

## 보일러 부산 애쉬를 이용한 아스팔트 콘크리트의 박리저항성 평가

김유석\* · 김낙석\*\*

Kim, Yooseok\*, Kim, Nakseok\*\*

### Evaluation of Anti-Stripping Performance in Asphalt Concrete using Byproduct Ash produced from Circulating Fluidized Bed Boiler

#### ABSTRACT

Pot-holes are steadily increasing due to abnormal climate such as heavy rainfall and frequent snowfall. Pot-hole related to traffic accidents cause injuries, car damage and distress of road facilities. To reduce pot-holes, the use of an anti-stripping agent is mandatorily recommended to asphalt concrete mixture. Hydrated lime is commonly used as anti-stripping agent due to the convenience and economics. Byproduct ash from circulating fluidized bed boiler was reviewed as an anti stripping agent. According to the test results, the byproduct ash is satisfied with TSR specification using 1% to 3% by weight of the asphalt mixture. The byproduct ash was examined under various condition changes of aggregate and asphalt concrete mixture considering quality movement. According to the results, using the byproduct ash was measured average 0.87 of TSR and coverage rates of 60% after rolling bottle test. Test results also revealed that the byproduct ash showed stable performance. Using the byproduct ash to decrease pot-hole in asphalt concrete pavement is suitable for demonstrating stable performance as anti-stripping agent.

**Key words :** Pot-hole, Anti-stripping agent, Circulating fluidized bed boiler, Byproduct ash

#### 초록

최근 집중호우, 잦은 강설 등 이상기후에 따라 아스팔트 콘크리트 포장의 포트홀 발생이 급증하고 있다. 포트홀은 교통사고와 직결되는 파손형태로 인명피해, 차량 및 도로시설물 파손 등의 피해가 증가하는 추세이다. 이에 따라 포트홀 발생을 저감하기 위해 아스팔트 콘크리트 혼합물에 박리방지제를 의무적으로 사용하도록 권장하고 있는 실정이다. 국내에서는 비교적 사용이 편리하고 경제적인 소석회를 박리방지제로 주로 사용하고 있다. 본 연구에서는 순환 유동층 보일러 가동시 발생하는 보일러 부산 애쉬를 박리방지제로 활용하는 연구를 수행하였다. 연구결과 보일러 부산 애쉬를 아스팔트 콘크리트 혼합물 중량의 1~3% 혼합한 결과 TSR 기준을 모두 만족하였다. 품질변동을 감안하여 골재, 혼합물 등 다양한 조건의 보일러 부산 애쉬를 검토하였으며 실험결과 TSR 평균 0.87, 동적수침 후 피복률 60% 이상으로 안정적으로 품질기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이에 따라 보일러 부산 애쉬는 안정적으로 박리방지제 성능을 발현하여 아스팔트 콘크리트 포장의 포트홀 발생 저감에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

**검색어 :** 포트홀, 박리방지제, 순환 유동층 보일러, 부산 애쉬

\* 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Kyonggi University · [marvel333@naver.com](mailto:marvel333@naver.com))

\*\* 종신회원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Kyonggi University · [nskim1@kgu.ac.kr](mailto:nskim1@kgu.ac.kr))

Received December 21, 2017/ revised January 5, 2018/ accepted January 22, 2018

### 1. 서론

최근 급격한 기후변화로 아스팔트 콘크리트 포장도로는 수분침투 및 동결·융해 작용에 의해 포트홀(Pot-hole) 발생이 증가하고 있다. 포트홀은 아스팔트 콘크리트 포장 표층의 일부가 움푹하게 파여 웅덩이의 형상의 파손으로 도로 이용자의 안전을 위협하는 요소로 주목받고 있다. 포트홀의 직접적인 원인은 수분에 의해 골재에 피복된 아스팔트 바인더가 박리(Stripping)되는 것으로 알려져 있다. 박리는 수분이 아스팔트 콘크리트 포장층에 침투하여 아스팔트 바인더 피막과 골재 사이 점착력(Adhesion) 및 아스팔트 바인더 자체의 결합력(Cohesion)을 약화시켜 궁극적으로 포장 자체의 구조적 성능이 저감되는 것으로 정의할 수 있다(Little and Jones, 2003; Jo et al., 2013).

