

도상 저항력 거동을 고려한 장대레일의 좌굴 특성

The characteristics of buckling of the CWR with respect to the ballast behaviour

김 현 준*
Kim, Hyun-June

이 방 우**
Lee, Bang-Woo

심 현 우***
Sim, Hyun-Woo

ABSTRACT

The advance in technology of the CWR in Korea has led the establishment of the CWR on the sharp curve (i.e. less than $R=600m$). As thermit welding used in the sharp-curved construction site is carried out on the curve track, it is difficult to adjust a curve shape accurately and these difficulties have occurred in a number of cases. Therefore, in this study, the lateral buckling analysis of CWR track was carried out considering the actual ballast resistance force. In addition, the cant and vertical resistance force in ballast was considered in order to predict the initial behaviour of buckling in track under the more accurate method.

1. 서 론

레일 장대화는 가장 효과적인 궤도 생력화 방법중의 하나로써 잘 알려진 바와 같이 정척레일을 용접하여 레일을 장대화시키면 열차 소음·진동의 감소, 주행속도의 향상, 승차감 향상 및 유지보수 노력의 절감 등 많은 장점이 있어 국철에서도 취약 궤도구조가 아닌 주요선로의 대부분이 장대화 되었거나 장대화 시공중에 있다. 그러나 보선 현장에서는 장대화로 인한 궤도의 좌굴 및 레일의 절손 위험성 때문에 많은 유지관리 노력이 투입되고 있는 것이 현실이다. 매년 춘기 장대 레일의 재설정, 하절기 궤도 좌굴 방지를 위한 감시 및 동절기 레일 절손 방지 등에 대한 많은 노력이 요구되고 있는 실정이다.

장대레일의 좌굴에 대한 해석 및 실험은 오래 전부터 많은 연구가 진행되었으며, 우리나라에서도 Yoshihiko Sato 와 Satoru Kobayashi⁽³⁾의 탄성좌굴 해석법으로부터 얻은 근사식을 사용하여 좌굴온도에 대한 안정성을 검토하고 이들 결과를 적용하여 레일 장대화를 수행하였으며, 최근에는 장대레일의 좌굴이 기하적 비선형성과 재료적 비선형성을 포함하고 있으므로 이들을 고려하여 수

* (주)철도안전연구소 선임연구원, 정회원

** 철도청 시설계획과, 정회원

*** (주)철도안전연구소 연구원, 비회원

치해석적 방법으로 비교적 합리적인 좌굴온도를 산정하고 이를 적용시키고 있다.

그럼에도 불구하고 보선현장에서 유지관리 노력이 크게 감소되지 않는 것은 궤도를 구성하는 재료 즉 레일체결구의 체결력, 레일패드의 내구성능에 따른 물성의 변화, 침목과 자갈도상의 상호 작용으로부터 발생하는 도상저항력, 도상의 불균일성 및 노반 상태의 변화 등 많은 불확실성을 내포하고 있는 재료들의 조합으로 구성되어 있으므로, 열차주행에 따른 궤도 구조의 저항력 변화 등의 추정이 어렵기 때문일 것이다. 특히, 특정선로에 대하여 어느 정도의 온도 변화까지 궤도가 좌굴에 안정한가에 대한 판단은 물론 도상의 저항력이 얼마인가 등에 대한 구조적 또는 경험적 지식을 충분히 갖춘 기술자들이 많지 않은 실정이다.

이러한 문제들은 궤도 안정에 대한 공학적인 지식이나 궤도재료의 통계·확률적인 고찰에서의 합리적인 판단에 의한 것이 아니고 궤도의 역학적 특성을 과소 평가하는 데에서 기인하는 것이 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 궤도 구성재료들의 역학적 거동특성을 고려하여 장대레일의 안정해석을 실시하고 일부 부분적인 궤도의 손상 등에 대한 해석도 수행하여 보선현장에서 궤도의 안정성을 보다 쉽게 이해하고 적용하는데 활용할 수 있게 하고자 한다.

대상 선로는 직선구간과 급곡선부, 레일은 50kg N 레일, 궤도 구성 재료 특성은 도상저항력 등의 실제 저항 거동을 고려하였으며, 곡선궤도에서 Cant 량도 고려함으로써 궤도의 후좌굴(post buckling)을 보다 유사하게 묘사할 수 있도록 하였다.

