

경제성을 고려한 유도상용 아스팔트 노반 적용성 평가

Applicability Evaluation of Asphalt Roadbed Considering Economical Efficiency

김지선*, 조국환*[†], 이성혁**, 이진욱**, 류태진**, 원상수**

Ji Seon Kim*, Guk Hwan Cho*[†], Seong Hyeok Lee**, Jin Wook Lee**, Tae Jin Lyu**, Sang Soo Won**

Abstract Ballasted asphalt roadbed can be beneficial in reducing maintenance cost from various effects such as prevention of both strength reduction and weakening in roadbed system due to the effect of preventing rainwater penetration; decreasing the thickness of roadbed by dispersing a train load; prevention of roadbed mud-pumping and frostbite. Due to these beneficial effects, the ballasted asphalt roadbed, which is layered between reinforced and ballasted roadbeds, has been widely applied in design standards of Italy and Japan. In this study, the optimum thickness of asphalt and reinforced roadbeds, corresponding to the design standards for reinforced roadbed of high-speed railway, was estimated.

Keywords : Asphalt roadbed, Ballasted track, KENTRACK, GEOTRACK

초 록 최근 국내에서는 철도 수송량의 증가와 고속화로 인하여 궤도의 내구성을 확보하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 아스팔트 노반은 강화노반층 상부에 설치되어 빗물의 노반 침투를 방지하고 열차하중을 분산시켜 분니발생 및 도상자갈의 관입을 최소화함으로써 유지보수를 절감할 수 있는 장점을 가진 구조이다. 이탈리아, 일본 등 국외에서는 유도상 궤도의 지지강성을 증가하기 위해 쇄석노반 상부에 아스팔트 노반을 설치하는 것을 기준에 명시하고 있지만 국내에서는 설계기준이 정비되어있지 않다. 유도상용 아스팔트 노반의 설계는 일본의 경우 강화노반 상면에서의 탄성침하를, 미국은 노반상면의 허용압력을 기준으로 하고 있다. 본 연구에서는 미국의 설계에 이용되고 있는 GEOTRACK 및 KENTRACK 프로그램을 이용한 역학적 측면과 경제성 및 시공성 측면을 고려한 아스팔트 노반의 적용성을 평가하였다.

주요어 : 아스팔트 노반, 유도상용 아스팔트 궤도, KENTRACK, GEOTRACK

1. 서 론

유도상 궤도는 유지보수를 전제로 하는 구조이므로 궤도의 생력화를 위해 이탈리아의 경우는 고속철도에서 요구하는 지지강성을 증가하기 위해 강화노반 상에 12cm의 아스팔트 노반을 설치하고[1], 일본의 경우도 쇄석노반 상부에 5cm의 아스팔트 층을 설치하도록 기준에 명시하였다[2]. 그리고 미국의 경우는 아스팔트 노반의 두께를 최소 10cm이상으로 제시하였다[3]. 국내에서도 현재 궤도구조의 생력화와 중고속대역에 적용가능한 철도아스팔트 노반 및 궤도구조 개발에 관한 연구가 진행 중에 있다[4].

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원(khcho@seoultech.ac.kr)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원

** 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 TFT

본 논문에서는 궤도의 구성요소를 간단한 방법으로 구현할 수 있는 장점을 가진 GEOTRACK과 KENTRACK 프로그램을 통해 고속철도 강화노반 설계조건에 부합하는 아스팔트 노반과 강화노반의 두께에 대한 응력상태 및 설계수명을 비교 분석하였고 LCC 분석을 통해 경제성을 고려한 아스팔트 노반의 적용성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 수치해석

2.1.1 수치해석 프로그램

GEOTRACK 프로그램은 철도 환경 특성을 최소한으로 포함시킬 목적으로 개발된 것으로 (Chang 외, 1980)[5], 궤도의 처짐과 궤도계수를 계산할 때 축 하중, 레일과 침목의 특성, 도상과 하부층의 특성 및 침목 간격과 층 두께 등을 고려할 수 있다.

