

# 강화유리 가드 및 핸드레일 구조시스템의 실물대 실험에 의한 성능평가

## Structural Performance Evaluation of Tempered Glass Guard and Handrail System Based on Full-Scale Test

김 선 응\*      박 동 순\*\*      이 철 호\*\*\*  
Kim, Seon-Woong      Park, Dong-Soon      Lee, Cheol-Ho

### Abstract

This paper summarizes full-scale test results on tempered glass guard and handrail systems unreinforced with structural framework. This cantilevered system has low redundancy and glass material itself is brittle. Depending on the connection type, stress concentration at the connection appears unavoidable. The resulting failure mode is very sudden and dangerous so that the structural safety should be controlled with a higher margin. Two connection types of frequent use were tested and evaluated based on full-scale test specimens. Specimens with bolted connection showed inferior performance due to brittle fracture arising from stress concentration while plastered connection specimens exhibited excellent performance even under cyclic loading.

키워드 : 강화유리, 가드 및 핸드레일, 실물대

Keywords : Tempered Glass, Guard and Handrail, Full-Scale Test

### 1. 서      론

투명성을 가장 큰 특징으로 하는 유리는 근대건축 도래 이후 건물의 외장에서부터 실내장식에 이르기까지 기능적이고 예술적인 건축공간의 구현에 매우 중요한 건축재료의 하나로 사용되어 왔다. 원래 비구조재로 사용되었던 유리가 근래에 들어서는 구조재로서 기능해야만 하는 경우가 종종 생겨나고 있다. 건물 내외의 통행로에 투명성을 부여하기 위해 설치되는 강화유리 가드 및 핸드레일 같은 것이 좋은 예이다.

유리는 구조재료로서 결정적 취약성, 즉 경고없는 급격한 취성파단에 의한 파괴모드를 갖고 있다. 강화유리와 같이 개선된 성능을 갖는 유리라해도 재료 자체의 근본적 약점인 취성이 개선되는 것은 아니다. 더구나 가드 및 핸드레일 시스템은 계단이나 슬라브에 하단만 고정되는 캔틸레버구조로서 힘의 재분배를 통한 내하력 증진을 기대할 수 없는 정정구조물이다. 또한 기하학적 불연속(소위 notch)이 존재하는 접합부에는 균열발생을 촉발하는 응력집중(stress concentration)이 불가피하게 수반된다. 이러한 불리한 제반조건(즉 재료의 취성, 구조시스템의

낮은 부정정도 및 접합부의 응력집중)을 갖고 있는 유리 가드 및 핸드레일 시스템은 높은 안전도 여유가 확보되도록 구조적으로 매우 엄격하게 취급되어야 할 것이다.

본 논문은 계단 또는 옥내의 통행로에 위치한 캔틸레버형식 강화유리 가드 및 핸드레일 구조시스템의 구조성능 평가결과를 요약한 것이다. 구조 및 접합상태를 실제 시공상황을 모사할 수 있도록 실물대 시험체를 제작한 후, 면외방향 하중에 대해서 사용성과 안전성을 검토하고 실무자에게 도움이 되는 설계권장사항을 제시코자 하였다.

### 2. 실험프로그램

본 실험은 강화유리의 접합방식 및 형상, 그리고 가력방식을 주요변수로 하여 핸드레일의 강화유리 및 접합부의 성능을 평가하고자 하였다.

시험체의 접합은 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 두 가지의 형태로서 핸드레일용 볼트를 이용한 방식과 강화유리의 양 측면에 석고를 충전시키는 방식이다. 강화유리의 형상은 두 가지로서 접합방식에 따라 다른 형태를 갖는 직사각형과 평행사변형으로 채택하였다. 시험체의 가력방식은 단조가력(monotonic loading)과 반복재하(cyclic loading)방식으로 정하고, 다양한 중량을 갖는 철물을 제작하여 가력하였다. 본 실험의 특성상 큰 하중의 가력이 불필요하고 아주 작은 오차범위의 가력장치가 필

\* 정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

\*\* 정회원, 삼성물산 건설부문 건축기술팀 차장

\*\*\* 정회원, 서울대학교 건축학과 부교수

이 연구는 2005년도 (주)동신씨의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

요하다. 본 실험의 계획단계에서 고려된 액추에이터의 측정오차는 ±100 kgf로 오차범위가 너무 크기 때문에 철물을 이용한 재하시험을 실시하게 되었다. 단조가력실험은 시험체의 가장자리와 코너에 각각 등분포하중과 집중하중을 재하하였으며, 반복재하시험은 시험체의 가장자리 중앙부와 코너에 각각 집중하중을 양방향으로 번갈아 반복재하하였다.

2.1 시험체 제작

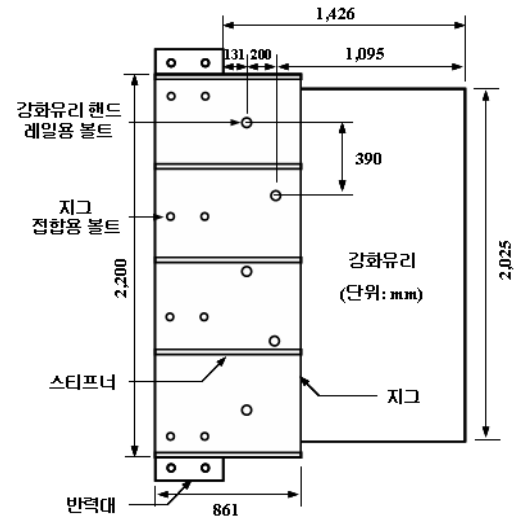
시험체는 모두 8개로서, 취성거동에 영향을 미칠 수 있는 불확실한 요인이 제거되도록 (즉 size effects가 영향을 미치지 않게), 실제 시공된 상황과 동일한 접합상태가 모사되도록 실물대로 제작하였다(표 1 참조). 볼트접합시험체는 지정부에 5개의 볼트용 구멍을 뚫었으며(그림 1.(a), (c) 참조), 석고충진된 경우에는 지그(jig)를 제작하여 강화유리를 지그에 삽입한 후에 석고로서 충전하고 실링재로 마감하였다(그림 1.(b), 그림 2.(b) 참조). 단조가력실험에서의 시험체는 수평방향으로 설치하였다. 석고충진된 시험체는 접합부를 스티프너로 보강하였으며, 상부는 시험체 양생기간중에 강화유리와 충전재 사이가 벌어지는 것을 방지하기 위해 리브로 보강하였다. 또한 석고충진된 시험체는 반력대에 설치된 지그에 고정하기 위해 φ10 볼트구멍을 지그 양측면에 8개씩 뚫었다(그림 2.(b), 3 참조).

