난연 아라미드 시트로 보강된 개착식 철도구조물 기둥의 내진성능에 대한 고찰

Experimental Study on Seismic Performance of Cut-and-Cover Railroad Structure Columns Reinforced with Flame-Retardant Aramid Sheets

고희규* · 김진호** · 이창길*** · 방명석****

Ko, Huigyu*, Kim, Jin Ho**, Lee, Changgil***, and Bang, Myung Seok****

Abstract

Recently, major earthquakes have occurred in the Gyeongju and Pohang areas, and concerns regarding the safety of urban railway facilities used by large crowds are increasing. Therefore, seismic retrofitting is progressing gradually for metropolitan railway facilities which do not meet seismic design criteria. In the case of cut-and-cover-type urban railway tunnels and stations, which are mostly constructed in basements, fire safety is required as well when seismically reinforcing the structure. In this study, a seismic reinforcement method that uses fire-retardant aramid sheets to improve the seismic performance of urban railway structures is proposed. To verify the feasibility of the proposed reinforcement method, a series of experiments has been conducted. From the experimental results, enhancement effects with respect to the seismic performance of the reinforced columns have been verified. More specifically, the energy dissipating capacity of the reinforced columns increased as compared to the unreinforced columns, that is, the ductility of the reinforced columns increased.

Key words : Seismic reinforcement, Cut-and-cover structure, Flame-retardant aramid sheet, Ductility, Energy dissipation

요 지

최근 국내에도 경주, 포항 지진과 같은 대규모 지진이 발생함에 따라 대규모 군중이 이용하는 도시철도 시설과 같은 다중이용시설의 안전에 대한 관심과 우려가 증가하고 있다. 이에 도시철도 내진설계기준이 반영되지 않고 건설된 수도권 도시철도 시설에 대한 내진보강이 점차적으로 진행되고 있다. 대부분 지하에 건설되는 개착식 구조형식의 도시철도 터널 및 정거장의 경우 내진보강 시 화재 안전성이 추가로 요구됨에 따라, 본 연구에서는 난연성이 보완된 아라미드 계열의 섬유보강공법을 제안하였다. 내진보강효과를 검증하기 위하여 실제 개착식 구조의 기둥을 실험 제작하고, 준정적실험을 통하여 균열 및 파괴형상, 강도특성, 에너지소산, 연성지수 등 내진특성에 대한 고찰을 통하여 내진보강의 효과를 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 내진보강, 개착식 구조물, 난연 아라미드 시트, 연성, 에너지 소산

*정회원, 한국교통대학교 교통대학원 박사과정(E-mail: ko6725@seoulmetro.co.kr)

Member, Ph.D Candidate, Korea National University of Transportation

**한국철도기술연구원 첨단철도기술기획실 수석연구원

Chief Researcher, Advanced Railroad Technology Planning Department, Korea Railroad Research Institute

***교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 첨단철도기술기획실 선임연구원(Tel: +82-31-460-5322, Fax: +82-31-460-5024, E-mail: tolck81@krrri.re.kr)

Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Advanced Railroad Technology Planning Department, Korea Railroad Research Institute

****한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 정교수

Professor, Korea National University of Transportation

1. 서 론

전 세계적으로 대규모의 지진이 빈번히 발생하고 있으며, 규모 5.0 이상의 지진은 매년 1000회 이상 발생하고 있다(USGS). 최근 지진의 안전지대로 알고 있던 국내에도 2016년 9월 규모 5.8의 경주 지진과 인근 포항에서 2017년 11월 규모 5.4의 지진으로 인적 물적 피해가 발생함으로써 지진에 대한 사회적 우려가 증가하고 있다. 이에 국내 주요시설에 적용하는 내진설계기준의 상위개념인 공통적용사항이 2017년 개정되었고 세부 설계기준의 개정작업이 진행되고 있으며, 아울러 기존시설물에 대한 내진성능평가가 수행되고 평가결과에 따라 내진보강이 활발히 이루어지고 있다(Hyoun, 2013).

