

Scientific Paper

무가선 트램용 매립형 궤도에 아스팔트 포장 적용을 위한 택코팅 재료의 부착강도 특성 평가

나일호^{1*} · 박지용²

¹한국석유공업 철도팀 책임연구원(공학박사), ²한국석유공업 기술연구소 책임연구원

Evaluation of bond strength characteristics of tack-coating materials for asphalt pavement application to embedded track system for Wireless tram

Il Ho Na^{1*} and Ji Yong Park²

¹Senior Research Engineer, Railway team, Korea Petroleum Industries Corporation (Ph.D.)

²Senior Research Engineer, R&D Center, Korea Petroleum Industries Corporation

*Corresponding author: Tel. +82-2-799-3126, E-mail. ihna@koreapetroleum.com

Received: November 4, 2020; Revised: November 25, 2020; Accepted: December 8, 2020

ABSTRACT

Recently, a tram using electric propulsion has been developed as a way to increase energy efficiency in the field of transportation systems. Wireless trams can share the same space as the road surface. However, when asphalt pavement is applied on the embedded track for Tram of concrete slab, it is necessary to evaluate the durability performance. In this study, the adhesion performance according to the type, amount of tack coating, and type of slab was evaluated, and when the tack coating material was used, it was confirmed that the tensile bond strength increased by about 34% and the shear bond strength by about 20%. In addition, the concrete slab did not meet the adhesion criterion, and it was concluded that the application of a tack coating material suitable for the concrete slab was necessary.

Keywords: Railway, Tram, Tack coating, Asphalt, Embedded rail

1. 서론

최근 에너지 고갈과 지구 온난화 문제로 온실가스 감축에 대한 관심이 증대되면서 교통 및 수송시스템 분야에서도 배기가스 저감 뿐만 아니라 에너지 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 현재 고령화



사회로 진입하면서 교통약자의 편의성 배려 및 도시미관의 향상 또한 중요한 요소로 자리 잡고 있어 새로운 교통 시스템의 도입이 요구되고 있다(Jeong et al., 2008; Do et al., 2012; Na et al., 2020)

트램은 전기 추진력을 이용한 교통수단으로 특별한 레일 없이도 도로면과 동일하게 부설하여 자동차와 혼용 운행이 가능하고 지하철에 비해 토목건설비가 1/10이하로 소요되며 공사기간도 줄일 수 있는 장점이 있어 최적의 교통시스템으로 각광을 받고 있다(Park et al., 2010). 유럽, 아시아, 미국 등 전 세계적으로 136개의 트램 노선이 건설되어 운행 중이며, 현재 50여개 노선이 추가 건설 중이다. 특히 교통문화가 발달한 유럽의 경우 경전철에서 트램이 차지하는 비율이 약 85% 이다(Lee et al., 2013).

프랑스는 2011년 기준 19개 도시에서 트램이 운영되고 있으며 2010에 제정된 Grenelle I법의 경우, 대중교통에 대한 투자가 주를 이루고, 그중에서도 트램이 계획 연장기준 절반가량을 차지하고 있다(An et al., 2012). 독일 등 대부분 유럽 국가의 경우 기존 트램 구간에 대한 포장 표면 및 하부구조의 결함, 자동차와의 혼합교통에 따른 소음발생, 트램 궤도의 좁은 중심 거리에 따른 안정성 문제 등을 해결하기 위하여 기존도로를 절개하고 아스팔트 포장으로 마무리된 트램 궤도로 재시공, 확장하는 경우가 많다(Huurman, 2002; Ingo et al., 2010).

그러나, 콘크리트 슬래브의 상부에 아스팔트 포장과 같은 이질 복합포장을 적용할 경우 차량의 공용하중과 환경(온도, 기후조건)에 의해 포장의 탈리, 균열 및 들뜸현상이 발생할 수 있어(Raab et al., 2004) 부착력 강화를 위한 방안이 필요한 상태이다. Granju et al. (2001) 등은 건조수축과 함께 온도변화에 따른 수축팽창이 슬래브 컬링현상을 야기해 단부와 모서리에 높은 수직인장응력을 발생시켜 부착면 인장파괴가 나타났다. Medina Chavez et al.(2007)은 콘크리트 포장 위에 부착식 콘크리트 덧씌우기 공법 적용을 통해 시공초기 덧씌우기의 건조수축으로 과도한 전단응력이 부착면 파손을 발생시켰고, 시험시공 및 평가에서 컬링(curling)이나 와핑(warping)에 의한 수직 인장응력이 원인이라고 결론 내렸다.

