



건물 외피에 적용된 복층창의 열팽창 파손에 대한 민감도 분석 연구

The Sensitivity Analysis of Thermal Expansion Breakage of Multi-layer Glazing in Building Envelope

윤종호* · 김승철** · 임경업*** · 오명환****

Yoon, Jong-Ho* · Kim, Seung-Chul** · Im, Kyung-Up*** · Oh, Myeong-Hwan****

* Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jhyoon@hanbat.ac.kr)

** Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (dearesob@gmail.com)

*** Coauthor, ALUENC Corp., South Korea (kuim@aluenc.com)

**** Coauthor, ALUENC Corp., South Korea (mhoh@aluenc.com)

ABSTRACT

Curtain wall system of office buildings has recently become very common in Korea. As the multi-layer curtain glazing is exposed to outdoor environment, it is very subjected to direct environmental impact. Consequently, breakage and cracks of glazing due to heat expansion is frequently observed. This study explores various causes and aspects for destruction of multi-layer glazing. A sensitivity analysis was performed on the basis that thermal changes causes damage to the multi-layer glazing. Air temperature in air cavity within the multi-layer glazing was examined to find its effect on multi-layer glazing breakage. Analysis showed high deflection to depth ratio of 1:1.8 and that higher the aspect ratio, smaller is the deflection. Allowable pressure showed that the weakest value is for aspect ratio of 1:2.9. Sensitivity analysis by the area of the glazing showed that as area of glazing becomes higher, allowable pressure and deflection-depth ratio becomes smaller. For allowable pressure and allowable deflection-depth within air cavity, the glazing breakage occurred at least 107°C. The results from glazing breakage by thermal factor shows that it is hard to break the glazing with only an increase in air cavity temperature in multi-layer glazing applied in buildings.

KEYWORD

복층창
장단변비
열팽창,
열파손,
민감도,
열파

multi-layer glazing
Aspect Ratio
Thermal Expansion
Sensitivity

ACCEPTANCE INFO

Received November 19, 2014

Final revision received December 3, 2014

Accepted December 5, 2014

© 2014 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 목적

국내 사무소용 건축물을 중심으로 관공서 및 주거용 건축물에 이르기까지 건물 외피를 커튼월(Curtain Wall) 구조로 적용하고 있다. 이는 통상적으로 건물 외피의 70% 이상이 유리(Glazing)로 마감되는 것을 의미하는데, 커튼월 구조에서 외장재로 사용되는 유리는 다층유리 구조로 적용되는 것이 일반적이다. 이 다층 유리는 유리 두 장 사이에 중공층을 두는 복층유리와 이보다 단열성과 기능성을 높이기 위해 세장의 유리를 이용하여 두 개의 중공층을 두는 삼중유리가 있다. 건축물의 외피로 적용되는 다층유리는 외부에 노출되어 자연 환경에 직접적인 영향을 받게 되며, 이로 인하여 큰 문제로 부각 되고 있는 것이 일사 및 대기중 온도변화와 같은 열에 의한 다층유리의 파손 현상이다.

건축물에 적용되는 다층유리의 기능과 성능은 지속적으로 발전하고 있는 가운데 '유리'라는 건축자재의 '깨짐'이라는 특성상 파손에 대한 방안이 마련되어야 하기 때문에[1] 남중우[2][3]는 곡면 복층유리 및 진공유리의 열파손 현상에 대한 실험적 연구를 진행하였다. 하

지만 다층유리 파손에 대한 민감도 분석 및 해결방안에 대한 뚜렷한 대안은 수립되지 않고 있다.

본 연구는 다층유리 파손에 대한 자료 구축 및 대안마련의 기초연구로 건축물에 적용된 다층유리(이하 유리로 통칭함)의 파손원인 중 열팽창 파손을 중심으로, 이론과 수식을 이용하여 유리면적과 장단변비를 대상으로 파손에 대한 민감도 분석을 수행하였으며, 중공층 온도가 파손에 미치는 영향을 고찰하였다.

