

침입도를 이용한 재생아스팔트 혼합물의 배합설계 방법 연구

A Study of Mix design Method for Hot-Mix Recycling Using Asphalt Penetration Blending

정규동* · 황성도** · 노성렬***

Jeong Kyudong · Hwang Sung-Do · Rho Sung-Yeol

1.. 서 론

재생아스팔트 혼합물을 제조하기 위하여 기존의 노화된 아스팔트 포장(아스콘 재생골재)의 추출아스팔트 침입도와 추출골재입도 시험 등의 품질시험 후에는 이들 시험 결과를 이용하여 배합설계를 수행한다. 이때 배합설계의 가장 중요한 부분은 아스콘 재생골재 사용비율을 결정한 후 추출아스팔트의 침입도에 따라 적절한 아스팔트를 선정하거나 재생첨가제의 사용여부와 사용비율을 정하는 것이다.

본 연구에서는 적용성을 높이기 위해서 국내에서 일반적으로 사용하는 아스팔트의 침입도를 이용한 추가 재료의 사용비율을 결정하는 방법을 개발하고, 이를 이용하여 재생아스팔트 혼합물의 배합설계 방법을 개발하고자 하였다.

2.. 재료

2.1 아스팔트

아스팔트는 KS M 2201에 규정된 침입도 등급 80~100인 AP-3 및 AP-5를 사용하였으며, 시험 결과 침입도는 87이었다.

2.2 노화아스팔트

노화된 페아스콘에 포함된 아스팔트를 모사하기 위하여 단기노화 및 장기노화 시험 장비를 이용하여 강제노화시켜 <표 1>과 같은 3종의 노화아스팔트를 제조하였다.

표 1 노화아스팔트 품질

시험종류 \ 아스팔트종류	AGAP1	AGAP2	AGAP3
침입도(1/100cm)	49	17	13
점도(135℃, cSt)	775	3,025	10,000이상

- 1) AGAP1 : AP-5 아스팔트를 RTFO 시험장비를 이용하여 단기노화시킨 아스팔트
- 2) AGAP2 : AGAP1을 PAV 시험장비를 사용하여 장기노화시킨 아스팔트
- 3) AGAP3 : AP-5를 PAV 시험장비를 사용하여 2회에 걸쳐 장기노화시킨 아스팔트

표 2 재생첨가제의 품질

2.3 재생첨가제

1차년도 연구에 사용한 미국 ASTM D 4552의 RA-1 등급 정도의 RJ-2와 RA-25 등급의 RJ-3 재생첨가제를 사용하였으며, 품질은 아래의 <표 2>와 같다. 또한, 재생첨

구 분	점도 (60℃, cSt)	인화점 (℃)	세츄레이트 (%)	RTFO 후의 점도비	RTFO 후의 중량변화율(±,%)
RA-1기준	50-175	218이상	30이하	3이하	4이하
RA-25기준	900-4500	218이상	30이하	3이하	4이하
RJ-2	132	238	45.39	1.14	1.70
RJ-3	1,000	228	10.57	1.61	3.67

가제 15%를 구아스팔트 85%와 혼합하여 침입도 시험한 결과 침입도가 70이었다.

* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 연구원 · 031-910-0183(e-mail:kdjeong@kict.re.kr)
 ** 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 031-910-0180(e-mail:sdhwang@kict.re.kr)
 *** 정희원 · 건설교통부 도로건설과 사무관 · 02-504-9073~4(e-mail:syroh@mocet.go.kr)



2.4 아스콘 재생골재

본 실험에 사용한 아스콘 재생골재는 최대치수 13mm 골재로서 도로에서 밀링한 페아스콘을 플랜트에서 임팩트 크리셔 등으로 파쇄하고 선별한 것이다. 페아스콘이 도로의 표층 부분을 콜드 밀링하여 걷어낼 때 바로 트럭에 상차되기 때문에 재생골재에 함유된 이물질은 없었다.

표 3 골재 입도 분포

구분 \ 체(mm)	통과중량백분율(%)							
	20	13	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
아스콘재생골재	100	98.2	72	52.5	29.5	19.9	13.5	9.1

아스콘 재생골재의 입도는 KS F 2354의 '역청 포장용 혼합물의 역청 함유량 시험방법'에 따라 추출골재와 아스팔트로 분리하여 아스팔트 함량을 결정하고, 골재입도시험을 한 후, KS F 2381의 '엡슨 방법에 의한 아스팔트 회수 시험 방법'에 따라 구아스팔트를 만든 후 침입도 시험을 수행하였다. 이 결과 아스콘 재생골재의 아스팔트 함량은 5.5%, 구아스팔트의 침입도는 23이었으며, 골재입도는 <표3>과 같았다.

