

# DSR을 이용한 온도변화에 따른 중온화 첨가제의 다짐특성 연구

## Study of WMA Additive's Compaction Characteristics in Terms of Temperature Change by Using DSR

황성도 Hwang, Sung-Do  
이상재 Lee, Sang Jae  
조동우 Cho, Dong-Woo  
이석근 Rhee, Suk Keun

정희원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 주저자 (E-mail: sdwhang@kict.re.kr)  
경희대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: leesjlsj@hanmail.net)  
정희원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 교신저자 (E-mail: dongwoocho@kict.re.kr)  
정희원 · 경희대학교 토목공학과 교수 (E-mail: skrhee@khu.ac.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study is to develop a method to evaluate the compaction effects of asphalt binders using WMA additives and compare their compaction effects on two types of WMA additives, two types of testing temperatures, 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 the stress sweep test by using dynamic shear rheometer (DSR). In addition, the testing parameters obtained from the stress sweep results to evaluate lubrication effects are complex modulus and LVE-Limit.

**RESULTS :** At both the first compaction condition (110°C, 0.3mm) and second compaction condition (80°C, 0.2mm) assumed, LEADCAP showed better compaction effects than Sasobit.

**CONCLUSIONS :** The temperature 30°C lower than general compaction temperatures can provide a better sensitivity for the evaluation of compaction effects. If a testing temperature and film thickness are grouped for the proper compaction conditions in the testing results, the compaction performance of each WMA additive can be more clearly discriminated in the grouped testing results matched with the grouped conditions.

### Keywords

*lubrication, asphalt, WMA, additive, film thickness, compaction temperature, compactability, LEADCAP, sasobit*

Corresponding Author : Cho, Dong-Woo, Senior Researcher  
Highway Pavement Research Division, Korean 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

아스팔트 플랜트에서 아스팔트 혼합물이 생산될 때 윤활제 역할의 고온상태 아스팔트는 골재와 함께 섞이면서 골재 표면을 골고루 피복시킨다. 그리고 생산된 이 아스팔트 혼합물은 도로시공현장으로 운반되면서 생산 당시의 온도보다 약 20~30°C 떨어진다. 이렇게 떨어진

온도에서 머캐담롤러에 의해 도로포장 시공현장에서 1차 다짐이 수행되고, 계속적으로 온도가 떨어지는 동안에 머캐담, 타이어, 탄뎀롤러등에 의해 2차, 3차 다짐과정을 연속해서 가진다. 이처럼 1, 2, 3차로 이어지는 다짐작업을 수행하면서 점점 온도가 떨어지는 아스팔트는 골재사이에서 적절한 윤활작용을 하다가 다짐과정이 끝

나면 아스팔트 도로포장의 골재사이에서 연속성을 주는 구조체 역할의 바인더가 된다.

최근 도로포장 연구와 관련되어 전 세계적으로 도입 및 적용이 확산되는 추세인 저탄소 중온 아스팔트 포장은 생산과 다짐 시의 온도를 기존 가열 아스팔트 보다 약 30℃ 낮추는 기술이고, 에너지와 탄소배출 저감, 작업환경 개선 등 다양한 장점을 가지고 있는 도로포장기술이다(조동우 외, 2009; Brian D Prowell 외, 2012).

이처럼 경제적, 환경적인 장점을 가지고 있는 저탄소 중온 아스팔트 기술은 온도 저감이라는 기술의 특징으로 적용된 아스팔트 도로포장의 다짐이 저하되는 현상이 발생할 수 있고, 또한 이로 인해 다양한 포장문제를 일으키기가 쉽다는 단점도 있다. 특히 러팅, 수분민감성, 그리고 라벨링 등을 포함하는 조기포장파손의 80% 이상은 다짐부족 때문에 발생하는 것으로 밝혀졌다(Mohamed, EI Hussein H. 외, 1993; Liu, Honghai 외, 2007). 이러한 다짐부족 현상을 확인 방지하기 위해서는 중온화 첨가제를 적용한 중온 아스팔트의 다짐 특성 평가, 중온화 첨가제를 적용하기 위한 아스팔트 혼합물 배합설계의 평가, 그리고 아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 시 적절한 다짐을 유지하기 위한 생산 및 다짐 온도관련 품질관리 평가가 병행되어야 한다.

본 연구는 이 같은 다짐특성과 관련된 평가 중 중온화 첨가제를 적용한 중온 아스팔트의 다짐특성을 비교, 평가하는 내용을 담고 있다. 본 연구를 수행하기 위해 동적 전단 유동기(Dynamic Shear Rheometer)을 이용한 Stress Sweep 시험을 수행해 Sasobit과 LEADCAP 2종류의 중온화 첨가제를 적용한 저탄소 중온 아스팔트의 선형 점탄성 복소탄성계수( $G^*$ , 본 논문에서 복소탄성계수는 선형 점탄성 복소탄성계수를 의미함)와 선형 점탄성 한계점(Linear Visco-Elastic Limit(LVE) Limit)을 비교 분석해 적용한 중온화 첨가제들의 윤활특성을 평가했다. 그리고 적용한 2가지 실험 온도와 3가지 피막두께 중 1차, 2차 다짐조건 가정에 해당하는 짝을 정해 실험한 결과들을 다시 정리한 후, 1, 2차 다짐조건 별 중온화 첨가제의 다짐특성 분석을 시도했다. 이런 과정을 통해 얻은 두 가지 결론은 다음과 같다.

1. 골재와 아스팔트 접촉면의 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점은 중온화 첨가제 종류, 아스팔트의 피막두께, 그리고 적용 온도에 따라 복합적인 영향을 받지만, 복소탄성계수는 1차 다짐온도보다 2차 다짐온도에서 피막두께에 민감하고, 선형 점탄성

한계점은 1차 다짐온도에서 더 민감하다.

2. 본 연구의 실험 결과를 정해진 다짐조건에 따라 한 쌍씩 짝지어(다짐온도, 다짐온도별 피막두께) 분류하면 적용하는 중온화 첨가제의 다짐특성을 좀 더 명확하게 확인할 수 있다.

그럼 지금부터 이러한 결론을 얻게 된 윤활특성 평가 실험에 대해 알아보기로 한다.

