



# 부산석회를 채움재로 재활용한 아스팔트 혼합물의 공학적 특성

## A Study on Engineering Characteristics of Asphalt Concrete Mixtures Using Filler with Recycled Waste Lime

황 성 도\*      박 희 문\*\*

Hwang, Sung Do      Park, Hee Mun

### Abstract

This study focuses on finding out engineering characteristics of asphalt concrete mixtures using mineral fillers with recycled waste lime, which is a by-product in the Soda Ash( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) production course. The materials tested in this study were made with 25%, 50%, 75% and 100% of mixing ratio based on the conventional mineral filler ratio to analyze the recycle possibility of the waste lime. The asphalt concrete mixtures with recycled waste lime and hydrated lime, and conventional asphalt concrete mixtures were evaluated through their fundamental engineering properties such as Marshall stability, indirect tensile strength, resilient modulus, permanent deformation characteristics, moisture susceptibility and fatigue resistance.

The results indicate that the application of recycled waste lime as mineral filler improves the permanent deformation characteristics, stiffness and fatigue endurance of asphalt concrete mixtures at the wide range of temperatures. It is also found that the mixtures with recycled waste lime show higher resistance against stripping than conventional asphalt concrete mixtures.

It is concluded from various test results that the waste lime can be used as mineral fillers and especially can greatly improve resistance to permanent deformation of asphalt concrete mixtures at high temperatures.

**Keywords :** recycled waste lime, filler, hydrated lime, asphalt mixtures, stripping

### 요 지

본 연구는 판유리 등의 생산 기초 원료인 소다회( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 생산 과정에서 발생하는 산업 부산물인 부산석회를 아스팔트 혼합물의 채움재로서 재활용 가능성을 검토하여 부산석회의 실질적인 활용 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 부산석회를 기존의 석회석분 채움재에서 중량 대비 25%, 50%, 75%, 100%로 대체하여 제조한 아스팔트 혼합물에 대해 간접인장강도 시험, 회복탄성계수 시험, 수분 민감성 시험, 반복하중 간접인장 시험, 휠트래킹 시험을 실시하여 부산석회의 채움재 활용 가능성을 파악하였다. 또한 기존 석회석분 채움재를 사용한 아스팔트 혼합물과 소석회(Hydrated Lime)를 사용한 아스팔트 혼합물의 공학적 특성을 비교 분석하여 부산석회를 재활용한 아스팔트 혼합물의 성능 증진 효과를 평가하고 본 기술의 실용화 가능성을 판단하였다.

**핵심용어 :** 부산석회, 채움재, 소석회, 아스팔트 혼합물, 박리

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원

\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원



# 1. 서론

부산석회(副産石灰)는 판유리나 비누세제의 기초 원료인 소다회(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)의 생산 과정에서 발생하는 산업 부산물로서, 인천에 위치한 D사에서 대부분 배출하고 있다. 최근까지 부산석회는 D사의 공장 인근 지역에 위치한 약 13만평 규모의 매립지에 거의 전량 폐기 처리하고 있다. 이로 인해 매립지 인근의 주택지에 비산 먼지와 침출수 등이 영향을 미쳐 주거 환경 오염이 우려되고 있다.

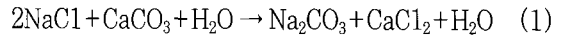
이에 본 연구는 소다회(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 생산 과정 중 발생하는 산업 부산물인 부산석회를 아스팔트 혼합물의 채움재로서 대체 가능성에 대한 공학적인 평가를 실시하고, 이를 통해 부산석회 재활용 기술의 실용화 가능성을 검토하고자 한다. 이를 위하여 부산석회를 재가공한 분말을 석회석분 채움재의 중량 대비 25%, 50%, 75%, 100%로 대체하고, 이를 각각 배합한 아스팔트 혼합물에 대해 기본 물성 시험, 간접 인장강도 시험, 회복탄성계수 시험, 수분 민감성 시험, 반복하중 간접인장 시험, 휠트래킹 시험 등의 실내 실험을 실시하였다. 또한 기존 석회석분 채움재만을 사용한 아스팔트 혼합물과 소석회(Hydrated Lime)를 사용한 아스팔트 혼합물에 대해서도 실내 실험을 실시하고, 그 결과를 상기의 시험 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 부산석회를 채움재로 재활용한 아스팔트 혼합물의 성능 증진 효과를 평가하였다.