반복재하시험체는 단조가력시험체중에서 가장 뛰어난 성능을 보일것으로 예상되는 석고충진된 시험체와 동일한 형태로 2개를 제작하고 반력대에 수직방향으로 직접 설치하기 위해 φ32 볼트구멍을 지그 양측면에 2개씩 뚫었다(그림 8 참조).

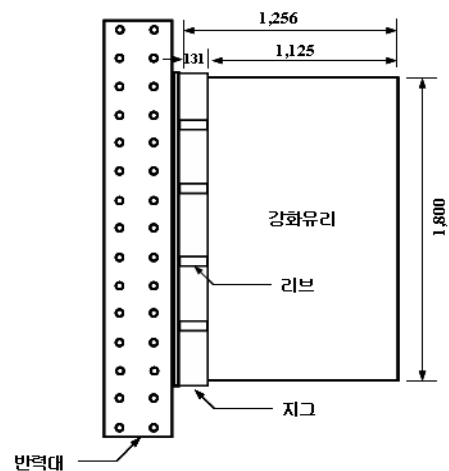
표1. 시험체 일람표

시험체	강화유리형상	사이즈(mm)	두께(mm)	접합	가력방식
REC-B-U	직사각형	2025×1426	12	볼트	단조가력(등분포)
REC-B-C	직사각형			볼트	단조가력(집중)
REC-P-U	직사각형	1800×1256		석고	단조가력(등분포)
REC-P-C	직사각형			석고	단조가력(집중)
PA-B-U	평행사변형	2361×1711		볼트	단조가력(등분포)
PA-B-C	평행사변형			볼트	단조가력(집중)
REC-P-CM	직사각형	1800×1256		석고	반복재하(중앙부)
REC-P-CC	직사각형			석고	반복재하(코너)

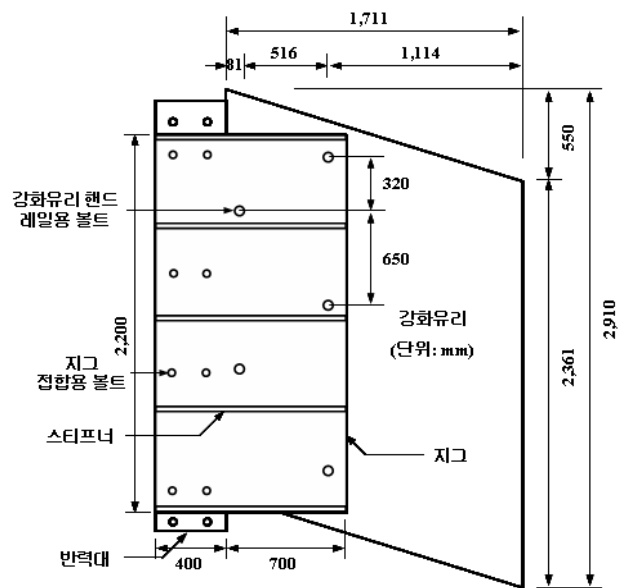
\* 시험체명: 강화유리형상-접합방식-가력방식(REC = RECTangular shape, B = Bolted, U = monotonic Uniform loading, C = monotonic Concentrated loading at corner point, P = Plastered, PA = PArallel shape, CM = Cyclic concentrated loading at Mid-point, CC = Cyclic concentrated loading at Corner point)



(a) 볼트접합된 직사각형 시험체

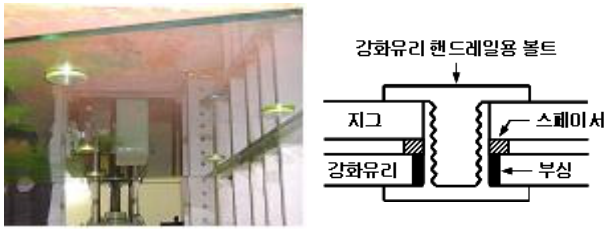


(b) 석고충진된 직사각형 시험체

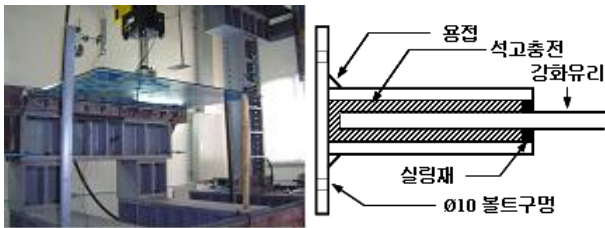


(c) 볼트접합된 평행사변형 시험체

그림1. 핸드레일 시험체의 상세도



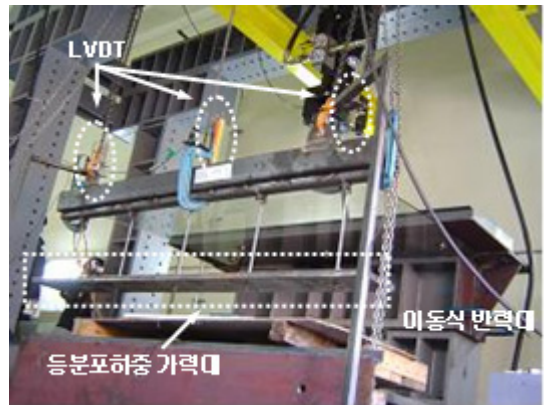
(a) 볼트접합부



(b) 석고충전 접합부

그림2. 시험체 접합방식 2가지

그는 면외방향의 변형을 방지하기 위해 그림 1과 5에 보여진 것과 같이 스티프너로서 보강하였다. 접합방식에 따라 제작된 각기 다른 형태의 3개의 지그를 계획된 시험체에 각각 설치하고, 지그와 반력대는 볼트접합하였다. 볼트접합 시험체는 그림 5.(a)에서 보듯이 강화유리와 볼트체결을 위해 상판이 돌출되어 있으며, 강화유리 핸드레일용 볼트를 사용하여 설치하였다. 핸드레일용 볼트접합시에는 상판과 강화유리 및 핸드레일용 볼트와 강화유리 사이에 각각 알루미늄재질의 스페이서와 플라스틱재질의 부싱을 사용하여 강화유리가 지그 및 볼트에 의해 파손되는 것을 방지하도록 하였다(그림 2.(a) 및 6 참조).