## 2. 윤활특성 평가 실험

### 2.1. 온도변화에 따른 윤활특성 평가 실험재료

#### 2.1.1. 골재 디스크

중온화 첨가제의 윤활특성 평가를 수행하기 위해 고안한 실험방법은 골재 디스크를 아스팔트 시료의 접촉 재료로 사용하는 Stress Sweep 시험법이다. 이 실험을 위해 아스팔트 혼합물용 화강암 골재를 세라믹 가공업체에 의해 직경 25mm, 높이 5mm의 형태로 가공했다. 또한 이처럼 디스크 형태로 가공한 골재에 연마재를 분사해 표면을 거칠게 만드는 샌드 블라스트 가공을 함으로써 실제 골재의 거칠기를 구현했다(조동우 외, 2012). 이처럼 세라믹 가공 후 샌드 블라스트 가공처리를 한 화강암 골재 디스크의 모습은 Fig. 1의 (a)에서 볼 수 있다. 본 연구에서 골재 디스크는 골재 표면 거칠기의 특성이 잘 나타나는 화강암 한 종류로 고정했다.

#### 2.1.2. 윤활제로서의 아스팔트 바인더

본 연구에서 사용하는 아스팔트는 국내 S사에서 제조되는 PG64-22 공용등급의 AP-5 한 종류만 적용했다. 아스팔트는 고온 또는 중온에서 아스팔트 혼합물 골재의 맞물림을 용이하게 해 다짐을 극대화 시키는 윤활제 역할을 하고 상온에서는 골재사이를 연결시키는 바인더 역할과 골재를 보호하는 피복제 역할을 한다. 본 연구에서는 윤활제 역할을 하는 아스팔트의 특성에 초점을 맞춘 실험을 진행했다. 고온 또는 중온에서 윤활제 역할을 하는 아스팔트는 반고체 윤활제인 그리스와 유사한 기능을 수행한다. 그리스는 기유(base oil)와 첨가제의 혼합물인 윤활유에 증주제(thickener)를 분산시켜 유동성을 최대한 억제한 반고체, 또는 연한 고체상으로 제조한 윤활제이다. 소량 사용과 안정적인 유막유지를 요구하는 작업조건에 적합한 그리스는 결국 아스팔트 혼합물 무게 대비 5%의 소량으로 골재 피복 및 윤활 역할을 수행해야 하는 아스팔트와 유사한 역할을 하고 있는 것이다.

### 2.1.3. 윤활보조제로서의 중은화 첨가제

본 연구의 주요 실험재료이자 실험결과에 영향을 미치는 주요 인자인 중은화 첨가제는 최근 한국건설기술 연구원에서 개발한 왁스형 중은화 첨가제인 LEADCAP과 남아프리카 공화국 Sasol Wax사의 Sasobit 두 종류를 선정했다. 그리고 AP-5 아스팔트 질량의 1.5%만큼 첨가제를 적용한 중은 아스팔트를 사용해서 실내 실험을 수행했다. Fig. 1의 (b)는 LEADCAP 첨가제를, 그리고 Fig. 1의 (c)는 Sasobit 첨가제를 보여주고 있다. LEADCAP과 Sasobit은 폴리에틸렌 왁스가 주 성분이기 때문에 아스팔트의 윤활특성을 강화하는 윤활보조제의 역할을 수행하는 물질이 된다. 다음은 지금까지 설명한 실험재료를 사용해서 온도변화에 따른 윤활특성을 평가하는 시험인 Stress Sweep 시험에 대해 알아본다.

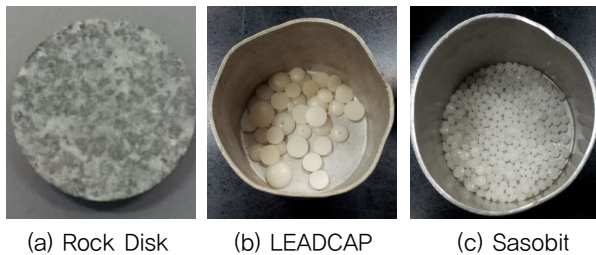


Fig. 1 Testing Materials

### 2.2. 골재와 아스팔트 접촉면의 윤활특성 평가실험

일반적으로 아스팔트 혼합물 생산 및 다짐에 적용하는 온도를 정할 때 온도와 점도의 상관관계를 이용해서 정하는 경우가 많다. 그러므로 점도는 아스팔트의 작업성을 추정할 수 있는 하나의 지표가 된다(Airey, Gordon D, 2008). 이 점도는 아스팔트에 가해진 전단응력에 따른 비틀림 변형 비를 나타내는 복소탄성계수와 밀접한 상관관계가 있고, 또한 아스팔트의 회복 가능한 비틀림 변형 한계점과 관련 있는 선형 점탄성 한계점과도 관계가 있다. 그래서 점도가 낮은 아스팔트는 전단강도가 떨어지고, 연해져서 물이나 기름 같은 미끄러운 성질이 발현하기 때문에 작업성이 좋아지는 원인이 된다. 여기서 중은화 첨가제의 시험온도에 따른 윤활특성을 평가 분석하기 위해, 아스팔트의 점탄성 거동을 측정, 분석하는 장비인 동적 전단 유동기에 골재 디스크를 부착하고, 골재 디스크 사이에 직경 25mm, 두께 1mm 디스크 형태의 표준 아스팔트 시료에 시간의 흐름과 함께 전단응력을 점점 증가시키는 Stress Sweep 시험을 수행했다. 본 연구의 Stress Sweep 시험을 수행하기 위해 사용된 DSR 장비는 영국 TA Instrument사의

AR 1500EX 이다.

Stress Sweep 시험은 아스팔트 시료에 정해진 주기에 따라 Fig. 2의 위쪽 그래프처럼 진동을 주는 회전토크의 크기를 증가시켜 증가되는 전단응력과 그에 따른 전단 비틀림의 두 진폭 비율인 복소탄성계수( $G^*$ )를 측정하는 시험이다. 이 시험의 결과인 전단응력과 복소탄성계수 그래프를 통해 아스팔트 시료의 점탄성반응을 선형영역과 비선형영역으로 구분할 수가 있다.

