

주물고사 첨가 아스팔트 콘크리트의 특성에 관한 연구

Characteristics of Asphalt Concrete using Waste Foundry Sand

김 광 우* · 고 동 혁** · 최 동 춘*** · 김 성 운**** · 김 중 열****

Kim, Kwang Woo · Ko, Dong Hyuk · Choi, Dong Chon · Kim, Sung Won · Kim, Joong Yul

Abstract

This study was performed to evaluate the characteristics of waste foundry sand (WFS) and the asphalt mixture made of a foundry waste sand. To estimate the applicability of WFS, chemical and physical properties were measured by XRF(X-ray fluorescent), and SEM(Scanning electronic microfilm). To improve the stripping resistance of WFS asphalt mixture, anti-stripping agents (a hydrated lime and a liquid anti-stripping agent) were used. To improve tensile properties and durability of WFS asphalt concrete mixture, LDPE(low-density polyethylene) was used as an asphalt modifier. Marshall mix design, indirect tensile strength, tensile strength ratio(TSR) after freezing and thawing, moisture susceptibility and wheel tracking tests were carried out to evaluate performance of WFS asphalt concrete. Comparing with conventional asphalt concrete, WFS asphalt concretes showed similar or the better quality in mechanical properties, and satisfied all specification limits. Therefore, it is concluded that waste foundry sand can be recycled as an asphalt pavement material.

Keywords : waste foundry sand, XRF, SEM, zeta potential, LDPE, anti-stripping agent, tensile strength ratio, freezing and thawing.

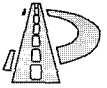
요 지

본 연구는 주물고사를 이용한 아스팔트 콘크리트와 주물고사의 물리적·화학적 특성을 비교·분석하는 것이다. 주물고사의 아스팔트 콘크리트 적용성을 평가하기 위하여 XRF, SEM, 제타전위를 측정하여 주물고사의 물리·화학적 특성을 알아보았다. 주물고사 아스팔트 콘크리트의 박리저항성을 향상시키기 위하여 박리방지제(소석회(Hydrated lime), 액상박리방지제)를 사용하였다. 그리고 주물고사 아스팔트 콘크리트 혼합물의 인장특성과 내구성 향상을 위하여 LDPE를 사용하였다. 또한 주물고사 아스팔트 콘크리트의 공용성을 알아보기 위하여 간접인장강도, 수분취약성시험, 동결·융해시험, 반복주행시험을 수행하였다.

시험결과 주물고사 아스팔트 콘크리트의 역학적 특성이 일반 아스팔트 콘크리트에 비해 같거나 향상되는 것으로 나타났다. 따라서 주물고사를 아스팔트 콘크리트에 재활용할 수 있다는 결론을 얻었다.

핵심용어 : 주물고사, XRF, SEM, 젯타포텐셜, LDPE, 박리방지제, 인장강도비, 동결융해.

* 정회원 · 강원대학교 농업공학부 교수
** 정회원 · 동일기술공사 도로부
*** 정회원 · 강원대학교 대학원 농공학과 박사 수료
**** 정회원 · 강원대학교 대학원 농공학과 석사과정



1. 서론

경제발전에 따른 산업화와 함께 우리나라 주물공업의 수요도 크게 증가하고 있다. 특히 주철제품의 수요가 많은 자동차 등과 같은 기계산업이 세계적 규모로 발전됨에 따라 주물공업도 대형화되고 단지화 되면서 중요한 산업으로써의 위치를 굳혀 가고 있다.

주물고사(Waste foundry sand : WFS)는 주물제품 주조를 위해 모래로 제조한 주형을 일회 사용 후 폐기함에 따라 발생하는 모래이다. 주물업체의 주물고사 발생량은 1999년 말 기준으로 연간 약 70만 톤으로 추산하고 있다. 이와 같이 발생된 주물고사의 처리는 주로 매립에 의존하고 있으며 재활용되는 양은 겨우 10% 정도에 지나지 않는다. 이러한 엄청난 양의 주물고사 매립은 기업입장에서 보면 폐기물 처리에 따른 비용의 낭비이며, 국가적으로 볼 때 이용 가능한 자원의 손실이다. 또한 주물 산업체가 주로 인구 밀집지역에 모여있으므로 이 지역 매립장의 매립난을 가속화하고 불법투기에 따른 환경오염의 부작용도 낳고 있다.

따라서 매년 다량 발생하는 주물고사를 재활용할 수 있는 실질적인 방안 연구는 시급한 문제이다. 특히 성토매립, 도로노체 등의 단순용도보다는 고부가가치의 건설재료로 활용하여 자원절약, 매립난 해소, 환경오염 방지 등에 크게 기여할 수 있는 보다 적극적이고 효율적인 재활용 방안에 대한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 보다 적극적인 주물고사 재활용 방안으로 주물고사를 아스팔트 혼합물의 잔골재로 사용하는 것이다. 이를 위하여 주물고사의 물리·화학적 특성시험을 수행하였으며, 이를 첨가한 아스팔트 혼합물을 제조하는 방법을 개발하고, 여러 가지 실내시험을 통하여 주물고사 첨가 아스팔트 콘크리트의 역학적 특성을 비교·분석

하여 주물고사의 활용가능성을 판단하였다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험 재료

2.1.1 아스팔트 시멘트

본 연구에 사용된 아스팔트 결합재는 침입도 등급 85~100인 S사의 AC 85~100(AP-3)을 사용하였다.

