

매립형철도궤도 시스템 성능평가

Evaluation of ERS(Embedded Rail Track System): Design and Experiments

박정근* 김순철** 한종문***
Park, Jeung-Geun Kim, Sun-Cheol Han, Jong-Mon

ABSTRACT

The ERS(Embedded Rail Track system) is constructed in the world due to a slab track system having maintenance free, high structural safety, and deduction of noise and vibration. The ADRI-ERS is developed as Korean type. This paper shows that the design of ADRI-ERS and experiments according to DIN EN 13481-5 and Korea high speed train test guidelines. The ADRI-ERS has high structural safety in pull-out test, longitudinal resistance test, and fatigue test. The design method of ADRI-ERS is proposed by two design constants due to the result of experiments also.

1. 서 론

매립형철도궤도시스템 ERS(Ebedded Rail Track System)은 네델란드에서 처음 시작하여 30년 이상의 상용선의 경험이 있고, 구조적 안정성이 탁월하며 유지보수 및 소음진동에 유리한 철도궤도시스템으로서 경전철에서 고속철도에 이르기까지 널리 적용되고 있다. 본 논문은 한국에서 수행한 ADRI-ERS® 시스템 성능평가에 관한 것으로 독일 콘크리트궤도용 ERS 성능시험 요구인 DIN EN 13481-5(콘크리트궤도용 레일체결장치에 대한 요구사항)의 조건에 준하는 성능을 충분히 만족하는 것을 보여준다. 그리고 연속레일패드 및 Polycork패드 시험방법, Polycork패드 강성이 전체시스템에 기여하는 기여도, Polycork의 시간별 강도변화에 관하여 소개한다.

2. 매립형철도궤도(Embedded Rail Track System)의 특징

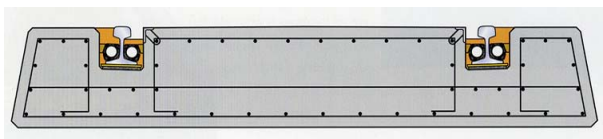


그림1. 매립형철도궤도

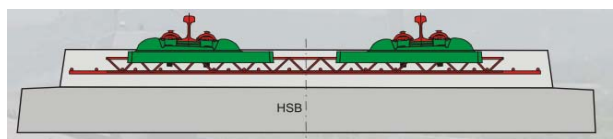


그림2. Rheda 2000

매립형철도궤도는 Slab Track System으로서 그림1, 2 에서와 같이 기존시스템과 달리 침목과 레일고정을위한 강철클립장치가 불필요하며 슬라브에 홈을 만들어 레일을 수지로 탄성 고정시키는 구조로 되어 있고 아래와 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 연속탄성지지(Continuous Rail Support): 균등한 레일마모와 수명연장(2~6배), 이상적인 고속주행
- (2) 우수한 진동소음저감 및 댐핑으로 인한 공진회피(Vibration and Noise Isolation)
- (3) 우수한 유지보수, 높은 내식성 및 내구성(Maintenance Free, High Durable Surfacing)

* (주)ADRI, 대표이사, 공학박사

E-mail : erskorea@gmail.com TEL : (070)7019-2221 FAX : (031)696-5913

** (주)석탐엔지니어링 철도사업부 전무, 철도기술사

*** (주)석탐엔지니어링 철도사업부, 대리

- (4) 높은 종저항력(High Longitudinal Resistance): 부분 지지의 7배 이상
- (5) 높은 전기 절연(High Electrical Insulation)
- (6) 빠른 시공 및 레일교체(Rapid Installation and Replacement)
- (7) 낮은 온도 신축율(Thermal Expansion Free)
- (8) 경전철에서 고속철도에 적용(Light Rail System~High Speed Rail): 대만고속철도
- (9) 철도교 형하공간 확보 및 터널단면 감소(Reducing Clearance and Structural Section Area)
- (10) 방재터널, 방재교량: 긴급시 일반차량 및 구급차량 통행 가능(Emergency Route)

3. ADRI-ERS 연속지지계수 및 궤도정적설계

ERS궤도정적설계는 Winkler Foundation Model을 기초로 하여 레일을 지지하는 연속지지계수를 산정하고 연속레일패드와 Polycork의 물성치를 정한다.

