

다짐온도에서 골재 거칠기와 아스팔트 피막두께에 따른 중온화 첨가제의 윤활특성 평가

Evaluation of Lubrication Characteristics of WMA Additives for Different Roughnesses of Aggregate Surfaces and Film Thicknesses of Binders at a Compaction Temperature

이상재	Lee, Sang Jae	경희대학교 토목공학과 석사과정 · 주저자 (E-mail : leesjsj@hanmail.net)
조동우	Cho, Dong-Woo	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : dongwoocho@kict.re.kr)
황성도	Hwang, Sung-Do	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 (E-mail : sdwhang@kict.re.kr)
이석근	Rhee, Suk Keun	정회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 (E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to develop a method to evaluate lubrication of asphalt binder using WMA additives and compare their lubrication effects on two types of WMA additives and three types of asphalt film thicknesses.

METHODS : This study is based on laboratory experiments and rheological analysis of the experimental results. Testing materials are aggregate disks, asphalt, and WMA additives. The main testing method is stress sweep test by using dynamic shear rheometer (DSR).

RESULTS : Sasobit gives more lubrication effects on film thicknesses 0.2mm and under but LEADCAP does on film thicknesses over 0.3mm.

CONCLUSIONS : LVE-Limit is a better parameter to discern the lubrication effects on the thin film asphalt thickness. Both Sasobit and LEADCAP WMA additives provide effective lubrication at the compaction temperature.

Keywords

lubrication, asphalt, WMA, additive, roughness, film thickness, compaction temperature, LEADCAP, sasobit

Corresponding Author : Cho, Dong-Woo, Senior Researcher
Highway Pavement Research Division, Korea Institute of
Construction Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu,
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea
Tel : +82.31.9100.722 Fax : +82.31.9100.373
E-mail : dongwoocho@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ijhe.or.kr/>
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)

1. 연구배경

아스팔트는 적용온도(생산온도, 다짐온도, 공용온도)에 따라 아스팔트 혼합물에 3가지 주요한 기능을 수행하는 재료이다. 아스팔트 혼합물을 생산할 때 아스팔트는 골재 각각의 표면을 피복시켜 그 골재들이 외부환경

에 직접 접촉하지 않도록 보호하는 피복재료의 역할을 한다. 그리고 아스팔트 혼합물을 다질 때 아스팔트는 아스팔트와 골재 혼합물의 작업성을 높이고 최적의 밀도가 나오게 하는 윤활재료의 역할을 한다. 마지막으로 공용되고 있는 아스팔트 도로포장의 아스팔트는 골재와

골재가 서로 맞물린 상태를 유지하는 접착제의 기능을 수행하면서 완성된 아스팔트 도로포장체의 내구성과 탄성에 기여하는 구조적 역할을 수행한다.

전통적으로 가열 아스팔트 혼합물을 생산하기 위해 적용하는 온도는 160℃ 이상의 높은 온도이고, 다짐온도도 1차 다짐에서는 140℃ 이상의 높은 온도를 적용한다. 그러나 이처럼 높은 생산온도와 다짐온도는 아스팔트 도로포장 산업에서 에너지 소모 및 탄소배출의 가장 큰 원인이 되고, 또한 위험한 작업환경을 만드는 요인이 된다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 최근 생산 및 다짐온도를 줄이는 기술인 저탄소 중온 아스팔트 포장기술이 도입 적용되고 있다(조동우 외, 2009, Brian D. Prowell 외, 2012).

저탄소 중온 아스팔트 포장기술은 기존 가열 아스팔트의 생산 및 다짐온도보다 약 30℃ 정도 낮은 온도에서 사용가능한 기술로 다양한 종류의 중온화 첨가제 및 중온 아스팔트를 생산하는 장비 등이 전 세계적으로 유통되고 있는 상황이다. 또한 이러한 첨가제와 장비를 사용해 기존 적용온도보다 낮은 온도에서 발현되는 성능 및 특성에 관한 연구들이 활발하게 진행되고 있는 중이다.

본 연구목적은 저탄소 중온화 기술 중 왁스형 재료로서 이미 전 세계적으로 품질과 적용성이 입증된 Sasobit과 국내에서 개발된 LEADCAP을 사용해 중온 아스팔트 기술에 적용되는 다짐온도에서 중온화 첨가제가 피복두께에 따라 아스팔트의 운할특성에 어떻게 영향을 미치는지 복소탄성계수(G^*)와 선형점탄성한계점(LVE-Limit)을 통해 비교·평가하는 것이다. 본 연구방법으로 표면 거칠기를 모사하기 위해 골재를 가공했고, 동적전단유동기(DSR) 장비를 사용해 골재와 아스팔트 접착면(또는 계면)의 복소탄성계수와 선형점탄성한계점을 측정 후, 측정값을 가지고 아스팔트의 운할성과 중온화 첨가제 사용에 따른 운할성 변화, 그리고 골재 표면 마찰 영향을 확인하기 위해 분석했다.

2. 운할특성 평가를 위한 실내실험

2.1. 실험재료와 재료의 가공

본 연구에서 DSR장비를 사용해 아스팔트의 역학적 물성을 시험하기 위해 화강암, 사암, 석회암 3종류의 암석을 선정하였다. 선정된 암종의 골재를 생산하는 채석장에서 암석을 채취하여 세라믹 가공을 한 후 직경 25mm, 높이 5mm의 디스크 형태 시료를 제작하였다. 그러나 이처럼 세라믹 가공을 한 재료는 골재 표면이 매끈하기 때문에 아스팔트 피복두께에 따른 골재의 마찰 특성이 실

내시험에 반영되지 않을 수도 있다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 세라믹 가공한 골재 디스크 중 일부를 Fig. 1과 같은 샌드블라스트 장치에 의해 골재 표면에 연마재를 분사해서 골재의 거칠기를 모사했다.

