

재활용 아스팔트 포장 공법의 고속도로 적용성 검토



박 종 서 | 한국도로공사 설계처 차장
 김 달 중 | 한국도로공사 김해부산건설사업단 차장
 백 철 민 | 한국건설기술연구원 수석연구원
 박 경 원 | (주)삼현피에프 도로사업본부장
 서 창 원 | 인성 A&T(주) 포장연구소장
 임 인 수 | (주)국보환경 기술연구소 이사

1. 검토배경

국내도로 총연장 106,414km 중 20년 이상 노후 포장이 2012년 5,100km에서 2022년 12,000km로 증가하며, 이에 따라 유지보수 소요 연장이 증가하고 있다. 그러나 한정된 예산으로 인하여 소요 유지보수 필요 연장 대비 유지보수율이 감소되고 있다. 또한 국내 재활용 아스팔트 포장 의무화 비율¹⁾이 40% 이상이나, 국내 재활용 비율은 10% 이하이다. 이는 재활용 제품에 대한 발주처나 사용자의 인식이

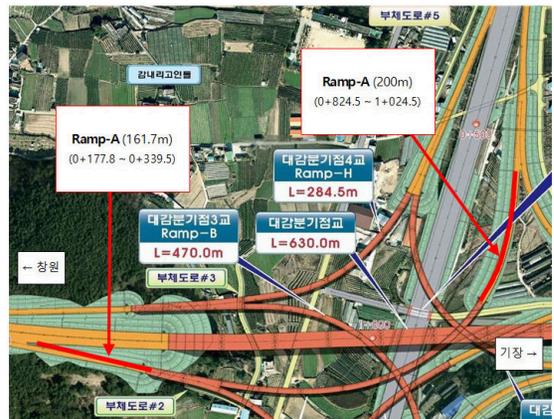


그림 1. 재활용 아스팔트 포장공법 시험시공 위치도

1) 건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 제38조(순환골재 및 순환골재 재활용제품의 사용 의무)

① 발주자는 순환골재 등 의무사용 건설공사를 발주할 때에는 건설업자에게 제35조에 따른 품질기준에 맞는 순환골재 및 대통령령으로 정하는 기준에 적합한 순환골재 재활용제품을 사용하게 하여야 한다.

낮은 것도 있으나, 범용적으로 활용할 수 있는 국가 기준이 미비한 측면도 있다. 이에 국토교통부는 재활용을 활성화 하고자 2017년 4월 아스팔트 콘크리트 포장시공지침을 개정하였고 국가기술표준원은

2017년 5월 GR F 4005 “순환 가열 아스팔트 혼합물” 및 2017년 9월 GR F 4026 “순환 상온 아스팔트 혼합물”에 대한 우수재활용제품(GR) 품질인증기준을 개정하는 등의 국가적인 노력을 기울이고 있다. 이에 한국도로공사는 고속도로 건설 시 법적 사용규정도 불구하고 현장적용이 미미함에 따라 합리적이고 친환경적인 설계적용방안을 강구하고자 2017년 10월 김해부산 고속도로 7공구에 상온·중온·가열 재활용 아스팔트 포장 시험시공을 실시하여 재활용 아스팔트 콘크리트의 적용성을 검토하였다.

2. 현실태 및 문제점

2.1 재활용 아스팔트 포장의 적용현황

선진국은 자원재활용을 통한 환경보호 목적으로 재활용 아스팔트 콘크리트 사용률이 상당히 높은 반면 국내의 재활용 아스팔트 콘크리트의 사용비율은 약 6~9%로 저조한 수준이다. 한국도로공사의 경우는 본선을 제외한 부체도로, 군·리도 등 일부 구간만 적용하고 있는 실정으로 재활용 아스팔트 콘크리트의 사용비율은 약 0.5% 내외로 매우 저조한 수준이다.

