

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2023.9.4.593

JCCT 2023-7-72

탈선방지 가드레일의 구조안전성과 유지보수 상관성에 관한 연구

A Study on Relationship between Structural Safety and Maintenance of Derailing Prevent Guard Rail

최정열*, 박현요**, 정지승***

Jung-Youl Choi*, Hyeon-Yo Park**, Jee-Seung Chung***

요약 곡선부에는 차량-궤도의 하중불균형 등 다양한 요인에 의한 탈선의 위험이 내재 되어있어 도시철도에서는 탈선방지 가드레일을 설치, 운영하고 있다. 앵글형 탈선방지 가드레일은 가드앵글을 포함한 다양한 부품으로 구성되어 탈선을 방지하는 기능을 수행하는데 탈선이 발생하지 않더라도 구성품에서 다양한 손상이 발생하고 있어 지속적인 유지관리가 필요하다. 손상현황을 조사하여 손상 빈도가 높은 앵글형 탈선방지 가드레일의 구성품을 분류하였으며, 다양한 손상의 발생 조건 등을 조사하였다. 또한 손상원인을 공학적으로 분석하고자 정밀 3차원 수치모델을 이용한 수치해석을 수행하였다. 수치해석은 열차의 탈선하중을 해석적으로 모사하고자 정적상태의 극한하중조건으로 적용하였으며, 앵글형 탈선방지 가드레일, 레일, 차륜의 실제도면을 이용하여 모델링하였다. 손상현황조사와 수치해석 결과를 비교 분석하여 구성품의 손상에 대하여 공학적으로 규명하고자 하였다.

주요어 : 열차탈선, 탈선방지 가드레일, 유지관리, 사례조사, 수치해석

Abstract There is risk of derailment due to various factors such as vehicle-track load imbalance in curved parts, so urban railways install and operate derailing prevent guard rails. The angle-type derailing prevent guard rail is composed of various parts including the guard angle. Even if derailment does not occur, various damages occur in the components, so continuous maintenance is required. Through the damage status analysis, the components of the angle-type derailing prevent guard rail with high damage frequency were classified, and conditions for the occurrence of various damages were investigated. In addition, a numerical analysis using a precise 3D numerical model was performed to analyze the cause of the damage analytically. In order to analytically simulate the derailment situation, the static ultimate load condition was applied, and the actual drawing of the angle-type derailing prevent guard rails, rails, and wheels was used for modeling. By analyzing the results of the damage status investigation and finite element analysis, we tried to investigate the damage of the components.

Key words : Derailment, Derailing Prevent Guard Rail, Maintenance, Case Study, Finite Element Analysis(FEA)

1. 서론

철도선로의 선형조건과 차량-궤도의 하중불균형 조건

등으로 인해 열차탈선 사고의 위험이 내재 되어있으며, 탈선에 의한 열차사고를 미연에 방지하고자 열차 방호 시설 설비 등의 많은 발전을 이루었다. 급곡선부에 열

*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자)

**정회원, 서울교통공사 궤도1사업소 대리 (교신저자)

***정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (참여저자)

접수일: 2023년 5월 15일, 수정완료일: 2023년 6월 10일

게재확정일: 2023년 7월 5일

Received: May 15, 2023 / Revised: June 10, 2023

Accepted: July 5, 2023

**Corresponding Author: 19koala90@gmail.com

Track Engineering office 1, Seoul Metro, Korea

차의 탈선사고를 사전에 방지하는 가드레일, 궤도 내측 및 외측에 설치하는 방호벽 등 다양한 안전설비들이 궤도 및 열차에 개발 및 설치되고 있다[1-3]. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 열차탈선에 의한 철도사고는 표 1과 같이 지속적으로 증가하고 있다[3].