국도교통부의 '2011~2015 고속 일반국도 포트홀 발생 현황' 자료에 따르면 5년간 발생한 포트홀이 36만 건 이상인 것으로 조사되었다. 5년간 포트홀로 인해 발생한 사고는 고속국도 1,046건, 일반국도 607건으로 피해보상액만 약 11억 원에 달한다(Im, 2017). 또한 국회 국정감사 보도자료(National Assembly, 2013)에 따르면 Table 1과 같이 서울시는 포트홀로 발생한 교통사고가 5년간('08~'13. 07월) 4,223건으로 나타났다. 이처럼 포트홀로 인한 교통사고는 인명피해, 차량 및 도로 시설물 파손 등의 피해가 증가하고 있으며 이를 관리하기 위한 도로포장 유지보수 예산의 증가로 이어지고 있다.

박리현상은 포트홀의 주요 원인으로 최근 아스팔트 콘크리트 혼합물의 박리저항성 향상을 위한 노력이 이어지고 있다. 미국, 유럽 등지에서는 소석회나 액상박리방지제의 사용을 권고하고 있으며 국내에서도 최근 주요 간선도로 및 고속국도 일부구간에 박리방지제 사용을 의무화하고 있는 실정이다. 국내의 경우 별도의 투입장치가 불필요하고 채움재를 대체하여 사용할 수 있는 소석회를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 기존 채움재로 사용하는 석회석분의 가격이 24,000원/ton인데 반해 소석회의 경우 120,000원/ton으로 아스팔트 콘크리트 혼합물의 약 2%를 혼합할 경우

1,920원의 원가 상승이 발생한다.

본 연구에서는 포트홀 발생 저감을 위한 아스팔트 콘크리트 혼합물용 박리방지제로 순환 유동층 보일러(Circulating fluidized bed boiler) 가동에 따라 발생하는 부산물인 보일러 부산 애쉬(Byproduct ash)의 박리방지제 사용 가능성을 검토하고자 한다. 산업부산물의 활용을 통해 보다 경제적인 박리방지제를 확보할 수 있다면 아스팔트 콘크리트 포장의 품질향상과 더불어 아스팔트 플랜트 및 도로관리기관의 예산절감에도 효과적일 것이다.

산업부산물은 목적성을 갖고 생산하는 것이 아니기 때문에 품질 변동이 있을 수 있으며, 아스팔트 콘크리트 혼합물은 전국의 다양한 골재, 아스팔트 바인더 등 다양한 생산조건에서의 효과가 검토되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 보일러 부산 애쉬를 사용하여 다양한 골재와 배합에 대한 수분민감성 개선 효과를 평가하고 보일러 부산 애쉬를 사용하였을 경우 아스팔트 콘크리트 혼합물의 품질 특성을 평가하고자 하였다.

### 2. 박리와 박리방지제

#### 2.1 박리와 포트홀

아스팔트 콘크리트 포장도로의 파손형태는 대표적으로 소성변형(Rutting)과 균열(Cracking), 포트홀(Pot-hole) 3가지로 구분된다. 포트홀은 아스팔트 콘크리트 포장의 노면이 국부적으로 움푹 떨어져 나가 패어지는 항아리 모양의 노면 파손형태로 여름철



Fig. 1. Occurred Pothole

Table 1. Accidents and Compensation of Pot-hole from Year to Year (Kim et al., 2017)

Classification	National highway		Expressway		Local road		Total	
	Accident	Compensation	Accident	Compensation	Accident	Compensation	Accident	Compensation
in 2008	4	9.1	36	27	169	313.1	209	349.2
in 2009	15	4.2	66	77.5	299	670.3	380	752
in 2010	56	48.7	249	204.2	557	627.3	862	880.2
in 2011	92	43.1	332	292.4	628	422.4	1,052	757.9
in 2012	85	41.3	162	120.4	422	290.5	669	452.2
in Jul, 2013	22	9.3	143	102.1	886	316.2	1,051	427.6
Total	274	25.95	988	823.6	2,961	2,639.8	4,223	3,619.1

집중호우, 겨울철 폭설시 집중적으로 발생한다. 수분에 지속적으로 노출된 아스팔트 콘크리트 포장은 내부 공동(Cavity)이 발생되고 반복적인 교통, 환경하중에 의해 포장층 상·하부에 미세균열을 유발하여 이는 Fig. 1과 같은 형태의 포트홀까지 이어진다(MLIT, 2014).

