

유화 아스팔트를 이용한 친환경적인 상온 순환 페아스콘 도로포장

Environment-friendly cold recycled asphalt mix pavement using asphalt emulsion



천승한 Seung-Han Cheon
(주)케이비유화 CTO
E-mail : evercsh57@daum.net

1. 머리말

국내 국가통계포털(KOSIS)에 따르면 최근 5년간 국내 폐 아스팔트콘크리트(페아스콘)는 평균적으로 매일 약 3만 7천 톤 가량이 발생되고 있으며, 매년 4% 이상 증가하고 있는 추세이다. 이렇게 발생한 폐 아스팔트콘크리트는 대부분 재활용되고 있으며^[1], 주로 재생 순환 아스콘 혼합물 또는 재생 안정처리 노반재 등으로 사용된다. 최근 건설폐기물법 법률 개정(2016)으로 재활용 아스팔트 혼합물 의무 사용 관련 법령이 개정됨에 따라 페아스콘 재활용을 촉진시키기 위해 페아스콘을 의무적으로 사용해야하는 건설 공사의 범위가 확대(신설도로, 확장도로, 도로 유지보수)되었다.

최근 전 세계적으로 지구온난화로 인해 이상기후 현상이 지속됨에 따라 자연재해가 빈번하게 발생하고 있다. 이로 인하여 많은 국가에서는 온실가스의 주범인 CO₂, NO_x, SO_x 등을 최소화하기 위해 수많은 노력을 하고 있으며, 페아스콘을 이용한 도로포장도 그 중 하나이다^[2]. 도로포장 공법으로는 시공 온도 및 사용되는 아스팔트 바인더 종류에 따라 크게 가열, 중온, 상온 시공으로 나뉘며, 주로 가열 및 중온 시공을 한다^{[3][4]}. 가열 및 중온 시공은 포장도로의 조기 양생으로 인한 신속한 도로 개통으로 도로포장시 교통문제에 효과적이며, 도로품질 및 공용성 또한 우수하다. 하지만 가열 및 중온 시공을 하기 위해서는 원재료인 아스팔트 바인더, 골재 등을 높은 온도로 가열해야 하는데^[5], 이 때 화석연료가 사용되면서 온실가스 및 유해가스, 비용 등이 발생하고, 또 가열된 아스팔트 및 골재 등을 혼합하고 도로에 포설하는 과정에서 유증기 및 유해가스 등이 추가로 발생한다^[6]. 이 때 발생한 유증기는 작업자의 건강 및 안전을 해치고 작업환경을 악화시키는 대기오염 물질이다^[7].

위와 같이 가열, 중온 시공에 의한 온실가스 및 유해물질의 발생을 최소화하기 위해 원재료의 가열이 필요하지 않고, 아스팔트 자체를 바인더로 사용하는 가열 시공 대비 비용이 비교적 낮은 유화 아스팔트를 사용하여 약 20% 이상의 비용절감이 가능하며, 혼합 및 포설과정에서 유해가스가 발생하지 않