표 1. 철도사고현황

Table 1. Railway accident status(10 years data)

Year	Railway derailment	Railway crash	Railway fire
2021	12	5	0
2020	3	1	0
2019	6	0	0
2018	4	0	0
2017	2	1	1
2016	8	0	0
2015	3	1	0
2014	6	2	1
2013	5	1	0
2012	4	1	1
2011	2	0	0

서울도시철도 1~8호선에서는 열차탈선을 방지하기 위해 표 2와 같이 약 25.6km의 탈선방지 가드레일을 설치하였으며, 전체 탈선방지 가드레일 설치연장의 대부분인 68.3%인 약 17.5km가 앵글형으로 설치하여 운영하고 있다. 열차의 탈선사고 예방을 위하여 앵글형 가드레일을 점진적으로 추가 설치하며 운영하고 있다.

표 2. 가드레일 설치현황(서울교통공사)

Table 2. Guard rail installation status(seoul metro)

Line	Length (km)	Angle-type		Rail-type	
		(km)	(%)	(km)	(%)
1	0.637	0.637	100	0	0
2	9.501	8.026	84.5	1.475	15.5
3	5.121	2.336	45.6	2.785	54.4
4	5.382	2.768	51.4	2.614	48.6
5	1.801	0.991	55.0	0.810	45.0
6	0.169	0.169	100	0	0
7	2.942	2.535	86.2	0.407	13.8
8	0	0	0	0	0
Total	25.553	17.462	68.3	8.091	31.7

레일형 가드레일은 그림 1과 같다. 궤간 내측에 가드레일을 설치하고 본선 레일과 레일형 가드레일의 간격인 플렌지웨이 간격은 200mm~250mm로 설치한다. 주로 교량과 같이 도상 없이 궤도가 부설된 무도상궤도에

레일형 가드레일을 설치한다. 교량 아래로 열차 추락을 방지하고자 설치하며, 두 개의 가드레일이 열차 주행방향의 좌우측으로 발생 가능한 탈선을 방지한다.



그림 1. 레일형 가드레일

Figure 1. Rail-type guard rail

앵글형 가드레일은 그림 2와 같이 급곡선부에 설치한다. 급곡선부 열차 주행 시 곡선 외측방향으로 작용하는 원심력에 의해 횡압이 증가하고 과대 횡압 작용에 의한 올라탐 탈선이 발생할 수 있다. 곡선부 열차 탈선사고를 방지하기 위해 곡선 내측레일에 가드레일을 설치하여 차륜의 이탈을 방지하는 원리이며, 앵글과 본레일의 간격은 75mm 슬락을 고려하여 설치한다.



그림 2. 앵글형 가드레일

Figure 2. Angle-type guard rail

레일형 가드레일의 플렌지웨이 간격은 앵글형 가드레일에 비해 다소 넓게 설치하고 교량부와 같이 비교적 직선구간에 주로 설치되므로 열차가 주행할 때 차륜이

가드레일을 직접 접촉하지 않아 가드레일의 손상사례가 현저히 적다. 따라서 본 연구에서는 급곡선부를 주행하는 열차의 탈선을 방지하는 목적으로 설치한 앵글형 가드레일을 본 연구의 손상현황조사와 구조안전성 검토 대상으로 설정하였다.

II. 손상현황조사

도시철도 운영기관은 탈선사고 방지 등 안전을 위하여 다양한 개소에 앵글형 탈선방지 가드레일을 설치 운영하고 있으나, 열차탈선이 발생하지 않아도 그림 3과 같이 구성품에서 다양한 손상이 발생한다.