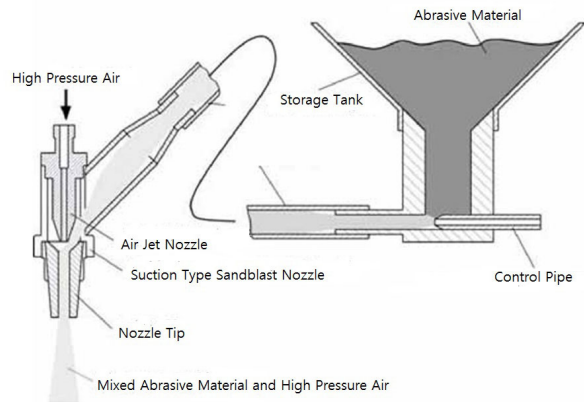
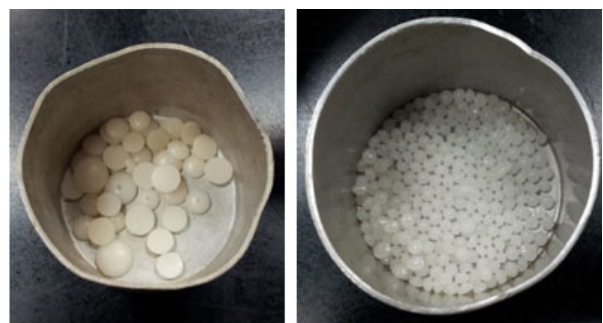


Fig. 1 Sandblast Device

골재와 함께 아스팔트 혼합물의 주요 재료인 아스팔트는 S사의 PG64-22 등급의 AP-5를 선정해서 사용했다. 그리고 일반 다짐온도보다 낮은 다짐온도에서 중온화 첨가제의 운할효과를 검증하기 위해 사용한 중온화 첨가제는 한국건설기술연구원에서 개발한 LEADCAP과 남아프리카 공화국의 Sasol Wax사에서 개발한 Sasobit을 아스팔트 무게의 1.5%만큼 아스팔트에 첨가해서 실내 실험을 수행하였다.



(a) Sasobit

(b) Additive

Fig. 2 LEADCAP

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 LEADCAP과 Sasobit 첨가제의 모습을 보여주고 있다. 다음은 골재의 샌드블라스트 가공 후 수행한 골재 표면의 거칠기 정량화 시험 방법에 대해 알아본다.

2.2. 골재의 거칠기 정량화 측정시험

본 연구에서 실험결과에 가장 큰 영향을 미치는 인자

중의 하나로 고려된 골재는 생성원인에 의한 종류와 모양, 그리고 표면의 거칠기에 따라 특성이 변하기 때문에 실험을 위한 표준 골재를 선정하기가 매우 어렵다. 특히 골재의 거친 두 표면 사이의 접촉은 불규칙한 불연속 접촉점의 연속으로 이어져 있기 때문에, 맞물려 접촉된 두 골재 표면이 외부 하중을 받게 될 때 두 표면사이의 정지마찰은 골재 표면의 거칠기나 골재 모양에 의해 정해지는 특징이 있다. 또한 두 표면사이에서 주어진 하중에 저항하지 못하고 미끄럼 마찰운동을 하면서 발생하는 동 마찰 역시 골재 표면의 거칠기나 골재 모양 등에 의해 정해지게 된다.

정량화된 실험결과를 얻기 위해 골재 모양은 직경 25mm, 높이 5mm의 디스크 형태로 고정했고, 본 연구에서 골재 모양은 실험결과에 영향을 주지 않는 인자가 되었다. 그리고 Fig. 3의 조도측정기를 사용해 샌드블라스트로 골재의 표면 거칠기를 모사한 화강암, 사암, 석회암 디스크의 표면 거칠기를 측정하였다. 화강암, 사암, 석회암등의 암종에 의한 아스팔트의 흡착(adsorption) 정도는 상온에서의 아스팔트와 골재의 접촉성질 및 수분에 의한 박리현상에 영향을 미치지만, 낮은 점성을 가지고 있는 중온에서 골재의 마찰 및 중온 아스팔트의 유희성질을 고려하는 본 연구에서는 실험결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 간주했다. 아스팔트와의 본 연구에 사용한 조도측정기는 영국 Paint Test Equipment사의 Surface Profile Gauge이고, 본 장비의 거칠기 측정범위는 0~1000 μm 이며 측정정밀도는 1 μm 이다.



Fig. 3 Surface Profile Gauge to Measure Roughness

거칠기를 측정한 후 접촉면의 마찰력을 충분히 발휘할 것으로 기대되는(50 μm 이상) 골재 디스크를 선택해서 다음에 설명하는 Stress Sweep 시험을 위한 실험재료로 사용했다.

