

잔골재 물성에 따른 아스팔트 혼합물 배합설계 비교 연구

A Comparative Study on Asphalt Mix Design by Properties of Fine Aggregate

장정순* · 조신행** · 전순제*** · 김낙석****

Jang, Jung Soon · Jo, Shin Haeng · Jun, Soon Je · Kim, Nak Seok

1. 서론

국내의 골재 수급 상황은 계속해서 나빠지고 있으며, 특히 수도권 지역의 경우에는 양질의 골재를 확보하는 문제뿐만 아니라 일정한 품질의 골재를 확보하는 것조차 어려운 실정이다. 골재원의 고갈과 수도권에 밀집된 수요처로 인해 골재 확보에 어려움을 겪고 있으며 수도권 플랜트의 경우 골재를 야적할 수 있는 공간의 확보가 어렵기 때문에 동일 납품처일 경우 예도 상이한 골재를 사용한 제품을 납품하게 되는 경우가 발생하기도 한다. 골재의 품질 변동은 아스팔트 콘크리트의 품질에 직접적인 영향을 미치게 된다. 특히, 잔골재의 품질은 아스팔트 바인더 함량과 밀접한 연관이 있으나, 입도를 제외하고는 현장에서 즉각적인 품질을 평가할 수 있는 마땅한 방법이 없는 것이 현실이다.

잔골재의 품질특성이 아스팔트 콘크리트 배합설계에 미치는 영향을 살펴봄으로써 현장에서 잔골재의 품질변동에 따라 즉각적인 배합설계 변경을 위한 기본 자료로 활용 할 수 있으며, 잔골재 품질을 관리함으로써 보다 안정적인 아스팔트 혼합물의 품질 관리가 가능할 것이다. 본 연구에서는 수도권 남부지역에서 사용되는 잔골재의 특성을 평가하고, 배합설계를 실시하여 잔골재 특성 중 배합설계에 영향을 미치는 인자를 분석하였다.

2. 잔골재의 기초물성 실험

수도권 남부지역에서 사용되는 잔골재 중 현장기술자와 함께 품질 상태를 상중하로 구분하여 산지가 서로 다른 4종의 잔골재를 샘플 채취하여 실내물성 실험을 실시하였다. 실내 물성 실험은 국토해양부의 도로공사 표준시방서(2009)에서 제시하는 잔골재 품질기준에 준하여 항목을 선정하였다. 실험결과를 표 1과 같다. 표 1의 항목 중 0.08mm 통과율의 경우 시멘트 콘크리트에 사용되는 잔골재 실험 방법으로 잔골재의 특성을 파악하기 위한 기준으로 부순모래 단독사용시 5.0이하, 천연골재 혼합사용시 7.0 이하로 규정되어 있다.

표 1. 기초물성 비교표

구분		잔골재 A	잔골재 B	잔골재 C	잔골재 D	기준	비고
밀도 (g/cm ³)	표건	2.613	2.606	2.663	2.510		KS F 2504
	절건	2.564	2.567	2.626	2.401	2.5이상	
	진밀도	2.699	2.704	2.728	2.696		
흡수율(%)		1.917	2.322	1.422	4.557	3.0이하	
모래당량(%)		74.5	83.0	76.6	73.9	50이상	국토부지침
공극률(%)		45.1	49.3	47.5	45.1	45이상	국토부지침 (A방법)
0.08mm통과율(%)		13.9	11.6	11.7	14.5	7.0이하	KS F 2511

* 비회원 · 경기대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : cho_cyon@naver.com)

** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : roadcreator@gmail.com)

*** 정회원 · 유진기업(주) 기술연구소 과장(E-mail : godonme@eugens.co.kr)

**** 정회원 · 경기대학교 토목공학과 교수(E-mail : nskim1@kyonggi.ac.kr)

잔골재 A, B, C의 경우는 기준을 만족하나 D의 경우 밀도가 낮고 흡수율이 높아 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 0.08mm 통과율의 경우 시멘트 콘크리트용 잔골재 실험 항목으로 아스팔트 콘크리트에 사용되는 잔골재는 그 기준을 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 이 항목의 경우 잔골재 특성 중 특히 미립분의 영향을 검토하기 위해 수행한 것으로 배합 설계 시 영향인자로서 살펴보았다.