2.1.2 주물고사(Waste foundry sand)

본 연구에 쓰인 주물고사는 인천지방의 한 주물공단에서 채취하였으며 가공 공정을 거쳐 아스팔트 혼합물용 잔골재로 재생 처리된 주물고사이다. 주물고사는 각종 첨가제의 첨가와 고온의 주조과정으로 인하여 강모래와는 달리 어두운 암갈색을 띄며 입도가 고운 모래이다. 주물고사는 주형의 종류와 주물 재질별로 구분되는데, 철(Fe) 성분이 포함된 주철이나 주강주물고사는 재처리 공정시 magnetic separator에 의해 고철이나 편철, 분철 등의 분리가 가능하나 비철(동, 알루미늄 등)주물은 기계적 방법에 의한 분리가 어려워 수작업이 불가피하기 때문에 주형 종류와 주물재질에 따른 분류 방법을 연관시켜 주물공장에서 발생하는 주물고사의 재활용 여부를 판단한다. 위의 주조 과정에 의한 주물고사의 품질시험 결과 비중, 흡수율, 조립율, 입도 모두 역청포장 혼합물용 잔골재 규격을 만족하였다. 표 1과 표 2는 주물고사의 품질시험과 입도분석 결과이다.

표 1. Properties of waste foundry sand

Test item	Specific gravity	Absorption (%)	Fineness Modulus	Color
Waste foundry sand	2.71	0.33	2.42	Dark black

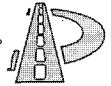


표 2. Gradation of waste foundry sand

Item Specimen	Passing percent (%)							
	10 mm	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Spec. limit (Fine agg.)	100	100	95 ~100	85 ~100	65 ~95	30 ~60	5 ~25	0 ~5
Waste foundry sand	100	100	98.79	98.34	80.54	43.74	7.04	3.22

2.1.3 골재

본 연구에 사용된 굵은골재는 중부지방에서 생산되는 편마암계통의 최대치수 19mm 골재를 사용하였으며, 잔골재는 굵은골재를 생산하는 과정에서 발생하는 부순모래(screenings)와 주물고사를 사용하였다. 주물고사의 조립률이 낮기 때문에 입도조정을 위해 비교적 입자가 굵은 바다모래를 첨가하였다.

골재들은 KS규정에 의해 품질시험을 실시하였으며 각 골재의 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 3. Properties of aggregates

Test items	Coarse aggregate (Gneiss)		Fine aggregates (Gneiss)		Sea sand	Filler
	Spec. limit	Measured value	Spec. limit	Measured value	Measured value	Measured value
Specific gravity	> 2.45	2.70	> 2.50	2.70	2.70	2.78
Abrasion (%)	< 35	18	—	—	—	—
Absorption (%)	< 3.0	0.7	< 3.0	0.26	1.36	—
Fineness Modulus	—	6.17	2.3~3.1	3.29	3.34	—

2.1.4 소석회(Hydrated lime)

예비시험으로서 Texas Boiling Water Test에 의한 주물고사와 아스팔트의 박리(striping)시험

결과 주물고사는 박리저항성이 일반 강모래에 비해 현저히 떨어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 문헌(Kim and Amirkhanian 1991, Lee 1982)을 통해 박리방지제(anti-stripping agent: ASA)의 한 종류인 소석회를 첨가제로 선정하여 아스팔트 혼합물에 사용하였다. 소석회 첨가방법은 일반적으로 소량(중량비로 1% 이내) 사용하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 플랜트에서의 활용도를 높이기 위해 채움재(filler)를 모두 소석회로 사용하는 방법을 취했다. 이 경우 별도의 채움재를 넣을 필요가 없어 경제적으로도 큰 차이가 없으며 그 함량은 전체중량의 4% 또는 5%를 사용하였다. 소석회는 No.200체를 거의 다 통과하는 백색의 채움재 형태로 표 4의 아스팔트 혼합물의 채움재 규격을 만족하였다.

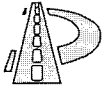
표 4. Physical properties of hydrated lime

Test item	Spec. limit	Hydrated lime
Specific gravity	—	2.50
Water contents (%)	< 1	0.75
Flow (%)	< 50	30.10
Swelling rate (%)	< 3.0	2.86
Stripping	< 1/4	Pass

2.1.5 액상박리방지제

(Liquid anti-stripping agent : ASA)

액상박리방지제는 대부분 특허로 인하여 성분을 알 수 없으나 골재와 아스팔트 사이의 계면에 수분이 침투하는 것을 막는 계면활성제로서 주로 양이온 성분을 포함하고 있다. 따라서 골재표면을 양이온 성분으로 치환시켜 골재와 아스팔트의 부착력을 높여 주는 역할을 한다. 본 연구에서는 문헌(Tunncliff and Root 1982)과 제조회사의 추천



량에 따라 ASA의 첨가량을 아스팔트 함량의 0.5%와 1%로 결정하였으며 고속전단믹서를 이용하여 아스팔트와 미리 혼합하여 사용하였다.