## 2.2 박리방지제

박리방지제는 아스팔트 콘크리트 혼합물 내에서 골재로부터 아스팔트 바인더의 박리를 최소화하기 위해 사용하는 첨가제로 일반적으로 분말형인 소석회(Hydrated lime)와 액상 박리방지제(Liquid anti-stripping agent)를 사용한다. Hicks&Scholz(2003)의 연구에 따르면 박리방지제의 사용은 박리 저항성을 증진시킬 뿐 아니라 노화 억제, 강성 증가, 포장 균열 억제 등의 효과가 있는 것으로 알려졌다. 국내의 경우 일반적으로 사용이 편리하고 비교적 저렴한 소석회를 골재 중량대비 1~2% 정도를 투입한다.

### 2.2.1 소석회(Hydrated Lime)

소석회는 석회석을 가열하여 얻어진 생석회를 수화시켜 생산하며 아스팔트 콘크리트 혼합물용 첨가제로 사용할 경우 박리방지, 균열·소성변형 저항성 등 포장 내구성을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(Choi et al., 2014; Watson, 1992; Lee et al., 2011). 박리 저항성과 포장 내구성 향상 효과에 따라 미국, 유럽 등지에서는 수분 영향이 우려되는 지역에 사용하는 박리방지제로 폭넓게 사용되고 있다.

### 2.2.2 액상 박리방지제(Liquid Anti-Stripping Agent)

일반적으로 액상 박리방지제는 골재와 아스팔트 바인더 사이의 부착력을 증진시키는 작용을 하는 표면활성 촉진제(표면활성제)이다(Chun et al., 2005). 액상 박리방지제는 아스팔트 바인더와 사전에 교반하거나 별도의 공급 장치가 필요하여 비교적 사용이 어려운 단점이 있다.

## 3. 순환 유동층 보일러 부산 애쉬

발전소, 정유공장과 같은 플랜트는 대규모의 에너지를 필요로 하여 에너지 공급을 위한 보일러를 가동한다. 이중 순환 유동층 보일러는 고유황탄, 저품위탄, 폐기물 등 가연성 물질에 대해 다양한 연료 사용이 가능하다. 연소 온도를 약 850°C 정도로 유지하여 질소산화물 생성을 억제할 수 있고 석회석으로 노내에서 집적 탈황이 가능하며 연소과정 중 이산화황과 석회석이 반응하여 황이 제거되고 석고가 생성되어 석탄재와 함께 배출된다. 이를 통해 일반적인 연소방식과 달리 CaO 함량이 높은 석탄재를 배출할

수 있는 장점이 있다. 순환유동층 보일러 부산물의 화학성분은 SiO<sub>2</sub>를 주성분으로 CaO, CaSO<sub>4</sub>에 의해 생성된 석고를 포함하고 있다. 약 50%에 가까운 높은 CaO 성분은 간극수의 수화와 함께 포틀랜드아이트(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 생성하여 수화물을 생성하게 된다. 이러한 반응은 결국 시멘트와 본질적으로 유사한 수화 메커니즘을 가진다(Mun and Kwon, 2014).

보일러 부산 애쉬(Ash)는 유동층 연소 보일러에서 코크스와 석회석이 함께 연소된 후 발생한 부산물로 산화칼슘(CaO), 삼산화황(SO<sub>3</sub>), 산화마그네슘(MgO)으로 구성되며 2,000~8,000cm<sup>2</sup>/g의 분말도를 갖는다. 생석회의 주성분인 산화칼슘(CaO)은 물과 접촉시 수화반응을 통해 소석회(수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>))을 생성한다. 수화반응을 통해 소석회와 동일한 성분을 나타내는 보일러 부산 애쉬를 가공하여 박리방지제로 활용하는 방안을 검토하였다.

## 4. 박리방지제 적용 검토

산화칼슘(CaO)을 함유하고 있는 보일러 부산 애쉬는 수분과 접촉하여 부피팽창과 발열을 동반한 수화반응을 일으키며 소석회(수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>))을 생성한다. 본 연구에서는 수화반응을 통해 보일러 부산 애쉬를 안정화 한 후 아스팔트 콘크리트 혼합물의 채움재를 대체하여 1~3% 혼합하여 아스팔트 콘크리트 혼합물의 박리 저항성을 평가하였다.

