

진동절연재로 보강된 기둥부재의 진동저감효과 및 구조적 거동분석

김진호¹, 이나현^{2*}, 허진호³, 김희규⁴

Vibration Reduction Effect and Structural Behavior Analysis for Column Member Reinforced with Vibration Non-transmissible Material

Jin-Ho Kim¹, Na-Hyun Yi^{2*}, Jin-Ho Hur³, Hee-Kyu Kim⁴

Abstract: For elevated railway station on which track is connected with superstructure of station, structural vibration level and structure-borne-noise level has exceeded the reference level due to structural characteristics which transmits vibration directly. Therefore, existing elevated railway station is in need of economical and effective vibration reduction method which enable train service without interruption. In this study, structural vibration non-transmissible system which is applied to vibroisolating material for column member is developed to reduce vibration. That system is cut covering material of the column section using water-jet method and is installed with vibroisolating material on cut section. To verify vibration reduction effect and structural performance for structural vibration non-transmissible system, impact hammer test and cyclic lateral load test are performed for 1/4 scale test specimens. It is observed that natural period which means vibration response characteristics is shifted, and damping ratio is increased about 15~30% which means that system is effective to reduce structural vibration through vibration test. Also load-displacement relation and stiffness change rate of the columns are examined, and it is shown that ductility and energy dissipation capacity is increased. From test results, it is found that vibration non-transmissible system which is applied to column member enable to maintains structural function.

Keywords: Elevated railway station, Structural vibration, Vibration non-transmissible system, Impact hammer test, Structural performance test

1. 서 론

최근 지역 간 또는 도시 내에서 대중교통 수단의 중심이 되고 있는 철도교통은 고속화 및 중량화 추세에 있으나, 이로 인해 발생하는 소음 및 진동은 지속적인 민원이 되고 있다. 특히 궤도가 역사의 상부에 놓여 열차진동이 역사로 직접 전달되는 선하역사의 경우 구조물의 진동과 구조물 기인 소음 (structural-borne noise) 레벨이 다른 역사 형식에 비해 상대적으로 높으며, 선하역사에서 측정된 진동 및 소음레벨은 기준치보다 높은 것으로 나타났다(Kim et al., 2015; Lee, 2014). 이는 선하역사의 주요 구조재가 열차운행으로 발생한 진동의 전달경로가 될 뿐 아니라 저주파 대역의 진동을 발생하고 구조물 기인 소음으로 이어지기 때문이다. 저주파 대역의 구조물 진동과 구조물 기인 소음은 청각적 불편뿐 아니라 신체적

감이나 척추에 자극을 주게 되며, 그로 인하여 선하역사를 이용하는 승객과 종사자들에게 쾌적한 실내 환경을 제공하는 데에는 한계가 있는 실정이다(Kim et al., 2015; Choi et al., 2014; Choi et al., 2015a).

선하역사에서 발생하는 진동과 소음을 저감하기 위하여 해외에서는 진동원, 전달경로, 응답구조물 분야에 다양한 기술을 적용하고 있다. 국내의 경우 진동원에 해당하는 궤도에 진동저감을 위한 플로팅궤도 공법이 국내기술로 처음 시공되었으나(Park et al., 2013), 설계와 시공의 난이도가 높고 고비용이며 또한 신설역사에만 적용이 가능하므로, 이미 건설된 선하역사의 경우 진동저감을 위한 방안은 국내외적으로 미흡한 상황이다. 이에 이미 건설된 선하역사의 진동특성 파악을 통하여 경제적이며 효율적인 저감방안이 요구된다.

지금까지 선하역사의 진동저감과 관련된 연구는 주로 플로팅 궤도의 방진재료와 시스템 성능에 집중되어 있다. Kim et al.(2012)는 매립형 궤도에 대한 소음 및 진동 해석을 통해 저감성능을 검토하였으며, Kim et al.(2015)은 기존 선하역사의 바닥재에 플로팅 슬래브를 적용 시 구조적 진동과 진동에 의한 방사소음의 저감에 대하여 실험과 해석을 통해 고찰하였다. Park et al.(2013)은 플로팅 궤도의 고무방진 마운트에 대

¹정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 책임연구원

²정회원, 한국철도기술연구원 광역도시교통연구본부 선임연구원, 교신저자

³정회원, ㈜모어엔지니어링건축사사무소 구조기술연구소 책임연구원

⁴정회원, ㈜모어엔지니어링건축사사무소 구조기술연구소 소장

*Corresponding author: nahyunyi@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute

•본 논문에 대한 토의를 2016년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

한 최적설계를 통해 비선형 거동 해석과 현장부설을 통하여 저감성능을 평가하였다.

플로팅케도 이외에 열차운행에 의한 진동을 저감하기 위한 연구가 일부 진행되었으며, Choi et al.(2015a, 2015b)은 선하역사의 진동 전달 경로와 위치별 측정값을 활용하여 접속교량에서 선하역사로 전달되는 진동 특성을 해석과 실험을 통해 분석하였고 선하역사와 접속된 교량의 연결 교량받침 종류에 따른 특성을 검토하였다. Yang et al.(2013)은 승강장 하부의 슬래브에서 최대로 수직 진동이 발생하고 열차 속도의 변화 등에 따라 진동의 증폭이 상이해지는 현상을 측정값을 통하여 실증하였다. Ryu et al.(2011)는 철도 및 지하철 인접 지역의 방진 대책으로 구조물에 페타이어를 이용한 진동 방진재를 구조물 바닥에 시공하여 저감성능을 검토하였다.

본 연구에서는 기존 선하역사에서 열차 운행의 중단 없이 진동저감이 가능한 대책을 강구하기 위하여, 선하역사의 진동전달 경로상에 있는 기둥의 단면 피복부를 파쇄하고 진동 절연재 기능을 위한 방진재를 보강한 구조진동 절연시스템을 제안하였다. 구조진동 절연시스템의 진동저감 효과와 보강단면에 따른 구조적 성능을 검토하기 위하여 실제 선하역사 기둥의 1/4 축소 모형을 제작하여 실험을 수행하고 결과를 분석하였다.