2. 궤도 및 궤도재료의 비선형 거동 특성

2.1 개요

장대레일은 온도에 의한 축력이 증가되면 신축이 자유로운 장대레일의 시점부인 신축이음부에서부터 이곳에서 장대레일 내부로 들어 갈수록 궤도의 저항에 의하여 점차 레일의 온도신축은 구속되기 시작하며 일정구간 이상 즉 궤도의 저항력이 레일 구속에 의하여 발생한 온도축력과 같을 때까지 신축이 된다. 이 구간을 신축구간이라 하고 이 이상 신축이 발생되지 않는 구간을 부동구간이라 하며 이곳에서는 레일의 변위 구속으로 인하여 온도축력을 모두 발생시키게 된다. 그러나 장대레일에서 부동구간과 신축구간이 정해져 있는 것은 아니고 온도 변화량의 크기, 궤도의 종저항력 등에 의하여 지배된다. 일반적으로 신축이음부로부터 약 100m 정도의 떨어지면 부동구간으로 간주하여 장대레일의 최소길이를 200m로 하고 있으나, 엄밀히 말하면 이는 궤도가 부설된 곳의 설정온도와 최대/최소 레일온도 및 궤도의 역학적 특성에 따라 달라지게 된다.

온도에 의한 레일의 신축이 방해되면 레일 내부에 축적된 에너지는 1차적으로 레일과 궤도를 구성하는 레일, 체결구 및 침목 등이 구조적으로 저항하게 된다. 점차 온도가 상승되면 레일 압축력이 커지게 되어 앞에서의 레일, 체결구 및 침목의 구조적인 결합에 의한 저항력보다 큰 좌굴 에너지가 발생되게 될 것이다. 이는 도상자갈의 마찰저항력으로 저항하여야 하며 이 저항력이 부족할 때 좌굴이 발생되게 된다. 일반적으로 궤도는 이론적으로 생각하는 이상적인 기하적조건을 갖추지 못하고 있으며 즉 궤도의 틀림이 존재하고 있다. 또한 궤도 구성 재료나 도상 자갈 등도 불확실성이 크고 비선형 거동을 하고 있다.

궤도의 좌굴은 정상적인 궤도에서는 온도축력에 대한 충분한 저항력을 확보하고 있으므로 발생될 확률이 아주 낮다. 그러나, 궤도는 통과톤수, 기후조건 및 재료의 내구성 손실로 손상이 발생되어 이들이 직접적으로 좌굴 저항력을 감소시키기도 하나, 대부분 이들 궤도의 손상에 대한 보수작업은 필연적으로 궤도를 이완시켜 저항력을 급속도로 저하시키게 된다. 이러한 경우 좌굴 발생의

확률이 높게 되며 대부분의 좌굴(장출)사고의 원인이 되고 있다.

궤도의 비선형 해석은 궤도 자체는 기하적 비선형 거동을 하며 레일 체결구의 체결력과 레일 패드의 저항력 및 도상중저항력과 도상 횡저항력은 미소 변위에서도 재료적 비선형거동을 하는 아주 복잡한 비선형 거동을 하게 된다.

궤도의 좌굴에 대한 해석적 방법으로 Timoshenko & Goodier는 탄성지반상의 보 이론을 기초하여 장대레일의 좌굴해석에 적용할 수 있는 해석적인 방법을 제시하였다. 宮井이 제안한 궤도 좌굴이론 계산은 에너지와 운동량의 평형상태를 가정한 「가상일의 원리」를 적용함으로써 구할 수 있음을 보여주었으며 일본에서는 이 식을 이용하여 장대레일을 설계하고 있다. 그러나 이들 두가지 방법은 1차원적인 해석에 지나지 않으며 현실과는 거리가 있다. Yu Lin Boa은 3차원으로 장대레일의 좌굴해석을 수행하였고 현재는 유럽을 중심으로 많은 연구가 진행되었으며 범용 프로그램을 사용하여 해석하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 장대레일 좌굴해석을 위한 비선형해석을 레일패드의 저항력 및 도상의 저항력 등은 재료의 비선형성과 궤도구조의 기하적 비선형 거동을 고려하여 적용시켰으며, 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램을 사용하여 비선형 해석을 수행하였다.