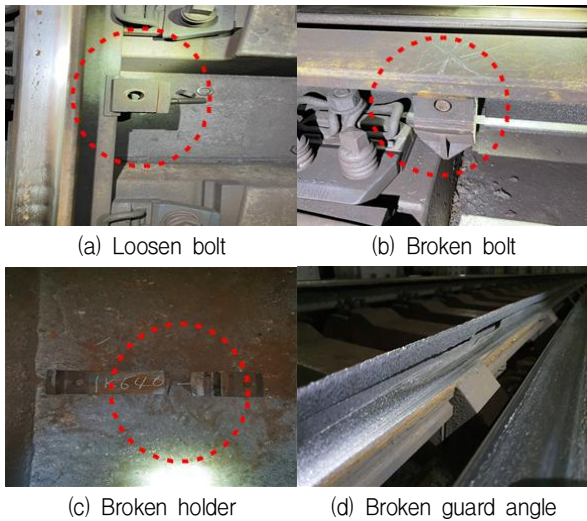


그림 3. 구성품의 손상사례
 Figure 3. Damage cases of components

손상현황 조사를 위하여 탈선방지 가드레일 설치기준인 곡선반경 200m 이하의 급곡선, 고가부, 탈선사고가 발생했던 개소와 곡선반경, 열차속도 등이 유사한 조건의 선로를 손상현황 조사 개소로 선정하여, 2020년~2022년 동안 발생한 구성품의 손상현황을 조사하였다. 손상현황 조사 개소와 조사 결과는 표 3과 같다.

조사 결과, 3년간 총 251회 유지보수하였으며, 가장 많이 발생한 손상유형은 볼트의 이완 185회(73.71%)이다. 이완보수와 같은 단순한 구성품 유지보수가 아닌 구성품의 교체가 필요한 손상사례로는 볼트 절손 교체 54회(21.51%)이며, 홀더 절손 교체 10회(3.98%), 앵글 절손 교체 2회(0.80%)로 조사되었다. 볼트이완은 전 개소에서 발생한 것으로 분석되었고, 볼트절손은 E~H개

소에서 가장 빈번하게 발생하였으며, 해당 개소는 볼트 이완이 빈번하게 발생하는 개소로 조사되었다.

표 3. 조사개소의 손상현황 (3년간)
 Table 3. Damage status of investigation site (3 years)

Site	Speed (km/h)	Radius (m)	Damage type				-
			Loosen bolt	Broken bolt	Broken holder	Broken angle	
A	30	141	8	0	3	0	Tunnel
B	30	136	4	0	0	2	Tunnel
C	55	200	6	0	4	0	Tunnel
D	55	200	6	0	3	0	Tunnel
E	55	200	30	14	0	0	Tunnel
F	55	200	46	23	0	0	Tunnel
G	60	250	42	8	0	0	Bridge
H	60	250	23	7	0	0	Bridge
I	60	250	6	1	0	0	Bridge
J	60	250	7	1	0	0	Bridge
K	55	250	3	0	0	0	New installed
L	60	246	4	0	0	0	New installed
Total : 251			185 (73.7%)	54 (21.5%)	10 (4%)	2 (0.8%)	

홀더와 앵글과 같은 구성품의 절손이 발생한 개소는 A~D개소에서 발생하였다. A~D개소는 곡선반경 200m 이하인 급곡선으로 열차가 통과할 때 원심력에 의해 곡선외측으로 열차하중이 집중되므로, 내측레일에 설치한 앵글형 가드레일에 과대 횡압이 작용하여 앵글과 홀더의 절손과 같은 손상을 유발한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수치해석을 통한 구조안전성 검토 결과와 손상현황조사 결과를 비교 분석하여 상관관계를 도출하고자 한다.

III. 구조안전성 검토

본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 Ansys Workbench를 통해 앵글형 탈선방지 가드레일의 수치해석을 수행하였다[4]. 수치해석 모델링은 그림 4와 같이 실제 설계도면을 바탕으로 다양한 구성품과 레일, 차륜의 형상을 모델링에 반영하였다.

수치해석에 사용된 레일, 차륜 및 앵글형 탈선방지 가드레일 구성품(앵글, 가드홀더, 볼트, 너트, 와셔, 절연패드)에 대한 재료적 특성치는 표 4와 같다.

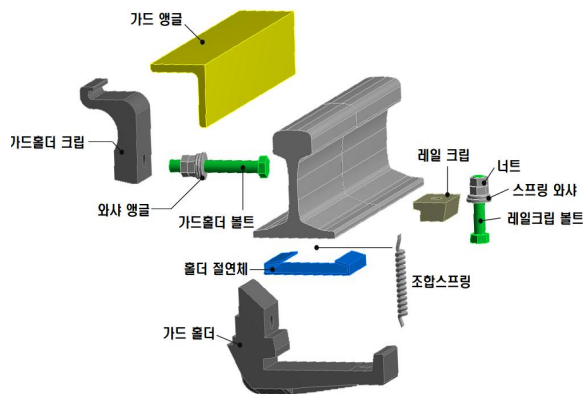


그림 4. 수치해석 모델링
Figure 4. Finite element analysis modeling

표 4. 재료 특성치
Table 4. Material properties

Components	Modulus of elasticity (MPa)	Poisson's ratio
Rail and Angle	2.0×10^{11}	0.3
Wheel	2.0×10^8	0.1
Guard holder	2.0×10^5	0.1
Bolt, Nut and Washer	2.0×10^5	0.3
Insulation pad	72.6	0.2

