레일절손시 허용개구량 기준에 관한 연구
A Study of the maximum allowable rail gap for the broken rail

고 덕 진* 조 선 규** 강 윤 석*** 양 신 추****
Ko, Duk-Jin Cho, Sun-Kyu Kang, Yun-Suk Yang, Shin-Chu

ABSTRACT

This paper deals with the domestic status of rail gap and criteria of the maximum allowable rail gap for the broken rail. Parameteric studies about the maximum allowable rail gap were accomplished by the zimmermann model. The dynamic behavior of broken rail not to be explained by the existing theory was looked into. When a train is travelling along rail gap for the broken rail , dynamic behaviors of rail system and train are abruptly changed. And the opinion about a permission criteria of the rail gab was presented.

1. 서 론

장대레일이 동절기에 기온하강으로 인해 과다할 경우 개구량에 의해 열차충격이 증가하면서 윤중이 급증한다. 이로 인하여 차륜과 궤도의 손상은 물론 열차탈선까지도 우려된다. 이러한 이유로 UIC와 일본은 레일 파단시 개구량에 대한 규정값을 정하여 열차통과시 안전을 확보할 수 있는 규정을 두고 있다. 기존의 이론은 탄성체위의 연속지지된 보(Beam)가 절질 때 생기는 기하학적인 관계에 의해 유도된 방정식에 의해 개구량을 정하고 있다. 그러나 이 이론은 속도증가에 의한 동적충격의 증가를 고려하고 있지 못하다. 절손개소를 차륜이 갈아탈 경우 충격하중에 따라 발생하는 이상윤중이 크게 증가하므로 기존의 이론을 보완할 수 있는 방안이 필요할 것으로 생각된다.

이 연구는 레일절손의 국내외 현황 및 기준과 레일절손시 허용개구량에 대한 이론을 다루고 있다. 기존의 레일탄성체 지지이론을 토대로하여 허용개구량에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그리고 동적해석을 수행하여 기존이론으로 설명되지 못하는 개구부에서의 이상윤중변동을 살펴보고 허용기준 도출에 대한 의견을 제시하였다.

2. 국내외 절손현황 및 허용개구량 적용기준

2.1 국내현황

국내의 레일 절손현황을 분석한 결과 시기적으로는 동절기에 주로 발생하는 것으로 나타났다. 또한 레일 개구부는 장대레일 뿐만 아니라 분기기 크로성부, 이음매부 등의 궤도취약개소에서 주로 발생하였다. 표 1은 99년 기존선 ○○지역 사무소에서 조사한 절손현황으로서 한해 23건의 레일절손이 발생하였다. 계절별로 분석하면 그림 1과 같이 1월, 11월이 제일 많아 동절기에 절손이 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과/공학석사과정/학생회원
** 서울 산업대학교 철도전문대학원 주임교수/공학박사/정생회원
*** 한국철도기술연구원/궤도토목연구본부 선임연구원/공학석사/정회원
**** 한국철도기술연구원/궤도토목연구본부/책임연구원/공학박사/정회원

표 1. ○○지역의 절손현황(1999년도)

발생일시	훼손종별
'99. 01. 22	50Kg N 절손
'99. 01. 24	크로싱 12#,6# 절손
'99. 01. 28	절 손
'99. 01. 28	절 손
'99. 01. 30	크로싱 12#균열
'99. 01. 31	절 손
'99. 02. 08	접착절연레일 절손
'99. 02. 19	두부→저부 균열
'99. 03. 05	절 손(장대구간)
'99. 03. 11	절 손
'99. 03. 22	이음매부 균열
'99. 05. 03	절 손
'99. 06. 07	절 손
'99. 06. 29	절 손
'99. 07. 09	절 손
'99. 09. 17	저부균열
'99. 11. 02	텅레일 10#우 절 손
'99. 11. 13	절 손
'99. 11. 13	절 손
'99. 11. 23	절 손
'99. 11. 29	크로싱 12# 절 손
'99. 12. 08	신축 텅레일 테르밋 복부해손

