

레일 체결장치 텐션클램프의 거동

최신형¹, 박범호², 윤경민², 배현웅³, 임남형^{2*}

¹(주)장맥엔지니어링 구조부, ²충남대학교 토목공학과, ³충남대학교 건설방재연구소

Behavior of Tension Clamp in Rail Fastening System

Shin-Hyung Choi¹, Beom-Ho Park², Kyung-Min Yun², Hyun-Ung Bae³, Nam-Hyoung Lim^{2*}

¹Structure Department, Jangmaek Engineering Co., Ltd.

²Department of Civil Engineering, Chungnam National University

³Research Institute for Construction Disaster Prevention, Chungnam National University

요약 콘크리트 궤도 건설의 증가로 인한 레일 체결장치의 중요성이 커지고 있는 상황에서 최근 레일 체결장치의 부속품인 텐션클램프가 절손되는 사고가 발생되었다. 이는 현장상태, 운영기관, 열차운행조건 및 빈도 등 다양한 요인에 의한 것으로 텐션클램프의 거동관련 연구가 필요하다. 본 논문에서는 실내실험 및 유한요소해석을 통해 텐션클램프의 역학적 거동을 분석하였다. 실내실험을 수행하여 텐션클램프 체결력에 따른 응력 및 변위를 도출하고 이를 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 해석 모델을 검증하였다. 또한 검증된 모델을 적용하여 열차 하중에 따른 텐션클램프의 변형과 응력을 도출하고, 응력 분석을 통해 텐션클램프의 피로에 대한 취약도를 파악하였다.

Abstract In a situation in which importance of rail fastening system is growing with increasing the construction of concrete track, an accident of tension clamp(the component of rail fastening system) breaking has been recently occurred. This results from various factors such as field condition, operating agency, running condition, traffic frequency and so on. Thus, the study for the behavior of tension clamp is required. In this paper, an experiment and finite element analysis(FEA) have been performed to analyse the mechanical behavior of tension clamp. The stress and displacement of tension clamp have been analyzed as the clamping force through a laboratory test, and they were compared with FEA results. Furthermore, the stress and displacement of the tension clamp are derived from train load condition applying the verified model, and the fatigue vulnerability of the tension clamp is identified through stress analysis.

Keywords : Concrete Track, Finite Element Analysis(FEA), Mechanical Behavior, Rail Fastening system, Tension Clamp

1. 서론

레일 체결장치는 레일과 침목을 견고하게 연결하는 기능을 가지며 체결장치의 성능에 따라 차량의 주행안전성 및 승차감, 열차충격하중에 대한 궤도의 구조안전성, 그리고 열차 구동소음 등에 큰 영향을 주는 매우 중요한 구성품이라 할 수 있다. 열차의 속도향상과 궤도구조의

성능향상을 목적으로 널리 적용되고 있는 탄성 레일 체결장치에는 과거 레일과 침목을 단순히 결속하는 클립형태에서 벗어나 레일과 체결장치(텐션 클램프) 사이에서 열차하중 및 선형조건에 의해 발생하는 레일의 틸팅(레일 종방향을 축으로 한 회전변위)과 인장 및 압축력에 스스로 저항할 수 있는 텐션 클램프가 사용되고 있다. 독일과 같은 유럽의 철도 선진국에서는 오래전부터 텐션

본 논문은 충남대학교 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Nam-Hyoung Lim(Chungnam National University)

Tel: +82-42-821-7005 email: nhrim@cnu.ac.kr

Received November 6, 2015

Revised November 23, 2015

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

클램프에 대한 다양한 연구개발을 거쳐 우수한 품질의 탄성 레일 체결장치가 사용되고 있다[1].