### 4.1 재료 준비

#### 4.1.1 보일러 부산 애쉬

본 연구는 산업부산물인 보일러 부산 애쉬는 원재료 및 생산 조건의 변동 등의 품질변동을 우려하여 1년간 4차례에 걸쳐 다른 시기에 생산된 재료를 사용하였다. 사용된 보일러 부산 애쉬는 국내 A 정유사의 순환 유동층 보일러에서 생산 것으로 환경성 평가를 위해 중금속 용출시험을 자체적으로 수행하였으며, 시험결과 Table 2와 같이 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 보일러 부산 애쉬의 경우 연소재료에 따라 투입되는 재료의 종류와 양이 변화하기 때문에 이를 감안한 평가가 필요하다. 보일러 부산 애쉬는 수화반응시 발열반응과 팽창성을 동반하기 때문에 정확한 수량을

Table 2. Result of Ash Environmental Evaluation

Item	Specification (wppm)	Result
Pb	≤ 150	-
Cu	≤ 800	-
Cd	≤ 50	-
As	≤ 50	-
Hg	≤ 2	0.1

첨가하여야 한다. 본 연구에서는 충분한 양의 물에 보일러 부산 애쉬를 수침시킨 후 물을 제거하고 젖어있는 애쉬를 건조한 후 분쇄하여 사용하였다.

본 연구는 환경 유해성 검증이 완료되어 시판중인 국내 A 정유사의 순환 유동층 보일러에서 생산된 보일러 부산 애쉬를 사용하였다. 또한 원재료 및 생산 조건 변동 등의 품질변동을 우려하여 1년간 4차례에 걸쳐 다른 시기에 생산된 재료를 사용하였다. 반면 보일러 부산 애쉬의 경우 연소재료에 따라 투입되는 재료의 종류와 양이 변화하기 때문에 이를 감안한 평가가 필요하다. 보일러 부산 애쉬는 수화반응시 발열반응과 팽창성을 동반하기 때문에 정확한 수량을 첨가하여야 한다. 본 연구에서는 충분한 양의 물에 보일러 부산 애쉬를 수침시킨 후 물을 제거하고 젖어있는 애쉬를 건조한 후 분쇄하여 사용하였다.

4.1.2 골재

박리방지제의 사용 목적은 골재와 아스팔트 바인더의 결합력을 향상시키는 것으로 재료에 따른 영향이 크다. 이에 따라 본 연구는 일반적으로 국내에서 아스팔트 콘크리트 혼합물용 골재로 사용되는 화강암 골재를 포함하여 다양한 골재를 평가하고자 경기도, 강원도, 전라남도 지역 아스팔트 플랜트에서 실제 사용되고 있는 골재를 입수하여 실험을 진행하였다. 실험 비교군으로 KS F 3501 (아스팔트 콘크리트용 채움재) 기준을 만족하는 석회석분과 현재 플랜트에서 분말형 박리방지제로 주로 사용되고 있는 소석회의 박리저항성을 평가하였다.

4.2 아스팔트 콘크리트 혼합물의 수분 저항성 평가

아스팔트 콘크리트 혼합물의 박리저항성을 평가하기 위한 실험은 다양한 방법이 있다. 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 방법은 수분 손상 처리 전, 후의 간접인장강도를 비교하여 인장강도비 (TSR, Tensile Strength Ratio)를 구하는 것이다. 본 연구에서는 -18°C에서 8시간 동안 동결 후 60°C 수조에 12시간 동안 수침하는

AASHTO T 283 (KS F 2398)에 따른 방법을 사용하였다.

보일러 부산 애쉬의 박리방지제 효과를 검증하고 사용량을 결정하기 위해 Fig. 2와 같은 입도의 WC-1 아스팔트 콘크리트 혼합물을 배합설계를 통해 제작하였다. 배합설계는 PG 64-22의 스트레이트 아스팔트 바인더와 채움재로 석회석분 2%를 사용하였으며, 공극률 4%에 최적아스팔트 함량은 5.7%로 결정되었다. 박리방지제의 성능 평가는 석회석분(Limestone Powder)과 혼합하지 않은 소석회 2%, 보일러 부산 애쉬 1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0%를 사용하여 공시체를 제작하였다.

