

산업부산물의 도로포장에의 재활용

김 주 원*

1. 머리말

1990년대 후반기에 들어서 엄청난 양의 산업폐기물이 각종 산업활동으로부터 발생하여 전세계적으로 이의 처리에 심혈을 기울이고 있는 실정이다. 국내에서도 한해에 약 4천만 m³의 건설폐자재가 발생하고 있어 이러한 건설폐자재와 쓰레기가 지속적으로 증가함에 따라 대도시 주변의 매립장은 그 한계에 도달하고 있으며, 새로운 매립장의 물색도 경제 및 환경적인 제약으로 인하여 어려운 실정이다. 이러한 현실에서 산업부산물의 효율적인 처리와 재활용에 대한 관심이 세계적으로 증대하고 있다. 최근에는 산업부산물의 재활용 문제가 토질환경분야와 도로건설분야에서 큰 비중을 차지하며 연구되고 있고 일부는 좋은 성과도 얻고 있다.

여기에서는 미국에서의 재활용분야를 살펴보고 국내의 실태를 기술한다.

2. 미국의 산업부산물 재활용

2.1 재활용 배경과 노력

미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)에 의하면 2000년대에는 연간 약 2억 톤의 산업부산물이 발생할 것으로 추정하고 있다. 이러

한 부산물은 주로 매립에 의해 처리되고 있으나 매립장의 한계로 인해 재활용이 가능한 부산물, 즉 폐자원의 재활용에 각 주의 교통국에서 관심을 가지고 이에 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 연방법, 주정부법에 의해 이러한 부산물의 일정비율 사용이 의무화되고 있으며, 폐자원의 활용과 연계하여 주목할만한 미국의 연방법으로는 1991년에 통과된 ISTEA(The Intermodal Surface Transportation Efficiency Act)의 Section 1038을 들 수 있으며, 이 법의 주된 내용은 연방정부의 지원을 받아 건설되는 도로포장에는 1998년부터 총공사비의 20%의 페타이어를 의무적으로 사용하도록 규정한 것이다. 따라서 현재 미국 도로국에서는 관련 연구과제를 선정하고 재활용이 가능한 산업부산물에 대한 각종 실내 및 현장 시험을 실시하여 많은 성과가 이루어지고 있다.

2.2 산업부산물의 종류와 실태

(1) 페타이어

미국에서는 매년 약 2억 8,500만 개의 타이어가 버려진다. 이 중 약 5,500만 개는 재처리되거나 재사용되며, 약 4,200만 개가 발전용 연료나 아스팔트 혼합물용 첨가제와 같은 여러 가지 대체용 도로 전환된다. 나머지 1억 8,800만 개의 타이어가 저장, 매립 또는 불법 투기된다.

* 우리 학회 회장

타이어에서 얻어지는 고무분말(crumb rubber)은 실온에서 분쇄하거나 극저온에서 분쇄하여 얻는다. 아스팔트 혼합물에 고무분말을 첨가하여 아스팔트를 개질하는 기술은 30년 전부터 개발되었다. 아스팔트 혼합물에 고무분말을 사용하는 방법은 일반적으로 습식방식과 건식방식이라고 일컬어지는 두 가지가 있다.

① 습식방식(Wet Process)

습식방식은 아스팔트 시멘트에 2mm 이하의 고무분말을 아스팔트에 대한 중량비로 18~26%를 190~220°C의 높은 온도에서 1~2시간 혼합, 반응시켜 고무-아스팔트를 만들어 사용하는 것이다. 습식방식을 처음 활용한 기술을 “맥도널드 방식(McDonald Process)”이라 부른다. 이 방식은 응력흡수막(stress absorbing membrane, SAM)과 응력흡수중간층(stress absorbing membrane interlayer, SAMI)을 시공하거나, 균열채움재를 제조하는 데에도 사용된다. SAM은 바인더로써 고무-아스팔트를 사용하는 시일코트이다. 아스팔트 혼합물층 사이에 하나의 층으로 SAM을 포설할 때 이것을 SAMI라 부른다. 1975년부터 고무-아스팔트는 아스팔트 혼합물의 바인더로 사용되기 시작하였으며 지금까지 개립도, 밀입도, 갭입도 3종류의 아스팔트 혼합물이 사용되고 있다. 이 방식의 주된 장점은 아스팔트의 점성과 내구성을 증가시키는 것이다.