도시철도 시설의 경우 일일 천만명 이상이 이용하는 대표적인 다중이용시설로 지진에 대한 대비가 미흡할 경우 대규모의 인적·물적 피해가 예상된다. 따라서, 변화하는 지질환경에 맞추어 적절한 수준의 내진설계기준의 개정과 동시에 내진설계기준이 적용되지 않은 시설에 대하여 시급히 내진보강이 필요하다. 국내 도시철도 시설의 경우 2005년에 도시철도 내진설계기준이 제정되었고, 수도권 1~4호선은 1974~1994년, 5~8호선은 1995~2000년 사이에 건설되어 내진설계기준이 적용되지 않아 지진에 대한 안전의 우려가 높았으나(Seoul Metro, 2007; Kim et al., 2017), 다행히 국가차원의 내진보강계획을 수립하여 내진보강이 점차적으로 수행되고 있다.

도시철도의 주요 구조물은 터널, 지하의 정거장, 교량 등으로 분류되며, 상대적으로 지진에 취약한 개착식 구조물이 대부분인 도시철도 구조물 특성을 고려한 내진보강 방안이 요구된다. 일반 건축, 토목시설과 달리 도시철도 시설물에서의 내진보강 시 요구되는 주요 사항은 열차운행 차단시간 내 급속보강이 필요하다는 점이다. 또한, 지하에 건설되는 개착식 구조형식의 터널 및 정거장의 경우 도시철도 건설규칙(MOLIT, 2014) 또는 철도시설의 기술기준(MOLIT, 2015b)에 의거, 화재사고에 대비하여 보강재는 불연성 또는 난연성을 갖추어야 한다. 도시철도 시설물의 내진보강을 위한 다양한 내진보강공법 중 섬유보강공법은 경제성 및 효율성 측면에서 유리한 공법으로 알려져 있으나 화재에 대하여 취약함에 따라 난연성이 보완된 섬유보강재에 대한 관심이 높아지고 있다. 하지만 섬유보강재를 내진 보강재로 활용한 기존의 연구에서는 난연 성능을 고려하지 않았으며(Lee and Koo, 1999; Lee et al., 2012; Kim et al., 2017), 난연성이 보완된 섬유보강재를 적용한 구조물의 내진 보강 성능을 확인할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존 내진성능평가 결과에 따라 취약한 부재로 우선 보강이 요구되는 도시철도 개착식 구조형식의 터널 및 정거장 기둥부재(Kim et al., 2017)를 대상으로 난연성이 보완된 아라미드 계열의 섬유보강공법을 제안하고, 내진보강효과를 검증하기 위하여 수행된 실험 성능시험 결과를 분석하였다.

2. 난연 아라미드 시트 보강재의 내진성능실험

2.1 난연 아라미드 FRP 시트

최근 다양한 내진보강공법 중 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 시트 등 복합재 기반의 보강공법 개발 및 적용이 증가하고 있다. FRP 시트는 고강도 특성을 가지고 있으며, 시트 섬유길이 방향으로의 탄성이 매우 높아 에너지 소산 능력 및 연성 증가 효과 측면에서 내진보강재로써 탁월한 성능을 나타내며, 이 중 아라미드 FRP는 강도, 변형 및 에너지 손상능력 등이 우수하여 내진보강재로써 적합한 것으로 알려져 있다(Lee and Koo, 1999).

본 연구에서 제안하는 난연성이 보완된 난연 아라미드 시트는 심선을 굴곡 없이 단방향으로 제작한 아라미드 시트를 난연 접착제에 함침한 후 무기난연재를 도포하여 제작하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 아라미드 시트, 난연접착제, 난연마감재로 구성되며 콘크리트표면에 부착 시 프라이머를 도포한다. 난연 아라미드 시트 제작에 사용된 아라미드 FRP 및 난연 접착제의 재료 물성치는 각각 Tables 1 및 2와 같다. 여기서, 아라미드 FRP의 물성치는 섬유 길이 방향에 대한 값이다.

(a) Aramid sheet

(b) Fabrication of fire-retardant aramid sheet

Fig. 1. Preparation of Fire-retardant Aramid Sheet

Table 1. Material Properties of Aramid Sheet

Type	Weight (g/m ²)	Thickness (mm)	Tensile strength (N/mm ²)	Elastic modulus (N/mm ²)
DA280	280	0.194	2,587	148,880
DA415	415	0.288	2,925	183,334
DA623	623	0.433	2,956	178,298
DA830	830	0.576	2,721	190,332

Table 2. Material Properties of Fire-retardant Adhesive (GBOND400)