(a) 등분포하중 실험



(a) 시험체의 상부

(b) 시험체의 하부

그림3. 석고충전된 시험체의 접합부 전경



(b) 집중하중 실험

그림4. 단조가력실험 테스트 셋업 전경

## 2.2 강화유리의 재료특성

강화유리는 판유리를 고온의 열처리를 한 뒤에 급속히 냉각시켜서 만드는 것으로 보통의 판유리에 비해 투시성은 같으나 강도와 내열성이 향상된 안전한 유리이다. 강화유리는 열처리 안된 보통의 판유리보다 5배 정도의 내충격 강도를 가지며 정적내력은 3 ~ 4배이다. 강화유리는 강도가 높아 파손율이 낮고, 한계충격을 받아 파손되더라도 끝이 날카롭지 않은 작은 입자로 부서져 부상위험이 적고 안전하다. 또한 보통의 판유리는 온도의 차가 60 ℃이면 파손 가능성이 있으나 강화유리는 200℃의 온도변화에도 견디는 강한 내열성을 가진 안전한 유리이다.

강화유리의 탄성계수는  $E = 7.5 \times 10^5$  (kgf/cm<sup>2</sup>)이다. 또한 강화유리의 파손확률은 일반적인 구조재에 비해 상당히 낮은 수준으로 알려져 있다(한국유리, 2000).

## 2.3 테스트 셋업, 가력 및 계측계획

시험체의 반력은 반력골조로서 지지하였다. 단조가력실험에서는 하중재하를 위한 장치 및 이에 따른 변위를 고려하여 이동식 반력대를 2단으로 위치하고 수평방향으로 시험체를 설치하였다(그림 4 참조). 시험체가 설치된 지



(a) 볼트접합된 시험체

(b) 석고충전된 시험체

그림5. 시험체의 접합부 단부구속을 위한 스티프너 설치상황

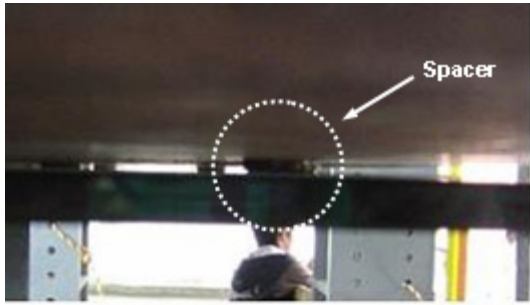


그림6. 스페이서가 사용된 볼트접합부 모습

재하를 위해 강화유리에 접합된 로드의 단부는 가력봉 볼트(힌지)접합하였다(그림 7 참조).

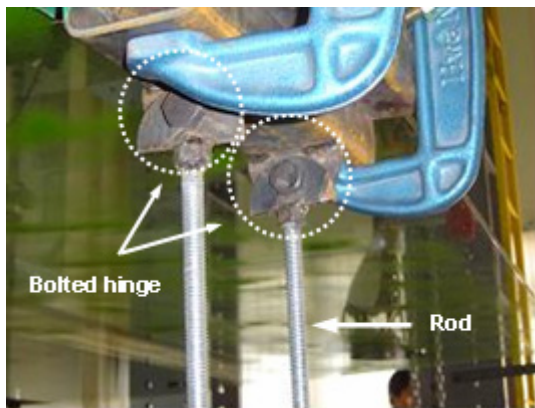


그림7. 로드가 힌지로서 볼트접합된 모습

반복재하실험은 반력대에 시험체를 직접 볼트접합을 하고 강화유리 양측으로 2단의 이동식 반력대를 놓고 강화유리 시험체와 동일한 높이가 되도록 지그를 제작하여 설치하였다. 양 반력대의 바깥쪽으로 반복가력에 사용될 중량물을 위치시키고 이를 반력대의 상부에 위치한 1 tonf 크레인 체인블록과 강화유리에 접지된 지그와 연결된 철선을 중량물에 고정하였다. 지그의 한쪽 가장자리는 롤러와 같이 마찰력을 최소화하기 위해 곡선으로 구현하고 실험과정에서 지그가 항복되는 것을 방지하고자 지그 중앙부를 스티프너로서 보강하였다(그림 8 참조). 지그의 상부는 이력거동에 사용된 철선과의 마찰을 최소화하고자 윤활제(grease)로서 처리하였다(그림 9 참조).

반복재하실험을 위한 시험체와 중량물의 연결은 강화유리 접지부에 양방향으로 철선이 연결가능하도록 하고 반복재하실험동안 가력방향이 연속적으로 수평을 유지하도록 그림 10과 같은 힌지접합부를 제작, 설치하였다.

시험체의 응답은 변위계(LVDT)를 사용하여 측정하였고, 자료취득은 UCAM 70A에 접속하여 모든 데이터를 기록하고 저장하였다. 단조가력실험의 경우에는 등분포하중과 집중하중으로 구분하여 변위계를 설치하였다. 등분포하중은 중앙과 양단부에 3개의 변위계를 설치하였고(그림 4.(a) 참조), 집중하중은 양단부에 2개의 변위계를 설치하였다(그림 4.(b) 참조). 반복재하실험의 경우는 그림 8에 나타난 것과 같이 전면에 2개, 후면에 1개를 설치하였다.