표 1. 해외 재활용 아스팔트 콘크리트 사용 현황

| 구분 | 일본 | 네덜란드 | 독일 | 덴마크 | 스웨덴 | 벨기에 | 이탈리아 |
|----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|
| 비율 | 73% | 65% | 60% | 53% | 50% | 38% | 30% |

* 출처 : 도로교통협회 협회지 128호(백종은 외, 2012)

표 2. 국내 재활용 아스팔트 콘크리트 사용 현황

| 구분 | | 2011년 | 2012년 | 2013년 | 2014년 |
|-------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
| 사용량 (천톤) | 계 | 19,723 | 23,179 | 26,200 | 23,470 |
| | 신규 아스팔트 콘크리트 | 18,207 | 21,110 | 23,804 | 21,963 |
| | 재활용 아스팔트 콘크리트 | 1,516 | 2,069 | 2,396 | 1,507 |
| 사용 비율(%) | | 7.7 | 8.9 | 9.1 | 6.4 |

* 출처 : 한국순환아스콘협회, 2015

표 3. 고속도로 재활용 아스팔트 포장 설계 및 사용 현황

| 구분 | 설계(톤) | | 시공(톤) | 적용율(%) | |
|------------------|-------|-----------|---------|--------|------|
| | 전체 | 재활용 | | | |
| 창원~김해 등 6개 노선 | 계 | 1,382,721 | 299,482 | 7,579 | 0.5% |
| | 표층 | 391,712 | 64,616 | 600 | 0.2% |
| | 중간층 | 185,086 | 49,984 | 1,284 | 0.7% |
| | 기층 | 805,923 | 184,882 | 5,695 | 0.7% |

* 출처 : 한국도로공사

2.2 재활용 아스팔트 콘크리트의 현장적용 문제점

2.2.1 재활용 아스팔트 콘크리트 특성을 배제한 설계 시행

재활용 아스팔트 콘크리트는 일반 아스팔트 콘크리트와 비교하여 소성변형 저항성은 높고 균열저항성은 낮은 특성을 가지므로 압축응력이 집중되어 높은 소성변형 저항성이 요구되는 기층을 설계대상으로 선정하는 것이 바람직하나, 포장층별로 의무사용비율을 일괄적으로 설계에 반영하고자 하여 품질에 대한 확신의 부족 등의 이유로 현장 적용실적이 저조하다.

2.2.2 가열 재활용 아스팔트 포장만 설계하여 환경피해 및 경제성 저하

가열재활용 아스팔트 콘크리트 생산 시 재료 가열을 위한 벵커-C유 소모로 인한 미세먼지 및 유해가스 발생을 원천적으로 차단할 수 있고 경제성도 우수한 상온아스팔트 콘크리트는 가열아스팔트 콘크리트와 비교하여 국내 적용사례가 적어 설계대상으로 고려되지 못하고 있는 실정이다.

표 4. 아스팔트 콘크리트 1톤 생산 시 연료사용량 및 배출 유해가스 발생량 비교

| 구분 | 가열 (160℃ 내외) | 중온 (130℃ 내외) | 상온 (비가열) | |
|--------------|-----------------|-----------------|-------------|---|
| 연료(벵커-C유, l) | 7.7 | 5.0 | 0 | |
| 먼지, 유해가스 | 이산화탄소(kg) | 6.3 | 4.2 | 0 |
| | 질소산화물(NOx)(ppm) | 38 | 34 | 0 |
| | 황산화물(SOx)(ppm) | 8 | 7 | 0 |
| | 일산화탄소(ppm) | 1,300 | 1,200 | 0 |

* 벵커-C유 1 l 당 CO2 배출량 3.026kg(국토교통부 발표 자료, 2012)

3. 재활용 아스팔트 콘크리트 적용방안

3.1 기층용 재활용 아스팔트 콘크리트 품질기준 및 종류별 특징 검토

기층구간에서 재활용 아스팔트 콘크리트의 종류별 품질기준을 검토한 결과, 가열 및 중온 재활용 아스팔트 콘크리트는 신규아스팔트 콘크리트와 동일한 기준을 적용하며 균열에 대한 저항성을 나타내는 상온 재활용 아스팔트 콘크리트의 간접인장강도 기준은 가열 및 중온형 아스팔트 콘크리트의 기준보다 0.2 N/mm² 낮은 것으로 조사되었다. 이러한 이유는 상온형 재활용 아스팔트 콘크리트는 일반아스팔트와 비교하여 점도가 낮은 유화아스팔트를 사용하는 특성상 간접인장강도를 향상시키는 것은 한계가 있는 것으로 조사되었다. 따라서 포장의 장기 내구성을 확보하고자 장기간 수분에 의한 파손 저항성을 나타내는 상온형 재활용 아스팔트 콘크리트의 인장강도비 기준을 현행 0.7 이상에서 가열아스팔트 콘크리트 표층 및 중간층 수준인 0.8 이상으로 상향하여 시험시공에 적용하였다.

