

진동영향을 고려한 가시설 레일의 동적 거동 특성

Nonlinear Dynamic Behavior of Temporary Rail Considering the Effect of Vibration

임형준* · 류동현** · 원종화*** · 김문겸****

Lim, Hyung Joon · Ryu, Dong Hyeon · Won, Jong Hwa · Kim, Moon Kyum

Abstract

The object of this study is to propose a rate of vibration increase in the analysis of temporary rail non-fixed in the vertical direction and characterize the nonlinear dynamic behavior of temporary rail while considering longitudinal and latitudinal load, vibration and lifting. The rate of vibration increase is proposed through measurement of an actual structure that is largely affected by loading and vibration of the superstructure. Dynamic behavior was additionally characterized by the dynamic response resulting from nonlinear dynamic finite element analysis with vehicle loading, including the rate of vibration increase. As a result, the rate of vibration increase by the vibration of an Auto Bar Machine is determined as 7% and the maximum stress in the analysis of the nonlinear rail is increased 14.5% over that of linear rail, and temporary rail is shown to be very sensitive to the velocity of the superstructure.

Keywords : construction automation, temporary rail, moving loads, increasing ratio of vibration, dynamic amplification factor

요 지

본 연구는 일반적인 궤도 구조물과는 달리 지지부와 받침이 레일과 상하로 구속되어 있지 않은 가시설 레일을 해석함에 있어 상부 하중에 의해 발생하는 종 방향 하중과 횡 방향 하중 및 진동, 그리고 들림 현상 등을 고려하여 가시설 레일 구조물의 하중 증가율을 제한한 후 비선형 동적 거동 특성을 파악하는데 목적이 있다. 그리하여 상부 구조물의 하중과 진동에 의한 영향이 클 것으로 판단되는 철근 배근 장치에 대한 실구조물 계측을 통해 하중 증가율을 제한하였으며 비선형 동적 유한 요소 해석을 실시하여 진동에 의한 하중 증가율을 고려한 차륜하중에 의해 발생하는 동적응답을 통해 동적 거동특성을 파악하였다. 그 결과 철근 배근 장치의 진동에 의한 하중 증가율을 7%로 제한하였으며 비선형 동적 거동은 선형화된 레일에 비해 최대응력이 14.5% 증가하였고 상부 주행 장치의 속도에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 자동화 시공, 가시설 레일, 이동하중, 진동 증가율, 동적증가계수

1. 서 론

가시설 레일은 일반적으로 거더교 시공 시 자동화 또는 기계화 시공을 위한 장치들의 이동 경로로 사용되어 왔다. 이러한 가시설 레일은 현재까지는 크게 가로보 거푸집 설치 장치와 슬래브 콘크리트 면 고르기 장치 등의 주행 레일로 주로 사용되고 있다. 하지만 가시설 레일 구조물들은 그 무게가 경량이며, 그 장치가 간단하게 이루어져 가시설 레일에 대한 체계적인 연구가 이루어지지 않은 실정이나, 현대 건설 산업의 발전으로 다양한 건설 자동화 시공 장치들이 개발되고 있으며, 그 무게도 점점 중량화 되고, 그 구조 또한 복잡해지고 있다. 또한 앞서 언급한 가로보 거푸집 설치 장치와 슬래브 콘크리트 면 고르기 장치 등은 연구를 통해 개발

된 것이 아닌 현장에서의 작업 필요성에 의해 개발된 것으로서, 작업자의 경험에 의해 개발됨으로 인해 많은 부분이 검증을 거치지 않고 사용되고 있는 실정이다. 이러한 현상은 보다 향상된 장치개발을 저해할 뿐 아니라 사용자의 인식저하, 선행기술의 자료미비에 따른 동일한 실수의 반복 가능성 등 많은 문제점을 내포하고 있다.

철근 배근 장치(Auto Bar Machine-이하 ABM) 이동을 위한 차륜은 철도의 차륜 및 천정크레인의 차륜과 비슷한 형태를 보이고 있으며, 장치의 진행 중 발생하는 흔들림에 따른 진동을 고려한 횡 방향 하중과 장치의 시동 및 정지에 따른 제동하중 등에 대한 학문적 배경을 살펴볼 수 있다. Chu등(1979)은 한 대 또는 일련의 일반 철도차량이 통과하는 거더교와 트러스교의 동적거동을 해석하였으며, Garivaltis

* (주)유신코퍼레이션 지반본부 기초설계팀 사원 · 공학석사 (E-mail : y13359@yooshin.co.kr)

** 교신저자 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 석사과정 (E-mail : ryukhan@yonsei.ac.kr)

*** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail : examave@yonsei.ac.kr)

**** 정희원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (E-mail : applymkk@yonsei.ac.kr)

등(1980)은 연직방향 및 횡 방향 궤도불규칙성에 대한 직선 궤도상의 6축 화물기관차의 동적응답을 해석하기 위해 스펙트럼 해석기법을 이용하였고, 미소변위, 선형 현가장치 요소, 바퀴-레일 상호작용을 위한 선형이론을 고려한 선형모델을 사용하였다. 또한 Chu등과 Grag등(1985)은 차량-궤도-교량의 상호작용으로 인한 강 트러스 철도교 부재의 동적응답을 연직방향 및 횡 방향의 궤도불규칙성, 접근로의 궤도 상태 및 교량감쇠 효과에 대해 연구하였다.