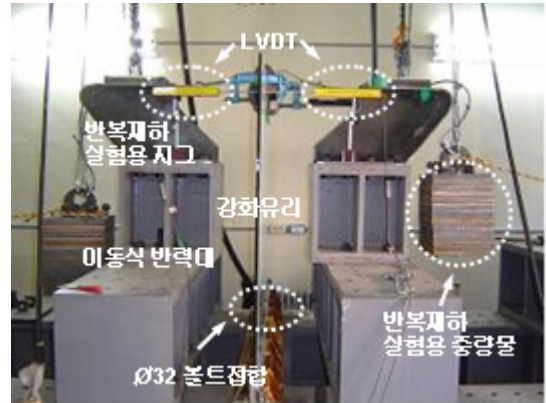


그림8. 반복재하 테스트 셋업 전경

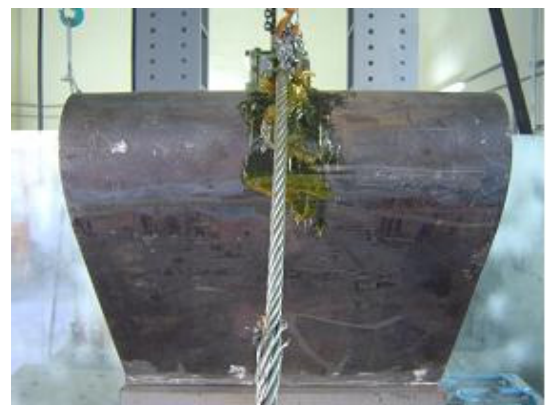


그림9. 철선과의 마찰을 최소화하기 위해 윤활제 (grease)를 처리한 모습

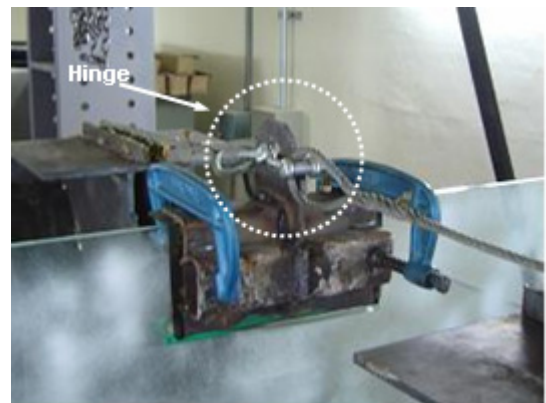
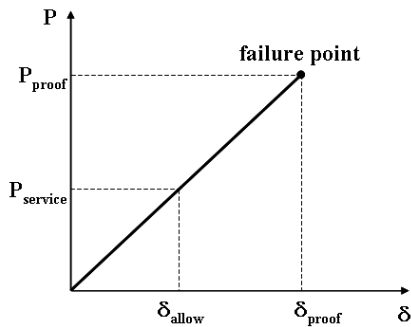


그림10. 반복재하실험시에 강화유리와 중량물과의 연결을 위해 사용된 지그

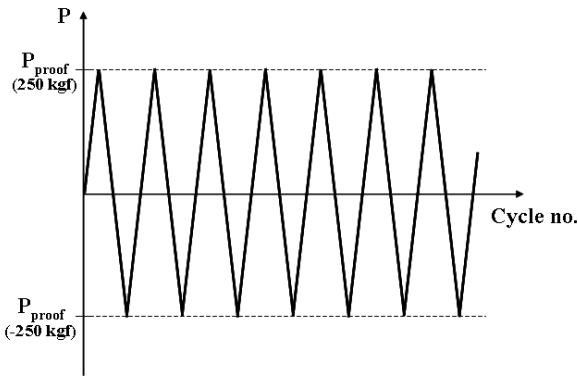
단조가력실험은 강화유리의 자중과 가력을 위해 강화유리에 설치된 장치가 초기하중으로 작용하고, 추가하중은 실험초기에는 무거운 중량물로 시작하여 파괴지점에 이르러서는 가벼운 중량물을 올려놓는 방식으로 파괴지점까지 가력하였다. 등분포하중은 강화유리의 가장자리에서 수직방향으로 일정하게 재하하였으며, 집중하중은 외부하중에 대해 가장 불리한 저항지점인 코너부에서 가력하였다(그림 11.(a) 참조).

반복재하실험은 양 측면에 250 kgf의 중량물을 시험체

와 반력대의 상부에 위치한 1 tonf 크레인에 연결하고 양측의 크레인 체인블록을 상하로 번갈아 이동시킴으로써 반복가력이 이루어지도록 하였다(그림 11.(b) 참조). 중앙부와 코너의 2개소에서 각각 반복재하실험을 하였다.



(a) 단조가력



(b) 반복재하

그림 11. 의사정적가력 프로그램

#### 2.4 성능평가기준

본 실험은 국내에서 최초로 실시되는 것으로서 실험계획단계에서 핸드레일과 관련한 시방서를 찾고 실험방식을 선택하는데 어려움을 겪었다. 우선 국내에는 이와 관련된 시방서가 없을 뿐만 아니라 실험방식 또한 전무한 상태이다. 이와 같은 이유로 본 연구는 IBC 1994, UBC 2003 등에서 근거하고 있는 ICC-ES 2004 보고서를 참고하였다. ICC-ES 2004 보고서에서는 핸드레일의 한계하중, 허용변위 및 가력시간을 규정하고 있는데, 이러한 사항들을 고려하여 실험방식을 고안하였다.

관련시방서(UBC 1994, IBC 2003)의 핸드레일의 사용하중에 하중계수(또는 안전계수) 2.5를 곱한 하중수준을 소요 소요내하력(proof load)으로 고려하고, 의사정적(pseudo-static) 단조 또는 반복재하실험에 의해 내력을 평가하였다.

UBC 1994, IBC 2003 등에서는 부재의 직각방향에 대한 하중의 크기는 등분포하중의 경우에는 50 plf(= 74.41 kgf/m) 이상, 집중하중의 경우에는 부재의 내력상 가장 불리할 것으로 예상되는 지점에서 200 lb(= 90.72 kgf) 이상 가력하도록 규정하고 있다. 이를 참조하여 본 실험에서는 각 시방서에 규정된 사용하중에 안전율 2.5를 곱하

여 등분포하중은 125 plf(= 186.02 kgf/m), 집중하중은 500 lb(=226.80 kgf)를 소요내하력으로 설정하였다.