2.5 신규골재

신규골재는 경기도 지역에서 가장 많이 사용되는 화강암 쇄석으로 골재배합의 정밀도를 높이기 위하여 각 입경별로 체가름하여 사용하였다. 각 골재는 19~13mm, 13~10mm, 10~5mm, 5~2.5mm의 굵은골재와 0.3mm를 기준으로 구분한 부순모래, 채움재 등을 사용하였으며, 입도는 <표 4>와 같다.

표 4 신규골재 입도 분포

구분 \ 체(mm)	통과중량백분율(%)							
	20	13	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
20mm	100	0						
13mm		100	0					
10mm			100	0				
5mm				100	0			
부순모래(0.3이상)		100	96.6	65.1	35.2	13.8	0	
부순모래(0.3이하)						100	50.5	30
채움재					100	99.0	94.6	86.6

3. 연구 방법

본 연구는 재생가열아스팔트 혼합물의 배합설계 방법을 개발하기 위하여 수행되었으며, 국내·외 연구성과를 조사 및 고찰하고, 실내시험을 통하여 아스팔트의 침입도를 이용한 배합설계 방법을 연구하였다.

3.1 재생첨가제 비율에 따른 구아스팔트 침입도 연구

노화아스팔트의 성능회복에 대한 연구를 위하여 점도가 상이한 두가지의 재생첨가제인 RJ-2와 RJ-3를 선택하여 노화아스팔트와 혼합하였다. 60℃ 점도가 132cSt인 재생첨가제 RJ-2와 1000cSt인 재생첨가제 RJ-3를 노화아스팔트에 5, 10, 15% 혼합하여 시료를 제조하였으며, 이를 이용하여 침입도 시험을 수행하였다.

3.2 재생 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 방법 개발

미국 아스팔트 협회(AI)에서 개발한 점도 방법에 의한 재활용 배합설계 방법을 침입도 방법으로 수정한 배합설계 방법을 제시하였다.

3.3 배합설계 방법의 검증

재생아스팔트 혼합물의 품질을 평가할 수 있는 시험 항목은 골재입도, 재생아스팔트량, 재생아스팔트 침입도, 마찰특성치 등이며, 이 연구에서는 배합설계에서 결정된 최적아스팔트량으로 재생혼합물을 제조하여 골재입도, 재생아스팔트량, 재생아스팔트 침입도 등의 시험을 수행하고, 배합설계 방법을 검증하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 재생첨가제 비율에 따른 구아스팔트 침입도 연구

침입도 시험 결과는 <표 5>와 같았다. 이 결과에서 많은 노화가 진행된 아스팔트의 경우 재생첨가제를 15% 정도 추가하여도 침입도의 회복이 낮음을 알 수 있었고, 재생첨가제의 종류에 따른 결과값의 차이도 적었다.

그리고, 재생첨가제의 첨가비율에 따른 침입도를 분석한 결과 재생첨가제의 첨가비율에 따라 침입도를 지수



함수로 취할 경우 아래의 <그림 1>~<그림 2> 와 같이 직선관계식으로 표현됨을 알 수 있었다. 그림에서 보듯이 각 직선방정식의 상관계수가 0.99 이상인 매우 상관성이 높았다.

따라서, 아스콘 재생골재에 포함된 구아스팔트 시료와 구아스팔트에 일정비율의 재생첨가제를 추가한 후의 시료의 침입도 시험 결과를 이용하여 임의의 침입도 값을 얻기 위한 혼합비율을 결정시 지수도표 또는 지수함수를 이용할 수 있음을 알 수 있었다.

표 5 노화아스팔트의 재생첨가제 추가 후 품질시험 결과

내 용	노화아스팔트											
	AGAP1				AGAP2				AGAP3			
재생첨가제비율(%)	0	5	10	15	0	5	10	15	0	5	10	15
RJ-2 첨가 후 침입도(1/100cm)	49	76	127	190	17	24	36	55	13	19	26	38
RJ-3 첨가 후 침입도(1/100cm)	49	62	94	135	17	22	30	47	13	18	25	34

