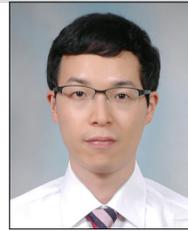


곡면 복층유리 열파손현상 및 원인분석

Analysis of Phenomenon and Cause Concerning Thermal Breakage of Curved Double Glazing



이 동 화*



이 재 현**



김 효 락***

* 대림산업(주) 기술개발원 과장
 ** 대림산업(주) 기술개발원 대리
 *** 대림산업(주) 기술개발원 부장

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축에 있어서 곡면의 형태는 고대건축의 볼트와 돔(dome)으로부터 최근의 자유곡면에 이르기까지 시대에 걸쳐 다양한 건축재료로 구축되어 왔다. 이중 채광이 가능하며 일반벽체처럼 단열과 차음의 기능을 가지고 있는 유리는 고급스러운 실내 분위기를 연출할 수 있어서 디자인적인 요소로 많이 사용되고 있다. 그러나 곡면유리는 평유리 대비 면가공이 어렵고, 품질확보의 어려움에 따른 단열성능 저하발생 가능성이 높다. 또한 곡면유리를 복층화하는 작업은 국내의 경우 모두 수작업으로 이루어지고, 복층화 과정에서 2차 실리콘의 구속으로 인하여 곡면유리에 추가적인 내부응력이 발생하기 때문에 휨내력이 저하되고, 유리 온도차에 의한 열파손에 취약하게 된다.

또한, 현재 국내에는 곡면 복층유리에 대한 품질기준이 마련되어 있지 않은 상황이며, 제작 및 복층화 공정이 다른 곡면 복층유리가 적용될 경우, 기존의 평면 복층유리에 적용되는 연구자료를 적용하기는 어려운 실정이다.

본 연구는 곡면 복층유리의 열파손 발생 온도차를 실험

을 통해 정량적으로 산출하고, 반강화 및 비강화 평면유리와 비교를 통해 원인을 파악하여, 추후 곡면 복층유리 적용시 활용자료로 사용하고자 하였다.

1.2 연구의 방법

본 연구에서는 곡면 복층유리의 열파손 발생 온도차를 산출하기 위하여 준비된 유리품종별 시험체를 챔버내에 설

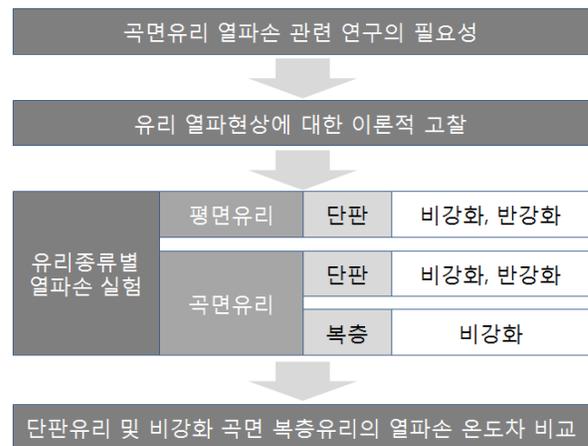


그림 1 연구의 방법

치하고 유리의 고온부와 저온부에 열전대를 부착하여 실험을 진행하였다. 이때 각각의 열파손 형상을 관찰하고 유리 품종별로 실험값을 비교하였다. 연구방법은 그림 1과 같다.

2. 창유리 열파손 현상에 대한 이론적 고찰

유리가 태양광을 받게 되면, 열선을 흡수하여 온도가 상승하고 팽창된다. 그러나, 프레임에 삽입되어 있는 부분이나 그림자가 진 유리부분은 온도상승이 되지 않고 저온인 상태를 유지하게 되는데, 이 저온 부분이 고온부분의 열팽창을 구속하여 유리의 edge부분에 인장응력이 발생한다. 이 열응력은 태양광을 받는 부분과 주변부분과의 온도차, 즉 유리판 내의 온도차에 비례하며, 유리의 edge 강도를 초과하는 인장응력이 발생하게 되면 열파손이 발생한다.