② 건식방식(Dry Process)

이 방식은 아스팔트를 골재에 투입하기 전에 골재에 대한 중량비로 약 3~5%의 굵은 고무입자(1.6~6.4mm 크기)를 혼합한다. 고무입자를 골재의 일부로 수용하기 위해 천연골재는 갭입도로 한다. 이 방식의 첫 번째 시공기술을 “플러스라이드 방식(PlusRide Process)”이라 부른다. 고무로 개질한 혼합물의 높은 탄성을 이용하여 포장면으

로부터 쉽게 결빙을 제거하는 것을 목표로 하였다.

위의 맥도널드 방식과 플러스라이드 방식은 특허방식이었으나 현재는 특허기간이 끝났으며, 최근에는 일반 입도에 고무분말을 첨가하기도 한다.

(2) 페유리

분쇄한 페유리를 아스팔트 혼합물에 넣은 것을 때로는 “글라스팔트(glasphalt)”라 부른다. 1970년대 초에 미국과 캐나다에서 몇 가지 실내실험과 현장평가가 이루어져 다음과 같은 결론을 내놓고 있는 있으나 주로 시내도로와 드라이브 도로, 주차장에 포설되었다.

- 스파이크 타이어 사용시 유리가 파쇄되어 라벨링이 발생하고, 혼합물의 생산가격이 상승한다.
- 라벨링 문제를 줄이기 위하여 글라스팔트는 기층에만 사용한다.
- 유리의 최대치수는 9.5mm 이하이어야 하고, 박리를 방지하기 위하여 소석회를 함께 사용한다.
- 깬모래의 15%를 유리입자로 대체하였을 때 마찰안정도는 15~20% 감소하고, 간접인장강도는 20%까지 감소한다.

(3) 지붕재(roofing shingle)

미국에서는 연간 약 9천만 개의 지붕재가 생산되며, 연간 1천만 톤의 폐지붕재가 발생하여 연간 버려지는 페타이어의 양보다 많은 양이다. 지붕재 폐기물에는 아스팔트가 36%, 단단한 2mm 이하의 돌가루가 22%, 채움재가 8%, 그리고 잡재료가 약간 들어있는 것으로 분석된다. 주차장 포장에 지붕재를 혼합하여 성공적으로 시공된 예가 있는데 이 경우 지붕재는 12mm 이하로 분쇄하여 약 5% 혼합하며, 아스팔트 혼합물의 가격을 줄일 수 있었다.

(4) 슬래그

슬래그는 제철산업의 부산물로 얻어지는데 제강슬래그와 고로슬래그로 대별된다. 제강슬래그는 공학적 물성도 우수하여 고속도로의 표층, 기층, 보조기층 등의 도로포장재료로써 활용되고 있다. 고로슬래그의 장점은 다짐시 큰 내부마찰각, 탁월한 배수효과, 동결융해 방지 등을 들 수 있다.

슬래그의 포장재료로의 사용은 경제적, 기술적, 환경적으로 문제가 없는 것으로 보고되고 있으나, 제강슬래그는 팽창성이 잠재적인 문제점이 될 수 있으며, 고로슬래그는 장기적으로 불 때 침출수에 대한 고려가 필요하다.

고로슬래그는 도로포장에 보편적으로 이용되고 있는 폐기물로 여러 교통국에서 자체 시방서를 만들어 사용하고 있다.

제강슬래그 역시 널리 사용되는 폐자원중의 하나이다. 다만, 추운 지방에서의 사용은 크랙이 발생할 수 있어 그 사용이 고로슬래그보다는 적은 편이다.

(5) 주물사(鑄物砂)

미국주물학회(America Foundrymen's Society, AFS)에서 1980년 말부터 1990년 초에 걸쳐 폐주물사를 콘크리트 제품이나 아스팔트포장 등에 사용하기 위한 연구가 진행되었다. AFS에서의 연구는 폐주물사를 재생하여 주물사로 사용하는 외에 다른 용도로 활용하기 위한 것에 초점을 맞추고

있다. 즉, AFS의 수행과제는 "Alternate Utilization of Foundry Waste Sand"라 불리었는데 시멘트 재료, 콘크리트용 재료, 아스팔트 콘크리트용 재료, 성토재료 등의 다양한 분야에 대한 용도에 관심을 두고 진행한 것이다.