## 2. 부산석회

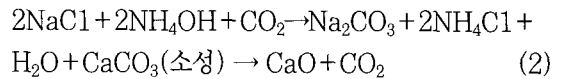
### 2.1 부산석회의 발생 공정

부산석회(waste lime)는 솔베이(Solvay)법에 의하여 염화나트륨(NaCl)중의 Na와 석회석(CaCO<sub>3</sub>)중의 CO<sub>2</sub>를 반응시켜 소다회(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)를 제조하는 과정에서 발생한다. 즉, 염화나트륨을 물에 녹여 순

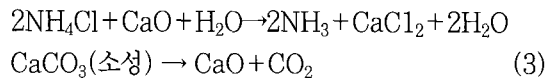
수한 소금물로 정제하고, 석회석을 1000℃ 온도로 가열한 후 소성을 통해 CaO와 CO<sub>2</sub>로 분리되고, 여기에서 생성된 물질을 액상에서 반응시킴으로써 소다회가 제조된다. 이 과정에서 염화암모늄(NH<sub>4</sub>Cl) 성분 중의 암모니아 회수를 위해 사용한 소성 석회석(생석회)를 분해·증류하면서 폐수가 발생한다. 이 폐수를 침전시키면 염화암모늄 분해 시 과잉 공급된 생석회와 미소성된 석회석, 불순물 등 무기성 고형물인 슬러지 상태의 부산석회가 발생한다. 이러한 소다회의 생산 화학식은 아래와 같다.



또는



그리고 부산석회가 발생하는 화학식은 아래와 같고, 그림 1은 부산석회 발생 과정을 나타내고 있다.



부산석회는 소다회를 생산 과정에서 발생하는 무기성 슬러지로서, 주요 구성 성분은 칼슘 화합물(약 50%)과 마그네슘 화합물(약 20%), 실리카 화합물

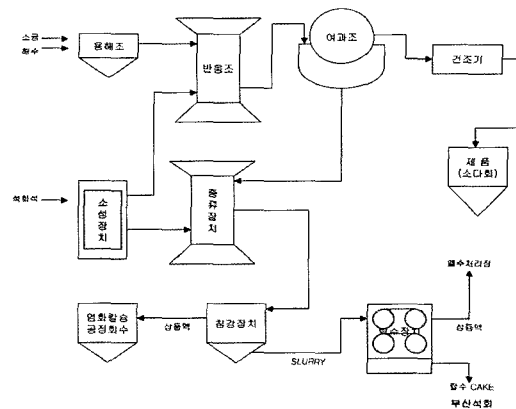


그림 1. 부산석회 발생 과정



표 1. 부산석회의 중금속 용출 시험 결과

중금속	폐기물 공정 시험법(mg/l)		
	기준치	회사측 제시치(1995)	보건환경 연구원(1999)
납	3.0	불검출	불검출
구리	3.0	불검출	0.03
비소	1.5	불검출	불검출
수은	0.005	불검출	불검출
카드뮴	0.3	0.01	0.05
크롬	1.5	불검출	불검출
시안	1.0	불검출	불검출

등으로 이루어져 있다(표 2 참조). 이 중에서 부산석회 구성 성분의 50%를 구성하는 칼슘 화합물은 골재 표면 박리 방지의 효과적인 성분으로 알려져 있다. 따라서 부산석회의 50%를 구성하는 칼슘 화합물이 아스팔트 혼합물의 박리를 억제시키는데 효과적인 특성을 나타낼 것으로 판단된다.

폐기물관리법 제2조의 산업 폐기물로 분류된 부산석회는 인천 D사의 인근 매립장에 대략 310만 ton 정도가 매립되어 있다. 이로 인해 매립지 주변 지역의 환경오염 문제를 유발시키는 주요 원인이 되고 있으나, 다량의 부산석회를 재활용할 수 있는 관련 기술 개발이 부족한 실정이다. 기존 문헌 조사 결과로는 부산석회의 중금속 농도는 모두 환경 기준을 만족하여 중금속 오염 문제는 없으나, pH가 12 이상의 강알칼리성 물질로서 주변 수자원의 오염 문제를 야

기할 수 있다. 표 1은 부산석회의 중금속 용출 시험 결과를 나타낸 것이다.

