

반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물의 개발 및 성능시험 연구

Development and Performance of Semi-Hot Foamed Recycling Asphalt Mixture

박 태 순* · 김 용 주** · 김 기 연***
Park, Tae Soon · Kim, Yong Joo · Kim, Ki Hyun

Abstract

Application of the foamed asphalt techniques in recycling the waste asphalt shows that large quantity of waste asphalt(60~70% of the total mix) can be used comparing with hot mix asphalt techniques and also is environmentally safe. However, the constant quality of the recycling foamed asphalt mixtures is not readily achieved and can not be applied to the heavy traffic road due to the characteristics of the conventional foamed asphalt mixtures. The semi-hot technique that the RAP and the aggregate is heated below 100 °C is adopted in this study and expected to solve the problems of conventional foamed asphalt mixtures. This study presents the viability of the semi-hot foamed asphalt mixtures when using the RAP. The semi-hot recycling foamed mixtures are tested and evaluated in the laboratory. The test results including coating rates, creep tests, resilient modulus tests, indirect tensile tests and the Marshall stability tests showed significant improvement.

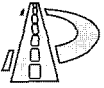
Keywords : semi-hot foamed recycling asphalt mixtures, RAP, resilient modulus tests

요 지

폼드 아스팔트 공법은 가열 아스팔트 혼합물공법과 비교했을 때 골재와 아스팔트 가열에 필요한 다량의 에너지 소모가 없으며 가열로 인한 이산화탄소가 발생하지 않기 때문에 환경적으로 안정한 공법으로 평가되고 있다. 특히, 아스팔트 재활용 측면에서는 전체 혼합물량의 60~70% 까지 많은량의 폐 아스팔트를 사용할 수 있기 때문에 폐 아스팔트 재활용에 매우 효과적인 방법이다. 그러나, 폼드 아스팔트 공법은 항상 일정한 양질의 혼합물을 얻기가 어렵고 중(重)교통의 도로에 적용하기에는 문제점이 있다. 본 연구는 골재와 폐 아스팔트를 100°C 미만으로 가열하는 새로운 방식인 반 가열공법을 사용했을 때 얻어지는 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물의 성능과 반 가열 방식의 타당성에 대한 연구결과이다. 반 가열 방식으로 제조된 재생 폼드 혼합물을 실내에서 코팅율, 크리프시험, 회복탄성시험, 간접인장강도 및 마찰 안정도시험을 실시한 결과 혼합물의 현저한 개선 효과를 나타내었다.

핵심용어: 반 가열 재생폼드 아스팔트혼합물, 회수 아스팔트 혼합물, 회복탄성계수 시험

* 정희원 · 서울산업대학교 토목공학과 교수(tpark@duck.snut.ac.kr/Tel:02-970-6506)
** 정희원 · 서울산업대학교 건설기술연구소 선임연구원(snut66@hanmail.net/Tel:02-970-6946)
*** 정희원 · 한국건설기술연구원 연구원(kihyun@kict.re.kr/Tel:031-910-0725)



1. 서론

1950년 미국 IOWA 대학의 Csanyi 교수에 의해서 개발된 폼드 아스팔트 공법은 교통량이 매우 적은 시골의 간이도로 포장용 목적으로 개발된 공법이다. 폼드 아스팔트 공법은 가열아스팔트에 비하여 소성변형 저항성이 우수하고 온도 변화에 의한 혼합물의 회복탄성계수 변화가 크게 변화하지 않는 등 큰 장점이 있으며, 재활용 측면에서는 가열 또는 상온 아스팔트 혼합물에 비하여 60~70%까지 폐 아스팔트를 사용할 수 있다는 폐 아스팔트의 재활용에 매우 바람직한 공법으로 평가되었다(박태순 외 1인, 1999). 그러나, 위에서 언급한 것처럼 이 공법을 그대로 적용할 경우 교통량이 많은 대도시의 포장으로는 안정성 면에서 부족한 점이 있는 것으로 나타났다. 즉, 상온에서 제조한 폼드 아스팔트의 문제점으로는 골재와 아스팔트간의 코팅력이 부족하여 수분의 침투로 인한 파손의 우려가 있으며 안정된 혼합물의 품질을 얻기가 어렵다는 단점이 있다.

이러한 폼드 아스팔트 혼합물의 단점을 보완하고 중(重)교통에 저항할 수 있는 혼합물로 개발하기 위해서 폼드 아스팔트에 사용되는 골재를 70~90℃의 범위로 가열함으로써 안정된 혼합물을 얻을 수 있음은 물론 중(重)교통이 작용하는 대도시에도 사용할 수 있다는 기초연구결과가 여러 연구자(Bowering & Martin, 1976, CSIR, 1998, Robert et al, 1984, Jenkins et al, 1999)에 의해서 발표되었다.

본 연구의 목적은 여러 연구자의 기초 연구를 바탕으로 구골재와 신골재를 60~100℃로 가열하여 제조한 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물의 성능을 각종 시험을 실시하여 평가하고 상온에서 제조된 재생 폼드 아스팔트 혼합물과 비교하여 성능 및 안정성의 향상을 분석함으로써 중(重)교통량이 작용하는 대도시의 혼합물로 사용 가능성

을 평가하는데 있다.

본 연구의 수행을 위하여 아스팔트 포장 보수 현장에서 수거한 폐 아스팔트를 사용하여 골재의 기층용 입도를 지방 규정에 따라 제조하였으며 골재 가열 온도 변화에 따른 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물의 성능을 평가하기 위해서 골재의 가열 온도를 60℃, 70℃, 80℃, 90℃ 및 100℃로 가열하여 회복탄성계수(MR), 크리프(Creep) 특성, 수분민감도, 저장안정성, 안정도 및 간접인장강도 등 아스팔트 혼합물의 역학특성을 실내시험으로 실시하였다.