2.1.6 개질재

바인더의 개질에 따른 주물고사 아스팔트 콘크리트의 강성증진과 소성변형 저항성 향상을 위해 선행연구를 통하여 개질 효과가 우수한 것으로 판명된(김광우 등 1997) 국산 저밀도 폴리에틸렌(Low-density polyethylene : LDPE)을 사용하였다. LDPE는 No. 50 체에 거의 다 통과하는 비교적 고운 가루형태의 분말이다. LDPE는 아스팔트 중량의 4%, 6%를 믹서에 골재와 함께 바로 투입하고 건식혼합으로 아스팔트와 혼합하여 사용하였다.

2.2 주물고사의 물리·화학적 특성 시험

2.2.1 XRF, SEM 분석

주물고사의 박리원인을 파악하기 위하여 주물고사의 화학조성을 검증하였다. 주물고사의 화학조성을 비교·분석하기 위하여 강모래, 편마암 screenings, 주물고사의 XRF(X-ray fluorescent)를 측정하고 SEM을 이용하여 각 골재의 입형을 관찰하였다.

2.2.2 제타전위(Zeta potential) 측정

본 연구에 쓰인 아스팔트와 주물고사 사이의 박리를 규명하고 소석회의 박리저항 특성을 알아보기 위하여 제타전위 측정방법으로 각 재료들 고유의 전위를 측정하였다.

2.3 혼합물 시험방법

2.3.1 박리저항성 시험

박리는 혼합물의 형태나 아스팔트의 특성, 환경, 골재의 특성, 교통량 등과 같은 많은 변수에 의해 복잡하게 나타난다. 이중에서도 박리에 가장 큰 영향을 주는 변수는 아스팔트 혼합물의 수분 민감성이다. 따라서 본 연구에서는 주물고사에 소석회를 첨가한 혼합물과 첨가하지 않은 혼합물의 박리저항성을 검증하기 위하여 Texas Boiling Water Test(TBWT)를 실시하였다.

2.3.2 배합설계 및 마찰 안정도 시험

배합설계는 마찰방법을 사용하였으며 주물고사 아스팔트 콘크리트의 배합설계 시 골재의 입도는 건교부 19mm 표층용 밀입도 규격에 따라 입도조정하여 동일한 입도를 사용하였으며 주물고사 아스팔트 혼합물의 배합설계조건은 다음과 같다.

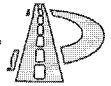
1) 입도조정을 위하여 해사를 사용하였다. 이 때 주물고사와 해사의 비율을 65 : 35로 혼합하여 이것을 전체중량의 20% 사용하였으며 첨가제를 사용하지 않았다.

2) 주물고사와 해사의 비율을 65 : 35로 혼합한것을 전체중량의 20%를 사용하고 채움재를 소석회로 모두 치환하였다. 이 때 소석회의 함량을 4%와 5% 2종류로 하였다.

3) 동일한 입도하에서 박리저항성 향상을 위하여 소석회를 첨가하지 않은 혼합물에 아스팔트 중량의 0.5%와 1%의 박리방지제를 첨가하여 배합설계를 실시하였다(Tunncliffe 1982).

4) 주물고사 아스팔트 콘크리트 혼합물의 강성증진과 소성변형 저항성 향상을 위하여 소석회를 첨가하지 않은 혼합물에 아스팔트 중량의 4%, 6%의 LDPE를 첨가하여 배합설계를 실시하였다.

5) 문헌에 의하면 미세입자를 제거하는 방안을 제시하였으므로 주물고사에서 #50체(0.3mm)이하의 분진을 제거하여 예비시험으로 TBWT와 안정도 시험을 수행하였다. 그 결과 박리현상이 줄어들고 안정도가 향상됨에 따라 주물고사의 분진



을 제거하여 박리방지제나 개질재를 첨가하지 않고 배합설계를 실시하였다.

공시체는 KSF 2337과 ASTM D 1559의 마살식 아스팔트 혼합물 제조 방법에 따라 상하 양면을 각각 50회 다집하여 제조하였다. 배합설계에서 얻어진 최적아스팔트함량으로 공시체를 제작하여 각종 시험을 수행하였다.

2.3.3 간접인장강도시험

최적 함량으로 제조된 마살 공시체로부터 25°C에서 간접인장강도를 구했다. 공시체 상하에 마살 공시체의 반경과 같은 곡률의 오목한 표면을 가진 폭 13mm의 금속 하중띠를 통해 50mm/min의 속도로 하중을 재하하여 최대하중과 이때의 수직 변형을 측정하였다. 강성지수(stiffness index)는 재하된 최대 하중에 대한 변형량의 비로서 그림 1과 같이 나타내었다(김광우 등 1997).