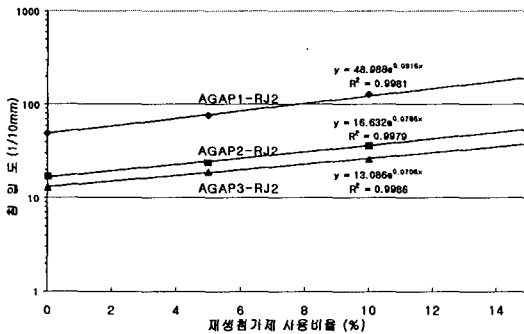


그림 1 노화아스팔트에 RJ-2 첨가 후 침입도

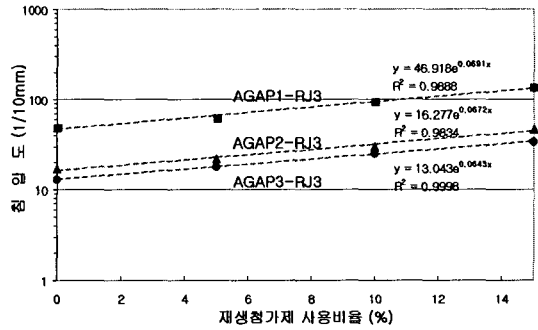


그림 2 노화아스팔트에 RJ-3 첨가 후 침입도

4.2 재생가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 방법 개발

4.2.1 배합설계 방법

(1) 배합설계 순서

재생아스팔트 혼합물의 배합설계는 <그림 3>의 공정에 따라 수행되었으며, 아스콘 재생골재 20%, 70%를 사용하였으며, 최대치수 20mm의 표층용 밀립도 혼합물 기준에 따랐다.

(2) 골재배합률 및 합성입도 결정

배합설계는 아스콘 재생골재를 20%, 70% 등 2종류로 나누어서 수행하였으며, 합성입도가 <표 6>과 같이 혼합물 기준입도를 만족시키고, 2종류가 최대한 비슷하도록 골재의 배합비율을 정하였다.

(3) 추정 아스팔트함량 결정

배합비율에 따른 추정아스팔트 함량을 구하기 위한 변수 a, b, c, X, F 과 식 1에 의한 추정 아스팔트 함량(Pb) 등은 <표 7>과 같이 계산되었다.

$$P_b = 0.035a + 0.045b + Xc + F \quad (\text{식 1})$$

여기서,

a = 2.5mm체에 남은 골재의 중량비 (100-(2.5mm체 통과중량))

b = 2.5mm체를 통과하고 0.08mm에 남은 골재의 중량비 (100-(0.08mm체 통과중량)-a)

c = 0.08mm체를 통과한 골재의 중량비

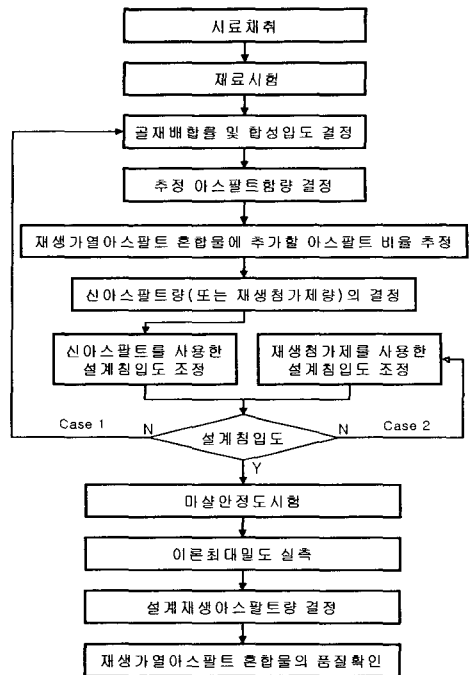


그림 3 재생가열아스팔트 혼합물의 배합설계 흐름



X = c가 11~15%이면 0.15, 6~10%이면 0.18, 5%이하면 0.20)

F = 0.7~1.0% 범위, 자료없으면 0.7%

(4) 혼합물에 추가할 아스팔트 비율 결정
 전체 혼합물중 추가할 아스팔트 비율 (P_{nb})은 식 2에 따랐으며, 전체 아스팔트 중 추가할 아스팔트 비율(R)은 식 3에 따라 <표 8>과 같이 계산하였다.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}} \quad (\text{식 2})$$

$$R = \frac{100P_{nb}}{P_b} \quad (\text{식 3})$$

여기서,

P_b = 아스팔트 혼합물의 추정 아스팔트 함량비(%)

P_{sb} = 아스콘 재생골재의 아스팔트 함량(%)

r = 100-(아스콘 재생골재 사용비율)

