비가열 후면의 온도-시간 곡선과 실스케일 실험에서 얻어진 곡선을

Figure 14. A comparison between bench-scale and full-scale fire resistance tests in terms of temperature-time profiles of frames.

(a) Specimen

(b) Test setup

Figure 15. Full-scale thermal insulation test.

보여준다. 벤치스케일 실험은 프레임의 가열 전면에서 비가열 후면으로 1방향 열전달을 구현한 반면에, 실스케일 실험에서는 프레임의 4면 중에 2면이 가열되었다. 이런 이유로 실스케일에서 측정된 온도값이 벤치스케일보다 더 높은 경향을 보였다. 그러나 비용과 시간이 많이 소비되는 실스케일 실험 전에 벤치스케일 실험을 통해 성능변화 경향을 파악할 수 있을 정도의 적절한 온도-시간 곡선 추세를 보였다.

2.6 창호시스템의 단열성능

커튼월구조 내화창호시스템의 단열 성능을 확인하기 위해 열관류율 시험을 수행하였다. KS F 2278⁽⁷⁾에 의하면 요구되는 시험체 크기가 너비 2,000 mm × 높이 2,000 mm이므로 Figure 15에서 보이는 바와 같이 해당 크기로 재제작되었다. 시험조건으로 외기 및 실내온도는 각각 0 °C, 20 °C로 설정하였다. 시험 결과로 열관류율이 1.311 W/m²K으로 측정되었고 이는 일반창호 단열 2등급 정도(1.0-1.4 W/(m²K))에 속하는 성능이다.

3. 결 론

본 연구에서는 파트 I에서 개발한 나노복합재료가 적용된 커튼월구조 창호시스템의 파일럿 모델을 실제 제작하여 내화 및 단열성능을 확인하고자 하였다. 나노복합재료의 대량압출을 위한 환경조건과 배합비를 세부 조정하여 다량

의 펠렛을 생산하였다. 이후 나노복합재료 프레임을 압출 생산하여 알루미늄 프레임과 결합하였고 최적 설계된 유리 세트와 조립하여 창호시스템 파일럿 모델을 제작하였다.

파일럿 모델의 내화성능은 벤치 및 실 스케일 실험을 통해 확인되었다. 프레임의 내화성능에 대한 정량적 분석을 목적으로 한 벤치스케일 실험 결과, ISO 834 화재곡선 노출 조건에서 나노복합재료의 용융에 따른 홀리내림은 발생하지 않았고 나노복합재료에 의한 열전달 지연효과를 온도 및 증가율로 확인하였다. 폴리아미드 단열바 구조는 폴리우레탄에 비해 열전달 지연효과가 근소하게 앞서는 결과를 보였다. 실 스케일 시험에서는 종합적인 내화성능을 확인하였다. 결과적으로 영국 및 유럽 기준의 커튼월 내화성능 요구항목인 Integrity (E), Insulation (I), Radiation (W)에 대해 EIW30을, 국내의 방화지구 내 설치하는 커튼월에 대한 내화성능 요구기준인 차열 30 min 내화성능을 확인하였다.

최적 유리세트는 단열성능에 초점을 맞추어 수치해석을 기반으로 설계되었고 실 스케일 열관류율 시험을 통해 검증되었다. 그 결과, 일반창호 단열 2등급 정도에 속하는 성능을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)과 소방청 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(10080375과 20008021).

References

1. S. Kang, M. Kwon and J. Y. Choi, "Development of an ABS Nanocomposite Material and its Application to a Fire-resistant Glazing System-Part I: Development of an

- ABS Nanocomposite Material", Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 5, pp. 1-9 (2020).
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "Regulations on Finishing Materials for External Walls of Buildings in a Fire Protection District" (2017).
3. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, "[Appendix 1] Classification of Fire Resistant Structures", Regulations on Egress and Fire Protective Structures of a Building (2019).
4. KS F 2845, "Fire Resistance Test for Glazed Elements", Korea Standards and Certifications.
5. KS F 2257-1, "Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-general Requirements", Korea Standards and Certifications.
6. G. K. Castle, "The Nature of Various Fire Environments and the Application of modern material approaches for fire Protection of Exterior Structural Steel", Journal of Fire and Flammability, Vol. 5, pp. 203-222 (1974).
7. KS F 2278, "Standard Test Method for Thermal Resistance for Windows and Doors", Korea Standards and Certifications.
8. BS 476-20:1987, "Method for Determination of the Fire Resistance of Elements of Construction", British Standards.
9. BS 476-22:1987, "Method for Determination of the Fire Resistance of Non-bearing Elements of Construction", British Standards.
10. BS EN 1363-1:2012, "Fire Resistance Tests Part 1: General Requirements", British Standards.
11. BS EN 1363-2:1999, "Fire Resistance Tests Part 2: Alternative and Additional Procedures", British Standards.
12. BS EN 1364-3:2014, "Fire Resistance Tests for Non-loadbearing Elements Part 3: Curtain Walling - Full Configuration", British Standards.