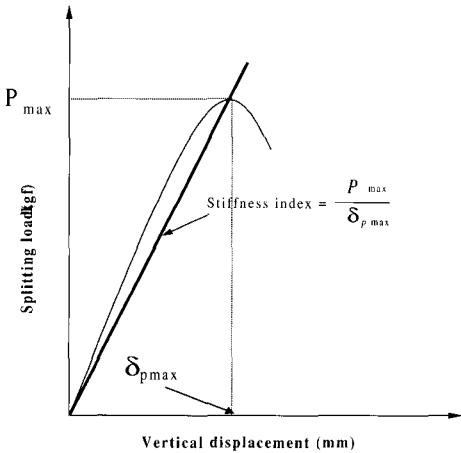


그림 1. Schematic illustration of stiffness index

2.3.4 동결·융해 및 인장강도비

겨울철 포장은 반복적으로 동결과 융해를 받

고, 이러한 동결-융해(freezing and thawing) 작용은 아스팔트 혼합물의 결합력 저하, 박리, 저온균열(low thermal cracking)의 원인이 된다. 본 연구에서는 이러한 동결-융해 작용에 따른 혼합물 특성치의 하나로 인장강도비(tensile strength ratio by freezing-and-thawing: $TSR_{f/t}$)를 측정하여 주물고사 아스팔트 콘크리트의 동결-융해에 대한 강도유지비율을 측정하였다. 혼합물별 마살 공시체를 Tunnicliff and Root (1984)의 제시에 따라 공극률 $8\pm 1\%$ 로 제조하여 동결 융해시험기에 7~28cycle 동안 동결융해 시킨 후 간접인장강도시험을 수행하였다.

동결-융해 1주기는 동결 8시간, 동결유지 -26°C 에서 4시간, 융해 8시간, 융해유지 $+4^{\circ}\text{C}$ 에서 4시간으로 총 24시간이 걸린다. 이와 같이 동결 및 융해 시간을 설정한 이유 및 시험방법은 문헌(오성균 2000)에 상세히 제시되어있다.

각 혼합물별로 공시체를 15개씩 제작하여 무작위로 3개를 선정하여 초기 ITS를 구하고 7일, 14일, 21일, 28일 동안 동결-융해 처리한 후 매번 무작위로 3개씩 공시체를 선정하여 ITS 시험을 하고 $TSR_{f/t}$ 를 구하였다. 인장강도비는 다음 식(1)에 의하여 계산하였다.

$$TSR_{f/t} = \frac{S_i}{S_0} \times 100\%$$

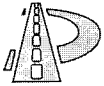
..... (1)

S_0 = 동결-융해를 거치지 않은 공시체의 간접인장강도

S_i = 동결-융해(해당 cycle)를 거친 공시체의 간접인장강도, $i = 7, 14, 21, 28$

2.3.5 수분취약성시험

주물고사 아스팔트 혼합물의 수분취약성을 측정하기 위해 마살 공시체를 공극률 $8\pm 1\%$ 로 제조하여 60°C 의 물에 24시간 침전하는 촉진수침처



리를 하여 인장강도비와 박리정도를 평가하였다. 이와 같은 촉진수침처리(expedited moisture conditioning : EMC)는 Tunniff & Root(1984)에 의하여 제시된 방법에 따른 것이다.

수침처리후의 강도유지비율을 알아보기 위하여 수침처리 전·후의 인장강도비율($TSR_{A/M}$)을 구하였다(식 (2)).

$$TSR_{A/M} = \frac{S_M}{S_A} \times 100 \% \quad \dots\dots\dots (2)$$

S_A : 촉진수침처리 전 간접인장강도

S_M : 촉진수침처리 후 간접인장강도

또한 박리정도를 평가하기 위해 간접인장강도 측정 후에 공시체의 파괴면을 육안으로 관찰하여 박리정도를 판정하였는데 이때 사용된 방법은 미국 조지아 교통국에서 개발된 방법을 사용하였으며 그 평가 방법은 표 5와 같다. 이 방법에 의한 박리정도를 나타내는 값 S가 2 이상이면 박리가 심한 것으로 간주된다(김광우 1998).

표 5. Criteria by stripping evaluation by Georgia DOT

Value of C	Value of F
C = Coarse aggregate stripping 1 : less than 10% 2 : 10~40% 3 : more than 40%	F = Fine aggregates stripping 1 : less than 10% 2 : 10~40% 3 : more than 40%
Visual Stripping Rating, $S = (C+F) / 2$	

2.3.6 반복 주행(Wheel tracking) 시험

주물고사 아스팔트 콘크리트의 소성변형 저항성을 추정하기 위하여 반복주행 시험을 수행하였다. 이를 위하여 305×305×70mm의 슬래브 공시

체를 롤러 가압다짐기로 다짐하여 공극률을 4±0.5%로 맞추어 제작하였다. 제작된 공시체는 24시간 양생 후 그림 2의 휠 트래킹 시험기를 사용하여 소석회를 첨가하지 않은 주물고사 아스팔트 혼합물과 소석회 4%, 5%, LDPE 4%, 6%를 첨가한 주물고사 아스팔트 혼합물의 수직 변형을 측정하고 그 결과를 비교 분석하였다. 공시체에 적용한 휠 트래킹용 바퀴는 재질이 강재인 직경 200mm, 폭 53mm로서 왕복 거리 200mm, 속도는 30회/min이다. 시험 온도는 60°C에서 실시되었고 적용된 윤하중은 70kg로 왕복 2700 cycle(5400 passes)동안의 변형량이 측정되었다.