가시설 레일은 침목 역할을 하는 지지대와 받침이 레일과 체결장치 없이 ㄷ형 받침위에 올려놓아져 있기 때문에 일체 거동을 하는 일반적인 궤도 구조물과는 하중 및 진동이 지지대로 전달되는 시스템에 있어서 차이가 있다. 그리고 가시설 레일은 일정한 길이의 사각형 강관을 연결시킨 구조이기 때문에 비체결적인 구조적 특성상 레일을 통해 상부 장치가 이동 할 때 레일의 들림 현상도 발생한다. 따라서 거더교 슬래브 자동화 시공 장치(Slab Construction Machine-이하 SCM) 레일은 일반적인 궤도 구조물에 비해 불안정 하므로 모형화와 해석 시 종 방향 하중과 횡 방향 하중 및 진동, 들림 등과 같은 거동특성을 고려할 필요가 있다. 하지만 ABM의 이동에 따른 가시설 레일 구조물의 거동은 정지 및 출발하중에 의한 종 방향 하중과 철근 배근 장치의 이동에 따라 발생하는 횡 방향 하중 등 이밖에도 예상치 못한 하중 조건 때문에 해석적 방법으로 정확한 거동을 파악하는데 정확성을 확보하는데 어려움이 있다. 그러므로 가시설 레일 구조물의 정확한 거동특성을 파악하고 진동에 대한 특성을 분석하기 위해서는 실구조물 실험에 의한 분석이 필요하다. 또한 비선형 거동을 보이는 가시설 레일에 대한 해석적 방법을 제안, 검증 후 비선형 유한 요소 해석을 실시함으로써 가시설 레일의 동적 거동 특성을 파악할 수 있고 차후 이와 유사한 구조물의 해석 시 적용 가능하다.

가시설 레일 구조물의 진동특성을 고려한 거동 및 해석에 관한 연구의 효율적인 진행을 위하여 다음과 같은 범위에서 연구를 수행한다.

- (1) 가시설 레일에 관한 연구는 상부 구조물의 하중과 진동에 의한 영향이 클 것으로 판단되는 ABM에 대해 고려한다.
- (2) 해석 시 상부 구조물의 이동에 의해 발생하는 종 방향 및 횡 방향 하중은 실구조물 계측 결과를 통한 하중 증가율을 적용하여 가시설 레일에 하중의 형태로 적용한다.
- (3) 레일 간의 이음에 의해 발생하는 주행면의 불규칙한 거동은 없는 것으로 하고, 레일과 지지대와의 이격은 없는 것으로 한다.
- (4) 지지대와 빔의 상단 돌출 전단철근은 용접에 의해 서로 체결된 상태로서, 일체 거동을 원칙으로 한다.
- (5) 가시설 레일 구조물에 관한 연구이므로 철근 배근 장치 본체에 대한 해석 등 이미 검증된 구조검토는 배제한다.

본 연구에서는 ABM의 이동을 위한 가시설 레일의 진동에 의한 거동특성을 파악하고 적합한 해석 기법을 제안하기 위해 실구조물 계측에 의한 데이터를 이용하여 상부 구조물의 진동 시 가시설 레일의 거동 특성과 응답을 분석하여 진동에 대한 영향을 평가하고, 적합한 유한요소 해석기법을 제안하여 비선형 특성을 가지는 가시설 레일 구조의 동적 거동특성을 파악한다.

2. 가시설 레일구조물의 특성 및 현황

2.1 슬래브 시공 장치 및 레일의 문제점

거더교 자동화 장치는 국내 현장 여건에 적합하도록 개발되어 왔으나, 시공성과 안정성을 위한 연구 개발이 부족한 실정이다. 크로스 빔 거푸집 설치를 위한 장치는 레일설치를 위한 별도의 장비가 필요하고 시공완료 후 레일 해체를 위해 장비가 필요해 시공성 및 경제성에 큰 효과를 얻기 힘들다. 또한 먼 고르기를 위한 피니셔 장치의 경우 콘크리트에 매립되는 레일 지지대의 수량을 최소화 하여 경제성을 높여야 하는 어려움이 있다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 국내에서 사용하고 있는 대부분의 슬래브 시공 장치들이 연구를 통해 개발된 것이 아닌 현장에서의 작업 필요성에 의해 개발된 것으로서, 작업자의 경험에 의해 개발됨으로 인해 많은 부분이 검증을 거치지 않고 사용되고 있는 실정이다. 이러한 이유로 합리적인 레일 시스템에 대한 연구개발이 필요하다. 따라서 이 논문에서는 가시설 레일 구조물의 동적 거동 특성을 파악하여 이와 유사한 거동을 보이는 시설물에 대한 체계적인 연구를 하는데 목적이 있다.

2.2 SCM의 현황

SCM은 거더교 슬래브 공사의 생산성 향상 및 안전사고 방지를 위해 최초로 개발된 슬래브 시공 자동화 장치로서 슬래브 공사 전체의 자동화가 가능하도록 개발된 종합 장치이다.

SCM장치 중 ABM은 거더 설치 후 사용하게 되며, 종래 인력을 이용하여 운반하던 가로보 철근을 작업자 반경 이내로 자동 운반하여 사용하게 함으로써 공중에서의 인력 소 운반을 없앴으며, 이후 가로보 거푸집의 운반과 크레인 및 먼 고르기 장치(Crane & Finisher Machine-이하CFM)를 이용한 거푸집 설치, 슬래브 및 캔틸레버 거푸집 운반을 수행하고, 거푸집 작업이 완료되면 주 철근을 자동배출 및 배열 한다. 그림 1은 실 구조물 계측 실험을 위해 설치된 ABM의 전경이다.

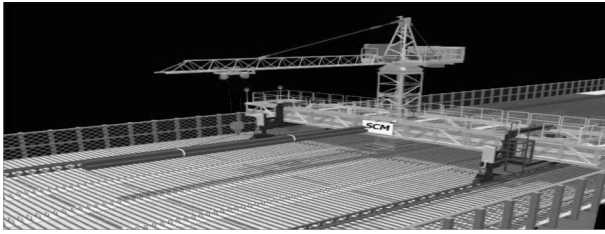
CFM은 공장에서 제작되어 현장으로 반입된 각종자재의 인 상과 설치를 수행하게 된다. 그리고 종 방향 철근의 묶음단 위(약1.5톤)배치(그림 2(a) 참고)와 슬래브 타설 콘크리트 먼 고르기(그림 2(b)참고)를 수행한다.