인장강도비 실험결과 Table 3과 Fig. 3에 나타난 것과 같이

Table 3. Types of Mixture Used in TSR Test (AASHTO T 283)

Classification	Contents (%)	ITS (MPa)		TSR
		Normal	After Freezing-Thawing	
Ash	1.0	0.94	0.75	0.80
	1.5	0.95	0.79	0.83
	2.0	0.96	0.82	0.86
	2.5	0.95	0.82	0.87
	3.0	0.93	0.80	0.87
Limestone powder	2.0	0.89	0.66	0.74
Hydrated lime	2.0	0.90	0.75	0.83

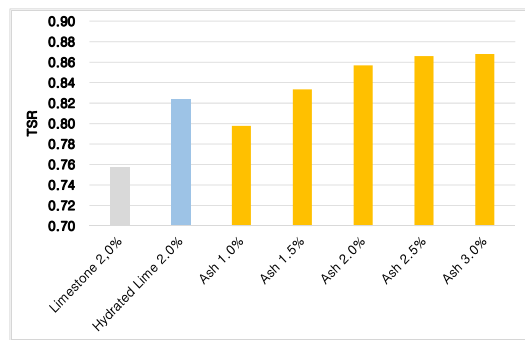


Fig. 3. Results of TSR

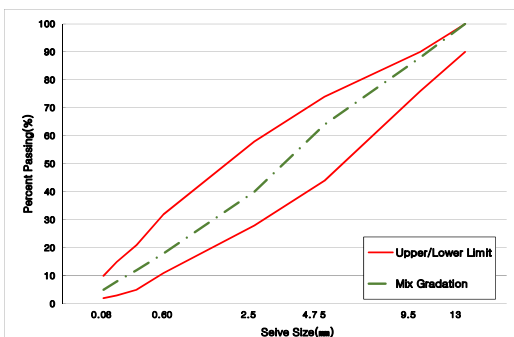


Fig. 2. 13mm DGA (WC-1)

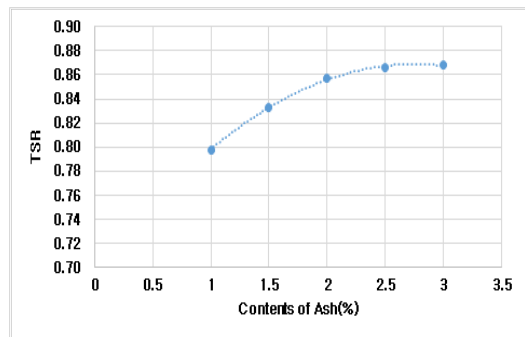


Fig. 4. Test Results by Ash Contents

석회석분 사용시 TSR 0.74로 국토교통부(2017)의 아스팔트 콘크리트 혼합물의 품질기준 0.80을 만족하지 못하였으나, 소석회를 사용하였을 경우 0.83으로 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 보일러 부산 애쉬는 1~3% 까지 모두 기준을 만족하였으며, Fig. 4에 보이는 것과 같이 2% 이상 투입하였을 경우 TSR의 큰 변화가 나타나지 않아 경제성을 감안하였을 때 2% 사용이 적절한 것으로 판단되었다.

보일러 부산 애쉬의 박리저항성 향상효과는 확인할 수 있었으나, 최적 사용량의 경우 채움재를 사용하지 않았기 때문에 1% 사용시 보일러 부산 애쉬의 효과가 불충분한 것 외에도 채움재의 부족으로 수분 민감성이 나빠진 것으로도 분석될 수 있다. 통상적으로 아스팔트 플랜트에서 채움재를 한 종류만 사용할 수 있기 때문에 기존 채움재의 사용량을 기준으로 보일러 부산 애쉬를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

보일러 부산 애쉬는 연소, 투입재료의 변동, 배합비 등 다양한 조건에 의해 품질의 변동이 있을 수 있어 한번의 실험으로 효과를 확실하기 어려운 측면이 있다. 이에 따라 2~3달 간격으로 생산된