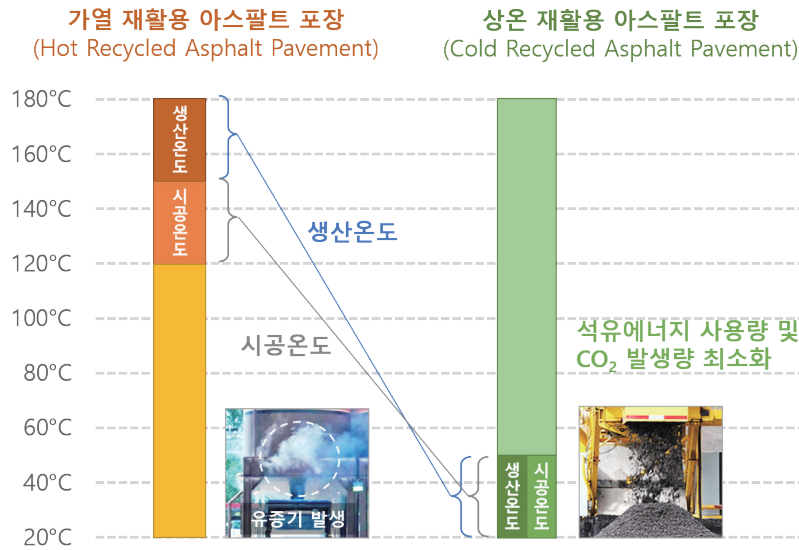


그림 1. 포장공법별 생산 및 시공온도 비교

도로 상온에서 포장 가능한 공법을 개발하였고, 이는 기층 및 신설도로 등에 사용되고 있다^{[8][9]}. 이 공법은 가열, 중온 시공에서 사용되는 고온의 아스팔트 바인더와는 다르게 유화 아스팔트를 사용하여 혼합물을 제조하는데, 유화 아스팔트는 아스팔트 바인더를 첨가제와 혼합하여 물속에 일정 범위의 입자로 분산시켜 만든 액상형 바인더로 상온에서 일정한 점도를 유지하여 골재와의 혼합이 용이하다^{[10][11]}. 이렇게 상온하에서 혼합 및 포설된 혼합물은 물이 포함되지 않은 기존 가열, 중온 아스팔트 혼합물과는 달리 다짐 및 양생과정에서 포함하고 있는 수분이 증발함에 따라 양생이 진행되고, 그에 따라 강도가 발현한다^[12]. 따라서 기존 공법에 비해 양생기간이 다소 길어 시공 범위가 제한적인 단점이 있다.

본 기사에서는 페아스콘을 이용한 혼합물 제조 및 도로포장시 온실가스, 미세먼지 등의 유해물질이 배출되지 않고, 화석연료의 사용이 최소화되어 비용절감 효과가 있으며^[13], 친환경적이면서도 기존 상온 공법의 단점을 크게 보완하여 시공 범위의 제한에서 벗어나 뛰어난 물성을 나타내는 공법에 대해 소개하고자 한다.

2. 유화 아스팔트의 정의 및 순환 아스콘 국내현황

유화 아스팔트란 아스팔트 바인더를 미세 혼합장비를 사용하여 물속에 약 1~30 μ m 입자 사이즈로 고르게 분산시켜 상분리 현상을 일으키지 않고, 아스팔트를 일정한 크기의 도메인(domain)으로 물은 매트릭스(matrix)로 하여 아스팔트 입자가 물속에 균일하게 분산되어 안정성을 유지하는 액상형 분산계 바인더이다^[14]. 이렇게 아스팔트 바인더를 물속에 분산시키기 위해서는 유화제가 사용되는데, 그 종류로는 양이온계, 비이온계, 음이온계가 있다^[15]. 국내에서는 골재의 특성에 따라 양이온 유화제를 사용하여 양이온계 유화 아스팔트를 주로 사용한다. 경화 속도에 따른 유화 아스팔트 종류로는 급속 경화형(Rapid Setting), 중속 경화형(Medium Setting), 완속 경화형(Slow Setting)이 있고, 용도에 따라 다르게 사용된다^[10].

페 아스팔트콘크리트를 사용하여 상온하에 표층, 기층 등에 포설하기 위해서는 주로 완속 경화형(Slow Setting) 유화 아스팔트 또는 중속 경화형(Medium Setting) 유화 아스팔트

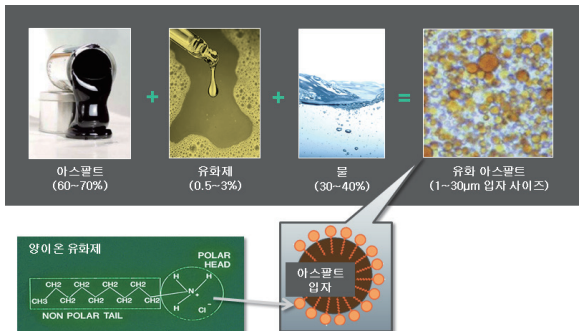


그림 2. 유화 아스팔트의 형태학(Morphology)