2.3 가시설 레일 구조물의 구성과 역할 및 특성

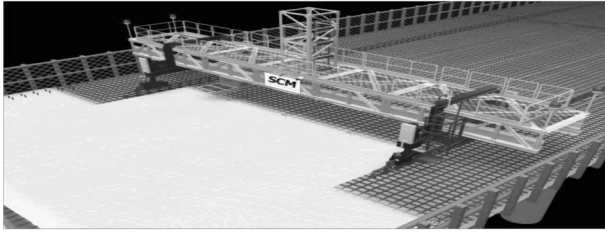
슬래브 자동화 장치의 주된 이동 경로인 가시설 레일 구조물은 거더교 가로보의 돌출 전단철근과 용접으로 체결되



그림 1. ABM 전경(김도학, 2006)

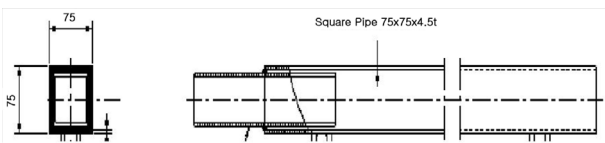


(a) 중 방향 철근 배치

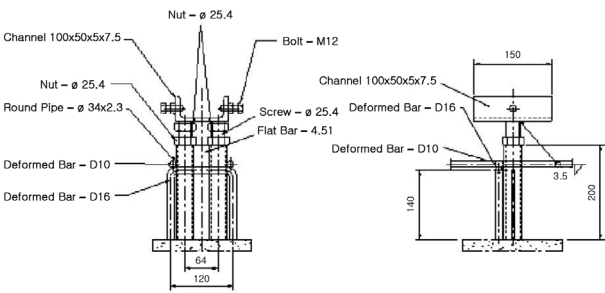


(b) 콘크리트 면 고르기

그림 2. CFM 전경(김도학, 2006)



(a) SCM 레일



(b) 레일 지지대

그림 3. SCM 레일 단면도(GS건설주식회사, 2005)

어 주행 레일의 역할을 한다. SCM레일은 그림 3과 같이 일반구조용 사각형강관으로 이루어진 레일과 ㄷ형강 및 사각나사로 구성된 받침부, 원형강관, 평철로 구성된 지지대로 구분된다. 차륜이 이동하는 각형관은 각 레일 끝 부분에 홈이 제작되어 삽입에 의해 연결된 후 나사에 의해 고정되는 형태로 이루어져있으며, 받침부는 ㄷ자 형강 아래 부분에 원형 스크류봉을 용접한 구조이다.

또한 다양한 현장 상황에 대처할 수 있도록 스크류 봉에 너트를 끼워 높이 조절을 가능하도록 하였다. 지지대는 그림 3의 (b)와 같이 원형 파이프 두 개 사이에 평철을 용접한 형태이며, 상부 구조물의 이동에 의해 발생하는 횡 방향 하중에 대한 저항과 상부 구조물의 이동에 의해서 발생하는 비틀림에 의한 전도를 예방하기 위한 구조형태이다.

2.4 천정 크레인 레일의 특성

거더고 슬래브 자동화 시공 장치와 비교적 유사한 바퀴구조 형태를 가지고 있는 천정크레인은 산업용 기계장치로서, 일반 크레인에 비해 간단한 구조장치를 가진 하역 장비이다. 이 천정 크레인은 새들에 의해서 전후로 이동되는 점에서

거더고 슬래브 자동화 시공 장치와 유사한 이동을 한다.

천정 크레인이 이동하는 레일 구조물은 일반적으로 크레인 보라 하며, 크레인 보 설계 시 크레인 지중과 최대 차륜하중, 수직하중, 수평하중, 충격력, 반복하중에 의해서 결정된다. 크레인의 지중은 중량과 크레인의 스패에 따라 산정되며, 최대 차륜하중은 차륜 수, 정량하중, 스패, 속도의 형태 즉, 고속형 또는 보통형, 저속형에 의해 산정된다.(대한건축학회, 2000) 수직하중의 산정은 크레인 속도가 60 m/min 미만인 경우에는 최대 차륜하중의 10%로 산정하고, 크레인 속도가 60 m/min 이상인 경우에는 최대 차륜하중의 20%를 산정한다. 단 이음매가 없는 레일 일 때는 기준 속도를 90 m/min으로 할 수 있다(대한건축학회, 2000).

천정 크레인의 수평하중은 주행방향에 대한 수평력과 주행방향에 직각으로 작용하는 수평력, 그리고 크레인 주행로에 대한 횡 방향 수평력으로 구분된다. 크레인의 제동력에 의한 중 방향 하중은 각 차륜하중의 15%를 적용하며, 이동 중 발생하는 횡 방향력에 대해서는 각 차륜하중의 10%를 적용하는 것을 명시하고 있다. 그리고 크레인 주행로에 대한 횡 방향 수평력은 양중 하중과 크레인 트롤리 무게 합이 20% 이상으로 적용되고 있다. 단, 크레인의 다른 부분 무게는 제외시킨다.

3. 가시설 레일의 실구조물 실험 및 거동특성

3.1 실 구조물 재하실험의 개요

실 구조물 실험은 가시설 레일 구조물의 응력 및 변위 등을 실측하여 가시설 레일 구조물의 거동특성을 파악하고, 정적 및 동적 하중에 대하여 발생하는 중 방향 하중 및 횡 방향 하중의 하중 증가율을 파악하기 위해 실시되었다. 변형률 계로는 실험의 목적을 충족시키기 위해 지지대와 레일의 변형을 측정한다. 그리고 재하실험은 유사한 거동특성 파악을 위해 PSC-Beam 교량 2차선 배열의 형태(C.T.C@2,500 mm)를 기준으로 길이 25 m의 Beam 외측 상단 약 30 cm를 제작하여 계측하였다. 그리고 철근 배근 장치의 상재하중인 6.0톤을 기준으로 비 상재하중 상태와 상재하중 상태를 구분하여 실험하였으며, 정적 재하실험 종료 후 동적 재하실험을 수행하였다.

실구조물 계측실험은 실제와 유사한 거동특성을 파악하기 위해 Beam 외측 상단 약 300 mm를 고려하여 제작하였으며, Beam의 길이는 25.0 m로 제작하여 계측실험을 수행하였다. 측정 장비를 기준으로 철근 배근 장치의 좌, 우측 레일을 구분하였으며, 좌측 레일은 안쪽에서부터 바깥쪽으로 높은 차 순으로 변형률계를 설치하였으며, 우측 레일 역시 안쪽에서부터 바깥쪽 순서로 변형률계를 설치하였다. 또한 도로의 횡단경사가 발생하는 실제 현장을 고려하여 좌측레일이 우측레일에 비해 약 60 mm 상향으로 높이차가 나도록 레일을 설치하였다.