표 6 배합설계 입도 분포

구분	체(mm)							
	20	13	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
밀립도-20R 기준	95-100	75-90	45-65	35-50	18-30	10-21	6-16	4-8
배합-R20	100	83.0	56.9	36.6	19.8	14.5	8.9	6.1
배합-R70	100	82.1	56.7	36.9	20.6	13.9	9.4	6.3

표 7 추정 아스팔트 함량 결정

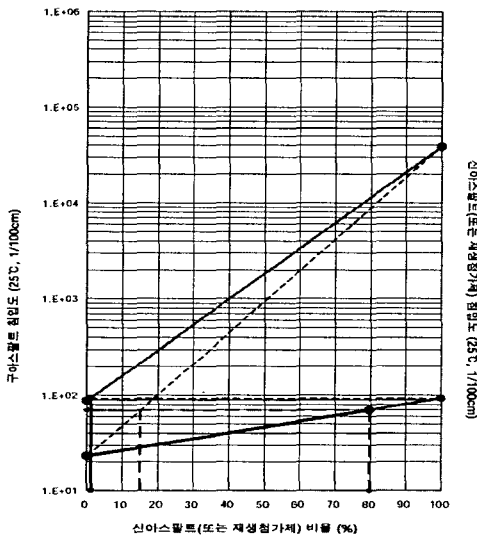
종 류	a	b	c	X	F	P_b
배합-R20	63.4	30.5	6.1	0.18	0.7	5.39
배합-R70	63.1	30.6	6.3	0.18	0.7	5.42

표 8 혼합물에 추가할 아스팔트 비율 결정

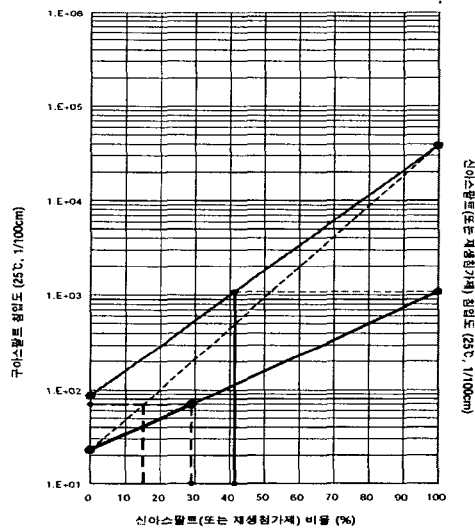
종 류	P_b	P_{sb}	R	P_{nb}	R
배합-R20	5.39	5.5	80	4.29	79.57
배합-R70	5.42	5.5	30	1.57	28.9

(5) 신아스팔트량 및 재생첨가제량 결정

혼합물 두 종류 모두의 목표 침입도를 70으로 설계하였으며, 이를 위한 재생첨가제량은 <그림 3.17>의 방법에 따라 회귀분석을 이용하여 자동으로 계산하도록 엑셀 프로그램을 제작하여 사용하였으며, 이에 의하여 결정된 재생첨가제량은 배합-R20이 1.12%, 배합-R70이 41.4%이었다.



(a) 배합-R20



(b) 배합-R70

그림 4 신아스팔트량 및 재생첨가제량

(6) 재생가열아스팔트 혼합물의 배합비

추정아스팔트 함량 비율이 약 5.4%이므로, 5.0%를 기준으로 추가할 아스팔트의 비율(P_{nb})을 변화시켜서 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% 등 5 배치의 마샬안정도 시험용 공시체를 만들기 위한 배합비율은 <표 9>와 같



았다. 이 때 재생첨가제 함량은 추정아스팔트 함량에서의 함량을 기준으로 모든 배치에 동일하게 적용하고, 신아스팔트 함량만을 변화시켰다.

혼합물의 제조시에 아스콘 재생골재의 배합 비율이 높을 경우 혼합시 골재의 피복이 잘되지 않았으나, 추가아스팔트를 신규골재와 혼합한 후 아스콘 재생골재와 배합한 결과 아스팔트가 골재를 약 95%이상 피복할 수 있었다.

4.2.2 배합설계 결과

공시체를 양면 75회 다짐하여 마찰특성치 시험한 결과는 <표 10>과 같았으며, 최적 아스팔트 함량은 공극률 4% 부근에서 각 특성치가 기준을 만족하도록 결정하였다. 이 결과 최적아스팔트 함량은 아스콘 재생골재를 20% 사용한 배합-R20 혼합물은 5.3%, 70% 사용한 배합-R70 혼합물은 4.8%를 얻을 수 있었다.

