

(뒷면) (옆면)

(앞면)

3cm	09 기술 혁신 A01	4cm	건설교통기술연구개발사업 제2차년도 중간보고서(견고닥13p)
			3cm
			0.5cm 09기술혁신 A01
			2.5cm 9cm
			(견고닥31p) 5cm
			균열저항성을 높인 중온아스팔트포장 개질제 개발 연구보고서
			(0.1cm)
			2012 . 10 . 25 .
			0.15cm (견고닥15p)
			(별색바탕 : C50, M20, Y59, K0)
			주관연구기관 / (주) 뉴 페 이 브
			위탁연구기관 / 한국건설생활환경시험연구원 2cm
			(견고닥 15.5p)
			(백색바탕)
			국 토 해 양 부 한국건설교통기술평가원
			(견고닥 20p)
5cm	국 토 해 양 부 한국건설교통기술평가원 (견고닥 17p)	Land Transport and Maritime R&D Report (견고닥 25p)	
3cm			

제 출 문

국토해양부장관 귀하

이 보고서를 " 건설교통 기술연구개발 사업에 관한 연구"과제(일반과제 "균열저항성을 높인 중온아스팔트포장 개질제 개발에 관한 연구")의 보고서로 제출합니다.

2012 . 10 .

주관연구기관명 : (주) 뉴 페 이 브

주관연구책임자 : 허 정 도 외5명

위탁연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원

위탁연구책임자 : 남 궁 연 외4명

보고서 요약서

과제고유번호		해 당 단 계 연구 기 간	2010. 10. ~ 2012. 10.	단 계 구 분	3차년도
연구 사업 명	중 사업 명	건설교통기술연구개발사업			
	세부사업명	건설핵심기술사업 일반과제			
연구 과제 명	대 과 제 명				
	세부과제명	균열저항성을 높인 중온 아스팔트포장 개질제 개발에 관한 연구			
연구 책임 자	허 정 도	해당단계 참 여 연구원수	총 : 11명 내부 : 8명 외부 : 3명	해당단계 연구 비	정부:313,000천원 기업:109,334천원 계 :422,334천원
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 17명 내부 : 8명 외부 : 9명	총연구비	정부:770,000천원 기업:276,668천원 계:1,046,668천원
연구기관명 및 소속 부서	(주) 뉴 페 이 브		참여기업명	(주) 뉴페이브 (주)삼우공간건축사사무소	
국제공동연구	상대국명 :			상대국연구기관명 :	
위탁연구	연구기관명 : 한국건설생활환경시험연구원			연구책임자 : 남 궁 연	
요약: 아스콘생산 중에 발생하는 공해문제를 없애고 생산연료를 절약하고 교통개방시간을 단축하기 위해 다양한 화합물이 첨가된 일반중온 및 개질중온 아스팔트 시편을 제조함. 함량과 온도를 변화시키며 점도를 측정하고, 측정 데이터의 새로운 분석기법을 개발함. 이 기법을 통해 새로운 최적의 일반 및 개질 중온 첨가제들을 개발함. 개발된 일반 및 개질중온 혼합물시편을 제조하여 물성측정을 하여 중온효과를 검증함. 개질재생 중온 혼합물의 경우는 배합설계, 중온아스콘 생산 및 시험포장을 통해 제품을 실용화함으로서 일반중온에도 동일하게 적용할 수 있음.				보고서면수	
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	중온첨가제, 일반중온아스팔트, 개질중온아스팔트, 점도측정, 새 분석방법			
	영 어	WMA Additive, Straight WMA Asphalt, Modified WMA Asphalt, Viscosity Measurement, A New Method of Analysis, etc.			

요 약 문

I. 제 목

균열저항성을 높인 중온 아스팔트포장 개질제 개발에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 교토의정서 1차 의무이행 기간(2008-2012)동안 유럽, 일본 등 36개 국가는 1990년 온실가스 배출량 대비 평균 5.2%의 감축을 의무화하고 있어, 신재생에너지원 및 기술 발굴, 탄소배출권 시장 등이 급속히 성장할 것으로 전망하고 있음.
 - 현 정부도 저탄소 녹색산업(신재생에너지 및 친환경 첨단산업)에 기반을 둔 친환경사회 구현 및 경제성장 능력 확충이라는 목표를 설정하고, ‘녹색성장’을 향후 국가 신 성장 동력으로 육성한다는 비전제시 (광복절 60주년 기념사, 2008. 8. 15.).
 - 국내외의 시대적 요구에 부응하기 위해 본 연구에서는 일반 및 개질 중온아스팔트포장 기술을 개발하여, 일반 가열아스팔트보다 아스콘생산과 포장시공온도를 약 30-40℃ 낮추어 온실 및 유해가스를 획기적으로 저감할 뿐 아니라 일반 중온 아스팔트포장의 약점인 소성변형과 피로균열과 같은 포장문제를 개선시켜 포장수명을 향상시키고 에너지도 절감하는 새로운 중온 첨가제에 대한 원천기술을 확보하고자 함.
- 이로 인한 효과는;

- ① 대기 중에 방출되는 탄산가스 및 유해가스 배출량을 획기적으로 줄임.
- ② 아스팔트바인더의 산화노화를 더디게 하여 포장수명을 연장.
- ③ 아스콘 생산온도의 감소는 석유계 연료를 약 30% 이상 절약함.
- ④ 포장시공 후에 냉각시간이 단축됨으로 조기 교통개방이 가능.
- ⑤ 중온시공은 동절기나 한랭지포장 또는 소량의 아스콘포장도 가능하게 함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 1차년도에서 선정된 중온첨가제 중 유망한 9종류의 중온첨가제 선정
- 일반과 개질아스팔트에 상기 각 중온첨가제의 첨가량과 온도변화를 감안한 다량의 시편을 제작
- 각 중온아스팔트 당 제작된 많은 시편을 함량과 온도를 달리하며 점도와 탄성을 측정함.
- 각 중온첨가제의 중온효과를 산정하기 위해 측정된 점도와 탄성의 정량적 분석기법을 개발함
- 상기기법을 통해 각 중온첨가제의 중온과 탄성효과를 분석하여 균열저항성이 높은 중온첨가제 개발
- 개발된 균열저항 중온첨가제로 일반 및 개질 중온아스팔트혼합물을 제조하고 밀도와 마찰안정도를 측정하여 중온효과를 검증함.
- 중온 개질제를 제조하기 위한 파이로트 플랜트 구축.
- 시제품 생산연구를 통해 시제품을 생산하고 물성시험을 거쳐 시험포장을 위한 대량생산.
- 개발된 중온개질제와 타 재료로 혼합물 배합설계를 하고 이에 따라 개질재생중온 아스콘을 생산
- 생산된 개질 재생 중온 아스콘의 물성측정을 통해 중온, 개질 및 재생의 기능성 확인
- 교통체증이 심한 장소를 물색하여 시험포장을 건설하여 중온 개질제의 효과를 검증함.

IV. 연구개발결과

- 가열아스콘과 비교하여 30℃ 낮은 일반, 개질, 재생 아스팔트포장용 중온아스콘의 생산가능.
- 중온효과를 가져오기 위한 중온첨가제 첨가량을 산정하기 위한 정량적인 분석기법을 개발.
- 중온첨가제의 균열저항성을 높이기 위한 기술개발.
- 새로운 분석기법을 통해 각종 중온첨가제의 중온효과를 정량적으로 분석하여 일반, 개질 및 중온 아스팔트포장용 중온첨가제 선정기술 개발.
- 개질 중온아스팔트포장용 중온첨가제 제조용 파이로트 플랜트 구축과 생산.
- 생산된 중온 개질제로 혼합물 시편을 만들고 중온효과와 물성의 우수성 확인.
- 중온 아스팔트 혼합물 배합설계 기술 구축.
- 개질 재생 중온 아스콘 생산과 물성의 우수성 검증
- 시험포장을 통해 개발된 중온첨가제의 기능 입증.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 개발된 균열저항성을 높인 중온첨가제를 일반, 개질, 재생, 개질재생 아스팔트포장의 현장적용.
- 선정된 일반, 개질, 재생 및 개질 재생 아스팔트포장용 각 중온첨가제로 배합설계, 아스콘 생산 및 시공기술을 적용하여 환경오염 감소, 생산연료비 절감, 산화노화 완화, 교통개방시간을 단축.
- 일반, 개질, 재생, 개질재생 아스팔트포장의 중온첨가제 시장에 진입하여 영업활동을 통해 국내외 중온아스팔트포장에 기여하여 녹색성장을 발전시킴.

SUMMARY

WMA (Warm Mix Asphalt) reduces the production temperature of asphalt mixtures to be 30-40℃ below the 165℃ of the HMA(Hot Mix Asphalt). The immediate benefit to producing WMA is about 30% reduction of burning fuels compared to the hot mix asphalt (HMA) at the production plant. The decreased production temperature brings the reduced emissions both from less burning fuels and evaporation of fumes generated during mixing. In addition, the WMA technology provides a clean working condition at the production and the construction sites, and also reduces the traffic opening time due to less temperature cooling time.

This technology could have a significant impact on transportation construction projects in and around large metropolitan areas that have air quality restrictions. The reduction in fuel usage to produce the mix would also have considerable cost savings.

However, the past researches indicate that the WMA did not improve the pavement quality at all and rather it had main drawbacks of causing cracks, potholes and rutting on pavements. Especially, some WMA creates easy pavement cracks. To resolve these problems, the WMA modifier that enhances crack resistance is needed. Thus, in this research, WMA preventing various cracks are developed first time.

WMA is true in reducing production temperature, but it does not improve pavement qualities at

all. Thus, for better pavements, WMA with modifiers is used to improve pavement performance.

This is the third year research to prove such special additives with modifiers together. Through the first and second-year effort, we have developed several effective WMA. The most difficult case having the warm mix effect is the construction of modified, recycled warm mix pavement. If this case works, it will be fine for a general, modified, or recycled warm mix case. To prove the developed warm mix additive, the mix design for modified recycled warm mix asphalt is carried out and then warm mix asphalt are produced at the temperature of 143°C that is 30°C below the regular modified hot mix asphalt (175°C). The measured physical properties from the samples of the modified recycled warm mix asphalt produced turns out to be excellent. Also, evolution of harmful gases and fuel consumption during production are measured and are found to be drastically reduced compared to the hot mix asphalt. A test pavement constructed at busy traffic jammed road by the produced modified, recycled warm mix asphalt has shown a good performance after one and a half observation. This indicates that the special warm mix chosen works fine for a general, a modified, a recycled or a modified recycled warm mix asphalt pavement construction.

Temperatures of the test pavement right after construction is measured to see the time taken to cool down the pavement to be below 50°C. Less than 2 hours is needed compared to 3 hours of the regular asphalt pavement case. Densities of pavement cores drilled has reached about 98% compaction degree compared to 96% of normal cases, that shows a warm mix additive as a good compaction aid.

C O N T E N T S

Chapter 1. Introduction of R&D Project	9
Section 1. The Purpose of R&D	9
Section 2. Necessity of R&D.....	9
Section 3. Scope of Research.....	17
Chapter 2. Status of R&D in Domestic & Abroad	19
Section 1. Status of T&D in Domestic & Abroad	19
Section 2. Position of this Research in Domestic & Abroad Standing.....	27
Chapter 3. Contents and Results of R&D Execution	29
Section 1. Lab Manufacturing and Property Measurement for	29
Section 2. Development of WMA for Straight Asphalts	49
Section 3. Development of WMA for Modified Asphalts.....	77
Section 4. Properties of WMA Mixtures.....	104
Section 5. Construction of Pilot Plant for Production of WMA Modifiers	110
Section 6. A Mix Design of Modified, Recycled WMA.....	114
Section 7. Production of Modified, Recycled WMA.....	122
Section 8. Construction of A Test Pavement for Modified, Recycled WMA.....	125
Chapter 4. Goal Achievements and Contribution to Related Fields.....	129
Section 1. Achievements of R&D Goals in the 2nd Year Research.....	129
Section 2. Contributions to Technology Advancement in Related Fields.....	129
Chapter 5. Usage Plan of R&D Results.....	130
Section 1. Necessesity of Additional Research.....	130
Section 2. Application to Other Research Areas.....	130
Section 3. Tactical Planning for Making Business.....	130
Chapter 6. Informations of Abroad Scientific Technologies.....	132
Chapter 7. References.....	177
Chapter 8. Appendices.....	178

목 차

제 1장 연구개발과제의 개요	9
제 1절 연구개발의 목적	9
제 2절 연구개발의 필요성.....	9
가. 연구개발의 필요성.....	9
나. 국내 외 연구개발의 추이.....	11
다. 연구개발의 중요성.....	13
라. 향후 전망.....	16
제 3절 연구의 범위.....	17
제 2장 국내외 기술개발 현황.....	19
제 1절 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황.....	19
1. 국내.....	19
가. 고순도 피셔-트롭시왁스의 직접제조.....	19
나. “중온 아스팔트 첨가제 조성물과 --- 혼합물의 생산방법”에 대한 특허	19
다. “중온 아스팔트 혼합물용 저탄소 첨가제”에 대한 특허	20
2. 국외.....	22
가. 유기첨가제 제품	24
나. 발포제에 의한 아스팔트발포 기술	25
3. 본 연구의 특허	27
제 2절 본 연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치.....	28
제 3장 연구개발수행 내용 및 결과.....	29
제 1절 중온첨가제의 실험실적 제조와 물성시험.....	29
1. 중온아스팔트 시료의 실험실적 제조.....	29
2. 제조된 시료의 점도시험.....	30
가. 회전점도계(Rotational Viscometer, RV)	30
나. 점도측정용 시료준비	30
다. 점도시험 절차	30
라. 측정자료 분석	32
3. 측정점도 데이터의 분석.....	33
가. 온도에 따른 점도분석 이론.....	33
나. 중온첨가제 선정을 위한 측정 점도데이터의 분석	33
다. 개질아스팔트를 위한 중온첨가제 개발.....	40
라. 첨가제의 함량이 아스팔트점도에 미치는 영향	44
마. 주 첨가제와 보조 첨가제를 함께 사용했을 경우의 점도영향	46
바. 유망한 중온첨가제를 포함한 중온아스팔트의 물성 시험	47
사. 실험결과에 따른 결론.....	48
제 2절 일반 스트레이트 아스팔트용 중온첨가제 개발.....	49
1. 중온아스팔트 시편제작.....	49
2. 이론식.....	49
3. 점도측정과 데이터분석.....	50
가. 데이터분석 방법.....	50
나. 단일 중온첨가제의 첨가함량과 온도에 따른 중온효과.....	51

다. 중온첨가제의 조합에 의한 중온효과.....	62
라. 중온첨가제의 함량이 많은 중온아스팔트의 중온효과.....	75
제 3절 개질 아스팔트용 중온첨가제 개발.....	77
1. 개질 중온아스팔트 시편제작.....	77
2. 개질 중온아스팔트의 점도 데이터 분석.....	78
가. 중온첨가제 5 중량%로 만든 개질 중온아스팔트의 점도분석.....	78
나. 중온첨가제 함량에 따른 일반과 개질 중온아스팔트의 점도분석.....	80
다. 중온첨가제의 조합과 함량에 따른 개질 중온아스팔트의 점도분석	84
라. 중온첨가제 중의 W8과 W9에 의한 개질 중온아스팔트의 점도분석	86
마. 중온첨가제 다량이 첨가된 개질 중온아스팔트의 온도감소 효과.....	89
바. 중온첨가제의 균열저항성 연구.....	91
제 4절 중온 아스팔트 혼합물의 물성.....	104
1. 일반 중온아스팔트 혼합물의 물성측정.....	104
가. 중온아스팔트혼합물의 시편제작.....	105
나. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험 방법.....	105
다. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험과 데이터 분석.....	105
2. 개질 중온아스팔트 혼합물의 물성측정.....	107
가. 개질 중온아스팔트혼합물의 시편제작.....	107
나. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험과 데이터 분석.....	108
제 5절 중온 개질첨가제 생산을 위한 파이로트플랜트의 구축.....	110
1. 중온 개질첨가제생산 장비 구축의 필요성.....	110
2. 장비의 구성요소와 기능.....	111
가. 재료준비 및 혼합.....	111
나. 가열, 용융, 혼합 및 압출.....	111
다. 제품의 분말화와 포장.....	111
라. 중온 개질첨가제 생산.....	112
제 6절 배합설계.....	114
1. 시험포장의 종류와 위치.....	114
가. 시험포장의 종류.....	114
나. 시험포장의 위치.....	114
다. 시험포장 시간.....	114
2. 아스콘생산을 위한 배합설계 및 혼합물시험.....	115
가. 골재배합 설계.....	115
나. 신규아스팔트의 첨가함량 결정.....	118
다. 배합설계된 개질재생중온 혼합물의 물성측정.....	118
제 7절 개질 재생 중온 아스콘 생산.....	122
1. 개질 재생 중온 아스콘 생산.....	122
가. 개질 재생 중온 아스콘	122
나. 개질 재생 중온 아스콘 공장의 사진.....	123
2. 생산된 개질 재생 중온 아스콘의 물성 측정.....	124
제 8절 개질 재생 중온 시험 아스팔트포장의 건설.....	125
1. 개질 재생 중온 아스팔트포장의 시공.....	125
2. 시공포장의 교통개방 시간.....	125

3. 포장 코-아의 채취와 밀도측정.....	126
4. 포장시공 사진.....	127
제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도.....	129
제 1절 이차년도 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표 달성도.....	129
제 2절 관련분야의 기술발전에의 기여도.....	129
제 5장 연구개발결과의 활용계획.....	130
제 1절 추가연구의 필요성.....	130
제 2절 타 연구에의 응용.....	130
제 3절 기업화 추진방안.....	130
1. 일반 및 재생아스팔트포장용 균열저항성을 높인 중온첨가제 제품.....	130
가. 일반 중온아스팔트포장에 활용.....	130
나. 일반 중온 재생아스팔트포장에 활용.....	130
다. 제품영업 활동.....	131
2. 개질 및 개질 재생아스팔트포장용 중온개질제 제품.....	131
가. 중온 개질아스팔트포장에 활용.....	131
나. 중온 개질 재생아스팔트포장에 활용.....	131
다. 제품영업 활동.....	131
제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	132
제 7장 참고문헌.....	177
제 8장 부록.....	178
제 1절 종류, 함량 및 온도에 따른 중온아스팔트 점도측정 데이터.....	178
제 2절 중온아스팔트 혼합물 밀도와 마찰안정도 데이터.....	197
제 3절 중온 아스팔트의 DSR 데이터.....	202
제 4절 개질재생중온 아스콘의 대기가스 및 생산온도 측정 데이터.....	203
제 5절 개질재생중온 아스콘의 물성측정 데이터.....	207
제 6절 포장 코-아의 밀도와 포장두께 측정 데이터.....	210

제1장 연구개발과제의 개요

제 1절 연구개발의 목적

본 연구에서는 국내 원천기술로 중온아스팔트포장 기술을 개발하여 아스콘생산과 포장 시공온도를 일반가열포장보다 약 30℃ 이상 낮추어, 대기 중에 방출되는 탄산가스 및 유해가스 배출량을 획기적으로 감소시키고자 한다. 중온 일반아스팔트포장에 대한 기술은 국내에서도 하나의 제품이 개발되어 있고 외국에는 상당히 다양한 제품이 개발되어 있으나 중온 개질아스팔트포장에 대한 중온기술은 아직도 확실히 개발된 제품이 없다. 본 연구의 최종목표는 중온 아스팔트포장의 약점으로 지적되어 온 저온 균열과 고온소성변형 문제를 동시에 해결하는 우수한 공용물성을 지닌 개질포장용 중온첨가제 개발에 있다. 이러한 기술 확보를 통해 국내 저탄소포장사업을 선도할 뿐만 아니라 각종 개질포장도 중온기술로 건설함으로써 포장수명을 획기적으로 연장시킬 수 있다. 물론 이로 인한 경제적 이익과 에너지 절약 및 온실가스와 유해가스의 저감 등의 막대한 편익이 기대된다. 상기 기술이 개발되면 국내 및 해외시장에 진출하여 매출과 영업이익을 극대화 할 것이다.

제 2절 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 필요성

1997년 12월에 일본 교토에서 지구온난화 방지조약회의가 개최되었다. 여기에서 채택된 교토의정서는 1차 의무이행 기간(2008-2012)동안 유럽, 일본 등 36개 국가는 1990년 온실가스(탄산가스) 배출량 대비 평균 5.2%의 감축을 의무화하고 있다. 이에 따라 탄소배출권 시장, 신재생에너지원 및 기술 발굴 등이 급속히 성장할 것으로 전망된다. 특히 온실가스(CO₂)는 지구온난화의 주범으로 인식되어 이를 최소화하려는 노력이 선진국을 중심으로 급속도로 확산되고 있는 추세다.

우리나라 정부도 저탄소 및 녹색산업(신재생에너지 및 친환경 첨단산업)에 기반을 둔 친환경사회 구현 및 경제성장 능력 확충이라는 목표를 설정하고, 이러한 목표를 현실화하기 위해 ‘저탄소 및 녹색성장’을 향후 국가 신 성장 동력으로 육성한다는 비전을 제시하고 있다(광복절 건국 60주년 대통령 기념사, 2008년 8월 15일). 여기서 저탄소정책이란 지구온난화의 주범인 탄산가스(온실가스)를 줄이려는 정책을 말한다. 일본 토목학회의 이산화탄소 배출량 조사결과에 의하면 도로포장분야에서는 아스콘생산의 배출이 대부분을 차지한다고 발표하고 있다.

도로포장건설에 사용되는 일반 가열아스팔트혼합물(Hot Mix Asphalt; HMA)은 아스콘 생산(160-165℃)과 포장시공(100-155℃)과정에서 높은 온도로 인하여 아스팔트의 일부가 분해되어 탄산가스(CO₂)를 포함한 각종 유해가스와 연기가 상당량 발생할 뿐만 아니라, 아스콘생산에 필요한 온도를 높이기 위해 화석연료를 사용함으로써 다량의 탄산가스를 발생시키고 있다. 따라서 아스콘 공장은 주거단지와 근접한 장소에는 허가가 불가능하다. 선진

국에서는 이러한 유해가스배출 문제점을 해결하기 위한 일환으로, 생산과 시공온도를 감소시켜 이들 가스와 연기의 발생량을 줄이고자 하는 연구가 진행되어 왔는데, 그 결과로서 최근에 새로운 기술들이 속속 시장에 등장하고 있으며, 이들을 중온아스팔트포장 혼합물(Warm Mix Asphalt; WMA)이라 부른다. 이들 제품을 사용한 포장을 중온아스팔트포장이라 하며, 말 그대로 생산과 시공온도를 가열아스팔트포장과 비교하여 30℃ 정도 낮추어 건설한 포장을 일컫는다.

이러한 중온아스팔트포장은 기존 가열아스팔트포장과 비교하여 약 30℃ 정도 생산과 시공온도는 낮아지지만 역학적 성능 면에서는 대등하거나 오히려 우수한 결과가 얻어진다고 보고하고 있다.

이러한 중온아스팔트포장은 낮아진 생산과 시공온도로 인하여 탄산가스발생량을 감소시키는 영향 이외에도, 아스팔트바인더의 산화노화의 감소, 석유계 연료의 절감, 조기 교통개방, 재료운반거리의 확장, 시공계절의 연장 및 작업자의 안전과 같은 여러 가지 다른 장점을 가지고 있는 새로운 포장기술이다.

외국문헌은 온도에 따른 아스팔트포장의 정의를 그림 1과 같이 표현하고 있다.

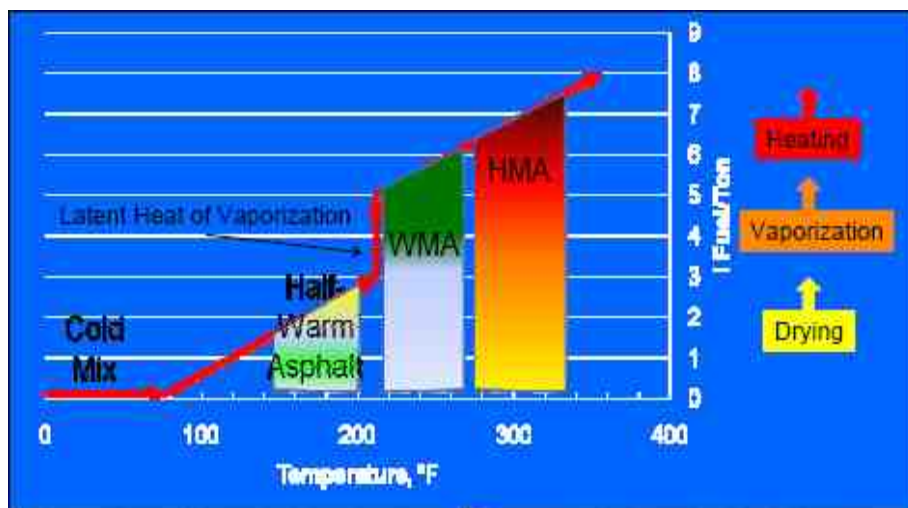


그림 1 온도에 따른 각종 아스팔트포장의 정의.

그림 1에 의하면 중온아스팔트혼합물(WMA)보다 더 낮은 온도에서 생산이 가능한 포장 재료가 존재하며, 이들은 준 중온아스팔트(Half Warm Asphalt)와 상온혼합물(Cold Mix)이라 부른다. 가열아스팔트바인더는 아스팔트만을 바인더로 사용하고, 중온아스팔트바인더는 아스팔트와 소량의 유기첨가제나 수분을 함께 사용하는데 반하여, 준 중온아스팔트나 상온아스팔트 바인더는 다량의 물에 아스팔트가 분산된 유화아스팔트를 사용하고 있다. 따라서 동일한 조건 하에 골재와 혼합한다면, 준 중온아스팔트(Half Warm Asphalt)와 상온혼합물(Cold Mix)은 가열 또는 중온 아스팔트바인더에 비하여 골재를 피복하는 아스팔트 함량이 상대적으로 적게 되고, 그 결과 역학적 물성이 취약해져 교통량이 많은 중요도로의 표층에는 거의 사용하지 않는다. 이러한 점을 고려할 때, 가열아스팔트포장의 생산과 시공온도를 낮추고 동시에 가열아스팔트포장과 동일한 역학적 물성을 확보할 수 있는 포장으로서 중온아스팔트포장이 유일한 선택으로 부각된다.

나. 국내 외 연구개발의 추이

중온아스팔트는 최근에 유럽에서 시작하였으며 간략히 소개하면 다음과 같다.
1995년 독일의 한 실험실에서 처음으로 중온아스팔트 예비실험을 수행하였다.
1997년 독일의 아스팔트포럼에서 중온아스팔트포장이 독일 전역에 소개되었다.
2000년 제 1회 국제 아스팔트학회(First International Conference of Asphalt Conference; 호주 시드니)에서 논문이 발표되어 전 세계적으로 알려졌다.
2000년 스페인 발세로나에서 개최된 제2차 유럽 아스팔트 학술대회 (The Second Euro-asphalt & Euro-bitumen Congress)에서 유럽전역에 확산되었다.
2002년 미국의 NAPA (National Asphalt Pavement Association)에서 파견된 전문가들이 유럽 기술여행(독일과 노르웨이)을 하여 중온포장을 미국에 알리기 시작했다.
2003년 미국의 NAPA의 연례모임(샌디에고)에서 유럽의 관련업체를 초빙하여 세미나를 개최함으로써 미국에 이 기술이 처음 도입되었다.
2004년 미국의 NCAT에 중온아스팔트포장에 대한 연구를 처음으로 발주하였고, 그 후 텍사스, 오하이오, 등 여러 곳에서 연구를 수행하였다.
2005-현재 미국의 수많은 곳에 중온아스팔트포장의 시공실적이 쌓여가고 있으며 새로운 제품도 속속 개발되고 있다.

이상은 미국의 관점에서 바라본 중온아스팔트포장에 대한 경험이고, 이외에도 일본, 호주 등에도 이미 중온아스팔트포장이 시공되고 있으며 관련제품도 개발되어 있다. 유럽의 여러 나라(노르웨이, 독일, 벨기에, 프랑스, 네덜란드, 등)들은 중온아스팔트포장의 시공경험을 통해서 중온포장의 공용성능이 가열포장과 비교하여 동일하거나 우수하다고 발표하고 있어서 중온아스팔트포장의 사용이 친환경 정책과 더불어 점점 가속화되어 갈 것으로 기대된다.

국내의 중온아스팔트포장에 대한 동향은 비교적 최근에 시작되었으며 아직도 초기기술도입단계에 머물러 있다. 중온아스팔트포장에 관련하여 최근에 발표된 학술논문과 기술논문을 살펴보면 아래와 같다.

2007년 건설기업정보지가 건설동향이라는 주제로 중온아스팔트포장의 정보제공.
2007년 한국과학기술정보연구원의 고경력과과학기술인 프로그램의 전문연구위원인 이치용씨가 “도로포장기술에서 이산화탄소 삭감대책”이라는 기술정보 제공.
2007년 박태순외 3인, “중온아스팔트 혼합물의 성능 및 특성연구”를 한국도로학회 학술대회발표 논문집에 수록.
2008년 조신행외 3인, “중온형 아스팔트 콘크리트 특성연구” 한국도로학회 논문집에 논문발표.
2008년 황성도, 정규동, “중온화 아스팔트 포장공법의 국내외 기술 현황,” 한국도로학회 기술논문집에 기고.
2008년 국토연구원의 국토정책지에 “저탄소 녹색성장을 위한 교통정책방향”에서 중온아스팔트포장에 대해 기술.

2008년 국회의원회관에서 국회 기술 분과위원 소속 국회의원들의 주관 하에 녹색 성장정책의 일환으로 건설사업분야 세미나를 개최하였는데, 중온아스팔트포장도 중요의제로 포함되었으며 그 결과 중온아스팔트포장의 입법화가 현재 추진 중.

2009년 4월 -- 한국건설기술연구원과 원주지방국토관리청은 국도 38호선 무릉-사북 구간 도로공사에 건기연이 개발한 저탄소 중온 아스팔트 포장을 시험 시공함.

2009년 10월 -- 한국건설기술연구원과 서울지방국토관리청은 건기연이 개발한 저탄소 중온 아스팔트 포장 공법을 현리-신팔 도로건설공사 (국도 37호선 : 거창-과주)구간에 시험 시공함.

유럽과 미국에서 그 동안 중온아스팔트포장과 관련하여 개발된 제품을 살펴보면 크게 두 종류로 나눈다.

1. 유기 첨가제 (왁스) - 바인더나 혹은 혼합물에 첨가함.
2. 아스팔트 발포 - 아스팔트나 혼합물에 수분과 첨가제를 소량 첨가하거나 피복시켜 고온에서 아스팔트에 기공을 형성.

상기 두 종류의 제품 중 가장 많은 포장실적을 가진 제품이 왁스형태인 새소비트(sasobit)이다. 새소비트는 생산과 시공온도를 낮춤과 동시에 공용온도에서 바인더점도를 높여서 소성 변형 저항성을 향상시키는 이점이 있다. 반면에 단점으로는 취성이 강하여 균열에 취약한 약점에 노출되어 있다. 이에 비하여 아스팔트발포제품은 발포과정에서 형성된 기공의 파괴로 인해 생산과 시공온도는 낮아지지만, 잔존 기공으로 인해 물성이 취약해져 소성변형 저항성에 약한 단점이 지적되고 있다.

세계적인 추세인 지구 온난화 정책과 국내의 저탄소 및 녹색성장 정책에 발맞추어 탄산가스를 줄이기 위한 시도로 중온아스팔트포장의 도입이 절실하다. 그러나 아직도 국내에서는 중온포장을 위한 독자적 제품이 개발되어 있지 못하다. 그렇다고 하여 외국에서 제품을 수입하면 운반비와 통관비가 포함되어 제품가격이 비싸지고, 이에 따른 외화낭비도 심하며, 기술 축적도 어려움으로 국내 독자적인 기술개발로 원천기술을 확보하는 것이 바람직하다.

제품의 품질을 고려하면 소성변형 저항성이 우수하면서 저온에서 쉽게 균열을 발생시키지 않는 중온아스팔트포장을 위한 유기첨가제 개발이, 수분에 의한 아스팔트 발포기술의 개발보다도 현재까지는 더 좋은 선택이 될 수 있다. 수분에 의한 발포포장은 수분이 아스팔트의 품질에 미치는 장기적 영향에 대한 연구가 아직 밝혀져 있지 않은 상태다. 이러한 측면에서 유기첨가제인 왁스 형태를 사용하여 단점을 보완하는 것이 바람직한 형태의 제품개발이 될 것이다. 온실가스발생 양을 줄일 뿐만 아니라 시공 상의 여러 이점을 확보하기 위해, 하루 속히 중온아스팔트포장 건설에 필수적인 유기첨가제의 개발이 이루어질 수 있기를 기대한다. 이로 인해 녹색성장 및 저탄소산업에 동참하고 세계적인 기상이변의 주요인인 지구온난화 예방에 일조할 수 있을 것이다. 상기 목적을 달성하기 위하여 국내 도로포장의 대부분을 차지하는 일반 아스팔트포장, 개질아스팔트포장, 배수성아스팔트포장, 개질재생아스팔트포장 등에 사용할 수 있는 중온 첨가제들의 개발이 시급히 요구되는 바이다.

다. 연구개발의 중요성

중온 아스팔트포장(WMA)의 핵심기술은 중온(110-140℃)에서 점도가 충분히 낮아지도록 유기첨가제를 추가하거나 수분 또는 발포제로 아스팔트를 발포(foaming)상태로 만드는 기술이며, 일반 가열아스콘(HMA)의 경우 생산과 시공온도를 30℃ 정도, 개질아스콘의 경우 30-50℃ 정도로 낮춘다고 알려져 있다. 이러한 온도감소는 직접적으로 아스콘생산의 비용절감과 간접적으로 사회 환경비용을 절감하는 편익이 있다. 구체적으로는 다음과 같은 기술적 경제적 및 사회문화적 이점을 가져온다.

- 아스콘생산과 포장시공과정에서 대기 중에 방출되는 탄산가스를 포함하는 유해가스 배출량을 가열아스팔트혼합물(HMA)과 비교하여 상당량 감소시킴. 아래 그림2를 참조하면 유기첨가제 중온포장(2W)이 기존 가열포장(1 HMA)과 비교하여 CO₂ 배출량이 22% 감소하고, 그 외 다른 유해가스도 현저히 줄어듦을 나타내고 있다.

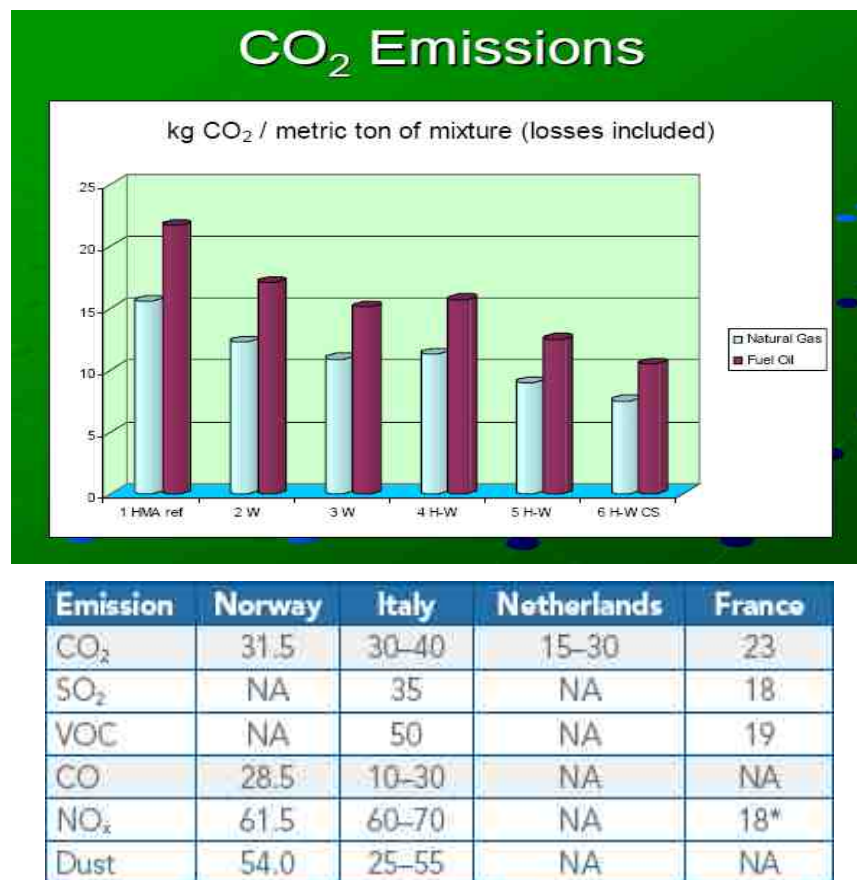
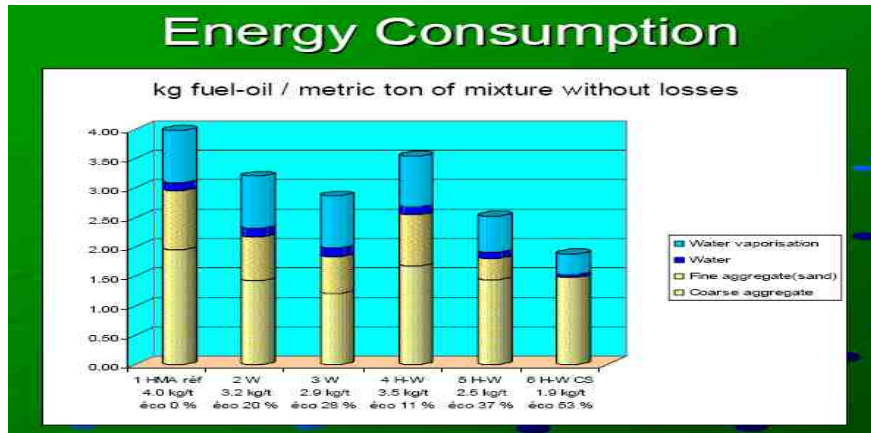


그림 2. 유해가스 배출량의 감소.

- 20-50℃ 낮은 생산과 시공온도는 아스팔트바인더의 산화노화를 더디게 하여 포장수명을 연장하는 효과를 가져 옴. 고온일수록 급격한 산화노화가 진행됨을 고려할 때 낮아진 온도는 산화노화속도를 느리게 함.
- 아스콘 생산 중에 가열온도의 저감에 의해 석유계 연료를 약 30% 절약함. 아래 그림을 참조하면 유기첨가제 중온포장(2W)이 기존 가열포장(1 HMA)과 비교하여

가열연료 양이 20% 감소함을 보이고 있다.



가열 아스콘 (160℃)

중온 아스콘(130℃)

- 시공 후 양생시간 감소에 따른 조기 교통개방의 실현.
- 고온에서 점도가 낮음으로 현장 시공 시에 다짐이 개선되어 다짐밀도가 좋음.
- 운반거리가 멀거나 적재차량이 대기하는 경우에도 아스콘냉각에 따른 시공염려가 있는 데, 낮은 온도에서도 시공이 가능함으로 문제가 되지 않음 (운반시간과 거리의 확장).
- 저온 시공가능성은 아스콘온도가 냉각하기 쉬운 동절기나 한랭지포장의 용도에 또는 아스콘을 소량 분할하여 운반하는 용도에도 적합함 (시공계절의 연장).
- 시공현장에서 유해가스나 분진의 발생이 적음으로 작업자의 안전이 확보됨.



그림 3. 가열포장과 중온포장의 포설장면 비교.

- 중온포장의 공용성능은 일반 가열포장과 비교하여 동일하거나 우수함. 아래의 그림에서 볼 수 있듯이 노르웨이에서는 중온포장의 공용성능이 가열포장보다 좋기도 하고 나쁘기도 하는 데 나쁜 경우는 다른 이유 때문이라고 하고 있으며, 독일은 중온포장의 공용성능이 가열포장과 비교하여 동일하거나 우수하다고 말하며, 왁스와 제올라이트의 사용허가를 위한 지침서를 개발하였다. 프랑스는 유료도로, 파리 시나 지역구는 현재까지 중온포장의 공용성능에 만족한다고 말하고 있다.

- Consensus of European Countries that WMA should provide **equal or better** performance than HMA
 - Norway – performance mixed, problems not attributed to WMA
 - Germany – performance same or better, developed guidelines to allow use of waxes and zeolite
 - France – toll road, district, and city of Paris pleased with performance to date

중온아스팔트 기술실시그룹 (WMA TWG)이 미 연방도로국(FHWA)의 Infrastructure R&D연구를 수행한 결과를 발표함 (December 12-13, Baltimore Maryland, USA) 아래 그림은 중온아스팔트포장용 바인더와 혼합물의 시험결과를 보여준다. Sasobit 왁스를 사용한 중온바인더의 $G^*/\sin\delta$ 값이 일반바인더에 비하여 훨씬 높음을 보여준다. 즉 이 중온포장은 일반가열포장에 비하여 소성변형저항성이 우수함을 증거하고 있다. 또한 혼합물의 피로균열시험에서는 중온포장 혼합물과 가열포장 혼합물 사이에 거의 차이가 없음을 언급하고 있다.

Overall Summary

Some binders had trouble coating bottles at 110C

PG52 PG58 PG64 PG70 PG76 PG82

Binder ID	°C G* /sinδ = 1kPa				°C G* /sinδ = 2.2kPa			
	Orig	110	130	163	Orig	110	130	163
B-6354, Missouri WMA Demo, 70-22		74.8	75.9	80.6		67.4	68.5	73.2
B-6348, Hawaii Project 70-16	72.0	72.5	74.4	79.3		66.2	68.1	72.9
B-6328, Venezuelan 64-22		68.8	70.0	74.8		62.2	63.4	68.1
AAM-1, SHRP High Paraffin Wax	67.1	72.6	75.3	77.9		65.9	68.8	71.4
AAM-2, SHRP High Paraffin Wax	60.9	64.0	65.8	69.8		57.5	59.1	63.2
AAG-1, SHRP Calif. Valley Low Aging	65.5	67.6	68.2	69.0		61.9	62.5	63.3
AAD-1, SHRP Calif. Coastal Hi Aging	60.5	64.5	67.0	69.7		57.9	60.2	62.8
B-6272, FHWA ALF Control, 70-22	73.0	75.5	77.0	81.6		68.8	70.4	74.9
B-6272+1.5% Sasobit		78.4	81.3	82.5		71.9	74.7	76.2
B-6272+3.0% Sasobit		84.9	84.7	84.6		77.9	78.0	78.4

Overall WMA Fatigue Results

- WMA Fatigue without Long Term Aging
 - Little differences were seen between HMA and WMA technologies in the non destructive dynamic modulus |E*|
 - Little differences seen in destructive fatigue characterization
 - If this were a double blind experiment, one would have a hard time determining which mixture was the conventional Hot Mix Asphalt and which was not.
- However, Long Term Aging needs to be investigated which may show larger differences between HMA vs. WMA and different WMA technologies

라. 향후 전망

국내외의 시대적 요구에 부응하기 위해 도로포장분야에서 공해문제를 가장 많이 발생시키는 아스콘생산과 시공공정에 중온아스팔트포장 기술을 접목시켜 공해문제를 감소시킬 필요가 있다. 최근 들어 일반 아스팔트포장도 많이 이용하지만, 포장수명이나 생활의 편의를 높이기 위한 기능성 아스팔트포장의 사용이 증가하는 추세인데, 이들 포장에는 일반 중온첨가제 대신에 중온 개질 첨가제의 사용이 필요하나 이들에 대한 기술적인 연구가 거의 전무하다. 개질아스팔트는 일반 아스팔트보다 생산온도도 10°C 정도 높아서 에너지사용이나 공해문제로 심각함으로 이에 대처할 수 있는 더욱 효과적인 중온 첨가제의 연구개발이 요구되고 있다. 기존 중온포장의 약점은 고온 소성변형과 저온 균열이 조기에 발생하여 포장수명이 단축될 수 있다는 점을 들 수 있어 이러한 점에서 국내 원천기술로 이러한 문제점을 해결할 수 있는 우수한 중온 개질 아스팔트포장용 첨가제 개발이 더욱 필요한 이유이다.

제 3절 연구의 범위

○ 일반과 개질 중온아스팔트포장용 중온첨가제의 종류와 기능성 연구

- 중온첨가제로서 왁스의 종류와 기능성 연구.
- 중온첨가제로서 발포제의 종류와 기능성 연구.
- 중온첨가제로서 점연제의 종류와 기능성 연구.

○ 중온아스팔트바인더의 점도측정 연구

- 일반과 개질 중온아스팔트포장용 유망 중온첨가제의 선정
- 선정된 중온첨가제를 일반 및 개질아스팔트와 혼합하여 다양한 시료제조
- 제조된 시료에 대해 중온첨가제의 종류(1-10 종류), 함량(아스팔트함량의 0.1-10%) 및 온도(80-135℃)를 변화시키며 브룩필드 점도계를 이용하여 점도를 측정함.
- 일반 및 개질 중온아스팔트의 점도데이터를 해석하여 중온효과를 정량적으로 산정을 할 수 있는 새로운 점도분석방법의 개발.
- 상기방법에 따라 생산온도에서의 베이스 아스팔트 혹은 개질아스팔트의 점도산정
- 베이스 아스팔트와 개질아스팔트의 점도에 따라 생산온도를 가열아스콘보다 30℃ 낮게 생산하기 위한 각 중온첨가제의 종류와 첨가함량 결정.
- 두 종류 이상의 첨가제를 사용했을 때의 중온효과 연구.
- 균열저항성 향상을 위한 첨가제 연구

○ 중온혼합물 물성측정을 통한 중온효과 조사

- 골재크기와 분포도를 고정시키고 중온혼합물 시편을 제작함.
- 각 다짐온도별로 온도를 변화시키며 밀도와 마찰안정도를 측정함.
- 가열아스팔트 혼합물과 비교하여 중온효과를 비교함.

○ 중온 개질제 제조를 위한 파이로트 플랜트 구축

- 각종 부품장비의 구매와 조립을 통하여 파이로트 플랜트 구축.
- 파이로트 플랜트를 통해 중온개질제 생산연구 및 대량생산.

○ 개질 재생 중온 혼합물 배합설계

- 아스콘생산을 위한 골재, 아스팔트, 중온 개질제의 배합설계
- 설계된 중온 혼합물의 물성측정

○ 개질 재생 중온 아스콘 생산

- 배합설계에 따라 아스콘 생산
- 연료소모량 조사
- 대기오염물질 측정
- 생산된 개질 재생 중온 아스콘의 물성측정
- 생산온도 측정

- 개질 재생 중인 아스콘으로 시험포장건설
 - 현장도착도 아스콘의 온도 측정
 - 1차, 2차, 3차 및 4차 다짐계획 및 각 다짐 후의 포장 온도측정
 - 시공완료 후시간에 따른 포장온도측정
 - 코-아 채취 와 밀도측정으로 다짐율 측정
 - 시공 후에 시간에 따른 포장상태 관찰

제2장 국내외 기술개발 현황

제 1절 국내·외 관련분야에 대한 기술개발현황

1. 국내

국내에서는 3개의 중온첨가제 관련 특허가 등록되어 있음. 그 중 2개의 특허가 장수명포장 연구기획단 프로그램의 세부과제로서 한국건설기술연구원과 금호석유화학(주)가 공동으로 중온아스팔트 첨가제 연구를 수행결과로서 한국특허청에 등록되어 있다.

가. 고순도 피셔-트롭시 왁스의 직접 제조

미국의 엑손모빌 리서치 사가 국내에 출원한 특허로서 새로운 방법으로 새솔왁스를 제조하는 방법에 대한 기술이다.

국내 출원번호: 1020047000482 (2004.01.12)

출원인: 엑손모빌 리서치 앤드 엔지니어링 컴퍼니

요약 : 액체 합성 생성물 및 촉매 입자를 포함한 탄화수소 합성 슬러리로부터 제조되는 탄화수소 왁스 생성물은, 탄화수소 합성 슬러리의 일부를 탄화수소 합성대역으로부터 처리 기체가 탄화수소 합성 슬러리에 접촉하는 처리대역으로 도입시킴으로써 정제된다. 수소 또는 수소함유 기체는 처리 기체로 유용하게 사용된다. 기체처리로 탄화수소 합성 슬러리 중의 탄화수소 왁스부분으로부터 불순물이 제거된다. 정제된 왁스 생성물은 분리되고 동일 반응계에서 왁스 회수수단을 통해 제거된다. 이 방법에 의하면 왁스 생성물의 추가적 처리를 할 필요성이 없거나 줄어든다.

<상기 특허에 대한 검토와 고찰>

중온 첨가제로 사용하는 새솔왁스에 대한 새로운 제조방법에 관한 특허임.

나. “중온 아스팔트 첨가제 조성물과 그 첨가제의 제조방법, 그리고 그 제조방법으로 제조된 첨가제를 이용한 중온 아스팔트 혼합물의 생산방법”에 대한 특허

출원번호 1020080126566 (2008.12.12)

등록번호 100951466 (2010.03.30)

발명자/고안자 황성도 | 권수안 | 정규동 | 양성린 | 박태순

① 스티렌 함량이 10~25중량%이고 스티렌 블록율이 40~70%이며 중량평균분자량이

50,000~90,000인 스티렌-부타디엔(Styrene Butadiene) 블록공중합체; 및, 연화점이 90~140℃이고 140℃의 점도가 15~300cps인 왁스;를 포함하여 구성되되, 상기 스티렌-부타디엔 블록공중합체 : 왁스의 중량비가 1.5~5 : 1.5~5로 조성되는 것을 특징으로 하는 중온 아스팔트 첨가제 조성물.

② 상기 왁스는 폴리에틸렌왁스, 폴리아미드왁스, 하이드록시왁스, 스테아미드왁스, 폴리올레핀왁스, 폴리프로필렌왁스, 에틸렌프로필렌왁스 중 어느 하나임을 특징으로 하는 중온 아스팔트 첨가제 조성물.

③ 3.0~7.0중량%의 아스팔트와 93.0~97.0중량%의 골재로 조성 설계되며, 상기 중온 아스팔트 첨가제는 상기 아스팔트 100중량부에 대하여 1.0~10.0중량부로 조성 설계되는 것을 특징으로 하는 중온 아스팔트 혼합물의 생산방법.

<상기 특허에 대한 검토와 고찰>

① SBR 고무와 왁스를 1.5~5:1.5~5의 비율로 섞어서 중온 개질첨가제로 사용하는 발명임. 왁스는 폴리에틸렌왁스, 폴리아미드왁스, 하이드록시왁스, 스테아미드왁스, 폴리올레핀왁스, 폴리프로필렌왁스, 에틸렌프로필렌왁스 중 하나를 사용함. 중온 첨가제의 사용량은 아스팔트 중량의 1-10 중량부를 사용.

② 이러한 종류의 왁스는 그 양을 많이 사용하지 않는 한 점도를 충분히 낮추는 것이 가능한가가 의문이며, 단순 왁스만 사용하면 균열문제가 발생할 수 있어 SBR고무를 사용한 것 같은데, SBR의 사용량도 적어 물성향상에도 크게 도움이 안 될 것으로 판단됨. 또한 SBR은 탄성은 좋으나 점성이 약하여 소성변형발생을 촉진시킬 수 있고 가격도 고가임.

③ 본 연구와 관련하여 참여기업이 최근에 출원한 특허는 왁스, 발포제 및 윤활제를 함께 사용하고, 왁스, 발포제 및 윤활제도 필요시에 한 종류 이상을 사용하여 보다 더 효과적인 중온 첨가제를 개발하는 것에 관한 것으로 상기 특허와는 완전한 차별화를 이룸. 여기에 아스팔트 포장의 물성향상을 위해서 SBR과는 전혀 다른 탄성 및 점성이 모두 우수한 고분자 개질제 중 하나 이상을 추가로 사용하는 것을 특징으로 하고 있음. 따라서 중온 첨가제도 다르고, 사용하는 개질제도 전혀 다름. 저렴한 원재료를 사용함으로써 가격 경쟁력도 확보할 수 있음.

다. “중온 아스팔트 혼합물용 저탄소 첨가제”에 대한 특허

출원번호 1020090081136 (2009.08.31)

등록번호 100949380 (2010.03.17)

발명자/고안자 정규동 | 황성도 | 권수안 | 양성린 | 천승한

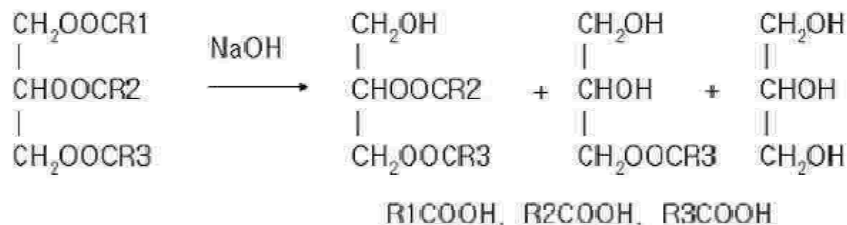
폴리에틸렌계 왁스(용점이 95℃~125℃이고, 140℃에서의 용융점도가 400cPs 이하인 것)와 식물성 왁스를 포함하는 중온 아스팔트 혼합물용 저탄소 첨가제에 대한 기술이며 오일을 더 함유할 수 있고, 이 때 상기 폴리에틸렌계 왁스와 오일의 중량 비율은 20:1 내지 2:1 이고, 오일은 40℃의 동점도가 20~300cSt 이어야 한다.

상기 저탄소 첨가제는 폴리 에틸렌계 왁스와 식물성 왁스를 20:1 내지 1:2의 중량 비율로

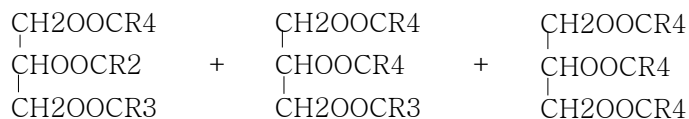
함유하며, 상기 식물성 왁스는, 야자열매에서 추출한 팜 오일(Palm oil)을 수첨하여 제조한 팜 왁스(융점이 55℃~65℃)에 수산화 나트륨(NaOH) (팜 왁스와 수산화 나트륨의 중량 비율 = 100:3.5 내지 100:4.0) 및 스테아린산(CH₃(CH₂)₁₆COOH) (팜왁스와 스테아린산의 중량 비율 = 100:16.0 내지 100:27.5인 것)을 용융 반응시켜 생성된 개질 팜왁스 (융점이 80℃~110℃이며, 팜왁스를 추가할 수 있음)인 것을 특징으로 하는 중온 아스팔트 혼합물용 저탄소 첨가제이다. 아스팔트와 상기 저탄소 첨가제의 중량 비율은 100:0.5 내지 100:15을 사용한다.

