

실물대 목업실험에 의한 슬라이딩스텝 철골계단의 진동 및 구조성능 평가

김성용¹ · 이철호^{2*} · 김나은³ · 조성상⁴ · 정운옥⁵

¹박사과정, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 서울대학교, 건축학과, ³석사과정, 서울대학교, 건축학과,
⁴부장, 태영건설, ⁵대표이사, 선우이앤지

Evaluation of Vibration and Structural Performance of an Innovative Sliding Step Steel Stair Using Full-Scale Mock-up Test

Kim, Sung Yong¹, Lee, Cheol Ho^{2*}, Kim, Na Eun³, Cho, Sung Sang⁴, Chung, Woon Ok⁵

¹Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

²Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

³Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-744, Korea

⁴General Manager, Taeyoung E&C, Seoul, 150-777, Korea

⁵CEO, Sun Woo Eng Co. Ltd, Hwaseong, Gyeonggi, 445-861, Korea

Abstract - In this study, an innovative steel stair system is presented which enables rapid erection and high quality control in both residential and office building construction. This system features two lightweight steel stringers of box shape, bolted connections easy to absorb construction tolerance, and stair steps movable transversely (or sliding steps) such that the work space needed for concrete stairway wall could be easily provided. In this type of stairway system, other than providing robust connecting details, ensuring vibration performance is especially important since this system may be vibration-sensitive due to lightweight nature and/or probable low damping. To tackle these issues, a series of full-scale mock-up tests were conducted by using box-shape stringer members with or without concrete-fill. The connection system was shown to be sufficiently stiff and strong, or it remained elastic even under the 160% of service load level. Among the seven stringer alternatives, five exhibited satisfactory vibration performance according to the related North American and European acceptance criteria.

Keywords - Sliding step, Steel staircase, Vibration, Serviceability, Safety, Mock-up test

1. 서론

최근 도심 건축물이 초고층화, 대형화, 특수화 되어감에 따라 효율적인 공정 및 공기 관리가 필수적으로 요구되고 있다. 계단 설치의 연속되는 선·후행 골조공사의 작업에 영향

을 주어 공사 기간을 단축하는 데 기여할 수 있는 핵심요소가 다. 하지만 계단 설치를 위한 재래식 공법의 경우 품질관리가 어려울 뿐만 아니라 계단 거푸집의 복잡성 등으로 인해 공기증가의 주된 원인으로 지목되어 왔다.

재래식 계단 공법의 대안으로 일부 건설현장에서 사용되고 있는 기존 시스템 철골계단의 경우 작업공정의 단순화 및 시공 품질 향상 등 상기 문제점을 다소 개선하였지만 중량의 철골 계단 유닛을 설치하기 위해 크레인 등 양중 장비의 사용이 요구되며 철골계단을 슬라이딩시켜 이동하는 과정에서 중량의 철골계단 유닛 전체를 이동해야하기 때문에 상당한 인력수급을 요하는 등 기존의 문제점을 완전히 배제했다고 보기 어렵다.

Note.-Discussion open until June 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 24, 2014; revised August 8, 2014; approved on August 11, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-9061 Fax. +82-2-878-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

슬라이딩스텝(Sliding Step)을 이용한 조립식 철골계단(이하 슬라이딩스텝 철골계단)은 강재 스트링거에 슬라이딩이 가능한 계단판을 조립한 철골계단으로, 대량생산된 철골 유닛을 현장 조립위주의 단순화된 시공으로 조립하여 제작하기 때문에 공기단축이 가능하며 계단 품질 및 시공성, 안전성 확보가 가능하다는 장점이 있다. 하지만 이러한 장점을 살리기 위해서는 철골계단을 구성하는 스트링거와 계단참, 계단판과 스트링거 간의 접합부에 대한 안전성이 전제되어야 하며, 철근콘크리트보다 강성이 큰 철골을 사용하는 관계로 진동에 취약할 수 있기 때문에 적정수준 이상 진동성능이 확보되어야 한다.

본 연구에서는 진동을 최소화하면서 안전성이 확보된 슬라이딩스텝 철골계단의 계단 부재 형상을 도출하고, 실물대 목업 실험을 통해 진동성능 및 안전성을 검증하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험 프로그램

2.1 슬라이딩 계단의 개요

2.1.1 계단의 구성

슬라이딩스텝 철골 계단은 계단 스텝을 지지하는 프레임인 Stringer와 벽체 거푸집 일체 시공을 위해 좌우로 이동이 가능한 슬라이딩스텝 계단판, 그리고 계단참 끝단에 설치되어 스트링거(Stringer)를 연결하기 위한 연결부인 스트링거 연결재(Stringer Connector)로 구성되어 있다 (Fig.1 참조).

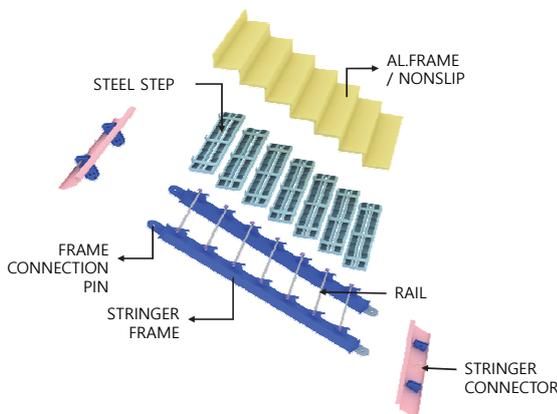


Fig. 1. Components of sliding step system

2.1.2 기본 원리 및 장점

기존 철골계단과 차별화된 슬라이딩스텝의 핵심은 계단판에 슬롯 구멍을 두어 계단판을 계단실 내측으로 슬라이딩시켜 이동할 수 있게 함으로써, 중량의 철골 계단 유닛 전체를 이동해야 했던 종래 슬라이딩식 철골 계단의 문제점을 획기적으로 개선했다는 데에 있다.

Fig. 2(b)와 같이 계단벽체 시공 시 별도의 양중 장비 없이 계단판을 벽체 반대방향으로 이동시킴으로써 벽체 거푸집 시공 시 전혀 지장을 초래하지 않아 작업의 효율성을 도모할 수 있다. 계단벽체 시공 후에는 계단판을 다시 벽체 측으로 이동시켜 원상태로 돌려놓음으로써 Fig. 2(a)와 같은 계단의 최종 형태를 손쉽게 갖출 수 있도록 하였다.