따라서 본 연구는 무가선 트램용 매립형 궤도 시스템에 적용되는 상부의 아스팔트 콘크리트와 하부의 콘크리트 슬래브 간 재료적 이질성을 극복하고 부착 및 방수성능을 부여하기 위한 재료선정 연구이며, 유화아스팔트를 0.3, 0.6, 0.9 l/m²의 사용량 증가에 따른 영향과 아스팔트 프라이머 및 아스팔트 함침 부직포의 부착성능을 평가함으로써 재료 사용 가능성 평가 및 최적의 재료 조건을 제시하고자 한다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

2.1.1 유화아스팔트

본 연구에 사용된 유화 아스팔트는 현재 국내 아스팔트 포장에서 텍코팅 재료로 사용되고 있는 일반유화 아스팔트 RSC 계열 2종과 아스팔트 프라이머 1종, 아스팔트 함침 부직포 1종을 선정하여 실험에 사용하였다. 연구에 사용된 2종류의 유화 아스팔트 물리적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Property of emulsion asphalt

Property	Emulsion asphalt	RS (C)-3	RS (C)-4
Viscosity (Engler, 25°C)		2.2	2.3
Sieve test (1.18 mm, wt %)		0.0	0.0
Coating ability		≥2/3	≥2/3
Residue (wt %)		51.6	51.6
Residue	Penetration (25°C) 1/10 mm	133	126
	Ductility (15°C) (cm)	119	111
	Solubility in trichloroethylene (%)	99.73	99.72
Storage stability (24 h) (wt %)		0.4	0.4

2.1.2 아스팔트 프라이머

아스팔트와 폴리머가 혼합된 1액형 아스팔트 코팅재료를 사용하였으며, Table 2와 같은 물리적 특성을 가진다.

Table 2. Property of asphalt primer

Contents	Results
Viscosity (Spindle #3, 25°C, cp)	199
Solids content (%)	51.1
Set to touch time (min)	10
Flexural Resistance (-10°C)	negativeness
Workability (24 h) (wt %)	negativeness

2.1.3 아스팔트 함침 부직포

아스팔트 함침 부직포 재료는 기존의 부직포에 고탄성 개질 아스팔트를 도포함으로써 아스팔트 포장층간의 전단력 및 부착성능을 강화시키고, 상부층에서 전달되는 하중을 완화하게 된다. 시험에 사용된 재료의 두께는 약 5 mm이고, KS F 4917의 기준에 따라 아래 Table 3과 같은 성능을 가진다.

Table 3. Property of asphalt sheet

Contents	Specification	Results	Test method
Tensile strength (N/mm)	Length	≥8.0	15.3
	Width	≥8.0	14.5
coefficient of expansion (%)	Length	≥15	56
	Width	≥15	52
Tearing Strength Test(N)	Length	≥20	73.5
	Width	≥20	67.6
Thermal resistance (mm)	≤5	0.1	KS F 4917 (JIS A 6013)

2.1.4 슬래브 시편의 물성

무가선 트램용 매립형 궤도를 구성하고 있는 콘크리트 슬래브의 설계 강도는 30 MPa를 적용하고 있어 실내 실험용 콘크리트 슬래브의 강도를 30 MPa 이상이 되도록 제작하여 사용하였고 아스팔트 콘크리트는 국토교통부에서 기준에 부합되는 OAC를 선정하여 실험에 사용하였다. Table 4는 사용 슬래브 시편의 특성을 나타냈다.

Table 4. Property of concrete and asphalt concrete (Slab)

Materials	Contents	Specification	Results	
Concrete	Density (g/cm ³)	-	3.15	
	Cement	Particle size (g/cm ³)	≥2,800	3,480
		Stability (%)	≥0.8	0.06
		3 day	-	22.6
	Compressive (MPa)	7 day	-	31.3
		28 day	-	43.1
Optimum asphalt content (%)		-	5.5	
Asphalt concrete	Maximum specific gravity	-	2.45	
	Bulk specific gravity	-	2.37	
	Air void (%)	3-5	3.1	
	VMA (%)	≥14	15.9	
	VFA (%)	70-85	80.3	
	Marshall stability (kgf)	≥6,000	12,911	

2.2 시험방법

2.2.1 시편제작

아스팔트 콘크리트 및 콘크리트 슬래브를 이용하여 코팅재료의 부착력을 측정하기 위해 30 cm×30 cm×10 cm 크기의 슬래브 몰드 안에 동일 규격의 콘크리트 슬래브를 하부에 설치하고 코팅재료를 도포 후 12시간 이상 건조하였다. 건조된 면에 아스팔트 혼합물을 포설하고 슬래브 다짐기를 이용하여 다져 일체화 된 슬래브 시편을 제작하였다. 그리고 부착강도 측정을 위해 5 cm×5 cm의 직사각형으로 절단 후 UTM장비를 이용하여 인장부착강도와 전단부착강도 시험에 사용하였다.