최근 국내에 고속철도 뿐 아니라 일반철도와 도시철도 선로에도 콘크리트 궤도가 다수 건설되어 콘크리트 궤도에 적합한 탄성 레일 체결장치에 대한 연구가 이루어지고 있다. 국내의 탄성레일 체결장치에 관한 연구의 대부분은 탄성 레일 체결장치 전반에 대한 거동분석에 초점이 맞추어져 있으며 특히, 레일패드 및 탄성패드와 같은 탄성재료의 특성변화에 따른 탄성 레일 체결장치의 역학적 거동 분석이 주로 수행되어 왔다[2]. 따라서 탄성 레일 체결장치의 다양한 구성품 중 텐션 클램프의 거동 특성에 관한 실험 및 해석적 연구는 부족한 실정이다. 또한 실제 현장에서는 운영 기관별로 다양한 열차운행 조건 및 빈도를 비롯하여 궤도상태 및 선형조건과 초기시공품질 등 탄성 레일 체결장치의 거동에 영향을 미치는 다양한 변수로 인해 제조사에서 제시하는 탄성 레일 체결장치의 거동과는 다소 상이한 결과가 발생할 수도 있어 많은 연구가 필요하다[3].

이와 같은 텐션 클램프에 대한 연구 필요성 외에도 국내 콘크리트 궤도에서 사용되는 레일 체결장치의 텐션 클램프 절손문제(Fig. 1)가 발생하는 등 텐션 클램프에 대한 역학적 거동 특성과 관련된 이해가 요구되고 있으므로 본 논문에서는 텐션 클램프의 거동특성을 규명하기 위한 실내실험 및 유한요소해석을 실시하였다.



Fig. 1. Damaged Tension Clamp

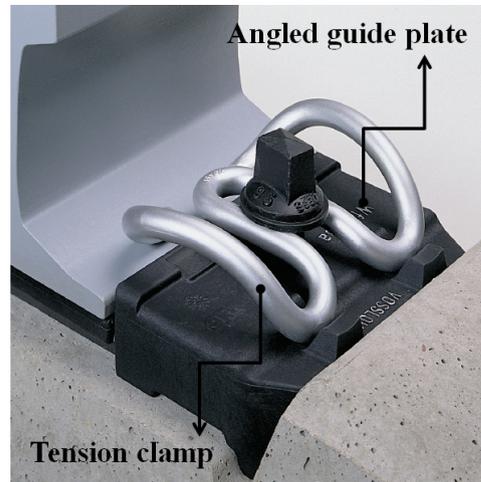
2. 실내 실험

2.1 실험체 및 실험방법

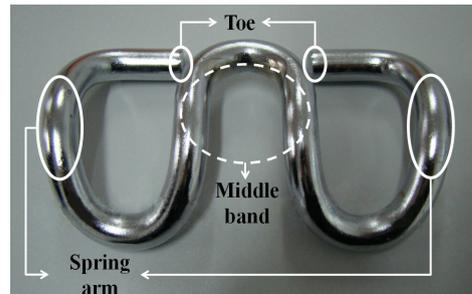
실험에 사용된 레일 체결장치는 Fig. 2와 같으며

Bi-block 침목이 콘크리트에 매립된 실험체에 탄성 레일 체결장치의 토크변화에 따른 텐션 클램프의 응력측정 실험을 실시하였다.

실험에 사용된 탄성 레일 체결장치의 올바른 결속은 스크루(Screw)의 조임으로 인해 텐션클램프의 미들밴드가 앵글 가이드 플레이트의 늑골부분(Rib of the Angled Guide Plate)과 최대 0.5 mm 이내로 접촉이 되어야 하며, 이 때 체결토크는 대략 200 N·m이다.



(a) Fastener Assembly



(b) Tension clamp

Fig. 2. Rail Fastener[4]

따라서 체결장치의 체결 토크량에 따른 미들밴드의 변위 및 텐션클램프의 응력을 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 텐션 클램프에 3축 스트레인 게이지와 LVDT를 설치하였으며, 토크렌치를 이용하여 체결 토크를 40 N·m 부터 100 N·m까지 변화시켜가며 미들밴드의 수직 방향의 변위를 측정하고 텐션 클램프에 발생하는 응력을 측정하였다.

