

지하철 고가교 접합강화유리 방음판의 열차진동 및 풍하중에 대한 성능평가

김석수¹, 이호범^{2*}, 송재호³

Performance Evaluation of Laminated-Tempered Glass as a Component of Noise Barrier on Metro Railway Elevated Bridge Against Train Induced Vibration and Wind Load

Suk-Su Kim¹, Ho-Beom Lee^{2*}, Jae-Ho Song³

Abstract: Types of noise barrier installed for noise attenuation are largely divided into noise-absorbing format and noise-proofing format. In these days, installation of transparent noise barrier is general trend to solve problems that hinder sunshine and landscape. Some kinds of transparent boards are used to one of components in noise barriers, but in some cases, less transparency and worse pollution due to yellowing phenomena, and severe material deformation are to harm the urban aesthetics. Therefore laminated-tempered glass board in that yellowing phenomena does not occur can be replaced as a transparent one to secure those shortcomings. In this paper, the structural safety against train induced vibration and the resistibility to wind load are analyzed for laminated-tempered glass system as a component of noise barrier installed on Metro railway elevated bridges. Also the appropriateness is evaluated through flexural bending performance test, compressive strength test, modulus of elasticity tests, and impact test for the system or the glass material itself. All of these processes are intended to present the deployment of logic to evaluate the adequacy for the system.

Keywords: Noise barrier, Transparent board, Laminated-tempered glass, Vibration and wind loads, Structural safety

1. 서 론

소음 저감을 목적으로 설치되는 방음벽은 크게 흡음 판과 방음판으로 나뉘며, 일조 및 경관을 저해하는 방음 벽 문제점을 해결하고자 방음벽 전체 또는 일부를 투명 방음판으로 대체하고 있다. 투명 방음판은 소재가 다양 하나(Jeong, H. Y. et al., 2005), 종류에 따라서는 시간 경과시 황변 현상과 재질 변형 등으로 투명도가 떨어지고, 오염이 심해지면 오히려 도시 미관을 해치기도 한다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 재질을 황변 현상이 없는 접합강화유리로 대체가 가능하다. 강화유리의 특성은 광투과성, 내후성, 내화학성, 내마모성 등 다른 재료를 통하여 쉽게 구현할 수 없는 장점을 가지고 있으나, 집중 하중에 취약하거나, 일단 파손이 시작되면 유리

전체가 붕괴되는 단점을 갖는다. 이러한 단점 보안을 위해 강화유리 사이에 특수 접합 필름을 삽입하여 밀착시킨 접합강화유리를 도로교 등의 방음판으로 사용하고 있다. 그러나 접합강화 유리 방음판은 국내에서의 적용 사례 및 연구 성과가 미비한 관계로 접합강화유리 방음판을 지하철 고가교 방음벽으로 적용하기 위해서는 합리적인 성능 시험 및 수치 해석을 통한 검증이 필요하다. 본 논문은 지하철 고가교 상의 접합강화유리 방음판에 대한 열차 운행 유발 진동에 따른 진동 안전성, 풍하중 안전성 등을 각각 분석하고, 접합강화유리 시스템 및 재료에 대한 소정의 관련 시험(휨 능력 성능 시험, 압축 강도 및 탄성 계수 시험, 충격 실험)을 수행함으로써 접합강화유리의 방음판으로서의 적정성을 평가하는 논리를 전개하는데 목적이 있다.

2. 본 론

2.1 분석 방향 및 내용

진동 해석은 고가교상 접합강화유리 방음판의 열차 유발진동에 대한 안전성을 평가하고, 풍하중에 대해서는 시방 풍하

¹정회원, (주)수성엔지니어링 상무이사

²정회원, (주)쓰리텍, 대표이사, 교신저자

³정회원, 금오공과대학교 정교수

*Corresponding author: threetech@empas.com

ThreeTECH. Co. Ltd., #502, Baekgoong Plaza(1), 331 Beongil 13, Seongnam-daero, Boondang-Gu, Seongnam-Si, Gyeonggi-Do, 13553, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Direction of analysis and contents

Items		Contents
System analysis	Dynamic analysis	Safety evaluation for the train induced vibration
	Wind load analysis	Bending performance test against wind load
Experimental test	Pseudo static test considering wind load	Pseudo-static bending performance considering wind load 300 kgf/m ²
	Compressive strength test	Tests of modulus of elasticity and compressive strength for laminated-tempered glass board system
	Impact test	Impact test until destruction for laminated-tempered glass board

중 해석과 이를 모사한 집중 하중(선하중) 시험 상태 해석에 따른 안전성을 평가한다. 유사 풍하중 시험은 풍하중에 대한 접합강화유리 방음판 시스템의 단순보 최대 모멘트와 동등한 모멘트를 유발케 하는 선하중을 1점 및 2점 재하 방식으로의 결과를 확인한다. 물성 시험은 응력-변형을 곡선 도출에 따른 탄성 계수(할선), 압축강도, 포아슨비 등의 결과를 획득한다. 충격 실험은 접합강화유리 상에 17.64 N 충격원을 수직 낙하시키며, 낙하고를 순차적으로 올려 최종 파괴될 때까지 실험한다. 분석 방향에 따른 내용은 Table 1과 같다.

2.2 평가 기준의 설정

2.2.1 방음벽 관련 기준

방음벽은 태풍과 같은 강풍에 견딜 수 있어야 한다. LH공사 전문 시방서에서는 방음판 중심부에서 2.94 kN/m² (풍속 60 m/s)에 견딜 수 있도록 정하고 있고(Kim, I. H. et al., 2014), 환경부 고시에서는 지역별 풍속을 고려하고 있다. 또한 철도설계기준 철도교편 기준(Korean Society of Civil Engineers, 2004)은 Table 2와 같고, 건설교통부제정 도로교 설계기준에 준한다. 한국산업규격 KS F 4770-3에서는 도로교 설계기준(LH Guide Specifications, 2010)의 설계 하중이 아닌 풍하중에 의한 방음판의 변위로 인해 발생될 수 있는 소음의 누출 현상을 방지하기 위해 내하중 등급(풍압)에 따른 최대 변위량을 제안하였다. 이는 허용 변위량 시험을 위한 설계 하중 및 시험 하중의 결정을 위해 도로교 설계기준에 근거한 지역별 풍속을 고려하여 풍하중을 5개의 등급으로 나누고, 이를 근거로 시험 하중을 제시한 것이다. 시험 하중은 철도설계기준을 참고하고, Table 3과 같이 도로교 설계기준의 단위 면적당 작용하는 풍하중(LH Guide Specifications, 2010) 계산 결과(설계 하중)의 약 1.3배를 적용하고 있다.

