

# 텐션클램프의 초기 체결력이 탄성레일체결장치의 성능에 미치는 영향

이동욱\* · 최정열\*\* · 백찬호\*\*\* · 박용길\*\*\*\*

Lee, Dong Wook\* , Choi, Jung Youl\*\* , Baik, Chan Ho\*\*\* , Park, Yong Gul\*\*\*\*

## Influence of Initial Clamping Force of Tension Clamp on Performance of Elastic Rail Fastening System

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the influence of initial clamping force of tension clamp on the performance of an elastic rail fastening system used in sharp curve track. In this study, the initial clamping force and the increasing lateral wheel loads were conducted in the analytical and experimental study, i.e., finite element analysis, laboratory and field test. Using the analytical and experimental results, the performance of the tension clamp was investigated. It was found that the stress of tension clamp depends on the initial clamping force. Therefore the initial clamping force appeared to directly affect the compression stress of the tension clamp. It was found that the compression stress of tension clamp was transferred to the tensile stress by applied the lateral wheel load in service sharp curve track. Further, it was concluded that the initial clamping force was applied on the strengthening force for the tension clamp and then the appropriate initial clamping force was important to ensure a stable performance and long term endurance of tension clamp.

**Key words :** Tension clamp, Elastic rail fastening system used in sharp curve track, Initial clamping force

### 초록

본 연구의 목적은 텐션클램프의 초기 체결력이 급곡선 궤도용 탄성레일체결장치의 성능에 미치는 영향을 검토함에 있다. 이를 위해 본 연구에서는 탄성레일체결장치의 구성품 중 텐션클램프의 거동을 평가하기 위해 초기 체결력의 변화와 횡압의 증가를 고려한 실내시험, 현장측정 및 수치 해석을 수행하였다. 수치해석 및 실험결과, 초기 체결력의 감소는 텐션클램프에 도입되는 초기 압축응력의 감소로 나타났다. 또한 텐션클램프의 압축응력은 급곡선 궤도에서 발생하는 횡압의 작용에 따라 인장응력으로 변환되는 것으로 나타났다. 따라서 초기 체결력에 의해 텐션클램프에 도입된 압축응력은 외력에 따른 발생 인장응력 저감을 위한 보강력으로 작용하는 것으로 분석되어, 탄성레일체결장치의 장기 내구성능 확보와 안정적인 거동을 유지하기 위해서는 적정 초기 체결력의 확보가 중요한 것으로 나타났다.

**검색어 :** 텐션클램프, 급곡선 궤도용 탄성레일체결장치, 초기 체결력

## 1. 서론

콘크리트궤도용 탄성레일체결장치에는 레일과 침목을 단순히 결속하는 역할을 하는 과거의 클립형태에서 벗어나 레일과 체결구(체결스프링)사이에서 열차하중 및 선형조건에 의해 발생하는 레일의 틸팅(레일의 회전변위) 및 인장, 압축력 등에 스스로 저항할 수 있는 체결스프링(이하 텐션클램프)을 사용하고 있으며 이에 독일 및 유럽의 철도선진국에서는 오래전부터 텐션클램프에 대한 다양한 연구개발을 수행하였으며

\* 정회원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정 (dwlee9@hanmail.net)

\*\* 교신저자 · 베를린공과대학교 박사과정 (Corresponding Author · Berlin Institute of Technology · cjyppassion@hotmail.com)

\*\*\* 서울메트로 레도신호처 선임 (wcoolw@seoulmetro.co.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수 (ygpark@seoultech.ac.kr)

Received October 15 2012, Revised December 15 2012, Accepted February 27 2013

현재 다수의 국가에서 일반적으로 사용되고 있다(C. Esveld, 2001; B. Lichtberger, 2010; Baik, C-H, 2011). 또한 최근에는 국내에서도 콘크리트궤도용 탄성레일체결장치 및 이에 적용되는 탄성패드 및 체결스프링에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Korea Rail Network Authority, 2002; 2008; Baik, C-H, 2011). 그러나 국내 연구의 대부분은 탄성레일체결장치 전반에 대한 거동분석에 초점이 맞추어져 있으며 특히, 레일패드 및 방진패드와 같은 탄성재료의 특성변화에 따른 탄성레일체결장치 및 이를 적용한 콘크리트궤도의 역학적 거동분석이 주로 수행되어 왔다(Korea Rail Network Authority, 2002; 2008). 그러나 탄성레일체결장치를 구성하는 다양한 구성품 중 텐션클램프의 역할 및 거동 특성에 관한 실험 및 해석적 연구는 다소 부족한 실정이며 텐션클램프에 대한 대부분의 특성치는 제조사의 정보를 이용하고 있는 실정이다(Baik, C-H, 2011; Baik, C-H et al., 2011). 반면 실제 현장에서는 운영기관별로 다양한 열차운행 조건, 궤도상태 및 선형조건과 초기시공품질 등 탄성레일체결장치의 거동에 영향을 미칠 수 있는 다양한 변수가 존재하여 일부 현장에서는 제조사에서 제시하는 사용수명보다 이른 시점에서 텐션클램프의 파손이 발생되고 있다(Baik, C-H, 2011; Baik, C-H et al., 2011; DB Netz AG, 2002; Eisenmann J et al., 2000; 2002). 텐션클램프의 경우 일반적인 클립형 체결장치와 달리 종류별로 각각의 텐션클램프가 예측된 성능수준을 확보하기 위해 필요한 적정 체결력(체결토크)이 존재하며 시공시 이를 지키도록 시방기준에 제시되어 있다(Baik, C-H, 2011; B. Lichtberger, 2010; DB Netz AG, 2002; Eisenmann J et al., 2000; EN 13481-2, 2002; EN 13149-4, 2002; Korea Rail Network Authority, 2008). 그러나 실제 시공현장에서는 모든 텐션클램프를 토크렌치를 이용하여 정확한 체결력으로 체결하는 것이 쉽지 않은 실정이다. 따라서 정량적인 체결력의 크기를 맞추지 못하고 텐션클램프(Middle band)의 변형량을 기준으로 시공하게 되는 경우가 빈번하게 발생하며 이러한 경우 텐션클램프에는 체결력의 과부족 상태가 유발될 수 있을 것으로 판단된다(Baik, C-H, 2011).