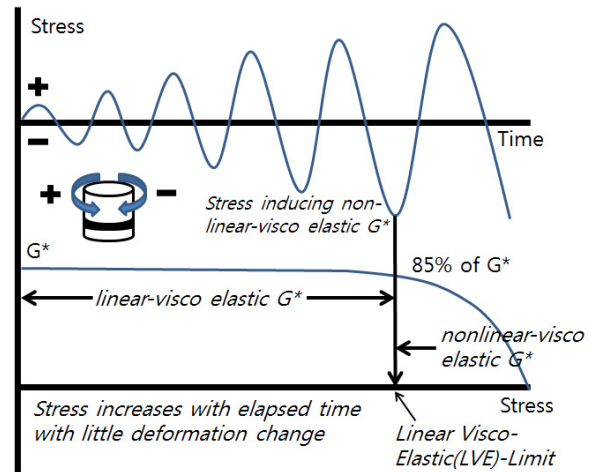


Fig. 2 Concept of Stress Sweep Test and LVE-Limit

Fig. 2의 아래쪽 그래프에서 직선형태를 보이는 곳이 선형 점탄성 영역이고, 포물선 모양으로 손실되는 형태를 보이는 곳이 비선형 점탄성 영역이다. 여기서 선형과 비선형 점탄성 영역을 구분하는 전단응력 값은 보존된 복소탄성계수가 15% 손실된 곳(복소탄성계수의 85% 값)으로 정한다. 그리고 선형과 비선형 점탄성 영역을 구분하는 전단응력값을 선형 점탄성 한계점(LVE Limit)으로 정한다(조동우, 2007).

본 실험은 DSR Moisture Damage 실험법(조동우, 2007, 2008)을 차용한 국내 아스팔트와 골재사이의 접촉성질에 관한 연구(유인상, 2009)의 실험준비방법을 따랐다. 본 실험이 상기 문헌의 실험과 다른 점은 적용한 온도가 110℃와 80℃라는 점이다.

본 실험준비 절차는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 샌드 블라스트 가공한 화강암 디스크에 Fig. 3의 (a)처럼 에폭시를 묻히고 Fig. 3의 (b)처럼 DSR 장비 위에서 세팅을 한다. 가공한 화강암 디스크와 DSR 장비를 잘 연결시키기 위해 사용한 에폭시가 양생(Fig. 3의 (c))되기를 기다린 후 Fig. 3의 (d)처럼 Stress Sweep 시험용 아스팔트 시료를 세팅한다.

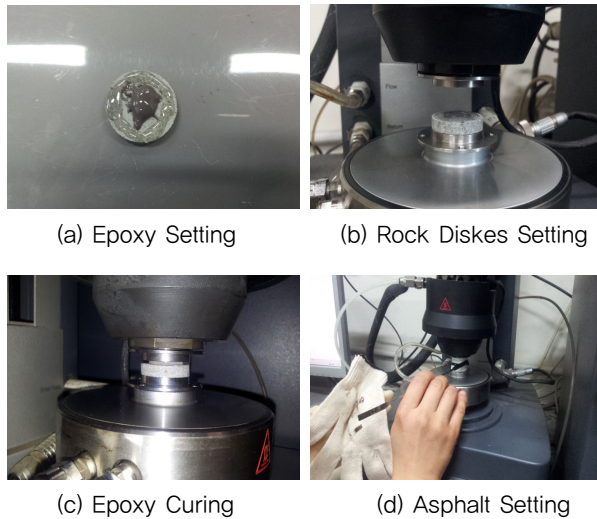


Fig. 3 Preparation of Stress Sweep using Rock Disks

### 2.3. 윤활특성 시험의 주요 실험인자와 실험계획

지금까지 골재와 아스팔트 접착면의 윤활특성을 평가하기 위해 아스팔트의 선형, 비선형 점탄성 영역의 거동과 물성(복소탄성계수, 선형 점탄성 한계점)을 분석하는 Stress Sweep 시험과 이 시험에 사용하는 재료관련 세팅절차를 살펴보았다. 여기서는 윤활특성을 평가하는 실험에서 실제 아스팔트 혼합물의 성능이나 거동에 가장 영향을 주는 주요 실험 인자들과 이러한 실험인자들을 포괄하는 전체적인 실험계획을 들여다보기로 한다.

#### 2.3.1. 다짐온도

최근 미국 중온 아스팔트의 다짐도와 관련된 연구에서 제안된 주요 내용 중의 하나는 다짐온도에 따른 민감성 평가이다. 조금 더 상세히 설명하면 중온 아스팔트 기술은 중온화 아스팔트 첨가제 종류나 중온 아스팔트 생산 장비에 따라 시간과 함께 점점 감소되는 다짐 온도에 의한 영향이 각각 다르다는 것이다(Ramon Bonaquist, 2011). 그리고 이러한 연구결과는 NCHRP 691 보고서에 수록된 AASHTO R 35의 수정안에 있는 현장 다짐 온도와 현장 다짐온도보다 30℃ 낮은 온도의 상대밀도 평가 항목에 반영되어 있다. 본 연구도 이러한 미국 다짐온도관련 연구내용과 표준 수정안 내용에 따라 다짐 온도를 주요 인자중의 하나로 선정하고 다짐온도 110℃와 이보다 30℃ 낮은 온도인 다짐온도 80℃ 두 종류의 다짐온도에서 Stress Sweep 시험을 수행했다.

#### 2.3.2. 피막두께

80℃와 110℃ 같은 높은 온도에서 시험을 수행하면

기존 1mm 두께를 사용한 아스팔트 시료는 Stress Sweep 시험도중 액상화가 진행되기 때문에, 시험을 수행하기도 전에 다 흘러내릴 것이다. 또한 다짐특성과 관련된 평가를 위해서는 골재 디스크가 주는 마찰력도 고려해야 하기 때문에, 아스팔트의 유연화적인 특성과 골재의 마찰 특성이 동시에 나타나는 아스팔트 피막두께를 본 연구를 위한 주요 인자로 선정했다. 본 실험을 위해 결정된 피막두께는 아스팔트 바인더가 흘러내리지 않는 정도의 얇은 0.1, 0.2, 그리고 0.3mm이다.

#### 2.3.3. 실험계획

본 실험에서 적용한 실험재료 및 실험인자, 그리고 실험반복 횟수를 정리한 실험계획은 Table 1과 같다.

실험계획에 대한 내용을 정리해보면, 사용한 재료로서 아스팔트 시료가 접촉하는 물질로 샌드 블라스트 가공한 화강암 골재 디스크를 사용했고, 이처럼 화강암 한 종류만 사용했기 때문에 아스팔트 접촉 재료는 실험결과에 영향을 주는 재료와 관련된 실험인자가 되지 않는다. 중온화 첨가제를 적용하기 위한 스트레이트 아스팔트 바인더 또한 PG64-22등급인 AP-5 한 종류를 사용했기 때문에 결과에 영향을 주는 재료 관련 실험인자가 될 수 없다.