보일러 부산 애쉬 4종과 골재, 배합비를 변화하여 잔류인장강도 실험을 진행하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 석회석분을 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 경우 TSR이 평균 0.76으로 기준을 만족하지 못하는 경우가 많았으나 보일러 부산 애쉬를 사용한 아스팔트 콘크리트 혼합물의 TSR은 평균 0.87로 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 기준을 만족하지 못한 경우는 20회중 1회에 그쳤다. Fig. 5의 보일러 부산 애쉬를 사용할 경우 TSR이 대부분 0.8~0.9 사이에 있으며 표준 편차가 0.06으로 나타났다. 반면 Fig. 6의 석회석분을 사용한 TSR의 경우는 표준편차가 0.10으로 결과가 넓게 분포하고 있으며 기준 0.8을 만족하지 못한 경우가 15회 중 10회로 나타나 보일러 부산 애쉬를 박리방지제로 사용하였을 경우 수분민감성이 개선됨을 확인할 수 있었다.

### 4.3 동적 수침 시험

동적 수침 시험은 골재와 아스팔트 바인더 사이의 접착력을 평가하는 시험법으로 다져지지 않은 혼합물의 굵은 골재를 이용하여 박리저항성을 평가하는 시험법이다. 서울시, 국토교통부의 박리방지제의 품질기준으로 적용하고 있는 시험방법 European Standard EN-12697-11에 따라(MLIT, 2017) 아스팔트로 피복된 굵은 골재를 상온에서 24시간 동안 양생 후 증류수와 시료를 유리병에 투입 후 25°C에서 24시간 동안 60rpm으로 회전시켰다. 실험이 완료된

Table 4. Types of Mixture Used in TSR Test

No.	Mix type	Binder type	Aggregate type	Filler type	
				Ash	Limestone powder
1	DGA (20mm)	PG 58-22	Granite	0.82	0.73
	DGA (20mm)	PG 64-22	Granite	0.89	0.86
	DGA (13mm)	PG 64-22	Granite	0.86	0.77
	DGA (13mm)	PG 76-22	Granite	1.02	0.88
	DGA (10mm)	PG 64-22	Granite	0.82	0.64
2	DGA (20mm)	PG 58-22	Granite	0.92	0.91
	DGA (13mm)	PG 58-22	Granite	0.82	0.71
	DGA (13mm)	PG 64-22	Granite	0.92	0.76
	DGA (13mm)	PG 64-22	Limestone	0.88	0.81
	DGA (10mm)	PG 76-22	Limestone	0.81	-
	SMA (13mm)	PG 76-22	Granite	0.84	-
3	DGA (20mm)	PG 64-22	Limestone	0.83	0.59
	DGA (13mm)	PG 76-22	Granite	0.83	0.70
	DGA (10mm)	PG 64-22	Granite	0.88	0.71
	SMA (13mm)	PG 76-22	Granite	0.78	-
	SMA (10mm)	PG 82-22	Granite	0.89	-
4	DGA (13mm)	PG 64-22	Granite	0.84	0.67
	DGA (13mm)	PG 76-22	Granite	1.04	0.95
	DGA (10mm)	PG 64-22	Granite	0.84	0.68
	DGA (10mm)	PG 82-22	Granite	0.85	-
Avg.				0.87	0.76

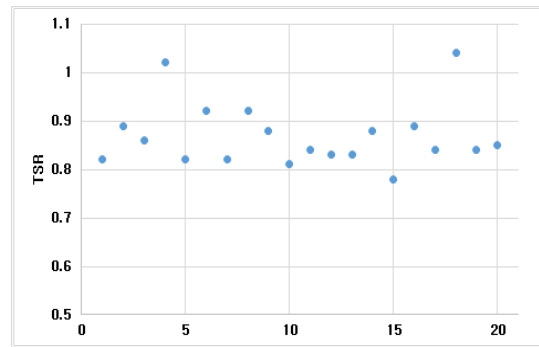


Fig. 5. Results of TSR (Ash)

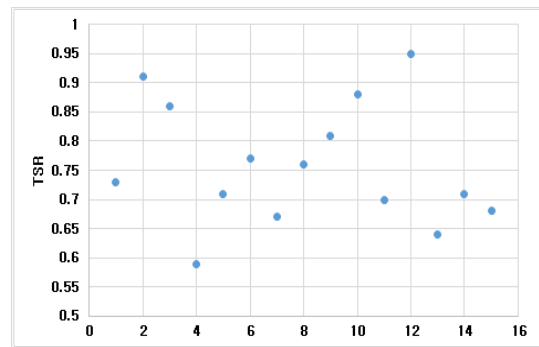


Fig. 6. Results of TSR (Limestone)

후 골재를 24시간 동안 60°C 오븐에서 건조 후 초기 무게와 실험 후 무게를 측정하였다. 또한 육안 조사를 통해 시험 후 피막 정도를 파악하였다. 피막 박리율 50% 이상이 되어야 한다.