2. 구조진동절연시스템

2.1 선하역사내의 진동 전달흐름

선하역사의 경우 Fig. 1에서 보는 것과 같이 열차운행으로 발생하는 진동이 궤도 및 교량을 통하여 주요 구조부재인 기둥, 슬래브 벽체 등으로 전달된다. 진동 전달경로 상에 있는 구조재에는 저주파 대역의 진동이 발생하며 전달거리가 멀어질수록 구조물 뒤편에 의하여 진동량은 감소하게 된다. 또한

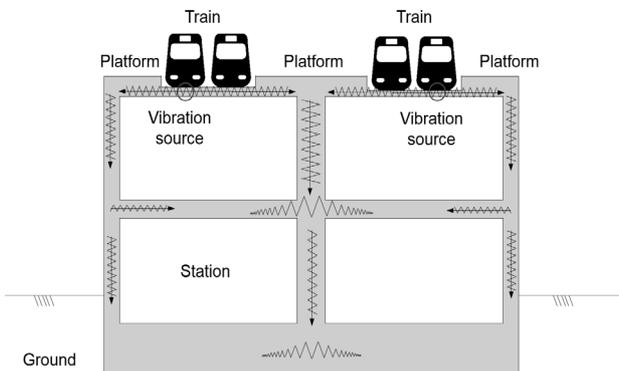


Fig. 1 Vibration flow on elevated railway station

구조물의 진동으로 인하여 방사되는 구조물 기인소음은 청각적 불편보다 인체가 느끼는 불편함을 가중시킨다(Choi et al., 2015; Lee, 2014). 그러므로 선하역사에서 발생하는 진동 및 소음을 저감하기 위해서는 차량-궤도, 구조물 간의 상호작용과 진동 전달메커니즘을 파악이 우선시 된다.

일반적으로 철도의 진동 및 소음을 저감하기 위하여 발생원(source), 전달경로(path), 응답원(receiver)으로 분류하고 각각의 특성을 고려한 방안을 고려하고 있다. 선하역사에서 발생하는 진동은 구조물 유형에 따라 상이한 감쇠비에 영향을 받으며, 진동 전달메커니즘은 역사 구조 형식(TBS(Track on Building System) 및 TPS(Track on Pier System)), 보-기둥 접합부의 강성 및 강접을, 구조재의 강성 및 배치상태 등에 따라 다른 특성을 보인다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선하역사의 가장 대표적 형식인 TBS형식의 철근콘크리트(RC) 라멘구조를 대상으로 검토하고자 한다.

2.2 진동절연시스템 개요

본 연구에서 개발한 구조진동 절연시스템은 철근콘크리트(RC)구조의 진동전달 경로 상에 있는 기둥의 일정 부위에 대하여 단면의 피복부를 제거하고, 진동 절연기능을 위하여 전달되는 진동의 고유 주기와 다른 고유 주기를 가지고 감쇠비가 높은 방진재를 시공하여 진동을 감소시키고자 하였다. 기존 진동저감 기술은 방진재 설치를 위하여 구조물 해체 또는 구조시스템 변경이 필요하며, 역사이용의 제한 및 중장비 이용으로 인한 시공 현장부지가 필요 하는 등의 이유로 기존 역사에 적용하기에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 기존 역사에 간편한 시공을 위해 기둥의 주철근과 심부는 유지하도록 하고, 기둥의 제거된 피복부 콘크리트가 부담하는 압축력은 에폭시 소재의 방진재를 시공하여 기존 역사구조물의 안전성을 확보할 수 있도록 하였다.

구조진동절연시스템은 기둥의 일정 부위에 대하여 단면의 피복부만 방진재로 치환하기 때문에 구조시스템 변경이 불필요하다. 또한, 구조물의 부분 현장시공으로 현장규모 및 역사 운영제한을 최소화할 수 있으며, 워터젯(water jet)공법을 이용하여 충격 없이 콘크리트를 파쇄 할 수 있으므로 구조물에 가해지는 충격을 최소화할 수 있다. 워터젯 공법은 물을 고압

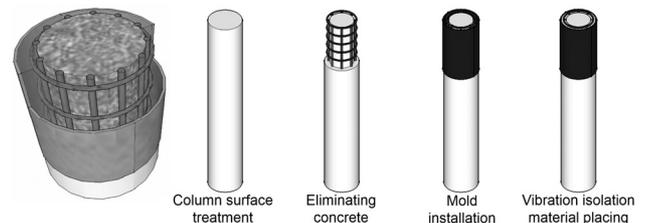


Fig. 2 Overview construction procedure of vibration isolation system

상태로 만들어 구조물에 분사시킴으로써 철근의 손상 없이 콘크리트만을 선택적으로 제거할 수 있는 공법으로 구조물의 해체 없이 급속 및 무진동으로 피복콘크리트를 파쇄할 수 있는 장점으로 인하여 구조진동 절연시스템에 사용하였다. 또한 구조진동 절연시스템에 사용된 방진재는 고내구성과 반영구적으로 사용할 수 있는 에폭시 소재를 적용하였다. Fig. 2는 구조진동절연시스템의 시공절차를 나타낸다.

3. 구조진동절연시스템 성능 검토 실험

3.1 시편제작

본 연구에서 제안하는 구조진동절연시스템의 진동저감 성능 및 구조적 성능을 검토하기 위해 라멘구조 형식인 K역사의 진동 전달경로상의 기둥에 대한 1/4 축소 모형을 제작하였다. 시험체는 $\phi 350 \times 2,450$ mm의 단면을 갖는 원형기둥으로 상세도는 Fig. 3과 같다. 시험체에 사용된 주철근은 HD16, 띠철근은 HD10을 100 mm간격으로 배근하였다. 콘크리트의 공칭압축강도는 27 MPa, 철근은 SD400을 사용하였다. 사용된 콘크리트의 탄성계수와 포아송비는 2.68×10^4 MPa, 0.176이며 철근의 탄성계수와 포아송비는 2.05×10^5 MPa, 0.30이다.

본 연구에서는 기둥단면의 피복부 끝단에서부터 파쇄하는 깊이를 변수로 선정하고 주철근의 50% 및 100%노출을 고려하여 30 mm, 50 mm 깊이의 피복부 파쇄를 수행하였다. Photo 1(d)에서와 같이 콘크리트 기둥 축방향으로 중앙부 700 mm를 워터젯을 이용하여 제거하고 에폭시 소재의 방진재를 기둥 파쇄 부분에 보강하여 시편을 제작하였다. 실험변수에 따른 콘크리트와 주철근이 부담하는 기둥의 최대 축하중(P_0) 및

공칭 축하중(P_n), 최대 설계 축하중(ϕP_n)은 Table 1과 같다.

시편제작 후 일정 콘크리트 압축강도가 발현되는 28일째에 진동절연시스템 시공방법에 따라 워터젯을 이용하여 피복 콘크리트를 제거하였다. Photo 1은 진동절연시스템 시공방법에 따른 시험체 제작과정이며 시험에 사용된 에폭시 소재계열 진동절연재의 재료특성은 Table 2와 같다. 본 연구에서는 압축부재인 기둥에서 충분한 절연효과를 나타낼 수 있도록 중등도 에폭시를 사용하였으며, 주재와 경화제는 3:1의 비율로 혼합하였다.

3.2 충격가진 실험

진동절연재로 보강된 기둥의 진동 감쇠정도를 측정하기 위해 22.6 kg 충격해머를 이용하여 Fig. 4와 같이 충격과 시험을 수행하였다. 기둥 실험체 상단 중앙부를 10초 간격으로 10회씩 타격하였으며, PCB-352A56 가속도계를 이용하여 기둥 상·하부와 중앙부의 진동 가속도를 측정하였다.