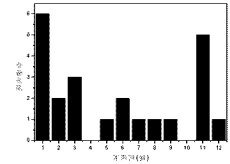


그림 1. 계절별 발생현황 통계

그림 2. 테르미트 용접부 절손

2.2 외국의 절손현황 및 허용개구량 기준 조사

일본 신간선의 레일절손의 주원인은 겨울철에 온도하강으로 인한 레일 수축이 일어나면서 발생하는 인장력이다. 자갈도상궤도에서는 발생한 개구량은 30mm정도이나 슬래브궤도는 공칭 종지항력 0.5t/m에서 68mm의 개구량이 관측되기도 하였다. 일본은 신간선 고속철도 운행시 개구부의 거동을 파악하기 위하여 1964년 압궁 모랠선에서 시속 200km/h까지의 레일개구 주행시험을 수행하였다. 이 때 레일 개구량은 20mm였다. 개구부에서 발생한 레일절손는 전방레일에서 10mm정도, 횡변위가 1mm, 레일응력은 10kgf/mm^{2}정도 발생하였고 콘크리트 침목도 저항 모멘트 100tf·cm를 넘었지만 몇 회 주행시는 문제가 없는 것으로 결론지었다. 그 후 1984년 1월 모터카에 의한 100mm까지의 개구부 주행시험을 수행하였고 허용개구량을 70mm까지 허용하였다. 신간선의 경우 레일절손시 열차가 해당장소에서 최대서행으로 통과하고 응급이음매판을 붙 후 70km/h까지의 주행을 허용하고 있는 실정이다.

허용개구량의 기준으로는 ACI Mannual of Concrete Practice의 PART 4에 경의된 기준과 일본의 전국신간선망 건조물 설계 표준 해설편 기준이 2가지가 있다. 미국의 ACI의 기준에 의하면 궤도시스템의 상대강성은 파단된 레일단부 사이의 개구량이 차량의 탈선을 방지하기 위한 허용 최대 변위와 같도록 비례하여야 한다고 되어 있다. 일반적인 기준은 ACI의 허용 개구량기준(표 2)과 같다. 일반적으로 허용개구량은 16in(0.4m)이하의 차륜에 대해서는 허용개구량을 2in(50mm)를 적용하고 16in이상의 차륜에 대해서는 4in(100mm)까지도 적용한다. 이 규정은 레일 개구량은 체결장치의 강성과 일정간격에 의하여 관리될 것을 권고하고 있다.

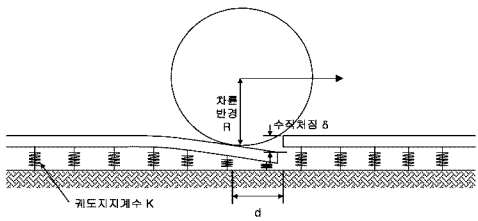
일본신간선망 건조물 설계표준은 교량상의 장대레일을 설계하는 경우에는 레일의 파단시 개구량

(허용치 6.9㎝)과 레일좌굴상노(허용치는 1레일당 100t)가 허용치 이내에 있도록 레일의 체결력, 레일의 신축이음, 형의 고정가능지지의 배치 등에 대해서 검토해야 한다고 되어있다. 단 이 때의 허용값은 60kg레일의 경우에 적용한다.

3. 레일 절손시 허용개구량 산정이론

3.1 허용개구량 산정이론

축력의 변화로 레일파단이 발생되는 틈을 개구라 하며 벌어진 양을 개구량이라 한다. 이와같이 레일의 절손개소를 차륜이 갈아탈 때 지장이 없는 개구량을 개구량 허용한도로 정의한다. 기존의 허용개구량 산정식의 주요가정은 절손 레일 위에 차륜이 레일을 윤중에 의하여 누르게 되면 레일에 처짐이 발생한다. 이 처짐량은 연속지지이론이나 이산지지이론에 의하여 구할 수 있다. 이 때의 처짐 형상은 그림과 같다. 이 파손 레일 위에 차륜 접촉점과 파단 레일의 수직처짐, 차륜반경의 기하학적인 관계에서 허용개구량(d)을 구할 수 있다.



