Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 38, No. 4: 611-619/ August, 2018
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.4.0611

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Construction Management **시공관리**

현무암 석분슬러지를 채움재로 활용한 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물의 공용성 평가

김승현* · 이동욱**
Kim, Seung Hyun*, Lee, Dong Wook**

Evaluation of Performance of Modified Recycling Asphalt Mixture and Normal Asphalt Mixture Using Basalt Powder Sludge as Filler

ABSTRACT

Basalt powder sludge (abbreviated BPS) is an inevitable industry by product resulted from the stone processing. Recently, demands for natural materials have been increasing in the construction and landscaping fields, therefore, amounts of BPS have been also increasing. Since most of BPS are used as landfill and earth soil, it is necessary to figure out to expedite their utilization. In this study, by considering the characteristics of precipitation of Jeju, effectiveness of BPS as a filler for asphalt compounds mixed with cement were analyzed. As a result, BPS satisfies quality criterion required in KS F 3501. Marshall mixing designs were performed to determine the optimal asphalt content for the Modified recycling asphalt mixture (27% recycling aggregate) and the Normal asphalt mixture. Effectiveness of BPS were identified by the Marshall Stability Test with the mixing ratio (level 3) of two asphalt compounds and composition ration (level 3) of BPS and cement. Performance of asphalt compounds shown appropriate effect of mixing and composition ratios of the filler were assessed. Test results show that two types of asphalt compounds satisfy the quality standards of the MLIT (2015). Therefore, BPS could be used as filler for asphalt compounds.

Key words : Basalt powder sludge, Filler, Modified recycling asphalt mixture, Normal asphalt mixture, Performance assesment

초 록

현무암 석분슬러지는 석재가공 과정에서 필연적으로 발생하는 산업부산물이다. 최근 건축 및 조경분야에서 천연자재에 대한 수요가 증가하고 있어 석분슬러지 발생량도 증가하고 있다. 현무암 석분슬러지는 현재 발생량의 대부분이 단순 매립과 복토용으로 처리되고 있어 활용성 제고를 위한 노력이 필요하다. 이에 본 연구에서는 제주지역의 강우특성을 고려해 현무암 석분슬러지를 시멘트와 섞어 아스팔트혼합물의 채움재로 활용하기 위한 검토를 수행하였다. 검토결과 현무암 석분슬러지는 KS F 3501에서 요구하는 품질기준을 만족하였다. 마샬 배합설계를 실시하여 개질재생아스팔트혼합물(순환골재 27%)과 일반아스팔트혼합물에 대한 최적 아스팔트 함량(OAC)을 결정하였다. 두 종의 아스팔트혼합물에 채움재의 혼합비(3 수준) 및 현무암 석분슬러지와 시멘트의 구성비(3 수준)를 변화시켜 마샬안정도 시험으로 현무암 석분슬러지의 활용 범위를 파악하였다. 채움재의 혼합비와 구성비가 안정적인 활용성을 보이는 아스팔트혼합물들에 대한 공용성을 평가한 결과 두 종의 아스팔트혼합물 모두 국토교통부(2015)의 품질기준을 만족하였다. 따라서 현무암 석분슬러지는 아스팔트혼합물의 채움재로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

검색어 : 현무암 석분슬러지, 채움재, 개질재생아스팔트혼합물, 일반아스팔트혼합물, 공용성 평가

* 제주대학교 토목공학과 박사후연구원 (Jeju National University · ksh@jejunu.ac.kr)
** 종신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (**Corresponding Author** · Jeju National University · dwlee@jejunu.ac.kr)

Received June 29, 2018/ **revised** July 3, 2018/ **accepted** July 5, 2018

Copyright ⓒ 2018 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

현무암을 모암으로 하는 제주지역에서 석재가공 과정 중 발생하는 산업부산물인 현무암 석분슬러지는 사업장 배출 시설계 폐기물로서, 불연성 무기성 오니류 중 공정오니로 분류되어 일정기간 동안 단순 재활용도 하지 못하는 경우 폐기물 처리로 인해, 비용 부담 및 매립장 이용으로 인한 환경훼손을 가중시키고 있다. ME and KECO (2017)에 따르면 공정오니의 발생량은 2016년 기준 전국적으로 17,744톤/일이 발생하고 있으며 제주지역에서는 6.5톤/일이 발생하고 있다. 최근 건축 및 조경분야에서 천연자재의 수요가 증가하고 있어 석분슬러지의 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

석재가공 과정에서 필연적으로 발생하는 산업부산물인 석분슬러지는 단순 매립 또는 흙과 섞어 복토재로 활용이 대부분을 차지하고 있다. 이렇게 저평가된 현무암 석분슬러지의 활용성을 높이기 위한 연구들(Kim, 2007; Ko and Choi, 2013, Lee et al., 2015)이 진행되고 있다. 현무암 석분슬러지는 Fig. 1에서와 같이 원석 가공 시 절삭 날의 냉각수와 혼합되어 현탁액으로 발생된 후 1, 2, 3차의 침전지와 응집조를 거친 후 탈수 과정을 통해 발생한다(Kim, 2007).

본 연구에서는 현무암 석분슬러지의 활용성 제고를 위해 아스팔트혼합물의 채움재로 활용하고자 하였다. 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물에 현무암 석분슬러지와 시멘트를 섞어 채움재로 활용하였다. 실내시험을 통해 각 아스팔트혼합물에서 현무암 석분슬러지가 채움재로 활용 가능한 범위를 찾고, 아스팔트혼합물들에 대한 공용성 평가를 통해 활용성을 검증하였다.

Fig. 1. Production of Basalt Powder Sludge

1.2 연구의 범위 및 방법

아스팔트혼합물의 채움재로 현무암 석분슬러지를 활용하기 위한 연구의 범위 및 방법은 다음과 같다.