일반 모래와 폐주물사를 이용한 아스팔트 콘크리트의 특성치를 시험한 결과 일반 밀입도 혼합물과 비슷한 안정도와 물성치를 나타내었다. 다만, 아스팔트 콘크리트용 골재로 폐주물사를 이용하기 위해서는 38미크론 이하의 세립분을 가능한 한 제거하고 사용하는 것이 좋다는 결론을 내렸다.

3. 우리나라의 산업부산물의 포장에 이용

3.1 폐타이어

(1) 발생 및 처리 현황

국내의 자동차 보유대수는 1천만 대를 넘었다. 이로 인해 폐타이어의 발생량도 급격히 증가하여 연간 2천만 개나 되고 있어 이의 처리도 중요한 과제로 되고 있다.

표 1은 최근 3년간의 폐타이어의 발생량과 처리 현황을 나타내고 있는데 이 표에서 보는 바와 같이 많은 양이 처리되지 않고 있다. 이 가운데 도로포장용으로는 고무분말로 가공하여 아스팔트 개질재의 첨가재로 활용하는 기술이 국내에서 활용되고 있다. 연간 150만~220만 개의 타이어가

표 1. 폐타이어의 발생 및 처리 현황 단위: 1,000개 (%)

발생량		1997년	1998년	1999년
처리 방법 별	가공이용(재생타이어, 분말, 밧줄)	3,003 (28.5)	3,711 (27.2)	2,722 (25.2)
	열 이용(시멘트공장, 기타 소각)	1,338 (12.8)	4,054 (29.8)	6,400 (59.2)
	원형이용(수출, 토목공사, 매립장)	6,181 (58.7)	5,861 (43.0)	1,694 (15.6)
합 계		10,522 (100)	13,626 (100)	10,816 (100)

고무분말로 가공되며, 재활용되는 타이어의 14~16%의 비율이다.

(2) CRM 아스팔트의 효과

미국에서는 30년 전부터 연구가 이루어져 많은 시공실적이 있는 기술로 국내에서도 이 기술을 도입하고, 일부 개량하여 건설교통부의 신기술로 지정 받아 여러 곳에 시공실적이 있다. 페타이어 고무분말을 혼입한 CRM(Crumb Rubber Modifier) 아스팔트로 포장을 시공한 결과 그의 효과는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

- ① 저온 균열에 대한 저항성이 우수하다.
- ② 감온성(感溫性)이 개선되고 소성변형에 대한 저항성이 우수하다.
- ③ 우천시 미끄럼 저항성이 양호하다.
- ④ 개립도와 갭입도를 채용하므로써 일반 포장에 비하여 소음저감 효과가 있다.
- ⑤ 마찰안정도는 일반 밀입도 혼합물에 비하여 떨어지나 그다지 문제가 되지 않는다.

그 밖에 포장의 내구성에 대하여는 국내의 시공실적이 오래되지 않아 계속 검증이 필요하다. (상세한 내용은 “도로포장공학회지” 제2권 2호 참조)

3.2 철강슬래그

(1) 발생 및 용도

철강슬래그에는 그림 1과 같이 선철(鐵鐵) 제조과정에서 고로(高爐)로부터 생기는 고로슬래그와 강(鋼)의 제조과정에서 생기는 제강(製鋼)슬래그가 있다. 제강슬래그에는 전로(轉爐)슬래그와 전기로(電氣爐)슬래그가 있으며, 전로슬래그는 고로에서 생산한 선철을 주원료로 하여 강을 제조하는 전로에서 생기며, 전기로슬래그는 스크랩(고철)을 주원료로 하여 강을 제조하는 전기로에서 생긴다.

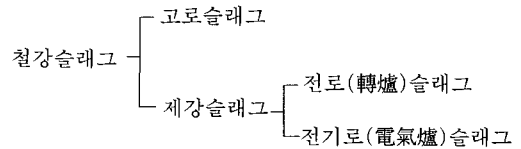


그림 1. 철강슬래그의 종류

고로슬래그는 용융상태의 고로슬래그를 넓은 냉각장에서 적당한 살수와 공기냉각에 의해 서서히 냉각고화시킨 후 반출하는 서냉(徐冷)슬래그와 용융상태의 것을 대량의 물로 급냉시킨 수쇄(水碎)슬래그로 구분되며, 후자의 수쇄슬래그는 잠재수경성(潛在水硬性)을 갖고 있어 보통포틀랜드 시멘트의 혼합재로도 이용되고 있으며, 콘크리트나 아스팔트포장의 잔골재, 포장의 차단층이나 샌드드레인에 쓰이는 외에 노상, 보조기층의 안정처리공법에도 활용되고 있다. 고로슬래그의 용도는 그림 2와 같이 다양한 용도에 쓰인다.