<상기 특허에 대한 검토와 고찰>

- ① 본 특허는 폴리에틸렌계 왁스에 식물성왁스를 함께 사용한 기술임. 폴리에틸렌계 왁스는 점도도 높고 접착력이 부족함으로 이를 개선하고자 식물성왁스를 함께 사용한 것으로 사료됨. 식물성왁스는 야자열매에서 만든 팜왁스(융점=55℃~65℃)를 사용했음. 그러나 팜왁스의 융점이 낮음으로 이를 높이하고자 개질하여 융점이 80℃~110℃인 개질 팜왁스를 만들어 이를 사용했음. 그러나 융점이 높을 시에 이를 낮추기 위하여 팜왁스 혹은 오일을 추가로 첨가하는 것으로 되어 있음.
- ② 개질 팜왁스를 만들기 위한 화학구조식을 보면, 팜왁스에 가성소오다(NaOH)를 섞고 가열 혼합하면 팜왁스의 일부 알킬산기(R₁COO-, R₂COO-, R₃COO-)가 수산화기(-OH)로 대체된다.



여기에 스테아린산과 촉매를 넣어 더욱 반응시키면 혼합 개질 팜왁스가 얻어짐.



상기에서 R₄는 스테아린산의 Alkyl 기(C₁₇H₃₅-)를 나타내며, 팜왁스의 R₁, R₂ 및 R₃는 스테아린산의 Alkyl 기(C₁₇H₃₅-)보다 체인수가 적은 Alkyl 기를 나타내는 것으로 추정됨. 팜왁스의 알킬기를 스테아린산의 알킬기로 대체하면 융점이 높아지는 것으로 볼 때, 스테아린산의 C₁₇보다 탄소수가 적은 알킬기인 것으로 사료됨. 따라서 팜왁스를 개질한 이유는 팜왁스의 R₁, R₂ 및 R₃를 스테아린산의 R₄(C₁₇H₃₄-)로 대체시켜 융점을 높이기 위함인 것으로 사료되며 팜왁스의 근본적인 구조에는 변화가 없음.

- ③ 따라서 근본적으로 폴리에틸렌왁스와 팜왁스의 혼합왁스를 중온 첨가제로 주장하고 있으며, 팜왁스의 사용으로 접착제성질은 향상될 것으로 기대되나 주된 성질은 폴리에틸렌왁스의 성질이 결정할 것으로 사료되며, 폴리에틸렌왁스는 극성이 없는 화합물로서 탄성이 없고 물

리적인 성질도 우수하지 못하여 중온 아스팔트의 물성향상에는 큰 기여가 없을 것으로 사료됨.

④ 본 연구와 관련하여 참여기업이 최근에 출원한 특허는 왁스와 발포제 뿐만 아니라 윤활제도 함께 사용하고, 왁스, 발포제 및 윤활제도 필요시에 한 종류 이상을 사용하여 보다 더 효과적인 중온첨가제를 개발하는 것에 관한 것으로 발포제를 전혀 사용하지 않는 상기 특허와는 완전한 차별화를 이룸. 또한 여기에 아스팔트포장의 물성향상을 위해서 탄성이 좋은 고분자 개질제 중 하나 이상을 추가로 사용함으로써 중온 개질아스팔트포장의 물성향상이 크게 기대되는 기술임.

예를 들어, 상기 건기원의 특허는 혼합왁스(폴리에틸렌왁스와 식물성왁스인 팜왁스의 혼합왁스 한 종류) 한 종류에 관한 특허이나 본 특허는 하나 이상의 다양한 혼합왁스(폴리에틸렌계 왁스와 동물계왁스인 비즈왁스; 혹은 폴리에틸렌계 왁스와 식물계왁스인 칸데릴라 왁스, 등)와 발포제와 윤활제로 구성되는 중온 첨가제로 구성되며, 이러한 중온 첨가제는 “중온 아스팔트 혼합물용 저탄소 첨가제”에 대한 특허처럼 단순 혼합왁스의 경우와는 달리 발포제와 윤활제를 첨가하여 중온특성을 더욱 향상시키는 차이점을 갖고 있음. 따라서 중온 첨가제도 다르고, 사용하는 개질제도 전혀 다름. 저렴한 원재료를 사용함으로써 가격 경쟁력도 확보하려고 개발 중에 있음.

2. 국외

중온 아스팔트포장의 국외 기술동향은 아래 표 1에 잘 나타나 있다. 가장 많은 시공실적을 쌓고 있는 중온포장용 제품은 유기첨가제(왁스계열인 Sosobit)로서 독일제품이다. 해외 중온아스팔트포장시장을 선도하고 있는 국가는 독일, 프랑스, 최근의 미국, 노르웨이, 네덜란드, 등이며 아세아에서는 일본이 앞서가고 있다.

일본에서는 Nippo 회사에서 개발한 제품으로, 특수첨가제를 고온의 아스팔트에 첨가하여 아스팔트를 발포시켜 미세기공을 형성하는 제품이 있다. 외부의 압력을 받아 혼합물을 구성하는 아스팔트속의 미세기포가 소멸되면서 작업성이 향상되고 다짐도도 향상된다. 마에다 회사에서 개발한 WAM(Water Added Mixes)페이브는 고온(110-160℃)에서 특수첨가제를 첨가하여 일시적으로 아스팔트의 점도를 저하시키는 공법으로서 생산 및 시공온도를 30-50℃ 저감시킬 수 있다고 주장하고 있다. 사토 와타나베 회사에서는 발포제를 포함하는 특수첨가제를 아스팔트혼합물 제조 시에 투입하여 생산 및 시공온도를 30℃ 정도 떨어뜨리는 제품을 개발하여 판매하고 있다. 이 외에도 타이세이로테크 회사에서 개발한 비스코믹스 제품이 있으며 성능은 타 제품과 유사하다.

중온아스팔트포장을 위한 제품은 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 한 종류는 왁스를 포함하는 유기첨가제로서 융점을 가지고 있는 제품이며, 다른 하나는 물을 포함하는 발포제를 사용하여 아스팔트를 발포시키는 기술이다.

표 1. 유럽과 미국에서 상품화된 중온기술 제품

WMA Process	Company	Additive	Production Temperature (at plant) °C	Use Reported in	Approximate Total Tonnage Produced to Date
ORGANIC (WAX) ADDITIVES—ADDED TO BINDER OR MIX					
Sasobit (Fischer-Tropsch wax)	Sasol	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder; lower doses, 1.0–1.5%, used in U.S.	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266 to 338 °F), depending on binder stiffness	Germany and 20 other countries worldwide	>10 million tons worldwide
Asphaltan-B (Montan wax)	Romonta	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266–338 °F), depending on binder stiffness	Germany	Unknown
Licomont BS 100 (additive) or Sübit (binder) (fatty acid amides)	Clariant	Yes, about 3% by weight of binder	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266–338 °F), depending on binder stiffness	Germany	>322,500 square meters since 1994
3E LT or Ecoflex (proprietary)	Colas	Yes	Varies, 30–40 °C (54–72 °F) drop from HMA	France	Unknown
FOAMING PROCESSES					
Aspha-min (zeolite)	Eurovia and MHI	Yes, about 0.3% by total weight of mix	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266–338 °F), depending on binder stiffness	France, Germany, and U.S.	About 300,000 tons
ECOMAC (cold mix warmed before laying)	Screg	Yes (unknown type/quantity)	Placed at about 45 °C (113 °F)	France	Some trials
LEA, also EBE and EBT (foaming from portion of aggregate fraction)	LEACO, Fairco, and Eiffage Travaux Publics	Yes, 0.2–0.5% by weight of binder of a coating and adhesion agent	<100 °C (212 °F)	France, Spain, Italy, and U.S.	>100,000 tons
LEAB® (direct foam with binder additive)	BAM	Yes, added at 0.1% by weight of binder to stabilize foam, aid in coating, and promote adhesion	90 °C (194 °F)	Netherlands	Seven commercial projects

표 1의 계속

WMA Process	Company	Additive	Production Temperature (at plant) °C	Use Reported in	Approximate Total Tonnage Produced to Date
FOAMING PROCESSES (continued)					
LT Asphalt (foamed asphalt with addition of hygroscopic filler to maintain workability)	Nynas	Yes, added 0.5–1.0% of a hygroscopic filler	90 °C (194 °F)	Netherlands and Italy	Unknown
WAM-Foam (soft binder coating followed by foamed hard binder)	Kolo Veidekke, Shell Bitumen (patent rights worldwide, except U.S.), and BP (patent rights U.S.)	Not necessary; a surfactant may be added to aid in the foaming of certain binders and an antistripping agent may be added to the soft binder	110–120 °C (230–248 °F)	France and Norway, also Canada, Italy, Luxembourg, Netherlands, Sweden, Switzerland, and United Kingdom	>60,000 tons
EMERGING U.S. TECHNOLOGIES					
Evotherm™ (hot aggregate coated with emulsion)	Mead-Westvaco	Yes	85–115 °C (185–239 °F)	France, also Canada, China, South Africa and U.S.	>17,000 tons
Double-Barrel Green	Astec	Not necessary; an antistripping agent may be added similar to normal HMA	116–135 °C (240–275 °F)	U.S.	>4,000 tons
Advera (zeolite)	PQ Corporation	Yes, about 0.25% by total weight of mix	Varies, 20–30 °C (36–54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130–170 °C (266–338 °F), depending on binder stiffness	U.S.	>10,000 tons
	Mathy Construction	Dilute surfactant	110 °C (230 °F)	U.S.	Trial sections only

가. 유기첨가제 제품

유기첨가제의 대표적인 제품은 독일에서 개발된 Sasobit 제품이다. Sasobit이란 Fischer-Tropsch 공정을 거쳐 생산된 왁스이며, Fischer-Tropsch 공정이란 촉매를 넣고 뜨거운 석탄을 수증기로 처리하여 생산한 파라핀 왁스를 말한다.

이 왁스는 융점이 98°C 이상인 긴 분자쇄를 가진 지방족 탄화수소로서, 낮은 온도에서는 아스팔트보다 점도가 높고 고온에서는 낮은 특성을 갖고 있다. 이 왁스는 아스팔트와 혼합된 상태에서 일정하고 미세한 막대형의 입자로 분포되며, 65와 110°C 사이에서 고체화된다. 이 Sasobit 왁스는 아스팔트바인더를 직접 개질시켜 사용하거나 아스콘혼합물을 만들 때 투입하여 사용한다. 아래 그림은 Sasobit 제품에 대한 사진이다. 플레이크(flakes)와 펠렛 형태의 두 종류가 있다.



또 다른 왁스제품으로 Asphaltan-B란 제품이 있으며 이 역시 독일에서 개발되었다. 이 왁스는 정제된 Montan왁스와 지방산아미드(fatty acid amide)를 블랜딩(blending)하여 생산되며, 구성성분은 긴 분자쇄를 가진 카르복실산 에스테르, 알콜, 케톤, 탄화수소 및 수지의 결합체로 되어 있다. Asphaltan-B의 융점은 82-95℃이다. 리그닌왁스, OP 왁스로도 알려진 Montan 왁스는 특정한 리그닌이나 갈색석탄을 용매로 추출하여 얻는다. Montan 왁스는 자동차나 신발의 광택제, 종이나 플라스틱 제조용 윤활제 및 페인트에 사용된다. 전 세계 생산의 1/3이 자동차 광택제로 사용되고 있다.

또 다른 유기첨가제인 Licomont BS 100은 지방산 아미드이다. 이 지방산 아미드는 아민과 지방산을 반응시켜 생산한다. 전형적인 융점은 141-146℃이다. 비슷한 제품이 아스팔트개질제로서 수년간 사용되어 왔으며, 다수의 생산자들로부터 여러 가지 형태로 구할 수 있다. 지방산 아미드는 1970년 후반기부터 1980년 초기까지 지붕용 아스팔트에 사용되었다. 아래 그림은 Licomont BS 100에 대한 사진이다.

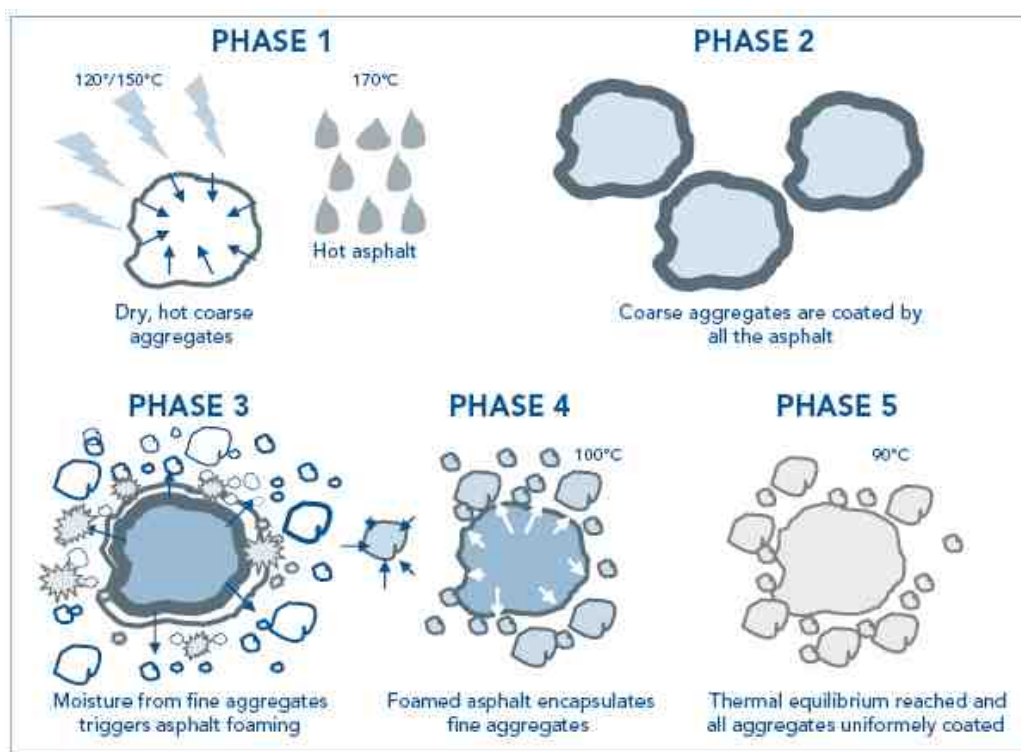


나. 발포제에 의한 아스팔트발포 기술

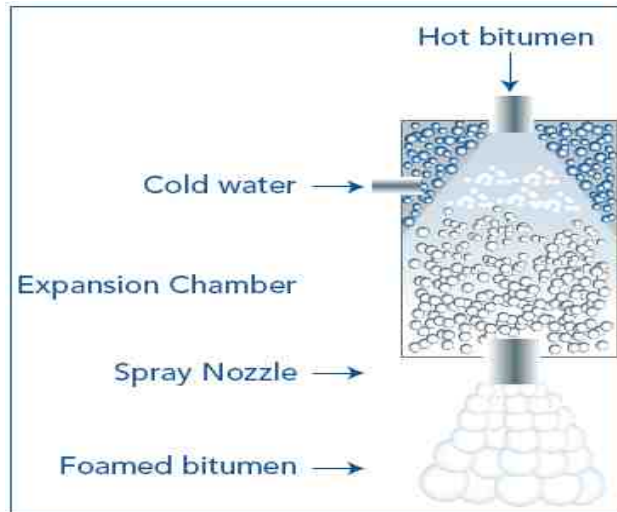
Asphamin은 합성 제올라이트로서 알카리금속인 규산알루미늄으로 되어 있다. 이 합성 제올라이트는 약 20%의 결정체 물을 포함하고 있으며 온도를 올리면 물이 증발한다. 전형적으로 혼합물 중량의 약 0.3% 제올라이트가 아스팔트의 분사 이전에 혹은 분사 직후에 혼합물에 투입된다. 제올라이트는 아주 작은 양의 물을 증발시키면서 제어된 발포효과를 내는 데, 아스팔트바인더는 부피가 약간 증가되면서 혼합물의 점도를 낮추는 결과를 낳는다. 보고되기로는 점진적인 수분의 증발로 인해 6-7시간동안 작업성이 향상되며, 혼합물온도가 100℃이하로 내려갈 때까지 그 효과가 지속된다.

LEA, EBE and EBT 모두 골재에 함유된 수분으로 아스팔트를 발포한다. LEA 공정은 조골재를 약 150℃까지 가열하고, 정상적인 온도로 가열된 아스팔트바인더를 분사하고 혼합한다. 아스팔트바인더의 약 0.5 중량%의 피복 및 접착용 첨가제가 혼합하기 직전에 첨가된다. 조골재가 아스팔트바인더로 피복된 후에, 차갑고 젖은 세골재가 투입 혼합된다. 이상적으로는 세골재가 약 3%의 수분을 함유하는 것이 바람직하다. 그 결과 혼합물온도는 100℃ 이하가 된다. 드럼 혼합공정에서는 세골재가 페아스콘 투입구를 통하여 첨가되며, 세골재가 너무 젖은 상태라면, 세골재의 일부분을 조골재로 건조시켜야 한다. 아래 그림은 이에 대해 잘 설명하고 있다.

LEAB 공정은 Jenkins에 의해 개발된 준 중온 발포 아스팔트의 상업화기술이다. 지금까지 이 공정은 배치공정에서만 적용되었다. 현재까지 이 공정은 ECOMAC을 제외하고는 물의 비등점온도 이상까지 골재의 일부분이라도 가열하지 않은 유일한 공정이다. 신규골재를 약 95℃까지 가열한다. 페아스콘을 다른 건조드럼에서 110-115℃까지 가열한다.



네델란드에서는 약 50%의 페아스콘이 사용된다. 아스팔트바인더는 수분에 의해 발포되어 골재와 혼합된다. 피복과 접착력을 높이기 위해 혼합 바로 직전에 지방산아미드 첨가제를 아스팔트바인더에 첨가한다. 이 첨가제는 작업성을 높이는 기포의 생명을 연장시키는 효과가 있다. 이 방법에 의하면 신규혼합물 생산에는 약 40%의 에너지절약이, 50% 페아스콘을 포함하는 혼합물 생산에는 약 30%의 에너지가 절감되는 것으로 알려지고 있다.



Nynas 저온아스팔트(LT-아스팔트) 공정은 발포를 위한 잠재수분을 유지하고 제어할 목적으로 0.5-1.0% 수분친화형 미분첨가제를 함께 사용하는 특수 발포공정을 채택한다. 골재를 90℃까지 가열한 후, 특정 침입도등급을 가진 아스팔트바인더가 특수 노즐을 통해서 발포되고, 발포된 바인더가 골재와 친수성 미분첨가제와 함께 혼합된다.

WAM-발포는 특수공정이지 첨가제나 재료가 아니다. 노르웨이에서 일반적으로 실시되는 공정으로서 계약자가 두 다른 등급의 바인더를 준비해야 하는 데, 하나는 연한 바인더이고 다른 하나는 딱딱한 바인더이다. 연하고 딱딱한 바인더를 한 라인에서 적절히 혼합하여 원하는 바인더등급을 만든다. 연한 바인더는 60℃ 점도가 1,500 cSt이고, 딱딱한 바인더는 70/100 침입도 등급에 해당한다. 필러가 없는 골재를 약 130℃까지 가열하고 나서 전체 바인더의 20-39%인 연한 바인더로 피복한다. 딱딱한 바인더는 180℃에서 딱딱한 바인더의 2-5%의 질량속도로 첨가되는 찬물에 의해 발포되어 혼합물속으로 혼합된다. 이러한 결과는 혼합물 1톤당 5%를 차지하는 전체 바인더에 0.8 kg의 물이 포함됨을 의미한다. 20%의 1,500 cSt 바인더와 80%의 70/100 침입도 바인더의 혼합 바인더 등급은 산화노화 안 된 70/100 침입도 등급에 해당한다. 따라서 아스콘 생산 공장을 통과한 바인더는 단기 노화과정 후의 70/100 침입도 등급보다 연하다. 조골재를 연한 바인더로 피복하는 것은 조골재의 아스팔트흡수를 만족시키기 위한 것이며, 낮은 온도에서 딱딱한 바인더로는 불가능하기 때문이다.

3. 본 연구의 특허

중온아스팔트포장 관련 특허로는 크게 두 종류가 있다. 하나는 중온 첨가제를 제조하는 방법이고, 다른 하나는 기계분사장치를 아스콘생산 공정에 부착하고 수분을 분사하여 아스팔트를 발포시키는 장치에 관한 방법이다. 전자에 관한 특허가 80% 이상을 차지하고 있다. 국내에는 앞장에서 언급한 세 특허가 등록되어 있다.

본 연구에서는 왁스를 사용하되 외국에서 전혀 사용한 적이 없는 혼합왁스를 사용하고 여기에 발포제를 함께 첨가하여 중온효과를 더욱 증진시키는 연구를 수행할 것이다. 일차년도에 이미 이에 대한 특허를 출원한 상태이다. 이러한 연구를 수행하여 원천기술을 확보함으로써 국내외의 타 특허와 전혀 상관이 없는 창의적인 새 중온 첨가제 기술을 개발할 것이다.

제 2절 본 연구결과가 국내·외 기술개발현황에서 차지하는 위치

국내외를 막론하고 진정한 의미의 개질아스팔트용 중온첨가제는 현재 미개발 상태이다. 개질아스팔트는 일반 아스팔트에 비하여 점도가 높아서 생산이나 시공온도가 최소한 10℃ 이상은 높은 편이다. 따라서 점도 또한 일반 아스팔트포장에 비해 훨씬 높다. 특히 물성이 우수한 개질아스팔트일수록 점도는 더욱 높다고 해도 과언이 아니다. 이러한 이유로 일반 중온첨가제보다 점도저감 효과가 훨씬 뛰어난 중온첨가제의 개발이 개질아스팔트의 중온화에 필수적이다. 일부 물성향상을 위해서 중온첨가제에 개질제를 약간 포함시킨 제품이 있긴 하나 개질제의 함량이 적어 일반 중온 첨가제의 사용만으로도 중온 효과를 발현하는 데 어려움이 전혀 없다. 그러나 소성변형이나 피로균열 저항성이 우수한 개질아스팔트, 저소음 배수성 아스팔트포장, 그리고 개질재생 아스팔트포장처럼 개질제의 점도가 상당히 높은 경우는 중온효과가 탁월한 중온 첨가제의 개발이 요구된다. 본 연구는 이러한 특수 중온 첨가제개발에 초점이 맞추어져 있어서 국내외의 타 중온첨가제와는 차별화를 견지하며, 첨단 기술개발이라 하겠다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절 중온첨가제의 실험실적 제조와 물성시험

1. 중온아스팔트 시료의 실험실적 제조

각종 왁스 군과 발포제 군 중에서 중온첨가제로서의 가능성이 있는 화합물을 선정하여 원료를 구매하였다. 이들이 중온 첨가제로서의 역할을 얼마나 효율적으로 수행하는 가를 알아보기 위하여 아스팔트 함량의 1% 혹은 3%를 아스팔트와 혼합하여 각기 다른 시료를 제조하였다. 시료를 제조하기 위한 혼합장비는 그림 4에 나타나 있다. 이 장비를 이용한 시료제조절차는 다음과 같다.



그림 4. 혼합장비.

- ① 오븐에서 용융된 아스팔트를 적정량 계량하여 스텐 비커에 붓고, 이 비커를 가열맨틀 속에 넣는다.
- ② 온도제어장비를 170℃로 세팅하면 가열맨틀의 히터가 비커를 가열하기 시작하여 비커속의 아스팔트에 담군 온도센서가 설정온도인 170℃에 도달하게 된다. 이 때 계량된 중온첨가제 조성물을 아스팔트에 첨가하고 화장품의 균일혼합에 사용하는 호모지나이저(homogenizer)를 사용하여 혼합하기 시작한다. 호모지나이저(homogenizer)의 기능은 바깥톱니가 고정된 상태에서 내부톱니가 회전하며 아스팔트에 투입된 첨가제 입자를 잘게 쪼갬다. 첨가제가 아스팔트와의 상용성이 나쁠 경우에 호모지나이저(homogenizer)는 미세 용융입자를 아스팔트에 균일하게 분산시키고, 아스팔트와의 상용성이 좋을 경우에는 균일한 단일 용융물로 만든다. 톱니의 맞물림에 의해 미세입자를 만드는 과정은 호모지나이저의 회전수와 직접 관련이 있으며 원하는 입상을 만들기 위해서는 충분한 시간을 요한다.

- ③ 균일한 분산상이나 용융 상을 보장하면서 혼합시간을 단축하기 위하여 최적 회전수(Optimum RPM)가 되도록 해야 한다. 이 때 최적회전수라 함은 톱니의 마찰열에 의해 온도제어가 불가능하게 되지 않는 최대 회전수를 일컫는다.
- ④ 혼합을 시작한 후 1시간이 경과한 후에 첨가제가 아스팔트에 균일하게 용해하여 균일한 혼합물이 형성되면 혼합공정을 종료한다.
- ⑤ 용융된 혼합물이 냉각되어 점도가 높아지기 전에 비커의 내용물을 시편 캔에 붓고 시료 명을 캔 표면에 적은 후에 상온에서 냉각시킨다.

2. 제조된 시료의 점도시험

가. 회전점도계(Rotational Viscometer, RV)

제조된 시료의 점도시험에 회전점도계를 사용하였다. 회전점도시험은 아스팔트 바인더의 흐름특성을 결정하기 위해 사용한다. 그림 5에서는 회전 동축 실린더 점도계를 보여주며, 이 점도계는 다양한 형태의 아스팔트 바인더를 평가하기 위해 필요하다. 회전점도계(Rotational Viscometer)는 모세관 점도계(Capillary Viscometer)와 상이하고 구성요소 사이에 더 큰 여유 공간을 가지며, 개질 및 비개질 아스팔트 모두에 적용할 수 있다. 회전점도계는 시험온도에서 점도를 자동으로 계산한다. 회전점도는 일정한 온도에서 아스팔트 바인더 시료에 담긴 스핀들이 일정한 속도로 회전하기 위해 필요한 토크를 측정하여 계산한다. 대표적인 회전점도계로서 가장 흔히 사용되고 있는 장비가 브룩필드 점도계이다. 본 실험은 브룩필드 점도계를 사용하여 앞서 실험실에서 제조한 중온아스팔트시료의 점도를 측정하였다.

나. 점도측정용 시료준비

약 30g의 바인더를 용융액체가 될 때까지 150℃ 이하로 오븐에서 가열한다. 가열하는 동안 공기를 제거하기 위해 가끔씩 시료를 휘젓는다. 시료는 예열된 시료용기에 담아 무게를 측정하며, 사용하는 아스팔트 양은 일반적으로 8~11g으로 스핀들 크기에 따라 변한다. 바인더 시료가 들어있는 시료용기를 예열된 온도조절용기(Thermo Cell)에 넣고 예열된 스핀들을 시료에 넣는다. 측정온도가 아주 중요함으로 온도가 세팅한 온도가 되도록 안정화시켜 시험을 시작한다. 온도를 안정화하는 데 상당한 시간이 걸린다. 시험시간은 일반적으로 약 30분 정도 걸린다.

다. 점도시험 절차

회전점도를 측정하기 위한 장치는 부룩필드 점도계와 써머셀 장비로 구성된다. 부룩필드 점도계는 모터, 스핀들, 제어키, 디지털 표시기로 구성된다. 그림 6에서 보는 바와 같이 모터는 스프링을 통하여 스핀들에 회전을 가하며, 토크가 증가함에 따라 스프링은 감기고 스프링에서의 토크는 회전식 트랜스듀서(Transducer)에 의해 측정된다. 모터는 20rpm으로 회전하도록 설정한다. 스핀들은 가열시료를 담고 있는 시료용기에 담그고 점도계와 연결한다. 바인더

의 점성은 스펀들 회전에 저항한다. 부룩필드 장치에서는 시험하는 바인더의 점도에 따라 다양한 스펀들을 사용한다. 제어키는 스펀들 번호와 같은 시험정보를 입력하는데 사용하고 또한 회전속도를 설정하고 모터를 켜고 끄는데 사용한다.

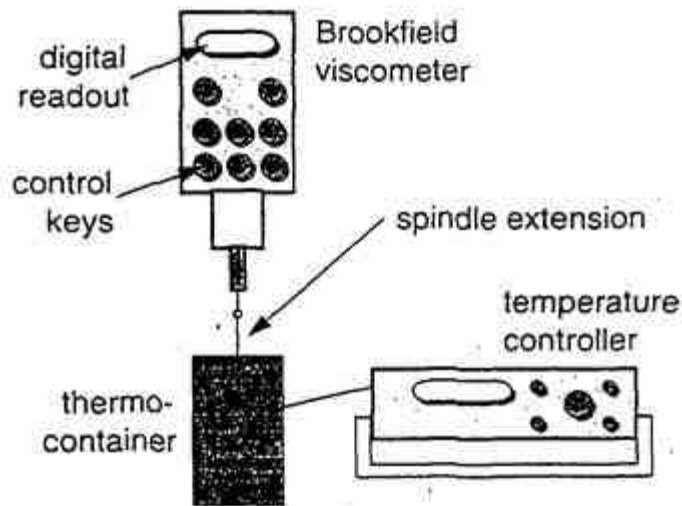


그림 5. 회전점도계

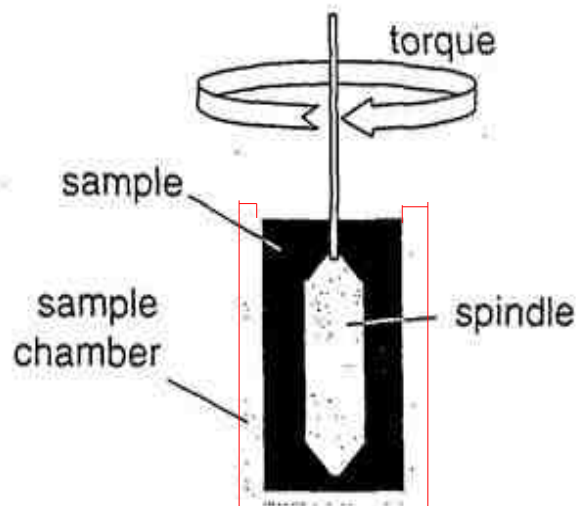


그림 6. 회전점도계의 원리

써모 셀(Thermo Cell) 장비는 시료용기, 온도조절용기, 온도조절기로 구성된다. 시료용기는 스테인레스 스틸 컵이나 알루미늄 컵이며, 온도조절용기는 시료용기를 거치하고 시험온도를 유지하거나 변경할 수 있는 전자가열장치로 되어 있다. 온도조절기는 시험온도를 135℃로 설정한다.

점도기가 제대로 기능을 발휘하기 위해 점도계와 온도조절용기는 레벨장치를 사용하여 수평을 맞추어야 한다. 135℃의 일정한 시험온도에 도달할 때까지 약 15분을 기다려야 한다. 이 기간 동안 점도계 모터를 켜고 디지털 표시기의 점도 값과 퍼센트 토크(2~98%)를 관찰한다.

만약 퍼센트 토크가 규정 범위를 벗어나면, 다른 크기의 스피들을 사용한다. 온도가 평형을 이룸에 따라 점도 값은 안정되고 시험결과가 기록된다. 시험결과를 보고하는데 필요한 점도, 시험온도, 스피들 번호 및 속도와 같은 정보를 보여주기 위해 디지털 표시기를 설정한다. 1분 간격으로 3번의 점도 값을 읽어 기록한다. 그림 7에서는 디지털 표시기 좌측 상부의 4가지 표시변화를 보여주며, 이것은 점도, 퍼센트 토크, 전단 속도, 전단응력이다.

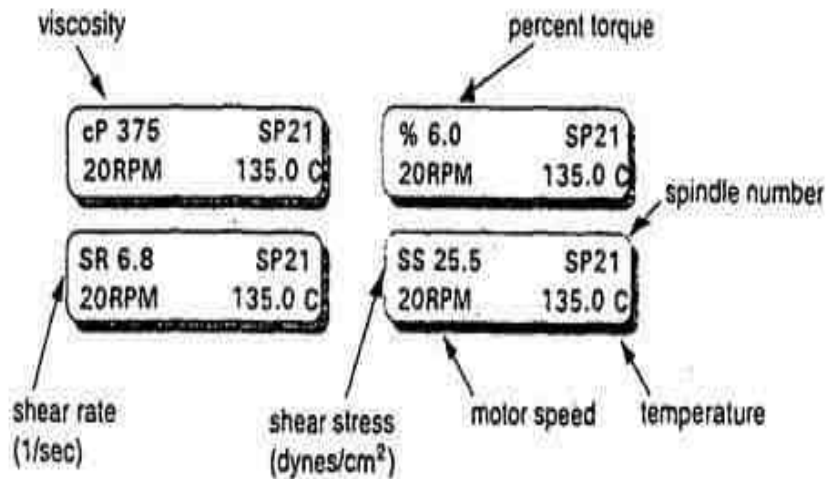


그림 7. 회전 점도계 디지털 표시기.

어떤 경우에는 135℃ 이외의 온도에서 바인더 점도를 측정할 필요가 있다. 대부분 기관에서는 배합설계 동안 혼합 및 다짐을 위해 등가점도온도를 사용한다. 실내에서 시료를 혼합하고 다짐할 때에는 바인더 점도의 규정 범위가 되도록 바인더 온도를 조절한다. 따라서 바인더의 점도-온도 관계 곡선이 필요하다. 이 등가점도온도를 얻기 위해 요구온도보다 높게 써머셀 제어기를 재설정하고 시험은 앞에서 서술한 순서대로 다시 수행한다.

라. 측정자료 분석

135℃에서의 점도는 3개의 점도 측정값을 평균하여 보고한다. 회전 점도계에서 디지털 출력결과와 점도 단위는 centipoise(cP)이나 슈퍼페이브 바인더 규정에서는 Pascal-seconds(Pa · s)를 사용한다. cP의 변환은 $1000\text{cP} = 1\text{Pa} \cdot \text{s}$ 를 사용한다. 따라서 Pa · s 단위의 점도를 얻기 위해서는 cP로 표시된 부록필드 점도에 0.001을 곱한다. 앞에서 언급한 것처럼 시험온도, 스피들 번호, 속도는 시험결과를 보고하는데 필요하다. 슈퍼페이브에서는 바인더 점도를 최대 3 Pa · s로 규정하는데 바인더 공급자가 요구 온도에서의 처리 및 펌핑을 보장하면 시험을 면제할 수도 있다.

3. 측정점도 데이터의 분석

가. 온도에 따른 점도분석 이론

중온첨가제의 기능을 조사하기 위해서, 본 연구에서는 앞장에서 설명한 바와 같이 예상 가능한 중온첨가제를 아스팔트에 투입하여 균일시료를 제조하였다. 중온첨가제의 기능은 중온아스팔트의 점도가 생산과 시공온도에서 일반 아스팔트의 점도와 비교하여 훨씬 작아지게 하는 데 있으며 이점을 이용한 것이 중온아스팔트포장기술이다. 따라서 중온 첨가제를 개발하기 위해서는 중온아스팔트의 점도와 온도와의 관계를 조사하는 것이 필수적이다.

점도와 온도와의 관계에 대한 이론식은 아레니우스(Arrhenius) 법칙을 따른다;

$$\eta = \eta_0 \cdot \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

위 식의 양변에 Log를 취하면 다음 식으로 간략화 된다. 식 (2)에서 Log(η)를 y-축으로 1/T를 x-축으로 도표를 그리면 직선식이 얻어진다.

$$\text{Log}(\eta) = A + \frac{B}{T} \quad (2)$$

η = 켈빈절대온도 T에서의 시료 점도

η_0 = 켈빈절대온도 T_0 에서의 시료 점도

E_a = 유동을 위한 활성화에너지(Activation Energy for Flow)

R = 만능 가스 상수 (Universal Gas Constant)

B = E_a/R = 직선식의 기울기

A = Log(h) 축과 직선식의 접점

위 식 (2)에서 Log(η)가 작아지려면 A와 B가 동시에 적은 값을 나타내면 당연한 결과가 되겠지만, B값이 설령 크다 하더라도 B/T가 커지는 속도에 비해 A-값이 충분히 작으면 Log(h)가 일정 온도범위 내에서는 여전히 작은 값을 가질 수 있다.

나. 중온첨가제 선정을 위한 측정 점도데이터의 분석

왁스와 발포제 중에서 중온첨가제의 가능성을 지닌 시료, A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K를 선정하여 앞에서 설명한 바와 같이 하여 중온아스팔트를 제조하였다. 제조된 재료에서 브룩필드 점도측정용 시료를 만들고, 온도를 95, 105, 115, 125, 135 및 145℃로 변화시켜 가며 각기 해당점도를 시료별로 측정하였다. 측정된 데이터는 표 2에 수록되어 있다.

표 2. 예상 중온아스팔트의 온도에 따라 측정된 점도 데이터

℃	Asphalt	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
145	1,675	2,541	1,520	340	1,520	1,490	2,052	1,430	350	350	1,100	1,135
135	3,110	5,666	2,656	507	2,630	2,870	3,645	2,612	560	552	1,927	1,985
125	6,270	9,083	5,248	862	5,320	5,300	7,870	4,741	961	933	4,060	4,070
115	11,660	22,600	11,940	1,582	12,300	10,580	16,900	8,633	1,752	1,737	9,012	9,525
105	21,700	61,600	28,160	3,170	30,200	18,470	37,050	17,060	3,420	3,337	19,650	22,000
95	55,600	148,600	74,700	6,850	74,700	46,700	82,300	37,160	7,540	7,291	68,400	74,500

위 표에서 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K는 각기 다른 첨가제를 나타내며 첨가함량은 전체의 1%이고 99%는 아스팔트이다. 측정된 일반 아스팔트의 점도를 기본으로 하여 예상 중온아스팔트의 점도와 비교해 보았다. 그 결과 위 표에서 회색으로 표시한 첨가제가 중온첨가제로서의 가능성이 크다. 특히 C, H, I가 중온 첨가제로서의 가능성이 아주 우수하다. 식 (2)를 이용하여 표 2의 데이터를 분석해 보았다. 그 결과는 아래 그림 8-18에 나타나 있다.