1.2. 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 유리 내부 중공층의 온도 변화에 의한 내부 압력 변화가 유리의 팽창 파손에 미치는 영향에 대한 민감도 분석을 분석 범위로 설정 하였다.

이론식 수치계산을 통해 유리의 면적과 장단변비 변화에 따른 허용압(응)력과 이에 따른 해당 처짐깊이를 도출하고, 허용압력 및 처짐깊이 상태의 중공층 온도를 이론식에 의해 산정하고 열팽창 파손이 일어날 수 있는 중공층의 상태를 도출하였다. 이 과정에서 중공층 온도에 의한 열팽창 파손의 영향만을 분석하기 위해 실제 건축물에 적용된 유리가 받는 풍하중은 무시하였다.

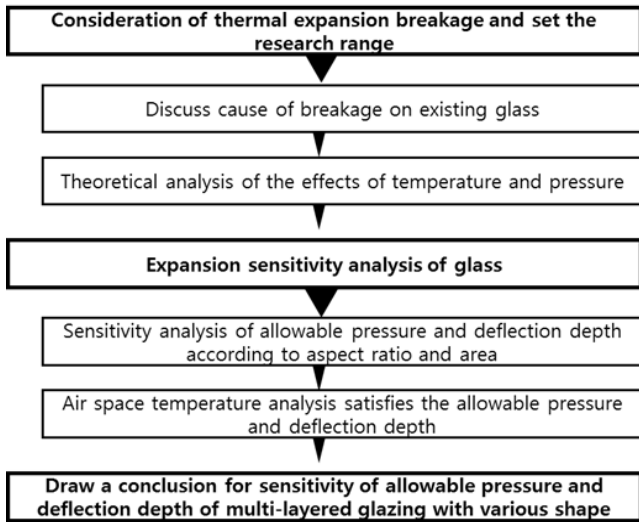


Fig 1. Flow chart for method of study and process

1.3. 유리 파손의 원인과 파손 현상

유리의 깨짐은 육안으로 확인이 불가능한 미세한 균열[4]의 신장에 의한 것이며, 인장응력의 작용, 크랙의 존재, 응력에 의한 크랙의 신장으로 인하여 파손이 발생하게 된다[5]. 대부분의 유리는 제조 공정에서 미세한 크랙이 발생한다. 따라서 유리의 이론 강도는 높다고 하더라도 유리 표면 및 유리 내측에 흠집(crack)이 미세하게라도 존재할 경우, 그 부위에 응력이 집중되어 파손이 진행되기 때문에 실용강도는 매우 낮다고 할 수 있다.



Fig 2. glazing breakage due to thermal expansion

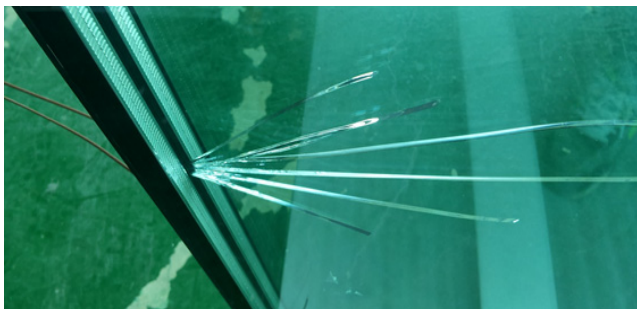


Fig 3. glazing breakage due to thermal stress

최근 건축물의 단열성능을 향상시키기 위하여 로이유리 또는 단열필름 등과 같은 복사열 투과를 방지하는 고성능성 유리를 적용하고 있다. 이는 유리 내부 공기층의 온도를 상승시켜 유리의 부피팽창으로 이어지게 되며, 유리의 온도변화 및 팽창과 수축의 반복으로 유리에 피로도(stress)가 쌓이게 된다. 따라서 유리의 열응력과 열팽창 파손에 대한 밀접한 연관성을 갖게 된다. Fig 2와 Fig 3은 장단변비가 큰 유리의 팽창 파손 사례와 열응력에 의한 파손 사례를 보여준다.