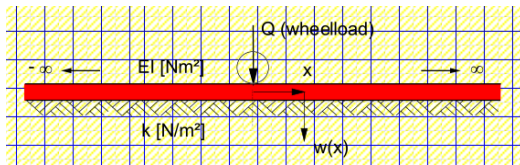


그림3. 탄성기초위의 보

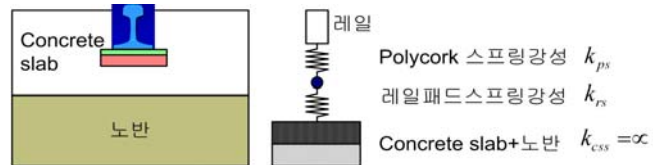


그림4. ADRI-ERS 레일지지강성

3.1 탄성기초위의 연속보 및 ERS연속지지계수(C_{cbc})

그림3은 탄성기초위에 연속적으로 지지된 보를 보여주고 있으며 이 모델은 ERS의 거동을 표현하는데 사용될 수 있다. 그림4에서와 같이 하중을 지지하고 있는 지지강성은 레일강성, Polycork 강성, 레일패드강성, 노반강성이다. 슬라브 궤도에서 노반 및 콘크리트 슬래브는 기준이상의 침하를 발생시키지 않도록 견고히 시공되어야 하고 지지 조건 또한 상부 차량하중을 등분포로 지지하고 있어 침하가 발생되지 않는 강체로 생각 할 수 있다.

$$EIw'''' + kw = 0$$

$$w(\infty) = 0; w'(0) = 0; w''(0) = \frac{Q}{2EI}$$

$$w(x) = \frac{QL^3}{8EI}\eta(x) = \frac{Q}{2kL}\eta(x)$$

여기서,

$$Q = \text{윤하중 [N]}, EI = \text{레일의 휨강성 [N/m}^2], L = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k_{cbs}}} = \text{특성길이(characteristic length)[m]}$$

$$\eta(x) = e^{-x/L}[\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L}], x \geq 0, \mu(x) = e^{-x/L}[\cos \frac{x}{L} - \sin \frac{x}{L}], x \geq 0 \text{ (wavelength } 2\pi L)$$

ERS연속지지계수(C_{cbc})는 콘크리트 슬라브와 노반 강체 위의 연속레일패드 및 폴리콜크패드가 상부 하중인 레일과 차량하중을 지지하는 단위 면적당 스프링 강성이다. 단위길이 당 지지강성($k = k_{cbs}$)을 연속지지폭 (b_c)으로 나눈 것으로 아래와 같이 정의 된다.

$$C_{cbc} = k_{cbs}/b_c = \text{연속지지계수 [N/m}^3], b_c = \text{연속지지 폭}$$

3.2 ADRI-ERS 궤도정적설계

슬래브와 노반은 강체로 상부하중을 지지한다고 가정한다. 그림5는 ADRI-ERS궤도의 정적설계 흐름도를 보여주고 있다. 연속지지스프링강성(k_{cbs})은 ERS연속지지에서 슬라브와 지반의 조합강성을 강체로 보았을 때 연속레일패드와 폴리카르크패드가 레일과 차량을 지지하는 단위길이당 강성이다. 여기에 연속지지폭(=연속레일패드폭)으로 나누면 ERS연속지지계수(C_{ecbc})가 산정된다. 이 값은 단위면적당 지지강성으로 패드 두께가 일정할 경우 고유의 값을 가진다.

연속레일패드스프링강성(k_{rs})은 연속지지스프링강성에 Pad강성비 설계정수(f_{prs}) 1.24와 연속레일패드스프링강성 감소계수(f_{rfs}) 0.77을 곱하여 산정한다. 이 Pad강성비 설계정수는 실험을 통하여 산출된 계수로 구조적으로 안정한 시스템의 Polycork패드스프링강성과 연속레일패드스프링강성의 비를 의미한다. 연속레일패드스프링강성 감소계수는 레일을 잡아주고 있는 Polycork의 수직방향강성으로의 기여로 인한 연속레일패드스프링강성 저감 보정계수이다. 이 저감된 연속레일패드스프링강성과 Polycork수직방향기여 강성이 조합되어 작용 수직하중을 지지한다.

레일의 휨강성과 지지강성이 고려된 레일의 최대 처짐을 계산하고 이에 따른 각 구조부재인 레일과 슬라브 및 노반의 허용응력 및 처짐을 조사한다. 궤도의 동적설계는 고속주행 시나 철도교량 등 철도 구조물 통과 시 정적거동과 비교하여 충격하중이나 공진현상 등 검토하여야 할 중요 항목이 있으므로 충분히 검토하여 설계하여야 한다.