그림 3. 경화속도에 따른 유화 아스팔트의 종류

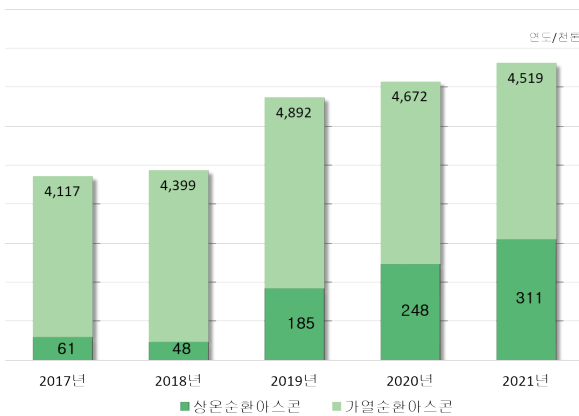


그림 4. 연간순환아스콘사용량 추이

가 사용되는데, 위에서 언급했던 것과 같이 온실가스, 미세먼지 등의 유해물질이 배출되지 않아 친환경적이면서 경제적이지만, 기존 가열 아스팔트 혼합물에 비해 약 2일 이상의 양생시간이 요구됨에 따라 짧은 시간내 도로 교통개방이 다소 어려운 이유로 용도가 제한적이며 사용량 또한 그다지 많지 않

은 상황이다^{[16][17]}.

위 <그림 4>와 같이 연간 순환 아스콘 사용량은 약 480만톤이지만, 상온 순환 아스콘의 사용량은 가열 순환 아스콘 사용량의 1/15 수준에도 미치지 못하는 약 30만톤 수준이다. 재활용 재료의 중요성이 부각되고, 환경오염으로 인하여 전 세계적으로 이상기후 현상이 빈번히 나타나는 현 시대에 이산화탄소 및 유해가스 등의 오염물질을 기존 가열 순환 아스콘 대비 90% 이상 감소시킬 수 있고, 가열 아스팔트 혼합물 대비 20% 이상의 비용절감이 가능한 상온 순환 아스콘의 비중을 늘려 사용하도록 장려하는 것이 필요하다고 생각한다. 하지만 기존 가열 아스콘 혼합물 대비 인지도가 높지 않고 비교적 긴 양생시간 등으로 인하여 상온 아스콘 혼합물에 대한 접근성 및 인식이 떨어져있는 것이 현실이다^[18]. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 상온 아스콘 혼합물의 품질을 개선하여 기존 가열 아스콘 혼합물과 유사하거나 그 이상의 물성을 나타내도록 제품 개발을 하는 것과 물성의 단점을 배제할 수 있을 정도의 비용절감 및 온실가스, 미세먼지 등 유해물질의 배출을 크게 감소시킨다는 강점을 국가와 시공업체에서 수용해야 한다고 생각된다.

3. 바인더 및 혼합물의 물성

현재 순환 상온 아스팔트 혼합물용으로 주로 사용되고 있는 유화 아스팔트 제품(Slow Setting)의 종류는 매우 한정적이다. 주로 기층에 사용되는 순환 상온 아스팔트 혼합물의 표준 배합은 우수재활용제품 품질인증 기준(GR F 4026-2017)에 따라 BB-1CR, BB-2CR로 두가지 배합이 존재하며, 여기에 사용되는 유화 아스팔트는 네 가지 종류로 나타낼 수 있다. 그 종류는 MS(C)-4h 또는 MS(C)-4hP, SS(C)-1h 또는 SS(C)-1hP이며, 양이온계 유화 아스팔트를 사용하는 이유는 음이온, 비이온계에 비해 기후조건(습도, 온도, 강수 등)에 영향을 덜 받고, 음이온을 띄는 화강암이 대부분인 국내 골재의 특성상 반대 극성인 양이온계를 사용하는 것이 골재와의 결합에 효과적이기 때문이다^[19].

