
Global Report

도로건설에 사용할 수 있는 재활용재

1. 개요
2. 소개
3. 도로건설에 사용할 수 있는 폐재료와 부산물
4. 결론

1. 개요

도로 산업의 진화 및 도로교토의 성장과 더불어 건설재료도 진화해 왔으며 많은 새로운 독창적인 재료들이 쓰이게 되었다. 그렇게 된 이유들 중에는 도로 산업에 쓰일 수 있는 기존 천연재료의 고갈과 그 외 재료 공급원들이 위태로운 환경에 처해 있다는 평가 경향 등이 작용한 것이었다. 이러한 재료에 포함될 수 있는 것으로 제2차적, 제3차적인 몇 가지 재료들이 있는데 이러한 폐부산물과 재료들이 현장에서 활용과 실행을 위해 조사되고 평가되며 분석되었다. 재활용재의 특성에 따라 종류별로 결과는 다양했다. 일부 재활용재는 다른 것들에 보다 바람직한 특성을 가진 것으로 입증되었으며 현장에서 만족스런 결과를 가져다주었다. 그러나 실험결과와 현장 관찰 등을 기반으로 하였지만 보다 심도 있는 연구가 있어야만 할 것으로 판명된 이러한 재료의 사용에 관한 많은 우려들도 있다.

재생 아스팔트 골재(reclaimed asphalt pavement, RAP), 재활용 콘크리트 골재, 플라스틱 폐기물, 폐타이어 분말, 광산 폐기물, 재활용 분쇄유리, 주물사(foundry sand), 플라이애시, 바텀애시(bottom ash) 및 폰드애시(pond ash)와 같은 석탄연소제품, 스틸슬래그, 오일샌드, 오일 셰일 샌드(oil shale sand), 라테라이트성 토양(lateritic soil) 등이 이러한 재료들의 부류이다. 천연자원과 귀중한 자원의 획기적인 보존이 도로건설에 2차적, 3차적 재료들을 사용함으로써 달성될 수 있을 것이란 믿음이 깊어지고 있다. 그럼에도 불구하고 포장작업과 관련한 학계, 업계 및 관계자들 간에 긴밀한 협력이 없다면 여러 성능관련 이슈들은 해결되지 않을 것이며 그대로 남아있게 될 것이다. 이 보고서는 업계에서 현재 쓰이고 있는 가장 실용적인 재활용 재료에 관한 관련 보고서를 제시하고 도로 산업에서 비교적 우수한 재활용재의 사용에 관한 귀중한 아이디어 개발을 목표로 한다.

2. 소개

도로 산업의 진화와 도로상 자동차의 엄청난 급증은 장기적인 서비스 수명의 보다 나은 도로를 건설하는 모든 실행 가능한 가용자원 활용을 촉진하는 근거가 되어왔다. 도로 건설에 있어서 비전통적 건설재료를 포함하게 된 것은 80년 대 부터 시작되었는데 역청, 쇄석 및 순환골재 혼합물과 같은 기존의 원천재료가 부족하고서 부터였다. 심각한 천연자원의 고갈로 인해 골재 채취는 환경 및 경제적 측면에 극심한 파괴를 불러일으키는 원인이 되어왔다. 더불어 도로건설에서 폐기물이 엄청나게 생겨나는 비율도 다양한 부산물의 사용가능성을 조사하는 노력들을 뒷받침하는 계기가 되었다. 현재 가장 많이 쓰이고 있는 재활용재에는 플라스틱 폐기물, 폐타이어, 주물사, 바텀애시 및 플라이애시, 오일샌드, 대리석분, 재활용 콘크리트 골재, 재생 아스팔트 포장재, 강재슬래그 등이 있다. 이러한 부문에 있어서 많은 연구가 이루어져왔다. 그리고 아직도 진행 중인 연구들이 있으며 이러한 재활용재를 보다 잘 활용하기 위한 조사와 현장연구 들이 계속되고 있다. 천연 원료의 대체재로서 폐기물 사용에 따라 얻어지는 편익, 유망한 연구 권고사항 및 실질적인 결과들이 있어 왔지만 다른 한편으론 환경문제 우려와 그러한 재료를 실제 현장에 적용한 경험 부족 때문에 재활용재의 채택을 방해하는 경우들도 많이 있어 왔다. 어떤 재활용재

료 및 폐부산물은 다른 일반재료보다 상당히 두드러진 특성을 가지고 있으며 일부 다른 건설재료에 포함되거나 적절히 특성을 발휘하도록 한다면 상당한 이점을 얻을 수 있을 것이다.