2.2 궤도재료의 저항 특성

여기서 궤도재료의 구조적 특성치는 문헌 3~5를 참고하였으며 그들을 간략히 요약하면 다음과 같으며 비선형 스프링 모델을 이상화 하였다.

(1) 레일체결구

레일체결용 코일스프링 e-clip 실험결과들을 분석하여 수직방향 및 종방향 그리고 회전에 대한 비선형 스프링 모델을 아래 그림과 같이 이상화시켜 해석에 적용하였으며, 나머지 요소들은 강체로 가정하였다.

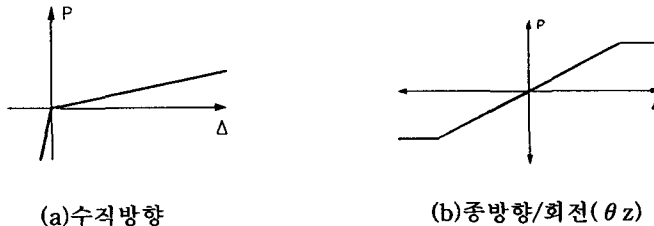


그림 1 레일체결구 비선형스프링 모델

2.3 침목 저항력

PC침목의 저항력은 크게 횡방향 저항력과 종방향 저항력으로 나누어 생각할 수 있다. 횡방향 저항력인 도상 횡저항력은 도상궤도에서 레일체결구를 풀고 레일패드를 제거하여 침목에 종방향력을 재하시키고 이에 따른 침목의 횡방향 변위로부터 측정하고 있으며, 침목이 횡방향으로 2mm 이동시켰을 때의 저항력을 침목의 횡저항력이며, 통상 이를 편측 레일로 도상 종방향으로 단위 m 당 저항력으로 환산하여 나타내고 있다.

침목의 횡저항실험시 횡하중과 횡변위 관계는 하중 초기부터 변위가 발생하는 것이 아니고 초

기 저항력의 약 30%~40%정도까지는 침목주변과 자갈의 마찰력으로 정지되어 있다가 횡하중의 증가와 함께 소성변형이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서도 도상저항력에 대한 비선형 스프링 모델도 이러한 형상을 적용시켰다.

표 1 횡저항력별 저항력 추이

변위(mm)	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
800미만	300	452	623	705	754	789	812
800~	389	568	762	860	916	956	978
1000~	405	639	861	1007	1102	1166	1204
1200~	416	717	1010	1199	1318	1399	1454
1400이상	421	775	1094	1324	1480	1577	1643
평균	386	630	870	1019	1114	1178	1218
비율	0.32	0.52	0.71	0.84	0.91	0.97	1.00

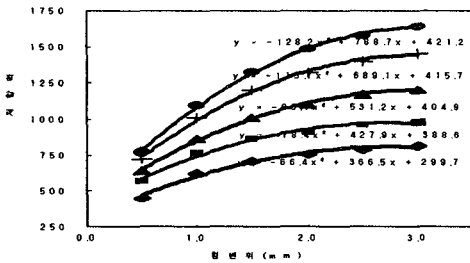


그림 2 횡저항력 본포별 추이

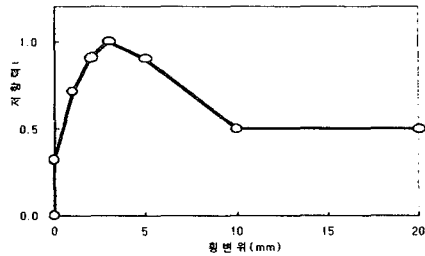
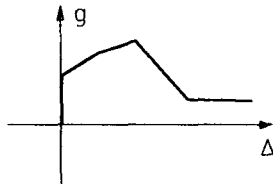
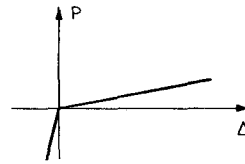


그림 3 이상화된 도상횡저항력 곡선



(a)횡/중 방향



(b)수직방향

그림 4 이상화된 도상저항력 비선형스프링

2.4 레일체결구 손실 및 도상저항력 손실

레일체결구는 도상작업시 이를 인위적으로 제거시키고 열차를 운행하게 된다. 체결구의 탈락은 열차의 운행 횟수의 증가시 피로에 의하여 체결력의 감소 등에 의하여 발생되는 경우도 있으며, 특히 도심 지하철과 같이 급곡선부가 많고 운행횟수가 잦은 경우에는 더욱 자주 발생된다. 어떠한 경우이든 체결구의 손실은 궤도의 좌굴안정성 저하는 물론 열차의 운행안전에도 문제를 야기할 수 있다. 이때의 모델은 Gap 요소를 사용하였으며 그 모델은 다음 그림 5와 같다.