2.2.2 전단부착시험

전단부착시험은 100 mm×100 mm 정사각형 시편에 대하여 Fig. 1과 같이 만능재료시험기를 사용하여 전단강도를 측정하였으며, 시험방법은 KS F 4932에 따라 재하속도는 1 mm/min, 시험온도는 20°C에서 시험체를 1시간 이상 놓아 둔 후 시험 장치에 올려놓고 시험하였다. 전단부착강도는 단위면적당 하중으로 다음 식 (1)에 의해 산출하고, 시험체 9개의 평균값으로 하여 전단부착강도는 소수점 이하 두 자리까지 구한다.

$$\text{Shear bond strength (N/mm}^2\text{)} = \frac{\text{Maximum shear load (N)}}{\text{Shear area (mm}^2\text{)}} \quad (1)$$

2.2.3 인장부착시험

인장부착시험은 지름 100 mm 원형 시편을 Fig. 2와 같이 부착강도 시험기에 거치하여 인장부착강도를 측정하였다. 이 시험방법은 KS F 4932에 따라 수행하고 충분히 경화된 시험체를 시험온도에서 1시간 놓아둔 후 시험체 면에 연직 방향으로 인장력을 가하여 최대 인장 하중을 구한다. 이때 하중속도는 매 초당 0.1 N/mm²에서 0.15 N/mm²로 끊길 때까지 측정한다. 인장 부착 강도는 전단부착시험과 달리 시편이 원형임으로 원의면적($A = \pi r^2$)를 구하여 단위면적당 하중으로 다음 식 (2)에 의해 산출하고 시험체 9개의 평균값으로 하여 소수점이하 한자리로 끝맺음 하였다.

$$\text{Tensile bond strength (N/mm}^2\text{)} = \frac{\text{Maximum tensile strength (N)}}{\text{Tensile area (mm}^2\text{)}} \quad (2)$$



Fig. 1. Shear bond strength test

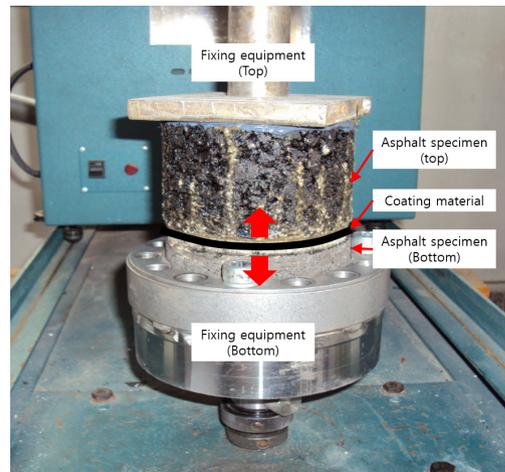


Fig. 2. Tensile bond strength test

2.2.4 부착강도 기준

무가선 트램은 하부에 콘크리트 슬래브와 상부에 아스팔트 콘크리트로 구성되어 있기 때문에 본 연구에서는 KS F 4932 교면용 도막 방수재의 부착강도 기준을 준용하였으며 Table 5는 적용된 부착강도의 기준을 나타낸다.

Table 5. Physical property of tack coat materials

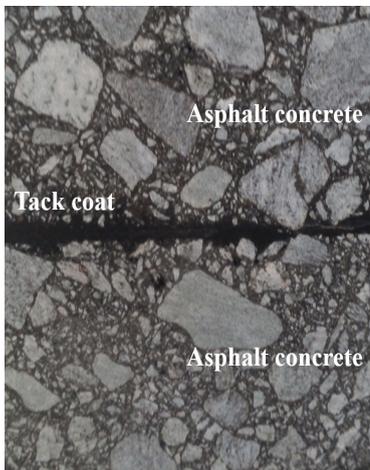
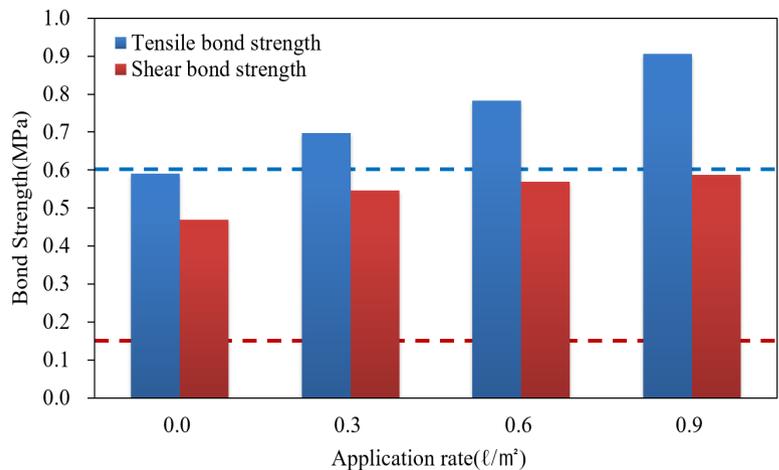
Classification	Specification (MPa)
Tensile bond strength	≥0.6
Shear bond strength	≥0.15