Table 1 Variation of specimen

Specimens	$t_{cd}^{1)}$ [mm]	$A_e^{2)}$ [%]	$P_0^{3)}$ [kN]	$P_n^{4)}$ [kN]	$\phi P_n^{5)}$ [kN]
RC(control)	-	-	2814.5	2251.6	1463.6
VI-30-1	30	31.3	1819.1	1455.3	946.0
VI-30-2					
VI-50-1	50	49.0	1126.6	901.2	585.8
VI-50-2					

¹⁾ t_{cd} : Cutting depth from surface, ²⁾ A_e : Eliminated area ratio to original area, ³⁾ P_0 : Max. axial loading, ⁴⁾ P_n : Nominal axial loading, ⁵⁾ ϕP_n : Max. design axial loading

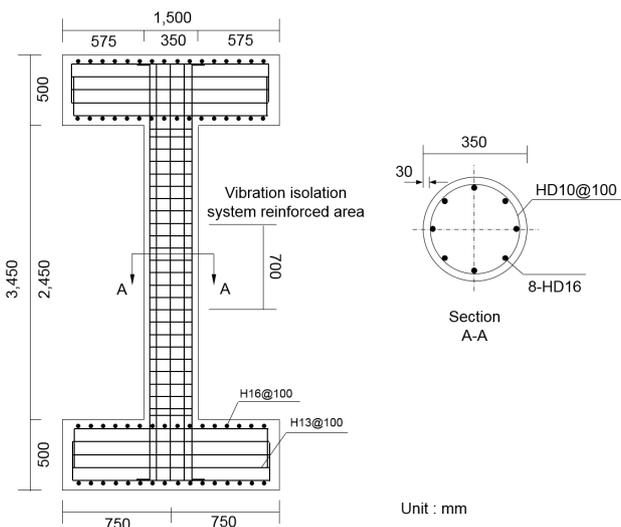


Fig. 3 Details of specimen

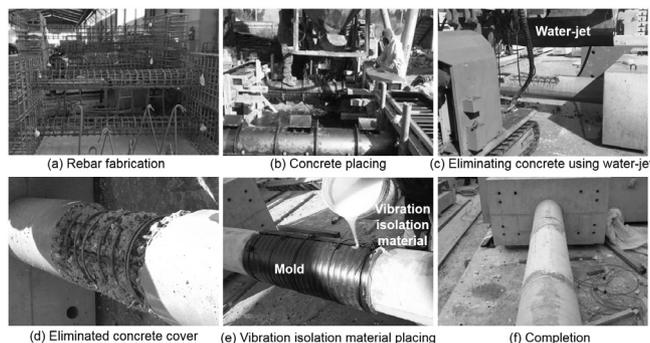


Photo 1 Manufacturing procedures of specimens

Table 2 Vibration isolation material properties

Compressive strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation at failure [%]	Adhesive strength [MPa]	Specific gravity
94.0	42.0	2.7	9.8	1.13

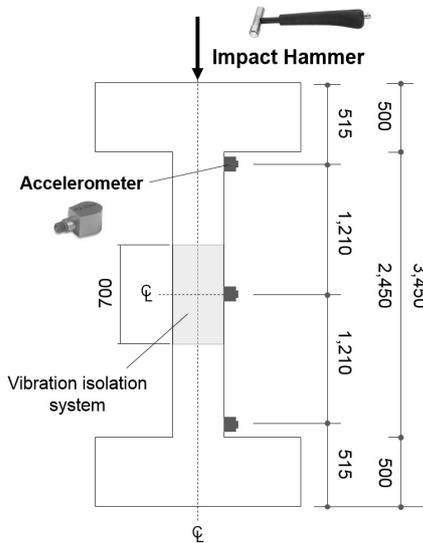


Fig. 4 Overview of impact hammer test

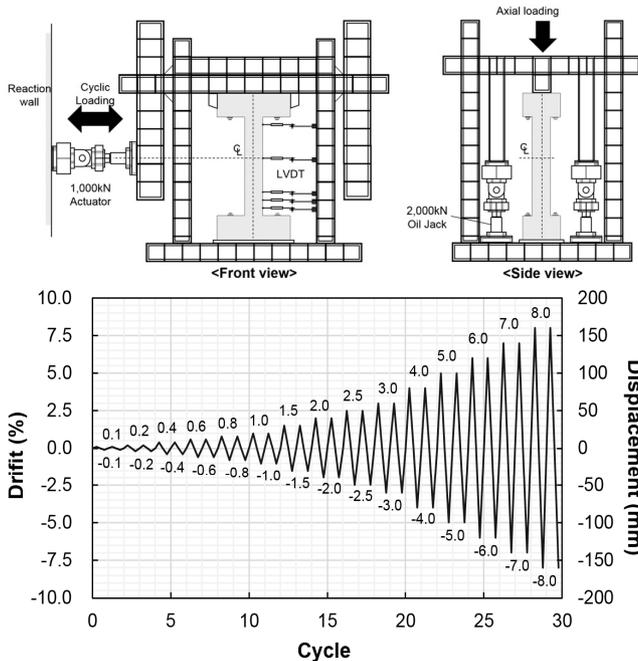


Fig. 5 Test set up & loading history

3.3 구조성능 실험

진동절연재로 보강된 기둥의 구조성능을 평가하기 위하여, Fig. 5와 같이 반복 횡하중이 가해지는 동안 2,000 kN 오일잭 2대를 병렬 설치하여 단면성능의 10% 축하중이 작용하도록 가력 실험을 수행하였다. 또한 라멘형태의 선하역사 구조물 특성을 반영하기 위하여 기둥 상하부 경계조건은 고정단으로 하고 시험체 상하부에는 같은 방향의 휨모멘트가 적용되도록 실험장치를 구성하였다. 실험체 중앙 연장선상에 1,000 kN 용량의 액추에이터를 사용하여 수평 반복하중을 적용하여 시험

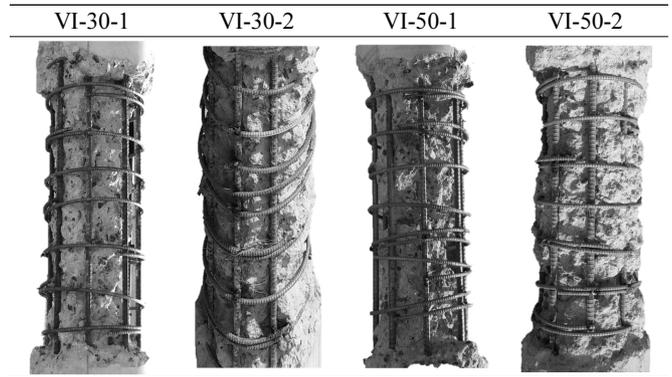


Photo 2 Figuration of test specimens with eliminated concrete cover

Table 3 Axial load on test specimen with eliminated concrete cover

Specimens	t_{cd} [mm]	A_e [%]	P_0 [kN]	$0.1P_0$ [kN]	$0.1P_0/P_{OP}$	
RC (control)	-	-	2814.5	281.4	0.1	
Plan	30	31.3	1819.1	181.9	0.1	
VI-30	VI-30-1	51.10	49.9	1410.1	141.0	0.78
	VI-30-2	40.18	40.6	1613.8	161.4	0.89
Plan	50	49.0	1126.6	112.7	0.1	
VI-50	VI-50-1	72.89	66.0	751.7	75.17	0.41
	VI-50-2	66.46	61.5	849.4	84.94	0.47

