

혼합방법에 따른 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 통계검정 평가

Statistical Evaluation of Moisture Resistance by Mixing Method of Recycled Asphalt Mixtures

김성운¹ · 김영삼² · 조영진³ · 김광우^{4*}Sungun Kim¹ · Yeongsam Kim² · Youngjin Jo³ · Kwangwoo Kim^{4*}

(Received April 6, 2021 / Revised June 11, 2021 / Accepted June 12, 2021)

When producing recycled asphalt mix, it is important that the old binder of reclaimed asphalt pavement(RAP) should be well melted during blending in the mixer. The recycled asphalt mix is produced by instant mixing(IM) of all materials(RAP, virgin asphalt and new aggregates) all together in the mixer. However, in the same recycled mix, the binder around RAP aggregate was found to show higher oxidation level than the binder coated around the virgin aggregate because the old binder of RAP was not rejuvenated properly while instant mixing. The partially-rejuvenated RAP binder is assumed to be a high stiffness point in IM recycled mix. In this study, the stage mixing(SM) method was introduced; blending RAP and virgin asphalt for the first stage, and then mixing all together with hot new aggregates for the second stage. To compare the effect of the two mixing methods on moisture resistance of recycled mixes, a statistical t-test was performed between SM and IM using indirect tensile strength(ITS) and tensile strength ratio(TSR). Three conditioning methods were used; a 16-h freezing and then 24-h submerging, 48-h submerging, and 72-h submerging in 60°C water. It was found that the $TSR(=ITS_{wet}/ITS_{dry})$ values of the mixes prepared by SM was clearly higher than the IM mixes, and coefficients of variation of SM mixes were lower than the IM mixes. It was also observed that the ITS_{WET} of SM was significantly different from the IM at $\alpha = 0.05$ level by statistical t-test. The ITS_{WET} of SM mix was reduced less than the IM mix in severer conditioned mixes. Therefore, it was concluded that the stage mixing method was an important blending technique for producing better-quality of recycled asphalt mixes, which would show higher moisture resistance than the recycled mixes produced by conventional instant mixing.

키워드 : 회수 아스팔트 포장재, 순환아스팔트 혼합물, 수분저항성, 단계혼합, 동시혼합

Keywords : Reclaimed asphalt pavement(RAP), Recycled asphalt mixture, Moisture resistance, Stage mixing, Instant mixing

1. 서론

도로 확포장과 유지보수에 따른 회수 아스팔트 포장재(Reclaimed asphalt pavement: RAP)의 발생이 매년 증가하여 2018년 15.7백만 톤에 달하며(Ministry of Environment 2018), 이 때 발생하는 RAP은 100% 재활용이 가능한 고급의 자원이다. 최근 들어 천연골재 자원이 부족한 국내의 현실을 감안하면(Ryu 2018)

양질의 골재와 아스팔트 바인더를 함유한 RAP을 재활용하는 것이 바람직하며 특히, 성토용 재료로 재활용하는 것보다 고부가가치를 지닌 도로포장용 순환아스팔트 혼합물(Recycled asphalt mixture) 생산에 적극 재활용이 필요하다.

국토교통부에서는 순환아스팔트 혼합물 품질 향상을 위하여 RAP에 포함된 노화 아스팔트가 잘 회생되도록 개선된 혼합방법을 제시하고 있다(MOLIT 2017). 즉, 순환아스팔트 혼합물 제조 시

* Corresponding author E-mail: asphaltech@hanmail.net

¹강원대학교 첨단건설기술연구소 선임연구원 (Advanced Construction Research Center, Kangwon National University, Gangwon, 24341, Korea)

²강원대학교 지역건설공학과 박사수로 (Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Gangwon, 24341, Korea)

³한국건설생활환경시험연구원 대구·경북지원 수석연구원 (Daegu & Gyeongbuk Branch, Korea Conformity Laboratories, Daegu, 42639, Korea)

⁴강원대학교 지역건설공학과 명예교수 (Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Gangwon, 24341, Korea)

RAP의 노화 아스팔트를 보다 효과적으로 회생시키기 위해 단계적 혼합(Stage mixing: SM) 방법을 제시하였다. 이는 신규 골재, RAP, 신규 아스팔트를 믹서에 넣고 동시에 혼합(Instant mixing: IM)하는 기존방법으로는 RAP의 장기간 노화된 아스팔트가 1분내의 짧은 혼합시간 동안 제대로 회생되지 못한 채 출하·포설되어 문제를 야기하기 때문이다. 즉, 적절한 수준으로 회생되지 못한 순환아스팔트 혼합물 내 노화바인더는 포설 후 포장체 내에서 공용시작과 함께 다시 노화가 시작되며 조기균열 발생의 원인이 된다(Kim et al, 2007).

이를 개선하기 위한 새로운 방법인 단계 혼합은 1차로 RAP과 신규 바인더(필요시 재생첨가제 포함)만을 믹서에 넣고 약 20초 이상 비빈 후, 가열된 신규골재를 넣고 2차 비빔을 하는 방법으로 개발되었다(Kim 2007; Kim et al, 2005; Kim et al, 2006; Doh et al, 2006; Park et al, 2006; Kim et al, 2007; Park et al, 2007). 이에 근거해 MOLIT(2017) 기준은 RAP은 간접가열 된 것을 사용하고, 신규바인더는 배합설계에서 결정된 등급의 아스팔트와 RAP을 믹서에 넣고 1차 비빔 후 신규골재를 추가하여 2차 혼합을 하도록 제시하고 있다. 이러한 단계 혼합 방법은 RAP이 우선 신규바인더와 질게 비벼지면서 RAP의 노화된 아스팔트가 녹아 신규 바인더와 융해된 다음 신규 골재와 비벼짐으로써 혼합물 전체 바인더의 점도가 고른 상태가 되도록 하기 위한 것이다.