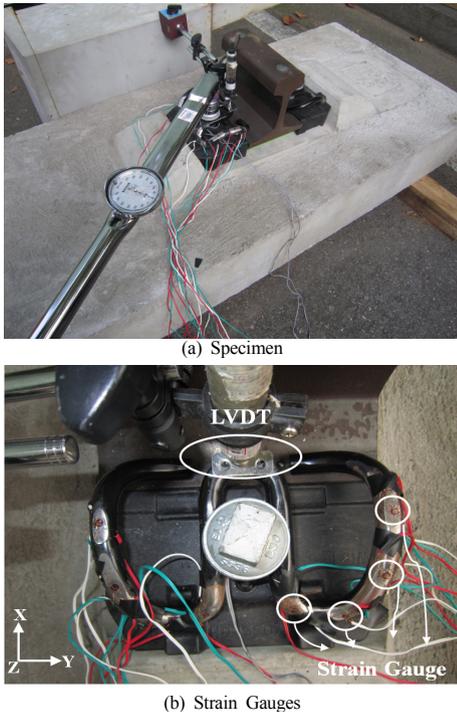


Fig. 3. Test Specimen

2.2 실험 결과

토크량 변화에 따라 텐션 클램프에 발생하는 응력 (Von-Mises Stress)은 Fig. 4와 같이 절곡 부분인 Point 1에서 최대로 발생했다. 또한 Point 1에서 스프링 압 방향으로 이동할수록 응력의 크기는 작아졌으며, 토크량 증가에 따라 텐션 클램프에 발생하는 응력은 선형으로 증가함을 알 수 있었다.

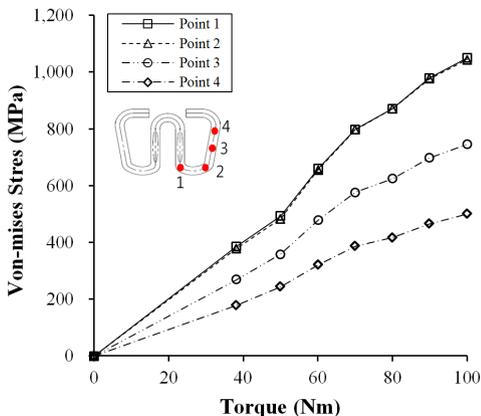


Fig. 4. Relation of Torque and Stress

3. 텐션 클램프 거동

3.1 유한요소해석 모델 검증

텐션 클램프의 거동을 분석하기 위해 범용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Workbench Program[5]을 사용하였다. 해석을 위한 모델은 다음 Fig. 5와 같으며 3D 스캐닝을 이용하여 정밀한 형상의 모델을 구현하였다. 3D Solid element(SOLID45)를 사용하여 레일 체결장치 (텐션 클램프, 앵글 가이드 플레이트, 탄성패드, 베이스 플레이트)와 침목, 레일을 모델링하였다. 적용된 물성치는 다음 Table 1과 같다.

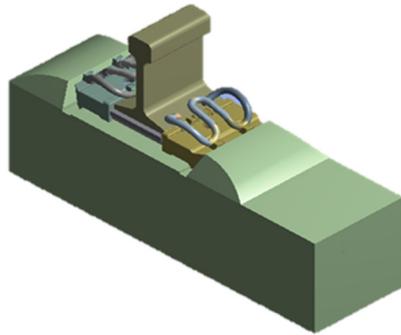


Fig. 5. Analysis Model

Table 1. Properties of Materials [6-8]

Division	Value	
Tension Clamp	Density (N/m ³)	27,146
	Young's Modulus (MPa)	210,000
	Poisson's Ratio	0.313
	Bulk Modulus (MPa)	187,170
Angled Guide Plate	Tensile strength, Yield (MPa)	1,590 ~ 2,750
	Shear Modulus (MPa)	79,970
	Young's Modulus (MPa)	9,832.5
Rail Pad	Poisson's Ratio	0.4
	Bulk Modulus (MPa)	16,388
	Shear Modulus (MPa)	3,511.6
	Spring stiffness (kN/mm)	500
Elastic Pad	Poisson's Ratio	0.49
	Bulk Modulus (MPa)	2,489.3
	Shear Modulus (MPa)	50.12
Base Plate	Spring stiffness (kN/mm)	22.5
	Poisson's Ratio	0.48
	Bulk Modulus (MPa)	55.617
	Shear Modulus (MPa)	2.2547
Base Plate	Young's Modulus (MPa)	200,000
	Poisson's Ratio	0.26
	Bulk Modulus (MPa)	138,890
	Shear Modulus (MPa)	79,365

스크루에 가해지는 Torque를 이용하여 레일 체결장치를 결속하는 대신 Fig. 6과 같이 미들밴드에 수직하중을 재하하여 실제 체결상태를 모사하였다. 레일 체결장치의 부품들 간의 경계조건은 No separation option을 사용하여 접선 방향으로 Sliding이 허용되는 조건으로 하였다[5].