2. 반 가열 폼드 아스팔트

2.1 반 가열의 정의

반 가열이라 함은 기존 가열 아스팔트 혼합물의 제조에 사용되는 골재를 가열하는 온도에 비해 낮은 온도, 특히 물의 끓는점인 100℃이하의 온도로 골재를 가열하는 방식을 뜻한다. 기존 가열 아스팔트 혼합물에 사용되는 에너지의 대부분은 그림 1의 2단계와 3단계에서 볼 수 있는 것처럼 골재를 건조하는데 사용된다.

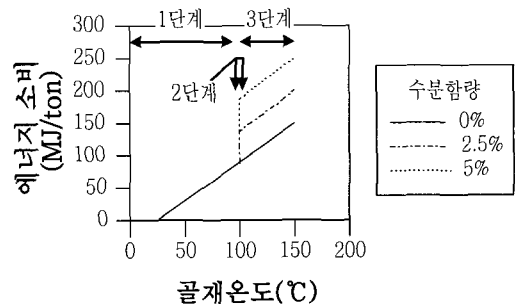
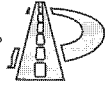


그림 1. 골재온도와 에너지 소비량과의 관계(Jenkins 외 3인, 1999)

2단계에서 골재를 가열하는데 필요한 에너지는



물 1℃를 가열하는데 필요한 에너지의 500배이다. 소모되는 에너지는 골재에 포함된 수분의 함량에 따라 증가하며, 실제로는 그림 1.에 도시한 에너지 보다 10~20%의 에너지가 더 소모된다. 골재를 100℃ 이하로 반 가열 할 경우 에너지의 절감은 물론 혼합물의 다짐 향상, 골재와 아스팔트의 코팅력 향상 및 아스팔트 바인더의 분산 시 수분의 손실 방지와 같은 장점이 추가적으로 얻어진다.

이러한 에너지 소모는 열역학 법칙을 사용하여 계산할 경우 골재내에 있는 함수비에 의해서 크게 영향을 받게 된다. 실제로는 골재의 가열에 필요한 에너지는 온도의 전달 및 손실을 고려하게 되면 그림 1.에 보인 에너지 사용량 보다 10~20%가 많아지게 된다. 따라서 비등점 이하의 온도, 즉 제 1단계 내에서 작업을 수행할 경우 에너지 절약과 여러 장점을 얻을 수 있게 된다.

즉, 제 1단계 구역 내에서 제조되는 반 가열 폼드 아스팔트는 에너지를 절약할 수 있음은 물론 혼합물의 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서, 반 가열을 실시할 경우 가열온도는 100℃ 미만을 사용하는 것이 바람직하다.

혼합시 골재온도는 혼합물의 평형온도에 큰 영향을 미친다. Jenkins(1999)의 연구에 의하면 180℃로 가열된 거품 형태의 아스팔트 바인더는 혼합물의 온도를 7℃~10℃정도만 상승시키기 때문에 골재의 온도가 큰 영향을 미치게 된다.

폼드 아스팔트 바인더와 골재간의 온도 기울기는 거품의 붕괴율에 영향을 미치게 된다. 이러한 현상은 폼드 바인더의 열 전달을 특성이 약하다라도 발생하게 된다. 그 이유는 거품상태에서, 골재와 접촉하고 있는 폼드 바인더의 표면적이 크고 거품의 필름두께가 매우 얇아서 열 전달률을 신속하게 만든다. 거품의 온도가 100℃보다 약간 크고 골재의 온도가 30℃이하일 경우, 혼합물의 평형온도는 약 38℃정도가 된다. 혼합 중에 거품

의 붕괴율과 바인더의 점도 증가율은 신속하게 변한다. 반대로, 골재의 온도가 90℃일 경우, 혼합물의 평형온도는 100℃보다 약간 작게 된다.

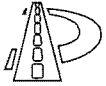
따라서 아스팔트는 혼합하는 긴 시간동안 낮은 점도를 유지하면서 남게되고 혼합물 내에서 퍼짐과 코팅이 향상된다. 폼드 바인더로부터 골재로의 열전달율은 아스팔트($r=0.17 \text{ Joule/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Kelvin}$)의 열전달계수로부터 추정할 수 있다. 아스팔트의 열전달계수는 석회석과 화강암에 비하여 10배에서 20배 정도가 낮다. 골재와 접촉하고 있는 아스팔트 거품의 경우를 고려할 때 189 Joules의 에너지가 1초 동안 110℃의 아스팔트로부터 20℃의 골재로 전달될 수 있다는 것을 뜻한다. 이러한 사실은 1g의 아스팔트가 90℃가 감소할 수 있다는 가능성을 보여준 것이다. 따라서, 큰 접촉 표면적과 거품내의 얇은 아스팔트 필름은 골재에 신속한 열전달을 발생시키게 된다.

2.2 연구사례

일반적으로 현장기술자들에게 알려진 대로 골재의 온도와 상온 폼드 아스팔트 혼합물의 품질은 큰 상관관계가 있다. 현재까지의 연구 결과 골재온도의 하한선은 결정되어 있지만(Bowering & Martin, 1976), 가열한 골재를 사용했을 경우에 생산된 폼드 아스팔트 혼합물의 성능에 대한 연구는 아직 까지 활발하게 이루어지지 않는 것이다.

다만, 가열한 골재를 사용하여 폼드 아스팔트를 생산할 경우 혼합물 내의 바인더의 분산이 더욱 용이해져서 조립골재에까지 코팅이 향상되며(CSIR, 1998), 혼합물의 밀도가 증가하여 공학적 성질이 향상되고(Roberts et al, 1984), 25%에서 158%의 안정도의 증가를 가져온다(Bushkuhl, 1990)는 등의 혼합물의 물리적 성능향상에 대한 연구결과가 보고되고 있을 뿐이다.