재활용재(Recycling materials)는 도로건설의 표층에서부터 하부층에 이르기 까지 다양한 층, 다양한 구성재로 활용되어질 수 있는 것으로 알려져 왔다. 재료의 종류 및 사용량과 관련 적절하고 실행 가능한 활용으로 이어지도록 어떤 재활용 부산물의 거동을 적절히 이해하고 건설재료에 포함하는 경우에 관한 영향을 조사하는 것은 꼭 필요한 것이다.

3. 도로건설에 사용할 수 있는 폐재료와 부산물

3.1 소개

개발도상국 및 선진국 모두에서 도로건설 분야에 폐기물을 활용하는 중추적인 목표는 매립지 제공과 이러한 폐기물에 대한 규정을 수립하는 등의 당국의 부담을 경감하며, 보다 나은 도로 서비스 및 승차품질 향상을 위한 업계의 헌신을 재확인하도록 환경상 천연재료를 가공 처리함에 따른 유해한 영향을 줄이는 것이다. 게다가 천연자원의 고갈도 활용을 뒷받침하는 하나의 근거가 된다. 일부 실험 및 연구들이 도로건설 분야에서 폐기물을 포함할 가능성을 조사하는데 기여하였다. 많은 연구가 포장 구조물에 이러한 폐기물의 일부분을 재사용 및 재활용에 성공적인 것으로 입증되어왔으며 일부 연구는 여전히 포장공사에 폐기물 재활용으로 얻어질 수 있는 것에 관한 상당한 연구들이 이루어지고 있다. 최대한의 유익한 방법으로 일부 폐기물 활용에 대한 심도 있는 분석을 위한 자금부족과 일부 논리적이고 설득력이 있는 지식으로 인해 폐기물 문제는 세계의 여러 지역에 있는 정부기관 및 교통당사국에 대한 핵심적인 문제이다. 국제적인 협력은 건설 분야에 실행 가능한 재활용재 활용을 통해 천연자원을 보존하고 온실가스 배출 완화하며 그러한 폐기물을 사용하는 접근방법을 평가하는데 집중함으로써 환경을 보호하는 핵심요소이다.

3.2 도로건설에 사용하는 재활용재의 유형

3.2.1 플라스틱 폐기물(Plastic Wastes)

대부분의 플라스틱 폐기물은 폴리머가 풍부하다. 이 재료는 고온배합 아스팔트(hot-mix asphalt - HMA) 포장 골재혼합물의 첨가제로서 쓰이거나 또는 지반 안정제로 사용될 수 있다. 또한 이 재료는 건식법으로는 골재로서 그리고 습식법으로는 바인더 중량의 0.25-0.5% 비율의 알갱이로서 바인더에 첨가된다. HDPE(고밀도 폴리에틸렌)는 HMA(고온배합 아스팔트) 역학적 특성을 향상시키는데 있어서 LDPE보다 선호된다. 첨가되는 플라스틱의 비율이 커지면 커질수록 역청은 온도에 덜 민감하게 되며 박리저항성(stripping resistance)이 향상된다. 건식방법으로 LDPE 30%가 배합물의 안정성을 개선하면서 인장강도가 유지되었다. HMA에 HDPE를 사용한 경우 변형 저항성이 개선되고, 안정성이 커지며 유동값(low flow value)이 작아지는 것으로 나타났다. HMA의 허용성능(acceptable performance)을 증대시키면서