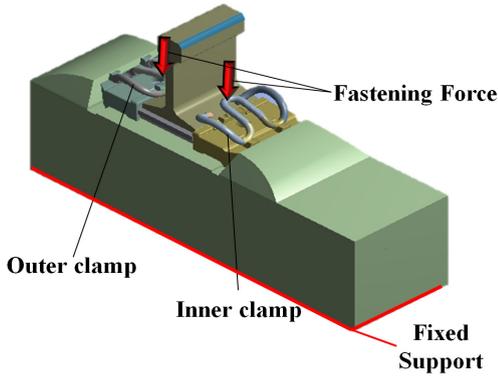


Fig. 6. Boundary and fastening force

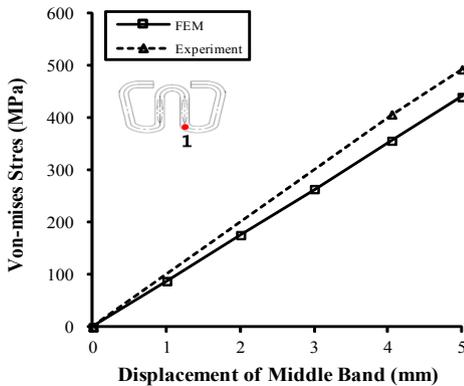


Fig. 7. Comparison FEA Result and Experimental Result

해석모델의 검증을 위해 Fig. 7과 같이 Point 1에서 체결력의 크기(Middle Band의 수직변위)에 따른 텐션 클램프의 응력 거동을 실내 실험값과 비교하였다. 실내 실험에서 측정된 응력과 해석 결과 응력은 최대 12.4 % (변위 4.05 mm일 때)의 차이가 나타났으며, 미들밴드의 수직변위에 대한 Von-mises 응력의 변화가 유사함에 따라 본 해석모델을 적용하여 텐션 클램프의 거동을 분석하였다.

3.2 체결력의 크기에 따른 텐션 클램프의 거동

Fig. 8과 같이 미들밴드의 수직변위가 약 20 mm(수직하중 약 30 kN) 일 때, 실제 초기 체결상태를 고려할 수 있다. 이에 따라 해석 모델에서 클램프의 미들밴드에 30 kN의 하중을 수직방향으로 재하하였으며, Fig. 9와 같이 미들밴드의 수직변위에 따른 클램프 위치 별(Point 1~4) 변위와 Von-Mises 응력의 관계를 도출하였다.

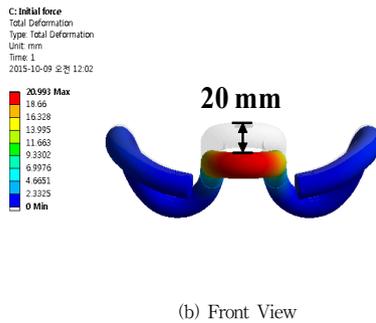
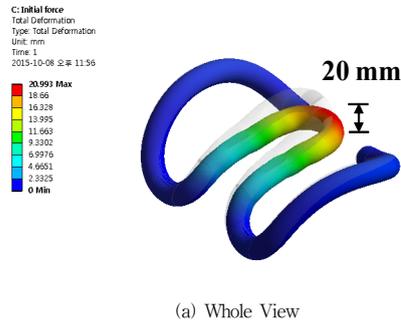