기존 동시 혼합으로 제조된 순환아스팔트 혼합물의 경우 같은 혼합물 내 RAP 골재와 신규 골재를 싸고 있는 바인더의 점도가 크게 차이 남을 확인하였다(Doh et al, 2008; Kim et al, 2007). 이와 같이 신규 골재, RAP, 신규 바인더를 모두 넣고 동시에 비비는 경우, 믹서 내에서 신규 바인더가 신규 골재와 RAP에 동시에 분사되므로 단계적 혼합 방법과 같이 우선 RAP만을 전체 신규 바인더로 녹여내지 못 한다(Kim et al, 2006; Kim et al, 2007). 예를 들어 30% 재활용의 경우 믹서 내에 신규 골재와 RAP의 양적 비율은 7: 3이다. 따라서 투입되는 신규 바인더의 약 70%는 신규 골재에, 30%는 RAP에 뿌려지기 때문에 RAP의 노화 바인더를 우선 녹여내기에 부족하기 때문이다.

동시 혼합 방법에서 신규 골재에 도포된 바인더는 순간적으로 골재 내에 일부 흡수되고 표면의 것들이 혼합에 사용되지만, 단계 혼합 방법처럼 RAP을 20초 이상 녹인 바인더가 널리 분포하여 혼합물 내 바인더 전체의 점도를 고르게 하지 못한다. 이와 같은 혼합물 내에서 바인더의 점도 불균형은 젤-투과 색층 분석(Gel-permeation chromatography: GPC) 장비를 이용한 신규 굵은 골재와 RAP 굵은 골재 도포 바인더의 대형분자(Large molecular size: LMS) 비율(%) 분석을 통해 확인되었다(Doh et al,

2008; Kim et al, 2006; Kim et al, 2007).

아스팔트 혼합물이 수분에 취약해지는 원인은 골재와 아스팔트가 제대로 결합되지 못하거나, 혼합물 내 입자간의 결합력의 약화가 원인인데(Jitsangiam et al, 2018), 노화된 RAP 바인더가 회생되지 못하면 덜 회생된 바인더가 이 두 가지 원인의 근원이 된다. 국내의 경우 아스팔트 혼합물 제조에 친수성(Hydrophilic)인 화강암 골재를 주로 사용하기 때문에 강우·강설로 인한 수분 침투로 아스팔트 포장의 박리(Stripping)와 포트홀(Pothole) 발생 등 손상이 매우 빈번하다. 더구나 높은 강성을 가진 RAP이 사용되므로 순환아스팔트 혼합물 생산 시 노화바인더를 충분히 회생시키지 못하면 수분에 의한 영향이 신규 아스팔트 혼합물에 비하여 더 클 것으로 판단된다(Kim et al, 2006; Park et al, 2007; Kim et al, 2018; Kim et al, 2019; Goli and Latifi 2020; Ishaq and Giustozzi 2020; Zhang et al, 2021). 즉, 제대로 회생되지 못한 경화바인더는 골재와의 결합이 취약하여 수분침투 시 바인더가 골재로부터 벗겨지는 박리에 취약한 원인이 된다. 그러므로 본 연구의 목적은 국토교통부 기준에서 제시한 단계 혼합 방법과 동시 혼합 방법으로 제조된 두 가지 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 평가를 통해 두 혼합방법이 얼마나 차이 나는지를 비교 평가하는 것이다. 이를 위해 수분저항성 평가 방법으로 널리 적용되는 인장강도 비(Tensile strength ratio: TSR) 시험을 수행하여 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성을 평가하고, 이를 통계적 검정을 토대로 비교하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 재료

본 연구에서는 두 지역에서 발생된 RAP과 화강암 신규 골재, PG 58-22 등급의 아스팔트(AP-3)를 순환아스팔트 혼합물 제조에 사용하였다. PG 58-22가 순환아스팔트 혼합물 제조용으로만 사용된 반면에 PG 64-22 아스팔트(AP-5)는 비교용 신규 아스팔트 혼합물 제조용으로만 사용되었다. 그리고 화강암 부순 모래(Screenings)와 채움재(Filler)로 석회석분(Limestone powder)을 신규 및 순환아스팔트 혼합물 제조에 사용하였다.

두 종류 RAP 중 하나는 경기도 용인지역에서 수집된 RAP1(Gyeonggi: GG)이며 다른 하나는 강원도 춘천지역에서 수집된 RAP2(Gangwon: GW)로, 모두 일반(비개질) 아스팔트가 사용된 도로 표층 유지보수 시 수집된 것이다. 신규 골재로 굵은 골재 최대 치수 19mm의 화강암을 사용하였다. 골재입도는 국토교통부 표층

Table 1. Physical properties of fresh binders and recovered binders from each RAP

Binder	Abs. viscosity (poise)	Kin. viscosity at 135°C(cP)	DSR		High service temp.(°C)	Note
			G*/sin δ at 64°C(kPa)	Critical temp. (°C)		
PG 58-22	1,320	325	1.056	62.4	58	for recycled asphalt mix
PG 64-22	1,810	375	1.382	67.1	64	for normal mix
RAP1-GG ¹⁾	9,765	602	8.308	81.3	76	Recovered binder from RAP1
RAP2-GW ²⁾	11,450	884	6,113	78.3	76	Recovered binder from RAP2

¹⁾GG: Gyeonggi, ²⁾GW: Gangwon.

용 WC-3 입도 기준을 적용하였다. Table 1은 2종의 신규아스팔트와 RAP으로부터 추출·회수된 바인더의 대표적 물리적 특성을 보여준다. 절대점도와 동점도로 보면 RAP2보다 RAP1이 덜 노화된 것으로 나타났으나, DSR 시험에서는 오히려 높은 강성과 임계 온도를 보여 두 결과가 다소 상이하다. 한편, 2종 RAP 바인더의 Original PG 등급은 알 수 없으나, 일반적으로 국내에서 가장 많이 쓰인 64로 간주할 경우 고온등급이 76°C로 노화에 의해 강성이 2 등급이 높아진 것으로 확인되었다.