유화 아스팔트는 기본적으로 혼합물의 주 바인더 역할을

하고 이는 포장체의 품질에 매우 중요한 역할을 한다. 현재 유화 아스팔트의 품질기준은 [표 1]과 같으며 시중에 유통되는 모든 제품은 이 기준에 부합한다. 하지만 유화 아스팔트가 나타내는 성능을 확인하고 비교할 수 있는 기준이 마땅치 않아, 몇 가지 추가 실험을 통해 개발된 유화 아스팔트와 다른 유화 아스팔트 샘플의 품질을 비교하였다.

가열 혼합물과 비교했을 때 상온 혼합물은 골재간의 결합력, 공극률, 안정도 등의 품질이 부족하여 교통량이 많거나 고하중이 가해지는 도로의 포장체가 변형되거나 탈리현상이 빈번히 일어난다. 또 최근 기후변화로 인하여 국내의 경우 이상 고온, 저온 현상이 나타나 도로의 품질이 저하되고 있음에 따라 고온에서의 도로변형이 발생해 회복되지 않는 현상이 나타나거나, 저온에서 아스팔트의 취성이 높아져 바인더가 깨지므로 도로가 파손되는 현상이 발견된다. 따라서 유화 아스팔트 잔류분의 품질기준 중 하나인 신도(ductility) 시험을 기준 온도의 상온(25℃)이 아닌 열악한 기후조건을 적용한 저온(4℃)에서 진행하여 비교하였고, 포장체의 소성변형에 대한 회복률을 측정하는 탄성 회복률(elastic recovery) 시험을 통해 유화 아스팔트 바인더의 품질을 비교하였다.

본 실험에서는 원재료인 모든 골재를 100% 페아스콘을 이

용하여 진행하였고, 품질이 개선된 고성능 유화 아스팔트를 사용하여 저온(4℃)하에서 신도 시험을 진행한 결과 <그림 5>에서와 같이 기존 유화 아스팔트 중 최저 신도 값 대비 물성이 50% 이상 증가한 것을 확인할 수 있으며, 이는 겨울철 저온하에서 아스팔트 혼합물의 취성(brittleness)에 대한 파괴 저항성이 개선되어 도로에서 자주 발생하는 동절기 고하중 차량에 의한 균열, 저온에서 골재와 아스팔트 바인더 간의 계면 접착력 저하로 인한 박리현상(포트홀), 파손 등을 예방하고 도로의 수명을 연장할 수 있는 효과를 기대할 수 있다^[20].

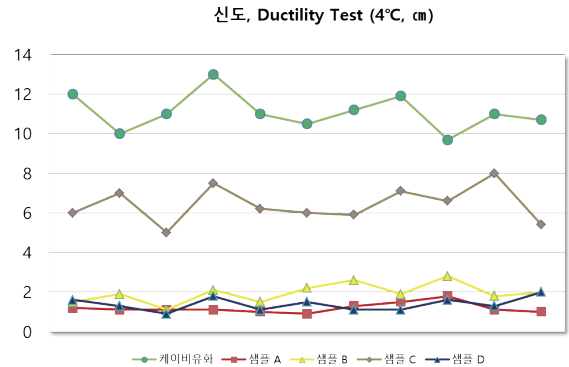


그림 5. 저온(4℃)에서의 유화 아스팔트 잔류분 신도 테스트

[표 1] 유화 아스팔트 품질기준(GR F 4026)

항 목	종 류	MS(C)-4h		SS(C)-1h	
		MS(C)-4h	MS(C)-4hP	SS(C)-1h	SS(C)-1hP
세이볼트 퓨롤 점도(25°C, SFS)		-		20 ~ 100	
세이볼트 퓨롤 점도(50°C, SFS)		50 ~ 450			-
저장 안정도(24h, %)		1 이하			1 이하
입자의 전하		양(+)			양(+)
체 잔류분(%)		0.1 이하			0.1 이하
시멘트 혼합성(%)		-			2.0 이하
증발 잔류분 질량(%)		65 이상			62 이상
증발잔류분	공용성 등급	PG 64-22	PG 70-22 이상	PG 64-22	PG 70-22 이상
	신도(25°C, 5cm/min, cm)	40 이상		40 이상	
	톨루엔 가용분 질량(%)	97.5 이상		97.5 이상	