## 2.2 부산석회의 구성 성분

부산석회와 가장 유사한 성분을 가진 아스팔트 혼합물의 채움재는 박리방지제로 활용되는 소석회이다. 이러한 소석회(hydrated lime)는 생석회에 물을 가하여 수화시킨 것으로 백색 또는 회백색의 분말로서 알칼리 성분을 나타낸다. 소석회 분말은 0.15mm체에 98% 이상 통과하며, 도질 개량재로도

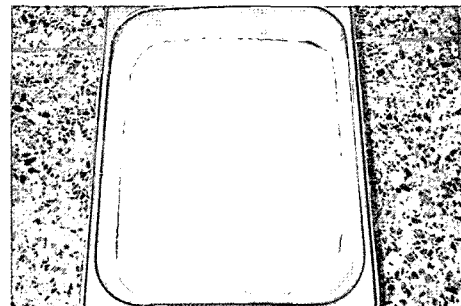
표 2. 소석회와 부산석회의 화학성분 분석결과  
(한국기초과학지원연구원 시험)

구성 성분	소석회 (중량 %)	부산석회 (중량 %)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.79	1.81
CaO	65.34	47.72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	0.12	0.83
K <sub>2</sub> O	0.02	0.38
MgO	0.82	18.12
MnO	0.01	0.08
Na <sub>2</sub> O	0.19	3.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.07
SiO <sub>2</sub>	1.32	7.26
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.05
L.O.I**	31.34	20.64
Total	99.98	99.97

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Total Fe      \*\*L.O.I : loss on ignition



(a) 슬러지 상태의 부산석회(가공 전)



(b) 부산석회 분말(가공 후)

그림 2. 부산석회의 가공 전 · 후



현재 많이 사용하고 있다.

부산석회는 소다회 생산 과정에서 석회석을 사용하여 발생하는 부산물로서 일반적으로 소석회와 비슷한 화학 성분을 나타내고 있다. 표 2는 소석회와 부산석회의 X-Ray Fluorescence(XRF) 화학성분 분석시험을 통한 화학 구성 성분들을 비교한 것이다.

그림 2는 슬러지 상태의 부산석회와 이를 열처리 후 채움재 분말로 가공 처리한 사진을 비교한 것이다. 초기 무기성 슬러지 상태인 부산석회를 100℃의 일정한 온도로 24시간 가열한 후 파쇄기를 이용하여 0.075mm 이하의 입도 조정을 통해 부산석회 분말로 만들어 아스팔트 혼합물의 채움재로 사용한다.

### 3. 실내 실험

#### 3.1 실험 계획

본 연구에서는 부산석회를 채움재로서 대체 가능성을 평가하기 위하여 부산석회 분말의 양을 석회석 분 채움재의 중량 대비 25%, 50%, 75%, 100% 비율로 변화시켜 아스팔트 혼합물에 혼합하였다. 아래의 그림 3은 실험 계획과 시험 종류를 나타낸 것이다.

부산석회 분말의 배합비율별로 각 아스팔트 혼합물의 마찰 배합설계를 실시하였으며, 실내 실험으로 마찰안정도, 간접인장, 휠트래킹, 수분민감성 등의 시험

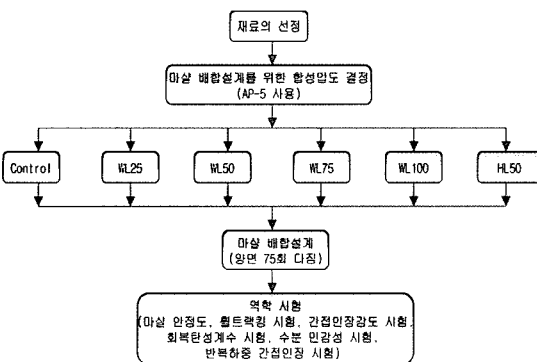


그림 3. 실험 계획 공정도

을 수행하였다. 표 3은 부산석회의 배합비율로 각 아스팔트 혼합물의 시험 코드를 나타낸 것이다.