	Tensile strength (N/mm ²)	Compressive strength (N/mm ²)	Tensile shear adhesive strength (N/mm ²)
Test method	ASTM D638:2014, (1)	ASTM D695:2015, (1)	ASTM D1002:2010, (1)
Value	24.3	75	6

난연 아라미드 시트의 난연 성능은 “건축물 마감재료의 난연성능 및 화재확산 방지구조 기준”(MOLIT, 2015a)에서 제시한 시험방법에 따라 성능시험이 수행되었다. 난연시험에서 시험개시 후 5분 이내 총발열량 및 최대방출열량을 측정하였다. 난연 아라미드 시트의 경우 총발열량이 8이하, 최대방출열량이 10이하로 기준값을 만족하는 것으로 나타났다. 균열, 구멍, 용융 등의 형상 변화에 이상이 없음이 검증되었다.

2.2 실험 계획

본 연구에서 제안하는 난연 아라미드 시트의 내진보강 효과를 검토하기 위한 대상 구조물은 서울 소재 도시철도 구조물을 고려하여 선정하였으며, 실제 구조물의 크기 수준으로 실험체를 제작하였다. Fig. 2와 같이 실험체 기둥의 크기는 600 × 600 mm, 높이는 3,000 mm이며, 주철근은 D19-20, 띠철근은 D13@300을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도는 24MPa, 철근의 인장강도는 400 MPa로 설계하였으며, 지진하중에 대한 수평저항 성능을 평가하기 위하여 복곡률(double curvature) 거동을 구현할 수 있도록 Fig. 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 축력 및 횡하중을 가력하기 위해 충분한 강성을 갖는 반력프레임을 이용하였으며, 단면 성능의 10%에 해당하는 중심축하중이 작용하도록 Fig. 3과 같이 실험체 측면에 2,000 kN 오일잭을 배치하였다. 횡하중은 인장하중 1,300 kN, 압축하중 2,000 kN 용량의 가력기(actuator)를 이용하여 가하였다. 수평하중이력은 Fig. 4와 같이 변위 제어 형태로 하중을 재하 하였으며, 초기 변위 5 mm에서부터 5 mm씩 증가시키며, 각 변위 단계에서 3회씩 가력하였다. 주요 실험 변수는 기둥의 보강 여부 및 보강량으로 Table 3과 같이 계획하였다. 기준 실험체인 비보강 기둥은 NA1 실험체로, 난연 아라미드 시트로 기둥 상·하단부에서 폭 300 mm, 600 mm로 구속한 기둥을 각각 RA1, RA2 실험체로 설정하였다. 이 때 콘크리트 기둥의 횡하중 재하에 의한 폭렬을 방지하고 단부 구속력을 증가시켜 에너지 소산 능력 및 연성을 향상시키기 위해 난연 아라미드 시트의 부착 방향은 섬유 길이 방향이 띠철근과 평행한 방향이 되도록 설정하였다.

Fig. 2. Details on Test Columns

Fig. 3. Configuration of Test Equipment

Fig. 4. Loading History

Table 3. Description of Specimens

NA1	RA1	RA2
Unreinforcement	300mm-wide aramid sheets at the both ends of a column	600mm-wide aramid sheets at the both ends of a column

3. 난연 아라미드 내진보강 실험결과 분석

3.1 하중-변위 이력곡선 및 파괴형상

3.1.1 무보강 실험체 NA1

무보강 실험체 NA1의 하중-변위이력곡선과 최종파괴 단계를 Figs. 5 and 6에 나타내었다. 횡변위 5 mm (-259.05 kN)의 가력단계에서 기둥 하부 200 mm 높이에 초기균열이 발생하였으며, 반복 하중을 증가시킴에 따라 기둥의 상하 양단부에서 전단 균열이 추가 발생하였다. 정(+)가력 하중 614.59 kN, 횡변위 34.85 mm 단계에서 기둥 하단부의 콘크리트 압괴가 발생하였고, 정(+)가력 하중 629.87 kN, 횡변위 43.75 mm 이후 전단 균열 폭의 증가로 가력 하중이 감소하였다. 최대 횡변위는 정(+)방향 50.17 mm, 부(-)방향 -49.79 mm이며, 최대 횡력은 정(+)하중 629.87 kN과 부(-)하중 -625.19 kN으로 나타났다. 무보강 실험체에서는 기둥 하단부의 전단 및 부착파괴로 인해 최대하중 이후 충분한 연성거동이 나타나지 않았다. 이러한 거동 패턴은 전형적인 취성파괴 형태이며, 강진으로 인한 반복가력에 대하여 매우 취약함을 알 수 있었다.