아스팔트의 잔골재를 입도 분석한 결과는 표 2와 같으며, KS F 2357의 No.4 입도에 가장 근접한 입도 분포를 나타내었다. 잔골재 A,B,C는 5~2.5mm 부분이 기준을 벗어나 있으며 입도의 전반적인 경향이 기준대비 다소 거친(coarse) 경향을 보이고 있다. 입도 곡선을 그려보면 그림 1과 같이 4종의 잔골재 중에서 잔골재 D만이 입도 기준을 만족하는 것을 알 수 있었다.

표 2. 아스팔트 잔골재 체가름 실험 결과 (KS F 2357)

체의 호칭치수(mm)	기준(No.4)	잔골재A	잔골재B	잔골재C	잔골재D
10	100	100	100	100	100
5	80~100	89.8	83.1	83.8	100
2.5	65~100	63.3	60.9	54.2	93.3
1.2	40~80	42.4	42.2	34.8	69.0
0.6	20~65	28.9	28.2	22.6	44.4
0.3	7~40	19.9	17.3	13.5	23.6
0.15	2~20	12.0	8.2	3.9	8.3
0.08	0~10	5.6	2.7	0.7	2.3

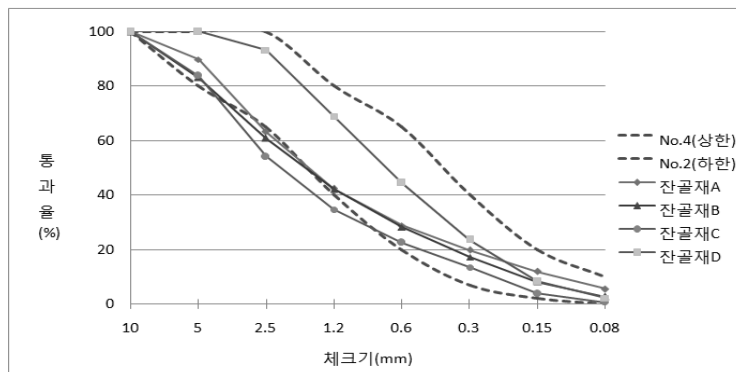


그림 1. 잔골재 입도 곡선

현장에서 잔골재의 품질을 육안 판단할 때 두 가지 사항을 보게 되는데, 하나는 입도이며 다른 하나는 토분의 함유이다. 잔골재에 포함된 고운 소성입자 및 더스트의 상대비율을 평가하기 위한 실험법이 모래당량 실험이며 석분내에 포함된 토분의 양을 정량적으로 평가하기 위해 실험을 수행하였다. 이 실험은 부순 모래의 청결성(점토, 불순물 등)을 평가하는 실험으로 잔골재의 청결성은 골재와 아스팔트 바인더의 부착력에 영향을 미치는 요소이기 때문에 품질 항목이다. 국토해양부의 아스팔트 포장 수명 연장 종합대책 수립을 위한 연구(건설교통부 2005)에 의해 국토해양부 시방서의 골재 관리 항목으로 추가되어 골재와 아스팔트 바인더 사이의 부착력을 증진시키고 박리에 대한 저항성 평가를 위해서 향후 골재 품질 평가를 위해 반드시 수행하여야 하는 실험이 되었다. 국토해양부의 시방서에 따르면 기준은 50% 이상(건설교통부 2007)이다. 실험 결과는 표 3과 같고, 4종류의 잔골재 모두 기준(50% 이상)을 만족하였다.

