철도차량 슬라이드식(텔레스코픽) 승강문 스텝의 강도평가

Strength Evaluation of Telescopic Sliding Doorstep Equipment for Railway Vehicle

김철수* · 박민흥

Chul-Su Kim · Min Heung Park

Abstract Heights of a platform above the rail for the passenger train in the country are classified into two categories such as the low level (500mm; mainline) and the high level (1,135mm; metropolitan subway line) platforms. In order to operate similarly both a mainline railroad and a metropolitan subway line, as the requisite door safety system, it is necessary to develop the doorstep equipment of the rolling stock regardless of both the low and high level platforms. In this study, Structural analysis and mechanical strength test of doorstep equipments used for two types of platforms are performed on the supposition that the train only for the low level platform could stop in the both low and high level platforms.

Keywords : Platform, Doorstep, Railway vehicle, Telescopic sliding type, Strength

초 록 국내 여객열차 전용 승강장은 높이에 따라 두 가지 종류로서, 일반 간선열차에서 주로 사용하는 저상 승강장과 수도권 전동차에서 주로 사용하는 고상승강장으로 구분된다. 중·고속 열차가 수도권 전철구간과 본선구간에서 혼용할 경우에 안전운전 및 승객편의를 함께 고려하기 위해서는 저상/고상 승강장에 상관없이 승하차할 수 있는 승강문 스텝장치가 필요하다. 본 연구에서는 전철역사 및 일반 철도역사에서 모두 승하차가 가능한 저상/고상 승강장 겸용 승강문 스텝 개념설계(안)의 구조해석 및 강도시험을 수행하고 이의 안전성을 검토하였다.

주요어 : 승강장, 승강문 스텝, 철도차량, 텔레스코픽 슬라이딩방식, 강도

1. 서 론

향후 도입예정인 저상 승강장 전용 중·고속 간선열차는 본선 및 수도권 전철 구간에서 고객 환승에 대한 불편을 감소하기 위하여 저상/고상 승강장 혼용 운영을 고려 중이다. 참고로 국내 여객을 취급하는 철도역사의 승강장(platform) 현황을 살펴보면 승강장은 레일 두부 윗면으로부터 높이에 따라 크게 두 종류로서, 각각 간선철도노선의 저상승강장(500mm, low level platform)과 광역전철구간의 고상승강장(1,135mm, high level platform)이다[1]. 현재 한국철도공사에서 운영하는 전국 575개 철도역사(저상승강장: 367개, 고상승강장: 173개)중에서 저상/고상 혼용 승강장을 갖춘 곳은 34개소뿐이다. 따라서 향후 도입예정인 저상승강장 전용 중·고속 간선열차(예: KTX-series 등)가 수도권 전철구간과 본선구간에서 모두 운영될 경우, 국내 저상/고상 승강장에 상관없이 승하차할 수 있는 해결방안의 제시가 중요하다. 또한 안전한 열차운행과 함께 승강문(door)과 승강장사이 이격거리의 변동성으로 인한 승객(교통약자)의 불편함이 존재하므로, 이러한 이격거리가 최대한 짧은 간격을 유지하는 승강문 스텝(doorstep)시스템이 요구된다.

최근 국내에 수도권 전철 경부선 및 장항선에서 운행 중인 누리로호(TEC)는 저상/고상 승강장에 혼용할 수 있는 승강문 스텝을 설치하여 운행 중이다. 그러나 이 기술을 중·고속철도차량에 도입하려면 현재 차체 바닥프레임이 변형되어야 하므로 구조적 안정성측면에서 차체 개조가 불가능하며, 복잡한 작동메커니즘(mechanism)으로 인하여 비상상황 발생 시 탈출이 용이하지 않다. 또한, 고속철도차량의 주요 기술인 기밀유지가 떨어지며, 승강문과 승강장사이 이격거리의 변동성으로 고객 편의에 문제점의 발생이 예상된다[2].