비용을 줄일 수 있는 최적의 HDPE 비율은 약 5% 정도로 나타났다. HDPE가 0.25% 첨가되는 경우 노반의 특성을 개선하는 것으로 드러났다. 0.25% 이상 플라스틱을 함유시키면 안정성, 변형 저항성, 피로 및 무결점 등의 측면에서 HMA 성능을 향상시키는 결과를 나타내었다. 아르헨티나에서는 박편의 PE 2% 함유시키는 경우 최적의 배합물 성능을 발휘하는 것으로 입증되었다. 나이지리아에서는 60/70 PEN은 플라스틱 병에서 얻은 폴리에틸렌 테레프탈레이트를 가지고 조사하였는데 혼합물의 특성이 대폭 향상되었다. 플라스틱 폐기물에서 추출된 재활용 플라스틱 핀(Recycled plastic pins - RPPs)은 제방 안정화에 활용되어왔다. 플라스틱에서 추출된 왁스 혼합물은 밴쿠버에서 사용되었다. 이 혼합물은 재활용 가능한 플라스틱을 왁스물질로 정제하여 생산된다. 2012년에 새롭게 수정된 혼합물이 제조된 혼합물의 품질을 평가하기 위하여 밴쿠버의 작은 구역에서 포괄적 시험을 실시한 후 도로에 쓰이게 되었다. 결과적으로 혼합 온도를 낮추는 등 탄소 발자국을 최소화하는 장점들도 있다. 반대자들은 CIPR과 발포 아스팔트가 플라스틱 추출 중온형 아스팔트 혼합물에 비하여 값이 저렴하고 효과적이며 유효하다는 것을 믿는다. 종합적인 평가가 수행될 때까지 의문의 여지가 있는 중온형 플라스틱 개질 아스팔트 혼합물의 장기적인 성능은 우려사항이다.

3.2.2 재활용 아스팔트 쉐글(Recycled Asphalt Shingles)

아스팔트 쉐글은 유리섬유(fiberglass) 쉐글과 종이(organic) 쉐글 이렇게 두 종류로 분류된다. 두 종류 모두 평균 총중량의 30% 정도 아스팔트 시멘트를 첨가하여 다양한 비율의 광섬유(mineral fibres), 광물성 채움재(mineral fillers) 및 코팅된 세라믹입자(hard rock granules - ultra-tiny particles ceramic-coated granule)로 구성되어 있다. 캐나다의 온타리오주에서는 종이 쉐글(organic shingles)이 최근 생산되게 되었으며 보통 HMA로 사용되는 것 보다 더 견고한 아스팔트 계의 것이 고품질의 골재입자로 덮혀 있다. 그러나 각 제조업체는 제조되는 아스팔트 쉐글을 비교적 다양한 구성성분으로 제작하고 있다. 유리섬유 쉐글은 종이 쉐글에 비하여 아스팔트 시멘트 비율이 약 15% 적어서 값이 저렴하며 종이 쉐글보다 선호되는 편이다. 재활용 아스팔트 쉐글의 아스팔트 시멘트 함유량은 19%~31%로 다양하다. 도로 건설에 아스팔트 쉐글을 활용하는 목적은 천연 바인더(virgin binder)의 양을 줄이려는 것이다.

제조 폐기물 아스팔트(manufacture scrap) 쉐글 및 파편 아스팔트 쉐글(tear-offs scrap shingles)은 일명 공장스크랩(post manufacturing) 쉐글 또는 소비전(pre-consumer) 및 소비 후(post-consumer) 쉐글 등으로 각각 불린다. 아스팔트 시멘트의 함유 비율은 본 연구에 사용된 다양한 재활용 아스팔트 쉐글 별로 14.6~36.7%에 이를 정도로 다양하였다. 파편 아스팔트 쉐글로 만든 아스팔트 바인더는 열화 및 환경노출 문제로 인해 소비전 쉐글로 만든 바인더에 비해 더 견고한 것으로 고려된다. 인장강도, 소성변형 저항성(rutting resistance), 습윤 피해 저항성등도 개선되는 것으로 알려져 있다. 그러나 피로 및 온도균열 저항성에 대해 초점이 맞춰져야 한다. 재활용 아스팔트 쉐글의 사용은 성능 관점에서 혼합물 총중량의 5% 비율로 제한된다. 그 이유는 가열 아스팔트 혼합물(hot mix asphalt mixture)에 사용되는 원래 신규 아스팔트 바인더에 비하여 아주 점성이 높은 것이 특징인 에어 블로운 아스팔트 바인더로만 들어지기 때문이다.