표 3. 모래당량 실험 결과

골재종류	잔골재A	잔골재B	잔골재C	잔골재D
모래당량(%)	74	83	77	75

3. 최적아스팔트 함량 결정

골재의 변동에 따라 콜드빈의 유출량을 조절하기란 쉽지 않다. 잔골재의 입도 변화에 따른 합성 입도의 변화량이 작기 때문에 핫빈에서의 배합비 조정이 필요하다. 잔골재 변동에 따른 핫빈배합비의 변동을 살펴보기 위해 실제 플랜트의 핫빈 스크린을 모사하여 핫빈 방식으로 혼합된 골재를 두 개의 빈(13~5mm, 5~0mm 체)으로 분류한 후 빈별 입도 실험을 실시하였고, 이에 따른 생산 배합비를 입도 기준의 중앙에 근접하도록 하며, 현장생산성을 고려하여 표 4와 같이 배합비율을 결정하였다. 이로 인해 품질의 일관성을 갖기 힘든 콜드빈 방식과는 다르게 일정한 배합비를 산출 할 수 있었다. 그에 따른 합성입도 결과를 표 4와 같으며, 혼합 입도곡선은 그림 2에 보이는 것과 같이 유사한 입도 곡선을 보였다.

표 4. 배합비율 비교

골재구분	배합 비율(%)			
	잔골재A	잔골재B	잔골재C	잔골재D
13-5mm	43	41	42	43
5mm이하	55	57	56	55
채움재	2	2	2	2

표 5. Hot Bin 배합설계 결정 비교

골재구분	골재 입도							
	20mm	13mm	5.0mm	2.5mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.08mm
소망입도	100	95-100	50-70	35-50	18-30	10-21	6-16	4-8
잔골재A	100	100	58.8	44.7	23.3	17.2	11.7	6.3
잔골재B	100	100	58.8	42.8	20.6	13.9	7.5	2.7
잔골재C	100	100	58.0	44.4	22.8	15.3	7.7	2.3
잔골재D	100	100	58.8	42.8	20.6	13.9	7.5	2.7

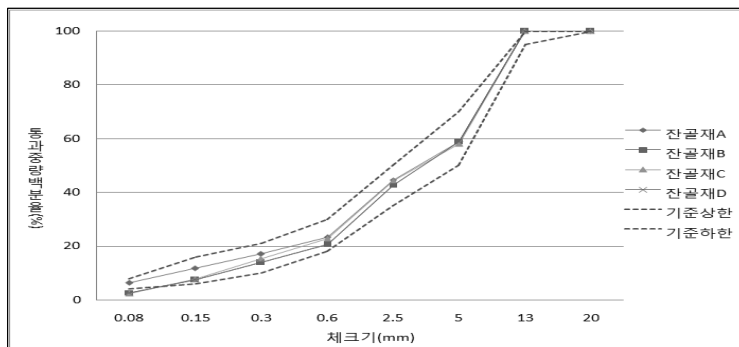


그림 2. 잔골재의 통과중량 백분율 비교

배합 설계를 위해 예상 AP량을 기준으로 상하 $\pm 0.5\%$ 로 공시체를 제작하였다. 공시체 제작 시 현장 생산 및 운반 중 잔골재로 흡수되는 AP를 고려하고자 1시간 동안의 단기노화를 모사하였다. 각각의 잔골재에 따른 아스팔트 혼합물의 안정도, 흐름값, 공극률, 포화도와 아스팔트 함량 변화량을 통해 최적 아스팔트 함량을 결정 하였다. 실내물성 결과는 표 6과 같다. 또한 잔골재들의 최적 아스팔트 함량은 표 7과 같이 산출되었다. 잔골재에 따라 아스팔트 함량이 5.5~6.0%로 변화함을 알 수 있었다.