Table 1. Experimental Plan

| Interfacing Materials            | Base Materials | Testing Temp. | WMA Additives | Film Thick. | Replicates |
|----------------------------------|----------------|---------------|---------------|-------------|------------|
| Sand Blasted Rock Disk (Granite) | AP-5 (PG64-22) | 110℃          | None          | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |
|                                  |                |               | LEADCAP 1.5%  | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |
|                                  |                |               | Sasobit 1.5%  | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |
|                                  |                | 80℃           | None          | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |
|                                  |                |               | LEADCAP 1.5%  | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |
|                                  |                |               | Sasobit 1.5%  | 0.1mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.2mm       | 3          |
|                                  |                |               |               | 0.3mm       | 3          |

\*Temp.: Temperatures, Thick: Thicknesses

본 연구의 주요 재료이면서 결과에 영향을 주는 주요 실험인자인 중온화 첨가제 LEADCAP과 Sasobit을 스트레이트 아스팔트 AP-5에 이 AP-5 무게의 1.5% 만큼 각각 혼입해서 중온 아스팔트를 만들었다. 또한 이미 설명을 한 것처럼 주요 실험인자인 다짐온도 변화에 따른 민감도 평가를 위해 실제 현장 다짐온도에 근간을 둔 실험온도인 110℃와 80℃ 두 종류의 실험온도를 적용했고, 골재의 마찰과 아스팔트 바인더의 유변학적 특성 또는 유힬특성을 복합적으로 반영하는 또 다른 주요 실험인자인 피막두께를 0.3, 0.2, 그리고 0.1mm로 줄여가면서 3번씩 반복했다.

다음은 지금까지 설명한 실험계획과 Stress Sweep 시험법을 사용해서 실험한 결과들에 대한 내용과 그 결과들을 분석 평가한 내용을 살펴보고자 한다.

### 3. 온도에 따른 중온화 첨가제 유힬특성 결과

본 연구의 실험결과인 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점을 통해 중온화 첨가제의 유힬특성을 확인할 수 있다. 이미 앞에서 설명을 한 것처럼 복소탄성계수는 아스팔트의 선형 점탄성 영역의 전단 응력과 전단 비틀림 변형의 관계를 나타내는 값이고, 선형 점탄성 한계점은 선형 점탄성 영역에서 비선형 점탄성 영역이 시작하는 전단 응력 값, 즉 아스팔트의 회복 가능한 비틀림 변형의 한계점을 나타낸다. 그러므로 여기서 복소탄성계수는 선형 점탄성 영역을 대표하는 결과이고, 선형 점탄성 한계점은 비선형 점탄성 영역을 대표하는 결과로 가정을 하고 분석할 것이다.

#### 3.1. 복소탄성계수를 통해 본 유힬특성

본 연구의 실험계획인 Table 1에 따라 각 조합별로

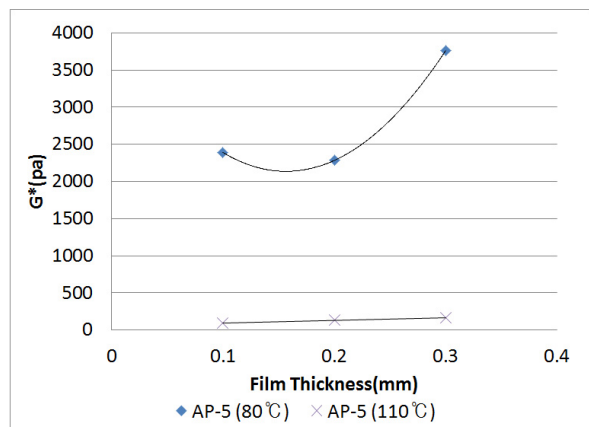


Fig. 4 G\* vs Film Thickness Graph of AP-5

Stress Sweep 시험 후 구한 각 조합별 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점 결과 값은 Table 2에 정리되어 있다. 여기서 중온화 첨가제를 섞은 중온 아스팔트의 온도 변화에 따른 복소탄성계수를 살펴보기 전에, Fig. 4처럼 첨가제를 섞지 않은 스트레이트 아스팔트 AP-5의 실험 결과를 살펴볼 필요가 있다. AP-5의 시험결과는 Table 2에서 확인할 수 있듯이 110℃ 실험온도에서 0.3mm는 164Pa, 0.2mm는 131Pa, 그리고 0.1mm는 98Pa 결과가 나왔고, 80℃ 실험온도에서 0.3mm는 3,761Pa, 0.2mm는 2,284Pa, 0.1mm는 2,391Pa 결과가 나왔다.

이 결과에서 80℃ 온도에서의 AP-5는 110℃ 온도에서의 AP-5보다 피막두께에 따른 민감도가 높은 것을 확인할 수 있다. 여기서 비교적 높은 110℃ 온도에서의 AP-5는 피막두께에 따른 값의 변화가 거의 없다. 그러나 80℃ 온도에서의 AP-5는 피막두께에 따른 결과 값이 110℃ 온도의 결과보다 크면서도 각 피막두께별 차이가 확연하게 보이고 있다. 특히 0.3mm에서 0.2mm로 피막두께가 변할 때 약 2배정도 값의 감소가 발생했고, 0.2mm에서 0.1mm로 피막두께가 변할 때 값의 변화가 거의 없는 것으로 보아 0.2mm 피막두께부터 골재 표면 마찰 특성과 아스팔트의 유힬특성이 아스팔트와 골재 접촉면의 물성에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 온도별로 나타나는 결과 값의 경향 차이가 AP-5에 중온화 첨가제를 혼입한 중온 아스팔트 시료에는 어떻게 발생하는지 Fig. 5에서 비교 확인해 보기로 한다.