도상저항력손실은 도상작업에 의한 경우와 열차 통과톤수의 증가에 의한 분니, 교대 배면의 충격진동에 의한 뜬 침목 등으로 발생되며, 전자의 경우에는 도상이 안정화될 때까지 초기에 저항력 자체가 낮은 수준을 유지하는 것을 의미하며 후자의 경우는 침목 저변이 도상 자갈에서 이격되어 이곳의 마찰저항이 소실된 경우이다. 이때에는 도상저항력중 마찰저항력으로 판단되는 초기 마찰저항을 제거시키고 모델링하였다. 침목 주변 마찰저항도 일정부분 존재할 것으로 판단되나 이는 안전을 고려하여 무시하였다. 이 경우의 모델은 다음 그림 6과 같다.

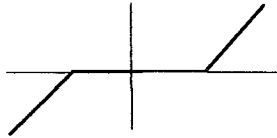


그림 5 Gap 요소 비선형스프링

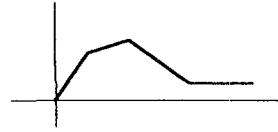


그림 6 도상저항력 손실 비선형스프링

표 2 해석물성치

구 분	스프링계수 (kg/mm)			비틀 스프링 (kg·m/rad)	침목	도상횡저 항력 (kg/m)
	횡	종	수직			
적용값	2682	536	3576	100	PC	400 ~ 800
문헌[4]	2682	536	3576	166×106	목	
실험값		450 ~ 550	900 ~ 1100	300 ~ 500	PC	

3. 궤도의 좌굴해석

3.1 해석모델

장대레일 좌굴해석을 위한 모델은 궤도 총길이 200m, 레일은 국철에서 주로 사용되고 있는 50 kg N 레일을 사용하였으며 전체 모델 및 경계조건은 그림 7(a), (b)와 같이 하여 비선형해석을 수행하였다. 침목간격은 17정/10m, 침목은 국철 PC침목을 사용하였다. 궤도 선형은 직선, 곡선반경 600m, 500m, 400m, 300m를 각각 모델링하였다. 재료 특성은 침목저항력만 변수로하여 도상횡저항력을 각각 300kg/m, 400kg/m, 500kg/m, 600kg/m, 700kg/m에 대하여 비선형 해석을 수행하였고, 나머지 궤도재료들은 표2에 있는 일정저항력에 대하여만 해석하였다. 비선형해석시 후좌굴을 유도하기 위하여 문헌[5] 등에서 궤도틀림을 횡방향으로 40mm 정도 발생시켜 놓고 해석하였으나 여기서는 정상적인 궤도에서 post-buckling 유도 방향으로 선행하중(Pre-lateral force)을 2ton 재하시키고 해석하였다. 이들 방법에는 여러 가지 논란이 있을 수 있을 것이나, 국철에서 궤도 틀림의 기준이 7mm이므로 궤도틀림을 40mm로 한다는 것은 기하적으로 이미 궤도에 좌굴이 발생된 수준이며, 이는 실제적인 최소 곡선반경이 300m 이하 선형의 표현으로는 적절하지 못한 것으로 판단된다. 본 연구에서 횡하중 2ton을 재하시키는 것은 열차의 사행동에 의한 레일에 작용되는 하중을 고려한 것으로 한편으로는 모델링이 간편하게 되고 또한 좌굴발생시점에서 침목저변과 도상

의 마찰저항을 감소시키는 효과도 있으므로 궤도의 좌굴해석과 후좌굴해석에 유용하며 안전측의 해석이 가능하게 한다.