현무암 석분슬러지의 물리 · 화학적 특성을 파악하고, MLIT (2015)의 '아스팔트혼합물 생산 및 시공 지침'에서 제시하고 있는 KS F 3501 (아스팔트 포장용 채움재)에 의한 품질시험을 실시하여 채움재로 활용 가능한지를 우선 검토한다. 그리고 나머지 아스팔트 혼합물 재료에 대한 품질을 확인한다.

폐아스콘 순환골재를 사용한 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물에 대해 마샬 배합설계를 실시하여 최적 아스팔트함량(Optimum Asphalt Content, OAC)을 도출한다.

그리고 각 아스팔트혼합물에 대한 채움재의 혼합비율과 현무암 석분슬러지와 시멘트의 구성비를 조정하여 마샬 안정도, 흐름값 그리고 물성 시험 결과들로부터 현무암 석분슬러지의 활용 범위를 도출한다.

도출된 현무암 석분슬러지의 활용 범위 내에서 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물에 대해 간접인장강도, 인장강도비 및 동적안정도 시험을 실시하여 아스팔트혼합물들에 대한 공용성을 평가한다.

1.3 문헌 고찰

MLIT (2015)에 의하면 아스팔트혼합물에 사용하는 채움재는 석회석분, 포틀랜드 시멘트, 소석회, 회수더스트 등을 사용하며, 일반적으로 석회석 채움재와 아스팔트 플랜트에서 아스팔트 혼합물 생산과정에서 발생하는 회수더스트를 사용한다. 집중적인 강우가 발생하는 지역에서 아스팔트 혼합물의 박리 저항성을 향상시키기 위해서는 채움재 중량의 약 50% 이상을 소석회 또는 시멘트로 대체하여 사용할 수 있다. 그리고 채움재로 사용되는 재료는 80μm 이하의 입도가 중요하다. 미립의 입자가 많으면 아스팔트 혼합물에서 아스팔트 량이 증가하는 효과가 나타나거나, 아스팔트의 강성이 높아질 수 있는 것으로 파악하고 있다.

아스팔트혼합물에서 채움재의 역할은 단순히 공극을 채워주는 효과 외에 미세균열에 대한 저항성 증가와 피로균열에 대한 저항성을 증가시켜주는 효과가 있으며(Rahman et al., 2013), 이외에도 아스팔트와 골재간의 결합력을 증가시켜 적은 양의 아스팔트 함량으로도 견고한 아스팔트 콘크리트를 형성할 수 있도록 역할을 하는 것으로 파악되었다(Harris et al., 1995; Quoted in Kim et al., 2017).

화력발전소에서 석탄 연소 후 발생되는 플라이애시와 바텀애시, 탈황공정에서 배연탈황 처리 후 발생되는 탈황석고, 제철산업에서 발생되는 고로 슬래그, 제강 슬래그, 폐주물사 등의 다양한 산업부산물들을 아스팔트혼합물용 채움재로 활용하기 위한 연구들이 진행되고 있다(Cho et al., 2016). 그리고 석재가공 과정에서 발생한 화강암 석분슬러지를 아스팔트혼합물의 채움재로 활용한 Jeong et al. (2007)은 석분슬러지를 4% 활용하여 아스팔트 함량을 0.4% 줄인 경제적인 설계가 가능하고, 폐기물 용출시험 결과 유해물질이 유출되지 않는 것으로 보고하였다.

물리·화학적으로 성질이 크게 변형된 산업부산물들을 아스팔트

혼합물용 채움재로 활용한 연구들이 대부분이다. 모암의 성질을 원형에 가깝게 유지하고 있는 파우더 형태의 화강암 석분슬러지를 활용한 연구에서 경제적이고 환경적인 결과가 도출되었다. 이와 같은 사례로부터 본 연구에서 활용하고자하는 파우더 형태의 현무암 석분슬러지도 채움재로 활용 시 아스팔트혼합물의 공극을 효과적으로 채워 공용성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 재료 특성

2.1 현무암 석분슬러지

2.1.1 물리·화학적 특성

Kim (2007)은 100°C 이상으로 24시간 이상 완전 건조한 다음 재분쇄하여 현무암 석분슬러지의 기본 물성을 제시하였다. 함수비는 35%이고 입경은 80μm의 통과율이 약 93%로 나타나고 있다. 비중은 2.92로 일반적인 토사의 비중 값 2.65~2.70에 비해 크다. 액성한계(LL)는 22.7%이고 소성한계(PL)는 18.0%로 소성지수(PI)가 4.70% 정도로 소성이 작다. 그리고 다짐시험결과 최적함수비(OMC)는 21.2%이며 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 1.65g/cm^{3}이다.

Table 1 (Kim, 2007; Ko and Choi, 2013)은 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 이용해 보통포틀랜드 시멘트와 현무암 석분슬러지의 화학적 조성 분석결과를 나타내었다. 화학적 조성을 보면 현무암 석분슬러지의 경우 보통포틀랜드시멘트에 비해 포졸란 반응으로 강도증진에 영향을 미치는 SiO_2 및 Al_2O_3를 다량 함유하고 있어 보통포틀랜드시멘트와 혼합 시 강도 증진에 효과적일 것으로 사료된다.

2.1.2 아스팔트혼합물용 채움재 특성

KS F 3501에 의하면 채움재는 석회석분 외 광물성 물질의 분말이어야 한다고 규정하고 있다. 입도는 600μm를 100% 통과하고 75μm를 70%이상 통과해야하며 소성지수, 흐름시험, 침수팽창, 박리저항성 시험 등을 실시하여 채움재로써의 적정여부를 판단하여야 한다. 이에 일련의 품질시험을 통해 현무암 석분슬러지에 대한 채움재 품질평가를 실시하였다.