2.3. Stress Sweep 시험

중온화 첨가제의 유희효과를 평가분석하기 위해 아스

팔트의 유변학적 거동을 측정, 분석하는 장비인 DSR에 골재 디스크를 부착하고 그 사이에 있는 아스팔트 피막 시료에 시간의 흐름과 함께 전단응력을 점점 증가시키는 Stress Sweep 시험을 수행했다. 이 시험을 수행하기 위해 사용된 DSR 장비는 영국 TA Instrument사의 AR 1500EX 이다. Fig. 4에서는 Stress Sweep 시험의 기본적인 개념도를 보여주고 있다. Fig. 4의 위쪽 그래프는 오른쪽과 왼쪽으로 번갈아 가면서 회전하는 DSR의 전단응력이 시간의 흐름과 함께 증가하는 전단응력과 시간과의 함수관계를 보여주고 있다. 그리고 Fig. 4의 아래쪽 그래프는 증가되는 전단응력이 가해지면서 디스크 형태의 아스팔트 시료가 변형되어 발생하는 전단변형률을 측정된 후 계산된 복소탄성계수(G^*)와 가해진 전단응력과의 관계를 나타낸다.

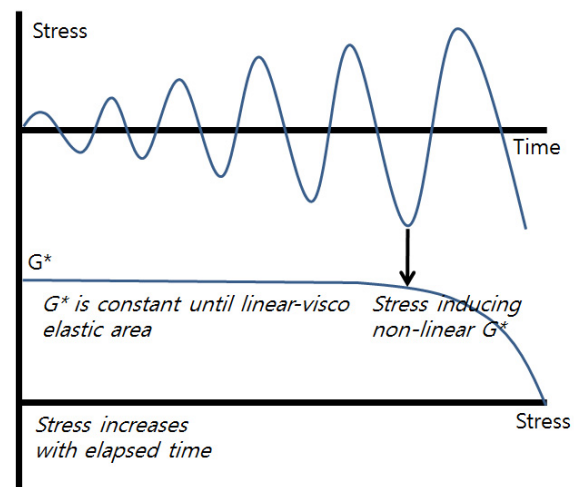


Fig. 4 Concept of Stress Sweep Test

여기서, 복소탄성계수가 직선에 가까운 형태를 보이면 선형 점탄성 영역이 되고, 지속적인 전단응력의 증가와 함께 복소탄성계수 값이 포물선을 그리면서 탄성력이 손실되는 형태를 보이면 비선형 점탄성 영역이 된다. 여기서, 선형 점탄성 영역과 비선형 점탄성 영역을 구분하는 전단응력 값을 선형 점탄성 영역의 복소탄성계수와 비선형 점탄성 영역이 나타나기 시작하는 복소탄성계수의 정해진 비율(비선형 점탄성 영역이 시작되는 복소탄성계수/선형 점탄성 영역의 복소탄성계수, 예: 95%, 90%, 또는 85% 등, 여기서는 85%를 선택)로 정한다. 이렇게 정해진 비율이 만나는 전단응력 값은 선형 점탄성한계점(Linear Visco-Elastic Limit)이 된다 (조동우 외, 2007, 조동우, 2008).

DSR 시험에 일반적으로 적용되는 표준 아스팔트 바인더 시료 1mm 두께는 피막두께 및 골재의 표면 거칠

기에 의한 영향을 받지 않으면서 아스팔트 자체의 유변학적 특성을 측정할 수 있는 표준 두께이다. 그러나 1mm가 아니라 본 연구에서 적용한 것 처럼 0.1~0.3mm 정도로 얇은 아스팔트 피막두께를 사용해 시험을 수행하면 높은 온도에 의해 액상형이 된 아스팔트의 윤활성과 골재 표면 거칠기에 의한 마찰특성이 복합적으로 나타난다. 이러한 아스팔트의 윤활성과 골재의 마찰특성은 Stress Sweep 시험의 복소탄성계수 값과, 선형과 비선형 점탄성 영역의 경계를 나타내는 전단응력 값인 선형

점탄성한계점(85% G* 위의 전단응력)에서 나타나게 되고, 본 연구에서는 이러한 윤활성을 평가하는 시험온도로서 중온 아스팔트 포장의 표준 다짐온도 범위 안에 있는 온도인 110℃를 적용했다. 본 Stress Sweep 실험을 수행하기 위해 준비하는 절차는 Fig. 5와 같다.

본 실험은 DSR Moisture Damage 시험법(조동우, 2008, 조동우 외, 2009)을 차용한 국내 아스팔트와 골재사이의 접착성질에 관한 연구(유인상 외, 2011)의 실험준비방법을 따랐다. DSR에 장착되는 금속 플레이트에 골재 디스크를 부착시키기 위해 두 종류의 에폭시를 사용했다. 본 실험에서 두 종류의 에폭시를 사용하는 이유는 골재 디스크가 DSR 금속 플레이트에 부착되기 위한 주요 재료인 고강도 에폭시 J&B INDUSTRO가 충분한 접착강도를 보이기 위해서는 최소한 12시간을 필요로 한다. 그러므로 DSR 장비 위에서 실험세팅을 하게 되면 하루에 한 개의 시료를 사용한 실험만이 가능하게 된다. 이러한 세팅시간을 줄이고 하루 실험량을 늘이기 위해 대량으로 제작한 골재 디스크와 금속 플레이트 세트를 만들었고, J&B INDUSTRO의 긴 양생시간을 보완하기 위해 급속경화 에폭시인 Perma Poxy 5Min을 사용해 짧은 시간에 경화된 골재 디스크와 금속 플레이트 접착세트를 DSR에서 분리해 12시간 동안 외부에서 양생할 수 있도록 했다. 양생된 골재 디스크와 금속 플레이트 접착세트 중 골재 디스크의 옆면만 테플론 테이프를 사용해서 밀봉한다. 옆면을 밀봉하는 이유는 아스팔트 바인더를 세팅하는 동안 아스팔트가 세팅온도에서 옆으로 흘러내려 골재와 부착되는 면적을 넓히는 것을 방지하기 위함이다. 이렇게 세팅된 골재 디스크와 금속 플레이트 접착세트를 사용해 Stress Sweep 시험을 수행한다.