차륜과 레일사이에서 발생하는 접촉력과 마찰력이 동일한 상황에서 발생할 수 있는 탈선에 대한 안전성을 정량적으로 평가하는 나달(Nadal)의 식을 이용하여, 올라타미 발생하는 최소한의 Q/P(한계탈선계수) 값을 구하는데 이용한다[5]. 열차탈선에 따른 극대횡압을 조건으로 수치해석에 반영하기 위해 좌·우측 차륜에 작용하는 횡압을 한쪽(편측)으로 작용하는 경우를 반영해 최대 임계탈선 하중조건으로 반영하였다. 표 5와 같이 국내외에서 적용하는 한계탈선계수 0.8보다 약 1.66배 가중치를 둔 보수적인 기준치로 설정한 것을 의미한다. 한계탈선계수 0.8에서의 임계탈선하중은 90kN이나 적용한 한계탈선하중은 150kN이다. 따라서 곡선 선형조건 및 열차속도를 모두 배제하더라도 수치해석에 적용한 한계탈선하중 이상이 발생할 수 있는 가능성은 매우 희박할 것으로 예상된다.

그림 5와 같이 차륜의 위치에 따라 수치해석을 수행하였으며, Case 1은 차륜이 가드홀더의 직상부에 위치한 경우로 설정하였다. Case 2는 차륜이 가드홀더와 레일지지점의 사이에 위치한 경우로 설정하였다. Case 3은 차륜이 레일지지점의 직상부에 위치한 경우로 설정하였다.

표 5. 하중조건
Table 5. Load condition

Axle load	225 kN
Wheel load(P)	112.5 kN
Lateral wheel load(Q)	$112.5 \times 0.6(60\%) = 67.5$ kN
Ultimate Lateral wheel load(ΣQ)	$67.5 \times 2 = 130$ kN
Derailment coefficient(Q/P)	$130 \text{ kN} \times 1.11(\text{extra coefficient}) = 150$ kN
-Analysis apply-	$150 \text{ kN} / 112.5 \text{ kN} = 1.33 \gg 0.8$ $0.8(\text{Limit Derailment coefficient}) \cdots \text{S.F } 1.66$

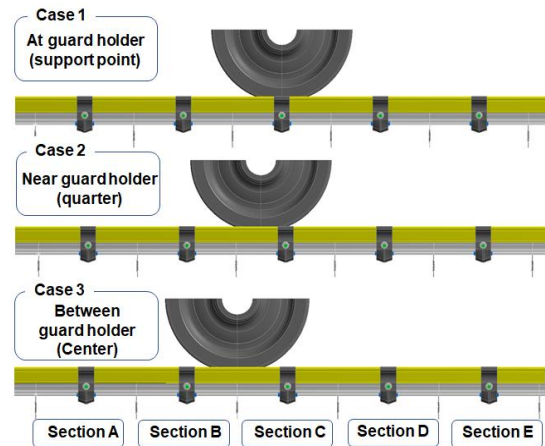


그림 5. 차륜의 위치에 따른 분석 조건
Figure 5. Analysis condition according to wheel position

차륜 위치에 따른 Case 1~Case 3의 해석조건을 적용하고, 하중은 0kN에서 점진적으로 증가시켜 한계탈선 하중인 150kN까지 적용하여 그림 6과 같이 각 구성품의 수치해석을 이용하여 구조적 안전성을 분석하였다.