2.1.2.1 흐름시험

채움재의 아스팔트 흡수성을 나타내는 지표로 아스팔트 대신 물을 사용하여 시료의 흐름치를 측정한다. KS L 5111에서 규정한 플로우 테이블과 플로우 콘을 준비하고 시료를 플로우 폭 약 20±4cm 범위에 들어가도록 반죽한 다음 플로우 콘에 놓고 2층으로 나누어 다진 후 플로우 콘을 들어올리고, 플로우 테이블을 15회 낙하시켜 Fig. 2와 같이 넓혀진 지름을 측정한다. 시료의 함수비를 변화시켜 시험을 반복하여 세로축에 함수비(%), 가로축에 플로우 폭(cm)을 잡아 얻어진 값을 플롯하고, 가장 적합한 직선을 그어 플로우 폭이 20cm가 되는 함수비를 구하여 이를 플로우 시험 값으로 한다.

2.1.2.2 침수팽창

1회 시험에 약 2000g의 시료를 준비하여 유공 밑에 거름종이를 깔고 몰드를 조립 후 몰드 질량(M_3)을 구하고 시료를 3층으로 나누어 넣고, 각 층을 25회씩 햄머로 다짐 후 시료와 몰드의 질량(M_1)을 구한다. Fig. 3과 같이 유공밑판을 물에 담근 상태로 48시간 침수시킨 후 침수에 의해 몰드 윗면으로 팽창한 시료를 곧은 날로 깎아내고 105±5°C의 건조기에서 24시간 건조시킨 후 실온에서 식혀 그 질량(M_2)을 구하여 Eq. (1)으로 침수팽창률(B, %)을 계산한다.

$$B = \left(\frac{M_2}{M_1 - M_3}\right) \times 100 \quad (1)$$

Table 1. Chemical Composition of Portland Cement and Basalt Powder Sludge

Sample	Chemical composition (%)								
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
Basalt powder sludge	52.6	14.6	11.1	8.3	6.3	2.8	1.0	-	-
Portland cement	20.3	6.2	3.2	62.4	3.0	-	-	2.0	1.9

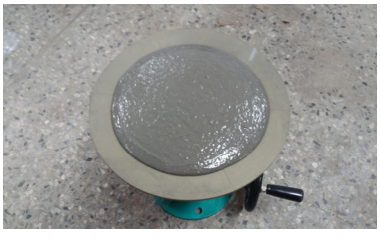

Fig. 2. Flow Test

Fig. 3. Swelling Test

2.1.2.3 박리저항성

물이 작용하는 조건에서 골재에 대한 아스팔트의 박리성에 채움재가 미치는 영향을 평가(Kim et al., 2006)하기 위한 시험이다. 표준사 1kg에 (3500/플로우 시험치)g의 채움재 약 100g과 아스팔트 50g을 가열하여 혼합 후 Fig. 4와 같이 1cm의 두께로 펴서 4시간 실온에서 식힌다. 비이커에 증류수 또는 수돗물을 약 300ml을 넣고 끓여서 여기에 혼합물을 20g넣고 60초 동안 가열한 후 비이커를 밑에서 관찰하고, 표준사로부터 아스팔트의 박리 상태를 확인하여 박리가 전체의 1/4정도 이하이면 합격으로 판정한다.

또한, MLIT (2015)에서는 이물질을 유기물 및 600μm 이상의 덩어리진 미립자에 대해 시료 총질량(g)에서 이물질 질량(g)의 함량을 1% 이하로 적용하고 있다. 본 연구에서 채움재로 활용한 현무암 석분슬러지는 3차에 걸친 침전지와 응집조를 거쳐 발생한 것으로 이물질은 거의 함유되어 있지 않은 것으로 확인되었다.

아스팔트혼합물용 채움재 활용을 위한 현무암 석분슬러지의 품질시험 결과는 Table 2와 같다. 현무암 석분슬러지는 Fig. 5와 같이 미립자의 광물질로 입도분석결과 품질기준을 모두 만족하며 75μm 이하가 통과중량 백분율로 82%이다. 소성지수는 비소성(Non Plastic), 흐름값은 기준치의 약 60% 수준, 침수팽창률이 1.0%로 작고, 박리 현상은 없었으며, 수분함량이 0.4%, 비중은 2.86이다. 평가결과, 현무암 석분슬러지는 아스팔트혼합물의 채움재에 대한 모든 품질을 확보하고 있어 채움재로 활용이 가능한 것으로 판단된다.

Table 2. Quality Test Results of Basalt Powder Sludge for Filler Application

Property		Criteria	Result	Test method
Sieve size (μm, %)	600	100	100	KS A 5101
	300	95 ≥	97	
	150	90 ≥	91	
	75	70 ≥	82	
Plasticity index		6 ≤	N.P	KS F 2303
Flow test (%)		50 ≤	29.9	KS F 3501
Swelling (%)		3.0 ≤	1.0	KS F 3501
Spring resistance		1/4 ≤	1/4 ≤	KS F 3501
Water content (%)		1 ≤	0.4	KS F 3501
Specific gravity		-	2.86	KS L 5110

Fig. 4. Spring Resistance Test

2.2 골재 특성

골재는 아스팔트혼합물 중량의 약 90~95%를 차지하고 있어 사용되는 골재의 품질이 매우 중요하다. 본 연구에서 사용된 골재는 제주특별자치도 서귀포시 안덕면에 위치한 H산업의 채석장에서 생산되는 골재를 사용하였다. 13mm 이하 굵은 골재와 5mm 이하 잔골재의 특성은 Table 3과 같고 편장석률이 10.7%인 2등급 골재를 사용하였으며 MLIT (2015)의 품질기준을 만족하였다. 그리고 순환골재는 제주전역에서 발생하고 있는 폐아스콘을 폐기물 중간처리업체가 선별 후 판매하고 있어 지역적으로 구분하기는 어렵다. 품질시험 결과 구재 아스팔트 함량이 5.6%, 구재 아스팔트 침입도(25°C)는 28(1/10mm)으로 MOLIT (2012)의 '순환골재 품질기준'을 만족하는 것으로 확인되었다.