표 3. 배합비율별 아스팔트 혼합물의 시험 코드표

시험코드	배 합 비
Control	석회석분 채움재 100%
WL25	석회석분 채움재 75% + 부산석회 25%
WL50	석회석분 채움재 50% + 부산석회 50%
WL75	석회석분 채움재 25% + 부산석회 75%
WL100	부산석회 100%
HL50	석회석분 채움재 50% + 소석회 50%

#### 3.2 아스팔트 혼합물의 배합설계

본 연구에 사용한 일반 아스팔트는 국내에서 생산된 S사의 AP-5 (침입도 기준 60~80)를 사용하였다. 또한 아스팔트 혼합물의 제조에 사용된 굵은 골재와 부순 모래는 포천 석산에서 생산된 편마암 종류의 쇄석을 사용하였다. 그림 4는 본 연구에서 적용한 골재의 합성입도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 마상 배합설계 방법으로 아스팔트 혼합물을 제작하였다. 표 4는 각 아스팔트 혼합물의 배합 설계 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 각 아스팔트 혼합물의 최적 아스팔트 함량 차이는 각 채움재의 입도 및 흡수율 등의 특성에 의해 나타난 것으로 판단된다.

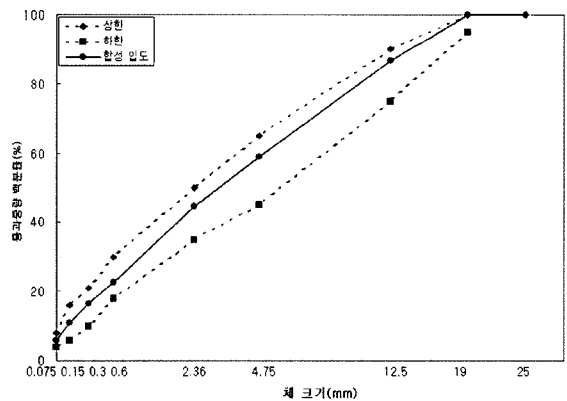


그림 4. 20mm 밀입도의 골재 합성 입도



표 4. 아스팔트 혼합물의 배합 설계 결과

골재 입도	혼합물 종류	AC (%)	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	공극률 (%)	VMA (%)	포화도 (%)	안정도 (kgf)	흐름치 (0.01cm)
20mm 밑 입도	Control	5.02	2.397	4.62	16.94	71.92	2,272	34
	WL25	4.70	2.441	3.52	15.07	76.23	2,496	30
	WL50	4.77	2.428	3.72	15.52	75.38	2,673	32
	WL75	4.77	2.428	3.71	15.46	75.37	2,734	31
	WL100	4.80	2.419	3.76	15.74	75.19	2,614	30
	HL50	4.79	2.433	4.13	15.40	73.97	2,366	33

### 3.3 시험 방법

#### 가. 간접인장강도 시험

아스팔트 혼합물의 피로 균열 저항성과 온도 균열 저항성을 평가하기 위해 -20, -10, 0, 25℃ 온도별로 간접인장강도 시험을 실시하였다.

#### 나. 회복탄성계수 시험

아스팔트 포장은 계절적 기후 변화나 습윤 상태와 같은 환경적 요인에 따라 다양한 거동 특성을 파악하기 위해 Roque(1992) 등이 개발한 간접인장 시험을 이용하여 -20, -10, 0, 5, 25, 60℃로 온도별로 시험을 실시하였다. 그림 5는 시험에서 사용된 0.1초의 재하 기간(pulse time)과 0.9초의 휴지 기간(rest time)을 나타내는 하중 형태를 보여주고 있다.

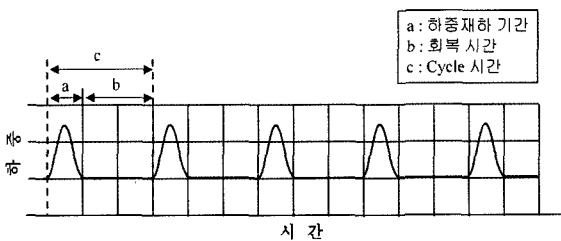


그림 5. 시험 하중의 형태

#### 다. 수분 민감성 시험

부산석회를 첨가한 아스팔트 혼합물의 수분 민감

성을 평가하기 위해 마샬 잔류 안정도와 Lottman 시험(AASHTO T 283)을 실시하였다. 마샬 잔류 안정도 시험을 통해 MSR(Marshall Stability Ratio)을 구하고, Lottman 시험을 통해 TSR(Tensile Strength Ratio)을 측정하여 수분 민감성을 평가하였다. MSR과 TSR은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$MSR = \frac{\text{잔류 마샬 안정도}}{\text{기준 마샬 안정도}} \times 100(\%) \quad (4)$$

$$TSR = \frac{\text{동결융해 처리한 공시체의 간접인장강도}}{\text{기준 공시체의 간접인장강도}} \times 100(\%) \quad (5)$$