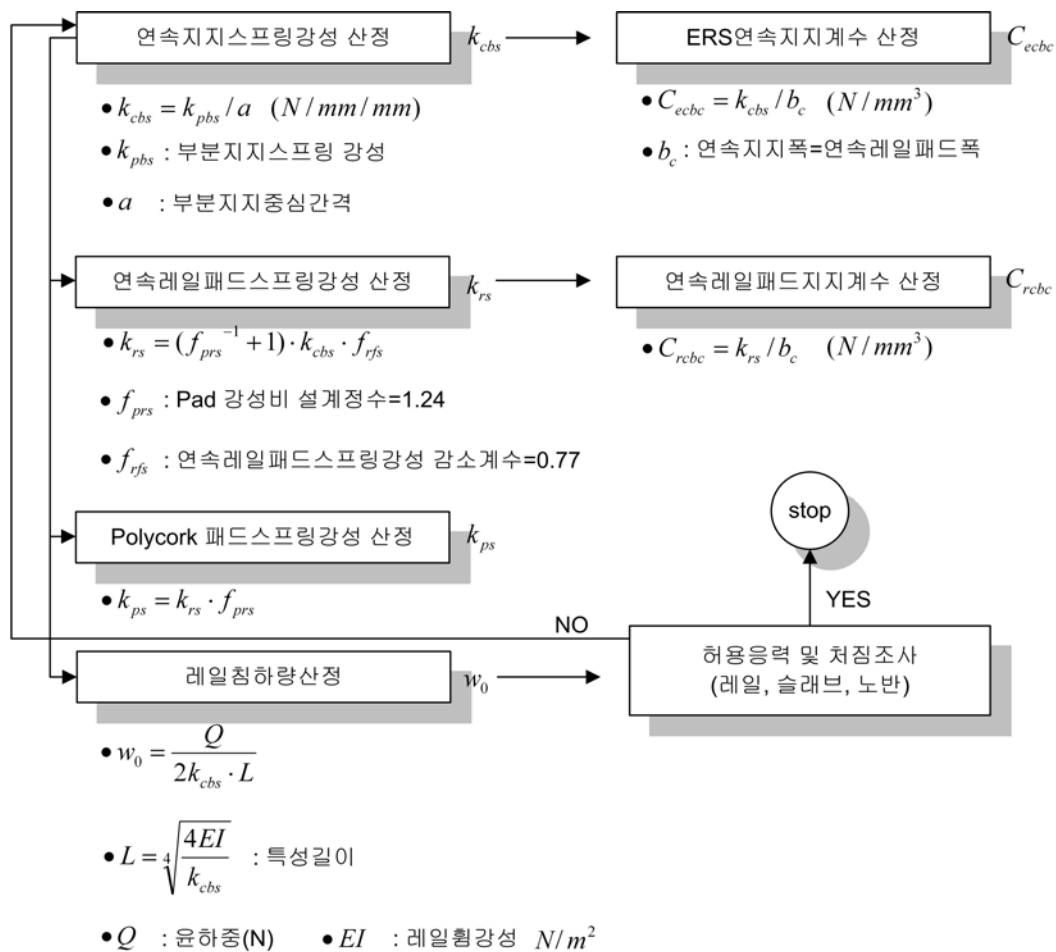


그림5. ADRI-ERS 정적궤도설계 흐름도

4. 매립형철도궤도 성능시험(Test of ERS)

ERS의 성능시험은 크게 요소시험(Element Test)과 시스템조합시험(System Test)로 나누어진다. 요소 시험은 연속레일패드시험(Continuous Rail Pad Test)과 레일고정수지인 Polycork시험(Polycork Test)으로 나누어진다. 시스템조합시험은 피로시험 전후 정적 및 동적 수직스프링계수시험 (Static and Dynamic Loading Test), 피로시험전후 인발저항력시험 (Rail Pull-out Test), 피로시험전후 종방향저항력시험 (Longitudinal Resistance Test), 피로저항시험 (Fatigue Resistance Test) 로 나누어지며 독일 콘크리트궤도용 ERS 성능시험 요구인 DIN EN 13481-5에 준하여 시험을 수행한다.