일반적으로 국내 아스팔트 콘크리트 혼합물용 골재는 화강암과 석회암으로 두 골재를 사용하여 동적 수침 시험을 실시하였다. 또한 분말형 박리방지제의 효과적 사용방법을 검토하기 위해 가열된 골재에 분말형 박리방지제를 혼합하고 건비빔한 후 아스팔트 바인더를 투입하고 혼합하는 Dry 방식과 분말형 박리방지제를 물과 섞어 슬러리 형식으로 만든 상태에서 골재와 혼합한 후 골재를 가열하는 Slurry 방식으로 시료를 준비하였다.

Table 5와 같이 석회석분을 채움재로 사용한 경우 기준 50%를 만족하지 못하는 것으로 나타났으나, 보일러 부산 애쉬를 사용한 시료의 경우 모두 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 석회석과

Table 5. Results of Rolling Bottle Test

No.	Filler 2% (Granite)	Ash 2%			
		Granite		Limestone	
		Dry	Slurry	Dry	Slurry
1	50.9	79.8	63.7	68.3	67.3
2	43.2	71.4	70.2	67.6	68.0
3	40.1	65.8	66.3	55.8	64.1
Avg.	44.7	72.3	66.3	63.9	65.5

Table 6. Results of ITS Test

Classification	ITS (MPa)	Disp. (mm)	Toughness (N·mm)
Filler (Limestone)	0.74	1.30	11,844
	0.82	1.29	14,046
	0.78	1.27	12,724
Avg.	0.78	1.29	12,871
Ash	0.76	1.27	12,724
	0.86	1.34	14,114
	0.84	1.28	13,985
Avg.	0.82	1.30	13,608

Table 7. Results of Wheel-Tracking Test

Classification	Air voids (%)	DS (number/mm)
Limestone	4.0	2,178
	3.9	2,256
	4.2	2,084
Avg.	4.0	2173
Ash	4.0	2,354
	4.1	2,264
	3.8	2,351
Avg.	4.0	2,323

화강암 골재 모두 기준을 만족하였다. 사용성 평가결과 Slurry 방식은 사용이 어려운 것에 비해 효과는 크지 않아 Dry 방식을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단되었다. 동적수침시험은 육안관찰에 의한 결과이기 때문에 결과에서 다소 차이가 발생하는 것을 볼 수 있었다.

4.4 균열 및 소성변형 저항성 실험

보일러 부산 애쉬를 사용한 아스팔트 콘크리트 포장의 균열저항성을 평가하기 위해 KS F 2382에 따라 간접인장강도 실험을 수행하였다. 실험온도는 상온 25°C에서 실시하였다. 공시체는 WC-1으로 PG 64-22의 스트레이트 아스팔트 바인더를 사용하였으며 공극률 4%로 제작하였다. 보일러 부산 애쉬 적용 혼합물의 경우 채움재를 넣지 않고 보일러 부산 애쉬 2%를 사용하였으며, 비교 공시체는 채움재로 석회석분 2%를 사용하였다. 실험결과는 Table 6과 같이 보일러 부산 애쉬 사용시 간접인장강도가 다소 증가하나 차이가 5%에 그쳐 균열 저항성에는 큰 영향이 없는 것으로 나타났다.

휠 트래킹 시험(KS F 2374)으로 소성변형 저항성을 평가하고자 하였다. 시험온도 60±0.5°C에서 차륜 하중은 686N, 차륜 접지압은 628±15MPa으로 수행하였다. 시험결과는 Table 7과 같다. 균열저항성과 마찬가지로 보일러 부산 애쉬를 사용하면 동적안정도가 약 7% 높아졌으나 간접인장강도 실험결과와 마찬가지로 보일러 부산 애쉬로 인해 소성변형저항성이 향상되었다고 하기 어려운 정도이다. 보일러 부산 애쉬의 수분민감성 개선효과로 박리 저항성이 향상되는 효과가 있으나 균열저항성과 소성변형 저항성의 향상은 크지 않은 것으로 나타났다.