(a) Step in general

(b) After moving step

Fig. 2. sliding step system in general (Left), after moving steps (Right)

2.2 실험세트 구성

총 7개의 실험세트는 스트링거의 크기 및 콘크리트의 채움 여부에 따라 주거용계단 4개, 사무용계단 3개로 구성되어 있다. Table 1은 실험세트에 대한 정보를 요약한 것이다. 계단의 용도에 따라 스트링거의 길이가 다르므로 주거용계단과 사무용계단을 구분하여 설치하였으며, 우선 주거용 두 개, 사무용 한 개의 계단에 대해 진동평가를 실시한 후, 계단 스트링거를 해제, 다른 주거용 두 개, 사무용 두 개의 계단을 거치하여 재차 측정을 실시하였다(Fig. 3참조). 주거용계단은 2366mm의 스트링거 두 개가 계단참에 의해 연결되어있고, 사무용계단은 3638mm의 스트링거 하나로 구성되어 있다. 스트링거 및 계단판은 일반 구조용 강재 SS400을 사용하여 400MPa의 인장강도를 가지며 콘크리트는 26.16MPa의 재령 28일 강도를 가짐을 확인하였다.

Table 3. Calculation of design loads

Use	Step area (m ²)	Number of steps (EA)	Basic uniform live load (kN/m ²)	Design load (kN)	1.6 x design load (kN)
Residence	0.322	7	3.0	6.762	10.819
Office	0.322	11	3.0	10.626	17.002

재하하였다. 점진적 재하를 위해 총 재하 하중을 8회에 나누어 재하하였으며, 최대처짐은 재하 후 네 시간 후에, 잔류처짐은 하중 제거 후 한 시간 후에 측정을 실시하였다.

3.1.3 스트링거 중앙부 즉시처짐 측정을 통한 사용성 검토

보의 사용성은 상황에 따라 여러 설계변수가 복잡하게 관여하기 때문에, 통상 구조설계기준에서는 보의 진동 사용성 확보를 위한 처짐제한을 확실히 명시하지 않는다. 하지만 일반적으로 사용성에 대한 처짐하중으로써 설계하중에 대해 $\Delta \leq l/360$ 이 요구되며, 여기서 Δ 와 l 은 각각 처짐과 경간을 나타낸다. 이에 따라 본 실험체의 경우 주거용, 사무용 계단의 처짐제한은 각각 7.64mm, 10.86mm이다.

Fig. 5는 주거용과 사무용 계단에서 설계하중과 설계하중의 160%에 대한 재하실험을 통한 처짐을 도시한 것이다. 점진적 재하를 통해 총 재하 하중이 설계하중의 160%에 도달하더라도 중앙부의 변형이 선형성을 띄는 등 탄성상태를 유지하고 있으며, 점진적 하중 제거 시 다시 원상태로 돌아오음을 확인할 수 있다. 주거용과 사무용 계단의 경우 각각 0.04mm와 0.54mm의 잔류처짐(Δ_{res})이 발생하였으나, 볼트접합부의 미끄러짐이나 구조적 연속성에 따른 영향들을 고려했을 때 극히 미미한 값으로 계단의 사용성에 영향을 끼치지 못하는 무시할만한 수준으로 판단된다.

주거용 계단의 경우 설계하중 6.762kN에 의한 처짐은 0.32mm(Δ_{LL}) 발생했으며, 이는 사용성 확보를 위한 처짐제한인 7.64mm(Δ_{allow}) 미만으로 처짐제한의 1/20수준에 그치는 등 극히 미미하기 때문에 사용성에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 또한 안전성 검토를 위해 설계하중의 160%수준인 10.819kN을 재하한 결과 총 하중이 재하될 때까지 스트링거는 탄성상태를 유지하였기에 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 내력을 보유한 것으로 평가된다.

사무용 계단의 경우 설계하중 10.626kN에 의한 처짐은 1.06mm(Δ_{LL}) 발생했으며, 이는 사용성 확보를 위한 처짐제한인 10.86mm(Δ_{allow}) 미만으로 처짐제한의 1/10수준에 그

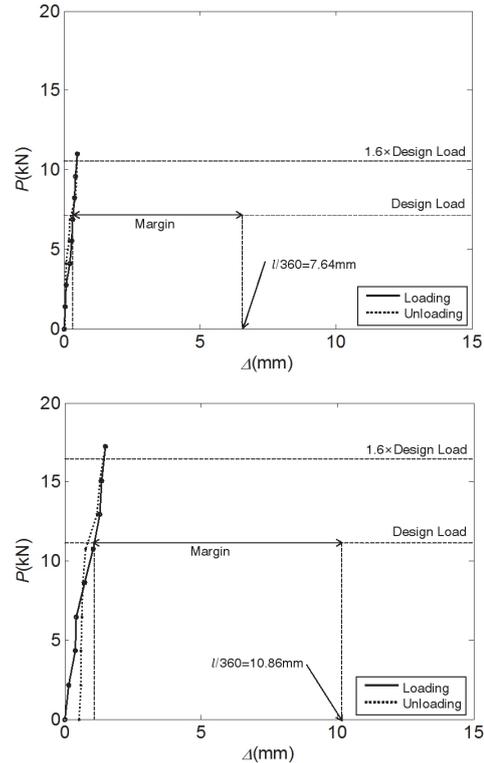


Fig. 5. Deflection at the center for residential stair (top) and office stair (bottom)

Table 4. Summary of the load test results

	Δ_{res} (mm)	Δ_{LL} (mm)	Δ_{allow} (mm)	$\Delta_{LL} / \Delta_{allow}$
Residence	0.04	0.32	7.64	0.049 (1/20) (O.K.)
Office	0.54	1.06	10.86	0.105 (1/10) (O.K.)

치는 등 극히 미미하기 때문에 사용성에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 또한 안전성 검토를 위해 설계하중의 160%수준인 17kN을 재하한 결과 총 하중이 재하될 때까지 스트링거는 탄성상태를 유지하였기에 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 내력을 보유한 것으로 평가된다. 주거용 및 사무용 계단의 잔류처짐, 설계하중에 의한 처짐 및 허용처짐 산정값을 Table 4에 정리하였다.