1999년 남아프리카 공화국의 제 7 회 CAPSA (Conference on Asphalt Pavements for Southern



Africa)에서 발표된 Jenkins의 3인의 “Half-Warm foamed bitumen treatment, a new process” 논문에서는 신재를 사용한 반 가열 폼드 아스팔트 혼합물의 성능 향상에 대하여 연구보고 하였는데 폼드 아스팔트에 사용하는 골재를 70~80℃로 가열하여 제조된 폼드 아스팔트 혼합물의 성능에 대한 평가 연구결과를 소개하였다.

2.3 반 가열 재생 폼드 아스팔트의 특성

혼합물 제조시 골재를 반 가열(60~100℃ 사이) 함으로써 기존 폼드 아스팔트 혼합물과 가열 아스팔트 혼합물에 비하여 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

- (1) 골재와 바인더간의 코팅력 향상
- (2) 다짐 향상
- (3) 혼합물의 밀도증가
- (4) 역학적 성능 개선
- (5) 에너지 사용량 감소
- (6) 환경친화

반 가열 할 경우 폼드 아스팔트의 장점인 저장성은 감소하지만, 기존 폼드 공법에 비하여 얻어지는 장점이 많기 때문에 품질확보 측면에서 매우 유리할 것으로 판단된다. 기존 폼드 아스팔트 혼합물의 경우에도 저장성이 있다고는 하지만 대기중의 습도에 따라 24 시간에서 48 시간이 경과하면 혼합물의 품질이 저하되고 상부의 혼합물은 사용이 불가한 경우가 발생하기도 한다.

아스팔트 혼합물의 골재 코팅은 혼합물의 성능에 큰 영향을 미친다. 혼합물 내에 바인더의 분산이 향상됨으로써 내구성, 수분에 대한 저항성 및 안정성이 증가되기 때문이다. 이러한 이유 때문에 골재에 대한 바인더의 최소 두께를 규정하고 있는 기관도 있다. 골재 아스팔트의 입자가 혼합물 내의 인장강도를 발현하게 하는 경우인 폼드 혼

합물에서는 특히 중요하고 골고루 잘 분포가 되었을 경우 바인더의 네트워크 망상의 연결을 잘 연결시킴으로서 혼합물의 피로 저항성을 증진시키게 된다.

폼드 아스팔트 혼합물내의 바인더 분포의 특성과 형상은 마치 실이 끊임없이 연결되어 있는 네트워크 모양이다(Jenkins, 1999). 이러한 바인더 네트워크는 낮은 점도의 아스팔트로 생성된 폼드 아스팔트거품이 호터지면서 그 파편에 의해서 형성된 것이다. 이러한 거품파편은 입자를 부분적 또는 완전하게 코팅을 하고 남은 바인더는 혼합중에 다른 입자를 부착시키는 과정으로 혼합물을 제조하게 된다. 아스팔트실의 길이와 두께는 아스팔트의 점도(등급 및 온도), 신도 및 입자의 상대 변형 및 자유아스팔트의 체적과 밀접한 관계가 있다. 혼합시간이 너무 길 경우 실이 파괴되어 혼합물에 나쁜 영향을 미칠 수도 있다. 특히, 실이 다시 재(再)성형 할 수 있는 기회는 혼합물의 온도에 전적으로 의존한다. 반 가열 폼드 혼합물은 아스팔트와 골재의 등가 온도로 인하여 혼합시간을 크게 늘릴 수 있을 뿐만 아니라 향상된 아스팔트 바인더의 망상보강이 가능하기 때문에 기존 상온 폼드 혼합물에 비하여 안정성 있는 혼합물을 구성하게 된다.

3. 사용재료 및 시험방법

3.1 사용재료 및 시험장비

본 연구에 사용한 페아스팔트는 서울 시내(신내동, 압구정동, 삼호아파트 앞길, 삼풍아파트, 세종로 5곳 - 그림 2. 참조)의 아스팔트 포장 보수공사 현장에서 채취한 것으로 배합설계와 실내시험을 실시하였다.

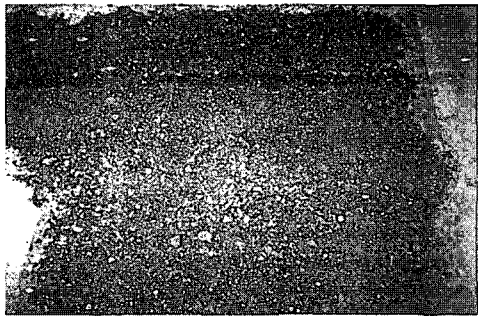
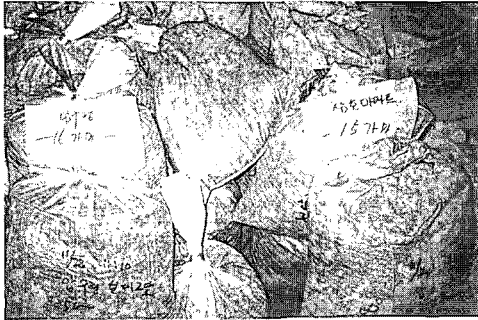
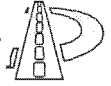


그림 2. 시험에 사용된 페 아스팔트

현장에서 채취한 페 아스팔트는 관련 KS 시험 규정에 따라 점도(ASTM D 2171), 침입도(KS M 2252), 아스팔트비(KS F 2354) 및 입도시험(KS F 2502)을 실시하여 회수 아스팔트 혼합물의 물리적특성을 시험·분석하였다. 표 1은 회수 아스팔트의 물리적 특성을 정리한 것이다.