[표 2] 유화 아스팔트 잔류분 탄성 회복률 테스트

	케이비유화	샘플 A	샘플 B	샘플 C	샘플 D
탄성 회복률(%)	50~60%	0~5%	10~15%	0~5%	5~10%
공용성등급(PG)	70-22	64-22	64-22	64-22	64-22

[표 3] 순환 가열 아스팔트 혼합물 품질 기준(GR F 4005)

항목	기준값
다짐횟수(회)	마살다짐 양면 50(75) 또는 선화다짐 75(100)
안정도(N)	3500(5000) 이상
흐름값(1/100cm)	10 ~ 40
변형강도(MPa)	2.7(3.2) 이상
공극률(%)	3.0 ~ 8.0
포화도(%)	60 ~ 75
간접인장강도(N/mm ²)	0.60 이상
터프니스(N·mm)	6000 이상
아스팔트 추출 후 침입도(1/10mm)	55 이상

[표 4] 순환 상온 아스팔트 혼합물 품질 기준(GR F 4026)

항목	기준값
마살안정도(40°C, N)	6000 이상
간접인장강도(25°C, MPa)	0.40 이상
인장강도비(TSR)	0.70 이상
흐름값(1/100cm)	10 ~ 40
공극률(%)	9 ~ 14
마살다짐회수(회)	75
유화 아스팔트의 아스팔트 잔류분 비율 (포틀랜드 시멘트 사용시)	시멘트 혼입 비율 대비 3배 이상

일정 온도하에서 유화 아스팔트 잔류분의 탄성 회복률을 시험한 결과 [표 2]에서 확인할 수 있듯이 기존 유화 아스팔트 샘플에 비해 온도 및 하중변화에 의한 소성변형 저항성이 우수하여 매우 큰 폭으로 회복률 값이 상승한 것으로 확인되었다. 추가로 도로포장 혼합물 바인더의 품질에 매우 중요한 기준이 되는 공용성등급(Performance Grade) 시험을 추가로 진행하였고, 공용성등급 또한 기존 유화 아스팔트 제품에 비해 우수하였다. 이 시험의 결과로 개선된 유화 아스팔트를 사용하여 상온 포장에 하였을 경우, 기존 혼합물과는 달리 고하중, 고교

통량의 도로환경에서도 소성변형을 최소화하여 도로에서 발생할 수 있는 문제점들이 개선되어, 장기적으로 도로의 품질이 나 수명에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

순환 가열 및 상온 아스팔트의 품질 기준 값은 [표 3], [표 4]와 같으며, 요구 품질 기준은 크게 다르지 않다. 하지만 실질적으로 사용되는 혼합물의 품질은 순환 가열 아스팔트 혼합물이 순환 상온 아스팔트 혼합물에 비해 다소 우수하다.

기존의 순환 상온 아스팔트 혼합물의 단점을 보완하기 위해 한국건설기술연구원과의 공동 연구(온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구, 2016~2018)를 수행하여 고성능 유화 아스팔트 제품 및 유화 아스팔트를 이용한 상온 재활용 아스팔트 포장공법을 개발하였다. 동시에 당시 국내에 적용되고 있는 다른 유화 아스팔트와의 물성 비교를 진행하였다.

먼저 유화 아스팔트를 사용함에 있어서 특히 중요한 물성중의 하나인 저장안정성, 혼합성, 시공성이 혼합물의 품질에 크게 영향을 미치기 때문에 개선이 필요하였고, 이를 기존과 비교했을 때 케이비유화에서 개발한 유화아스팔트 제품의 품질이 상당히 향상되었음을 확인할 수 있었다. 또한 기존 순환 상온 혼합물의 양생기간 최소 5일 이상인 것과 비교하여 양생시간을 2일 이내로 크게 단축시킴으로써 상온 혼합물의 단점인 교통개방 시간에 대한 문제를 한층 더 보완할 수 있게 되었다.