Fig. 5. Load-displacement Curves for NA1

Fig. 6. Final Failure of NA1

3.1.2 RA1 실험체

난연 아라미드 시트로 기둥의 상·하단부 300 mm를 보강한 RA1 실험체에서는 정(+)가력 하중 369.65 kN, 횡변위 10 mm 단계에서 기둥 하부의 난연 아라미드 시트 보강면 위 400 mm 높이에서 초기균열이 발생하였으며, 횡변위 15 mm 단계에서 난연 아라미드 시트 표면에 균열이 발생하였다. 가력하중의 증가가 진행되면서 실험체의 상하 양단부에서 균열의 증가와 추가 전단균열이 발생하였다. 횡변위 65.00 mm 단계에서 난연 아라미드 시트 표면에 도포된 난연재가 시트에서 박리되었으며, 정(+)가력 세 번째 사이클에서 기둥 하부 시트 겹침 부위 부착이 떨어지면서 하중이 급격히 감소하였다. Figs. 7 and 8은 RA1 실험체의 하중-변위 곡선과 실험 최종파괴단계를 나타내었다. 최대 횡변위는 정(+)방향 65.03 mm, 부(-)방향 -65.399 mm이며 최대횡력은 정(+)하중 639.11 kN과 부(-)하중 -665.73 kN로 나타났다.

Fig. 7. Load-displacement Curves for RA1

Fig. 8. Final Failure of RA1

3.1.3 RA2 실험체

난연 아라미드 시트로 기둥의 상·하단부 600 mm를 보강한 RA2 실험체에서는 부(-)가력 325.70 kN, 횡변위 10 mm 단계에서 기둥 하부 난연 아라미드 시트 보강면 상단 180 mm 높이에서 초기균열이 발생하였다. 가력하중의 증가가 진행되면서 실험체의 상하 양단부에서 균열의 증가와 추가 전단균열이 발생하였다. 횡변위 65 mm 단계에서 기둥 하부 난연 아라미드 시트에서 압괴가 시작되었고, 횡변위 85 mm 단계에서 시트 표면의 난연재가 박리되기 시작했다. 횡변위 110.00 mm 단계 부(-)가력 3번째 사이클에서 실험체 기둥 하부 시트 겹침 부위의 부착이 떨어지고 시트의 파단이 발생하면서 하중이 감소하였고, 횡변위 115.00 mm 단계 정(+)가력 1번째 사이클에서 기둥의 활렬 파괴로 하중이 급격히 감소하였다. Figs. 9 and 10은 각각 RA2 실험체의 하중-변위곡선, 실험 최종파괴단계를 나타내었다. 최대 횡변위는 정(+)방향 115.41 mm, 부(-)방향 -115.17 mm이며 최대하중력은 정(+)하중 648.49 kN과 부(-)하중 -661.55 kN로 나타났다.

Fig. 9. Load-displacement Curves for RA2

Fig. 10. Final Failure of RA2

RA2 실험체의 실험결과로부터 RA1 실험체 대비 최대하중은 조금 증가했으나 변형능력은 크게 증가했다(Fig. 11(a) 참조). 특히 NA1 실험체와 비교 시 변형능력이 대폭 증가하여 내진보강재로서 효과가 크게 향상되었음을 알 수 있다. 시트에서 난연재가 박리되고 겹침부위의 탈락 등 손상 메커니즘은 RA1 실험체와 유사하였으나 RC기둥의 전단 및 부차

파괴를 상당히 지연시켰음을 알 수 있다.

(a) Fire-retardant aramid sheets

(b) Normal aramid sheets

Fig. 11. Envelopes of Load-displacement Curves

3.1.4 일반 아라미드 보강 시트 내진보강 실험의 하중-변위 비교 및 분석

본 연구에서 수행한 난연 아라미드 시트 내진보강 실험과 동일한 조건으로 다양한 일반 아라미드시트 형상으로 보강된 기둥에 대하여 선행연구가 수행된 바 있다(Lee et al., 2012). 본 연구에서는 난연 아라미드 시트와 동일한 보강량 (300 mm, 600 mm)의 일반 아라미드 시트로 보강한 기둥의 내진보강실험으로부터 얻어진 하중-변위 관계를 비교 분석하고 난연 아라미드 시트 보강 시의 내진성능과 비교하였다.