허용 변위량은 풍압 작용시 또는 풍압 제거시 방음판 사이

Table 2 Design wind load for noise barrier(unit:kN/m²) (Korean Society of Civil Engineers, 2004)

Region	Location	Earthwork part			Bridge part
		Height of noise barrier(m)			
		H≤ 3.5	H≤ 4.0 ~8.0	H> 8.0	
Inland	Seoul, Daegu, Daejeon, Chooncheon, Soowon, Choopongryeong, Jeonjoo, Iksan, Jinjoo, Gwangjoo	0.7	0.9	1.0	1.1
	West coast	Seosan, Incheon	0.9	1.2	1.3
West & East-south coast, South coast	Goosan, Yeosoo, Choongmoo, Busan, Pohang, Woolsan	1.2	1.5	1.5	2.0
East coast Jeju-Do special region	Sokcho, Gangreung, Jeju, Seogeuiipo, Mokpo	1.5	1.5	1.5	2.5

Table 3 Load rating

Design velocity(m/s)	50	45	40	35	30
Design load(kN/m ²)	3.4	2.8	2.2	1.7	1.2
Test load(kN/m ²)	4.4	3.6	2.9	2.2	1.6

Table 4 Allowable maximum displacement(Unit:mm)

Item	Elastic displacement	Permanent residual displacement
Maximum displacement	50	$L_A/500$

note) L_A : Maximum length of noise-proofing board for test(mm)

Table 5 Properties of fusing galvanized steel sheet

Fusing galvanized steel sheet(KSD 3506)				
Classification	Sign	Yielding point (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Ratio of elongation (%)
Structure	SGH400	Over 295	Over 400	Over 18

에서의 음누출 방지를 위한 변위량이다. 이에 적합한 성능 평가를 위해 국외 및 한국산업규격 시험법에서는 2등분점 및 3등분점 하중 시험법을 이용한 하중-변위 시험을 수행하되 탄성변위시험 및 영구 잔류 변위 시험을 구분하며, 시험중 지지대로부터의 방음판 분리 또는 방음 판 좌굴이 없도록 하고 있다. 한국산업규격 시험법은 Table 4와 같이 허용 최대 변위값을 유럽의 EN1794-1을 준용하고 있다.

방음판은 충격과 관련하여 EN1794-1 및 KSF 4770-3에 따

른 충격 시험을 수행한다. 이때 충격원 충격 후 충격부 위에서 찌그러짐과 같이 구조 성능에 문제가 되지 않는 외형상의 사소한 변형이나 균열 발생은 허용한다. 접합강화유리 프레임(frame)에 사용되는 아연도금강판 물성치는 Table 5와 같다.

2.2.2 구조물 손상 관련 진동기준

구조물 손상관련 허용 진동 권장 기준은 주로 해당 주관 기관에서 규정하며, 국내 기준 및 해외 기준의 일부는 각각 Table 6 및 Table 7에서와 같다(The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 1995).

2.2.3 접합강화유리 방음판 안전성 판정 기준

고가교 접합강화유리 방음판 안전성 평가를 위한 허용 진

Table 6 Recommended vibration criteria(1999) (The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 1995)

Target structures	Cultural proper ties	Traditional houses (low-rise floors, general houses etc.)	Low-rise european style buildings, Town-houses etc.	Low-rise & mid-rise apartments, Medium size & small shopping center and factories	Seismic designed structures (high-rise& large size apartment)
P.P.V. (cm/sec)	0.3	1.0	2.0	3.0	5.0

note) P.P.V. : Peak Particle Velocity

Table 7 Criteria from dupont company(The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 1995)

Peak particle velocity		Nature of damage
inch/sec	cm/sec	
12	30	Fall of rocks in unlined tunnels
7.6	19.3	50% Probability of major plaster damage
5.4	13.7	50% Probability of minor plaster damage
2.80~3.3	7.1~8.38	Threshold of damage from close-in blasting
2.0	5.0	Safe blasting criterion for residential structures recommended by U.S.B.M

note) U.S.B.M. : United States Bureau of Mines

Table 8 Allowable vibration velocity for the safety evaluation of noise-proofing board

Items	Standard value	Unit	Remark
Vibration criteria	0.8	kine (cm/sec)	Noise-proofing board made of laminated-tempered glass

Table 9 Judgment values for the noise-proofing board made of laminated-tempered glass

Items	Units	Standard values	Remarks
Stress on steel frame	N/mm ²	206.5	Yielding stress on steel frame(70% of the yielding strength of fusing galvanized steel sheet)
Stress on laminated-tempered glass	N/mm ²	22.4	70% of modulus of rupture of tempered glass provided by manufacturer
Displacement	mm	13.0	70% of displacement value just before plastic deformation occurs on bending test for normal noise-proofing board
Impact test	-	Level of damage	The presence of cracks on whole section

note) 2.94 kN/m² for wind load is applied

동 속도 기준은 Table 6 두 번째 범주의 80%가 되는 보수적 기준의 값을 도입하여 Table 8과 같이 설정하고, 구조적 성능 평가 판정 기준은 Table 9와 같이 각각 주어진 환경하에서의 기준 성능 값을 별도로 정한다.

3. 수치해석

3.1 기본사항

3.1.1 접합강화유리 방음판

접합강화유리 방음판(아연도 강판+코너연결 블럭)은 강재 프레임에 접합강화유리를 끼운 형태이며, 그 구성은 Table 10, Fig. 1 및 Fig. 2와 같다.