건축물에서 발생된 유리의 파손형태는 유리(glazing)의 구성 및 응력분포, 강화여부, 장·단비(유리의 단변과 장변의 비율)등에 따라 파손의 형태가 상이하게 나타난다. 따라서 기존 유리의 파손형태[1]에 따라 팽창파손과 열응력에 의한 파손을 구분할 수 있다. 또한 신재규 [6]는 건축물의 외장 유리의 파손 요인들은 유리의 유형, 코팅 위치, 외부 음영패턴, 난방 위치 및 방향 등이 있으며, 유리의 열응력으로 인한 파손에 대한 방지 방안을 명시하고 있다. 하지만 열에 의한 유리의 팽창 파손 요인의 범위가 광범위하여 그 원인에 대한 뚜렷한 파악 및 그에 따른 대처방안의 수립은 난제로 남아있다.

2. 이론식에 기반을 둔 팽창 민감도 분석

2.1. 유리의 허용응력 및 처짐, 내부온도 계산 방법

유리의 처짐깊이와 허용응력을 수치적으로 산정하는 방식은 다양하게 존재한다. 그중 국제 표준 ASTM E 1300[7]에서는 본 연구에서 산출하고자 하는 유리의 장단변비와 두께, 구성 및 유리 단면부 지지면수에 따른 허용 처짐 응력과 해당 응력에 대한 처짐깊이의 계산 방법을 근접하게 제시하고 있다. 계산 변수 중 Glazing의 지지면수에 따라 그 계산 값에 차이가 발생하게 되며, 본 연구에서는 창호의 특성상 4면지지 형태를 기준으로 분석하였다.

Fig 4는 유리의 풍하중에 따른 유리의 장·단비별 처짐 계수가 산정된 차트를 도식화 하였다. 식 (1)을 기준으로 유리면에 작용하는 풍압에 유리의 면적과 탄성계수, 두께를 적용하여 q (applied load)값을 산정하며, 해당유리의 장단변비(AR : Aspect Ratio)를 식 (2)에 의하여 산출하고, 그 값에 따라 Fig 4.의 그래프에서 w (the maximum lateral deflection of the glazing)값을 산출한다.

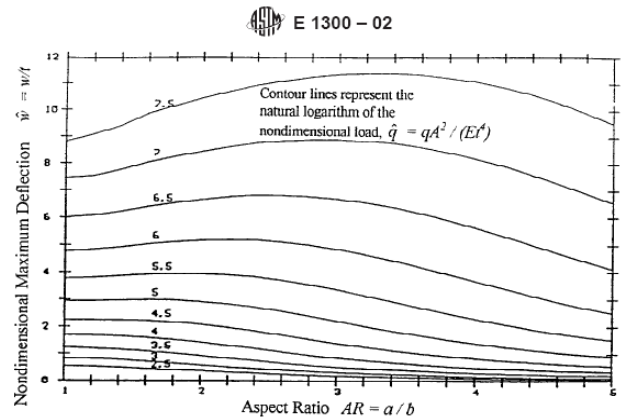


Fig 4. ASTM E1300 Non-dimensional Maximum Deflection[7]

1) 유리제조공정상 발생하는 니켈 금속성분(NiS)이 용융로 안에서 유황성분과 결합되어 생성된 현상

$$q = q \times A^2 / Et^4 \quad (1)$$

여기서, q : applied load, kPa
 t : true glass thickness, mm
 A : area of the rectangular glass plate, mm²
 E : Modulus of elasticity of glass, (71.7 × 10⁶ kPa)

$$AR = a/b \quad (2)$$

여기서, AR : Aspect Ratio
 a : plate length(long dimension)
 b : plate length(short dimension)

$$W = w/t \quad (3)$$

여기서, W : the non-dimensional maximum deflection
 w : the maximum lateral deflection of the glass
 t : the true glass thickness