3. 시험결과

3.1 택코팅 사용량에 따른 부착특성

3.1.1 아스팔트 콘크리트(상부)/아스팔트 콘크리트(하부)

본 연구에서는 상/하부를 아스팔트 콘크리트 슬래브(Asphalt concrete and asphalt concrete : A/A)로 Fig. 3과 같이 구성하여 코팅재료의 부착성능을 확인하기 위해 사용량을 증가시켜 실내 부착강도시험을 실시하였다. 재료의 사용량은 국토교통부의 택코트 기준을 0.3~0.6 ℓ/m^2 로 규정하고 있다. 본 연구에서는 사용량에 따른 뚜렷한 변화를 확인하기 위해 0.0~0.9 ℓ/m^2 로 사용량 범위를 확장하여 실험을 진행하였다. Fig. 4의 실험결과를 바탕으로 사용량 증가에 따라 인장부착강도가 증가하는 경향을 나타냈고 관계식 $y=0.0463x^2+0.3039x+0.5828$ 으로부터 최소 사용량 0.3 ℓ/m^2 를 사용시 인장부착강도는 약 0.68 MPa 이상의 부착강도를 나타낼 것으로 추정된다. 다만, 코팅재료의 도포량이 0 ℓ/m^2 일 때에는 기준치인 0.6 MPa를 만족하지 못함으로서 코팅재료의 사용이 필요한 것으로 나타났다. 전단부착강도는 사용량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으나 택코팅을 사용하지 않은 상태에서도 0.15 MPa 이상을 나타내 노면전차 매립형 궤도의 아스팔트 포장 전단부착강도를 평가하기 위한 기준으로서는 큰 의미가 없을 것으로 사료된다.

**Fig. 3.** Specimen A/A**Fig. 4.** Results of tensile and shear bond strength (A/A)

3.1.2 아스팔트 콘크리트(상부)/콘크리트(하부)

본 연구에서는 상부 아스팔트 콘크리트와 하부 콘크리트 슬래브(Asphalt concrete and concrete : A/C)로 Fig. 5와 같이 구성하여 사용량에 따른 실내 부착강도시험을 확인하고자 하였다. Fig. 6의 실험결과로부터 사용량 0~0.9 ℓ/m^2 범위 내에서는 인장부착강도 기준치인 0.6 MPa를 만족하지 못함을 확인하였고, 실험에서의 최대 사용량인 0.9 ℓ/m^2 은 오히려 강도가 저하되는 경향을 보였다. 이에, 사용량 증가에 따른 인장부착강도 값에 의한 관계식 $y=-0.6759x^2+0.8694x+0.3292$ 의 예측식을 통해 최소 사용량 0.3 ℓ/m^2 을 적용시 인장부착강도는 약 0.53 MPa 이하의 부착강도를 나타냈고 기준치인 0.6 MPa를 만족하지 못한다. 따라서 기준치를 근접하게 만족하는 사용량 0.6 ℓ/m^2 을 적용이 필요하지만 이 또한 기준치를 만족하지 못하기 때문에 코팅재료의 근본적인 개선이 요구된다. 전단부착강도는 사용량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으나 텍코팅을 사용하지 않은 상태에서도 0.15 MPa 이상을 나타냈다.