#### 라. 반복하중 간접인장 시험

아스팔트 혼합물의 피로 균열에 대한 저항성을 평가하기 위해 반복하중을 적용한 간접인장 시험을 실시하였다. 시험에 적용한 반복 하중은 0.1초간 haversine 형태의 하중을 재하하고 0.4초간 휴지기간을 갖는 2Hz의 주기로 실시하였다. 본 시험에서 사용한 하중 크기는 최대 규정 하중인 500lb(227kg)로 결정하였고, 30lb(13.6kg) 정도의 하중을 시편의 구속 하중으로 항상 재하되도록 설정하였다.

#### 마. 휠트래킹 시험

실내 시험인 휠트래킹 시험은 동적 반복 크리프 시험의 일종으로 아스팔트 혼합물의 내유동성과 소성 변형 저항성을 평가하는데 사용된다. 시험을 통해 시



간접 침하량(Relative Deformation)과 동적 안정도(Dynamic Stability)를 구하여 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 마찰 안정도

다음의 그림 6과 같이 일반 석회석분과 부산석회 비율에 따른 각 아스팔트 혼합물의 마찰 안정도는 다소의 차이를 나타냈으나, 모두 시방 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 부산석회를 일정 비율로 첨가한 경우에 다른 혼합물보다 안정도가 더 높게 측정되었다. 채움재의 배합비율에 따른 마찰 안정도의 변동폭은 최대 9.5%로 모두 유사한 거동 특성을 나타내었다.

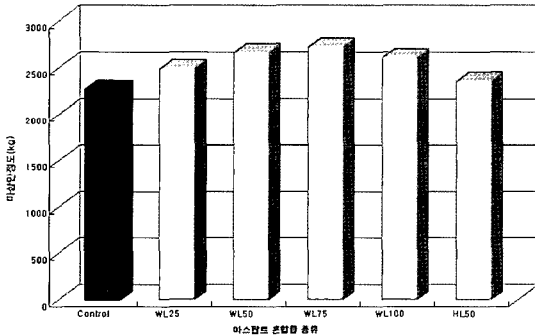


그림 6. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 마찰 안정도

### 4.2 간접인장강도

다음의 그림 7과 같이 0℃ 이상의 상온에서는 부산석회를 첨가한 혼합물과 첨가하지 않은 혼합물, 그리고 소석회를 사용한 혼합물 모두 유사한 거동 특성을 보인 반면 0℃ 이하 저온에서는 혼합물에 따라 상이한 거동 특성을 나타내었다. 특히 -20℃에서는 부산석회를 첨가한 아스팔트 혼합물의 간접인장강도가 control 혼합물보다 최고 40% 정도 높게 나타나 저온에서의 인장 균열 저항성이 높게 평가되었다.

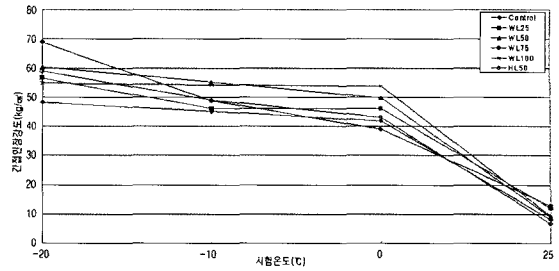


그림 7. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 간접인장강도

### 4.3 회복탄성계수

다음의 그림 8과 같이 부산석회를 첨가한 아스팔트 혼합물의 회복탄성계수는 저온보다는 상온 및 고온에서 변동폭이 좀 더 크게 나타났다. control 혼합물과 소석회 혼합물은 0℃ 이상에서 비교적 변동폭이 크게 나타난 반면, 부산석회 혼합물은 상대적으로 작은 회복탄성계수의 변동을 나타내었다. 따라서 부산석회 혼합물이 다른 혼합물에 비해 온도 감온성이 상대적으로 낮게 나타나 온도 균열을 억제하는데 효과적인 것으로 판단된다.

