

반복하중을 받는 경량 배관 서포트 시스템에 대한 실험적 성능 평가

Experimental Capacity of Suspended Piping Trapeze Restraint Installations under Cyclic Loadings

정 상 덕*
Jeong, Sang-Deock

오 창 수**
Oh, Chang-Soo

박 민 재***
Park, Min Jae

이 창 환****
Lee, Chang-Hwan

Abstract

Damage to gas and fire protection piping systems can lead to secondary disasters after an earthquake, so their seismic design is crucial. Accordingly, various types of seismic restraint installations are being devised, and a new suspended piping trapeze restraint installation has also recently been developed in Korea. In this study, a cyclic loading test was performed on the developed trapeze support system, and its performance was evaluated according to ASHRAE 171, the standard for seismic and wind restraint design established by the American Society of Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE). The three support system specimens did not break or fracture, causing only insignificant deformations until the end of the experiment. Based on the experimentally rated strength and displacement performance, this trapeze support system is expected to control the seismic movement of piping during an earthquake.

Keywords : *Suspended piping trapeze restraint installation, Nonstructural component, Cyclic loading test, Threaded rod, Buckling, ASHRAE*

1. 서론

최근 지진 발생 시 비구조요소의 손상 및 파괴로 인한 피해가 잇따라 보고되면서, 이들의 내진설계에 대한 관심이 높아지고 있다^{1,2,3}. 특히 가스 및 소방배관을 포함한 배관 시스템의 손상은 2차 피해로 이어질 수 있기에 그 중요성이 더욱 높다^{4,5}. 이와 관련하여 배관 시스템의 내진설계 및 보강에 사용할 다양한 제품들이 개발되고 있으며^{4,5}, 최근 국내에서도 기존에 사용되는 시스템에 비해 무게가 가벼운 배관 서포

트 시스템이 고안되었다. 이 배관 서포트 시스템은 기존 제품에 비해 경량이면서도 동급 이상의 내진성능을 가질 수 있도록 개발되었다.

현행 국내 건축물 내진설계기준인 KDS 41 17 00⁶에서는 비구조요소가 내진설계 범위로 포함되어 있지만, 내진설계에 사용되는 배관 서포트 시스템에 대한 규정은 명확하지 않다². 또한 비구조요소의 내진제품에 대해서는 제품의 제조사가 해당제품이 내진성능을 보유하고 있음을 입증해야 한다³.

배관 서포트 시스템에 대한 선행연구로서, Perrone et al.(2020)은 배관 서포트 시스템을 구성하는 개별 부속품에 대하여 반복하중 실험을 수행하였으며, 이 실험의 결과를 바탕으로 전체 조립품에 대한 수치해석을 수행하였다⁷. 또한 Filiatrault et al.(2018)도 배관 서포트 시스템을 구성하는 개별 부속품에 대하여 반복하중 실험을 수행하는 것으로 제품의 성능을 평가하였다⁸. Wood et al.(2014)은 하중제어된 반복하중 하에서 실험을 수행하는 것으로 배관 서포트 시스템의 성능을 평가하였다⁹.

* 학생회원, 부경대학교 건축·소방공학부, 석사과정
Division of Architecture and Fire Protection Engineering, Pukyong National University

** 정회원, (주)양수금속 대표이사, 공학석사
Yang Soo Metals Co., Ltd.

*** 정회원, 부경대학교 건축공학과 조교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University

**** 교신저자, 정회원, 부경대학교 건축공학과 부교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Pukyong National University
Tel: 051-629-6087 Fax: 051-629-7084
E-mail: chlee@pknu.ac.kr

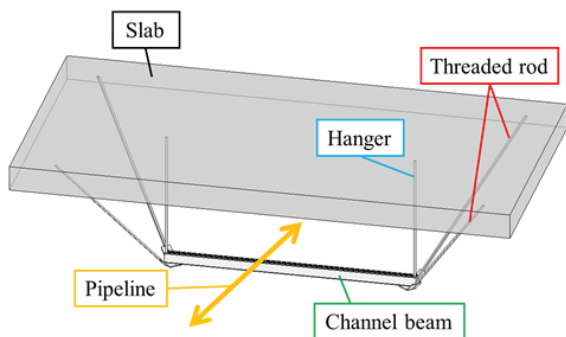
이와 같이 선행연구들은 배관 서포트 시스템을 구성하는 개별 부품들에 대해 반복하중 실험을 수행하거나, 하중제어 반복실험을 통해 배관 서포트 시스템의 성능을 평가한 것을 볼 수 있다. 미국냉동공조학회(ASHRAE)는 내진 및 내풍 버팀대(seismic and wind restraints)에 대한 실험기준인 ASHRAE 171¹⁰⁾을 규정하는데, 이 기준은 하중제어 반복실험을 통해 제품의 성능을 평가한다. 따라서 본 연구에서 대상으로 하는 배관 서포트 시스템에 대한 내진성능은 ASHRAE 171¹⁰⁾을 통해 평가될 수 있을 것이다.