따라서 본 연구에서는 텐션클램프의 시공 시 적정 체결력 확보가 텐션클램프의 성능에 미치는 중요성을 입증하고자 현장조사, 수치해석 및 실내의 시험을 수행하였다. 서울지하철 급곡선 구간(1호선

시청~종각, R140)에서 실제 발생하는 텐션클램프의 파손 유형 및 현황을 검토하였다. 또한 초기 체결력의 변화에 따른 텐션클램프에 발생하는 변위 및 응력상태를 해석 및 실험적으로 분석하였으며, 실제 텐션클램프 파손이 발생하고 있는 구간에서의 현장측정결과와 비교, 분석하여 텐션클램프의 파손원인을 파악하고 초기 체결력이 텐션클램프의 발생응력에 미치는 영향을 검토하였다(Baik, C-H, 2011).

## 2. 텐션클램프의 특성 및 파손현상분석

### 2.1 급곡선 탄성레일체결장치(SM-F)의 개요

본 연구의 대상 궤도구조는 급곡선 궤도구조로써 서울지하철 1호선의 급곡선으로 인한 극대하중의 영향을 고려하여 궤도품질 수준과 열차 주행안정성을 확보 할 수 있도록 특수 설계되었다(Baik, C-H, 2011). 급곡선 궤도구조(Post tensioning tie track, PTT track)의 주요특징은 Table 1과 같다(Baik, C-H, 2011; Baik, C-H et al., 2011).

급곡선 탄성레일체결장치(Seoul Metro-Fastening system, SM-F)에 사용되는 체결스프링은 텐션클램프(SK12)이며 주요 특징 및 재료는 Table 2와 같다(Baik, C-H, 2011; Baik, C-H et al., 2011). 텐션클램프는 방진패드와 함께 레일체결장치의 성능에 중요한 요소이다. 텐션클램프의 주요 기능은 레일의 위치고정 유지, 체결력 유지를 통한 궤도 안전성 확보, 레일의 탈링 및 부가작용력에 대한 탄성적 거동과 피로진폭 확보 등이 있다(C. Esveld,

Table 1. Properties of PTT track system with SM-F

Name of rail fastening system	Seoul Metro-Fastening system (SM-F)
fastening spring	Vossloh SKL12 (Tension clamp)
Adjustment for gauge	Max. 19 mm
Resilient pad	PUR pad, thickness = 12 mm
Target section	Track curvature (R) < 200 m
Figure of PTT track system including SM-F	

Table 2. Properties of tension clamp (SKL12)

Fatigue stroke	> 2.5 mm	Design torque	200 Nm	
Deflection	About 13 mm	Resistance element for tilting	Middle band	
Toe load	2 × 12 kN (per clamp)	Adjustment for level	20 mm	
Optimum distance between rail flange and middle band (applied by the design torque) : 1~3 mm				

2001; B. Lichtberger, 2010; Korea Rail Network Authority, 2002).

텐션클램프(SK12)는 Table 2와 같이 열차하중에 의한 레일의 틸팅 발생 시 레일을 지지하고 텐션클램프의 전체적인 파손을 방지하는 역할을 하는 Middle band와 레일 플랜지에 직접 접촉하여 레일을 고정하고 복진 및 틸팅에 탄력적으로 저항하는 Spring arm으로 구성된다(B. Lichtberger, 2010; EN 13481-2, 2002; Korea Rail Network Authority, 2002). 텐션클램프는 체결 시 Middle band가 레일 플랜지측으로 밀착되면서 전체적인 텐션클램프의 초기 형상이 변화하며 이러한 형상 변화에 의해 텐션클램프 내부에는 내력이 발생하는 구조적 특성을 갖는다(B. Lichtberger, 2010; EN 13481-2, 2002). 체결력 도입 전 신품 텐션클램프의 경우 Middle band와 Spring arm 사이의 간격은 20mm이며, 정상 체결력(200Nm) 도입 시 Middle band는 약 17mm 정도 하향변위가 발생하여 Middle band와 Spring arm 사이에는 약 3mm의 공간이 생기게 된다(Baik, C-H et al., 2011; Eisenmann J et al., 2000; EN 13481-2, 2002)(Table 2 참조). 따라서 본 연구의 수치해석에서는 이러한 텐션클램프의 초기 체결력 도입에 따른 기하학적 형상 변화특성을 입력하중조건으로 설정하여 해석에 적용하였다(Baik, C-H, 2011).

윤증이 지배적인 경우에 2중 탄성레일체결장치의 체결스프링 응력은 완화되는 방향에 있지만 횡압을 받는 구조의 체결스프링에서는 레일의 틸팅으로 체결스프링과 레일간의 접촉점의 위치가 변화하며 그에 따라 스프링의 체결력에 변동이 생기고 체결스프링 각부의 응력이 변동한다(C. Esveld, 2001). 이들 응력 변동의 합계(응력진폭)와 초기 체결에 의해 생긴 응력(중심응력)이 항상 스프링 강 피로한도의 일정한 기준을 만족하여야 한다. 따라서 체결스프링에 발생하는 응력은 초기 체결 시의 응력과 열차주행 시 발생하는 응력의 합으로 나타낼 수 있다(C. Esveld, 2001; B. Lichtberger, 2010; DB Netz AG, 2002; EN 13481-2, 2002; Korea Rail Network Authority, 2008).