본 실험에서 적용한 실험재료 및 인자 그리고 실험반복 횟수를 정리한 실험계획은 Table 1과 같다. Table 1에서 확인할 수 있는 것처럼 DSR 장비의 기본 세팅인 금속 플레이트와 아스팔트 바인더 사이의 아스팔트 피막물성을 확인하는 실험을 수행한 후, 주 실험인 골재 디스크와 아스팔트 바인더 사이의 피막물성을 측정했다. 이 실험을 위해 기본 아스팔트 바인더인 PG64-22인 AP5와 AP5에 중온화 첨가제 LEADCAP를 AP5의 1.5% 무게만큼 섞은 LEADCAP 중온 아스팔트 바인더를 사용했다. 그리고 골재 디스크를 사용한 실험에는 AP5에 Sasobit을 AP5의 1.5% 무게만큼 섞은 Sasobit 중온 아스팔트 바인더 시료가 추가되었다. 본 실험을 위한 온도로 금속 플레이트 실험군과 골재 디스크 실험군 둘 다 110℃ 온도를 사용했고 0.1, 0.2, 그리고 0.3mm



Fig. 5 Preparation of Stress Sweep using Rock Disks

피막두께를 사용했다. 그리고 각 조건별로 3번씩 반복 실험을 수행했다.

지금까지 본 연구를 위한 실험재료의 가공방법과 특성 및 물성을 측정하는 방법, 그리고 이러한 물성 측정법에 의한 실험계획에 대해서 설명을 했다. 이제부터는 이러한 실험재료를 사용한 물성실험 결과들과 그 결과들을 통해 분석하고 고찰한 결론들을 살펴보고자 한다.

Table 1. Experimental Plan

Testing Temp.	Interfacing Materials	Testing Samples	Film Thick.	Replicates
110°C	Metal Plate	AP5	0.1mm	3
			0.2mm	3
			0.3mm	3
		AP5 + LEADCAP 1.5%	0.1mm	3
			0.2mm	3
			0.3mm	3
	Aggregate Disk	AP5	0.1mm	3
			0.2mm	3
			0.3mm	3
		AP5 + LEADCAP 1.5%	0.1mm	3
			0.2mm	3
			0.3mm	3
AP5 + Sasobit 1.5%	0.1mm	3		
	0.2mm	3		
	0.3mm	3		

* Temp.: Temperature, Thick : Thickness

3. 윤활효과 측정 실험결과

3.1. 골재의 거칠기 정량화 측정시험 결과

골재의 거칠기에 의한 마찰과 아스팔트의 윤활효과를 고려한 Stress Sweep 시험을 위해서는 충분한 골재의 표면 거칠기가 보장되어야 한다. 이 때문에 가공한 골재의 표면 거칠기 측정을 통해 적용할 골재 시료를 정하였다. 시험을 수행 할 때 사용한 골재 시료는 세라믹 가공

Table 2. Result of Measured Roughnesses

Processed Type	Mineralogy	Average (μm)	Standard Deviation
Ceramic Process (Before Sandblasting Process)	Limestone	10	10
	Sandstone	20	20
	Granite	0	10
Sandblasting Process	Limestone	20	20
	Sandstone	30	10
	Granite	70	20

만 한 석회암, 사암, 화강암과 표면 거칠기 모사를 위해 샌드블라스트 처리까지 한 석회암, 사암, 화강암까지 총 6종류였다. 가공한 각 골재 디스크 시료 중 4개의 샘플을 무작위로 추출하여 10회씩 조도측정을 하였다. 조도측정을 통해 각 골재 시료의 거칠기에 대한 평균값 및 표준편차는 Table 2에 정리했다.

골재의 거칠기를 측정한 결과 세라믹 가공을 한 골재들의 거칠기는 10~20μm 사이로 거칠기의 차이가 거의 없었지만, 샌드블라스트 처리를 한 골재 중 화강암의 거칠기는 70μm로 다른 골재들과 큰 차이를 보였다. 그러므로 샌드블라스트 처리를 한 화강암이 골재 표면의 거칠기에 따른 영향을 평가하기에 가장 좋은 시료로 선정되었고 Stress Sweep 시험에 사용되었다. 이제부터는 이렇게 거칠기 분석을 통해 선정된 재료를 사용한 Stress Sweep 시험에 의해 나온 시험결과와 그 결과들을 분석·고찰한 내용을 살펴보기로 한다.