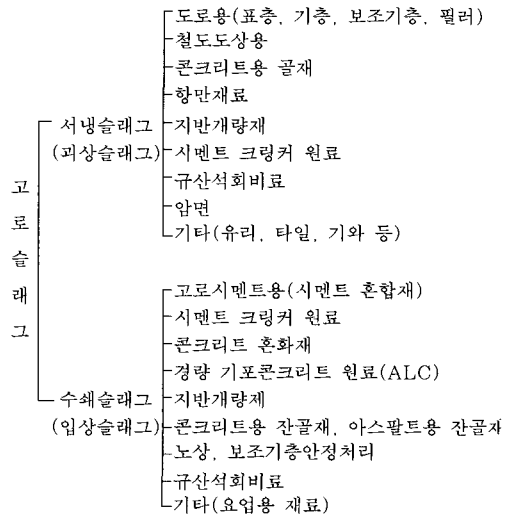


그림 2. 고로슬래그의 용도

표 2. 도로포장용 철강슬래그의 종류와 용도

재료명	호칭	주 용 도
단입도 제강슬래그	SS	가열 아스팔트 혼합물용
크러셔런 제강슬래그	CSS	역청안정처리(가열혼합)용
입도조정 철강슬래그	MS	기 층 재
수경성 입도조정 철강슬래그	HMS	기 층 재
크러셔런 철강슬래그	CS	보조기층재

주) SS : Single-sized Steel Slag
 CSS : Crusher-run Steel Slag
 MS : Mechanically Stabilized Slag
 HMS : Hydraulic and Mechanically Stabilized Slag
 CS : Crusher-run Slag

도로포장용으로 사용되는 철강슬래그의 종류와 주된 용도는 표 2와 같다.

또한 철강슬래그의 활용에 참고할 수 있는 지침으로는 다음과 같은 것이 있다.

- ① 고로슬래그 굽은골재 콘크리트 설계시공지침 (대한토목학회, 1983)
- ② 제강슬래그를 사용한 아스팔트포장 설계시공지침 (대한토목학회, 1985)
- ③ 고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침 (대한토목학회, 1986)
- ④ 복합슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침 (대한토목학회, 1989)

- ⑤ 고로슬래그 시멘트 및 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계·시공지침(안) (대한토목학회, 1995)

(2) 발생 및 활용 현황

우리나라의 최대 제철소인 포항제철과 광양제철소에서 발생하는 고로슬래그와 전로슬래그의 발생량과 재활용 현황은 표 3과 같다.

3.3 제강더스트

(1) 발생 및 용도

고철을 전기로에서 용해, 정련(精鍊)하여 강(鋼)을 제조하는 공정에서 부수적으로 더스트(분진)와 슬래그가 발생한다. 더스트는 고온의 가스 와 혼합되어 배기되는 것을 여러 단계의 백필터(bag filter)로 포집하여 모아진다. 제강더스트 또는 제강분진이라고 하며, 화학적 조성은 산화철이 주성분이며, 산화아연, 실리카 순으로 구성되어 있다. 정련과정에서 1,750°C 정도의 고온에서 생성되므로 일단 안정되어 있으며, 수분도 거의 없다. 선진 외국에서는 Fe₂O₃ 만을 분리 회수하여 안료(顔料)로 사용하기도 하고, 또는 조성성분을 각각 분리하여 회수하고 나머지는 매립용으로 폐기하고 있으나, 우리나라에서는 분리시설에 업청

표 3. 고로슬래그와 전로슬래그의 발생량과 재활용 현황 단위 : 1,000톤(%)

		고로슬래그		전로슬래그	
		1997년	1998년	1997년	1998년
발생량		8,536	8,125	4,089	3,899
처리 방법 별	성토, 매립용 시멘트 원료	—	405 (5)	2,588 (63)	2,450 (62)
	도로용 골재	5,333 (63)	3,449 (42)	423 (10)	314 (8)
	비료 원료	2,851 (33)	3,846 (48)	—	—
	요업용 골재	279 (3)	425 (5)	—	—
	자재 원료	73 (1)	—	—	—
	기타	—	—	1,018 (25)	1,112 (29)
합 계		8,536 (100)	8,125 (100)	4,089 (100)	—

난 비용이 소요되는 관계로 자원화를 못하고 있는 실정이다. 또한 우리나라에서는 폐기물관리법에 의하여 이 분진은 일반 산업폐기물의 “무기물류 산업폐기물”로 분류되어 폐기에도 어려움이 있다.