한편, 국외 관련 개발기술은 작동메커니즘에 따라 계단방식, 슬라이드방식(또는 램프식), 접이방식(또는 리프팅방식)으로 구분한다. 계단방식은 기밀유지 및 비상탈출에 어려움을 가지며, 언더프레임 손상이 불가피하므로 저상용 열차에 적용하기 힘들다. 접이방식/리프팅식은 차량과 승강장사이의 이격거리의 불편을 해소하지만, 개폐시 많은 공간 및 시간을 요구한다. 슬라이딩방식은 기존 차량 바닥 프레임이 손상을 최소화 하면서 이격거리를 해소하고 신속한 개폐를 구현할 수 있다. 최근 사례로서 중국 고속열차 CRH는 중국 철도의 총 4가지(381mm, 550mm, 760mm and 1,250mm (제레선: 1,300mm 제외))의 승강장 높이를 고려하여 수동형 슬라이드방식 승강문 스텝장치를 개발하였다. 그러나 이 장치는 각 차량마다 1단계 개폐를 수동으로 운영해야 하는 단점을 가지므로 이를 개선할 수 있는 작동메커니즘이 요구된다. 따라서 승강장 혼용운영에 대비하여 국내 현실에 적합

*Corresponding author

Tel.: +82-70-8855-1649, E-mail : chalskim@ut.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.352>

한 승강문 스텝을 개발하기 위해서는 2단계에 걸쳐 자동으로 작동하는 저장/고상 겸용 승강문 스텝의 개발이 중요하다.

철도차량용 승강문의 관련 연구는 대부분 신뢰성보전(Reliability Centered Maintainability, RCM)관점의 전동차 유지보수주기 또는 신뢰성향상에 국한되었으며[3,4], 아직까지 승강문 스텝에 관련한 체계적인 연구는 미비한 실정이다. 또한 관련규격의 경우에서도 해외에서는 EN 14752 규격이 있지만, 국내의 경우 승강문 스텝의 안전성 인증을 위한 관련규격은 아직 존재하지 않는다.

본 연구에서는 저장승강장 전용 중·고속 열차가 수도권 전철구간과 본선구간에서 운용할 경우에 안전운전 및 승객 편의를 함께 고려하기 위하여 저장/고상 승강장 겸용 승강문 스텝에 대한 설계(안)의 안전성 검토 연구일환으로서, 이에 대한 구조해석 및 기계적 강도시험을 수행하고자 한다.

2. 설계요구사항 및 관련규격

2.1 개념설계(안) 및 요구사항

본 연구에서는 저장/고상 승강장 겸용 승강문 스텝 개발을 위하여 관련전문가들과 브레인스토밍을 거쳐 기능 및 제작요구사항을 도출하였다[5]. 본 스텝장치는 두 단계에 걸쳐 순차적으로 텔레스코픽 슬라이딩(telescopic sliding)방식이며, 이의 주요 기능은 철도 차량의 실내 바닥 면과 동일 평면을 이루는 프레임 유닛으로부터 승강장 방향으로 슬라이딩(인출)되는 1 및 2차 발판 유닛을 통해 승객의 승하차가 용이하도록 하는 것이다. 이 방식은 차량의 바닥 프레임 손상하지 않고, 승강장과 열차사이의 이격거리를 두 단계로 나누어 작동하며, 신속한 개폐공간을 활용할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 주요 요구사항중의 하나는 차량에 따라 가변적인 차량 바닥과 고상 플랫폼 사이의 이격거리(상하 및 좌우) 문제이다. 이의 원인은 ‘선로의 노상자갈 높이 변동성’, ‘차중변화’, ‘차륜삭정에 의한 차륜외경의 변화’, ‘곡선 정차역에서 캔트량’, ‘차량폭과 건축한계의 차이’ 등으로 인하여 변동성을 갖기 때문이다. 기존 연구보고서[5]에서 실제 차중별 승강문과 차량사이의 상하 이격거리를 조사한 결과, 이는 폐차예정 열차를 제외하고 차량상판기준으로 약 100mm 이내이다. 그리고 차량 폭 3,100mm이상의 차량에서 좌우 이격거리는 약 150mm이내로서, 작동방식과는 무관한 공통적인 요구사항이다. Fig. 1은 제작/기능 요구사항을 고려한 저장/고상승강장 겸용 승강문 스텝의 개념설계(안)을 나타낸 것이다. 이의 주요 부품은 강성 및 내구성을 확보하기 위한 프레임 유닛, 1차 발판 유닛, 2차 발판 유닛, 가이드 레일, 힌지, 핀 등이며, 정의된 시스템의 기능을 구현할 수 있는 구동 모터, 타이밍 벨트, 풀리, 롤러, 베어링 등의 부품을 선정해야 할 것이다. 그리고 본 스텝장치는 1 및 2차 발판 유닛에 의하여 단계적으로 텔레스코픽 슬라이딩하여 승강장까지 연장됨으로써, 차중별 승강문과 차량사이의 좌우 이격거리와 상관없이 안전하게 승하차 할 수 있는 기능을 갖추도록 설계되어야 한다.