본 연구는 최근 국내에서 새로이 개발된 경량 배관 서포트 시스템의 내진성능 평가를 목적으로 하였다. 먼저 대상 시스템의 기능, 상세 및 요소실험 과정이 소개되며, 다음으로 ASHRAE 171에 따른 배관 서포트 시스템의 실험적 성능평가 과정이 상세히 기술된다. 실험결과에 대한 분석을 바탕으로 향후 설계에 사용할 경량 배관 서포트 시스템의 내진강도와 더불어 변위성능이 평가된다.

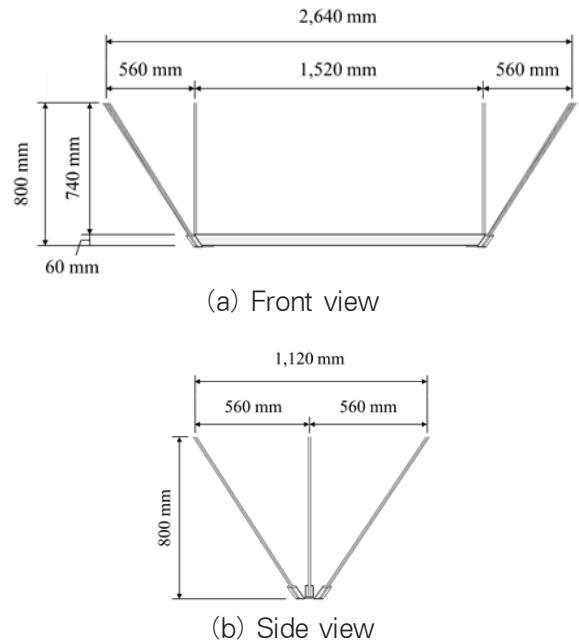
2. 경량 배관 서포트 시스템

2.1 시스템의 구성

본 연구에서 사용한 경량 배관 서포트 시스템의 형상은 Fig. 1과 같다. 또한 상세 치수가 표현된 정면도 및 측면도는 Fig. 2에 제시되어 있다. 이 서포트 시스템은 배관의 직각방향 지진하중에 대해서는 독립적으로 저항할 수 있도록 고안됐다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 이 시스템은 길이 1.52 m의 채널 보 양 단부에 길이 0.8 m의 행거가 수직재로 연결되며, 수평력 지지



〈Fig. 1〉 Conceptual configuration of the developed trapeze support system



〈Fig. 2〉 Details of the developed trapeze support system

를 위한 대각방향 가새 또한 2개씩 연결된다. 가새부 재료는 보강이 없는 M12 전산볼트가 사용되며, 행거와 가새 부재는 앵커를 통해 슬래브 하부에 정착된다. 시스템을 구성하는 개별 부품들을 가볍게 함으로써, 기존 시장에서 사용되는 배관 서포트 시스템에 비해 경량화가 가능하였다. 이로 인해 현장에서의 설치작업도 용이하게 개선되었고, 배관의 내진설계 및 보강을 위해 소요되는 강재의 물량이 절감되는 경제적인 이점도 있다.

경량화를 위한 부재의 세장성으로 인해, 가새는 인장력만 전담하도록 시스템이 설계되었으며, KS B ISO 898-1¹¹⁾에 따른 성질 등급 4.8의 M12 전산볼트가 사용된다. 그 외 서포트 시스템을 구성하는 강재들은 모두 KS D 3503¹²⁾의 SS275이다.