Notes: t_{cd} : Cutting depth from surface, A_e : Eliminated area ratio to original area, P_0 : Max. axial loading, $0.1P_0$: Applying axial load, $0.1P_0/P_{OP}$: Axial load ratio to plan axial load

체 전체에 작용하는 전단력이 동일하도록 구성하였다. 가력 하중은 시험체의 파괴양상을 파악하기 위하여 부재회전각 8.0%까지 변위 제어하였다.

시험체의 불균일한 골재배치와 수압에 의해 콘크리트 파쇄된 단면이 Photo 2와 같이 불균일하게 발생하고, 콘크리트 깊이 50 mm를 파쇄하는 VI-50-1시편의 경우 콘크리트 단면 손상이 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 손상된 콘크리트 단면에 따라 반복하중 시험시 가해지는 축하중을 다르게 가력해야 하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 콘크리트 최대 파쇄 깊이를 기준으로 하여 Table 3과 같이 축력을 계산하였다.

30 mm의 콘크리트 피복부 파쇄를 계획한 VI-30시편의 최대 파쇄깊이는 51.10 mm, 40.18 mm이며, 실제 파쇄된 단면성능은 계획한 축하중(181.9 kN)에 비해 각각 78%, 89%만큼 줄어들어 따라 가해지는 축하중은 단면에 따라 141.0 kN, 161.4 kN으로 가력 하였다. 단면 깊이 50 mm의 콘크리트 파쇄를 계획한 VI-50 시편에서는 최대 72.89 mm, 66.46 mm의 깊이까지 콘크리트가 파쇄되었으며, 파쇄된 단면성능에 따른 축하중은 계획된 단면성능에 따른 축하중에 비해 50%이상 감소한 것을 확인하였다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 충격가진 실험결과

충격해머에 의해 타격으로부터 얻어진 가속도의 평균치 값을 분석하여 얻은 주파수 응답은 Fig. 6과 같다. 고유진동수는 RC시편이 평균 109.89 Hz이고, VI-30시편은 88 Hz, VI-50시

편은 74.8 Hz, 81.3 Hz로 나타났다. 이는 진동절연재로 보강한 기둥부재의 고유진동수가 바뀜으로 인하여 동일한 진동에 대하여 다른 진동응답 결과를 보임을 의미하며, 기둥부재의 동적특성을 고려하고 진동절연재의 감쇠비를 조절하면 진동을 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