표 1. 회수 아스팔트의 물리적 특성

채취장소	년령	점도(poise)	침입도 (1/10mm)	회수아스팔트비(%)
신내봉	4년	5372	39	4.2
압구정동	미상	2211	57	7.1
삼호APT	미상	4124	40	5.1
삼풍APT	10년	6860	27	5.3
새종로	미상	147	시험불가	6.5

표 1에 나타난 시험결과를 기준으로 페 아스팔

트는 아스팔트비를 기준으로 압구정동, 삼풍 APT 시료를 하나의 시료로 혼합하여 사용하였다. 3개 지역의 페아스팔트를 혼합한 시료는 지방 입도 범위를 만족하지만, 굵은골재의 입도가 상한선에 치우쳐 그림 3에 보이는 것처럼 신 골재를 사용하여 국내 기준 입도인 BB-2 입도에 적합하도록 합성입도를 결정하여 배합설계의 입도로 사용하였다.

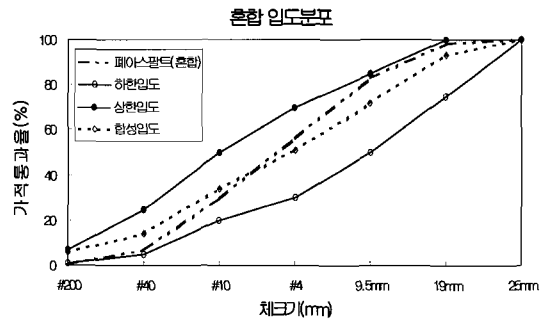


그림 3. 배합설계에 사용한 합성입도

회수골재의 입도분포를 지방규정에 맞추기 위하여 사용한 신 골재의 잔골재 비중은 2.71 굵은골재의 비중은 2.64이며, 폼드 아스팔트 생산에 필요한 아스팔트 바인더는 PG 64-22을 사용하였다. 신·구골재의 합성비율은 1차년도 연구(서울산업대학교, 1999)로부터 결정된 50:50의 비율을 사용하여 시험을 수행하였다.

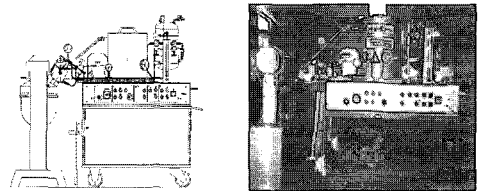
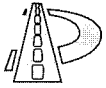


그림 4. 실내용 폼드 아스팔트 장비

그림 4는 실내용 폼드 아스팔트 시험장비로써 독일의 W사 제품으로 거품을 만들어 내는 플



랜트와 혼합물을 혼합할 수 있는 믹서로 구성되어 있다.

3.2 시험계획 및 방법

폼드 아스팔트 혼합물은 간접인장강도를 기준으로 최적 아스팔트비를 결정하는 방법과 마샬 배합설계를 수정한 수정 마샬 배합설계 방법이 사용되고 있다. 유럽과 남아프리카 공화국에서는 인장강도시험으로부터 최적 아스팔트비를 정하는 반면 미국에서는 마샬 시험법으로부터 최적 아스팔트비를 정하는 방법을 사용하고 있다. 호주의 Lancaster(1994)에 경험에 의하면 폼드 아스팔트 바인더비는 반드시 회복탄성계수가 가장 큰 수치로 선정되어야한다고 추천하고 있으며, Lewis (1998)는 마샬 안정도가 아스팔트 혼합물의 성능과 관계가 없기 때문에 간접인장강도 시험으로 설계 바인더비를 선정하도록 제안하고 있다.

따라서 본 연구에서는 인장강도와 마샬시험법을 함께 사용하여 최적 아스팔트비를 도출하였으며, 골재의 온도가 혼합물의 성능에 미치는 영향을 조사하기 위해 10℃ 간격으로 60℃에서 100℃ 까지 골재의 가열온도를 변화시켜 공시체를 제작하였다. 제조된 혼합물은 기존의 상온 재생 폼드 아스팔트 혼합물 및 일반 가열 재생 아스팔트 혼합물과 성능을 비교하기 위하여 마샬안정도, 크리프시험 및 회복탄성계수, 간접인장강도 시험결과를 비교하였다.

또한, 골재의 온도가 혼합물의 저장성에 미치는 영향을 알아보기 위해 혼합물을 제작한 뒤, 그 즉시, 실온에서 1시간, 2시간, 3시간, 4시간, 5시간 저장 후, 공시체를 제작하여 시간의 변화에 따른 혼합물의 물성 변화를 밀도와 간접인장 강도 시험을 실시하여 저장 가능 시간을 조사하였다.

역학적시험은 혼합물의 소성변형 특성을 분석하기 위해 60℃에서 60분간 150kpa의 정적하중을 재하하고 30분간 하중을 제하하여 영구변형을 측

정하는 크리프 시험, 온도 변화에 대한 민감도와 회복탄성율을 분석하기 위해 5℃, 25℃ 및 40℃에서 실시하는 회복탄성계수 시험, 균열특성을 분석하기 위한 간접인장강도시험 및 국내 아스팔트 혼합물의 설계 기준인 마샬안정도 시험을 실시하여 각각의 골재 온도에서 제작된 혼합물이 역학적 특성에 미치는 영향을 조사하는 동시에 저장성의 확보 여부도 연구하였다.

육안검사로부터 골재와 바인더간의 코팅력 향상 여부를 판정하였으며, 공시체의 다짐 효과를 판정하기 위해서 공시체 높이 비교 및 비중시험을 실시하였다. 그림 5는 본 연구의 시험계획에 대한 흐름도이다.