열파손의 원인이 되는 열응력은 창외의 방위, 유리의 품종이나 구성, 그림자의 상태, 커튼의 영향, 유리면적, 창틀의 재질, 시공 조건 등 복잡한 영향을 받는다. 이러한 온도차에 의한 열파손을 열응력으로 계산하여 유리 품종별 허용 열응력값과 비교하여 일반적인 상황에서의 열파손 가능성을 판별할 수 있다. 계산식은 (1)과 같다.

$$\sigma = \sigma_0 \times S \times C \times A \times E \times (T_g - T_s) \quad (1)$$

여기서,

σ : 판유리의 발생 열응력 (kg/cm^2)

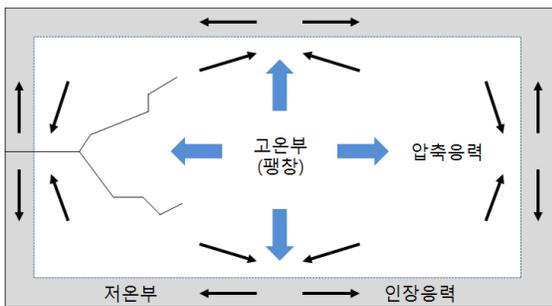


그림 2 열응력에 의한 유리 열파손

표 1 유리의 종류 및 두께별 허용 열응력

분류	두께(mm)	허용열응력(kg/m^2)
플로트판 유리	3 ~ 12	180
	15, 19	150
망입유리	6 ~ 12	100
반강화유리	3 ~ 8	360
강화유리	5 ~ 12	500

σ_0 : 기본응력계수 (4.8 kg/cm^2)

S : 그림자계수

C : 커튼계수

A : 면적계수

E : edge 온도계수

T_g : 유리 중앙부 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_s : 창틀온도($^{\circ}\text{C}$)

본 연구는 위의 계산식 중 열파손에 가장 영향이 큰 인자인 판유리의 온도차($T_g - T_s$)로 범위를 제한하였으며, 다른 변수들의 영향이 없도록 실험조건을 설정하였다. 또한 창틀면의 온도는 유리의 edge면의 온도로 대체하여 실제 곡면 복층유리 열파손시 깨진 유리면에서의 최대 온도차를 측정하였다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험계획

단판유리 및 비강화 곡면 복층유리의 열파손 특성을 파악하기 위해 7가지 유리종류 및 각각의 표면온도차를 실험 요인으로 설정하였으며, 열파손 형상을 관찰하였다.

다음의 표 2는 유리 실험체의 Case 분류를 나타낸 것으로 단판유리의 경우 유리 종류별로 3개의 실험체를 사용하였으며, 복층유리의 경우 6개의 실험체로 실험을 실시하였다.

표 3은 유리 실험체 종류별 규격을 나타낸 것으로 평면 및 곡면 단판유리는 투명 단판유리(두께: 6mm), 비강화 평면 복층유리의 경우 투명 일반적으로 많이 사용되는 Low-e 복층유리(두께: 24mm)로 선정하였다.

표 2 실험체 Case 분류

유리 종류	단판유리			복층유리
	비강화 ¹⁾		반강화 ²⁾	비강화 면취 ³⁾
	면취 ³⁾	면취無		
평면	3EA	3EA	3EA	-
곡면	3EA	3EA	3EA	6EA
실험 요인	유리 종류, 유리표면 온도차			
실험 항목	유리의 열파손 형상			

1) 강화를 하지 않은 일반 유리를 의미함

2) 연화점 이하의 온도에서 가열하고, 찬 공기를 약하게 불어 주어 냉각하여 만드는 배강도 유리를 의미함

3) 날카로운 유리의 모서리를 라운드나 경사형으로 제거하는 것을 의미함

표 3 유리 실험체 종류별 규격

구 분	유리 규격
비강화 평면 단판유리	투명 단판유리(6T) 1,200×1,200mm
반강화 평면 단판유리	
비강화 곡면 단판유리	투명 단판유리(6T) 1,200×1,300mm(호길이)
반강화 곡면 단판유리	
비강화 평면 복층유리	투명 Low-e 복층유리(24T) 6T+12T(ARGON)+6T 700×1,300mm(호길이)

3.2. 실험방법

표 4는 국내의 유리실험 관련 KS 기준을 나타낸 것으로 국내에는 유리 열파손 시험에 관한 KS 기준이 없는 것으로 조사되었다.

표 4 국내 유리실험 관련 KS 기준

구분	단판유리		복층유리	
	평면	곡면	평면	곡면
비강화	KS L 2012	없음	KS L 2003	없음
반강화	KS L 2015	없음		없음
강 화	KS L 2002			없음