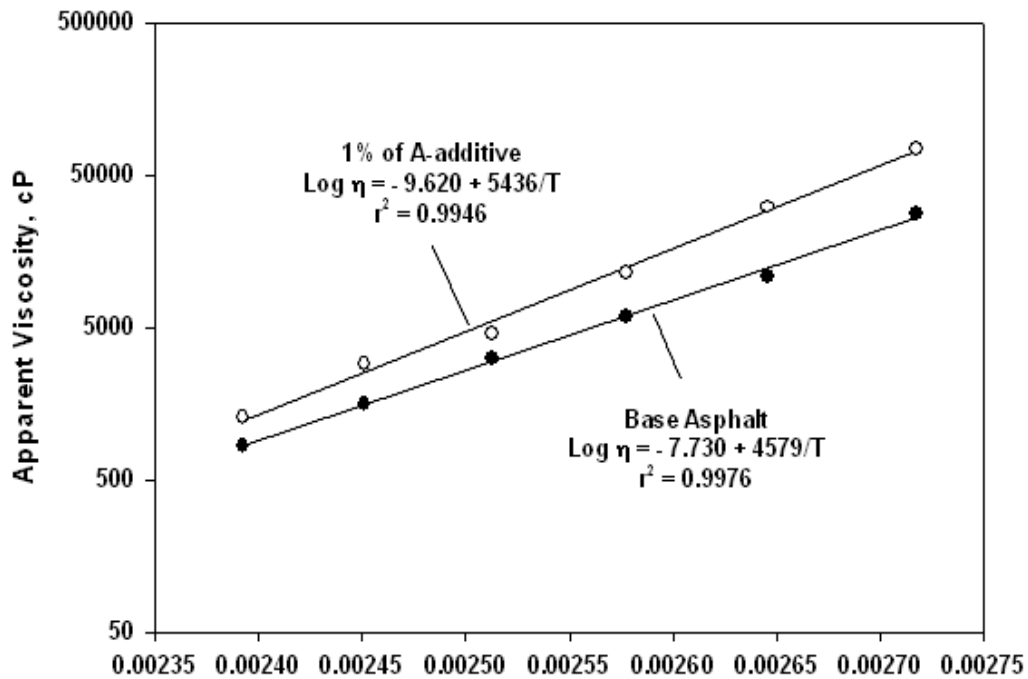


그림 8. 첨가제 A의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

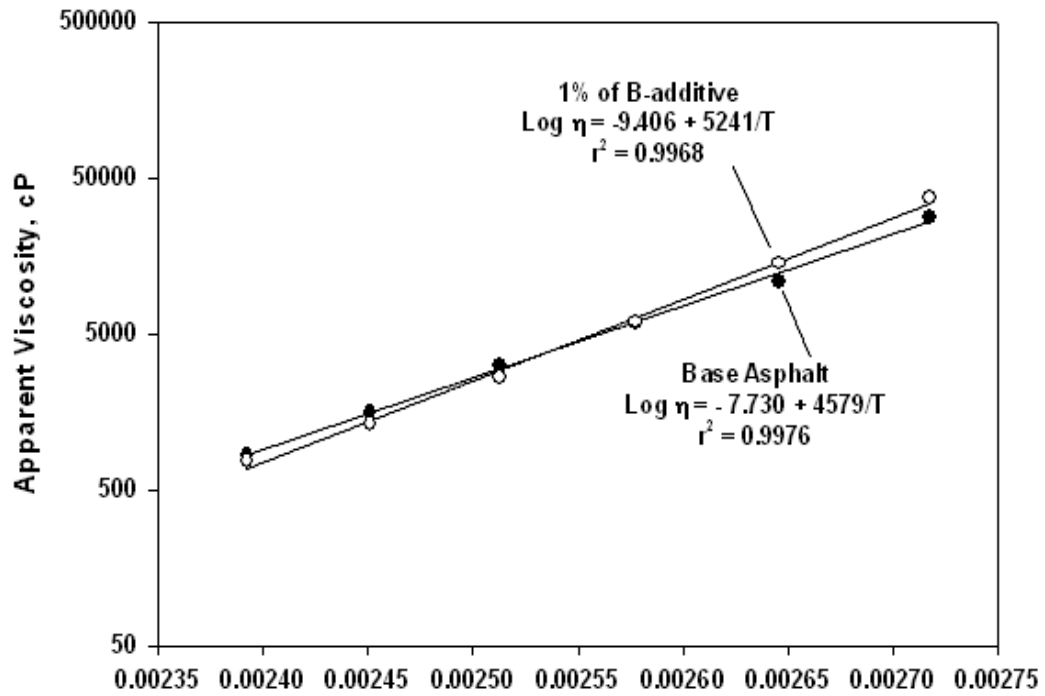


그림 9. 첨가제 B의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

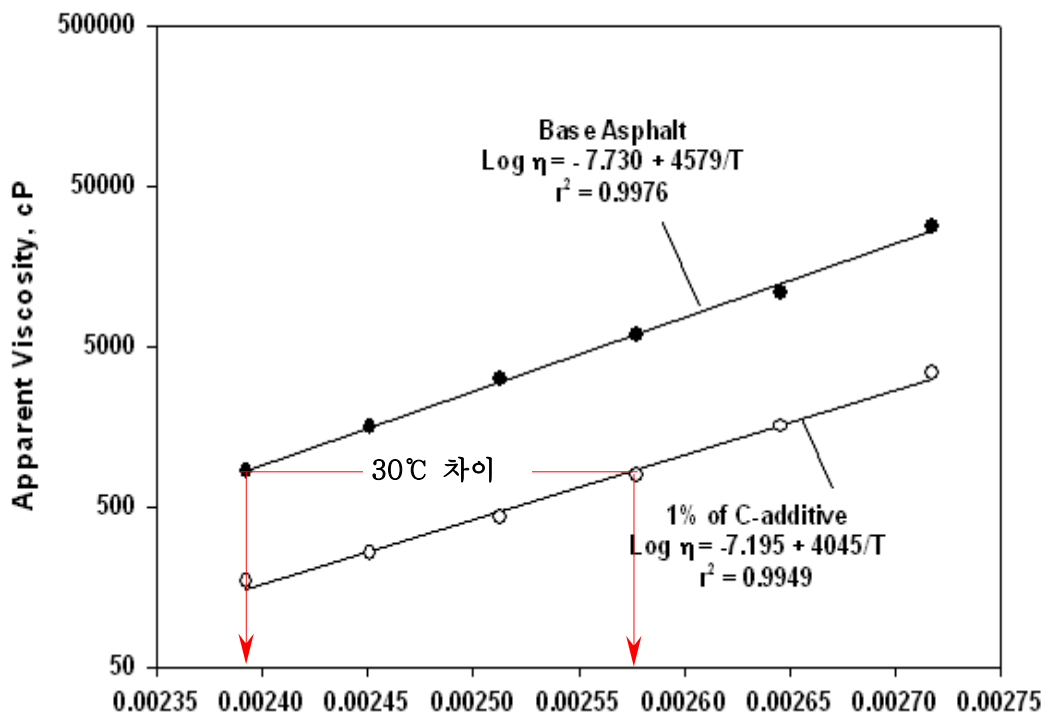


그림 10. 첨가제 C의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

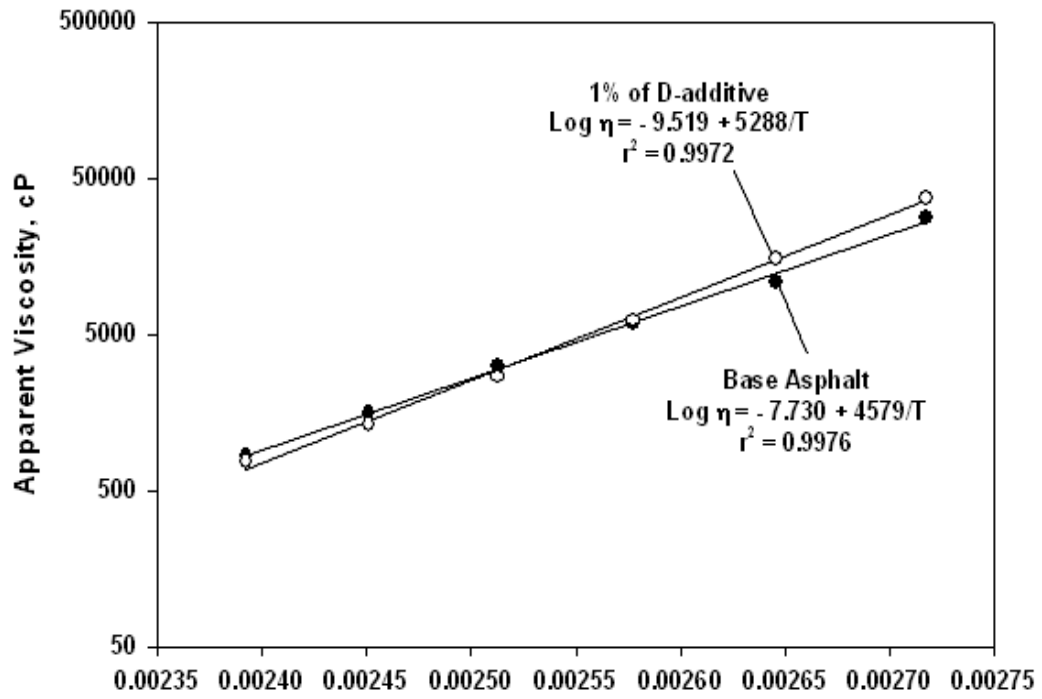


그림 11. 첨가제 D의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

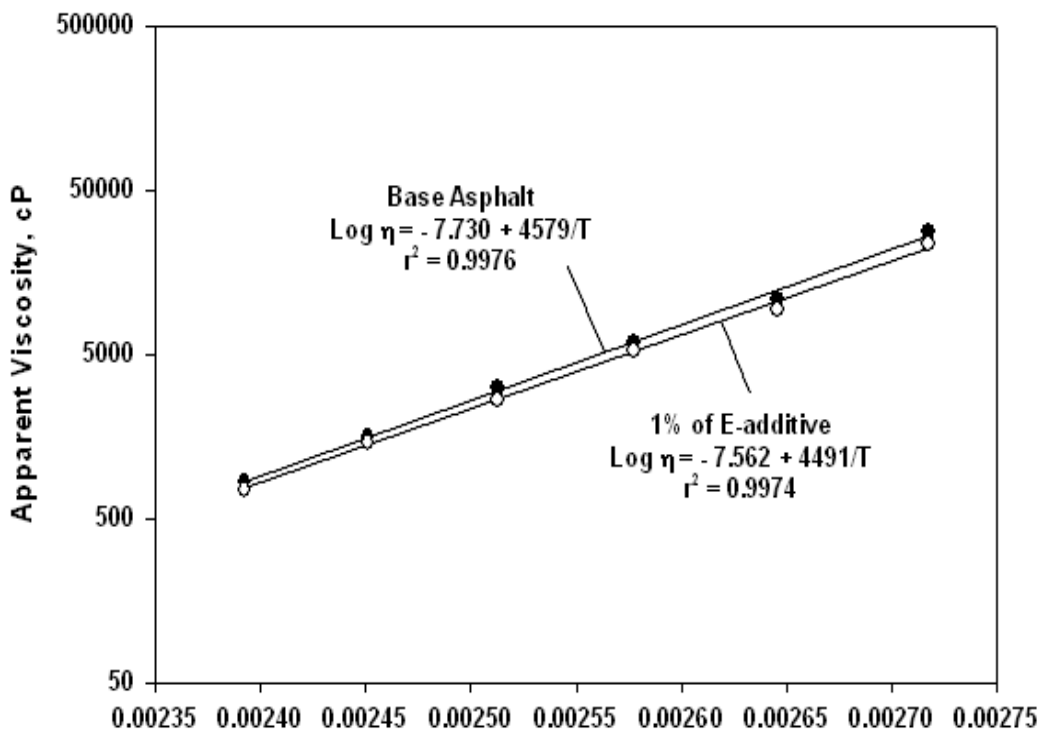


그림 12. 첨가제 E의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

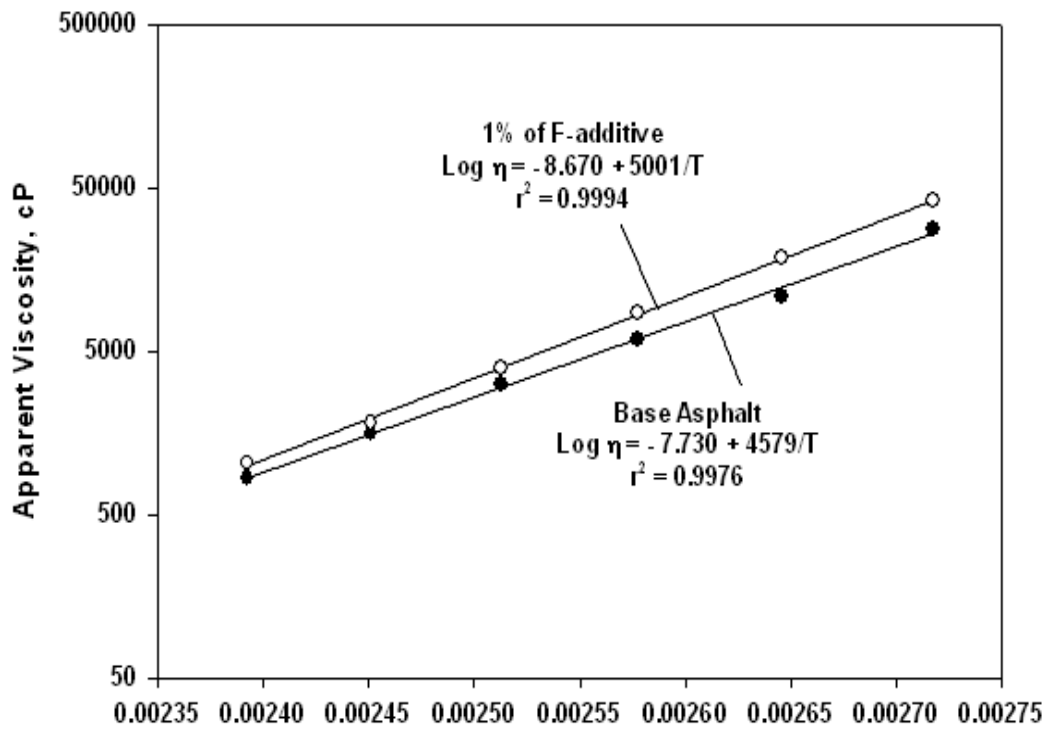


그림 13. 첨가제 F의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

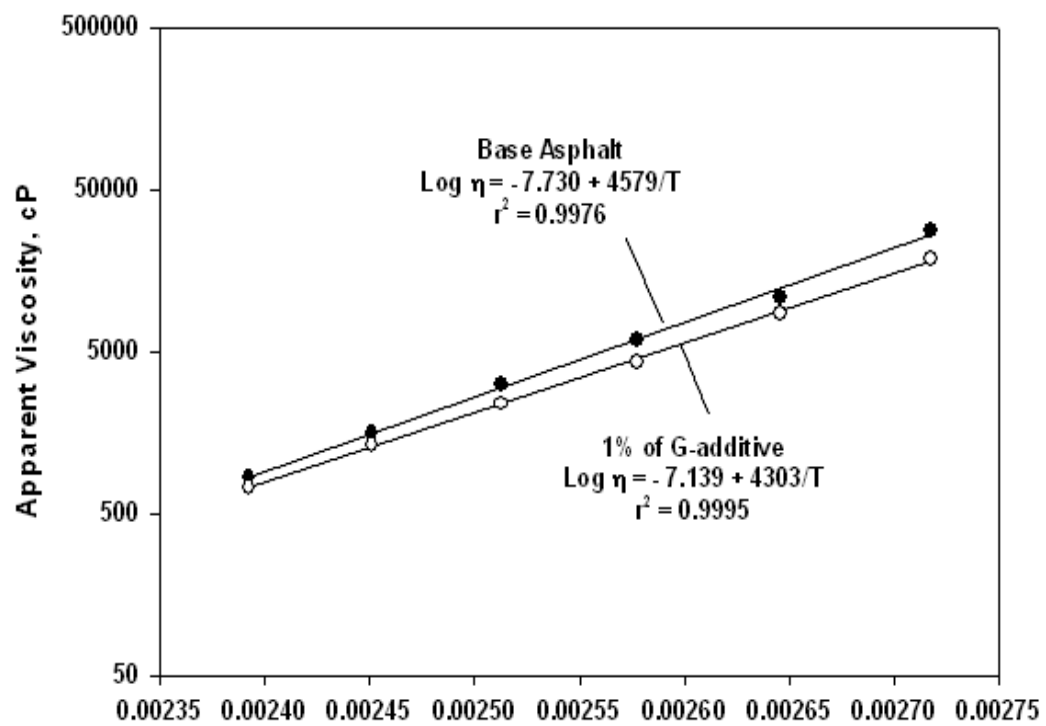


그림 14. 첨가제 G의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

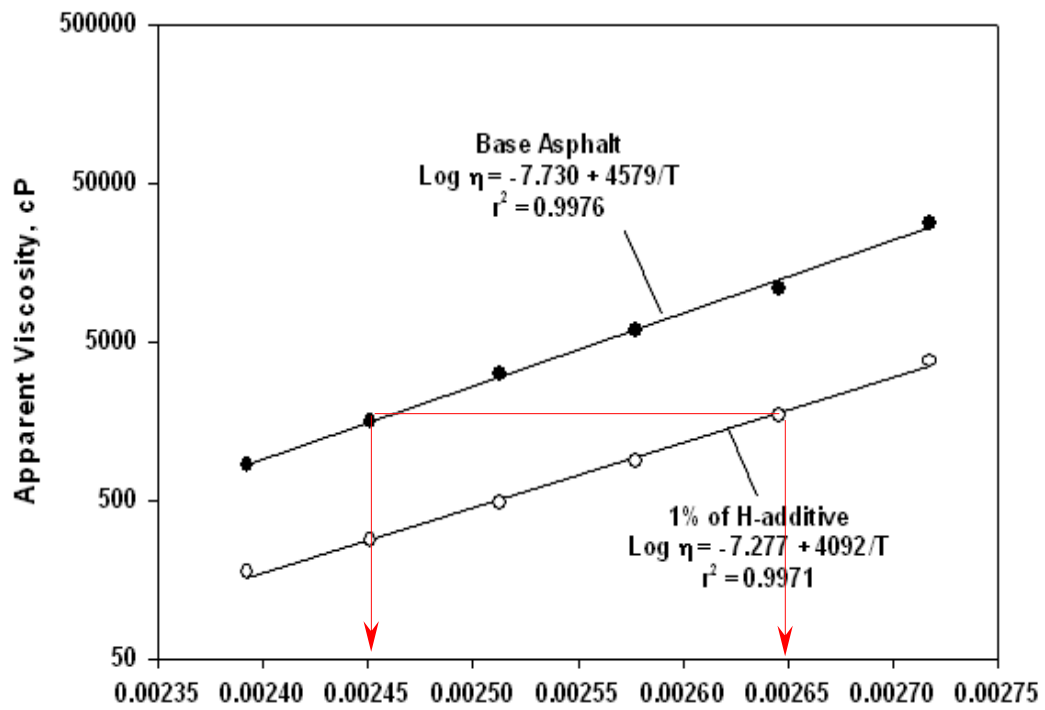


그림 15. 첨가제 H의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

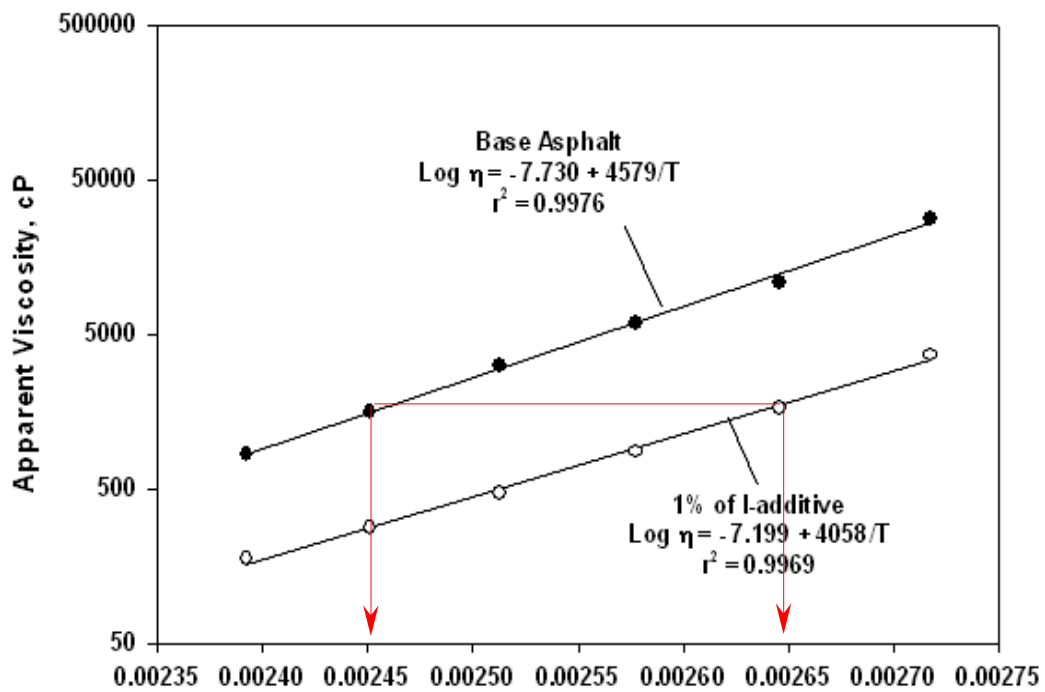


그림 16. 첨가제 I의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

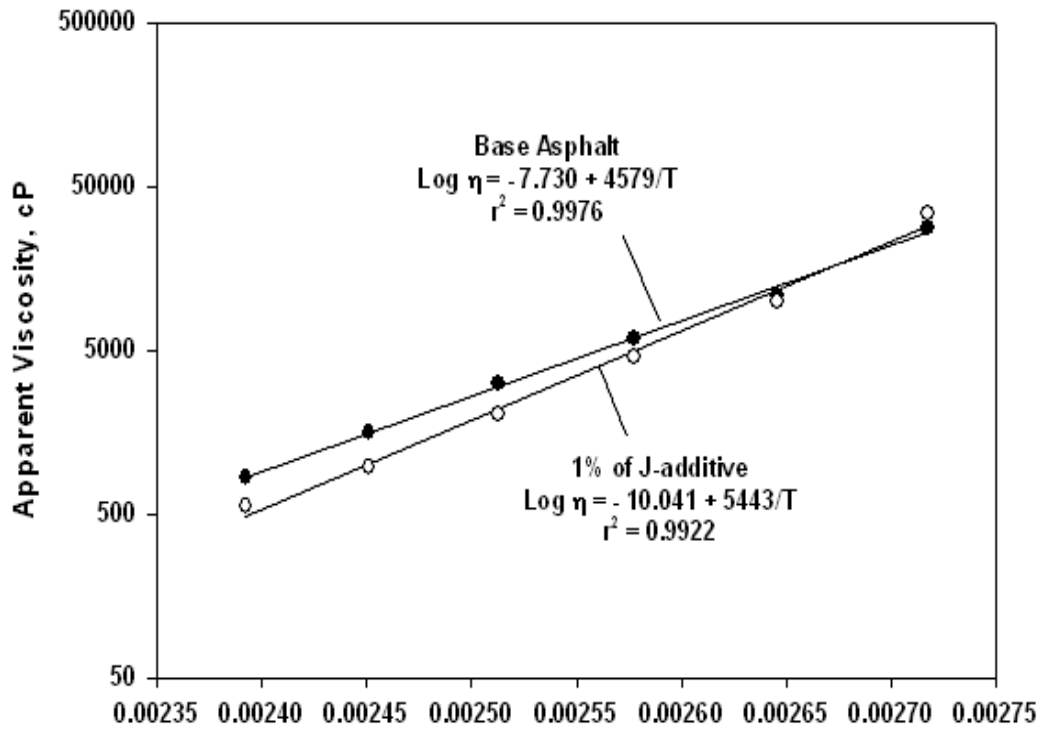


그림 17. 첨가제 J의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

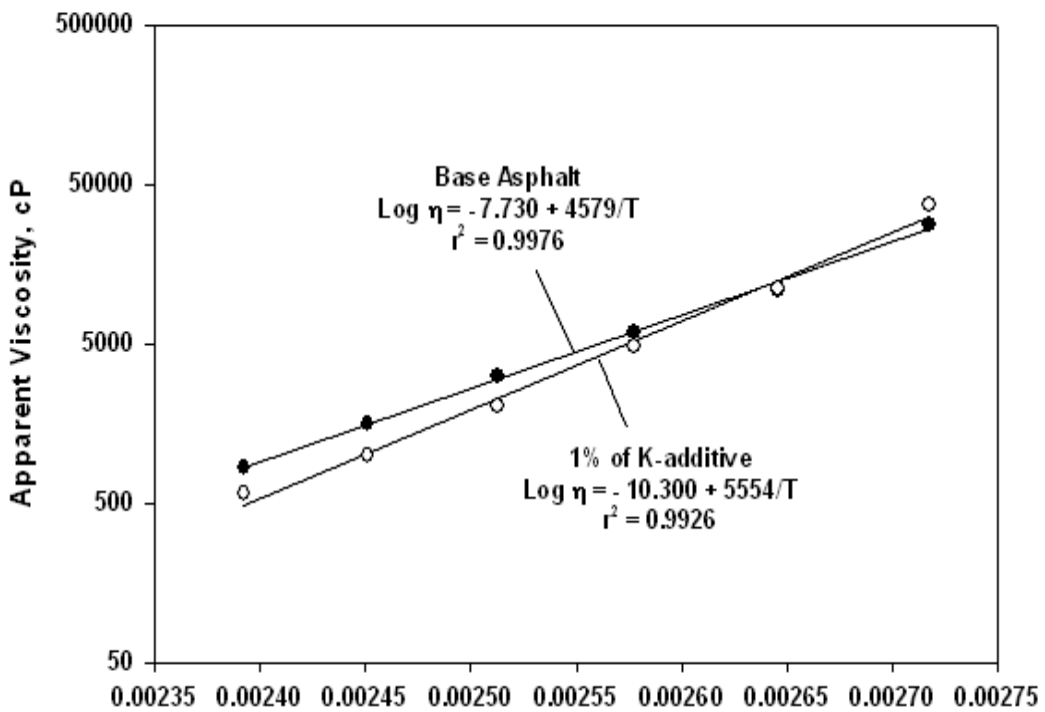


그림 18. 첨가제 K의 중온아스팔트와 일반아스팔트와의 비교.

상기 회귀분석결과로 얻어진 식 (2)의 상수들을 아래 표 3에 나타내었다.
 위의 그림들과 표 3을 참조하면 크게 세 유형으로 중온 첨가제로서의 가능성을 구분할 수 있다. 즉,

- ① 중온첨가제로서의 가능성이 적은 경우 --- A, F
(측정온도의 모든 영역에서 아스팔트에 비하여 점도가 높음)
- ② 중온첨가제로서의 가능성은 있으나 첨가함량의 증가가 필요 --- J, K
(아스팔트에 비하여 기울기는 크나 절편이 아주 작음; 이 경우 아스팔트의 직선식과 이들 첨가제가 포함된 아스팔트의 직선식이 한 점에서 서로 교차함; 즉 온도가 높은 영역(교차점 이전영역)에서는 아스팔트에 비하여 점도가 낮고, 온도가 낮은 영역(교차점 이후영역)에서는 점도가 높음; 교차점이 비교적 낮은 온도에 위치하면 생산과 시공온도에서 점도가 낮음으로 더욱 바람직함)
둘째 경우와 유사하나 그 경향이 적게 나타나는 첨가제 --- B, D
- ③ 중온첨가제로서의 가능성이 매우 큰 경우 --- C, H, I
(측정온도의 모든 영역에서 아스팔트에 비하여 점도가 낮음; 절편은 비슷하나 기울기가 현저히 적음; 생산과 시공온도가 약 30℃ 가량 감소함)
유사한 경향을 보이지만 그 영향이 적은 첨가제 --- E, G

표 3. 점도데이터의 회귀분석 결과

그림 번호	바인더의 종류	식 (2)의 기울기(Ea/R)	식 (2)의 절편	식 (2)의 신뢰지수(r^2)
	아스팔트	4579	-7.730	0.9976
8	첨가제 A +아스팔트	5436	-9.620	0.9946
9	첨가제 B +아스팔트	5241	-9.406	0.9968
10	첨가제 C +아스팔트	4045	-7.195	0.9949
11	첨가제 D +아스팔트	5288	-9.519	0.9972
12	첨가제 E +아스팔트	4491	-7.562	0.9974
13	첨가제 F +아스팔트	5001	-8.670	0.9994
14	첨가제 G +아스팔트	4303	-7.139	0.9995
15	첨가제 H +아스팔트	4092	-7.277	0.9971
16	첨가제 I +아스팔트	4058	-7.199	0.9969
17	첨가제 J +아스팔트	5443	-10.041	0.9922
18	첨가제 K +아스팔트	5554	-10.300	0.9926

상기 연구결과를 통해서 중온아스팔트바인더를 제조하기 위하여 C, H, I 첨가제가 가장 좋은 기능을 보여주고 있고, J와 K 첨가제도 중온첨가제로서 사용할 수 있으나 첨가함량을 증가시킬 필요가 있다. 2차년도 연구에서는 J와 K의 첨가함량 증가가 전체 아스팔트 점도에 미치는 영향을 연구해야 할 필요가 있다.

다. 개질아스팔트를 위한 중온첨가제 개발

아스팔트에 개질제를 첨가하고 강력전단혼합기인 호모지나이저(Homogenizer)를 사용하여 170℃에서 1시간가량 혼합하여 개질아스팔트(M-Asphalt)를 제조하였다. 상기 개질아스팔트에 첨가제 A, B, C, D, E를 전체 바인더 함량의 3%가 되게 첨가하고 30분간 혼합하여 균일한

예상 중온개질아스팔트(MA, MB, MC, MD, ME)를 제조하였다. 이렇게 제조된 예상 개질 중온아스팔트 시료를 브룩필드 점도계를 사용하여 온도를 변화시켜가며 각기 해당점도를 측정하였다. 측정한 데이터는 아래 표 4에 수록되어 있다.

표 4. 예상 개질아스팔트의 온도에 따라 측정한 점도 데이터

℃	M-Asphalt	MA	MB	MC	MD	ME
145	1,150	3,210	1,417	1,230	1,188	2,002
135	1,885	5,600	2,416	2,085	1,962	3,965
125	3,440	10,330	4,315	3,720	3,340	6,820
115	6,460	20,350	8,260	6,620	6,570	15,540
105	13,160	41,700	17,720	13,480	14,300	37,550
95	27,250	89,900	38,300	31,500	26,600	105,500

위 표 4에서 개질아스팔트를 위한 중온첨가제의 가능성을 지닌 첨가제는 특별히 발견되지 않는다. 다만 MC와 MD가 그 가능성을 가지고 있는 것으로 관측된다. 이 경우 이들의 첨가제함량을 더욱 증가시켜 전체 바인더점도를 더욱 떨어뜨릴 필요가 있다. 식 (2)를 사용한 분석결과와는 아래 그림 19-23에 나타나 있다.

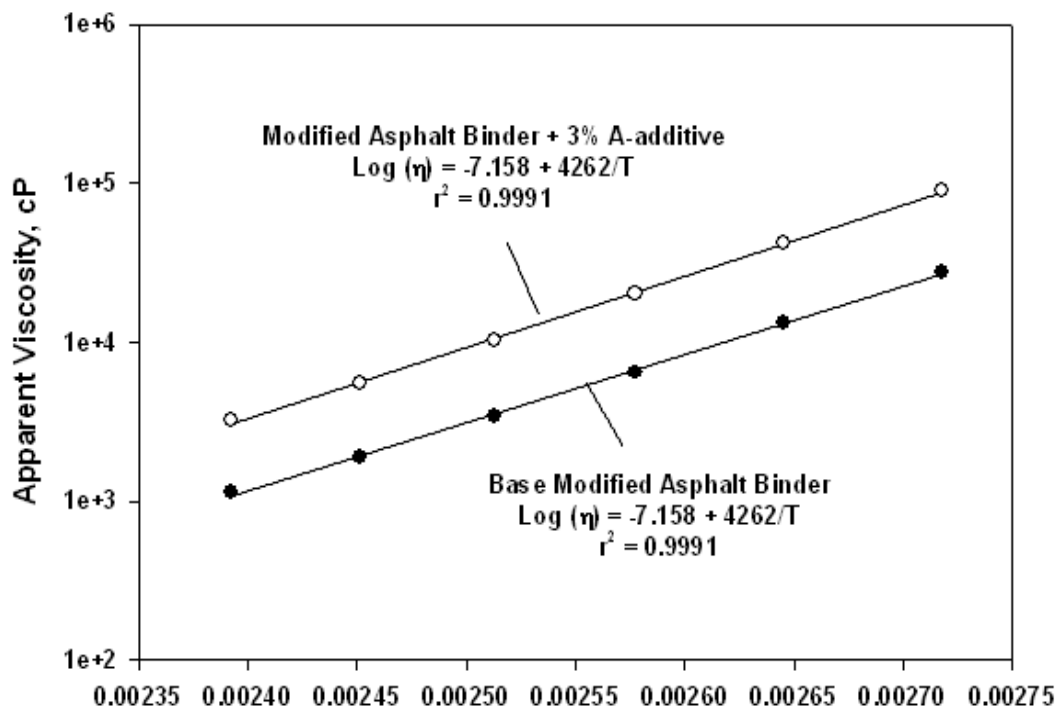


그림 19. 첨가제 A의 중온 개질아스팔트와 개질아스팔트와의 비교.

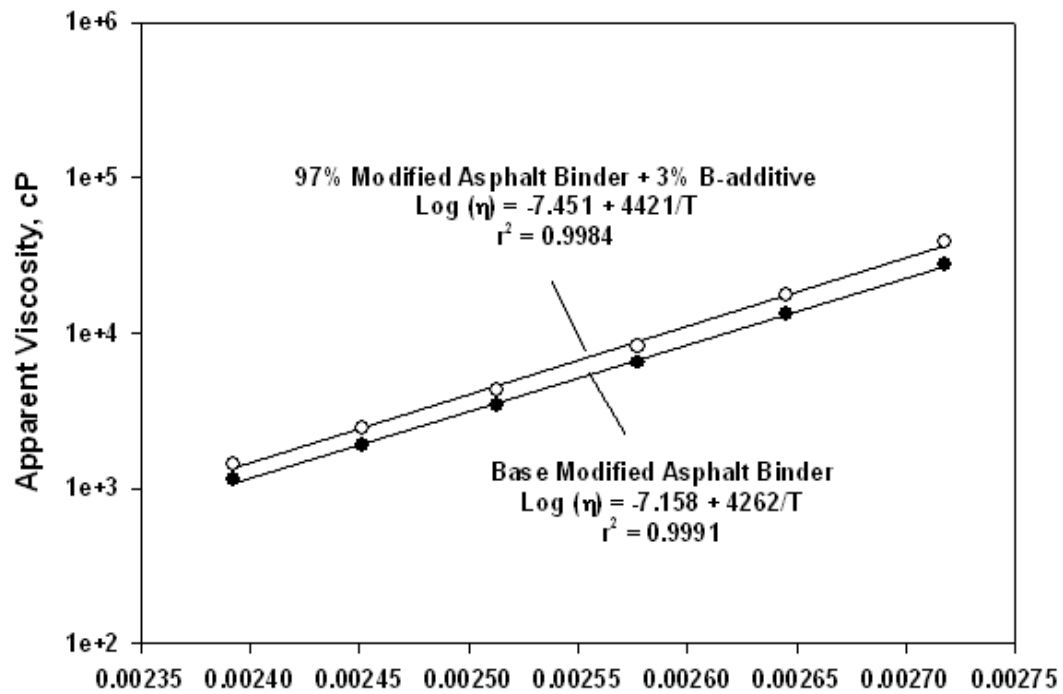


그림 20. 첨가제 B의 중온 개질아스팔트와 개질아스팔트와의 비교.

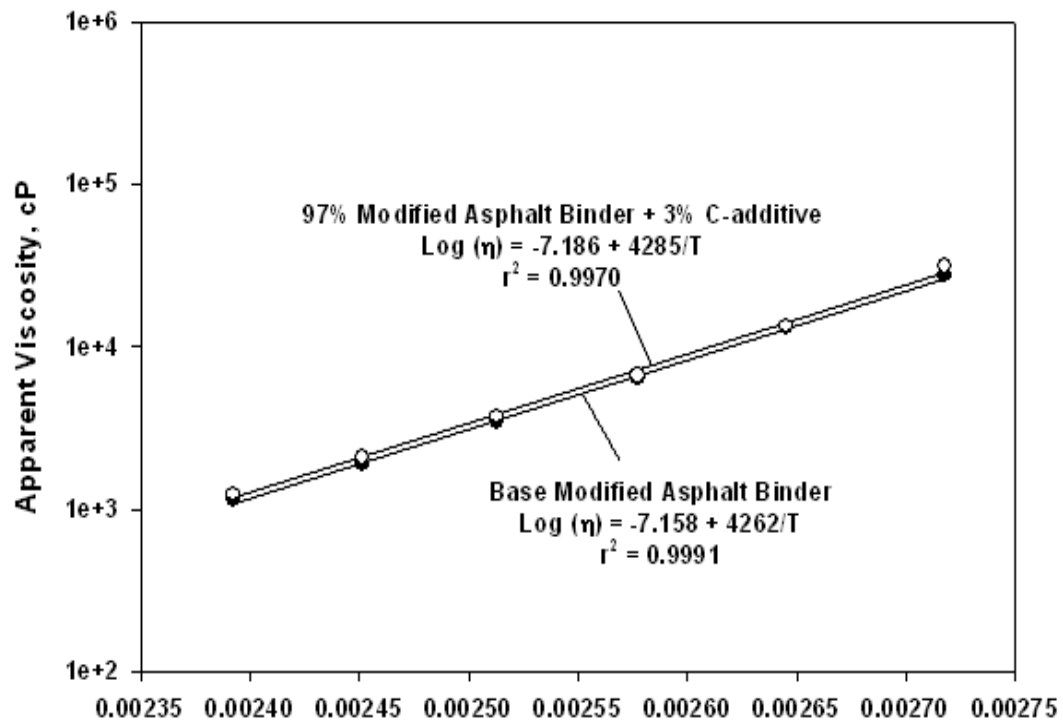


그림 21. 첨가제 C의 중온 개질아스팔트와 개질아스팔트와의 비교.

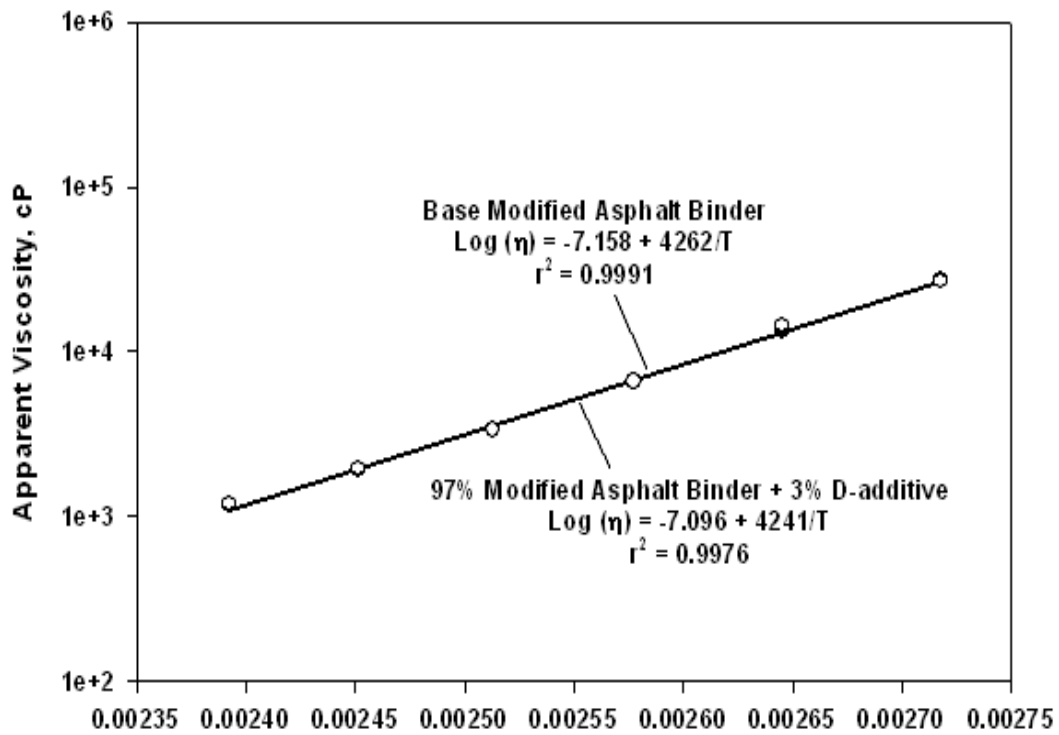


그림 22. 첨가제 D의 중온 개질아스팔트와 개질아스팔트와의 비교.

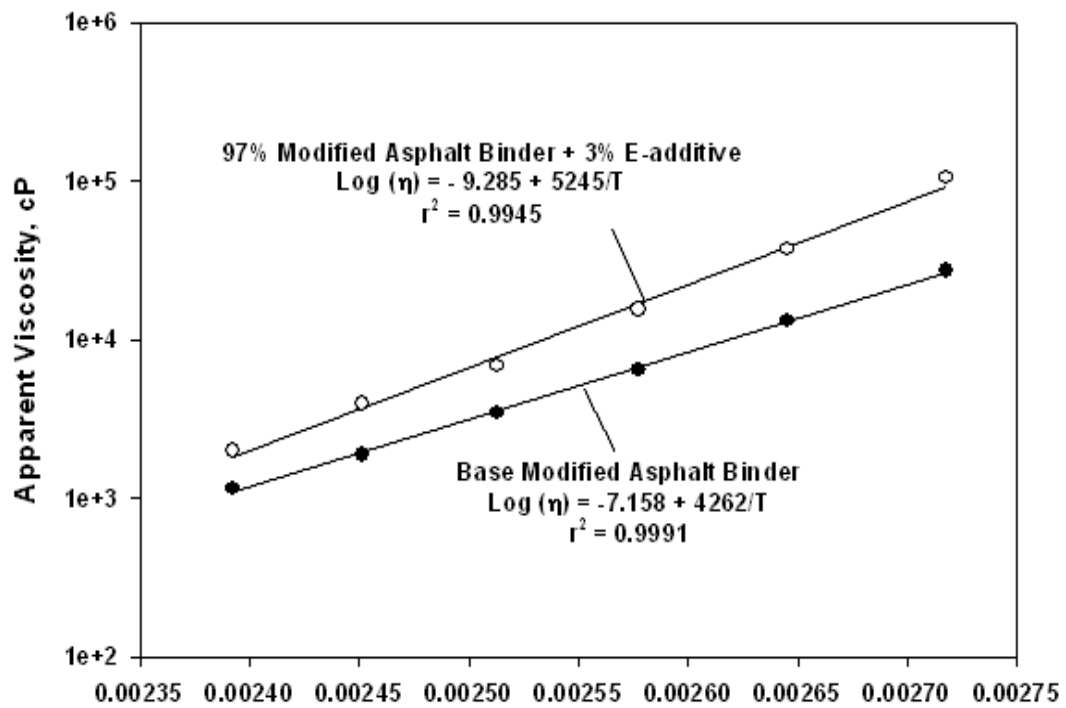


그림 23. 첨가제 E의 중온 개질아스팔트와 개질아스팔트와의 비교.

상기 회귀분석결과로 얻어진 식 (2)의 상수들을 아래 표 5에 나타내었다.

표 5. 개질아스팔트 점도데이터의 회귀분석 결과

그림 번호	바인더의 종류	식 (2)의 기울기(Ea/R)	식 (2)의 절편	식 (2)의 신뢰지수(r^2)
	개질아스팔트	4262	-7.158	0.9991
19	첨가제 A +개질아스팔트	4466	-7.149	0.9996
20	첨가제 B +개질아스팔트	4421	-7.451	0.9984
21	첨가제 C +개질아스팔트	4285	-7.186	0.9970
22	첨가제 D +개질아스팔트	4241	-7.096	0.9976
23	첨가제 E +개질아스팔트	5245	-9.285	0.9947

위의 그림들과 표 5를 참조하면 개질아스팔트를 위한 중온 첨가제로서의 가능성을 알아볼 수 있는 데, 조사한 첨가제 중에는 뚜렷이 효과적인 첨가제가 발견되지 않는다. 그나마 가능성이 있는 첨가제로서는 C와 D가 있다. 그러나 본 실험에서 사용한 3%로는 중온 첨가제로서의 기능이 약함으로 함량을 더욱 증가하여 연구할 필요가 있다. 2차 년도에서는 이러한 가능성을 조사할 것이다. 이 외에도 다른 첨가제의 영향에 대한 조사가 필요하다. 예를 들어, 앞서 중온첨가제로서의 기능을 확인한 H, I, J, K에 대한 연구가 진행되어 2차 년도에서도 계속적으로 개질아스팔트를 위한 효과적인 첨가제를 개발하는 연구가 추진될 것이다.

라. 첨가제의 함량이 아스팔트점도에 미치는 영향

중온아스팔트를 제조하기 위한 적정 첨가제함량을 알아보기 위한 연구를 수행하였다. 본 실험에서는 B와 F 첨가제를 사용하였다. B-첨가제를 선택한 이유는 B가 중온첨가제로서의 가능성은 있으나 그 효과가 약함으로 함량을 증가시키면 중온효과가 더욱 증진되는 가 여부를 알아보기 위해서다. 그리고 F-첨가제를 사용한 이유는 이미 중온 첨가제로서의 효과가 없다는 것이 판명되었지만 F-첨가제의 용점이 낮은 관계로 함량을 증가시키면 다른 변화가 있는 지 알아보기 위해서 이다. B-첨가제의 함량을 2, 3, 4, 5%로 바꿔가면서 온도변화에 따른 점도를 측정하였고, 그 결과를 아래 그림 24에 나타내고 있다. 그리고 식 (2)에 의한 회귀분석결과도 함께 보여주고 있다.

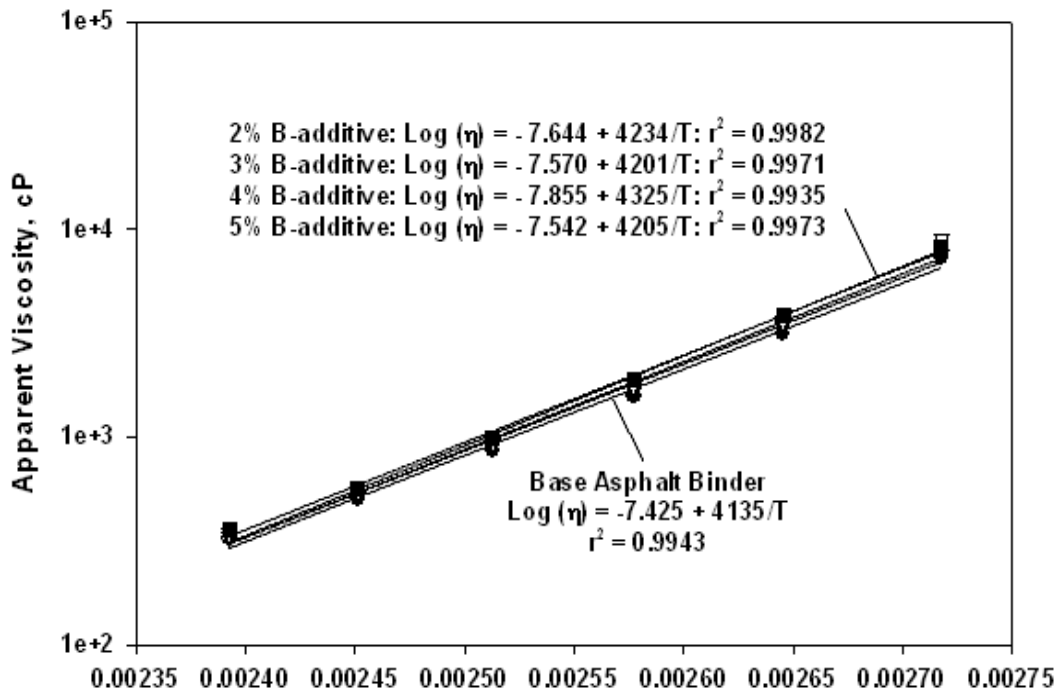


그림 24. B-첨가제의 함량변화에 따른 점도의 영향.

B-첨가제의 경우, 첨가함량의 대소가 중온효과에 거의 아무런 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 단순히 함량을 증가시킨다고 점도가 낮아지지는 않는다.

F-첨가제의 함량을 2, 3, 4, 5%로 바꿔가면서 온도변화에 따른 점도를 측정하였고, 그 결과를 아래 그림 25에 나타내고 있다. 그리고 식 (2)에 의한 회귀분석결과도 함께 보여주고 있다. F-첨가제는 중온첨가제로서 부적절하다고 이미 앞에서 언급한 바가 있다.

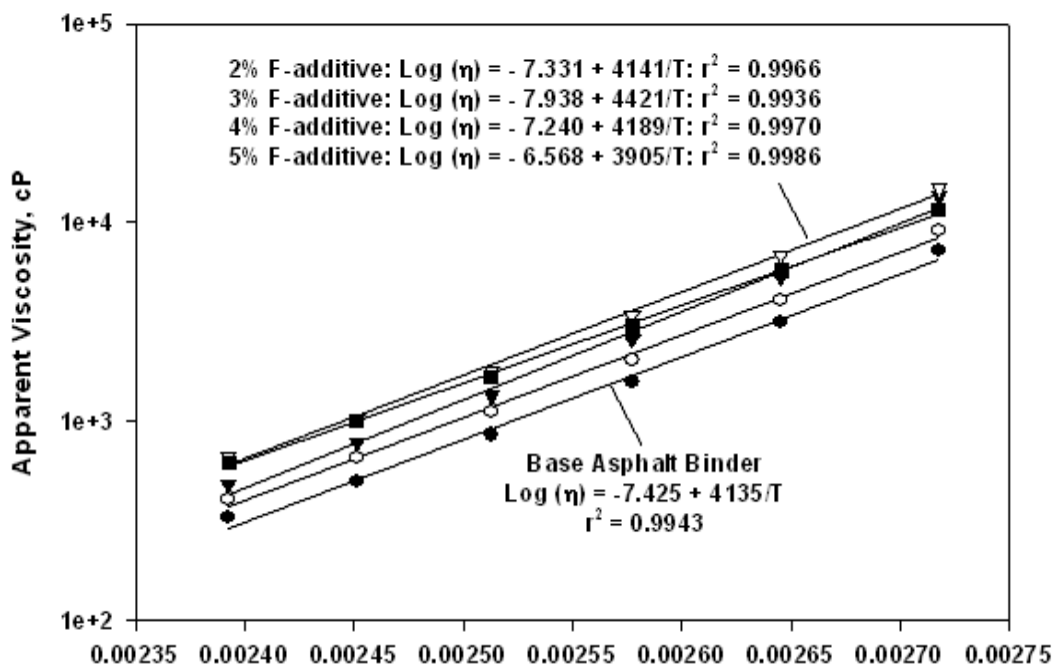


그림 25. F-첨가제의 함량변화에 따른 점도의 영향.

F-첨가제의 경우, 함량을 증가시킬수록 점도가 더욱 커져서 중온기능을 할 수 없음을 확인할 수 있다. 따라서 함량이 많고 적음보다는 중온첨가제로서의 기능을 수행하는 첨가제 종류가 중요함을 본 연구를 통하여 확인할 수 있었다.

마. 주 첨가제와 보조 첨가제를 함께 사용했을 경우의 점도영향

첨가제-B에 보조첨가제를 보충하여 아스팔트의 점도를 낮추는 연구를 수행하였다. 이때 보조첨가제는 주 첨가제보다 용점이 낮은 화합물을 선정하였으며, “가”와 “다”라고 표기한 두 화합물을 사용하였다. 아래 그림 26에는 첨가제 B를 2%로 고정시키고 보조첨가제 “가”의 함량을 0.3, 0.6, 0.9% 함께 첨가했을 때의 온도변화에 따른 점도측정결과를 보여준다. 보조첨가제 “가”의 영향이 아스팔트점도를 떨어뜨리는 데, 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

그림 27에는 첨가제 B를 2%로 고정시키고 보조첨가제 “다”의 함량을 0.3, 0.6, 0.9%로 첨가했을 때를 보여준다. 보조첨가제 “다”의 영향이 아스팔트점도를 떨어뜨리는 데, 거의 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 결론적으로 말하자면 보조첨가제는 주 첨가제에 큰 영향을 줄 수 없음을 확인할 수 있었다.

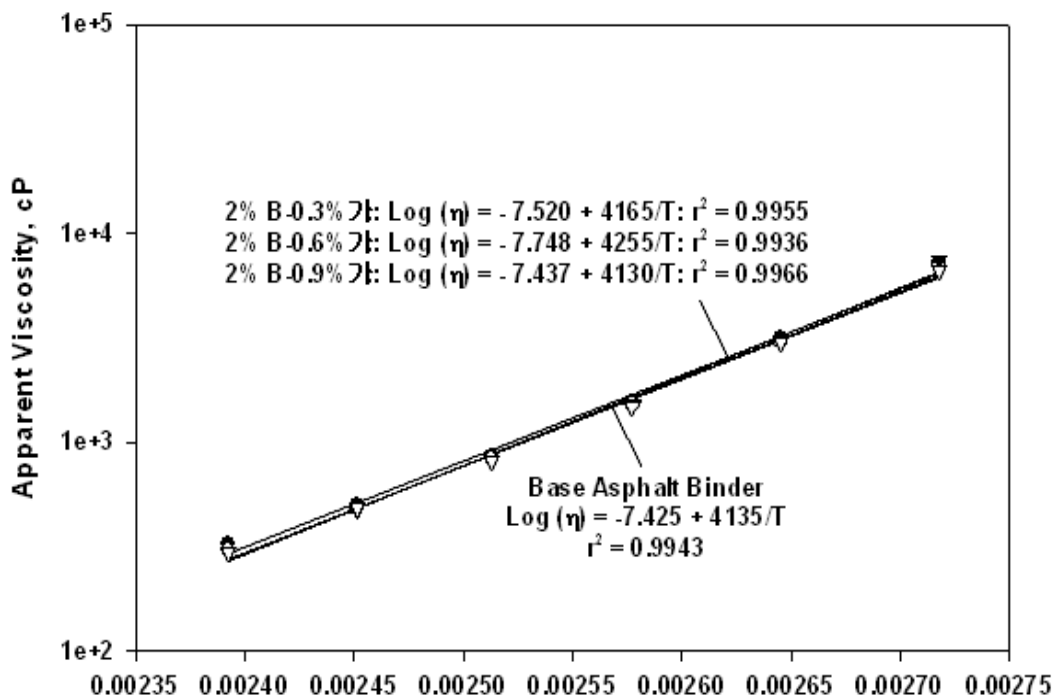


그림 26. 보조첨가제 “가”의 함량변화에 따른 점도의 영향.

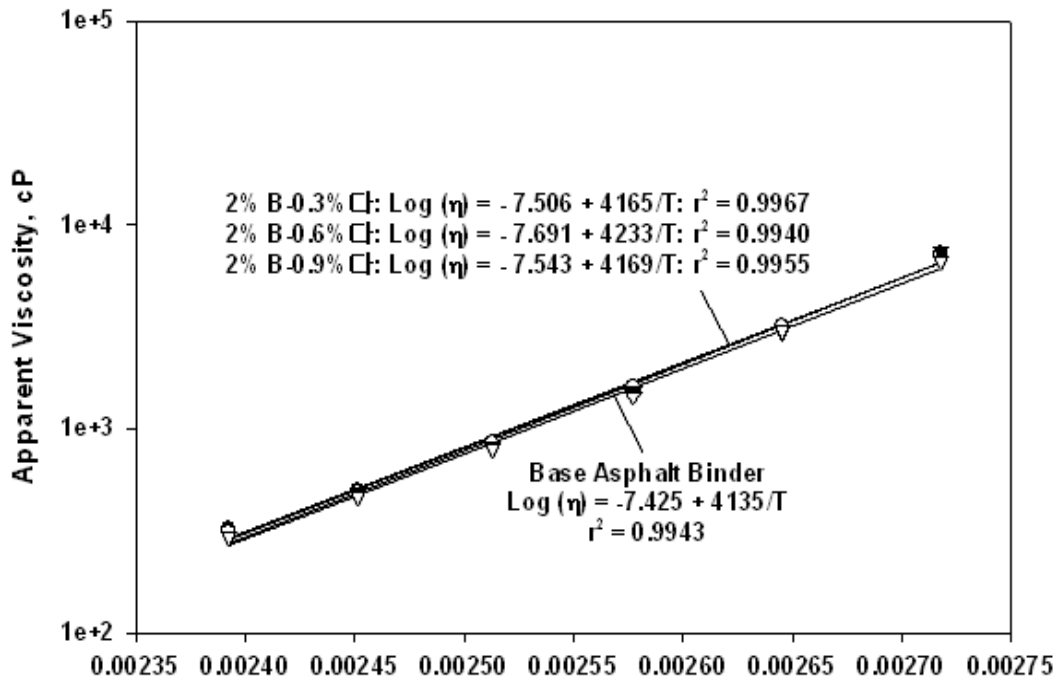


그림 27. 보조첨가제 “다”의 함량변화에 따른 점도의 영향.

바. 유망한 중온첨가제를 포함한 중온아스팔트의 물성 시험

본 연구에서 검토한 유망한 중온첨가제 중 H와 I가 3% 포함된 중온아스팔트를 만들고 이들에 대한 침입도와 연화점을 측정하였다. 이 값을 기준재료인 아스팔트와 비교 검토한 것이 아래 표 8에 나타나 있다. 기준이 되는 아스팔트와 비교하여 H와 I의 점도는 현저하게 낮은 반면에 침입도와 연화점은 일반아스팔트보다 약간 높게 나타난다. 이것이 시사하는 바는 침입도와 연화점 값은 일반아스팔트보다 거의 비슷하거나 우수한 반면에 점도는 현저히 낮게 나타남으로 일반 공용물성에는 거의 변화가 없으나 생산과 시공온도를 낮추는 중온아스팔트의 특성을 잘 나타내고 있다 하겠다.

표 6. H와 I가 포함된 중온아스팔트의 물성

물성		Asphalt	H-중온	I-중온
겉보기 점도 (cP)	145℃	1,675	350	350
	135℃	3,110	560	552
	125℃	6,270	961	933
	115℃	11,660	1,752	1,737
	105℃	21,700	3,420	3,337
	95℃	55,600	7,540	7,291
침입도		54	46	49
연화점		85.0	49.5	50.5

사. 실험결과에 따른 결론

중온효과를 나타내는 첨가제 개발에 대한 연구를 수행한 결과 첨가제 C, H, I와 J, K가 가능성이 있다는 결론에 도달하였다. 2차 년도에서는 이들에 대한 연구를 더욱 진행시켜 여러 다른 특성과 물성을 연구할 것이다. 개질아스팔트에 대한 중온첨가제를 개발하는 연구를 더욱 진행시킬 것이다. 본 연구를 통하여 첨가제 개발 가능성을 확인하였다. 중온효과를 주지 못하는 첨가제는 첨가제 함량을 증가시키거나 보조 첨가제를 추가하여도 중온효과가 없는 결론에 도달하게 된다는 사실이 본 연구결과 도출되었다. 그럼으로 적정한 첨가제의 선정이 중온첨가제 개발에 필수적이라고 결론지을 수 있다.

제 2절 일반 스트레이트 아스팔트용 중온첨가제 개발

1. 중온아스팔트 시편제작

일반 아스팔트의 점도는 크게 높은 편이 아니어서 중온첨가제의 개발이 비교적 용이한 편이다. 중온첨가제의 종류는 일차년도에서 소개한 바와 동일하다. 10개의 유망한 중온첨가제들(W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9, W10)을 첨가하여 해당 중온아스팔트를 만들었다. 일부시편은 10개의 중온첨가제 중 두 개 또는 세 개를 병행하여 중온아스팔트시편을 제조하였으며, 각 중온아스팔트에 대해서는 함량과 온도를 달리하면서 측정할 수 있도록 충분한 개수의 시편을 제작하였다. 중온첨가제의 함량은 중온아스팔트의 중량 퍼센트를 말하며 나머지는 아스팔트의 중량 퍼센트를 나타낸다. 시편제작과정은 일차년도의 연구내용을 참고하기 바란다.

2. 이론식

아스팔트에 중온첨가제를 첨가하고 균일하게 혼합하여 얻어진 중온아스팔트는 첨가하기 이전의 아스팔트와 비교하여 점도가 낮아지는 중온효과를 나타낸다. 이러한 점도의 감소효과는 Time-Temperature Superposition 원리에 의해 온도의 감소로 나타낼 수 있다. 즉, 낮아지는 점도만큼 온도도 감소함으로 이는 생산과 시공온도를 낮출 수 있다는 뜻이다. 따라서 중온첨가제의 종류별, 함량별로 중온아스팔트를 만들고 점도를 측정하여, 동일 점도를 가지는 온도를 구하면 각 해당하는 중온아스팔트의 온도경감을 수치화 할 수 있다. 이러한 온도경감 수치화에 대한 개념은 본 연구에서 처음으로 제안하는 이론이다. 특정 중온첨가제에 의한 중온아스팔트의 온도를 수치화하기 위해 식 (2)를 온도에 대한 식으로 재구성하면 아래와 같다;

$$T = \frac{B}{\text{Log}(\eta) - A} \quad (3)$$

식 (3)에 의해 주어진 점도에 해당하는 켈빈 절대온도를 구한다. 원래 아스팔트와 비교하여 중온아스팔트의 점도감소에 따른 상대적인 온도감소를 표현하려면 아래 식을 사용할 수 있다.

$$T_0 - T = \frac{B_0}{\text{Log}(\eta) - A_0} - \frac{B}{\text{Log}(\eta) - A} \quad (4)$$

상기의 독창적인 이론에 의해 중온첨가제에 대한 온도경감을 정량화 할 수 있다. 즉, 식 (3)에 의해 특정 점도에서의 원래의 아스팔트의 절대온도를 구하고, 이어서 동일한 점도 값을 사용하여 동일 식에 의해 중온아스팔트의 절대온도를 얻어서, 두 절대온도의 차이를 찾아내면 이것이 상대 온도감소를 나타낸다.

3. 점도측정과 데이터분석

가. 데이터분석 방법

브룩필드 점도계를 사용하여 제조된 시편의 점도를 측정하였다. 점도측정방법은 일차연도의 연구내용을 참고하기 바란다. 각 시편들에 대해 측정한 데이터는 부록에 첨부되어 있다. 측정한 데이터와 식 (2)에 의한 데이터의 회귀분석결과를 각 그림에 나타내었으며, 회귀분석 결과도 각 표로 나타내었다. 식 (2)의 회귀분석 결과로 얻어진 값을 근거로 식 (3)과 (4)에 의하여 중온아스팔트의 온도와 상대 온도감소를 산정하였으며, 이들도 표에 수록되어 있다. 상기 식들에 의한 계산에서 기준이 되는 점도는 125℃에서의 원 아스팔트 점도로 고정하였고, 중온아스팔트의 온도도 이 점도에 해당하는 온도 값과 상대 온도감소 값을 계산한 것이다.

예를 들어, 아래 그림 28과 표 9를 참조하면 식 (2)에 의한 원 아스팔트의 회귀분석결과와는 아래와 같다.

$$\text{Log}(\eta) = -8.226 + \frac{4448}{T} \quad ; \quad r^2 = 0.9975 \quad (5)$$

온도 125℃의 켈빈절대온도는 398°K이며, 이 값을 위 식 (5)에 삽입하면 아스팔트의 점도 값 (891 cP)이 얻어진다. 동일한 점도 값을 가진 1.2 중량% W1 중온아스팔트의 온도를 식 (3)으로 계산하면 아래 식 (6)과 같다.

$$T = \frac{3890}{\text{Log}(891) + 6.942} - 273 = 120^\circ\text{C} \quad (6)$$

따라서 상대 온도감소는 125-120=5℃이다. 이렇게 계산된 값을 각 표에 수록하였다. 아스콘생산에 필요한 아스팔트는 135℃에서의 점도가 3.0Pa.S 이하가 되도록 규정하고 있다. 이 점도보다 점도가 더욱 높으면 아스팔트의 높은 점도로 인하여 골재의 피복에 어려움이 있어서 혼합시간이 훨씬 길어지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 생산온도를 더욱 높여서 점도를 낮추어야 한다. 이러한 문제를 방지하기 위하여 135℃에서의 점도규정을 마련하고 있다. 상기 규정에 따르면 현재 아스팔트의 점도는 그림 1의 데이터가 보여주듯이 0.474 Pa.S(=474 cP)로서 규정값인 3.0Pa.S에 훨씬 못미친다. 즉, 아스팔트가 이미 중온효과를 포함하고 있다는 뜻이다. 그러면 현 아스팔트는 얼마만큼의 중온효과를 가지고 있는지 알아보자. 식 (2)에 의한 아스팔트 점도의 회귀분석 값은 A=-8.226과 B=4448임으로 이를 식 (3)에 대입하고 아스팔트가 3.0Pa.S의 점도를 가지는 온도를 구한다. 그 값은 아래 식 (7)에서와 같이 107℃가 얻어진다. 즉, 현 아스팔트는 107℃가 되어야 3.0Pa.S의 점도에 도달하며, 현 아스팔트는 이론 상 107℃에서도 아스콘생산이 가능하다는 의미이다.

$$T = \frac{4448}{\text{Log}(3000) + 8.226} - 273 = 107^{\circ}\text{C} \quad (7)$$

따라서 현 아스팔트의 온도감소효과는 $135-107=28^{\circ}\text{C}$ 이다. 통상 중온아스팔트는 일반 아스팔트에 비하여 30°C 정도 더 낮은 온도에서 생산이 가능해야 함으로 이를 만족시키기 위해서는 중온첨가제를 첨가하여 적어도 $30-28=2^{\circ}\text{C}$ 의 온도감소효과만 있어도 현 아스팔트로서 중온아스팔트를 만들어 중온아스콘을 생산할 수 있다. 그러므로 중온첨가제에 의한 온도감소는 그 자체만으로 30°C 가 될 필요가 없이 약 10°C 전후만으로도 충분하다. 실제로 세계적으로 가장 많이 팔리는 중온첨가제로서 Sasobit이라는 왁스가 있으며, 실제 첨가량은 중온아스팔트의 약 3%로서 온도감소는 10°C 에 지나지 않는다. 이러한 점은 중온첨가제 개발에 핵심적 사항으로 본 연구에서 독창적으로 고안한 분석방법에 의하여 정량적으로 분석하였다.

나. 단일 중온첨가제의 첨가함량과 온도에 따른 중온효과

다음은 9종류의 새로운 중온첨가제(W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8, W9)를 선정 한 후, 각 첨가제의 첨가함량을 달리하며 아스팔트와 균일하게 혼합하여 중온아스팔트를 만들고, 제조된 중온아스팔트 시편을 브룩필드점도계를 사용하여 온도($135, 125, 115, 105, 95, 85, 75, 70^{\circ}\text{C}$)를 변화해가며 점도를 측정하였다. 이러한 점도 데이터를 이용하여 식 (2)로 회귀분석을 실시하고 그 결과를 각 그림 28-36과 표 7-15에 나타내었다. 각 표에는 식 (2)에 의한 회귀 분석 결과로 얻어진 물성상수를 적용하여 식 (3)으로 중온첨가제에 의해 감소된 중온아스팔트의 온도를 산정하였고 이 값도 각 표에 수록되어 있다. 또한 표준온도(현 아스팔트의 125°C)와 감소된 온도와의 온도감소 차이(중온효과)도 함께 보여주고 있다.

또한 각 그림에서 유의할 점은 중온첨가제에 의한 중온효과로 점도가 낮아지지만, 105°C 를 기점으로 하여 다시 점도가 상승한다는 점이다. 중온효과는 아스콘 생산과 시공온도 영역에서 그 영향력을 발휘하여 생산과 시공온도를 낮추는 것이 좋다. 따라서 이러한 점도상승은 바람직하나, 공용온도(70°C)에 도달하기 이전에 중온아스팔트의 점도가 급격히 상승하여 원래의 아스팔트와 동일하거나 더욱 커지는 것이 원하는 결과이다. 그렇지 않아서 공용온도에서도 점도가 낮으면 소성변형과 같은 공용성문제를 야기할 수 있으므로 유의해야 한다.