5. 결론

보일러 부산 애쉬의 아스팔트 콘크리트 혼합물용 박리방지제 적용성 검토 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 보일러 부산 애쉬를 수화반응 시켜 얻은 재료를 아스팔트 콘크리트 혼합물의 채움재 대체 개념으로 사용할 경우 박리방지제로서의 활용을 검토하였다. 재료, 배합, 혼합물 종류 등 다양한 조건에서의 수분민감성 개선 효과를 검증하기 위해 TSR을 측정된 결과 평균 0.87의 값을 나타내어 다양한 골재와 배합조건에서도 안정적인 박리방지제 기능을 갖는 것으로 확인되었다. 혼합물 중량의 약 2% 사용시 최적의 박리방지 효과를 나타내어 채움재를 대체하여 기존 배합설계에 반영하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- (2) 보일러 부산 애쉬와 골재와의 고른 분산과 부착을 위해 Slurry 방식과 Dry 방식으로 혼합하였으나 그 차이가 크지 않아 사용성을 감안하였을 때 Dry 방식이 적절해 보였으며, 실제 생산시에는 아스팔트 바인더 투입 전 충분한 건비빔을 통해 골재표면에 보일러 부산 애쉬가 충분히 코팅되도록 하여야 한다.
- (3) 실험결과 보일러 부산 애쉬는 균열저항성과 소성변형 저항성의 향상에는 큰 영향이 없었으나 수분민감성 개선을 통한 박리저항성에 뚜렷한 효과를 보였다. 이에 따라 보일러 부산 애쉬는 박리방지제의 역할을 수행할 수 있어 아스팔트 콘크리트 포장의 포트홀 발생 저감에 매우 효과적인 것으로 판단된다.

## References

- AASHTO T 283, Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.
- Choi, S. H., Kim, W. J., Le, V. P., Lee, H. J. and Hwang, S. D. (2014). "Moisture damage evaluation of asphalt mixtures depending on the types of anti-stripping agent." *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 45-50 (in Korean).
- Chun, S. H., Rhee, S. K., Kim, N. H. and Hwang, S. D. (2005). "Effect of hydrated-lime on moisture susceptibility characteristics of asphalt mixtures." (in Korean).
- Hicks, R. G. and Todd, V. S. (2003). "Life cycle costs for lime in hot mix asphalt." Report & Software for National Lime Association.
- Im, J. S. (2016). "Over the past 5 years, occurred 360,000 pot-hole in national pavement." The Press Release in the National Assembly (in Korean).
- Jo, M. H., Yun, S. U. and Lee, Y. H. (2013). "Asphalt concrete pavement pothole: repair method." *Journal of Korea Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 2, pp. 43-51 (in Korean).
- Kim, K. N., Kim, S. H. and Kim, N. S. (2017). "A study on algorithm for materials take-off using pothole detection system." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 3, pp. 603-610 (in Korean).
- KS F 2374, *Standard Test Method for Wheel Tracking of Asphalt Mixtures* (in Korean).
- KS F 2382, *Standard Test Method for Indirect Tension of Asphalt Mixtures* (in Korean).
- KS F 3501, *Filler For Hot Mix Asphalt Pavement* (in Korean).
- Lee, S. Y., Mun, S. H. and Kim, Y. R. (2011). "Fatigue and rutting performance of lime-modified hot-mix asphalt mixtures." *Construction and Building Materials*, 25, pp. 4202-4209.
- Little, D. N. and Jones IV, D. R. (2003). "Chemical and mechanical mechanisms of moisture damage in hot mix asphalt pavements." National Seminar in Moisture Sensitivity, San Diego, California.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2014), "Development of Quality Management System to Pavement Construction to Prepare for Climate Change (4th year)", Final Report of 4th Years (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2017). *Asphalt mixture construction guidelines* (in Korean).
- Mun, K. J. and Kwon, S. J. (2014). "Construction materials utilizing byproduct from circulating fluidized bed boiler." *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 9, No. 3, pp. 8-12 (in Korean).
- National Assembly (2013). *Accident related to pothole has increased five times over the four years seven month*, The Press Release in the National Assembly (in Korean).
- Watson, D. (1992). *Status report on the use of hydrated lime in asphaltic concrete mixtures in georgia*, Georgia DOT, Materials and Research.