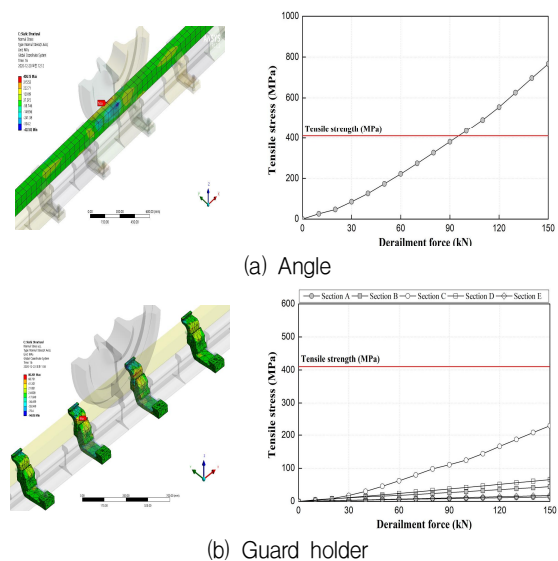


그림 6. 구조안전성 수치해석 결과 (예시)
Figure 6. Result of structure safety Finite element analysis

수치해석을 통하여 한계탈선 하중과 차륜의 위치 조건에 따른 구성품의 구조안전성 분석결과는 표 6과 같다.

표 6. 구성품의 구조안전성 분석결과
 Table 6. Result of structural safety analysis of components

		Angle	Guard holder	Bolt	Nut
Case 1	Max stress (MPa)	380.95	228.36	866.03	158.06
	Tensile strength (MPa)	410	410	1,005	1,005
	Max force (kN)	90	150	150	150
	S.F	1.08	1.80	1.16	6.36
Case 2	Max stress (MPa)	374.07	107.13	743.41	138.65
	Tensile strength (MPa)	410	410	1,005	1,005
	Max force (kN)	140	150	150	150
	S.F	1.10	3.83	1.35	7.25
Case 3	Max stress (MPa)	408.35	80.20	614.08	117.32
	Tensile strength (MPa)	410	410	1,005	1,005
	Max force (kN)	150	150	150	150
	S.F	1.00	5.11	1.64	8.57

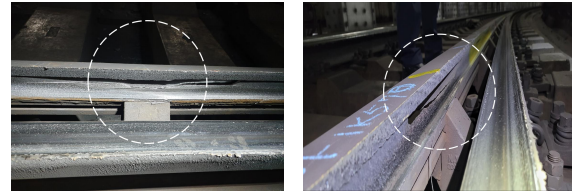
Case 별 검토결과, 앵글은 극한인장강도를 초과하는 응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 그러나 Case 3에서 국내, 외에서 상용하는 임계탈선계수(Q/P=0.8)의 하중(90kN)을 고려하였을 때 1.08 이상의 안전율을 도출하였다. 가드홀더는 Case 1 조건에서 가장 안전율이 낮게 분석되었으며, 이때의 최대응력은 228MPa이 발생하고 안전율은 1.80으로 분석되었다. 볼트는 다른 구성품에 비하여 가장 큰 최대응력이 발생하는 것으로 분석되었으며, Case 1의 조건에서의 최대응력은 866MPa으로 분석되었고 안전율은 1.16으로 도출되었으며, 너트는 최대 안전율이 6.36으로 분석되어 다른 구성품에 비하여 구조적으로 가장 안전하다고 판단된다.

열차가 앵글형 탈선방지 가드레일이 설치된 곡선부를 통과할 때, Case 1 조건인 차륜이 가드홀더의 직상부에 위치할 때 구성품은 가장 구조적으로 불안정한 조건으로 분석되었다.

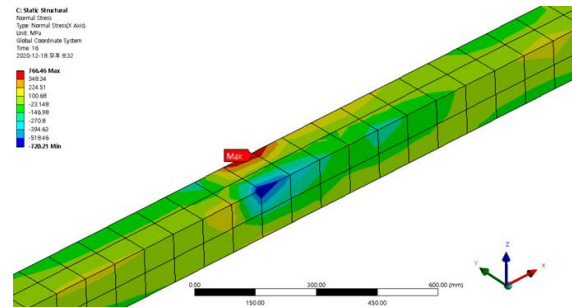
IV. 손상현황과 구조안전성 비교 검토

손상현황과 구조적 안전성을 비교 검토는 구조적으로 가장 불안정한 조건인 Case 1(차륜이 가드홀더 직상부에 위치한 경우) 경우만 고려하고, 각 구성품 중 가장 구조적으로 안전한 너트는 제외하여 분석하였다.