2.2 시험방법

2.2.1 배합설계

RAP에서 추출·회수한 바인더의 절대점도(Absolute viscosity) 값으로 Asphalt Institute(2014)를 이용하여 신규바인더 등급을 결정하였다. 절대점도 blending chart에서 일반 아스팔트 혼합물 제조에 사용되는 PG(performance grade) 64-22 아스팔트의 절대점도 2,000 poise 라인을 X축 방향으로 긋고, X축의 70%(100-재생비율) 점에서 수직선을 그어 신규바인더 2,000 poise와 만나는 교점을 찾았다. 그리고 좌측 Y축에 RAP1, 2로부터 추출·회수한 바인더 절대점도 평균 10,600 poise를 표기하고, 이 점과 위에서 찾은 교점을 좌측 Y축까지 연장하여 신규 아스팔트의 점도 1,000 poise 결정하였다. 본 연구에서는 신규 바인더로 절대점도 1,000 poise에 해당되는 PG 58-22를 재생 첨가제 없이 사용하였다. RAP 30%를 동시 믹싱방법으로 제조한 순환아스팔트 혼합물을 75회 선회 다짐하여 100mm 공시체를 제조하였으며, 국토교통부 배합설계 기준을 적용하여 최적 아스팔트 함량(Optimum asphalt content: OAC)을 결정하였다. 배합설계 시 최적아스팔트 함량은 일반도로 표준용 WC-3 아스팔트 혼합물 기준을 만족하는 공통범위 내 공극률 4.0%에서 결정하였다. OAC로 각각의 시험용 공시체를 제조 시 순환아스팔트 혼합물은 동시혼합(Instant mixing: IM)과 단계적 혼합(Stage mixing: SM) 방법을 적용하였다.

2.2.2 간접인장강도(indirect tensile strength: ITS)

간접인장강도(Indirect tensile strength: ITS)는 Fig. 1(a)와 같이 공시체 측면 상단에 수직 하중을 가하면 하중 축 방향을 따라 일정한 인장 응력이 공시체 내부에 발생하게 되어 파괴 시 측정되는 값이다. 이는 포장의 윤택도에 의한 인장응력을 견디는 중요한 특성으로 포장의 균열 저항성과 관계가 있다(Kim 1988). 기본 특성으로서의 ITS는 75회 선회다짐으로 제조한 공극률 4%의 공시체를 사용하였다.

Table 2. Asphalt mix design criteria

Mix	Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)	S _p (MPa)	TSR	ITS (MPa)	Gyrations No.
WC-3	3~5	>13	70~85	>3.2	>0.8*	>0.8	75

Toughness: > 8,000 N.mm

Dynamic stability: > 1,000 pass/mm(PG64-22)

2.2.3 인장강도비(tensile strength ratio: TSR)

아스팔트 혼합물의 수분 저항성은 -18°C에서 16시간 동결 처리 및 60°C에서 24시간 수침처리 공시체와 무처리 공시체의 인장강도비(Tensile strength ratio: TSR, KS F 2398, AASHTO T 283)로 평가한다. 이 방법은 아스팔트 포장 시공 직후 현장 공극률(7±1%)을 모사하기 위하여 실험실에서 다짐회수 조정을 통해 공시체의 공극률 7±1%로 제조하여 시험하는 방식이다.

본 연구에서는 순환아스팔트 혼합물 공시체(직경 100mm, 공극률 7±1%)를 각 혼합물 당 12개씩 제조하여 물성 측정 후 무작위(random)로 3개씩 4그룹으로 나누었다. 우선 무작위로 선정된 3개는 시험온도인 25°C에 건조 상태로 48시간 보관 후 ITS를 측정하였다. 나머지 9개 중 3개 1조는 -18°C에서 16시간 동결(freezing) 후 60°C 수소에 24시간 융해(thawing)(이후 F/T), 또 다른 1개 조는 동결 없이 60°C 물에 48시간(이후 48-h), 마지막 1개 조는 72시간(이후 72-h) 수침시킨 후 ITS를 측정하였다. 그리고 모두 ITS 시험 직전 25°C 물에 2시간 수침 후 꺼내 신속히 Fig. 1(a)와 같이

50mm/min 속도로 하중을 가하여 ITS를 측정하였다. 각 공시체 별로 얻어진 최대하중(Fig. 1(b)의 P)을 읽어 식 (1)에 대입하여 ITS를 구하였다.

$$ITS = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (1)$$

여기서, ITS= 간접인장강도(MPa), P= 최대하중(N), D= 공시체 직경(mm), t= 공시체두께(mm)이다.

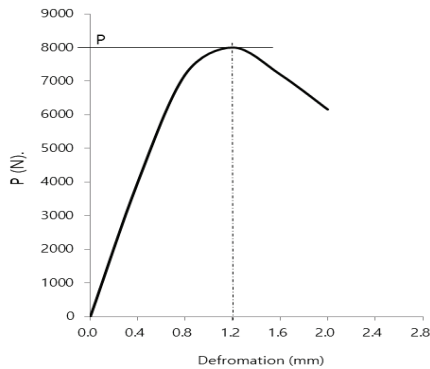
그리고 동결과 수침(F/T) 또는 수침 만 처리된 3개의 평균값 (ITS_{wet})과 건조 공시체 3개의 평균값(ITS_{dry})을 식 (2)에 대입하여 TSR(%)을 계산하였다.

$$TSR(\%) = \frac{ITS_{wet}}{ITS_{dry}} \times 100 \quad (2)$$

여기서, TSR= 인장강도비(%), ITS_{wet} = 수분처리 후 간접인장 강도(MPa), ITS_{dry} = 건조 간접인장강도(MPa)이다.



(a)



(b)

Fig. 1. Illustration of (a) ITS test setting and (b) a load-deformation curve

3. 결과 및 고찰

3.1 배합설계

배합설계 후 결정된 세 가지 혼합물의 최적아스팔트 함량 (OAC)과 기본 특성을 Table 3에서 보여준다. G19는 RAP이 포함 되지 않은 19mm 신규골재와 PG64-22 바인더를 사용한 일반 혼합물로 비교용(control)이다. G19R30은 순환아스팔트 혼합물이며, 여기서 G는 화강암(granite), 19는 굵은 골재 최대치수 19mm, R30은 recycle 30%(RAP 30%)를 의미하고, GG는 경기와 GW는 강원을 나타낸다. 일반 혼합물의 ITS는 0.72MPa, 2중 순환아스팔트 혼합물 평균은 0.8MPa 수준이었다. 그리고 변형강도 (Deformation strength: S_D)는 일반적으로 표준용 기준인 3.2MPa 이상을 모두 만족하였다. 두 종류 S_D 측정 공시체로부터 추출 회수한 바인더의 평균은 4,510 poise로 국토교통부 기준 5,000 이하를 만족하였다.

