

긴급보수용 개질 유화아스팔트 고비율 순환골재를 사용한 상온 아스팔트 혼합물의 성능 평가

Performance Evaluation of High-RAP Asphalt Mixtures using Rapid-Setting Polymer-Modified Asphalt Emulsion

권봉주	Kwon, Bong Ju	정회원 · (주)오에이티엠엔씨 연구개발 팀장 (E-mail : oatkwon@naver.com)
허재민	Heo, Jae Min	(주)오에이티엠엔씨 연구개발 과장 (E-mail : oatheo@naver.com)
한용진	Han, Yong Jin	경희대학교 공과대학 도로연구실 박사과정 (E-mail : rome@khu.ac.kr)
이석근	Rhee, Suk Keun	정회원 · 경희대학교 공과대학 사회기반시스템공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this study was to evaluate the performance of rapid-setting polymer-modified asphalt mixtures with a high reclaimed asphalt pavement (RAP) content.

METHODS : A literature review revealed that emulsified asphalt is actively used for cold-recycled pavement. First, two types of rapid-setting polymer-modified asphalt emulsion were prepared for application to high-RAP material with no virgin material content. The quick-setting polymer-modified asphalt mixtures using two types of rapid-setting polymer-modified asphalt emulsion were subjected to the following tests: 1) Marshall stability test, 2) water immersion stability test and 3) indirect tensile strength ratio test.

RESULTS AND CONCLUSIONS : Additional re-calibration of the RAP was needed for laboratory verification because the results of analyzing RAP aggregates, which were collected from different job sites, did not deviate from the normal range. The Marshall stability of each type of binder under dry conditions was good. However, the Type B mixtures with bio-additives performed better in the water immersion stability test. Moreover, the overall results of the indirect tensile strength test of RAP mixtures with Type B emulsions exceeded 0.7. Further research, consisting of lab testing and on-site application, will be performed to verify the possibility of using RAP for minimizing the closing of roadways.

Keywords

reclaimed asphalt pavement (RAP), cold recycling, asphalt emulsion, Marshall stability, indirect tensile strength ratio

Corresponding Author : Rhee, Suk Keun, Professor
Department of Civil and Environmental Engineering,
Kyunghee University, Global Campus, 1732, Deogyong-daero,
Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 446-701, Korea
Tel : +82.31.201.2900 Fax : +82.31.202.8854
E-mail : skrhee@khu.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Mar. 3, 2015 Revised Mar. 4, 2015 Accepted Mar. 17, 2015

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

온실가스는 지구온난화의 주범으로 급격한 환경변화로 인해 인류에게 많은 피해를 안겨주고 있으며 교토의

정서 가입국들은 탄소배출권을 통하여 온실가스의 대부분을 차지하는 이산화탄소의 배출 제한을 통하여 환경 보호에 도움이 되고자 하고 있다. 이에 따른 시대적 흐름에 맞추어 도로포장 분야에서도 지속 가능한 친환경적인 도로포장 기술의 개발이 요구되고 있다.

현재, 우리나라는 교통량의 증가(특히 중차량의 증가) 및 이상기후에 의해 도로포장은 설계수명에 이르지 못하고 조기에 유지보수가 진행되는 경우가 빈번하게 발생하고 있다. 이와 같은 도로포장의 유지보수에서 발생하는 순환골재는 주요 건설폐기물로서 그 활용방안에 대해 사회문제로 이슈화되고 있다. 현재 도로포장의 유지보수공사에서 발생하는 순환골재는 약 11%만이 다시 도로포장에서 재활용되어 귀중한 건설재료의 손실이 발생하고 있으며 환경적 문제까지 야기하는 실정이다. 이에 순환골재를 사용한 아스팔트 포장의 재활용은 이산화탄소 저감을 통한 환경보호와 효율적인 자원 재활용의 두 가지 측면을 만족시키는 훌륭한 대안으로 제시되고 있다.

상온 유화아스팔트는 일반적인 아스팔트에 비하여 재료의 가열이 필요하지 않기 때문에 이산화탄소를 비롯한 각종 유해 가스 배출을 억제할 수 있고 소요되는 유류비 절감에 따른 경제적 효과도 기대할 수 있다.

현재 국내에서 활용되고 있는 상온 재생 아스팔트 공법의 경우 환경친화적이며 경제적으로 유리한 공법이지만 상온 재생 아스팔트 혼합물의 낮은 내구성 문제로 인하여 시공 후 파손 및 품질불량이 발생하여 국내 활성화에 어려운 실정이다.

본 연구에서는 100% 순환골재에 상온 유화아스팔트를 적용한 긴급보수재료를 개발하기 위해 기존 긴급 상온 보수재료의 문제점인 내구성 강화를 위해 새로운 긴급보수용 개질 유화아스팔트를 고비율(100%) 순환골재에 적용하여 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 성능을 평가 및 분석하는데 목적이 있다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

일반적으로 100% 순환골재에 상온 유화아스팔트를 적용하여 도로포장의 보수재료로 사용한 연구사례는 많지 않아 국내외 긴급보수 및 순환골재 활용과 관련된 문헌조사 및 응급보수재료와 관련된 문헌조사를 통해 기존의 순환골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 품질평가 방법과 순환골재의 적용사례 및 유화아스팔트를 활용한 응급보수방법에 대한 내용과 특성에 대해 정리하였다.

또한, 다양한 시공현장에서 수집한 아스팔트 순환골재에 대한 입도분석 및 실내시험에서 아스팔트 순환골재와 혼합하여 사용할 두 가지 종류의 상온 개질 유화아스팔트를 제조하였다.

제조한 개질 유화아스팔트의 특성을 평가하기 위해 현장에서 수집한 100% 순환골재와 일반골재를 대상으

로 두 가지 타입의 상온 개질 유화아스팔트와 혼합하여 마찰안정도, 수침잔류안정도, 간접인장강도비를 측정하여 100% 순환골재에 적용한 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 성능을 평가하였다.