기존 연구에서는 체결스프링에 도입하는 초기 체결력은 레일 패드의 초기 스프링계수 및 레일두부 횡변위에 직접적인 영향을 미치는 요소이며, 콘크리트 궤도의 경우 레일의 회전 변형량이 레일패드 강성뿐만 아니라 체결스프링의 영향도 받는 것으로 나타났다(Korea Rail Network Authority, 2008). 또한 기존 연구에서는 레일체결장치의 적정 교환주기를 산정함에 있어 레일패드의 교체주기를 제시하면서 이와 함께 레일체결장치의 기타 구성품에 대한 일반적인 교체주기 및 교체시기를 체결장치 구성품별로 간략하게 소개한 바 있다(Korea Rail Network Authority, 2008). 기존 연구에서 제시된 바로는 일반적으로 체결클립은 내구한도(Endurance limit, D영역) 이하의 응력이 발생하도록 설계되기

때문에 체결클립 원재료의 품질이 확보되는 한 교체할 필요가 없으나 초기 품질 미확보, 유지보수작업에 따른 손상 및 과변형이 발생될 가능성이 있기 때문에 정기적인 검사가 필요하다고 기술되어 있다(Korea Rail Network Authority, 2008). 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 언급한 체결구(체결스프링)의 손상 및 과변형의 요인 중 초기 품질 미확보의 요인 중 체결장치 시공과정에서 발생 가능한 초기 체결력의 과부족을 연구의 매개변수로 설정하는 근거로 기존 연구결과(Korea Rail Network Authority, 2008)를 활용하였다(Baik, C-H, 2011).

## 2.2 텐션클램프의 파손현황 및 유형 분석

2009년 1월부터 2010년 10월까지 서울지하철 1호선 시청~종각 급곡선 구간(R140, 궤도연장 527m)에 적용된 텐션클램프의 파손 현황을 조사한 결과, 조사기간(약 21개월) 동안 총 76개(월 최대 18개)의 텐션클램프가 파손된 것으로 나타났으며 파손 발생량은 Fig. 1과 같이 점차적인 증가 추세에 있는 것으로 분석되었다. 또한 조사기간 동안 대상구간에서 발생한 총 76개의 텐션클램프의

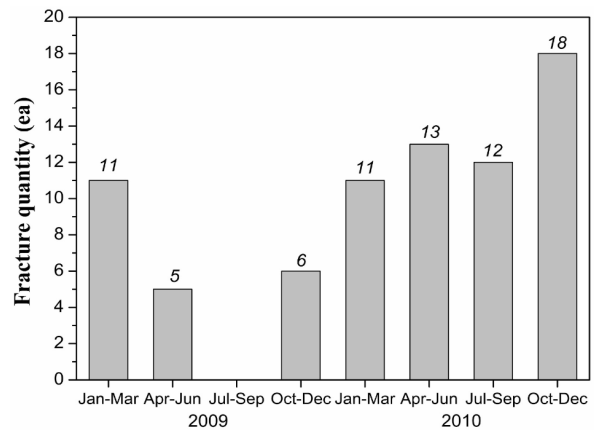


Fig. 1. Fracture quantity of in-situ tension clamp (fastening spring)

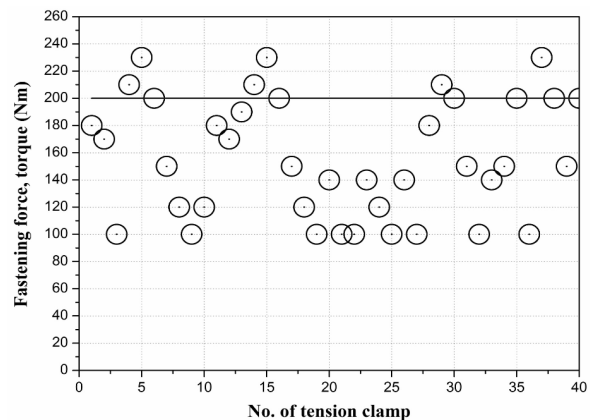


Fig. 2. Variations on the fastening torque in test site

파손량은 같은 기간 동안 서울지하철 1~2호선에 부설된 급곡선 궤도구조 적용구간(총연장 3.5km)에서 발생한 파손량의 약 93%를 차지하는 것으로 분석되었다(Baik, C-H, 2011).

텐션클램프 파손개소에 대한 현장조사를 통해 텐션클램프의 파손유형을 분석하였다. 현장조사 방법은 토크렌치를 이용한 체결력 확인과 현장 시료채취를 통한 텐션클램프의 변형상태 확인과정으로 구분하였다. 기 부설된 텐션클램프의 체결력(체결토크)을 토크렌치로 재확인하는 과정을 통해 시공시 도입된 체결력을 측정하였다. 텐션클램프의 경우 시공당시 도입된 체결력의 수준을 토크렌치를 이용하여 비교적 정량적으로 확인이 가능하며 현장에서 재측정한 대상구간의 측정 체결력의 분포는 Fig. 2와 같다(Baik, C-H, 2011).

현장 체결력 조사는 텐션클램프의 상습파손 개소에 있는 총 40개의 텐션클램프를 대상으로 실시하였으며 토크렌치로 정수값의 체결력(토크값)을 측정하고 첫째자리(일의 자리)에서 반올림하였으며 측정오차의 범위는 약  $\pm 10\text{Nm}$  이다(Baik, C-H, 2011). Fig. 2와 같이 측정 체결력의 분포는 정상 체결력(200Nm)을 대부분 하회하는 수준으로 나타났으며 일부 이를 초과하는 과체결상태도 조사되었다. 측정결과 현장 체결력의 약 50% 이상이 100~160Nm 범위에 분포하는 것으로 조사되었으며, 정상 체결력을 만족하는 경우는  $\pm 10\text{Nm}$  범위를 포함하여 약 25%에 불과하였다.