Table 3. Optimum asphalt content(OAC) and fundamental properties of three mixtures

Mixture	OAC (%)	Air voids (%)	VMA (%)	VFA (%)	ITS (MPa)	S_D (MPa)
G19	4.6	4.1	15.0	72.5	0.72	4.10
G19R30-GG	4.5	3.8	14.0	76.0	0.81	3.84
G19R30-GW	4.4	3.6	13.9	75.2	0.79	4.56

3.2 인장강도비 시험결과

Table 4는 공시체 처리(treatment) 조건과 혼합 방법에 따른 TSR 시험결과이다. 동결-용해(F/T) 처리한 일반 아스팔트 혼합물 G19의 TSR은 75.79%이었다. GG 순환아스팔트 혼합물의 IM 방법 TSR은 74.06%이나 SM 방법은 81.78%로 TSR이 7.72% 높게 나타났다. GW 순환아스팔트 혼합물은 TSR이 각각 69.33%와 80.30%로 SM 방법이 10% 이상 높게 나타났다. 또한, 48-h와 72-h 수침 처리한 경우에도 SM 방법 TSR이 IM 방법 TSR 값보다 높게 나타났고, 전체 평균에서도 모두 SM 방법이 10% 이상 높게 나타났다.

전술한 바와 같이 TSR은 수분 처리 전·후 간접인장강도 비로 평가되는데, 본 연구에서 적용한 SM 방법에 의한 순환혼합물이 박리에 강하여 수분처리조건이 강화되어도 ITS_{wet} 의 감소가 적은 것이 TSR 상대적 편차의 원인인 것으로 판단된다. 이것은 SM 방법으로 혼합되는 동안 노화된 RAP이 일정부분 회생되어 순환아스팔트 혼합물의 결합력이 증가된 것이라 판단된다.

Table 4. Comparison of ITS_{dry} and ITS_{wet} , and TSR for 30%-recycled asphalt mixtures prepared by instant mixing(IM) and stage mixing(SM)

Mix	OAC (%)	Mixing method	ITS_{dry} (MPa) ①	F/T		48-h		72-h		TSR mean (%)
				ITS_{wet} (MPa) ②	TSR (%) ②/①	ITS_{wet} (MPa) ③	TSR (%) ③/①	ITS_{wet} (MPa) ④	TSR (%) ④/①	
G19	4.6	-	0.633	0.480	75.79	0.470	74.21	0.410	64.74	74.58
G19R30 -GG	4.5	IM	0.797	0.590	74.06	0.383	48.12	0.260	32.64	51.60
		SM	0.787	0.643	81.78	0.450	57.20	0.360	45.76	61.58
G19R30 -GW	4.4	IM	0.750	0.520	69.33	0.457	60.89	0.370	49.33	59.85
		SM	0.677	0.543	80.30	0.520	76.47	0.440	64.71	73.82

3.3 통계분석에 의한 혼합방법 비교

Table 4의 각 혼합물 별, 처리 조건 별 ITS 값들은 각각 3개 공시체의 평균값이다. 일반적으로 평균값들을 비교할 때 5~10% 정도의 차이를 보이는 경우에도 의미 있는 차이(유의차: significant difference)가 나타나지 않는 경우가 있다. 따라서 객관성 있게 차이를 보려면 통계적 분석을 통해 비교해야 한다.

Table 5는 동시 혼합(IM)과 단계 혼합(SM)이 ITS_{dry} 에 영향을 미쳐 통계적으로 유의차가 있는지를 Student t-test를 통하여 분석한 결과이다. Table 4에서 P>|t|는 t-test에서 두 평균에 대한 유의성 확률을 나타내는 것으로 이 값이 유의성 수준(α) 0.05 미만이면 두 평균 간에 통계적으로 유의차가 있음을 나타낸다. 표에서 비교대상 모델 ①: ② 또는 ③: ④는 IM 방법과 SM 방법으로 제조한 각각 3개 혼합물 평균을 t-test를 통해 두 평균 간에 유의차가 있는지를 비교한 것이다.

두 혼합물 모두 IM 방법이 SM 방법보다 다소 높은 ITS 평균값을 보이나, 통계분석 결과 P>|t| 값에서는 GG, GW 순환아스팔트 혼합물 모두 유의성 수준(α) 0.05보다 커서 유의차를 보이지 않았다. 하지만 GG의 경우 보편적 기준인 $\alpha=0.05$ 수준에서는 유의차가 없으나 $\alpha=0.1$ 수준으로 보면 유의차가 있다(P>|t|= 0.0532가 0.1 미만이므로). 이는 IM 방법에 의해 어느 정도 ITS가 더 높은 혼합물

이 제조됨을 의미하는데, 그 이유는 순환아스팔트 혼합물 내에 제대로 회생되지 못한 RAP 바인더의 존재 때문으로 추정된다. 또한 두 혼합물 모두 IM 방법의 변동계수(CV)가 SM 방법보다 커서 샘플 간의 변동성이 큰 것으로 나타났다. 이는 IM 방법으로 제조 시 순환 아스팔트 혼합물의 품질이 그만큼 고르지 못해 불확실성이 높게 생산됨을 의미한다.

Table 6은 IM 방법과 SM 방법이 3가지 조건으로 수분 처리한 순환아스팔트 혼합물의 ITS_{wet} 에 영향을 미쳐 통계적으로 유의차를 보이는지를 t-test 분석한 것이다. F/T 처리의 경우 GG 순환아스팔트 혼합물은 IM과 SM 방법 간에 유의차(*표시)가 있으나, GW 순환아스팔트 혼합물에서는 두 혼합방법 간에 유의차가 나타나지 않았다. 그러나 나머지 2가지(48-h, 72-h) 수침 처리에서는 모두 IM 방법과 SM 방법 간에 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 있는 것으로 나타났다. 따라서 건조 상태와 달리 6가지 중 5가지 t-test에서 IM과 SM 방법 간에 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 있어서, 수분처리 상태에서는 대부분 혼합방법에 따른 ITS_{wet} 에 통계적 유의차가 있으므로 혼합방법이 ITS에 영향을 미침을 알 수 있다.