프레임은 용융아연도금 강판을 사용하여 방음판 변위량을 최소화하며, 휨발생시 방음판 이탈 방지 및 단부 응력 집중을 완화시킨다. 강판 물성치는 Table 11과 같고, 접합강화유리 물성치는 Table 12와 같다.

3.1.2 수치 해석 모델링

Table 10 Specifications of the laminated-tempered glass as a noise proofing board

Items	Materials
Transparent board	Laminated-tempered glass 10.76T
Steel frame	Galvanized steel sheet 1.6T
Corner connection block	Aluminium
Rubber gasket	Rubber
Noise-proofing pad	Rubber sponge

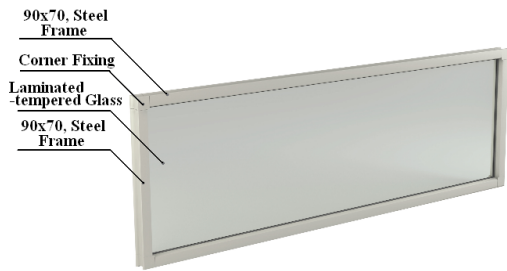


Fig. 1 The noise-proofing system of laminated-tempered glass

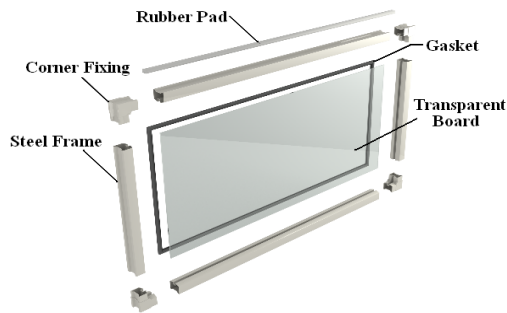


Fig. 2 Configurations of the noise-proofing system of laminated-tempered glass

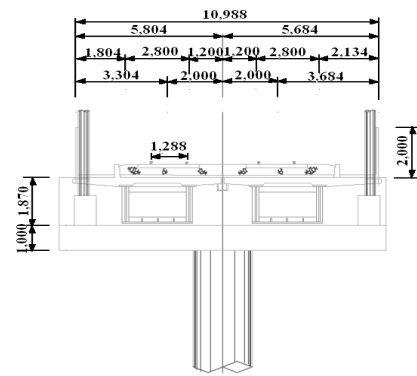


Fig. 3 Structural configuration of the elevated bridge on #1 region (unit : mm)

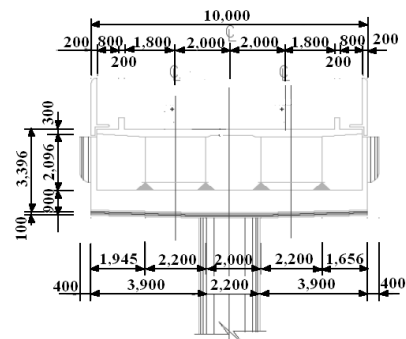


Fig. 4 Structural configuration of the elevated bridge on #2 region (unit : mm)

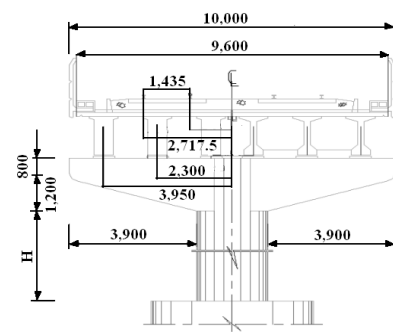


Fig. 5 Structural configuration of the elevated bridge on #3 region (unit : mm)

Table 11 Properties of fusing galvanized steel sheet(KSD 3506)

Classification	Sign	Yielding stress (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Ratio of elongation (%)
Structures	SGH400	Over 295	Over 400	Over 18

Table 12 Properties of tempered glass and PVB

	Items	Properties
Tempered glass	Density	24516.6 N/m ³
	Young modulus	72000 N/mm ²
	Modulus of rupture	36.5 N/mm ²
	Shear modulus	29800 N/mm ²
	Poisson's ratio	0.23
PVB	Young modulus	950 N/mm ²
	Modulus of rupture	22.2 N/mm ²
	Shear modulus	316.7 N/mm ²
	Poisson's ratio	0.5

note) Values for numerical analysis are selected as optimal values among the given values above and the real test values

방음판은 플레이트 수치모델요소로, 접합강화유리와 프레임은 탄성 연결로 효율화하였다. 교량 구조물은 2경 간을 기준으로 거더, 슬래브, 콘크리트 도상을 일체 구조로 하였고, EVA 제품의 레일 패드 및 폴리우레탄 제품의 베이스 플레

트 방진재는 스프링, 댐퍼 요소로 하였다. 열차는 상하행 양방향 열차 각 3량 총 6량을 재하하였다. 속도 75 km/h 운행시의 실가진력으로 레일-침목 간의 시스템적 특성을 감안한 가진점 분배를 적용하여 동해석을 수행하였다. 분석 구간은 상계~노원 구간(#1구간), 한양대~뚝섬 구간(#2 구간) 및 신림~신대방 구간(#3 구간)등이며, 프로그램은 MIDAS Civil을 이용하였다. 각 구간의 구조물 제원은 Figs. 3~5와 같다.

3.2 열차유발진동에 대한 해석

3.2.1 해석 개요

진동 해석은 최장 지간 고가교상 방음벽 상단 4단에 부착된 2.0 m×0.5 m 접합강화유리 방음판에 대해 응력, 변위, 속도를 도출하였다. 대표적 모델링 형상은 Fig. 6, 열차 가진력 배치는 Fig. 7과 같다.

3.2.2 #1 구간 진동해석

#1 구간은 강박스로 구성되며, 지간은 30 m+30 m로 총 60 m이다. 고유치 해석결과는 Table 13, 열차동적하중 가진 해석 결과는 Table 14와 같다.