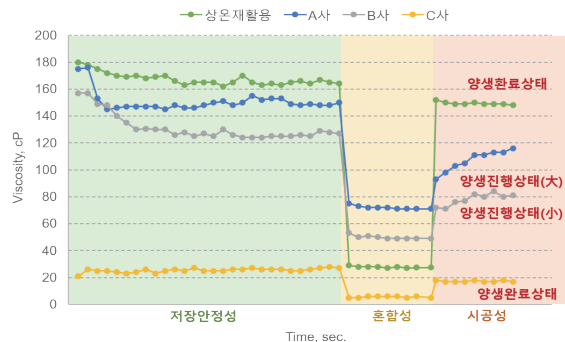


그림 6. 유화 아스팔트 제품별 혼합물의 품질

다음으로 <그림 7>, <그림 8>과 같이 간접인장강도 및 동탄성계수 값은 순환 가열 혼합물 대비 80% 이상의 품질을 확보하였고, 소성변형 저항성의 경우에는 2.5배 이상 품질이 향상되었다.

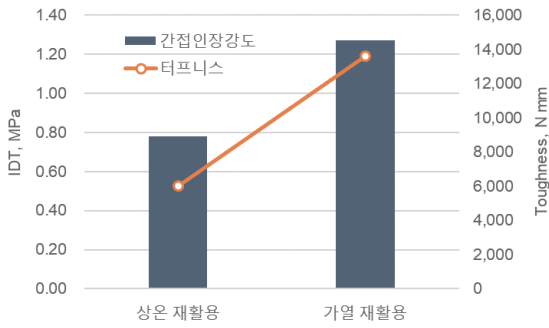


그림 7. 간접인장강도 품질 비교

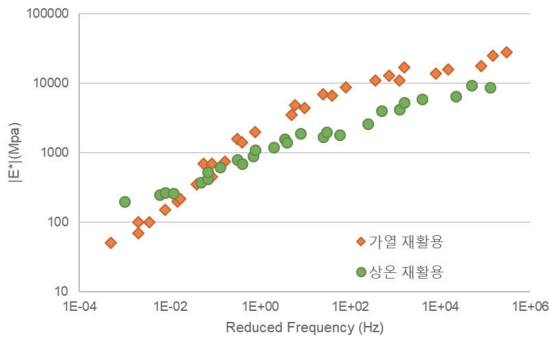


그림 8. 동탄성계수 품질 비교

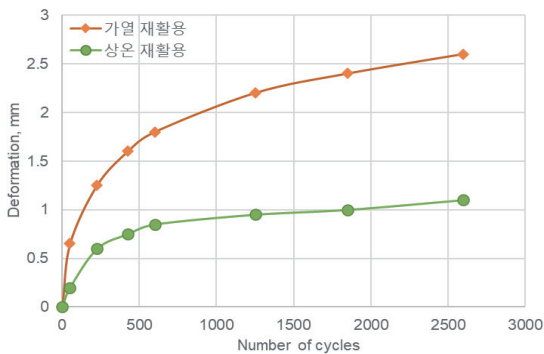


그림 9. 소성변형 저항성 품질 비교

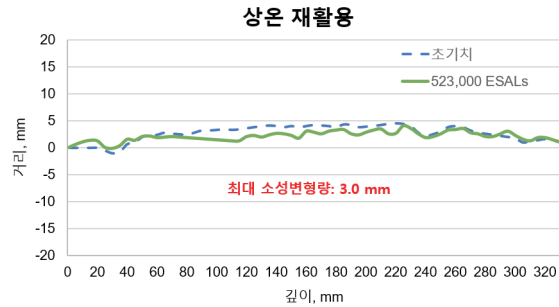
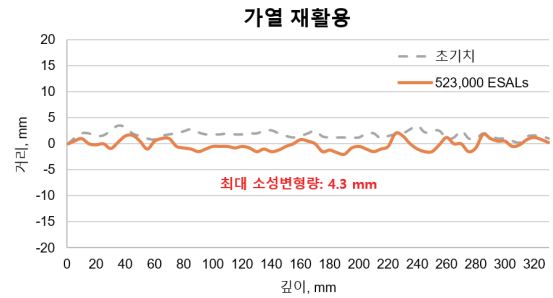