또한 시방서는 처짐에 대해서는 집중하중의 경우만을 다루고 있는데, 사용하중에 도달하였을 때 중간지점에서 측정할 경우에는 (가드높이/24)+(유효가드길이/96), 단부지점에서는 유효가드높이/12 이내가 되도록 정하고 있다.

하중재하 시간과 관련하여 ICC-ES 2004 보고서는 10 초 ~ 5분 사이를 가력시간으로 규정하고 있으며, 1분 이상 지속된 재하하중을 구조물의 소요내하력으로 정하고 있다. 그러나 가력과정에서 불가피하게 소요되는 시간으로 인해 가력시간을 30분 이내에서 진행하였는데, 이는 실험결과를 보수적으로 해석할 수 있음을 의미한다.

### 3. 실험결과 및 분석

우리는 지극히 취성적인 재료이기 때문에 가력과정에서 순간적으로 파괴가 일어난다. 따라서 단조가력실험시에 발생할 수 있는 충격효과로 인하여 시험체의 성능평가에 미칠 수 있는 영향을 최소화하고자 하였다. 또한 실제 현장시공된 것과 동일하게 강화유리 시험체 표면에 안전필름을 붙여 시험체가 파괴하중에 도달하여 갑작스런 파괴가 일어나도 일반유리와 같이 유리조각이 산산히 부서져 떨어져 나가는 것을 방지함으로써 시험체 파괴로 인한 부상을 방지하고자 하였으며, 여러 형태의 안전장치를 추가로 설치하여 실험을 진행하였다.

#### 3.1 파괴모드

##### 3.1.1 단조가력 시험체



그림 12. 응력집중현상에 의한 볼트접합부 파괴

직사각형 및 평행사변형 강화유리가 각각 볼트접합된 REC-B-U 및 PA-B-U 시험체는 등분포하중에 대한 성능평가를 위한 것이다. 볼트접합된 시험체는 가력방식에 따라 유사한 거동을 보이는데, REC-B-U 및 PA-B-U 시험체는 볼트접합부의 전면에 위치한 볼트열에서 전파된 응력집중현상으로 인해 시험체가 급격히 취성파괴 되

는데, 이는 파괴후의 볼트접합부 주변의 균열패턴으로도 확인할 수 있다(그림 12 참조). 강화유리에 부착된 안전 필름은 강화유리 파괴시에 유리파편의 비산을 방지하는데 효과적이었다(그림 13, 14 참조).



그림 13. REC-B-U 시험체의 파괴전경

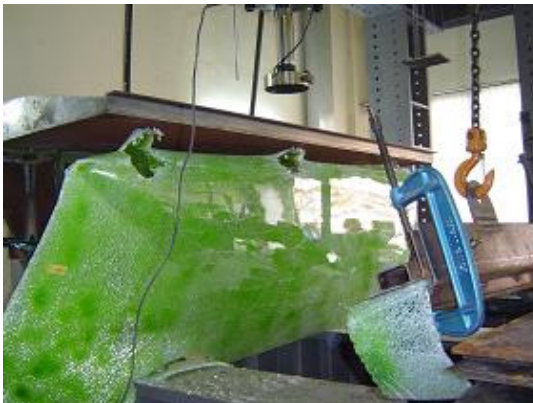


그림 14. PA-B-U 시험체의 파괴전경

직사각형 및 평행사변형 강화유리가 각각 볼트접합된 REC-B-C 및 PA-B-C 시험체는 외부하중에 가장 취약한 코너에 집중하중을 가하는 실험이다. 실험결과, 등분포하중의 경우와 마찬가지로 응력집중현상이 가력위치에서 가장 인접한 전면에 배치된 볼트열로 전파되어 볼트 접합부에서 시험체가 급격히 취성파괴 되었다. REC-B-C 시험체는 등분포하중실험과는 달리 접합부 부위가 완전히 분리되었으며(그림 15 참조), PA-B-C 시험체는 부착된 안전필름이 유리파편들이 비산되는 것을 막아주어 강화유리가 접합부에서 완전히 분리되는 것을 방지해 주었다(그림 16 참조).

직사각형 강화유리가 석고충진된 REC-P-U 시험체는 등분포하중에 대한 성능평가를 위한 것이다. 전체적으로 실험결과는 강화유리의 형상에 상관없이 석고충진된 시험체가 가장 뛰어난 성능을 나타내었다. REC-P-U 시험체는 REC-B-U 시험체와 마찬가지로 최종파괴된 후에도 접합부가 일부 결속되어 있었으며 강화유리의 밑면에 부착된 안전필름이 다소 손상되었으나 시험체의 형태가 크게 망실되지는 않았다(그림 17 참조).



그림 15. REC-B-C 시험체의 파괴전경



그림 16. PA-B-C 시험체의 파괴전경

REC-P-U 시험체의 파괴는 볼트접합된 시험체의 경우에 접합부의 일부에서 발생하는 과도한 응력집중현상에 의해 파괴되는 것과는 달리 석고를 접합부 전면에 걸쳐 충전시킴으로써 볼트접합부에서 유발되었던 응력집중현상을 최소화한 결과, 하중에 대해 접합부 전체폭이 저항하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉 석고충진된 접합부는 강화유리에 내재된 일정이상의 내력을 통해 구조물로서의 성능을 충분히 발휘할 수 있는 환경을 제공하고 있는 것으로 판단된다.