앵글은 극한강도를 초과하는 하중은 90kN~100kN 사이로 분석되어 비교적 구조적으로 불안정한 구성품으로 분석되었다.



(a) Broken angle around guard holder

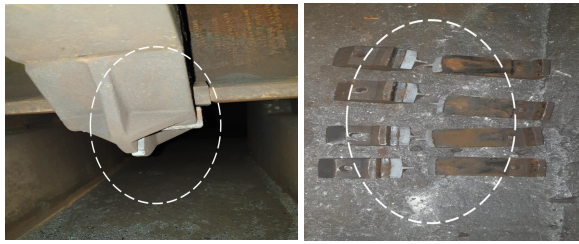


(b) Finite element analysis of Angles

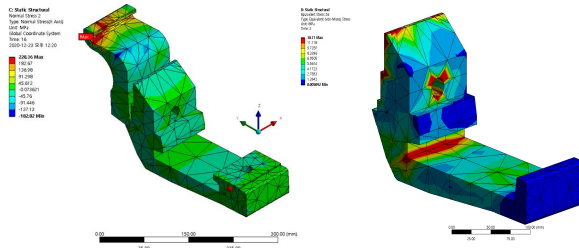
그림 7. 앵글의 비교분석 결과
 Figure 7. Analysed stress of angle

그림 7과 같이 가드홀더 주변의 앵글이 다른 앵글보다 손상이 더 진행되었으며, 마모 등으로 인한 파손 및 절손 등의 손상현황이 조사되었다. 또한 차륜이 직접적으로 앵글과 접촉하는 위치에서 720MPa의 압축응력이 발생하는 것으로 분석되어, 손상현황 조사와 구조안전성 검토결과 비교분석으로 본 연구에서 적용하는 수치 해석 결과에 대한 적정성을 입증하였다.

수치해석 결과, 앵글은 윤중 112.5kN과 탈선하중 90kN이 적용하였을 때, 극한인장강도를 초과하는 최대응력이 발생하였다. 따라서 이 조건에서의 나달공식에 의한 탈선계수(Q/P = 90kN/112.5kN)는 0.8로 임계탈선계수와 동일하므로 곡선반경 200m 이하의 급곡선에서는 실제 열차의 탈선이 발생할 가능성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 곡선반경 200m 이하의 선로에 설치된 앵글형 탈선방지 가드레일은 상시 열차의 탈선을 방지하고 있으므로 주기적인 점검과 손상된 앵글의 유지관리가 반드시 필요하다.



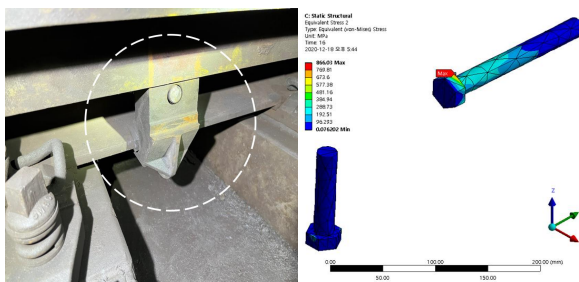
(a) Broken guard holder



(b) Analysed stress of guard holder

그림 8. 가드홀더의 비교분석 결과
Figure 8. Result of guard holder comparative analysis

그림 8과 같이 레일 저부에 고정하는 가드홀더의 모서리 부분에 균열 및 절손 등이 발생하는 것으로 조사되었다. 극한강도 410MPa에 비해 매우 작은 등가응력 38.77MPa가 발생하는 것으로 분석되었으나, 절손이 발생하는 위치와 응력이 집중되는 위치와 위치가 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 정적인 하중조건에서는 가드홀더의 절손까지 발생되지 않으나 절손 등 손상의 정확한 원인을 규명하기 위해 본 연구에 적용한 정적하중 조건이 아닌 동적하중, 충격하중 등 다양한 조건을 반영한 추가 연구가 필요할 것으로 분석되었다.