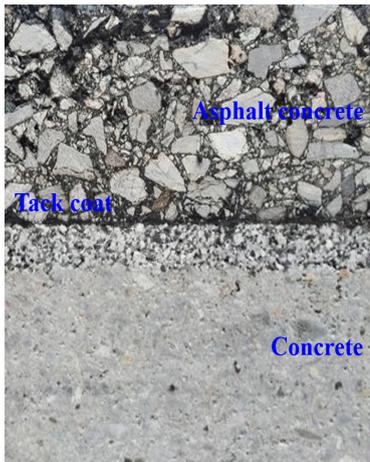


Fig. 5. Specimen A/C

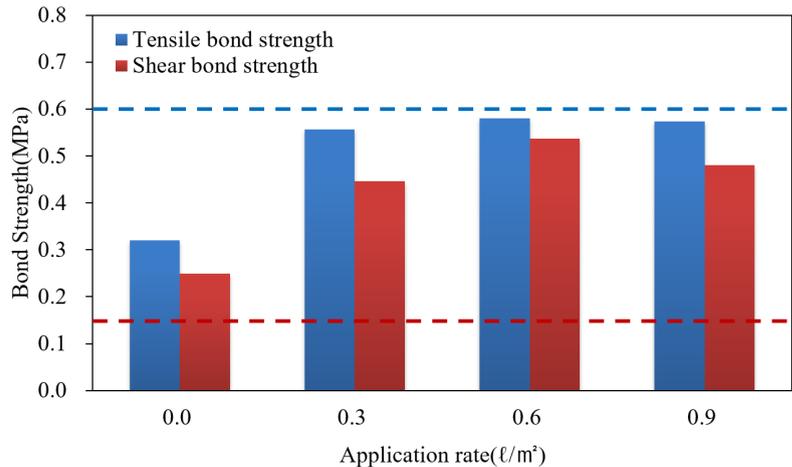


Fig. 6. Results of tensile and shear bond strength (A/C)

3.2 슬래브 종류에 따른 부착특성

슬래브 시편의 구성에 따라 부착성능의 차이를 확인하기 위해 상부층은 아스팔트 콘크리트 슬래브 2종류 (PG64-22, PG76-22), 하부층은 아스팔트 콘크리트(PG64-22), 콘크리트 슬래브로 구성하여 실험을 실시하여 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. 이때 코팅재료의 사용량은 0.6 ℓ/m^2 로 동일하게 적용하고 하부층과 상부층의 상태에 따라 부착성능을 비교 분석 하였다. 하부층에 콘크리트로 구성 시 아스팔트 콘크리트로 구성된 것에 비해 인장 부착강도가 작게 나타났으며 기준치인 0.6 MPa를 만족하지 못하는 결과를 얻었고, 상부층이 아스팔트 콘크리트로 구성시 0.6 MPa이상으로 기준치를 만족하였다. 전단부착강도에서도 마찬가지로 인장부착강도와 유사한 경향을 보였으며 KS F 4932의 기준치에는 4가지 구성 모두 만족하고 있다. 하지만 하부 콘크리트 슬래브의 인장부착강도는 기준 미달임에도 불구하고 전단부착강도는 기준을 상회하는 결과를 보였기 때문에 전단부착강도만으로 부착력을 평가하는 것은 한계가 있을 것으로 사료된다.