한편, 차량 상판과 고상승강장사이의 상하 이격거리 변동

Fig. 1 The first design for the doorstep equipment of both the low and the high Level Platforms

(a) Operation procedure

(b) Schematic diagram of the plate of the second step

Fig. 2 Cam angle analysis to move the plate of the second step

성을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 2차 발판에 Fig. 2와 같이 캠(cam)을 이용하여 고상 승강장에 안착하도록 설계하고자 캠 각도(cam angle)의 기구학적 해석을 수행하였다. 2차 발판의 작동순서는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 1차 발판의 수평진출 후에 먼저 캠홈과 니들롤러베어링(needle roller bearing)사이 접촉으로 식 (1)의 상승 회전각(α_u)에 따라 약간 상승한다. 이후에 승강장 높이에 따라 식(2)의 하강 회전각(α_d)에 의하여 2차 발판은 부드럽게 하강한다. 즉, 롤러가 캠 위를 구르면서 Fig. 2(b)와 같이 캠 단차(h_{1down} , h_{1up})에 의해 2차 발판은 상승 및 하강한다.

$$\alpha_u = \tan^{-1}(h/l_1) - \tan^{-1}((h-h_{1up})/l_1) \quad (1)$$

$$\alpha_d = \tan^{-1}(h/l_1') - \tan^{-1}((h-h_{1down})/l_1') \quad (2)$$

그리고, 2차 발판의 상승(H_{up}) 및 하강 높이(H_{down})는 식 (1) 및 식 (2)와 힌지핀에서 2차 발판끝단까지 거리(L)로 부터 삼각법을 활용하여 각각 식 (3) 및 식 (4)에 의하여 계산할 수 있다.

$$H_{up} = L \times \tan \alpha_u = L \times \tan \{ \tan^{-1}(h/l_1) - \tan^{-1}((h-h_{1up})/l_1) \} \quad (3)$$

$$H_{down} = L \times \tan \alpha_d = L \times \tan \{ \tan^{-1}(h/l_1') - \tan^{-1}((h-h_{1down})/l_1') \} \quad (4)$$

따라서 차량 상판과 고상승강장사이의 이격거리 변동성은 식 (3) 및 식 (4)로부터 2차 발판의 캠 형상설계에 반영하여 해결할 수 있다.