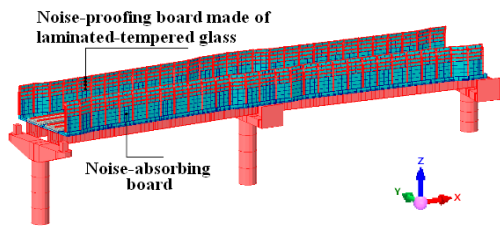


Fig. 6 Structural model of the elevated bridge

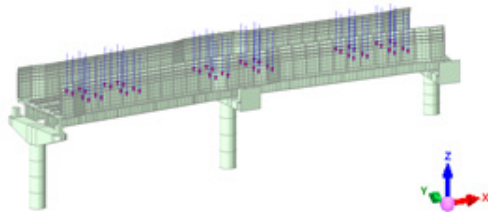


Fig. 7 Position of train forcing forces on the elevated bridge

Table 13 Natural frequencies for the elevated bridge on #1 region

Items	Mode #						
	37	54	1	2	6	77	
Natural frequencies(Hz)	16.37	22.588	1.930	3.928	8.259	29.890	
Directions	X(horizontal)		Y(horizontal)		Z(vertical)		

Table 14 Results of dynamic analysis for the the elevated bridge on #1 region

Position of response	Stress (N/mm ²)	Displ. (mm)	Velocity (cm/sec)	Remark
Noise-proofing board of laminated-tempered glass	0.138	0.119	0.366	Loading of 6 wagons (bi-direction)

3.2.3 #2 구간 진동 해석

#2 구간은 강박스로 구성되며, 지간은 44.2 m+24.8 m로 총 69 m이다. 고유치 해석 결과는 Table 15와 같고, 열 차 동적 하중 가진 해석 결과 최대값은 44.2 m 교량 중 양부에서 존재하며, 결과는 Table 16과 같다.

3.2.4 #3 구간 진동해석

#3 구간은 PSC 보구간으로 지간은 20.0 m+20.0 m로 총 40 m이다. 고유치 해석 결과는 Table 17과 같고, 열차 동적 하중 가진 해석 결과는 Table 18과 같다.

3.3 풍하중에 대한 해석

3.3.1 해석 개요

방음판은 풍하중 안전성 확보, 풍하중의 지주 전달시 파손, 탈락, 과도 변형 및 이로 인한 소음 누출 등이 방지되어야 한

Table 15 Natural frequencies for the elevated bridge on #2 region

Items	Mode #					
	2	4	1	8	5	9
Natural frequencies(Hz)	2.254	3.891	1.326	7.674	4.575	8.620
Directions	X(horizontal)		Y(horizontal)		Z(vertical)	

Table 16 Results of dynamic analysis for the elevated bridge on #2 region

Position of response	Stress (N/mm ²)	Displ. (mm)	Velocity (cm/sec)	Remark
Noise-proofing board of laminated-tempered glass	0.266	0.206	0.645	Loading of 7 wagons(bi-direction)

Table 17 Natural frequencies for the elevated bridge on #3 region

Items	Mode #					
	2	59	1	3	26	68
Natural frequencies(Hz)	3.859	38.562	2.895	5.736	15.666	42.856
Directions	X(horizontal)		Y(horizontal)		Z(vertical)	

Table 18 Results of dynamic analysis for the the elevated bridge on #3 region

Position of response	Stress (N/mm ²)	Displ. (mm)	Velocity (cm/sec)	Remark
Noise-proofing board of laminated-tempered glass	0.251	0.038	0.360	Loading of 5 wagons (bi-direction)

다. 해석은 방음판의 풍하중에 대한 안전성 평가 및 성능 시험용 해석을 수행하였고, 풍하중은 $2.94 \text{ kN/m}^2 (=300 \text{ kgf/m}^2)$ 를 적용하였다.

3.3.2 풍하중 구조해석

방음판 두께는 10.76 mm, 강제 프레임 두께는 1.6 mm이고, 수치 해석 모델은 Fig. 8과 같다.

Table 19에서와 같이 방음판 중앙부에서 최대 변위 및 응력

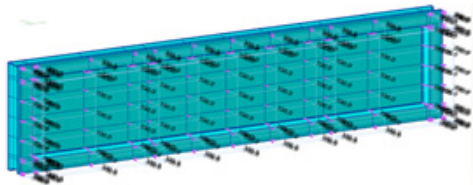


Fig. 8 Modeling of noise-proofing system made of lami-nated-tempered glass(application of wind load)

Table 19 Results of wind load analysis for the noise-proofing system made of laminated-tempered glass

Classification	Units	Analysis output	Standards	Judgment
Displacement on lami-nated tempered glass	mm	1.487	13.0	OK
Maximum stress on laminated-tempered glass	N/mm ²	1.870	22.4	OK
Displacement on steel frame	mm	1.398	13.0	OK
Maximum stress on steel frame	N/mm ²	64.403	206.5	OK

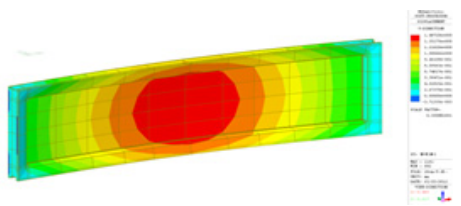


Fig. 9 Displacements on the laminated-tempered glass due to wind load

Table 20 Types of applying loadings for the test

Classification	Calculation	load
Loading cases on frame	1 point loading $PI/4=705.9 \text{ N-m}$ $\therefore P=1,440.6 \text{ N}$	12.01 kN/m
	2 points loading $PI/2-0.2P=705.9 \text{ N-m}$ $\therefore P=905.1 \text{ N}$	7.54 kN/m
Loading cases on laminated-tempered glass	1 point loading $PI/4=428.1 \text{ N-m}$ $\therefore P=944.0 \text{ N}$	2.67 kgf/m
	2 points loading $PI/2-0.2P=428.1 \text{ N-m}$ $\therefore P=605.5 \text{ N}$	1.71 kN/m

과 강제 프레임 응력은 모두 기준을 만족한다. 해석 결과 그림 일부는 Fig. 9와 같다.