산출된 w 값은 식 (3)에 의해서 유리의 두께로 나누게 될 경우 유리의 최대 처짐깊이를 산정할 수 있다. 하지만 그래프 상에서 w 값을 산정하는데 정확도가 떨어지기 때문에 ASTM E1300에서는 식(4)[8]를 통하여 산정하도록 제시하였다. 식 (4)는 각 유리 면적의 장단변비에 따른 계수를 누승으로 두께와 곱하여 w 값을 산정할 수 있도록 하였다.

$$w = t \times \exp(r_0 + r_1 \times x + r_2 \times x^2) \quad (4)$$

여기서, r_0 : 0.553-3.83(a/b)+1.11(a/b)²-0.0969(a/b)³
 r_1 : -2.29+5.83(a/b)-2.17(a/b)²+0.2067(a/b)³
 r_2 : 1.485-1.908(a/b)+0.815(a/b)²-0.0822(a/b)³
 x : ln{ln[q(a/b)²/Et⁴]}

다층유리의 내부 중공층에는 기본적으로 건조한 공기가 채워져 있다. 건축물 외피에 적용된 유리는 일사와 풍하중에 직접적인 영향을 받게 되며 유리 내부의 공기가 이에 반응하여 팽창과 수축을 반복하게 된다.

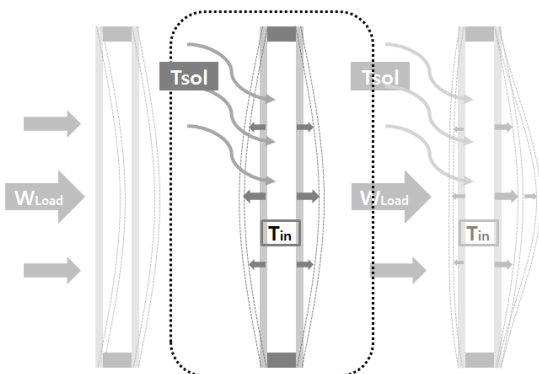


Fig 5. Expansion of air cavity by wind load and temperature

Fig 5은 풍하중과 온도에 의한 유리의 내부 상태 변화를 도식한 그림이다. 일반적으로 풍하중과 일사의 영향을 동시에 받게 되는 건축용 유리에 대해서 유리 내부 온도상승에 의해 발생하는 팽창이 미치는 영향을 분석하기 위하여 풍하중에 의한 압력 변화는 고려하지 않았다. 중공층의 상태 변화는 반데르발스의 상태방정식을 통해 알 수 있다. 식(5)는 반데르발스의 상태방정식을 나타낸다.

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (5)$$

여기서, n : 기체 몰수
 V : 기체의 체적
 P : 기체의 압력
 R : 기체상수 (8.314 J/(mol·K))
 T : 온도 (K)
 a : 기체상수 (J·m³/mol²)
 b : 기체분자 한 개의 부피 (m³/mol)

2.2. 유리의 허용 팽창도 분석

상기 이론식을 통해 본 계산에서는 중공층 온도 상승에 의한 팽창과 유리에 가해지는 압력이 단기하중(Short Load)으로 작용되는 점을 고려하여 본 계산식에서도 단기하중 허용응력 값으로 유리의 허용 팽창 민감도를 산출하였다.

실 건물에 적용되는 유리의 구성은 6 mm 판유리를 이용한 다층유리로 구성되는 것이 대다수이며, 구조 및 안전성을 위하여 유리의 강화에 따라 그 성능이 차이가 발생하므로 본 계산에서 비강화(Annealed), 반강화(Heat Strengthened), 강화(Fully Tempered)유리로 구분 적용하여 분석하였다.

Fig 6은 장단비를 1:1.5로 고정하여 유리 면적을 1 m²~4 m²까지 변화시켜 유리의 허용압력 및 해당 처짐깊이를 측정된 결과이다. 유리 면적이 커질수록 허용압력이 감소하며 처짐깊이는 증가하는 것으로 나타났다.