또한 측정 체결력의 하한치가 100Nm로 나타나 본 연구에서 검토하고자 하는 초기 체결력 변화의 하한치를 정상 체결상태의 50% 수준인 100Nm로 설정하는 근거로 본 측정결과를 활용하였다

(Baik, C-H, 2011). Fig. 3은 신품 텐션클램프와 현장에서 채취한 텐션클램프의 형상을 비교한 것으로서 현장시료의 경우에는 시료 채취 후 48시간 후에 변형상태를 측정하여 비교하였다. Fig. 3(a)는 체결력 도입 전의 신품 텐션클램프의 형상을 나타내며 Middle band 직하부 공간 20mm를 확보하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)의 경우, 해당 텐션클램프의 현장 체결력은 약 150 Nm로 측정되었으며 주변 텐션클램프의 체결력 분포는 약 100~220Nm로 나타나 인접한 텐션클램프 간의 체결력의 편차가 큰 것으로 조사되었다. 그러나 해당 텐션클램프의 경우 해체 후에도 Middle band의 영구 변형은 발생하지 않았다. 반면 Fig. 3(c)의 경우에는 체결력이 약 100Nm로 측정되었으며 Middle band의 변형경화 현상이 나타났다. 본 연구의 파손현황 조사결과(Fig. 2)에는 이와 같은 변형경화 상태를 제외한 실제 파괴가 발생한 경우만 조사 대상으로 하였다. 현장조사결과, 텐션클램프의 파손유형은 일정하지 않은 체결력으로 인하여 특정 텐션클램프에 응력이 집중되어 조기에 파손되는 유형(Fig. 3(b))과 현장에서 파손되지 않았으나 초기 체결력 부족으로 인하여 신품(Fig. 3(a)) 대비 텐션클램프의 변형경화(strain hardening)가 진행된 경우(Fig. 3(c))로 크게 두 가지로 분석되었다(EN 13481-2, 2002). 또한 Fig. 4와 같이 Spring arm 절곡부에서 파손이 발생하는 경우가 약 99%인 것으로 조사되어 Spring arm 절곡부는 열차주행 시 횡압에 의한 레일 탈팅의 저항을 가장 크게 받는 부분인 것으로 분석되었다(Baik, C-H et al., 2011; Baik, C-H, 2011).

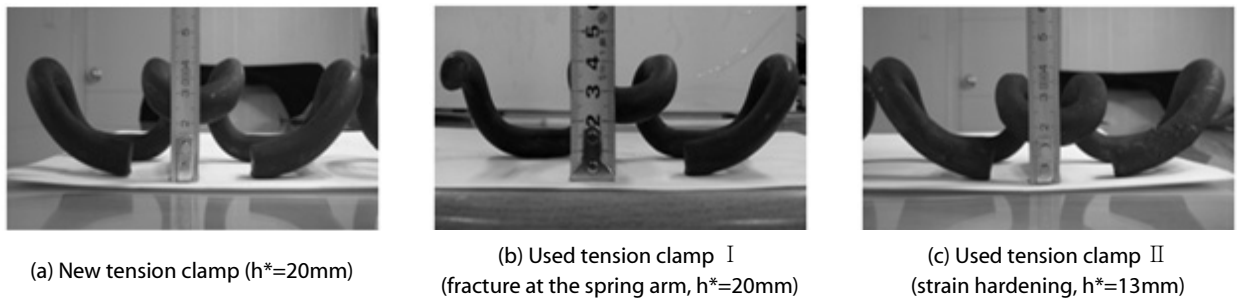


Fig. 3. Comparison of deformed shape between new and used tension clamp  
h\*: Distance between middle band and bottom of spring arm



Fig. 4. Photograph of the fractures for in-situ tension clamp

### 3. 텐션클램프의 거동 측정

#### 3.1 실내시험

텐션클램프의 거동에 영향을 미치는 초기 체결력(체결토크)과 과대 횡압의 영향을 검토하고자 정적재하시험을 수행하였다. 실내 시험을 위한 궤도시험체는 Fig. 5와 같이 현장측정구간과 동일한 탄성레일체결장치(SM-F)가 적용된 침목 3조의 급곡선 궤도구조(PTT track, 침목간격; 625mm)를 이용하였으며, 정격하중 100kN의 UTM을 이용하여 횡방향력을 최대 80kN까지 정하중으로 재하하였다(Baik, C-H, 2011). 실내시험에 고려된 횡압의 수준은 현장측정을 통해 획득한 동적 횡압의 약 2배로써 과대 횡압의 영향을 모사하고자 침목 간 중앙과 레일지지점의 레일두부 측면에 각각 최대 80kN까지 10kN 단위로 횡하중을 재하하고 텐션클램프의 응력변화수준을 검토하였다. 또한 체결력의 변화에 따른 텐션클램프(Spring arm 절곡부)의 응력을 검토하고자 Fig. 5(c)와 같이 토크렌치를 이용하여 체결토크를 100Nm, 150Nm, 200Nm, 250Nm로 각각 변화시켜가며 텐션클램프의 발생응력을 측정하고, 동시에 체결력 도입단계별 Middle band의 변위를 측정하여 수치해석의 입력하중조건으로 적용하였다(Baik, C-H, 2011).