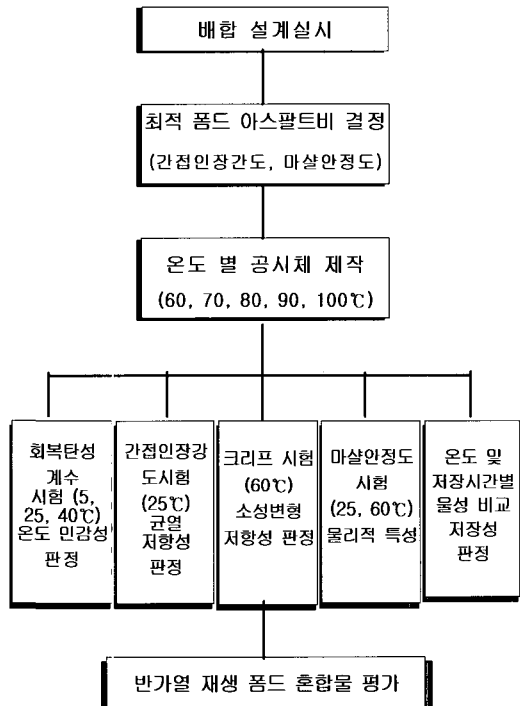


그림 5. 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물 시험계획



4. 시험결과 및 분석

4.1 폼드 아스팔트 바인더의 최적 함유량 결정

압력을 6~8 bar로 변화시키고 동시에 온도를 160℃, 170℃, 180℃로 변화시키면서 거품특성을 측정하였다. 거품 특성은 함유비에 의해서 결정되기 때문에 반감기와 팽창비를 동시에 만족시킬 수 있는 최적 함유비를 구하기 위해서 배합설계를 실시하기 전에 반드시 실시하는 과정이다.

각 온도에 따른 최적 함유비를 측정한 결과는 표 2와 같다. 표 2의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 온도가 높아최적 함유비는 상승하는 것으로 나타났다.

표 2. 아스팔트의 온도별 최적함수비(%)

바인더	온도		
	160℃	170℃	180℃
AP-3 (PG64-22)	1.2	1.25	1.4

그림 6은 180℃에서의 시험에 사용한 아스팔트의 팽창비와 반감기에 대한 시험 결과이며 본 연구에서는 혼합물 제작 시 폼드 아스팔트의 최적 함유비를 1.4 %로 결정하여 사용하였다.

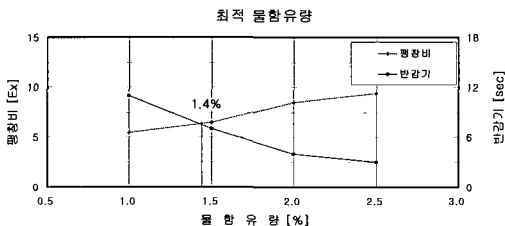


그림 6. 원 아스팔트의 최적함수비

4.2 골재의 다짐시험

배합설계 이전에 골재의 다짐시험을 실시하여 골재의 최적 함유비를 정하여야 골재간의 최적 결합을 얻을 수 있다. 다짐시험은 흙의 다짐시험 (KS F 2312)을 이용하여 최적 함유비와 최대밀도를 결정하였다.

다짐시험은 합성입도에 맞도록 각각 5조를 준비하였고 함유비를 변화시켜 가면서 수정 D다짐으로 시험을 실시하였다. 골재의 다짐시험을 실시하여 얻어진 최대 건조밀도와 최적 함유비의 결과는 표 3과 같다.

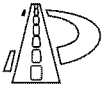
표 3. 다짐 시험결과

구분	최대건조밀도(g/cm ³)	최적 함유비(%)
혼합 시료	2.102	5.90

4.3 배합설계 및 설계 바인더량 결정

배합설계는 국내에서 사용하고 있는 다짐장치 및 배합설계 방법을 고려하여 마샬 다짐장치를 사용하는 남아프리카 공화국의 배합설계 절차를 따랐으며, 그 순서는 다음과 같다.

- ① 아스팔트의 거품 - 최적함수비 결정 (반감기 - 팽창비 관계 결정)
- ② 골재 및 페 아스팔트의 함유비 - 밀도관계 (다짐시험)
- ③ 마샬 공시체 8개 제작 (양면 75회)
- ④ 다짐된 시료의 양생
- ⑤ 밀도 시험
- ⑥ 시료의 수침
- ⑦ 건조 및 수침 간접인장강도 시험
- ⑧ 최적 폼드 아스팔트량 결정
- ⑨ 최적 아스팔트량으로 제작된 시료의 마



살안정도 시험

(국내 아스팔트 혼합물 시방 규격에 합격 여부를 확인)

혼합물 제작은 10kg을 1배치로 하여 바인더량을 0.5%씩 증가시켜 가면서 5개의 배치를 제작하였다. 폼드 아스팔트 플랜트에서 미리 가열시키고 가열이 완료되면 계량된 골재에 물을 가하고 1분 정도 믹서에서 혼합하고, 즉시 제조된 폼드 아스팔트 바인더와 함께 30초 동안 혼합하였다. 마살 다짐장치로 양면 75회 다짐을 실시 시편을 제작하고, 몰드 내에서 60℃의 오븐에서 72시간 동안 양생하였다. 표 4는 남아프리카공화국의 설계기준이다.

표 4. 폼드 아스팔트의 설계기준

구 분	기 준	
	건 조 상 태	습윤상 태
간접인장시험	5~7 kgf/cm ² (500~700 kPa)	3 kgf/cm ² (300 kPa)
M _R (회복탄성계수)시험	30,000kgf/cm ² 이상 (3000 MPa이상)	-
크리프시험	200 kgf/cm ² 이상 (20 MPa이상)	

건조 및 습윤 간접인장강도 시험을 실시해 습윤상태에서 최대인장강도를 보이는 7.5%를 최적 아스팔트 함량으로 결정하였다. 설계 아스팔트 비에는 회수아스팔트비 5.8%가 포함되어 있다.