3.3.3 풍하중 성능 시험용 구조 해석

해석 하중은 등분포 하중인 풍하중에 대해 방음판의 단순보 최대 모멘트를 산정하고, 이와 동등한 모멘트를 유발케하는 집

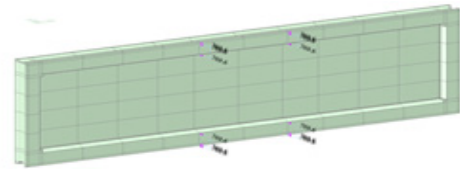


Fig. 10 Points loading on the frame holding laminated-tempered glass

Table 21 Results of numerical analysis for 1 point loading case

Classification	Unit	Analysis output	Standards	Judgment	
1 point loading on the frame	Displacement of lami-nated-tempered glass	mm	1.903	13.0	OK
	Displacement of frame	mm	1.890	13.0	OK
1 point loading on laminated-tempered glass	Displacement of lami-nated-tempered glass	mm	1.620	13.0	OK
	Maximum stress of laminated-tempered glass	N/mm ²	10.077	22.4	OK

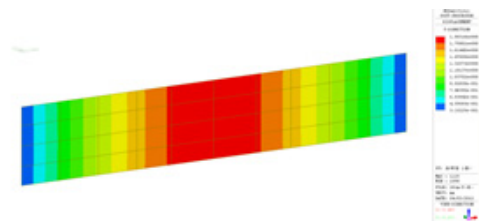


Fig. 11 Displacement of the laminated-tempered glass in the case of 1 point loading on the frame

Table 22 Results of numerical analysis for 2 point loading case

Classification	Unit	Analysis output	Standards	Judgment	
2 points loading on frame	Displacement of lami-nated -tempered glass	mm	2.249	13.0	OK
	Displacement of frame	mm	2.235	13.0	OK
2 point loading on laminated-tempered glass	Displacement of lami-nated-tempered glass	mm	1.779	13.0	OK
	Maximum stress of laminated-tempered glass	N/mm ²	7.065	22.4	OK

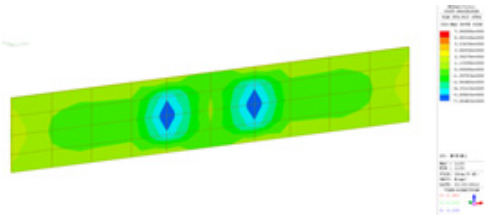


Fig. 12 Stresses of the laminated-tempered glass in the case of 2 points loading on the laminated- tempered glass

Table 23 Results of dynamic analysis on bridges

Target region for numerical analysis	Evaluation items	Analysis output	Standards	Judgment
·Elevated bridge on #1 region (Beam: steel box)	Stress (N/mm ²)	0.138	22.4	OK
	Displacement(mm)	0.119	13.0	OK
	Velocity (cm/sec)	0.366	0.8	OK
·Elevated bridge on #2 region (Beam : steel box)	Stress (N/mm ²)	0.266	22.4	OK
	Displacement (mm)	0.206	13.0	OK
	Velocity (cm/sec)	0.645	0.8	OK
·Elevated bridge on #3 region (Beam : PSC)	Stress (N/mm ²)	0.251	22.4	OK
	Displacement(mm)	0.038	13.0	OK
	Velocity (cm/sec)	0.360	0.8	OK

중 하중(선하중)을 1점 및 2 점 재하 하중으로 하였다. 하중은 Table 20과 같고, 하중 재하 모델링 그림 일부는 Fig. 10과 같다.

Table 21과 같이 프레임 상부 1점 하중 재하시 방음판 중앙부와 프레임의 최대 변위 및 방음판 상부 1 점 하중재하시 중앙부 변위와 응력은 모두 기준을 만족한다. 해석 결과 그림 일부는 Fig. 11과 같다.

Table 22와 같이 프레임 상부 2점 하중 재하시 방음판 중앙부와 프레임 최대 변위 및 방음판 상부 2 점 하중 재하시 중앙부 변위와 응력은 모두 기준을 만족한다. 해석결과 그림 일부는 Fig. 12와 같다.

3.4 접합강화유리 방음판 수치해석 결과

열차 유발진동에 대한 방음판 응력, 변위 및 속도와 풍 하중 및 성능 시험용 해석 결과는 판정 기준을 모두 만족하였고, 유사 풍하중 시험의 구조 해석은 휨시험 결과와 상호 비교되어 그 적정성이 입증되었다. 결과는 Tables 23 및 24와 같다.

4. 성능시험 및 실험평가

4.1 시험체계 및 방법

KSF 4770-3방음판중 비금속재 컬러 방음판 시험은 탄성

Table 24 Results of wind load analysis on the noise-proofing board of laminated-tempered glass

	Classifications	Units	Analysis output	Standards	Judgment
Wind load of 300 kgf/m ²	Displacement of laminated-tempered glass	mm	1.487	13.0	OK
	Maximum stress of laminated-tempered glass	N/mm ²	1.870	22.4	OK
	Displacement of steel frame	mm	1.398	13.0	OK
	Maximum stress of steel frame	N/mm ²	64.403	206.5	OK
1 point loading on frame	Displacement of laminated-tempered glass	mm	1.903	13.0	OK
	Displacement of steel frame	mm	1.890	13.0	OK
1 point loading on laminated-tempered glass	Displacement of laminated-tempered glass	mm	1.620	13.0	OK
	Maximum stress of laminated-tempered glass	N/mm ²	10.077	22.4	OK
2 points loading on frame	Displacement of laminated-tempered glass	mm	2.249	13.0	OK
	Displacement of steel frame	mm	2.235	13.0	OK
2 points loading on laminated-tempered glass	Displacement of laminated-tempered glass	mm	1.779	13.0	OK
	Maximum stress of laminated-tempered glass	N/mm ²	7.065	22.4	OK

변위 시험과 충격 시험으로 대별된다. 본 연구에서는 이러한 시험법을 준용하되 보다 목적에 맞는 논리 체계로 변환시켰다. 풍하중 휨성능 평가 시험은 수치 해석 결과에 따라 프레임 상부 및 접합강화유리 상부에 각각 1점 및 2점 하중 재하 방식을 이용하여 탄성 거동 특성을 확인하였다. 시험체 1개조는 탄성 휨시험을 수행한 후, 프레임 소성변형 상태까지 하중을 증가시켜 휨성능 정도를 평가하였다. 재하시험 상세 일부는 Fig. 13과 같다. 탄성계수 및 압축강도 시험용 접합강화유리 시험편은 제조상 300 mm×300 mm로 제작되었다. 좌굴 파괴를 방지토록 고정 지그에 의한 수평지지 방안을 강구하였고, 상하 단면에서 편심에 따른 국부파괴 방지를 위해 균일 등분포 하중을 받도록 캡핑재를 활용하였다. 또한 시험체가 등분포 가력을 받을 수 있도록 강성체 강제 플레이트를 상재하여 가력하였다. 응력-변형률 곡선은 판중앙에 부착한 변형률 게이지를 통해 도출하였고, 실험 상세는 Fig.14와 같다.