2.3 아스팔트 바인더

아스팔트 바인더는 일반아스팔트(AP-5)와 개질아스팔트(SBS PMA (Polymer Modified Asphalt)) 두 종류를 사용하였다. 일반아스팔트의 침입도(25°C)는 73이며 공용성 등급으로는 PG 64-22에 해당한다. 개질아스팔트의 공용성 등급은 PG 76-22이고 135°C에서 점도가 1,798cP로 일반아스팔트 바인더 보다 높은 특징을 갖고 있어서 아스팔트혼합물 배합 시 온도를 일반아스팔트 보다 약 10°C 이상 높여주어야 한다.

Table 3. Property of Aggregate

Property	Coarse aggregate	Fine aggregate
Apparent specific gravity (g/cm^3)	2.68	2.71
Absorption (%)	1.95	1.52
Abrasion (%)	22.7	-
Stability (%)	4.8	5.4
Flat and elongated particles (%)	10.7	-

Fig. 5. Basalt Powder Sludge

3. 배합설계

배합설계는 최대입경 13mm의 표층용 밀입도 아스팔트 WC-2를 적용(MLIT, 2015)하였다. 국내외 문헌 등에서 제시하고 있는 폐아스콘 순환골재의 사용 범위는 아스팔트혼합물 중량비의 10~70%이나 일반적인 배치플랜트의 경우는 최대 50%까지 사용할 수 있는 것으로 파악된다. 첨가제의 개발을 통해 100% 재생기법도 연구되었으나 폐아스콘 순환골재를 사전 가열하는 보조 장치 없이는 10~35%가 가장 적절한 비율로 보고 있다(Kim et al., 2010). 본 연구에서는 폐아스콘 순환골재의 활용률을 기 수행된 제주지역의 현무암 폐아스콘 순환골재를 활용한 개질재생아스콘에 대한 기초 연구(Lee et al., 2016)를 바탕으로 실질적인 활용성을 높이기 위해 골재비의 27% (중량비의 30%)로 결정하였다.

최적 아스팔트 함량(OAC)을 도출하기 위하여 마샬 배합설계를 실시하였으며, 각 아스팔트혼합물은 마샬 다짐용 공시체로 제작하여 공용성을 평가하였다. 현무암 석분슬러지를 채움재로 활용한 아스팔트혼합물들에 대한 공용성을 평가하기 위해 마샬 안정도, 간접인장강도, 인장강도비, 동적안정도 시험을 실시하였다.

3.1 배합설계

표층용 밀입도 아스팔트(WC-2) 입도기준을 적용하여 굵은골재, 잔골재, 채움재를 혼합한 합성입도를 만들어 배합하였다. 배합설계의 최적 아스팔트함량을 결정하기 위해 아스팔트 바인더 함량을 5.0%에서 이를 기준으로 ±0.5%, ±1.0%로 아스팔트 함량을 변화시켜 검토하였다. 그리고 개질아스팔트를 사용한 아스팔트혼합물의 혼합온도는 170°C±5°C이며 다짐온도는 150°C±5°C를 기준으로 하였고, 일반아스팔트를 사용한 아스팔트혼합물의 혼합온도는 160°C±5°C, 다짐온도는 140°C±5°C에서 공시체를 제작하였다.

다짐 횟수는 MLIT (2015)의 등가단축하중(ESAL) < 10으로 설계하여 양면 50회로 마샬 다짐을 실시하였다. 공시체는 KS F 2337의 마샬 시험기를 이용한 시험방법에 따라 각 골재의 소요 배합량을 계량하여 공시체 1개분씩(약 1,200g)을 혼합한다. 계량한 골재는 소정의 온도까지 가열한 후 혼합용기에서 마른 비빔을 한 후 소요 아스팔트량을 주입하여 충분히 피복되도록 혼합온도 범위에서 혼합한 후 마샬 다짐기로 다짐하고 실온에서 12시간 이상을 양생한 후 설계하였다. 공시체는 아스팔트바인더 함량별로 시험 1조당 3개씩 제작하여 평가하였다.

3.1.1 이론최대밀도

가열아스팔트혼합물의 이론최대밀도는 추정 아스팔트 함량을 실제 측정하여 결정한다. 이론최대밀도 시험은 골재와 아스팔트바인더를 혼합한 혼합물의 상태에서 공극이 전혀 없을 경우를 가정한 밀도이다. 가열아스팔트혼합물의 배합설계 시 공극률을 결정하기 위해 사용된다(Choi et al., 2017). 추정 아스팔트 함량 5%로 제조된 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물에 대한 이론최대밀도를 KS F 2366에 따라 구하였다. 이 결과를 이용해 MLIT (2015)에서 제시한 방법에 따라 골재의 유효비중(G_{se})을 계산한 후 Eq. (2)을 이용하여 아스팔트 함량 4.0%, 4.5%, 5.5%, 6.0%에서의 이론최대밀도를 Table 4와 같이 구하였다. 여기서, D : 아스팔트 함량별 이론최대밀도(g/cm^3), G_b : 아스팔트 비중, P_b : 아스팔트 함량(%)이다.

$$D = \frac{100}{\frac{100 - P_b}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (2)$$

3.1.2 최적 아스팔트 함량(OAC) 결정

아스팔트 함량은 아스팔트 혼합물의 성질을 좌우하기 때문에 과부족 시 발생하는 특성을 잘 파악하여 최적 아스팔트 함량을 결정해야 한다. 본 연구에서는 공시체의 수중 무게와 표면건조포화상태 무게를 측정하여 용적을 구하고 공기 중 무게를 측정하여 실측밀도 값을 구한 다음 Table 4의 이론최대밀도 값과 실측밀도 값으로부터 공극률을 구하고, 포화도와 마샬 안정도 및 흐름값으로부터 최적 아스팔트 함량(OAC)을 결정하였다.