일반 기둥부재와 진동절연재가 시공된 기둥부재의 감쇠비

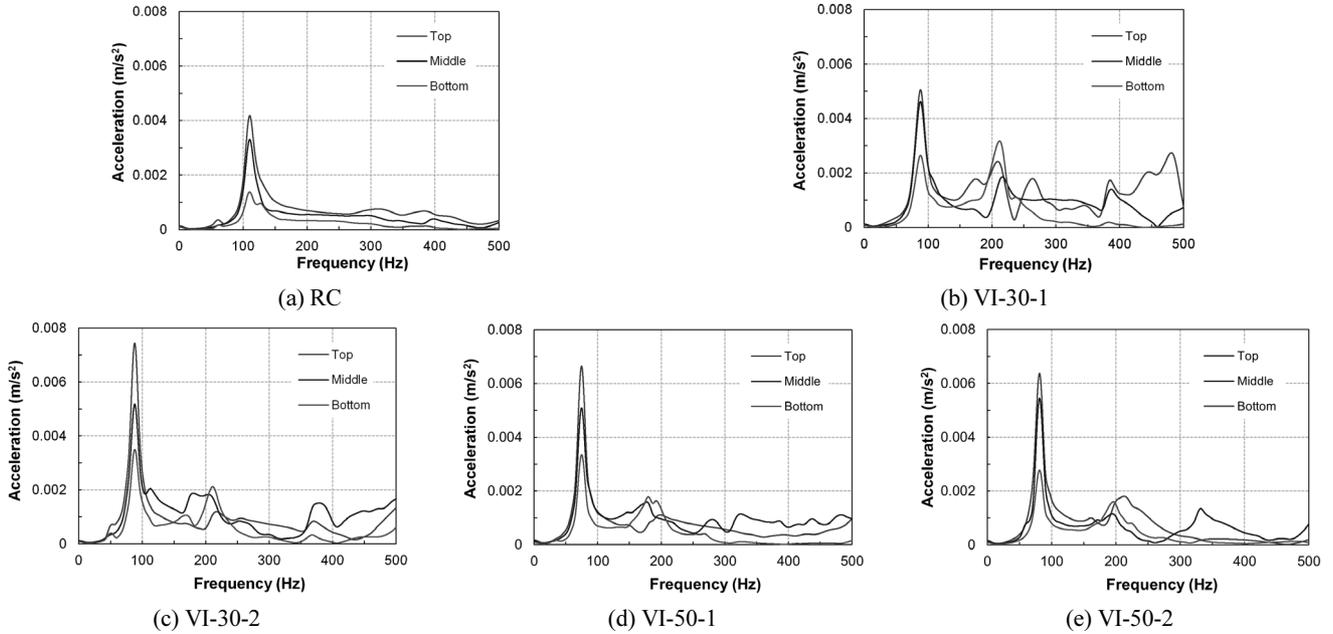


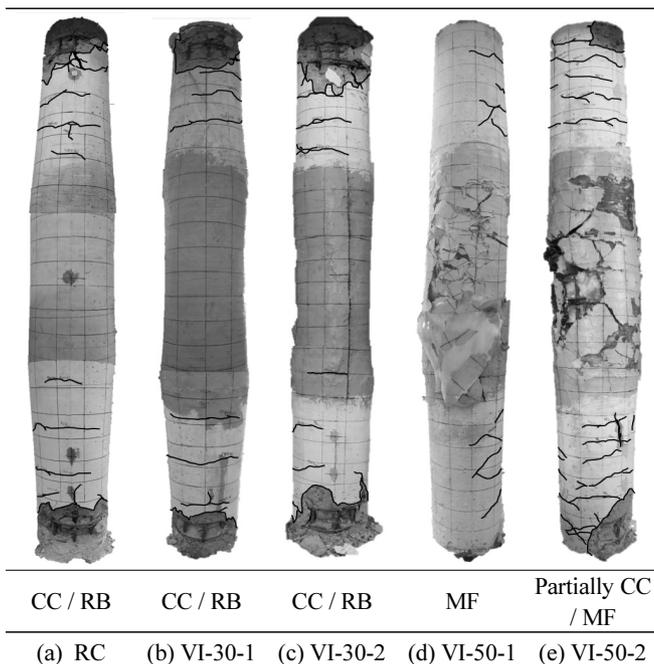
Fig. 6 FFT analysis data

Table 4 Impact hammer test results on top, middle, bottom points

Specimen	Peak acceleration [mm/s ²]	Peak frequency [Hz]	Average peak frequency [Hz]	Damping ratio [%]	Average damping ratio [%]	Acceleration response		Max. Velocity [mm/s]	Max. Displacement [mm]	Ratio of displacement	
						Narrow band [db]	1/3 Octave band [db]				
RC	Top	4.180	109.95		6.06	52.42	85.89	6.051	0.018	1.000	
	Middle	3.300	110.04	109.89	5.83	6.17	50.36	83.47	4.773	0.778	
	Bottom	1.380	109.69		6.63		42.78	77.73	2.002	0.006	0.323
VI-30-1	Top	5.053	88.08		7.99	54.07	89.00	9.130	0.033	1.000	
	Middle	4.621	88.05	88.07	7.75	7.97	53.29	87.43	8.353	0.030	0.909
	Bottom	2.649	88.07		8.16		50.05	86.50	4.787	0.017	0.524
VI-30-2	Top	7.447	88.09		6.17	57.44	89.51	13.455	0.049	1.000	
	Middle	5.179	88.20	88.20	6.51	6.37	54.28	88.60	9.345	0.034	0.688
	Bottom	3.502	88.31		6.44		50.89	85.44	6.311	0.023	0.469
VI-50-1	Top	6.646	74.74		7.04	56.45	88.35	14.152	0.060	1.000	
	Middle	5.092	74.75	74.79	7.15	7.08	54.14	87.27	10.842	0.046	0.767
	Bottom	3.343	74.89		7.05		50.48	84.57	7.104	0.030	0.500
VI-50-2	Top	6.368	81.30		6.71	56.08	88.89	12.466	0.049	1.000	
	Middle	5.451	81.34	81.30	6.71	6.71	54.73	86.47	10.666	0.042	0.857
	Bottom	2.780	81.27		6.71		48.88	83.32	5.444	0.021	0.429

는 주파수 응답함수 값 최대의 $1/\sqrt{2}$ 이 되는 주파수의 차(half power bandwidth)로부터 Table 4와 같이 산정하였다. RC시편의 평균 감쇠비는 6.17%이나, VI-30시편은 7.97%, 6.37%, VI-50시편은 7.08%, 6.71%로 RC시편에 비해 VI-30시편은 1.29배, 1.032배, VI-50시편은 1.147배, 1.087배 증가한 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 진동절연시스템의 진동저감 성능을 확인할 수 있었다.

충격가진 실험을 통한 최대 가속도값을 이용하여 최대 속도, 최대 변위를 Table 4에 나타내었다. RC시편을 포함하여 진동절연시스템 시편의 최대 가속도, 최대 속도, 최대 변위가 충격해머로 충격이 가해진 상부에서 하단으로 전달되는 과정에서 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 진동전달 경로상에서 구조재와 진동절연재의 감쇠 효과, 흡수 또는 경로거리에 따른 자연감쇠 등이 발생하였음을 확인할 수 있다. 발생된 최대 변위에 대하여 상, 중, 하부의 감소비율을 비교 시 RC시편의 하부에서 0.323으로 제일 큰 변위감소가 발생된 것을 확인할 수 있다. 상부에서부터 하부로의 변위 감소가 크다는 것은 1차 진동모드에서의 상하부의 차이가 크게 발생하였으며, 진동절연시스템으로 보강된 시편의 경우 RC시편에 비해 보다 안정하게 거동하는 것을 알 수 있다. 시험체간의 감쇠비가 서로 상이하게 발생하는 것은 워터젯에 의해 파쇄된 콘크리트의 단면에 의한 진동절연재의 보강량 차이로 발생하였으며, 시공성의 정밀도에 따라 결과가 상이한 것을 확인하였다.



Notes: CC : Concrete crushing, RB: Rebar buckling, MF : Vibration isolation material fracturing

Fig. 7 Figuration of failure mode

4.2 동적구조성능실험

4.2.1 균열 및 파괴형상

진동절연재로 보강된 기둥 부재의 구조성능을 검토하기 위해 반복하중을 가한 시편의 최종파괴형상을 상부, 중앙부, 하부를 연결 하여 Fig. 7에 나타내었다. 일반 기둥부재인 RC 시편은 콘크리트 단부에서 콘크리트 압괴파괴와 주철근의 좌굴이 발생되었으며, 소성힌지구간에서 휨균열이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 30 mm 두께의 콘크리트를 제거하여 진동절연시스템을 적용한 VI-30시편에서도 유사한 파괴형상을 나타내고 있다. 50 mm 두께의 콘크리트를 제거한 VI-50 시편의 경우에는 진동절연시스템을 적용한 중앙부에서 파괴가 주로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 콘크리트의 피복두께 이상으로 진동절연시스템을 시공하여 일정 콘크리트 심부 단면이 부족하면 진동절연시스템에서 파괴가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

4.2.2 하중-변위 관계

시편의 동적거동을 검토하기 위한 하중-변위 이력곡선과 최대변위에 대한 포락곡선은 Fig. 8과 같다. 진동절연재를 적용하지 않은 RC시편의 경우 부재회전각 1.09%에서 항복하였고 부재회전각 2.0%에서 최대하중 124.2 kN를 나타내었으며 부재회전각 5.57%까지 급격한 하중 저하 없이 안정적인 이력거동을 나타내었다.

진동절연재를 시공하기 위해 30 mm 콘크리트를 파쇄한 VI-30 시편은 부재회전각 1.19%와 0.99%에서 항복하였고 부재회전각 2.50%, 2.51%에서 최대하중 98.7 kN, 98.1 kN을 나타내었다. RC 시편과 비교 시 최대하중은 0.8배 감소하였으며, 이는 콘크리트 단면의 감소와 진동절연재에 의한 강도감소가 원인인 것으로 판단된다. VI-30시편은 부재회전각 6.54%, 7.87%에서 파괴되었고, RC시편에 비해 연성거동 하는 것을 확인할 수 있다. VI-50 시편은 부재회전각 1.10%에서 항복하였고 부재회전각 2.02%, 2.01%에서 최대하중 100.0 kN, 111.4 kN을 나타내었다. RC 시편의 최대하중에 비해 진동절연시스템 기둥은 80%, 90%을 나타내었고, 이는 심부콘크리트의 단면감소에 영향을 받은 것이라고 판단된다. VI-50 시편과 VI-30 시편의 최대하중 값이 큰 차이가 발생하지 않은 것은 보강된 진동절연재의 증가에 따른 강도감소는 크지 않음을 알 수 있다. VI-50시편은 파괴 시 부재회전각은 2.90%, 6.11%의 큰 편차가 발생하였으며, VI-50-1시편은 RC시편에 비해 취성거동을, VI-50-2 시편은 RC시편에 비해 연성거동을 보였으며 VI-30시편과 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있다.