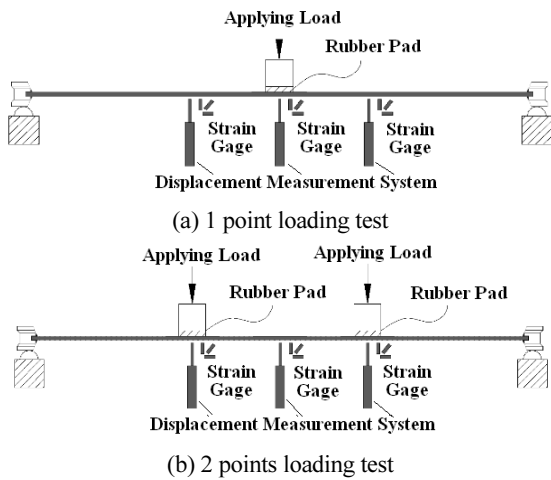


Fig. 13 Loading cases in bending tests for the noise-proofing system with laminated-tempered glass board

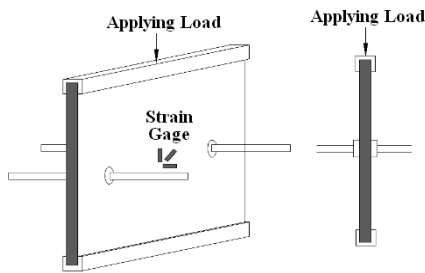


Fig. 14 Tests for the modulus of elasticity and the compressive strength

접합강화유리 충격 시험은 0.018 kN 강구를 수직 낙하 시키고 낙하고를 순차적으로 올려 최종 파괴될 때까지 실험하였다. 방음판은 모서리 양끝단을 지지대로 지지하여 지면으로부터 50 mm 이상 이격시켰다. 강구 타격위치는 방음판 모서리로부터 125 mm 떨어진 위치, 중앙부, 임의 위치 등 3지점으로 하였다.

4.2 방음판 시스템 및 재료시험

4.2.1 풍하중에 따른 프레임 휨성능 시험

1점 하중재하 방식과 2점 하중재하 방식에서의 재하 하중은 풍하중 성능 시험용 구조 해석시의 재하 하중을 그대로 활용하였고, 이는 Table 25와 같다. 측정 센서별 위치는 Fig. 15와 같다.

프레임 상부 1점 및 접합강화유리 상부 1점 하중 재하 시험 전경은 Fig. 16과 같고, 단계별 하중 증가에 따른 위치별 계측 결과는 각각 Table 26 및 Table 27과 같다.

프레임 상부 1점 하중 재하 시 하중이 1.60 kN일 경우 접합강화유리 중앙부 변위는 1.24 mm, 프레임 변위는 1.73 mm이

Table 25 Loading cases in frame bending tests for a simulation of the effect of wind load to noise-proofing system

Classifications	2.94 kN/m ² (Wind load)	Maximum test load
Loading on frame	1 point loading	1.60 kN 5.83 kN
	2 points loading	1.94 kN(0.97 kN per 1 point) total 5.83 kN(2.92 kN per 1 point)
Loading on laminated-tempered glass	1 point loading	0.96 kN 5.83 kN
	2 points loading	1.28 kN(0.64 kN per 1 point) total 5.83 kN(2.92 kN per 1 point)

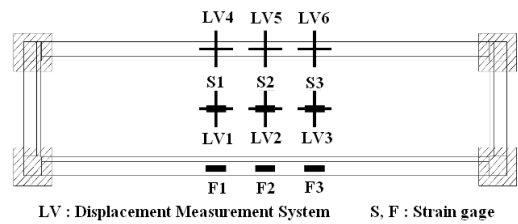
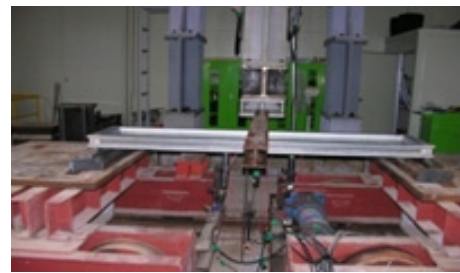
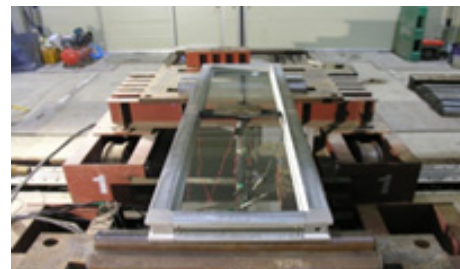


Fig. 15 Sensor arrangement for the test of wind load performance



(a) 1 point loading on the frame



(b) 1 point loading on the glass

Fig. 16 Methods of 1 point loading for the system

고, 하중이 5.83 kN 일 경우는 각각 4.25 mm 및 5.26 mm이다. 또한 접합강화유리 상부 1 점 하중 재하 시 하중이 0.96 kN일 경우 접합강화유리 중앙부 변위는 1.99 mm, 프레임 변위는 0.99 mm 이고, 하중이 5.83 kN 일 경우는 각각 10.01mm 및 4.84mm 이다. 최종적으로 하중 제거 시 접합강화유리 중앙부에서는 1.18 mm 잔류 변형량이 존재하였다. 프레임 상부 2점 및 접합강화유리 상부 2점 하중재하 시험 전경은 Fig. 17과 같다.