3.1.4 스트링거 연결재 매립부의 안전성 검토

스트링거 연결재의 경우 철근콘크리트조와 철제 스트링거가 접합되는 부분으로 구조적으로 가장 취약한 부분이다. Fig. 6은 변형률 측정을 위한 변형률게이지 부착 위치를 나

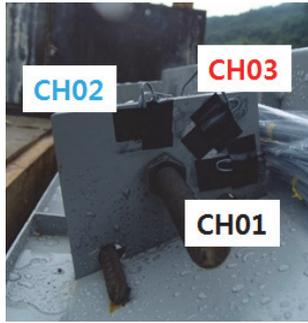


Fig. 6. The locations of strain gauge

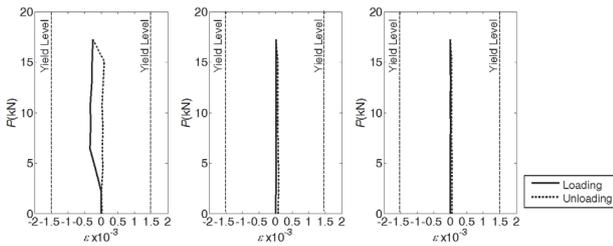


Fig. 7. The results of load-strain for stringer connection

타낸 것으로, 스트링거 연결재 매립부의 측단부(CH01), 연단부(CH02)와 45° 방향(CH03)에 변형률게이지를 설치한 후 스트링거에 설계하중의 160%까지 점진적으로 재하하여 이 때 변형률의 항복수준 도달 여부를 확인하였다.

Fig. 7은 매립된 강재의 변형률을 도시한 것이다. 측단부의 경우 연단부 및 45° 방향에 비해 상대적으로 큰 변형이 관측되나 160%의 설계하중이 재하된 시점의 최대변형률이 항복변형률의 1/3수준에 미치는 것으로 나타났다. 또한 연단부와 45° 방향 지점의 경우 극히 미미한 변형이 관측되었다. 스트링거 연결재 매립부는 160% 수준의 설계하중에 대해서 항복하지 않은 채 탄성상태를 유지하였으며, 실제로 재하시험 이후 접합부에서 어떠한 균열 등이 발견되지 않았다. 따라서 본 연결재의 매립부는 구조설계상 요구되는 설계하중을 지지할 수 있는 안전성을 확보한 것으로 평가된다.

3.2 고유진동수 및 감쇠비 측정 실험

3.2.1 실험개요

임팩트해머 테스트를 실시하여 계단의 동적 특성인 고유진동수 및 감쇠비를 측정하였다(Fig. 8). 가속도계는 응답이 가장 클 것으로 예상되는 계단 스트링거의 중앙부 하단에 부착하였으며, 임팩트해머를 통해 계단 스트링거 중앙 하단부를 가력하여 동적 특성을 규명하기 위한 데이터를 수집하였



Fig. 8. Impact hammer test

다. 각 계단 별로 총 세 차례 가력한 후, 여기서 얻은 주파수 응답함수의 평균을 취하여 최종 주파수응답함수를 얻었다. 계단의 동적 특성인 고유진동수와 감쇠비를 산정하기 위한 기법으로 로그감쇠율법(Logarithmic decrement method)을 사용하였다^[1].

3.2.2 주거용계단의 고유진동수 및 감쇠비

□125x75x4.5 강재를 사용한 경우, R-□125x75x4.5-F와 R-□125x75x4.5-NF 모두 25Hz에서의 진동모드가 관찰되었으며, 콘크리트를 채운 실험체의 경우 30Hz에서 추가적인 진동모드가 관찰되었다. Fig. 9는 주거용 계단의 주파수응답함수를 도시한 것이며, 각 계단의 고유진동수 및 감쇠비는 Table 5에 요약하였다.

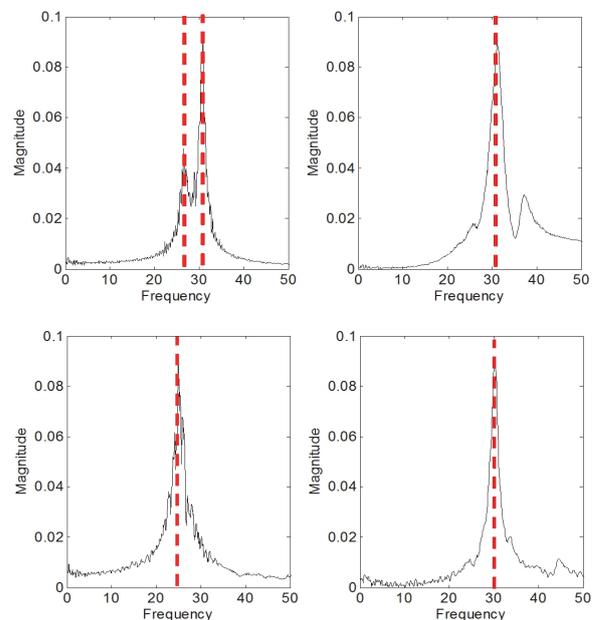


Fig. 9. Frequency response (clockwise from top left) R-□125x75x4.5-F, R-□150x100x4.5-F, R-□150x100x4.5-NF and R-□125x75x4.5-NF,

Table 5. Natural frequencies and damping ratios

Use	Specimen	Natural frequency (Hz)	Damping ratio (%)
Residential	R-□125x75x4.5-F	31.50	3.50
	R-□125x75x4.5-NF	25.80	4.59
	R-□150x100x4.5-F	32.00	3.85
	R-□150x100x4.5-NF	30.80	2.30
Office	O-□150x100x4.5-F	16.00	2.13
	O-□200x100x4.5-F	22.00	3.21
	O-□200x100x4.5-NF	24.25	4.05

□150x100x4.5 강재를 사용한 경우, R-□150x100x4.5-F와 R-□150x100x4.5-NF 모두 30Hz에서의 진동모드가 관찰되었다. 보행하중으로 인한 공진 발생여부의 분기점으로 여겨지는 고유진동수 10Hz를 각 실험체 모두 상회하기 때문에 공진현상이 일어나지 않으며, 진동성능이 우수하다고 판단된다^[2].