이는 콘크리트 파쇄면적이 기존 계획과 VI-50-2 시편에 비해 VI-50-1 시편이 크게 파쇄 되었고 면적 뿐 만 아니라 최대 파쇄 체적이 증가하였기 때문이라고 판단된다. 이는 진동절

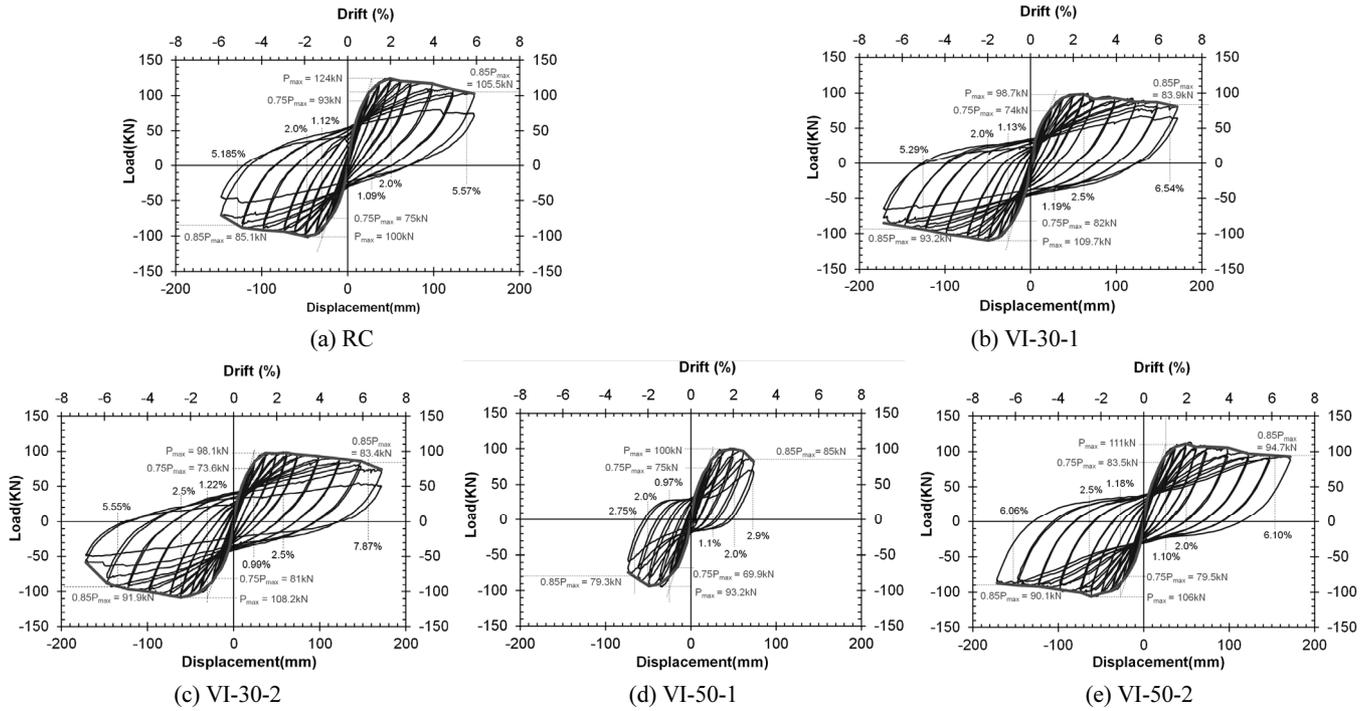


Fig. 8 Cyclic loading response

Table 5 Measured cyclic loading test results

Specimen		Yield			Max			Failure			K_{iy}	μ	μ/μ_{RC}
		P_y [kN]	δ_y [mm]	γ_y [%]	P_{max} [kN]	δ_{max} [mm]	γ_{max} [%]	P_f [kN]	δ_f [mm]	γ_f [%]	(P_{max}/δ_y) [kN/mm]	(δ_f/δ_y)	
RC	Posi	93.1	26.7	1.09	124.2	49.1	2.00	105.5	136.4	5.57	4.66	5.12	1.00
	Nega	75.1	27.4	1.12	100.1	49.1	2.00	85.1	127.0	5.19	3.65	4.63	1.00
VI-30-1	Posi	74.0	29.3	1.19	98.7	61.3	2.50	83.9	160.3	6.54	3.37	5.48	1.07
	Nega	82.2	27.7	1.13	109.7	49.1	2.00	93.2	129.6	5.29	3.95	4.67	1.01
VI-30-2	Posi	73.6	24.2	0.99	98.1	61.5	2.51	83.4	192.9	7.87	4.05	7.97	1.56
	Nega	81.1	29.9	1.22	108.2	61.8	2.52	91.9	136.1	5.55	3.62	4.56	0.98
VI-50-1	Posi	75.0	27.0	1.10	100.0	49.5	2.02	85.0	71.1	2.90	3.70	2.63	0.51
	Nega	69.9	23.9	0.98	93.2	49.1	2.00	79.3	67.4	2.75	3.90	2.82	0.61
VI-50-2	Posi	83.5	26.9	1.10	111.4	49.3	2.01	94.7	149.7	6.11	4.14	5.57	1.09
	Nega	79.5	28.9	1.18	106.0	61.5	2.51	90.1	148.5	6.06	3.66	5.13	1.11

Notes: P_y : yield load, δ_y : yield displacement, γ_y : yield drift ratio, P_{max} : maximum load, δ_{max} : maximum displacement, γ_{max} : maximum drift ratio, P_f : failure load, δ_f : failure displacement, γ_f : failure drift ratio, K_{iy} : initial rigidity, μ : ductility, μ/μ_{RC} : ductility ratio to RC specimen

연시스템에서는 파쇄단면의 정확한 시공이 필요하며 파쇄단면은 시스템 성능을 결정짓는 하나의 요소임을 알 수 있다.

Table 5는 실험에서 측정된 최대하중과 이에 상응하는 변위와 부재회전각, 초기항복강성 및 연성도를 나타내었다. 초기항복강성(K_{iy})은 최대하중에 대한 항복변위의 비로 진동절연재가 적용된 시편의 정방향 가력방향에 대한 초기강성은 RC시편에 비해 VI-30시편은72%, 87%, VI-50시편은 79%,

89%로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 초기강성의 감소는 본 연구에서 개발한 진동절연시스템이 진동 응답에 영향이 있었음을 확인할 수 있다. 또한 파괴변위에 대한 항복 변위의 비로 나타낼 수 있는 연성도(μ)는 RC시편에 비해 VI-30 시편은 정방향 가력에 대하여 7%, 56%가 증가하였으며, VI-50-2시편의 경우에는 9%정도 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 적용된 진동절연시스템이 연성파괴를 유도하는데

효과적으로 작용하였음을 확인하였다.