KENTRACK은 철도 궤도 구조의 성능기반 구조설계와 해석에 이용할 수 있는 층 탄성유한 요소에 근거를 둔 프로그램으로, 초기에 자갈층으로 구성된 궤도와 아스팔트 층으로 구성된 궤도구조의 해석을 위해 개발되었다. 최근에는 자갈과 아스팔트의 결합층으로 구성된 궤도구조를 해석하기 위해 다목적으로 확장되었다. 해석에서의 주된 인자는 노상(subgrade)층 위의 수직압축 응력, 윤중, 통과톤수, 환경적 조건 및 다른 인자들의 효과와 관련한 다양한 층들의 피로 수명을 고려하는 것이 가능하다.

2.1.2 해석조건

아스팔트 노반과 강화노반의 두께 변화에 따른 수치해석을 위해 두 해석프로그램의 입력값은 동일한 조건으로 하였다. 각층의 두께는 자갈도상은 35cm로 적용하고 아스팔트와 강화노반, 흙노반은 합이 3m가 되게 적용하였다. Table 1은 층별 탄성계수 및 층 두께조건이며 Table 2는 해석에 적용한 KTX 제원이다.[6]

Table 1 Structure properties and thickness conditions

| Layer | Modulus(MPa) | Thickness of layer(mm) |
|--------------------------------|--------------|------------------------------|
| Ballast(T_B) | 100 | 350 |
| Asphalt(T_A) | 3,000 | 50, 100 |
| Reinforced roadbed(T_{RB}) | 180 | 100, 150, 200, 250, 300, 350 |
| subgrade(T_S) | 80 | 3,000-(T_A+T_{RB}) |

Table 2 KTX Specifications

| 구분 | 구성 | 축중(KN) | 대차중심거리 | | 고정축거 |
|-------|----------------|--------|---------|--------|------|
| | | | 동력차(PC) | 객차(TC) | |
| KTX | 2PC+2MTC+16TC | 170 | 14m | 18.7m | 3m |
| KTX산천 | 2PC+2(M)TC+6TC | 170 | 14m | 18.7m | 3m |

해석에 적용한 레일과 침목의 물성은 Table 3 및 Table 4와 같으며, 두 프로그램에서 동일한 조건으로 해석을 수행하였다.

Table 3 Rail properties used in GEOTRACK & KENTRACK

| 레일 | 레일간격 (mm) | 단면적 (mm ²) | 탄성계수 (MPa) | 무게 (kg/m) | 체결구 (kN/m) | 단면2차M (mm ⁴) |
|-----|-----------|------------------------|------------|-----------|------------|--------------------------|
| 물성치 | 1,435 | 7,750 | 210,000 | 60 | 800,000 | 30,900,000 |

Table 4 Sleeper properties used in GEOTRACK & KENTRACK

| 침목 | 길이 (mm) | 간격 (mm) | 저면폭 (mm) | 폭 (mm) | 높이 (mm) | 탄성계수 (MPa) | 무게 (kg) | Segment | 단면2차M (mm ⁴) |
|-----|---------|---------|----------|--------|---------|------------|---------|---------|--------------------------|
| 물성치 | 2,600 | 650 | 300 | 260 | 200 | 30,000 | 250 | 5 | 18,640,000 |

2.2 역학적 개념의 최적단면 결정

2.2.1 현행 설계기준과의 비교

Fig.1과 Fig.2는 GEOTRACK의 해석결과로 KTX 열차의 운중 재하 시 강화노반 두께에 따른 노반 상면에서의 침하량 및 수직응력에 대한 그래프이다. 현행 철도설계기준인 아스팔트노반이 없는 강화노반 최소 두께 40cm일 때의 단면과 비교하여 아스팔트 노반 상면(도상자갈 하면)의 수직응력 분포가 유사한 단면은 아스팔트 노반 5cm일 때 강화노반 30cm인 경우이고, 침하량이 유사한 단면은 Fig.2와 같이 아스팔트 노반 5cm일 때 강화노반 30cm인 경우와 아스팔트 노반 10cm 일 때 강화노반 15cm인 경우이다.