표 5. 기층용 재활용 아스팔트 콘크리트의 종류별 품질기준 비교

| 구 분 | 가열/중온 재활용 | 상온 재활용 |
|----------------------------|---------------|---------------|
| 마찰안정도(N) | 5,000 이상(60℃) | 6,000 이상(40℃) |
| 흐름값(1/10mm) | 10-40 | 10-40 |
| 공극률(%) | 4-6 | 9-14 |
| 포화도(%) | 60-75 | - |
| 인장강도비(TSR)* | - | 0.8 이상 |
| 간접인장강도(N/mm ²) | 0.6 이상 | 0.4 이상 |
| 터프니스(N·mm) | 6,000 이상 | - |

* 표층 및 중간층 기준, 기층용 아스팔트 콘크리트에 대한 기준은 없음. 본 시험시공에 상향 적용함.

3.2 고속도로 본선 등 기층적용 시 장기공용성 검토

한국도로학회에서 2016년 10월 실시한 포장가속

시험 결과 일반 가열 아스팔트 콘크리트 대비 재활용 상온 아스팔트 콘크리트의 소성변형 저항성이 일반 가열 아스팔트 콘크리트 대비 약 2배 우수한 것으로 조사되었다. 또한 서울시의 실제 적용사례를 분석한 결과, 재활용 아스팔트 콘크리트를 시공한 구간의 균열율, 소성변형량, 평탄성은 일반 가열아스팔트 콘크리트와 비교하여 큰 차이가 없는 것으로 조사되었다.

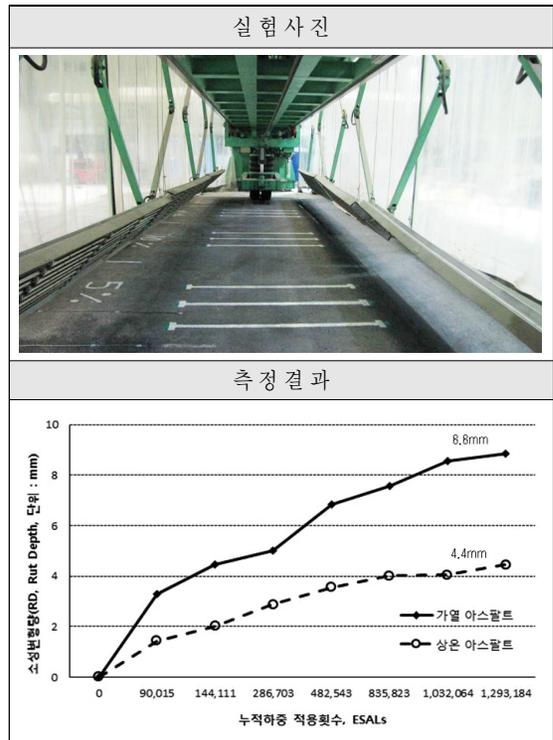
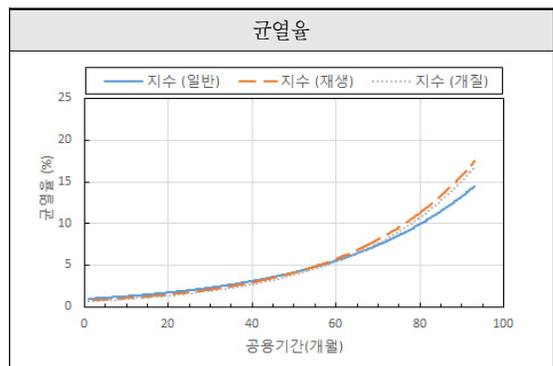


그림 2. 재활용포장의 포장가속시험 결과 (한국도로학회)