4.2.3 강성변화 평가

각 실험체의 하중 및 강성변화를 ACI T1.1-01(2002)의 모멘트 프레임에 대한 내진성능 평가기준에 따라 Table 6과 같이 정리하였다. ACI T1.1-01(2002)에서는 강진 이후에도 구조물이 붕괴되는 것을 방지하기 위해 부재회전각 3.5%에서

Table 6 Test results based on ACI T1.1-01 acceptance criteria

Specimen	3.5% & 5.5% drift cycle	
	P_x/P_{max}	K_s/K_{iy}
ACI T1.1-01 Acceptance Criteria	≥ 0.75	≥ 0.05
RC	Posi	0.95
	Nega	0.93
	Posi	0.85
	Nega	0.79
VI-30-1	Posi	0.94
	Nega	0.94
	Posi	0.89
	Nega	0.84
VI-30-2	Posi	0.96
	Nega	0.95
	Posi	0.90
	Nega	0.85
VI-50-2	Posi	0.96
	Nega	0.93
	Posi	0.86
	Nega	0.86

Notes: P_x : Load at drift ratio 3.5% or 5.5%, P_{max} : Peak load, K_s : Secant stiffness of drift ratio 3.5% or 5.5%, K_{iy} : Initial yield stiffness

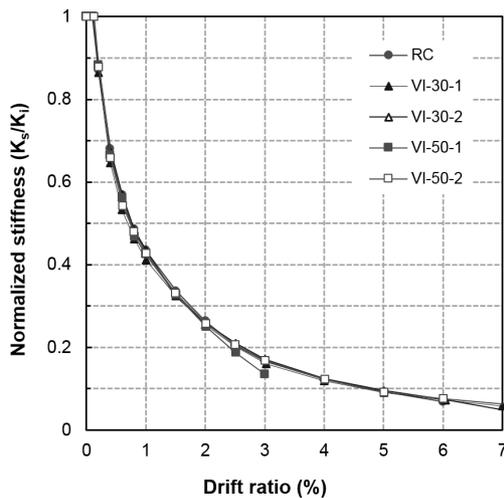


Fig. 9 Normalized stiffness degradation

도 최대 하중의 75% 이상의 하중 저항성능을 유지해야 하도록 제안하고 있다(Choi et al., 2010). 이에 진동절연재로 보강된 시편 중 VI-50-1 시험체의 경우에는 부재회전각 3.5% 이전에 파괴되었으므로 평가 대상에서 제외하였다. 또한 RC 시험체의 최대 부재회전각 5.5%에 대해서도 검토하였다. 최대하중 저항성능에 대해서는 RC를 비롯한 진동절연재로 보강된 시편이 모두 75%이상을 유지하고 있음을 확인하였다.

ACI T1.1-01(2002)에서는 강진이 발생하더라도 초기항복강성에 대한 활선강성이 0.05이상 유지하도록 제안하고 있으며, 진동절연시스템은 0.16이상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 진동절연시스템이 적용된 구조물이 내진설계를 기반으로 설계되지는 않았으나 지진하중과 같은 수평반복하중에 대해 충분한 하중저항성능과 강성을 지니고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9는 각 실험체의 초기강성(K_i)에 대한 활선강성(K_s)의 비율로 강성변화를 나타내었다. 정·부 방향 가력시 최대 변위를 통한 초기강성과 활선강성을 산출하였다. 취성 파괴가 발생한 VI-50-1시편만을 제외하고, 진동절연시스템으로 보강된 시편의 강성변화는 RC와 유사하게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 진동절연시스템에 의한 시편의 강성변화가 발생하지 않았으며 RC 구조체로서 적용 가능성이 높음을 확인할 수 있다.

4.2.4 에너지소산 능력

지진하중에 대한 구조물의 내진성능 평가를 위한 방법으로 하중에 대한 에너지 소산능력을 활용할 수 있다. 이는 구조물의 총 에너지를 변위이력으로부터 실제 흡수 및 소산되는 에너지를 산정하는 것으로 지진, 바람 등의 횡하중에 대한 구조물의 성능을 평가하는 주요 지표가 된다. Fig. 10은 누적에너지소산 능력을 부재회전각별로 나타내었으며, 누적에너지 소

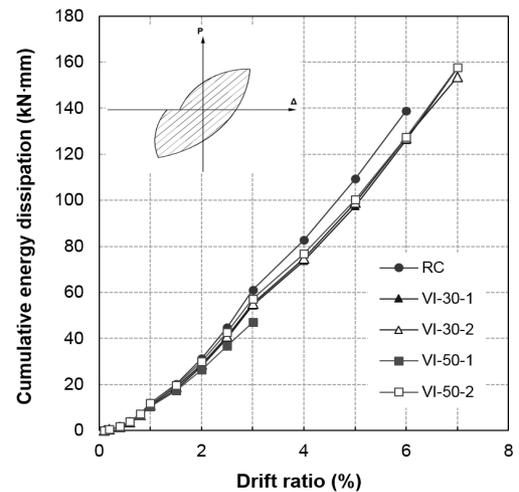


Fig. 10 Cumulative energy dissipation

산량은 Fig. 8에 나타난 하중-변위 이력곡선의 면적으로 계산하였다. RC시편은 진동절연시스템으로 보강된 시편에 비하여 동일한 부재회전각에서 더 큰 에너지를 소산하는 것으로 확인되었다. 이는 RC시편의 최대하중이 진동절연시스템에 비해 상대적으로 크기 때문이라고 판단된다.

그러나 RC시편의 경우에는 부재회전각 6%에서 내력이 저하되고 시편이 파괴되어 최종 약 140 kN·mm의 누적소산에너지를 나타내는 것을 확인할 수 있다. VI-50-1시편을 제외한 나머지 진동절연재로 보강된 VI-30시편과 VI-50-2시편에서는 부재회전각 7%에서 약 160 kN·mm의 최종 누적소산에너지를 나타내므로 RC보다 1.125배 더 큰 소산에너지가 발생한 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 열차운행으로 발생하는 진동이 직접 전달되는 선하역사 내의 진동과 이로 인한 구조물 기인 소음 저감을 위하여, 진동절연 기능을 위한 에폭시 소재의 방진재와 워터젯 공법을 이용하여 급속시공이 가능한 구조진동절연시스템을 제안하였다. 진동절연재의 보강체적을 변수로 한 진동절연시스템을 실제역사 기둥의 축소 모형에 적용하고, 충격가진 시험을 통한 진동저감 성능과 반복하중을 가력시험을 통한 구조적 성능을 실험적으로 검증하였다.