3.2. 아스팔트 바인더의 Stress Sweep 시험결과

3.2.1. 금속 플레이트 실험군의 증온화 첨가제 윤활효과

110°C는 LEADCAP 첨가제를 적용한 중온 아스팔트가 가장 잘 다짐되는 범위에 있는 온도 중의 하나이다. 이 온도에서 골재의 표면의 마찰을 고려한 윤활성을 관찰하기 전에 금속 플레이트 사이에서 발생하는 마찰영향을 확인하기 위해 금속 플레이트를 사용한 Stress Sweep 시험을 수행했다. 실험을 위한 재료와 인자조건에 대한 내용은 Table 1의 금속 플레이트(Metal Plate) 항목에서 확인할 수 있다. 이러한 실험재료와 인자조합에 따라 Stress Sweep 시험 후 구한 아스팔트 피막두께에 따른 복소탄성계수와 선형점탄성한계점(85% G*의 전단응력)은 Table 3에 정리했고 Fig. 6의 그래프에서 특성을 확인할 수 있다.

Fig. 6의 (a) 그래프를 보면 일반 아스팔트 바인더 AP5는 아스팔트 피막두께가 0.3mm에서 0.2mm, 0.1mm까지 얇아지면서 평균 복소탄성계수 값도 165, 148, 그리고 121Pa로 일정하게 감소하는 경향을 보인다. AP5에 LEADCAP 1.5%를 섞은 중온 아스팔트 또한 피막두께가 얇아지면서 평균 복소탄성계수 값은 112, 104, 그리고 84Pa로 일정하게 감소한다. 그리고 LEADCAP 중온 아스팔트 결과와 피막두께에 따른 값의 차이는 약 40Pa 정도로서 일정하다. 이러한 결과로 알 수 있는 것은 LEADCAP 증온화 첨가제는 굉장히 미약한 정도이지만 가열아스팔트의 복소탄성계수를 약 40pa정도 감소시키는 효과를 준다는 것이다.

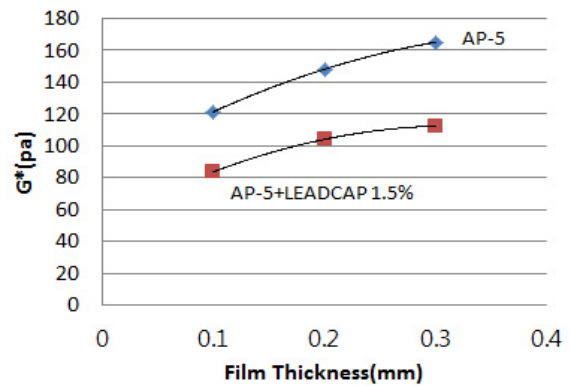
Stress Sweep 시험을 통해 측정한 AP5 아스팔트의 선형점탄성한계점은 복소탄성계수 값과는 다르게 0.3mm에서 측정되기도 하고 안되기도 하는 결과가 나왔다. 측정되지 않은 결과가 존재하는 이유는 장비가 측정할 수 없는 낮은 전단응력범위의 미끄럼 현상이 나타났기 때문이다. 그러나 측정된 결과가 나타났을 때는 이러한 미끄럼 현상보다는 정지마찰과 미끄럼마찰이 작용되는 마찰현상이 아스팔트와 금속 플레이트 사이 접촉면을 지배했다고 할 수 있다.

Fig. 6의 (b) 그래프는 마찰이 발생한 AP5의 선형점탄성한계점 값을 보여주고 있다. Fig. 6의 (b) 그래프에서 측정된 전단응력값은 0.3mm에서 평균 11,830Pa을 보이다가 0.2mm에서 46,027mm로 증가하고 다시 0.1mm에서 36,060mm로 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 0.2mm에서부터는 금속 플레이트 사이에 발생하는 마찰에 의해 전단응력이 증가한 영향으로 고려될 수 있고, 기존 연구논문에서도 확인되는 현상이다 (유인상 외, 2011). 여기서는 0.2mm 피막두께에서 보존된 아스팔트 피막의 접착력 또는 윤활성질과 함께 복합적으로 작용한 금속 플레이트의 마찰력이 결합되어 가장 높은 전단응력이 나온 것이고, 0.1mm에서는 아스팔트 피막의 접착력 보다는 윤활성질이 조금 더 크게 발현되면서 나온 결과라고 추정할 수 있다.

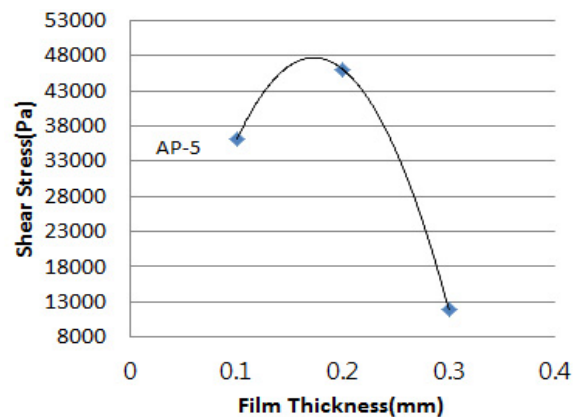
Table 3. Testing Results on the Metal Plate Group

Sample	AP5			AP5 + LEADCAP 1.5%			
	LVE G* (Pa)	85% LVE G* (Pa)	LVE Limit (Shear Stress, Pa)	LVE G*	85% LVE G*	LVE Limit (Shear Stress)	
0.1mm	1	118	100	35,740	81	N/A	N/A
	2	125	109	36,540	86	N/A	N/A
	3	121	105	35,900	84	N/A	N/A
	Ave.	121	105	36,060	84	N/A	N/A
	SD	5	6	423	2	N/A	N/A
0.2mm	1	152	131	47,110	105	N/A	N/A
	2	142	127	42,970	103	N/A	N/A
	3	150	133	48,000	103	N/A	N/A
	Ave.	148	130	46,027	104	N/A	N/A
	SD	5	3	2684	1	N/A	N/A
0.3mm	1	170	N/A	N/A	110	N/A	N/A
	2	163	139	11,830	113	N/A	N/A
	3	163	N/A	N/A	115	N/A	N/A
	Ave.	165	139	11,830	112	N/A	N/A
	SD	4	N/A	N/A	2	N/A	N/A