주거용 계단의 경우, 순철골 실험체(-NF) 대비 콘크리트 채움 실험체(-F)의 경우 고유진동수 변화가 거의 없는데, 이는 콘크리트를 채움으로 인해 강성이 다소 증가하는 만큼 질량도 증가하기 때문이다. 또한, 부재의 크기를 증가시킬 경우 크기 증가로 인해 고유진동수가 다소 증가하며 진동에 약간이나마 유리하게 작용할 여지가 있다. 감쇠비는 3~4% 수준으로 일반적인 철골 구조물 설계 시 AISC에서 실내외 보도교 설계 시 사용하도록 권장하는 감쇠비인 1%와 SCI에서 전용접 철골구조 및 계단 설계 시 사용하도록 권장하는 0.5%를 크게 상회한다.

3.2.3 사무용 계단의 고유진동수 및 감쇠비

실험체 O-□150x100x4.5-F와 □200x100x4.5 강재를 사용한 두 실험체 O-□200x100x4.5-F 및 O-□200x100x4.5-NF 모두 보행하중으로 인한 공진 발생여부의 분기점으로 여겨지는 10Hz를 상회하는 16Hz 및 22Hz의 진동모드가 관찰되었으며, 이 경우 보행 가진으로 인한 공진현상이 일어나지 않는다고 판단된다. Fig. 10은 사무용 계단의 주파수 응답함수를 도시한 것이다.

사무용 계단의 경우, 주거용 계단과 마찬가지로 순철골 실험체(-NF) 대비 콘크리트 채움 실험체(-F)의 경우 고유진동수 변화가 거의 없는데 이는 콘크리트를 채움으로 인해 강성이 다소 증가하는 만큼 질량도 증가하기 때문이다.

감쇠비는 2~4% 수준으로 주거용 계단과 마찬가지로 AISC나 SCI에서 일반적인 철골 구조물 설계 시에 사용하는 감쇠비인 1%와 0.5%를 상회함을 확인하였다.

3.3 진동성능 평가실험

3.3.1 실험개요

본 평가에서는 다양한 연령 및 체중 조건을 반영하기 위해 20~50대의 다양한 연령대와 68~80kgf의 체중에 이르는 실험자를 표본으로 선정하였으며, 선정된 총 7인의 실험 참가자들이 각각 1인 정상보행(상행 및 하행)과 속보(상행 및 하행)를 통해 계단을 가진하도록 하였다. Table 6은 보행실험 참가자들의 연령, 신장 및 체중을 요약한 것이다.

가속도계는 응답이 가장 클 것으로 예상되는 계단 스트링거의 중앙부 하단에 부착하였다. 각 시간이력은 가속도계를

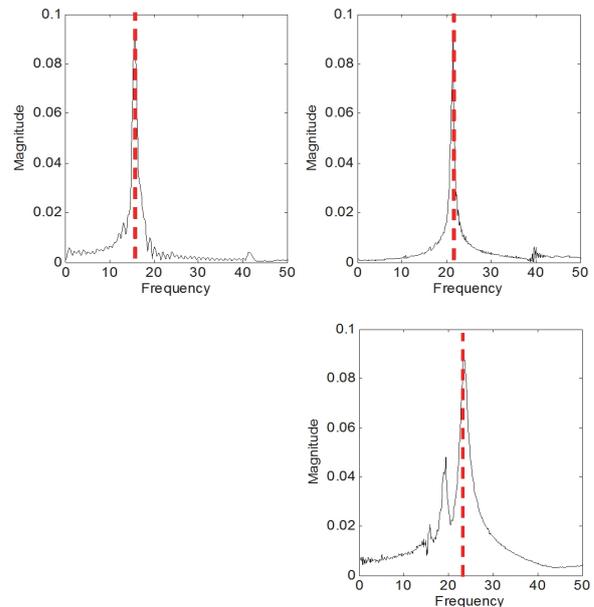


Fig. 10. Frequency response (clockwise from top left) O-□150x100x4.5-F, O-□200x100x4.5-F and O-□200x100x4.5-NF



Fig. 11. Walking test

Table 6. Information of participants

Participant	1	2	3	4	5	6	7
Age (years)	58	54	42	31	30	27	26
Height (cm)	170	170	169	180	170	178	174
Weight (kgf)	80	68	73	80	80	74	69

이용하여 계측하였으며, FFT 분석기를 통해 데이터들을 수집 및 분석하였다.

3.3.2 진동성능 평가 지표 선정

계단을 오르는 경우(상행)과 내려오는 경우(하행) 중 어느 경우의 응답이 큰가의 여부에 관한 다양한 예측과 실험결과 등이 보고되었으나, 이에 대한 일반적인 합의는 이루어지지 않은 상태이다. Kerr and Bishop (2001) 는 하행 시 미끄러짐에 대한 두려움으로 보행자가 안전하게 걷고자 하는 경향을 보이며 계단에 대한 보행하중이 작아지는 것으로 보고하고 있는 반면에^[3], Bishop, N. W. M. et al. (1995)는 상행 및 하행의 여부와 관계없이 보행 속도에 따라 보행하중의 크기가 다르게 나타나며, 특히 1.87Hz에서 1.94Hz 사이의 일반보행의 경우와 빠르게 걷는 경우, 하행 시 보행하중이 더 크게 나타난다고 보고하고 있다^[4].

Fig. 12는 본 실험을 통해 얻은 상행과 하행 간 최대응답 가속도의 평균값을 비교한 그래프로, 분석 결과 두 경우 간 유의미한 차이는 발견되지 않았다. 따라서 본 계단의 진동성능을 평가하기 위해 상행과 하행을 따로 구분하지 않고 정상보행 및 속보에 대한 최대값의 평균을 산정하여 이를 진동성능 평가지표로 활용하였다.

주파수 분석 결과, 모든 실험체에서 공통적으로 가진 보행진동수인 2Hz나 그 정수배의 대역에서 직접적인 가진으로 인한 응답성분이 관측되는데, 이는 계단의 고유진동수 부근에 비해 극히 미미한 수준으로써 가진에 의한 공진이 일어

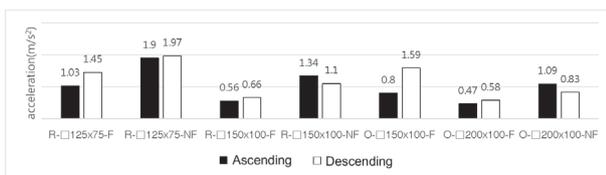


Fig. 12. Comparison with the peak response acceleration between ascending and descending stairs

나지 않음을 확인할 수 있다. 주거용 계단 실험체에서 실시한 1인 정상보행(상행 및 하행) 실험결과 얻어진 응답의 시간 이력과 주파수 분석 결과는 Fig. 13과 Fig. 14에 도시하였다.