또한 재생혼합물은 재생첨가제를 사용하여 혼합물의 아스팔트 설계침입도를 70으로 고정시켰으므로, 아스콘 재생골재를 높게 사용하여도 안정도의 증가는 보이지 않았다. 단, 낮은 아스팔트 함량에서도 흐름치가 다소 높았다. 이 결과 아스콘 재생골재의 사용비율을 20% 뿐만 아니라 70%를 사용하여도 현재의 국내 기준을 만족시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4.3 배합설계 방법의 검증

4.3.1 골재입도 및 아스팔트 함량 시험 결과

배합설계 결과 얻어진 최적아스팔트 함량으로 재생아스팔트 혼합물을 KS F 2354에 의하여 원심분리한 결과 아스팔트 함량은 배합-R20이 5.4%, 배합-R70이 4.8%를 얻어 적합함을 알 수 있었다.

그리고, 골재입도는 <그림 5>와 같이 설계한 합성입도와 거의 비슷하게 제조되었음을 알 수 있었다.

4.3.2 아스팔트 침입도 시험 결과

재생아스팔트 혼합물을 원심분리하여 만든 아스팔트 용액을 로타베이퍼 방법을 이용하여 재생아스팔트로 만들어 침입도 시험을 수행하였다. 그리고 이 결과와 비교하기 위하여 침입도 70인 AP-5 아스팔트를 이용하여 재생아스팔트 혼합물과 거의 동일한 입도로 제조한 후 침입도 시험을 하였다. 이 결과 <표 11>과 같이 재생 후 침입도는 신아스팔트 혼합물이 52,

표 9 혼합물에 추가할 아스팔트 비율 결정

종 류	P _b	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
배합-R20	P _{nb}	2.88	3.39	3.89	4.40	4.91
	P _{sm}	20.32	20.21	20.11	20.00	19.89
	P _{ns}	76.80	76.40	76.00	75.60	75.20
배합-R70	P _{nb}	0.09	0.61	1.13	1.65	2.17
	P _{sm}	71.11	70.74	70.37	70.00	69.63
	P _{ns}	28.80	28.65	28.50	28.35	28.20

여기서,

P_b = 아스팔트량(%)

P_{nb} = 신아스팔트량(%, 식 3.2에 따름)

P_{sm} = 아스콘 재생골재량(%)

$$= \frac{100(100 - r)}{(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_b}{100 - P_{sb}}$$

P_{ns} = 아스콘 재생골재량(%)

표 10 혼합물에 추가할 아스팔트 비율 결정

종 류	AC (%)	밀도 (g/cm ³)	안정도 (kg)	공극률 (%)	포화도 (%)	흐름치 (0.1mm)
기준	45-70	-	750이상	3-6	65-80	20-40
배합-R20	4.0	2.314	1,743	7.85	53.58	31
	4.5	2.319	1,477	6.96	59.48	36
	5.0	2.345	1,332	5.20	68.81	34
	5.5	2.388	1,270	2.77	82.27	45
	6.0	2.375	889	2.60	84.29	41
배합-R70	4.0	2.337	1,243	7.11	56.25	31
	4.5	2.375	1,163	4.89	68.16	32
	5.0	2.405	1,340	2.99	79.76	36
	5.5	2.413	1,439	1.96	86.86	34
	6.0	2.409	1,307	1.38	91.12	43

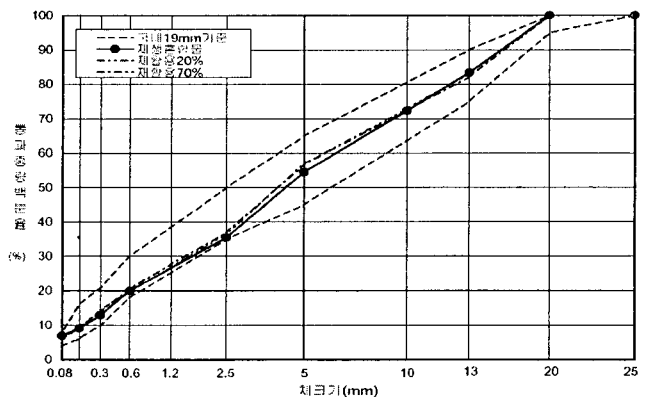


그림 5 재생아스팔트 혼합물의 추출후 골재 입도



재생아스팔트 혼합물인 배합-R20이 49로 침입도의 차이는 3이었다. 이는 아스팔트의 특성에 따라 혼합물 제조 과정에서의 노화 차이로 발생하는 오차라고 판단되었으므로 재생혼합물이 적정하게 제조되었다고 판단되었다. 그러나 배합-R70 혼합물은 침입도의 차이가 14이었으며, 이는 위에서 고려한 오차를 감안하여도 침입도가 40 정도의 낮은 범위임을 감안하면 설계 침입도의 범위를 벗어난 것으로 사려되었다.