실구조물 계측실험의 현황은 그림 4에 나타내었고, 계측기의 설치 현황은 그림 5, 표 1과 같다.

3.2 재하실험을 통한 가시설 레일의 진동특성

진동 프레임은 전체 프레임 위에 설치되어 총 8개의 진동기에 의해 상하 진동 운동을 하게 된다. 진동기는 정면에 4

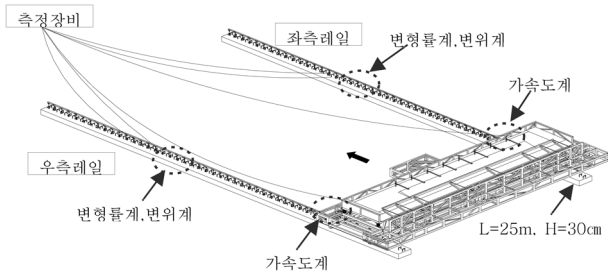


그림 4. 실구조물 계측실험의 현황(김도학, 2006)

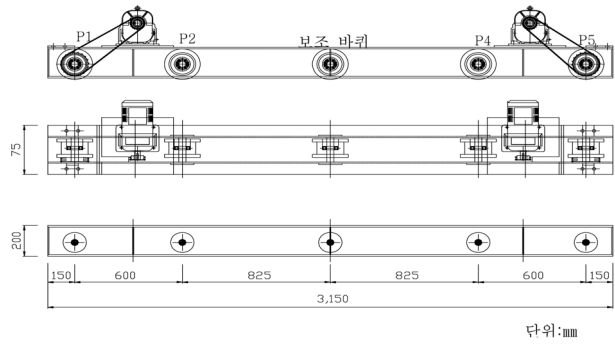
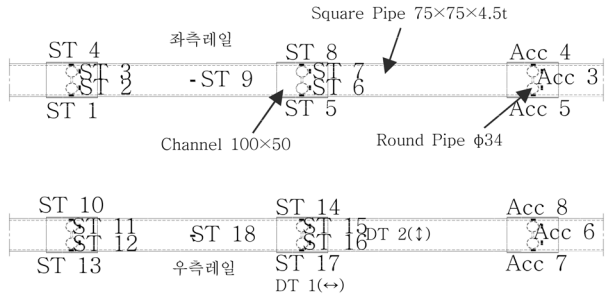


그림 6. ABM 바퀴의 제원(김도학, 2006)



※ ST : 변형률계, DT : 변위계, Acc : 가속도계

그림 5. 센서 부착 현황(GS건설주식회사, 2005)

표 1. 변형률계 부착 현황

구분	변형률계	
	좌측레일	우측레일
종방향	ST2,3,6,7	ST11,12,15,16
횡방향	ST1,4,5,8	ST10,13,14,17
처짐	ST9	ST18

표 2. 철근 배근 장치 차륜 하중(김도학, 2006)

구분	P1(kgf)	P2(kgf)	P3(kgf)	P4(kgf)
하중	1814.7	3295.1	3495.0	3735.8

개 후면에 4개 설치되어 총 8개가 사용되어 진동을 가한다. 진동기의 제원 및 총 중량은 표 4, 표 5와 같다.

이동 상태의 진동 실험은 ABM의 이동 속도를 작업 주행 속도인 5 m/min으로 적용하였으며 계측 장비가 설치된 레일 부분으로부터 약 5~6 m 후방에서부터 진동과 함께 철근 배근 장치가 이동하여 계측 장비를 통과 정지한 후 진동을 종료하는 것을 한 번의 실험으로 하였다. 실험 결과 최대 상재 하중 상태의 실험이 최소 상재 하중의 실험보다 큰 변형을 나타내었으므로 거동의 분석과 횡 방향 및 종 방향 하중의 평가는 최대 상재 하중 상태의 실험을 토대로 하였다. 또한 진동 외에 가시설 레일 구조물의 동적 거동에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위해 표 6의 조건을 고려하여 실험을 실시하였다.

그림 7과 그림 8의 그래프는 각 강관을 흠을 이용하여 연결했을 때와 각 강관이 미소하게 분리되는 현상을 방지하기 위해 분리가 용이할 수 있을 정도의 용접으로 접합을 시

표 3. 하중 Case별 특성

Case1	주행 중 철근 낙하 상황
Case2	주행 무진동

표 4. 진동기 제원(GS건설주식회사, 2005)

Model	Power	가진력	진동수	중량
HSRV-158	1.5 KW	2000 kgf	900 rpm	266 kgf

표 5. 진동체의 총 중량(GS건설주식회사, 2005)

철근적재량	진동프레임 중량	진동기 중량	총중량
6000 kgf	1385 kgf	2128 kgf	9513 kgf

표 6. 강관 연결 방식

Test 1, 2, 3	각 강관을 흠을 이용하여 연결
Test 4, 5, 6	각 강관을 용접하여 연결

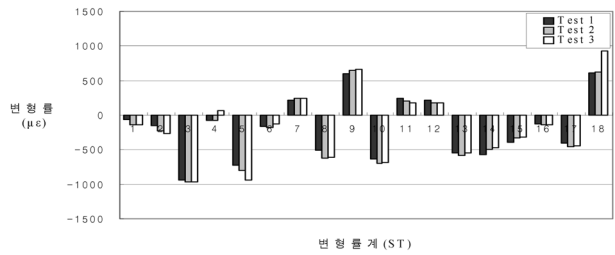


그림 7. 이동 중 진동 상태의 Test 1, Test 2, Test 3 변형률

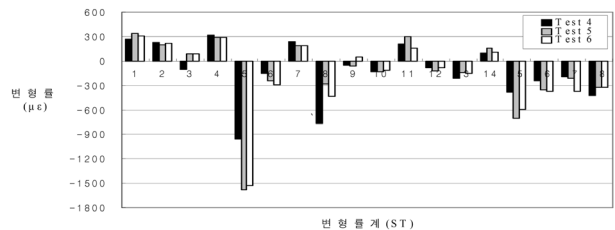


그림 8. 이동 중 진동 상태의 Test 4, Test 5, Test 6 변형률

켰을 때 ABM이 이동 중 진동 상태에서의 변형률을 나타낸 것이다. 두 그래프를 비교해 보면 그림 7과 8에서 보는 바와 같이 종, 횡 방향에 설치된 변형률계의 변형률은 진동에 의해 일정한 거동 특성을 보이지 않으므로 ABM에 의해 발생하는 가시설 레일 구조물의 종 방향 하중 및 횡 방향 하중은 각 변형률계를 통해 얻어진 최댓값에 대하여 고려하였다. 또한 ST1~4와 ST10~13, ST5~8과 ST14~17, 상재되는 ABM이 좌우 대칭임에도 변형률이 대칭을 이루지 않는 이유는 좌, 우측 레일의 높이차로 인한 결과로 사료된다.