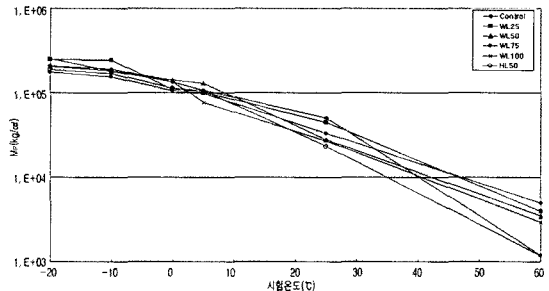


그림 8. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 회복탄성계수

### 4.4 수분 민감성

그림 9, 10과 같이 박리 저항성을 개선시키는 박리방지제로 알려진 소석회는 MSR(Marshall Strength Ratio), TSR(Tensile Strength Ratio) 모두에서 가장 우수한 시험값이 측정되었다. 이와 비교하여 부산석회는 상대적으로 낮은 MSR, TSR을

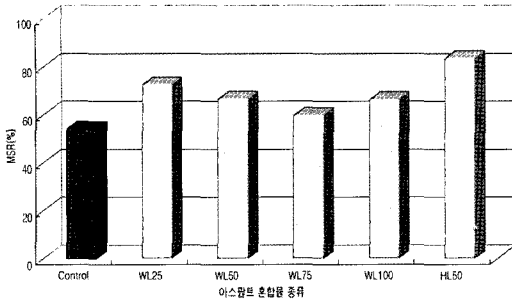


그림 9. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 MSR(%)

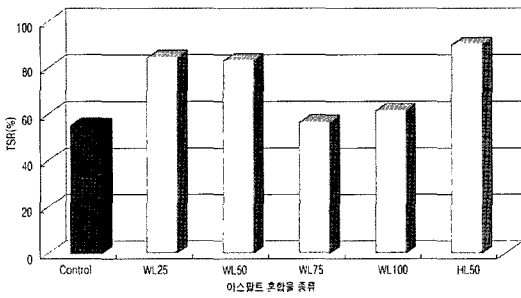


그림 10. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 TSR(%)

나타내었지만, control 혼합물보다는 높은 박리 저항성을 나타내는 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 소다회를 생산하는 과정에 생산된 부산석회의 성분 변화로 인해 박리 저항성을 개선시키는 칼슘 화합물이 소석회보다 상대적으로 낮은 비율을 차지하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.5 반복하중 간접인장 시험

다음의 그림 11과 같이 control 혼합물은 반복하중 재하 횟수 7,492회에서 파괴가 발생한 반면, 부

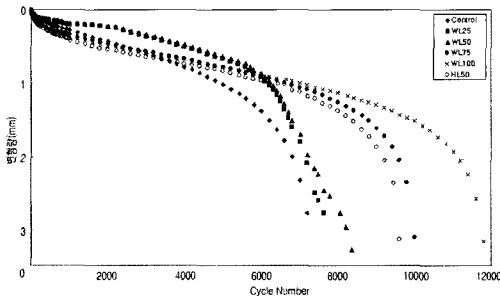


그림 11. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 반복하중 간접인장 시험

산석회를 첨가한 아스팔트 혼합물은 상대적으로 높은 재하 횟수에서 파괴가 발생하였다. 따라서 상온(25℃)에서 부산석회의 첨가로 인해 아스팔트 혼합물의 피로 저항성은 개선되는 것으로 판단된다.

#### 4.6 휠트래킹 시험

다음의 그림 12, 13과 같이 부산석회 혼합물의 동적 안정도가 control 혼합물보다 월등히 높은 것으로 측정되었다. 부산석회 혼합물의 동적 안정도는 최대 4,219cycle/min(WL100), 최소 2,598cycle/min(WL50)을 나타내어 control 혼합물과 비교하여 2.8~4.5배 정도로 소성변형 저항성이 개선된 것으로 나타났다. 특히 부산석회 배합비가 높을수록 동적 안정도도 높게 측정된 것으로 나타나 부산석회가 고온에서 혼합물의 소성변형 저항성을 개선시키는데 효과적인 채움재 분말로 판단된다.