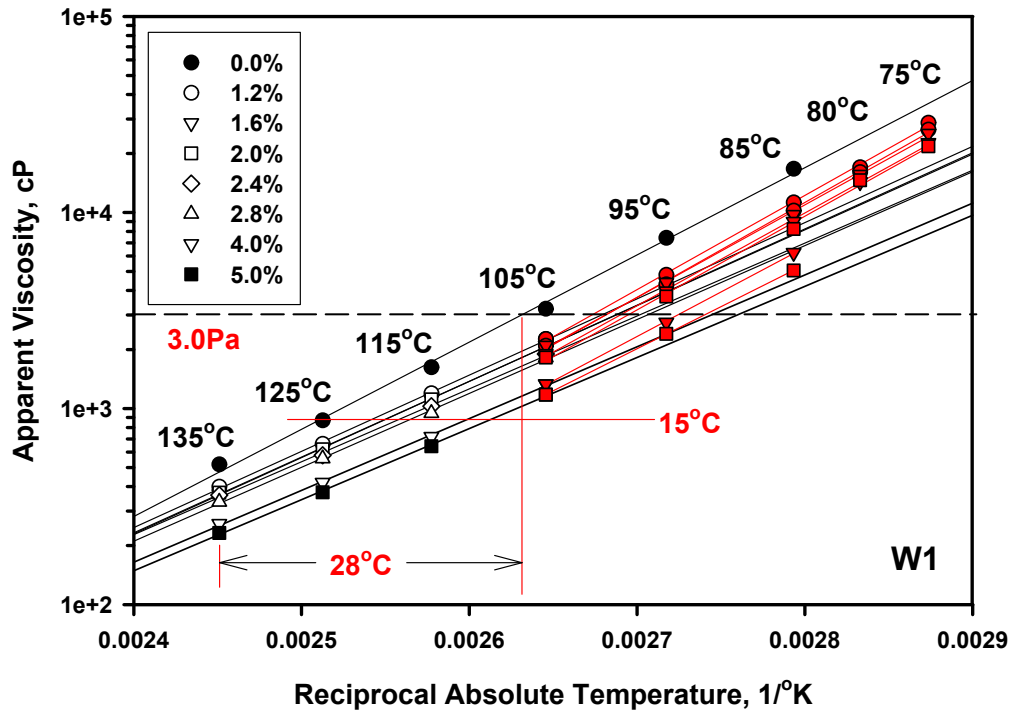


그림 28. 중온첨가제 W1의 점도데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 7. W1 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r^2	온도, 식(3)*	온도감소, 식(4)**
W1(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W1(1.2%)	-6.942	3890	0.9991	120 “	5°C
W1(1.6%)	-6.970	3888	0.9998	119 “	6°C
W1(2.0%)	-6.905	3863	0.9993	119 “	6°C
W1(2.4%)	-6.566	3718	0.9985	118 “	7°C
W1(2.8%)	-6.722	3769	0.9985	117 “	8°C
W1(4.0%)	-6.572	3662	0.9990	112 “	13°C
W1(5.0%)	-6.535	3628	0.9991	110 “	15°C

* 125°C에서의 원래의 아스팔트와 동일 점도를 보이는 중온아스팔트의 온도

** 원래 아스팔트의 온도에서 감소된 중온아스팔트의 온도를 뺀 온도차이

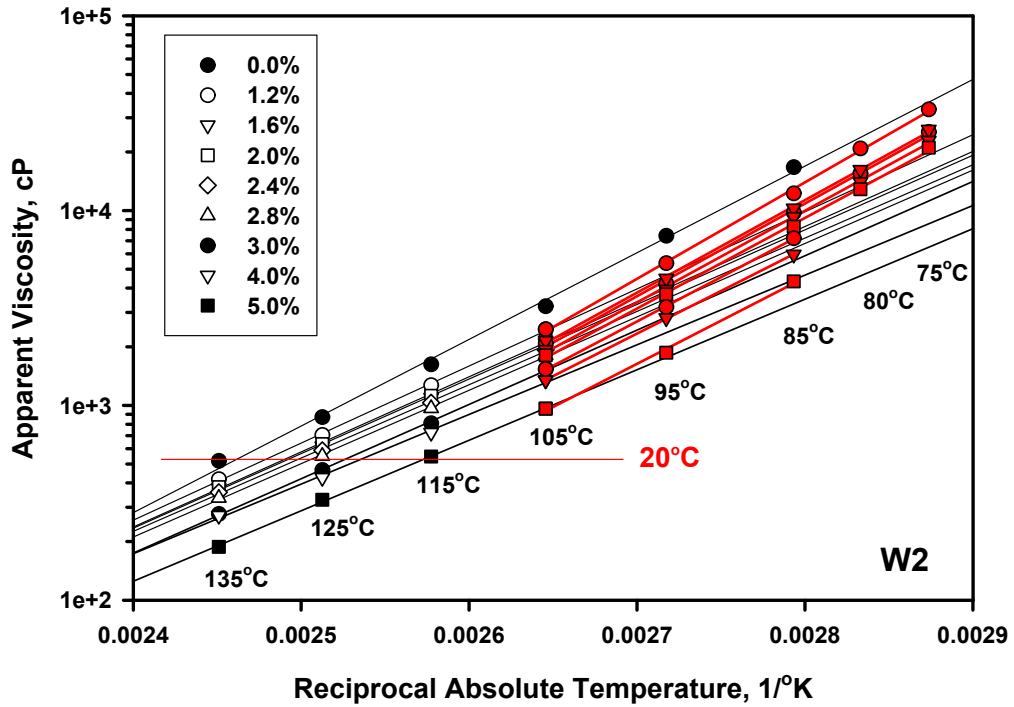


그림 29. 중온첨가제 W2의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 8. W2 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W2(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W2(1.2%)	-7.091	3959	0.9991	121.3°C	3.7°C
W2(1.6%)	-6.822	3830	0.9987	118.9°C	6.1°C
W2(2.0%)	-6.883	3858	0.9990	119.4°C	5.6°C
W2(2.4%)	-6.682	3765	0.9992	117.9°C	7.1°C
W2(2.8%)	-6.717	3767	0.9992	116.7°C	8.3°C
W2(3.0%)	-6.917	3816	0.9993	113.7°C	11.3°C
W2(4.0%)	-6.344	3576	0.9975	111.8°C	13.2°C
W2(5.0%)	-6.596	3622	0.9993	106.4°C	18.6°C

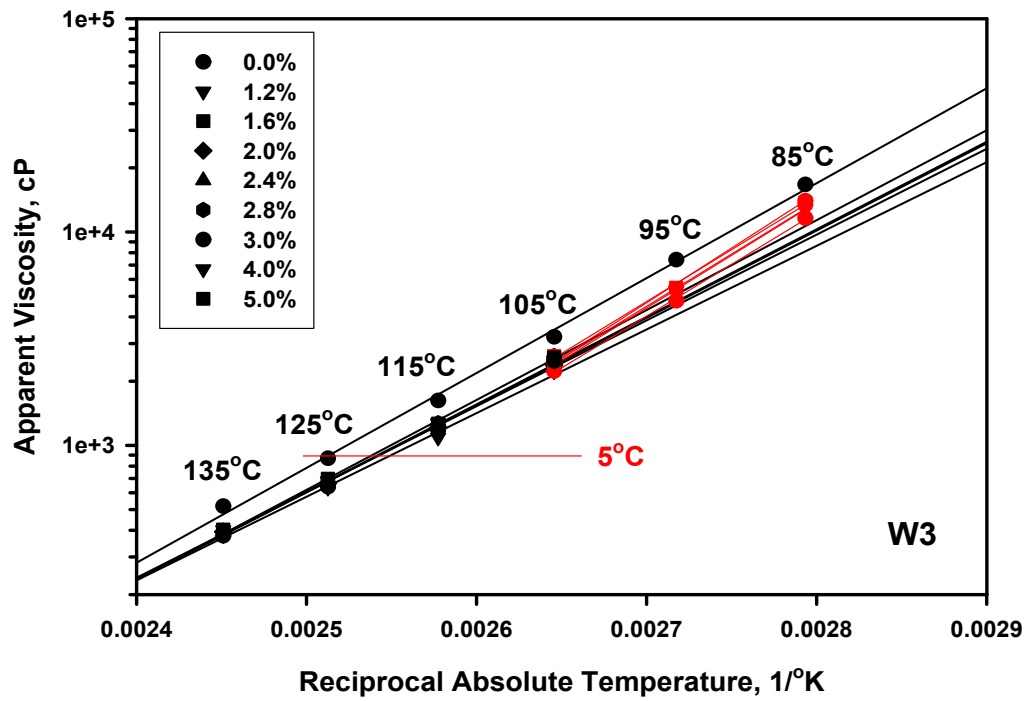


그림 30. 중온첨가제 W3의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 9. W3 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W3(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W3(1.2%)	-7.042	3921	0.9964	119.4°C	5.6°C
W3(1.6%)	-7.450	4092	0.9977	120.5°C	4.5°C
W3(2.0%)	-7.266	4019	0.9989	120.4°C	4.6°C
W3(2.4%)	-7.472	4102	0.9983	120.6°C	4.4°C
W3(2.8%)	-7.742	4214	0.9978	121.1°C	3.9°C
W3(3.0%)	-7.789	4223	0.9982	120.2°C	4.8°C
W3(4.0%)	-7.467	4104	0.9989	121.0°C	4.0°C
W3(5.0%)	-7.531	4132	0.9985	121.2°C	3.8°C

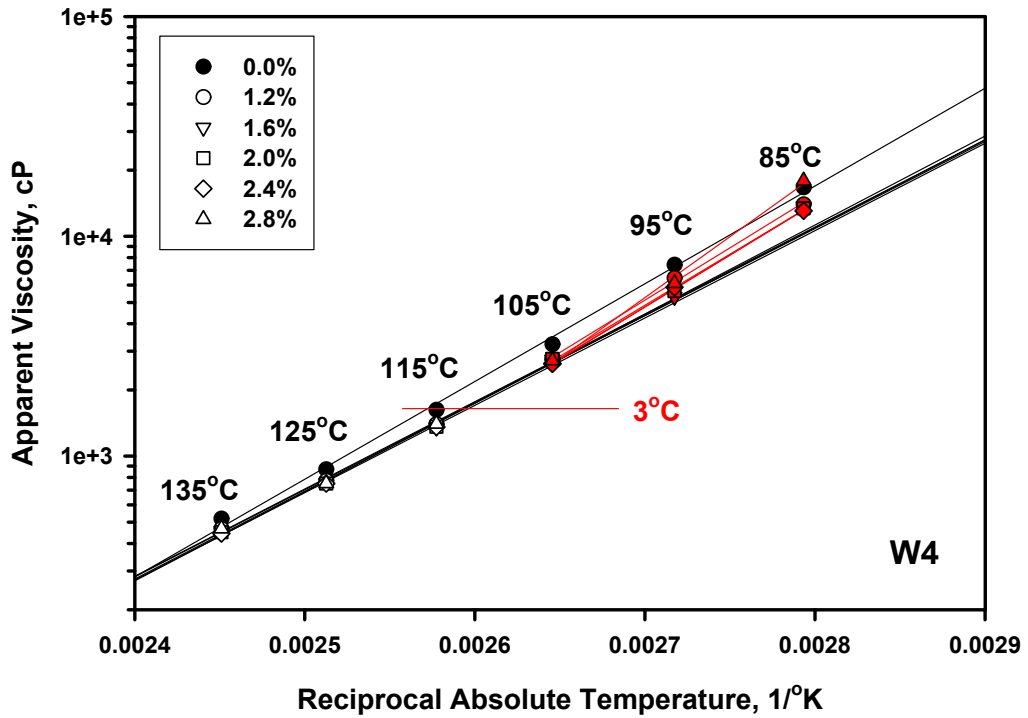


그림 31. 중온첨가제 W4의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 10. W4 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W3(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125℃	0℃
W4(1.2%)	-7.079	3972	0.9980	123.1℃	1.9℃
W4(1.6%)	-7.153	3997	0.9969	122.6℃	2.4℃
W4(2.0%)	-7.281	4048	0.9973	122.7℃	2.3℃
W4(2.4%)	-7.103	3975	0.9992	122.4℃	2.6℃
W4(2.8%)	-7.058	3962	0.9972	122.9℃	2.1℃

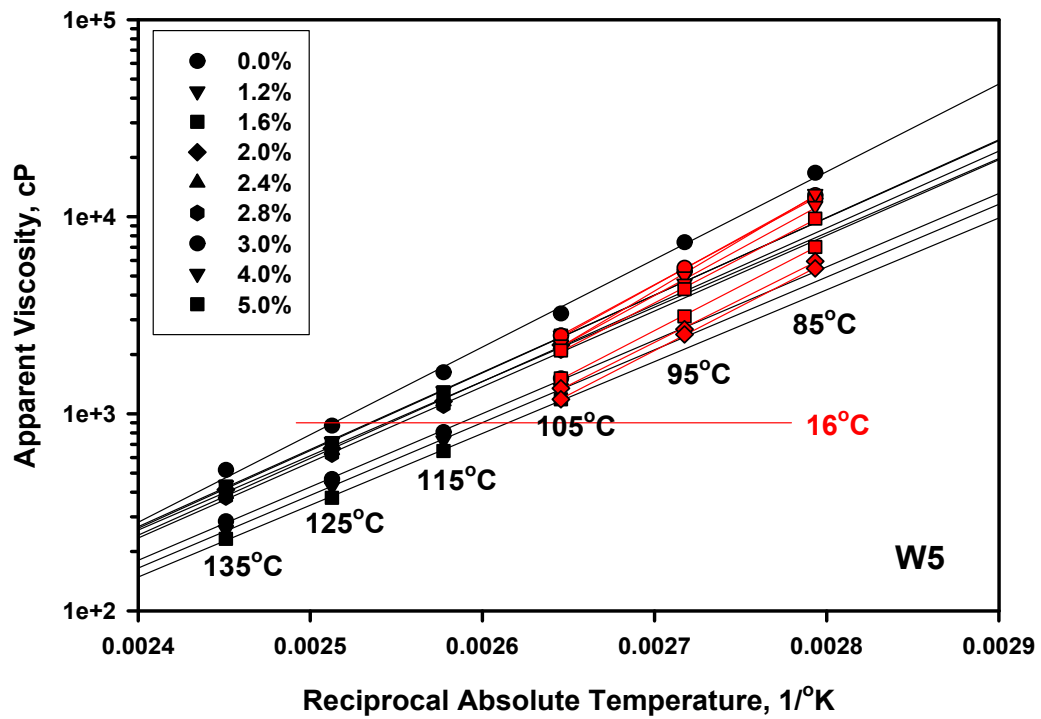


그림 32. 중온첨가제 W5의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 11. W5 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W5(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W5(1.2%)	-6.977	3919	0.9989	121.8°C	3.2°C
W5(1.6%)	-7.045	3944	0.9987	121.6°C	3.4°C
W5(2.0%)	-6.641	3771	0.9977	120.2°C	4.8°C
W5(2.4%)	-6.968	3897	0.9987	119.9°C	5.1°C
W5(2.8%)	-6.844	3839	0.9990	119.0°C	6.0°C
W5(3.0%)	-6.679	3723	0.9990	113.6°C	11.4°C
W5(4.0%)	-6.643	3692	0.9996	111.9°C	13.1°C
W5(5.0%)	-6.576	3645	0.9992	109.6°C	15.4°C

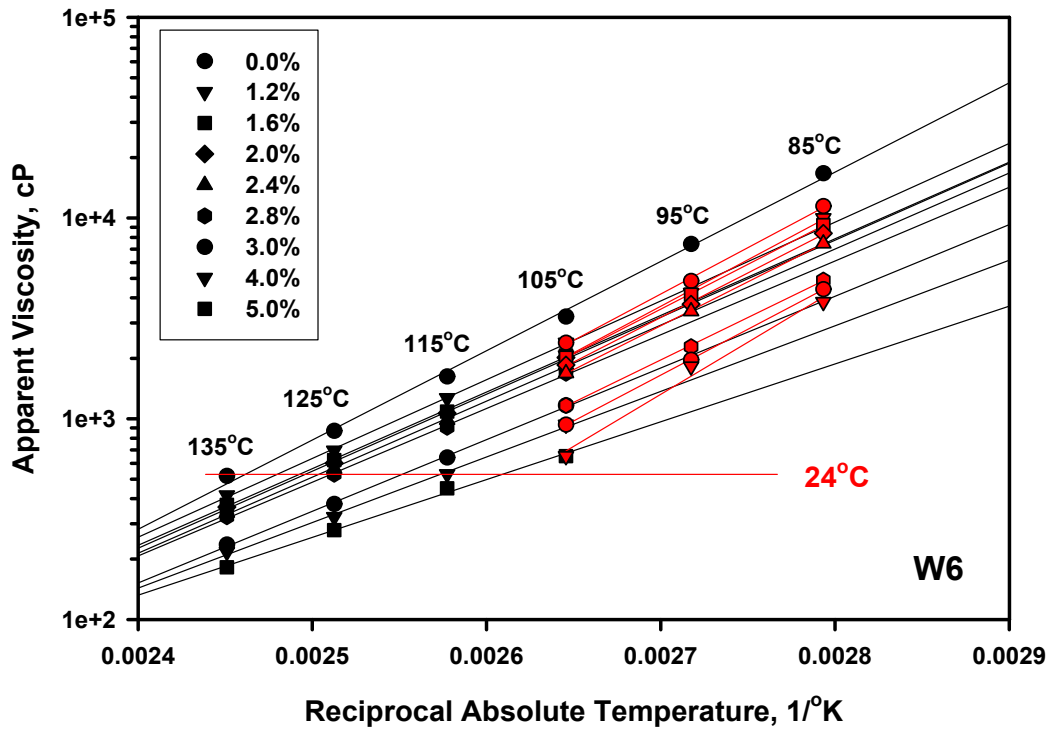


그림 33. 중온첨가제 W6의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 12. W6 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W3(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W3(1.2%)	-7.007	3924	0.9994	121.1°C	3.9°C
W3(1.6%)	-6.792	3817	0.9991	118.8°C	6.2°C
W3(2.0%)	-6.849	3835	0.9991	118.4°C	6.6°C
W3(2.4%)	-6.761	3788	0.9993	117.1°C	7.9°C
W3(2.8%)	-6.500	3673	0.9989	115.7°C	9.3°C
W3(3.0%)	-6.391	3572	0.9989	109.4°C	15.6°C
W3(4.0%)	-5.686	3268	0.9970	105.4°C	19.6°C
W3(5.0%)	-4.794	2881	0.9959	99.0°C	26.0°C

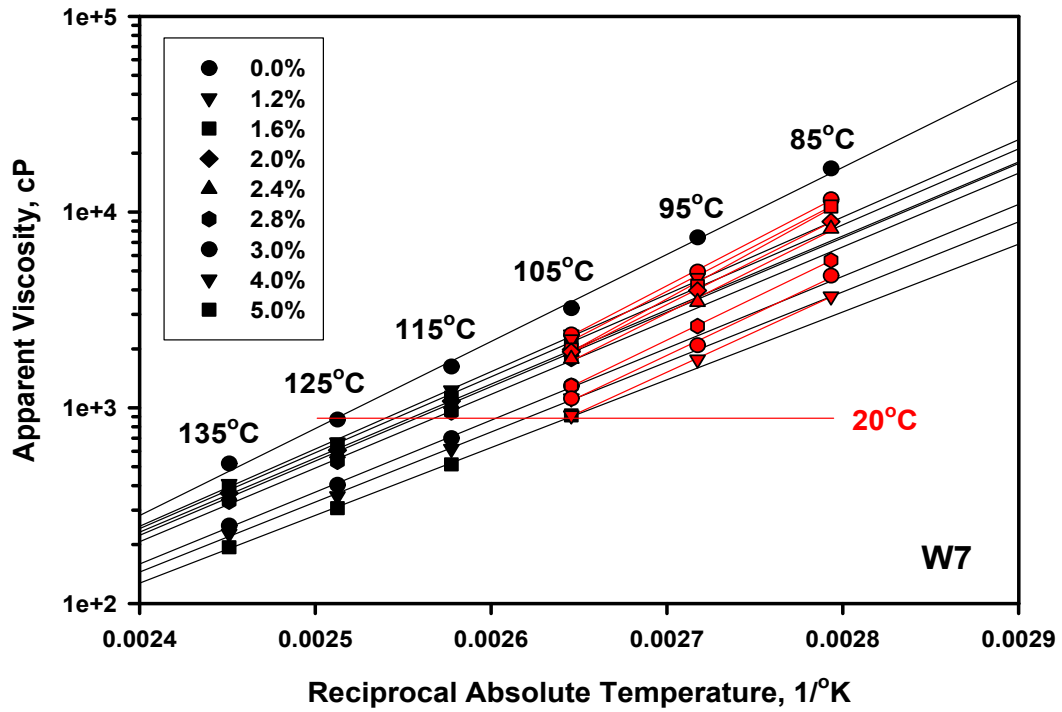


그림 34. 중온첨가제 W7의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 13. W7 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W7(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W7(1.2%)	-7.087	3951	0.9980	120.6°C	4.4°C
W7(1.6%)	-6.932	3881	0.9978	119.7°C	5.3°C
W7(2.0%)	-6.715	3783	0.9996	118.4°C	6.6°C
W7(2.4%)	-6.773	3801	0.9995	117.9°C	7.1°C
W7(2.8%)	-6.721	3766	0.9982	116.4°C	8.6°C
W7(3.0%)	-6.620	3675	0.9989	111.0°C	14.0°C
W7(4.0%)	-6.430	3580	0.9981	108.7°C	16.3°C
W7(5.0%)	-6.211	3465	0.9992	105.2°C	19.8°C

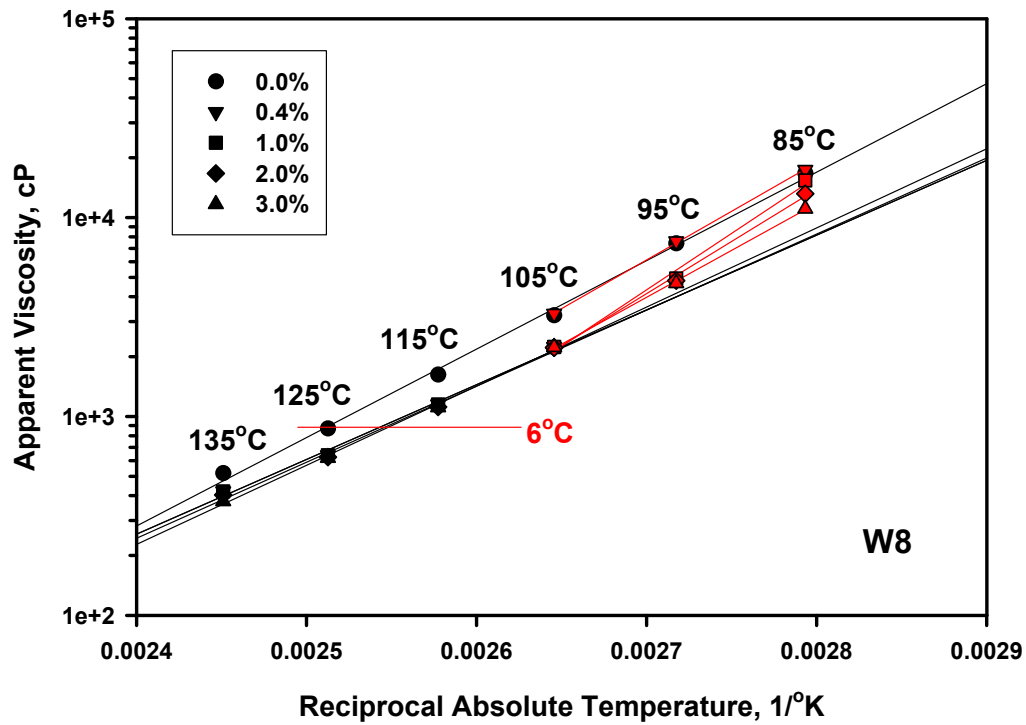


그림 35. 중온첨가제 W8의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 14. W8 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W8(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W8(0.4%)	-6.613	3759	0.9941	120.1°C	4.9°C
W8(1.0%)	-6.613	3759	0.9941	120.1°C	4.9°C
W8(2.0%)	-6.789	3824	0.9944	119.6°C	5.4°C
W8(2.4%)	-7.196	3980	0.9975	119.3°C	5.7°C

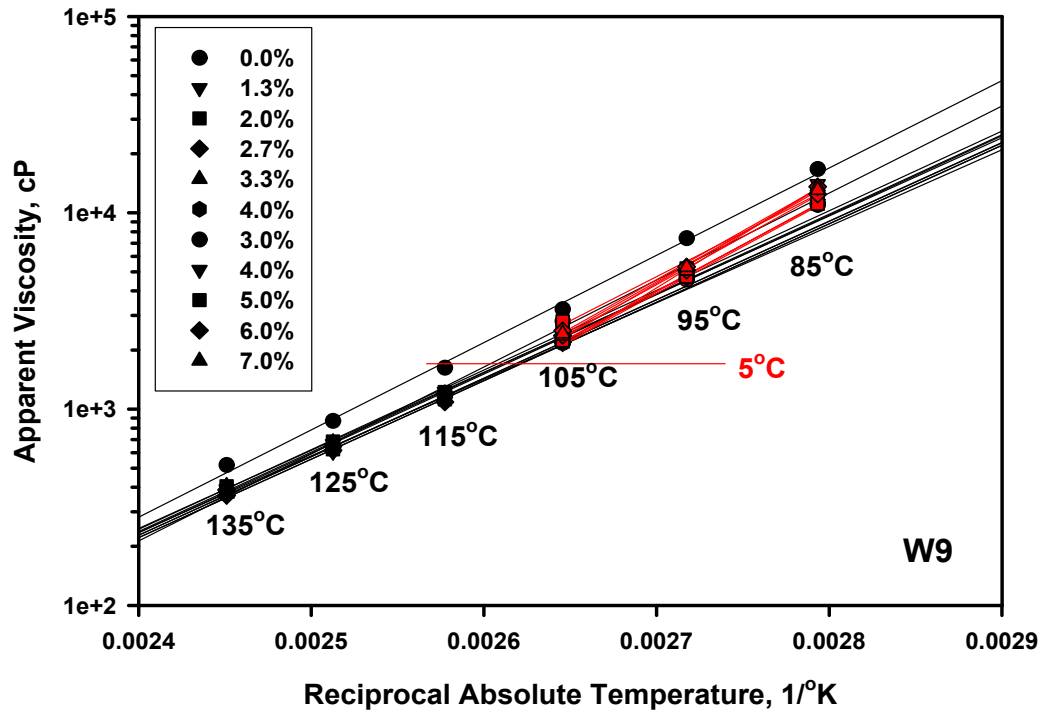


그림 36. 중온첨가제 W9의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 15. W9 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
W9(0.0%)	-8.226	4448	0.9975	125°C	0°C
W9(1.3%)	-7.253	3999	0.9986	118.9°C	6.1°C
W9(2.0%)	-6.987	3900	0.9973	119.5°C	5.5°C
W9(2.7%)	-7.251	3998	0.9979	118.9°C	6.1°C
W9(3.0%)	-8.306	4431	0.9913	119.7°C	5.3°C
W9(3.3%)	-7.248	4002	0.9992	119.4°C	5.6°C
W9(4.0%)	-7.236	3998	0.9988	119.5°C	5.5°C
W9(5.0%)	-7.352	4058	0.9974	119.9°C	5.1°C
W9(6.0%)	-7.338	4045	0.9984	119.2°C	5.8°C
W9(7.0%)	-7.161	3981	0.9975	119.7°C	5.3°C

위의 W1, W2, W3, W4, W5, W6, W7, W8 및 W9 중온첨가제에 의한 중온효과 분석결과들을 종합하여 각 온도감소 효과를 서로 비교해보면, 아래 표 16과 그림 37에 나타난 최종결

과가 얻어진다.

표 16. 중온첨가제 함량에 따른 중온아스팔트의 온도감소

함량, %	W1, °C	W2, °C	W3, °C	W4, °C	W5, °C	W6, °C	W7, °C	W8, °C	W9, °C
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.4								4.9	
1.0								4.9	
1.2	5.0	3.7	5.6	1.9	3.2	3.9	4.4		
1.3									6.1
1.6	6.0	6.1	4.5	2.4	3.4	6.2	5.3		
2.0	6.0	5.6	4.6	2.3	4.8	6.6	6.6	5.4	5.5
2.4	7.0	7.1	4.9	2.6	5.1	7.9	7.1	5.7	
2.7									6.1
2.8	8.0	8.3	3.9	2.1	6.0	9.3	8.6		
3.0		11.3	4.8		11.4	15.6	14.0		5.3
3.3									5.6
4.0	13.0	13.2	4.0		13.1	19.6	16.3		5.5
5.0	15.0	18.6	3.8		15.4	26.0	19.8		5.1

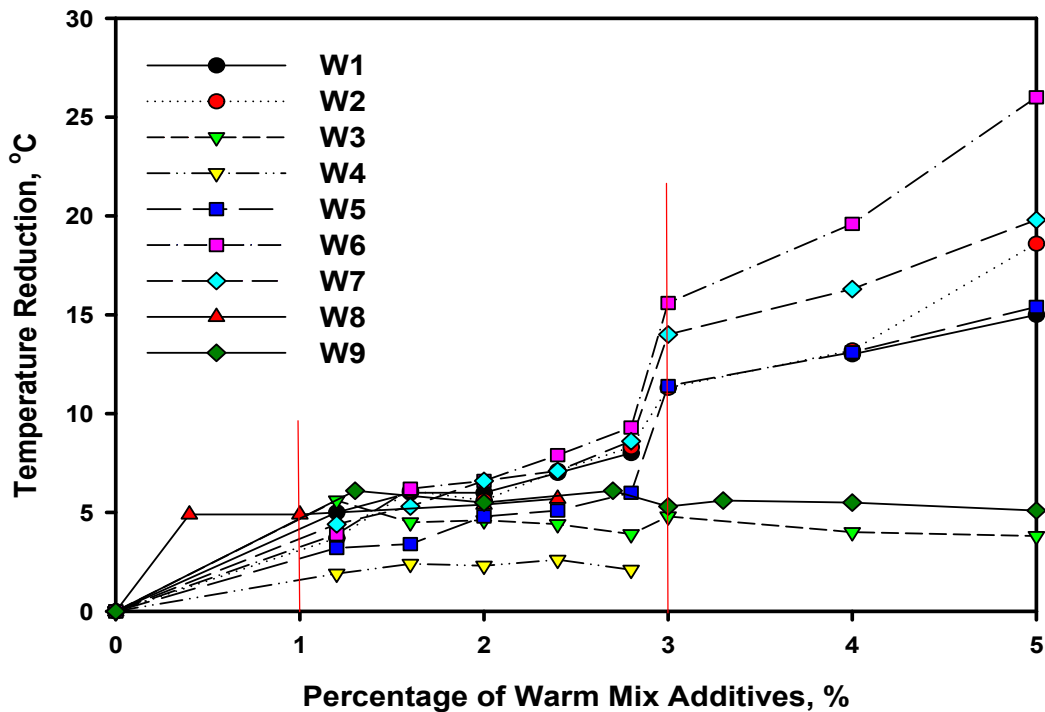


그림 37. 중온첨가제(W1-W9)의 첨가함량에 따른 온도감소 효과.

위의 표 16과 그림 37을 참조하면, 전체적인 중온첨가제 사용함량은 1.0% 이하, 1.0~3.0% 그리고 3.0% 이상의 영역으로 나눌 수 있음을 알 수 있고, 3.0%를 사용하는 것이 온도감소효과 면에서 바람직하다. 그러나 많이 사용할수록 더 많은 온도감소를 가져오지만, 경제적인 면과 역학적인 면을 고려하면 3.0%를 사용하는 것이 이상적이라고 사료된다. 예를 들어, 왁스를 필요 이상으로 많이 사용하면 역학적 물성인 취성이 증가하여, 조기 균열의 원인이 될 수 있다. 상기 중온첨가제 중에서 사용함량이 3.0%에서 급격한 온도감소를 보이는 첨가제(W1,

W2, W5, W6, W7)가 있는 반면에 거의 변화를 보이지 않는 첨가제(W3, W4, W8, W9)도 있음을 알 수 있다. 후자에 속하는 첨가제는 첨가함량에 따라 거의 변화를 보이지 않는다. 따라서 소량의 첨가만으로 중온효과가 조금 나타나고 더 많은 첨가제를 첨가한다고 해서 더 좋은 중온효과를 기대하기 어렵다. 효과적인 중온첨가제는 3%에서 급격한 온도감소를 보이는 첨가제들이며, 이 중 첨가제의 온도감소 효과 순으로 나열하면, W6>W7>W2>W5>W1의 결과를 얻는다.

다. 중온첨가제의 조합에 의한 중온효과

다음은 비교적 소량의 중온첨가제를 첨가하는 대신에, 하나가 아니고 2개 내지 3개의 중온첨가제를 함께 조합하여 사용하는 연구를 수행하였다. 아래 그림과 표에는 중온첨가제 조합과 이러한 조합으로 만든 중온아스팔트를 측정된 점도데이터와 이 데이터들의 분석결과들을 보여준다. 앞 단일 중온첨가제 연구에서 W2와 W3는 각기 다른 영향을 보였으므로 이 두 중온첨가제를 선정하고 여기에 각각 중온효과가 우수한 W5, W6 및 W7를 조합하여 그 효과를 조사하였다. 여기에 W9도 추가하여 그 효과도 알아보았다. 상기 조사결과는 아래 그림 38-39와 표 17-28에 잘 나타나 있다.

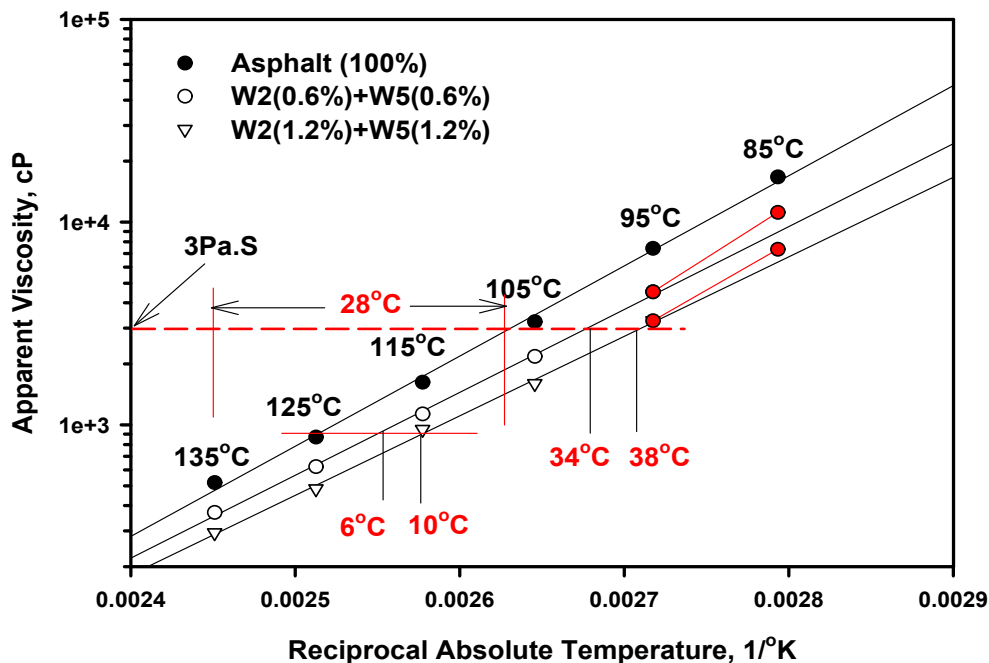


그림 38. (W2+W5)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 17. (W2+W5) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W5(0.6%)	-7.468	4088	0.9988	119.4	5.6
W2(1.2%)+W5(1.2%)	-7.149	3921	0.9981	115.3	9.7

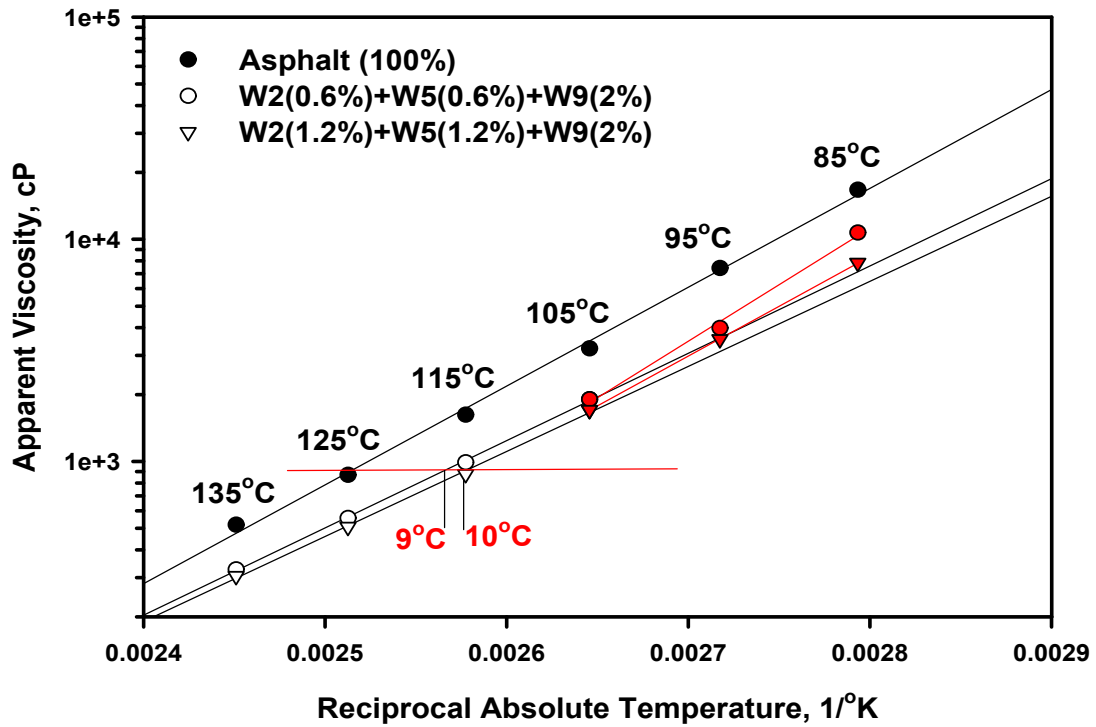


그림 39. (W2+W5+W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 18. (W2+W5+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(°C), 식(3)	온도감소(°C), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W5(0.6%)+W9(2%)	-7.124	3930	0.9995	117.1	7.9
W2(1.2%)+W5(1.2%)+W9(2%)	-6.906	3828	0.9984	115.4	9.6

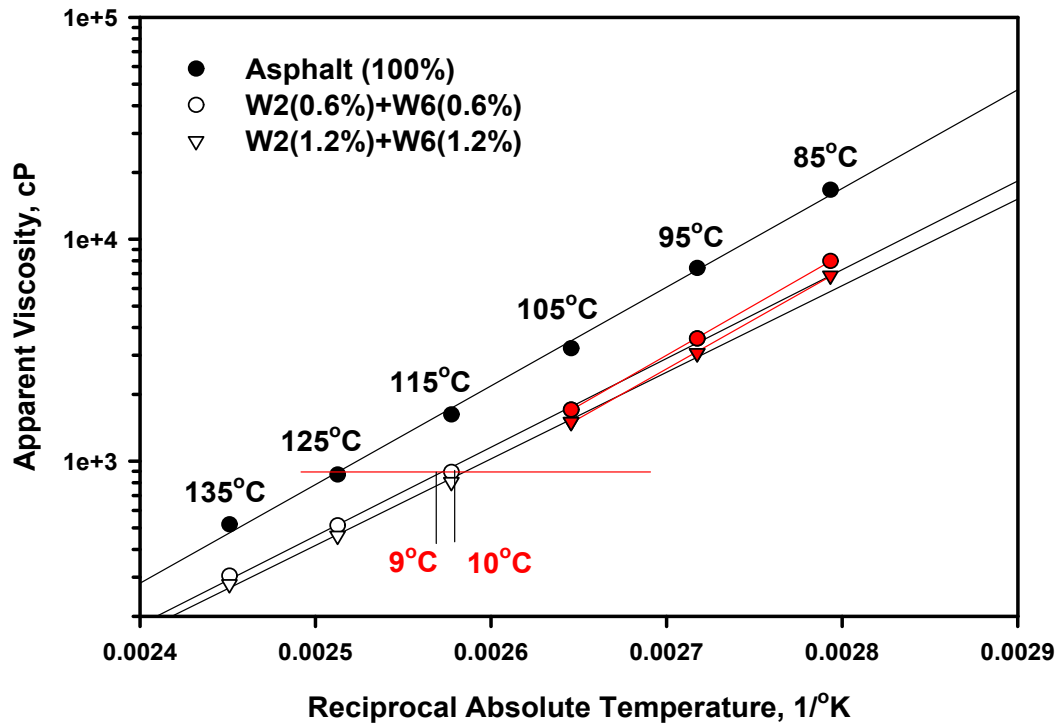


그림 30. (W2+W6)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 19. (W2+W6) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W6(0.6%)	-7.335	3999	0.9981	115.8	9.2
W2(1.2%)+W6(1.2%)	-7.134	3902	0.9985	113.9	11.1

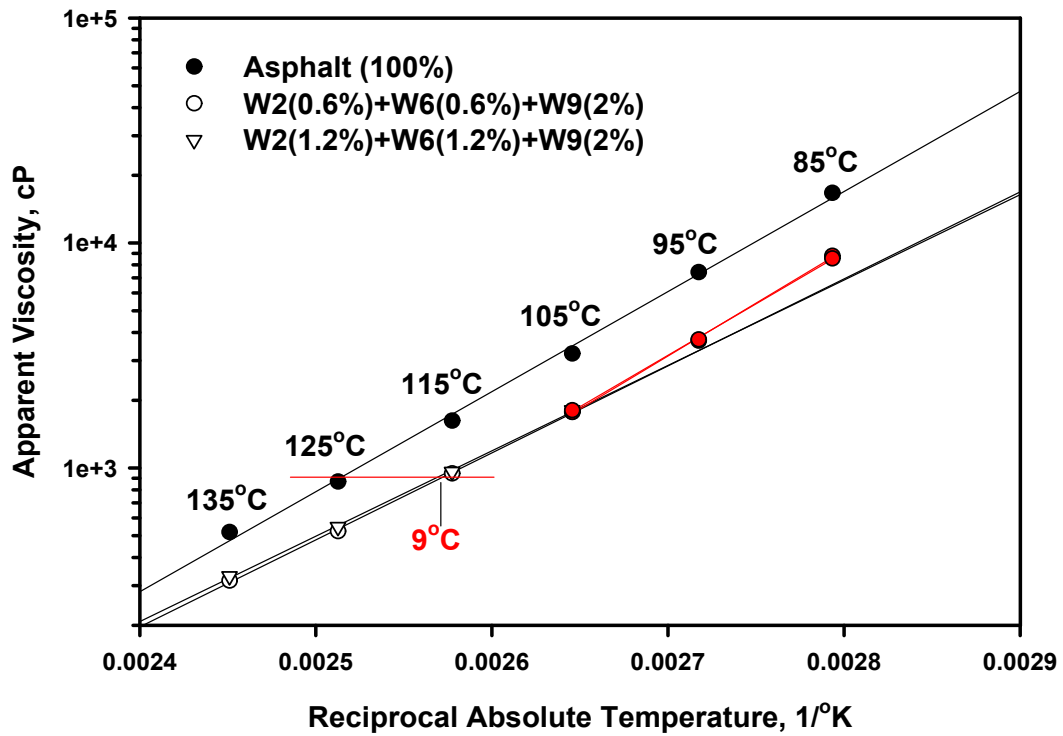


그림 31. (W2+ W6+ W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 20. (W2+W6+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W6(0.6%)+W9(2%)	-6.986	3867	0.9993	116.2	8.8
W2(1.2%)+W6(1.2%)+W9(2%)	-6.791	3795	0.9993	116.6	8.4

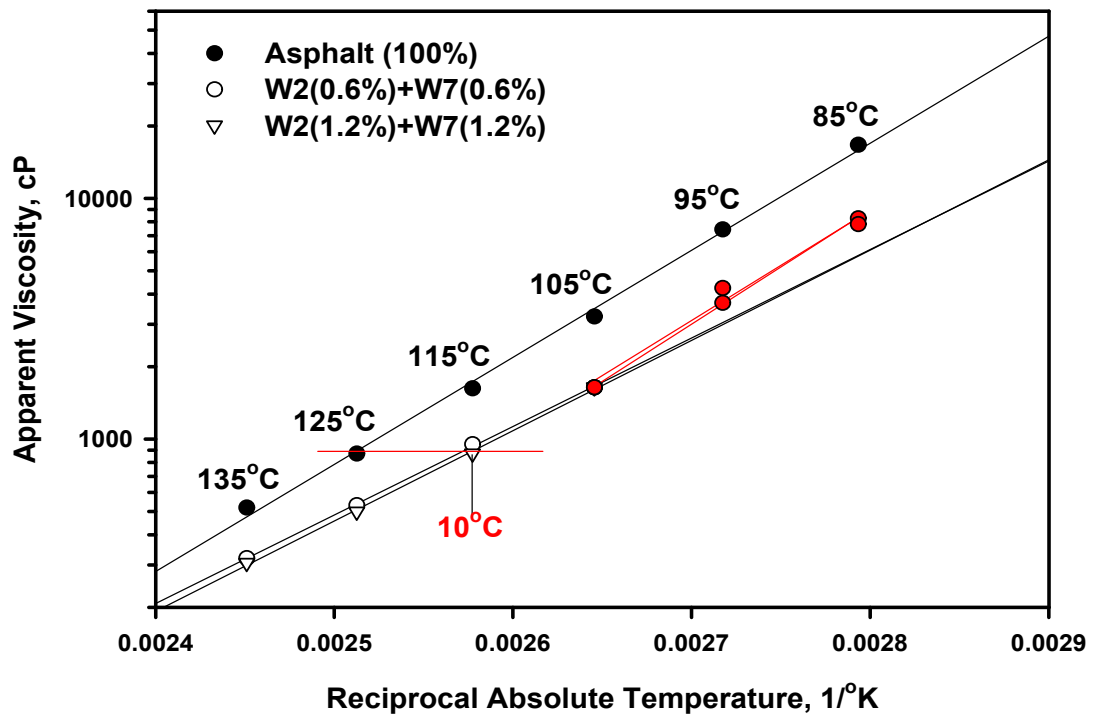


그림 32. (W2+W7)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 21. (W2+W7) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W7(0.6%)	-6.507	3677	0.9995	115.8	9.2
W2(1.2%)+W7(1.2%)	-6.721	3752	0.9988	115.0	10.0

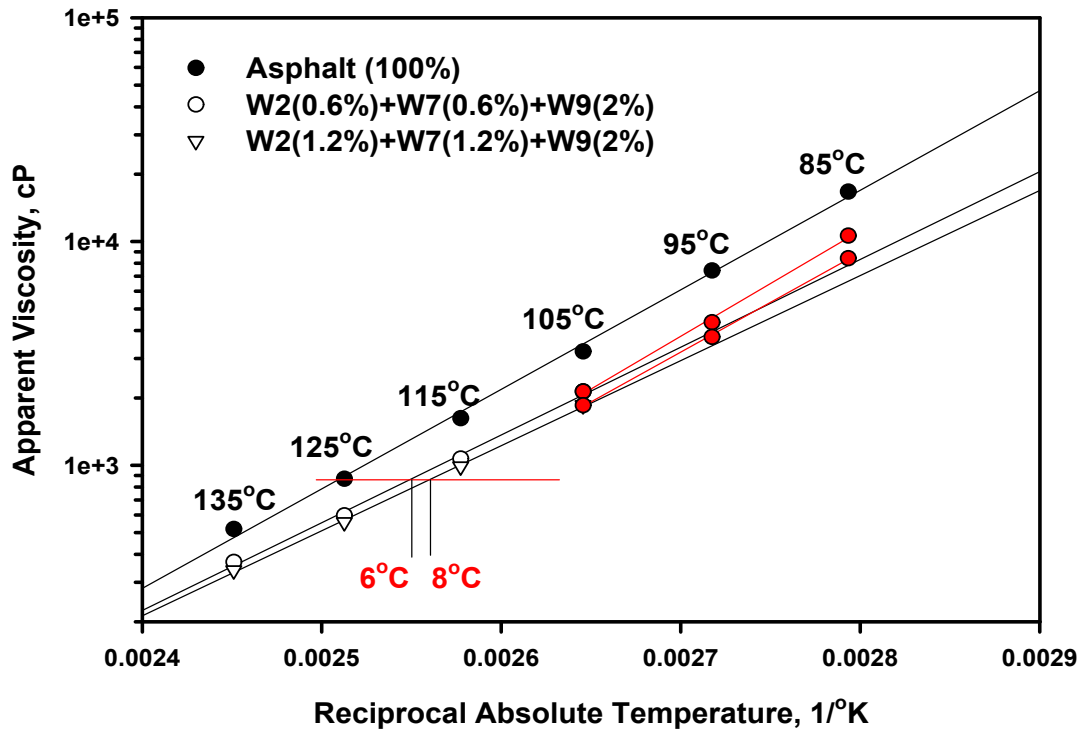


그림 33. (W2+W7+W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 22. (W2+W7+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(°C), 식(3)	온도감소(°C), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(0.6%)+W7(0.6%)+W9(2%)	-7.064	3923	0.9967	118.8	6.2
W2(1.2%)+W7(1.2%)+W9(2%)	-6.796	3801	0.9991	117.0	8.0

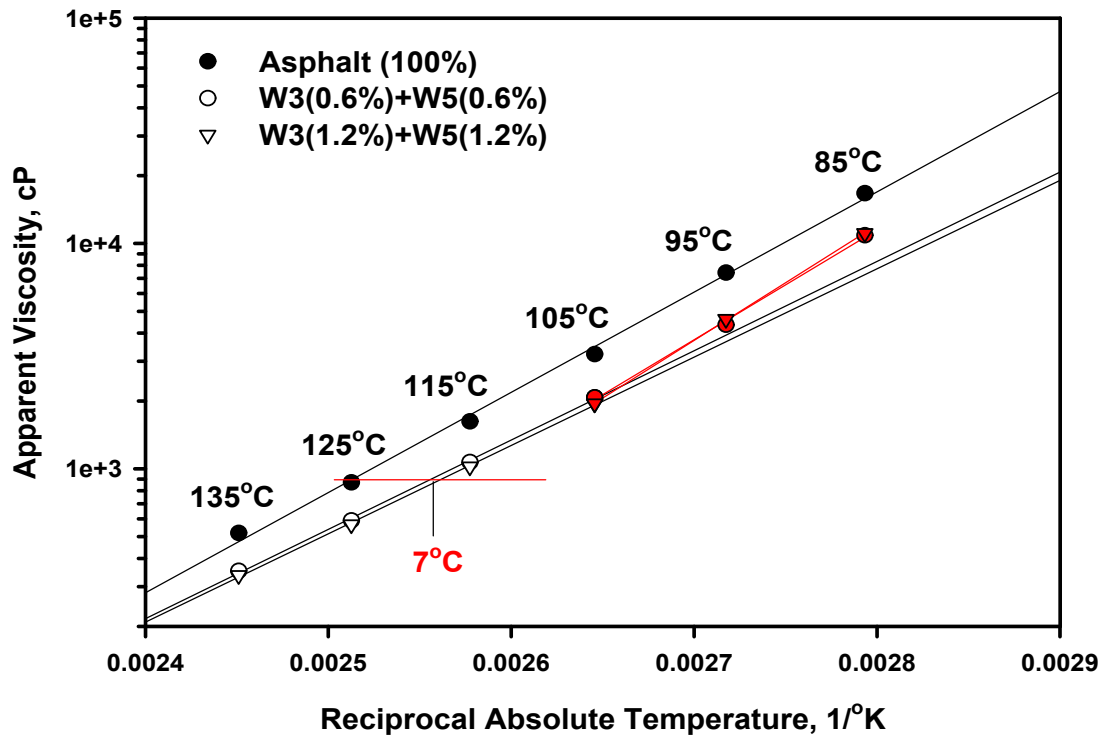


그림 34. (W3+W5)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 23. (W3+W5) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W5(0.6%)	-7.174	3963	0.9890	118.4	6.6
W3(1.2%)+W5(1.2%)	-7.090	3921	0.9994	117.5	7.5

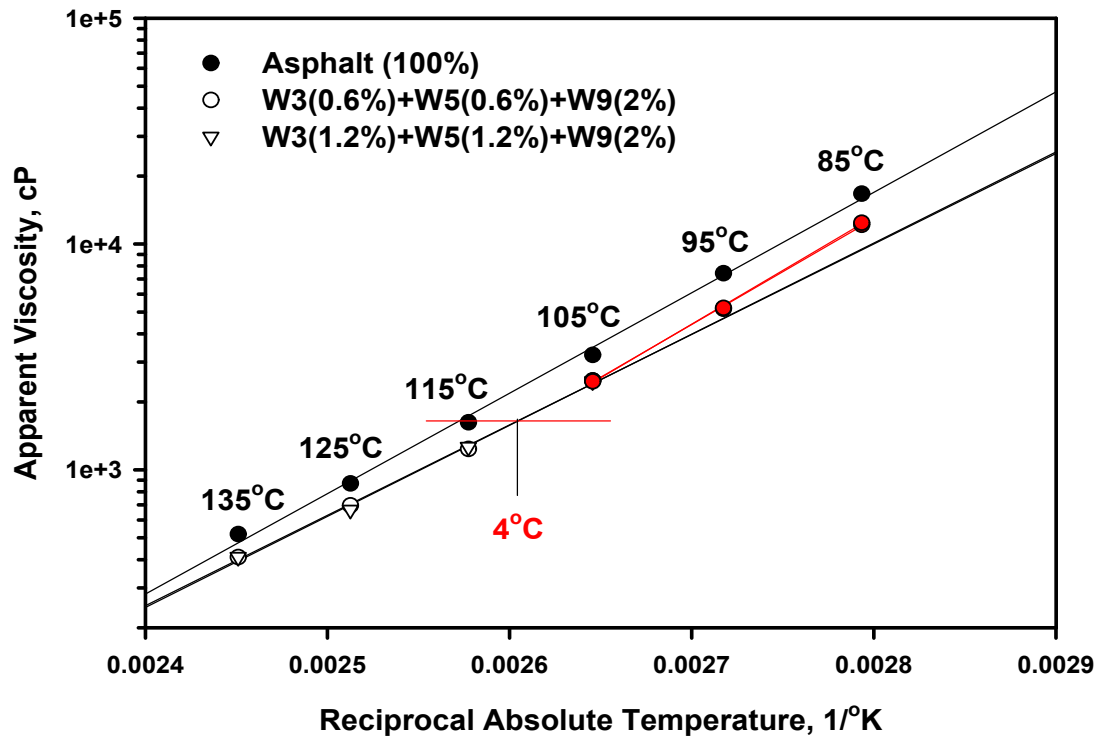


그림 35. (W3+W5+W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 24. (W3+W5+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W5(0.6%)+W9(2%)	-7.214	4005	0.9982	121.0	4.0
W3(1.2%)+W5(1.2%)+W9(2%)	-7.289	4003	0.9973	118.0	7.0

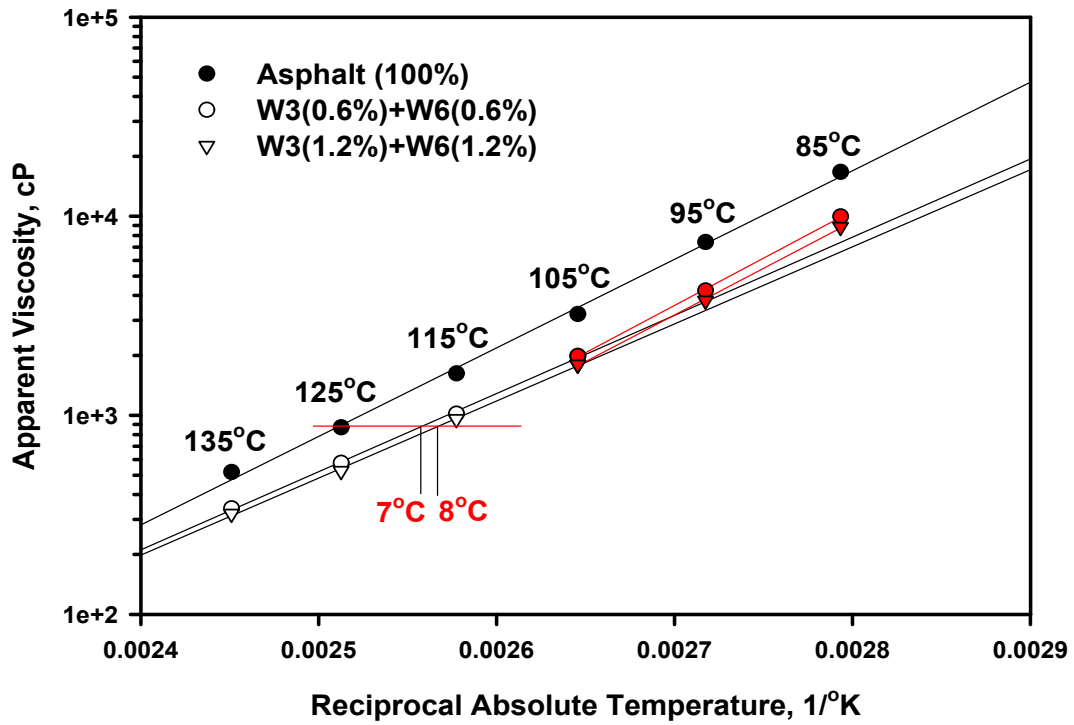


그림 36. (W3+W6)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 25. (W3+W6) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W6(0.6%)	-7.099	3926	0.9990	117.7	7.3
W3(1.2%)+W6(1.2%)	-6.996	3872	0.9990	116.3	8.7

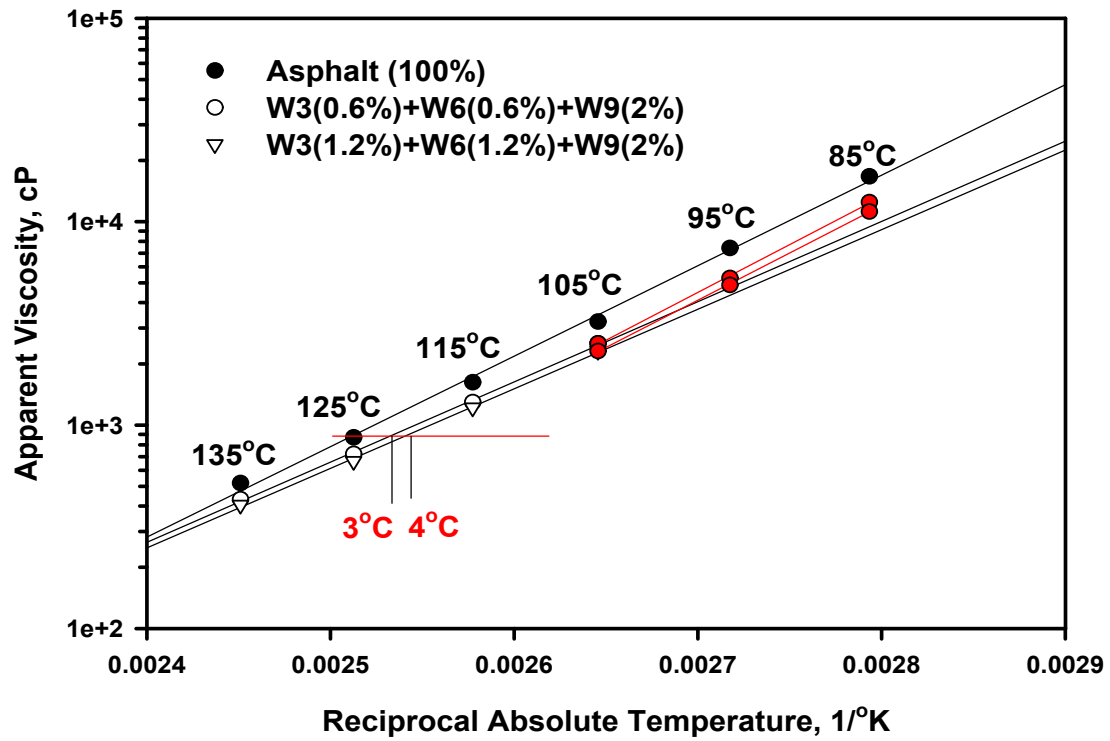


그림 37. (W3+W6+W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 26. (W3+W6+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W6(0.6%)+W9(2%)	-7.041	3944	0.9987	121.8	3.2
W3(1.2%)+W6(1.2%)+W9(2%)	-6.993	3912	0.9987	120.4	4.6

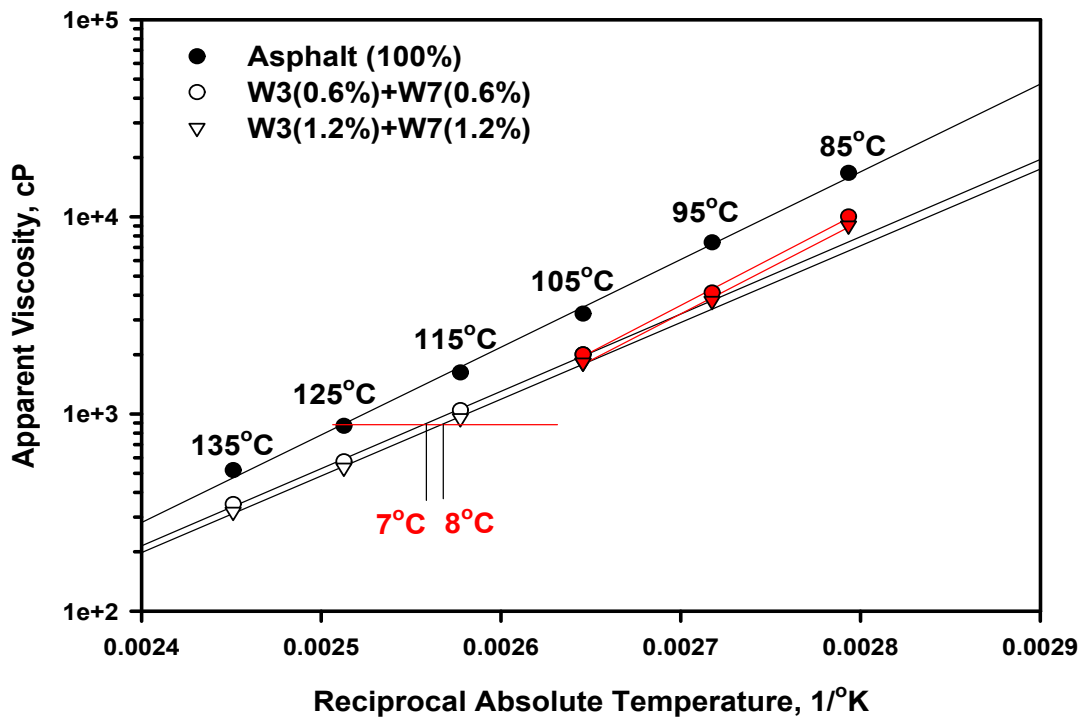


그림 38. (W3+W7)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 27. (W3+W7) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W7(0.6%)	-7.077	3920	0.9987	117.9	7.1
W3(1.2%)+W7(1.2%)	-7.043	3892	0.9992	116.5	8.5

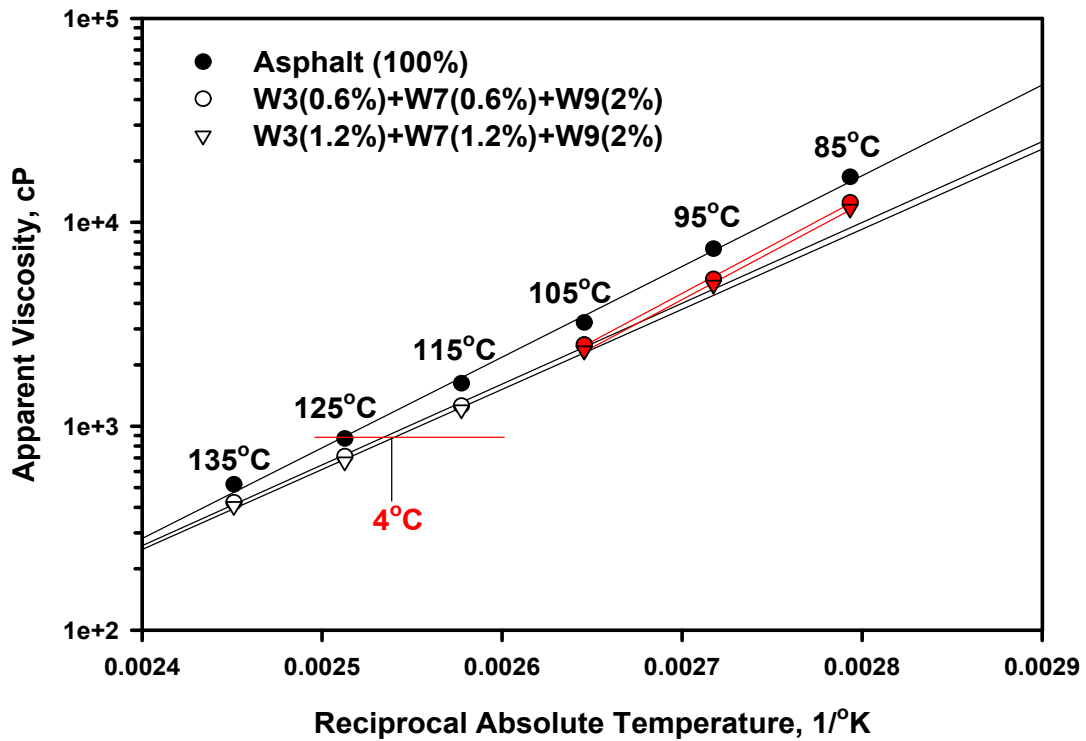


그림 39. (W3+W7+W9)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 30. (W3+W7+W9) 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r ²	온도(°C), 식(3)	온도감소(°C), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W3(0.6%)+W7(0.6%)+W9(2%)	-7.096	3963	0.9982	121.5	3.5
W3(1.2%)+W7(1.2%)+W9(2%)	-7.029	3927	0.9985	120.5	4.5

이상의 중온첨가제 조합에 의한 중온효과 분석결과들을 종합하여 아래 표 29와 그림 40에 표시하였다.