※ 유리 열파손 시험에 관한 KS 기준은 없음

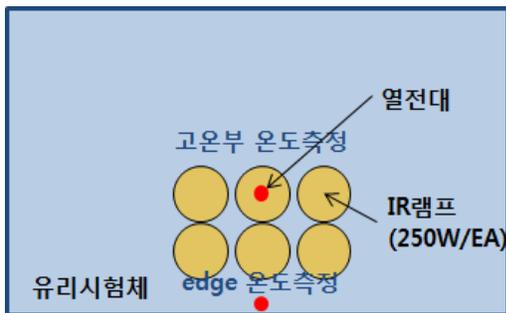


그림 3 IR램프 및 열전대 부착위치

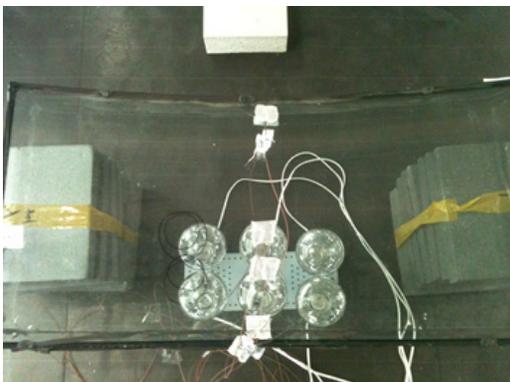


그림 4 실험 장면

본 실험방법을 위해 램프와 유리면 이격거리, 램프의 위치 등 유리 열파손에 관한 다양한 사전 실험을 수행한 결과, 그림 3과 같이 IR램프(250W/EA) 6개를 유리 edge면 중앙에서 약 80mm 정도 이격시켜 열을 조사(照射)함으로써 유리의 열파손을 유도할 수 있음을 확인하였다. 실험장면은 그림 4와 같다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 단판유리의 열파손 특성

(1) 비강화 평면 단판유리

표 5는 비강화 평면 단판유리의 열파손 특성을 나타낸

표 5 비강화 평면 단판유리 열파손 특성

구 분	고온부 온도(°C)	edge온도 (°C)	온도차 (°C)	파손 여부	
면취有	1	120.2	7.4	112.8	○
	2	161.0	21.1	139.9	○
	3	148.4	10.5	137.9	○
면취無	1	139.2	10.7	128.5	○
	2	106.0	5.6	100.4	○
	3	140.5	12.1	128.4	○



그림 5 비강화 평면 단판유리(면취有) 열파손 형상



그림 6 비강화 평면 단판유리(면취無) 열파손 형상

것으로 면취가 있는 경우 고온부 온도 및 edge 온도의 차가 약 110~140℃(평균 130.2℃) 범위에서 열파손이 발생하였으며, 면취가 없는 경우에는 약 100~130℃(평균 119.1.℃) 온도차에서 열파손이 발생하였다. 특히 면취가 없는 경우 열파손 평균온도차가 다소 낮은 것으로 나타나 미미하지만 면취여부가 열파손에 영향을 주는 것으로 판단된다. 또한 유리 열파손 형상은 그림 5 및 그림 6과 같이 edge 부위에서 시작되어 주변에 직각방향으로 진행하다가 경사지어 나가는 모양으로 나타났다.

(2) 비강화 곡면 단판유리

비강화 곡면 단판유리의 경우 표 6에서 볼 수 있듯이 총

표 6 비강화 곡면 단판유리 열파손 특성

구 분		고온부 온도(℃)	edge온도 (℃)	온도차 (℃)	파손 여부
면취有	1	290.8	30.4	260.4	X
	2	310.1	32.1	278.0	X
	3	302.5	29.2	273.3	X
면취無	1	280.0	28.8	251.2	○
	2	284.3	28.5	255.8	X
	3	295.3	27.9	267.4	X



그림 7 비강화 곡면 단판유리(면취有) 실험 장면



그림 8 비강화 곡면 단판유리(면취無) 열파손 형상

6개의 실험체 중 약 251℃에서 1개의 실험체(면취無)에서만 파손이 발생하였으며, 실험장면 및 열파손 형상은 각각 그림 7 및 그림 8과 같다.

(3) 반강화 단판유리

표 7은 반강화 단판유리의 열파손 특성을 나타낸 것으로 평면 및 곡면 유리 모두 약 260~280℃ 온도차에서도 열파손이 발생하지 않았으며, 실험장면은 그림 9 및 그림 10과 같다.

4.2 비강화 곡면 복층유리의 열파손 특성

비강화 곡면 복층유리의 열파손 특성은 표 8에 나타난 바와 같이 약 40~60℃ 온도차에서 모두 열파손이 발생하

표 7 반강화 단판유리 열파손 특성

구 분		고온부 온도(℃)	edge온도 (℃)	온도차 (℃)	파손 여부
평면 유리	1	299.4	28.8	270.6	X
	2	307.2	29.4	277.8	X
	3	301.5	31.9	269.6	X
곡면 유리	1	312.4	31.7	280.7	X
	2	295.3	28.6	266.7	X
	3	304.1	29.9	274.2	X