개질재생아스팔트혼합물의 마샬안정도는 품질기준치인 5,000N을 모두 상회하였으며, 흐름값은 기준치 이내 21~31 (1/100cm) 범위로 나타났다. 그리고 공극률은 아스팔트 함량 4.7~6.0%에서 기준치를 만족했고, 포화도는 아스팔트 함량 4.7~5.8%에서 기준치를 만족했다. 이 결과로부터 최적 아스팔트 함량(OAC)을 설계 아스팔트 함량 4.7~5.8% 사이의 평균치 5.3%로 결정하였다.

그리고, 일반아스팔트혼합물에서도 마샬안정도는 품질기준치를 모두 상회하였으며, 흐름값은 기준치 이내 17~34 (1/100cm)

Table 4. Theoretical Maximum Gravity According to Asphalt Content

Theoretical maximum gravity (g/cm^3)	Asphalt content (%)					Effective specific gravity
	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	
Modified Recycling	2.669	2.647	2.626	2.606	2.585	2.854
Normal	2.652	2.631	2.610	2.590	2.569	2.836

범위에서 나타났다. 그리고 공극률은 아스팔트 함량 4.7~6.0%에서 기준치를 만족하였고, 포화도는 아스팔트 함량 4.7~5.9%에서 기준치를 만족하였다. 이 결과로부터 최적 아스팔트 함량(OMC)을 설계 아스팔트 함량 4.7~5.9% 사이의 평균치인 5.3%로 결정하였다.

3.1.3 채움재 구성

최근 제주지역에서는 기후변화로 인해 시간당 70mm 넘는 국지성 호우가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 기상조건에서는 박리 저항성을 높이기 위한 조치가 필요한 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 재료의 수급이 용이하고 현무암 석분슬러지와 혼합 시 포졸란 반응으로 강도 증진에 효과를 보일 것으로 기대되는 보통포틀랜드 시멘트를 현무암 석분슬러지와 같이 채움재에 혼합하였다.

각 아스팔트혼합물에서 채움재의 혼합 비율과 구성비는 Table 5와 같다. 최적의 채움재 혼합비율과 구성비를 결정하기 위해 개질재생아스팔트혼합물에 대해 골재 중량비에서 채움재의 혼합 비율을 3%, 4%, 5%로 결정하고 일반아스팔트혼합물은 4%, 5%, 6%로 채움재의 혼합 비율을 결정하였다. 이는 현장에서 일반적으로 활용되고 있는 채움재의 혼입량에서 활용성을 높이기 위해 1% 씩 두 단계를 올린 혼합 비율이다.

그리고 각각의 비율마다 시멘트 : 현무암 석분슬러지의 구성비를 6 : 4, 4 : 6, 2 : 8로 구분하여 각각의 아스팔트혼합물에 대해 마샬 안전도 시험을 실시하여 활용범위를 파악한 후 안정적인 활용성을 보인 아스팔트혼합물들에 대해 공용성을 평가하였다. Fig. 6은 공시체 제작을 위한 아스팔트 투입 전 단계의 공시체 재료이며 Fig. 7은 시험 전 제작된 공시체이다.

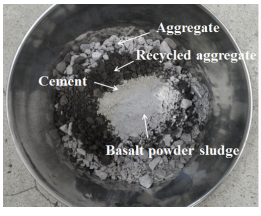

Fig. 6. Material Preparation

Fig. 7. Specimen

4. 실험 방법 및 결과

4.1 마샬안정도 시험

마샬안정도 시험은 KS F 2337의 규정에 따라 상부, 하부 2개로 되어 있는 1개 조의 원호모양의 재하헤드를 통하여 직경 101.6mm, 높이 63.5mm인 원통형 공시체에 50.8mm/min의 하중 재하비율로 압축 하중을 가하여 공시체가 파괴될 때의 최대 하중인 안정도(Stability)와 수직 변위량인 흐름값(Flow) 측정한다. 시험 전 공시체를 30분 동안 수조에 침수시켜 60±1℃를 유지한 상태에서 시험을 실시하는데 이는 포장체가 여름철에 받게 되는 대략적인 최대 포장 온도로서 가열아스팔트혼합물에 대한 가장 열악한 조건을 모사하기 위함이다. 일반적으로 흐름값이 높으면 소성변형에 대한 저항성이 높다는 것을 나타내고 반대로 흐름값이 낮으면 혼합물은 내구성을 확보하는데 필요한 아스팔트 함량이 부족하여 조기 균열이 발생할 우려가 있다(Hwang, 2004).

개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물에 대한 마샬 안정도 및 흐름값 시험결과는 Table 6과 같으며, 결과 값은 3개의 공시체 시험결과를 평균한 값이다.