4.4 물리적시험 및 역학적시험 결과 및 분석

4.4.1 마살 안정도 시험결과

마살 안정도시험은 가열 재생 아스팔트 혼합물과 상온 재생 폼드 아스팔트 혼합물과 비교하기 위하여 반가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물에 대해서 60℃와 25℃에서 각각 시험을 실시하였으며, 시험결과는 표 5 및 표 6과 같다.

표 5. 60℃ 마살 안정도 시험결과

구 분	골재온도 (℃)	마살 안정도(kgf)
반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물	60	425
	70	460
	80	565
	90	654
	100	1266

표 6. 25℃의 마살 안정도 시험결과

구 분	골재온도(℃)	마살 안정도(kgf)
반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물	60	2175
	70	2265
	80	2357
	90	2569
	100	2936

60℃와 25℃에서 실시한 마살 안정도 시험에서 모두 골재의 온도가 증가함에 따라 안정도는 증가하였다.

60℃ 마살안정도

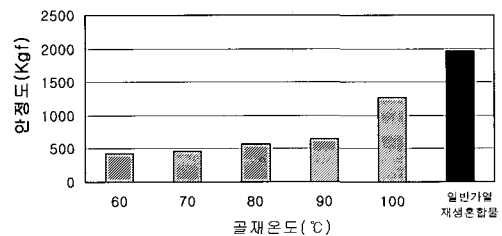


그림 7. 60℃ 마살 안정도 비교

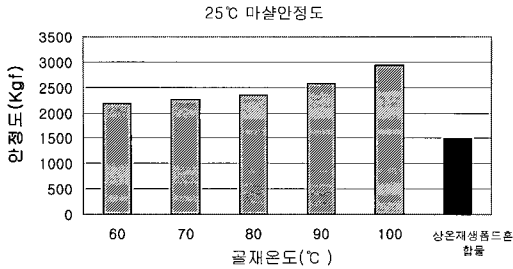
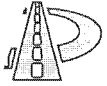


그림 8. 25°C 마살안정도 비교

그림 7과 그림 8은 반 가열 재생 폼드 혼합물과 일반 가열 재생혼합물, 상온 재생 폼드 혼합물의 안정도를 비교한 것이다. 60°C에서 실시한 마살 안정도는 가열 재생 혼합물의 안정도보다 낮은 안정도를 나타냈다. 25°C에서 실시한 마살 안정도는 상온 재생 폼드 아스팔트 혼합물과 비교했을 때, 반 가열한 혼합물의 안정도가 약 2배 이상 향상하였다. 반 가열을 실시함으로써 골재나 아스팔트간의 코팅력과 내부의 바인더 연결로리가 향상되어 안정도가 향상된 것으로 판단된다.

4.4.2 간접인장강도 시험결과

간접인장강도 시험은 25°C에서 실시하였으며, 시험결과는 표 7과 같다.

표 7. 25°C 간접인장강도 시험결과

구 분	골재온도(°C)	간접인장강도 (kgf/cm ²)
반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물	60	5.5
	70	6.8
	80	7.1
	90	8.1
	100	9.9

그림 9는 반 가열 재생 폼드 혼합물과 일반 가열 재생혼합물, 상온재생 폼드 혼합물의 간접인장강도를 비교 한 것이다. 간접인장강도 역시 골재의 가열온도와 일정한 관계가 있는 것으로 나타났다. 반가열 온도가 상승할수록 마살 안정도의 경우와 마찬가지로 간접인장강도는 상승하였으며, 90°C와 100°C에서 제작된 반가열 혼합물은 가열 재생 혼합물의 간접인장강도와 유사하거나 크게 나타났다.

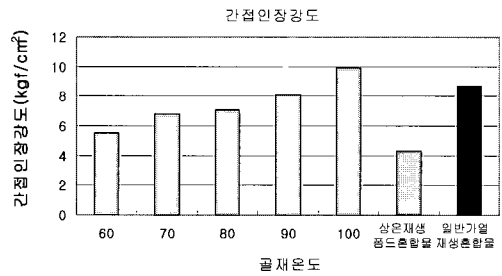


그림 9. 간접인장강도 비교

4.4.3 회복탄성계수 시험결과

회복탄성계수시험은 ASTM D 4123에 따라 시험을 수행하였으며, 시험 결과는 표 8과 같다.

표 8. 회복탄성계수 시험결과 (Mpa)

구 분	골재온도 (°C)	시험온도(°C)		
		5°C	25°C	40°C
반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물	60	6331	852	파괴
	70	8211	2260	454
	80	9099	1895	436
	90	9555	2484	583
	100	12324	2960	574
가열 재생 아스팔트 혼합물	-	12518	2676	1052
상온 폼드 아스팔트 혼합물	-	4004	1445	716

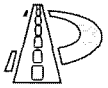


그림 10은 반 가열 재생 폼드 혼합물과 일반 가열 재생혼합물, 상온재생 폼드 혼합물의 회복탄성계수 시험결과를 비교 한 것이다. 회복탄성계수 역시 골재의 가열온도가 상승할수록 높게 나타난다. 특히, 저온(5℃)에서 이러한 현상이 현저하게 나타나고 있는데, 이는 가열 혼합물과 동일한 양상이나 가열 혼합물의 경우 높은 가열온도에 의해서 아스팔트 바인더의 점도가 온도에 의해 크게 영향을 받음으로서 저온에서 회복탄성계수가 크게 나타나고 있다.