(a) Broken bolt

(b) Analysed stress of bolt

그림 9. 볼트의 비교분석 결과
Figure 9. Result of bolt comparative analysis

볼트의 손상현황 조사와 구조안전성 검토 결과는 그림 9와 같다. 볼트는 가장 큰 응력이 발생하는 구성품으로 분석되었고, 손상현황 조사를 통해 볼트의 절손이

발생하는 위치에 등가응력이 집중되는 것으로 분석되어 수치해석 결과의 적정성을 입증하였다. 앵글형 탈선방지 가드레일의 구성품에 대한 손상현황과 구조안전성 결과를 바탕으로 하중전달 메커니즘을 그림 10과 같이 제시하였다.

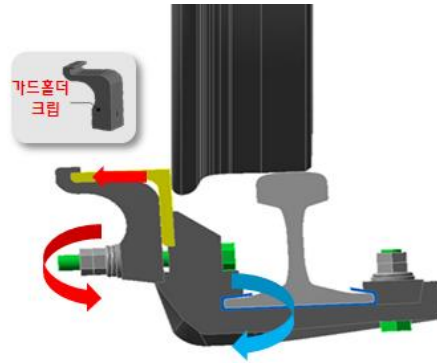


그림 10. 하중전달 메커니즘
Figure 10. Load transfer mechanism

앵글형 탈선방지 가드레일이 설치된 급곡선부 열차주행 시 그림 10과 같이 차륜이 앵글에 접촉하여 직접 탈선하중을 가드홀더에 전달한다. 앵글을 통해 가드홀더로 탈선하중이 전달되고, 가드홀더의 구조적 형상으로 인하여 모멘트가 발생한다. 가드홀더는 레일에 고정되는 지지점이며 발생된 모멘트와 하중이 집중되어 이완 및 절손 등의 손상이 발생하는 것으로 분석되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 도시철도 앵글형 탈선방지 가드레일의 손상현황을 수치해석을 통하여 손상 원인을 규명하고, 유지관리 최소화를 위한 구성품의 최적설계의 필요성을 제시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 손상현황 조사를 수행하고자 앵글형 탈선방지 가드레일이 설치된 12개소를 선정하여 유지보수 데이터를 분석하였다. 가드홀더를 고정하는 볼트의 이완 및 절손사례가 전체 손상수량의 95%로 나타나 가장 빈번한 손상이 발생하는 구성품은 가드홀더 고정볼트인 것으로 분석되었다.

(2) 구조안전성 검토 결과, 가드홀더의 직상부에 차륜이 위치하는 경우가 가장 취약하며 너트를 제외한 대부분의 구성품에서 1.80 미만의 안전율을 확보하는 것으로 분석되었다. 앵글의 경우, 탈선하중 90kN 이상 하

중에서 인장강도를 초과하는 응력이 발생하였다. 또한 볼트에서 가장 높은 응력이 발생하는 것으로 분석되었다.

(3) 연구결과, 앵글의 경우 가드홀더의 직상부가 다른 부위에 비해 손상발생 가능성이 높으며, 가드홀더는 레일을 고정하는 모서리부에는 절손과 같은 손상이 발생 될 수 있는 인장응력이 집중되는 것으로 분석되었다.

References

- [1] H.Y. Park, “A Study on Relationship between Structural Safety and Maintenance of Derailing Prevent Guard Rail”, Master thesis, Dongyang University, 2023
- [2] J.H. Kim, “A study on the Estimation of Impact Load for the Derailment Containment Provision within Track Gauge”, Ph.D dissertation, Chungnam National University, 2019
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Railway accident status”, 2021. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_874&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=C_25&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&column_path=E1
- [4] Ansys Inc. ANSYS 2021 ANSYS Workbench 2021 R1; ANSYS Inc.; Cannonsberg, PA, USA, 2021.
- [5] H.H. Yang, “A study on the effects of uneven rail-wear at the curved track on running safety”, Master thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2016