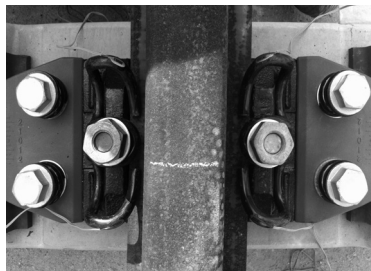
#### 3.2 현장측정

현장측정 대상선로는 텐션클램프의 파손이 빈번하게 발생하는

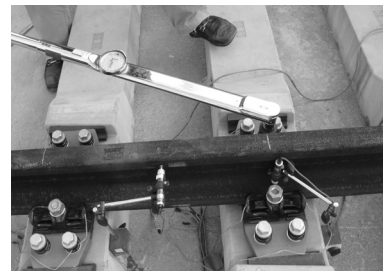
서울지하철 1호선의 급곡선 구간(R140)으로서 측정구간의 전경은 Fig. 6(a)와 같다. 대상선로를 주행하는 열차의 평균 운행속도는 약 35km/h이고 일 평균 308회 운행한다. 또한 일 평균 약 46만명의 승객이 이용하는 구간으로써 일 평균 통과톤수는 약 15만톤이다(Baik, C-H et al., 2011; Baik, C-H, 2011). 운행선에서의 현장측정을 통하여 급곡선 궤도의 동적 윤중 및 횡압의 수준을 파악하고, 초기 체결력이 텐션클램프의 발생응력에 미치는 영향을 실험적으로 입증하고자 하였다. 현장 측정시스템은 내외측 윤중, 횡압 및 레일두부 횡변위를 비롯한 텐션클램프 각부의 응력센서를 조합하여 총 32개의 채널을 동시 측정할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 실제 발생한 응답치를 왜곡하거나 데이터의 손실이 발생하지 않도록 충분한 수집율(Sampling Rate, 1kHz)을 설정하였다(Baik, C-H et al., 2011; Baik, C-H, 2011). 대상선로에서 측정된 변형률 데이터는 증폭기를 통해 증폭되어 MGC-PLUS(Data Acquisition System)에 저장한 후, ORIGIN™을 사용하여 분석하였다. 측정위치를 주행하는 열차의 동적 윤중 및 횡압을 측정하기 위해 일반적인 윤중 및 횡압측정법을 이용하여 침목간 중앙의 내, 외측 레일복부에 윤중 및 횡압센서를 설치하여 측정하였다(Baik, C-H, 2011; RD Froehling, 1997; International Union of Railways, 1965). 5mm 용량의 변위계를 이용하였으며 변위계 설치를 위한 지그는 Fig. 6(b)와 같이 콘크리트도상 상면에 견고히 설치하였다. 또한 토크렌치를 이용하여 초기 체결력의 변화(100Nm, 200Nm)를 현장 텐션



(a) SeoulMetro-Fastening system



(b) Strain gage at the tension clamp



(c) Applying on clamping force(torque) and displacement transducer (LVDT)

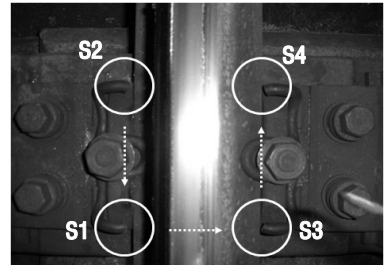
Fig. 5. Photograph of laboratory test



(a) Photographs of field test site



(b) LVDT and strain gage



(c) Failure point of tension clamp

Fig. 6. Photographs of field test site and sensor instrumentation

클램프에 적용하여 Spring arm 절곡부의 발생응력을 검토하였다. Fig. 6(c)와 같이 수치해석 및 실내시험결과를 비롯하여 실제 현장에서 발생한 텐션클램프의 파손 현황을 감안하여 체결력의 영향이 가장 직접적으로 미치는 Spring arm 절곡부(4개소, S1~S4)에 1축 스트레인 게이지를 텐션클램프의 축방향에 맞추어 설치하였으며 실 주행열차하중에 따른 동적 발생응력을 측정하였다(Baik, C-H et al., 2011; Baik, C-H, 2011; RD Froehling, 1997; EN 13481-2, 2002).

#### 4. 수치해석

초기 체결력 변화에 따른 텐션클램프의 응력상태를 검토하고자 범용 구조해석프로그램인 ANSYS version.13을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위한 해석모델은 Fig. 7과 같이 실제 텐션클램프의 기하학적 형상을 정확하게 구현하기 위해 AutoCad를 이용하여 텐션클램프의 제작도면을 바탕으로 정밀하게 모델링하였으며, 이를 ANSYS 프로그램에서 Import하여 절곡부가 많고 체결력 도입에 따른 기하학적 형상변화를 통해 전체적인 거동특성이 변화하는 텐션클램프의 구조적 특성을 수치해석모델에 반영하였다(Baik, C-H, 2011; ANSYS manual, 2008). 해석에 사용된 요소는 3차원 솔리드 요소(Solid element)이며 텐션클램프의 실제 설치조건을 고려하여 Spring arm의 Toe부분은 레일플랜지 상면과 접촉되어 압축되는 조건을 Remote displacement 경계조건

요소로 적용하여 Middle band의 변위제어가 Spring arm에 영향을 줄 수 있도록 모델링하였다(Fixed support). 실제 설치되는 조건과 동일하게 Spring arm의 Toe부분과 Spring arm과 Middle band 사이의 평행부의 경계조건 역시 Fixed support조건으로 해석을 수행하였다(Baik, C-H, 2011; ANSYS manual, 2008). 따라서 텐션클램프의 수치해석 모델은 체결력 도입에 따라 Middle band 상면이 하향변위가 발생됨에 따라 발생하는 Spring arm과 Middle band Toe 부분의 변형을 해석적으로 모델링하였다. 이때 하중이 작용되는 Middle band는 변위(displacement)와 변형(strain)이 모두 발생할 수 있도록 구성하였다(Baik, C-H, 2011; ANSYS manual, 2008).