사무용 계단 역시 가진에 의한 공진이 관측되지 않았다. 전반적으로 스트링거에 콘크리트를 채운 경우가 채우지 않은 경우에 비해 좋은 진동성능을 보이고 있으며, 스트링거 부재의 크기가 큰 실험체가 작은 실험체에 비해 더 나은 진동성능을 보임을 확인하였다. 또한, 실험 참가자 중 어느 누구도 보행진동에 따른 불쾌감이나 불안감을 보고하지 않았다. Fig. 15에서 Fig. 16은 사무용 계단 실험체에서 실시한 1인 정상보행(상행 및 하행)의 실험결과를 도시한 것이다.

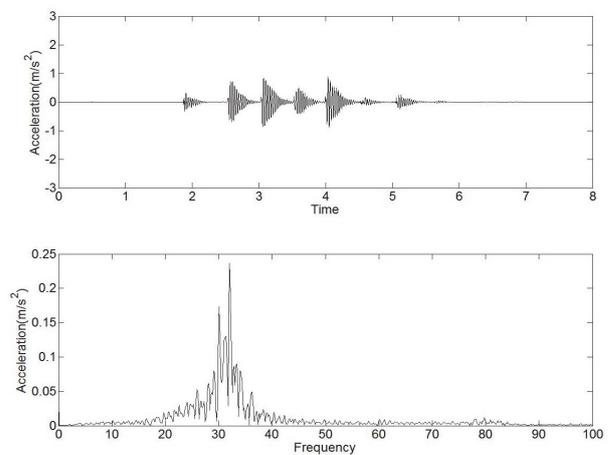


Fig. 13. The acceleration response-time history of the footfall loading (top) and amplitude spectrum of acceleration response (bottom) of R-□150x100x4.5-F

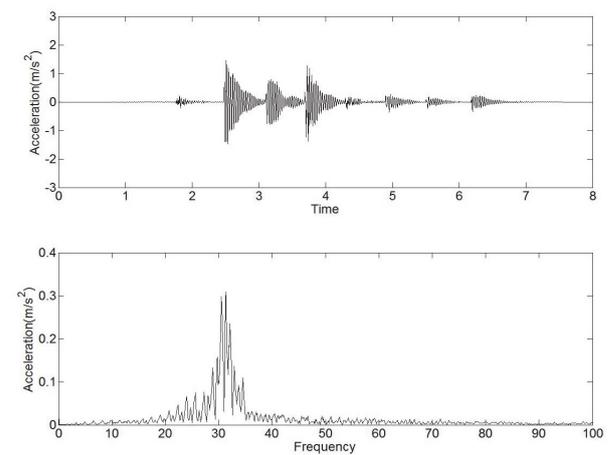


Fig. 14. The acceleration response-time history of the footfall loading (top) and amplitude spectrum of acceleration response (bottom) of R-□150x100x4.5-NF

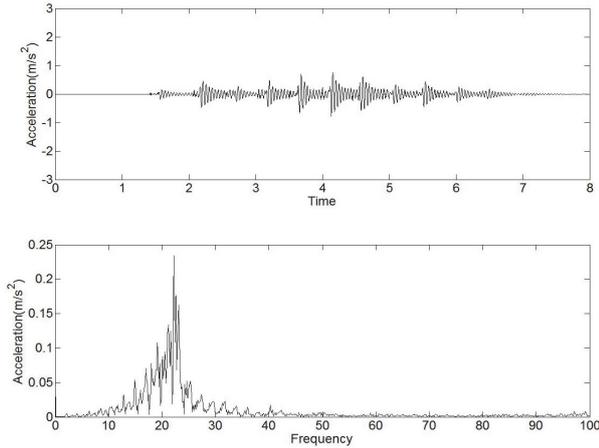


Fig. 15. The acceleration response-time history of the footfall loading (top) and amplitude spectrum of acceleration response (bottom) of O-□200x100x4.5-F

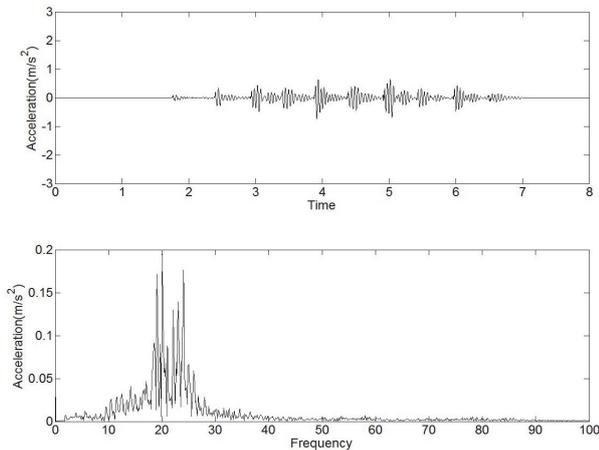


Fig. 16. The acceleration response-time history of the footfall loading (top) and amplitude spectrum of acceleration response (bottom) of O-□200x100x4.5-NF

4. 진동 성능 및 사용성 평가

4.1 진동성능 평가 방법

슬라이딩스텝 철골 계단의 진동성능을 평가하기 위하여 미국 강구조학회(AISC, American Institute of Steel Construction)의 지침서 AISC Design Guide #11 (Murray, et al., 1997)에서 제시한 방법과 영국 강구조학회(SCI, Steel Construction Institute)의 기술자료 SCI-P354(Smith, et al., 2007)에서 제시한 방법을 적용하였다^{[5],[6]}.

4.1.1 AISC Design Guide #11

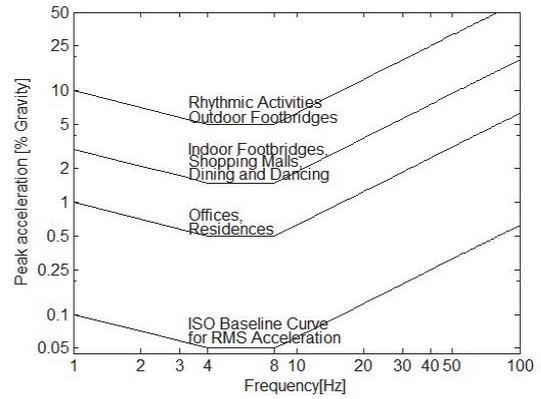


Fig. 17. Serviceability standard curve of AISC for floor vibration

AISC의 사용성 기준은 건물을 사무소 및 주거용 건물, 실내 보도교와 실외 보도교의 세 가지 용도로 구분하여 각각에 대한 평가 곡선을 제시하고 있다. Fig. 17은 ISO(1993) 기준을 바탕으로 작성된 AISC의 사용성 기준을 나타낸 것으로, 1571b(=71.2kgf=0.7kN) 체중인 사람의 1인 정상보행을 기준으로 한다^[7].