그리고 중요한 것은 Table 5의 ITS_{dry} 의 경우는 IM 방법 SM보다 ITS가 높게 나타났으나, Table 6의 ITS_{wet} 에서는 SM 방법이 모두 더 높게 나타났다. 이는 건조 상태에서는 강도가 더 높던 IM

Table 5. Statistical comparison of mixing methods using ITS_{dry} for three mixes without moisture treatment

Treatment	Mix	Mixing method	ITS_{dry} (MPa) by sample			Mean ITS_{dry} (MPa)	Std. ¹ (MPa)	CV ² (%)	T-test	
			1	2	3				Model	P> t
Air dry	G19R30 -GG	IM ①	0.71	0.79	0.89	0.797	0.090	11.32	①: ②	0.4630
		SM ②	0.87	0.77	0.72	0.787	0.076	9.71		
	G19R30 -GW	IM ③	0.81	0.66	0.78	0.750	0.079	10.58	③: ④	0.0532
		SM ④	0.74	0.63	0.66	0.677	0.057	8.40		

¹Standard deviation, ²Coefficient of variation ($CV = \frac{Std.}{Mean\ ITS_{dry}} \times 100$)

Table 6. Statistical comparison of mixing methods using ITS_{wet} for three mixes by three treatments

Treatment	Mix	Mixing method	Sample			Mean ITS_{wet} (MPa)	Std. ¹ (MPa)	CV ² (%)	T-test	
			1	2	3				Model	P> t
F/T	G19R30 -GG	IM ①	0.64	0.53	0.60	0.590	0.056	9.44	①: ②	0.0131*
		SM ②	0.68	0.60	0.65	0.643	0.040	6.28		
	G19R30 -GW	IM ③	0.58	0.47	0.51	0.520	0.056	10.71	③: ④	0.2413
		SM ④	0.55	0.51	0.57	0.543	0.031	5.62		
48-h	G19R30 -GG	IM ①	0.39	0.33	0.43	0.383	0.050	13.13	①: ②	0.0049*
		SM ②	0.44	0.43	0.48	0.450	0.026	5.88		
	G19R30 -GW	IM ③	0.45	0.42	0.50	0.457	0.040	8.85	③: ④	0.0094*
		SM ④	0.51	0.50	0.55	0.520	0.026	5.09		
72-h	G19R30 -GG	IM ①	0.29	0.26	0.23	0.260	0.030	11.54	①: ②	0.0289*
		SM ②	0.36	0.34	0.38	0.360	0.020	5.56		
	G19R30 -GW	IM ③	0.37	0.34	0.40	0.370	0.030	8.11	③: ④	0.0131*
		SM ④	0.46	0.41	0.45	0.440	0.026	6.01		

¹Standard deviation, ²Coefficient of variation(CV = $\frac{Std.}{Mean S_{dry}} \times 100$), *Significant at $\alpha = 0.05$.

방법이 수분처리에 의해 강도가 크게 낮아지기 때문에 나타난 현상이라 할 수 있다. 특히 ITS_{wet} 값은 모두 F/T, 48-h, 72-h 순으로 점차 더 낮아졌는데, 이는 F/T(동결융해), 48-h, 72-h 수침시간이 길어지는 순서대로 수분처리로 인한 공시체의 손상이 더 심해지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 ITS_{dry} 와 마찬가지로 IM 방법의 ITS_{wet} 의 변동계수가 SM 방법보다 높아 품질에 불확실성도 큰 것으로 나타났다.

3.4 수분 저항성

Fig. 2는 Table 4의 각 처리 조건 별 혼합물의 혼합방법별 TSR과 처리조건별 TSR 평균을 그림으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 IM 방법 혼합물은 GG, GW 순환아스팔트 혼합물 모두 각 처리조건별 평균 이하로 나타났으나, SM 방법의 경우 각 처리조건별 평균이나 일반 혼합물의 TSR과 평균이 유사하거나 더 높게 나타났다. 이는 순환아스팔트 혼합물도 단계적 혼합으로 일반 혼합물과 유사한 수분저항성을 유지할 수 있음을 보여 준 것이라 할 수 있다. 하지만 기존 IM 방법으로 제조된 순환아스팔트 혼합물의 수분 저항성은 취약하며, 이러한 사실을 통계 검정 및 그림을 통해서도 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 3가지 조건으로 전처리 후 전체를 평균한 ITS_{dry} , ITS_{wet} 값과 TSR을 혼합 방법 별로 비교하여 보여준다. 앞서 언급 하였듯이 ITS_{dry} 에서는 IM 방법이 SM에 비하여 약간 높으나(GG: 0.797/0.787=1.01, GW: 0.750/0.677= 1.1), ITS_{wet} 에서는 IM 방법이 분명히 낮으며(GG: 0.411 / 0.484=0.849, GW: 0.449/0.501=0.896), 이것이 TSR에 반영되어 10% 이상 큰 차이로 낮게

나타났다. 이는 SM방법으로 비빈 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성이 더 좋아 강도가 덜 저하되는데 기인한 것으로 판단되었다.

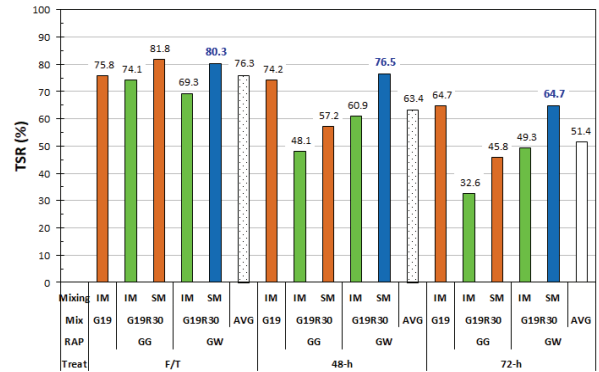


Fig. 2. Comparison of TSR for IM and SM mixed recycled asphalt mixes

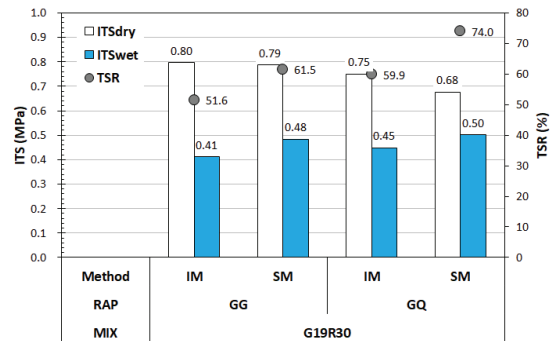


Fig. 3. Comparison of mean ITS for IM and SM, and TSR for recycled mixes

3.5 수분처리 방법 비교 분석

Table 7은 혼합물 별 IM 방법과 SM 방법으로 제조한 순환 아스팔트 혼합물의 ITS_{wet} 에 3가지 수분 처리방법 중 어떤 것이 더 큰 영향을 미치는지를 t-test를 이용하여 통계적 유의차를 분석한 것이다. 각 수분처리는 ITS_{wet} 에만 영향을 미치므로 ITS_{dry} 는 제외하였다.