2. 기존 연구 및 문헌 고찰

2.1. 국내연구

홍인권 외 3명(2014)은 KS F 2572의 기준을 만족하는 아스팔트용 순환골재를 회수하여 신규골재와 45%:55%의 비율로 혼합한 후 1.0~5.0wt%의 유화아스팔트 및 유화 첨가제와 혼합하여 GR F 4026(2010)의 기준을 만족하는 기층용 재활용 아스팔트 혼합물을 제조하였다. 함수량, 유화아스팔트함량, 유화 재생첨가제 함량 그리고 시간 경과에 따른 각각의 마찰안정도와 흐름치를 측정하였고 각각의 최적 함량 및 최적 혼합비율을 설계하였다.

김진철 외 4명(2014)은 포트홀의 보수재료를 프리캐스트 형식으로 접근하였다. 프리캐스트 재료는 4가지 재료 타입으로 나누었는데 SMA, PMA, Guss asphalt 그리고 폴리우레탄 계열의 Cold-mix Reaction Asphalt를 마찰안정도시험과 동적안정도시험을 통하여 보수재료의 성능을 비교하였다. 또한 접착제를 포함한 현장 적용성 검토를 시간의 경과에 따라 비교하였다. 물리적 성능면에서 Guss asphalt를 제외한 나머지 재료가 높은 값을 나타내고, 반응형 상온 아스팔트가 다른 재료에 비해 양생시간이 적어 보수재로 적합하다는 결론을 내렸다.

심재필 외 3명(2012)은 현재 국내외에서 사용 중인 상온 응급보수재 4가지를 선정하여 마찰안정도, 휠트랙킹 시험, 수평전단강도시험 그리고 현장시험시공을 시행하여 각 재료의 성능을 평가하였다. 응급보수재료로써 1개월 이상의 공용성능을 만족하지 못하였다.

김용주 외 2명(2007)은 미국 내 7개소의 순환골재를 선정하여 바인더를 추출한 입도, 추출된 바인더 함량, 입도분석, 침입도분석, DSR시험, 편장석률 분석을 진행하였다. 최적함수량과 최적 폼드 아스팔트 함량을 구하기 위한 간접인장강도시험과 라벨링시험을 진행하였다. 그리고 양생조건을 달리하여 성능평가를 비교·분석하였다. 기존 바인더 함량이 간접인장강도에 큰 영향을 미치지 않는다고, 라벨링시험은 양생시간과 폼드 아스팔트 함량에 영향을 많이 받았다는 결과를 도출하였다.

박지용 외 3명(2012)은 긴급 보수용 상온 아스팔트 혼합물의 기본 특성을 분석하였다. 이 연구에서 사용된 상온 아스팔트는 컷백 아스팔트로써 조기강도 발현을 위해 폴리올 우레탄수지(PU)를 사용하였다. 역학시험은 마샬안정도시험과 간접인장강도시험을 진행하였다. PU함량에 따른 변수와 PU를 넣는 시기별로 Pre-mix와 Onsite-mix로 나눈 변수에 따라 진행하였고 수침 잔류안정도시험도 같이 진행하였다. 모든 결과가 기준을 만족하였고 Pre-mix방법으로 제작된 시험에서 보다 우수한 측정값이 도출되었다.

2.2. 해외연구

Lillbroanda 외 2인(1999)은 스웨덴에서 솔벤트를 함유하지 않고 침입도가 낮은 아스팔트 바인더로 제조한 유화아스팔트를 개발하여 상온 순환골재 재생포장연구를 진행하였다. 기존의 연구들에서는 침입도가 높고 연화점이 낮은 유화아스팔트를 주로 사용해 내구성이 낮은 문제가 있었다. 이 연구에서는 침입도가 낮은 바인더를 활용해 재활용 유화아스팔트 제조와 더불어 현장 혼합방법을 개선하여 혼합물의 내구성을 증가시켰다. 실내 및 현장 시험시공을 적용하여 상온 재생 아스팔트 적용 시 3가지 종류의 유화아스팔트를 분석하여 유화아스팔트 함량에 따른 강도계수와 간접인장강도를 실내시험을 통하여 측정하였다. 또한, 2가지 유화아스팔트에 대해서는 현장 시험시공을 통한 도로 공용성능을 모니터링한 후 코어링을 통하여 휠트래킹 시험도 진행하였다. 각각의 결과물은 스웨덴 국가 도로부의 기준을 만족하였다.

Hillgren 외 2인(1998)은 순환골재의 입도를 단계별로 구분하는 것을 제안하였다. 또한, 작업성, 점착성능, 압축성능, 공극률 결정, 반복축하중시험, 간접인장강도 시험을 진행하였다. 특히 ISSA(International Slurry Surfacing Association)에서 Surface Treatment의 교통개방시간의 측정을 위한 점착력시험(Cohesion Test)을 응용하여 순환골재 혼합물의 점착력을 측정하여 교통개방에 필요한 최소기준을 추정하였다.

Valentin 외 6인(2014)은 유화아스팔트와 폼드 아스팔트를 혼합하여 2종류의 혼합물을 배합설계 하였다. 공시체 제작에 따른 변수는 6가지 방식의 선회다짐, 1가지 마샬다짐, 1가지 Static Compaction과 같이 총 8종류의 다짐을 시행하였는데 선회다짐은 다짐횟수와 다짐강도별로 그 변수를 지정하였다. 또한, 7일, 14일로 양생기간을 달리 하여 각각의 변수에 따른 간접인장강

도를 측정하였다. 이 연구는 유럽 여러 나라의 상이한 시험조건, 특히 다짐방법에 따른 차이를 조사·분석하고 이를 통용할 수 있는 배합설계 기준을 제시하기 위해 기초시험으로써 진행되었다.