RAS(Recycled Asphalt Shingles - 재생 아스팔트 쉐글)와 RAP(Reclaimed Asphalt Pavement - 재생

아스팔트 골재)를 쓰는 것은 아스팔트 포장의 저온성능에 악영향을 주는 것으로 입증된 재료의 노화와 취성을 발생시키는 아스팔트 포장이란 몇 가지 우려사항들이 있다. RAS 수정 혼합물은 저온에서 성능이 떨어지는 것으로 입증되어 OGFC(Open-Grade Friction Course - 개립도 마모층) 혼합물에 대한 이러한 문제에 대해 본 연구는 추가 연구조사를 제안하였다.

3.2.3 재생 아스팔트 혼합물(RAP - Reclaimed Asphalt Pavement)

온타리오 주에서 고온배합 아스팔트(hot-mix asphalt, HMA)와 기층재료에 재생 아스팔트 혼합물(RAP) 활용 비율은 2004년과 2006년 사이에 사용된 총 재활용재의 8% 미만인 것으로 알려져 왔다. RAP의 특징은 골재재료의 종류와 특성, 바인더 함유량, 바인더 강성도(binder stiffness)에 따라 소스별로 다양하다. 신규 아스팔트 혼합물에서 RAP의 함유량은 HMA의 성능에 영향을 미치는 중추적 요인으로 고려된다. 신규 재료로 만들어진 아스팔트 포장의 성능은 25% RAP의 중간급 보다 낮은 것으로 이루어진 것만큼 만족스러운 것으로 알려져 왔다. 기술적으로 아스팔트 혼합물의 바인더 등급에 대한 수정 특히 저온급의 경우 RAP가 혼합물 총중량의 15% 미만으로 사용될 경우 크게 우려할 필요는 없다. 신규 아스팔트 포장의 성능은 25% RAP의 중간급보다 낮은 것으로 이루어진 만큼 적절한 것으로 알려져 왔다. 바인더 등급에서 20% 이상의 RAP 비율을 사용한다는 의미는 그 비율이 20% 미만일 경우의 것 보다 상당히 더 크다. 혼합물에 15~25%의 RAP는 섭씨 6도 온도 내외에서 등급 감소의 수정을 필요로 하는 것이 문헌에 나타나 있다. 그러나 3% RAS와 평균 20% RAP의 조합이 사용될 경우 저온급의 아스팔트 시멘트는 섭씨 6도까지 올라가고 아스팔트 시멘트의 저온성능급이 감소하는 것으로 결과가 제시되었다. MTO 시방요건에 따른 HMA 용도의 RAP 최대 허용율은 30%이다.

3.2.4 페타이어 분말(Crumb Rubber "Scrap tires)

습식으로 가공되었던 또는 건식으로 가공되었던 간에 아스팔트 표층용으로 사용된 페타이어 분말은 미끄러짐 방지 개선 이외에도 여러 가지 다른 장점들이 있다. 또한 이 페타이어 분말은 포장층 하부에 발생하는 바퀴자국 패임 등의 소성변형(rutting)을 방지하고 통행하중에 잘 견디게 하는 높은 전단강도를 가진 아스팔트 혼합물을 제공하기도 한다. 또한 동절기 동결융해가 반복되는 동안 표층하부에 페타이어 분말이 있으면 동결심도의 감소에 중요한 역할을 한다. 도로 공사용으로 페타이어 분말을 사용하는 또 다른 장점에는 감온비 뿐만 아니라 소성변형 방지 및 내피로성(fatigue resistance), 안정성 개선과 유동값(flow value) 감소(페타이어 분말 10% 까지) 그리고 박리저항성 개선 등이 있다. 30% 비율까지 아스팔트 바인더에 첨가할 경우 내후성 및 박리저항성과 같은 특성에 큰 진전이 이루어졌다.

3.2.5 주물사(Foundry sands)

주물사는 철 및 비철금속 주조산업의 부산물이며 균일한 크기와 매우 청결한 고품질의 실리카로 구성된 미세입자로 분류된다. 문헌에 따르면 모래는 더 이상 사용할 수 없을 만큼 여러 차례 주물공장에서 재사용되어지며 사용 후에는 폐주물사로 처리된다고 한다. 이 폐주물사가 도로공사용으로 고려될 수 있다