Table 5 Case of analysis

| 구분 | Case | | | | | | | | | | | |
|---------------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 아스팔트 노반두께(cm) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 |
| 강화노반 두께(cm) | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 |

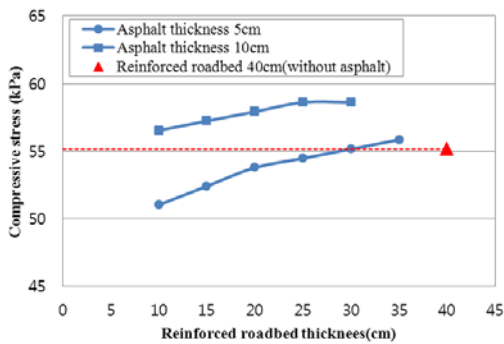


Fig. 1 Compressive stress at top of asphalt layer

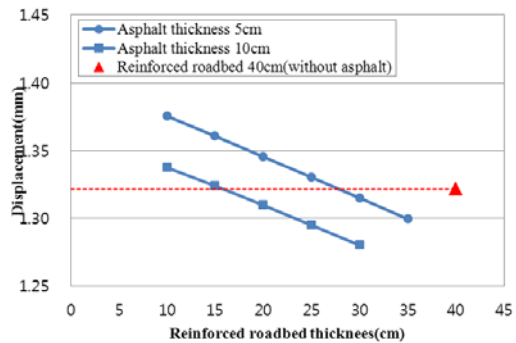


Fig. 2 Displacement at top of asphalt layer

GEOTRACK과 KENTRACK 프로그램 해석결과에서 아스팔트 노반 상부의 수직압축응력을 비교하면 Fig. 3과 같다. 강화노반의 두께가 두꺼워 질수록 수직압축응력이 증가하고 아스팔트 노반이 두꺼워질수록 수직압축응력이 감소하였다.

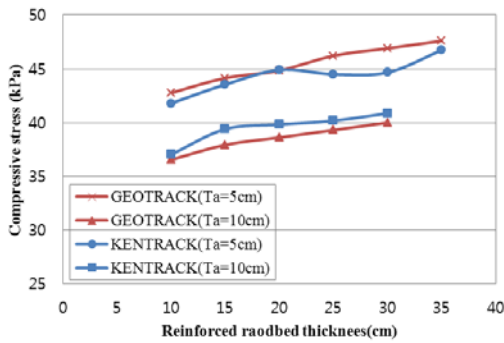


Fig. 3 Comparison of compressive stress at top of asphalt layer

Table 6 Analysis results of KENTRACK

| Asphalt Thickness (cm) | Reinforced roadbed Thickness (cm) | case | KENTRACK |
|------------------------|-----------------------------------|------|----------------------------|
| | | | Asphalt Design Life (year) |
| 5 | 10 | 1 | 23.7 |
| | 15 | 2 | 38.9 |
| | 20 | 3 | 57.2 |
| | 25 | 4 | 86.1 |
| | 30 | 5 | 132.1 |
| | 35 | 6 | 203.2 |
| 10 | 10 | 7 | 21.8 |
| | 15 | 8 | 23.8 |
| | 20 | 9 | 30.7 |
| | 25 | 10 | 56.9 |
| | 30 | 11 | 49.2 |
| - | 40 | 12 | - |

이 경우 모든 유형의 해석단면은 도상자갈하부 노반의 허용압축응력 133kPa[7]을 만족하였다.

2.2.2 아스팔트 노반 설계수명 산정

Fig.4는 KENTRACK의 해석결과로 아스팔트 노반의 설계수명을 나타낸 것이다. 일본의 설계 기준에서는 아스팔트 노반의 설계수명을 50년 이상으로 제시하고 있다. Fig. 4에서 50년 이상을 만족하는 단면은 아스팔트 노반 5cm일 때 강화노반 20cm 이상인 경우와 아스팔트 노반 10cm일 때 강화노반 25cm인 경우로 나타났다. Fig.5는 아스팔트 노반 하면의 인장변형률을 나타낸 그래프이다. 강화노반의 두께가 두꺼워질수록 인장변형률은 감소하는 경향을 보였고 설계수명 50년 이상인 단면에서의 인장변형률은 $1.7\sim 1.92\times 10^{-5}$ 이다.