Alan(2014)은 북미 상온 아스팔트 배합설계에 대해 전통적인 방법 소개와 신규 개발될 방법들을 분석하였고, 현재로는 ASTM이나 AASHTO에서 정확한 기준이 없는 상황이라고 결론지었다. 전통적인 방법은 Dense Mixes, Open Graded Mixes이 있으며 신규 개발될 방법들은 선회다짐, 점착력 시험 등에 의해 규정될 것이라 분석하였다.

Dong 외 2인(2013)은 겨울철 포트홀 보수재료를 현장 및 실내시험을 통해 평가하였다. 현장 시험은 포트홀을 패칭한 후 시간 경과에 따른 변화를 분석하였고 패칭 성능의 영향을 미치는 인자들을 선정하여 각각의 인자들이 성능에 미치는 양상에 대하여 조사하였다. 현장 시험을 바탕으로 실제 현장에서 발생하는 문제점들과 상관관계에 있는 실내시험들을 진행하였다. 특히, 점착력 시험에서는 Rolling sieve test가 활용되어 진행되었다. 이 시험은 마샬다짐으로 만들어진 공시체를 sieve에 넣은 후 일정 거리를 앞뒤로 20회 굴려서 재료의 탈락률을 측정하여 혼합물의 점착성능을 분석하는 시험으로 간단하게 진행할 수 있다. 이와 같이 3개의 상온 혼합물과 3개의 HMA 총 6가지 혼합물의 점착력, 점착력, 수분민감성을 측정하고 휠트래킹시험을 통하여 각각의 보수재료의 성능을 평가하였고, 전반적으로 HMA의 성능이 비교적 높게 측정되는 결과를 도출하였다.

Nicholls 외 8인(2014)은 유럽 국가들에서 전반적으로 나타나고 있는 포트홀을 보수하기 위해 내구성 있는 포트홀 보수를 위한 연구를 하였다. CMA, HMA, cement-based, synthetic binder 4종류의 변수를 지정하여 시험을 진행하였는데 현장 시험을 통해 실제 공용성능을 분석하였고, 실내시험으로는 변수에 상응하는 혼합물을 제작하여 간접인장강도시험을 통하여 성능을 비교·분석하였다.

Hugener 외 3인(2014)은 100% RAP와 식물성 오일 기반의 재생제(Rejuvenator)를 활용한 상온 현장 재생 아스팔트를 분석하였다. 다짐 방법으로는 선회다짐을 적용하여 상온 양생하였고, Uniaxial Compression Test(UCT)를 사용하여 파라미터는 함수량과 재생제의 함량으로 flux oil, vegetable oil, Rapeseed oil, linseed oil과의 조합으로 혼합물을 만들어 역학시험을 진행하였다. 현장에서 5가지 종류의 샘플을 추출하여

MMLS3 시험을 통하여 소성변형 저항성을 측정하였다. 상온 재생 아스팔트의 활용에서 식물성 오일 기반의 재생제는 좋은 대안이 될 수 있고, UCT 이외의 다른 동적시험도 진행되어야 하며 또한 물에 대한 반응은 HMA와 상이하므로 추가적인 시험이 필요하고, 버려지는 식물성 기반 오일이 재사용될 경우 경제성 또한 좋아질 것이라고 결론지었다.

Dong 외 2인(2014)은 포트홀 보수재료의 장기 경제적 유효성에 대해 연구하였다. 시공방법에 따라 경제성과 공용성에 대해 분석하였는데 throw-and-roll과 semi-permanent의 차이를 비교·분석하였고 HMA+cut squares, tack coat, heater 조합을 통하여 변수를 설정하여 현장 시험을 2가지 방법으로 진행하였는데 보수 후 기간별 손상을 측정하여 평가하였다. 공용성의 성능 영향 인자는 재료, 길이, 폭, 깊이, 차량속도, 시간 등이 있고 각 재료조합과 시공방법을 조합하여 14개월간 비교·분석하여 최종적인 공용성능과 경제성을 분석하였다.

Jian 외 3인(2010)은 마이크로서피싱 혼합물을 통하여 상온 유화아스팔트의 유화제 타입과 골재입도에 따른 공용성을 평가하였다. 5종류의 유화제와 4종류의 첨가제 그리고 4종류의 골재입도를 조합하여 5종류의 혼합물을 최종 선정하여 시험을 진행하였다. 소성변형의 영향 인자는 유화아스팔트 타입 및 함량, 첨가제 종류, 다짐방법으로 결론지었다. 특히 첨가제는 소성변형에 주요한 영향을 미치므로 신중히 선정되어야 하며, 대부분의 혼합물의 소성변형 저항성이 가열아스팔트 혼합물과 비슷한 수준으로 우수하게 측정되었다.

Karlsruhe Institute of Technology에서는 포트홀에 대하여 유럽 전반에 걸쳐 현존하는 기준, 기술, 재료 그리고 경험에 대하여 구체적으로 분석하였다. 재료별로는 주로 CMA, HMA, cement-based materials로 분류하였고, 보수방법별로는 크게 임시, 반영구, 영구보수로 분류하였다. 유럽과 유럽 외 지역에서 현재의 기술 및 경험을 비교·분석하였고 재료의 특성을 면밀히 분석하였으며 보수방법은 Throw-and-go, Throw-and-roll, Semi-permanent repair, Edge seal, Spray injection patching 등 적용과정별로 상세히 분석하였으며 계절에 따른 방법을 구분하였다. 또한, 추가적으로 고내구성, 고품질 재료의 적용방법도 평가·분석하였으며 경제성 분석도 함께 진행하였다.

2.3. 순환골재의 활용

순환골재의 활용방법은 크게 2가지 기준에 따라 분류

가 가능하다. 재생 온도 방법에 따라 가열재생과 상온재생으로 나눌 수 있으며, 생산방식에 따라 현장재생과 플랜트재생으로 분류할 수 있다. Table 1에서와 같이 각각에 활용 방법별로 장단점을 비교할 수 있다. 본 연구에서 현장 상온 재생을 목표로 연구를 진행하고 있다.