두 종의 아스팔트혼합물에 대한 채움재의 혼합 비율과 구성비 변화에서 안정도는 기준치인 5,000N 이상을 모두 상회하는 것으로 나타났으며, 흐름값도 품질기준인 20~40 범위를 모두 만족하고 있다. 전반적으로 개질재생아스팔트혼합물은 일반아스팔트혼합물에 비해 개질재의 영향으로 안정도는 높지만 흐름값은 조금 낮은

Table 5. Mix Design Information

Design	Filler ratio (%) / Sieve size (mm)	3		4		5		6	
		Modified recycling	Normal	Modified recycling	Normal	Modified recycling	Normal	Modified recycling	Normal
2 BIN	13 ≤	34.0		34.0	44.0	34.0	46.0		48.0
1 BIN	5 ≤	36.0		35.0	52.0	34.0	49.0		46.0
Recycling aggregate	13 ≤	27.0		27.0	-	27.0	-		-
Filler	0.3 ≤	3.0		4.0	4.0	5.0	5.0		6.0
Recovered asphalt content		1.3		1.3	-	1.3	-		-
Added asphalt content		4.0		4.0	5.3	4.0	5.3		5.3

Table 6. Results of Marshall Stability and Flow Test

Filler (%)	Cement : BPS*	Thickness (mm)	Density (g/cm^3)	Porosity (%)	Saturation (%)	Stability (N)	Flow (1/100cm)
#. Modified recycling asphalt mixture							
3	6 : 4	60.9	2.494	4.6	73.5	21,456	27
	4 : 6	61.5	2.498	4.3	74.9	19,014	27
	2 : 8	61.2	2.498	4.4	74.5	20,324	25
4	6 : 4	60.7	2.518	3.7	77.6	22,948	26
	4 : 6	60.1	2.523	3.6	78.0	20,559	26
	2 : 8	60.7	2.512	3.8	77.2	23,788	24
5	6 : 4	60.3	2.535	3.0	81.3	21,599	26
	4 : 6	59.6	2.556	2.4	84.7	20,065	29
	2 : 8	59.5	2.564	2.2	85.6	23,089	27
#. Normal asphalt mixture							
4	6 : 4	60.0	2.473	4.5	73.9	15,983	29
	4 : 6	59.9	2.481	4.7	73.1	15,019	29
	2 : 8	59.6	2.477	4.6	73.5	14,646	27
5	6 : 4	59.2	2.489	4.1	75.5	16,557	27
	4 : 6	59.6	2.483	3.9	76.6	15,891	27
	2 : 8	59.2	2.493	3.9	76.7	13,536	26
6	6 : 4	58.9	2.504	2.8	82.0	16,116	28
	4 : 6	58.7	2.533	2.2	85.2	16,293	24
	2 : 8	60.0	2.516	2.5	83.8	14,927	27

*BPS : Basalt powder sludge

것으로 나타났지만 내구성 부족으로 인한 품질개선이 필요한 수준은 아닌 것으로 파악된다.

공극률과 포화도는 밀접한 관계가 있는 물성으로 공극률이 작아지면 포화도가 증가한다. 개질재생아스팔트혼합물은 채움재의 혼합비 5%에서 공극률 품질기준인 3~6% 사이의 하한 값을 벗어났으며, 일반아스팔트혼합물의 경우에는 채움재의 혼합비 6%에서 동일하게 품질기준 하한 값을 벗어났다. 포화도는 두 종류의 아스팔트혼합물 모두 공극률에서와 동일한 채움재 혼합비가 품질기준 65~80%의 상한 값을 벗어났다.

종합해보면 마샬안정도와 흐름값은 모든 채움재 혼합 비율 및 구성비에서 품질기준을 만족하였으나, 공극률과 포화도의 품질기준을 만족하는 개질재생아스팔트혼합물은 채움재 혼합비 3~4%이고 일반아스팔트혼합물은 채움재 혼합비 4~5%이다. 또한 이 범위 내에서는 채움재에 현무암 석분슬러지의 구성비를 증가하여도 품질기준을 만족하는 것으로 확인되어 개질재생아스팔트혼합물에서는 공시체(1,200g)당 최대 37g, 일반아스팔트혼합물에서는 공시체당 최대 46g이 활용 가능한 것으로 파악된다.

4.2 간접인장강도(ITS) 시험

간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS) 시험은 KS F 2382에 따르며, 아스팔트혼합물의 균열 저항성을 평가하기 위해 원통형의 공시체에 12.7mm 폭의 곡률을 가진 2개의 재하대를 평행하게 수직으로 지지시킨 후 직경 면을 따라 50mm/min의 재하 속도로 균등한 인장을 발생시켜 파괴에 이르게 되는 강도를 측정하는 시험이다. 시험에서 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 인장파괴에너지(Toughness, Fracture energy: FE)를 구할 수 있다. 파괴에너지는 최대하중에 이르기까지 곡선하의 면적으로 나타내며, 이는 변형에 대한 저항성 즉, 변형에너지를 흡수 할 수 있는 정도를 나타내는 척도로서 아스팔트혼합물의 균열 저항성을 평가하는 대표적인 측정값이다(Hwang, 2004).

시험을 위한 공시체의 혼합물 조성은 마샬 안정도 시험결과에서 가장 안정적인 결과의 채움재 혼합 비율인 개질재생아스팔트혼합물 3%와 일반아스팔트혼합물 4%를 적용하였고 시멘트와 현무암 석분슬러지 구성비는 6 : 4로 동일하게 적용하였다. 이는 인장강도비 시험과 동적안정도 시험에도 동일하게 적용하였다.