Table 26 Measurement results for 1 point loading on the frame

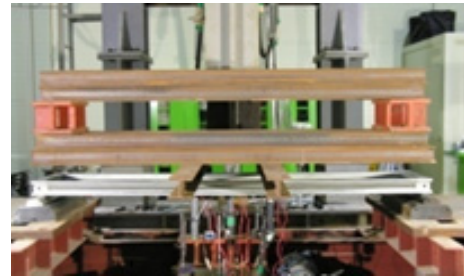
Applying load (kN)	Measurement results		
	Displacement on laminated-tempered glass (mm)	Displacement on frame(mm)	Strain on laminated-tempered glass($\times 10^{-6}$)
0.96	0.75	1.06	85
1.28	0.99	1.35	114
1.92	1.48	2.0	169
2.24	1.72	2.29	198
2.88	2.18	2.83	253
3.20	2.41	3.10	283
3.51	2.64	3.35	311
3.85	2.86	3.60	340
4.17	3.08	3.86	370
4.49	3.31	4.12	403
5.83	4.25	5.26	515

Table 27 Measurement results for 1 point loading on the laminated-tempered glass

Applying load (kN)	Measurement results		
	Displacement on laminated-tempered glass(mm)	Displacement on frame(mm)	Strain on laminated-tempered glass($\times 10^{-6}$)
0.96	1.99	0.99	129
1.28	2.64	1.24	171
1.92	3.71	1.80	251
2.24	4.30	2.10	294
2.88	5.42	2.64	371
3.20	6.07	2.95	415
3.51	6.62	3.17	451
3.85	7.04	3.05	487
4.17	7.48	3.26	518
4.49	7.93	3.43	549
5.83	10.01	4.84	693
0	1.18	-0.13	41

다음으로 단계별 하중증가에 따른 위치별 계측 결과는 각각 Table 28 및 Table 29와 같다. 프레임 상부 2점 및 접합강화유리 상부 2점 하중재하시의 계측은 각각 1점 하중재하시의 결과와 비교될 수 있도록 동일한 상황하에서 계측하였고, 이를 표로 도시하였다.

프레임 상부 2점 하중재하시 하중이 1.94 kN일 경우 접합강화유리 중앙부 변위는 1.36 mm, 프레임 변위는 1.63 mm이고, 하중이 5.83 kN일 경우는 각각 3.93 mm 및 4.65 mm이다. 또한 접합강화유리 상부 2점 하중재하시 하중이 1.28 kN일 경



(a) 2 point loading on the frame



(b) 2 point loading on the glass

Fig. 17 Methods of 2 point loading for the system

Table 28 Measurement results for 2 points loading on frame

Applying load (kN)	Measurement results		
	Displacement on laminated-tempered glass(mm)	Displacement on frame(mm)	Strain on laminated-tempered glass ($\times 10^{-6}$)
0.64	0.49	0.5	45
1.28	0.93	1.07	90
1.94	1.36	1.63	133
2.56	1.79	2.17	176
3.20	2.24	2.7	220
3.85	2.66	3.21	259
4.49	3.1	3.72	316
5.19	3.54	4.17	372
5.83	3.93	4.65	419

우 접합강화유리 중앙부 변위는 1.91 mm, 프레임 변위는 1.06 mm 이고, 하중이 5.83 kN일 경우는 각각 7.20 mm 및 4.62 mm 이다. 최종적으로 하중 제거시 접합강화유리 중앙부에서는 1.00 mm 잔류 변형량이 존재하였다. 접합강화유리 방음판 최대 휨능력 평가 시험결과는 Fig. 18 및 Table 30과 같다.

4.2.2 탄성계수 및 압축강도 시험

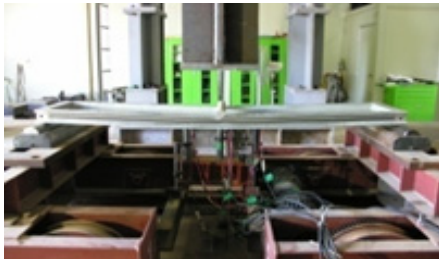
UTM 전용 장비를 이용한 접합강화유리의 재료 물성 평가에 있어서 응력-변형률 곡선 도출에 따른 탄성 계수, 압축 강도, 포아슨비 등은 Table 31과 같다.

Table 29 Measurement results for 2 points loading on the laminated-tempered glass

Applying load (kN)	Measurement results		
	Displacement on laminated-tempered glass(mm)	Displacement on frame(mm)	Strain on laminated-tempered glass ($\times 10^{-6}$)
0.84	0.95	0.52	-5
1.28	1.91	1.06	-13
1.92	2.66	1.61	-25
2.56	3.45	2.14	-38
3.20	4.13	2.64	-46
3.85	4.93	3.15	-55
4.55	5.78	3.68	-62
5.19	6.49	4.15	-67
5.83	7.20	4.62	-69
0	1.00	-0.07	-13



(a) Selection of loading position



(b) Feature of bending failure after full loading

Fig. 18 Flexural bending test for the frame

Table 30 Results of flexural bending test for the frame

Order	Applying load(kN)	Displ. on frame(mm)	Remark
1	5.88	5.54	-
2	6.86	5.69	-
3	9.80	13.21	-
4	14.87	19.43	Failure state

4.2.3 충격실험

접합강화유리 방음판 충격실험에 있어서 충격원 낙하 높이 0.5 m를 기준으로 0.3 m 씩 높이를 올려 모서리, 중앙-모서리 1/2지점, 중앙지점에 대한 손상 여부를 평가결과는 Fig. 19

Table 31 Compressive strength and modulus of elasticity

Items	Applying load(kN)	Compressive strength(N/mm ²)	Poisson's ratio(v)	Modulus of elasticity(N/mm ²)
Values	97.8	30.30	0.21	65,038



(a) Impacting source



(b) Testing feature

Fig. 19 Impact test for the laminated-tempered glass

Table 32 Result of impact test

Specimen / Steel ball	Position	Height(m)	State
Specimen : Laminated-tempered glass (Thick.: 10.76 mm)	Corner	0.5	Good
		0.8	Good
		1.1	Good
	1/2 position between corner and center	0.5	Good
		0.8	Good
		1.1	Good
Wight of steel ball : 1.8 kgf	Center	0.5	Good
		0.8	Good
		1.1	Failure

및 Table 32와 같다.