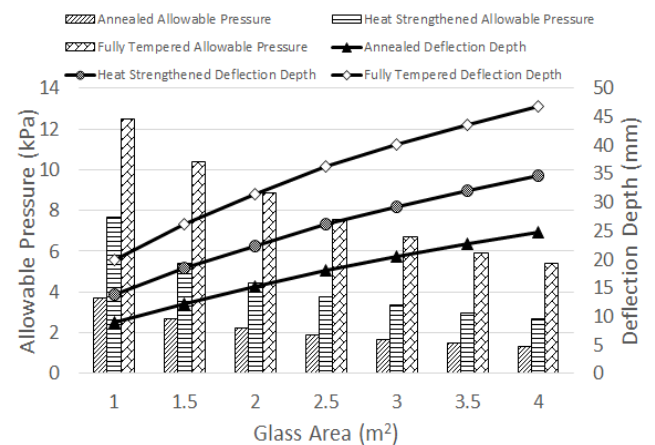


Fig 6. Allowable pressure and deflection depth according to fixed aspect ratio and area increase

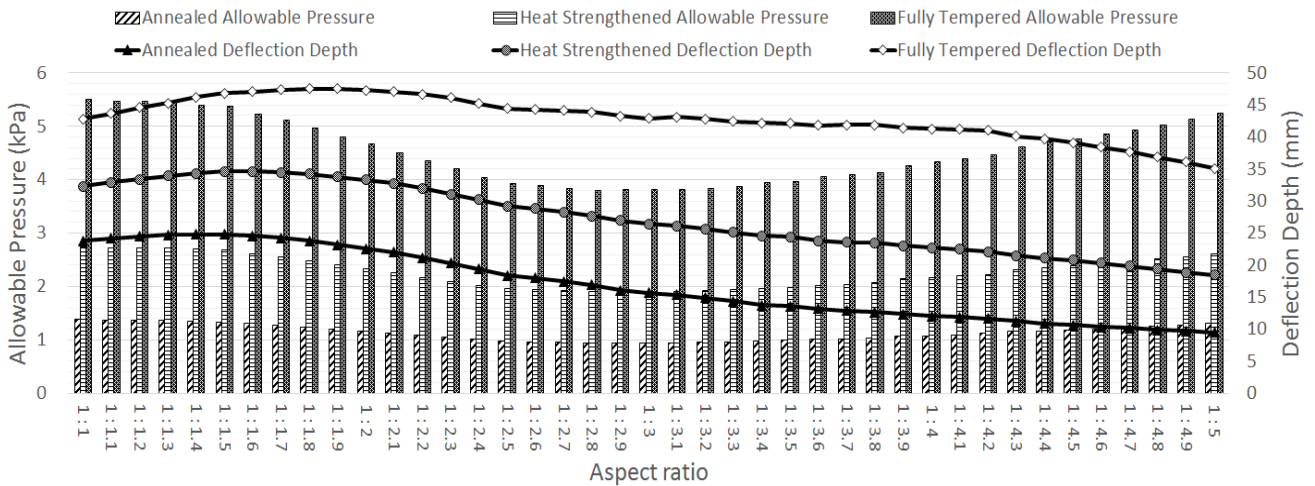


Fig 7. Allowable pressure and deflection depth according to fixed area ($4m^2$) and variable aspect ratio

Fig 7은 강화여부가 구분된 3종류의 6 mm 단판 유리를 이용하여, 면적을 $4m^2$ 로 고정한 유리의 장단변비(AR)를 1:1~1:5까지 0.1단위로 조정하여 유리의 허용압력 및 해당 처짐깊이를 측정된 결과이다.

유리의 면적을 $4m^2$ 로 고정하였을 경우 장단변비 변화에 따라 강화, 반강화, 비강화 순으로 허용압력 및 허용 처짐깊이가 큰 것으로 나타났다. 유리의 처짐깊이는 장단변비가 1:2까지 상승하였고 그 이상에서는 취약해 지는 것으로 나타났으며, 허용압력 한계 값은 장단변비가 1:3까지 취약해지지만 그 이상의 장단변비에서는 증가하는 것으로 나타났다.