표 6. 잔골재를 이용한 혼합물의 실내물성 결과 비교

설계인자 AP량	밀도 (t/m ³)	간극률 (%)	포화도 (%)	공극률 (%)	안정도 (N)	흐름값 (0.01cm)
기준	-	-	70~85	3~6	5000이상	20~40
잔골재A	5.3%	2.322	16.87	70.7	4.95	11385
	5.8%	2.366	16.1	82.8	2.76	10488
	6.2%	2.372	16.35	87.1	2.10	9783
잔골재B	5.3%	2.305	15.56	71.5	4.72	14913
	5.8%	2.332	16.29	80.5	3.18	13174
	6.2%	2.333	16.77	83.6	2.76	11161
잔골재C	5.3%	2.264	19.34	60.1	7.72	11721
	5.8%	2.319	18.1	72.0	5.07	11501
	6.2%	2.316	18.74	74.2	4.83	10973
잔골재D	5.3%	2.267	18.73	62.2	7.09	15867
	5.8%	2.258	18.61	68.2	5.92	13614
	6.2%	2.277	17.60	77.7	3.92	13626

표 7. 최적 아스팔트 함량

골재종류	잔골재A	잔골재B	잔골재C	잔골재D
아스팔트함량(%)	5.5	5.6	5.9	6.0

4. 실험물성과 아스팔트 함량 상관 관계분석

4.1 잔골재의 기초물성과 최적아스팔트 함량

잔골재의 기초 물성과 최적 아스팔트 함량과의 상관관계를 분석하여 현장에서 우선적으로 고려되어야 할 잔골재의 물성을 도출하고자 하였다. 잔골재의 물성과 최적 아스팔트 함량(OAC)이 선형적 관계로 가정하고 추세를 분석하고 R^2 값을 계산하였다.