2.2 관련규격

저상/고상 승강장 겸용 승강문 스텝의 안전 설계를 위해서는 제작/기능 요구사항[5]과 함께 국내외 관련 법규에 대한 검토가 필요하다. 기존 승강문 관련 국내규격은 “KS R 9246 : 전동차용 공기식 출입문 개폐장치”[6]와 “KS R 9247 : 전동차용 전기식 출입문 개폐장치-시험방법”[7], “KRS CB 0001-07(R) : 전동차용 출입문”[8]이 있지만, 승강문 스텝에 관련한 국내규격은 존재하지 않는다. 따라서 저상/고상 승강장 겸용 승강문 스텝 개발을 위해서는 이에 대한 안전성 및 인증을 위한 해외기술 기준(규격 또는 규정)의 검토가 요구된다. 이에 반하여 해외 관련규격은 유럽 TSI (Technical Specification for Interoperability)에서 제시하는 EN 14752 규격[9]이 있으며, 이 규격에서 승강문 스텝의 기계적 강도 관련 주요내용은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 Requirements of mechanical strength of the doorstep equipment according to EN 14752

3. 해석 및 시험 결과

3.1 설계(안)의 구조해석

3.1.1 유한요소모델 및 경계조건

Fig. 4는 슬라이드식(텔레스코픽) 승강문 스텝 설계(안)의 구조해석을 위한 유한요소망 생성(finite element mesh

(a) mesh generation

(b) 360mm movement of 2nd step

(c) supporting of the platform

Fig. 4 Finite element model and boundary condition of the doorstep equipment

generation) 그리고 각각의 하중 및 경계조건을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 유한요소모델은 8절점 육면체와 4절점 사면체 형태를 혼합하여 구성하였고, 총 요소수 및 노드수는 각각 71,774 및 127,433개이다. 하중 및 경계조건은 EN 14752 규격[9]에 준하여 2차 발판과 작용하중 위치에 따라 총 6가지로 구분하였다. 먼저 2차 발판이 360mm진출하는 경우 (Load case 1, 2, 3) 경계조건은 Fig. 4(b)와 같이 외팔보 형식으로서, 프레임유닛의 측면과 1차 발판 측면을 구속한 것이다. 그리고 2차 발판이 승강장에 지지하는 경우(Load case 4, 5, 6) 경계조건은 Fig. 4(c)와 같이 단순보 타입으로서, Fig. 4(b)의 경계조건에 2차 발판과 승강장사이 접촉부를 추가하여 구속한 것이다. 또한 2차 발판 캐리어 플레이트의 핀과 힌지 그리고 발판하부와 롤러 사이에는 면접촉 조건을 부여하였다. 하중조건(load case) 1, 2, 4, 5는 100mm×200mm 면적에 수직하중 2kN을 부여하였고, 하중조건 3 및 6은 가혹한 조건으로 예상되는 2차 발판의 끝부분과 중앙에 선상 분포하중 4kN을 각각 부여한 것이다[9].

3.1.2 해석결과

Fig. 5는 6종류 하중조건 중에서 가장 가혹한 조건인 Fig. 4(b)의 3번 하중조건(load case 3)하에 취약부의 유한요소해

Fig. 5 Results of stress analysis of the doorstep equipment on the condition of load case 3

석 결과를 나타낸 것이다. 참고로 오른쪽 상단부 그림은 각 하중조건별 최대 von-Mises 응력을 정리한 것이다. 그리고 Table 1은 하중조건에 따른 예상 취약부위에 최대 von-Mises 응력과 허용응력(allowable stress)을 정리한 것이다. 여기서 1번~3번 하중조건은 중국 CRH의 스텝장치[5]와 같이 승강장에 직접 지지하지 않고 근접한 경계조건(외팔보 형식)이다. 해석결과로부터 이의 취약부는 작용하중 위치에 상관없이 니들 롤러 베어링이며, 이의 원인은 2차 발판의 진출과 함께 구름접촉하면서 작용하중을 지지하기 때문이다. 이에 반하여 4번~6번 하중조건은 승강장 지지조건(단순지지보 형식)이므로 이들의 최대 von-Mises 응력은 이전경우(load case 1~3)보다 약 10배이상 작다. 따라서 향후 본 스텝장치에 대한 리그시험은 3번 하중조건에 대하여 영구변형유무 및 안전성을 검토해야 될 것이다.