ITS 시험결과는 Fig. 8에서와 같이 개질재생아스팔트혼합물은 평균 1.73MPa로 품질기준인 0.8MPa에 2배 이상을 상회하는 수준이며, 일반아스팔트혼합물도 1.08MPa로 만족할만한 결과를 도출하였다. 또한 Fig. 9에서 보여주는 터프니스는 두 종의 아스팔트혼합물 모두 품질기준인 8,000N·mm을 상회하는 수준을 나타내고

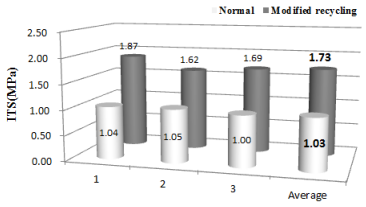

Fig. 8. ITS Results

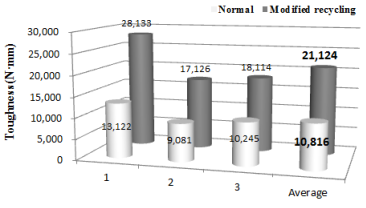

Fig. 9. Toughness Results

있다. 따라서 현무암 석분슬러지를 채움재로 활용한 두 종의 아스팔트혼합물 모두 품질기준 이상의 균열저항성을 확보하고 있는 것으로 확인되었다.

4.3 인장강도비(TSR) 시험

간접인장강도 시험방법으로 인장강도비(Tensile strength ratio: TSR)를 구하여 수분에 대한 저항성을 평가한다. KS F 2398 규정에 따라 시험을 실시하였다. 마샬 다짐기를 사용하여 소요 공극률 7±0.5%가 얻어지도록 다짐횟수를 조절하여 각 아스팔트혼합물에 대해 6개의 시편을 제작한다. 공시체는 3개씩 2개조로 나누고 1개조는 수분처리를 하지 않고 비닐 랩과 비닐 팩으로 포장한 후 25°C의 물속에 2시간 수침한 후 건조 간접인장강도(ITS dry)를 시험한다. 다른 1개조는 포화도가 70~80% 이내가 되도록 포화시킨 후 -18±3°C에서 최소 16시간이상 냉각한 다음 60±1°C의 물속에 24시간 넣어둔 후 시험 전 2시간 동안 25°C의 물속에 넣었다가 꺼내 수침 간접인장강도(ITS wet)를 측정한다. 인장강도비(TSR)는 ITS dry에 대한 ITS wet의 비로 Eq. (3)을 이용하여 구한다.

$$TSR = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \quad (3)$$

TSR 시험결과를 Table 7에서 보여주고 있다. 전 절의 간접인장강도 시험결과와 마찬가지로 개질재생아스팔트혼합물가 ITS dry와 ITS wet 모두 일반아스팔트혼합물 보다 높은 수준을 보여주고 있다. 그러나 TSR은 수분 저항성을 검토하기 위해 포화되어 동결·융해 과정을 거친 ITS wet의 상대적인 인장강도 저하 정도를 ITS dry와의 비율로 판단하는 방법이다. 시험결과 개질재생아스팔트혼합물과 일반아스팔트혼합물은 유사한 수준의 TSR 값을 보여주고 있다. 두 종의 아스팔트혼합물 모두 품질기준인 0.8 이상을 만족하고 있어 수분에 대한 소요 저항성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

Table 7. Results of Tensile Strength Ratio Test

Specimen	Modified recycling (MPa, %)			Normal (MPa, %)		
	ITS dry	ITS wet	TSR	ITS dry	ITS wet	TSR
1	1.82	1.40	0.77	1.00	0.85	0.84
2	1.58	1.32	0.84	1.02	0.78	0.76
2	1.65	1.33	0.81	0.98	0.85	0.86
Average	1.68	1.35	0.81	1.00	0.82	0.82

4.4 동적안정도(DS) 시험

아스팔트 포장에서 소성변형(Rutting)은 하중이 증가함에 따라 서서히 발생하며, 일반적으로 바퀴가 접촉하는 바닥이 침하되어 종방향으로 골이 패이듯 포장이 손상되는 형태로 나타난다. 이러한 소성변형은 반복되는 윤하중에 의한 아스팔트 혼합물의 압밀로 인한 밀도 증가와 반복되는 차량하중에 의한 아스팔트혼합물의 전단변형으로 보고 있다(Hwang, 2004). 동적안정도(Dynamic stability: DS) 시험은 이러한 차량운행 환경을 실내에서 재현하여 소성변형 저항성을 평가하는 시험방법이다.

시험은 KS F 2374에서 규정한 시험방법에 따라 반복주행(Wheel tracking) 시험을 수행하기 위하여 300×300×50mm의 슬래브 공시체를 공극률 4%를 목표하여 제작하고, 제작된 공시체는 24시간 상온 양생 후 60°C에 6시간 보관 후 시험에 사용한다. 시험은 60°C에서 수행하고, 재하 윤하중은 686 N (70kg), 통과횟수 42회/min로 60분 동안 2,520회 반복주행(시간과 통과횟수)에 따른 침하량을 측정한다. DS는 공시체의 변형이 1mm 발생하는데 통과하는 횟수로 나타내며, 변형속도(Rate of deformation: RD)는 60분과 45분 사이에서 분당 발생하는 변형량으로 나타낸다.

DS 시험결과 Table 8과 같은 결과를 도출하였다. 마샬안정도 시험에서 강성이 높았던 개질재생아스팔트혼합물이 상대적으로 높은 DS와 낮은 RS를 보여 소성변형 저항성이 큰 것으로 파악된다. 가열아스팔트혼합물에 요구되는 DS는 750N/mm 이상으로 두 종의 아스팔트혼합물 모두 높은 수준의 소성변형 저항성을 확보하고 있으며 활용성이 우수한 것으로 판단된다.