AISC 사용성 기준의 경우 계단에 대한 명확한 기준이 없음에도 불구하고 진동 사용성 평가를 목적으로 가장 빈번하게 사용되는 기준이기 때문에, 본 기준을 통해 사용성 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 Bishop, N. W. M. et al. (1995)이 제안한 계단 성능 평가 시 참고해야 할 아래 세 가지 사항을 감안하여 평가를 위한 기준점을 선정하였다.

- (1) 상/하행 간 일부 보행자가 주변을 둘러보거나 반대편으로부터 오는 보행자에 의해 잠시 동안 보행을 멈추는 일이 발생하는가의 여부
- (2) 다수의 고령자가 해당 계단을 이용하는가의 여부
- (3) 계단 근처에 있는 여타 부동의 구조물을 인지함으로써 상대적으로 계단의 진동에 대해 더 민감해질 수 있는가의 여부

위 사항에 비추어 봤을 때 본 평가의 대상이 되는 계단의 경우는 거주자가 장시간 거주하는 공간이 아니며, 현재 주거용 및 사무용 계단이 실제로는 활발한 통과공간으로 사용되지 않기 때문에 반대편으로부터 오는 보행자에 의한 보행 멈춤 현상이 거의 일어나지 않는다는 점, 거주 및 건물을 이용하는 거주자 중 고령자의 경우 계단보다는 엘리베이터나 에스컬레이터 등 여타 승강장비의 이용을 선호한다는 점, 일반

적으로 폐쇄 공간인 계단실의 경우 여타 부동의 구조물이 존재하지 않기 때문에 진동에 대해 더 민감해질 여지가 없다는 점 및 평가대상이 단순통과공간인 점을 감안하여 실외 보도교(Outdoor footbridges)의 기준을 적용하였다.

4.1.2 SCI-P354

AISC의 사용성 기준이 바닥의 최대응답가속도를 토대로 진동성능을 평가하는데 반해, SCI의 사용성 기준은 RMS (Root mean square) 응답가속도로 진동성능을 평가한다. 진동을 고려하는 시간 T초 동안 주어진 응답가속도 a(t)의 RMS 응답가속도 a_{RMS} 는 식 (1)을 통해 계산한다.

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a(t)^2 dt} \tag{1}$$

시간 T는 적어도 한 주기 이상의 시간을 택해야 하며, 선택한 시간의 길이에 크게 영향을 받는다. 대개는 1초 이하부터 60초까지의 시간을 택하나, 현재 영국의 실무기준은 RMS 가속도를 계산할 때 필요한 표준시간에 대한 정보가 전

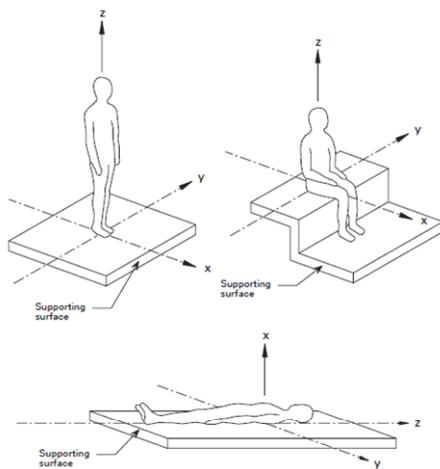


Fig. 18. Directions for vibration

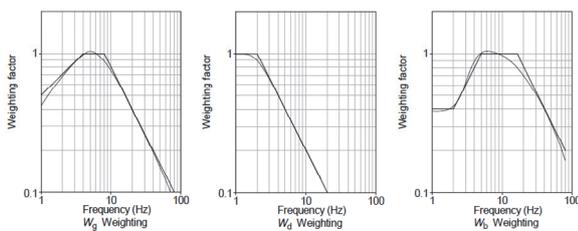


Fig. 19. Frequency weighting curves

무하다. 이에 Eriksson(1994)은 10초를 적합한 값으로 제안 하였으나, 제한된 몇 걸음만이 가능한 계단의 경우에는 적용 할 수 없다. 이 경우 SCI-P354와 ISO(1997)에서는 1초의 시간을 택할 것을 제안하고 있다^[8].

SCI의 사용성 기준 역시 76kgf 체중인 사람의 1인 정상보행을 대상으로 하며, 진동이 인체에 전달되는 방향과 진동수에 따르는 가중치를 식 (1)에서 구한 RMS 응답가속도에 곱한 값을 지표로 진동응답을 평가한다. Fig. 18는 진동이 인체에 전달되는 방향을 나타내는 신체방향 좌표계를 도시한 것이며, Fig. 19는 진동수 별 인체의 민감도를 반영한 진동수 대역 별 가중계수를 나타낸 것이다.

Table 7는 바닥용도에 따른 적용가중계수를 나타낸 것으로, 계단의 경우 작업장과 동선 공간에서 척추방향의 진동에 대한 가중함수인 W_b 를 적용하여 진동수에 따른 인체의 민감도를 고려하였다. 진동성능 평가를 위한 가중 RMS 응답가속도는 식 (2)를 통해 계산한다.

$$a_{w,rms} = a_{RMS} \times W \tag{2}$$

여기서 a_{RMS} 는 식 (1)을 통해 구한 RMS 응답가속도, W는 진동에 대한 가중함수로 계단의 경우 가장 연관성이 높은 ‘작업장과 동선 공간’ 기준을 준용하여 이 경우의 사용곡선 W_b 를 적용하였다. 가중 RMS 응답가속도가 정해지면 응답계수는 식 (3)을 통해 계산하며 이 값은 Table 8의 응답계수를 넘지 않아야 한다.

$$R = \begin{cases} a_{w,rms}/0.005 & z \text{ 축} \\ a_{w,rms}/0.00357 & x, y \text{ 축} \end{cases} \tag{3}$$