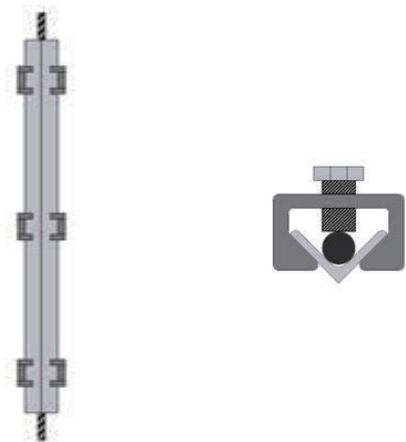
이 배관 서포트 시스템은 별도의 선설치 인서트 앵커^{13,14,15)}를 통해 바닥판에 고정하는 것으로 고안됐다. 상부층 슬래브 하부에 인서트 앵커를 매립한 후 콘크리트를 타설하며, 양생 후 서포트 시스템을 구성하는 전산볼트들을 인력에 의해 인서트 내로 간단히 밀어 넣음으로써 고정 작업이 완료된다. 서포트 시스템을 구조부재에 고정하는 작업이 간단하고 용이하기 때문에 설치 작업성을 향상시킬 수 있다. 정착부 고정에

사용하기 위한 별도의 앵커에 대해서는 선행연구^{14,15)}에서 그 자체의 내진성능이 평가되었다.

2.2 행거 보강 계획 및 좌굴성능 평가

본 실험에 앞서 상용 구조해석프로그램인 Etabs¹⁶⁾를 사용하여 고안된 서포트 시스템에 대한 사전해석을 수행하였다. 해석모델은 실제 적용시의 배치와는 다른 3.2절에서 후술되는 실험조건과 동일하게 작성되었다. 즉 서포트 시스템을 천장이 아닌 바닥에 거꾸로 고정하는 형태로 구성하였으며, 실험에서 최대하중으로 계획된 4.01 kN의 수평하중을 배관의 직각방향으로 가력하였다. 해석결과 압축력은 배관 서포트 시스템의 구성요소 중 수직재 역할을 수행하는 행거에서만 약 5.8 kN의 크기로 작용하는 것을 확인하였다.

한편 행거 부재를 M12 전산볼트로만 구성하게 되면, 세장비가 매우 커지기 때문에 압축력에 대해 거의 저항하지 못한다. 이 문제를 해결하기 위해, Fig. 3과 같이 전산볼트에 강제 앵글을 덧붙이는 형태로 행거의 좌굴내력을 증가시킬 수 있는 보강안을 구상하였다. 두 요소의 일체화 거동을 위해, 중심부를 포함한 3군데 위치에서 강제 앵글과 전산볼트를 클램프로 고정하였다.



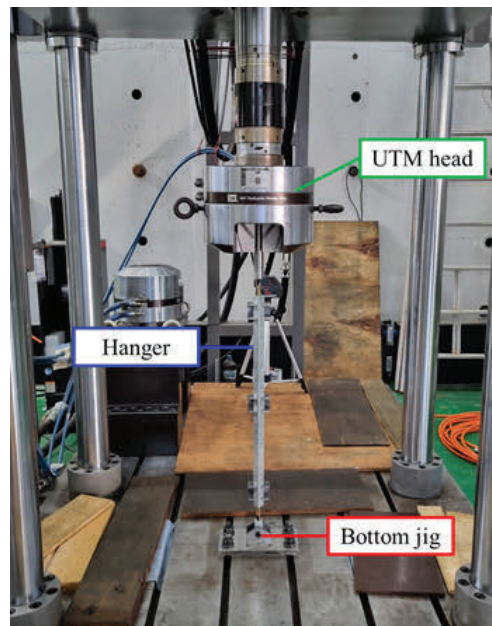
(a) Front view (b) Top view

〈Fig. 3〉 Detail of retrofitted hanger element

이 행거부재는 길이에 걸쳐 단면특성이 바뀌는 변단면으로 구성되어, 국내 강구조부재설계기준¹⁷⁾에 따른 압축강도 산정이 불가능하다. 또한 연속적인 일체화가 아닌, 3

개의 클램프를 통해 강제 앵글을 전산볼트에 불연속적으로 연결하기 때문에 불완전합성이 발생하며, 보강단면에 대한 비보강단면(M12 전산볼트)의 단면2차모멘트가 약 0.04의 비율로 매우 작다. 이러한 이유로 기존 변화단면을 가지는 기둥의 좌굴하중에 대한 선행연구^{18,19,20)}에서 도출된 강도 예측방법을 직접적으로 적용하는데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 요소실험을 통하여 행거부재의 좌굴강도를 평가하였다. 좌굴하중 실험은 M12 전산볼트로만 구성된 행거 2개와 보강안을 적용한 행거 2개를 대상으로 수행되었다. 실험의 셋업은 Fig. 4에서 볼 수 있으며, 실제 사용되는 조건보다 행거의 강도를 보수적으로 평가하기 위하여 하부지그는 한지로 구성하였다. 이에 따라 행거 실험체는 좌굴길이가 830 mm이고, 고정단-한지 경계조건을 가졌다. 실험체에는 1 mm/min의 속도로 변위제어된 압축하중을 가하였다. 실험체명은 보강유무에 따라 R(보강)과 NR(비보강)로, 그리고 가력순서에 따라 1과 2로 구분하였다.