따라서 해석 시 하중조건은 변위제어로써 초기 체결력(체결토크)을 100Nm, 150Nm, 200Nm, 250Nm로 적용하였을 경우 Middle band에 발생하는 변위를 각각 12mm, 14mm, 17mm 및 20mm로 입력하였다. 이때 각 단계별 체결력 적용 시 텐션클램프에 발생하는 변위량은 실내시험 시 획득한 각각의 도입 체결력별 변위데이터의 평균값을 활용하였다(Baik, C-H, 2011). 해석에 적용한 텐션클램프의 재료적 특성치는 Table 3과 같이 DIN 17221-“Hot rolled steels for springs suitable for quenching and tempering” 중 38Si7을 적용하였다(Baik, C-H, 2011; EN 13481-2, 2002).

체결력 변화에 따른 텐션클램프의 발생응력 해석결과는 Fig. 8과 같다. 해석결과 체결력이 커질수록 텐션클램프에 도입되는 압축응력은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 50% 체결력에서 정상 체결력의 경우 보다 압축응력이 약 2.2배 작게 나타나 초기 체결력의 감소는 텐션클램프의 초기 도입 압축응력 감소에 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 체결력 도입시 텐션클램프의 최대응력 발생지점은 Spring arm의 절곡부인 것으로 나타났다. 따라서 Spring arm은 체결력 도입에 따른 텐션클램프 내부 응력변화의 주요부위인 것으로 검토되었다(Baik, C-H, 2011).

#### 5. 분석 및 고찰

수치해석 결과, Fig. 8과 같이 초기 체결 시 텐션클램프에서 발생하는 최대 응력 발생지점은 현장 파손부위(Fig. 6)와 일치하는 것으로 분석되었다. Fig. 9와 같이 수치해석과 실내시험의 발생응력의 편차가 약 2~7%로 나타나 3차원 솔리드요소로 모델링하고 체결력의 변화를 텐션클램프 Spring arm에서의 변위제어로 모델링한 수치해석모델이 실제 텐션클램프에서의 초기 체결력 도입 시의 발생응력특성을 잘 반영하는 것으로 나타났다(Baik, C-H, 2011).

Fig. 9와 같이 실내시험 및 수치해석결과 모두 초기 체결력의 감소는 텐션클램프에 도입되는 초기 압축응력의 선형적인 감소로

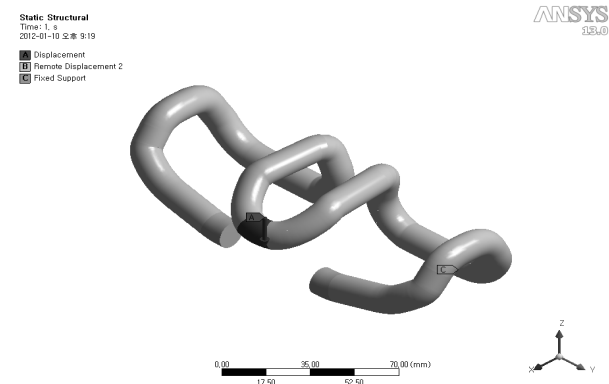


Fig. 7. FE model for the tension clamp

Table 3. Properties of tension clamp

Properties	Value
Density	7,850 N/m <sup>3</sup>
Tensile strength, yield	1,590-2,750 MPa
Modulus of elasticity	210 GPa
Poisson's ratio	0.313
Shear modulus	80 GPa

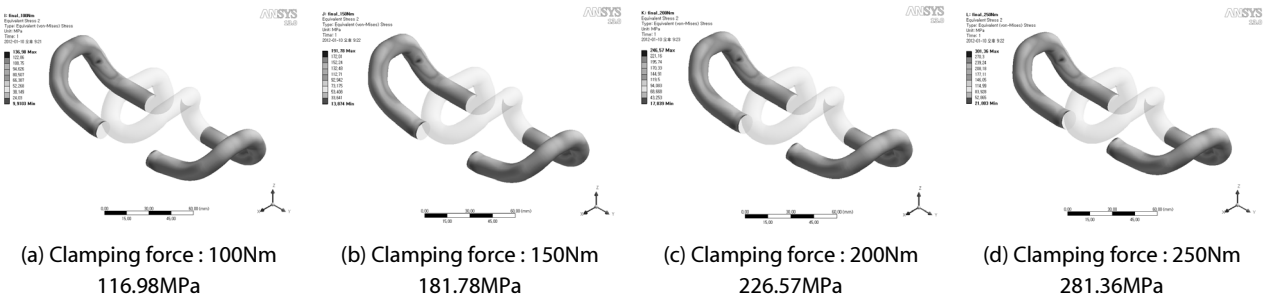


Fig. 8. Variations on the stress of tension clamp due to initial clamping force

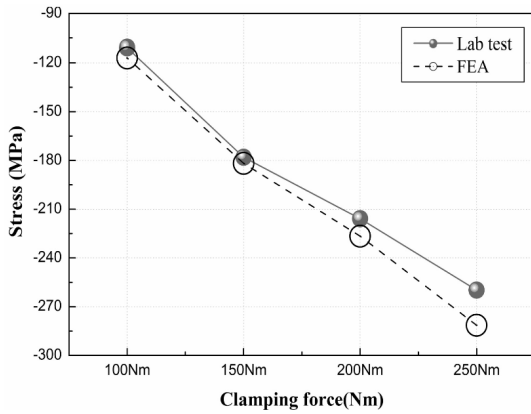


Fig. 9. Comparison of the stress of tension clamp due to initial clamping force

나타났다. 정상 체결력(200Nm) 도입 시 발생하는 압축응력의 수준은 약 210~225MPa 수준이며 초기 체결력이 50% 감소되면 클램프의 압축응력도 약 50% 감소되는 것으로 나타나 초기 체결력은 텐션클램프 내부의 도입 압축응력과 뚜렷한 선형적인 관계가 있는 것으로 분석되었다(Baik, C-H, 2011). 또한 정상 체결력(200Nm) 이하인 100~150Nm 수준의 체결력에서는 실험과 해석 결과의 편차가 매우 작았으나, 정상 체결력 이상의 체결력 도입단계에서는 체결력 도입에 따른 초기 압축응력의 측정결과가 해석결과보다 다소 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 수동식 토크렌치를 이용하여 인력으로 체결력을 도입한 실내시험의 시험오차에서 기인한 것으로 판단되며 이러한 체결력 도입과정에 발생할 수 있는 오차는 현장에서의 체결력 도입과정에서도 마찬가지로 발생가능한 문제로써 수동식 토크렌치를 이용한 체결력 도입은 정량적인 체결력 도입에 다소 제약이 따를 것으로 판단된다(Fig. 2 참조).