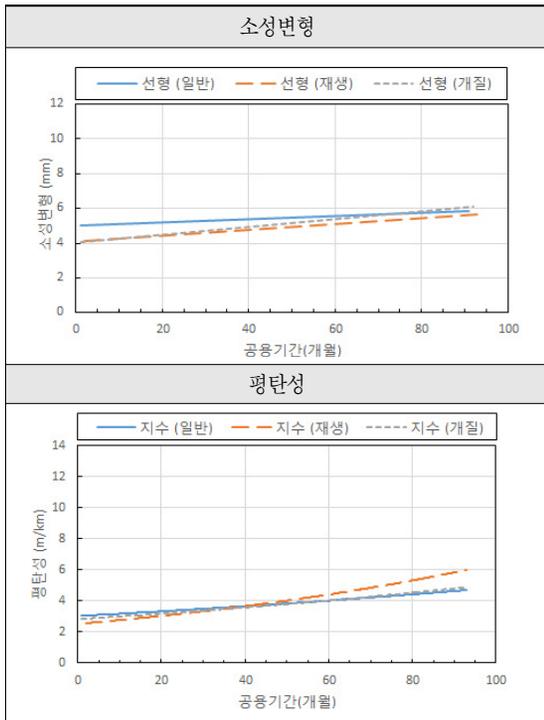


그림 3. 재활용포장의 균열율, 소성변형, 평탄성 비교 (서울시)

3.3 고속도로 설계 적용방안 검토

아스팔트 콘크리트 포장형식 설계 시 표층은 압축, 전단, 인장응력이 모두 집중되므로 소성변형 저항성 및 균열저항성이 큰 재료를 적용하고, 기층은 전단, 인장응력이 하부로 갈수록 소산되어 상대적으로 압축응력이 지배적이므로 소성변형 저항성에 강한 재활용 아스팔트 콘크리트를 적용하는 것이 바람직하다. 교통량 및 중차량 통행량이 많은 도로는 기층위주로 적용하고, 보통 이하인 도로 및 단기간 공

표 6. 의무사용비율에 따른 재활용 아스팔트 콘크리트 설계 적용방안

| ① 교통우회기다 | ② 부체도로 | ③ 4차로 국도 이설 | ④ 고속도로 본선 |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--|
| 표층(재활용) 5 기층(재활용) 13 | 표층(재활용) 5 기층(재활용) 10 | 표층(재활용) 5 기층(재활용) 10 | 표층(일반) 5 중간층(일반) 7 기층(일반) 21 기층(재활용) 기층(재활용) |

용도로는 중간층 및 기층에 적용하되 의무사용비율 40% 초과 시 고속도로 본선 기층은 다층으로 나누어 하부 기층에만 적용하는 것을 원칙으로 설계에 적용하고자 한다.

3.4 재활용 아스팔트 콘크리트의 지역별 수급현황 및 경제성 검토

2017년 10월 현재, 재활용 아스팔트 콘크리트 생산업체는 전국적으로 분포하며, 기존의 가열아스팔트 콘크리트 생산업체는 순환골재 가열설비 및 공급설비 등을 추가하면 가열, 중온, 상온 재활용 아스팔트 콘크리트를 생산할 수 있는 것으로 확인하였으며, 사용량 증가 시 제조업체는 지속적으로 늘어날 것으로 예상되므로 설계 및 현장적용이 가능한 것으로 판단되었다. 현재 설계 또는 공사가 진행 중인 세종~포천, 새만금~전주, 김포~파주, 양평~이천 고속도로 구간에 재활용 아스팔트 콘크리트를 적용하는 경우 일반가열아스팔트 콘크리트 대비 가열재활용은 6.0%, 중온재활용은 2.1%, 상온재활용은 16.1%의 공사비를 절감할 수 있는 것으로 조사되었다.

표 7. 아스팔트 콘크리트 평균단가

(원/ton, 2017년 1월 기준)

| 구 분 | 신규아스팔트 콘크리트 | | 재활용 아스팔트 콘크리트 | | |
|----------------|-------------|--------|---------------|--------|--------|
| | 가열 | 중온 | 가열 | 중온 | 상온 |
| 기 층 (PG 64-22) | 50,067 | 50,428 | 47,069 | 49,000 | 42,000 |

3.5 재활용 아스팔트 콘크리트의 환경적 영향 검토

현재 설계 또는 공사가 진행 중인 세종~포천, 새만금~전주, 김포~파주, 양평~이천 구간의 고속도로 기층에 상온재활용 아스팔트 콘크리트를 적용하면 CO₂ 배출량을 13,898,893kg 저감하여 소나무 3,928,460그루를 심는 효과를 기대할 수 있고, 약 3.2억 원의 탄소배출권을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