〈Fig. 4〉 Test setup for buckling tests

Table 1은 개별 실험체의 최대하중(P_{max})을 보여준다. 실험체의 평균 P_{max} 는 비보강된 NR 계열의 경우 2.07 kN, 보강된 R 계열의 경우 13.03 kN이었다. 고안된 보강안을 적용함으로써, 단독 M12 전산볼트의 약 5배 이상으로 강도가 상승하였고, 보강된 R 계열 실험체의 개별

〈Table 1〉 Hanger buckling test results

Specimen	P_{max} (kN)
NR 1	2.03
NR 2	2.11
R 1	15.02
R 2	11.04

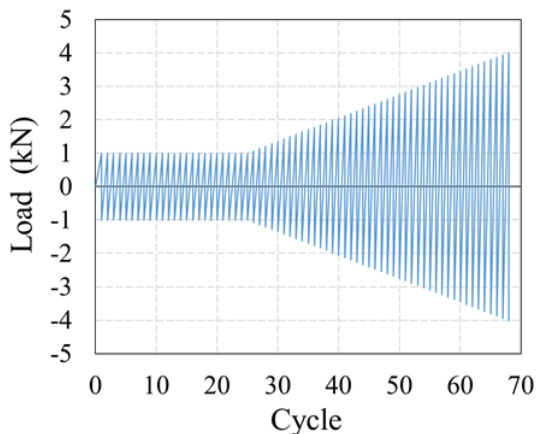
압축강도 또한 사전해석에서 요구되는 압축력 5.8 kN을 크게 초과한 것을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 행거 보강안을 경량 배관 서포트 시스템에 적용하는 것이 적절하다고 판단되었다.

3. 실험개요

3.1 ASHRAE 171 절차

경량 배관 서포트 시스템의 성능실험 및 평가는 ASHRAE가 제시하는 내진 및 내풍 버팀대에 대한 실험기준인 ASHRAE 171¹⁰⁾에 따라 수행하였다. 이 기준의 절차에 따르면, 실험체의 예상 목표하중수준을 먼저 설정하고, 이에 따라 실험에 적용할 가력프로토콜의 반복하중수준 및 평가되는 강도수준이 결정된다.

기준에서 제시하는 가력프로토콜의 형태는 Fig. 5와 같다. 이 가력프로토콜은 크게 두 단계로 구분된다. 첫 번째는 초기가력 단계로 예상 목표하중수준의 절반수준에 해당하는 하중이 총 25회 반복하여 가력된다. 초기가력 단계가 종료되면, 바로 두 번째인 하중증가 단계가 이어진다. 하중증가 단계에서는 매 사이클마다 점진적으로 증가하는 하중이 지속적으로 가



〈Fig. 5〉 Loading protocol

력되며, 사이클 간 하중 증분은 목표하중수준의 3.5%이다. 이 단계는 가력하중이 예상 목표하중수준의 약 2배에 도달하는 68번째 사이클까지 진행되며, 반복하중은 0.1 Hz의 주파수로 가력하도록 규정된다.

이 반복하중 실험은 실험체에서 파괴가 발생되거나, 실험체의 변위가 변형한계인 38 mm에 도달하면 계획된 가력프로토콜이 모두 수행되기 이전에 종료된다. 만약 초기가력 단계에서 실험이 종료되면, 예상 목표하중수준을 낮추어 재실험을 수행해야 한다.

실험체의 최대성능은 실험이 종료되기 이전 완전한 사이클의 반복하중 값으로 결정된다. 실험체의 파괴 없이 계획한 모든 사이클의 가력프로토콜이 종료된다면, 이 실험체의 최대성능은 예상 목표하중수준의 2배로 결정된다. 또한 추후 설계에 사용할 실험체의 강도는 실험체의 최대성능 중 최소값의 90%로 결정된다.

3.2 실험방법

본 실험에 사용한 배관 서포트 시스템에 대한 상세 내용은 2절에서 자세히 설명되었다. 본 연구에서 예상 목표하중수준은 국내 건축물 내진설계기준인 KDS 41 17 00⁶⁾을 참고하여 결정하였다. 기준에서 비구조요소의 수평설계지진력(F_p)은 다음의 식 (1)과 같이 산정된다.