Fig. 8. Deformation Contour of Tension Clamp under Initial Clamping Force

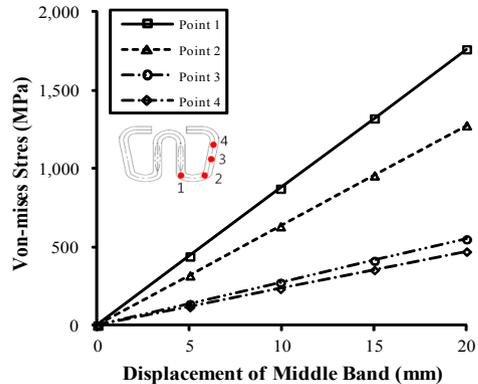


Fig. 9. Von-Mises Stress of Tension Clamp under Initial Clamping Force

Fig. 9에 나타난 것과 같이 정상적인 초기 체결상태가 될 때까지 미들밴드의 변위와 응력 관계는 선형으로 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 초기 체결상태에서 발생하는 미들밴드의 각 위치에서의 Von-Mises 응력은 Table 2와 Fig. 10과 같다.

Table 2. Von-Mises Stress of Tension Clamp under Initial Clamping Force

	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Von-Mises Stress (MPa)	1,761	1,277	550	471

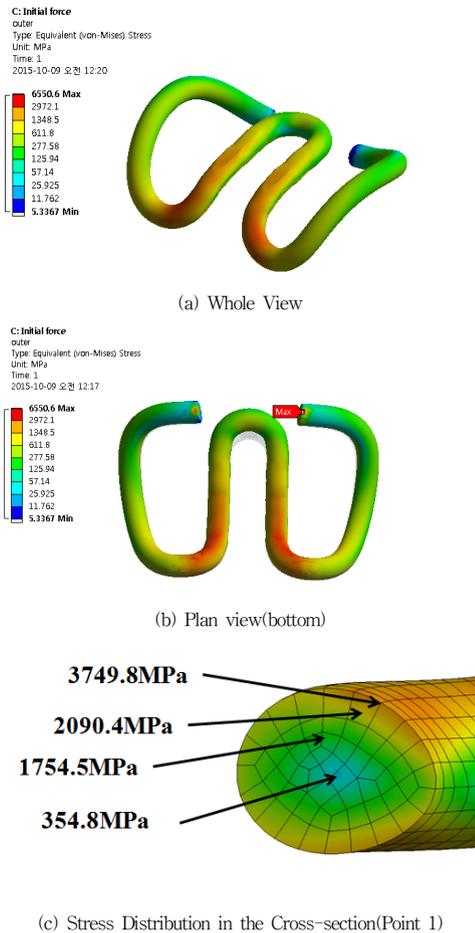


Fig. 10. Von-Mises Stress Contour of Tension Clamp under Initial Clamping Force

클램프에 발생하는 최대 Von-Mises 응력은 Fig. 10(a)와 같이 레일과 클램프가 접촉하게 되는 Toe부분에서 발생하며 이와 같은 국부적인 접촉응력을 제외하면 “2.2 실험결과”와 같이 미들밴드에서 스프링 압 쪽으로 이동(Point 1에서 Point 4로 이동)하면서 응력이 감소하는 경향을 나타내고 있다(Fig. 10(b)). Fig. 10(c)는 Point 1 단면의 Von-mises 응력 분포를 나타내는 그림으로 클램프 표면에서 국부적으로 항복응력을 초과하고 있지만 대부분 영역의 응력이 항복응력 내에 있는 것으로 나타났다.

3.3 열차하중에 따른 텐션 클램프의 응력

레일 두부에 직선구간에서의 열차하중, 곡선구간에서의 열차하중 2가지로 분류하여 유한요소해석을 수행하였다(Fig. 11). 직선구간의 수직하중은 축중 150 kN, 윤중분배율 0.5를 적용하여 산정하였으며, 곡선구간의 횡하중은 800 m > 곡선반경(R) ≥ 600 m의 선로 조건을 가정하여 레일체결장치 설계하중을 산정하였다[9].