3.2 강도 시험 및 평가

3.2.1 시험

본 연구에서 저장/고상 겸용 스텝장치의 기계적 강도시험은 Table 1로부터 선상분포하중조건하에 수행하였다. 본 리그시험은 시험품을 테스트 베드에 고정하고, 실제 차량운용 조건과 동일하게 출력 공압 5Bar와 전원(DC 100V/2A)을 공급하여 내부 동력장치들을 구동한다. 그리고 2차 발판까지 순차적으로 진출한 후에 작용하중을 10초간 부여하고, 하중 인가 및 제거 시 주요 취약 부위의 처짐량 및 변형률을 측정한다. Fig. 6은 본 장치의 강도시험에 사용된 유압시험장비와 지그 및 로셋 변형률게이지(Rosette strain gage)를 부착한 모습이며, 좌측 사진은 Fig. 5의 3번 하중조건하에서의 시험모습이다.

3.2.2 시험결과

Fig. 7은 3번 작용하중조건하에 시험에서 얻은 처짐량과

Fig. 6 Static rig test of the doorstep equipment

Fig. 7 Deflection curves obtained from rig test and finite element analysis on the 3rd load condition

Fig. 8 Comparison between results of rig test and finite element analysis for hinge of the doorstep on the 3rd load condition

해석결과를 함께 나타낸 것이다. 해석과 시험에서 얻은 최대 처짐량은 각각 29.5mm 및 28.2mm이며, 이들의 오차는 4%이다. 또한 동일 조건하에 스텝장치의 힌지부에서 해석결과와 리그시험에서 로셋 변형률게이지로부터 환산된[10] von-Mises 응력값을 비교한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 7 및 Fig. 8로부터 응력해석결과의 예측값은 시험결과와 유사하게 도출되었음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 스텝장치 안전성의 기준인 영구변형 유무는 제하조건(unloading condition)하에 2차 발판 처짐량으로 판단하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하중제거 후 스텝의 무부하 상태 복원시 기준점대비 2

Table 1 Maximum von-Mises stress and safety factors of core parts for the doorstep equipment

	Load case (MPa)						Allowable Stress(MPa)	Safety factor
	1	2	3	4	5	6		
Needle roller bearing(SUJ2)*	255.1	196.2	440.6	1.3	1.4	1.9	1570	3.6
Hinge(SM45C)*	111.5	109.5	205.8	31.9	23.5	36.6	500	2.5
LM Bloc(SM45C)*	181.7	154.2	300.4	2.1	3.1	3.3	500	1.7

차 발판 처짐량은 '0'이므로 본 장치의 영구변형은 없다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 저상 승강장 전용 중·고속 열차가 수도권 전철구간과 본선구간에서 운용할 경우에 대비하여 저상/고상 승강장 겸용 승강문 스텝에 대한 설계(안)에 대한 구조해석 및 기계적 강도시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 스텝장치는 1차 및 2차 발판 유닛에 의하여 단계적으로 텔레스코픽 슬라이딩하여 승강장까지 연장됨으로써, 차종별 승강문과 차량사이의 이격거리와 상관없이 안전하게 승하차하도록 설계된 것이다. 이때, 차량 상판과 고상승강장 사이의 이격거리 변동성은 2차 발판의 캠 형상설계에 반영하여 해결하였다.

(2) 국내의 스텝장치의 관련규격이 존재하지 않으므로 해외 EN 14752 규격에 준한 다양한 하중조건하에 본 설계(안)의 구조해석을 수행하였다. 여기서 하중조건은 외팔보 및 단순 지지보 형식의 경계조건에 수직집중하중 및 선상분포하중을 2차 발판에 각각 부여한 것이다. 해석결과로부터 예상 취약 부는 2차 발판의 진출과 함께 구름접촉하면서 작용하중을 지지하는니들 롤러 베어링이다. 이의 최대 von-Mises 응력은 외팔보 형식 경계조건에 선상분포하중(4kN)하에서 440.6MPa이다. 따라서 본 스텝장치의 안전성 검토 기준으로서, 외팔보 형식의 선상분포 하중(4kN)하에서 스텝장치의 영구변형 유무를 평가하는 것이 타당하다고 사료된다.