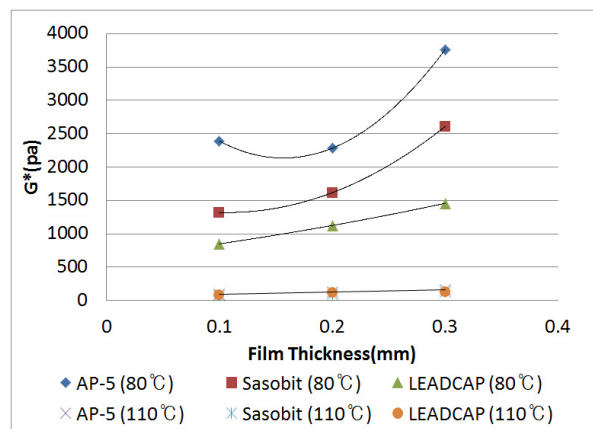


Fig. 5 G\* vs Film Thickness Graph of Samples

Fig. 5의 그래프에서 AP-5와 AP-5에 중온화 첨가제 LEADCAP과 Sasobit을 1.5% 혼입한 80℃의 결과 값들의 차이는 확연하게 보이고 있다. 그러나 이 복소탄성계수의 스케일 안에서 각 중온화 첨가제를 사용한 시료의 110℃ 결과 값들은 거의 차이를 확인할 수 없을 정

Table 2. Results of Stress Sweep Test at 110°C

| Testing Materials |           |             | AP-5         |                 |                | AP-5 + LEADCAP 1.5% |                 |                | AP-5 + Sasobit 1.5% |                 |                |
|-------------------|-----------|-------------|--------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|----------------|
| Testing Factors   |           |             |              |                 |                |                     |                 |                |                     |                 |                |
| Temperature       | Thickness | Replicate   | LVE G* (Pa)  | 85% LVE G* (Pa) | LVE Limit (Pa) | LVE G* (Pa)         | 85% LVE G* (Pa) | LVE Limit (Pa) | LVE G* (Pa)         | 85% LVE G* (Pa) | LVE Limit (Pa) |
| 110°C             | 0.1mm     | 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         |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>98</b>    | <b>83</b>       | <b>20,083</b>  | <b>88</b>           | <b>75</b>       | <b>17,947</b>  | <b>71</b>           | <b>61</b>       | <b>16,103</b>  |
|                   |           | SD          | 10           | 7               | 6,247          | 12                  | 11              | 14,638         | 14                  | 11              | 872            |
|                   | 0.2mm     | 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         |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>131</b>   | <b>112</b>      | <b>28,077</b>  | <b>119</b>          | <b>101</b>      | <b>30,860</b>  | <b>99</b>           | <b>85</b>       | <b>23,530</b>  |
|                   |           | SD          | 8            | 6               | 8,610          | 12                  | 10              | 4,425          | 15                  | 13              | 4,300          |
|                   | 0.3mm     | 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          |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>164</b>   | <b>140</b>      | <b>20,807</b>  | <b>124</b>          | <b>106</b>      | <b>977</b>     | <b>134</b>          | <b>113</b>      | <b>8,080</b>   |
|                   |           | SD          | 7            | 7               | 6,778          | 35                  | 30              | 577            | 18                  | 16              | 1,818          |
| 80°C              | 0.1mm     | 1           | 3,656        | 3,103           | 17,110         | 684.9               | 584             | 6,211          | 1,397               | 1,193           | 9,843          |
|                   |           | 2           | 1,535        | 1,321           | 10,790         | 595.4               | 509.8           | 8,187          | 1,324               | 1,136           | 6,810          |
|                   |           | 3           | 1,982        | 1,678           | 12,980         | 1267                | 1,083           | 10,790         | 1,242               | 1,061           | 8,977          |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>2,391</b> | <b>2,034</b>    | <b>13,627</b>  | <b>849</b>          | <b>726</b>      | <b>8,396</b>   | <b>1,321</b>        | <b>1,130</b>    | <b>8,543</b>   |
|                   |           | SD          | 1,118        | 943             | 3,209          | 365                 | 312             | 2,297          | 78                  | 66              | 1,562          |
|                   | 0.2mm     | 1           | 2,712        | 2,323           | 12,980         | 95,436              | 815.3           | 3,674          | 1,732               | 1,480           | 6,810          |
|                   |           | 2           | 2,147        | 1,821           | 8,187          | 960.1               | 817.8           | 7,467          | 1,551               | 1,314           | 9,843          |
|                   |           | 3           | 1,993        | 1,712           | 6,810          | 1,460               | 1,247           | 7,467          | 1,568               | 1,330           | 8,977          |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>2,284</b> | <b>1,952</b>    | <b>9,326</b>   | <b>1,125</b>        | <b>960</b>      | <b>6,203</b>   | <b>1,617</b>        | <b>1,375</b>    | <b>8,543</b>   |
|                   |           | SD          | 379          | 326             | 3,239          | 290                 | 249             | 2,190          | 100                 | 92              | 1,562          |
|                   | 0.3mm     | 1           | 4,231        | 3,554           | 9,843          | 1,350               | 1,152           | 5,664          | 2,493               | 2,123           | 2,473          |
|                   |           | 2           | 3,172        | 2,720           | 6,211          | 1,227               | 1,041           | 5,664          | 2,456               | 2,095           | 2,473          |
|                   |           | 3           | 1,879        | 3,290           | 6,810          | 1,792               | 1,522           | 4,711          | 2,873               | 2,450           | 2,711          |
|                   |           | <b>Ave.</b> | <b>3,761</b> | <b>3,188</b>    | <b>7,621</b>   | <b>1,456</b>        | <b>1,238</b>    | <b>5,346</b>   | <b>2,607</b>        | <b>2,223</b>    | <b>2,552</b>   |
|                   |           | SD          | 539          | 426             | 1,947          | 297                 | 252             | 550            | 231                 | 197             | 138            |

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

도로 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이 결과는 중온 아스팔트 시공 초기에 적용하는 다짐온도에서는 각 중온화 첨가제의 특성을 확인할 수 있을만한 변별력을 제대로 줄 수 없다는 증거를 보여주고 있는 것이다.

이 내용을 다시 한 번 확인한다면, Table 2에 정리되어 있는 실제 값인 110°C, 0.3mm의 LEADCAP을 적용한 중온 아스팔트의 복소탄성계수값은 124Pa이고 Sasobit을 적용한 복소탄성계수값은 134Pa로 AP-5의 164Pa보다 각각 40Pa과 30Pa 만큼 작은 값을 보이고

있다. 이 결과도 수치상으로는 LEADCAP < Sasobit < AP-5 순으로 복소탄성계수값의 순위를 정할 수가 있고 결과적으로 LEADCAP이 가장 낮은 값으로 점도를 낮추는 효과가 가장 높은 것으로 생각할 수는 있다. 그러나 110°C 온도에서 30-40Pa이라는 너무나도 작은 값의 차이는 중온화 첨가제가 이 온도에서 실질적으로 아스팔트의 점도를 낮추어 주고 이로 인해 골재 사이에서 윤활 효과를 준다는 증거가 될 수는 없다.