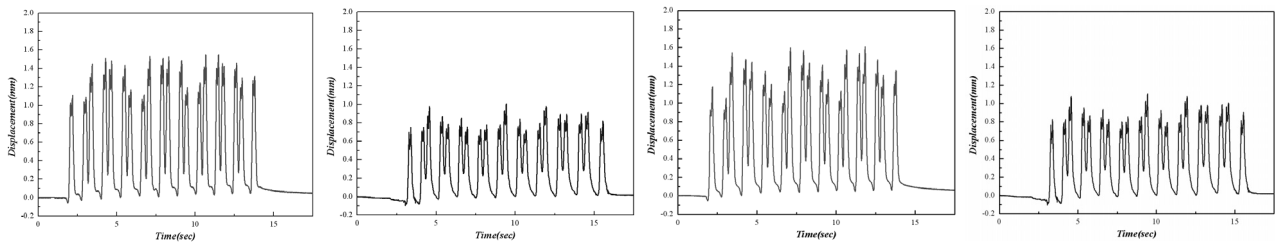
또한 현장측정을 통한 초기 체결력 변화에 따른 레일두부 횡변위 측정결과는 Fig. 10과 같이 예상대로 텐션클램프 체결위치인 레일지지점 두부 횡변위 보다 침목간 중앙부에서의 다소 크게 나타났다. 또한 체결력이 50% 감소한 경우(100Nm)가 정상체결상태(200Nm) 보다 레일두부의 횡변위가 약 32% 증가하는 것으로

나타났다. 따라서 텐션클램프의 초기 체결력의 감소는 레일두부 횡변위의 증가에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타나 곡선부 레일 탈팅에 대한 안정성 확보에 텐션클램프의 초기 체결력이 중요한 요소인 것으로 분석되었다. 또한 Fig. 11과 같이 체결력 50%(100Nm)의 경우 정상 체결상태의 경우 보다 실주행 차량에 의한 텐션클램프의 발생응력이 약 29% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 운행선 현장측정을 통해 텐션클램프와 같은 내력 보강형 체결구의 경우 텐션클램프의 사공 시 적정한 수준의 초기 체결력(토크량)을 부여하는 것이 중요하다는 사실을 실험적으로 입증하였다(Baik, C-H et al., 2011; Baik, C-H, 2011).

실내시험과 현장측정결과와 비교결과, Fig. 12와 같이 초기 체결력 도입당시 발생된 텐션클램프의 압축응력이 궤도 횡압의 작용에 따라 인장응력으로 변환되었으며, 초기 체결력의 감소는 횡압작용에 따른 레일의 경사에 저항하는 텐션클램프(Spring arm 절곡부)의 응력증가로 나타났다(Baik, C-H, 2011).

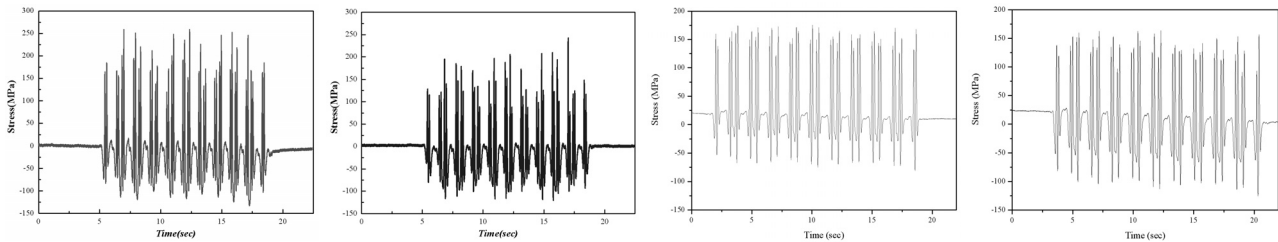
Fig. 12와 같이 약 30kN 이하의 횡압 작용 시에는 초기 체결력 변화에 따른 영향이 다소 적으나 40kN 이상의 횡압이 작용하는 경우 체결력 감소에 따른 텐션클램프의 발생응력이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 정상 체결력의 50% (100Nm)의 경우, 실제 현장에서 발생하는 동적 횡압의 수준(35~48kN)에서 텐션클램프의 발생응력이 증가하여 정상 체결상태의 경우를 상회하는 것으로 나타났다. 또한 과 체결상태를 모사한 체결력 250Nm의 경우, 정상 체결력을 도입한 경우와 거의 비슷하거나 다소 높은 발생응력이 나타나 정상 체결력 이상의 초기 체결력은 오히려 텐션클램프의 응력증가를 초래할 수 있는 것으로 분석되었다.