*LVE: Linear Visco-Elastic, Ave.: Average, SD: Standard Deviation



(a) Average Complex Modulus Values



(b) Average Linear Visco-Elastic(LVE) Limit Values

Fig. 6 Average Complex Modulus and LVE Limit of Samples using Metal Plates

LEADCAP 1.5%를 섞은 중온 아스팔트 바인더는 미끄럼 현상에 의해 측정할 수 있는 선형점탄성한계점 값의 결과가 존재하지 않았다. 이는 중온화 첨가제 LEADCAP이 얇은 피막두께에서도 윤활효과를 발휘해 AP5 아스팔트 바인더를 단독으로 사용했을 때 보다 낮은 전단응력이 발생했음을 알려주는 결과이다. 그러나 표면이 매끈한 금속 플레이트와는 표면 거칠기가 존재하는 실제 골재에서도 이러한 윤활특성이 나타나는지 확인해볼 필요가 있다.

이를 위해 다음은 가공한 골재 디스크 시험군의 결과에 대해서 살펴보고자 한다.

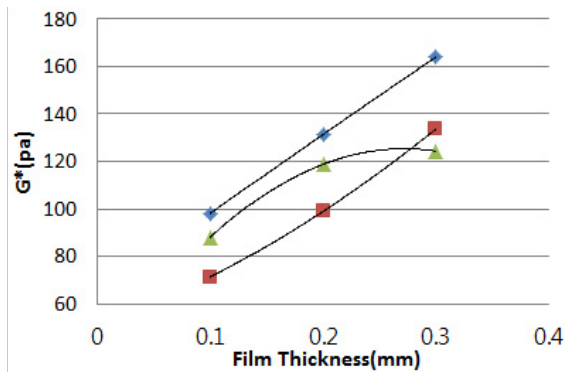
3.2.2. 골재 디스크 시험군의 중온화 첨가제 윤활효과

골재 디스크 시험군에서는 AP5, AP5에 LEADCAP 1.5% 섞은 LEADCAP 중온 아스팔트와 AP5에 Sasobit 1.5%를 섞은 Sasobit 중온 아스팔트 시료를 사용해서 Stress Sweep 시험을 수행했고, 그 결과는 Table 4에 정리했고 Fig. 7의 그래프에서 피막두께별 변화를 확인할 수 있다.

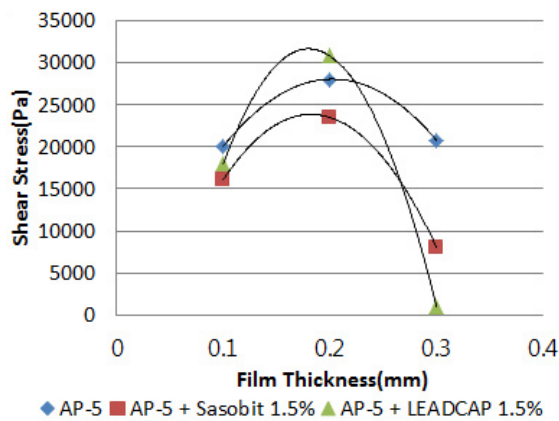
Table 4. Testing Results on the Aggregate Diskes Group

Sample	AP5			AP5 + LEADCAP 1.5%			AP5 + Sasobit 1.5%			
	LVE G*	85% LVE G*	LVE Limit (Shear Stress)	LVE G*	85% LVE G*	LVE Limit (Shear Stress)	LVE G*	85% LVE G*	LVE Limit (Shear Stress)	
0.1 mm	1	94	80	22,550	82	71	1,560	78	68	15,600
	2	109	91	24,720	102	88	22,550	80	67	17,110
	3	91	78	12,980	79	67	29,730	55	48	15,600
	Ave.	98	83	20,083	88	75	17,947	71	61	16,103
	SD	10	7	6,247	12	11	14,638	14	11	872
0.2 mm	1	132	111	29,730	106	90	35,740	107	92	27,110
	2	139	118	35,740	129	110	29,730	108	93	24,720
	3	124	105	18,760	121	104	27,110	81	69	18,760
	Ave.	131	112	28,077	119	101	30,860	99	85	23,530
	SD	8	6	8,610	12	10	4,425	15	13	4,300
0.3 mm	1	161	138	24,720	91	77	1,423	147	125	6,211
	2	172	149	24,720	120	102	326	140	120	8,187
	3	158	134	12,980	161	137	1,183	113	95	9,843
	Ave.	164	140	20,807	124	106	977	134	113	8,080
	SD	7	7	6,778	35	30	577	18	16	1,818

*LVE: Linear Visco-Elastic, Ave.: Average, SD: Standard Deviation



(a) Average Complex Modulus Values



(b) Average Linear Visco-Elastic(LVE) Limit Values

Fig. 7 Average Complex Modulus and LVE Limit of Samples using Aggregate Diskes

Fig. 7의 (a) 그래프를 보면 일반 아스팔트 바인더 AP5는 금속 플레이트 실험군의 AP5 결과와 유사하게 피막두께가 0.3mm에서 0.2mm, 0.1mm까지 얇아지면서 평균 복소탄성계수 값도 164, 131, 그리고 98Pa로 감소하는 경향이 보인다. 그리고 LEADCAP 중온 아스팔트도 피막두께가 얇아지면서 평균 복소탄성계수 값은 124, 119, 그리고 88Pa로 또한 Sasobit 중온 아스팔트도 134, 99, 그리고 71Pa로 둘 다 점점 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