미국 NCHRP에서 수행한 순환골재를 적용한 중온 아스팔트 관련 연구에서도 저탄소 중온화 첨가제를 적용하

는 다짐온도에서 다짐정도를 확인하기가 힘들다는 연구 결과가 나왔다. 이 연구의 내용은 다양한 중온화 첨가제를 사용한 아스팔트 혼합물의 127℃와 102℃의 상대 다짐도를 비교하면 127℃보다는 102℃에서 민감도가 더 높고, 결국 낮은 온도에서 저탄소 중온화 첨가제별 성능 차이를 보인다는 것이다(Ramon Bonaquist, 2011).

이미 앞에서 언급한 것처럼 미국 NCHRP의 연구결과와 유사하게, 본 연구에서도 적용한 첨가제들의 결과 값의 차이가 크게 나타나는 80℃가 미미한 결과 값의 차이를 보이는 110℃보다 더 좋은 변별력을 제공하는 실험온도인 것으로 판명되었다. 그리고 80℃ 온도에서도 110℃ 온도와 유사하게 LEADCAP < Sasobit < AP-5 순으로 복소탄성계수값의 순위가 정해졌다. 또한 0.1mm, 0.2mm, 그리고 0.3mm 모든 피막두께영역에서 LEADCAP이 가장 낮은 복소탄성계수값을 보이면서 점도를 낮추어주는 효과가 가장 높은 것으로 나타났다.

지금까지는 아스팔트 시료에 가해지는 전단 응력과 그에 응답하는 전단 비틀림 변형이 일정한 값을 가진 복소탄성계수로 표현된 선형 점탄성 영역에 적용할 수 있는 실험결과들을 확인해 보았다. 이제부터는 이러한 선형 점탄성 영역을 벗어나 아스팔트 시료가 고유의 선형 점탄성 성질을 잃게 될 정도로 크게 변형되거나 파손되는 영역인 비선형 점탄성 영역에서도 이러한 결과가 나타나는지 확인해보도록 한다.

### 3.2. 선형 점탄성 한계점을 통해 본 윤택특성

복소탄성계수를 비교할 때 중온화 첨가제를 섞지 않은 기본 재료인 스트레이트 아스팔트 AP-5의 온도별 결과 차이를 확인한 것처럼, 비선형 점탄성 영역의 거동을 확인하는 Stress Sweep 시험의 결과인 선형 점탄성 한계점도 110℃와 80℃에서 비교해 보았다. Fig. 6은 AP-5의 피막두께별 110℃와 80℃의 선형 점탄성 한계점을 보여주는 그래프이다. 이 그래프는 Table 2에서 값을 확인할 수 있는데, 110℃ 온도의 경우 0.3mm에서 0.1mm까지 20,807Pa, 28,077Pa, 그리고 20,083Pa로 0.2mm에서 값이 증가했다가 다시 0.1mm에서 줄어드는 결과가 나왔다. 이는 0.2mm에서 골재 사이에 발생하는 마찰과 아스팔트 피막의 접착력이 복합되어 가장 큰 값이 나온 것으로 판단된다. 그리고 0.1mm에서는 아스팔트 피막의 접착력 보다는 윤택성질이 조금 더 영향을 미치면서 값이 떨어진 것으로 추정할 수 있다. Fig. 6의 그래프에서 80℃ 온도의 경우에는 110℃ 온도와는 달리 피막두께가 감소하면서 점점 선형 점탄성 한

계점이 커지는 것을 확인할 수가 있다.

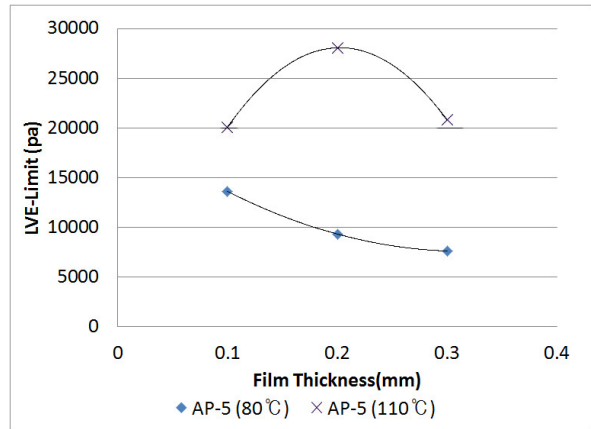


Fig. 6 LVE-Limit vs Film Thickness of AP-5

이처럼 온도별로 나타나는 선형 점탄성 한계점의 경향 차이가 AP-5에 중온화 첨가제를 혼합한 중온 아스팔트 시료에는 어떻게 발생하는지 비교확인하기 위해 Fig. 7과 같은 그래프를 그려보았다. 역시 Fig. 6과 유사한 형태의 온도별 그래프 결과가 나왔지만, 적용한 중온화 첨가제에 따라 피막두께와 온도별로 다른 결과가 나왔음을 확인할 수 있다. Table 2를 통해 확인해보면 110℃에서는 0.3mm 피막두께에서 LEADCAP이 977Pa로 가장 낮은 선형 점탄성 한계점을 보였고 이는 8,080Pa의 Sasobit보다 거의 9배는 낮은 값을 보인다.

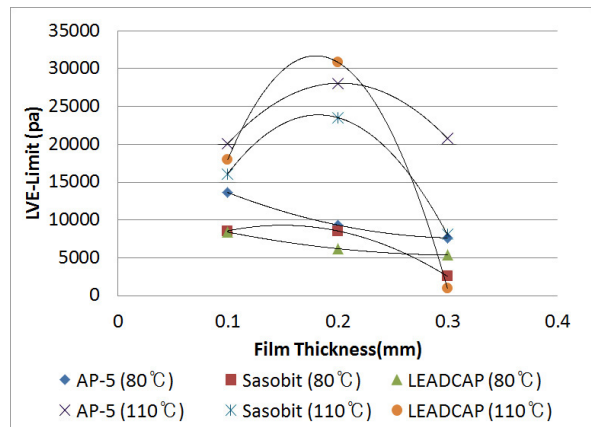


Fig. 7 LVE-Limit vs Film Thickness of Samples

그러나 0.2mm 피막두께에서는 Sasobit이 23,530Pa 그리고 LEADCAP이 30,860Pa로 Sasobit이 LEADCAP보다 조금 더 낮은 값을 보이고, 0.1mm에서는 LEADCAP이 17,949Pa 그리고 Sasobit이 16,103Pa로 Sasobit의 값이 약간 낮지만 LEADCAP과 거의 유사한 값을 보였다.