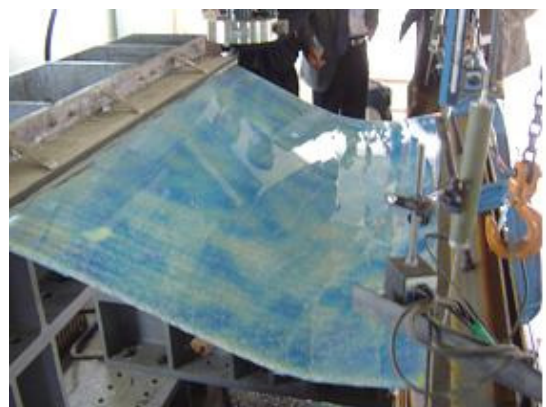


그림 17. REC-P-U 시험체의 파괴전경

직사각형 강화유리가 석고충진된 REC-P-C 시험체는 가장 취약한 코너에 집중하중을 가력하는 실험이다. 시험체의 최종파괴모드는 접합부가 완전히 파괴되어 있음을 확인할 수 있다(그림 18 참조). 본 시험체는 실험 중에 구조물의 강화유리 코너부에 설치된 가력대에 상당한 중량이 가력되면서 강화유리 역시 일정량 이상의 변형을 일으키게 되므로 지그의 일부가 강화유리를 누르는 문제점을 노출하였다. 이러한 일련의 과정은 강화유리에 지그가 접합된 부위에서 응력집중현상을 유발시켜 시험체의 파괴로까지 진행되는 직접적인 원인이 된 것으로 보인다.



그림18. REC-P-C 시험체의 파괴전경

### 3.1.2 반복재하시험체

REC-P-CM 시험체는 시험체의 가장자리 중앙부에 집중하중을 반복재하하는 실험이다. 실험과정에서 접합부의 상태를 확인하기 위해 석고 위에 마감된 실링재를 걷어내고 실험을 진행하였다. 본 실험은 시험체와 일부 지그의 자중이 축력으로 작용하고 가력하중이 시험체의 좌우로 횡하중으로 작용하므로 횡변위와 축력의 작용에 의하여 추가적인 2차 모멘트가 발생하게 된다. 따라서 본 실험결과는 보수적으로 해석가능하다.

REC-P-CM 시험체는 “120회 이상”의 반복재하에서도 저항하므로, 시험체는 본 실험에 대해서 충분한 강성을 보유하고 있는 것으로 판단하여 실험을 종료하였다. 아래의 그림 19는 실험종료 후에 접합부가 손상된 모습으로 강화유리를 따라 길이방향으로 충전된 석고가 작은 크기로 파손되어 접합부의 충전재와 강화유리가 약 1 cm 정도 벌어져 있는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 강화유리의 보장연한을 10년으로 산정하므로 장기간의 반복재하는 (시험체의 접합부에 충전된 석고의 손상정도의 차이는 있겠으나) 깊이 방향으로 계속 진행되는 결과를 보일 것으로 예상되는 바, 접합부의 파손정도를 확인할 수 없는 문제점이 발생하게 된다. 따라서 동선간에 이동이 빈번한 장소에 설치된 핸드레일에 대해서는 장기적으로 접합부의 안전성을 보장할 수 없다. 그러나 본 실험은 시험체의 극한상태를 가정한 것으로 일반건물에 실제 시공

된 핸드레일의 경우에는 실험상황과 동일한 충격하중이 반복적이고 연속적으로 발생하지 않기 때문에 시공과정에서 문제점만 발생하지 않는다면 접합부 뿐만 아니라 핸드레일의 구조물 전체가 충분한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

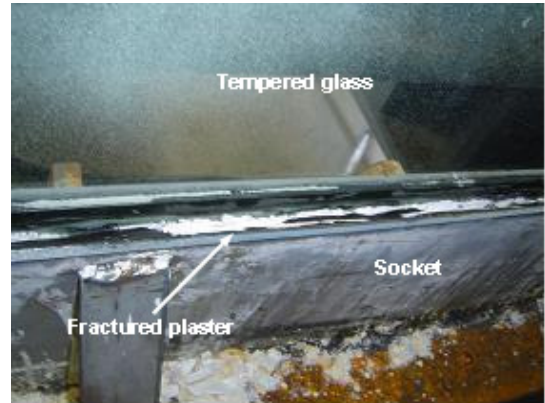


그림19. REC-P-CM 시험체의 접합부가 손상된 모습

REC-P-CC 시험체는 시험체의 가장자리 코너에 집중하중을 반복재하하는 실험이다. REC-P-CM 시험체와 마찬가지로 실링재를 제거한 후 진행하였다. 시험체는 61회 반복재하가 이루어지는 순간에 파괴되었다(그림 20 참조). 그러나 위에서 기술한 바와 같이, 실제 시공된 핸드레일에 실험상황과 동일한 60회 이상의 충격하중이 반복적이고 연속적으로 발생할 가능성은 극히 미미하므로, 시험체에 요구되는 충분한 성능수준을 만족시키고 있다고 할 수 있을 것이다.



그림20. REC-P-CC 시험체의 파괴전경

아래의 그림 21은 REC-P-CC 시험체의 접합부가 시험체의 길이방향으로 손상된 모습을 보여주고 있다. 이는 본 시험체의 경우에 REC-P-CM 시험체와는 달리 시험체가 파괴되었기 때문에 발생한 것으로 판단되는데, 석고

가 강화유리의 양측면에서 깊이방향으로, 바깥쪽에서 안쪽으로 “약 1 cm 가량” 사선으로 파손되어 있다.

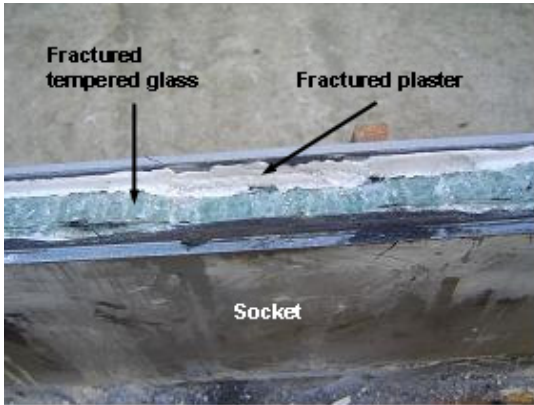


그림21. REC-P-CC 시험체의 접합부가 파손된 모습

3.2 소요내하력 및 허용변위에 의한 성능평가

3.2.1 단조가력 핸드레일 시험체

강화유리의 자중과 가력을 위해 설치된 지그를 초기하중으로 산정하고 이에 대한 응답을 초기처짐으로 측정하여 평가하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 ICC-ES 2004 보고서의 성능평가기준에서는 최대내하력 뿐만 아니라 (집중하중의 경우에) 사용하중에서의 허용변위에 대해 규정하고 있으므로 이를 토대로 핸드레일의 성능평가를 하였다.