Fig. 11(b)는 일반 아라미드 시트로 보강된 기둥의 실험결과로 얻어진 하중-변위 포락곡선을 나타내고 있다. Fig. 11에 보여주고 있는 두 개 실험결과와 하중-변위 포락곡선을 비교 시 매우 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 다만, 일반 아라미드 시트 보강기둥의 실험결과에서 아라미드 시트의 폭렬로 인하여 기둥 파괴 이전에 실험이 중단되어 기둥의 파괴형상까지 비교를 위한 관찰은 어려웠으나 Table 4에서와 같이 일반 아라미드 시트 보강 기둥 및 난연 아라미드 시트 보강 기둥의 하중-변위 포락곡선 간의 상관계수가 0.9 이상으로 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서, 난연성이 보완된 아라미드 시트의 보강이 일반 아라미드 시트의 내진 보강 성능과 동등 이상임을 예측할 수 있었다.

Table 4. Correlation Coefficient of Load-displacement Envelopes

		Normal aramid	
		RA1	RA2
Fire-retardant aramid	RA1	0.978	0.979
	RA2	0.944	0.948

3.2 강도 특성

3.2.1 초기 강성 및 2차 강성

각 실험체에 대한 초기 강성 및 2차 강성의 산출 결과를 Table 5 및 Figs. 12 and 13에 나타내었다. 초기 강성은 하중변위 곡선 상에서 하중이 원점에서 직선으로 변화하는 구간의 기울기로 정의하였으며, 2차 강성은 항복 후 변화된 기울기의 평균값으로 정의하였다. Table 5로부터 RA1 실험체의 초기 강성 및 2차 강성 모두 NA1 실험체에 비해 소폭 증가하였음을 알 수 있다. RA2 실험체의 경우, Fig. 12에서 나타낸 바와 같이 NA1 실험체 및 RA1 실험체 대비 초기 강성은 소폭 증가하였고 2차 강성은 확연히 감소함으로써 초기 강성과 2차 강성 간의 비율을 나타내는 2차 강성비는 대폭 감소하였음을 알 수 있다. 2차 강성비는 연성 거동 정도를 나타내며, 2차 강성비가 작을수록 연성능력이 크다. 따라서, RA2 실험체는 NA1, RA1 실험체에 비해 연성능력이 매우 향상되었음을 알 수 있다. 또한, Fig. 13에서와 같이 RA1, NA1 실험체는 하중 재하 실험 시 RA2 실험체에 비해 낮은 반복하중단계에서 파괴됨으로써 RA2 실험체의 경우 변형능력이 대폭 향상되었음을 알 수 있다. 즉, RA2 실험체에서 연성능력 및 내진보강 효과가 현저히 향상되었음을 확인하였다.

Table 5. Initial and Secondary Stiffness

Test case		NA1	RA1	RA2
Load (kN)	Max. +	629.87	639.11	648.49
	Max. -	-625.19	-665.73	-661.55
Stiffness (kN/mm)	Initial	36.5	39.2	39.3
	Secondary	8.3	8.7	6.1
	Ratio	0.23	0.22	0.15

Fig. 12. Comparison of Stiffness Ratio **Fig. 13.** Comparison of Stiffness Reduction

3.2.2 항복 및 최대 하중

실험체의 항복하중 및 최대하중을 실험변수별로 분석하여 Fig. 14에 나타내었다. 실험변수에 따른 항복강도 비교 시 RA1 실험체의 항복강도는 NA1 실험체에 비해 10 kN 증가하였으며, RA2 실험체의 항복강도는 NA1 실험체에 비해 12 kN 증가하여 난연 아라미드 시트 보강으로 인한 강도보강 효과가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 14. Comparison of Maximum Load and Yield Strength

3.3 에너지 소산

구조물에 지진하중 재하 시, 구조물은 외력에 의한 손상 또는 파괴에너지에 대하여 부재가 파괴될 때까지 에너지를 흡수 또는 소산시킨다. 이러한 에너지 소산 지표는 부재의 내진성능을 평가함에 있어 중요한 요소라 할 수 있다. 구조물 또는 부재의 총 에너지량에 있어서 변위 이력으로부터 실제로 흡수 및 소산되는 에너지를 계산하고 총 에너지량과 비교하여 구조물의 지진에 대한 안전성 여부를 검토할 수 있다. 에너지 소산능력을 평가하기 위하여 누적 소산에너지를 분석하며, 한 사이클 동안 소산되는 에너지는 하중-변위 곡선의 면적으로 정의한다.