Table 7. Weighting factors appropriate for floor design

Room type	Axis of vibration	Category	Weighting curve
Critical working areas (e.g. hospital operating theatres, precision laboratories)	z-axis	Vision/Hand control	W_g
	x-, y-axis	Perception	W_d
Residential, offices, wards, general laboratories, consulting rooms	z-axis	Discomfort	W_b
	x-, y-axis	Discomfort	W_d
Workshop and circulation spaces	z-axis	Discomfort	W_b
	x-, y-axis	Discomfort	W_d

Table 8. Recommended multiplying factors based on single person excitation

Type	Multiplying factor for exposure to continuous vibration R
Office	8
Shopping mall	4
Dealing floor	4
Stairs - Light use (e.g. offices)	32
Stairs - Heavy use (e.g. public buildings, stadia)	24

여기서 a_{RMS} 는 식(2)를 통해 계산한 가중 RMS 응답가속도이다. 본 계단의 경우 ‘계단-작은 하중(사무실)’ 기준을 준용하여 응답계수 R=32를 기준으로 계단의 진동성능을 평가하였다.

4.2 사용성 평가

4.2.1 AISC Design Guide #11을 통한 평가

Fig. 20은 실외 보도교에 대한 AISC 사용성 기준에 대해 주거용 및 사무용 계단 실험세트의 진동성능을 평가한 결과를 도시한 것이다. 주거용 계단의 경우, R-□125x75x4.5-F, R-□150x100x4.5-F와 R-□150x100x4.5-NF 계단이 AISC의 실외 보도교 기준에 만족하였다. 사무용 계단의 경우에는 O-□200x100x4.5-F와 O-□200x100x4.5-NF가 AISC의 실외 보도교 기준에 만족하는 것으로 평가되었다.

4.2.2 SCI-P354를 통한 평가

SCI-P354는 현재 계단의 진동성능평가와 관련한 거의 유일한 기술지침이다. 실험결과로부터 식(1)을 통해 계산한 RMS 응답가속도를 바탕으로 SCI-P354를 적용하여 진동성능을 평가하였다. RMS응답가속도를 얻기 위한 시간은 통상 1초를 택하나, 택하는 구간의 시점과 종점에 따라 비보수적인 응답계수가 얻어진다. 이에 본 평가에서는 보수적인 평가를 위해 최대응답가속도가 나타나는 걸음과 그 전후 걸음을 포함한 세 걸음을 대상으로 응답계수를 산정하였다.

3.2절에서 제시한 절차를 바탕으로 산정한 응답계수를 Table 9에 정리하였다. 최대응답가속도를 통한 비교결과와 마찬가지로 응답계수를 토대로 진동성능을 평가한 결과 역시 전반적으로 스트링거에 콘크리트를 채운 경우가 채우지 않은 경우에 비해 좋은 진동성능을 가지며, 스트링거 부재의

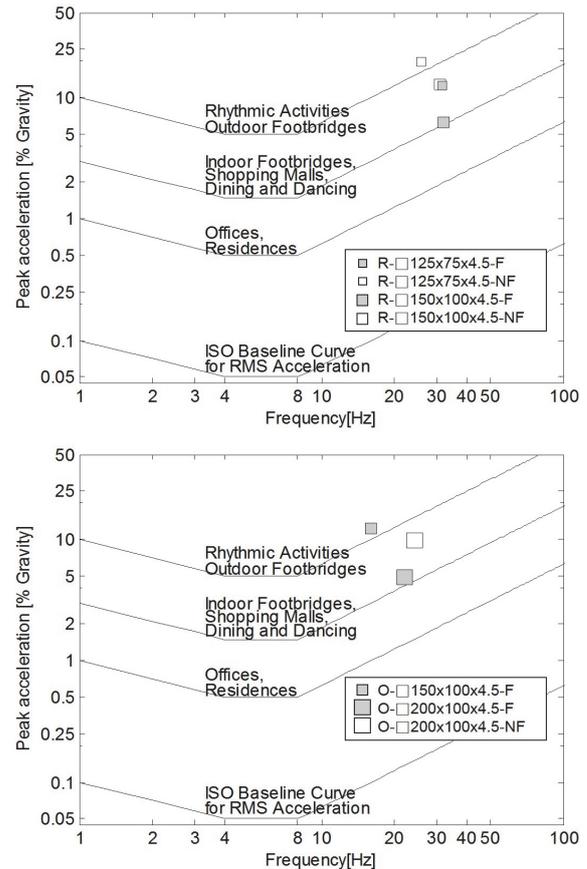


Fig. 20. Assessment of vibration via AISC serviceability curve

Table 9. Assessment of vibration via serviceability standard of SCI

Use	specimens	R	R/32	contentment
Residential	R-□125x75x4.5-F	28.0	0.87	O.K.
	R-□125x75x4.5-NF	46.1	1.44	N.G.
	R-□150x100x4.5-F	13.2	0.41	O.K.
Office	R-□150x100x4.5-NF	30.5	0.95	O.K.
	O-□150x100x4.5-F	80.2	2.51	N.G.
	O-□2000x100x4.5-F	18.4	0.57	O.K.
	O-□2000x100x4.5-NF	25.8	0.81	O.K.