그림 22는 단조가력 시험체의 하중-변위관계곡선을 나타낸 것이다. 시험체의 전체적인 거동을 살펴볼 때, 전형적 탄성-취성거동(elastic-brittle behavior)을 보인다. 석고충전된 시험체가 (강화유리의 형상에 관계없이) 볼트접합된 시험체에 비해 월등한 성능을 보였다. 또한 앞에서 기술한 바와 같이, 등분포하중에 대한 시험체는 하중에 대해서 접합부의 전체폭이 저항하고 있기 때문에 볼트접합부의 전면에 위치한 볼트열에서의 응력집중현상으로 인한 취성파괴모드가 형성되는 집중하중에 대한 시험체에 비해 뛰어난 성능을 나타내고 있다.

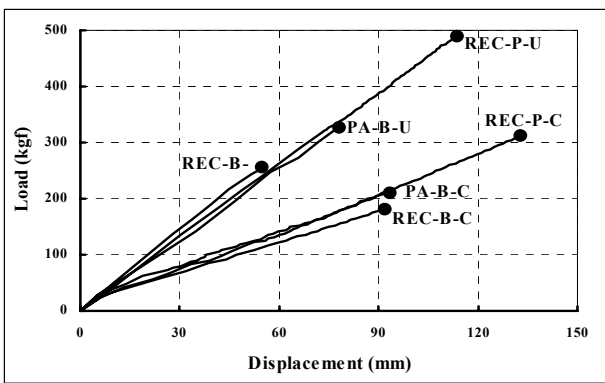


그림22. 단조가력 시험체의 하중-변위 관계곡선 (●: fracture point)

표 2는 단조가력 시험체의 소요내하력에 의한 성능평가결과를 정리한 것이다. REC-B-U 시험체의 파괴하중은 255.33 kgf이고 최대변위는 54.62 mm이다. 시험체의 파괴하중을 사용하중으로 나눈 값인 안전율은 1.69이다. REC-B-C 시험체의 시험체의 파괴하중은 182.28 kgf이고 최대변위는 91.88 mm이다. 안전율은 2.01로서 등분포하중(1.69)의 경우보다 안전성이 상대적으로 높게 나타났다.

REC-P-U 시험체의 파괴하중은 489.13 kgf, 변위는 113.57 mm이다. 안전율은 3.65이다. REC-P-C 시험체의 파괴하중은 311.58 kgf이고, 변위는 132.63 mm이다. 안전율은 3.43으로서 등분포하중(3.65)의 경우보다 안전도가 낮게 평가되었다 그러나 위에서 서술한 바와 같이, 외부하중에 의한 파괴이전에 예기치 않은 강화유리와 지그와의 마찰로 인해 파괴되었기 때문에 이러한 문제점을 고려하여 이미 실시된 볼트접합 시험체의 실험결과를 통해 본 실험의 최종결과를 유추할 때, 도출된 실험결과보다 다소 높은 파괴하중과 변위를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

PA-B-U 시험체의 파괴하중은 328.0 kgf이고, 변위는 77.87 mm이다. 안전율은 1.87로서 REC-B-U 시험체(1.69)에 비해 약간 높은 수치를 보인다. PA-B-C 시험체의 파괴하중은 210.61 kgf이고 변위는 92.83 mm이다. 안전율은 2.32로서 등분포하중(1.87)의 경우보다 안전성이 높게 평가되었다.

단조가력 시험체의 전체 안전율을 살펴보면, 실험결과를 등분포하중에 대한 저항성능이 높게 나타났으나, 관련 시방서에서는 등분포하중에 대해서 높은 성능수준을 요구하고 있기 때문에 상대적으로 안전율은 집중하중에 대한 시험체가 높게 나타나고 있다. 볼트접합된 시험체의 경우는 가력방식에 따라 엇비슷한 값을 나타내고 있으며, 높은 강성을 가지는 석고충전된 시험체는 볼트접합된 시험체에 비해 대략 1.7 ~ 2.2배 이상의 안전성을 확보하고 있음을 알 수 있다. 따라서 볼트접합된 시험체는 모두 안전율(2.5)을 밑돌고 있으므로 구조보강을 통해 안전성을 확보할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

표2. 단조가력 시험체의 소요내하력에 의한 성능평가

시험체	사용하중 (kgf)	소요내하력 (kgf)	파괴하중 (kgf)	파괴시의 최대변위 (mm)	안전율*
REC-B-U	150.68	376.70	255.33	54.62	1.69
REC-B-C	90.72	226.80	182.28	91.88	2.01
REC-P-U	133.94	334.85	489.13	113.57	3.65
REC-P-C	90.72	226.80	311.58	132.63	3.43
PA-B-U	175.68	439.21	328.00	77.87	1.87
PA-B-C	90.72	226.80	210.61	93.50	2.32

\* 안전율 = 파괴하중/사용하중



표 3은 ICC-ES 2004 보고서에 근거한 집중하중에 대한 허용변위관점에서의 성능평가결과를 나타낸 것이다. REC-B-C, REC-P-C 및 PA-B-C 시험체는 각각 91.25 mm, 93.75 mm, 92.83 mm의 허용변위 제한값을 가지는데, 본 시험체들의 사용하중시의 변위는 각각 40 mm, 40 mm, 35 mm로서 모두가 탁월한 성능수준을 나타내고 있다.

표3. ICC-ES 2004 보고서에 근거한 성능평가

시험체	사용하중시의 변위	허용변위제한 (mm)	만족여부
REC-B-C	40	91.25	O.K.
REC-P-C	40	93.70	O.K.
PA-B-C	35	92.83	O.K.