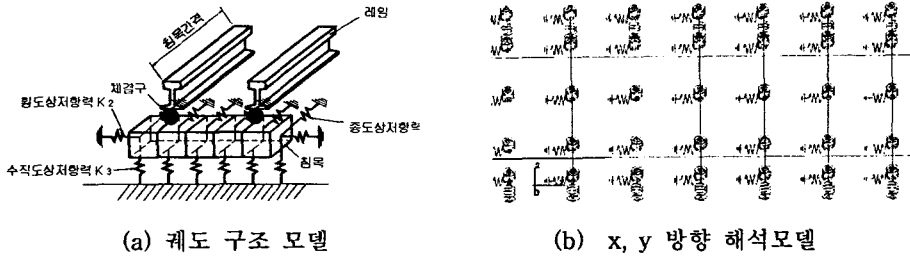


그림 7 x, y 방향 해석모델

3.2 해석 결과 및 분석

‘경부고속철도 기존선활용에 따른 판형교 장대부설 및 장대레일 관리방안 연구, 한국철도기술 연구원, 2000’의 연구결과는 우리나라 도상저항력의 특성을 고려하여 이론적 해석과 실험 등을 통하여 도상저항력의 적절한 확보로 이들 곡선에서도 장대화 가능한 연구 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 곡선 반경에 따라 레일 꺾임 길이를 변수로 좌굴 해석 모델링을 하고 이들과 정상적인 곡선 궤도와 비교·검토하였으며, 기존 강하시 이들에 미치는 인장 응력 특성도 함께 고찰하고자 한다. 해석에 사용된 물성치는 외국의 자료 및 국내 실험자료⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾를 사용하여 값을 사용하였다. 다음 그림 8은 직선궤도의 좌굴형상을 나타낸 것이다.

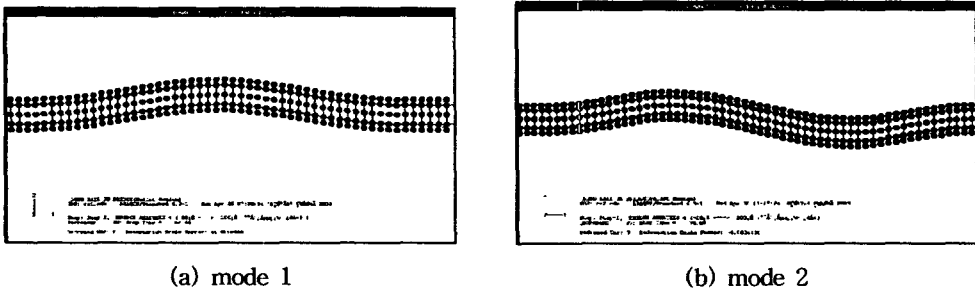


그림 8 변위형상 비교(R=∞)

궤도의 도상저항력, 레일체결력 및 손실 등에 대한 보다 현실적인 물성치들을 사용하여 해석한 기하학적 및 재료비선형 해석결과 들을 나타낸 것이 다음 표와 그림들이다.

(1) 정상궤도

위의 그림은 직선궤도에서 횡변위와 온도관계를 후좌굴해석을 통하여 나타낸 것이다. 직선궤도에서의 1차 좌굴하중은 $g=300\text{kg/m}$ 에서도 180°C 정도에서 좌굴이 발생되나 좌굴이 급작히 발생되고 있다. 또한 최소 온도하중이 약 100°C 에 이르는 것을 알 수 있어 직선궤도는 좌굴에 상당한 안전성을 가지고 있음을 알 수 있다. 아래 그림과 표는 곡선부와 도상저항력에 따른 좌굴온도하중(2mm 횡

변위시)를 나타낸 것으로 문헌[1]에서 제시한 곡선 반경별 소요 도상저항력은 충분한 안전성을 확보한 것으로 나타났다. 여기서 좌굴온도가 좀더 높게(안전하게) 나타난 것은 도상저항력의 초기 마찰력을 고려하였기 때문인 것으로 보인다.