80℃ 온도에서는 0.3mm 피막두께에서 2,552Pa의 Sasobit이 5,346Pa의 LEADCAP보다 약 절반정도의 선형 점탄성 한계점을 보였고, 0.2mm에서 8,543Pa의 Sasobit이 6,203Pa의 LEADCAP보다 약 38% 높은 선형 점탄성 한계점을 보였으며, 0.1mm에서 Sasobit은 8,543Pa 그리고 LEADCAP은 8,396Pa로 두 재료의 선형 점탄성 한계점 값은 거의 유사하다.

우선 온도 110℃와 80℃의 선형 점탄성 한계점 값을 비교하면 0.1mm의 얇은 피막두께에서 LEADCAP과 Sasobit 둘 다 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 이는 0.1mm정도 되는 얇은 피막에서는 골재사이의 접촉 거칠기와 마찰이 거의 최대로 발현되면서 Sasobit과 LEADCAP 중온화 첨가제의 아스팔트 운할성질에 대한 영향이 거의 미치지 않아 나온 결과인 것으로 사료된다. 전체적인 경향을 살펴보면 110℃의 결과들이 80℃의 결과들보다 낮은 선형 점탄성 한계점을 보이고, 또한 110℃의 피막두께에 따른 민감도는 80℃보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 낮은 점도에 의해 골재 사이 거칠기의 영향이 크게 나타났기 때문으로 고려된다. 피막두께와 온도별 결과를 조금 더 살펴보면, 0.2mm 피막두께 110℃ 온도의 결과에서는 Sasobit이 LEADCAP 보다 낮은 선형 점탄성 한계점을 보이는 반면에 80℃에서는 LEADCAP이 더 낮은 한계점 값을 보이고 있다. 0.3mm 피막두께에서는 이와는 반대로 110℃의 LEADCAP이 Sasobit보다 훨씬 낮은 값을 보이고 있고, 80℃의 LEADCAP이 Sasobit보다 큰 값을 보인다.

지금까지 각 중온화 첨가제를 적용한 아스팔트 시료의 결과값인 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점에 대해 설명했다. 선형 점탄성 한계점은 복소탄성계수와는 달리 피막두께와 실험온도에 따라 서로 결과가 교차하면서 일관적이지 않은 결과를 보여주고 있기 때문에 다른 관점에서의 설명이 필요하다. 이를 위해 지금부터는 1차 다짐과 2차 다짐 시의 온도와 피막두께를 각각 가정 한 후 이 다짐조건별 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점들을 다시 정리해서 각 중온화 첨가제의 다짐특성을 분석하기로 한다.

### 3.3. 중온화 첨가제의 다짐특성 분석

아스팔트 혼합물이 적절한 내구성과 탄성을 가지기 위해 반드시 거쳐야 하는 작업은 바로 다짐이다. 이 다짐을 통해 아스팔트 혼합물은 차량이 통행할 수 있고, 또한 부드러운 승차감도 구현되는 아스팔트 도로포장 구조물로 탈바꿈 된다. 도로포장 시공 시 일반 가열 아

스팔트 혼합물은 3번의 다짐작업을 거쳐야 하고, 각 다짐작업별로 적용하는 다짐온도가 다르다. 국토해양부 지침에 의하면 1차다짐은 140~160℃, 2차다짐은 120~145℃의 다짐온도를 적용하며, 3차다짐은 60~100℃의 다짐온도를 적용하도록(국토해양부, 2009) 지시하고 있다. 또한 이와 유사하게 저탄소 중온 아스팔트도 중온화 첨가제 종류에 따라 다른 각 다짐별 추천 다짐온도를 적용하게 되어있지만, 3차 다짐온도를 제외하고(일반 가열 아스팔트 다짐온도와 같음) 일반 가열 아스팔트 혼합물 1, 2차 다짐온도보다 약 30℃ 낮은 범위의 온도를 적용할 것을 규정하고 있다(국토해양부, 2011).

본 연구에서 적용한 온도 110℃와 80℃는 저탄소 중온 아스팔트의 1차, 2차 다짐을 대표할 수 있는 범위에 있는 온도이고, 이러한 온도가 실제 시공에서 적용하는 1차, 2차 다짐온도라는 가정을 하고, Stress Sweep 시험에 의한 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점을 다짐 온도별로 비교한 결과가 Fig. 8과 Fig. 9이다.

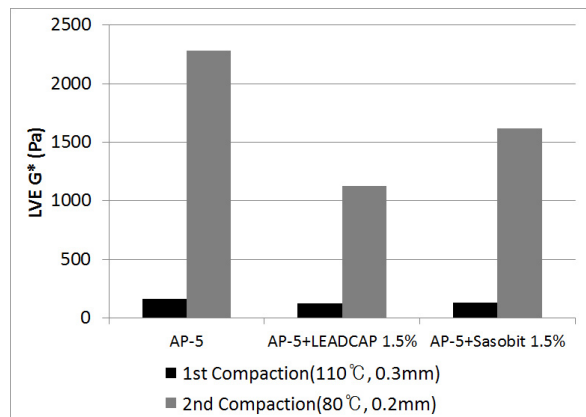


Fig. 8 LVE G\* Graphs of 1st and 2nd Compaction Conditions

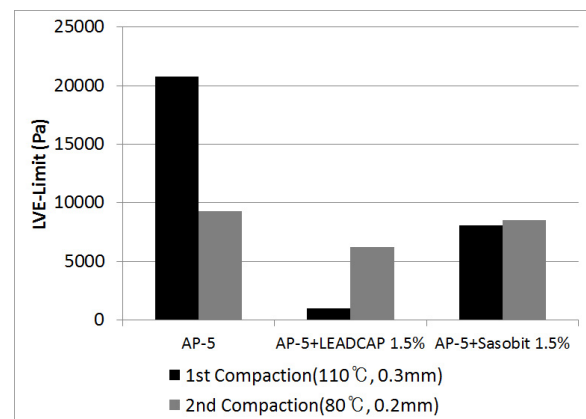


Fig. 9 LVE-Limit Graphs of 1st and 2nd Compaction Conditions



또한 Fig. 8과 Fig. 9의 그래프를 보면 1차, 2차 다짐의 온도에 각각 0.3mm, 0.2mm의 피막두께들도 표기를 했다. 이 피막두께는 다짐을 하면 밀도가 높아지고, 밀도가 높아지면 골재 사이 간격이 좁혀지며, 그에 따라 골재 사이에 붙어 있는 아스팔트 두께도 얇아진다는 상식적인 가정을 여기에 추가한 것이다. Fig. 8에서 1차 다짐조건(110℃, 0.3mm)시의 AP-5, AP-5 + LEADCAP 1.5%, 그리고 AP-5 + Sasobit 1.5%를 비교해보면 복소탄성계수값의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 그러나 2차 다짐조건(80℃, 0.2mm)시의 결과를 보면 AP-5가 가장 큰 복소탄성계수 값을 가지고 있고, LEADCAP을 적용한 중온 아스팔트가 가장 낮은 값을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 보면 1차 다짐온도 110℃보다는 2차 다짐온도 80℃에서 복소탄성계수 값의 차이가 보이면서 LEADCAP 첨가제를 적용한 중온 아스팔트의 다짐성질이 가장 높을 것이라는 예측을 쉽게 할 수 있다.