표 29. 중온첨가제 조합의 온도감소효과 요약

중온첨가제 조합	온도 감소, °C
W2(0.6%) + W5(0.6%)	5.6
W2(1.2%) + W5(1.2%)	9.7
W2(0.6%) + W5(0.6%) + W9(2%)	7.9
W2(1.2%) + W5(1.2%) + W9(2%)	9.6
W2(0.6%) + W6(0.6%)	9.2
W2(1.2%) + W6(1.2%)	11.1
W2(0.6%) + W6(0.6%) + W9(2%)	8.8
W2(1.2%) + W6(1.2%) + W9(2%)	8.4
W2(0.6%) + W7(0.6%)	9.2
W2(1.2%) + W7(1.2%)	10.0
W2(0.6%) + W7(0.6%) + W9(2%)	6.2
W2(1.2%) + W7(1.2%) + W9(2%)	8.0
W3(0.6%) + W5(0.6%)	6.6
W3(1.2%) + W5(1.2%)	7.5
W3(0.6%) + W5(0.6%) + W9(2%)	4.0
W3(1.2%) + W5(1.2%) + W9(2%)	7.0
W3(0.6%) + W6(0.6%)	7.3
W3(1.2%) + W6(1.2%)	8.7
W3(0.6%) + W6(0.6%) + W9(2%)	3.2
W3(1.2%) + W6(1.2%) + W9(2%)	4.6
W3(0.6%) + W7(0.6%)	7.1
W3(1.2%) + W7(1.2%)	8.5
W3(0.6%) + W7(0.6%) + W9(2%)	3.5
W3(1.2%) + W7(1.2%) + W9(2%)	4.5

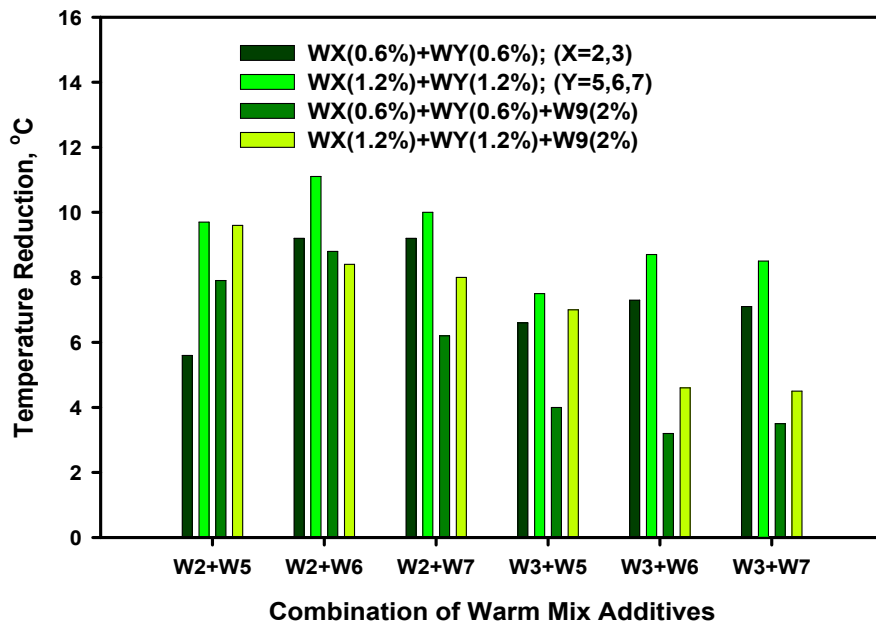


그림 40. 중온첨가제 조합의 온도감소효과 비교.

표 29와 그림 40을 살펴보면, W2와 (W5, W6 및 W7)의 조합이 W3와 (W5, W6 및 W7)

의 조합보다 더 좋은 중온효과가 있음을 알 수 있다. 또한 중온첨가제의 조합 중에서도 $W2+W6 > W2+W7 > W2+W5$ 의 순서로 중온효과가 뛰어남을 볼 수 있으며, 각기 0.6%의 첨가제 두 종류를 조합하여 전체가 1.2%가 되어도 상당히 큰 중온효과가 있음을 알 수 있다. 중온첨가제의 함량이 1.2%인 경우를 고려하면, 그림 37의 단일 중온첨가제 중 중온효과가 큰 $W1(5.3^{\circ}\text{C})$ 과 $W3(5.6^{\circ}\text{C})$ 와 비교하여 볼 때, $W2(0.6\%)+W6(0.6\%)$ 의 9.2°C 와 $W2(0.6\%)+W7(0.6\%)$ 의 9.2°C 와 비교할 수 있고, 중온첨가제 조합효과가 더욱 우수함을 알 수 있다. 중온첨가제의 함량이 2.4%인 경우를 고려해도, 그림 37의 단일 중온첨가제는 $W6$ 가 7.9°C 이고 $W2$ 가 7.1°C 인 것에 반하여, 중온첨가제 조합인 $W2(1.2\%)+W6(1.2\%)$ 의 경우는 11.1°C 이고 $W2(0.6\%)+W7(0.6\%)$ 는 10.0°C 임으로, 중온첨가제 조합효과가 더욱 우수함을 알 수 있다. $W2+W6$ 의 경우 각 첨가제 함량을 0.6%에서 1.2%로 두 배로 늘린다고 하여 중온효과도 2배로 증가하지 않았으나, 상당한 증가는 있었다. 이러한 결과는 그림 37에서 설명한 중온첨가제함량의 범위가 1-3%의 영역에 있기 때문인 것으로 사료된다. 상기 조합에서 $W9(2\%)$ 의 추가는 중온효과를 오히려 떨어뜨리는 결과를 가져왔으며 그 이유는 분명치 않다. 중온첨가제를 조합할 때 이러한 중온첨가제를 사용하지 않도록 주의해야 할 것이다.

라. 중온첨가제의 함량이 많은 중온아스팔트의 중온효과

아래 그림 41과 표 30에는 전체 첨가제가 중온아스팔트함량의 8%와 5%를 차지하는 경우에 대한 중온효과를 조사하였다. 중온첨가제의 함량이 클수록 온도감소는 증가하였다. 그 중에서도 $W2(5\%)+W6(3\%)$ 의 중온효과가 가장 크고(20.2°C), 다음은 $W2(5\%)+W10(3\%)$ 이며(18.6°C), 그 다음은 13.2°C 인 $W2(5\%)+W8(3\%)$ 가 차지하며, 이어서 $W10(5\%)$ 으로서 12.1°C 이었다. 그러나 중온효과가 우수하다고 하여 무조건 바람직하다고 할 수 없는 것은 온도가 7.5°C 이하로 내려가도 점도가 크게 상승하지 않는다는 점이다. 생산과 다짐온도 영역에서는 점도가 낮은 것이 좋으나, 포장공용온도에서는 점도가 상승하여야 포장의 역학적 기능을 잘 수행할 수 있다. 공용온도영역에서도 점도가 낮으면 소성변형과 같은 문제를 야기할 수 있어 큰 문제가 될 수 있으므로 중온첨가제의 설계 시 공용온도에서도 점도가 낮아지지 않도록 조심하여야 한다.

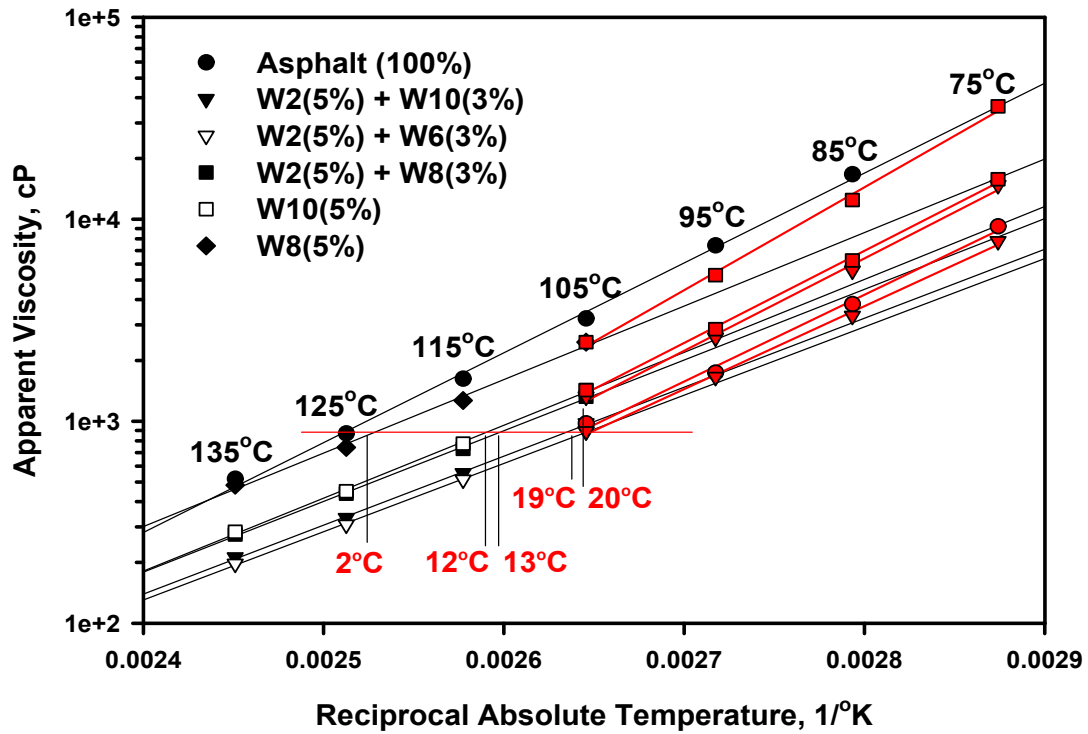


그림 41. 타 중온첨가제의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 30. 타 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도(℃), 식(3)	온도감소(℃), 식(4)
아스팔트 100%	-8.226	4448	0.9975	125	0
W2(5%)+W10(3%)	-6.051	3415	0.9991	106.4	18.6
W2(5%)+W6(3%)	-5.996	3380	0.9994	104.8	20.2
W2(5%)+W8(3%)	-6.149	3501	0.9990	111.8	13.2
W10(5%)	-6.410	3612	0.9984	112.9	12.1
W8(5%)	-6.258	3640	0.9945	122.3	2.7

3절 개질 아스팔트용 중온첨가제 개발

1. 개질 중온아스팔트 시편 제작

고분자 개질제를 전체 개질아스팔트 중량의 10%가 되도록 아스팔트에 첨가한 후 170℃에서 균일하게 혼합하여 개질아스팔트를 제조하였다. 상기 개질아스팔트의 점도를 온도의 함수로서 측정하고 식 (2)를 이용하여 물성상수 값을 구하면 $A=-8.527$ 와 $B=4996$ 를 얻는다(그림 42과 표 33 참조). 135℃($T=408^{\circ}\text{K}$)에서의 상기 개질아스팔트의 점도 값을 구하면 5.284Pa.S이다. 이 값은 아스팔트의 생산과 시공을 위해서 규정한 점도 값인 3.0Pa.S보다도 2.284Pa.S 더 높은 수치이다.

$$\text{Log}(\eta) = -8.527 + \frac{4996}{408} = 3.723 \quad ; \quad \eta = 5284\text{cP} \quad (8)$$

식 (3)을 이용하여 3Pa.S의 점도에 해당하는 개질아스팔트의 온도를 구하면,

$$T = \frac{4996}{\text{Log}(3000) + 8.527} - 273 = 143.2^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

143.2℃를 얻는다. 이 말은 일반 가열혼합물을 생산할 경우 개질아스콘의 생산온도는 10℃ 높은 175℃이며, 개질아스팔트의 점도규정은 일반 아스팔트보다 10℃ 높은 145℃에서의 점도가 3Pa.S 되어야 한다는 의미이다. 따라서 중온개질아스콘은 175-30=145℃에서 생산해야 하고 이를 위해 개질아스팔트의 점도는 145-30=115℃에서 3.0Pa.S가 되도록 중온첨가제의 종류와 함량을 설계해야 한다. 이 값은 개질아스팔트의 기준 값을 135℃로 정한다면, 135-115=20℃의 중온첨가제에 의한 온도감소가 있으면 중온 개질아스콘을 145℃에서 생산하는 것이 가능하다. 일반적으로 개질아스팔트의 점도가 높아지면, 가스가 발생하는 온도도 함께 높아짐으로 145℃를 생산온도로 한다 하더라도 가스발생염려는 적어서 개질중온 효과를 기대할 수 있다.

일반 아스팔트와 개질아스팔트의 중온첨가제 사이에 어떤 차이가 있는 것은 아니나, 개질아스팔트의 경우 점도가 훨씬 높음으로 다량의 중온첨가제의 사용이 필요하다. 중온 개질아스콘을 제조하기 위하여 적절한 중온첨가제의 함량이 얼마인지를 알아보는 것이 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 개질아스팔트의 점도가 135℃인 것을 기준으로 하여 적어도 20℃ 이상 점도를 낮출 수 있는 중온첨가제를 목표로 한다.

2. 개질 중온아스팔트의 점도 데이터 분석

가. 중온첨가제 5 중량%로 만든 개질 중온아스팔트의 점도분석

먼저 각 중온첨가제가 일반아스팔트와 개질아스팔트의 경우에 어떻게 다르게 작용하는가를 알아보기 위하여 중온첨가제 함량을 개질 중온아스팔트 중량의 5%로 사용했을 때의 온도감소를 조사하였다. 개질아스팔트 95%에 각기 해당하는 중온첨가제(W1, W2, W5, W6, W7) 5중량%를 첨가하고 145℃에서 균일하게 혼합하여 개질 중온아스팔트의 시편을 제조하였다. 제조된 시편은 브룩필드 점도계를 사용하여 온도를 변화시켜가며 각 온도에서의 점도를 측정하였고, 이렇게 얻어진 데이터는 식 (2)를 이용하여 회귀분석을 실시하였고 그 결과는 그림 42과 표 31에 나타내었다. 온도감소를 계산하기 위한 기준으로서 일반아스팔트의 경우와는 달리 135℃에서의 개질아스팔트의 점도(5284cP)를 기준으로 하였다. 예를 들면, 표 33에서 W1(5%) 개질 중온아스팔트의 점도 데이터에 대하여 식 (2)에 의해 얻어진 물성상수 값은 $A=-6.844$ 와 $B=4128$ 이며, 이들을 식 (3)에 대입하면 점도가 5284cP에 해당하는 W1 개질 중온아스팔트의 온도 117.8℃가 얻어진다.

$$T = \frac{4128}{\text{Log}(5284) + 6.844} - 273 = 117.8^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

W1(5%) 중온첨가제에 의한 개질 중온아스팔트의 온도감소는 $135-117.8=17.2^{\circ}\text{C}$ 가 구해진다. 이러한 값들이 각 중온첨가제에 의한 온도감소로서 표 23에 수록되어 있다. 그림 42와 표 31에서 보듯이 본 연구에서 사용한 각종 중온첨가제 5%로서는 20℃의 온도감소를 얻을 수 없음을 알 수 있다. 그러나 이 첨가제 중 첨가함량을 조금 높임으로서 가능성이 있는 첨가제로는 W6(19.4℃), W2(17.5℃) 그리고 W1(17.2℃)임을 알 수 있다.

동일한 중온첨가제 5%를 사용했을 경우에, 일반 중온아스팔트의 온도감소와 (표 16 참조) 개질 중온아스팔트의 온도감소(표 31)를 서로 비교하여 그 차이점을 조사하기 위해 아래 표 32와 그림 43에 두 경우를 함께 표현하였다. 그림 43을 참조하면 W1의 경우를 제외하고, 일반 중온아스팔트의 경우에 개질 중온아스팔트와 비교하여 온도감소가 더 큰 것으로 나타났다. 즉 다 같은 함량의 중온첨가제를 사용하더라도 중온첨가제를 5 중량%를 첨가할 경우에 개질 아스팔트의 온도감소효과가 다소 적게 나타난다는 사실이 관측된다.

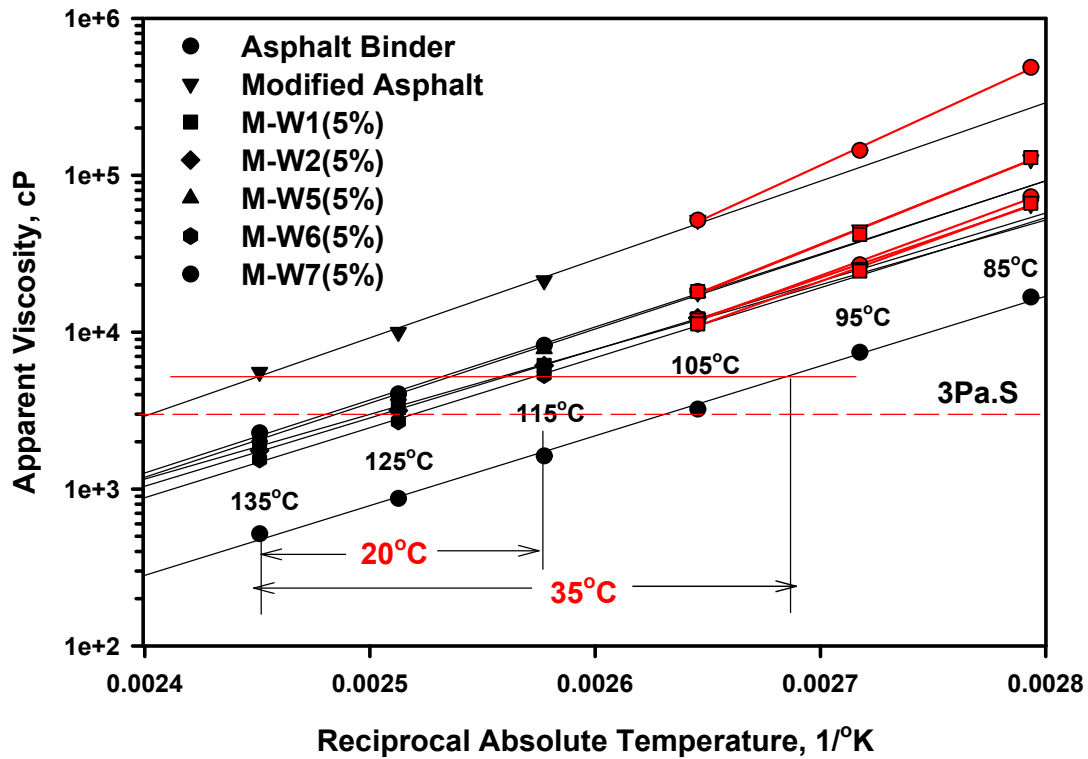


그림 42. 중온첨가제 5%인 각 개질 중온아스팔트의 점도분석.

표 31. 중온첨가제가 5%인 개질 중온아스팔트의 점도데이터 분석

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W1(5%)	-6.844	4128	0.9992	117.8	17.2
M-W2(5%)	-7.435	4355	0.9997	117.5	17.5
M-W5(5%)	-8.267	4726	0.9979	121.3	13.7
M-W6(5%)	-7.761	4461	0.9981	115.6	19.4
M-W7(5%)	-8.068	4654	0.9977	121.9	13.1

표 32. 중온첨가제가 5%인 일반과 개질 중온아스팔트의 온도감소 비교.

중온 첨가제	일반 중온아스팔트의 온도감소, °C	개질 중온아스팔트의 온도감소, °C
W1(5%)	15.0	17.2
W2(5%)	18.6	17.5
W5(5%)	15.4	13.7
W6(5%)	26.0	19.4
W7(5%)	19.8	13.1

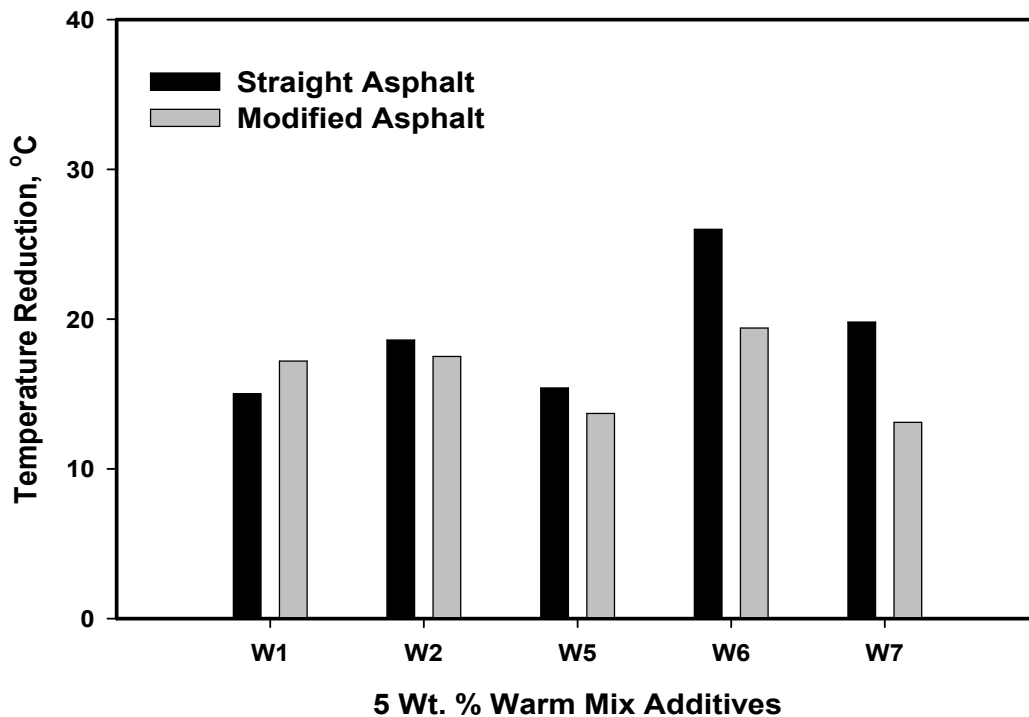


그림 43. 중온첨가제가 5%인 일반과 개질 중온아스팔트의 온도감소.

나. 중온첨가제 함량에 따른 일반과 개질 중온아스팔트의 점도분석

W2와 W6 중온첨가제가 개질아스팔트의 경우 어떻게 온도감소에 기여하는 가를 알아보기 위하여 첨가함량(1,2,3,4,5 중량%)과 온도(135, 125, 115, 105, 95, 85°C)를 변화시켜 가며, 중온효과에 의한 온도감소를 조사하였다. 그 결과를 W2의 경우에 그림 43과 표 33에, W6의 경우에 그림 44와 표 34에 각각 나타내었다. 그림 43과 44 그리고 표 33와 34에서 볼 수 있듯이 첨가제함량이 증가할수록 온도감소효과가 증가하였으며, W6가 W2에 비하여 그 효과가 더욱 두드러지게 나타났다.

상기 경향을 더욱 명확하게 관측하고, 일반과 개질 중온아스팔트의 중온효과를 비교하기 위하여 그림 43와 44 그리고 표 33와 34에 수록된 데이터를 종합적으로 정리하여 그림 45과

표 35에 나타내었다. 그림 45와 표 35에서 볼 수 있듯이 일반 중온아스팔트의 경우 중온첨가제 함량이 적을 경우 비교적 낮은 온도감소효과를 보이지만, 첨가제 함량이 증가하면 온도감소효과도 두드러지게 증가함을 볼 수 있다. 이에 대조적으로 개질 중온아스팔트의 경우 중온첨가제 함량이 적을 경우에도 상대적으로 높은 온도감소를 보이거나, 첨가제 함량이 증가하면 온도감소 효과도 상승하긴 하나 일반 중온아스팔트와 비교하면 완만한 상승을 보인다. 일반적으로 W6 첨가제에 의한 온도감소효과가 W2에 비하여 우수함을 볼 수 있다.

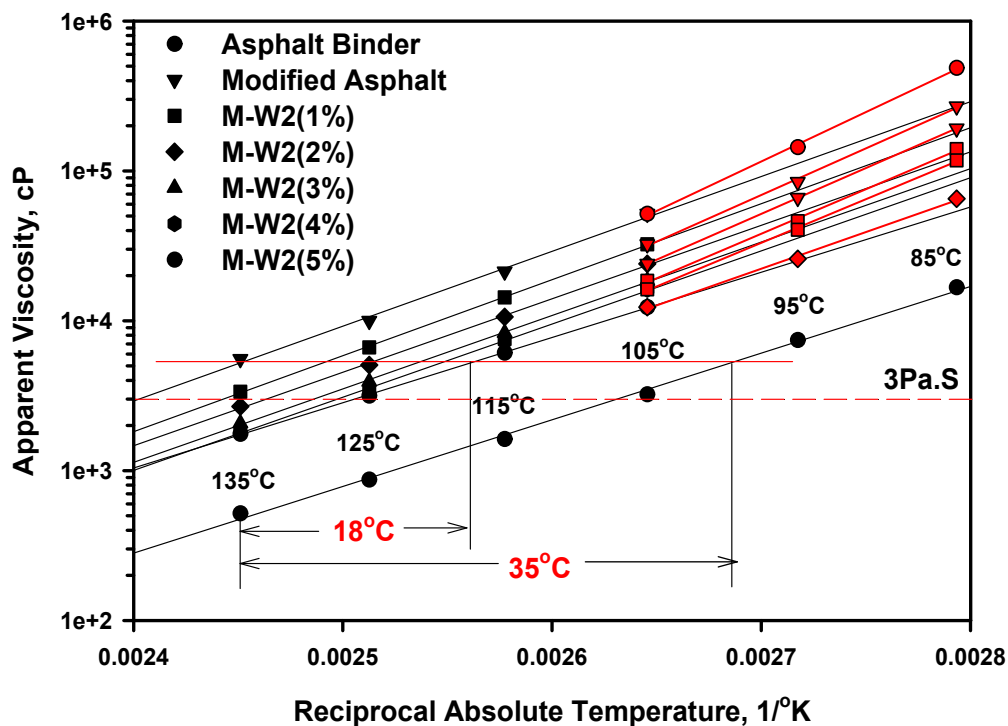


그림 43. M-W2의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 33. M-W2 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W2(1%)	-8.911	5071	0.9997	128.5	6.5
M-W2(2%)	-8.601	4903	0.9990	125.0	10.0
M-W2(3%)	-8.707	4901	0.9992	121.4	13.6
M-W2(4%)	-8.717	4883	0.9987	119.7	15.3
M-W2(5%)	-7.435	4355	0.9997	117.5	17.5

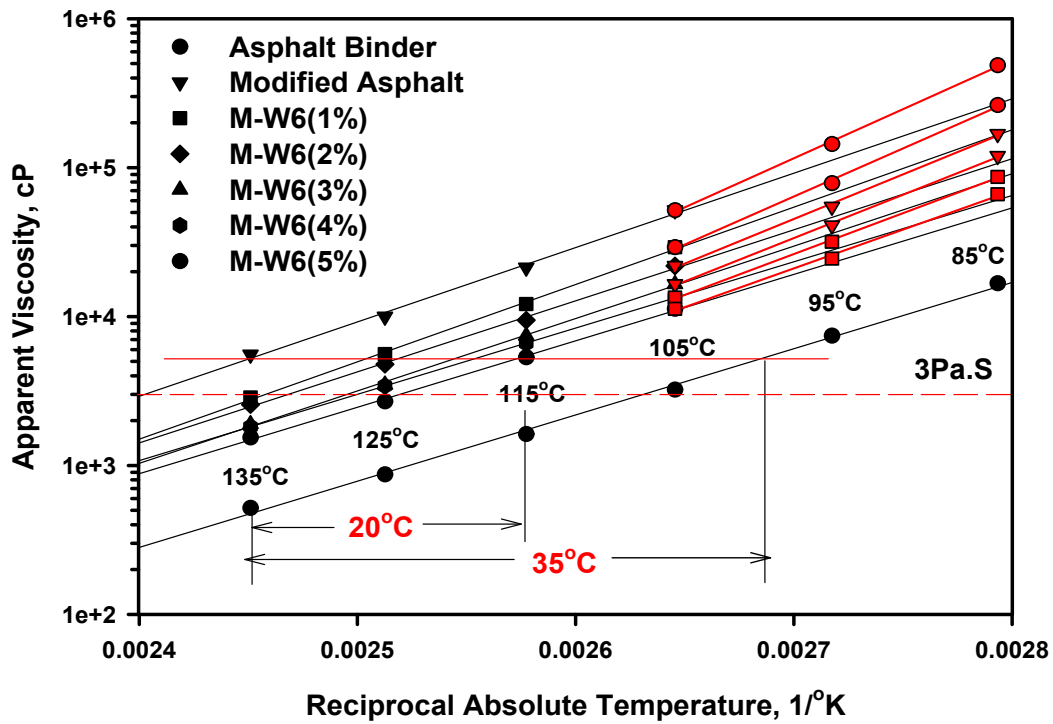


그림 44. M-W6의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 34. M-W6 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W6(1%)	-9.289	5194	0.9986	126.3	8.7
M-W6(2%)	-8.303	4773	0.9978	124.1	10.9
M-W6(3%)	-8.656	4863	0.9985	120.0	15.0
M-W6(4%)	-7.654	4453	0.9999	118.6	16.4
M-W6(5%)	-7.761	4461	0.9982	115.6	19.4

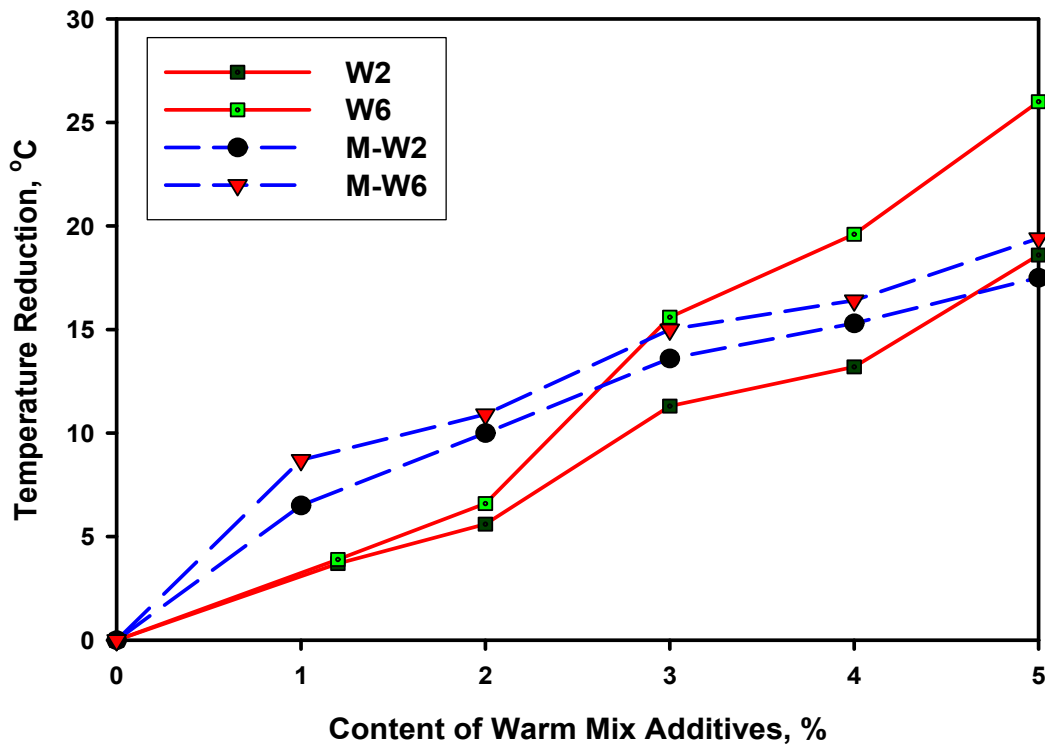


그림 45. 중온첨가제 함량과 일반 및 개질 중온아스팔트의 온도감소.

표 35. 중온첨가제 함량에 따른 일반 및 개질 중온아스팔트의 온도감소.

중온첨가제 함량, %	W2에 의한 온도감소, °C	W6에 의한 온도감소, °C	M-W2에 의한 온도감소, °C	M-W6에 의한 온도감소, °C
1			6.5	8.7
1.2	3.7	3.9		
2	5.6	6.6	10.0	10.9
3	11.3	15.6	13.6	15.0
4	13.2	19.6	15.3	16.4
5	18.6	26.0	17.5	19.4

다. 중온첨가제의 조합과 함량에 따른 개질 중온아스팔트의 점도분석

중온첨가제의 조합은 아주 중요하다. 중온첨가제 중의 어떤 종류는 왁스타입으로 융점을 가지고 있어서 융점이하에서는 고체처럼 단단해져 점도를 높이는 반면에 어떤 종류는 융점이 없이 전 온도범위에 걸쳐 점도를 낮추기도 하고, 어떤 종류는 발포하여 아스팔트 내부에 기포를 형성하기도 한다. 따라서 효과적인 중온첨가제를 설계하기 위하여 이들 다른 기능을 가진 중온첨가제들을 적당히 조합하여 원하는 온도특성을 갖도록 할 필요가 있다.

아래에 M-W2를 3%로 고정시킨 후에 M-W6의 첨가함량을 1,2,3% 증가시키고 온도를 변화해가며 점도를 측정하고 그 값을 식 (2)로 회귀분석한 결과를 그림 45와 표 36에 나타내었다. 또한 상기와 반대로 M-W6를 3%로 고정시킨 후에 M-W2의 첨가함량을 3, 4, 5% 증가시키고 온도를 변화해가며 점도를 측정하고 그 값을 식 (2)로 회귀분석하여 그림 46과 표 37에 나타내었다. 전체 중온첨가함량이 7%이상을 넘어서면 온도감소효과가 20℃ 이상이 나타나는 것으로 관측된다. 문제는 온도감소효과는 만족스럽지만 85℃ 이하의 저온에서 개질 중온아스팔트의 점도상승이 적다는 점이다. 이처럼 적은 점도상승은 역학적 물성을 약화시키는 문제를 야기 시킬 수 있어 염려스럽다.

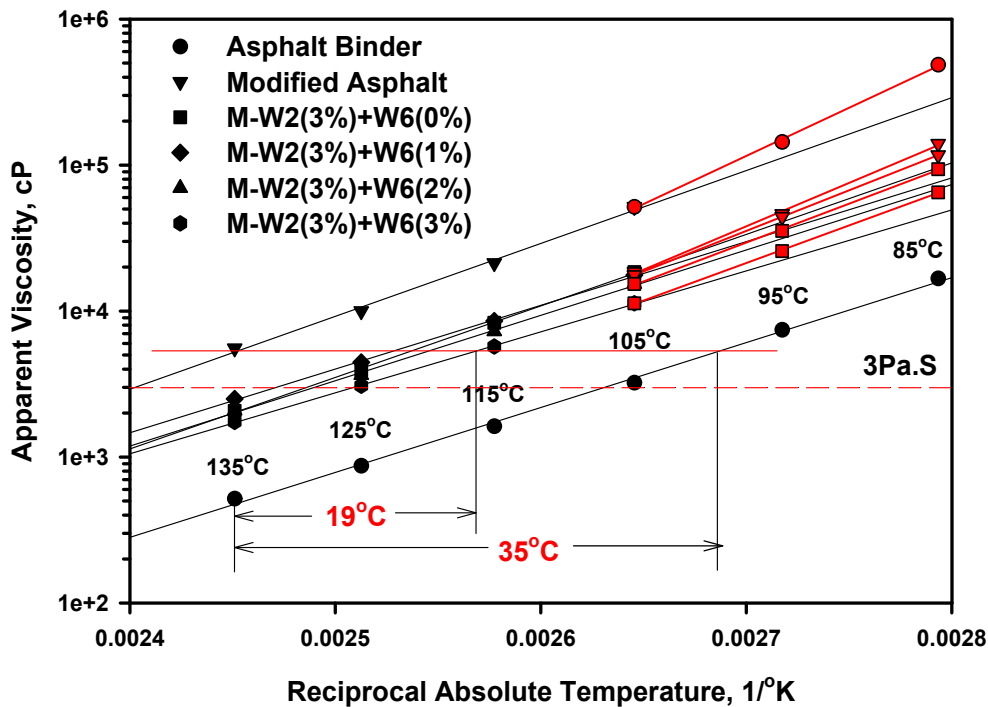


그림 45. M-(W2(3%)+W6)의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 36. M-(W2(3%)+W6) 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W2(3%)+W6(0%)	-8.707	4901	0.9992	121.4	13.6
M-W2(3%)+W6(1%)	-7.310	4365	0.9993	122.8	12.2
M-W2(3%)+W6(2%)	-7.673	4478	0.9983	120.1	14.9
M-W2(3%)+W6(3%)	-7.000	4176	0.9997	116.6	18.4

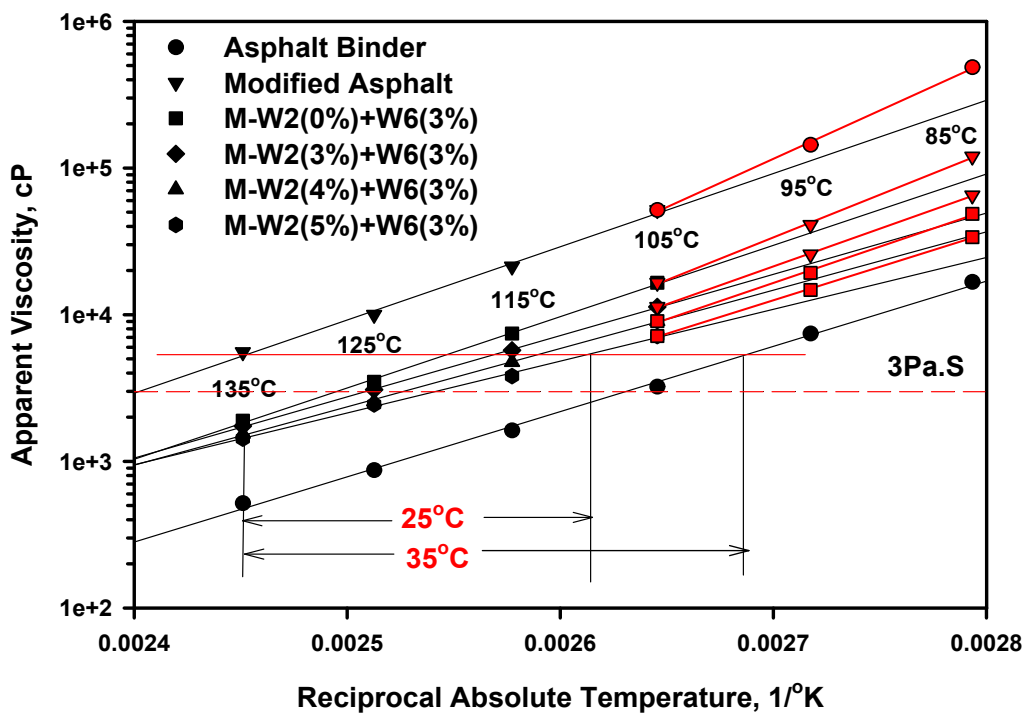


그림 46. M-(W2+W6(3%))의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 37. M-(W2+W6(3%)) 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W2(0%)+W6(3%)	-8.656	4863	0.9985	120.0	15.0
M-W2(3%)+W6(3%)	-7.000	4176	0.9997	116.6	18.4
M-W2(4%)+W6(3%)	-6.565	3975	0.9990	113.6	21.4
M-W2(5%)+W6(3%)	-5.504	3534	0.9971	110.2	24.8

상기 그림 45과 46 그리고 표 36과 37의 결과를 종합하여 그림 47과 표 38에 표시하였다. 이들 결과는 W2 혹은 W6 중 어느 하나를 고정시키고 다른 첨가제의 함량을 변화시키는 것은, W2와 W6 둘 중 하나를 선택하고 고정 안 된 다른 중온첨가제의 함량을 처음부터 계속 증가시키는 것과 같은 효과가 있음을 시사하고 있다. 즉 두 첨가제 중 어떤 첨가제를 고정시키던 상관없이 중온첨가제의 전체 첨가함량이 증가할수록 온도감소효과도 증가함을 볼 수 있었다.

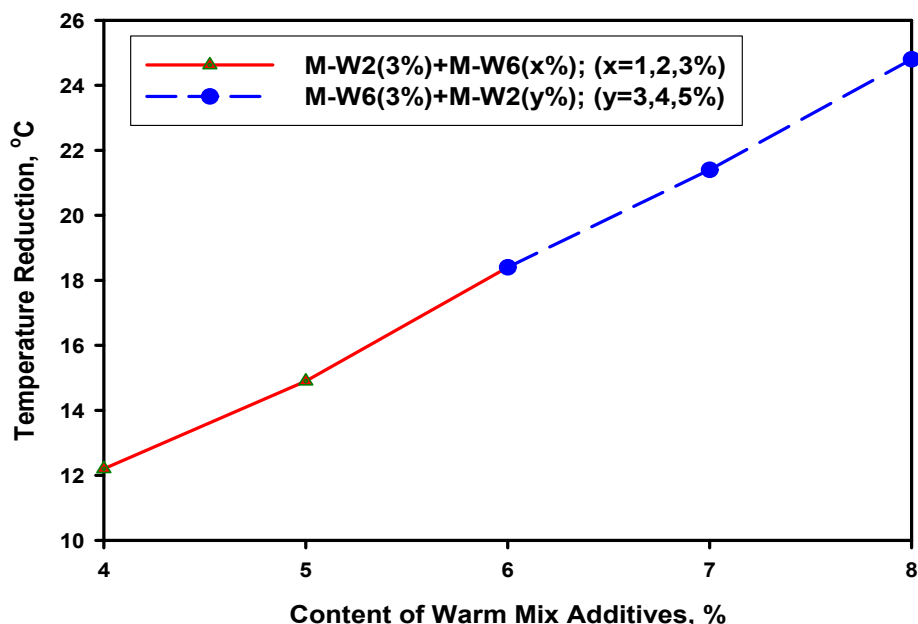


그림 47. 중온첨가제 조합에 의한 개질아스팔트의 온도감소

표 38. 중온첨가제 조합에 의한 개질아스팔트의 온도감소 데이터

첨가제 함량	중온첨가제 함량					
	x=1	x=2	x=3	y=3	y=4	y=5
M-W2(3%)+M-W6(x%)	12.2	14.9	18.4			
M-W6(3%)+M-W2(y%)				18.4	21.4	24.8

라. 중온첨가제 중의 W8과 W9에 의한 개질 중온아스팔트의 점도분석

W8과 W9으로 만든 개질 중온아스팔트의 중온효과를 그림 48, 49 및 50과 표 39, 40 및 41에 각각 나타내었다. 이들 그림과 표에서 알 수 있듯이 이들 첨가제에 의한 중온효과는 무시할 수 있을 정도로 미미한 것으로 나타났다. W8과 W9은 개질아스팔트의 경우에 거의 영향을 나타낼 수 없는 것으로 판단된다.

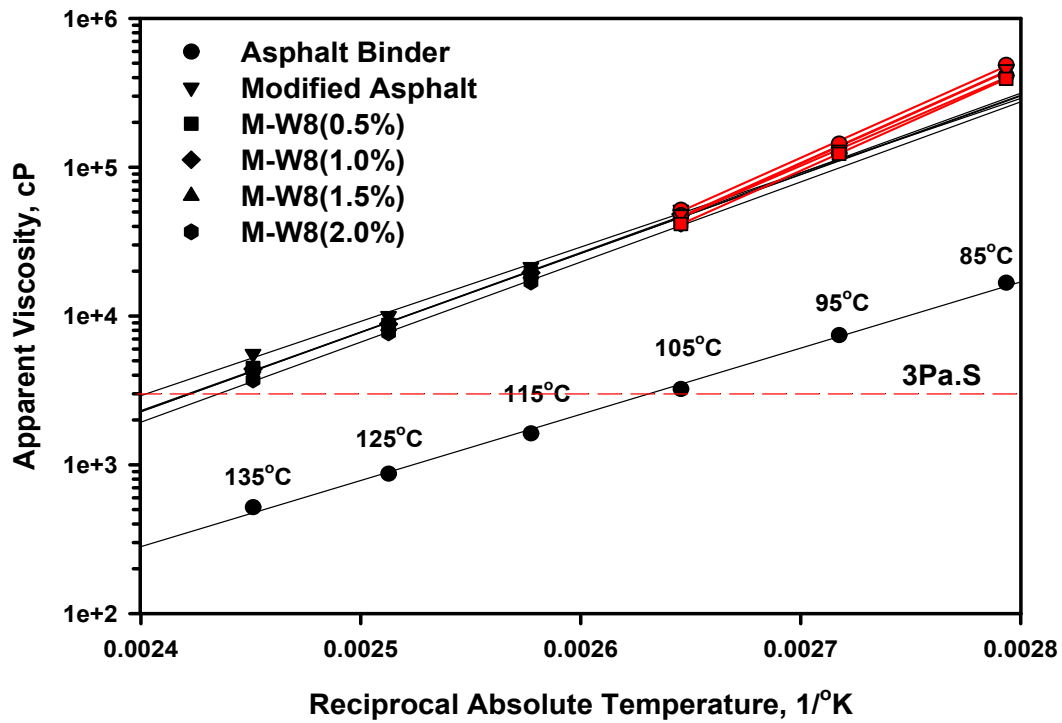


그림 48. M-W8의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 39. M-W8 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W8(0.5%)	-9.323	5286	0.9981	132.3	2.7
M-W8(1.0%)	-9.490	5353	0.9987	132.3	2.7
M-W8(1.5%)	-9.402	5316	0.9971	132.2	2.8
M-W8(2.0%)	-9.629	5382	0.9994	130.2	4.8

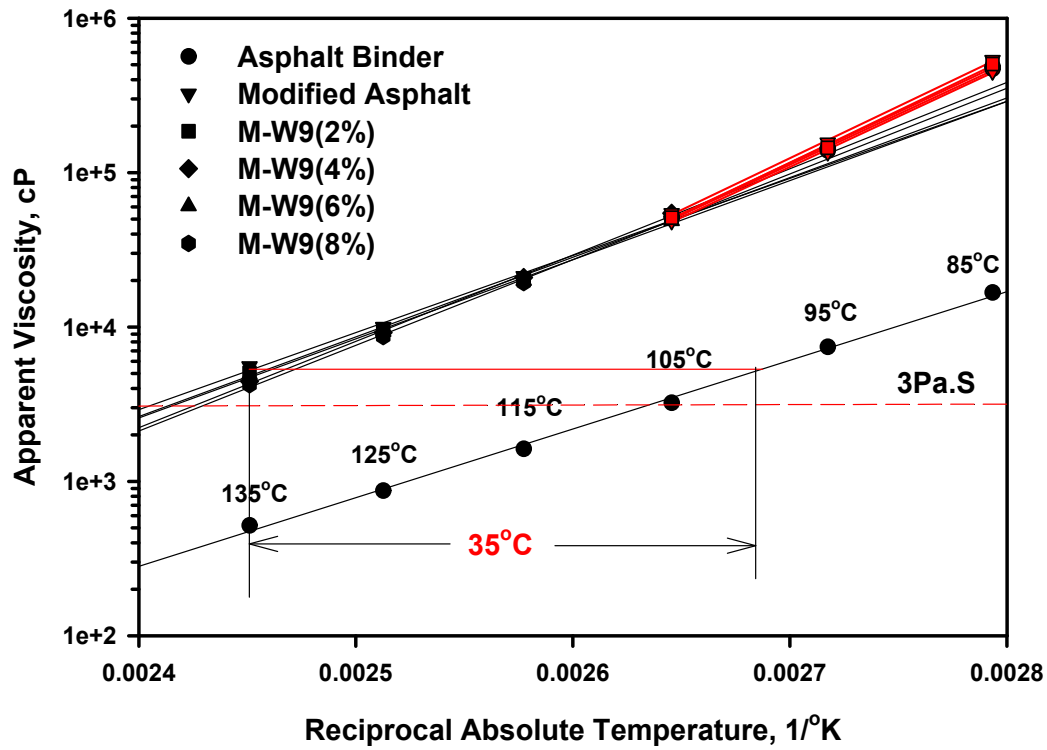


그림 49. M-W9의 점도 데이터와 식 (2)의 회귀분석.