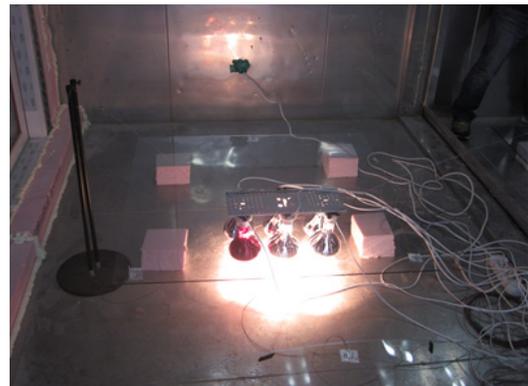


그림 9 반강화 평면 단판유리 실험 장면

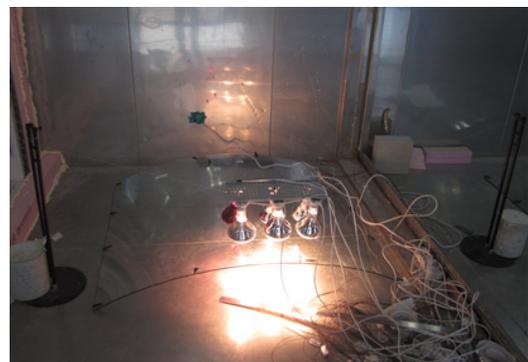


그림 10 반강화 곡면 단판유리 실험 장면

표 8 비강화 곡면 복층유리 열파손 특성

구분		고온부 온도(°C)	edge온도 (°C)	온도차 (°C)	파손 여부
수평 방향	1	77.8	29.3	48.5	○
	2	67.1	30.7	36.4	○
	3	53.4	-0.4	53.8	○
수직 방향	1	112.1	67.3	44.8	○
	2	145.7	100.6	45.1	○
	3	158.4	102.8	55.6	○



그림 11 비강화 곡면 복층유리 열파손 형상(수평)



그림 12 비강화 곡면 복층유리 열파손 형상(수직)

었다. 수평 및 수직방향에 대한 비교실험 결과 증력에 대한 증력에 의한 영향은 미미한 것으로 판단된다.

비강화 곡면 복층유리의 열파손 형상은 그림 11 및 그림 12에서 볼 수 있듯이 비강화 단판유리의 열파손과 흡사하게 나타난 반면, 비강화 단판유리에 비해 낮은 온도차에서 열파손되었으며, 열원 측의 유리만 파손되고 반대 측의 유리는 손상이 전혀 없었다.

이는 곡면유리의 복층화 과정에서 시공된 2차 실리콘의 구속에 의한 응력이 발생함에 따라 단판유리보다 낮은 온도차에서 파손이 생긴 것으로 사료된다. 또한 온도차가 큰

열원 측의 유리가 1차로 파손된 이후로는 구속이 제거되면서 반대 측의 유리가 단판곡면유리와 같은 열파손 특성을 갖기 때문에 반대 측의 유리는 손상이 전혀 없었던 것으로 판단된다.

5. 결 론

단판유리 및 비강화 곡면 복층유리의 열파손 특성을 파악하기 위한 실험결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 비강화 평면 단판유리의 열파손 실험 결과, 100~140°C 온도차에서 열파손이 발생한 반면, 비강화 곡면 단판유리의 경우 250°C의 온도차에서 열파손이 발생하였다. 이는 곡면 단판유리의 경우 제조 단계의 열처리에 의해 강도가 향상되었기 때문으로 판단된다.
- (2) 면취없는 유리가 면취 있는 유리보다 다소 낮은 온도차에서 열파손이 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) 반강화 단판유리의 경우 평면 및 곡면 유리 모두 260~280°C 온도차에서도 열파손이 발생하지 않았다.
- (4) 비강화 곡면 복층유리의 열파손 실험 결과, 40~60°C 온도차에서 열파손이 발생하였으며, 이는 복층화 과정에서 시공된 2차 실리콘의 구속에 의한 응력이 발생함에 따라 단판유리보다 낮은 온도차에서 파손이 일어난 것으로 판단된다. 또한, 온도차가 큰 열원 측의 유리가 파손되면서 구속이 제거되어 반대 측의 유리는 단판 곡면유리와 동일한 응력을 유지하게 되어 파손되지 않는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 류창수, 곡면형상과 Glass Skin 구축에 관한 연구, 대한건축학회논문집(계획계), 23권 1호, 2007.01
2. 윤종호 외, 커튼월 스펠드럴용 BIPV창호의 온도 및 열파괴 가능성 연구, 대한건축학회논문집(계획계), 28권 2호, 2012.02.
3. 박형주 외, 구획 화재시 국부복사열에 노출된 유리면의 수막접촉에 따른 급냉파열특성에 관한 실험적 연구, 한국화재소방학회 논문지, 제17권 제4호, 2003.11.
4. 감광만, 이인혁 저, 건축시공이야기, 2007

[담당 : 윤자결, 편집위원]