Fig. 9는 1차, 2차 다짐조건에서의 선형 점탄성 한계점 값을 비교하고 있다. 복소탄성계수 값을 비교한 Fig. 8의 그래프 결과와는 달리 1차 다짐조건에서 LEADCAP을 적용한 중온 아스팔트가 AP-5 그리고 Sasobit을 적용한 중온 아스팔트 보다 월등하게 낮은 값을 보이는 것으로 나타났다. 이 선형 점탄성 한계점 값이 낮다는 것은 그만큼 성질이 부드러움다는 것을 나타내고 역시 다짐성질이 좋다는 것을 반영하는 결과이다. 또한 2차 다짐조건의 결과도 1차 다짐조건 정도만큼 차이가 나지는 않지만 역시 LEADCAP을 적용한 중온 아스팔트가 Sasobit을 적용한 중온 아스팔트 보다 낮은 값을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

아스팔트는 고온 또는 중온에서 골재 사이의 마찰을 줄여 다짐성질을 높이는 윤활제의 역할을 그리고 중온화 첨가제는 윤활 보조제의 역할을 한다. 이런 윤활 성질과 가정된 다짐조건을 연결시켜 비교·분석하기 위한 Stress Sweep 시험을 적용했고, 이 시험을 통해 다짐 특성을 비교·분석한 결과의 요약과 결론은 다음과 같다.

1. 중온 아스팔트와 관련한 미국 NCHRP 연구 결과는 중온화 첨가제의 다짐특성을 확인하기 위해 일반 다짐온도보다 약 30℃ 낮은 온도를 적용하라는 것이다.
2. 일반 AP-5, AP-5+LEADCAP, 그리고 AP-5+Sasobit에 110℃ 시험온도를 적용한 복소탄성계

수 결과는 첨가제별 차이를 거의 확인할 수 없었다.

3. 2차 다짐온도인 80℃에서의 복소탄성계수는 110℃보다 피막두께에 민감하고, NCHRP 연구결과와 일치한다.
4. 선형 점탄성 한계점을 온도별로 비교한 결과 2차 다짐온도인 80℃보다 1차 다짐온도인 110℃가 피막두께에 민감한 결과가 나왔다. 그리고 피막두께에 따라 사용한 중온화 첨가제의 윤활특성이 일관적이지 않고 서로 엇갈리는 결과가 나왔다.
5. 이처럼 복소탄성계수와 선형 점탄성 한계점은 중온화 첨가제의 종류, 적용온도, 피막두께에 따라 다른 결과가 나오는 것을 확인할 수가 있다. 특히 선형 점탄성 한계점은 피막두께에 따라 서로 엇갈리는 결과가 나오기 때문에 다른 관점으로 보는 분석이 필요하다.
6. 110℃와 0.3mm를 1차 다짐조건으로 가정하고 80℃와 0.2mm를 2차 다짐조건으로 가정하면, 각 다짐조건과 복소탄성계수 그리고 선형 점탄성 한계점을 연결시켜 다짐특성을 확인하기 위한 분석이 가능하다.
7. 이러한 다짐특성 분석결과 LEADCAP이 1차 다짐조건과 그리고 2차 다짐조건에서도 다 Sasobit보다 우수한 성능을 보였다.
8. 이처럼 다짐온도와 피막두께를 한 쌍씩 비교·분석하면 피막두께의 급격한 민감도 변화로 인해 가려지는 중온화 첨가제의 다짐특성을 좀 더 명확하게 확인할 수 있다.
9. 본 연구는 재료의 실제 현장에 존재하는 거칠기를 반영하지 않았고, 또한 실제 다짐 시의 피막두께를 반영한 시험이 아니기 때문에 본 연구결과를 일반적인 현상이나 조건에 다 적용할 수는 없다.
10. 향후 연구과제로서 재활용 등 다른 기능을 가지고 있는 중온화 첨가제를 적용한 연구가 가능하고, 또한 실제 혼합물의 다짐도와 연결시켜 비교·분석하는 연구를 진행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업 재원으로 수행되었습니다.

#### References

- Airey, Gordon D, Mohammed, Musarrat H, Fichter, Caroline, 2008, Rheological characteristics of synthetic road binders, *Fuel*, Vol 87, Issues 10-11, pp.1763-1775
- 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, 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 중온 아스팔트 포장(WMA)의 기술현황", 도로학회지 제11권 2호, pp.20-25)
- Cho, Dong-Woo, Lee, Sang Jae, Kim, Yeong-Min, Lee, Jin Wook, Rhee, Suk Keun, Hwang, Sung Do, 2012, *A Study of Lubrication Effects of Warm-Mix Asphalt Additives under Film Thicknesses using DSR*, Conference Papers of Korean Society of Civil Engineers,
- Liu, Honghai, Yin Ran, Wu, Shaopeng, 2007, Reducing the compaction segregation of hot mix asphalt, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol 22, Issue 1, pp. 132-135
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, *Asphalt Pavement Production and Construction Guidelines*.  
(국토해양부, 2009, 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 지침)
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2010, *Low Carbon Warm-mix Asphalt Pavement Production and Construction Provisional Guidelines*.  
(국토해양부, 2010, 저탄소 중온 아스팔트 혼합물 생산 및 시공 잠정지침)
- Mohamed, El Hussein H., Halim, A.O. El Abd, Kennepohl, Gerhard J., 1993, Assessment of the influence of compaction method on asphalt concrete resistance to moisture damage, *Construction and Building Materials*, Vol 7, Issue 4, pp. 149-156
- Prowell, Brian D., Hurley, Graham C. , Frank, Bob, 2012, *Warm-Mix Asphalt: Best Practices 3rd Edition*, National Asphalt Pavement Association
- 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, pp.29-40
- 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 Engineers*, Vol.31, No.6D, pp.803-810  
(접수일 : 2013. 3. 18 / 심사일 : 2013. 3. 20 / 심사완료일 : 2013. 6. 24)