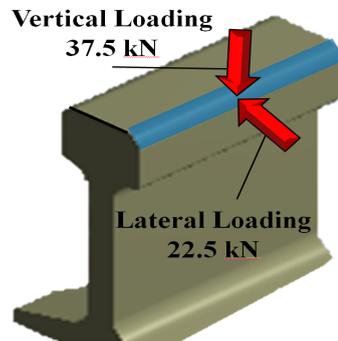


Fig. 11. Wheel load on the rail

Fig. 10과 같은 클램프의 체결력에 의해 초기 체결된 상태에서 주행하는 열차에 의한 하중의 효과를 분석하였다. 주행하는 열차의 사행동 영향은 고려하지 않았으며 직선구간에서는 Fig. 11에서 37.5 kN의 수직방향 하중만 작용하는 것으로 모사할 수 있다. 이와 같은 수직방향 하중 작용에 따른 변형형상은 Fig. 12와 같으며, 각각의 클램프에 발생하는 Von-Mises 응력은 Table 3과 같다. 초기 체결상태의 응력(Table 2)과 비교한 결과, 내측 클램프의 미들밴드에서 발생하는 응력은 감소하였으며, 외측 클램프의 모든 위치(Point 1~4)에서 응력은 증가하는 경향을 보이고 있다.

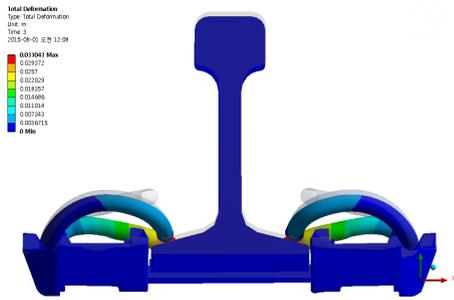


Fig. 12. Deformed Shape of Straight Track

Table 3. Von-Mises Stress of Tension Clamp in Straight Track

	Von-Mises Stress (MPa)			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Inner Tension Clamp	1,681	1,497	744	554
Outer Tension Clamp	1,782	1,634	833	649

직선궤도와 달리 곡선궤도에서는 주행하는 열차로 인해 원심하중이 횡 방향으로 작용하게 된다. 이와 같은 효과를 분석하기 위하여 Fig. 11과 같이 37.5 kN의 수직방향 하중과 22.5 kN의 횡방향 하중을 작용시켰다. 곡선궤도의 변형형상은 Fig. 13과 같으며 각각의 클램프에 발생하는 Von-Mises 응력은 Table 4와 같다. 초기 체결상태의 응력(Table 2)과 비교하여 내측 및 외측 클램프에 발생하는 응력은 모두 증가하는 경향을 보이고 있다.

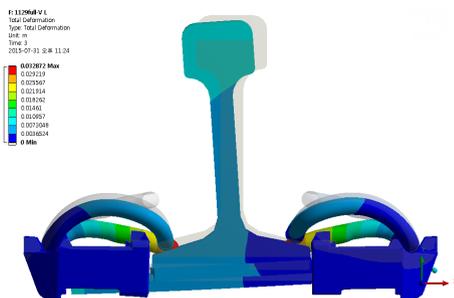


Fig. 13. Deformed Shape of Curved Track

Table 4. Von-Mises Stress of Tension Clamp in Curved Track

	Von-Mises Stress (MPa)			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
Inner Tension Clamp	1,856	1,445	690	857
Outer Tension Clamp	1,953	1,425	663	587

최대 국부응력을 나타내는 Toe(텐션 클램프의 스프링 암과 레일의 접촉점)를 제외하면 앵글 가이드 플레이트에 접촉하는 Point 1 부근에서 클램프의 최대 Von-mises 응력이 발생된다. 초기 체결상태를 기준으로 응력의 변화를 분석하기 위하여 Table 5와 같이 직선과 곡선 궤도 별 하중에 의한 최대응력 및 초기 체결응력과의 차이를 산정하였다.