(3) 기계적 강도평가를 위한 본 스텝장치의 리그시험은 2차 발판까지 순차적으로 진출 완료한 후에 외팔보 형식의 선상분포하중조건(4kN)하에서 수행하였다. 해석 및 시험에서 얻은 최대 처짐량 및 응력의 오차는 각각 4% 및 6% 이내로서, 응력해석결과와 예측값은 시험결과와 유사하게 도출되었음을 확인하였다. 또한 하중제거 후 스텝의 무부하 상태 복원시 기준점 대비 2차 발판 처짐량은 '0'이므로 본 장치의 영구변형은 없으며, 이를 통해 스텝 장치의 기계적 안전성을 확보한 것으로 사료된다.

(4) VPD(Virtual Product Development)관점에서 본 스텝 장치의 피로수명 예측을 위하여 본 연구의 응력해석결과와 각 재질의 피로특성과 함께 피로해석 시뮬레이션의 입력자료로서 활용하며, 이로부터 설계 초기 단계에서 제품의 성능 및 내구성을 확보할 수 있다.

(5) 향후 연구에서 본 스텝장치에 관한 피로해석 및 실험 리그 시험을 추진할 예정이며, 다양한 성능조건(진동, 환경, EMC) 시험 및 현차 적용 시험을 통하여 이의 안전성을 평가할 것이다.

후 기

본 연구는 미래철도기술개발사업의 한국형 틸팅열차 신뢰성 평가 및 운용기술개발 연구의 일환으로 국토해양부의 연구지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

참고문헌

- [1] Ministry of Government Legislation (2009) Regulation of Railway Construction Criteria.
- [2] Korea Railroad (2009) Maintenance Guidelines of Nuriro Train : TEC railway Vehicles, KORAIL.
- [3] C.H. An, D.S. Lee, Y.J. Son, H.S. Lee (2010) A Study for Reliability Improvement of Belt Type Door System using FMECA, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(1), pp. 58-64.
- [4] D.G. Lee, J.W. Kim, H.S. Lee (2008) A Case Study on Determining Doors Maintenance Intervals through Running Fault Data Analysis for Metro EMU, *Journal of the Korean Society for Railway*, 11(3), pp. 240-247.
- [5] C.S. Kim et.al (2010) The Planning Report on the Development Plan of Door System for Both the Low and the High Level Platforms, Korea Institute of Construction & Transportation Technology Evaluation and Planning.
- [6] Korea Standard Association (2007) Pneumatic Door System Used on Railway Rolling Stock, Korean Agency for Technology and Standards, KS R 9246.
- [7] Korea Standard Association (2007) Electric Door System Used on Railway Rolling Stock-Test Methods, Korean Agency for Technology and Standards, KS R 9247.
- [8] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2007) Entrance Door for Electric Car, Korean Railway Standards, KRS CB 0001-07(R).
- [9] European Railway Agency (2005), Railway Application-Body Entrance Systems, European Standards, BS EN 14752.
- [10] J.W. Dally, F.R. William, (1993) Experimental Stress Analysis, 3rd ed : Strain-Analysis Methods, McGraw-Hill, Boston, pp. 313-315.

접수일(2012년 7월 13일), 수정일(2012년 7월 30일),
게재확정일(2012년 8월 9일)

Chul-Su Kim : chalskim@ut.ac.kr

Department of Railway Vehicle System Engineering, Korea National University of Transportation, 157 Cheoldobakmulkwon-ro, Uiwang-Si 437-763, Gyunggi-Do, Korea

Min Heung Park : ddung7676@naver.com

Korea Rolling Stock Technical Corp., #558-3, Cheoncheon-dong, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Korea