표 40. M-W9 개질 중온아스팔트의 점도데이터에 대한 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W9(2%)	-8.966	5161	0.9971	133.9	1.1
M-W9(4%)	-10.070	5592	0.9985	132.6	2.4
M-W9(6%)	-8.886	5124	0.9974	133.5	1.5
M-W9(8%)	-10.000	5554	0.9979	131.9	3.1

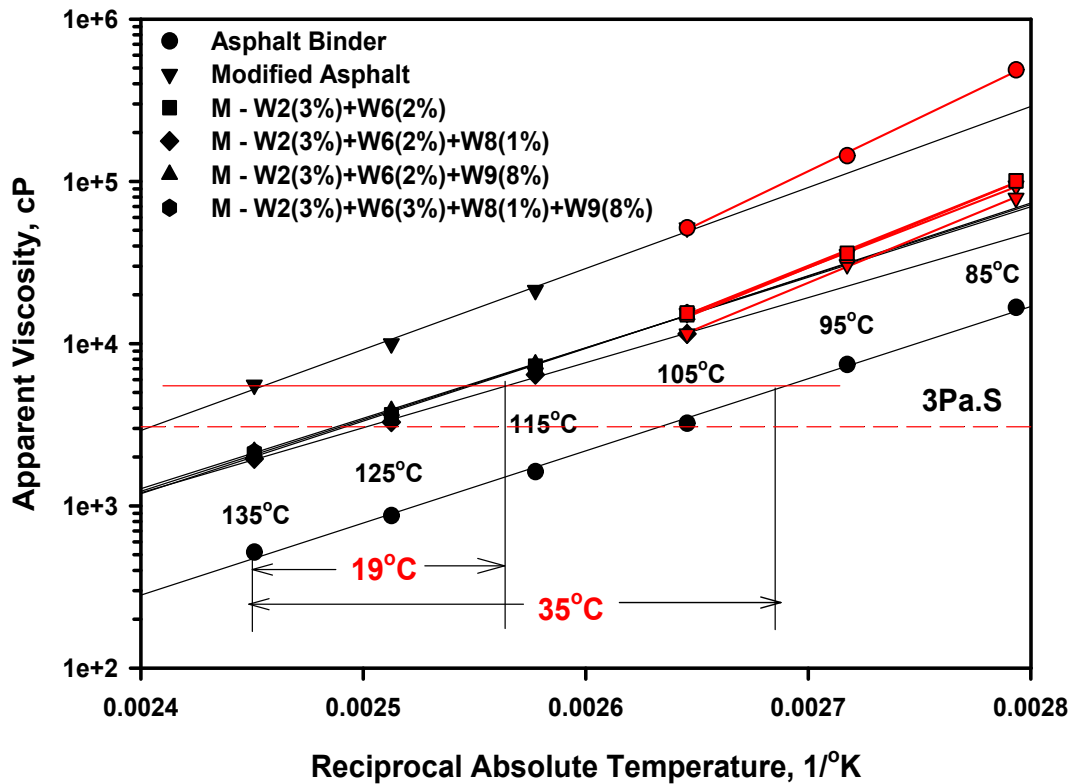


그림 50. 중온첨가제 조합에 의한 개질 중온아스팔트의 온도감소.

표 41. 중온첨가제 조합에 의한 개질 중온아스팔트의 점도데이터 분석 결과

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W2(3%)+W6(2%)	-7.673	4478	0.9983	120.1	14.9
M-W2(3%)+W6(2%)+W8(1%)	-6.545	4011	0.9983	117.8	17.2
M-W2(3%)+W6(2%)+W9(8%)	-7.321	4345	0.9996	120.6	14.4
M-W2(3%)+W6(3%)+W8(1%)+W9(8%)	-7.518	4420	0.9971	120.4	14.6

마. 중온첨가제 다량이 첨가된 개질 중온아스팔트의 온도감소 효과

아래 그림 51과 표 42에서 알 수 있듯이 단독이던 조합이던 간에 전체 중온첨가제 함량이 7%이상이면 개질 중온아스팔트의 온도감소 요구조건인 20℃ 이상이 만족된다. 아래에는 전체 중온첨가제 함량이 10%인 경우에 중온아스팔트의 점도를 분석한 것이다. W8과 W9이 추

가된 경우의 중온첨가제를 제외하면 모두 온도감소가 20℃ 이상이다. 앞서 제기한 바와 같이 75℃로 온도가 내려가도 중온아스팔트의 점도증가가 충분하지 않아 역학적인 관점에서 문제가 될 수 있음을 상기해야 한다.

즉 아스팔트보다는 점도가 높긴 하나, 개질아스팔트로서 소성변형 저항성이 크게 향상되어야 함에도 불구하고 그렇지 못할 가능성이 크다. 이를 고려하여 중온첨가제를 설계할 필요성이 요구된다.

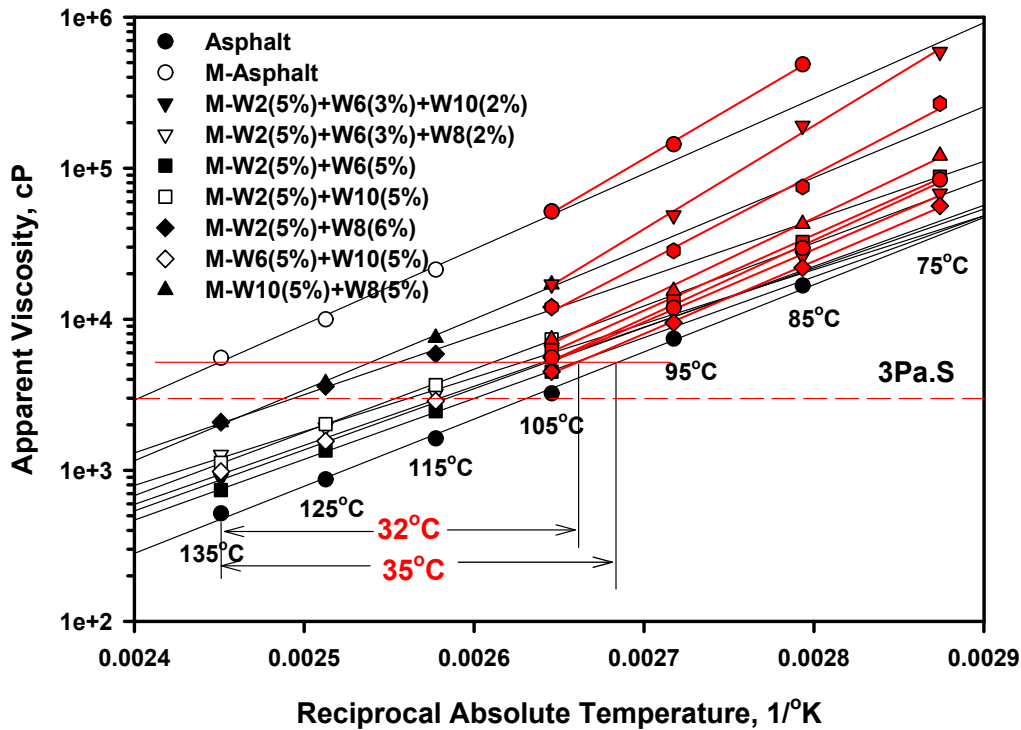


그림 51. 다량의 중온첨가제와 개질 중온아스팔트의 온도감소.

표 42. 중온첨가제 다량이 첨가된 개질 중온아스팔트의 점도데이터 분석

첨가제 함량	식(2)의 A	식(2)의 B	식(2)의 r2	온도, 식(3)	온도감소, 식(4)
아스팔트	-8.226	4448	0.9975	99.4	35.6
개질 아스팔트	-8.527	4996	0.9954	135.0	0.0
M-W2(5%)+W6(3%)+W10(2%)	-6.987	4049	0.9989	105.2	29.8
M-W2(5%)+W6(3%)+W8(2%)	-5.669	3570	0.9932	107.3	27.7
M-W2(5%)+W6(5%)	-6.996	4028	0.9995	103.0	32.0
M-W2(5%)+W10(5%)	-7.207	4183	0.9995	109.9	25.1
M-W2(5%)+W8(6%)	-6.152	3861	0.9958	118.2	16.8
M-W6(5%)+W10(5%)	-6.612	3911	0.9969	105.6	29.4
M-W10(5%)+W8(5%)	-8.185	4687	0.9979	120.8	14.2

바. 중온첨가제의 균열저항성 향상 연구

균열저항성은 모든 중온첨가제에 필요한 물성이나, 특히 왁스 타입의 중온첨가제가 가장 필요로 한다. 이유는 왁스타입의 중온첨가제는 융점을 가지고 있으며, 융점이상에서는 물처럼 점도가 급격히 낮아져 중온의 역할을 하지만, 융점이하에서는 결정을 이루어 균열을 일으키기 쉬운 상태가 됨으로 이를 방지하기 위해 균열저항성이 요구되기 때문이다. 일반적으로 왁스는 파라핀왁스와 비 파라핀왁스로 분류되며 그 종류는 아래 그림 52와 같다.

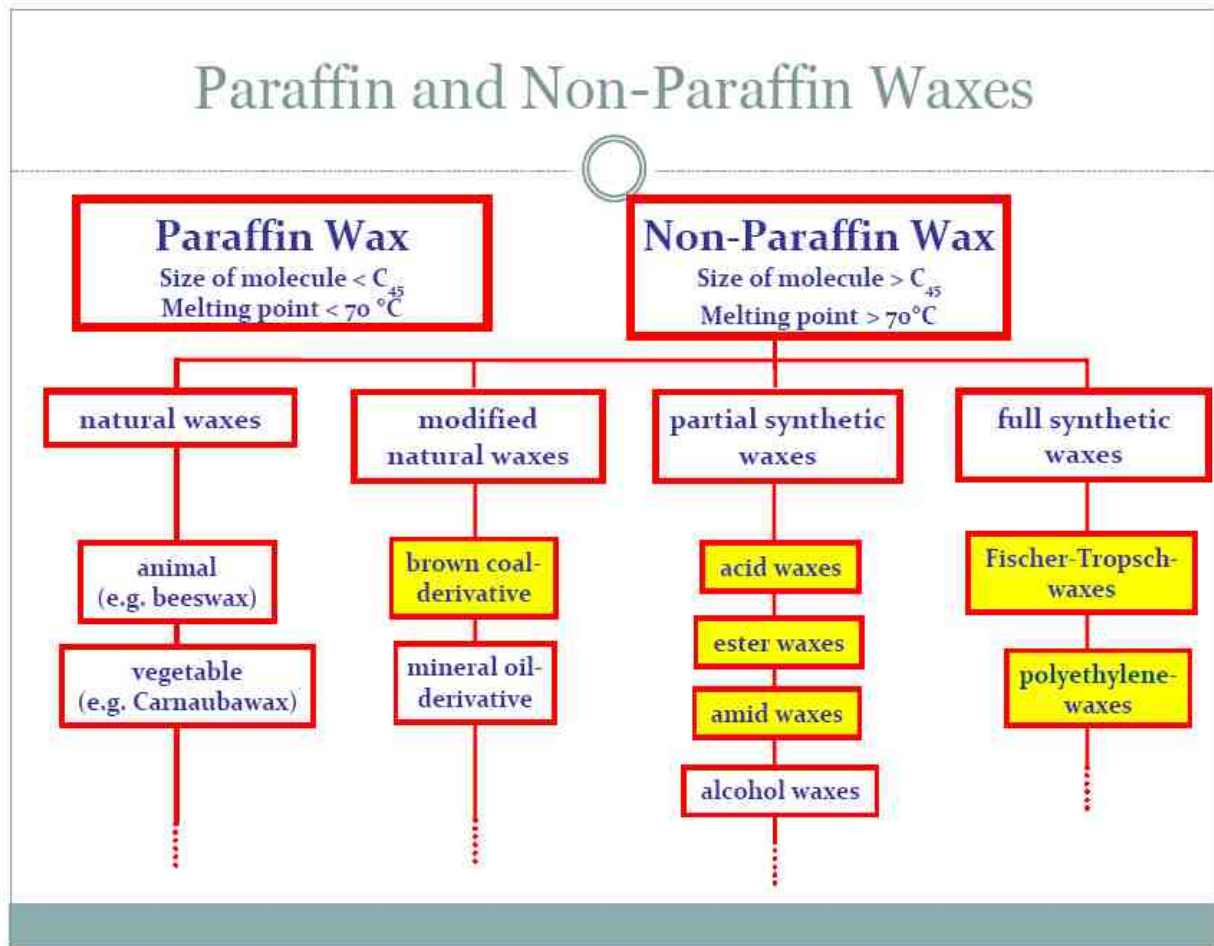


그림 52. 중온첨가제로 사용 가능한 각종 왁스의 종류.

예를 들어, 상업적으로 널리 사용되는 왁스타입의 중온첨가제의 사례를 든다면, 아래 그림 53에서 찾아볼 수 있다. 이들 중 가장 흔히 사용되고 있는 대표적인 왁스타입의 중온첨가제로는 남아프리카 공화국에서 생산되는 합성왁스인 새소비트 (sasobit)를 들 수 있다.

본 연구에서는 상기 왁스타입의 중온첨가제의 균열저항성을 높이기 위한 화합물로서 유리변환점 (glass transition temperature)이 아주 낮은 탄성재료를 사용한다. 이러한 탄성재료는 타 고분자나 유기재료와 비교하여 유리변환점이 훨씬 낮기 때문에 저온에서 왁스의 결정으로 인한 취성을 보완하여 균열을 억제하는 역할을 수행할 수 있다.

Selected Additives



- **Paraffin Waxes:**
 - Microcrystalline
 - Astra 3816 Refined Paraffin
- **Non-Paraffin Waxes:**
 - Modified Natural
 - Romonta Normal - Montan
 - Romonta Asphaltan A
 - Romonta Asphaltan B
 - Partial Synthetic
 - Clariant Licomont BS100 – N,N'-ethylenebisstearamide
 - Luxco Pitch – stearic acid pitch
 - Ester Wax - TBD
 - Synthetic
 - Sasobit – Fischer-Tropsch
 - Allied - Polyethylene

그림 53. 상업적으로 사용되는 왁스타입의 중온첨가제.

일반적으로 아스팔트바인더는 점탄성유체로서 점성과 탄성을 함께 가지고 있으며, 탄성재료의 첨가로 인한 물성을 측정하기 위해서는 동적 전단유동 시험장비 (DSR측정장비)를 사용하며, 아래에 이 장비에 대한 소개와 측정방법을 기술한다.

(1) 동적전단유동장치(Dynamic Shear Rheometer, DSR)

아스팔트 거동은 재하시간과 온도에 의존하기 때문에 아스팔트 바인더의 이상적인 시험은 이 두 인자를 모두 고려하여야 한다. DSR은 아스팔트바인더 시험 시 중간온도에서 고온까지의 유변학적 특성(rheological characteristics; 복합전단계수, 위상각)을 측정한다.

본 연구에 사용된 DSR 장비는 ANTON Parr 회사의 장비이며 장비제원은 다음과 같다.

- 형식 : 회전식, 진동식
- 점도 측정범위 : $(0.5 \times 10^{-3} \sim 8.5 \times 10^5)$ Pa
- 측정온도 범위 : $(-150 \sim 1000)$ °C
- 적용 주기 : $(0.00001 \sim 100)$ Hz
- 변화각도 정밀도 : $0.1 \mu\text{rad}$

DSR 물성측정 **관련규격**은 KS F 2393, AASHTO TP5에 명시되어 있다.

DSR 시험에서는 측정할 아스팔트 바인더 시편을 고정판과 회전판 사이에 넣는다. 아래 그림 54를 참조하기 바란다. A점에서의 판의 중심선(검게 칠해진 수직선)은 판이 회전함에 따라 B점까지 움직인다. 판의 중심선은 B점으로부터 다시 되돌아오고 A점을 통과하여 C점

까지 움직인다. 판의 중심선은 C점으로부터 다시 A점으로 되돌아온다. 이런 회전은 한 사이클이고 DSR 시험동안 지속적으로 반복된다. 모든 슈퍼페이브 DSR 바인더 시험은 10 rad/sec의 진동속도로 수행하며, 이것은 약 1.59Hz에 해당한다.

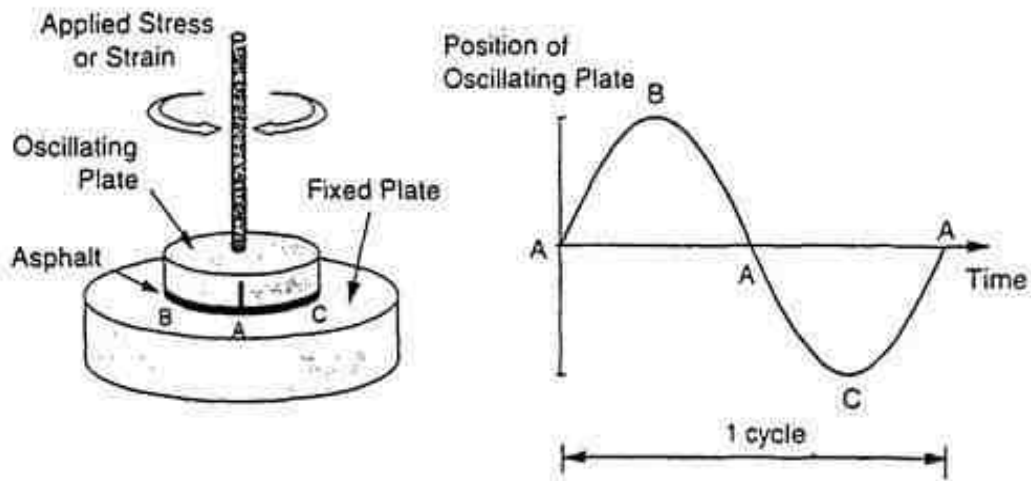


그림 54. DSR 시험

동적 전단유동장치는 응력제어와 변형제어의 두 가지 모드로 측정할 수 있다. 응력제어모드는 A점에서 B점까지 회전판을 움직이기 위해 일정한 토크를 작용시킨다. 제안된 주파수에서 판을 움직이기 위해 필요한 토크는 아스팔트 바인더의 점성에 따라 변하며, 더 강한 점성을 가진 아스팔트는 더 큰 토크가 필요하다. 슈퍼페이브 바인더 시험에서는 이 응력제어 모드를 사용한다. 변형제어 모드는 제안된 주파수에서 A점부터 B점까지 일정하게 회전판을 움직이는데 필요한 토크를 측정한다. 두 모드의 차이점은 응력제어모드는 최대 시료응력(일정한 토크)을 일정하게 유지하고 실제 판 이동거리가 각 사이클 사이에서 약간 변하며, 변형제어모드는 판 이동거리가 일정하고 토크와 응력이 변한다는 점이다. 슈퍼페이브 바인더 시험에서는 응력제어 모드를 사용하지만, 변형제어모드로도 슈퍼페이브 바인더 규정시험을 수행할 수 있다.

DSR은 아스팔트 바인더의 복합전단계수(G^*)와 위상각(δ)을 측정하여 점성 및 탄성 거동 특성을 분석한다. 그림 55에서는 아스팔트 바인더의 점탄성 거동을 보여준다. G^* 는 재료가 반복전단응력을 받을 때, 재료의 변형에 대한 전체 저항성의 척도이며, 탄성(회복성)과 점성(비회복성)의 두 요소로 구성된다. δ 는 회복성과 비회복성 변형의 상대적인 양을 나타낸다. 아스팔트 바인더의 G^* 와 δ 값은 온도와 하중 주파수에 매우 큰 영향을 받는다. 고온에서 아스팔트는 회복력이 없는 점성유체와 같이 거동을 하며, 이 경우에 아스팔트는 $\delta=90^\circ$ 이므로 G^* 의 탄성요소가 없는 수직축에 표시된다(그림 55 참조). 저온에서 아스팔트는 변형이 완전히 회복되는 탄성체와 같이 거동을 하며, 이 경우에 아스팔트는 $\delta=0^\circ$ 이므로 G^* 의 점성요소가 없는 수평축에 표시된다(그림 55 참조). 일반적인 포장온도와 교통하중에서 아스팔트 바인더는 점성유체와 탄성체의 특성을 모두 가진 점탄성유체의 거동을 보인다. 그림 55에서의 벡터 G_1^* 과 G_2^* 는 아스팔트 1과 2의 복합전단계수를 보여준다. 이런 아스팔트가 하중을 받을 때, 변

형의 일부는 탄성(E)이고 일부는 점성(V)이다. 따라서 아스팔트는 점탄성재료이다. 비록 그림 55에서의 아스팔트가 둘 다 점탄성이고 같은 G^* 를 가지더라도 아스팔트 2는 아스팔트 1보다 더 작은 δ 를 가지므로 더 큰 탄성을 가진다. 아스팔트 2가 더 큰 탄성을 가지기 때문에 아스팔트 1보다 더 큰 변형을 회복한다. 이것은 G^* 만으로 아스팔트 거동을 설명할 수 없으며, δ 가 반드시 필요하다는 것을 의미한다.

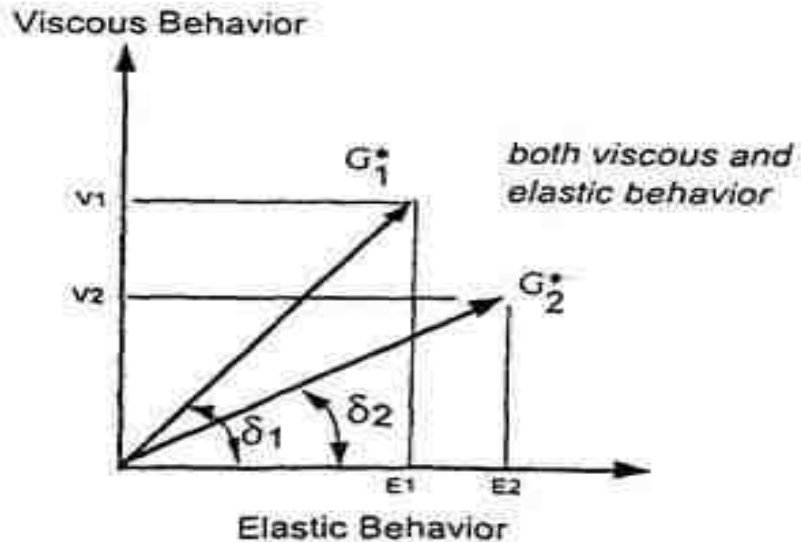


그림 55 점탄성 거동

(2) 시료준비

시험은 DSR의 회전판과 같은 직경을 가진 판상의 아스팔트 시료를 사용한다. 회전판과 고정판 사이의 아스팔트 두께는 조심스럽게 맞추어야 하며, 시료 두께는 두 판 사이의 간격을 조정하여 맞춘다. DSR에서는 시료 두께에 따라 두 개의 다른 직경을 가진 회전판을 사용한다. 사용되는 판 직경과 시료 두께는 시험하는 아스팔트의 노화 상태에 따라 다르다. 원 아스팔트 바인더와 RTFO 노화 바인더는 25mm 직경의 판과 1mm의 간격으로 시험한다. 또한 PAV 노화 바인더는 8mm 직경의 판과 2mm의 간격으로 시험한다. 시료를 설치하지 전에 간격은 요구 값(1mm, 2mm)에 여유분 50미크론을 더하여 조정한다. 시험 시료를 준비하기 위해서는 아스팔트 바인더를 유체가 될 때까지 가열하고 경우에 따라 기포제거와 균질한 시료 제작을 위해 잘젓는다. 이때 개질 아스팔트 바인더는 비 개질 바인더보다 더 높은 온도가 필요하지만 온도는 163℃를 초과할 수 없다.

시료를 준비하는 데는 두 방법이 있다. 첫 번째로는 적당한 두께를 가지도록 고정판에 아스팔트를 직접 부어 넣는 방법이며, 두 번째로는 몰드를 이용하여 판상의 아스팔트를 제조하고 스펀들과 고정판 사이에 시료를 설치하는 방법이다. 어떤 방법을 사용하던지 아스팔트를 설치한 후 같은 높이가 되도록 시료를 깎아 다듬고 여유분 50 미크론을 재조정하여 간격을 요구 값으로 정확하게 맞춘다. 이때 시료는 그림 56과 같이 약간 팽창한다. 아스팔트 바인더 특성은 온도에 따라 변하기 때문에 DSR장치는 시료온도를 제어하는 정밀한 온도장치를 가져야 한다. 이것은 순환수조(circulating fluid bath)나 강제공기오븐(forced air oven)을 사용하여 온도를 일정하게 한다. 일반적으로 수조는 시료를 둘러싸는 데 물을 사용한다. 물은 요

구 시료온도를 정확하게 조절하기 위해 온도조절기를 통해 순환된다. 공기오븐은 시험동안 공기로 시료를 둘러싼다. 두 경우다 시료온도를 일정하게 유지하기 위해 온도를 조절해야 하며, 간격 사이 온도가 0.1℃ 이상 변하지 않게 주의해야 한다.

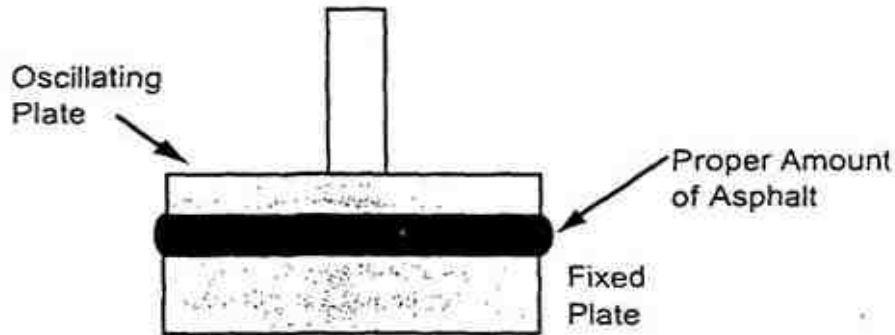


그림 56 DSR에서의 아스팔트 시료 형상

(3) 시험절차

아스팔트 시료가 설치되고 시험온도가 안정된 후, 시료가 설정한 온도로 평형을 이루도록 최소 10분간 방치한다. 실제 온도 평형 시간은 장비에 따라 다르고 매우 정확한 온도감지능력을 가진 측정기로 검사해야 한다. 때때로 온도를 검사하기 위해서는 판 사이에 매우 얇은 실리콘 고무판으로 둘러싼 서미스터(thermistor)를 설치하기도 한다. 컴퓨터는 DSR 시험의 변수를 제어하고 시험결과를 저장한다. 시험은 DSR을 조정하여 일정한 반복응력을 작용시키고 이 반복응력에 의해 발생하는 변형률과 지연시간 δ 를 측정한다. 슈퍼패이브에서는 회전속도를 10rad/sec로 규정한다. 시험자는 개략적인 전단변형률을 설정하여야 하며, 전단변형률은 시험하는 바인더의 노화상태에 따라 약 1-12%까지 변한다. 원 바인더와 RTFO 노화바인더는 약 10-12%의 변형률에서 시험하며, PAV 노화바인더는 약 1%의 변형률에서 시험한다. 모든 경우에 바인더의 G^* 값이 선형 점탄성 범위에 있도록 변형률은 충분히 작아야 한다. 이 범위에서 G^* 는 실질적으로 변형률의 변화에 영향을 받지 않는다. 이를 선형점탄성 이론이라 한다.

시험을 수행하기 위해서는 시료에 10 싸이클 동안 토크를 가한다. 이 조절기간 동안 DSR은 설정한 전단 변형률을 얻기 위해 필요한 응력을 측정하고 시험동안 정확하게 이 응력을 유지한다. 전단 변형률은 이 일정한 응력을 얻기 위해 설정한 값으로부터 다음단계로 변화하여 측정을 한다. 이 전단변형률의 변화는 DSR s/w에 의해 자동으로 제어된다. 10 싸이클의 조절기간을 거친 후, 다음단계의 전단 변형율에서 시험자료를 얻기 위해 10 싸이클의 토크를 다시 가한다. DSR s/w는 가해진 응력과 변형률의 관계를 이용하여 자동적으로 G^* 와 δ 를 계산하고 기록한다.

(4) 자료분석 절차

그림 57에서는 극단적인 형태의 탄성거동과 점성거동을 보여준다. 복합전단계수 G^* 는 전체 전단 응력($\tau_{\max} - \tau_{\min}$)과 전체 전단변형($\gamma_{\max} - \gamma_{\min}$)의 비이다. 가해진 응력과 그 응력에 의해 나타나는 변형률 사이의 지연시간(응력제어모드) 또는 가해진 변형률과 그 변형률에 의해 나타나는 응력 사이의 지연시간(변형제어모드)은 위상각 δ 와 관계가 있

다. 완전한 탄성체에 대하여 가해진 하중은 즉시 응답하여 지연시간 또는 위상각은 영이다. 완전한 점성재료(혼합온도까지 가열한 아스팔트)는 하중과 응답사이에 상대적으로 큰 지연시간을 가지며, 이런 경우에 위상각은 90° 가 된다. 그러나 아스팔트 바인더는 일반적인 포장온도에서 점탄성체이므로 두개의 극단적인 경우 사이에서 거동하며, DSR은 그림 58 (a)와 (b)와 같은 응답을 보인다.

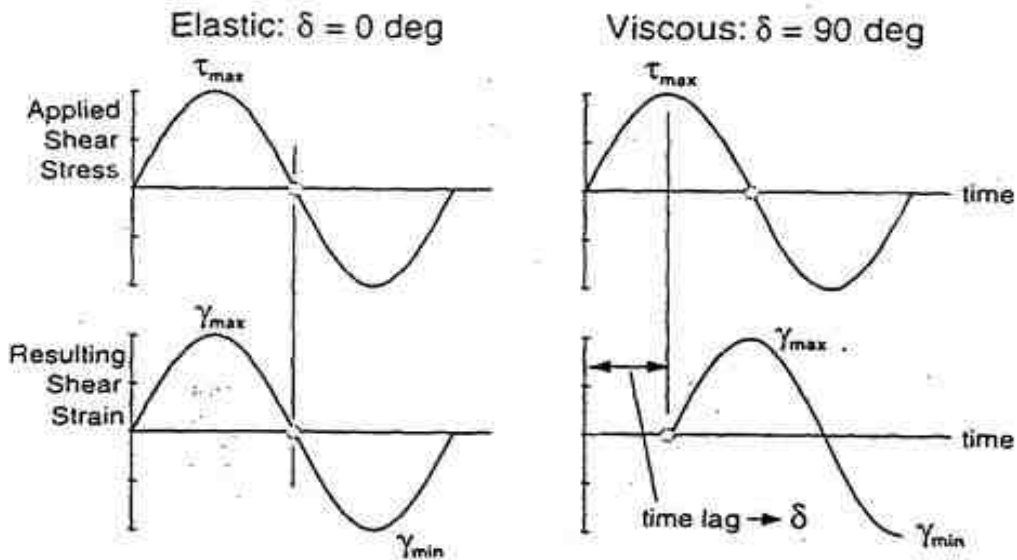


그림 3.8 (a), 극단적인 응력-변형 관계

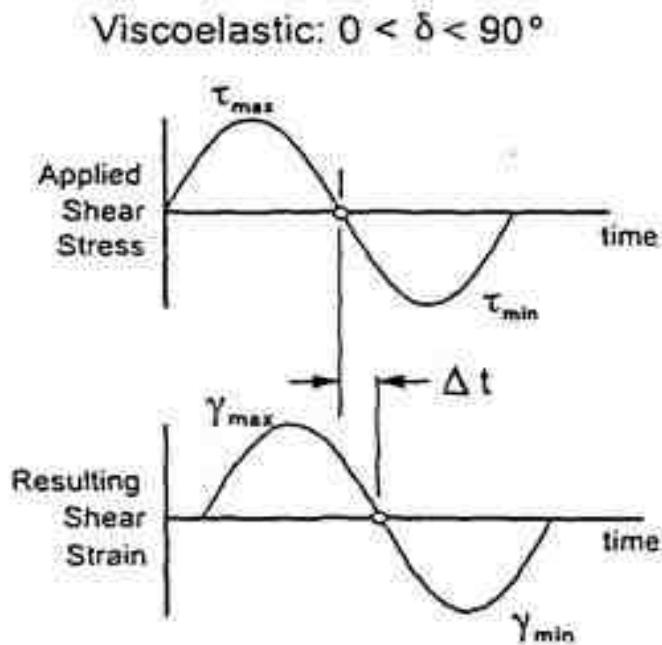


그림 3.8 (b), 점탄성체의 응력-변형 관계

그림 59에서는 DSR s/w에서 $\tau_{\{max\}}$ 와 $\gamma_{\{max\}}$ 를 계산하기 위해 사용하는 식을 보여준다. DSR을 이용하여 점탄성체의 다양한 특성을 측정할 수 있지만 슈퍼페이브 규정에서는 단지 G^* 와 δ 만이 필요하다. 영구변형은 시험온도에서 원 바인더에 대해 1.0 kPa 이상, RTFO

노화 바인더에 대해 2.20 kPa 이상으로 $G^*/\sin\delta$ 를 제한함으로써 억제된다. 피로균열은 시험온도에서 PAV 노화바인더에 대해 5000kPa 이하로 $G^*\sin\delta$ 를 제한함으로써 억제된다.

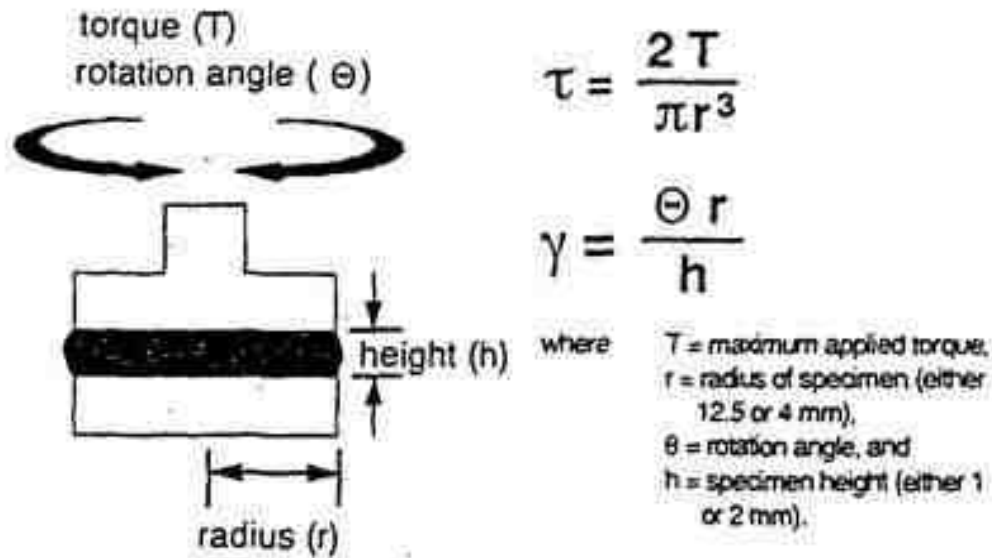


그림 59 DSR 아스팔트 시료의 계산

(5) 점탄성 시편의 준비와 측정이론

탄성재료를 아스팔트바인더의 0.5%, 1.0% 및 1.5%로 변화시키며 아스팔트에 첨가하고 고온에서 용융시켜 탄성을 증진시킨 아스팔트바인더 시편을 제조하였다. 일반적으로 점성유체는 동탄성계수(G^*)를 측정하여 그 특성을 나타낼 수 있지만, 탄성재료가 함유된 아스팔트바인더는 점성이 아니라 점탄성 성질을 가짐으로 동탄성계수 (G^*)로 표현하면 오류를 낳는다. 점탄성 계수인 ($G^*/\sin\delta$)로 나타내어야 올바른 값을 나타내는 데, 여기서 $\sin\delta$ ($=G''/G^*$)는 점탄성 변수를 대변한다. $\sin\delta$ 가 1 (즉 위상각 $\delta=90^\circ$)일 때, ($G^*/\sin\delta$) = G^* 와 동일하게 되어 점성성질을 나타낸다. 그러나 점탄성유체의 경우에 $\sin\delta < 1$ 가 되어 ($G^*/\sin\delta$) > G^* 가 성립한다. 즉 점탄성유체일 경우에 점탄성 계수 ($G^*/\sin\delta$) 값이 동탄성 계수 값보다 커진다. 따라서 탄성이 큰 유체일수록 $\sin\delta$ 가 1보다 작아져서 점탄성 계수 ($G^*/\sin\delta$) 값이 더욱 커지게 된다. 이러한 원리는 유체의 특성을 규명하는 데 요긴하게 사용될 수 있으며, 점탄성유체인 경우에는 동탄성 계수(G^*) 대신에 반드시 점탄성 계수($G^*/\sin\delta$)를 사용해야 오차를 없앨 수 있다는 결론에 도달한다. 예를 들어, 일반 스트레이트 아스팔트는 점성성질에 가까움으로 동탄성계수(G^*)를 사용해도 오차가 적으나, 탄성재료가 첨가된 아스팔트의 경우는 점탄성 성질을 나타냄으로 오차를 없애기 위해 반드시 점탄성 계수 ($G^*/\sin\delta$)를 사용해야 한다.

상기에서 제조된 시편들에 대해서 40, 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82℃로 온도를 변화시키며 동전단시험 (DSR Testing; Dynamic Shear Rheometer Testing)을 수행하고 그 결과로부터 얻은 동탄성계수 값 (G^*)과 위상각 (δ)의 데이터를 분석하여 점탄성 계수 ($G^*/\sin\delta$) 값을 계산하고 이를 아래 그림 54에 온도의 함수로 나타내었다. 동탄성계수와 위상각에 대한 시험데이터는 본 보고서의 끝부분의 부록 제2절에 첨부된 DSR데이터를 참조하기 바란다.

(6) 균열저항성을 높인 중온바인더의 점탄성 측정과 분석

그림 60을 참조하면, 높은 온도에서는 탄성재료의 첨가영향이 거의 나타나지 않으나 온도가 감소함에 따라 그 영향이 커져서 점탄성 계수 값이 급속히 증가함을 볼 수 있다. 또한 탄성재료를 첨가한 것이 첨가 안한 일반 스트레이트 아스팔트보다 점탄성 값이 크게 증가하는 것이 관찰된다. 일반적으로 포장의 균열은 저온에서 발생함으로 저온에서의 점탄성 계수 값의 증가는 바람직하다 하겠다. 흥미로운 것은 탄성재료의 함량이 아스팔트의 0.5%인 시료가 1%와 3%의 시료보다 더 큰 점탄성 계수 값을 나타낸다는 점이다. 이러한 결과는 왁스타입의 중온첨가제에 탄성재료를 아주 소량만 첨가한다 해도, 탄성성질을 충분히 개선시켜서 균열저항성을 크게 완화시킬 수 있음을 의미한다는 점에서 주목할 필요가 있다. 즉, 40℃에서 0.5%의 탄성재료를 넣었을 때, 일반 아스팔트바인더에 비해 약 40%의 $G^*/\sin\delta$ 값의 증가를 볼 수 있으며, 이러한 경향은 온도가 낮아질수록 더욱 커지는 추세를 보이고 있다.

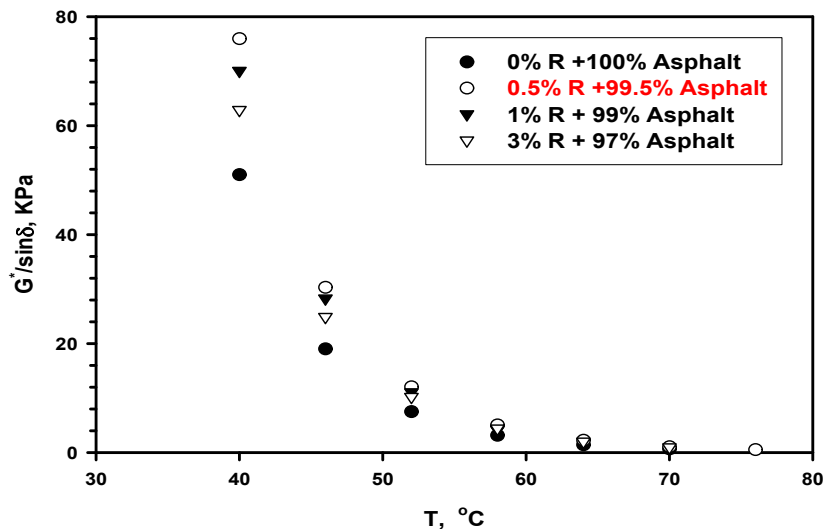


그림 60. 탄성재료와 온도변화에 따른 점탄성 계수 값

그러면 탄성재료를 아스팔트에 첨가함으로써 나타나는 탄성성질은 어떻게 측정이 가능한가를 생각해보자. 일반적으로 점탄성 유체는 탄성성질과 점성성질로 구성되며, 점성성질이 크면 탄성성질이 적고, 반대로 탄성성질이 크면 점성성질이 적다. 점탄성 성질은 탄성계수($=G'$)나 점성계수($=G''$)로 나타낼 수 있는 것이 아니라, $\cos\delta(=G'/G^*)$ 혹은 $\sin\delta(=G''/G^*)$ 값으로 대변할 수 있다. $\cos\delta$ 는 0일 때 완전점성을 나타내고 1일 때 완전탄성을 나타내는 반면에, $\sin\delta$ 는 1일 때 완전 점성을 나타내고 0일 때 완전 탄성을 나타냄으로서 서로 상반된 경향을 보이는 하나, 근본적으로는 동일한 점탄성 성질을 대변한다. 따라서 점탄성 계수 값($=G^*/\sin\delta$)은 완전 점성($\sin\delta=1$)일 때 동탄성계수 값(G^*)과 동일하게 되고, 탄성성질이 조금이라도 있으면 $\sin\delta < 1$ 가 되어 점탄성 계수($G^*/\sin\delta$) 값이 동 탄성계수 값(G^*)보다 커짐으로, 점탄성 계수 값을 ($G^*/\sin\delta$)으로 표현하는 것이 타당하다. 따라서 탄성의 정도는 $\sin\delta$ 값에 달려 있으며, 이 값이 1보다 얼마나 적은가에 따라서 특정유체의 점탄성 성질 중에서 탄성성질이 차지하고 있는 비율이 결정된다. 일반적으로 점탄성 유체라 하더라도 점성성질이 탄성성질보다 큰 유체가 대부분임을 유의하기 바란다. 그러나 $\sin\delta$ 값이 1보다 약간 작아지더라도 점탄성 계수 ($G^*/\sin\delta$) 값은 동 탄성계수 값(G^*)보다 훨씬 커질 수 있음을 유의하기 바란다.

그림 61은 그림 60과 동일한 점탄성유체를 나타내며, 탄성재료의 첨가여부에 따라 탄성성질이 얼마나 증가하는 가를 보여준다. 아스팔트 자체도 온도가 감소함에 따라 약간의 탄성성질이 존재함을 알 수 있다. 그러나 탄성재료를 첨가한 아스팔트가 그렇지 않은 것보다 좀 더 탄성성질이 크게 나타남을 보여준다. 탄성재료가 0.5%, 1.0% 그리고 3.0%로 첨가한 것이 온도 40℃에서 약간의 차이를 보이긴 해도 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 유의할 필요가 있다. 즉 0.5%만큼 소량만 첨가해도 탄성성질이 상당히 증가함을 볼 수 있다는 결론에 도달한다. 아스팔트바인더만의 $\sin\delta$ 값이 약 0.98인 것에 비하여 탄성재료가 아스팔트의 0.5% 첨가된 바인더의 값은 약 0.96으로 탄성값이 나타나고 있을 보이며, 이러한 경향은 저온에서 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 포장균열은 저온에서 발생하므로 이처럼 탄성재료의 첨가는 균열저항에 큰 영향을 줄 수 있음을 입증하고 있다.

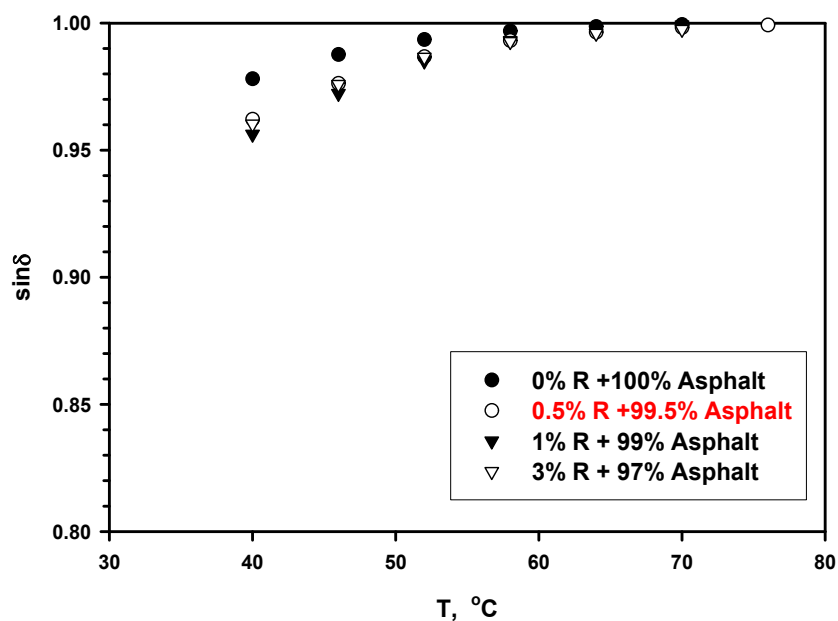


그림 61. 점탄성 성질 중 탄성영향의 크기.

이상의 연구결과를 토대로 탄성재료를 3% 첨가한 가운데, 왁스타입의 중온첨가제를 0.4, 0.8, 1.2, 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0%를 각각 함유한 아스팔트 시편을 제조하고 이들 시편에 대한 동탄성시험을 수행하였다. 그 결과는 그림 62에 나타나 있다.

아래 그림 62를 살펴보면, 탄성재료 3%와 중온첨가제 3%가 함유된 중온아스팔트가 점탄성계수 값에서 가장 적절한 중온아스팔트라고 판단된다. 중온첨가제 함량이 4%와 5%가 3%보다 더욱 좋은 값을 보이긴 하지만 물성향상차이가 커지 않고 첨가함량의 증가로 가격이 고가가 됨으로 3%가 실제 현실적용에 가장 적당하다고 결론을 지을 수 있다. 섭씨 40도에서의 일반 아스팔트바인더의 $G^*/\sin\delta$ 값이 50Kpa인 데 비하여, 탄성재료 3%와 중온첨가제 3%를 함유한 바인더의 $G^*/\sin\delta$ 값은 90Kpa 임으로 약 80%의 증가를 보이고 있다. 이러한 증가율에서 탄성재료 단독이 차지하는 $G^*/\sin\delta$ 값은 62Kpa임으로 실제 탄성효과는 $12/50=24\%$ 에 달하며 이 값이 80% 증가율에 포함되어 있다.

아래 그림 62에서 측정된 재료의 탄성성질을 표현한 그림 63을 살펴보면, 그림 62와 같이 탄성재료 3%가 첨가된 중온첨가제의 $\sin\delta$ 값이 0.96인 데 비하여 아스팔트의 $\sin\delta$ 값은 0.98

인 점을 참조하면 탄성재료에 의한 탄성영향을 알 수 있다. 이러한 경향은 온도가 낮아질수록 더욱 뚜렷하게 큰 차이를 보일 것으로 판명된다. 그러나 본 연구에서는 최저온도로서 섭씨 40도까지만 측정하였다.

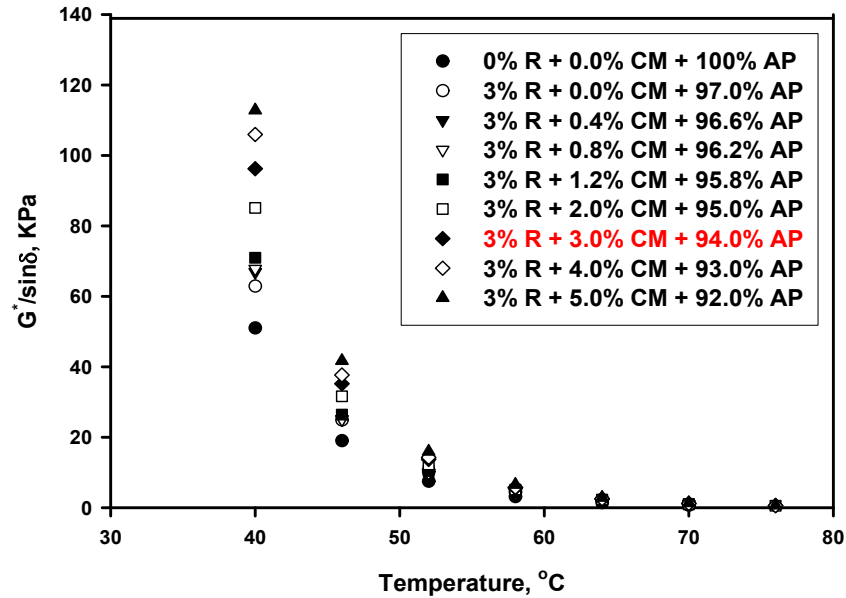


그림 62. 탄성재료 3%에 대한 중온첨가제의 영향

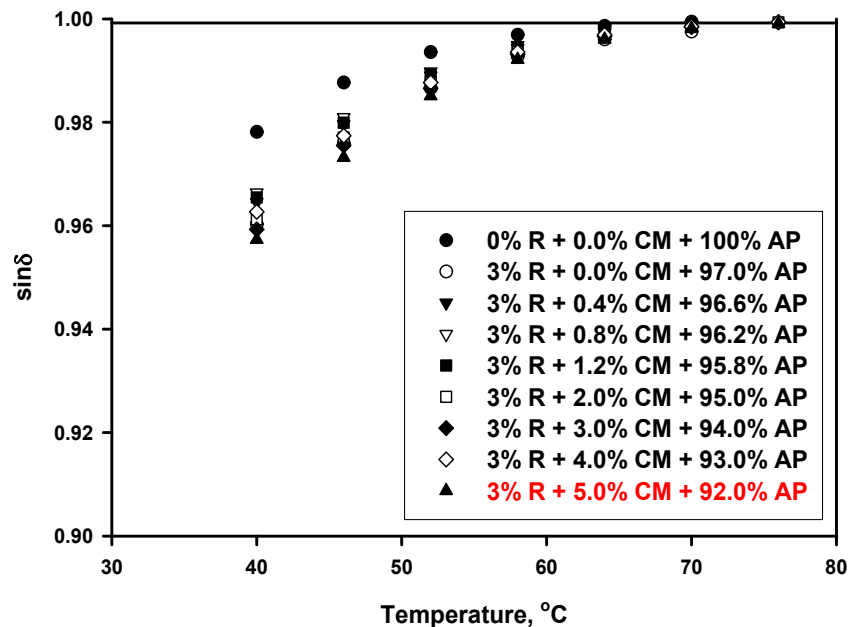


그림 63. 탄성재료 3%와 중온첨가제 함량변화에 따른 탄성영향.

그림 62와 63에는 3% 탄성재료의 존재 하에서 단일 중온첨가제의 중온효과와 탄성효과를 살펴보았다. 아래 그림 64와 65는 3% 탄성재료의 존재 하에서 두 중온첨가제를 함께 사용했

을 때의 증온효과와 탄성효과를 보여준다.

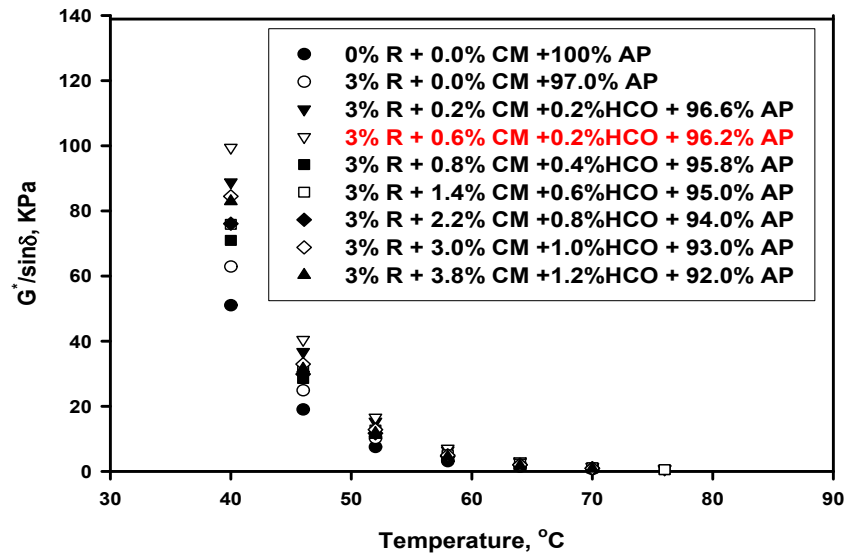


그림 64. 탄성재료 3%에서 두 증온첨가제를 섞었을 때의 점탄성 계수.

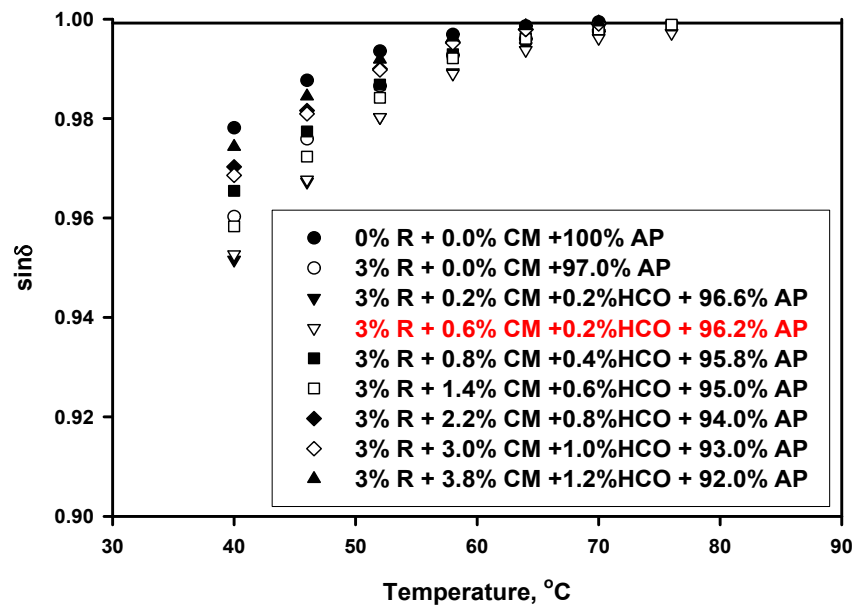


그림 65. 탄성재료 3%에서 두 증온첨가제를 섞었을 때의 탄성효과.