$$\delta = \frac{P}{2EI\beta^3} e^{-\beta x}\beta x \quad \text{(식1)}$$

$$d = \sqrt{R^2 - (R-\delta)^2} \quad \text{(식2)}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{(식3)}$$

여기서, d: 허용개구량 R: 차륜반경
δ: 처짐량 P: 열차윤중
EI: 레일의 휨강성 k: 궤도연속지지계수

위 식에서 레일의 수직 처짐량은 짐머만(Zimmermann)의 탄성체 지지이론(Beam on the elastic foundation model)으로 구한 것이다. 이는 궤도 지지계수가 K위에 무한으로 긴 휨강성 EI의 장대레일 궤도가 있다고 가정한 모델이다. 이 상태에서 보요소의 평형을 구하기 위한 평형계의 미분방정식을 풀어 (식 1)과 (식 3)을 유도할 수 있다.

4. 허용개구량 산정이론에 따른 계산

4.1 허용개구량 영향에 미치는 매개변수

궤도 연속지지에 의한 허용 개구량 결정이론은 레일의 수직처짐과 차륜반경에 의하여 큰 영향을 받는다. 레일 체결에 영향을 주는 요소는 궤도시스템의 지지강성, 궤도의 휨강성이다. 그리고 차륜반경도 이도 허용개구량의 주요변수가 된다. 이외에 궤도의 불규칙부에서는 속도증가와 레일누부면의 요철형상에 의한 동적충격이 매우 커지므로 이상윤중 발생에 대한 고려도 필요하다. 다음 절에는 궤도연속지지에 의한 개구량 결정이론을 토대로 한 허용개구량의 매개변수 연구내용을 설있다.

4.2 각 변수별 허용개구량 산정

4.2.1 속도충격을 고려하지 않은 허용개구량 산정

국내 철도차량의 축중 및 차륜경은 표 2와 같다. 기존이론 계산시 신품과 마모한도에 따라 차륜경이 달라질 수 있는데 마모한도의 차륜직경을 적용하였다.

표 2. 철도종류별 윤중과 차륜직경

구 분		축 중 P(ton)	윤 중 Pw(ton)	차륜경 R(mm) 신 품	차륜경 R(mm) 마모한도	비 고
고 속 철 도		17	8.5	920	850	
일반철도	전기 기관차	22	11	1,250	1,150(가정)	<국유철도건설규칙> - 전 등급의 선로에 LS-22 하중재하를 원칙으로 함. - 최소차륜경 : 768mm 이상
	디젤 기관차	22	11	1,016	916(가정)	
	일반객차	44/3	7.33	860	768	
	전동차 전용선	18	9	860	768	EL-18 하중 적용
도시철도 (지하철)		16	8	860	760	P-16 하중 적용

1) 레일종류에 따른 개구량 산정

표 3에 KS 50레일, KS 60레일, UIC 60레일의 허용개구량을 나타내었다. 같은 궤도지지강성으로 가정하여 해석한 결과 KS 50레일인 경우가 KS 60레일, UIC 60레일인 경우보다 허용개구량이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 이 결과는 충격윤중을 고려할 경우 반대의 경우도 성립할 수 있다고 생각한다.