반복주행시험을 통하여 각 혼합물의 동적안정도(Dynamic stability : DS)와 최종 침하량을 구하였다. 반복주행시험 중 LVDT로 읽어들이는 침하량을 컴퓨터를 통하여 기록하였으며 초기 일정횟수가 지난 후 반복재하에 따른 누적 침하율은 그림 3에서와 같이 기울기로 나타나게 되며 동적안정도는 혼합물 1mm 침하에 필요한 반복횟수로써 이를 그림과 같이 cycle/mm로 구하였다.

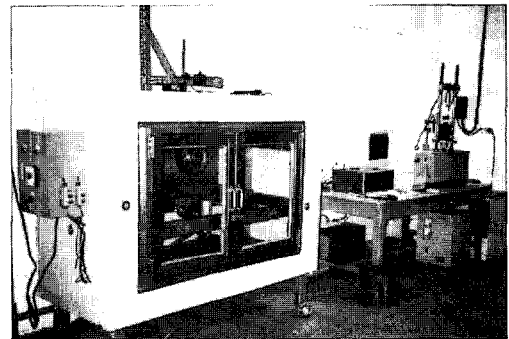


그림 2. Apparatus of wheel tracking test

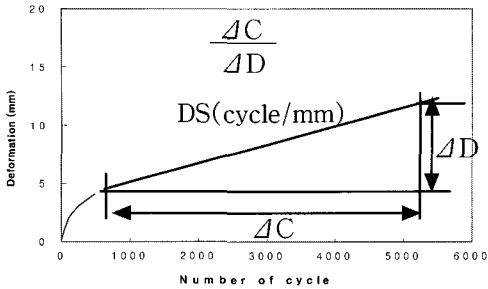
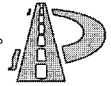


그림 3. Description of dynamic stability

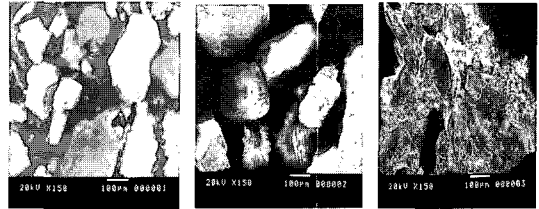


그림 4. Photograph of river sand by SEM (×150)

그림 5. Photograph of Screenings by SEM (×150)

그림 6. Photograph of WFS by SEM (×150)

3. 시험결과 및 분석

3.1 주물고사의 특성시험

주물고사(WFS), 강모래, 편마암 screenings의 XRF시험결과(표 6) 및 SEM 사진(Figs. 4, 5, 6)을 비교 분석해 보면 주물고사는 강모래 및 screenings(편마암)에 비해 미지의 미립자를 많이 포함하고 있으며 Al_2O_3 , CaO , K_2O , Na_2O 등의 함량이 상대적으로 낮은 편이고 SiO_2 와 Fe_2O_3 의 함량이 상대적으로 높았다.

표 6. Test result of XRF

(Unit: %)

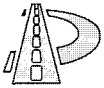
Specimen Item	River sand	Gneiss	WFS
SiO_2	78.390	68.451	87.123
Al_2O_3	10.384	14.369	3.542
Fe_2O_3	2.625	3.807	5.536
MnO	0.025	0.039	0.125
CaO	0.747	1.724	0.274
K_2O	4.145	5.178	0.735
Na_2O	1.676	2.975	0.931
Others	1.978	2.686	1.534
Total	99.970	99.229	99.806

3.2 제타전위

주물고사 혼합물의 박리원인은 모래로 주물형틀을 만들 때 쓰이는 점결재와 고온 때문에 주물사의 전하밀도변화가 일어나 음(-)전하밀도가 커지게 되어 아스팔트와 친화력이 낮아지기 때문인 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여 각 재료의 제타전위를 측정하고, 표 7에서 보듯이 소석회를 제외한 나머지 4종류의 시료들은 음(-)전하를 나타냈으며, 특히 주물고사의 값이 다른 시료에 비하여 상대적으로 음(-)전하가 크다. 음(-)전하가 큰 주물고사가 아스팔트와 혼합된 후 정전기적 반발력이 증가하게 되고 이러한 작용이 아스팔트와 주물고사의 결합력을 약하게 만들어 박리현상이 발생하는 원인이 된다.

표 7. Test result of zeta potential

	Zeta potential (mV)				
	WFS	River sand	Screenings	Sea sand	Hydrated lime
1st run	-53.6	-18.4	-22.8	-29.8	+25.9
2nd run	-48.1	-18.3	-19.1	-27.9	+25.1
Avg.	-50.85	-18.35	-20.95	-28.85	+25.5



3.3 박리저항성 시험(Texas boiling water test)

주물고사 아스팔트 혼합물의 박리저항성을 보기 위하여 Texas Boiling Water Test(TBWT)를 실시한 결과 소석회를 첨가하지 않은 혼합물이 소석회를 첨가한 혼합물보다 박리가 많이 나타났다.