는 것이다. 이 폐주물사는 HMA, 기층재료, 제방 및 유동성이 있는 뒤편재로 활용되어져 왔다. 이 폐주물사에는 점토분의 함량이 크기 때문에 수위가 높은 곳이나 배수가 불량한 곳에는 적절하지 않다. 비철금속 주조는 다량의 중금속 성분이 있기 때문에 HMA용으로는 권장되지 않는다. 캐나다 온타리오 138-5에서 대부분의 주조용 모래는 재사용하기 위해 주물공장에 돌려보내지고 있으며 수분유입으로 발생하는 손상문제로 인해 아스팔트 혼합재로 사용하는 최대비율은 15%로 제한되어 있다. 그러나 이 재료는 일부 기술적이고 환경적인 영향들이 알려졌기 때문에 더 이상 베이스/서브베이스용으로 사용되는 것이 권장되지 않는다. 주물사 수정 서브베이스에 첨가되는 시멘트에 대한 비율은 5.5%가 권장되며 이 경우 만족스러운 결과가 초래되었다. 또 다른 조사결과에 따르면 베이스/서브베이스에 5~15%를 첨가할 경우 OMC 또는 MDD 모두 변경되지 않는 것으로 나타났다. 그러나 회복탄성계수(resilient modulus)는 베이스 혼합재 시험결과에 비해 훨씬 적었으며 수정된 베이스/서브베이스 재료의 성능에 관한 추가 조사가 이루어져야 할 것이다. CIPR 혼합재에서 주물사는 바텀애쉬(bottom ash)에 비해 주물사로 혼합한 폼드아스팔트 혼합물(foamed asphalt mixture)의 강도, 강성 및 소성변형저항성(rutting resistance)이 떨어짐에도 불구하고 CIPR 혼합재의 천연자갈을 대체할 가능성이 있는 큰 잠재력이 있는 것으로 알려졌다.

3.2.6 석탄연소제품 및 시멘트 보충재

플라이애시, 바텀애시/보일러 슬래그, 폰드애시(pond ash), 오일샌드, 석유로 오염된 토양(petroleum-contaminated soil), 오일 세일애시 및 브레이크슈 파인(Brake Shoes Fine) 등이 이러한 부류의 재료에 속한다. 고온배합아스팔트(HMA) 속에 광물질 충전재(filler)가 쓰일 수 있는 것처럼 플라이애시에 적절한 비율의 중금속(heavy metals) 및 극소미립자들이 쓰일 수 있다. 이러한 재료는 칼슘 함량이 높은 C 타입이거나 칼슘 함유량을 줄인 E 타입일 수도 있다. 노반의 특성(Subgrade properties)은 2~12%의 플라이애시를 첨가하여 개선되었다. CBR과 회복탄력성값(resiliency value)을 고려하여 실험실과 현장 시험결과를 토대로 베이스 재료(base material)에 RAP재료와 함께 사용되는 타입 C의 비율은 10% 정도인 것으로 나타났다. 신규골재 20%와 함께 RAP 수정 배합에 플라이애시 40%를 첨가한다면 경량포장의 서브베이스와 베이스 층에 적절할 것으로 판단된다. CIPR 배합에 1~3%의 석회와 시멘트가 사용될 수 있는 것에 비하여 플라이애시는 8~12% 비율까지 사용될 수 있고 약 25%의 절감을 이룰 수 있다. 바람직한 압축강도를 발현하기 위해 12% 시멘트가운데 25% 비율이 유지되어야 한다.

바텀애시/보일러 슬래그는 뾰족한 유리 같은 표면을 가지고 있어서 미끄러짐을 방지할 수 있는 장점을 가지고 있다. 용광로에서 얻어진 애시는 노(furnace) 바텀애시(bottom ash)라고 한다. 문헌에 따르면 플라이애시는 도로공사용으로 바텀애시 보다 선호되는 것으로 알려져 있다. 그러나 바텀애시의 사용은 회복탄력성(resiliency)을 즉각적으로 증가시키기 위해서 플라이애시의 비율을 늘려야 한다. Mississauga와 Brampton은 매년 3만 톤의 바텀애시와 3천톤의 플라이애시를 생산한다. 고온배합 아스팔트(HMA)에 쓰이는 양은 단지 10%에 불과하다. 이 문제를 해결하기 위해 제안된 방법은 침출문제 우려가 있었고 그것을 입증해야 하는 문제가 있었다. 입증된 애시는 유리 같은 질감을 가지고 있었으며 골재처럼 아스팔트 포장에 함유되어지는 것이다. 이것은 바람직한 성능을 얻는데 요구되는 아스팔트 시멘트의 양을 크

게 줄일 수 있는 것으로 물을 싫어하는 재료이다. 바텀애시를 첨가하면 인장강도와 변형저항성이 향상되지만 스트리핑(stripping characteristics) 방지성능을 평가하기 위해 추가적인 분석이 요구된다.