Table 1. RAP Utilization Method

Recycling method	Advantage	Disadvantage
Hot in plant recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for large scale job • Quality control 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficult for small scale job
Hot in place recycling	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for large scale • Application time reduction • Controllable for the temperature of mixture 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficult to manage the quality
Cold recycling	<ul style="list-style-type: none"> • No aging for the aggregate (Cold application) • Environmental friendly • Low price • Simple manufacture System • Lower initial cost then hot recycling • Usable for wet aggregate 	<ul style="list-style-type: none"> • Low traffic applicaiton • Lower performance then Hot recycling • Low workability on low temperature

2.4. 보수재료의 활용

보수재료는 가열 아스팔트 혼합물과 상온 유화아스팔트 혼합물로 나눌 수 있으며 그 중에서 긴급 유지보수용으로 사용되는 보수재료는 상온상태에서 사용이 가능한 상온 유화아스팔트 및 컷백 아스팔트가 대부분을 차지하고 있다. 이에 대하여 Table 2에서와 같이 제작 및 혼합방법에 따라 분류를 하였다.

Table 2. Repair Meterial by Producing Method

Producing method	Description
Cold pre-mixed asphalt mixture	<ul style="list-style-type: none"> • Plant mixing cold asphalt concrete • Patch type cold asphalt concrete • Cutback asphalt concrete (Rapid, Medium, Slow setting) • Emulsified asphalt concrete (Rapid, Medium, Slow setting)
Hot pre-mixed asphalt mixture	<ul style="list-style-type: none"> • Plant mixing hot mixed asphalt concrete • Heating up the mixture, then use in it small job site
Hot in-place asphalt mixture	<ul style="list-style-type: none"> • In situ hot mix asphalt • Calibrate the mixing ratio, then heating and mixing • Mainly, applied in joint system on the bridgedeck

현재 사용 중인 보수재료들은 Table 3에서의 보수공

법으로 분류하여 사용되고 있다. 보수공법은 대표적인 공법을 몇 가지 정리하여 나타내었다. 각각의 공법은 성능과 경제성 그리고 편의성 등에 초점을 맞추어 평가되었고, 상황에 맞게 사용되고 있다.

Table 3. Repair Method

Repair method	Description
Trow-and-roll	<ul style="list-style-type: none"> • Temporary repair • No previous [reparation • Truck tyres compaction
Semi-permanent method	<ul style="list-style-type: none"> • Increases performance, Raises cost • Preparation necessary • Forming until vertical reasonable pavement
Spray injection method	<ul style="list-style-type: none"> • No compaction • Blow water and debris • Any weather • Spray tack coat binder • Cover layer of aggregate
Edge seal	<ul style="list-style-type: none"> • Require second pass area • Truck tyres compaction

본 연구에서는 유화아스팔트 재료를 활용하여 현장에 순환골재를 상온 재생혼합하여 반영구적인 긴급보수가 가능한 재료를 개발하고 배합설계 및 성능평가를 진행하고자 한다.

3. 입도분석

3.1. 아스팔트 순환골재의 입도분석

긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 성능평가 시험을 위해 실내시험에서 사용할 순환골재의 입도에 대한 특성을 분석하였다. 실제 아스팔트 포장의 보수공사 및 재포장이 진행 중인 서울시내의 6개 포장공사현장 (내부순환로, 노량대교, 두모교, 동작대교, 서소문고가, 아차산교)에서 대형 절삭장비를 사용하여 파쇄된 아스팔트 순환골재를 수집하였다. 수집한 아스팔트 순환골재의 입도분석 결과는 Fig.1과 같이 도로공사 시방서의 13mm 밀입도 기준과 함께 비교하였다. 현장에서 절삭된 아스팔트 순환골재의 현장 파쇄입도는 도로공사 13mm 밀입도 기준의 상한선과 하한선을 벗어나는 경우가 나타났으며, 입도분포 또한 매우 불규칙한 결과를 나타내었다. 따라서 현장에서 수집한 절삭된 아스팔트 순환골재는 입도조정 후 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물에 사용하였다.

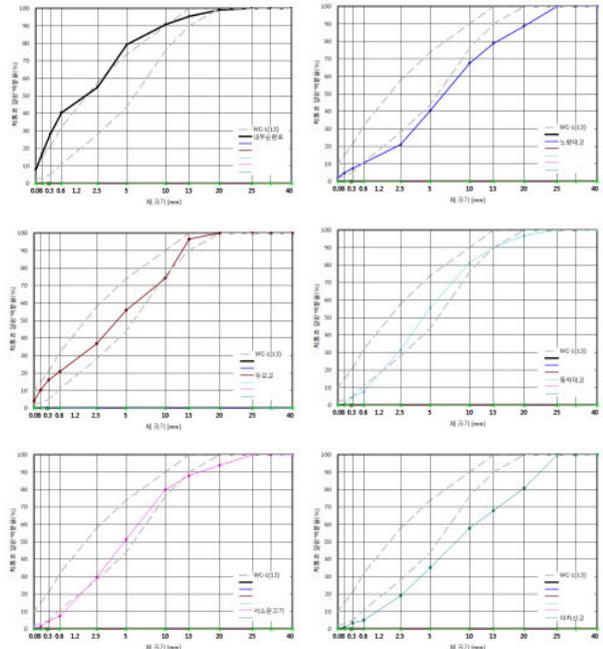


Fig. 1 RAP Aggregate Analysis from 6 Sites

3.2. 입도조정

6개소의 아스팔트 포장공사에서 수집한 아스팔트 순환골재의 입도를 분석한 결과는 현장에 아스팔트 순환골재를 상이한 입도분포를 나타내어 실제 아스팔트 순환골재를 사용한 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 생산 및 성능을 평가할 경우, 입도분포에 따른 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 변동을 최소화하기 위해 도