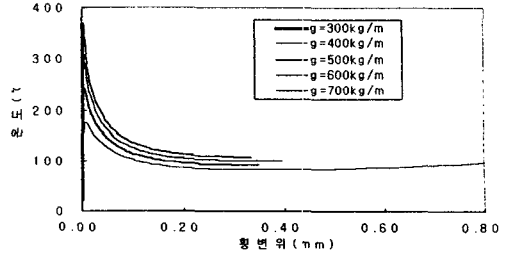


그림 9 궤도횡변위와 온도관계(직선궤도)

표 3 정상궤도 곡선반경-온도 해석결과

곡선반경	g=300	g=400	g=500	g=600	g=700
300	29.7	41.0	53.2	66.3	80.5
400	35.7	49.5	63.3	82.4	97.4
500	36.5	51.3	74.1	94.7	113.5
600	37.4	56.7	83.4	103.2	130.1
직선부	60.7	98.0	148.3	185.7	239.4

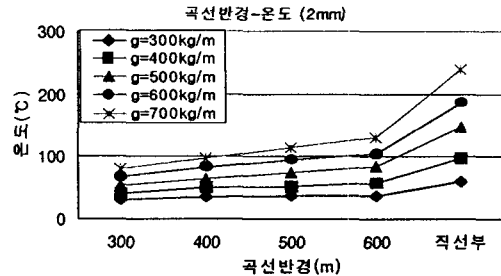


그림 10 정상궤도의 곡선반경-온도

표 4 정상궤도 곡선반경-축력 해석자료

곡선반경	g=300	g=400	g=500	g=600	g=700
300	22.2	24.8	27.6	30.4	50.1
400	24.1	30.4	38.2	65.4	97.0
500	25.5	48.6	84.3	116.5	159.0
600	34.1	62.1	103.7	138.2	183.4
직선부	60.9	121.2	196.0	260.5	334.3

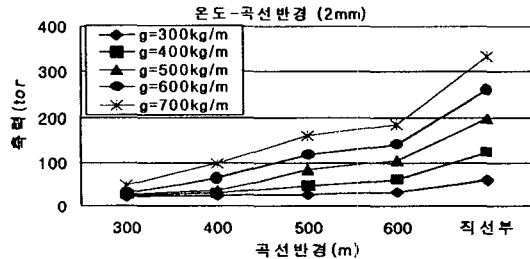


그림 11 정상궤도의 곡선반경-축력

(2) 침목손상 및 레일 체결구 손상

침목손상시(30% 저항력은 유지하는 것으로 가정) 해석결과는 직선궤도일 때 4개 손상된 경우 80℃ 정도에서 좌굴이 발생됨을 알 수 있으나, 나머지 R600m 미만 궤도에서는 50℃ 미만에서 좌굴이 발생됨을 알 수 있다. 1개손상시에는 모두 60℃를 초과하므로 좌굴 위험성은 안전함을 알 수 있다. 특히 침목손상시에는 급곡선부에서는 곡선반경의 크기와 관계가 크지 않음을 알 수 있다.

체결구 손상시 해석결과도 침목손상과 유사하게 나타났다. 체결구 손상이 연속하여 4개 이상일 때에는 모두 좌굴온도가 50℃ 미만으로 나타났으며, 직선부에서는 3개 손상까지는 안전하게 나타났고 곡선부에서는 2개 이상은 좌굴안정성이 확보되지 못하는 것으로 나타났다.

표 5 침목손상 곡선반경-온도 해석자료

곡선반경	정상	1개	2개	3개	4개	5개
300	80.5	64.6	43.5	43.3	32.5	32.5
400	89.9	70.2	45.2	45.2	31.5	31.5
500	94.7	73.6	49.5	53.0	39.7	31.3
600	93.3	71.3	47.6	47.6	39.5	39.5
직선부	148.3	131.3	102.2	85.1	80.5	52.5

표 6 침목손상 곡선반경-축력 해석자료

곡선반경	정상	1개	2개	3개	4개	5개
300	50.1	69.5	36.1	36.1	17.6	17.6
400	81.2	65.8	36.8	30.2	28.4	11.8
500	116.5	71.3	35.8	35.8	31.8	13.1
600	121.0	67.0	32.9	32.9	32.6	32.2
직선부	196.0	175.4	136.2	109.5	110.7	64.7

표 7 체결구손상 곡선반경-온도 해석자료

곡선반경	정상	1개	2개	3개	4개	5개
300	80.5	59.3	43.5	38.6	35.2	31.0
400	89.9	70.7	56.0	44.9	36.8	32.0
500	94.7	74.3	60.2	44.8	37.5	30.7
600	93.3	71.8	56.9	44.2	36.8	29.2
직선부	148.3	107.2	84.9	62.8	46.5	41.9