골재 디스크와 금속 플레이트 실험군의 복소탄성계수 값들을 같이 정리해서 고찰을 해보면 기울기의 정도가 사용한 시료별로 차이를 보일 수는 있지만, 피막두께가 얇아지면서 나타나는 평균 복소탄성계수 값의 감소 경향은 일반 아스팔트나 중온 아스팔트 그리고 금속이나 골재 접촉재료 등 사용한 모든 재료의 조합들에서 공통적으로 나타나는 현상이다. 또한 이러한 감소 경향의 정도는 20~40Pa 범위 안에 있는 미미한 차이만 보였다. 그러므로 이러한 결과를 통해 피막두께는 복소탄성계수 값에 영향을 주는 주요한 실험인자가 될 수 없다는 결론을 얻었다. 그러나, 이처럼 미미한 차이임에도 불구하고 피막두께에 따른 평균 복합탄성계수 값의 차이를 고려해 LEADCAP 중온화 첨가제와 Sasobit 중온화 첨가제가 일반 아스팔트 바인더인 AP5에 주는 영향을 평가해본다면, 0.2mm 이상의 피막두께에서는 Sasobit 중온화 첨가제가 LEADCAP 중온화 첨가제 보다 아스팔트 AP5의 복소탄성계수 값을 약간 더 낮추어 주는 효과가 있는 것으로 나타났다. 이에 반해 0.3mm 이상의 피막두께에서는 LEADCAP 중온화 첨가제가 Sasobit 중온화 첨가제보다 AP5의 복소탄성계수 값을 약간 더 낮추어 주는 것을 확인할 수 있다. 즉 0.2~0.3mm 피막두께 사이에서 LEADCAP과 Sasobit 중온화 첨가제의 영향이 서로 역전하고 있음을 알 수 있는 결과이다.

Fig. 7의 (b) 그래프는 가공한 화강암 골재 디스크 사이의 접촉면에 발생하는 마찰과 함께 중온화 첨가제를 혼입한 중온 아스팔트의 윤활효과가 복합적으로 발생한 AP5, LEADCAP 중온 아스팔트, 그리고 Sasobit 중온 아스팔트 시료의 피막두께에 따른 선형점탄성한계점이 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 복소탄성계수 값은 재료가 받는 응력에 대해서 회복가능한 탄성력을 보이는 선형점탄성 영역에 대한 대표 물성값인 반면에 선형점탄성한계점은 탄성력이 손실되어 재료가 변형 또는 파괴되는 비선형점탄성 영역에 대한 물성을 나타내는 값이다. 그러므로 재료의 변형이 크게 영향을 미치는 다짐

성이나 내구성을 비교·평가할 경우에는 선형점탄성한계점을 확인하는 것이 더 바람직하다고 할 수 있다.

Fig. 6의 (b) 그래프처럼 AP5의 결과만 나온 금속 플레이트 실험군의 결과와는 달리 골재 디스크 실험군에서는 모든 중온 아스팔트 시료들의 결과가 나왔다. 이는 골재 디스크를 사용한 Stress Sweep 시험을 사용했을 때, 아스팔트 바인더의 점도를 낮추어 윤활성을 높여 주는 LEADCAP과 Sasobit 중온화 첨가제를 사용해도 골재사이에 마찰이 항상 작용하고 있어서 금속 플레이트처럼 미끄럼이 발생하지 않은 결과이다. 또한 Fig. 6의 (b) 결과처럼 0.2mm를 기점으로 한계점인 전단응력 값이 크게 바뀌는 것을 확인할 수 있다.

선형점탄성한계점을 비교해보면 AP5보다 Sasobit 중온 아스팔트가 좀 더 큰 폭으로 변화하고, 또한 LEADCAP 중온 아스팔트는 이보다 훨씬 급격한 변화를 보이고 있다. 예를 들면 0.3mm에서 AP5는 20,807Pa로 가장 크고, Sasobit 중온 아스팔트는 8,080Pa로 AP5보다 작은 값이 나왔고, LEADCAP 중온 아스팔트는 977Pa로 가장 낮은 선형점탄성한계점을 보이고 있다. 그러나 0.2mm에서는 AP5가 20,077Pa로 가장 낮고 Sasobit 중온 아스팔트가 그다음 23,530Pa, 그리고 LEADCAP 중온 아스팔트가 30,860Pa로 마찰력이 가장 크게 작용한 피막두께에서 가장 높은 선형점탄성한계점 결과가 나왔다. 결과적으로 0.2mm보다 두꺼운 피막두께에서는 LEADCAP 첨가제가 Sasobit 첨가제 보다 윤활효과가 더 크고, 0.2mm보다 얇은 피막두께에서는 Sasobit 첨가제가 LEADCAP 첨가제 보다 윤활효과가 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

지금까지 결과의 내용을 다시 한 번 간략히 정리해보면, 골재와 아스팔트 접촉면(또는 계면)의 복소탄성계수 값은 재료별로 너무 작은 차이를 보이고 있기 때문에 다짐처럼 재료에 큰 변형이 발생하는 현상의 특성을 평가할 때 변별력을 주기는 힘들다. 선형점탄성한계점은 변형이 발생하는 재료의 특성을 반영하는 시험결과이고, 본 연구에서 중온화 첨가제의 윤활효과를 평가할 때 피막두께별로 큰 차이를 볼 수 있는 결과가 나왔다.