소석회를 첨가하지 않은 혼합물에 비해 소석회 첨가 혼합물은 아스팔트의 박리가 25% 이하로 관찰되어 소석회의 첨가로 인하여 박리저항성이 향상되었다.

이는 소석회의 수산화이온이 주물고사 표면을 알칼리성으로 만들어주고 양(+)전하의 소석회와 음(-)전하의 주물고사와 아스팔트사이의 정전기적 평형상태를 유지하여 아스팔트와 주물고사의 결합력을 향상시켰기 때문이다.

Figs. 7, 8은 주물고사에 소석회를 첨가하지 않은 혼합물과 주물고사에 소석회를 첨가한 혼합물의 TBWT 후의 사진이다. 사진으로 보면 소석회를 첨가하지 않은 혼합물은 아스팔트의 피복이 많이 벗겨져 주물고사와 굵은 골재가 분리된 상태이고 소석회를 첨가한 혼합물은 골재표면에 아스팔트가 피복되어 굵은 골재와 주물고사가 결합된 상태이다.



그림 7. WFS mixture without lime showing stripping after TBWT (×6)

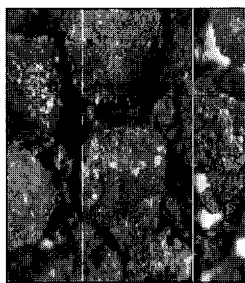


그림 8. WFS mixture with lime showing no stripping after TBWT (×6)

3.4 배합설계

19mm 표층용 밀입도 규정의 입도를 맞추기 위하여 골재 전체중량의 20%를 해사와 주물고사의 비율을 65 : 35로 하여 배합설계를 실시하였다(control). 표 8은 각 혼합물 별 배합설계 결과 얻어진 OAC 및 OAC로 제조한 혼합물의 기본 특성을 보여준다.

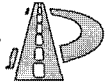
표 8. Mashall properties of WFS asphalt mixtures

	OAC (%)	Flow (0.1mm)	Stability (kgf)	ITS (kgf/cm ²)	Stiffness index (kgf/mm)
Control	5.2	28	754	8.7	420
lime 4%	5.7	29	1239	8.0	442
lime 5%	5.4	27	1277	8.4	509
ASA 0.5%	5.1	28	1000	9.4	552
ASA 1.0%	5.1	27	1021	9.7	544
LDPE 4%	4.8	27	1050	10.8	721
LDPE 6%	4.8	25	1229	11.1	729
Dust removed	5.1	28	1082	9.0	534

3.5 마샬안정도, 간접인장강도시험

표층용 주물고사 아스콘 혼합물의 배합설계로부터 얻어진 최적아스팔트 함량으로 마샬공시체를 제작하여 안정도 및 간접인장강도를 측정할 결과는 표 8과 같다. 전반적으로 control에 비해 안정도가 증가하였으며 소석회 4%, 5%를 채움재로 대체하였을 때 1200kgf를 넘는 높은 안정도 값을 얻을 수 있었다.

간접인장강도는 LDPE 6%에서 가장 높은 값을 나타냈고 control에 비해 대부분 높은 값을 얻었다. lime 4%와 5%는 control보다 ITS에서는 다소 낮았지만 강성이 증가되는 것으로 나타났다.



그러므로 혼합물의 강성이 증가되어 안정도의 증가는 물론 소성변형 저항성이 향상되는 것을 알 수 있었다.

3.6 침출수 시험

수질검사를 의뢰한 결과 유해물질은 거의 검출이 안되거나 일부 용출된 성분도 폐기물관리법(시행규칙 제2조 3항)의 기준치와 비교할 때 극히 미미하여 주물고사를 아스팔트 콘크리트에 사용할 경우 무해한 것으로 나타났으며, 표 9는 주물고사와 소석회를 첨가한 아스팔트 콘크리트의 침출수를 강원도 보건환경연구원에 의뢰하여 수질검사를 실시한 결과이다.

표 9. 주물고사 아스콘의 침출수 수질검사 결과

구분	기준치 (mg/l)	소석회 0%	소석회 1%	소석회 1.5%	소석회 4%대체	소석회 5%대체
구리	<3	0.014	0.011	불검출	불검출	불검출
카드뮴	<0.3	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
납	<3	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
크롬	<1.5	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
비소	<1.5	0.01	불검출	불검출	불검출	불검출
수은	<0.005	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
시안	<1	불검출	불검출	불검출	불검출	불검출
pH	-	6.7	6.8	7.1	6.7	6.9

3.7 동결·융해시험

표 10은 동결·융해 cycle 경과에 따른 간접인장강도비를 나타낸다. 동결융해시험 결과, 동결·융해 28cycle 후 간접인장강도비는 박리방지제와 LDPE를 첨가한 혼합물이 control 혼합물에 비해 우수하였으며 LDPE 6% 첨가 혼합물의 강도유

지비율이 가장 높았다. 또한 주물고사의 분진을 제거한 혼합물의 강도유지비율이 control 혼합물에 비해 우수하였다.