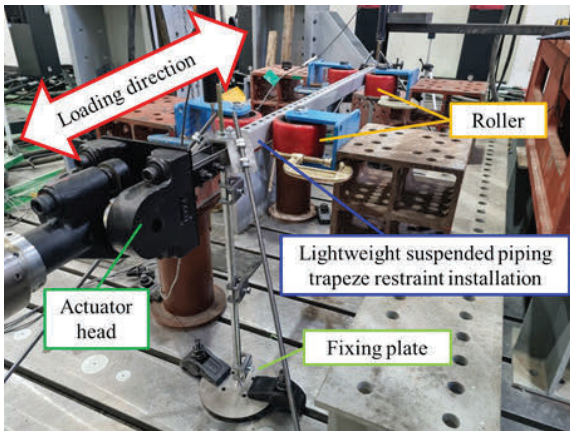
$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS} W_p}{\left(\frac{R_p}{I_p}\right)} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \quad (1)$$

여기서, a_p 와 R_p 는 각각 비구조요소의 증폭계수와 반응수정계수로, 배관 서포트 시스템의 경우 2.5와 4.5가 적용된다. S_{DS} 는 단주기 설계스펙트럼가속도이며, 본 연구에서는 국내에서 적용할 수 있는 최대값 수준인 0.54를 적용하였다. W_p 는 비구조요소의 가동 중량이며, 서포트 시스템에 지지될 배관의 최대 무게인 3.51 kN을 적용하였다. I_p 는 비구조요소의 중요도 계수이며, 소방배관을 위한 서포트 시스템을 가정하여 1.5를 적용하였다. z/h 는 구조물의 밑면으로부터 지붕층의 평균높이에 대한 비구조요소가 부착된 높이 비이며, 여기서는 1로 고려하였다. 이상의 값들을 반

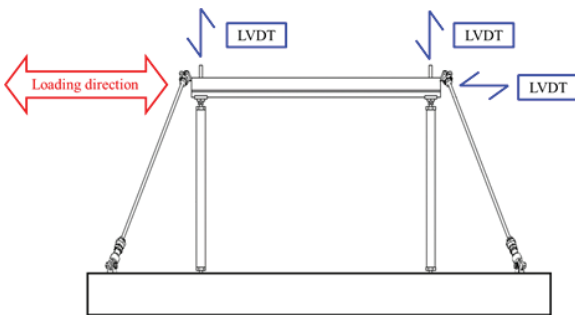
영하여 최종적으로 산정된 F_p 는 1.89 kN이다.

본 연구에서는 F_p 값에 여유를 두어 예상 목표하중수준을 2 kN으로 설정하였고, 이에 따른 가력프로토콜은 Fig. 5와 같다. 초기가력 단계의 반복하중수준은 1 kN으로 정해지며, 이어지는 하중증가 단계의 반복하중은 매 사이클 별 0.07 kN씩 증가된다. 최대 반복하중 값인 4.01 kN에 도달하면 실험이 종료된다. 본 실험은 기준에서 요구하는 최소 실험체 개수인 3개의 배관 서포트 시스템에 대해 수행되었다.

Fig. 6은 실험 셋업을 보여준다. 배관 서포트 시스템은 상부층 바닥에 매달리는 형태로 고정되지만, 본 실험에서는 구성을 단순화하기 위하여 실험체의 상하부를 뒤집어 바닥에 고정하였다. 서포트 시스템의 구성요소 중 하나인 채널 보의 한쪽 끝단을 연장한 뒤 액추에이터의 헤드와 연결하였고, 이를 통해 배관 직각방향의 수평하중이 실험체에 전달될 수 있도록 계획하였다. 가력방향 외의 실험체 수평변위를 막기 위하여, 채널 보의 두 지점에 롤러를 이용하여 횡지하였다.