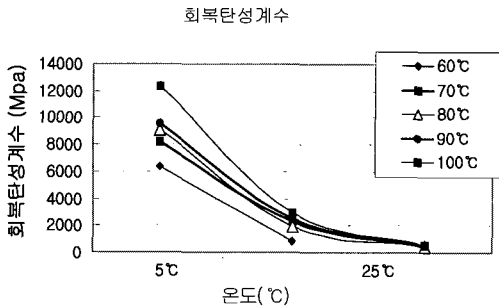


그림 10. 회복탄성계수 비교

4.4.4 크리프 시험결과

그림 11은 반 가열 재생 폼드 혼합물과 일반 가열 재생혼합물, 상온재생 폼드 혼합물의 크리프 시험결과를 비교 한 것이다. 그림 11에서 볼 수 있는 것처럼 80℃ 이하로 가열한 골재를 사용한 재생 폼드 아스팔트 혼합물은 크리프 시험결과 변위가 크게 발생하였으며, 이에 따라 영구 변형량도 크게 나타났고, 60℃로 가열한 골재를 사용한 혼합물은 시험 도중 파괴가 발생하였다.

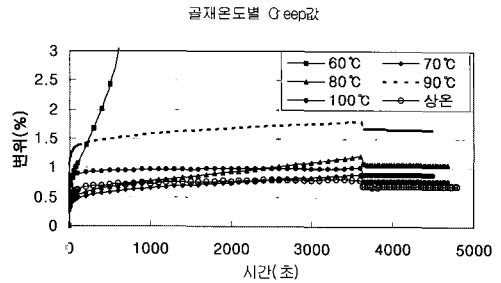


그림 11. 크리프 시험 결과 비교

따라서 골재의 가열온도가 높아질수록 영구 변형량은 증가하는 것으로 나타났다(단, 100℃의 결과는 제외). 가열 혼합물의 경우 바인더와 골재의 가열로 인하여 온도에 의한 영구변형, 즉 소성 변형에 대한 저항성이 폼드 혼합물과 상온 유화 아스팔트에 비하여 낮은 것과 관계가 있다. 폼드 아스팔트의 경우 골재를 100℃ 미만으로 반 가열 함으로써 아스팔트 바인더가 반 가열된 골재에 의해서 온도가 상승하고 이러한 상승으로 인하여 상온에서 제작된 재생 폼드 혼합물에 비하여 소성변형 저항성이 낮아지게 된다. 그러나, 낮아지는 정도는 성능에 영향을 미칠 만큼 크게 저하되는 것은 아니다.

4.4.5 저장성 시험결과

60℃와 90℃로 가열한 골재를 사용하여 제작한 혼합물을 1시간 단위로 실온에서 저장한 후 공시체를 시간별로 제작하여, 공시체의 높이 및 비중을 측정하고 간접인장강도 시험을 수행하였다. 저장성 시험결과는 표 9와 같다.

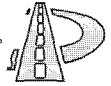


표 9. 저장성 시험결과

골재 온도 (°C)	저장 시간 (시간)	공시체 높이 (mm)	겉보기 비중	간접인장강도 (kgf/cm ²)
60	0	71.05	2.149	5.5
	1	73.71	2.125	2.2
	2	76.01	2.086	1.8
	3	79.42	2.079	1.1
	4	80.80	2.072	1.0
	5	84.03	2.068	0.8
90	0	63.45	2.264	8.1
	1	74.67	2.218	2.1
	2	75.44	2.102	0.9
	3	78.11	2.099	0.9
	4	79.08	2.086	0.8
	5	84.36	2.061	0.5

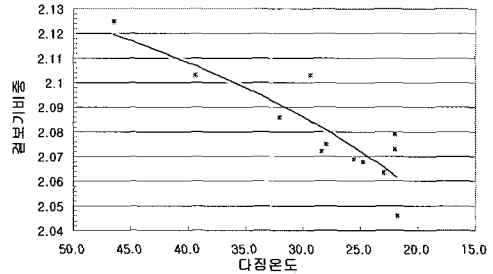


그림 12. 다짐온도에 따른 겉보기 비중의 변화

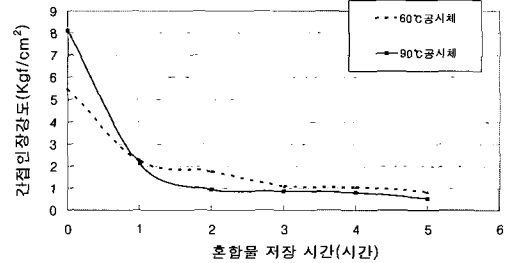


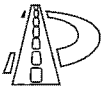
그림 13. 혼합물 저장 시간에 따른 간접인장강도의 변화

그림 12는 다짐온도의 변화에 따른 겉보기비중의 변화를 보인 것이다. 다짐온도가 상승함에 따라 공시체의 다짐이 잘 이루어져 조밀한 상태가 되어 비중이 상승되지만 다짐온도가 저하됨에 따라 비중은 최고 2.12에서 최소 2.05 까지 저하하는 것으로 나타났다.

그림 13은 혼합물의 저장시간과 간접인장강도의 관계를 보인 것이다. 90°C에서 제작된 혼합물은 혼합 즉시 다짐을 실시 할 경우 간접인장강도는 8 kgf/cm² 이상으로 60°C에서 제작된 혼합물에 비하여 약 70%의 향상을 보여주었으나 저장 시간이 경과 할 경우 60°C에서 제작한 시료와 동일한 수준으로 강도 저하 특성을 나타냈다. 1시간 이후의 간접인장강도의 변화는 매우 작은 것으로 나타났다. 일반적으로 가열재생혼합물의 경우 5~7 kgf/cm²의 간접인장강도를 나타내고 있다.

4.4.6 육안 검사에 의한 공시체의 비교

그림 14는 60°C부터 100°C까지 제작된 반가열 재생 폼드 혼합물의 표면상태를 육안관찰 한 후 사진 촬영한 것이다. 그림 14에서 볼 수 있는 것처럼 상온에서 제작된 폼드 혼합물의 경우 아스팔트와 골재의 코팅이 적절하게 이루어지지 않아서 표면에 골재가 보이고 있다. 그러나, 반가열 조건에서 제작된 혼합물은 모두 골재와 아스팔트 간의 코팅이 크게 향상되는 것을 육안으로도 확실하게 구분할 수 있다. 한편, 골재 가열온도가 상승함으로써 골재와 아스팔트의 코팅은 향상되었으나 80°C 이후 온도부터는 온도의 상승이 코팅을 크게 향상시키지 못하는 것으로 관찰되었다.