표 3. 각 레일별의 허용개구량 계산결과

구 분		윤중 P(ton)	차륜직경 R(mm)	KS 50레일 허용개구량 d (mm)		KS 60레일 허용개구량 d (mm)		UIC 60레일 허용개구량 d (mm)	
				비마모차륜	마모차륜	비마모차륜	마모차륜	비마모차륜	마모차륜
고 속 철 도		8.5	850	49.78	47.84	47.03	45.20	47.10	45.27
일반철도	전기기관차	11	1,150	56.38	54.07	53.27	51.09	53.34	51.16
	디젤기관차	11	916	50.82	48.25	48.01	45.58	48.08	45.65
	일반객차	7.33	768	38.18	36.08	36.08	34.09	36.13	34.14
	전동차전용선	9	768	42.29	39.96	39.96	37.76	40.01	37.81
도시철도(지하철)		8	760	48.35	46.54	45.68	43.97	45.75	44.03

2) 차륜에 의한 허용개구량 검토

차륜에 따른 개구량의 변화를 알아보기 위해 하부 노반의 스프링하 계수를 k = 150MN/m이고 KS 60 레일이라고 가정하였다. 차륜신품과 50%마모, 마모한계에 따른 허용개구량을 나타내면 그림 4와 같다. 허용개구량이 제일 큰 것은 일반철도이며 제일 작은 것은 고속철도로 나타났다. 해석결과 차륜의 마모진행에 따라 적정이 감소하고 허용개구량이 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 차륜직경이 커짐에 따라 허용개구량이 증가하는 것으로 나타났다.

3) 하부지지 강성에 따른 허용개구량 변화

그림 5는 고속철도 KTX열차와 기존철도 디젤기관차 통과시 허용개구량을 나타낸 것이다. 고속철도의 경우 UIC 60레일에 차륜직경을 42.5cm로 계산하였고 기존철도는 KS50 레일에 대하여 마모한도 차륜직경인 45.8cm로 하여 해석하였다. 해석한 결과, 차륜직경과 축중이 작을수록 허용개구량이 커진다. 그리고 하부지지강성이 커지면 커질수록 발생되는 개구량은 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 하부지지강성이 증가하면서 레일의 처짐량의 감소하기 때문이며 식 2에 의해서 개구량이

작게 나타난다. 기존이론에 의하면 지지강성이 작을수록 허용개구량이 크게 나타나며 이는 동적충격을 고려하지 않은 것이다.

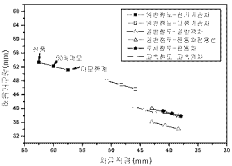


그림 4. 차륜크기에 따른 허용개구량

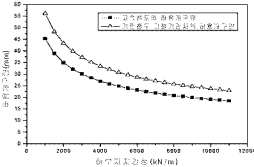


그림 5. 지지강성변화에 따른 허용개구량 변화

4.2.2 동적충격계수를 고려한 허용개구량 산정

열차속도가 증가하면 궤도에 미치는 충격하중이 증가한다.이는 궤도틀림에 의해 동적윤중의 변동분이 증가하기 때문이며 이를 정적하중에서 고려할 수 있도록 한 것이 동적계수이다. 본 연구에서는 일본의 측정결과와 프랑스 TGV의 측정값 등을 정부고속철도 시운전구간에 KTX열차운행시 궤도충격률을 참조하였다. 이중 UIC기준과 국내기준의 동적충격률과 유사하고 선제 고속철도의 설계기준으로 설정된 바 있는 신간선의 장대레일(4)과 이음매궤도(5)의 충격계수를 고려하여 허용개구량을 산정하였다.

충격에 대한 허용개구량을 해석한 결과는 그림 6과 같다. 속도에 따라 허용개구량이 점점 커지는 것으로 나타났으며 일반철도의 허용개구량이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 속도에 따른 충격효과로 인하여 차침이 더 많이 발생하였고 그 결과 속도가 커질수록 허용개구량도 증가하였다. 이결과는 불균일부가 커질수록 윤중이 매우 커져 안전성에 영향을 줄 수 있다는 사실을 반영하고 있지 않다. 일반적으로 차륜플랫이나 궤도의 불규칙한 요철을 통과할 경우 충격에 의하여 매우 큰 동적하중이 발생한다. 네덜란드의 실측에 의하면 시속 120km에서 궤도 불균일부에서 윤하중의 동적증가가 최고 400%이상까지도 발생한 것으로 알려지고 있다. 개구발생시 차륜이 통과하면 이보다 더 큰 이상윤중의 가능성이 매우 높으며 이를 고려하여 개구량과 통과속도를 고려할 필요가 있다고 생각한다.