<Fig. 6> Test setup



<Fig. 7> Measurement plan

Fig. 7은 본 실험의 간략한 측정계획을 보여준다. 하중 데이터는 가력시스템에 내장된 로드셀을 이용하여 수집하였고, 실험체의 수평변위 측정을 위해 액추에이터 반대편 채널 보 단부에 LVDT를 설치하였다. 또한 채널 보와 수직재가 연결되는 두 부분에 LVDT를 설치하여, 가력 중 서포트 시스템에 발생하는 수직변위를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

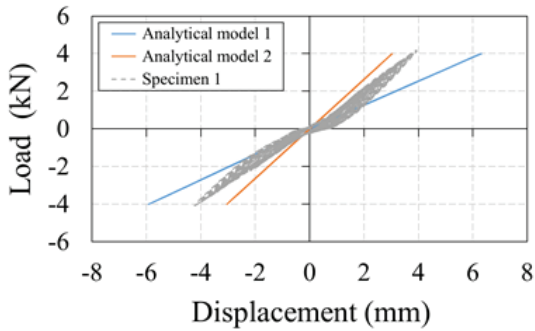
반복하중 실험의 결과는 Table 2에 요약되어 있으며, 개별 실험체의 최대하중(F_{max})과 최대 수평변위(δ_{max})가 정방향 및 부방향에 대해 각각 제시된다. 본 실험에서 모든 배관 서포트 시스템은 계획하였던 가력프로토콜이 종료될 때까지 파괴나 큰 변형을 보이지 않았다. 측정된 실험체의 F_{max} 는 계획하였던 가력프로토콜의 최대 반복하중수준인 4.01 kN보다 약간 높았다. ASHRAE 171에 따른 평가 시 이 배관 서포트 시스템의 최대성능은 예상 목표성능수준인 2 kN의 2배, 즉 4 kN으로 인정된다. 따라서 추후 배관의 내진설계 및 보강에 이 서포트 시스템을 사용할 시 최대 성능의 90% 수준인 3.6 kN이 설계강도로 사용될 수 있다.

본 실험에서 측정된 배관 서포트 시스템의 최대 δ_{max} 는 정방향과 부방향에 대해 각각 5.08 mm와 4.23 mm였다. 이 값들은 기준에서 제한하는 변형한계인 38 mm의 13%와 11%에 해당하는 수준으로, 성능평가 과정에서 발생한 변위는 상당히 작았다. 수직변위 또한 실험이 진행되는 동안 약 1 mm 내외로만 발생했다. 따라서 이 배관 서포트 시스템은 지진발생 시 배관의 움직임을 우수하게 제어할 것으로 판단된다.

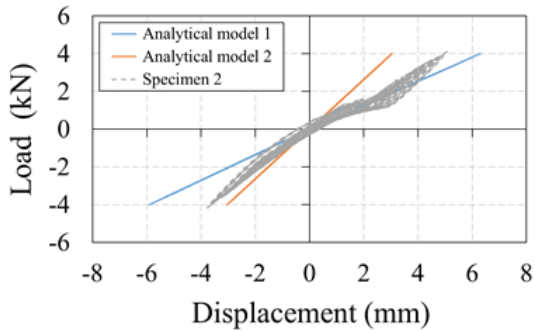
실험체의 하중-변위 그래프는 Fig. 8에 제시되어 있다. 모든 실험체는 실험이 종료될 때까지 두드러진

<Table 2> Cyclic loading test results

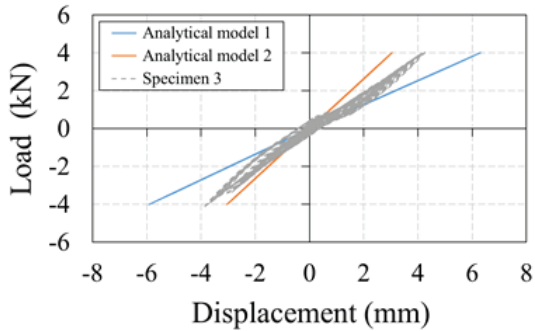
Specimen	F_{max} (kN)		δ_{max} (mm)	
	(+)	(-)	(+)	(-)
1	4.18	4.08	3.93	4.23
2	4.12	4.15	5.08	3.77
3	4.67	4.10	4.27	3.85