따라서 적정한 수준의 초기 체결력은 텐션클램프 내부의 압축응력을 도입함으로써 외력작용에 따른 텐션클램프의 발생응력 저감을 위한 보강력으로 작용하는 것을 실험적으로 입증하였다. 또한 실 주행열차 하중에 대한 현장측정결과가 정적하중을 고려한 실내 시험결과를 약 1.5~2.3배 상회하는 것으로 나타났으며 이는 운행선 현장에서 발생 가능한 열차하중의 동적 충격효과에서 기인한 결과인 것으로 분석되었다. 그러나 체결력의 감소가 텐션클램프 발생응력의 증가로 이어지는 경향은 실내시험결과와 일치하는 것으로



(a) Center of two sleepers (left figure: 100Nm, right figure: 200Nm) (b) At the rail support (left figure: 100Nm, right figure: 200Nm)

Fig. 10. Lateral displacement of rail head due to initial clamping force (fastening torque)



(a) S2 (left figure: 100Nm, right figure: 200Nm)

(b) S4 (left figure: 100Nm, right figure: 200Nm)

Fig. 11. Variations on the stress of tension clamp due to initial clamping force (refer to Fig. 6(c))

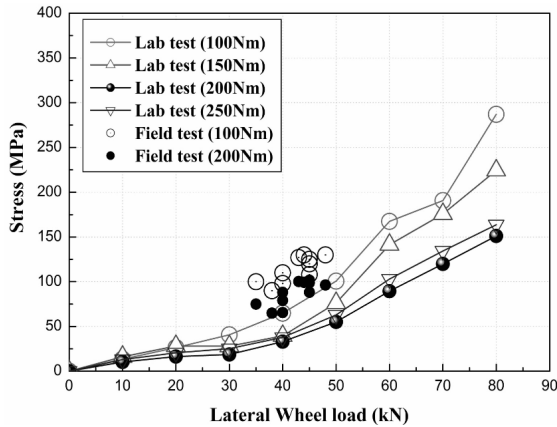


Fig. 12. Variations on the stress of tension clamp due to lateral wheel load and clamping force

나타났다. 따라서 텐션클램프에 도입하는 초기 체결력은 공용상태의 텐션클램프에서 발생하는 응력범위에 직접적인 영향을 미칠 수 있음을 실험적으로 입증하였다(Baik, C-H, 2011).

## 6. 결론

본 연구에서는 탄성레일체결장치의 구성품 중 텐션클램프의 거동에 영향을 미치는 매개변수로서 초기 체결력과 과대 횡압을 설정하고 이를 고려한 실내시험 및 수치해석을 수행하였다. 또한 실제 텐션클램프의 파손이 빈번히 발생하고 있는 서울지하철 급곡

선 구간에서 수행한 현장조사 및 현장측정결과와 비교·분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 텐션클램프의 파손유형 조사결과, Spring arm 절곡부의 파손이 전체 파손비율의 약 99%인 것으로 조사되어 Spring arm 절곡부는 열차주행 하중(횡압)과 곡선부 선형조건에 의한 레일 틸팅의 저항을 가장 크게 받는 부분인 것으로 분석되었다. 또한 현장 체결력 조사 결과, 대부분 정상 체결력 이하로 나타나 현장 텐션클램프의 정량적인 체결력 도입 및 유지관리 방안 마련을 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 분석되었다.
- (2) 수치해석 및 실내시험 결과, 초기 체결력의 감소는 텐션클램프에 도입되는 초기 압축응력의 감소로 나타났으며 이는 선형적인 관계로 분석되었다. 또한 현장측정결과, 초기 체결력이 50% 감소된 경우 레일두부 횡변위와 텐션클램프의 발생응력이 각각 약 32%, 29% 증가하는 것으로 나타나 초기 체결력에 의해 도입된 텐션클램프의 압축응력은 외력 작용에 대한 텐션클램프의 발생응력 및 레일 틸팅 저항을 위한 보강력으로 작용하는 것으로 분석되었다.
- (3) 따라서 텐션클램프의 초기 체결력은 텐션클램프와 텐션클램프가 지지하는 레일의 외력에 대한 저항성능에 직접적인 영향을 미치므로 텐션클램프를 사용하는 탄성레일체결장치의 장기 내구성 확보와 체결구의 안정적인 거동을 유지하기 위해서는 현장 케도부설 및 체결구 유지관리 시 적정 초기 체결력 (200Nm)을 확보하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다.



## References

- ANSYS (2008). *Ansys manual*.
- B. Lichtberger. (2010). *Track compendium*, Eurail Press.
- Baik, C.-H., Joo, B.-G., Choi, J.-Y., Park, Y.-G. (2011). "The parametric study on the performance characteristics of elastic rail fastening system on the sharp curved track." *Journal of Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway*, Korean Society for Railway, pp. 2163-2173 (in Korean).
- Baik, C.-H. (2011). *The parametric study on the performance characteristics of elastic rail fastening system on the sharp curved track*, MSc Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Graduate School of Railroad (in Korean).
- C. Esveld. (2001). *Modern railway track, 2nd ed.*, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands.
- Eisenmann J. and Laykauf, G. (2000). *Feste fahrbahn für schienenbahnen*, Betonkalender (in German).
- Eisenmann, J. and Laykauf, G. (2002). *Betonfahrbahnen, 2. Auflage*, Ernst & Sohn (in German).
- EN 13149-4. (2002). *Railway applications-track-test methods for fastening systems-Part 4 : Effective of repeated loading*, CEN.
- EN 13481-2 (2002a). *Railway applications-track-performance requirements for fastening system-Part 2 : Fastening systems for concrete sleepers*, CEN.
- EN 13481-2 (2002b). *Railway applications-track-performance requirements for fastening system-Part 2 : Fastening systems for slab track*, CEN.
- International Union of Railways. (1965). *Office for research and experiments, question D71, stresses in the track, ballast and formation as a result of rolling loads, stresses in rails, Part 2: Calibration and Measuring Procedures*, Report No.1, Utrecht, Holland.
- Korea Rail Network Authority (2002). *Performance specification for rail fastening system* (in Korean).
- Korea Rail Network Authority (2008). *Study on the performance improvement of interface for concrete track* (in Korean).
- DB Netz AG (2002). *Requirements catalog for the construction of the permanent way 4th revised edition, Technical notification concerning the body of permanent way technology regulations*, RO 03/2002, Version of 08/01/2002.
- RD Froehling (1997). *Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness*, Ph.D thesis, University of Pretoria.