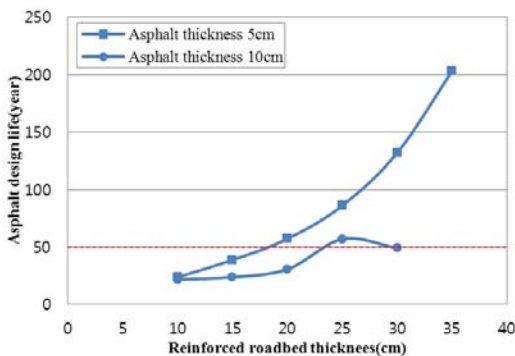


Fig. 4 Asphalt design life with reinforced thickness

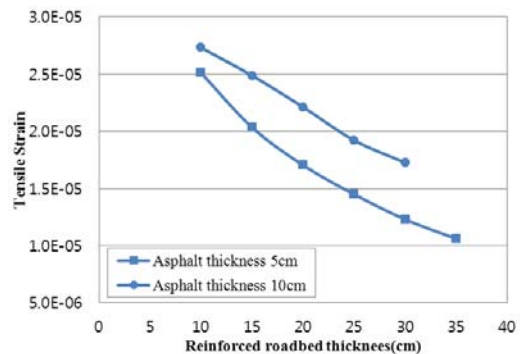


Fig. 5 Tensile strain at bottom of asphalt layer

국내에는 아스팔트 노반에 대한 명확한 설계수명기준이 없으므로 일본에서 제시하는 설계수명 50년을 적용하였을 경우 Table 6에서 보는 바와 같이 Case 3, 4, 5, 6, 10이 기준을 만족하였다.

2.3 경제성 고려를 위한 LCC 분석

2.3.1 LCC 분석조건

유도상 아스팔트 궤도의 경제성을 평가하기 위해 각 Case별 초기비용과 유지관리비용의 합으로 구성된 총 생애주기비용 분석을 실시하였으며, 분석대상은 단위연장 1km 단선을 기준으로 하였다. LCC 분석을 위한 구조물의 분석기간은 철도시설물의 목표수명인 100년으로 가정하였고, 할인율은 실질할인율로 인플레이션을 고려할 필요 없는 4.5%로 가정하였다.

분석대상은 각 Case별로 동일한 항목인 자갈궤도와 강화노반의 점검, 보수, 교체비용을 제외한 아스팔트 노반의 유지관리만을 선정하였다.

2.3.2 설계단계 LCC분석

분석대상의 강화노반은 아스팔트 노반 하부에 위치하고 있어 변상이 거의 일어나지 않는다고 가정하였기 때문에 아스팔트 노반의 유지관리만을 고려하였다. 아스팔트의 수명은 일본에서는 40~50년으로 제시하고 있어 평균 45년을 교체주기로 산정하였다. 또한, 일본의 아스팔트 노반 설계수명기준인 50년 이상을 만족하는 해석단면에 생애주기비용(LCC) 순위를 부여한 결과를 Table 7에 나타내었다.

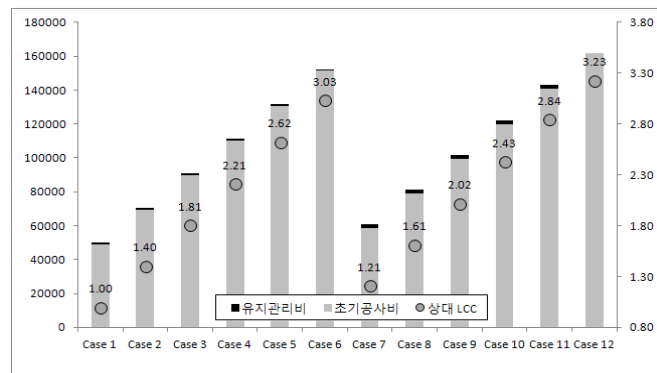


Fig. 6 LCC Analysis (1)

Table 7 Rank of LCC Analysis (1)

| Case | 3 | 4 | 5 | 6 | 10 |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|
| Asphalt thickness(cm) | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 |
| Reinforced roadbed thickness(cm) | 20 | 25 | 30 | 35 | 25 |
| Rank | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 |

2.3.3 유지관리단계 LCC 분석

설계단계 LCC분석과 달리 아스팔트 노반과 콘크리트 노상의 주기적 보수, 보강을 적용하였다. 그 결과, Case12에 비해 Case 1이 87.2백만원 가량 절감되었고, Case 2는 63.8백만원, Case 3은 40.3백만원 가량 절감되었다. 여기에 설계단계 LCC분석과 마찬가지로 설계수명 50년 이상을 만족하는 해석단면에 생애주기비용(LCC) 순위를 부여한 결과, Table 8과 같다.