표 8. 재활용 아스팔트 콘크리트 적용에 따른 환경적 기대효과

| 구 분 | 가열 재활용 | 상온 재활용* |
|---------------------------------------|--------------|-----------|
| 소나무 1ha CO ₂ 흡수량(kg/년) | 5,830 | |
| 소나무 그루(그루/ha) | 1,648 | |
| 소나무 그루당 CO ₂ 흡수량(kg/그루)* | 3,538 | |
| 새만금~전주 등 4개노선 CO ₂ 배출량(kg) | 13,898,893** | 0 |
| 연간 CO ₂ 발생량 환산 소나무 그루수 | 3,928,460 | 0 |
| 절감 그루수 | | 3,928,460 |

* 소나무(중부지방 20년령) 그루수 기준 절감량

** 탄소배출권 : 13,899톤×23,000원/톤 = 319,677,000원

4. 고속도로 본선 적용성 검증을 위한 시험시공

4.1 시험시공 개요

재활용 아스팔트 콘크리트의 고속도로 본선 적용성을 검증하고자 2017년 10월 17일~18일 김해부산 고속도로 7공구 진출입 램프구간의 기층에 상온 재활용아스팔트 콘크리트 2종류, 중온 및 가열 재활용아스팔트 콘크리트 각 1종류를 이용하여 시험시공을 실시하였다. 품질기준은 “아스팔트 콘크리트 포장 시공지침(국토부, 2017)”을 적용하였다. 이상에서 언급한 바와 같이 상온 아스팔트 혼합물의 인장강도비는 0.8로 상향 적용하였고 골재는 한국도로공사 품질기준에 따라 1등급 골재를 사용하였다. 순환골재는 일반적으로 노면에서 절삭되고 재처리되는

표 9. 재활용 아스팔트 콘크리트 종류별 시험시공 적용 현황

| 이 정(STA) | 연장(m) | 적용 아스팔트 콘크리트 | 적용 단면(cm) | |
|--------------------|-------|---------------------|-----------|-----|
| | | | 표층 | 중간층 |
| R-A1+024.5~0+924.5 | 100 | 상온형 재활용 아스팔트 콘크리트 ① | 5 | |
| R-A0+924.5~0+824.5 | 100 | 상온형 재활용 아스팔트 콘크리트 ② | 7 | |
| R-A0+177.8~0+259.5 | 80 | 가열형 재활용 아스팔트 콘크리트 | 15 | |
| R-A0+259.5~0+339.5 | 81.7 | 중온형 재활용 아스팔트 콘크리트 | 30 | |

과정에서 1등급 골재의 입형기준을 만족하지만 시공 과정에서 샘플을 채취하여 확인시험을 수행하여 1등급 기준 만족여부를 확인하였다.



(a) 보조기층 시공

(b) 피니셔 포설



(c) 롤러 다짐

(d) 시공 완료

그림 4. 재활용 아스팔트 콘크리트 시험시공 과정

4.2 배합설계결과

본 시험시공에 제시된 품질기준에 적합하도록 재활용 아스팔트 콘크리트 제조업체는 국토부 시공지침 부속서 Ⅲ-3에 명시된 방법에 따라 배합설계를 수행하였다. 순환골재 사용량은 각 혼합물 중량 대비 25%를 적용하였다.

표 10. 상온 재활용 아스팔트 콘크리트의 배합설계 결과

| 항 목 | 국토부 기준 | 상온재생① | 상온재생② |
|------------------|----------|-------|--------|
| 최적 유허AP 함량(%) | 3.0 이상 | 3.5 | 5.2 |
| 마찰안정도(40℃, N) | 6,000 이상 | 9,515 | 14,274 |
| 간접인장강도(25℃, MPa) | 0.4 이상 | 1.22 | 0.47 |
| 인장강도비(TSR)* | 0.8 이상 | 0.96 | 0.81 |
| 흐름값(1/100cm) | 10~40 | 32.0 | 28.2 |
| 공극율(%) | 9~14 | 12.3 | 13.3 |
| 마찰다짐횟수(회) | 75 | 75 | 75 |

* 장기공용성 확보를 위하여 국토부기준 0.7 이상을 본 시험시공에서는 0.8 이상으로 상향 적용함.