1993년에 국내의 S사의 연구로 제강·제철더스트를 아스팔트 콘크리트의 채움재로 재활용하는 기술이 개발되어 건설교통부로부터 신기술로 지정 받아 많은 양이 재활용되고 있으며, 좋은 성과를 보이고 있다(표 4). 채움재로 재활용되는 양이외는 전량 흙이나 시멘트 콘크리트와 혼합하여 매립용으로 폐기된다.

표 4. 제강더스트의 발생 및 재활용 현황
(단위 : 1,000톤)

구 분	1997년	1998년	1999년
발생량	271	243	266
재활용량	88.6	73.0	75.9
활용비율	32.7%	30.0%	28.5%

(2) 재활용 효과

아스팔트 콘크리트의 채움재는 배합비율은 적으나 아스팔트 혼합물에 있어 필수적인 재료의 하나이다. 일반적으로 채움재로는 석회암 분말이 주로 쓰이며, 그밖에 포틀랜드 시멘트, 소석회, 플라이애쉬, 회수더스트(collected dust), 전기로 제강더스트 등도 쓰인다.

일반적으로 채움재로 쓰이는 석회석분의 대체물로 제강더스트를 아스팔트 콘크리트에 활용했을 때 경제적인 측면 외에 기술적인 효과면에서 볼 때 다음과 같은 점을 들 수 있다.

- ① 분쇄하여 제조하는 석회석분에 비하여 품질면(특히 입도)에서 안정적이다.
- ② 석회석분을 혼합한 아스팔트 콘크리트에 비하여 잔류안정도가 월등히 높은 것으로 보아

물 의 영향을 받기 쉬운 장소에 포설되는 아스팔트 콘크리트에 매우 내구적이라 할 수 있다.

- ③ 지하수 및 환경오염 등 환경에 미치는 영향을 검토하기 위한 용출시험 결과 환경문제는 전혀 고려하지 않아도 된다.

3.4 그 밖의 부산물

(가) 플라이애쉬

우리나라의 화력발전소에서 발생하는 석탄회는 금년에 약 470여 만톤에 이를 전망이다. 발전소에 따라 무연탄을 연료로 사용하는 곳과 유연탄을 사용하는 곳이 있으며, 이에 따라 플라이애쉬와 보텀애쉬의 비율은 80~85% : 20~15%로 되고 있다. 플라이애쉬는 콘크리트 혼화재로서 많은 연구가 이루어졌고, 일부 레미콘에 사용되고 있으나 도로포장에 본격적으로 재활용되지는 않고 있다.

(나) 폐주물사

우리나라의 주물생산업체수는 1992년 실태조사에 의하면 718개 업체에 이르며, 여기에서 사용되는 주물사는 연간 373만여 톤에 이르고, 이 중 강모래 사용량은 48만여 톤으로 이 만큼의 폐주물사가 발생한다. 이와 같은 폐주물사는 주로 매립되고 있으며, 이에 대한 재활용을 위한 연구가 진행되고 있어 곧 그의 성과가 나올 것으로 전망된다. 이의 재활용은 아스팔트 콘크리트용 잔골재로의 이용을 목표로 하고 있다.

4. 맺음말

산업의 발전은 우리에게 많은 편리함을 가져다 주는 동시에 심각한 환경문제를 야기하고 있다.

우리가 활용할 수 있는 자원은 어쩌면 유한한 것일 수도 있다. 또한 무한하다 할지라도 다음 세

대가 사용할 수 있도록 절약하여야 한다. 유한한 자원을 효율적으로 사용하는 방법의 하나로 산업 부산물의 재활용이 반드시 필요한 것이다. 아울러 폐기물 문제를 해결하는 길이기도 하다.