그림 10. APT 시험의 소성변형량 결과

장기공용성 평가를 하기 위하여 10년 동안의 공용수명을 모사할 수 있는 실험인 실대형 포장가속시험(APT)을 한양대학교의 APT 시험기를 사용하여 진행하였으며, 그 결과 순환 가열 혼합물과 순환 상온 혼합물 포장체 표면에 모두 손상이 없어 동등한 수준의 피로균열 저항성을 확보하였으며, 소성변형량 또한 차이가 미미하였다. 이와 같은 품질 시험 결과로 미루어보았을 때 순환 가열 아스팔트 혼합물과 본사의 유화 아스팔트 바인더를 사용한 순환 상온 아스팔트 혼합물의 품질이 거의 동등하게 평가됨을 알 수 있으며, 이 개발로 인하여 순환 가열 혼합물을 사용할 경우 발생하는 온실가스, 미세먼지 등의 유해물질, 고온의 환경에서 발생할 수 있는 위험에서 벗어나 친환경적이고 안전한 도로포장이 가능해질 것을 기대하고 있다.

4. 맺음말

전 세계적으로 지구온난화에 대응하기 위하여 많은 노력을 하고 있는 가운데 국내 도로 건설사업에서도 폐자재 재활용 및 오염물질 최소화에 대하여 많은 관심을 갖고 있다.

현재 국내에서는 이미 사용된 골재를 재활용하여 만든 폐아스콘을 사용하는 것을 법적으로 제도화되고 있고 사용량을 늘리기 위하여 폐아스콘 사용을 장려하고 있다. 이를 바탕으로 순환 가열, 중온, 상온 등의 재활용 혼합물이 생산되지만 순환 가열 혼합물이 주를 이룬다. 친환경을 추구하기 위하여 사용되는 순환 가열 혼합물은 제조공정에 의하여 다량의 환경오염 물질이 발생하는 문제점이 있으며, 이를 대체하기 위해 유화 아스팔트 바인더를 이용한 순환 상온 혼합물이 주목되고 있다.

하지만 순환 상온 혼합물은 기존 순환 가열 혼합물에 비하여 품질이 낮아 사용자들에게는 제품 선택에 있어 고민거리가

되고 있는 것이 현실이다. 하지만 이를 개선하여 기존 순환 가열 혼합물에 상응하는 혼합물을 사용한다면, 기존 가열 혼합물과 비교하였을 때 제조공정에서 발생하는 이산화탄소 및 온실가스, 포설과정에서 발생하는 유증기, 미세먼지, 유해물질 등이 거의 제로에 가까운 수치로 최소화될 것을 기대할 수 있다.

지금까지 당연시되었던 ‘뜨거운 아스팔트 도로포장’의 틀에서 벗어나 온실가스, 미세먼지 등 오염물질을 최소화하여 친환경적인 ‘시원한 아스팔트 도로포장’으로 인식되고 거듭나길 고대하고 있다.