이동 상태의 진동을 고려한 실험 결과 종 방향 변형률계의 최대 변형률은 ST3에서 발생하였고, 횡 방향 변형률은

표 7. 최대 변형률 발생 Case 및 Test

구분	Case1(진동)	Case2(무진동)
종방향	Test2	Test3
횡방향	Test5	Test3
선 종류	실선	점선

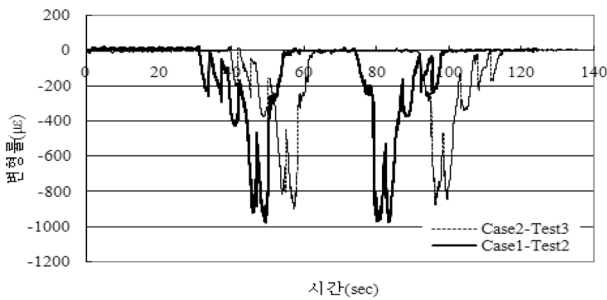


그림 9. 종 방향 진동 및 무진동 주행 시 최대 변형률 비교 (김도학, 2006)

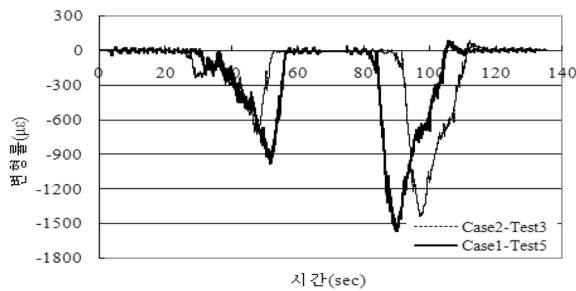


그림 10. 횡 방향 진동 및 무진동 주행 시 최대 변형률 비교 (김도학, 2006)

ST5에서 발생하였다. 따라서 ABM에 의한 진동 발생 시 가시설 레일 구조물에 발생하는 차륜 하중의 증가율을 산출하기 위해 ST3와 ST5에서 발생하는 최대 변형율을 진동이 없는 이동 상태의 최대 변형률과 비교하였다.

그림 9와 그림 10의 그래프는 진동 상태(주행 중 철근 낙하 : Case1)와 무진동 상태(주행 무진동 : Case2)에서 ABM의 주행에 따른 지지대의 변형률을 나타낸 것이다. 각 방향별 최대 변형률의 발생 Case 및 Test는 표 7과 같다.

각 변형률계의 데이터를 이용하여 진동에 의한 증가율을 산정하는 것은 가시설 레일의 임의적 거동 특성상 현실적으로 타당한 증가율 산정에 문제점이 있다. 따라서 가시설 레일의 계측 실험 데이터 중 최대 변형률은 반복된 실험 결과에서 유사한 값을 나타내므로 각 변형률계의 데이터 중 최대 변형률이 발생하는 부분을 검토하여 증가율을 산정하였다.

그림 9와 그림 10으로부터 각각 종, 횡 방향 최대 변형률을 구할 수 있으며 각 방향별 최대 변형률은 표 8과 같다.

주행 중 진동상태에서의 계측 실험 결과 최대 6.95%의 증가율이 나타났으므로 가시설 레일의 진동에 의한 증가율

표 8. 각 방향별 최대 변형률

구분	Case1(με) (진동)	Case2(με) (무진동)	최대 변형률 증가 (%)
종방향	970.75	910.37	6.63
횡방향	1563.16	1461.53	6.95

은 6.95%로 산정하여 유한요소 해석에 적용하는 것이 바람직하리라 사료되며, 그 외에 가시설 레일 구조물이 설치되는 현장의 조건과 전단 철근과 지지대와의 용접 상태, 그리고 강관으로 구성된 레일과 레일의 접합 상태와 같은 불확실한 현장상황을 고려하여 이 후 ABM의 이동을 위한 가시설 레일과 유사한 비 체결 레일의 유한요소 해석에 적용 가능한 7%의 진동에 의한 하중 증가율을 제안하였다.

4. 가시설 레일 구조물의 수치해석 검증

4.1 가시설 레일의 수치해석 검증을 위한 모형화 기법

가시설 레일 구조물은 그림 11과 같은 형상을 하고 있다.

가시설 레일 구조물의 모형화는 평철에 대하여 쉘 요소를 사용하여 모형화 하였으며, 그 외 지지대와 스크류 바, 전단 철근, 받침, 레일, 종 방향 보강 철근은 모두 빔 요소를 이용하여 모형화 하였다. 한편 비선형 거동을 하는 부재를 제외한 용접으로 접합된 모든 부재들 사이의 구속조건은 강철 구속 요소를 사용하였으며 레일과 받침의 구속 요소는 횡 방향과 종 방향만을 구속하는 조건 구속 요소를 사용하였다.

한편 레일과 받침부분은 경계 비선형 거동을 보이므로 비선형 요소를 사용해서 모형화 해야 한다. 따라서 그림 12와 같이 받침 부분을 모형화한 빔 요소와 레일 부분의 빔 요소는 각 17개의 연결 요소로 모형화 하였다. 받침과 레일의 종 방향과 횡 방향 구속을 위하여 종 방향 변위에 한정하여 구속하는 조건 구속 요소를 5개, 횡 방향 변위에 한정하여 구속하는 조건 구속 요소를 5개 사용하였다. 레일 부분이 상부 방향으로 상승하는 현상을 고려하기 위해 7개의 압축 전단 요소를 이용해 각 노드를 연결하여 모형화 하였다.