4.1 요소시험(Element Test)

(1) ERS KS50N 연속 Rail Pad 및 Polycork Pad 시험시편크기(ADRI, 2008)

단일패드를 사용하는 경우 레일체결장치의 구성품인 연속 Rail Pad 단품으로 수직스프링정수를 시험하며 필요에 의해 Polycork의 시편을 제작 시험한다. 탄성패드를 지지할 지지대와 레일저부와 같은 폭을 갖는 하중 재하판, 레일패드의 밀림을 방지할 수 있는 연마용 천으로 구성하여 시험한다.

도표1. 연속레일패드 및 Polycork패드 시험시편크기(ADRI-ERS KS50N)

구 분		연속 Rail Pad	Polycork Pad
Bedding Modulus(N/mm ³)		0.44	0.55
재하하중(N)		70,000	30,000
변위(mm)		3	2
허용압축응력(N/mm ²)	1.5(허용값)	1.37	1.17
허용변형률(%)	20(허용값)	19	13
기준시험체크기(mm)	폭	160	160
	길이	320	160
	두께	16	16

각 패드는 허용압축변형률 및 허용압축응력이하에서 기준시험체 크기로 시험하며 시편크기를 줄일 경우 재하하중의 크기도 비례하여 줄여 시험할 수 있으나 원칙적으로 규정된 기준시편을 이용 시험한다. 시편의 하중-변위는 탄성 상태로 비례하여야 한다.

(2) 연속레일패드(Continuous Rail Pad Test)

시험은 KS M 6604(방진고무 시험방법) 및 KS M 6518(가황고무 물리시험 방법)에 따라 시험하며 시험편의 크기는 160(가로)×320(세로)×16(두께)mm로 한다. 정적 수직스프링강성 시험은 실온에서 1mm/min의 속도로 $P_{max}=(70 \pm 1)$ kN의 수직력을 시험편에 3회 반복하여 마지막 3번째의 하중변위 곡선으로부터 $P_1 \sim P_2$ 를 0kN~50kN 범위에서 측정된 활선 스프링 계수로 한다. 각 시험항목에 대한 물리적 성질은 설계된 정적수직스프링계수 값과 허용된 영구압축줄임률의 오차범위 이내를 만족해야 한다.

(3) 레일고정수지 Polycork(Polycork Test)

시험은 KS M 6604(방진고무 시험방법)에 따라 시험하며 시험편의 크기는 160(가로)×160(세로)×16(두께)mm로 한다. 정적 수직스프링강성 시험은 실온에서 1mm/min의 속도로 $P_{max}=(300 \pm 1)$ kN의 수직력을 시험편에 3회 반복하여 마지막 3번째의 하중변위 곡선으로부터 $P_1 \sim P_2$ 를 0kN~30kN 범위에서

측정한 할선 스프링 계수로 한다. 각 시험항목에 대한 물리적 성질은 설계된 정적수직스프링계수 값의 오차범위 이내를 만족해야 한다.

4.2 시스템조합시험(System Test)

(1) 시험편 제작

시험편은 궤도정적설계방법에 따라 산출된 설계단면을 적용하며 철재 홈을 구성 KS 50N 레일용 ADRI-ERS 시스템을 제작한다. 종방향 길이는 600mm로 하며 실온에서 3일 이상 방치 후 아래의 시험을 실시한다.

(2) 시스템수직스프링계수시험

• 정적 스프링계수

정적스프링계수는 실온에서 2kN/s의 속도로 $P_{max}=(70\pm 1)$ kN의 수직력을 체결장치에 재하하여 $P_1\sim P_2$ 를 0kN~50kN 범위에서 측정할 할선 스프링 계수로 한다. 시험은 3회 반복 수행하며 마지막 3회 주기의 최대, 최소 변위량 및 최대, 최소 하중 값들을 다음 식으로 계산하여 정적 스프링 계수를 구한다.

• 동적 스프링계수

동적스프링계수는 실온에서 $P_1\sim P_2$ 를 5kN~55kN 범위로 수직력을 (4 ± 1) Hz의 주파수로 100회 반복 재하하여 마지막 100회 측정할 최대, 최소 하중값 및 10회 이후의 측정할 최대, 최소 변위량의 평균값을 다음 식으로 계산하여 동적 스프링 계수를 구한다.

(3) 종방향저항력시험

종방향 저항력은 레일을 고정하고 있는 합성수지의 부착력과 신장률을 시험하는 것으로 부분지지 궤도 방식의 종방향 저항력 시험(DIN EN 13146-1)과 목적이 같다. 시험 방법은 시험체를 수직방향으로 세운 상태에서 레일의 단면부에 (10 ± 5) kN/min의 속도로 2.5kN의 하중을 가한 상태에서 30초간 유지시킨다. 다음에 하중을 2.5kN씩 단계별로 높이면서 재하되 각 하중 단계마다 30초간 유지한 후 하중을 증가시킨다. 가력 단계에서 2mm 변위 발생 시의 하중을 측정하고 이때의 레일 고정 합성수지와 시험체간의 접촉분리현상은 없어야 한다.