(a) Specimen 1



(b) Specimen 2

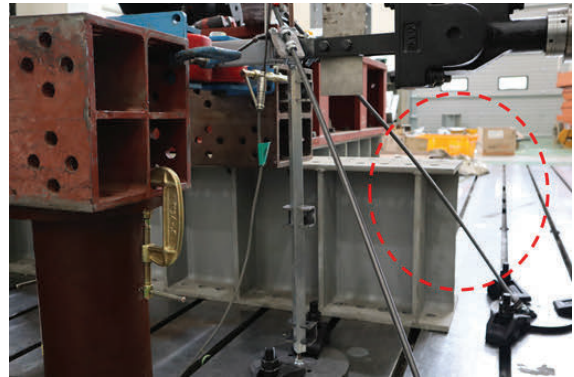


(c) Specimen 3

〈Fig. 8〉 Load-displacement relationships

비선형적 거동을 나타내지 않았다. 한편 Fig. 8에는 해석을 통해 얻은 배관 서포트 시스템의 하중-변위 관계가 실험결과와 함께 비교되어 있다. 여기서 해석모델 1은 시스템 설계개념과 동일하게, 배관 서포트 시스템의 모든 가새들이 압축력 저항 없이, 인장력만 저항할 수 있게 설정한 것이다. 반면 해석모델 2는 가새들이 인장력과 압축력을 모두 저항할 수 있게 한 것으로, 좌굴에 대한 고려 없이 선형 거동으로 가정되었다.

실제의 가새는 일정 수준의 압축력을 지지할 수 있으며, 좌굴강도에 도달한 이후에는 압축력 저항능력이 감소하면서 점차 인장력 전담부재로 바뀌게 된다. 이러한 사



〈Fig. 9〉 Buckling deformation of braces

실을 고려하면, 해석모델 1과 해석모델 2는 각각 본 서포트 시스템의 수평력 저항성능에 대한 상한(upper bound)과 하한(lower bound) 거동을 상정한 경우로 볼 수 있다. Fig. 8의 결과 비교를 통해, 실제 세 실험체의 하중-변위 관계 또한 예상된 것과 같이 두 해석모델의 거동범위 사이에 있었음을 확인할 수 있다.

수평방향 하중 하에서 압축을 받는 가새들은 초기 선형 거동을 하였지만, 하중 수준이 높아지면서 좌굴강도에 도달하여 Fig. 9와 같이 휘어지는 현상을 보였다. 그러나 이러한 변형 거동은 급진적인 부재의 파괴로 이어지지 않고, 점진적이고 안정적으로 진행되었다. Fig. 8에서 시스템의 강성이 변화하며 비선형성을 가지는 일부 구간이 존재하는데, 이는 가새의 비선형 거동과 더불어 바닥 및 가력장치 체결부의 안정화 과정에 기인한 것이다. 이러한 일부 비선형성에도 불구하고 모든 실험체는 전체적으로 선형에 가깝게 매우 안정적으로 거동했다. 본 결과에 기반할 때, 해석모델 1과 같이 가새가 인장력만 저항하도록 설계하는 접근법은 서포트 시스템의 성능을 보수적으로 예측할 수 있는 적절한 방법이라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 국내에서 개발된 경량 배관 서포트 시스템에 대한 요소실험 및 ASHRAE 171에 따른 내진성능 평가를 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 배관 서포트 시스템에 대한 반복하중 실험은 ASHRAE 171에 따라 수행되었다. 3개의 실험체는 모두 계획한 하중프로토콜이 종료될 때까지 파괴나 큰 변형을 나타내지 않았다. 실험결과를 바탕으로, 향후 설계에 사용

할 경량 배관 서포트 시스템의 내진강도는 3.6 kN으로 평가되었다.

2) 실험이 수행되는 동안 배관 서포트 시스템에서 측정된 최대 수평변위는 정방향의 경우 5.08 mm, 부방향의 경우 4.23 mm로, 이 값들은 기준에서 규정하는 변형한계인 38 mm에 비해 매우 작았다. 최대 수직변위도 1 mm 내외로 작게 발생한 점을 함께 고려할 때, 경량 배관 서포트 시스템은 지진발생 시 배관의 움직임을 잘 제어할 것으로 예측된다.

3) 본 실험에서 사용한 배관 서포트 시스템의 가새부재인 M12 전산볼트는 인장력만 저항할 수 있도록 계획하였다. 실제 거동에서 가새는 예측된 것처럼 초기 압축력을 저항한 후 점진적인 휨 거동을 나타냈지만, 전체 시스템의 거동은 선형에 가깝게 매우 안정적이었다. 가새가 인장력만 저항하도록 설계하면 서포트 시스템의 수평력 저항능을 보수적으로 예측할 수 있어, 이 개념은 합리적으로 적용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2021년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S3103759)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