2.3. 허용 팽창 정도에 따른 유리 내부 온도 분석

유리의 내부 온도 분석은 6 mm 유리 두 장으로 구성된 24 mm복층 유리를 기준으로 하였다. 강화여부에 따라서 외부측 유리를 반강화(Heat Strengthened)로 고정한 채 내부 유리를 비강화(Annealed), 반강화(Heat Strengthened), 강화(Fully Tempered)유리로 구분하여 분석하였다. 분석은 상기 언급한 반데르발스의 이론식을 이용하였으며, 중공층 공기의 초기 상태를 설정하기 위해 복층유리가 가공된 시

Table 1. The initial condition of air cavity.

	Input and calculated values
glazing Area	$4 m^2$
Spacer Depth	12 mm
Pressure	101,325 Pa (1ATM)
Temperature	293.15 K (20°C)
Gas constant (R)	8.3144621 J/(mol·K)
Measure of the attraction between the particles (a)	$0.1358 J\cdot m^3/mol^2$
Volume excluded by a mole of particles (b)	$0.0000364 m^3/mol$
number of moles (n)	1.9924132732913

점의 중공층에 포함되어 있는 몰수를 계산하였다. Table 1은 초기 일력조건 및 계산결과를 나타낸다.

Fig 8은 면적을 $4m^2$ 로 고정한 복층유리의 장단변비(AR)를 1:1~1:5까지 0.1단위로 조정하여 허용압력 및 처짐깊이에 도달하는데 필요한 중공층 온도를 분석한 결과이다. 장단변 비가 1:1.5 일 때 열팽창

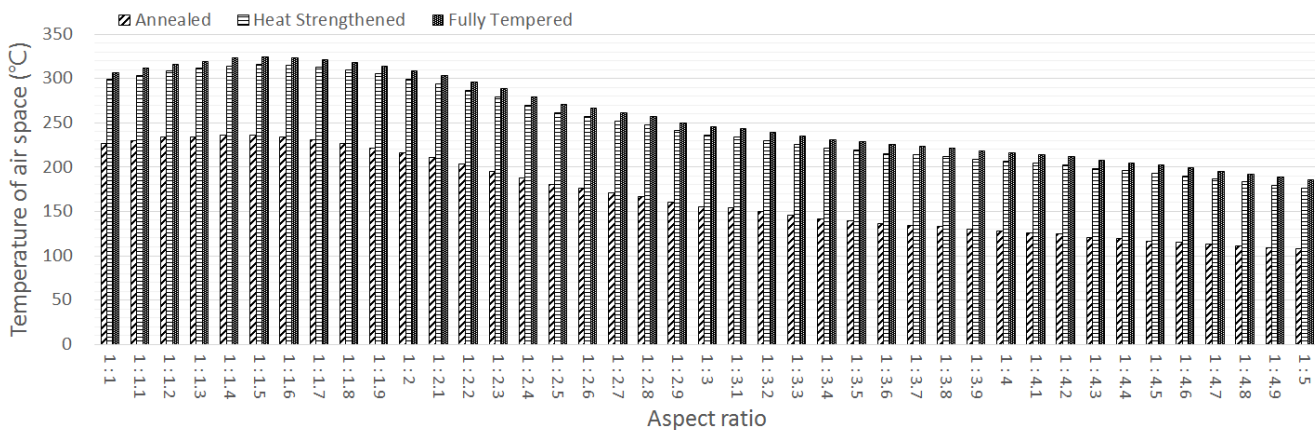


Fig 8. Temperature of air space according to fixed area ($4m^2$) and variable aspect ratio

에 의한 파손을 가장 잘 견디는 것으로 나타났다. 비강화(Annealed)의 경우 중공층 온도가 최소 107 °C에서 최대 235 °C에 도달해야 열팽창 파손이 일어나는 것으로 분석되었다. 반강화(Heat Strengthened)와 강화(Fully Tempered)의 경우 장단변비에 따라 176 °C ~ 324 °C로 비슷한 온도 분포를 보였다. 이는 강화가 적용된 복층유리의 내부측 반강화 유리의 허용압력 및 처짐깊이에 도달했기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 다층유리의 내부 열팽창 파손의 영향을 파악하기 위한 과정으로 유리의 장단변비와 면적에 의한 민감도 분석 및 팽창파손이 일어날 수 있는 내부 중공층의 온도 분석을 수행하였다. 이에 따라 도출된 결과는 다음과 같다.