표 8 체결구손상 곡선반경-축력 해석자료

곡선반경	정상	1개	2개	3개	4개	5개
300	74.7	61.0	36.0	28.7	22.6	15.2
400	81.2	66.5	44.9	30.8	24.1	16.9
500	116.5	72.4	51.6	29.0	25.0	16.5
600	121.0	67.9	48.7	35.8	24.1	14.1
직선부	196.0	137.4	100.3	66.9	45.1	31.1

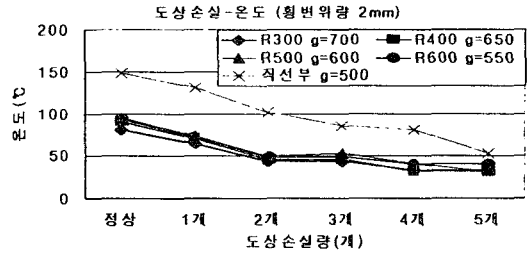


그림 12 침목손상시 곡선반경-온도

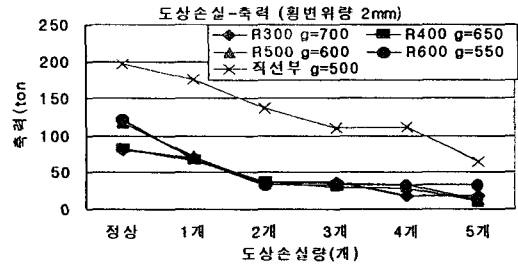


그림 13 침목손상시 곡선반경-축력

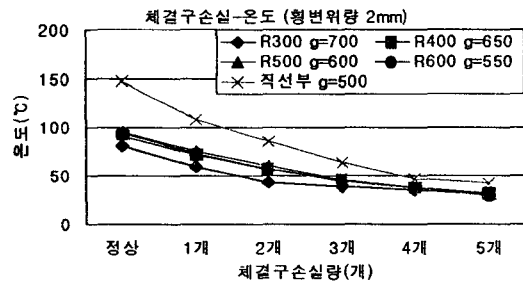


그림 14 체결구손상시 곡선반경-온도

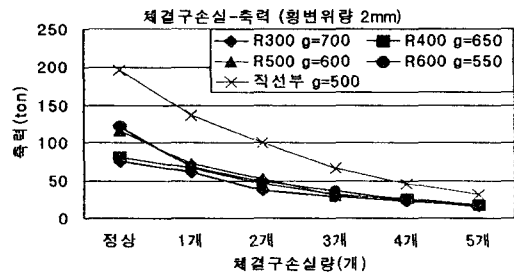


그림 15 체결구손상시 곡선반경-축력

4. 결론

본 연구는 자갈도상 궤도의 각종 물성치를 실제거동에 유사하게 모델링하여 장대레일 궤도의 안정해석을 수행하였다.

해석결과 문헌[1]에서 제시한 곡선별 소요저항력은 충분한 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다으며, 온도 좌굴 안전성이 높게 나타났다.

궤도의 손상에 따른 안정성을 해석한 결과 침목의 손상은 직선궤도에서 4개까지는 안전한 것으로 나타났으나 급곡선 궤도에서는 2개소 이상은 불안한 것으로 나타났다. 또한, 레일 체결구의 손상도 침목손상과 유사한 결과를 나타내고 있으며, 직선부에서 체결구 손상이 연속하여 4개 이상일 때에는 좌굴안전성에 문제가 있는 것으로 나타났다. 곡선부에서는 2개 이상은 좌굴안전성이 확보되지 못하는 것으로 나타났다. 급곡선부에서 궤도손상이 2개소 이상 연속되는 경우에는 궤도 관리에 특별한 조치가 요구되는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 한국철도기술연구원, 경부고속철도 기존선 활용에 따른 판형교 장대부설 및 장대레일 관리방안연구, 2000.12
2. 철도안전연구소, 도상저항력 측정 및 확보방안 연구, 2000.12
3. 60kg 레일を含む各種レール軌道座屈強さと座屈強さ略算式,鐵道技術研究報告, 1971,6
4. American Railways Engineering Association, "1994 Manual For Railways Engineering", 1994
5. Transportation Systems Center Cambridge MA, "Parametric Analysis and Safety Concepts of CWR Track Buckling", NTIS, 1993