Table 5. Maximum Stress and Stress Variation (unit; MPa)

State		Maximum Stress (σ_{max})	Stress Variation from Initial Clamping Force ($\Delta\sigma$)
Initial Clamping State		1,761	-
Straight Track	Inner Clamp	1,681	$\nabla 80$
	Outer Clamp	1,782	$\Delta 21$
Curved Track	Inner Clamp	1,856	$\Delta 95$
	Outer Clamp	1,953	$\Delta 192$

피로한도(Fatigue Limits)에 영향을 미치는 반복 응력의 최댓값(σ_{max})은 Table 5와 같으며, 직선 궤도 내측 클램프를 제외하고는 초기 체결상태(Initial Clamping State)에 비해 최대응력이 증가하는 것을 알 수 있다. 모든 상태에서 피로한도를 초과한다는 가정 하에서 Table 5의 응력 증감량을 분석하면, 곡선궤도의 외측 텐션 클램프($\Delta\sigma = 192$ MPa)가 피로에 가장 취약한 것으로 나타났다. 또한 직선궤도보다 곡선궤도의 텐션 클램프가 피로에 취약함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 레일 체결장치에 삽입되는 텐션 클램프의 거동을 분석하였다. 초기 체결상태와 열차 운행에 따른 하중, 직선과 곡선궤도, 궤간 내측과 외측 클램프에 따른 변형과 응력을 실험적 및 해석적으로 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 초기 체결상태(클램프의 미들밴드가 앵글 가이드 플레이트에 접촉)까지 클램프에 발생하는 응력과 미들밴드의 변위는 선형관계를 갖는다.

2. 텐션 클램프에 발생하는 최대 Von-Mises 응력은 클램프와 앵글 가이드 플레이트가 접촉(Point 1)하는 구역에서 발생하며, 스프링 압 쪽으로 가면서 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

3. 열차 하중 효과를 고려하면, 직선궤도인 경우에는 초기 체결상태의 응력과 비교하여 내측 클램프에 발생하는 응력은 감소하고, 외측 클램프에 발생하는 응력은 증가하는 경향을 보이고 있다. 곡선궤도인 경우에는 초기 체결상태의 응력과 비교하여 내측 및 외측 클램프에 발생하는 응력은 모두 증가하는 경향을 보이고 있다.

4. 피로 취약성을 검토하기 위해 모든 상태의 최대응력이 피로한도를 초과하였다고 가정할 경우, 곡선궤도의 외측 텐션 클램프가 피로에 취약한 것으로 나타났으며, 직선궤도 보다 곡선궤도의 텐션클램프가 피로에 취약한 것으로 나타났다.

References

- [1] Seo, S.B., Railway engineering, Book gallery, pp. 147-180, 2008
- [2] Baik, C.H., The Parametric Study on the Performance Characteristics of Elastic Rail Fastening System on the Sharp Curved Track, Seoul National University of Science and Technology, 2012
- [3] Seo, S.B., Track engineering, Book gallery, pp.37-77, 2009
- [4] Vossloh, Rail fastening systems for slab tracks -System 300, Publications.
- [5] Ansys, Workbench Manual ver.14.5, 2012
- [6] DIN EN 10089, Hot rolled steels for quenched and tempered springs technical delivery conditions, 2003
- [7] KS D 3503, Rolled steels for general structure, 2013
- [8] Lee, D.W., Choi, J.Y., Baik, C.H., Park, Y.G., "Influence of Initial Clamping Force of Tension Clamp

on Performance of Elastic Rail Fastening System", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.33, No.3, pp. 1243-1251, 2013
DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.3.1243>

[9] Lee, J.D., Railroad Track Mechanics, pp.55, 2001

최 신 형(Shin-Hyung Choi)

[정회원]



- 2013년 2월 : 건양대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2015년 8월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : ㈜장맥엔지니어링 구조부 사원

<관심분야>

구조공학, 궤도공학

박 범 호(Beom-Ho Park)

[정회원]



- 2008년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2010년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 4월 ~ 2015년 5월 : ㈜코네스코퍼레이션 구조팀 대리
- 2010년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

<관심분야>

구조공학, 내진공학, 궤도공학

윤 경 민(Kyung-Min Yun)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

<관심분야>

구조공학, 궤도공학

배 현 응(Hyun-Ung Bae)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2011년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 건설방재연구소 박사후연구원

<관심분야>

구조공학, 궤도공학

임 남 형(Nam-Hyoung Lim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 강구조, 궤도공학