표 11. 중온/가열 재활용 아스팔트 콘크리트의 배합설계 결과

| 항 목 | 국토부 기준 | 중온 재활용 | 가열 재활용 |
|---------------|-------------------|----------|----------|
| 최적 아스팔트(%) | - | 2.8 | 2.8 |
| 마찰안정도(40℃, N) | 5,000 이상 | 9,608 | 9,407 |
| 흐름값(1/100cm) | 10~40 | 31 | 31 |
| 공극율(%) | 4~6 | 5.4 | 5.2 |
| 포화도(%) | 60~75 | 61.9 | 62.9 |
| 골재간극율(%) | 13 이상 | 14.1 | 13.9 |
| 터프니스(N·m) | 6,000 이상 | 6,000 이상 | 6,000 이상 |
| 밀도 | g/cm ³ | 2.327 | 2.326 |
| 이론최대밀도 | g/cm ³ | 2.460 | 2.453 |

4.3 시험시공 품질관리

시험시공은 프라이밍/택코팅 살포량, 혼합물 온도, 다짐횟수 및 다짐속도 등은 국토부 지침에 명시된 기준에 따라 관리하였으며, 시공 후 각 재료별로 코어샘플을 채취하여 포장두께, 공극률, 다짐도, 간접인장강도를 확인한 결과 모두 국토부 기준을 만족하였다.

표 12. 시험시공구간 코어샘플 품질 확인 시험 결과

| 구 분 | 상온재생① | 상온재생② | 중온재생 | 가열재생 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 두께(mm) | 152.5 | 152.4 | 155.6 | 158.5 |
| 코어 밀도(g/cm ³) | 2.116 | 2.134 | 2.251 | 2.249 |
| 실내배합 밀도(g/cm ³) | 2.196 | 2.167 | 2.327 | 2.326 |
| 현장 다짐도(%) | 96.4 | 98.5 | 96.7 | 96.7 |
| 이론 최대밀도(g/cm ³) | 2.453 | 2.493 | 2.450 | 2.459 |
| 공극률(%) | 13.7 | 14.4 | 8.1 | 8.5 |
| 실내배합 공극률(%) | 12.3 | 13.3 | 4.9 | 5.2 |
| 간접인장강도(MPa) | 0.78 | 0.75 | 1.22 | 0.95 |



(a)가열재활용아스팔트 (b)중온재활용아스팔트 (c)상온재활용아스팔트

그림 5. 재활용 아스팔트 콘크리트 현장코어 채취(48시간)

5. 시험시공 결과 분석 및 적용방안

5.1 시공성 및 품질검토 결과

시험시공을 통한 재활용 아스팔트 콘크리트의 고속도로 기층용 적용성 검토결과, 가열, 중온, 상온 재활용 아스팔트 콘크리트의 시공방법은 모두 동일하지만 상온아스팔트 콘크리트 다짐면의 평탄성이 타이어(Tire)롤러 다짐에서 확보되어 탄뎀(Tandem)롤러 다짐이 필요없는 것으로 판단되었다. 마찰안정도는 국토부 기준 대비 상온재활용 아스팔트 콘크리트는 159~238%, 중온 및 가열재활용 아스팔트 콘크리트는 188~192%로 나타났다. 간접인장강도는 상온재활용 아스팔트 콘크리트는 123~215%, 중온 및 가열재활용 아스팔트 콘크리트는 158~203%로 나타났다.

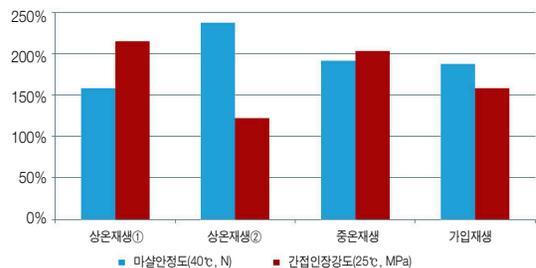


그림 6. 실내 시험 결과

5.2 재활용 아스팔트 콘크리트의 고속도로 적용을 위한 설계적용 방안 검토 결과

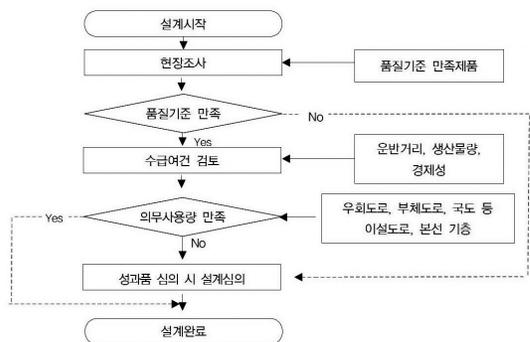


그림 7. 재활용 아스팔트 콘크리트의 고속도로 적용을 위한 설계적용 흐름도

향후 국토부 품질기준 및 순환골재 의무사용량을 만족하기 위해서는 설계, 품질확인, 수급여건 확인, 경제성검토 등의 체계적인 설계반영 절차가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결론