참고문헌

1. 온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구 워크샵, 2017
- [1] A. Milad, A.M. Taib, A.G.F. Ahmeda, M. Solla, N.I.M. Yusoff, A review of the use of reclaimed asphalt pavement for road paving applications, *J Teknol*, 82 (2020) 35–45. <https://doi.org/10.11113/jt.v82.14320>.
- [2] Y. Luan, T. Ma, S. Wang, Y. Ma, G. Xu, M. Wu, Investigating mechanical performance and interface characteristics of cold recycled mixture: Promoting sustainable utilization of reclaimed asphalt pavement, *J Clean Prod*, 369 (2022) 133366. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133366>.
- [3] M. Amoori Kadhim, S. Al-Busaltan, A. Dulaimi, M. Sadique, H. al Nageim, M. Al-Kafaji, R. Al-Yasari, Developing a sustainable, post treated, half warm mix asphalt for structural surface layer, *Constr Build Mater*, 342 (2022) 127926. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127926>.
- [4] S. Jain, B. Singh, Cold mix asphalt: An overview, *J Clean Prod*, 280 (2021) 124378. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124378>.
- [5] S. Al-Busaltan, Hassan, A. Nageim, William Atherton, G. Sharples, Mechanical Properties of an Upgrading Cold-Mix Asphalt Using Waste Materials, 2012.
- [6] M. Sukhija, N. Saboo, A. Pani, Economic and environmental aspects of warm mix asphalt mixtures: A comparative analysis, *Transp Res D Transp Environ*, 109 (2022) 103355. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2022.103355>.
- [7] S. Mo, Y. Wang, F. Xiong, C. Ai, Effects of asphalt source and mixing temperature on the generated asphalt fumes, *J Hazard Mater*, 371 (2019) 342–351. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2019.03.025>.
- [8] F. Xiao, S. Yao, J. Wang, X. Li, S. Amir Khanian, A literature review on cold recycling technology of asphalt pavement, *Constr Build Mater*, 180 (2018) 579–604. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.06.006>.
- [9] B. Dolżycki, P. Jaskula, Review and evaluation of cold recycling with bitumen emulsion and cement for rehabilitation of old pavements, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6 (2019) 311–323. <https://doi.org/10.1016/J.JTTE.2019.02.002>.
- [10] AEMA / Asphalt Institute, Basic Asphalt Emulsion Manual, 4th Edition, Asphalt Institute Inc., 2008.
- [11] L. Kiihni, A.F. Brahm, Developing a particle size specification for asphalt emulsion, *Constr Build Mater*, 293 (2021) 123414. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123414>.
- [12] H.K. Shanbara, A. Dulaimi, T. Al-Mansoori, S. Al-Busaltan, M. Herez, M. Sadique, T. Abdel-Wahed, The future of eco-friendly cold mix asphalt, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149 (2021) 111318. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111318>.
- [13] O. Daniel, S. Ahmed, A. Ayman, M. Yusuf, D.C. J. L. Wade, Economic and environmental cost analysis of cold in-place recycling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (2021) 04020496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003610](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003610).
- [14] M. Ronald, F.P. Luis, Asphalt emulsions formulation: State-of-the-art and dependency of formulation on emulsions properties, *Constr Build Mater*, 123 (2016) 162–173. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.06.129>.
- [15] J. Ouyang, Y. Meng, Quantitative effect of droplet size and emulsion viscosity on the storage stability of asphalt emulsion, *Constr Build Mater*, 342 (2022) 127994. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127994>.
- [16] C. Sangiorgi, P. Tataranni, A. Simone, V. Vignali, C. Lantieri, G. Dondi, A laboratory and field evaluation of Cold Recycled Mixture for base layer entirely made with Reclaimed Asphalt Pavement, *Constr Build Mater*, 138 (2017) 232–239. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.004>.
- [17] W. Yang, J. Ouyang, Y. Meng, B. Han, Y. Sha, Effect of curing and compaction on volumetric and mechanical properties of cold-recycled mixture with asphalt emulsion under different cement contents, *Constr Build Mater*, 297 (2021) 123699. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123699>.
- [18] A. Stimilli, G. Ferrotti, A. Graziani, F. Canestrari, Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt, *Road Materials and Pavement Design*, 14 (2013) 149–161. <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.774752>.
- [19] H.Y. Liu, Y.Q. Jia, Study on the action mechanism of bitumen emulsion and aggregate, *Adv Mat Res*, 250–253 (2011) 3039–3043. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.3039>.
- [20] C.M. Nwakaire, S.P. Yap, C.W. Yuen, C.C. Onn, S. Koting, A.M. Babalghaith, Laboratory study on recycled concrete aggregate based asphalt mixtures for sustainable flexible pavement surfacing, *J Clean Prod*, 262 (2020) 121462. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121462>.

담당 편집위원 : 이병재(대전대학교)