(4) 인발저항력시험(체결력)

체결력은 레일과 레일고정 합성수지 및 레일고정 합성수지와 콘크리트 또는 철재 접촉부간의 수직방향 인발력을 시험하는 것이며 이는 부분지지 방식의 궤도에서 레일저부 상부면에 설치된 체결장치에 적용된 하중을 정의하는 시험(DIN EN 13146-7)과 목적이 같다. 시험 방법은 수직방향 레일 인발지그를 설치 후 10kN/min 미만의 속도로 30kN까지 가한 후 접촉 분리상태를 조사하여 판정한다.

(5) 피로저항시험

레일에 주행차량의 하중이 가해질 때 체결장치가 견뎌야 하는 실제의 수직 및 수평 하중조건을 위해 기울어진 시험편에 반복하중을 가한다. 시험방법은 DIN EN 13146-4(반복하중의 영향에 대한 성능시험)에 준하여 실시한다.

도표2. ADRI-ERS 시스템 조합시험 시험 항목 및 요구조건

시험항목	관련규정		요구조건
	국내	해외	
시스템의 정적스프링계수 변화량	레일체결장치 성능 시방서	DIN EN 13146-4	±25%
중방향 레일 구속력		DIN EN 13146-5	7N/mm 이상
중방향 레일 구속력 변화량		DIN EN 13146-1	±20% 이내
체결력		-	16kN 이상
체결력 변화량		DIN EN 13146-5	±20% 이내
피로하중에 의한 레일두부 횡변위		-	4mm 이내

4.3 ERS시스템 성능시험결과(국제공인 한양대 초대형구조시스템연구센터(2007.7))

(1) 연속레일패드

Table A1-1. 정적 수직 스프링계수 시험결과

시편	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	P_{min} (N/mm ²)	P_{max} (N/mm ²)
No.1	0	1.066	0	0.501
No.2	0	1.132	0	0.500
No.3	0	1.015	0	0.499

Table A1-2. 정적 수직 스프링계수 판정

시편	스프링계수 (N/mm ³)	허용치 (N/mm ³)	판정
No.1	$k_{stat} = \frac{0.501-0}{1.066-0} = 0.47$	0.44±20%	O.K
No.2	$k_{stat} = \frac{0.500-0}{1.132-0} = 0.44$	0.44±20%	O.K
No.3	$k_{stat} = \frac{0.499-0}{1.015-0} = 0.49$	0.44±20%	O.K