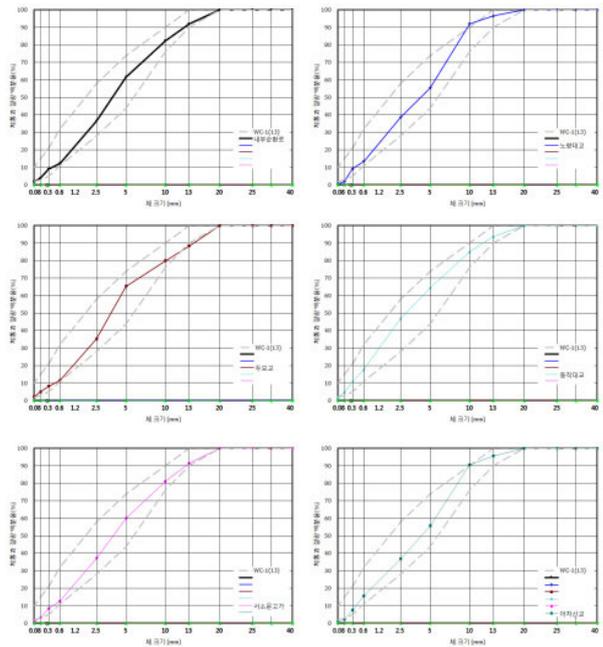


Fig. 2 RAP Aggregate Sieve Curve after Adjustment from 6 Sites

로공사 13mm 밀입도 기준을 참고하여 4.75mm체를 사용하여 아스팔트 순환골재를 2종류로 분류하였다. 분리된 순환골재는 4.75mm 이상을 40%, 4.75mm 이하를 60%로 구성하는 아스팔트 순환골재로 입도를 조정하였다. Fig.2는 입도조정을 거친 6개 현장의 입도곡선이 도로공사에서 제시하고 있는 13mm 밀입도 아스팔트 혼합물의 상한 및 하한기준을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 긴급보수용 개질 유화아스팔트

4.1. 재료특성

유화아스팔트는 1900년대 초부터 사용하기 시작하여 화학기술의 발전과 더불어 그 성능이 개량되어 다양한 공법이 현장에 적용되고 있다. 유화아스팔트는 이온 전하에 의하여 음이온계, 양이온계 및 비이온계로 구분되며 세팅시간에 따라 RS(Rapid Set), MS(Medium Set), SS(Slow Set), QS(Quick Set)으로 분류된다. RS 유화아스팔트의 경우 상태가 불안정하여 골재 등과 혼합하여 사용하기는 어렵지만 양생이 빠르다는 장점이 있다.

본 연구에서는 잔골재 특히, 아스팔트 순환골재를 CSS-1h, CQS-1h계의 긴급보수용 유화 개질아스팔트로 제조하고 사용하는 아스팔트의 개질제, 유화제 등의 첨가제를 배합설계를 통해 아스팔트 순환골재와의 점착력 및 접착력이 개선되고 빠른 양생이 가능한 새로운 긴급보수용 유화아스팔트 개발에 중점을 두었다.

4.2. 긴급보수용 유화아스팔트 제조

본 연구에서 진행하고 있는 Type A, Type B의 긴급보수용 유화아스팔트 개발에는 국내에서 공급하는 PG 64-22 아스팔트를 사용했다. Type A 유화아스팔트 제조 시 점착력을 향상시키기 위해 천연 라텍스를 첨가하였고 Type B 유화아스팔트 제조과정에서 유화단계를 진행하기 전에 아스팔트에 식물성 반응첨가제를 혼합하였다. Type A와 Type B의 유화아스팔트 제조 정보는 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Asphalt Emulsion Information

Name	Binder type	Emulsifier		Ph	Description
		Type	Dosage, %		
Type-A	PG 64-22 (SK) 60%	CSS	1.3	2	Cement, Latex
Type-B	PG 64-22 (SK) Modified 60%	CQS	1.1	2	Bio

5. 역학시험

5.1. 배합설계

두 종류의 긴급보수용 개질 유화아스팔트(Type A, Type B)를 사용하여 아스팔트 순환골재에 함유되어 있는 잔류 아스팔트 함량을 고려하여 유화아스팔트 함량을 각각 3%, 4%, 5%로 하여 배합설계를 실시하였다. 또한, Type A 아스팔트는 첨가제 함량을 1.0%로 고정하였고 Type B 아스팔트는 첨가제 함량을 각각 1%, 1.5%, 2%로 변경하였다. Table 5와 같이 총 6종류에 대해 각각 3개씩의 공시체를 제작하여 총 18개의 마샬 공시체를 제작하였다.

Table 5. Dosage of Binders and Additives for Mix Design

Mixture	Binder type	Dosage of binder, %	Dosage of additive, %
A-1	Type A	3	1
A-2		4	1
A-3		5	1
B-1	Type B	3	1
B-2		4	1.5
B-3		5	2

순환골재의 입도는 6종류에 대하여 동일한 조건으로 적용하였다. 입도조정을 통하여 얻게 된 4.75mm 이상 크기의 순환골재를 40%, 4.75mm 이하 크기의 골재를 60%로 설계입도를 선정하였다.

5.2. 마샬안정도시험 및 수침 잔류 안정도

본 연구는 재활용 상온 아스팔트콘크리트 혼합물 시험인 KS I 3022(2014)의 규정에 따라 마샬다짐으로 Fig. 3에서와 같이 101.6mm의 지름과 63mm 전후의 두께를 가진 재활용 상온 아스팔트 혼합물 공시체를 제작하였는데, 다짐방법으로는 양면 75회 다짐 후 48시간 60℃의 오븐에서 양생하였다. 오븐 양생 후 2~3시간 방치 후 탈형하였고 탈형된 공시체는 25℃의 공기욕조에 2시간 동안 유지하였다.