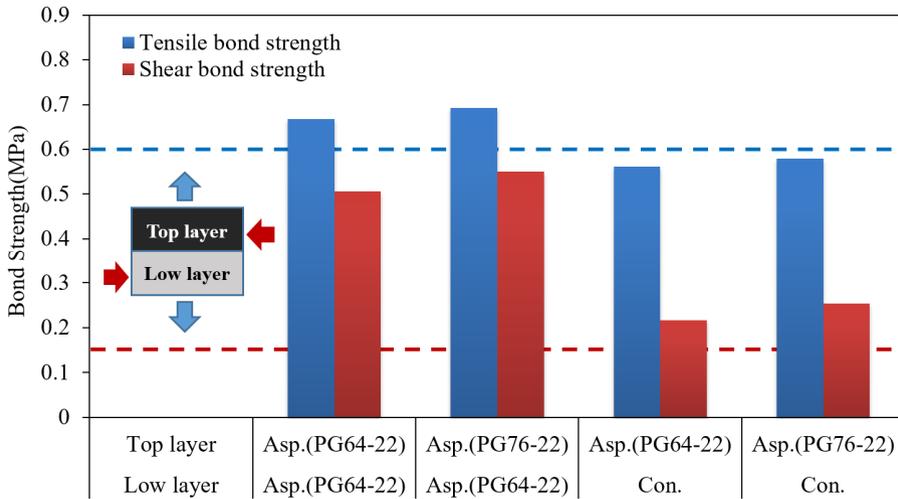


Fig. 7. Results of bond strength by slab (asphalt, concrete) composition type

3.3 코팅재료에 따른 부착특성

무가선 트램용 매립형 궤도를 구성하고 있는 콘크리트 슬래브 위에 아스팔트 콘크리트로 구성 시 부착강도가 기준치를 만족하지 못하는 경향을 앞선 연구로부터 확인할 수 있었고 이를 개선하기 위한 코팅재료의 근본적인 개선이 필요하다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 RSC계열, 아스팔트 프라이머(Asphalt primer), 아스팔트 합침 부직포(Asphalt sheet : AS)를 활용하여 각 재료들의 물리적 특징이 인장부착강도와 전단부착강도에 미치는 영향을 Fig. 8에서 비교하였다. 코팅재료를 사용하지 않은 Control에 비해 코팅재료를 사용한 것이 부착강도를 높이는 효과가 있었고, RSC계열의 2종류 코팅재료는 Control보다 높은 값을 보여주었으나 0.6 MPa이하로 기준

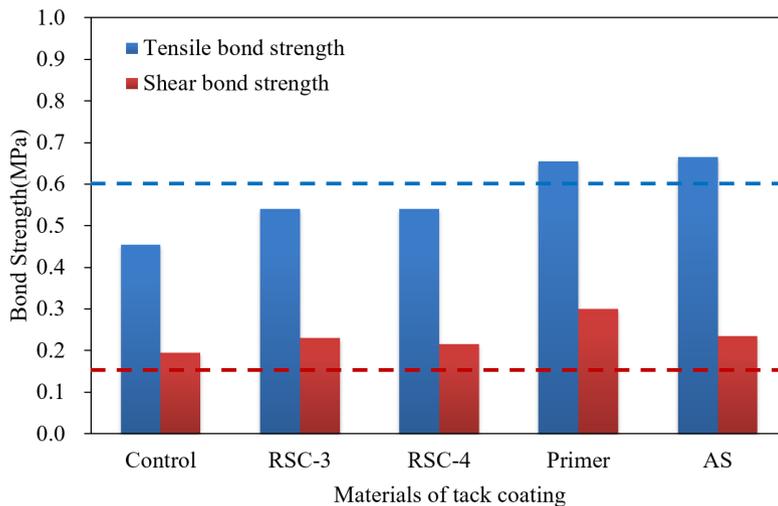


Fig. 8. Results of bond strength by coating materials type

을 만족하지 못한 결과를 얻었다. 이에 반해 AS와 Primer가 0.66 MPa 이상으로 높은 부착성능을 나타냈다. 따라서 무가선 트램용 매립형 궤도의 구성조건에 맞춰 아스팔트 콘크리트 포장시 부착성능을 개선하기 위해서는 RSC 계열 보다는 Primer나 AS와 같은 특성의 택코팅 재료 적용이 필요할 것으로 판단된다.

4. 현장평가

4.1 궤도구조

무가선 트램용 매립형 궤도의 형식은 Fig. 9와 같고, 하부는 콘크리트 층으로 구성되어 있어 아스팔트를 시공해야 하는 내부 폭은 약 1,200 mm, 높이는 약 40 m이다. 또한, 도로와 공통의 공간을 공유하기 때문에 매립형 궤도 안쪽 외에도 바깥 부분도 아스팔트 콘크리트 포장을 진행해야 하며 이 부분은 도로의 아스팔트 콘크리트 포장과 동일하게 표층, 중간층, 기층으로 구성된다.

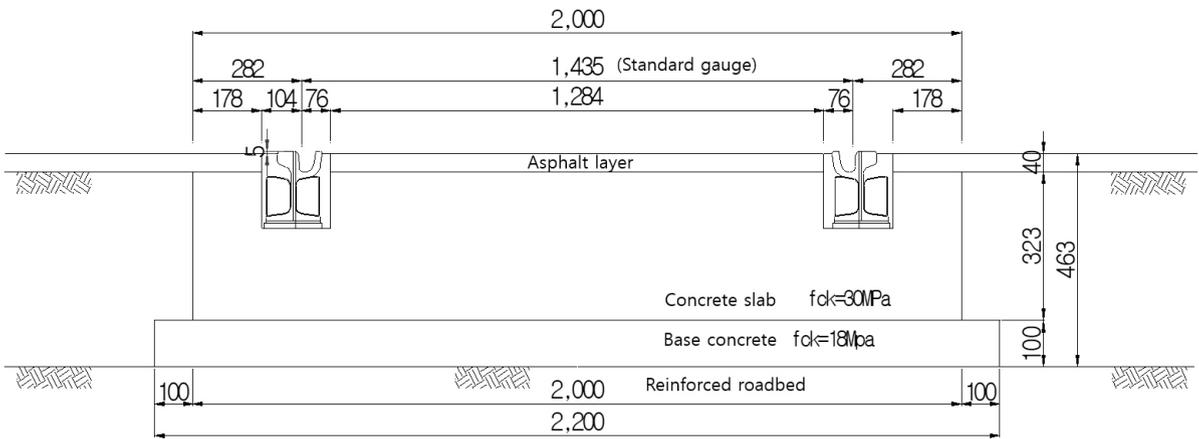


Fig. 9. Standard drawing of embedded track system for tram (MOLIT, 2013)