1. Filiatrault, A., Perrone, D., Merino, R. J., & Calvi, G. M., "Performance-based seismic design of nonstructural building elements", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.25, No.2, pp.237~269, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1512910>
2. Hong, H. Y., "Seismic design codes and provisions in the U.S. (미국의 내진설계 법규 및 규정)", *Magazine of the SAREK*, Vol.48, No.7, pp.40~47, 2019.
3. Baek, G. J., "Seismic design of nonstructural elements in overseas cases (비구조 요소의 해외 내진설계 사례)", *Magazine of the SAREK*, Vol.48, No.7, pp.52~57, 2019.
4. Hoehler, M. S., Lutz, C., & Schulze, P., "Testing passive fire-resistance systems for fire following earthquakes", In *Proceedings of Structures Congress 2012*, Chicago, Illinois, 2012.
DOI:<https://doi.org/10.1061/9780784412367.120>
5. Tan, J., Michael Ho, S. C., Zhang, P., & Jiang, J., "Experimental study on vibration control of suspended piping system by single-sided pounding tuned mass damper", *Applied Sciences*, Vol.9, No.2, 285, 2019.
DOI:<https://doi.org/10.3390/app9020285>
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), "Seismic Building Design Code (KDS 41 17 00)", MOLIT, 2022.
7. Perrone, D., Brunesi, E., Filiatrault, A., Peloso, S., Nascimbene, R., Beiter, C., & Piccinin, R., "Seismic numerical modelling of suspended piping trapeze restraint installations based on component testing", *Bulletin of earthquake engineering*, Vol.18, pp.3247~3283, 2020.
DOI:<https://doi.org/10.1007/s10518-020-00832-0>
8. Filiatrault, A., Perrone, D., Brunesi, E., Beiter, C., & Piccinin, R., "Effect of cyclic loading protocols on the experimental seismic performance evaluation of suspended piping restraint installations", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.166, pp.61~71, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.08.004>
9. Wood, R. L., Hutchinson, T. C., Hoehler, M. S., & Kreidl, B., "Experimental characterization of trapeze assemblies supporting suspended nonstructural systems", In *Proceedings of Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Anchorage, Alaska, July 2014.
DOI:<https://doi.org/10.4231/D3D21R19J>
10. ASHRAE Standard Committee 2016-2017,

- “ANSI/ASHRAE Standard 171: Method of Testing for Rating Seismic and Wind Restraints”, ANSI, 2017.
11. Korea Agency for Technology and Standards (KATS), “KS B ISO 898-1: Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel-Part 1: Bolts, screws and studs”, Seoul (Korea), Korean Standards Association, 2023.
 12. Korea Agency for Technology and Standards (KATS), “KS D 3503: Rolled steels for general structure”, Seoul (Korea), Korean Standards Association, 2023.
 13. Jeon, J. S., Kim, J. H., Oh, C. S., & Lee, C. H., “Tensile and Shear Strengths of New Type of Cast-in-Place Concrete Insert Anchors Under Monotonic Loading”, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.21, No.2, pp.49~56, 2021.
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2021.21.2.49>
 14. Jeong, S. D., Oh, C. S., & Lee, C. H., “Experimental evaluation of tension and shear capacities of new headed cast-in specialty inserts in cracked concrete”, International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.17, 40, 2023.
DOI:<https://doi.org/10.1186/s40069-023-00605-4>
 15. Jeong, S. D., Oh, C. S., & Lee, C. H., “Shear performance evaluation of cast-in specialty inserts in cracked concrete according to cyclic loading patterns”, Journal of Korean Association for Spatial Structures, Vol.23, No.2, pp.53~60, 2023.
DOI:<https://doi.org/10.9712/KASS.2023.23.2.53>
 16. CSI (Computers & Structures, Inc.), “CSI Analysis Reference Manual”, ETABS version 17, CSI, 2017.
 17. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), “Design Standard of Structural Steel Members (LRFD) (KDS 14 31 10)”, MOLIT, 2017.
 18. Chen, Y. Z., Cheung, Y. K., & Xie, J. R., “Buckling loads of columns with varying cross sections”, Journal of engineering mechanics, Vol.115, No.3, pp.662~667, 1989.
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:3\(662\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:3(662))
 19. Arbabi, F., & Li, F., “Buckling of variable cross-section columns: integral-equation approach”, Journal of Structural Engineering, Vol.117, No.8, pp.2426~2441, 1991.
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:8\(2426\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:8(2426))
 20. Darbandi, S. M., Firouz-Abadi, R. D., & Haddadpour, H., “Buckling of variable section columns under axial loading”, Journal of engineering mechanics, Vol.136, No.4, pp.472~476, 2010.
DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000096)
- Received : July 27, 2023
 - Revised : August 11, 2023
 - Accepted : August 11, 2023