접합강화유리 모서리 및 중앙-모서리 1/2 지점은 충격에 대해 건전한 상태이나, 중앙부는 1.1 m 높이의 충격원에 의해 파손되었다. 파손시 파편 탈락 현상 및 충격원 관통은 없었으며 접합강화유리의 균열이 심하게 발생한 정도로 원형을 보존하였다.

4.3 결과 고찰

접합강화유리 방음판 휨성능 시험 결과와 수치 해석 결과는 Table 33에서와 같다. 프레임 상부 1점 하중 재하시 프레임 변위의 경우 수치 해석 결과가 시험치의 109% 수준이고, 접합

Table 33 Results of loading test and numerical analysis

Items	Measurement		Numerical analysis		
	Displ. on laminated-tempered glass(mm)	Displ. on frame (mm)	Displ. on laminated-tempered glass(mm)	Displ. on frame (mm)	
1 point loading	Loading on frame	1.24	1.73	1.903	1.890
	Loading on laminated-tempered glass	1.99	0.99	1.620	-
2 point loading	Loading on frame	1.36	1.63	2.249	2.235
	Loading on laminated-tempered glass	1.91	1.06	1.779	-

강화유리 상부 1점 하중 재하시 접합강화유리 변위의 경우는 81.4% 수준이다. 프레임 상부 2점 하중 재하시 프레임 변위의 경우 수치 해석 결과가 시험치의 137% 수준이고, 접합강화유리 상부 2점 하중 재하시 접합강화유리 변위의 경우는 93.1% 수준이다. 따라서 수치적 경증을 고려시 하중 재하 시험의 적합성이 확인되었다.

접합강화유리 방음판은 휨변위 19.43 mm까지 탄성 거동을 한다. 재하 하중은 14.87 kN로 풍하중 1점 하중 계산시 2.94 kN/m²와 동일한 모멘트를 갖는 하중이 1.44 kN임을 감안하면 10.3배의 안전성이 확보된다. 충격 실험 결과 0.018 kN 충격원에 의한 수직 낙하 높이 1.1 m 미만에서는 접합강화유리가 파손되지 않는다. 이때의 충격원 위치 에너지는 19.4 Joule이고, 운동 에너지를 속도로 변환하면 약 4.64 m/s이다. 이는 열차 운행시 접합강화유리 방음판 충격 저항성을 평가한 것으로 현장에서 물리적으로 실험 환경 이상의 충격이 예상되지 않으며, 설정된 접합강화유리 허용 진동 속도 0.8 kine을 충분히 만족시키므로 안전성 확보 논리가 적용된다. 단 접합강화유리 충격 안전성에 대한 완전한 기준은 현존하지 않으므로 향후 실지 상황에 대한 외란 충격 현상 및 그 기준 설정을 위한 별도의 연구가 요구된다.

5. 결론

2.0 m×0.5 m 접합강화유리 방음판(아연도강판+코너 연결블럭)의 열차 유발 진동에 대한 진동 성능, 풍하중 성능 및 관련 시험의 결론은 다음과 같다.

- 1) 지하철 고가교 방음벽 시스템의 투명 방음판으로서 적용되는 접합강화유리에 있어서 열차 유발 진동과 풍하중에 대한 안전성 및 적정성을 수치 해석적 방식과 시험적 방식을 접목하여 구명하는 논리를 전개함으로써 해당분야의 평가 방식을 개선하였다.
- 2) 풍하중 휨성능 평가시험 및 충격 실험을 통해 접합 강화유리 방음판 시스템이 설계 풍하중지시 능력 보다 상당 수준 (10.3배)까지의 안전성을 유지하며 충격 능력은 설정된 관리 기준을 만족하고 있음을 구명하였다.
- 3) 본 연구는 방음판 특수 소재인 접합강화유리에 대한 제반 관리 기준이 아직 명확히 규정되어 있지 않은 상태 및 제한적 범위에서 도출된 것이므로 향후 보다 많은 연구에 따른 신뢰성 확보가 요구된다.

References

Jeong, H. Y. et al. (2005), Korean Highway Bridge Design Code, Korea Road Transportation Association, 16-22.

Kim, I. H. et al. (2014), Development of the sound insulation and sound absorption based functional hybrid transparent noise barrier technology, KICT 2014-185, 19-40.

Korean Society of Civil Engineers (2004), Railway Design Code, Korea Rail Network Authority, 76.

LH Guide Specifications (2010), 400 Civil Construction, 42415 Noise Barrier, Korea Land & Housing Corporation, 533.

The Korean Society for Noise and Vibration Engineering (1995), A study for the noise and vibration of the high-speed rails : their criteria and prevention measures, Korea High Speed Rails Construction Authority, 1-47.

Received : 02/21/2017

Revised : 04/24/2017

Accepted : 08/23/2017

요 지 : 소음 저감을 목적으로 설치되는 방음벽은 크게 흡음판과 방음판으로 나뉘며, 일조 및 경관을 저해하는 방음벽의 문제점을 해결하고자 투명 방음벽을 설치하는 것이 일반적 추세이다. 방음벽에 사용되는 투명 방음판의 소재는 여러 가지가 있으나 경우에 따라서는 황변현상과 재질변형 등으로 인해 투명도가 떨어지고 오염이 심해져 오히려 도시미관을 해하기도 한다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 투명 방음판의 재질을 접합강화유리로의 대체가 가능하다. 본 논문은 메트로 지하철 고가교 상에서의 열차 유발진동에 따른 접합강화유리 방음판의 진동 및 풍하중에 의한 안전성을 분석하고, 접합강화유리 시스템 및 재료에 대한 휨능력 성능시험, 압축강도 및 탄성계수 시험, 충격시험 등을 수행하여 접합강화유리의 방음판으로서의 적정성을 평가하는 데 목적이 있다.

핵심용어 : 방음벽, 투명판, 접합강화유리, 진동과 풍하중, 구조 안전성