표 11 추출·재생한 아스팔트의 침입도

구 분	신아스팔트 혼합물 (AP-5)	재생아스팔트 혼합물	
		배합-R20	배합-R70
설계 침입도(0.1mm)	70	70	70
재생 후 침입도(0.1mm)	52	49	38
추정아스팔트량(%)	-	5.4	5.4
혼합물 아스팔트량(%)	4.8	5.4	4.8

주) 재생아스팔트 혼합물 아스팔트량은 아스팔트 함량 시험에 의한 결과 값임. 단, 신아스팔트 혼합물의 아스팔트량은 설계 값임.

따라서, 침입도의 차이가 발생한 원인을 분석한 결과 <표 11>과 같이 배합-R20혼합물은 추정아스팔트량과 최적아스팔트량으로 결정된 혼합물의 아스팔트량의 차이가 0.1%로 미소하였으나, 배합-R70 혼합물은 0.6%의 차이가 있었음을 발견하였다.

미국 아스팔트 협회 방법은 배합설계시에 편의성을 위해 재생첨가제 함량을 추정아스팔트 함량에서 결정된 함량을 기준으로 모든 배치에 동일하게 적용하고, 신아스팔트 함량만을 변화시켰다. 따라서 추정아스팔트 함량과 최적아스팔트 함량이 비슷할 경우에는 혼합물의 침입도 변화가 크게 없었으나, 배합-R70과 같이 최적아스팔트 함량이 추정아스팔트 함량과 많은 차이가 발생할 뿐만 아니라, 아스콘 재생골재의 함량이 높아서 재생첨가제를 많이 사용할 경우에는 재생혼합물의 침입도가 설계침입도에 맞게 제조되지 않는 것으로 판단되었다.

이에 따라 배합설계시 설계침입도 70에 따른 각 배치별 추가아스팔트에 대한 재생첨가제 비율을 구한 결과 배합-R70 혼합물은 추정아스팔트 함량인 5.4%에서는 41.4%이었으나, 아래의 <표 12>와 같이 아스팔트 함량 4%, 4.5% 혼합물은 재생첨가제를 100% 사용하여도 설계침입도를 얻을 수 없을 것으로 예상되었으며, 각 아스팔트 함량에 따른 재생첨가제의 사용량도 큰 차이를 보였다. 단, 아스콘 재생골재의 시용비율이 적을 경우에는 큰 차이가 없었다. 따라서 재생첨가제 비율 결정시 아스콘 재생골재의 사용비율이 높을 경우에는 각 배치에 따라 서로 다른 재생첨가제 비율을 결정하여 사용하여야 할 것으로 판단되었다.

표 12 추가아스팔트 함량에 대한 재생첨가제 비율

종 류	P _b	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
배합-R20	재생첨가제(%)	3.5	2.4	1.6	1	0.5
	신아스팔트(%)	96.5	97.6	98.4	99	99.4
배합-R70	재생첨가제(%)	800.6	113.2	59.1	39.1	28.7
	신아스팔트(%)	-	-	40.9	60.9	71.3

5. 결 론

침입도를 적용한 가열아스팔트 혼합물의 배합설계 방법을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노화된 아스팔트는 첨가되는 아스팔트 또는 재생첨가제의 비율에 따라 지수적으로 침입도가 증가한다.
2. 미국 아스팔트 협회의 방법을 수정하여 가열 아스팔트 혼합물의 배합설계 방법을 개발하였으며, 검증결과 아스팔트 함량, 골재입도 등의 설계 방법이 적합하였다.
3. 재생첨가제 함량의 결정시 각 배치의 아스팔트 함량에 따라 서로 다른 재생첨가제 비율을 결정할 경우 목표 침입도를 얻을 것으로 판단되었다.
4. 앞으로 다양한 배합설계 시험 등을 통하여 적합성을 추가 검증할 예정이다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부에서 지원한 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구” 의 일부 연구결과입니다.

참고문헌

- 1) Asphalt Institute, “Asphalt Hot-Mix Recycling,” MS-20