김해부산고속도로 제7공구에 가열, 중온, 상온 재활용 아스팔트 콘크리트 3종류를 적용한 결과, 품질 및 시공성은 모두 국토교통부 기준을 만족하였고, 공학적 타당성, 법적 의무사항, 경제성, 환경영향 등

을 종합적으로 고려할 때, 재활용 아스팔트 콘크리트를 고속도로의 기층에 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

또한 재활용 아스팔트 콘크리트를 2017년 현재 설계 및 시공 중인 고속도로 기층에 적용하는 경우 (1) 현행 의무사용 기준을 만족하는 동시에 (2) 경제적으로 가열, 중온, 상온 재활용아스팔트 콘크리트를 적용하는 경우 각각 6.0%, 2.1%, 16.1% 공사비를 절감할 수 있고 (3) 환경적으로 13,899톤 CO₂를 저감하여 소나무 3,928,460그루를 심는 효과 및 약 3.2억 원의 탄소배출권을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

학회지 원고접수 안내

학회지 편집위원회에서는 다음과 같은 내용으로 여러분을 초대하고자 합니다. 언제든지 참여하시어 알찬 학회지를 만듭시다. 여러분의 원고를 기다리겠습니다.

(연락처 : 학회사무국 또는 편집위원)

| 컬 럼 | 내용 및 형식 | 비 고 |
|----------------|---|------------------|
| 권두언/축사/제언/격려사 | 시사성 있는 내용으로 A4 2쪽 이내 분량으로 작성 | 편집위원회 주관 |
| 특집 | 회원들에게 도로포장내용과 최신동향소개 : 특집편집위원회 주관하여 연재 | 게재원고료 지급 심의 후 게재 |
| 기술기사 | 도로 및 도로포장과 관련된 기술보고서로서 A4 10쪽 이내 분량으로 작성 : 사례연구, 공사지, 성공 및 실패사례, 지역별 도로특성, 국내 산학연 합동 연구, 국내외 관련연구소 소개 등 | 게재원고료 지급 심의 후 게재 |
| 기술위원회 세미나 주요내용 | 기술위원회 세미나 내용을 자세히 요약하여 그 내용을 회원들에게 알리는 컬럼 | 기술위원회 제공 |
| 해외기술동향 | 도로 및 도로포장관련 해외의 최신 연구내용 및 결과로 A4 4쪽 이내 | |
| 국내외 학술회의 | 도로 및 도로포장과 관련된 학술 및 기술강좌, 세미나 등의 내용 소개 | E-mail 이용 가능 |
| 문화산책(교양) | 교양과 관련된 내용으로 A4 4쪽 이내 : 수필, 취미생활(등산, 낚시 등), 독후감 및 의견제시 등 자유내용 | 심의 후 게재 |
| 국내외 신간도서 소개 | 최근 발간된 도로 및 도로포장 도서 내용소개 및 총평과 국내 회귀 입수 서적 소개 | E-mail 이용 가능 |
| 학교 및 업체연구소 소개 | 도로 및 도로포장관련 학교 연구실 및 업체 연구소의 A4 2쪽 내외의 소개 | 게재분량 엄수 |
| 학회소식 | 정기총회 및 학술발표회 소식, 이사회 회의록, 기술위원회 활동소식 등 | 학회 사무국 제공 |
| Q/A | 도로 및 도로포장 관련 문제에 대한 질문과 답변 | E-mail 이용 가능 |
| 회원동정 | 주소변경, 직장변경, 경조사, 회원가입, 박사 및 석사학위 취득자 등 | E-mail 이용 가능 |

※ 집필자는 필히 본인 및 공동집필자 사진을 첨부하십시오.

E-mail : ksre1999@hanmail.net