일반 혼합물(G19)의 경우 F/T와 48-h, 48-h와 72-h 간에는 $\alpha=0.05$ 수준에서 유의차가 없었으나, F/T와 72-h 간에는 유의차를 보였다. G19는 RAP이 포함되지 않은 혼합물이지만 F/T와 72-h 간에는 유의차를 보여, F/T가 가장 낮은 수준의 수분손상을 유발하며 72-h 수침이 가장 큰 수분손상을 유발하기 때문인 것으로 추정된다.

GG 순환아스팔트 혼합물 IM 방법의 경우 3가지 모든 비교 모델(F/T와 48-h, F/T와 72-h 및 48-h와 72-h)에서 $\alpha=0.05$ 수준의 유의차가 있는 것으로 나타났다. 하지만 SM 방법의 경우 F/T와 48-h 간에는 유의차가 나타나지 않았고, 나머지 F/T와 72-h 그리고 48-h와 72-h 간에는 $\alpha=0.05$ 수준의 유의차가 있는 것으로 나타났다. GW 순환아스팔트 혼합물 IM 방법의 경우도 GG와 마찬가지로 세 가지 처리조건 모두에서 유의차가 나타났다. 그리고 SM 방법의 경우도 GG 순환아스팔트 혼합물과 마찬가지로 F/T와

48-h 간에는 유의차가 없고 나머지는 유의차가 있다. 이를 종합하면 F/T와 72-h 간의 비교에서는 모두 유의차를 보여 72-h가 수분손상이 가장 심한 처리조건이고, F/T가 가장 낮은 처리조건임을 알 수 있다.

Fig. 4는 TSR을 공시체 처리방법 별로 두 혼합 방법의 비교를 통해 보여준다. 모든 순환아스팔트 혼합물에서 동결-융해(F/T), 48-h, 72-h 순으로 TSR이 낮아져 순차적으로 더 강한 수분손상 처리 방법임이 나타났으며, 강한 처리조건일수록 두 혼합 방법 간에 차이는 더 크게 나타났다. 이런 현상은 앞서 Table 4의 분석에서도 나타났던 결과로 이를 그림을 통해 볼 수 있다. 국내 순환아스팔트 혼합물은 F/T 처리 후 $TSR \geq 80\%$ 기준을 적용하며, 이 경우 SM 방법 순환아스팔트 혼합물은 둘 다 합격이나 IM은 불합격이다. 또한 두 순환아스팔트 혼합물에서 보면 모두 SM 방법의 값들이 IM보다 높아 단계적 혼합으로 제조한 혼합물의 수분저항성이 모든 처리조건에서 더 우수함을 보여준다.

TSR은 ITS_{wet} 을 ITS_{dry} 로 나눈 값이므로 ITS_{wet} 이 낮아도 ITS_{dry} 가 낮으면 TSR은 높게 계산되는 모순이 있다. 그러므로 어떤 의미에서 보면 TSR보다는 ITS_{wet} 값이 일정수준 이상으로 유지되는 것이 더 중요할 수 있다. 그 한 예로 Kim(1988)은 현장코어 공시체의 최소 ITS를 65psi로 제시하였으며, 이를 근거로 미국 South Carolina주 도로국에서는 수분저항성 평가 시 ITS_{wet} 값의

Table 7. Statistical comparison of ITS_{wet} by 3 treatment methods for three mixtures

Mix	Treatment	Mixing method	Sample			Mean ITS_{wet} (MPa)	Std. ¹ (MPa)	CV ² (%)	T-test	
			1	2	3				Model	P> t
G19	F/T	IM ①	0.50	0.45	0.49	0.480	0.026	5.51	①: ①	0.1127
	48-h	IM ②	0.50	0.43	0.48	0.470	0.036	7.67	①: ②	0.0364*
	72-h	IM ③	0.39	0.40	0.44	0.410	0.026	6.45	②: ③	0.0700
G19R30 -GG	F/T	IM ①	0.64	0.53	0.60	0.590	0.056	9.44	①: ①	0.0096*
	48-h	IM ②	0.39	0.33	0.43	0.383	0.050	13.13	①: ②	0.0042*
	72-h	IM ③	0.29	0.26	0.23	0.260	0.030	11.54	②: ③	0.0441*
	F/T	SM ④	0.68	0.60	0.65	0.643	0.040	6.28	④: ④	0.1072
	48-h	SM ⑤	0.44	0.43	0.48	0.450	0.026	5.88	④: ⑤	0.0195*
	72-h	SM ⑥	0.36	0.34	0.38	0.360	0.020	5.56	⑤: ⑥	0.0029*
G19R30 -GW	F/T	IM ③	0.58	0.47	0.51	0.520	0.056	10.71	③: ③	0.0071*
	48-h	IM ④	0.45	0.42	0.50	0.457	0.040	8.85	③: ④	0.0021*
	72-h	IM ⑤	0.37	0.34	0.40	0.370	0.030	8.11	④: ⑤	0.0020*
	F/T	SM ④	0.55	0.51	0.57	0.543	0.031	5.62	④: ④	0.0590
	48-h	SM ⑤	0.51	0.50	0.55	0.520	0.026	5.09	④: ⑤	0.0036*
	72-h	SM ⑥	0.46	0.41	0.45	0.440	0.026	6.01	⑤: ⑥	0.0173*

¹Standard deviation, ²Coefficient of variation ($CV = \frac{Std.}{Mean S_{dry}} \times 100$), *Significant at $\alpha = 0.05$.