다.

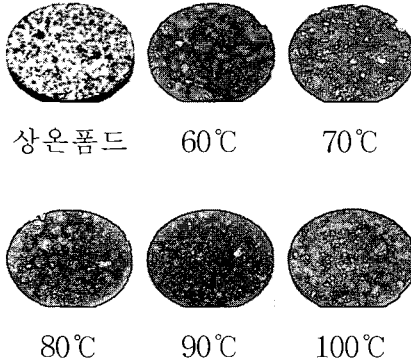


그림 14. 골재 온도 별 공시체

5. 결론

폼드 아스팔트 공법은 환경친화, 에너지 절약, 플랜트의 간소화 등 여러 가지 장점을 가지고 있다는 것이 외국(미국, 유럽, 남아프리카공화국, 호주)에서 수행된 여러 연구에서 증명 되었다.

폼드 아스팔트 혼합물은 상온에서도 제조할 수 있으나, 대도시의 교통량에 저항할 수 있는 혼합물로 제작하기 위해 골재와 아스팔트의 혼합과정에서 에너지의 소모를 최소화하고 혼합물의 성능을 최대로 할 수 있을 것으로 기대되는 반가열 공법을 적용하였다.

본 연구에서는 골재를 반 가열함으로써 기존 폼드 아스팔트 공법을 개선하였다. 개선된 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물은 혼합물의 안정성 및 내구성의 성능이 크게 향상되는 것으로 밝혀졌다. 실내시험으로부터 소성변형 저항성이 우수하고 온도 변화로 인한 회복탄성계수의 변화가 작아서 감온성이 우수함은 물론 폐 아스팔트를 가열 아스팔트에 비하여 많은 량을 재활용 할 수 있다는 장점을 가진 매우 효율적인 공법으로 확인되었다. 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물은

고급도로에 적용이 가능할 것으로 판단되며 본 연구로 도출된 주요 결론 사항은 다음과 같다.

(1) 골재를 반 가열하여 재생 폼드 혼합물을 제작할 경우 혼합물의 외관 및 골재와의 코팅이 현저하게 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 반 가열 재생 폼드 아스팔트 혼합물은 골재의 온도에 비례하여 상온 재생 폼드 아스팔트에 비해 물리적 성질이 크게 개선되는 것으로 나타났다. 물리적인 성질로는 밀도의 증가와 골재 코팅률이 향상되었으며, 마찰 안정도 시험, 간접 인장강도 시험, 크리프 시험, 회복탄성계수 시험에서 모두 향상된 성능을 나타내었다.

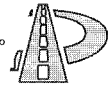
(3) 반 가열의 온도는 60~100°C의 범위가 적당하고 반 가열 온도의 선택은 수분민감성, 저장성 및 경제성을 고려하여 선택하는 것이 바람직하다.

(4) 반 가열 혼합물의 저장성은 상온에서 제작된 혼합물에 비하여 저하되는 것으로 나타났으나 성능은 크게 향상되었다.

(5) 골재의 가열온도가 높아질수록 혼합물의 성능은 향상되나 저장할 수 있는 시간이 1시간 이내로 줄어들어 장시간 저장이 필요한 경우 골재의 가열온도를 조절하여야 한다.

참고문헌

1. 박태순, 김용주, 백성현, 김광우 "환경친화적 페아스팔트 활용공법의 평가-폼드아스팔트공법-" 한국도로포장공학회 학술발표회 논문집, 한국교육문화회관, 1999. 11. pp 219-222
2. 박태순, 김용주 "폼드 아스팔트의 원리 및 아스팔트 바인더의 거품특성에 관한 연구, 대한토목학회, 학술발표회 논문집, 경주 교육문화회관, 1999. 10. PP 219-222
3. 서울산업대학교 건설기술연구소, " 폼드 아스팔트의 실용화



- 연구-재활용을 중심으로-, 도포공 99-2, 1999. 12
4. Bowering, R. H. and Martin C. L., "Foamed Bitumen Production and Application of Mixtures : Evaluation and Performance of Pavements," *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, New Orleans, USA, 1976, pp. 453-477.
 5. Buschkuhi G., Gapski J. and Grundel R., 1990. "Bituminose Tragschichten aus Mullverbrennungssasche und Schaumbitumen" Diplomarbeit, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule Hamburg, Germany
 6. CSIR Transport.: *Foamed Asphalt, Mix Design*. Website. <http://foamasoh.csir.co.za :81/chap4.htm>, 1998
 7. Jenkins, K.J., Groot JLA, Van de Ven MFC, Moleenaar, AAA, "Half-warm Foamed Bitumen Treatment, New Process." *7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*, 1999. 8, pp. 2-65 - 2-73
 8. Lancaster J, McArthur L, Warwick R, 1994. VICROADS experience with foamed bitumen stabilization. *17th ARRB Conference*, Proceedings held in Gold Coast, Queensland, 1994. 8., Vol. 17 Part 3, pp 193-211
 9. Muthen K. M. "Foamed Asphalt Mixes-Mix Design Procedure" Contract Report CR-98/077, SABITA Ltd & CSIR, 1999. 6.
 10. Roberts F. L., Engelbrecht J. C. and Kennedy T. W., "Evaluation of Recycled Mixtures Using Foamed Asphalt," *Transportation Research Record* 968, 1984, pp. 78-85
 11. Tony Lewis, "Foamed Bitumen : Expanding Use Worldwide", Loudon&partners Consulting Engineers South Africa, 1997

(접수 : 2001. 8. 1)