표 10. Test result of freeze-thaw test

Cycle	7cycle	14cycle	21cycle	28cycle
Mixtures	TSR (%)	TSR (%)	TSR (%)	TSR (%)
Control	89.3	72.4	64.7	61.6
lime 4%	95.6	74.5	78.1	62.6
lime 5%	97.8	74.7	66.5	68.2
ASA 0.5%	105.0	95.3	87.9	91.9
ASA 1.0%	103.0	83.6	96.6	91.3
LDPE 4%	99.0	87.9	92.7	87.9
LDPE 6%	118.0	109.3	108.1	94.5
Dust removed	103.0	90.6	94.8	86.9

일부 혼합물에서 동결-융해 후 TSR이 100% 이상이 나타났는데 이는 통계적 우연에 의한 것으로 판단된다. 즉 동결-융해 처리를 위해 다수의 공시체를 한날 만들어 각 cycle을 거친 후 무작위로 뽑아 시험할 때 그 값들이 통계적으로 유의차가 없다면 최초 측정치보다 동결-융해 처리 후의 값들이 우연히(by chance) 더 높게 나타날 수 있다. 그렇다고 이것이 동결-융해를 통해 ITS가 증가되는 증거라고 할 수는 없을 것이다.

3.8 수분취약성시험

control 혼합물, 박리방지제와 개질제를 첨가한 혼합물, 분진을 제거한 혼합물의 공시체를 제작하여 60°C에 24시간 촉진수침처리(EMC)하여 수분취약성시험을 수행하였다. 표 11은 수분취약성 시험 후 간접인장강도비를 나타내고 표 12는 수분취약성시험 후의 육안박리도 결과이다.

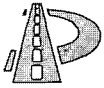


표 11. Test result of moisture susceptibility test

Cycle Mixtures	ITS before EMC (kgf/cm ²)	ITS after EMC (kgf/cm ²)	TSR (%)
Control	8.7	7.1	83.0
lime 4%	7.6	7.5	98.6
lime 5%	8.4	8.2	98.2
ASA 0.5%	9.4	8.8	95.0
ASA 1.0%	9.2	9.5	103.4
LDPE 4%	10.5	9.1	87.0
LDPE 6%	10.4	10.0	96.5
Dust removed	9.0	7.9	88.0

수분취약성시험 후 control의 TSR은 83% 정도로 나타났으며 전반적으로 대부분의 혼합물의 TSR이 control보다 높게 측정되었다. 특히 ASA 1%의 TSR이 가장 높았다. 수분취약성 시험에서도 lime 4%와 lime 5% 첨가 혼합물이 다른 혼합물에 비해 간접인장강도가 낮게 측정되었지만 축진수침처리 후의 간접인장강도 유지비율은 우수하였다.

표 12. Evaluation of stripping value by Georgia DOT method

Cycle Mixtures	Stripping values : S	
	Before EMC	After EMC
Control	1.0	2.0
lime 4%	1.0	1.0
lime 5%	1.0	1.0
ASA 0.5%	1.0	1.0
ASA 1.0%	1.0	1.0
LDPE 4%	1.0	1.0
LDPE 5%	1.0	1.0
Dust removed	1.0	1.5

수분취약성시험 후 공시체의 박리정도를 육안으로 관찰한 결과 박리방지제와 개질재를 첨가한 혼합물, 분진을 제거한 혼합물이 모두 박리도가 양호하게 나타났지만 수분취약성 시험 후 control 혼합물은 박리정도가 크게 나타났다.

3.9 반복주행시험

본 연구에서는 반복주행시험을 통하여 반복된 차량하중에 대한 각 혼합물의 소성변형 저항성을 비교해 보았다. 소석회 4%, 5%를 채움재로 대체한 혼합물과 소석회를 첨가하지 않고 LDPE 4%, 6%로 아스팔트를 개질한 혼합물의 침하깊이와 동적안정도를 일반 밀입도아스팔트 콘크리트 혼합물과 비교·분석하였다.

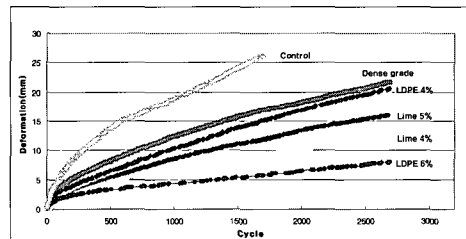


그림 9. Test result of wheel tracking test

표 13. Dynamic stability and rut depth in wheel tracking test

Item Mixtures	Rut depth (mm)	Dynamic Stability (Cycle/mm)
Control	26.3	90.1
Dense grade	22.3	153.2
lime 4%	16.0	177.5
lime 5%	11.6	267.8
LDPE 4%	20.6	154.2
LDPE 6%	8.1	466.1

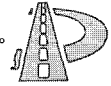


그림 9는 반복주행시험 결과이고 표 13은 침하 깊이(rut depth)와 동적안정도를 나타낸다. 여기서 control은 주물고사 외에 아무 첨가제도 섞지 않은 혼합물이고 dense grade는 본 실험에 사용된 편마암 일반 골재만으로 제조한 밀입도 혼합물을 의미한다.