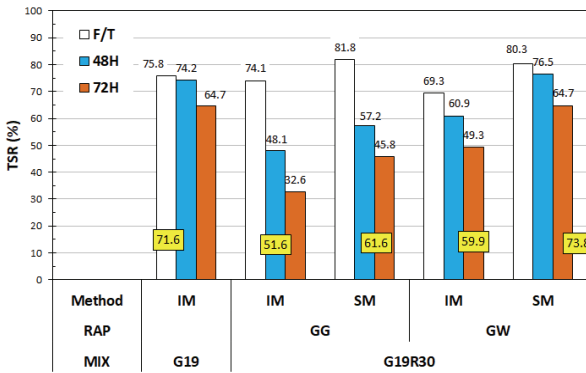


Fig. 4. Comparison of TSR of IM and SM mixed mixtures under 3 treatments

기준을 “ $ITS_{wet} \geq 65\text{psi}$ ”로 규정하고 있다(SCDOT 2000), 여기서 65psi는 0.46MPa에 해당되며, 이 기준은 국내에서도 고려해 볼만한 값이라 할 수 있다.

Fig. 5는 SM 방법에 의한 ITS_{wet} 값이 IM의 ITS_{wet} 보다 얼마나 높은지를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 모든 경우 비율이 1.04 이상이며, 그중에서도 가장 강한 처리방법인 72-h 수침 시 IM 방법보다 SM에 의한 ITS_{wet} 비율이 두 혼합물에서 모두 가장 높게(1.38, 1.19) 나타났다. 이는 단계적 혼합이 고급의 장비나 재료의 사용 없이 단순히 혼합순서를 조정하는 것만으로도 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 향상에 큰 효과를 내는 기법임을 보여주는 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 순환아스팔트 혼합물 제조 시에 모든 재료를 동시 혼합하는 통상적 방법과 국토교통부(MOLIT 2017)에 제시된 단계 혼합방법으로 순환아스팔트 혼합물을 제조하였다. 그리고 두 혼합 방법으로 제조된 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 평가를 위해 수침처리 전후 간접인장강도를 이용한 인장강도 비를 측정하고 t-test를 이용한 통계적 분석으로 그 차이를 비교하였다. 경기와 강원지역에서 수집된 2종의 회수 아스팔트 포장 재료를 30% 재활용한 표층용 순환아스팔트 혼합물을 3가지 방법으로 수분처리 후 ITS를 측정하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동시혼합 순환아스팔트 혼합물의 건조 상태 간접인장강도는 단계혼합보다 더 높게 나타났고, 3가지 조건에서 수분처리 후 간접인장강도는 단계혼합보다 낮게 나타남을 $\alpha = 0.05$ 수준에서 통계적으로 확인하였다. 또한, 동시혼합 방법은 수분처리 전·후 변동계수가 크게 나타나 품질의 불확실성이 큰

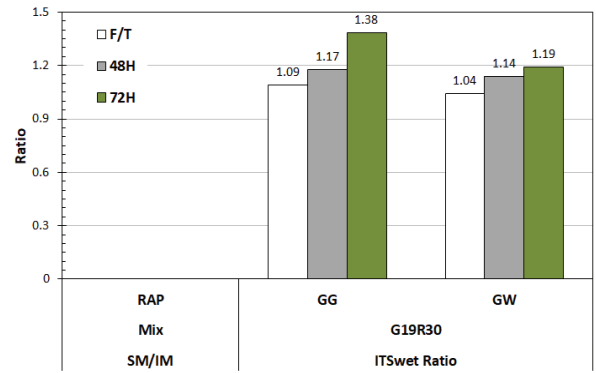


Fig. 5. ITS_{wet} ratio by mixing method (SM/IM) under 3 treatments

것을 확인하였다. 이는 모든 재료를 동시 혼합 시 RAP의 노화 바인더가 제대로 회생되지 못해 높은 강성이 유지됨으로 인해 단계 혼합보다 높은 강도를 보이고, 노화 바인더 부분이 취약하여 수분에 쉽게 손상되어 나타난 현상으로 판단되었다.

- 2) 단계 혼합 방법이 동시 혼합보다 수분저항성이 우수하게 나타났으며, 수분처리가 가혹할수록 혼합방법 별 차이가 크게 나타나, 가혹한 수분처리 조건에서 단계 혼합 방법이 더 효과적임을 알 수 있었다. 이는 단계 혼합으로 노화된 RAP 바인더가 일정부분 회생되고, 강성이 낮아져 혼합물의 결합상태가 향상되기 때문인 것으로 사료된다.
- 3) 수분저항성 평가는 인장강도 비 외에 ITS_{wet} 값을 일정수준 이상으로 유지하는 것이 중요하며, 가장 가혹한 조건에서 단계 혼합 방법이 동시혼합에 비해 19~38% 우수하여 수분저항성 향상에 효과적인 것을 확인하였다.
- 4) 결론적으로 본 연구에서는 국토교통부 기준에 명시된 단계 혼합 방법은 순환아스팔트 혼합물 제조 시 필수 방법으로 판단되며, 고급 장비나 추가 재료 사용 없이 혼합과정 조정만으로 품질을 개선시킬 수 있는 효과적인 기법임을 확인하였다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한

국연구재단 공공조달 연계형 국민생활연구 실증·사업화 사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2019M3E8A1067629)로서 강원대학교 첨단건설기술연구소의 시설·장비를 이용하여 수행되었습니다.