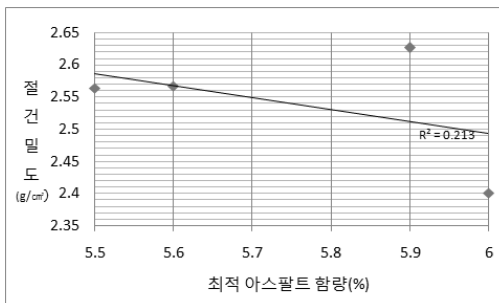


그림 3. 절건 밀도와 OAC와의 관계

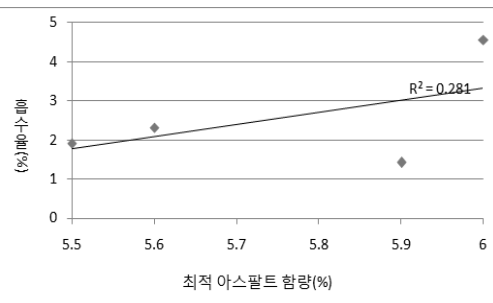


그림 4. 흡수율과 OAC와의 관계

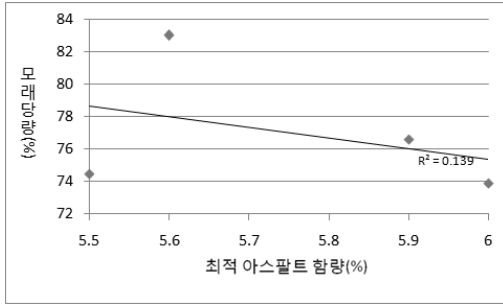


그림 5. 모래당량과 OAC와의 관계

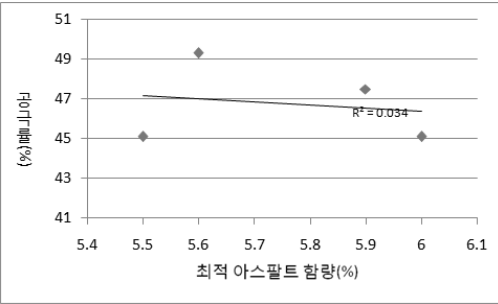


그림 6. 공극률과 OAC와의 관계

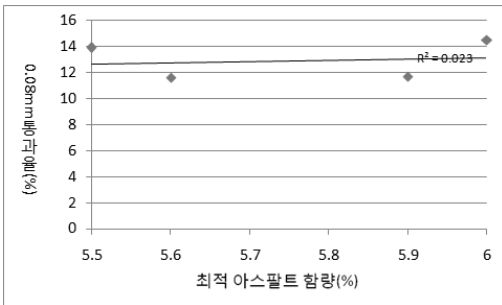


그림 7. 0.08mm통과율 OAC와의 관계

잔골재의 물성에 따른 최적 아스팔트 함량과 실내 실험값을 비교 분석한 결과 절건밀도와 흡수율은 그림 3, 그림 4와 같이 잔골재C를 제외한 타 잔골재의 경우 아스팔트 최적함량과 어느정도 상관성을 보이고 있었다. 하지만 모래당량, 공극률, 0.08mm 통과율은 그림 5, 그림 6, 그림 7을 보면 결과에 뚜렷한 경향이 보이지 않았고, 몇몇의 인자에서는 상반된 관계를 보이고 있어서 KS에서 규정하고 있는 잔골재의 물성과 아스팔트 함량과는 유의성있는 상관관계가 없는 것으로 판단되었다. 절건밀도와 흡수율 역시 어느 정도의 상관관계는 유추할 수 있으나 배합설계를 위한 인자로 사용되기에는 부족한 것을 알 수 있었다.

4.2 혼합물의 유효, 흡수 아스팔트

KS 기준 및 인수 검사 시 제공되는 잔골재의 물성과 아스팔트 함량과의 상관관계의 신뢰도가 낮아서, 본 연구에서는 다른 방식으로 접근을 시도하였다. 그리하여, 적용된 것이 잔골재와 아스팔트 함량과의 관계를 분석하고자 미국에서 개발된 슈퍼페이브 배합설계를 일부 적용하였다. 슈퍼페이브에서는 혼합물 중에 존재하는 아스팔트를 유효 아스팔트와 흡수 아스팔트로 나누고 있으며 이 메커니즘을 각 혼합물에 적용하였다. 특히, 유효 아스팔트는 전체 아스팔트함량 중 흡수되지 않고 골재 표면을 코팅하고 있는 부분으로, 아스팔트 혼합물의 공용성에 대한 상관관계가 높다. 다음 식 1과 2는 흡수아스팔트와 유효 아스팔트를 구하는 식이다. 각 혼합물의 결과는 표 8과 같다.

$$P_{ba} = 100 \left(\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \right) G_b \tag{식 1.}$$

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} P_s \tag{식 2.}$$

여기서,

- P_{ba} : 흡수 아스팔트
- P_{be} : 유효 아스팔트
- G_{se} : 유효 밀도
- G_{sb} : 합성골재 밀도
- G_b : 아스팔트 바인더 밀도
- P_b : 혼합물내의 아스팔트 백분율
- P_s : 혼합물 전체 중량에 대한 골재 비율

표 8. 아스팔트 혼합물별 유효, 흡수 아스팔트량: 5.8%기준

혼합물구분	유효 아스팔트함량(%)	흡수 아스팔트함량(%)	최적 아스팔트함량(%)
잔골재A	4.172	1.628	5.5
잔골재B	4.095	1.705	5.6
잔골재C	2.581	3.219	5.9
잔골재D	2.199	3.601	6.0