난연 아라미드 시트 보강 실험체에 대한 누적 에너지 소산능력의 결과는 Table 6과 같다. 무보강 NA1 실험체의 하중재하 9단계까지의 누적 에너지 소산 값을 기준으로 하여 RA1 실험체와 RA2 실험체의 최종단계까지 누적 에너지 소산능력을 평가하였다. NA1 실험체의 경우 실험체 파괴까지 하중재하가 9단계, RA1 실험체는 12단계, RA2 실험체

는 최대 22단계까지 진행되었으며, 따라서, 내진보강 정도에 따라 실험체별로 에너지 소산량 차이를 확인할 수 있었다.

Table 6. Cumulative Energy Dissipation

Test case		NA1	RA1	RA2
Displacement (mm)	45 (9th step)	76.54 (100%)	82.86 (108%)	78.58 (103%)
	50 (10 step)	-	98.56 (129%)	92.78 (121%)
	60 (12 step)	-	152.91 (200%)	148.58 (194%)
	100 (20 step)	-	-	409.12 (535%)

에너지 누적 소산 평가결과에 따르면 무보강 RA1 실험체와 비교하여 난연 아라미드 시트 보강 RA1 실험체는 최대 2.0배, RA2 실험체는 최대 약 5.4배 이상 증가한 것으로 나타났다. 따라서, 난연 아라미드 시트를 내진보강재로 활용 시 상당한 내진보강효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

3.4 연성 지수

지진과 같은 수평하중을 받는 구조물의 경우 항복 강도 및 항복 변위를 초과하여 비선형 영역의 최대 하중 및 변위까지 최대한 하중을 지지할 수 있는 구조 성능은 내진성능 평가에서 매우 중요한 요소이다. 이와 같은 성능을 평가할 수 있는 대표적 지표인 연성 지수(μ)는 구조물의 하중-변위 결과에서 항복 변위와 극한 변위의 비로 정의된다. 여기서 극한 변위라 함은 최대 하중의 85%에 해당하는 최대 변위 값으로 한다. 따라서, 연성 지수는 구조물이 비선형 영역에서 붕괴까지 하중을 지지할 수 있는 능력을 나타낸다.

난연 아라미드 시트 보강 실험체에 대한 연성 지수 및 연성 증가율은 Table 7과 같다. 무보강 실험체 NA1을 기준으로 난연 아라미드 실험체 RA1의 경우 1.4배, RA2의 경우 2.5배 증가한 것으로 나타나, 난연 아라미드 시트의 내진 보강 효과는 명확하다. 또한, 실험체 RA2가 실험체 RA1에 비해 연성 보강 효과가 약 2배가 됨을 알 수 있으며, 향후 내진 보강 설계 시 고려되어야 할 사항으로 사료된다.