1) 수치계산을 통한 유리의 허용 팽창정도를 분석한 결과 면적이 고정된 상태에서 유리의 장단변비 변화에 따라 강화, 반강화, 비강화 순으로 허용압력 및 허용 처짐깊이가 큰 것으로 나타났다. 유리의 처짐깊이는 장단변비가 1:2까지 상승하였고 그 이상에서는 취약해 지는 것으로 나타났으며, 허용압력 한계 값은 장단변비가 1:3까지 취약해지지만 그 이상의 장단변비에서는 증가하는 것으로 나타났다.

2) 수치계산을 통해 중공층 내부 허용압력 및 허용 처짐깊이 상태의 온도를 분석한 결과 장단변비가 1:1.5 일 때 열팽창에 의한 파손을 가장 잘 견디는 것으로 나타났으며, 비강화(Annealed)의 경우 중공층 온도가 최소 107 °C에서 최대 235 °C에 도달해야 열팽창 파손이 일어나는 것으로 분석되었다. 반강화(Heat Strengthened)와 강화(Fully Tempered)의 경우 장단변비에 따라 176 °C ~ 324 °C로 비슷한 온도 분포를 보였다.

3) 본 연구에서 산출한 유리의 열적 요소에 의한 한계 파손 결과를 기반으로 검토한 결과 실제 건물에 적용된 다층유리는 온도(일사)요인만으로는 유리의 팽창 파손을 발생시키기 어려우며, 실제 현장에서 발생하는 유리의 팽창 파손은 온도(일사)를 포함한 다양한 요인에 의하여 복합적으로 발생됨을 확인 할 수 있다.

상기의 결과를 바탕으로 건축물 외피의 다층유리 적용에 있어 열적요인 뿐만 아니라 음영, 하중 등 다양한 요소에 의한 원인 규명이 필요하며, 실제 설치 시에도 본 연구결과 및 다양한 파손 원인에 대한 고찰이 설계 시 반영되어야 할 것이다. 본 연구는 차후 유리의 파손에 대한 추가적인 연구결과에 기초자료로 활용할 수 있기를 기대하는 바이다.

Acknowledgement

This study was carried out with the support of Ministry of Trade, Industry and Energy, Republic of Korea under the project "Industrial fusion source technology development", project # 10045340.

Reference

[1] Lee, Sang-Sup, Park, Keum-Sung, Bae, Kyu-Woong, "Causes of Glass

Breakage", Journal of Korean Society of Steel Construction, v.22 n.5, 2010

[2] Nam, Jung-Woo, Lee, Jae-Hyun, "An Experimental Study on Thermal Breakage in Curved Double Glazing", Proceeding of Annual Conference of the Korean Solar Energy Society, vol. 32, no. 1, pp 543-548, 2012

[3] Nam, Jung-Woo, Won, Jong-Seo, Lee, Byung-Seouk, "An Experimental Study on the Thermal Breakage of Vacuum Insulation Glass", Proceeding of Annual Conference of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 12-S-088, pp. 392-393, 2012

[4] Technical data of Pair Glass, Hankuk glass industries INC., 2007

[5] Kim, Yong-Hwan, "Breakage Phenomenon of Glazing", Korea Institute of Science and Technology Information.

[6] Shin, Jae-Gyu, Hwang, Woo-Jin, Choi, Won-Ki, "A Study on the Thermal Breakage Phenomenon of Glazing and the Preventive Measures", Proceeding of Annual Conference of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 11-S-247, pp. 1180-1184, 2011

[7] Standard Practice for Determining Load Resistance of glass in Buildings, ASTM E 1300-02

[8] Dalgliesh, A. CGSB 12.20 Structural Design of Glass for Buildings, NRC of Canada

[9] Glass Strength in Solar Applications International Materials Institute, Pilkington, 2008.

[10] Glass Design Guidelines, PPG.