마샬안정도시험은 2개의 반원형 재하 헤드를 통하여 원통형 공시체에 분당 50mm의 변형 비율로 압축하중을 가하여 공시체가 파괴될 때까지 이루어지며, 이를 통해 마샬안정도를 측정하였다. 시험에서 측정된 물성 중에서 마샬안정도는 공시체가 파괴될 때까지 가해진 하중으로 공시체가 견딜 수 있는 최대하중을 나타낸다. 또한 흐름치는 최대하중에 이를 때까지 공시체의 총 수직

변위를 의미하는 것으로, 하중이 가해지는 시작점부터 시료가 파괴될 때까지의 총 수직변위를 나타낸다. 재활용 상온 아스팔트콘크리트 혼합물(KS I 3022)의 품질 규정은 밀입도 아스팔트 콘크리트의 경우 Table 6-1과 같다. 또한, 본 연구에서는 혼합물의 주 활용 형태가 긴급보수용으로 적용하므로 도로 보수용 상온 역청 혼합물의 기준(KS F 2369)도 동시에 검토하였다.



Fig. 3 RAP Molds for Marshall and IDT Tests

Table 6-1. Specification of Recycled Cold Mixed Asphalt

Test Items	Standard Value
Marshall stability (25°C), N	over 5,000
Flow, 1/10mm	20~50
Air void ratio, %	3~10
VFA, %	60~85
Indirect tensile strength (25°C), MPa	over 0.15
Retained indirect tensile strength ratio (TSR)	0.75

Table 6-2. Specification of Cold Mixed Asphalt for Repair

Test Items	Standard Value
Marshall stability (25°C), N	over 2,500
Flow, 1/10mm	20~40
Air void ratio, %	3~15
Water-immersion stability, %	over 75

각 규정의 기준치를 비교하여 보다 상위의 값을 목표로 설정하고 시험을 진행하였다. 먼저, KS I 3022에 규정된 재활용 상온 아스팔트콘크리트 혼합물의 마찰안정도 기준은 밀입도의 경우 5,000N이다. 이는 KS F 2369의 기준인 2,500N보다 높은 수치이므로 KS I 3022를 목표로 하였다. 마찬가지로, 시료가 파괴될 때의 수직변위인 흐름치는 ASSHTO 및 한국산업표준 KS F 2349의 배합설계 기준이 20~40로 비교적 좁은 범위를 가지므로 이 규정을 목표로 설정하였다.

수침잔류 안정도는 보수재료의 적용 특성상 수분이 많은 곳에서도 수분저항성을 갖추어야하기 때문에 반드시 필요한 시험이다. 따라서 KS F 2369의 기준을 적용하여, 공시체 제작 후 물속에서 48시간 수침 시킨 후 건조상태에서와 같은 방법으로 마찰안정도시험을 진행하는 것으로 결정하였다. 건조상태에서의 마찰안정도과 비교하여 값이 75% 이상을 만족하여야 한다.

5.3. 잔류인장강도비

TSR(Tensile Strength Ratio, 인장강도비)시험은 Kandhal에 의해 개발되었으며, 1985년에 AASHTO에서 표준 시험법으로 채택되었다. 이 시험방법은 Lottman의 방법(NCHRP 246)과 Tunncliffe와 Root 방법(NCHRP 274)의 장점을 모은 것으로 물로 진공포화(55~80% 수준으로 포화)한 후 Lottman이 제안한 1회 동결과 1회 용해를 거친다. 모든 공시체는 51mm/분(2인치/분)의 하중 속도로 25°C에서 간접인장강도를 측정하여 TSR을 결정한다. AASHTO T-283 수정된 Lottman의 아스팔트 혼합물 수분처리방법은 5~10분 동안 13~67kPa의 기압에 해당하는 진공수준으로 수침한 후 진공상태를 제거하고 다시 5~10분 동안 수침시킨다. 혼합물을 플라스틱 백에 넣고 -18±3°C의 저온 챔버에 최소 16시간동안 거치시킨 다음 꺼낸 시료를 60±1°C의 수조에 24±1시간동안 거치시킨다. 실험을 하기 전에 다시 25±0.5°C의 수조에 24±1시간동안 거치한 후 간접인장강도 실험을 수행한다. TSR은 보통 0.7 이상이면 수분에 영향을 받지 않는 혼합물로 규정한다.

$$TSR = \frac{\text{(수분처리를 거친 시편의 인장강도)}}{\text{(기준 시편의 인장강도)}}$$

간접인장강도시험은 1953년에 Akazawa에 의해 시멘트 콘크리트의 인장강도를 측정하기 위한 시험으로 처음 소개되었고, Messina와 Breen이 아스팔트 혼합물의 시험에 적용하였다. 이후 1965년에 Hadley 등에 의하여 시험방법이 정립되었다. 간접인장강도시험은 Fig. 4와 같이 수직인 직경면을 따라 평행하게 작용하는 정적 압축하중이나 반복 압축하중을 원통형 공시체에 재하시키는 방법으로 수행된다.

간접인장강도시험은 아스팔트 혼합물을 특성화하는데 있어서 유용한 두 가지의 특성을 제공한다.

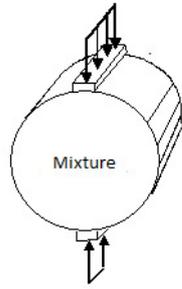


Fig. 4 Loading for Indirect Tensile Strength Test

첫 번째 특성은 인장강도인데 일반적으로 높은 인장강도 값은 보통 좋은 공용성이 기대되는 반면, 낮은 인장강도 값은 대개 나쁜 공용성이 예상된다. 또한, 인장강도는 아스팔트 혼합물의 균열발생 가능성을 평가하는데에도 사용된다.

두 번째 특성은 파괴 시의 인장변형률이다. 이것은 균열발생 가능성을 예측하는데 유용하게 사용된다. 즉, 파괴에 앞서 높은 변형률에 견딜 수 있는 혼합물은 그렇지 못한 혼합물보다 균열에 대한 저항성이 더 크다는 것을 의미한다.