폰드 애시(pond ash)는 석호에서 쏟아져 나온 물과 애시(ash)로 이루어진 슬러리이며 그 특징은 비결정질의 재료이다. 특성을 개선하기 위하여 석회 및 섬유와 같은 다른 첨가제를 넣어 수정되는 경우가 아주 흔하다. 애시와 혼합되는 섬유와 석회의 비율이 증가함에 따라 기층(base course)과 노상층(subgrade layers)에 부과되는 수직 압축변형과 수평 인장변형은 감소되었다. 따라서 포장의 강성은 섬유와 석회의 첨가비율에 따라 증가되었다. 즉 노반재료의 CBR 값에 관한 폰드애시 사용의 영향을 좀 더 조사하는 것이 옳은 일이라고 판단된다.

오일, 타르 또는 역청질 모래는 원유를 정제하는 과정에서 나오는 오일샌드의 부산물이며 유타주에서 13%에 달하는 고점도 아스팔트 시멘트와 더불어 모래, 점토, 물의 침전혼합물처럼 자연적으로 축적된다. 세계에서 가장 큰 오일샌드 처리원은 앨버타주에 위치해 있다. 미국에서 퇴적물의 크기와 추출공정을 위한 물의 이용가능성으로 인해 퇴적물의 조성상태가 이 오일샌드를 이용하는데 방해가 되는 장애물 중 하나이다. 캐나다에서 이 재료를 처음 사용한 것은 1913년으로 거슬러 올라간다. Gap HMA에 사용되는 경우 결과는 소성변형저항성(rutting resistance)이 저하되고 혼합온도는 섭씨 104도 정도로 기존 HMA의 온도보다 낮은 것으로 나타났다. HMA에 오일샌드를 함유시키는 것에 대한 추가적이고 포괄적인 분석이 요구된다.

오일 셰일 제조과정에서 나오는 애시는 아스팔트 시멘트의 유동성(rheology)을 향상시키는 유용한 첨가제로 분류되고 있다. DSR(dynamic shear rheometer)과 회전점도시험(rotational viscometer test) 방법으로 0~20%의 범위 내에서 5%씩 증가시켜나갈 경우에 대한 조사가 시행되었다. 전단탄성계수(Shear modulus)는 사용되는 비율이 증가함에 따라 커졌다. 그러나 수정된 바인더의 탄성거동은 위상각 결과(phase angles results)에 표시된 바와 같이 떨어졌다. 따라서 셰일 애시는 신규 바인더(virgin binder)의 저온 거동에 영향을 미치지 않았다. 다른 바인더의 그레이드 조사가 제안되었으며 요구되는 저온 성능에 관한 사항도 추가적으로 분석되었다.

자동차업계에서 나오는 브레이크 슈즈 분말(Brakes shoes dust)을 0~7.5% 범위 내에서 2.5%씩 증가시켜 나아갈 때 HMA의 충전재로서의 특성에 대한 조사가 중국에서 이루어졌다. 동탄성계수(Dynamic modulus)는 섭씨 40도의 고온에서 상승하고 섭씨 5도의 저온에서 감소하는 것으로 입증되었다. IDT에 표시된 바와 같이 2.5% 비율에서만 인장강도가 개선되었다. 변형저항성이 파악되지 않았다는 사실에도 불구하고 HMA의 충전재로서 브레이크 슈즈 분말 2.5%를 사용하는 것에 대한 결론이 내려졌다.

4. 결론

도로건설에 재활용재를 사용하는 것에 관한 모든 연구가 잠재력이 있다는 사실에도 불구하고 보다 나은 도로건설과 천연자원 보존에 관련된 사안들에 대한 집중적인 조사와 평가가 필요하다는 많은 우려와 지

식격차가 있다. 본 보고서에서 다루어지지 않았지만 광산 폐기물처럼 도로 건설을 위해 사용 잠재력이 있는 다른 재활용재들에 대한 관심도 강조되어야 한다.