4.2 아스팔트 포장

무가선 트램용 매립형 궤도 내 아스팔트 콘크리트 시험시공을 위해 Fig. 10~Fig. 13과 같이 기존의 아스팔트 콘크리트를 철거하고 습윤한 콘크리트 슬래브 상면을 24시간 동안 자연건조 후 시공 총 연장 20 m에 준비된 코팅 재료(Asphalt primer) 도포 및 2종의 DGA(Density grade asphalt) 혼합물, SMA(Stone mastic asphalt) 혼합물을 포장하였다.



Fig. 10. Crushing of existing asphalt concrete



Fig. 11. Cleaning of embedded track system for tram



Fig. 12. Surface before asphalt concrete construction



Fig. 13. Surface of asphalt pavement of embedded track system

또한, 무가선 트램용 매립형 궤도의 슬래브는 가운데가 오목한 형태이고 우천시 Fig. 14~Fig. 15와 같이 다량의 물이 유입됨을 확인하였다. 따라서 별도의 배수시설 없는 매립형 궤도는 우천시 자연건조에 한계가 있고 상부 아스팔트 포장 및 품질 확보를 위해서는 배수시설이 필요할 것으로 판단된다.



Fig. 14. water-reservoir phenomenon in rainy situation



Fig. 15. moisture removal on site

4.3 현장 부착성능 시험

현장 부착강도를 측정하기 위해 아스팔트 포장 표면에 직경 5 cm, 깊이 약 6 cm로 코어링 하였고 측정 시 현장의 아스팔트 포장 표면 측정 온도는 약 31°C로 실내 시험온도인 20°C보다 약 11°C 높았다. 이로 인해 동일한 현장 조건에서 아스팔트 혼합물이 포장 되었음에도 불구하고 측정부에 인장력 작용 시 Fig. 16과 같은 아스팔트 혼합물 분리 현상이 나타나 이러한 값은 제외하였다. 각 혼합물 구간별 3개소를 선정하고 개소마다 3회 이상 측정하여 평균값을 얻었으며, 측정결과는 Fig. 17과 같다. 높은 현장시험 온도로 인해 기준치인 0.6 MPa를 만족할 수는 없었으나 동일한 부착재료 적용 시 DGA혼합물과 SMA 혼합물의 상대비교가 가능하였고 DGA 혼합물은 0.14~0.18 MPa, SMA 혼합물은 0.08~0.11 MPa의 값을 보여 동일한 코팅재료 사용시 DGA 혼합물이 SMA 혼합물보다 인장부착강도가 약 37% 크게 나타났다. 또한 아스팔트 콘크리트(상부)/콘크리트(하부)의 실내 인장부착강도 측정 값에 비해 현장 인장부착강도 측정값이 전체적으로 약 0.3 MPa 작게 나타났다. 그리고 본 연구는 짧은 시공범위로 인해 한정된 코팅재료가 사용되었으므로 향후 다양한 재료를 통한 현장시험 시공이 필요하다.



Fig. 16. Field test

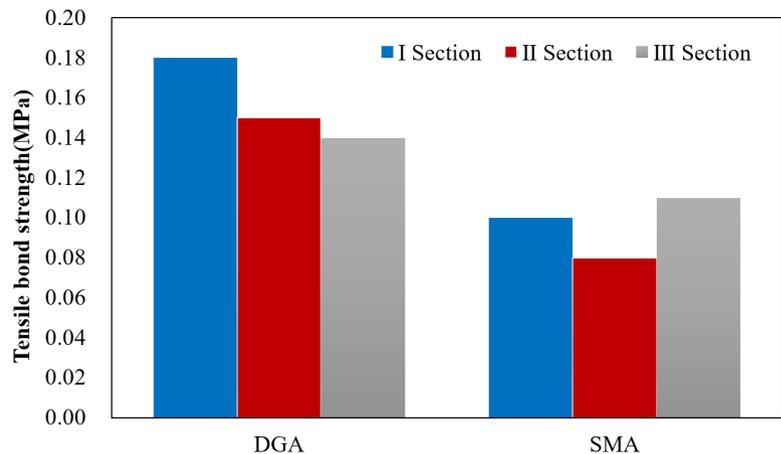


Fig. 17. Results of tensile bond strength by field test

5. 결론

본 연구에서는 무가선 트램용 매립형 궤도의 아스팔트 포장 부착성능을 확인하기 위하여 코팅재료의 사용 유무 및 사용량, 슬래브 종류에 따라 부착강도시험을 수행하고 아래와 같이 결론을 도출하였다.