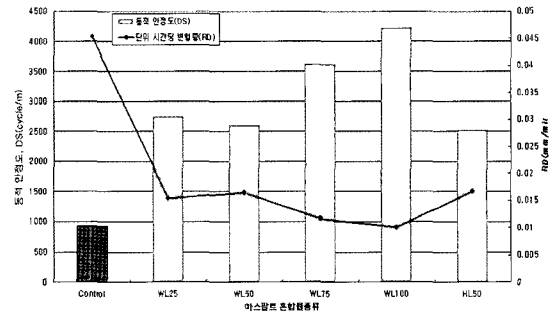


그림 12. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 동적 안정도 및 RD

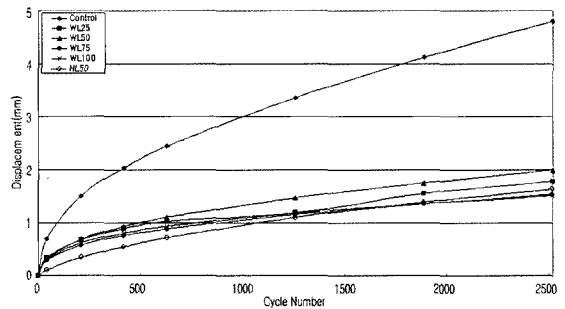
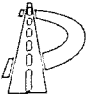


그림 13. 아스팔트 혼합물의 종류에 따른 변형량



## 5. 결론

1. 상온에서 부산석회 혼합물의 인장강도는 일반 혼합물, 소석회 혼합물과 차이가 없었다. 그러나 저온(-20℃~0℃)에서 인장강도는 다른 혼합물에 비해 모두 높게 나타났다. 이는 부산석회가 아스팔트 혼합물의 저온 균열에 대한 저항성은 개선시키는데 효과적인 채움재로 대체 가능함을 나타내는 결과이다.
2. 온도 균열의 발생 가능성을 파악하기 위한 회복탄성계수 시험에서 부산석회 혼합물의 온도 감온성은 일반 혼합물, 소석회 혼합물보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 부산석회 혼합물이 다른 혼합물에 비해 온도 균열에 대한 저항성이 우수한 성능을 나타내는 결과로 판단된다.
3. 박리 저항성이 뛰어난 소석회 혼합물과의 비교를 위해 마샬 잔류안정도 시험과 Lottman 시험을 수행한 결과, 부산석회를 첨가한 아스팔트 혼합물의 박리 저항성은 소석회 혼합물에 비해 상대적으로 모두 낮게 측정되었다. 그러나 일반 혼합물과 비교하면 부산석회 혼합물의 박리 저항성은 뛰어난 것으로 나타났다.
4. 간접인장 반복하중 시험을 통해 피로 균열 저항성을 평가한 결과, 부산석회 혼합물의 피로 균열 저항성이 일반 혼합물, 소석회 혼합물보다 높게 측정되었다. 부산석회 혼합물의 첨가 비율이 높을수록 피로 균열 저항성은 증진되는 것으로 나타났다.
5. 고온(60℃)에서 부산석회 혼합물의 동적 안정도는 일반 혼합물에 비해 2.8~4.5배까지 월등히 높았으며, 소석회 혼합물과 비교해도 1.5배정도 높게 나타났다. 부산석회의 배합비가 높을수록 동적 안정도는 높게 나타나 부산석회 혼합물이 고온에서 소성변형 저항성을 증진시키는 것으로 판단된다.

위와 같은 결과를 통해 부산석회의 채움재 대체 가능성은 상당히 높은 것으로 나타났으며, 향후 현장 적용성 및 실내 검증 연구를 통해 실용화 등의 추가 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다

## 참고 문헌

1. 신은철, "부산석회(Dreg)를 이용한 도로 기층재 및 보조기층재 개발에 관한 연구", 인천대학교, 1996.
2. Roque, R and Buttlar, W. G., "The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties using the Indirect Tensile Mode", *Proceeding AAPT*, Vol. 61, 1992.
3. Roque, R and Buttlar, W. G., "Evaluation of SHRP Indirect Tension Tester to Mitigate Cracking in Asphalt Concrete Pavement and Overlays", *Final Report*, University of Florida, August 1997.
4. Kandhal, P. S., "Moisture Susceptibility of HMA Mixes: Identification of Problem and Recommended Solutions", National Asphalt Pavement Association Quality Improvement Publication(QIP) 119, December 1992.
5. Lottman, R. P., "Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete-Field Evaluation", *Transportation of Research Record, NCHRP Report 246*, 1982.
6. Kennedy, T. W., Roberts, F. L. and Lee, K. W., "Evaluation of Moisture Susceptibility of Asphalt Mixtures Using the Texas Freeze-Thaw Pedestal Test", *Proc AAPT*, Vol. 51, 1982. pp. 327-341.

(접수 : 2005. 5. 30)