Table 7. Ductility Index

Test case	NA1	RA1	RA2
Ductility index	5.32	7.53	13.3
Increasing rate	1	1.4	2.5

4. 결 론

본 연구에서는 도시철도 구조물의 내진보강 부재에 요구

되는 화재 안전성에 대하여, 난연성을 보완한 난연 아라미드 시트를 제안하였다. 이에 난연 아라미드 시트의 재료실험 및 내진보강 성능실험을 수행하고 실험결과와 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 무보강 NA1 실험체는 기둥 하단부의 전단 및 부차파괴로 전형적인 취성파괴 패턴을 나타냈으며, 난연 아라미드 시트가 300 mm 폭으로 보강된 RA1 기둥은 NA1 실험체와 비교하여 강도와 변형능력이 향상되고 연성 거동을 나타내었으며, 난연 아라미드 시트가 600 mm 폭으로 보강된 RA2 실험체는 NA1, RA1 실험체와 비교하여 변형능력이 대폭 증가하고 확인한 연성거동이 관찰되었다. 아라미드 시트에 함침된 난연재 바리, 겹침 부위 탈락 등의 손상형상은 RA1 및 RA2 실험체에서 유사하였으나 RA2 실험체에서 기둥의 전단 및 부차파괴가 상당히 지연되었음을 알 수 있었다.
- (2) RA1 실험체는 NA1 실험체와 비교하여 초기강성, 2차 강성이 모두 증가하였고 RA2 실험체는 NA1 실험체와 RA1 실험체 대비 초기 강성의 차이는 크지 않으나 2차 강성은 확연히 감소하여 2차 강성비가 가장 낮게 나타났다. 2차 강성비의 저하는 연성적 거동을 의미하므로 RA2 실험체는 내진보강에 효과가 있는 것으로 판단되며, RA1 실험체보다 연성능력과 내진보강 효과가 현저히 향상되었음을 의미한다고 볼 수 있다.
- (3) 일반 아라미드 시트 보강기둥에 대한 선행연구 실험결과와 비교를 통하여, 하중-변위 관계는 유사한 경향을 보였으며 상관계수가 0.9 이상으로 매우 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 난연성이 보완된 아라미드 시트 보강이 일반 아라미드 시트의 내진성능과 동등이상임을 예측할 수 있었다.
- (4) 누적 에너지 소산 평가결과에 따르면 난연 아라미드 시트 보강 RA1 실험체의 누적 에너지 소산량은 NA1 실험체의 최대 2.0배, RA2 실험체는 NA1 실험체의 최대 약 5.4배 이상 증가한 것으로 나타났다. 따라서, 난연 아라미드 시트를 내진보강재로 활용한 RA1, RA2 실험체의 내진보강효과를 확인하였다. 또한, 연성지수 및 연성 증가율에 대하여 무보강 실험체 NA1을 기준으로 난연 아라미드 실험체 RA1의 경우 1.4배, 난연 아라미드 실험체 RA2의 경우 2.5배 증가한 것으로 나타났다. 실험체 RA2가 실험체 RA1보다 연성보강 효과가 더욱 증진됨을 알 수 있어 향후 내진보강 설계 시 고려되어야 할 사항으로 사료된다.
- (5) 실험 결과에 따르면, RA1, RA2 실험체의 보강 높이를 300 mm, 600 mm로 선형적으로 증가시킨 데에 반해 내진 보강 효과 지표인 에너지 소산 및 연성은 비선형적으로 증가하였다. 이에 보강 높이와 내진 보강 효과 간의 상관관계를 분석할 필요가 있으나, 본 연구에서는

난연 아라미드 시트의 내진 보강 효과를 실험적으로 검증하고자 하였으며, 실험 케이스도 두 가지로 매우 적어 위 상관관계를 분석하기에는 추가적인 데이터의 확보가 필요하다. 따라서 추후 연구를 통하여 보강 높이에 따른 내진 보강 효과에 대한 분석을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(PK1805A2B)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Colomb, F., Tobbi, H., Ferrier, E., and Hamelin, P. (2008). Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials. *Compos. Struct.*, Vol. 82, No. 4, pp. 475-487.
- Hollaway, L.C. (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr. Build. Mater.*, Vol. 24, No. 12, pp. 2419-2445.
- Hyoun, C.K. (2013). Reinforcement design against earthquake in Korea. *Proceedings of 2013 Fall Conference*, Earthquake Engineering Society of Korea, pp. 137-148.
- Kim, J.-H., Yi, N.-H., and Lee, H.-S. (2017). Studies on behavior characteristics of retrofitted cut-and-cover underground station using centrifuge test results. *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, Vol. 21, No. 2, pp. 24-33.
- Lee, H.-H., Kim, J.-H., and Rho, K.-G. (2012). Strengthening effects of RC column using fiber reinforced polymer. *J. Korea Concr. Inst.*, Vol. 24, No. 4, pp. 473-480.
- Lee, H.-H., and Koo, E.-S. (1999). A experimental study on the capacity evaluation of the shear-strengthened RC column with aramid fiber sheet. *Journal of the Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 15, No. 6, pp. 29-36.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport). (2014). *Urban railroad construction rule*.
- MOLIT. (2015a). *Standards for fire retardant performance of building finishing materials and structure to prevent fire diffusion*.
- MOLIT. (2015b). *Technical standards for railroad facilities*.
- Seoul Metro. (2007). *Preliminary evaluation of Seoul metro line No. 1-4 seismic performance*. pp. 7-187.
- USGS. *Earthquake statistics*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/browse/stats.php>

Received	October 4, 2018
Revised	October 8, 2018
Accepted	October 11, 2018