본 연구결과는 주어진 실험온도에서 골재와 아스팔트 사이 접촉면에서 발생하는 마찰 및 피막두께에 따른 접촉면 거동물성을 나타내고 있기 때문에, 본 결과와 아스팔트와 골재 혼합물의 다짐온도에서 공극률 변동에 의한 피막두께 변화와 연결시켜 실제 혼합물의 다짐성을 예측·비교하는 연구로 연결할 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 아스팔트 혼합물의 피막특성을 반영하기 위해 실제 골재를 가공해 표면의 거칠기까지 고려한 실험을 수행한 후, 중온 아스팔트에 적용하는 다짐온도에서 피막두께와 골재표면 거칠기에 따른 중온화 첨가제의 윤활특성을 비교·평가하는 내용을 다루고 있다. 본 연구결과와 결과에 관해 고찰한 내용은 다음과 같다.

1. LEADCAP과 Sasobit 중온화 첨가제는 둘 다 110℃의 다짐온도에서 PG64-22인 일반 AP5 아스팔트 바인더의 윤활성을 높이는 효과가 있음을 확인했고, 또한 중온화 첨가제의 종류별, 골재 표면의 거칠기, 그리고 피막두께별로 다른 윤활특성을 나타내고 있음을 발견했다.
2. 특히 골재 표면 거칠기에 따른 마찰은 복소탄성계수보다는 선형점탄성한계점에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 나왔다.
3. 얇은 아스팔트 피막두께를 사용해 골재사이의 마찰을 고려한 결과에서 LEADCAP과 Sasobit 중온화 첨가제는 전반적으로 AP5보다 낮은 복소탄성계수와 선형점탄성한계점을 보임으로써 저탄소 중온화 첨가제를 사용하면 윤활성이 향상됨을 확인할 수 있었다.
4. 아스팔트 피막두께가 0.2mm 이하의 경우에는 Sasobit 중온화 첨가제가 LEADCAP 중온화 첨가제보다 아스팔트 바인더의 윤활특성을 더 높여주고, 골재의 피막두께가 0.3mm 이상인 경우에는 LEADCAP 중온화 첨가제가 Sasobit 중온화 첨가제보다 아스팔트 바인더의 윤활성을 더 높이는 효과가 있는 것으로 확인했다.
5. 선형점탄성 영역 물성의 대표 값인 복소탄성계수보다 비선형 점탄성 영역 물성을 나타내는 선형점탄성한계점이 다짐온도에 대한 윤활성이나 다짐성을 비교·평가하는 데에 훨씬 변별력이 있다.
6. 향후 본 연구를 확장해서 연구결과인 가공한 골재 디스크와 중온 아스팔트 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰, 윤활 및 피막두께 변화에 따른 접촉면 물성과, 중온 아스팔트 혼합물의 다짐온도(일반 가열 아스팔트 다짐온도보다 약 30℃ 낮은 온도)에서 공극률 변동에 의한 피막두께 변화와 연결시켜 실제 혼합물의 다짐성을 예측·비교하는 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

References

- Cho, Dong-Woo, Hwang, SungDo, Im KwangSoo, 2009, European Warm-Mix Asphalt Technologies, *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol 11, No.2, pp.20-25
- (조동우, 황성도, 임광수(2009). “유럽의 저탄소 증온 아스팔트 포장(WMA)의 기술현황”, 도로학회지 제11권 2호, pp.20-25)
- Prowell, Brian D., Hurley, Graham C. , Frank, Bob, 2012, *Warm-Mix Asphalt: Best Practices 3rd Edition*, National Asphalt Pavement Association
- Cho, Dong-Woo, Bahia, Hussain U., 2007. “Effect of Aggregates’ Surface and Water on Rheology of Asphalt Films.” Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1998, *TRB*, National Research Council, Washington, D.C., pp.10-17
- Cho, Dong-Woo, 2008, *Study of Asphalt-Aggregate Bond in Simple Simulation Using the Dynamic Shear Rheometer*, Ph.D Dissertation, University of Wisconsin, Madison, WI
- Cho, Dong-Woo, Bahia, Hussain U., 2010, New Parameter to Evaluate Moisture Damage of Asphalt-Aggregate Bond in Using Dynamic Shear Rheometer, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.22, No.3, p267-276
- Yoo, In Sang, Cho, Dong-Woo, Hwang, Sung Do, Rhgee, Suk Keun, 2011, A Study of Warm-Mix Asphalt’ s Bonding Properties on the Change of Asphalt Film Thicknesses, *International Journal of Highway Engineering*, Vol.13, No.4, pp29-40
- Yoo, In Sang, Cho, Dong-Woo, Hwang, Sung Do, Rhgee, Suk Keun, 2011, A Study of the Performance Evaluation Method of Warm-mix Asphalt Mixture the Analysis of Bonding Properties between Asphalt Binder and Aggregate, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol.31, No.6D, pp803-810
- (접수일 : 2013. 1. 23 / 심사일 : 2013. 1. 25 / 심사완료일 : 2013. 8. 29)