일반 기둥부재의 경우 고유 진동주기는 109.89 Hz, 진동절연재가 시공된 VI-30시편은 88 Hz, VI-50시편은 74.8 Hz, 81.3 Hz로 하향되어 나타났고, 감쇠비의 경우에는 VI-30시편은 1.29, 1.032배, VI-50시편은 1.147, 1.087배 증가하였다. 이는 진동절연재로 보강된 기둥부재의 고유진동수가 바뀜으로 인하여 동일한 외부진동에 대하여 다른 진동응답 결과를 보임을 의미하며, 감쇠비 증가는 진동저감 효과가 있음을 보여준다. 횡하중 반복가력에 의한 구조성능 실험을 통해 진동절연시스템으로 보강된 시편은 RC시편에 비해 연성도가 VI-30시편은 7%, 56%, VI-50시편은 9% 증가하였고 초기강성은 RC시편에 비해 VI-30시편은 0.72, 0.87배, VI-50시편은 0.79, 0.89배 감소하였다. 이는 제안한 구조진동절연시스템이 진동응답특성에 대해 효과적이며, 연성파괴를 유도하여 구조적 안정 성능을 나타내는 것으로 판단하였다. 또한 진동절연재로 보강된 시편이 RC시편에 비해 1.125배 더 큰 에너지 소산 능력을 보임으로써 본 연구에서 개발한 진동절연시스템이 충분한 진동절연효과와 구조부재로서의 성능에 문제가 없음을 알 수 있었다.

그러나 콘크리트 두께가 50 mm 파쇄되고 진동절연재로 보강된 VI-50시편의 경우에는 균열 및 파괴형상이 진동절연재

가 보강된 중앙부에서 파괴되어, 심부 콘크리트 단면이 부족함에 따른 진동절연재에서 파괴가 발생되었다. 향후 본 연구에서 개발된 진동절연시스템을 실제 선하역사 구조 부재에 적용하기 위하여 효율적인 진동절연효과를 나타낼 수 있는 파쇄 깊이와 방진재 종류에 대한 추가적인 연구와 실제 구조물의 형식, 레도정착형식, 구조적 공간에 따른 진동으로 인해 기인한 소음을 감소시키기 위해 실제 선하역사 모형에서의 모형실험 연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 에폭시 방진재와 콘크리트 면의 경계면에서의 부착거동에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 「철도 소음/진동 저감기술 개발(15RTRP-B072484-03)」 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- ACI T1.1R-01 (2002), Commentary on Acceptance Criteria for Moment Frames based on Structural Testing, *ACI Manual of Concrete Practice*, American Concrete Institute, 1-7.
- Choi, H. K., Yoo, C. H., Choi, Y. C., and Choi, C. S. (2010), Structural Capacity Evaluation of Hybrid Precast Concrete Beam-column Connections Subjected to Cyclic Loading, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 22(3), 325-333(In Korean).
- Choi, S., and Kwon, S. (2014), Vibration Analysis of an Elevated Railroad Station Considering Station-Bridge Connection Characteristics, *Journal of Korea Society of Disaster Information*, 10(2), 274-281(In Korean).
- Choi, S. H., Kim, J. H., Yoo, Y., and Kwon, S. G. (2015b), Analysis of Vibration Characteristics of Approach Bridges for an Elevated Railroad Station, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(4), 2911-2916(In Korean).
- Choi, S. H., Yoo, Y., Kim, J. H., and Kwon, S. G. (2015a), Experimental Analysis of Vibration Transfer Characteristics of an Elevated Railroad Station, *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, 11(1), 89-96(In Korean).
- Kim, J. H., and Han, S. Y. (2008), The Review of Floating Slab Tracks for Vibration Reduction of Railway Stating, *Korean Journal of Environmental Engineers*, 30(6), 581-586(In Korean).
- Kim, J. H., Jang, D. D., and Ji, Y. S. (2015), A Study of Noise Characteristics Induced by Slab Vibration for the Elevated Railway Station, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 16(5), 3557-3566(In Korean).
- Kim, J. H., Kim, D. H., Kang, Y. S., and Kang, Y. J. (2012), A Study About Noise/Vibration Analysis of Embedded Rail Track, *Proceedings of 2012 Journal of the Korean Society for Railway*, The Korean Society for Railway, Gyeongju, 1028-1033.

Lee, J. Y. (2014), Improvement of Vibration Mitigation Efficiency for an Elevated Railroad Station Considering Transfer Characteristics, Master's thesis, Korea National University of Transportation, 1-27 (In Korean).

Park, S. G., Chun, C. K., Lee, G. S., and Jang, S. Y. (2013), The Development of a Floating Slab Track to Isolation System, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 23(2), 112-122(In-Korean).

Ryu, B. J., Lee, H. G., and Koo, K. W. (2011), Experimental Study on Railway Vibration Isolation of a Large Structure using Isolation Materials, *The Transactions of the Korean Institute of Electrical*

Engineers, 60(6), 1286-1292.

Yang, N., Guo, T., and Sun G. (2013), Train-Induced Vibration on Elevated Railway Station, *Journal of Central South University*, 20, 3745-3753.

Received : 03/21/2016

Revised : 04/04/2016

Accepted : 04/11/2016

요 지 : 궤도가 역사의 상부에 위치하여 열차운행으로 인하여 발생한 진동이 직접 전달되는 선하역사에서 구조물 진동과 이로 인한 구조물 기인 소음이 기준치보다 높은 것으로 나타남에 따라, 기존 선하역사에 대하여 열차 운행의 중단 없이 진동저감이 가능한 경제적, 효율적 방안이 요구된다. 이에 본 연구에서는 진동전달 경로상의 기둥에 워터젯 공법으로 기둥단면에서 피복재 부분을 파쇄한 후 진동전달 절연기능을 가지는 에폭시 소재의 방진재를 보강하여 진동을 저감시키기 위한 구조진동절연시스템을 개발하였다. 방진재의 보강체적을 변수로 한 진동절연시스템을 실제역사 기둥의 1/4 축소모형에 적용하고, 충격가진 시험을 통한 진동저감 성능과 횡하중 반복가력시험을 통한 구조적 성능을 검증하고자 하였다. 충격가진 시험결과로부터 구조진동절연시스템을 적용할 경우 고유 진동주기가 하향되어 진동응답 특성이 변화되고 감쇠비는 약 15~30%까지 증가를 나타내어 진동저감 성능이 있음을 알 수 있었다. 또한 반복하중 가력에 의한 구조성능 시험에서 하중-변위 및 강성변화에 대한 고찰과 연성도 및 에너지 소산의 증가를 보인 결과로부터 구조부재로의 기능을 유지함을 확인 할 수 있었다.

핵심용어 : 선하역사, 구조물 진동, 구조물 기인 소음, 진동절연시스템, 충격가진 시험, 구조성능 시험