Table 8. Results of Dynamic Stability Test

Specimen	Modified recycling		Normal	
	RS (mm/min)	DS (N/mm)	RS (mm/min)	DS (N/mm)
1	0.004	10,755	0.013	3,315
2	0.003	15,595	0.015	2,739
2	0.003	12,476	0.011	3,937
Average	0.003	12,942	0.013	3,330

5. 결 론

본 연구에서는 현무암 석분슬러지를 시멘트와 섞어 아스팔트혼합물의 채움재로 활용하기 위해 채움재로써의 특성을 평가하고, 마샬 배합설계를 통해 개질재생아스팔트혼합물(순환골재 27%)과 일반아스팔트혼합물에 적용하여 활용 가능한 범위를 제시하였다. 그리고 현무암 석분슬러지가 채움재로 활용된 두 종의 아스팔트혼합물에 대한 공용성을 평가하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

(1) 현무암 석분슬러지를 KS F 3501에 의하여 아스팔트혼합물용 채움재로써 적정 여부를 판단한 결과, 품질기준을 만족하는 것으로 확인되었다.
(2) 마샬안정도 시험을 통해 현무암 석분슬러지의 활용 범위를 도출하였다. 개질재생아스팔트혼합물은 채움재 혼합비 4%, 채움재에 대한 시멘트와의 구성비는 80%까지 가능해 공시체(1,200g)당 37g이 활용 가능하고, 일반아스팔트혼합물에서는 채움재의 혼합비 5%, 시멘트와의 구성비는 동일하게 80%까지 가능해 공시체당 46g이 활용 가능한 것으로 판단된다.
(3) 간접인장강도(ITS)와 인장강도비(TSR) 시험 결과, 두 종의 아스팔트혼합물 모두 품질 기준치를 상회하였다. 따라서 현무암 석분슬러지를 활용한 두 종의 아스팔트혼합물들은 균열과 수분에 대한 저항성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.
(4) 동적안정도(DS)와 변형속도(RD)를 분석한 결과, 일반아스팔트혼합물이 DS: 3,330N/mm, RS: 0.013mm/min이고 개질재생아스팔트혼합물은 DS: 12,942N/mm, RS: 0.003mm/min로 나타나 상대적으로 높은 변형 저항성을 보였다. 현무암 석분슬러지를 채움재로 활용한 두 종의 혼합물 모두 가열아스팔트혼합물에 요구되는 DS: 750N/mm를 만족하며, 우수한 소성변형 저항성을 화보하고 있는 것으로 확인되었다.
(5) 결과적으로 현무암 석분슬러지는 아스팔트혼합물용 채움재로 활용이 가능한 것으로 판단된다. 다만 활용 범위를 보다 구체적으로 정립하기 위한 보다 세밀한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

Cho, D. Y., Park, K. B., Woo, Y. Y. and Moon, B. K. (2016). "A study on asphalt paving filler development from industrial by-products and its characteristics in construction site." *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 4, No. 3, pp. 227-234 (in Korean).

Choi, M. J., Kim, H. J., Kim, Y. J. and Lee, J. J. (2017). "Fundamental properties of asphalt concrete mixture as using TDF fly ash as mineral filler." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 497-505 (in Korean).

Hafeez, I. and Kamal, M. (2010). "Effects of mineral filler to polymer modified bitumen ratio on the design properties of hot mixasphalt and its performance mehran university research." *Journal of Engineering & Technology*, Vol. 29, No. 4, pp. 581-588.

Hwang, S. D. (2004). *Chapter 5. Asphalt Concrete Test*, KICT, pp. 1-38.

Hwang, S. D. and An, S. H. (2000). "High temperature behavior of asphalt mixtures according to the type of aggregate." *Journal of the Korea Road Pavement Engineering Society*, Vol. 2, No. 4, pp. 50-56 (in Korean).

Jeong, J. S., Song, G. Y., Ahn, J. H. and Kim, T. H. (2007). "Utilization of stone sludges produced by stone manufacturing process as asphalt concrete filler." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 4D, pp. 457-464 (in Korean).

Kim, K. Y. (2007). *A study on the application of powdered basalt sludge in construction engineering and its special characteristic*, Ph.D. Dissertation, Jeju National University, pp. 55-56, 64-65 (in Korean).

Kim, N. H., Kim, J. C., Hong, J. P. and Kim, K. W. (2010). "Evaluation of fundamental properties of warm-mix recycled asphalt concretes." *Journal of the Korean Society Road Engineers*, Vol. 12, No. 4, pp. 111-120 (in Korean).

Kim, Y. G., Kim, J. S., Joe, B. Y., Joe, J. W., Han, J. M. and Lee, H. I. (2006). "Application study of filler for asphalt concrete mixture of industrial by-products (electric arc furnace dust + incinerator recovery dust)." *Proceedings of Spring Conference of Korean Society of Waste Management*, pp. 71-77 (in Korean).

Kim, Y. W., Park, K. B., Woo, Y. Y. and Moon, B. K. (2017). "Characteristics of asphalt concrete utilizing coal ash based filler." *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 5, No. 3, pp. 305-312 (in Korean).

Ko, D. W. and Choi, H. B. (2013). "Basic performance evaluation of dry mortar recycled basalt powder sludge." *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 13, No. 2, pp. 131-138 (in Korean).

Lee, D. W., Kim, K. Y. and Kim, D. H. (2015). "A study on the application of powered basalt.", *Proceeding of the Korean Society of Civil Engineers*, Gunsan, pp. 163-164 (in Korean).

Lee, D. W., Kim, S. H. and Oh, J. (2016). "Development of recycled-modified asphalt using basalt aggregate." *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 11-15.

Ministry of Environment (ME) and Korea Environment Corporation (KECO), (2017). *National Waste Generation and Disposal Status in 2016* (in Korean).

Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT) (2015). *Guide of Production and Construction of Asphalt mixture* (in Korean).

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLIT) (2012). *Recycling Aggregate Quality Standard* (in Korean).

Rahman, M. N. and Sobhan, M. A. (2013). "Use of non-conventional fillers on asphalt-concrete mixture." *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 3, No. 4, pp. 1101-1109.