탄성재료가 3% 존재하는 조건 하에서 그림 62와 63에서 증온첨가제 CM을 3%를 사용한 결과와, 그림 64와 65에서 증온첨가제 CM 0.6%와 HCO 0.2%를 함께 사용한 결과를 비교해보면, 단일 증온첨가제로서 3중량%사용하는 것보다 두 종류의 증온첨가제 합이 0.8%인 것이 점탄성 계수 값이나 탄성효과에서 비슷하거나 약간 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 이러한 결과는 단일 증온첨가제를 사용하는 것보다, 두 다른 증온첨가제를 함께 사용하는 것이 첨가함량은 적으면서도 (경제적으로 저렴하면서도) 좋은 증온효과와 탄성효과를 가져옴을 시

사하고 있어 그 의미가 크다. 즉, 중온첨가제를 많이 사용한다고 해서 단순히 좋은 중온효과를 가져온다고 할 수 없다는 결론에 도달한다. 중온첨가제 (CM 0.6%와 HCO 0.2%)를 함께 사용한 중온첨가제의 경우에 있어서 탄성재료 3%가 존재할 경우에 $G^*/\sin\delta$ 값이 100KPa이며 이 값은 일반 아스팔트의 50KPa과 비교할 때, 약 100%의 증가를 보인다. 중온첨가제에 탄성재료를 3% 첨가했을 경우에 일반 아스팔트에 비해 균열저항성 효과가 약 2배 정도 증가할 것이라 예측된다. 한편 3% 탄성재료가 첨가된 중온첨가제 (CM 0.6%와 HCO 0.2%)의 $\sin\delta$ 값이 0.95인 반면에 순수 아스팔트의 $\sin\delta$ 값은 0.98이며, 이러한 차이는 탄성효과를 나타내며 온도가 낮아질수록 그 효과는 더욱 커지는 추세를 보인다. 포장균열은 저온에서 발생함으로 이러한 경향은 저온에서의 포장 균열저항성을 크게 향상시킬 것으로 예측된다.

마지막으로 왁스계열의 중온첨가제로서 가장 널리 사용되고 있는 새소비트 왁스(sasobit wax)의 탄성효과를 조사해보았다. 아스팔트에 단순히 새소비트 왁스를 2%와 3%를 섞었을 경우와 아스팔트에 탄성재료 3%를 섞은 후에 새소비트 왁스를 2%와 3%를 섞었을 경우를 비교하기 위하여 각 시편을 만들고 동탄성시험을 수행하였다. 그 결과 얻어진 데이터를 분석하여 그림 66에 점탄성 계수를, 그리고 그림 67에는 탄성효과를 전시하였다. 그림 66에는 탄성재료 3%와 함께 새소비트 왁스 2%와 3%를 함유한 경우에 $G^*/\sin\delta$ 값이 얼마나 증가하는가를 보여준다. 40℃에서 아스팔트에 탄성재료 없이 단순히 새소비트 왁스만을 2% 첨가한 경우에는 $G^*/\sin\delta$ 값이 80KPa인 반면에, 3% 탄성재료가 첨가된 경우에는 110KPa임으로 $G^*/\sin\delta$ 값이 약 30KPa 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 $30/80=37\%$ 증가한 수치이다. 이러한 경향은 새소비트를 3% 넣은 경우에서도 나타난다. 그 이유는 그림 67에서 더욱 명확해진다. 그림 67을 참조하면, 3%의 탄성재료를 첨가했을 경우에 그렇지 않고 단독으로 새소비트 중온첨가제만을 사용한 것에 비해 $\sin\delta$ 값이 0.03만큼 더욱 작아지는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 탄성의 효과를 나타내며 온도가 낮아질수록 그 효과가 확대될 것으로 예측되어, 탄성재료의 효과가 왁스타입의 중온첨가제를 사용한 아스팔트포장의 균열방지에 도움을 줄 것으로 판명된다.

(CM 0.6%와 HCO 0.2%)를 함께 섞은 0.8%의 중온첨가제가 새소비트 2%와 비슷한 $G^*/\sin\delta$ 값을 보이고 있어서 전자가 후자에 비해 훨씬 경제적인을 알 수 있다. 즉, 새소비트는 kg 당 3000원이고 본 연구에서 개발한 탄성재료 0.5%와 (CM 0.6%와 HCO 0.2%)를 함께 섞은 1.3%의 혼합 중온첨가제는 kg당 2500원 임으로 kg당 500원 정도가 본 연구에서 개발한 중온첨가제가 더 저렴하다.

결론적으로 탄성재료를 중온첨가제와 함께 사용함으로서 그렇지 않는 경우보다 저온에서 점탄성 계수 값을 증가하게 만드는 데 그 이유는 탄성효과가 커지기 때문이다. 이러한 결과는 중온첨가제에 탄성재료를 소량 첨가함으로서 저온균열 방지에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

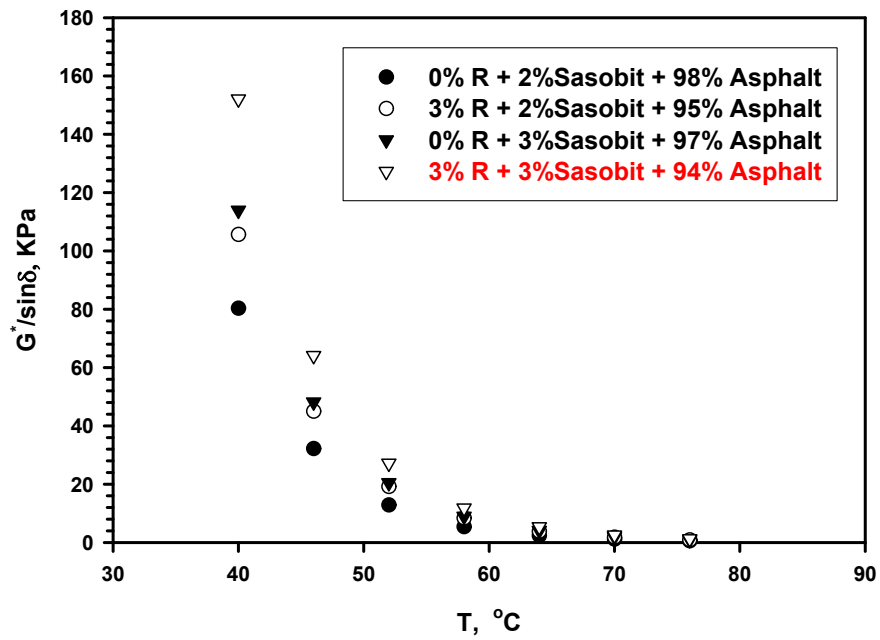


그림 66. 탄성재료 하에서 새소비트 중온아스팔트의 점탄성 효과.

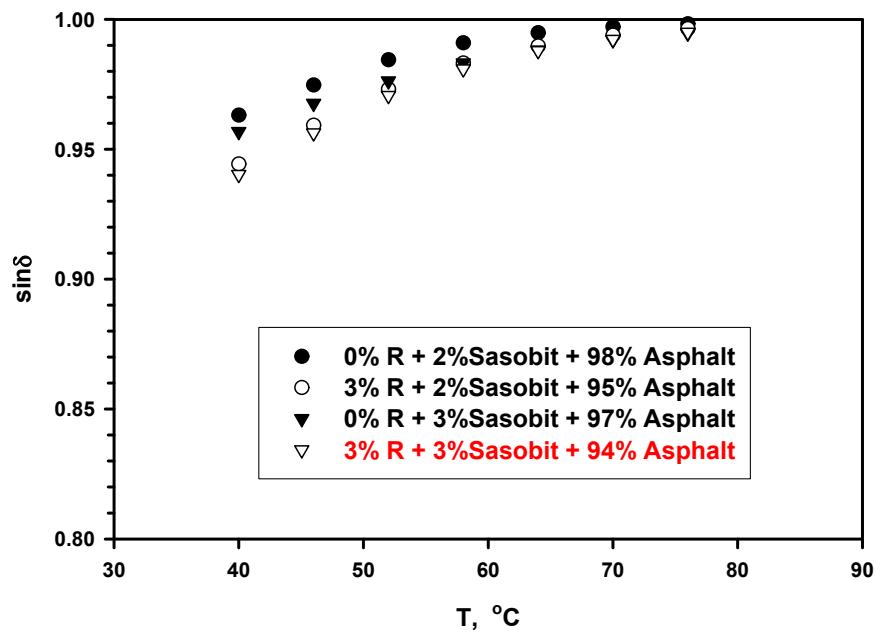


그림 67. 탄성재료 하에서 새소비트 중온아스팔트의 탄성효과.

제 4절 중온 아스팔트 혼합물의 물성

1. 일반 중온아스팔트 혼합물의 물성측정

가. 중온아스팔트혼합물의 시편제작

일반 가열아스팔트이거나 중온아스팔트이거나 간에 바인더 함량을 5.5%를 고정하여 사용하였고 골재입도는 수퍼페이브 입도를 선정하였다. 입도분포는 아래 그림 68에 표시되어 있다.

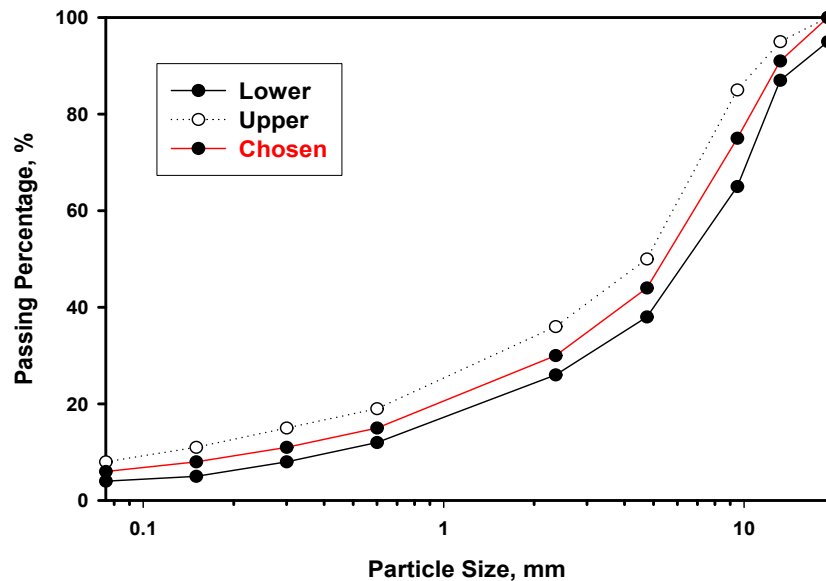


그림 68. 혼합물시험에 사용한 수퍼페이브 입도(최대입도크기=19mm).

시편제조 절차는 다음과 같다.

① 일반 아스팔트 57.75그램(165℃)과 골재 992.25그램(165℃)를 165℃의 혼합기에 넣고 3분간 균일하게 혼합한 후, 용기에 담아 2시간 각기 다른 온도의 오븐에 넣어 두었다. 오븐온도는 각각 84, 101, 118, 145, 168℃로 세팅하였으며, 2시간 후에 꺼내어 바로 마샬몰드에 넣고 양면 50회 다짐을 실시하였다. 하루 동안 실온에서 경화시킨 후 탈형하여 물성시험을 위한 시편준비를 완료하였다.

② 중온첨가제 3.6그램 (W8(3그램)+W2(0.3그램)+W6(0.3그램))과 일반 아스팔트 57.75그램(135℃)과 골재 988.65그램(135℃)을 135℃의 혼합기에 넣고 3분간 균일하게 혼합한 후, 용기에 담아 각기 다른 온도의 오븐에 넣어 두었다. 오븐온도는 각각 73, 84, 102, 120, 135℃로

세팅하였으며, 2시간 후에 꺼내어 바로 마샬몰드에 넣고 양면 50회 다짐을 실시하였다. 일반 아스팔트와 비교하여 오븐온도(다짐온도)를 낮게 세팅한 이유는 중온에서의 생산과 다짐을 고려하기 위함이다. 일반아스팔트의 경우에 혼합을 165℃에서 실시하였으나 중온아스팔트의 경우에는 135℃에서 실시하여 낮은 생산온도를 고려하였다. 또한 일반아스팔트 혼합물의 경우에 다짐온도는 168℃에서 시작하였으나 본 중온첨가제를 첨가한 혼합물의 경우 다짐온도를 142℃에서 시작하여 26℃ 낮은 온도에서 다짐한 것에 유의하기 바란다. 하루 동안 실온에서 경화시킨 후 탈형하여 물성시험을 위한 시편준비를 마쳤다.

③ 상기와 다른 중온첨가제 3.3그램 (W2(1.8그램)+W10(1.2그램)+W6(0.3그램))과 일반 아스팔트 57.75그램(135℃)과 골재 988.95그램(135℃)을 135℃의 혼합기에 넣고 3분간 균일하게 혼합한 후, 용기에 담아 2시간 동안 각기 다른 온도인 75, 83, 104, 120, 135℃에 넣어두었으며, 2시간 후에 꺼내어 바로 마샬몰드에 넣고 양면 50회 다짐을 실시하였다. 일반 아스팔트와 비교하여 다짐온도를 낮게 세팅한 이유는 중온에서의 생산과 다짐을 하기 위함이다. 일반아스팔트 혼합온도인 165℃와는 달리 본 중온아스팔트의 경우는 135℃에서 실시하여 낮은 생산온도를 고려하였다. 또한 일반아스팔트 혼합물의 경우에 다짐온도를 168℃에서 시작하였으나 본 중온첨가제를 첨가한 혼합물의 경우 다짐온도를 135℃에서 시작하여 33℃ 낮은 온도에서 다짐한 것에 유의하기 바란다. 하루 동안 실온에서 경화시킨 후 탈형하여 물성시험을 위한 시편준비를 완료하였다.

나. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험 방법

물성시험은 두 가지를 수행하였다. 하나는 밀도시험이며 다른 하나는 마샬안정도시험이다. 밀도시험은 혼합물의 다짐정도를 나타내는 것으로서, 중온혼합물의 경우에 일반혼합물의 경우와 비교하여 무게는 일정하나 점도가 낮아 다짐이 잘 됨으로, 전체 시편의 부피가 줄어들게 되어 밀도의 증가가 기대된다.

마샬안정도시험은 중온혼합물의 역학적 지지력이 일반아스팔트의 그것과 어떠한 차이가 있는가를 알아보기 위해서이다. 중온혼합물의 경우에 낮은 온도에서도 점도가 낮아 생산과 다짐이 잘 되는 장점이 있기는 하나 이로 인해 역학적 안정성에 문제가 될 수 있으므로 주의해야 한다. 특히 중온혼합물의 낮은 점도로 인해 소성변형이 발생하기 쉬운 치명적인 단점이 있다. 이러한 문제를 점검하기 위해서는 마샬안정도 시험은 필수적이다.

다. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험과 데이터 분석

(1) 밀도측정

아래 그림 69에는 앞의 시편제조과정에서 설명한 일반 아스팔트혼합물 한 종류와 중온 아스팔트혼합물 두 종류에 대하여 다짐온도를 변화시켜 가며 측정한 밀도 값을 보여준다. 다짐온도가 증가할수록 점도가 낮아짐으로 다짐이 잘 되어 밀도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반 아스팔트의 경우에 통상적인 가열아스팔트의 생산과 다짐온도에서 시편이 만들어졌으므로 정상적인 밀도를 보이고 있다.

이에 반하여, 중온첨가제 3.6그램 (W8(3그램)+W2(0.3그램)+W6(0.3그램))이 첨가된 중온아

스팔트 혼합물은 110℃까지는 밀도가 일반아스팔트와 대등하나 그 이후에는 급격히 떨어짐으로 점도가 높아져 다짐이 충분하지 않음을 나타낸다. 즉 중온효과를 나타내기에 상기 중온첨가제는 효과적이지 않음을 보여준다.

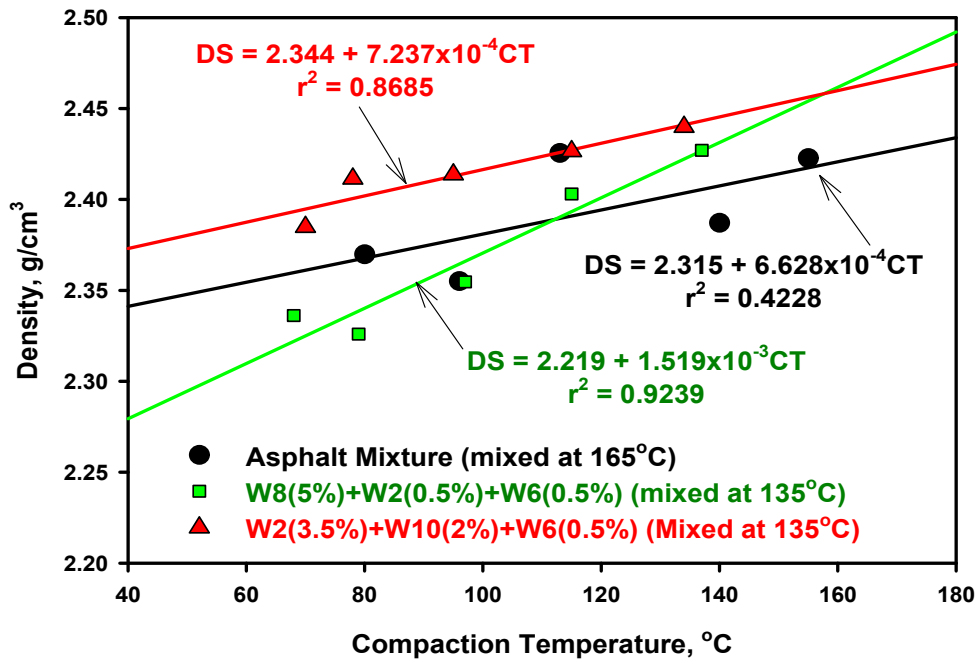


그림 69. 일반과 중온아스팔트 혼합물의 다짐온도와 밀도 비교.

반면에 다른 중온첨가제 3.3그램 (W2(1.8그램)+W10(1.2그램)+W6(0.3그램))을 첨가한 중온아스팔트 혼합물은 모든 다짐온도 영역에서 일반아스팔트 혼합물보다 더 높은 밀도(약 0.04g/cm³ 정도 높음)를 보임으로서 중온효과가 충분히 나타나는 것으로 판명된다.

(2) 마찰안정도 측정

앞에서 제조한 한 종류의 일반아스팔트 혼합물 시편들과 두 종류의 중온아스팔트 혼합물 시편들을 60℃의 항온수조에 30분간 넣어 두었다가 꺼내어 마찰안정도 시험을 즉시 실시하였다. 아래 그림 70에는 다짐온도에 따른 마찰안정도 측정값을 보여준다. 일반 가열아스팔트 혼합물 시편은 통상적인 마찰안정도 값을 나타내고 있다(165℃에서 약 12,000N 정도).

중온첨가제 3.6그램 (W8(3그램)+W2(0.3그램)+W6(0.3그램))이 첨가된 중온아스팔트 혼합물은 중온효과가 충분하지 못하여 다짐온도가 감소함에 따라 마찰안정도 값도 급격히 감소하는 결과를 초래하고 있다. 이러한 결과는 그림 69에서 관측되는 밀도측정 결과와 동일한 것으로서 다짐온도가 떨어질 때, 밀도가 급격히 감소하고 이로 인해 공극이 커짐으로 초래되는 결과이다. 불충분한 다짐으로 증가된 공극이 마찰안정도의 하락을 가져온 주요 원인으로 사료된다.

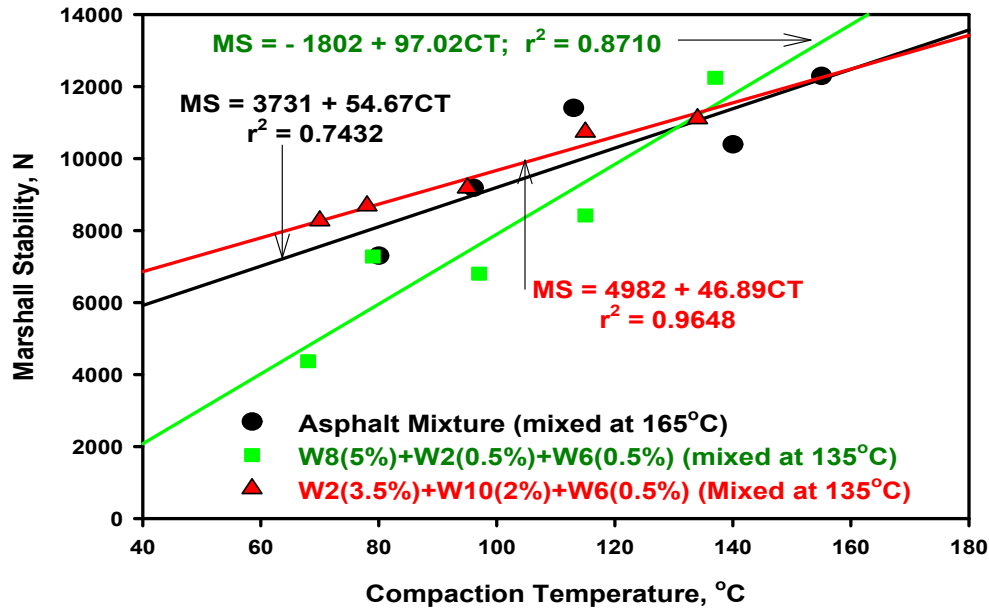


그림 70. 가열과 중온아스팔트 혼합물과 마샬안정도 값.

한편 다른 중온첨가제 3.3그램(W2(1.8그램)+W10(1.2그램)+W6(0.3그램))이 첨가된 중온아스팔트 혼합물의 마샬안정도 값은 다짐온도의 전 영역에 걸쳐 일반 가열아스팔트 혼합물의 값과 거의 비슷하거나 약간 우수한 것으로 나타났다 (130°C에서 11000N임). 이러한 역학적 값은 중온아스팔트포장의 성능으로서 만족할만하다. 일반 가열아스팔트 혼합물의 마샬안정도 값은 높은 다짐온도에서는 통상적인 값을 주지만, 다짐온도가 80°C 이하에서는 급격히 하강하기 시작하는 반면에, 중온아스팔트 혼합물은 70°C에서도 약간 감소하는 경향을 보임으로서 중온효과가 비교적 낮은 다짐온도에서도 나타남을 볼 수 있다. 다음해의 연구에서는 중온 아스팔트혼합물에 대한 연구를 더욱 충분하게 수행하여 일반 중온아스팔트 시험포장에 대비하려고 한다.

2. 개질 중온아스팔트 혼합물의 물성측정

가. 재질 중온아스팔트혼합물의 시편제작

① 개질 아스팔트 57.75그램(175°C)과 골재 992.25그램(175°C)을 175°C의 혼합기에 넣고 3분간 균일하게 혼합한 후, 용기에 담아 2시간 각기 다른 온도의 오븐에 넣어 두었다. 오븐온도는 각각 83, 100, 119, 140, 157°C로 세팅하였으며, 2시간 후에 꺼내어 바로 마샬몰드에 넣고 양면 50회 다짐을 실시하였다. 하루 동안 실온에서 경화시킨 후 탈형하여 물성시험을 위한 시편준비를 완료하였다.

② 중온첨가제 6.0그램 (W2(1.8그램)+W6(1.2그램)+W10(3.0그램))과 개질 아스팔트 57.75그램 (145°C)과 골재 986.25그램(145°C)을 145°C의 혼합기에 넣고 3분간 균일하게 혼합한 후, 용기

에 담아 각기 다른 온도의 오븐에 넣어 두었다. 오븐온도는 각각 68, 82, 97, 115, 136℃로 세팅하였으며, 2시간 후에 꺼내어 바로 마샬몰드에 넣고 양면 50회 다짐을 실시하였다. 일반 아스팔트와 비교하여 혼합온도는 30℃ 적게, 다짐온도는 29℃ 낮게 실시하였다. 하루 동안 실온에서 경화시킨 후 탈형하여 물성시험을 위한 시편준비를 마쳤다.

나. 중온아스팔트 혼합물의 물성시험과 데이터 분석

① 밀도측정

개질 가열아스팔트와 개질 중온아스팔트 혼합물 시편의 밀도측정 결과는 아래 그림 71에 나타나 있다. 개질 중온아스팔트 혼합물 시편의 밀도는 다짐온도가 감소하여도 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 수준의 밀도를 유지하는 반면에 개질 가열아스팔트 혼합물 시편의 밀도는 다짐온도에 따라 현저히 감소하는 추세를 보이고 있다. 개질 중온아스팔트 혼합물은 중온효과가 충분하여 다짐온도가 70℃ 이하로 떨어져도 밀도가 약간 감소하는 경향을 보이며, 개질 가열아스팔트 혼합물은 다짐온도가 떨어짐에 의해 다짐이 적게되어 공극이 커지고, 이에 따라 밀도도 작아지는 것으로 해석된다. 이러한 결과는 다음에 기술한 역학적 물성시험 값인 마샬안정도 시험에서 더욱 확실해진다.

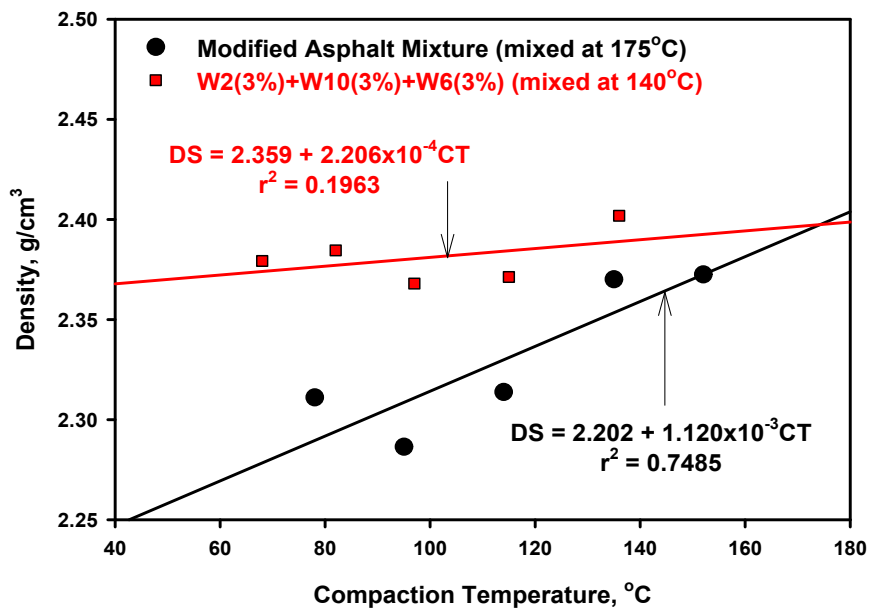


그림 71. 개질가열과 개질중온 혼합물의 다짐온도와 밀도 값.

② 마샬안정도 측정

개질가열과 개질중온 아스팔트혼합물 시편들의 마샬안정도 측정결과가 그림 72에 전시되어 있다. 개질가열 아스팔트 혼합물의 마샬안정도 값은 예상하는 바와 같이 높은 다짐온도에서 상당히 높은 값을 나타내었다. 그러나 다짐온도가 감소함에 따라 그 값이 급격히 하강함을 볼 수 있다. 주된 이유는 낮은 다짐온도에서는 점도가 높아 충분한 다짐이 이루어지지 않아서(공극이 커져서) 역학적 강도의 확보가 어렵기 때문인 것으로 사료된다.

반면에 개질 중온아스팔트 혼합물의 마샬안정도 값은 전체 다짐온도영역에서 큰 변화없이 상당히 높은 역학적 값(140℃의 다짐온도에서 마샬안정도 값이 16000N임)을 보여주고 있으며 개질아스팔트포장으로서 충분한 수치이다. 상기 수치는 앞의 밀도 값에서도 예상되는 바와 같이 중온첨가제의 효과가 커서 저온에서도 비교적 낮은 점도가 유지되기 때문인 것으로 추정된다. 생산과 다짐영역에서는 점도를 낮추어 중온기능을 나타내고, 공용물성이 필요한 온도 영역에서는 충분한 점도상승을 가져와 역학적 물성을 증진시키는 중온첨가제의 기능이 이상적이다. 3차년도 연구에서는 이러한 중온혼합물의 역학적 물성을 고려하여 중온첨가제를 설계하는 연구를 더욱 많이 수행하여 성공적인 일반중온과 개질중온 아스팔트 혼합물의 시험포장에 대비하려고 한다.

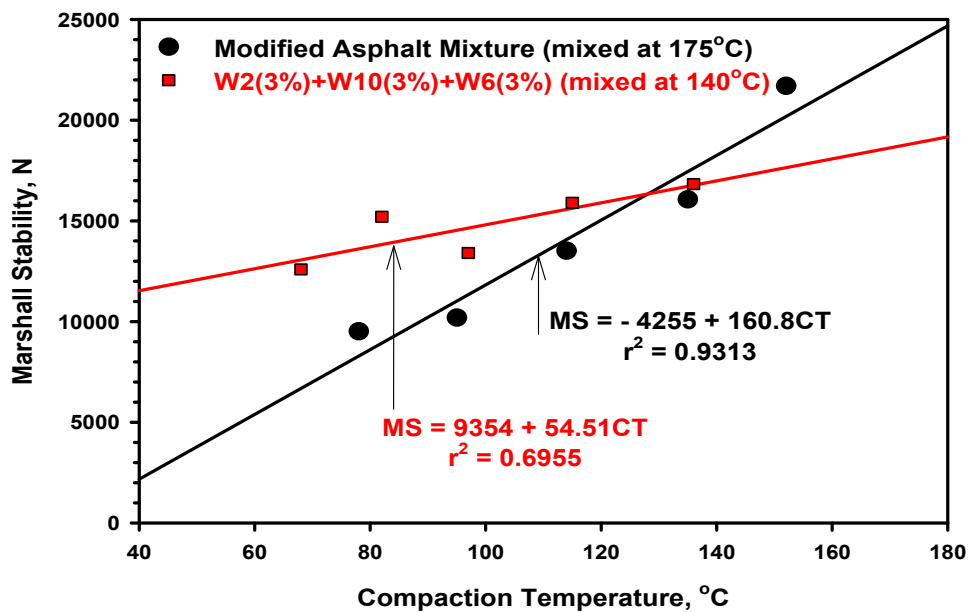


그림 72. 개질가열과 개질중온 아스팔트혼합물의 다짐온도와 마샬안정도.

제 5절 중온 개질첨가제 생산을 위한 파이로트플랜트의 구축

1. 중온 개질첨가제 생산 장비 구축의 필요성

중온개질제란 중온첨가제와 개질제를 함께 혼합한 재료를 말한다. 아스콘생산은 사전배합 방식과 현장배합방식이 있는 데, 전자는 개질제와 아스팔트를 아스콘공장에 공급하기 이전에 미리 혼합하여 균일한 개질아스팔트용액을 만든 것을 공장에 운반해 와서 배치탑의 퍼그밀에서 가열골재와 함께 혼합하여 개질아스콘을 생산하는 방식이며, 후자는 개질제와 아스팔트를 각각 분리하여 아스콘공장에 운반하여 와서 배치탑의 퍼그밀에서 가열골재와 아스팔트를 함께 혼합할 때 비로소 개질제를 첨가하고 혼합하여 개질아스콘을 생산하는 방식이다. 개질 중온아스콘을 생산할 경우에 현장배합방식은 배치탑에서의 짧은 혼합시간(40-50초)내에 개질제와 중온첨가제를 따로 따로 첨가하게 되는 데, 불가능한 일은 아니나 상당히 신경쓰이는 일 이 아닐 수 있다. 이를 용이하게 하기 위한 방법으로서 개질제와 중온첨가제를 사전에 혼합 하여 함께 포장한 후에 한 번에 배치탑의 퍼그밀 혼합기에 투입할 수 있다. 이처럼 개질제와 중온첨가제를 함께 혼합한 것을 여기서는 중온 개질제 혹은 중온 개질첨가제라 일컫는다.

이러한 중온 개질제를 다량으로 충분히 생산하여야 3차년도 연구의 상당부분을 차지하는 일반 및 개질 중온아스팔트 혼합물의 시험포장 연구가 가능하다. 이러한 시험포장을 통한 중온첨가제의 검증연구는 물론이고, 개발된 제품의 사업화를 이루기 위해서도 파이로트 생산시설의 구축은 필수적이다.

파이로트 생산설비에 대한 도식을 간단하게 표현하면 다음 그림 73과 같다.

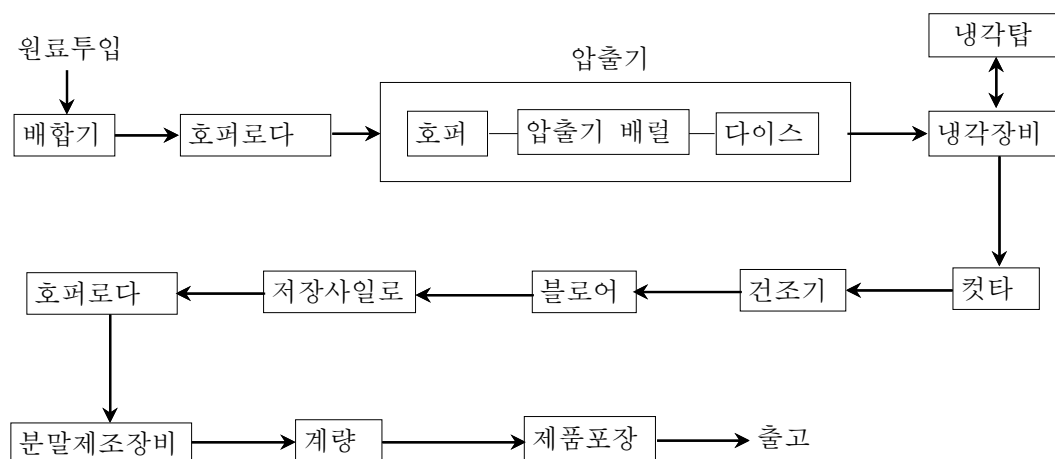


그림 73. 파이로트 생산설비에 대한 간단한 도식.

2. 장비의 구성요소와 기능

가. 재료준비 및 혼합

중온 개질제의 조성물은 분쇄를 필요로 하는 재료, 분말 재료 및 펠렛(pallet) 재료로 구성된다. 이들을 각각 혼합하기 쉬운 형태로 만들어서 혼합기에 투입한다. 혼합기에서 물리적으로 혼합된 재료들은 이송장비를 거쳐 압출기의 호퍼에 투입된다.

나. 가열, 용융, 혼합 및 압출

압출기의 호퍼에 투입된 각기 다른 재료들은 뜨거운 압출 스크류를 통과하면서 열을 받아 용융 액체가 되고, 이 상태에서 균일하게 혼합되어 점도가 높은 액체재료가 된다. 아래 그림 74은 압출기에 대한 사진이다. 액체재료는 압출다이스를 통해서 압출물로 방출되고 냉각수조를 거쳐 입자 컷팅기에서 펠렛으로 컷팅된다. 컷팅된 재료(펠렛)는 건조와 이송과정을 거쳐서 저장사일로에 저장된다.



그림 74. 압출기 사진.

다. 제품의 분말화와 포장

저장사일로에 저장되어 있는 펠렛형의 중온개질제는 입자사이즈가 커서 사용이 불가능하다. 입자가 크면 가열용융에 많은 시간이 소요됨으로 아스콘공장의 짧은 혼합시간을 고려할 때 사용할 수가 없다. 따라서 입자크기를 미세하게 해야 순간용융이 가능해져 사용이 가능하다. 이를 위해 저장사일로의 펠렛 재료를 분체기의 호퍼에 이송한다. 펠렛재료는 분체기 내부에서 미세분말로 분쇄된다. 분체기를 통과한 미세입자들은 공기와 함께 사이클론에 진입한다. 사이클론에서는 미세입자와 공기가 분리되어 입자는 로터리밸브를 통해 외부로 방출되어 분말제품이 된다. 이 제품은 일정량 계량되어 플라스틱 백에 포장되어 중온 개질제 제품으로 사용된다. 사이클론에서 공기와 함께 남은 미세분진은 집진기로 들어가서 거기서 필터에 의해 걸러져 포집되고 깨끗한 공기만 송풍기에 의해 외부로 유출된다. 분말화 장비에 대한 사

진은 그림 75에 전시되어 있다.



그림 75. 중온개질제 입자의 분말화 장비.

라. 중온 개질첨가제 생산

위의 분말화 장비를 이용하여 중온 개질제의 구성재료들을 한 종류씩 분말화하고 이들을 물리적으로 균일하게 혼합하여 중온 개질제를 생산하였다. 이러한 중온 개질제는 일반 가열 생산의 175°C 보다 30°C 낮은 145°C 에서 개질 중온아스콘의 생산이 가능하도록 개발되었다.

원칙적으로 조성물의 혼합재료를 압출기에 보내어 가열, 용융 및 혼합하여 균일한 제품을 만든 후 분말화해야 하지만 아직도 파이로트플랜트가 완전히 구축되지 않았기 때문에 이로 인해 시험포장을 지연할 수 없을 것 같아 상기 압출과정은 생략하고 각 조성물의 분말화과정을 거쳐 물리적으로 혼합하여 중온개질제를 생산하였다. 한 포장단위는 개질 중온아스콘 1톤을 생산하기 위함이며 6kg이 비닐봉지에 포장된다(그림 76). 현재까지 이러한 제품 6톤(1포대 6kg으로 포장하여 1000포대)을 생산하여 확보하고 있는 중이다(그림 77).



그림 76. 개질중온아스콘 1톤을 위한 중온개질제 1팩.



그림 77. 중온개질제 50팩이 담긴 PP 마대
(1팩은 6kg의 중온개질제가 포장됨).

제 6절 배합설계

1. 시험포장의 종류와 위치

가. 시험포장의 종류

중온첨가제는 일반, 개질 및 재생개질 중온 아스팔트포장 등에 널리 사용될 수 있다. 그러나 포장종류에 따라 포장의 구성요소인 바인더의 점도가 달라짐으로 중온첨가제의 첨가함량도 달라진다. 본 연구의 목적은 ‘균열저항성을 높인 중온아스팔트포장 개질제’ 개발이기 때문에 이에 걸맞게 기 개발된 중온 개질제를 사용하여, 개질 중온아스팔트포장에 대한 연구를 하고자 하였다. 그러나 최근에는 1km 이상의 도로포장에는 페아스콘의 사용을 의무화하고 있어서 이를 추가하여 개질 재생 중온아스팔트포장에 대한 연구를 수행하고자 한다.

나. 시험포장의 위치

개질아스팔트나 개질재생 아스팔트에 대한 시공을 하고자 하는 이유는 도로의 주요 공용성 문제인 소성변형이나 피로균열을 해결하기 위함이다. 이러한 관점에서 국내에서 겨울철에 기온이 아주 낮고 여름철에 기온이 상당히 높은 대표적인 도시가 대구광역시이다. 대구광역시의 도로 중에서도 교통정체가 항상 심하여 문제가 발생하는 곳이 대구지하철 2호선 감삼역 앞 사거리이다 (사진 1 참조). 이도로는 왕복 12차선, 편도 6차선 도로로서 신호등 교차로 바로 앞에는 포장한 후 얼마 안 되어 정체된 차량으로 인해 이미 소성변형이 발생해 있었다(사진 2 참조). 대구 시설관리 공단 관련자와 검토한 결과 편도 6차선 도로 중에서 3, 4, 5차선 도로를 사거리 정지선에서 시작하여 후방 60미터까지 시험포장하기로 결정하였다.



사진 1: 시험포장위치의 교통체증



사진 2: 시험포장 위치의 소성변형

다. 시험포장 시간

시험포장하고자 하는 대구 감삼역 앞 사거리는 항상 교통체증이 심각하여 낮 시간에는 도저히 시공이 불가능하여 밤 11시 이후의 야간작업을 하기로 대구 시설관리 공단 담당자와 상

의하여 결정하였다. 일시는 2012년 8월 31일 금요일 밤 11시로 선정되었다.

2. 아스콘 생산을 위한 배합설계 및 혼합물 시험

가. 골재배합 설계

시험포장을 위한 골재는 대구광역시에 위치한 (주)보광산업에서 수송 받았다. 상기 회사는 폐아스콘재생시설이 가능한 업체라서 시험포장을 위한 개질재생중온아스콘을 생산할 수 있고, 시공현장과 가까워서 선정되었다. 배합설계를 위한 골재는 핫빈에서 채취한 골재로서, 13-20mm골재 (3Bin), 5-13mm 골재 (2Bin), 잔골재 (5mm 이하) (1Bin) 및 13mm이하로 분쇄한 순환골재를 각각 20kg, 채움재를 5kg, 그리고 아스팔트 (AP-5) 20리터를 공급받았다.

각 골재를 체가름하여 다음 표43, 44, 45, 46, 47과 같은 입도분포를 얻었다.

표 43. 13-20mm (3 Bin)의 경우

WC-3 표충용 Hot Bin (3Bin, 13-25mm)				
체크기 (mm)	잔유량	통과량	잔유율(%)	통과율(%)
25	0.0	5728.4	0	100
20	0.0	5728.4	0	100
13	3631.8	2096.6	63	37
10	1460.7	635.9	89	11
5	452.5	183.3	97	3
2.5	143.2	40.1	99	1
0.6				
Pan	40.1	0.0	100	0
계	5728.4			

표 44. 5-13mm (2 Bin)의 경우

WC-3 표충용 Hot Bin (2Bin, 5-13mm)				
체크기 (mm)	잔유량	통과량	잔유율(%)	통과율(%)
25	0.0	2536.2	0	100
20	0.0	2536.2	0	100
13	0.0	2536.2	0	100
10	606.2	1930.0	24	76
5	1265.6	664.5	74	26
2.5	621.4	43.1	98	2
0.6				
Pan	43.1	0.0	100	0
계	2536.2			

표 45. 5mm 이하 (1 Bin)의 경우

WC-3 표층용 Hot Bin (1Bin, 5mm 이하)				
체크기 (mm)	잔유량	통과량	잔유율(%)	통과율(%)
25	0.0	582.2	0	100
20	0.0	582.2	0	100
13	0.0	582.2	0	100
10	0.0	582.2	0	100
5	49.5	532.7	8	92
2.5	80.9	451.8	22	78
0.6	196.8	255.0	56	44
0.3	117.0	138.0	76	24
0.15	41.9	96.1	83	17
0.08	60.0	36.1	94	6
Pan	36.1	0.0	100	0
계	582.2			

표 46. 채움재의 경우

WC-3 표층용 채움재				
체크기 (mm)	잔유량	통과량	잔유율(%)	통과율(%)
25	0.0	55.1	0	100
20	0.0	55.1	0	100
13	0.0	55.1	0	100
10	0.0	55.1	0	100
5	0.0	55.1	0	100
2.5	0.0	55.1	0	100
0.6	0.0	55.1	0	100
0.3	0.3	54.8	1	99
0.15	4.0	50.8	8	92
0.08	7.0	43.8	20	80
Pan	43.8	0.0	100	0
계	55.1			

순환골재의 경우는 페아스콘을 분쇄하여 모두 13mm 이하로 만든 것을 사용했다.

표 47. 순환골재의 경우

WC-3 표층용 순환골재				
체크기 (mm)	잔유량	통과량	잔유율(%)	통과율(%)
25	0.0	2587.9	0	100
20	0.0	2587.9	0	100
13	0.0	2587.9	0	100
10	344.2	2243.7	13	87
5	323.5	1920.2	26	74
2.5	460.6	1459.6	44	56
0.6	615.9	843.7	67	33
0.3	437.4	406.3	84	16
0.15	157.9	248.4	90	10
0.08	119.0	129.4	95	5
Pan	129.4	0.0	100	0
계	2587.9			

표 43, 44, 45, 46 및 47의 결과를 종합해보면 아래 표 48의 결과를 얻는다.

표 48. 각 골재의 체크기 통과 백분율

골재 종류	체 크기									
	25	20	13	10	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
3 Bin	100	100	37	11	3	1				
2 Bin	100	100	100	76	26	2				
1 Bin	100	100	100	100	92	78	44	24	17	6
채움재	100	100	100	100	100	100	100	99	92	80
순환골재	100	100	100	87	74	56	33	16	10	5

위에서 산정된 각 골재의 통과 백분율로부터 합성입도를 결정할 수 있다. 시험포장을 시공할 대구 감삼역 사거리의 항상 교통체증이 심하여 소성변형이 자주 발생하는 지역임으로 이에 대한 방안으로 조골재가 세골재보다 상대적으로 많아지도록 골재 배합설계를 하였고 그 결과는 아래 표 49에 수록하였다. 그림 78는 골재배합설계를 그래프로 표현하고 있다.

표 49. 합성입도의 선정

골재종류	사용 백분율	체 크기									
		25	20	13	10	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
3 Bin	28.0	28.0	28.0	10.4	3.1	0.8	0.3				
2 Bin	23.0	23.0	23.0	23.0	17.5	6.0	4.6				
1 Bin	17.0	17.0	17.0	17.0	17.0	15.6	13.3	7.5	4.1	2.9	1.0
채움재	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.8	1.6
순환골재	30.0	30.0	30.0	30.0	26.1	22.2	16.8	9.9	4.8	3.0	1.5
합성입도		100.0	100.0	82.4	65.7	46.6	37.0	19.4	9.1	7.7	4.1
WC-3의 시방입도		100	90-100	72-90	56-80	36-85	23-49	10-28	5-19	3-13	2-8

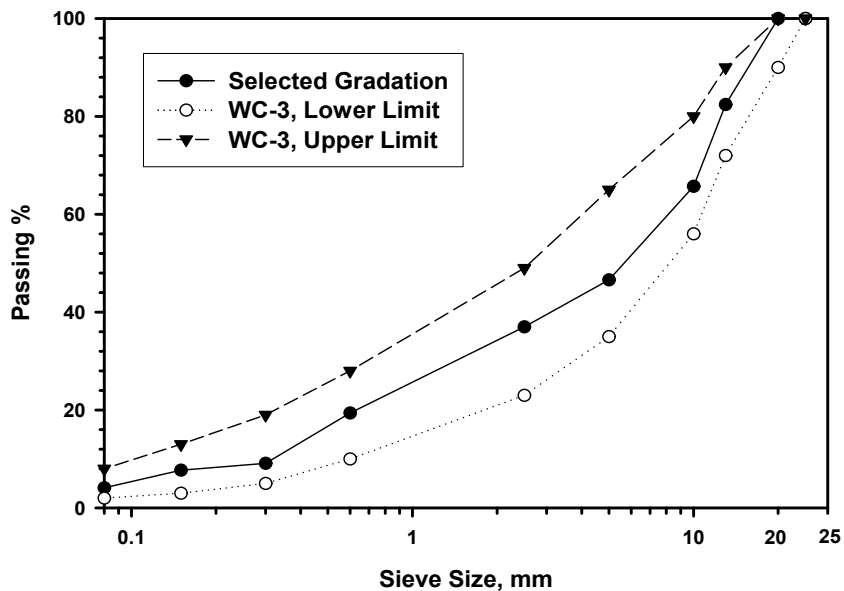


그림 78. 합성입도와 WC-3 시방입도.

나. 신규 아스팔트바인더의 첨가합량 설계

순환골재(폐아스콘)를 30% 사용할 경우, 신규아스팔트 첨가합량은 다음 식으로 계산한다.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - r \cdot P_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}} \quad (11)$$

식 (20)에서 각 부호의 의미는 아래와 같다.

P_{nb} = 재생아스콘 생산에 필요한 신규아스팔트 함량 (%)

P_b = 재생아스콘의 유효 아스팔트 함량 (%)

P_{sb} = 순환골재의 유효 아스팔트 함량 (%)

r = 전체 재생아스콘 골재 중 신골재의 백분율 (%)

상기 식 (11)에서, $r=70\%$ 일 때, $P_b=4.9\%$, $P_{sb}=4.0\%$ 라 하면, $P_{nb}=3.7\%$ 를 얻는다. 따라서 상기 골재배합설계에 따른 아스콘생산에 첨가할 신규아스팔트함량은 3.7%로 선정하였다. 이제 골재크기와 분포도, 신규아스팔트 함량, 개질제 및 균열저항성 증온첨가제가 모두 결정되었다.

개질재생중온 아스콘 1톤 생산에 필요한 각 재료의 물량을 계산하면 아래 표 50과 같다.

표 50. 개질재생중온아스콘 1톤 생산에 필요한 각 재료의 배합량

재료 종류	배합비율(%)	배합량(kg/톤)	배합량을 위한 계산
3 Bin	28.00	264.5	(1000-49-6.5) * (28/100)
2 Bin	23.00	217	(1000-49-6.5) * (23/100)
1 Bin	17.00	161	(1000-49-6.5) * (17/100)
채움재	2.00	19	(1000-49-6.5) * (2/100)
순환골재	30.00	295	(1000-49-6.5) * (30/100)/(1-4/100)
신규아스팔트	3.70	37	
개질재생 증온첨가제	0.65	6.5	균열저항성 향상 첨가제 포함
합 계		1000	
* 개질재생중온아스콘 중의 개질재생중온 아스팔트 함량은 (4.9+ 0.65)%; 순환골재중의 아스팔트함량은 4.0%로 계산함.			

상기 표 50에서 사용한 개질재생중온첨가제는 증온첨가제의 조합(W2+W6)에 탄성재료를 추가하고 재생포장의 품질향상을 위한 재생개질제도 포함하고 있다.

다. 배합설계된 개질 재생 중온 혼합물의 물성측정

표 50의 혼합물 배합설계에 따라 각 재료를 합하여 한 시편 당 1100그램이 되게 계량하여 각 용기에 담고 140℃의 오븐에 2시간 넣어 두었다가 꺼낸 후 즉시 혼합기에 넣고 3분간 격렬하게 혼합한 후, 잘 혼합된 혼합물을 마샬 몰드에 넣고 한 면을 75회, 양면 모두 다짐을 실시한 후 물성시험을 위한 혼합물시편의 제조를 완료하였다. 만들어진 시편을 하루 동안 실험실에서 경화시킨 후 탈형한 후, 마샬안정도, 간접인장, 수침인장(TSR), 파괴소모에너지, 등을

측정하였다. 그 결과는 아래 표 51에 나타나 있다.

표 51. 개질재생중온 아스팔트 혼합물 (WC-3, 페아스콘 30%)

구분		일반 신규아스팔트 혼합물(WC-3)	개질재생중온 아스팔트 혼합물(WC-3)
측 정 값	마찰안정도(kgf)	900-1200	1700-2200
	간접인장강도(kgf)	800-1100	2200-2600
	수침인장비(%)	85-92	85-96
	파괴에너지(kgf.mm)	1200-1400	2559-2976

상기 표의 측정값들은 아스팔트포장의 공용성능을 나타내는 값들이다. 마찰안정도와 간접인장강도는 소성변형 저항성을, 수침인장비는 수분민감성을, 그리고 파괴에너지는 소성변형과 피로균열 저항성을 함께 예측하는 값으로 사용된다. 상기 관점에서 페아스콘 30%를 재활용한 개질 재생 중온 아스팔트 혼합물은 일반신규 아스팔트 혼합물과 비교하여 약 2배 정도의 우수한 공용물성 값을 보인다.

상기에서 수침 간접인장 비는 아래와 같이 계산 된다;

$$TSR(\%) = \frac{T_s - T_{sw}}{T_s} \quad (12)$$

여기서

TSR = 수침 간접인장 비 (Tensile Strength Ratio)

Ts = 25℃에서 측정한 간접인장강도(kgf)

Tsw = 수침 간접인장강도(kgf, 60℃에서 24시간 담군 후, 25℃에서 측정)

마찰안정도와 간접인장강도는 모두 혼합물의 파괴강도를 나타내는 수치로서 서로 상관관계를 가지고 있으며, 둘 다 소성변형 저항성을 예측하는 경향을 갖고 있다. 그러나 상당한 오차를 포함하고 있는 것으로 알려져 있다. 아래 그림 72에서 그 한 사례를 보여준다. 개질아스팔트바인더를 포함하는 바인더로 아스팔트 혼합물 시편을 만든 후, 한 시험은 마찰안정도를 측정하고, 동일 혼합물에 대해 다른 한 시험은 실내바퀴주행시험을 실시하여 1260 사이클에서의 영구변형깊이를 측정하였다.

측정된 영구변형깊이와 마찰안정도의 데이터를 이용하여 상호간의 상관관계를 아래 그림 79에 나타내었다. 그림 79에서 볼 수 있듯이 마찰안정도로 소성변형깊이를 예측한 값은 상당한 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다. 그 동안 많은 연구자들은 보다 정확하고 간단한 소성변형 예측방법을 찾기 위해 노력하여왔다. 본 연구에서는 그림 30에서 측정한 혼합물에 대해 파괴에너지를 산정하고 이 데이터를 이용하여 소성변형깊이를 보다 정확하게 예측하는 기술을 개발하였다.

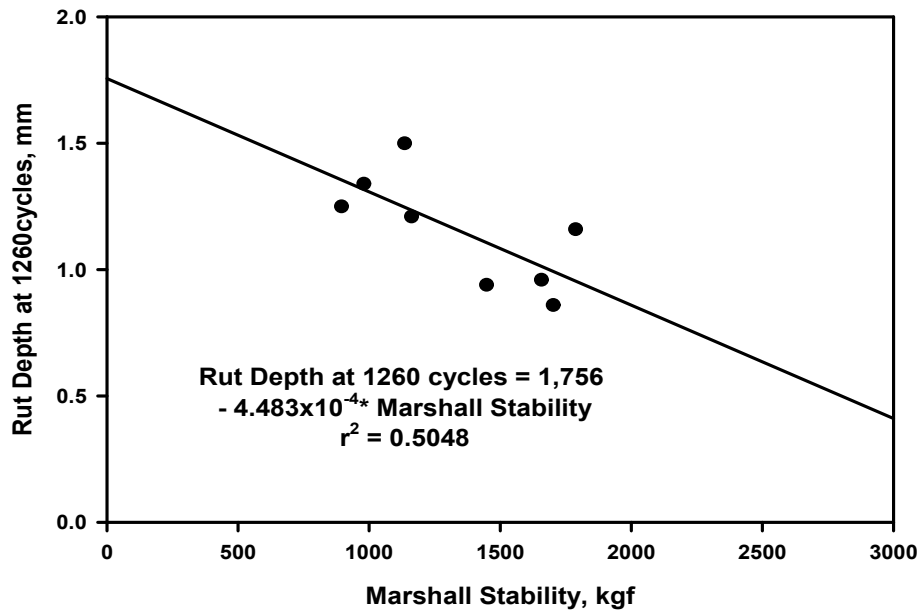


그림 79. 소성변형깊이와 마찰안정도와의 상관관계.