최적 아스팔트 함량이 많은 혼합물 배합은 상대적으로 유효 아스팔트량이 적고, 흡수 아스팔트량이 많은 경향을 나타내는 상관관계를 가졌다. 따라서, 본 결과는 아스팔트 바인더 함량 5.8%의 동일 조건을 분석한 결과로 최적 아스팔트 함량의 조건으로 분석하게 되면, 더 큰 편차를 나타낼 것이다. 또한, 흡수 아스팔트를 구하는 식의 인자는 혼합물에 포함된 골재의 배합비율, 밀도 및 혼합물에 첨가된 아스팔트 함량과 이론밀도의 영향으로 결정된다. 이러한 인자 중에서 혼합물의 이론밀도와 골재의 밀도는 흡수 아스팔트 함량에 상관성 높은 영향을 준다. 특히, 혼합물의 이론밀도의 경우 실측된 값으로 흡수 아스팔트 결정에 상관관계가 큰 인자이며, 결국 이론밀도를 측정하기 위해서는 제작되는 호트리진 시료에서 일정량의 아스팔트가 흡수되어 측정되므로 잔골재의 특성에 따른 흡수 아스팔트 영향이 고려되어진 것으로 판단되었다. 일반적으로 골재의 밀도는 흡수율과 밀접한 인자로 잔골재D의 혼합물에서 흡수 아스팔트가 기타 혼합물보다 큰 결과는 잔골재D의 낮은 밀도와 흡수율에 기인한 것으로 기준을 벗어나는 밀도와 흡수율은 아스팔트와 상관관계가 높은 것으로 분석되었다.

4.3 잔골재의 AP 흡수율 실험

잔골재의 기초물성 중 흡수율 실험은 물을 사용한 것으로 실제 골재가 아스팔트 바인더를 흡수하는 경향과는 다르다. 잔골재의 아스팔트 흡수 성능을 평가하기 위해서 현재 배수성 아스팔트 배합설계에서 사용하고 있는 Drain Down 시험방법을 응용하였다. 실험방법은 잔골재를 1000g씩 개량 후 아스팔트와 혼합하였다. 그런 다음 팬의 무게를 측정하고 혼합물을 시료팬에 넣고 무게를 측정했다. 그 후에 163℃에서 1시간동안 단기노화 시킨 후 혼합물을 털어내고 팬의 무게를 다시 확인하여 시료팬에 묻은 흘러내린 아스팔트의 무게를 측정하는 실험이다. 이런 방식으로 잔골재 A, 잔골재B, 잔골재D를 2번에 걸쳐 실험하였다. 1차 실험 조건은 AP함량을 8.35%로 하고, 골재는 가공하지 않고 입고된 골재를 그대로 사용하였고, 2차 실험 조건은 동일한 입도의 고려를 위해 5mm체의 통과된 골재인 잔골재만 사용하여 실험함에 따라 표면적의 증가를 고려하여 AP함량을 13%로 하였다. 이 두 가지 조건의 실험 결과는 표 9와 같다.

표 9. 잔골재 AP 흡수율 실험결과

구분	팬 무게(g)	팬+시료무게(g)	실험후 팬무게(g)	호름손실율(%)	비고
잔골재A	174.8	1254.6	175.0	0.019	1차 실험
잔골재B	170.0	1248.9	170.6	0.056	
잔골재D	228.0	1308.5	228.2	0.019	
잔골재A	174.8	1234.3	177.7	0.274	2차 실험
잔골재B	171.8	1306.0	174.4	0.229	
잔골재D	228.0	1353.6	228.2	0.027	

호름 손실률이란 아스팔트가 팬에 묻어 있는 양으로 배합설계 결과 아스팔트 함량이 높은 순서(잔골재D→잔골재C→잔골재B→잔골재A)로 호름 손실율이 작아져야 잔골재 자체에서 아스팔트를 흡수하는 특성의 차이가 배합설계 결과에서 나타난 것으로 볼 수 있다. 1차 실험에서는 잔골재A와 잔골재D의 손실률은 동일하여, 잔골재B가 높은 결과를 나타내고 있으므로 유의적인 판단을 도출하기가 어렵다. 이에 반해 2차 시험결과는 배합설계의 함량의 경향과 동일한 경향을 보이고 있으며, 특히 잔골재D의 경우 잔골재 A, B에 비해 약 10배의 AP흡수율을 나타냈다.