그러나 본 연구는 순환골재를 재활용한 상온 아스팔트 혼합물에 관한 연구이므로 인장강도비에 관한 구체적인 혼합물의 품질시험은 위의 가열 아스팔트 혼합물의 인장강도비와는 약간의 차이가 있다. KS I 3022의 기준을 적용하여 잔류인장강도비 시험을 진행하였다. 또한, 기준치가 0.75 이상일 경우 수분 저항성능이 우수하다고 판단할 수 있다.

6. 시험결과 및 분석

6.1. 마샬안정도 시험결과 및 분석

마샬안정도의 시험결과는 Table 7과 같이 모두 6가지 혼합물이 기준 값인 5,000N을 상회하는 값으로 만족하고 있다.

Table 7. Result of Marshall Stability Test

Mixture	Marshall stability, N	VFA, %	Air void ratio, %
A-1	20,467	64	5.2
A-2	39,860	65	5
A-3	27,412	75	4.3
B-1	32,513	61	6.1
B-2	31,947	74	4.2
B-3	16,190	80	3.4

6.2. 수침잔류안정도 분석

수침잔류안정도의 시험결과는 Table 8과 같이 Type A의 경우 혼합물 대부분이 기준 값인 75%를 만족하지 못하였지만, Type B의 경우 바인더 함량이 4%가 넘어가면서 기준 값을 만족시켰다. Fig 5에서 더 명확하게 확인할 수 가 있다.

Table 8. Result of Water-immersion Stability Test

Mixture	Water-immersion stability, %
A-1	49
A-2	24
A-3	28
B-1	69
B-2	75
B-3	123

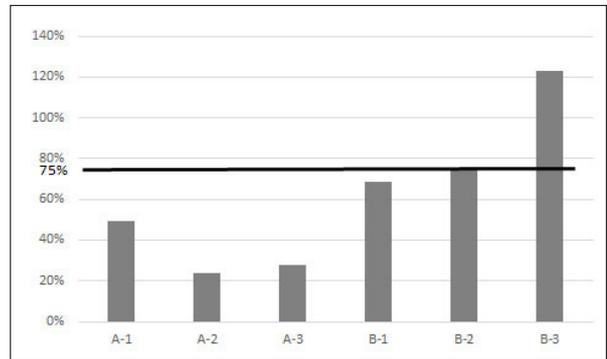


Fig. 5 Result of Water-immersion Stability Test (Graph)

6.3. 잔류인장강도비 분석

잔류인장강도비(TSR:Retained Indirect Tensile Strength Ratio)를 도출하기 위해 건조상태와 수침상태에서의 간접인장강도를 측정하였다. 건조상태에서의 간접인장강도는 기준치를 상회하는 값을 나타내며 공용성능이 우수하다는 결론을 도출할 수 있었으며, 균열에 대한 저항 또한 우수함을 알 수 있었다. 수침 후 간접인장강도시험을 통한 최종적인 잔류인장강도비를 함께 Table 9에 나타내었다.

Fig. 6에서와 같이 바인더 타입에 따라 잔류인장강도비가 다르게 나타남을 쉽게 확인할 수 있다. 수침잔류안정도와 마찬가지로 Type A 바인더의 경우 대부분의 혼합물이 기준치 이하의 값을 나타내며 수침상태에서의 성능이 상대적으로 부족함을 보였다. 하지만 Type B 바인더의 경우는 모든 혼합물이 기준치 이상의 값을 보여 수침상태에서도 우수한 성능을 나타내었다. 또한, 잔

류인장강도비가 1을 상회하는 값을 나타내며 건조상태에서보다 수침상태에서 큰 간접인장강도를 발휘하는 혼합물도 존재하였다.

Table 9. Result of IDT

Mixture	Indirect tensile strength, MPa	TSR
A-1	0.299	0.47
A-2	0.221	0.61
A-3	0.236	0.42
B-1	0.270	1.10
B-2	0.372	0.84
B-3	0.467	0.76

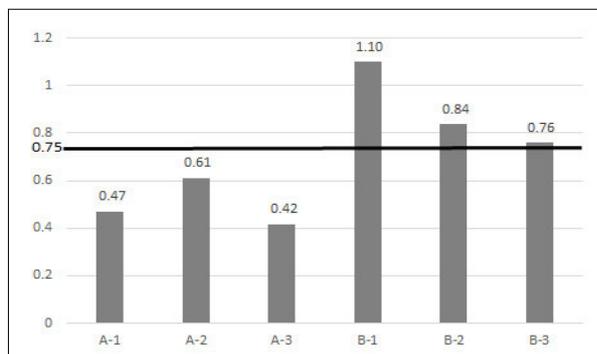


Fig. 6 Result of Tensile Strength Ratio (Graph)

7. 결론

본 연구는 소규모의 아스팔트 파손구간을 긴급으로 보수할 때 전통적인 응급보수재를 사용하여 임시 보수하는 개념이 아닌 현장에서 발생하는 아스팔트 순환골재를 활용하여 신속하게 유지보수가 가능한 유화아스팔트를 개발하여 혼합물을 평가하는데 있다. 이를 위하여 개발된 긴급보수용 개질 유화아스팔트와 아스팔트 순환골재를 혼합하여 기본적인 성능시험을 통해 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 마찰안정도 시험결과 Type A, B 두 종류의 긴급보수용 개질 유화아스팔트를 3%, 4%, 5%를 투입한 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물에서 모두 높은 안정도 값을 나타냈다. Type A 혼합물의 경우 수침잔류안정도에서는 재활용 상온 아스팔트 기준치인 5,000N을 상회하는 값을 나타냈지만 이는 수침 전 혼합물의 75%

대비 매우 낮은 결과 값을 나타냈다.