Table A1-3. 압축영구줄음률 시험결과 및 판정

시편	압축영구줄음률 (%)	허용치 (%)	판정
No.2	7	15 이내	O.K

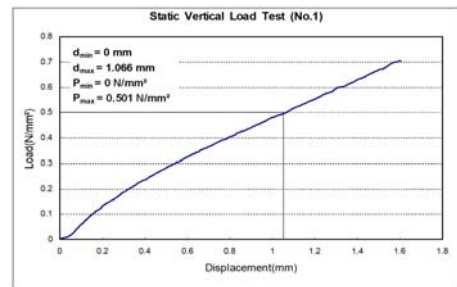


Figure A1-1. 하중-변위 관계곡선

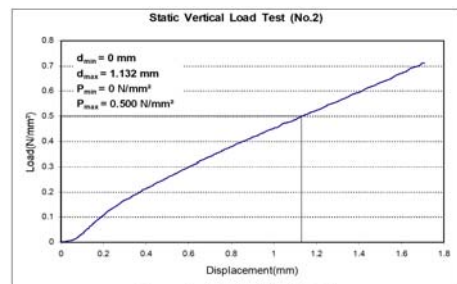


Figure A1-2. 하중-변위 관계곡선

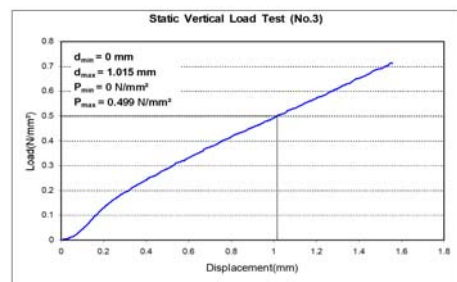


Figure A1-3. 하중-변위 관계곡선

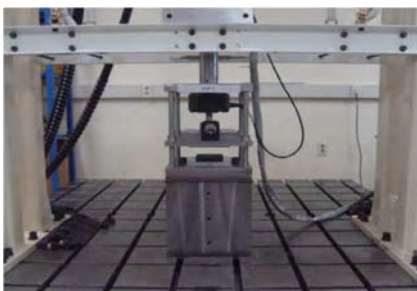


그림6. 연속레일패드 시험

(2) 레일고정 합성수지 Polycork

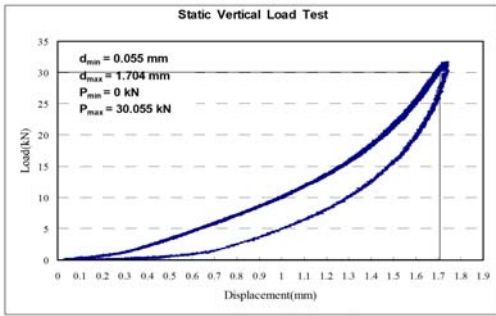


Figure A2-1. 하중-변위 관계곡선



Table A2-1. 정적 수직 스프링계수 시험결과

d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)
0.055	1.704	0	30.055

Table A2-2. 정적 수직 스프링계수 판정

스프링계수 (kN/mm)	허용치 (kN/mm)	판정
$k_{stat} = \frac{30.055 - 0}{1.704 - 0.055} = 18.22$	17±20%	O.K.

그림7. Polycork Pad 시험

(3) 인발저항력(체결력)

Table A4-1. 인발저항력(체결력) 시험결과 및 판정(피로저항시험 전)

항목	측정치	허용치	판정
재하된 하중	30 kN	25 kN 이상	O.K.
접촉분리현상	발생하지 않음	발생하지 않아야 함	O.K.

Table A4-2. 인발저항력(체결력) 시험결과 및 판정(피로저항시험 후)

항목	측정치	허용치	판정
재하된 하중	30 kN	25 kN 이상	O.K.
접촉분리현상	발생하지 않음	발생하지 않아야 함	O.K.

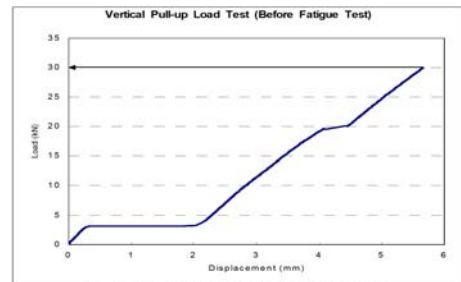


Figure A4-1. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 전)

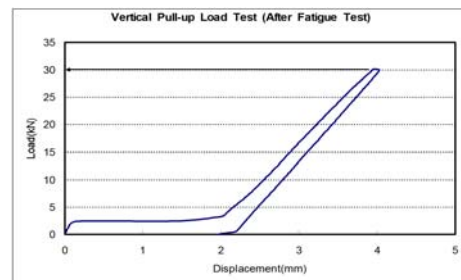


Figure A4-2. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 후)

그림8. 인발저항력(체결력) 시험

(4) 시스템 수직스프링 계수

Table A3-1. 정적 수직 스프링계수 시험결과(피로저항시험 전)

	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)
정적 수직 스프링계수	0	1.2132	0	49.9277

Table A3-2. 정적 수직 스프링계수 시험결과(피로저항시험 후)

	d_{min} (mm)	d_{max} (mm)	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)
정적 수직 스프링계수	0	1.1101	0	49.7738

Table A3-3. 동적 수직 스프링계수 시험결과(피로저항시험 전)

	d_{min} (평균값) (mm)	d_{max} (평균값) (mm)	P_{min} (kN)	P_{max} (kN)
동적 수직 스프링계수	0.4825	1.0189	4.5411	55.4845

Table A3-4. 수직 스프링계수 판정(피로저항시험 전)

	수직 스프링계수 (kN/mm)	허용치 (kN/mm)	판정
정적	$k_{stat} = \frac{49.9277 - 0}{1.2132 - 0} = 41.15$	35±20%	O.K.
동적	$k_{dyn} = \frac{55.4845 - 4.5411}{1.0189 - 0.4825} = 94.97$	정적의 250% 이내	O.K.