5. 결 론

아스팔트 콘크리트의 품질 관리를 위해 사용되는 잔골재의 특성이 배합설계에 미치는 영향을 분석하고자 4종의 잔골재를 입수하여 기초 물성을 측정하고 최적 아스팔트 함량의 결정에 미치는 영향을 분석하였다.

1. KS에서 제시하는 기준에 따라 밀도, 흡수율, 모래당량, 공극률, 입도 실험을 실시한 결과 잔골재 A, B, C의 경우 기준 입도 보다 약간 거친 입도를 나타냈으며, D의 경우는 낮은 밀도와 높은 흡수율로 기준을 벗어나는 것으로 나타났다.
2. 잔골재의 변동에 따른 배합 설계 결과를 모사하기 위해 핫빈 배합 방식과 유사하게 혼합 입도를 결정하고 배합 설계를 수행하였다. 잔골재 A는 5.5%, 잔골재 B는 5.6%, 잔골재 C는 5.9%, 잔골재 D는 6.0%의 최적 아스팔트 함량을 나타냄으로써 잔골재에 따라 배합설계 결과가 크게 달라짐을 알 수 있었다.
3. 잔골재의 품질 특성 중 입도의 영향을 최소화함에도 불구하고 최적아스팔트함량에 큰 차이를 보임에 따라 배합 설계에 영향을 미치는 잔골재의 품질 특성을 분석하였으나 유의성 있는 상관관계를 얻을 수 없었다. 특히 현장에서 주로 고려되는 골재의 밀도와 흡수율도 어느 정도의 경향성을 나타내기는 하나 이를 통해 배합설계의 인자로 사용하기에는 어려움이 있는 수준으로 판단되었다.
4. 슈퍼페이브의 불륨메트릭 배합 설계 방법을 통해 유효 아스팔트 함량과 흡수 아스팔트 함량을 계산하였으며 결과 높은 최적 아스팔트 함량을 나타내는 혼합물의 경우 높은 흡수 아스팔트 함량을 나타내는 것으로 나타났으며 이는 흡수율 실험은 물을 사용하기 때문에 골재의 아스팔트 바인더 흡수율을 정확히 모사하지 못하는 것으로 판단되었다.
5. 골재 특히 잔골재의 아스팔트 바인더 흡수율을 측정하기 위해 배수성 아스팔트와 SMA 아스팔트 혼합물 배합설계에 사용되는 드레인다운 실험을 적용코자 하였으며, 잔골재 1kg에 아스팔트 바인더 함량 8.35%로 호름 실험을 실시하였으나 상관관계를 분석하기 어려웠다. 잔골재를 5mm 체 통과분으로 분리하여 핫빈과 같은 상태가 되도록 한 후 아스팔트 바인더 함량 13%로 혼합한 후 드레인다운 실험을 수행한 결과 잔골재별로 호름 손실률에 큰 차이를 나타냈으며, 그 경향은 배합 설계의 최적 아스팔트 함량과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

현장 플랜트에서 잔골재의 품질 변동이 빈번한 만큼 본 연구에서와 같이 간단한 실험을 통해 잔골재의 품질 특성을 평가하고 배합 설계에 반영함으로써 보다 안정적인 품질관리가 가능할 것으로 판단된다. 다만 본 연구는 한정적인 시료에 의해 수행된 실험으로 향후 보다 많은 시료에 대해 실험을 진행하고 분석한다



면 현장에서 실시간으로 잔골재 품질 변동에 따른 배합비 조정이 가능한 인자의 도출이 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] 국토해양부 (2009). “도로공사 표준시방서”
- [2] 국토해양부 (2009). “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안연구”, 한국건설기술연구원, 한국도로공사
- [3] 건설교통부 (2005). “도로포장 장수명화를 위한 설계 시공 기술 고도화: 아스팔트 포장의 포트홀 방지를 위한 재료 및 시공기술 개발”
- [4] 건설교통부 (2007), “도로 아스팔트 포장 품질 혁신방안 마련”, 도로건설부, 보도자료