2. Type B 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 경우 긴급보수용 개질 유화아스팔트 함량이 높아질수록 수침잔류안정도 값이 증가하였다. 특히 5%의 긴급보수용 개질 유화아스팔트를 첨가하였을 때는 수침 전 안정도에 비해 123%의 높은 안정도 비를 나타냈다. 이는 5%의 긴급보수용 개질 유화아스팔트 첨가량이 과대하여 수침 전 안정도값이 상대적으로 낮아진 것으로 추정할 수 있지만 동시에 Type B 긴급보수용 개질 유화아스팔트의 경우 수침상태에서는 Type A 긴급보수용 개질 유화아스팔트 대비 내구성이 우수함을 알 수 있었다.

3. 잔류인장강도비 시험결과 Type A의 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물은 잔류인장강도비 기준 값인 0.75%를 만족시키지 못하는 값을 나타냈고 Type B의 긴급보수용 개질 유화아스팔트 혼합물의 경우는 0.75%를 상회하는 결과 값을 나타냈다. 이는 수침잔류안정도에서도 알 수 있듯이 Type B 긴급보수용 개질 유화아스팔트의 수분에 대한 내구성능이 Type A 긴급보수용 개질 유화아스팔트에 비하여 우수함을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 속경 반응성 순환골재용 개질 유화아스팔트 혼합물 개발 및 기초물성 평가에 대한 것으로 양생시간 별 혼합물의 성능 변화를 분석하여 조기 교통개방에 가능한 배합 및 조건에 대해 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류사업인 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구”의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

BIBLIOGRAPHY

- Alan J., (2002), “COLD MIX DESIGN IN NORTH AMERICA”, Akzo Noble.
- Dong Q., Huang B., Jia X., (2014), “Long-term Cost-effectiveness of Asphalt Pavement Phthole Patching Methods”, TRB 2014 Annual Meeting.
- Dong, Q. Huang, B. Zhao, S. (2014) Field and laboratory evaluation of winter season pavement pothole patching materials, The international journal of pavement engineering, Vol. 15, No .4, pp.279-289.
- Hilgren, G. James, A. Svensson, T. Wallin, T., (1998), “In-Plant

- Cold Recycling and Cold Mix in Sweden-Developments in Laboratory Testing”, Asphalt Emulsion Manufacturers Association, pp.41-54
- Hong I. K., Jeon G. S., Yang C. B., Lee S. B., (2014), “Development of Optimal Binder for Recycling Cold Asphalt Mixture”, Appl. Chem. Eng., Vol.25, No.4, pp.409~413.
- Hugener, M. Partl, M.N. Morant, M. (2014) Cold asphalt recycling with 100% reclaimed asphalt pavement and vegetable oil-based rejuvenators, Road materials and pavement design : an international journal, Vol. 15, No. 2, pp.239-258.
- Jian X., Songchang H., Yongchun Q., Feng L., (2010), “RUT-FILLING MICRO-SURFACING MIXTURE” 7th ISSA World Congress, Lyon 2010.
- Kandhal P. S., C. W. Lubold, and F. L. Roberts, (1989), "Water Damage to Asphalt Overlays : Case Histories", AAPT, Vol. 58.
- Karlsruhe Institute of Technology, (2012), “Pothole - Study of existing standards, techniques, materials and experience with them on the European market”
- Kim J., Bae S., Lee J., Yang J., Kim J., (2014), “A Study for Selection and Field Applicability of Asphalt Precast Pothole Repair Materials”, International Journal of Highway Engineering, Vol.16, No.4, pp.21-33.
- Kim Y., Lee H., (2010), “Comparing Laboratory of Engineered Emulsified Asphalt and Foamed Asphalt Mixtures for Cold In-place Recycling Pavement”, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol.12, No.1, pp.79-86.
- Kim, Y. Lee, H. Heitzman, M., (2007), “Validation of New Mix Design Procedure for Cold In-Place Recycling with Foamed Asphalt”, Journal of materials in civil engineering Vol.19, No.11, pp.1000-1010.
- Lesueur, D. Potti, J.J. Southwell, C. Walter, J. Cruz, M. Delfosse, F. Eckmann, B. Fiedler, J. Racek, I. Simonsson, B., (2004), “Superior Cold Recycling : The Score Project”, Eurasphalt & eurobitumen congress, pp.632-640
- Lottman, R. P.,(1971), “The Moisture Mechanism that Cause Asphalt Stripping in Asphalt Pavement Mixtures”, University of Idaho, Final Report Research Project R-47, Feb 1971
- Lottman, R. P.,(1982), “Predicting Moisture-Induced Damage to Asphalt Concrete Field Evaluation Phase”, National Cooperative Highway Research Program Report 246
- Nicholls C., Kubanek K., Karcher C., Hartmann A., Adesiyun A., Ipavece A., Komacka J., Nielseng E., (2014), “Durable pothole repairs”, TRA - transport research arena 2014, Paris.
- Olsson, K. Lillbroanda, U. Redelius, P., (1999), “IMPROVED COLD RECYCLING OF ASPHALT”, H & T : the journal of the Institution of Highways & Transportation & IHIE, Vol.46, No.1/2, pp.9-10
- Park J., Lee S., Kim S., Kim K. W., (2012), “Fundamental Property of Cold-mix Asphalt Mixture for Instant Pot-Hole Repair”, Journal of the Korean Society of Road Engineers, Vol.14, pp.47-52.
- Shim J. P., Jin J. H., Park T. S., Lee J. S., (2012), “Evaluation on Patching Materials for Asphalt Pavement”, International Journal of Highway Engineering, Vol.14, No.3, pp.59-67.
- Valentin J., Suda J., Formanov- Z., Mollenhauer K., Engels M., Batista F., McNallye C., (2014), “Introduction to European COREPASOL Project on Harmonizing Cold Recycling Pavement Techniques”, TRA - transport research arena 2014, Paris.