3.2.2 반복재하시험체

그림 23 및 24는 REC-P-CM 시험체 및 REC-P-CC 시험체의 하중-변위관계곡선을 각각 나타낸 것으로 최대 변위는 각각 87.3 mm, 125.80 mm를 나타내고 있다. 동일한 접합조건을 갖는 시험체에 대한 단조가력실험에서 얻어진 사용하중(250 kgf)에 상당하는 하중에서의 변위를 살펴보면, 등분포하중의 경우는 약 56 mm, 집중하중은 약 107 mm로서 (본 실험과는 다른 조건이므로 단순비교가 불가능하나) 실험상의 P-Delta 효과와 단조가력실험과 달리 큰 하중이 일시에 재하되는 가력속도로 인해 큰 변위가 발생하는 것으로 판단된다.

그러나 이러한 소요내하력 수준의 반복재하에도 불구하고 접합부의 강성저하는 거의 없다. 가령 REC-P-CM 및 REC-P-CC 시험체의 강성저하는 단지 각각 26.58%, 16.79%에 불과하다. 따라서 본 시험체는 반복재하에 대해서 충분한 성능수준을 만족시키는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 구조보강이 되지 않은 강화유리 가드 및 핸드레일의 성능평가를 위한 단조가력 및 반복재하 실물대 실험을 수행하였다. 본 연구의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 단조가력의 경우, 시험체는 모두 전형적 선형탄성-취성거동을 보였다. 즉 본 구조시스템의 접합부는 연성거동에 의한 에너지소산이 전혀 없는 취성시스템으로서 파괴시까지 비탄성거동을 통한 사전경고가 없으므로 상대적으로 높은 안전도 여유를 갖도록 설계 및 시공될 필요가 있다. 특히 본 구조시스템의 경우, 힘의 재분배를 기대할 수 없는 정정 캔틸레버구조라는 점을 감안하면 더욱 그러하다.
2. 볼트접합부 시험체는 하중재하점에서 최단응력전달 경로에 위치한 (즉 가력점에서 최근거리에 위치한) 볼트

접합 개구부위의 응력집중현상에 의해 시험체의 파괴가 촉발된 것으로 관측되었다. 이들 시험체는 이러한 응력집중현상에 의해 1.69 ~ 2.32 수준 안전율밖에 확보하지 않아서, 본 실험의 목표수준인 2.5에는 도달하지 못하였다. 볼트 접합부를 채용할 경우, 이런 응력집중현상을 경감시킬 수 있는 개선된 볼트배열 또는 상부 캡의 보완 등의 방안이 모색될 필요가 있다.

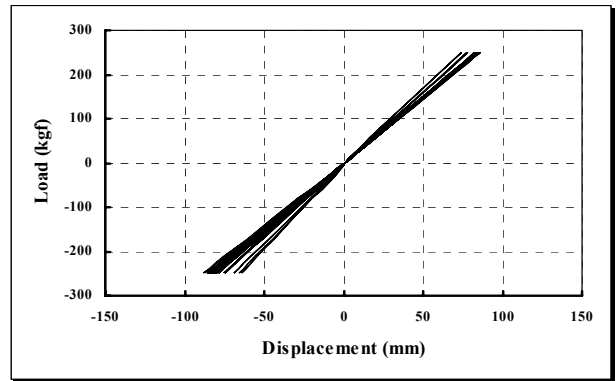


그림23. REC-P-CM 시험체의 하중-변위관계곡선

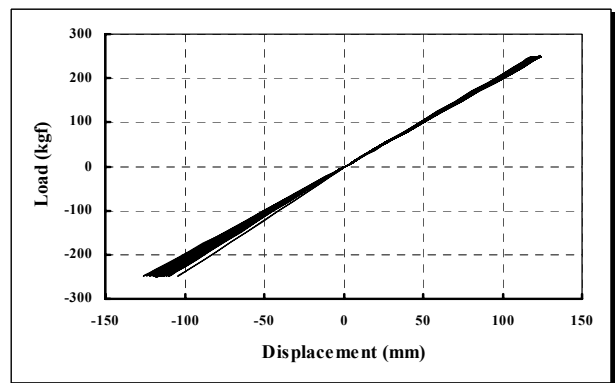


그림24. REC-P-CC 시험체의 하중-변위관계곡선

3. 석고충진 접합부 시험체의 안전율은 각각 3.43 ~ 3.65 수준으로서 월등히 뛰어난 접합성능을 발휘하였다. 이는 석고충진을 통하여 연속접합부가 구축되므로 볼트 접합부와는 달리 응력집중현상이 대폭 완화되었기 때문인 것으로 판단된다.

4. 실험에서 관측된 사용하중하에서의 횡변위는 30 ~ 45 mm로서, ICC-ES 보고서 기준 허용변위인 90 mm 수준을 충분히 만족하였다.

5. 반복재하를 받을 경우, 석고접합부의 강도 또는 강성저하여부를 알아보기 위해 반복재하실험을 수행하였다. 중앙부 반복가력에 대해서는 무려 120회의 사이클에 이르도록 강성 또는 강도의 저하가 거의 없었다. 단 접합부 석고의 지압변형의 누적에 따른 접촉면 이간이 관측되었다. 극히 불리해 보이는 하중조건인 코너부의 반복가력에

대해서도 61회의 사이클에 이르러서야 접합부의 파단이 발생하였다. 전체적으로, 석고접합부는 반복하중하에서도 내하력이 매우 우수한 것으로 평가된다.

6. 유리 가드 및 핸드레일 구조시스템의 실물대 구조실험 자료는 매우 희소하다. 본 연구결과가 유리구조시스템의 취성적 거동특성 및 이의 위험성에 대한 관련 실무자의 이해증진, 그리고 향후 설계 및 시공의 개선에 참조될 수 있기를 희망한다.

#### 참고문헌

1. ICC Evaluation Service, Inc.(2004). Acceptable Criteria for Deck Board Span Ratings and Guardrail Systems (Guards and Handrails): AC174.
2. International Conference of Building Officials(1994). Uniform Building Code, 1.
3. International Code Council, Inc.(2003). International Building Code.
4. 한국유리(2000). 기술자료집.

(接受: 2005. 9. 1)