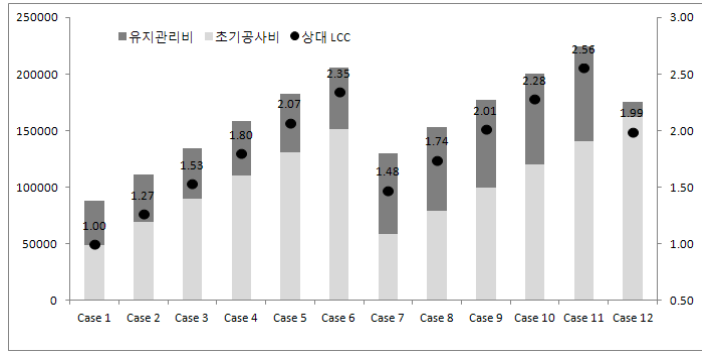


Fig. 7 LCC Analysis (2)

Table 8 Rank of LCC Analysis (2)

| | | | | | |
|----------------------------------|----|----|----|----|----|
| Case | 3 | 4 | 5 | 6 | 10 |
| Asphalt thickness(cm) | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 |
| Reinforced roadbed thickness(cm) | 20 | 25 | 30 | 35 | 25 |
| Rank | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 |

5. 결론

본 논문에서는 역학적 측면과 경제성 측면을 고려한 아스팔트 노반의 최적두께를 산정하고자 검토하였으며 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 해석에 적용된 모든 단면(Case1~12)은 도상자갈하부 노반의 허용압축압력 133kPa을 만족하였다.

(2) 국내에는 아스팔트 노반에 대한 명확한 설계수명기준이 없으므로 일본의 설계수명 기준인 50년을 적용하였을 때, Case 3(아스팔트노반5cm+강화노반20cm), Case 4(아스팔트노반5cm+강화노반25cm), Case 5(아스팔트노반5cm+강화노반30cm), Case 6(아스팔트노반5cm+강화노반35cm), Case 10(아스팔트노반10cm+강화노반25cm)이 그 이상을 만족하였다.

(3) 경제성 평가를 위한 LCC분석을 통해 설계수명 50년을 만족하는 위 단면두께에 순위를 부여한 결과, Case 3(아스팔트노반5cm+강화노반20cm)이 가장 경제적인 단면으로 판정되었다.

(4) 검토결과 Case 3(아스팔트노반5cm+강화노반20cm)은 역학적 특성, 설계수명, 경제성을 모두 만족하는 유도상 아스팔트 노반의 최적두께로 볼 수 있다. 또한, 총 노반두께가 25cm로, 기존두께 40cm에서 15cm의 두께 절감을 통해 시공성, 경제성 면에서 추가적인 비용절감을 할 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] P. F. Teixeira, P. A. Ferreira, A. Lopez Pita, C. Casas, and A. Bachiller(2009) The Use of Bituminous Subballast on Future High-Speed Lines in Spain: Structural Design and Economical Impact, *International Journal of Railway*, Vol.2, No.1,pp.1-7.
- [2] Railway Technical Research Institute(2007) Design standards for railway structures and commentary earth structures, railway technical research institute.
- [3] Yang H. Huang, Jerry G. Rose, Charles J. Khoury(1987) Thickness design for Hot-Mix Asphalt Railroad Trackbeds, *Asphalt Paving Technology*, 1987 AAPT, Vol. 56, pp. 427-453.
- [4] Korea Railway Research Institute(2012) development of asphalt roadbed and track system suited to speed up, Korea Railway Research Institute.
- [5] Chang, C. S., Adegoke, C.W. and selig, E. T(1980) The GEOTRACK model for railroad performance. *Journal of Geotechnical Engineering Divison*, ASCE, Vol. 106, No GT11, November, pp. 1201-1218
- [6] K.S. Park, S.H. Lee, J.W. Lee, T.J. Lyu(2013) Optimum Thickness of Asphalt Roadbed the Calculation of the service life, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*
- [7] Korea Railway Network Authority(2012) KR CODE KR C 14030, Korea Railway Network Authority
- [8] American Railway Engineering Association(1996) Manual For Railway Engineering, Vol. I and II