거더교 상부 돌출 철근은 그림 13과 같이 xyz 좌표계에서 u_x , u_y , u_z 의 변위와 r_x , r_y , r_z 의 회전에 대해서 모두

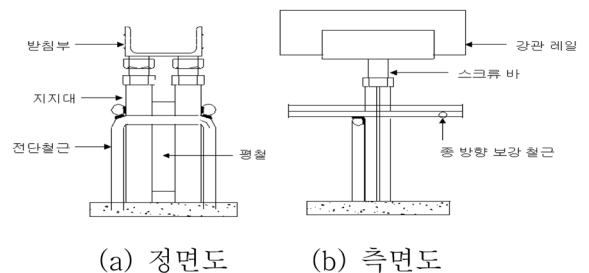


그림 11. 가시설 레일 구조물의 정면도 및 측면도(GS건설주식회사, 2005)

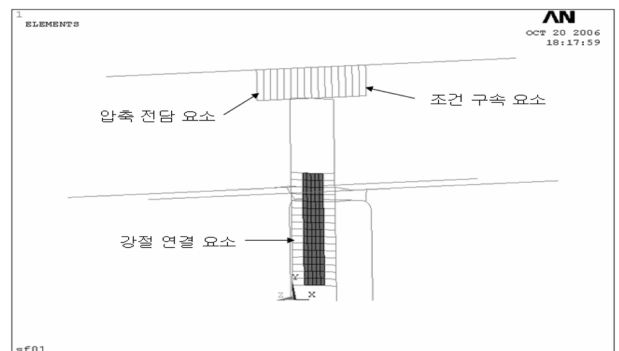


그림 12. 빔 요소의 연결 요소

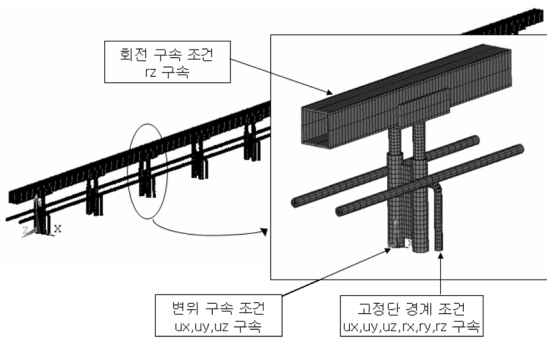


그림 13. 가시설 레일 구조물의 경계조건

구속하였다. 또한 레일의 회전이 발생하는 문제가 있어 레일 부분에 축 방향 회전(rz)를 구속하는 경계조건을 적용하였다.

4.2 유한요소 모델을 위한 수치해석 검증

저속 주행하는 철근 배근 장치의 특성상 주행 하중 모형이 가시설 레일 구조물의 동적 해석에 적합할 것이라 사료되므로 가시설 레일 구조물의 동적해석에 대한 이동하중의 모형화는 주행 하중 모형을 사용한다.

가시설 레일 구조물에 특별한 감쇠장치는 설치 되어있지 않으며 구조물 자체적으로 발생하는 감쇠만 고려한다. 그러므로 감쇠가 구조물에 걸쳐서 분포된 경우 주로 사용하는 고전적 감쇠인 레일라이 감쇠를 적용하였다.

경계비선형 시간이력해석은 전체 구조물을 선형계와 비선형계로 나누고 발생하는 비선형 부재력을 선형계에 가해지는 외부 동적하중으로 치환하여 해석한다. 여기서 선형계는 선형탄성 부재와 비선형연결요소의 비선형 스프링으로 구성되며 비선형계는 비선형연결요소의 비선형 스프링만으로 구성된다.

적절한 해석 범위 검토를 위해 가시설 레일 구조 모형을 다양한 경간에서 비선형 동적 해석을 실시하였다. 임의의 하중 3495 kgf를 가시설 레일의 한 경간인 600 mm보다 긴 800 mm 구간에 이동하중 모형으로 재하 하여 이동하중이 한 경간에 걸쳐 충분히 재하 되도록 하였고 각 모델의 중앙 경간부 800 mm에 걸쳐 이동하중을 재하 하였다.

선형 이동하중 해석에서는 경간의 수와 상관없이 모든 경간에서 일정한 최대응력이 발생하였다. 그러나 비선형 이동하중 해석에서는 그림 14에서 알 수 있듯이 경간 수가 늘어날수록 최대응력은 점점 감소하는 경향을 나타내다 15경간 이상의 경간을 가지 모형에서는 변화의 폭이 매우 감소

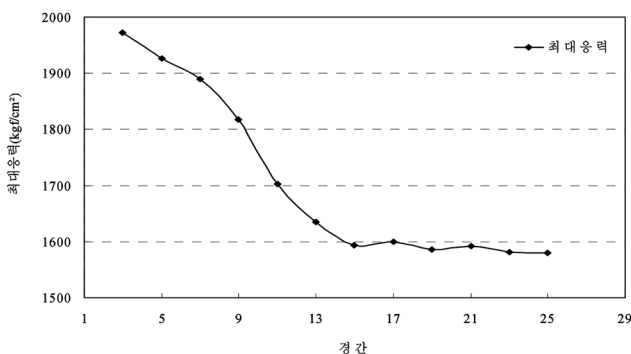


그림 14. 각 경간별 최대 응력

하여 유사한 최대 응력을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러므로 가시설 레일의 비선형 이동하중 해석에서 경간 15경간 이상의 모형화를 적용하는 것이 바람직하다.

5. 가시설 레일의 동적거동 특성

5.1 유한요소 모델의 검증

본 연구에서는 진동특성에 대한 하중증가 효과를 고려하고 적합한 모형을 통해 유한 요소해석을 실시한 후 그 결과를 계측실험 결과와 비교 하여 검증하였다. 그 결과는 그림 15의 그래프와 같으며 지지대 부분의 횡 방향 변위인 레일 축 직각 방향 변위를 검토하였다.