표 4. 속도와 궤도충격률과의 관계

구 분	100km/h	200km/h	300km/h
(1) Formula of Central European Railways (1936)	1.333	2.333	4.000
(2)Birman's formula(1960)	1.241	1.535	2.401
(3)프랑스 TGV 001호 동적계수	1.176	1.422	1.839
(4)일본의 측정결과로 인한 동적충격계수(장대레일 궤도)	**1.3**	**1.600**	**1.800**
(5)일본의 측정결과로 인한 동적충격계수(이음매 궤도)	**1.500**	**2.000**	**2.333**
(6)경부고속철도 KTX 시험선구간 동적충격계수	1.105	1.140	1.175

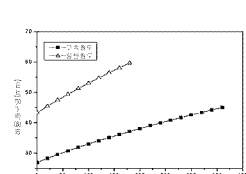


그림 6. 충격계수를 고려한 허용개구량

5. 동적해석에 의한 개구부의 윤중분석

차량-궤도상호작용 동적해석프로그램인 GTDAP를 이용하여 충격윤중을 구하기 위한 동적해석을 수행하였다. 그림 7은 25mm개구부에 대하여 시속 70km/h로 동적해석을 한 결과이다. 그림 8에는 속도에 따라 발생하는 윤중의 증가를 나타내었다. 해석결과 그림 7에서는 이상윤중이 200kN이상 발생하였다. 궤도의 발생된 이상윤중을 신간선 자갈도상궤도의 200kN으로 제한하거나 윤중감소치 0.8로 제한한다면 허용개구량은 다른 기준에 의한 제한된 수 있다고 생각한다.

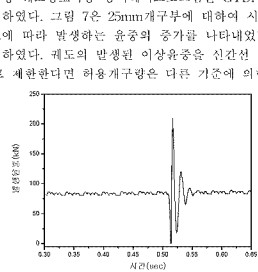


그림 7. 25mm 개구부에서의 이상윤중

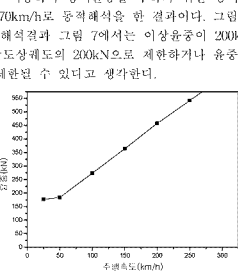


그림 8. 속도상승에 따른 윤중변동 증가

6. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 레일절손의 국내외 현황 및 기준을 살펴보고 기존의 레일탄성체 지지이론에 의하여 허용개구량에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 그리고 기존이론으로 설명되지 못하는 개구부에서의 이상윤중변동을 살펴보고 허용기준 도출에 대한 의견을 제시하였다. 향후 개구부에서의 이상윤중발생을 모형을 개선하고 현장측정 등을 통해 발생 메카니즘과 실제 허용 개구량을 할 예정이다.

참고문헌

1. 서사범 역/Coenraad Esveld 저 최신 철도선로(Modern Railway Track-Second Edition) 얼과얼
2. 선로공학 서사범 편저 삼과꿈
3. 新軌道力學 – 한글판– 佐藤吉彦 著
4. 鐵道工學 槪論 V.A.Profillidis 저 서사범 역 B/G북갤러리
5. 鐵道工學(Railway Engineering) 李鍾得 著 (盧海出版社)
6. 鐵道軌道力學(Railroad Track Mechanics) 李鍾得 著 (盧海出版社)
7. 고속철도공사 전문시방서(궤도편) 한국철도시설공단
8. 보선업무자료 철도청 시설본부 과천출판사
9. 양신추,강유석(1999) 레일용접부의 국부궤도틀림에 따른 차량 및 궤도 거동특성에 대한 연구, 1999년도 학술발표회 논문집(IV), 대한토목학회, pp 293-296.
10. 강기동,박대근,이시하(1999) 텀죠인트 및 궤도틀림에 의한 윤중변동연구, 1999년도 학술발표회 논문집(IV), 대한토목학회, pp 301-304.