반복주행시험에서는 동적안정도가 크고 침하깊이가 작을수록 소성변형에 대한 저항성이 크다고 본다. 시험결과, 주물고사 아스콘 혼합물에 첨가제를 첨가하지 않은 control 혼합물의 경우 소성변형 깊이가 25mm 이상 너무 빨리 패여 약 1,500 사이클 후 실험을 정지해야만 했다. 따라서 이것의 소성변형저항성은 일반밀입도아스콘 혼합물에 비해서도 떨어지나 첨가제(Lime, LDPE)의 첨가로 소성변형저항성이 크게 향상되었다.

4. 결론

본 연구는 주물고사를 표층용 아스팔트 혼합물에 첨가하여 그 특성을 평가하였다. 이를 위하여 주물고사의 물리·화학적 시험을 수행하여 주물고사의 특성을 파악하였고 박리방지제와 개질재의 첨가에 따른 혼합물을 제조하여 마찰안정도, 간접인장시험, 수분취약성시험, 동결융해시험, 반복주행시험을 수행하여 혼합물의 특성과 주물고사의 특성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제타전하를 측정된 결과, 주물고사는 음(-) 전하가 가장 크게 나타났고 소석회는 다른 골재와는 달리 양(+)전하를 띠는 것을 알 수 있었다. 수분취약성시험 결과 소석회 첨가 혼합물의 강도 유지비율이 control 혼합물에 비해 우수하였다. 따라서 소석회가 아스팔트와 주물고사의 결합력을 향상시켜 수분침투시 주물고사의 박리 저항성을 향상시키는 것으로 판단되었다.

2) 박리방지제와 LDPE의 첨가로 인하여 마찰안정도와 간접인장강도가 향상되는 것을 알 수 있었다. 특히 소석회를 첨가한 혼합물의 마찰안정도가 아무것도 첨가하지 않은 주물고사아스콘(control) 혼합물에 비해 크게 향상되는 것을 알 수 있었다. 하지만, 소석회의 첨가로 최적 아스팔트함량이 증가되었고 간접인장강도가 낮아졌다. 반면에 LDPE의 첨가로 아스팔트 함량이 줄어들고 간접인장강도가 높아졌다.

3) 주물고사의 분진을 제거한 후 공시체를 제조하여 실내시험을 수행한 결과, 박리방지제나 개질재를 첨가하지 않고도 어느 정도 박리저항성, 안정도 및 인장강도가 향상된 주물고사 아스콘 혼합물을 얻을 수 있었다.

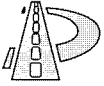
4) 동결·융해시험 결과 소석회를 첨가한 혼합물의 동결·융해 저항성이 control 혼합물에 비해 우수하였고 ASA, LDPE, 분진제거 혼합물의 동결·융해 저항성이 매우 우수하였다.

5) 반복주행시험 결과, 주물고사 혼합물은 소성변형에 매우 취약하였으나 여기에 소석회를 첨가한 경우는 일반 밀입도 보다 더 우수하다는 것을 알 수 있었고 폴리머로 개질한 주물고사 아스팔트 혼합물의 경우가 가장 우수하였다. 따라서 소석회의 첨가와 바인더의 개질로 주물고사 아스팔트 콘크리트 혼합물의 소성변형 저항성이 향상될 수 있음을 확인하였다.

결론적으로 주물고사를 소석회 등의 첨가제와 함께 사용시 일반 아스팔트 혼합물 규정을 모두 만족하는 우수한 혼합물을 얻을 수 있으므로 그간 버려지던 주물고사는 아스팔트 포장용 잔골재로 충분히 재활용 될 수 있다고 판단되었다.

참 고 문 헌

1. Kim, K. W. and Amirhanian, S. (1991) "Evaluation of Effectiveness of ASA using Fuzzy set Procedure."



- TRR1323. Washington. D. C..
2. Lee. K. W. (1982). "Prediction and evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixture in Pavement Systems." Center of Transportation Research. Bureau of Eng. Research The University of Texas at Austin August.
 3. Tunncliff. D. G. and Root. R. E. (1982). "Antistripping additives in asphalt concrete-state of the art." *Assoc. of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 52. Kansas City. Mo.
 4. Tunncliff. D. G. and Root. R. E. (1984). "Use of antistripping additives in asphaltic concrete mixtures-laboratory phase." *NCHRP Report 274*. TRB. Washington D. C..
 5. 김광우 등 (1997). "폴리머(LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성." 아스팔트 포장공학의 첨단기술 논문집, 강원대학교 석재신소재센터
 6. 김광우, 최영규 (1998). "포층재료로 건식혼합 페타이어 아스팔트 혼합물의 적용성 연구." 대한토목학회 논문집, 제 18 권, 제Ⅲ-2권, 1998.
 7. 오성균 (2000). "차도용 칼라 역청 콘크리트 포장의 적용성 연구," 강원대학교 대학원 농공학과 석사학위논문.
(접수 2001. 8. 6)