각 실험데이터의 최대변위는 1.72 mm이며, 진동 주행 시 발생하는 해석데이터의 최대변위는 1.6 mm, 무진동 주행 시 발생하는 최대 변위는 1.58 mm이므로 각각에 대한 오차는 진동주행에 대하여 약 7.00%와 무진동주행 시는 8.14%로 나타났다. 따라서 실 구조물 실험에 의해 산출된 계측데이터와 본 연구에서 제안된 모델과 하중 증가율을 사용해서 도출된 해석데이터는 거의 유사한 거동을 보인다. 그러므로 제안된 유한요소 모델은 타당한 것으로 판단된다.

5.2 일반 주행속도에서 가시설 레일의 동적 거동 특성

그림 16은 5 m/min의 일반 작업 주행 속도를 가지는 이동하중이 지나가는 경간 중앙부의 y방향 변위에 대한 시간 이력해석 결과이다. 15초 전의 변위는 차륜하중 작용에 따른 각 지지대의 반력으로 인해 상승하는 현상을 보이고 있다.

동일한 지점에서 발생한 최대 응력은 2490 kgf/cm²으로 레일 지지대 부위에서 발생하였다. 그림 17과 같이 하중이 재하 되는 지점을 기준으로 하여 주위 레일이 들뜨는 현상을 확인 할 수 있으며, 최대 응력 발생 부위는 지지대의 횡

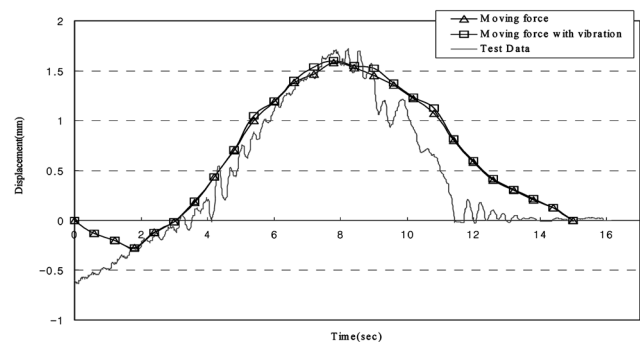


그림 15. 횡 방향 변위의 해석결과와 계측데이터 비교

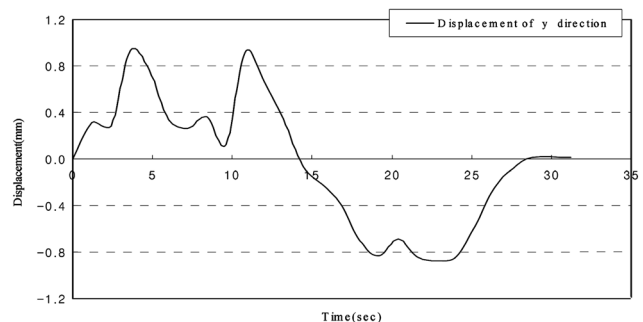


그림 16. 경간 중앙부에서의 y변위

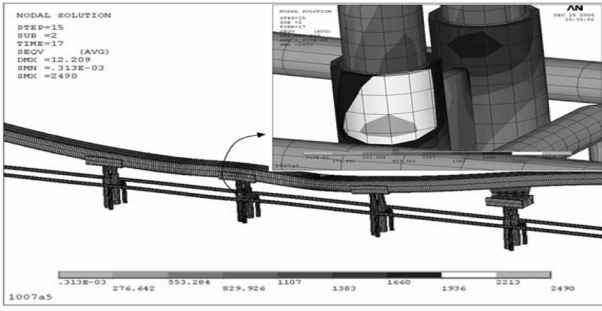


그림 17. 진동효과를 고려한 레일의 최대 발생 응력

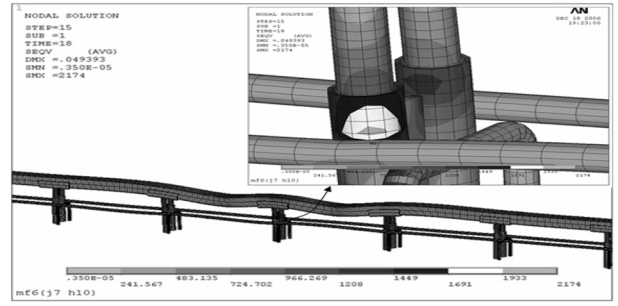


그림 20. 선형 모델의 해석결과

방향 부분, 즉 레일 축 직각방향으로 발생하는 것으로 나타났다.

5.3 각 경간별 레일의 비선형 동적거동특성

그림 18은 한 경간을 이루는 총 23개의 노드 중 지지대 상부에 위치해 있는 2개 노드를 제외한 21개의 노드의 변위를 도시한 그래프이다. 첫번째 노드와 마지막 노드에 가까울수록 변위 차는 작은 경향을 보이며, 중앙부에 접근할수록 큰 차이를 보인다. 최대 변위는 8번 노드에서 발생하였으며 변위 차는 0.0688 mm로 첫 번째 경간에 대해 두 번째 경간의 변위가 약 16%증가한 것을 알 수 있다.

5.4 선형 레일에 대한 거동 비교

그림 19는 진동특성을 고려한 비선형 레일과 가시설 레일을 선형 구조물로 모형화한 레일의 경간 중앙부의 처짐을 나타낸 결과이다. 이를 통해 알 수 있듯이 비선형 특성을 가지는 가시설 레일에 비해 선형 레일의 동적응답은 변위의 폭이 상당히 작게 나타난다. 특히 들림 현상이 발생하지 않는 선형 모델의 특성상 상부로 들뜨는 현상이 없기 때문에

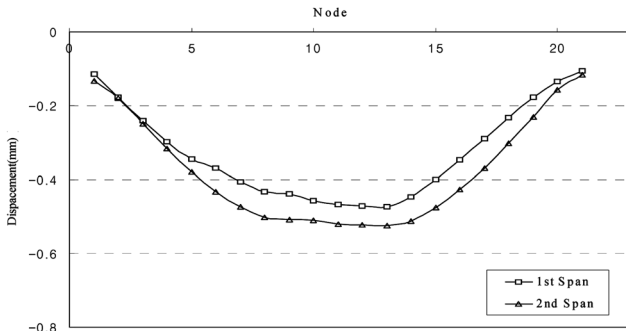


그림 18. 첫 번째 경간과 두 번째 경간에 대한 변위

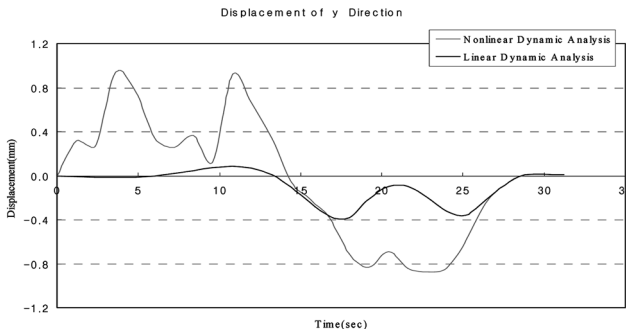


그림 19. 가시설 레일의 선형 및 비선형 응답

상부 방향으로의 변위 발생은 미소한 수준이다.