Table A3-5. 정적 수직 스프링계수 판정(피로저항시험 후)

정적 수직 스프링계수 (kN/mm)	변화량 (%)	허용치 (%)	판정
$k_{stat} = \frac{49.7738 - 0}{1.1101 - 0} = 44.84$	8.97	정적의 25 이내	O.K.

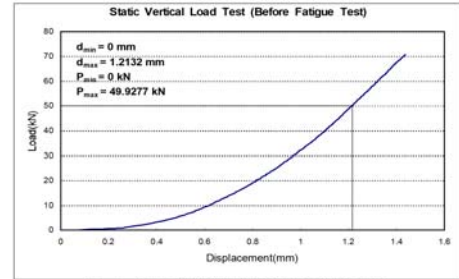


Figure A3-1. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 전)

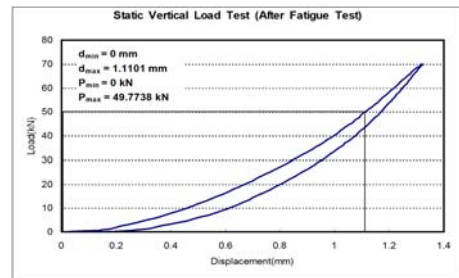


Figure A3-2. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 후)

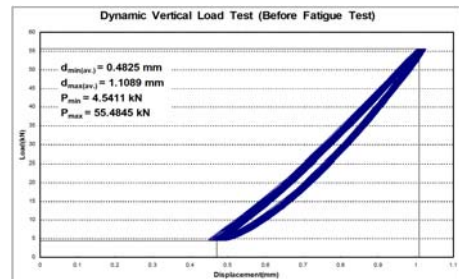


Figure A3-3. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 전)

그림9. 시스템 수직 스프링계수 시험

(5) 종방향 저항력

Table A5-1. 종방향 저항력 시험결과 및 판정(피로저항시험 전)

항목	측정치	허용치	판정
2mm 변위 발생시 하중	17.42 kN	14 kN 이상	O.K.
접촉분리현상	발생하지 않음	발생하지 않아야 함	O.K.

Table A5-2. 종방향 저항력 시험결과 및 판정(피로저항시험 후)

항목	측정치	허용치	판정
2mm 변위 발생시 하중	22.77 kN	14 kN 이상	O.K.
접촉분리현상	발생하지 않음	발생하지 않아야 함	O.K.

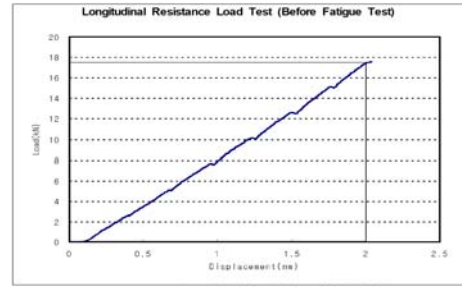


Figure A5-1. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 전)

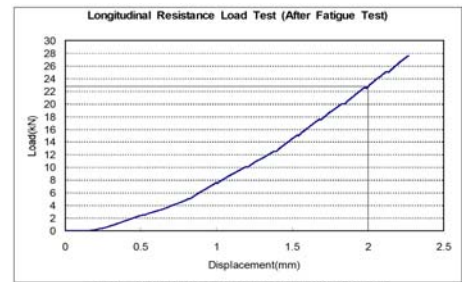


Figure A5-2. 하중-변위 관계곡선(피로저항시험 후)

그림10. 종방향 저항력 시험

(6) 피로저항

Table A6-1. 피로저항 시험결과 및 판정

구분	Cycle	LRH (mm)	LRH 요구치 (mm)	판정
0	1	0.670	≤4	O.K.
1	50,000	0.435		
2	550,000	0.395		
3	1,050,000	0.392		
4	1,550,000	0.425		
5	2,050,000	0.405		
6	2,550,000	0.423		
7	3,050,000	0.400		



그림11. 피로저항 시험

도표2. ADRI-ERS 시스템 시험결과

시험항목	관련규정		요구조건	시험결과
	국내	해외		
시스템의 정적스프링계수 변화량	레일체 결장치 성능 시방서	DIN EN 13146-4	±25%	20% 이내 만족
종방향 레일 구속력		DIN EN 13146-5	7N/mm 이상	11.39N/mm 만족
종방향 레일 구속력 변화량		DIN EN 13146-1	±20% 이내	20% 이내 만족
체결력		-	16kN 이상	30kN 만족
체결력 변화량		DIN EN 13146-5	±20% 이내	20% 이내 만족
피로하중에 의한 레일두부 횡변위	-	-	4mm 이내	0.4mm 만족

5. 레일고정수지 Polycork의 경화일에 따른 강도변화

Polycork의 경화일에 따른 강도변화에서 Cork가 들어갔을 경우 3일째강도가 28일을 100%으로 볼 경우 92%수준이고 이후 비교적 일정한 강도 값을 보인다.