References

- Asphalt Institute. (2014). Asphalt Mix Design Methods, Manual Series No. 2, MS-2, 7th Ed.
- Doh, Y.S., Amirkhani, S.N., Kim, K.W. (2008). Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC, *Construction and Building Materials*, **22(6)**, 1253–1260.
- Doh, Y.S., Ko, T.Y., Park, T.W., Jo, B.J., Kim, K.W. (2006). Evaluation of renovated mixing method and deformation strength of recycled asphalt concrete, *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites*, **11(1)**, 1–11 [in Korean].
- Goli, H., Latifi, M. (2020). Evaluation of the effect of moisture on behavior of warm mix asphalt(WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement(RAP), *Construction and Building Materials*, **247**, 118526.
- Ishaq, M.A., Giustozzi, F. (2020). Rejuvenator effectiveness in reducing moisture and freeze/thaw damage on long-term performance of 20% RAP asphalt mixes: an Australian case study, *Case Studies in Construction Materials*, **13**, e00454.
- Jitsangiam, P., Nikraz, H., Nusit, K. (2018). Asphalt concrete moisture damage resistance: an evaluation of the coating ability of aggregates and binders, *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, **934**, 217–212.
- Kim, K.W. (1988). Determination of Critical Tensile Strength for Bituminous Concrete Surface Course, Ph.D Thesis, Clemson University, Clemson, SC, USA.
- Kim, K.W. (2007). A Manufacturing Method for Recycled Asphalt Concrete using Waste Asphalt Concretes, *International Patent Classification*, E01C19/10(2006.01.01) E01C19/05(2006.01.01.).
- Kim, K.W., Amirkhani, S.N., Doh, Y.S., Jung, J.H. (2007). Reducing stiffness of oxidized binder in recycled asphalt mixture by stage mixing, *Journal of AAPT*, **78**, 201–233.
- Kim, K.W., Doh, Y.S., Lim, D.S., Jung, J.H., Lee, J.S., Park, T.W., Joe, B.J. (2006). “Improvement of recycled asphalt mixture by mixing method renovation,” *Proceedings of International Symposium for Advanced Technology in Asphalt Pavements(ATAP)*, Kangwon National University, Korea, 67–90.
- Kim, K.W., Hong, S.K., Lee, G.H., Doh, Y.S. (2005). Methodology for modifying aging condition of hot-mix recycled asphalt mixture, *International Journal of Highway Engineering*, **7(1)**, 1–9 [in Korean].
- Kim, K.W., Kwon, O.S., Doh, Y.S. (2006). Evaluation of permanent deformation characteristics of recycled asphalt concretes made by improved binder-rejuvenation, *International Journal of Highway Engineering*, **8(1)**, 1–13 [in Korean].
- Kim, S., Shen, J., Lee, S., Kim, Y., Kim, K.W. (2019). Examination of physical property degradation due to severe short-term ageing and effect of hydrated lime as antioxidant in asphalt mixture, *Road Materials and Pavement Design*, **20(7)**, 1638–1652.
- Kim, S.U., Shen, J., Jeong, M.M. (2018). Effects of aggregate size on the rutting and stripping resistance of recycled asphalt mixtures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30(2)**, 04017280.
- Ministry of Environment (2018). National Waste Generation and Treatment Status [in Korean].
- MOLIT: Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017). Guideline for Production and Construction of Asphalt Concrete Mixture, Sejong City, 30103 Republic of Korea [in Korean].
- Park, T.W., Doh, Y.S., Kim, K.W. (2006). Characteristics of fatigue resistance of recycled asphalt concretes by modified mixing process, *International Journal of Highway Engineering*, **8(4)**, 135–143 [in Korean].
- Park, T.W., Kim, S.U., Park, N.W., Kim, K.W. (2007). “Mixing method renovation for reducing stiffness of recycled asphalt mixture,” *Proceedings of 5th MAIREPAV Conference*, Park City, Utha, USA, 451–456.
- Ryu, D.H. (2018). Plan on the stabilization of aggregate supply, *Magazine of RCR*, **13(1)**, 4–6 [in Korean].
- SCDOT: South Carolina Department of Transportation (2000). Standard Specifications for Highway Construction, Edition of 2000.
- Zhang, J., Guo, C., Chen, T., Zhang, W., Yao, K., Fan, C., Liang, M., Guo, C., Yao, Z. (2021). Evaluation on the mechanical performance of recycled asphalt mixtures incorporated with high percentage of RAP and self-developed rejuvenators, *Construction and Building Materials*, **269**, 121337.

혼합방법에 따른 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 통계검정 평가

순환아스팔트 혼합물은 제조 시 믹서에서 혼합되는 동안 노화된 RAP(회수 아스팔트포장재)을 잘 녹이는 것이 중요하다. 순환아스팔트 혼합물은 모든 재료(RAP, 신규 아스팔트 및 신규 골재)를 동시에 믹서에 넣고 혼합하여 생산한다. 동시 혼합(IM) 방법으로 제조된 순환아스팔트 혼합물의 경우 RAP에 포함된 노화된 바인더는 신규 바인더와 혼합되는 동안 적절하게 회생되지 못하기 때문에 동일한 혼합물 내에서 신규 골재 주위에 코팅된 바인더보다 더 높은 산화·노화 수준을 나타내며, 큰 강성을 보인다. 본 연구에서는 RAP의 노화된 바인더를 회생시키기 위해서 단계 혼합(SM) 방법을 적용하였다. 첫 번째 단계에서는 RAP과 신규 아스팔트를 혼합한 다음 두 번째 단계에서는 가열된 신규 골재와 함께 혼합하였다. 혼합 방법에 따른 순환아스팔트 혼합물의 수분저항성 개선효과를 비교하기 위해 간접인장강도(ITS)와 인장강도 비(TSR) 시험을 수행하여 SM 방법과 IM 방법 간에 통계적 t-테스트를 수행했다. 수분저항성을 평가하기 위해서 세 가지 전처리 조건 즉, -18°C 동결 후 60°C에서 24 시간 수침, 60°C에서 48 시간 수침 및 60°C에서 72 시간 수침 조건을 적용하였다. SM 방법으로 제조한 순환아스팔트 혼합물의 TSR은 IM 방법에 의한 순환아스팔트 혼합물보다 분명히 높았고, SM 방법의 변동계수는 IM보다 낮았다. 또한 통계적 t-test에 의해 SM 방법의 ITS_{WET} 이 $\alpha = 0.05$ 수준에서 IM과 유의하게 다른 것으로 관찰되었다. 또한, SM 방법의 ITS_{WET} 은 IM과 비교하여 더 가혹한 조건에서 처리할수록 훨씬 개선된 결과를 나타냈다. 따라서 단계 혼합 방법은 기존의 동시 혼합 방법으로 생산된 순환아스팔트 혼합물보다 더 높은 수분저항성을 보이고, 보다 더 우수한 순환아스팔트 혼합물을 생산하기 위한 중요한 혼합 방법임을 확인하였다.