선형화된 가시설 레일의 최대 발생응력은 2174 kgf/cm²으로 비선형 거동을 고려한 동적해석의 결과인 2490 kgf/cm²보다 316 kgf/cm²의 응력이 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 선형 해석에 대해 14.5%증가한 것으로 나타났다. 그림 20은 선형화 된 가시설 레일의 해석결과이다.

5.5 주행속도에 따른 가시설 레일의 동적응답

가시설 레일 구조물의 비선형 동적해석을 통해 얻어진 최대 응력과 비선형 정적 해석을 통해 얻어진 최대 응력을 비교하였으며 비선형 거동을 하는 가시설 레일 구조물의 동적 증가계수를 도출하여 동적 거동에 대한 안정성을 평가하였다. 동적증가계수는 다음의 식으로 표현된다.

$$\text{동적증가계수} = \frac{\text{최대동적응답}}{\text{최대정적응답}} \quad (1)$$

최대 정적 응답은 동적 해석모형과 동일한 정적해석 모형에 진동에 의한 증가하중을 고려하여 해석을 수행 하였으며, 그 결과 가시설 레일의 지지대 부분에서 최대 응력이 2250 kgf/cm²발생하였다. 최대 동적 응답은 ABM의 속도를 5 m/min에서 40 m/min까지 5m/min의 속도 씩 증가시켜서 구하였다. 그림 21은 가시설 레일의 동적증가계수를 그래프로 나타낸 것이다.

그림 21의 그래프를 보면 철근 배근 장치의 속도가 진동 중 주행 상태에서 25 m/min 이상을 넘어 가면서 동적 증가 계수가 급증하는 것을 알 수 있다. 이는 레일과 받침부가 구속이 되어있지 않는 특성상 상부 주행 장치의 속도가 증가함으로써 발생하는 진동에 의한 결과로 판단된다. 따라서 일반적인 철도교의 동적응답과 비교해 볼 때 속도에 상당히 민감한 것으로 판단된다.

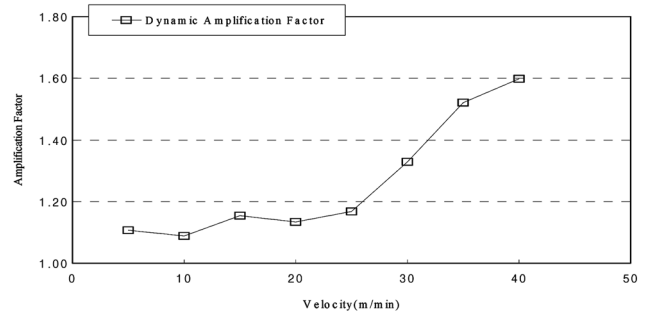


그림 21. 가시설 레일의 동적증가계수

6. 결 론

본 연구에서는 가시설 레일의 실 구조물 계측 실험을 통하여 상부 주행 장치인 ABM의 주행과 상하진동에 의해 발생하는 변형률을 검토하여 주행 상태에서의 진동에 의한 하중 증가율을 제안하였고 유한 요소 모델에서 하중을 적용할 때 하중 증가율을 고려하여 진동에 의한 영향을 반영하였다. 또한 비선형 동적 특성을 가지는 가시설 레일 구조물의 적절한 모형화 및 해석 방법에 대해 연구하여 실험적으로 검증은 거쳤으며 검증된 방법으로 상용 해석 프로그램인 ANSYS를 이용 하여 비선형 동적 유한 요소 모델에 대한 해석을 실시하였다.

1. 주행 중 진동에 의한 종 방향 및 횡 방향에서 최대 증가율은 6.95%로 나타났다. 그러므로 진동에 의한 하중 증가율은 불확실한 현장상황을 반영하여 7%를 고려하는 것이 바람직하리라 판단된다.
2. 비선형 동적 특성을 고려한 모형화 범위에 관한 연구 결과 가시설 레일의 비선형 동적 해석을 위해서는 최소 15경간 이상의 유한요소 모형화가 적합한 것으로 판단된다.
3. 선형 레일과 비선형 레일의 동적해석 결과 비선형 레일이 선형 레일에 비해 최대 발생응력이 14.5% 더 큰 값을

보였다. 따라서 비선형 레일이 선형레일에 비해 상재되는 하중에 대해서 더 큰 위험성을 내포하고 있다.

4. 가시설 레일의 비선형 동적 응답에 대한 연구결과 동적 증가계수는 상부 주행 장치의 주행속도가 5 m/min과 10 m/min을 초과하면서 다소 증가하는 현상을 보이고 25 m/min을 초과하면서 급증하므로 가시설 레일이 상부 주행 장치의 속도에 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- 김도학(2006) 거더교 슬래브 자동화 시공을 위한 SCM 레일의 종 횡 방향 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교.
대한건축학회(2000) 건축물 하중기준 및 해설, 태림문화사.
GS건설주식회사(2005) ABM 구조계산서 및 도면.
Anil K. Chopra (2000) *Dynamics Of Structures*, Prentice Hall, USA
Li, G.-Q. and Li, j.-j. (2002) A tapered Euler-Timoshenko beam element for analysis of steel portal frame. *Journal of Constructional steel research*, JCSR, Vol. 58(14), pp. 1531-1544.
Kohnke, P.L. (1998) *ANSYS Theory Reference-Release 5.5*. Ansys, Inc., SAS IP, Inc., Houston.

(접수일: 2007.2.23/심사일: 2007.3.13/심사완료일: 2007.11.1)