끝으로 산업부산물의 재활용을 검토할 때 다음과 같은 점을 고려할 필요가 있다.

- ① 환경적으로 주위 자연이나 인간에게 해가 없는지를 장기적으로 검증되어야 한다.
- ② 경제적으로 발생량, 재처리 비용, 운반거리 등을 고려할 때 저가로 되어야 한다.
- ③ 안정적인 공급이 이루어져야 한다.
- ④ 정부의 제도나 법적인 지원으로 일정 비율을 의무적으로 활용토록 하거나 인센티브를 주어 적극적으로 재활용을 유도하여야 한다.

참고문헌

1. NAPA Education Foundation(1996), "Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction", pp.456~470.
2. 박태순, 이관호, "미국연방도로국의 폐자원 활용 실태", 토목학회지 제45권 7호(1997. 7월)
3. 대한토목학회(1986), "고로슬래그 기층 및 보조기층 설계·시공지침"
4. 한국도로교통협회(1997), "아스팔트포장 설계·시공요령", pp.76~78.
5. 김주원, "아스팔트 콘크리트용 채움재로서 製鋼더스트의 특성에 관한 실험적 연구", 한국 콘크리트학회 논문집 제5권 3호(1993. 9월)
6. 한국전력공사(1994), "석탄회 이용가치와 재활용 기술", pp.85~129.

용어정의

아스콘 재활용에 사용되는 용어가 다소 혼동이 있을 수 있어 문헌에 제시된 용어를 아래 기술한다.
(가열아스팔트... 1998, Mix design... 1993, 김광우 등 1997)

- 재활용 (Recycling)** : 일반적으로 최초의 특정 목적으로 사용된 적이 있는 재료를 어떤 전 처리 과정을 거쳐 다시 사용하는 것.
- 폐아스팔트 콘크리트 또는 폐아스콘 (Waste asphalt pavement)** : 포장의 상부층을 평삭하거나 재건설 또는 다른 목적으로 기존(노후) 포장에서 철거된 아스팔트 포장 콘크리트의 크고 작은 덩어리.
- 회수 아스팔트 포장 (Reclaimed asphalt pavement : RAP) 재료** : 상기의 폐아스콘을 파·분쇄 처리한 포장재료로서 아스팔트와 골재가 포함되어 있는 노화된 상태의 혼합물.
- 회수 골재 (Reclaimed aggregate material : RAM)** : 철거되어 파·분쇄된 포장재료로서 역청 결합제가 거의 포함되어 있지 않은 것. 이는 주로 포장 하부의 무처리 기층이나 보조기층을 철거했을 때 얻어지는 것으로서 아스팔트가 거의 포함되어 있지 않음.
- 추출 골재 (Extracted aggregate)** : 노화된 아스팔트 포장재료를 용해시켜 본래의 상태로 추출·분리한 골재.
- 추출 아스팔트 용액(Extracted asphalt)** : 노화된 아스팔트 포장재료를 용해시켜 골재를 분리해내고 남은 아스팔트 용액.
- 재생아스팔트 (Recovered asphalt)** : 추출 아스팔트 용액을 Absorbent 방법이나 기타 방법에 의하여 혼합물 내에서 노화되어 있는 상태의 아스팔트로 재생한 것
- 가열-혼합 재활용(Hot-mix recycling)** : RAP이나 회수골재 등을 새로운 아스팔트, 첨가제(필요시) 및 새로운 골재와 섞어서 가열(145℃ 이상)하여 혼합물로 다시 제조하는 과정, 최종 생산된 재생 혼합물은 해당 혼합물의 표준규격과 시방규격에도 적합해야 함.
- 상온-혼합 재활용 (Cold-mix recycling)** : RAP이나 회수골재 등을 새로운 아스팔트 유제, 골재 및 채움재(필요시 첨가제)와 함께 60℃ 이하의 온도에서 혼합하여 재활용하는 과정.
- 재생 혼합물 (Recycled mixture)** : 회수 아스팔트 포장재료, 신규 아스팔트, 필요시 재생 첨가제 및 입도 조정된 새로운 골재 (혹은 회수골재)를 혼합하여 최종 생산한 아스팔트 혼합물.
- 아스팔트 재활용 첨가제 (Asphalt recycling agent)** : 유기물질로 노화된 아스팔트를 회복시키는 특성을 가진 재료로서 회생제 (Rejuvenator)라고도 함.