크기가 큰 실험체가 작은 실험체에 비해 더 나은 진동성능을 보인다. 주거용 계단의 경우, R-□125x75x4.5-F, R-□150x100x4.5-F 및 R-□150x100x4.5-NF강재를 사용한 계단이 SCI 기준을 만족하였다. 사무용 계단의 경우에는, O-□200x100x4.5-F와 O-□200x100x4.5-NF의 경우 SCI 기준을 만족함을 확인할 수 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 시공성 향상을 위해 개발된 슬라이딩스텝 조립식 계단을 구성하는 부재의 최적 크기를 결정하고, 실물 대 목업 실험을 통해 계단의 진동특성 규명, 진동성능 평가 및 재하실험을 통한 스트링거와 계단참에 매립된 연결재의 안전성능을 검증하고자 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 주거용 계단의 경우, 설계하중 6.762kN에 의한 처짐은 0.32mm 발생했으며, 이는 사용성 확보를 위한 처짐제한인 7.64mm의 미만으로 처짐제한의 1/20수준에 그치는 등 극히 미미하기 때문에 사용성에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 안전성 검토를 위해 설계하중의 160%수준인 10.819kN을 재하하였다. 총 하중이 재하될 때까지 스트링거는 탄성상태를 유지하였기 때문에 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 내력을 보유한 것으로 평가된다.
- (2) 사무용 계단의 경우 설계하중 10.626kN에 의한 처짐은 1.06mm 발생했으며, 이는 사용성 확보를 위한 처짐제한인 10.86mm의 미만으로 처짐제한의 1/10수준에 그치는 등 극히 미미하기 때문에 사용성에 문제가 없는 것으로 확인되었다. 안전성 검토를 위해 설계하중의 160%수준인 17kN을 재하하였다. 총 하중이 재하될 때까지 스트링거는 탄성상태를 유지하였기 때문에 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 내력을 보유한 것으로 평가된다.
- (3) 재하실험 결과 스트링거 연결재 매립부는 160% 수준의 설계하중에 대해서 최대변형률이 항복변형률의 1/3수준에 미치는 등 항복하지 않은 채 탄성상태를 유지하였다. 또한 재하실험 후에도 접합부에서 어떠한 균열이나 이상이 발견되지 않았다. 따라서 본 스트링거 연결재의 매립부는 구조설계상 요구되는 설계하중을 지지할 수 있는 안전성을 확보한 것으로 평가된다.
- (4) 주거용 계단의 경우, R-□125x75x4.5-F, R-□150x100x4.5-F, R-□150x100x4.5-NF의 경우 북미기준과 유럽기준의 사용성 기준을 모두 만족함을 확인하였다. 해당 계단의 고유진동수는 각각 31.5, 32, 30.8Hz로 공진 가능성이 제기될 수 있는 저진동수 바닥의 고유진동수 분기점인 10Hz를 크게 상회하며, 감쇠비는 각각 3.50, 3.85, 2.30%로 북미기준과 유럽기준에서 계단 설계 시 사용하도록 권장하는 감쇠비인 1%와 0.5%를 2-7배 가량 상회하는 등 우수한 진동성능을 발휘함을

확인하였다.

- (5) 사무용 계단의 경우, O-□150x100x4.5-F, O-□200x100x4.5-NF의 경우 북미기준 과 유럽기준을 모두 만족함을 확인하였다. 해당 계단의 고유진동수는 각각 22Hz와 24.25Hz로 공진 가능성이 제기될 수 있는 저진동수 바닥의 고유진동수 분기점인 10Hz를 상회하며, 감쇠비는 각각 3.21%와 4.05%로 북미기준과 유럽기준에서 계단 설계 시 사용하도록 권장하는 감쇠비인 1%와 0.5%를 3-8배 가량 상회하는 등 우수한 진동성능을 발휘함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 (주)태영건설의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Chopra, A.K. (1995) *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (Volume 3)*, Prentice Hall, USA.
- [2] Middleton, C.J., and Brownjohn, J.M.W. (2010) Response of High Frequency Floors: A Literature Review, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.32, No.2, pp.337-352.
- [3] Kerr, S.C., and Bishop, N.W.M. (2001) Human Induced Loading on Flexible Staircases, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.23, No.1, pp.37-45.
- [4] Bishop, N.W.M., Willford, M., and Pumphrey, R. (1995) Human Induced Loading of Flexible Staircases, *Safety Science*, Elsevier, Vol.18, No.4, pp.261-276.
- [5] Murray, T.M., Allen, D.E., and Ungar, E.E. (1997) *Floor Vibrations Due to Human Activity (Steel Design Guide 11)*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [6] Smith, A.L., Hicks, S.J., and Devine, P.J. (2007) *Design of Floors for Vibration: A New Approach*, The Steel Construction Institute, UK.
- [7] International Organization for Standardization (1997) *Mechanical Vibration and Shock: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration, Part 1: General Requirements (ISO 2631-1: 1997(E))*, Switzerland.
- [8] Eriksson, P.E. (1994) *Vibration of Low-Frequency Floors: Dynamic Forces and Response Prediction*, Chalmers University of Technology, Sweden.

요 약 : 본 연구에서는 주거용 및 사무용 계단시공의 작업공정의 단순화 및 시공품질 향상을 목적으로 개발된 혁신적인 계단 시스템인 슬라이딩스텝 철골계단의 진동 및 구조성능 평가를 수행하였다. 슬라이딩스텝 철골계단은 각형 강재 스트링거와 시공오차를 흡수할 수 있도록 설계된 스트링거 연결재 및 계단벽체 시공이 용이하도록 벽체 반대방향으로 이동이 가능한 슬라이딩 스텝으로 구성되어 있다. 하지만 철골계단의 경우 철골 접합부의 구조적 안전성 확보와 더불어, 비교적 경량에 저감쇠인 철골재 사용으로 인한 낮은 진동성능이 발현될 수 있기 때문에 진동성능에 대한 확보를 파악하는 것이 필수적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 진동성능 및 구조적 안전성 확보여부를 파악하기 위해 실물대 목업실험을 실시하였다. 진동성능 및 중량으로 인한 경제성 등을 종합적으로 판단하기 위해 콘크리트를 채운 스트링거와 콘크리트를 채우지 않은 스트링거를 교체해가며 각 경우에 대한 주거용 및 사무용 계단의 진동성능을 평가하였다. 또한 각 용도별로 한 개의 계단을 선정하 후, 재하실험을 통해 철골 접합부의 구조적 안전성과 스트링거 중앙부의 잔류 처짐 및 사용성 검토를 수행하였다. 실물대 목업실험 결과 접합부 시스템의 경우 사용하중의 160%인 극한하중에 대해서도 탄성상태를 유지하며 재하실험 후에도 어떠한 균열이나 이상이 발견되지 않는 등 충분한 강성과 강도를 확보하고 있음을 확인하였다. 또한 스트링거 중앙부 처짐은 주거용/사무용 계단 모두 역시 동일한 하중조건 하에서 사용성에 문제가 없을 정도의 미미한 수준의 최대처짐과 잔류처짐이 발생하였으며, 최대하중이 가해질 때까지 스트링거가 탄성상태를 유지하는 등 설계하중을 지지할 수 있는 충분한 내력을 보유한 것으로 평가되었다. 진동성능 검토 결과 총 일곱 개의 스트링거 타입 중 다섯 개의 타입이 북미기준과 유럽기준에서 제시하는 기준의 허용치를 만족함을 확인하였다.

핵심용어 : 철골계단, 진동, 사용성, 안전성, 실물대 목업 실험