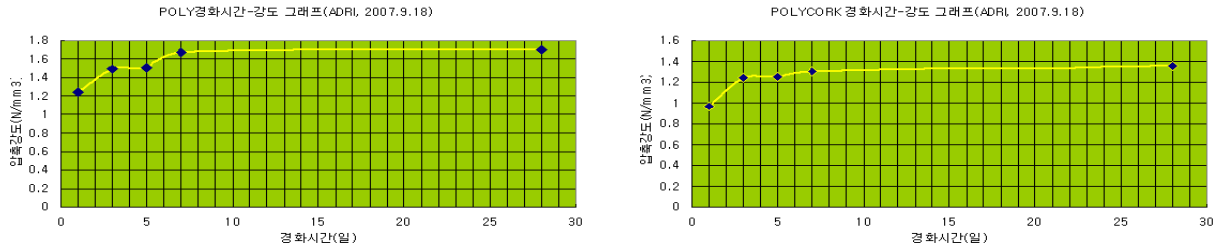
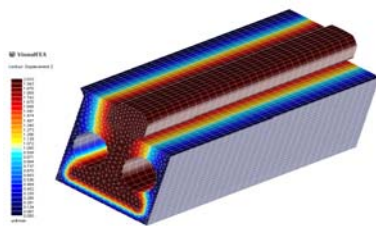
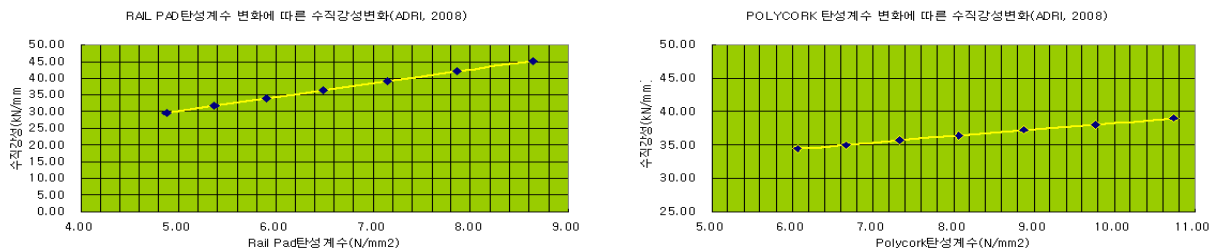


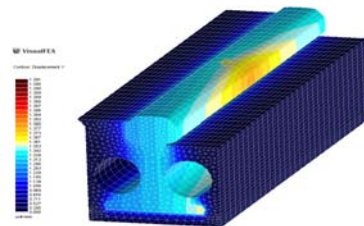
그림12. Polycork Test

6. Polycork와 레일패드 강성변화에 따른 시스템 수직강성 기여도

시험결과를 토대로 시뮬레이션을 검증하고 Polycork패드강성의 시스템 수직강성기여도를 조사하였다. Polycork 및 Rail Pad의 10%강성 증가에 따른 수직강성 변화율이 각각 2.09, 6.83%로 Rail Pad의 강성변화에 따른 궤도시스템 수직강성변화가 크다. 시스템수직강성 변화를 100%로 보면 Polycork에 의한 시스템의 수직강성 기여율은 23% 이다.



종방향변위 검증해석



수직방향변위 검증해석

그림13. Polycork와 레일패드 강성변화에 따른 시스템 수직강성 기여도(시뮬레이션)

7. 결론

한국형 ERS시스템인 ADRI-ERS®는 독일 콘크리트궤도용 ERS 성능시험 요구인 DIN EN 13481-5 (콘크리트궤도용 레일체결장치에 대한 요구사항)의 조건에 준하는 성능을 충분히 만족하는 것을 보여 주고 있다.

참고문헌

1. Coenraad Esveld(2001), "Modern Railway Track Second Edition", EUL & AL Publishing
2. 박정근(2007), "매립형철도궤도 설계 및 성능평가보고서", (주)ADRI, 한양대학교초대형시험센터