1. 텍코팅 재료를 사용하는 것이 사용하지 않은 것보다 인장부착강도가 약 34%, 전단부착강도는 약 20%로 부착력 증가 효과가 있으므로 무가선 트램 매립형 궤도의 콘크리트 슬래브 상면에 아스팔트 포장 적용 시 텍코팅 재료 사용이 요구된다.
2. A/A와 A/C의 슬래브 재료 구성에서 RSC 계열의 텍코팅 재료를 0.3~0.9 ℓ/m^2 도포량에 따라 적용 시 A/A

는 모두 기준을 만족하는 결과를 보였으나 A/C는 기준을 만족하지 못하였다. 이에 A/C에 코팅재료를 적용 시에는 부착력을 향상시킬 수 있는 코팅재료를 적용하여 아스팔트 포장의 공용성능을 향상시킬 필요가 있다고 판단된다.

3. 매립형 궤도의 콘크리트 슬래브는 양쪽 벽이 막혀있는 오목한 형태로서 배수에 취약한 구조이며 이러한 비 배수 슬래브 구조에 설치된 아스팔트 포장의 내구성 확보를 위해서는 유공관 설치 및 방수 개념의 검토가 요구된다.
4. 본 연구에서는 기 개발된 무가선 트램용 매립형 궤도 조건에 맞춰 아스팔트 포장 두께 4~5 cm로 실내시험과 현장 시험을 진행하였으나 향후, 중차량 및 도심의 많은 차량통행량 등을 고려한다면 다양한 포장 두께에 대한 검토 및 추가적인 현장 적용 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- An, J. and Kim, H. (2012). A study for implementing innovative urban surface transit systems in Korea: focusing on tramways. Report (2012-18), The Korea Transport Institute.
- Do, J.Y., An, D.G., Jun, J.T., Jeong, W.T. and Lee, S.H. (2012). "A study on the test construction evaluation and noise and vibration characteristics of wireless low-floored trams trackway", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 16(6), pp. 143-154.
- Granju, J.L. (2001). "Debonding of thin cement-based overlays", Journal of Materials in Civil Engineering, 13(2), pp. 114-120.
- Huurman, M. (2002). Embedded rail in asphalt: design calculations embedded rail with CAPA-3D (in Dutch). Report (7-02-131-3), Delft University of Technology, Germany.
- Ingo, S., Sag, B. and Nils, J. (2010). "Design and implementation of solutions at test sites WP3.5.Bremen.tram track replacement techniques", Urban Track Final Conference, Prague, Czech.
- Jeong, W., Jang, S.H. and Kwak, J.H. (2008). "Key technologies of battery driven hybrid low-floor tram", Proceedings of the 2008 Autumn Conference the Korean Society of Precision Engineering, Daejeon, pp. 681-682.
- Lee, S.H., Chel, H.H., Oh, O.K., Kang, Y.S., Jung, W.T. and Gwak, J.H. (2013). "Construction of test-bed for wireless tram", Journal of the Korean Society for Railway, 16(2), pp. 34-40
- Medina-Chavez, C.I., Choi, S.C. and Won, M. (2007). Concrete pavement overlays and failure mechanisms. Report (FHWA/TX-09/0-4893-2), Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin, USA.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2013). Development of system technology for wireless low-floor tram. Final report (12PUR-T-B053833-04), Korea Railroad Research Institute.
- Na, I.H., Choi, Y.T. and Lee, S. H. (2020). "Analysis of permanent deformation and cracking of asphalt pavement of embedded rail for tram", Journal of the Korean Society for Railway, 23(7), pp. 637-648
- Park, H.S. (2010). "The introduction of catenary-free low floor tram", Journal of the Korea Society of Automotive Engineers, 32(3), pp. 32-35.
- Raab, C. and Partl, M.N. (2004). "Interlayer shear performance : experience with different pavement structures", 3th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna, Austria, 1, pp. 535-545.