혼합물의 소성변형과 피로균열 저항성을 보다 정확히 예측하는 기술로서 실험실에서 간단히 측정된 데이터를 통해 혼합물의 파괴에너지를 계산하고 이 파괴에너지를 소성변형깊이와 피로균열 저항성과 관련지음으로서 보다 정확한 공용물성을 예측할 수 있게 된다. 다음의 두 식이 공용물성예측에 적용되도록 개발된 새로운 상관관계식들이다.

소성변형 예측식:

$$\frac{h_N}{N^\beta} = a - b \cdot \text{Log}(A)$$

(13)

피로균열 예측식:

(14)

h_N = 고정된 수평회수(N)에서의 소성변형 길이.
N = 파괴수평회수.
A = 혼합물의 파괴에너지, kgfmm.
N_d = 파괴점에서의 수평회수.
a, b, c, d = 재료물성 상수들.

식 (14)에서는 혼합물의 파괴에너지가 그 혼합물의 소성변형 저항성을 예측해주며, 마찰가 지로 혼합물의 소성변형깊이는 피로균열과 관련성이 있음을 알려주고 있다. 즉 소성변형과 피로균열은 서로 상관관계가 있음을 시사하고 있다. 식 (13)은 파괴에너지가 변수로 아스팔트 포장의 소성변형이 각이점을 가리키고 있다. 한편, 식 (14)은 식 (13)의 소성변형깊이가 값을 수직 피로균열에 도달하기 위한 수평회수가 증가함을 나타낸다. 따라서 혼합물의 파괴에너지

가 소성변형저항성과 피로균열의 예측에 중요한 물성임을 말하고 있다.

그림 79에 사용된 혼합물에 대한 시험을 행하여 측정한 파괴에너지로 식 (13)로 소성변형을 예측하였으며 그 결과를 아래 그림 80에 나타내었다.

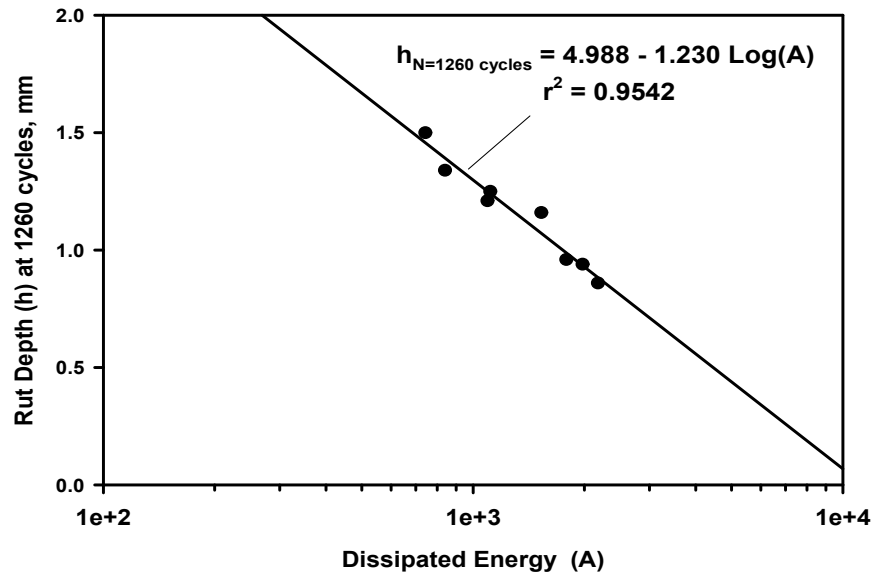


그림 80. 소성변형깊이와 혼합물의 파괴에너지와의 상관관계.

그림 80은 파괴에너지가 소성변형깊이를 보다 정확하게 예측함을 보여주며, 마찰안정도 (MS) 대신에 파괴에너지(A)를 측정하여 소성변형을 예측하는 것이 더욱 바람직함을 가리키고 있다. 상기 관점에서 그림 79와 80의 회귀분석 식인 아래 식 (15)와 (16)를 근거로, 표 29의 마찰안정도와 파괴에너지 데이터에 의한 소성변형깊이를 산정하면 아래 표 52과 같다.

$$h_{1260cycles} = 1.756 - 4.483 \times 10^{-4} \cdot MS \quad ; \quad r^2 = 0.5048 \quad (15)$$

$$h_{1260cycles} = 4.988 - 1.230 \cdot \log(A) \quad ; \quad r^2 = 0.9542 \quad (16)$$

표 52. N=1260 cycles에서의 신규와 개질재생중온 아스팔트혼합물의 소성변형예측 값

구분	일반 신규아스팔트 혼합물(WC-3)	개질재생중온 아스팔트 혼합물(WC-3)
마찰안정도(MS, kgf)	1050	1950
소성변형 예측 값(식 (24))	1.285 mm	0.882 mm
파괴에너지(A, kgf.mm)	1300	2760
소성변형 예측 값(식 (25))	1.158 mm	0.756 mm

표 52에서는 마찰안정도로 예측한 소성변형깊이가 파괴에너지로 예측한 값보다 약간 크게 나타나 있다. 그리고 개질재생중온 아스팔트 혼합물이 일반 신규아스팔트 혼합물보다 소성변형깊이가 훨씬 적게 나타나 있다.

제 7절 개질재생 중온아스콘의 생산

1. 개질 재생 중온 아스콘 생산

가. 개질 재생 중온 아스콘 생산

제 4절에서 제조한 재생 개질제에 탄성재료가 포함된 중온첨가제를 혼합하고, 1톤 아스콘 생산에 필요한 6.5kg씩 각 비닐 백에 포장하여, 개질 재생 중온 아스콘을 생산할 대구광역시의 (주)보광산업에 운반하였다. 시험포장할 구간은 감삼역 앞 사거리 정지선으로부터 후방 60미터로서 편도 6차선 도로의 3, 4, 5차선이다. 차선평은 3.5미터, 두께는 6cm로 결정되었으며, 전체 아스콘 물량은 90톤으로 계산되었다. 아래 그림 81에 시험포장할 장소를 회색으로 표시하였다.

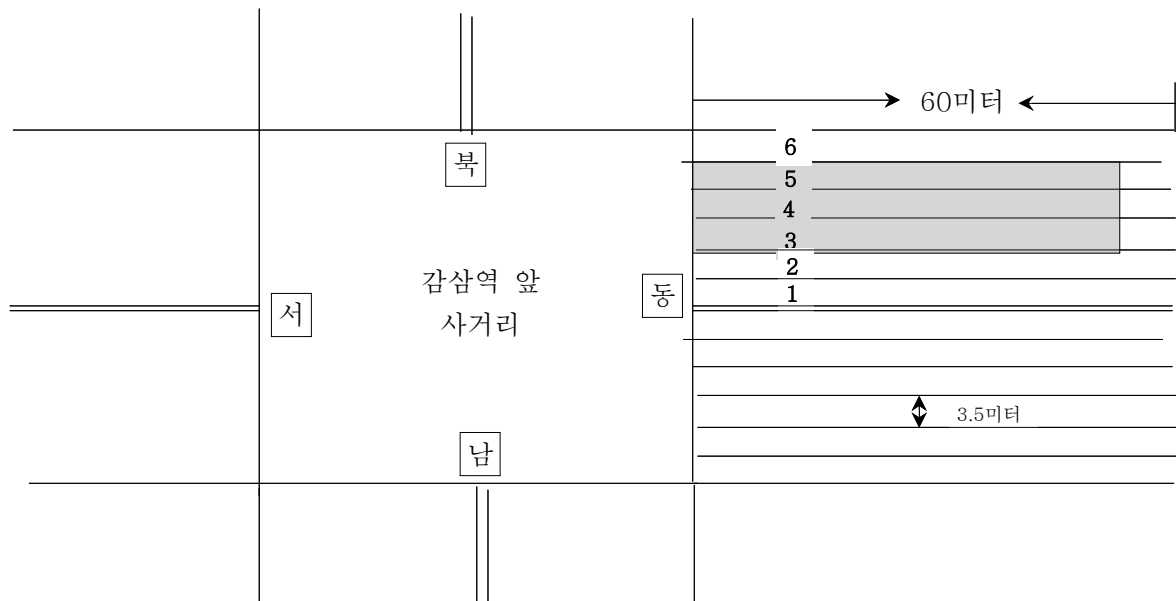


그림 81. 대구시 지하철 2호선 감삼역 앞 사거리에 시험포장할 장소.

가열 아스콘 생산온도는 개질아스콘(170-175℃)이 일반아스콘(160-165℃)보다 10℃ 높음으로 개질 재생 중온 아스콘의 경우 개질아스콘보다 30℃ 낮은 140-145℃로 산정하였다. 개질 재생 중온 첨가제는 배치탑의 중간 투입구에서 매 배치마다 인력으로 투입하였다. 아스콘 생산시작 전에 연료탱크의 게이지에 표시를 하고 생산이 끝났을 때의 게이지 눈금을 체크하여 90톤 생산에 필요한 연료소모량을 체크하였다. 아스콘이 생산되어 덤프트럭에 투하되었을 때를 아스콘 생산온도로 간주하여 생산온도를 측정하였다. 최초 아스콘 생산온도는 143.4℃이었고, 외기온도는 20.6℃이었다. 밤 10시에 생산을 시작하여 밤 11시에 시공현장에 도착하는 것으로 계획하여 생산하였다. 아스콘 생산은 표 53에 표시된 배합설계에 따라 진행하였다. 순환골재는 폐아스콘을 13mm이하로 분쇄한 것을 사용하였고, 신규골재와 채움재는 보광산업의 규격을 그대로 사용하였다. 한 배치당 2톤의 아스콘을 생산하였다. 재료투입에 따른 생산시간

은 아래 표 54와 같다.

표 54. 재료투입 순서, 재료온도 및 혼합시간

투입재료	①골재	②개질 재생 중온 첨가제	③아스팔트	④채움재	⑤순환골재	⑥습식 혼합
재료온도	160	상온	140	상온	130	145
혼합시간	9초	5초	3초	3초	3초	27초

15배치 생산 후에 생산된 아스콘의 샘플을 채취하여 한국건설생활환경시험연구원에 보내어 혼합물의 각종 물성을 시험하였다. 대기오염가스 측정은 아스콘공장의 굴뚝에서 방출되는 공기를 포집하여 측정하였다.

측정시험결과는 아래 표 55와 같다. 측정데이터는 첨부된 부록의 제4절을 참조하기 바란다.

표 55. 아스콘 생산시의 온도, 연료소모량, 유해가스 발생량 경감

구분	생산온도 (℃)	연료소모량 (리터/톤)	유해가스 발생량			
			CO ₂ (%)	NO _x (ppm)	SO _x (ppm)	CO (ppm)
개질 가열 아스콘	175	10.3	3.3	983	75	60
개질 재생 중온 아스콘	143	7.2	2.0	324	50	45
절감 %	32℃ 감소	30%	39%	67%	33%	25%

상기 표 55에서 개질 재생 중온 아스콘 생산은 일반 개질아스팔트의 생산온도보다 약 32℃ 낮게 생산하였고, 이에 따라 연료소모량은 30%, 이산화탄소는 39%, 질소산화물은 67%, 황산화물은 33%, 그리고 일산화탄소는 25%의 절감효과를 낳았다. 측정데이터는 부록의 제 5절에 첨부되어 있다. 상기 결과를 경제적 측면에서 살펴보면 다음과 같은 이익을 기대할 수 있다.

- 중온효과에 의한 연료비 절감효과 (연료비 약 30% 절감)
- 중온효과에 의한 탄소배출권 확보효과 (탄산가스 약 30% 감소)
- 중온개질제에 의한 폐아스콘 재생함량 증가 (최대 40% 재생가능)
- 일반, 개질, 재생 및 개질재생 아스콘 생산에서의 1시간 30분 정도의
교통개방시간 단축에 따른 경제적 이익
- 중온개질제에 의한 포장공용물성 증가에 따른 유지보수비 절감
(약 2배정도의 포장공용물성 증가)

나. 개질 재생 중온 아스콘 생산공장의 사진

다음은 생산 공장인 (주)보광산업 플랜트에서 촬영한 사진이다. 밤중이라 사진이 선명하지 않으나 참고용으로 제시한다.



(주)보광산업



개질 재생 중은 첨가제 운반



생산 제어실



아스콘 적재트럭

2. 생산된 개질 재생 중은 아스콘의 물성측정

생산된 아스콘 50kg을 샘플로 채취하여 한국건설생활환경시험연구원에 보내 물성측정을 요청하였다. 그 결과 얻어진 측정값들은 아래 표 56에 수록되어 있다.

표 56. 생산된 개질 재생 중은 아스콘의 물성시험 값

시험 항목	단위	측정 값	KS 규정
마찰안정도	N	18,198	KSF 2446: 2000
흐름 값	0.1mm	33	KSF 2449: 2010
간접인장 (건조)	MPa	1.223	KSF 2382: 2008
간접인장 (습윤)	MPa	1.027	KSF 2382: 2008
간접인장강도 비, TSR	%	0.842	KSF 2382: 2008
동적 안정도	회/mm	6342	KSF 2374: 2000
공극률	%	4.7	KSF 2340: 2010
밀도	g/cm ³	2.349	KSF 2382: 2008
이론최대 밀도	g/cm ³	2.46	KSF 2382: 2008
골재 간극률	%	18.02	KSF 2353: 2006
포화도	%	71	KSF 2349: 2010

표 56를 참조하면, 비록 30%의 순환골재(페아스콘)가 포함되어 있지만, 일반 신규아스콘보다 훨씬 우수한 물성 값을 보여준다. 구체적인 측정시험 결과는 부록의 제 5절을 참조하기 바란다.

제 8절 개질재생 중온 시험 아스팔트포장 건설

1. 개질 재생 중온 아스팔트포장의 시공

그림 75에 표시한 시험포장구간에 미리 6cm 되게 상온절삭장비로 절삭한 후, 청소차로 청소를 하였다. 깨끗해진 시험포장표면에 디스트리뷰터로 RSC-4 유화아스팔트를 모든 표면에 골고루 살포하였다. 특히 코너나 절삭한 측면에도 살포가 잘 되도록 주의를 기울여 유제를 살포하였다. 아스콘공장에서 덤프트럭으로 운반하여온 개질 재생 중온 아스콘은 페이브의 호퍼에 붓고 주위의 표면보다 1cm 정도 높게 포설을 하기 시작하였다. 이 때 페이브 호퍼의 재료온도를 측정하였는데 132.5℃이었다. 생산 시의 온도는 143.5℃임으로 아스콘운반에 따른 온도손실은 10.9℃가 된다. 온도측정결과는 202 페이지를 참조하기 바란다.

페이브의 포설 직후에 12톤의 마카담 롤러가 따라가며 1차 다짐을 6회, 그 뒤로 2차 다짐으로 15톤의 타이어롤러로 8회, 다음에 3차 다짐으로 10톤 진동롤러로 2회, 그리고 4차 마무리 다짐으로 무진동 10톤 탠덤롤러로 4회 각각 다짐을 실시하여 시공을 마무리하였다.

시공 시의 외부의 공기온도는 22.7℃이었으며, 1차 다짐온도는 130.6℃, 2차 다짐온도는 125.7℃, 그리고 다짐 후의 포장온도는 95.5℃이었다. 시공장비와 포장온도를 요약하면 표 57과 같다.

표 57. 개질 재생 중온 아스팔트포장의 다짐

다짐 종류	다짐장비(무게)	다짐회수(회)	다짐속도(km/hr)	다짐온도(℃)
포설	페이브 (3.5m)	1	2-3	130-135
1차 다짐	마카담 (12톤)	6	2-3	120-130
2차 다짐	타이어 (15톤)	8	4-6	110-120
3차 다짐	진동 탠덤 (10톤)	2	2-3	100-110
4차 다짐	무진동 탠덤 (10톤)	4	2-3	90-100

2. 시공포장의 교통개방시간

포장시공 후에 교통개방시간을 산정하기 위하여, 시공 동안에 온도센서(thermocouple)를 포장표면에서 2cm 아래에 매설하고 다짐 후의 시간경과에 따른 포장온도를 측정하였다. 아래 그림 82는 그 결과를 보여준다. 온도측정 데이터는 부록의 제 4절에 수록되어 있다.

그림 82는 포장다짐 직후의 온도인 95℃에서 교통개방온도인 50℃에 도달하는 데 걸리는 시간이 1시간 19분(79분)인 것을 보여주고 있다. 일반적으로 가열아스팔트포장의 교통개방에

걸리는 시간이 3시간(180분)임을 고려할 때, 약 1시간 41분(101분)의 교통개방시간의 단축을 보여주는 결과이다.

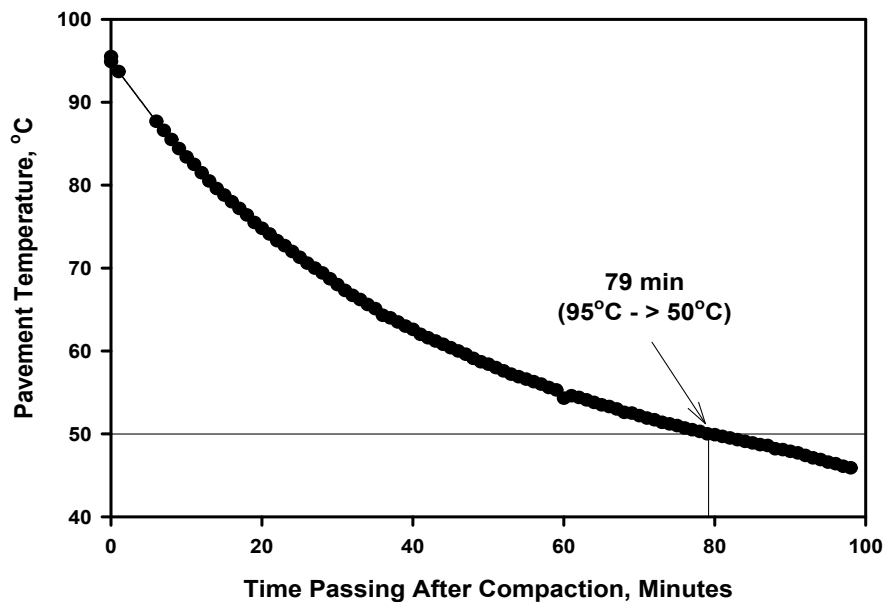


그림 82. 다짐 후 시간경과에 따른 포장온도의 냉각

3. 포장 코-아의 채취와 밀도측정

시공이 끝나고 하루 지난 후 시험포장 현장에서 코-아를 채취하고, 포장두께와 밀도를 측정하였다. 시험결과는 부록의 제 6절에서 찾아볼 수 있다. 이 데이터를 표로 나타내면 아래 표 58과 같다.

표 58. 포장 코-아의 두께와 밀도

코아 번호	밀도(g/cm ³)	두께 (mm)
	KS F 2446: 2000	KS F 2367: 2006
1	2.291	65.18
2	2.256	70.77
3	2.277	70.48
4	2.335	67.70
5	2.337	76.42
6	2.261	66.04
평균	2.293	69.43

표 56의 실험실 밀도(2.349 g/cm³)와 표 58의 현장 코-아 밀도(2.293 g/cm³)에서 현장 다짐도를 계산하면 $(2.293/2.349) \times 100 = 97.6\%$ 의 다짐도가 얻어진다. 통상 96% 이상의 다짐도가 만족할 수 있는 수준임으로 97.6%는 충분한 다짐이 이루어졌음을 나타내고 있다.

원래 포장은 표층에서 6cm 상온절삭하는 것으로 계획하였으나, 코-아의 두께측정으로 나타난 수치는 6.9cm임으로 계획보다 약간 깊게 절삭되었음을 알 수 있다.

4. 포장시공 사진

다음은 포장 시공시의 사진이다. 밤중에 시공을 해야 했기 때문에 사진이 선명하지 않으니 유의하기 바란다.



다음은 시공완료 후 1주일이 지난 시점에 촬영한 사진이다. 육안으로 관측하여 아무런 문제가 없었고, 아직 차선이 그어지지 않은 상태이다.



다음은 시공완료 후 2주일이 지난 시점에서 촬영한 사진이다. 아무런 문제가 없었으며 차선이 그어진 것을 볼 수 있다.



다음은 시공완료 후 1달 반이 지난 시점을 보여주며, 비가 내린 후이지만 여전히 아무런 문제가 없었다.



제 4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발 목표 달성도

목 표	달성도(%)	내 용
중온효과를 산정하기 위한 새로운 분석방법의 개발	100%	일반 및 개질 가열아스콘의 온도보다 30℃ 낮은 온도에서 중온효과를 산정하는 방법개발.
균열저항성을 높인 일반 및 개질 중온첨가제 개발	100%	일반 및 개질 중온아스팔트시료를 첨가함량과 온도별로 시편을 만들어 점도를 측정함. 상기 분석방법에 의해 다수의 일반 및 개질 중온첨가제 개발.
중온혼합물 물성 측정에 의한 중온효과 조사	100%	가열 혼합물과 중온 혼합물의 다짐온도에 따른 밀도와 마찰안정도를 측정함으로서 비교 검토.
파이로트 플랜트 구축. 중온개질제 시제품 생산연구	100%	파이로트 플랜트로 중온 개질제를 생산하는 기술 확립; 시험포장용으로 대량생산.
개질 재생 중온 아스콘 생산을 위한 배합설계	100%	골재설계, 아스팔트함량결정, 순환골재 함량결정, 생산온도 및 시간 결정, 등
배합설계에 따른 개질 재생 중온 아스콘 생산; 샘플채취로 각종 물성시험	100%	연료소모량, 대기오염물질 측정, 생산온도 및 생산시간 및 재료투입 절차 결정; 아스콘 생산과 샘플채취에 따른 각종 물성측정
생산된 아스콘으로 시험포장 건설	100%	다짐장비의 조합과 회수 결정, 다짐온도 측정, 교통개방시간 측정, 관측을 통한 포장문제점 파악.
코-아 채취 및 밀도 측정	100%	코-아 채취, 코-아 밀도측정을 통한 다짐도 결정, 포장두께 측정,

제 2절 관련분야의 기술발전예의 기여도

중온첨가제의 중온효과를 평가할 수 있는 획기적인 점도데이터 분석방법을 개발함. 이러한 분석방법은 각 중온첨가제의 중온효과를 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 얼마만큼 첨가해야 원하는 온도감소를 얻을 수 있는 가를 찾아내는 역할을 수행할 수 있으므로, 중온아스팔트포장을 위한 중온첨가제 개발의 핵심기술로서 본 연구에서 세계 최초로 개발한 기술이다. 또한 이러한 분석방법을 통해 일반 및 개질 중온아스팔트포장을 위한 유망한 다수의 중온첨가제를 개발하였음. 이러한 중온첨가제는 국내 외의 중온아스팔트포장 시장에 진입하여 그 성능을 인정받고 제품을 판매함으로서 관련분야의 기술발전에 크게 기여하리라 믿는다.

중온첨가제는 아스팔트포장의 생산과 시공온도를 감소시켜, 연료비용 절감, 대기오염가스 발생 경감, 산화노화에 의한 물성퇴화 영향 축소, 교통개방시간 단축, 동절기에도 포장시공가능 등의 효과를 가져오지만, 아스팔트포장 자체의 품질을 향상시키지는 않는다. 공용물성 증진으로 인한 포장품질을 개선시키기 위해서는 중온첨가제 대신에 중온개질제를 사용해야 하는데, 본 연구를 통해 이들을 개발하였다.

제 5장 연구개발결과의 활용계획

제 1절 추가연구의 필요성

3차년도 연구를 통하여 일반 및 개질 중온아스팔트포장을 위한 다수의 유망 중온첨가제를 개발하였으며, 시험포장 건설을 통하여 그 가능성을 입증하였다. 추후에는 개발된 중온첨가제를 일반, 개질, 재생 및 개질재생포장의 건설에 널리 사용할 수 있도록 그 실용화연구가 필요하다. 또한 기 개발된 각종 중온첨가제의 상업화에 필수적인 단계에 대한 연구도 필요하다.

제 2절 타 연구에의 응용

각종 중온첨가제가 개발되면, 일반, 개질(저소음 배수성, 일반 개질, 한랭지 및 교면포장용), 재생 및 개질재생 아스팔트포장에 응용되어 공해문제를 해결하고, 에너지 절감과 교통개방시간의 단축에 기여할 수 있을 것이다.

제 3절 사업화 추진방안

주관기업이면서 참여기업인 (주)뉴페이브 사가 이 기술을 실용화하여 중온아스팔트포장 건설시장에 진입할 것이다. 일반 중온첨가제는 하나의 보조첨가제로서 사업화가 가능하나 수익성이 낮은 단점이 있으나 중온첨가제와 개질제를 혼합한 중온개질제는 중온개질아스팔트포장건설이나 중온 개질 재생아스팔트포장건설에 판매기회가 충분히 있어 상품가치가 높을 것으로 기대된다. 사업계획을 구체적으로 나타내면 아래와 같다.

1. 일반 및 재생 아스팔트포장용 균열저항성을 높인 중온첨가제 제품

가. 일반중온아스팔트포장 건설에 활용

용도: 국도, 광역시도, 지자체도 및 지방도의 중온아스팔트포장 건설에 사용

수요처: 국도, 광역시도, 지자체도 및 지방도 등의 아스팔트포장건설 관련 공무원, 도로포장 설계 담당자, 엔지니어링회사 설계 담당자 등

나. 중온재생아스팔트포장 건설에 활용

용도: 국도, 광역시도, 지자체도 및 지방도의 중온재생아스팔트포장 건설에 사용

수요처: 국도, 광역시도, 지자체도 및 지방도의 아스팔트포장건설 관련 공무원, 도로포장

설계 담당자, 엔지니어링회사 설계 담당자 등

다. 제품영업 활동

상기에 언급한 수요처에 브로슈어, 제품설명서, 물성측정 값, 시험포장 사례, 특허증, 등의 자료를 이용하여 홍보 및 영업. 국내 전 지역을 모두 취급할 수 없음으로 대리점을 선정하여 위탁영업과 판매

2. 개질 및 개질재생 아스팔트포장용 중온개질제 제품

가. 중온개질(일반, 저소음배수성, 교면개질, 등) 아스팔트포장 건설에 활용

용도: 고속도, 산업도, 국도, 광역시도, 지자체도, 교면 및 공항활주로 등의 중온 개질 아스팔트포장 건설에 사용

수요처: 고속도, 산업도, 국도, 광역시도, 지자체도 및 교면 및 공항활주로 등의 아스팔트 포장 건설공무원, 도로포장설계 담당자, 엔지니어링회사 설계 담당자 등

나. 중온 개질 재생 아스팔트포장 건설에 활용

용도: 고속도, 산업도, 국도, 광역시도, 지자체도, 교면 및 공항활주로 등의 중온 개질 재생 아스팔트포장 건설에 사용

수요처: 고속도, 산업도, 국도, 광역시도, 지자체도, 교면 및 공항활주로 등의 아스팔트 포장 건설공무원, 도로포장설계 담당자, 엔지니어링회사 설계 담당자 등.

다. 제품판매 활동

상기에 언급한 수요처에 브로슈어, 제품설명서, 물성측정 값, 시험포장 사례, 특허증, 등의 자료를 이용하여 홍보 및 영업. 국내 전 지역을 모두 취급할 수 없음으로 대리점을 선정하여 위탁영업과 판매.

제 6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt

Graham C. Hurley¹ and Brian D. Prowell²

Abstract

Several new processes have been developed to reduce the mixing and compaction temperatures of hot mix asphalt without sacrificing the quality of the resulting pavement. Three potential warm mix asphalt processes were evaluated in this study. They were Aspha-min®, Sasobit®, and Evotherm®. A laboratory study was conducted to determine the applicability of these processes to typical paving operations and environmental conditions commonly found in the United States, including the performance of the mixes in quick traffic turn-over situations and high temperature conditions.

All three processes were shown to improve the compactability of mixtures in both the SGC and vibratory compactor. Statistics indicated an overall reduction in air voids. Improved compaction was noted at temperatures as low as 190°F (88°C). Superpave gyratory compactor results indicated that Aspha-min®, Sasobit®, and Evotherm® may lower the optimum asphalt content. The addition of Aspha-min®, Sasobit®, or Evotherm® did not affect the resilient modulus of an asphalt mix nor did they increase the rutting potential of an asphalt mix as measured by the Asphalt Pavement Analyzer. The rutting potential did increase with decreasing mixing and compaction temperatures, which may be related to the decreased aging of the binder resulting from the lower temperatures. There was no evidence of differing strength gain with time for the mixes containing the three processes as compared to the control mixes indicating that a prolonged cure time before opening to traffic is not an issue. The lower compaction temperature used when producing warm asphalt may increase the potential for moisture damage. Overall, Aspha-min®, Sasobit®, and Evotherm® appear to be viable tools for reducing mixing and compaction temperatures that can be readily added to hot mix asphalt. Reductions in mixing and compaction temperatures are expected to reduce fuel costs, reduce emissions,

¹Research Engineer and ²Assistant Director, National Center for Asphalt Technology

widen the winter paving window and facilitate niche applications such as airport runway construction where rapid open to traffic is essential.

Introduction

A number of new processes and products have become available that have the capability of reducing the temperature at which hot mix asphalt (HMA) is mixed and compacted without compromising the performance of the pavement. These new products can reduce production temperatures by as much as 40 percent. North American asphalt mixes are generally heated to 300°F (149°C) or greater, depending mainly on the grade of binder used; mixes produced with these new products are being produced at temperatures of about 250°F (121°C) or lower. Lower plant mixing temperatures mean fuel cost savings to the contractor and findings have shown that lower plant temperatures can lead to a 30 percent reduction in fuel energy consumption (1). Lower temperatures also mean that any emissions, either visible or non-visible, that may contribute to health, odor problems, or greenhouse gas emissions, will also be reduced (2). The decrease in emissions represents a significant cost savings, considering that 30-50 percent of overhead costs at an asphalt plant can be attributed to emission control (1). Lower emissions may allow asphalt plants to be sited in non-attainment areas, where there are strict air pollution regulations. Having an asphalt plant located in a non-attainment area and producing hot mix with a product that allows for a lower operating temperature will allow shorter haul distances which will improve production and shorten the construction period, thus reducing the possible headache of traffic congestion. Warm asphalt mixes will also allow longer haul distances and a longer construction season if the mixes are produced at more normal operating temperatures. There is another potential added advantage in that oxidative hardening of the asphalt will be minimized with the lower operating temperatures and this may result in changes in pavement performance such as reduced thermal cracking, block cracking, and preventing the mix from being tender when placed.

Of the current processes, this report concentrated on three in particular. The first process is known as Aspha-min®. Aspha-

min® is a product of Eurovia Services GmbH, based in Bottrop, Germany. Aspha-min® is a manufactured synthetic sodium aluminum silicate, or better known as zeolite. This zeolite has been hydro-thermally crystallized. Zeolites are framework silicates with large empty spaces in their structures that allow the presence of large cations, such as sodium and calcium. They also allow the presence of large cation groups, such as water molecules. Most zeolites are characterized by their ability to lose and absorb water without damaging their crystal structure. Heat can drive off the water contained in the zeolite, which can then act as a delivery system for the new fluid (3).

Eurovia's Aspha-min® contains approximately 21 percent water by mass and is released in the temperature range of 185-360°F (85-182°C). When Aspha-min® is added to the mix at the same time as the binder, water is released. This water release creates a volume expansion of the binder that results in asphalt foam and allows increased workability and aggregate coating at lower temperatures.

During the production of HMA, Eurovia recommends that Aspha-min® be added at a rate of 0.3 percent by mass of the mix, which in previous research has shown a potential 54°F (30°C) reduction in typical HMA production temperatures (3). Eurovia also states that all commonly known asphalt and polymer-modified binders can be used, as well as recycled asphalt (RAP). All types of aggregates used in the hot mix industry can also be used, so no changes to a normal mix design process are needed when using zeolite. Aspha-min® zeolite is approximately a 50 mesh material which may be added directly to the pugmill of a batch plant, through the RAP collar, or pneumatically fed into a drum plant using a specially built feeder. To date, four projects have been constructed in the United States as well as a number of projects in Europe.

The second process is branded Sasobit®, which is a product of Sasol Wax. It is a fine crystalline, long-chain aliphatic polymethylene hydrocarbon produced from the gasification of coal or natural gas feedstocks using the Fischer-Tropsch (FT) process (4). It is also known as FT hard wax.

In summary, in the Fischer-Tropsch synthesis, coal or natural gas (methane) is partially oxidized to carbon monoxide (CO) which is subsequently reacted with hydrogen (H) under

catalytic conditions producing a mixture of hydrocarbons having molecular chain lengths of C5 to C100 plus carbon atoms. The process begins with synthesis gas, which is a combination of carbon monoxide (from coal gasification) and hydrogen (from air separation), then reacted with either an iron or cobalt catalyst to form products such as synthetic naphtha, kerosene, gasoil and waxes. The liquid products are separated and the FT waxes are recovered or hydrocracked into transportation fuels or chemical feedstocks. The Sasobit recovered is in the carbon chain length range of C45 to C100 plus. (4-6). By comparison, macrocrystalline bituminous paraffin waxes have carbon chain lengths ranging from C25 to C50 (7). The longer carbon chains in the FT wax lead to a higher melting point. The smaller crystalline structure of the FT wax reduces brittleness at low temperatures as compared to bitumen paraffin waxes.

Sasobit® is described as an “asphalt flow improver”, both during the asphalt mixing process and during laydown operations, due to its ability to lower the viscosity of the asphalt binder (4). This decrease in viscosity allows working temperatures to be decreased by 32-97°F (18-54°C). Sasobit has a melting temperature of about 216°F (102°C) and is completely soluble in asphalt binder at temperatures higher than 248°F (120°C). At temperatures below its melting point, Sasobit® reportedly forms a crystalline network structure in the binder that leads to the added stability (4, 7).

During the production of HMA, Sasol recommends that Sasobit® be added at a rate of 0.8 percent or more by mass of the binder, but not to exceed 3 percent. Sasobit® can be blended into hot binder at the blending plant without the need for high shear mixing. In commercial applications in Asia, Europe, South Africa and the United States, Sasobit® has been added directly onto the aggregate mix as solid prills (small pellets) or as molten liquid via a dosing meter. Marshall tests performed on mixes produced in this manner indicated no difference in Stability or Flow values as compared to premixing with the binder (8).

Since 1997, over 142 projects were paved using Sasobit® totaling more than 2,716,254 square yards (2,271,499 square meters) of pavement (9). Projects were constructed in Austria, Belgium, China, Czech Republic, Denmark, France, Germany, Hungary, Italy, Macau, Malaysia, Netherlands, New Zealand,

Russia, South Africa, Sweden, Switzerland, the United Kingdom, and the United States. The projects included a wide range of aggregate types and mix types, including: dense graded mixes, stone mastic asphalt and Gussaphalt. Sasobit® addition rates ranged from 0.8 to 4 percent by mass of binder.

Evotherm® is a non-proprietary technology based on a chemistry package that includes additives to improve coating and workability, adhesion promoters, and emulsification agents. The total Evotherm package is typically 0.5 percent by weight of emulsion, as was the case for this study. The chemistry is delivered in an emulsion with a relatively high asphalt residue (approximately 70 percent). Unlike traditional asphalt binders, Evotherm® is stored at 176°F (80°C). The water in the emulsion is liberated from the Evotherm® in the form of steam when it is mixed with the heated aggregate. The resulting warm mix appears like hot mix in terms of coating and color.

Two Evotherm field trials have been constructed in South Africa and one in the United States with additional trials planned. The South African trials used dense-graded 12.5 mm NMA siliceous aggregates and viscosity-graded AC20 and AC10 binders. Parallel-flow drums plants were used to produce dense-graded mix at temperatures as low as 160°F (71°C); and in the field, laydown and compaction temperatures as low as 140°F (60°C) were achieved. The United States trial was constructed near Indianapolis, Indiana. The Indiana mix was a 12.5 mm NMA Superpave design produced with a dolomitic limestone aggregate. The emulsion was produced from a PG 64-22 base.

Objective

The objective of this study was to perform a laboratory study to determine the applicability of several different processes in warm mix asphalt applications including typical paving operations and environmental conditions commonly found in the United States. The processes were evaluated with respect to compactability, quick turnover to traffic, stiffness, rutting potential, and to moisture susceptibility.

Research Approach

Table 1 shows the experimental design for the laboratory evaluation of the three warm mix additives. The following sections describe the individual tests that are included in the experimental design.

Table 1. Experimental Design for Evaluating the Influence of Warm Asphalt Processes on Mixture Volumetrics and Performance

	Number of Samples Tested							
	Granite				Limestone			
	Control	Zeolite	Sasobit®	Evotherm	Control	Zeolite	Sasobit®	Evotherm
Mix Design	9	9	9	9	9	9	9	9
Volumetrics	8	8	8	8	8	8	8	8
Densification	24	24	24	24	24	24	24	24
Resilient Modulus	24	24	24	24	24	24	24	24
APA Rutting	24	24	24	24	24	24	24	24
Moisture Sensitivity	6	6	6	6	6	6	6	6
Strength Change with Time	10	10	10	10	10	10	10	10

Mix Design

Two aggregate types (granite and limestone) and one asphalt binder grade (PG 64-22) were used to evaluate the processes. However, to achieve the PG 64-22 binder used with the Sasobit®, 2.5 percent Sasobit® was added to a base PG 58-28 binder to produce the PG 64-22 binder. The mix design replicates a 12.5mm nominal maximum aggregate size Superpave coarse-graded crushed granite mix produced by Hubbard Construction, Orlando, Florida. The mix design gradation and optimum asphalt contents are shown in Table 2. The same target gradation was used for the limestone aggregate.

Table 2. Target Gradations and Asphalt Contents

Sieve Size	% Passing		
	JMF ¹	Granite	LMS ²
19.0	100.0	99.0	100.0
12.5	90.0	87.9	90.9
9.5	83.0	79.9	83.6
4.75	52.0	49.6	52.7
2.36	34.0	32.2	32.6
1.18	25.0	23.6	23.7
0.600	19.0	18.6	17.5
0.300	13.0	14.7	12.3
0.150	5.0	5.3	6.0
0.075	2.9	2.9	3.1
AC, %	5.3	5.1	4.8

1: Job Mix Formula; 2: Limestone

The job mix formula asphalt content was verified for the granite aggregate using a design gyration level of 125 gyrations. For the limestone aggregate, the mix design was conducted using the same design gyration level to determine an optimum asphalt content. Once the mix designs were verified at 300°F (149°C), each combination was then compacted at three lower temperatures (265, 230, and 190°F (129, 110, 88°C)). Volumetric properties for each of the 32 mix design combinations (one binder grade, two aggregates, three processes and one control mix type, and four compaction temperatures) are presented in Tables 3 and 4. The data for both aggregates with Sasobit® compacted at 190°F (88°C) were not obtained due to lack of material. These data points will be obtained when more material is available. Each result represents the average of two samples. From the results of the mix design verifications using the control mixtures, asphalt contents of 5.1 and 4.8 percent were determined for the granite and limestone aggregate, respectively. These asphalt contents were used throughout the remainder of the study, whenever test specimens were made.

Table 3. Volumetric Mix Design Data for Granite Aggregate

Additive	Temperature, F	AC, %	G_{mm}	% G_{mm} (or N_1)	G_{ph}	Air Voids, %	VMA	VFA
Control	300	5.1	2.467	88.0	2.365	4.1	13.6	69.6
Control	265	5.1	2.467	88.2	2.371	3.9	13.3	71.0
Control	230	5.1	2.467	87.7	2.360	4.4	13.8	68.4
Control	190	5.1	2.467	87.5	2.356	4.5	13.9	67.6
Zeolite	300	5.1	2.457	88.8	2.376	3.3	13.9	76.4
Zeolite	265	5.1	2.457	88.9	2.382	3.0	13.6	77.7
Zeolite	230	5.1	2.457	88.7	2.378	3.2	13.1	75.5
Zeolite	190	5.1	2.457	88.3	2.368	3.6	13.5	73.2
Sasobit	300	5.1	2.461	88.4	2.375	3.5	13.9	74.8
Sasobit	265	5.1	2.461	88.0	2.377	3.4	13.8	75.5
Sasobit	230	5.1	2.461	88.0	2.360	4.1	14.4	71.7
Sasobit	190	5.1	2.461	NA	NA	NA	NA	NA
Evotherm	300	5.1	2.465	88.7	2.389	3.1	12.7	75.7
Evotherm	265	5.1	2.465	88.5	2.387	3.2	12.8	75.2
Evotherm	230	5.1	2.465	88.4	2.384	3.3	12.9	74.5
Evotherm	190	5.1	2.465	88.6	2.390	3.0	12.7	76.0

Table 4. Volumetric Mix Design Data for Limestone Aggregate

Additive	Temperature, F	AC, %	G_{mm}	% G_{mm} (or N_1)	G_{ph}	Air Voids, %	VMA	VFA
Control	300	4.8	2.544	85.4	2.433	4.4	15.0	70.8
Control	265	4.8	2.544	85.1	2.430	4.5	15.1	70.3
Control	230	4.8	2.544	85.3	2.435	4.3	14.9	71.3
Control	190	4.8	2.544	85.5	2.439	4.1	14.8	72.1
Zeolite	300	4.8	2.544	85.8	2.442	4.0	14.7	72.8
Zeolite	265	4.8	2.544	85.8	2.449	3.7	14.4	74.3
Zeolite	230	4.8	2.544	85.7	2.444	3.9	14.6	73.2
Zeolite	190	4.8	2.544	84.8	2.418	4.9	15.5	68.2
Sasobit	300	4.8	2.545	86.1	2.459	3.4	14.1	76.1
Sasobit	265	4.8	2.545	86.3	2.463	3.2	14.0	76.7
Sasobit	230	4.8	2.545	86.3	2.465	3.1	13.9	77.4
Sasobit	190	4.8	2.545	NA	NA	NA	NA	NA
Evotherm	300	4.8	2.547	86.0	2.472	3.0	13.6	78.4
Evotherm	265	4.8	2.547	85.6	2.458	3.5	14.1	75.3
Evotherm	230	4.8	2.547	86.2	2.477	2.8	13.5	79.6
Evotherm	190	4.8	2.547	85.2	2.451	3.8	14.4	73.9

Observations from Tables 3 and 4 indicate that the different processes had little effect on the maximum specific gravity (G_{mm}) of the mixture. Previous research has indicated that the Superpave gyratory compactor (SGC) was insensitive to compaction temperature (10,11). In Tables 3 and 4 there are very slight trends of increasing air voids with decreasing temperature for some of the combinations. Out of the 22 combinations that data was determined for, only one had a higher air void level than its corresponding control mixture. An Analysis of Variance (ANOVA) test was conducted on the gyratory data to confirm the belief that the gyratory compactor is not sensitive to compaction temperature. The results are shown in Table 5. From these results, the gyratory compactor is statistically insensitive to the change in compaction temperature. It can also be seen from the data that the

different additives are significant in the densification of hot mix asphalt. Consequently, the addition of the Aspha-min® zeolite appears to reduce the design asphalt content by approximately 0.1 to 0.4 percent, while the addition of Sasobit® or Evotherm® appear to reduce the design asphalt content by approximately 0.1 to 0.5. Similar reductions were noted in previous research on Sasobit®(4). However, as stated previously, the asphalt contents presented in Table 2 were used for the production of the remaining test samples to reduce the number of variables.

Table 5. ANOVA Results for Gyratory Data

Source	DF	Adj. MS	F-stat	p-value	Significant
Temperature	2	0.0154	0.14	0.872	No
Additive	3	1.3526	12.16	0.000	Yes
Aggregate	1	0.0704	0.63	0.437	No
Error	17	0.1112			
Total	23				

Densification

Once the optimum asphalt contents and volumetric properties for each aggregate/binder combination were determined, test samples were then produced to evaluate the mixes' ability to be compacted over a range of temperatures. These test samples were prepared using oven dried aggregate. Before test samples were made, the anticipated number of test specimens were batched and then randomized for each of the different sets to reduce the variability. This was achieved by compacting a set of six samples per mix at the three lower temperatures mentioned previously (265, 230, and 190°F (129, 110, 88°C)), as well as a set compacted at 300°F (149°C). The mixing temperature was approximately 35°F (14°C) above the compaction temperature. Each sample was aged for two hours at its corresponding compaction temperature prior to compaction. No coating problems were observed for any of the warm mix processes. Test samples were compacted using a vibratory compactor, as seen in Figure 1. The vibratory compactor was selected for several reasons. One reason was that the literature suggested that the Superpave gyratory compactor was insensitive to temperature changes. A second reason was that it was found to be easier to produce samples for the Asphalt Pavement Analyzer

(APA) with the vibratory compactor than with a Marshall hammer (the Marshall hammer is known to be sensitive to compaction temperature). A third reason was that the vibratory compactor applies a vertical load, frequency, and amplitude that is comparable to those found in a typical vibratory roadway compactor.

Test samples, 6 inches in diameter and 3.75 inches tall, were compacted in the vibratory compactor for a time period of 30 seconds. This was the length of time that produced an air void content of 7 percent in preliminary testing using the PG 64-22 control mixture with the granite aggregate at 300°F (149°C). Once the air void content was determined, these same samples were then used to determine the resilient modulus and APA rut resistance of each mix at the various compaction temperatures.



Figure 1. Vibratory Compactor used for Compaction of Test Samples

Resilient Modulus

Resilient modulus is a measure of the stiffness of the hot mix asphalt. The indirect resilient modulus was determined according to ASTM D 4123, *Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. The testing was conducted at 73°F (23°C) as recommended by Lottman (12). Since resilient modulus is a non-destructive test, additional testing was conducted on the same set of test samples for each mix combination.

APA Rutting

Once the resilient modulus testing was completed, each mixture set was placed in the APA to determine the rut resistance of each aggregate/binder combination for the different compaction temperatures. All testing was conducted at 147°F (64°C). Testing was conducted using a hose pressure of 120 psi and a vertical load of 120 pounds.

Strength Gain

An evaluation of strength change with time was also conducted because of the possible changes in the stiffness of the asphalt due to the lower production temperatures when using the warm asphalt additives. If they improve the workability of a mixture, there may be concern that the workability would not dissipate prior to being opened to traffic, thus creating the potential for rutting. Ten samples of each mix were prepared for short-term and long-term mix aging per AASHTO PP2, using both the granite and limestone aggregates. Mixture strength was evaluated based on indirect tensile strength at 77°F (25 °C). The indirect tensile strength of the mixture is sensitive to binder (or mastic) stiffness. Indirect tensile strength testing was performed on samples after the aging periods shown in Table 6.

Table 6. Strength Gain Experiment Aging Periods

Set	Short Term Aging (hours) at 250°F (121 °C) (prior to compaction)	Long Term Aging (days) of Compacted Samples at	
		185°F	(85 °C)
1	2	0	
2	4	0	
3	2	1	
4	2	3	
5	2	5	

Moisture Sensitivity

If the moisture contained in the aggregate does not completely evaporate during mixing due to the low mix temperatures, water may be retained in the aggregate which could in turn lead to increased susceptibility to moisture damage. Therefore, additional test samples were produced and tested according to ASTM D 4867, *Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*, to assess the potential for moisture susceptibility of each mixture combination. The ASTM procedure is similar to the AASHTO T283 procedure except for the aging times. Several agencies have already eliminated the 72-96 hour room temperature cure period found in the AASHTO procedure.

To simulate the actual mixing process of a typical drum plant, a bucket mixer and a propane torch were used to heat the aggregate and mix the samples for making the TSR test samples. This was selected based on a methodology developed to study the effects of residual moisture on compaction (tender mixes) (13). The bucket mixer used can be seen in Figure 2. Before the aggregate was combined with the binder, 3 percent water in addition to the absorption value of each aggregate was added to the mix before it was heated. For example, the granite aggregate had an absorption value of 1.1 percent, so a total of 4.1 percent water by aggregate weight was added to the oven dry material before the binder was added.

The addition of the aggregate to the bucket mixer took place in two steps because it was found that when the entire gradation was added at once, by the time the aggregate was heated to the intended mixing temperature, which was 275°F (135°C), all of the fine material had segregated to the bottom of the bucket. So when the binder was added to the aggregate, the fine material was not fully coated. This was alleviated by adding the coarse and fine aggregate separately. The appropriate percentage of moisture was added to the fine aggregate portion, then set aside. The coarse aggregate was added to the bucket, and appropriate percentage of moisture was introduced to the coarse aggregate (Figure 2) and then it was heated to 250°F (121°C) (Figure 3). Then the fine aggregate portion was added to the bucket and the aggregate was heated back to the intended mixing temperature. When reached, the dust proportion of the blend and the binder was added to the bucket and allowed to thoroughly coat the aggregate. Each bucket mix produced three test samples. During the mixing process, the

mix temperature decreased, so each test sample was placed in an oven until the compaction temperature (250°F (121°C)) was reached, usually about 10-15 minutes. This process is shown in Figures 2-4.



Figure 2. Introduction of Moisture to Aggregate for TSR Samples



Figure 3. Heating of Wet Aggregate to Mixing Temperature



Figure 4. Warm Mix Asphalt in Bucket Mixer

TEST RESULTS AND DISCUSSION

Densification

As mentioned earlier, samples were compacted in the vibratory compactor over a range of temperatures. The densification results for both the granite and limestone mixes are shown in Figures 5 and 6. The data for the replicates are provided in the Appendix, Tables A1 through A8. From observation of the results in Figures 5 and 6, the addition of zeolite, Sasobit®, and Evotherm improves compaction over the control mixture for all binder, aggregate, and temperature combinations. Observation of Figures 5 and 6 also show that the air void content for the control mixtures increased from 300°F (149°C) to 265°F (129°C), but did not increase at the lower compaction temperatures. This is probably due to less aging of the binder or possibly from the coarse nature of the mix. To verify if the coarse nature of the mix had an influence on the densification of the mixtures, a fine gradation was evaluated in the vibratory compactor at the different compaction temperatures, and their bulk specific gravities was determined. The results indicated a gradual increase in the air void content with the decrease in compaction temperature, so the coarse nature of the mix is believed to have

some influence in the fluctuation of the densification at the lower compaction temperatures.

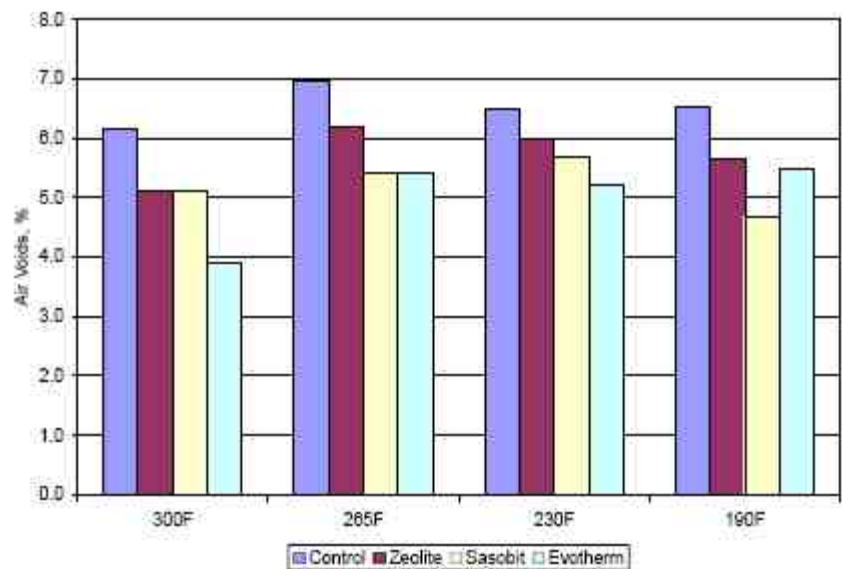


Figure 5. Densification Results over Range of Compaction Temperatures – Granite Mix

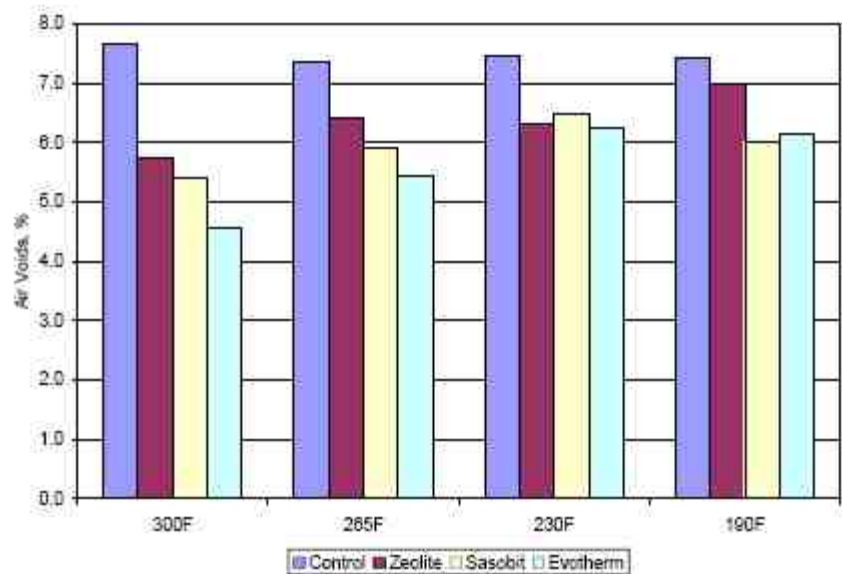


Figure 6. Densification Results over Range of Compaction Temperatures – Limestone Mix

Analysis of Variance (ANOVA) was used to analyze the densification data with air voids as the response variable and aggregate type, presence of additive, and compaction temperature as factors. The results from the ANOVA are presented in Table 7. From the results, all factors along with all possible interactions are statistically significant.

Table 7. ANOVA Densification Results

Source	DF	Adj. MS	F-stat	p-value	Significant*
Temp	3	8.8115	31.33	0.000	Yes
Additive	3	18.8782	67.13	0.000	Yes
Agg	1	28.5208	101.42	0.000	Yes
Temp*Additive	9	2.2346	7.95	0.000	Yes
Temp*Agg	3	1.3168	4.68	0.004	Yes
Additive*Agg	3	1.4257	5.07	0.002	Yes
Temp*Additive*Agg	9	0.5641	2.01	0.042	Yes
Error	160	0.2812			
Total	191				

* = Significant at the 95 percent confidence interval

A Tukey's post-ANOVA test was then conducted on the data for several reasons. One was to compare the different additives to the control and to each other, to see if any additive was statistically different from another additive. A second reason was to determine how much each additive lowered the air void content, based on the fact that the optimum asphalt content might be altered by the addition of a warm asphalt additive, discussed earlier in the report. Based on the results from the Tukey's test, Evotherm lowered the air void content the most, with Sasobit® next, and zeolite lowering the air void content the least. Statistically speaking, all additives significantly lowered the air void content, compared to the control. However, Evotherm was significantly different than the Sasobit® and zeolite, while the Sasobit® and zeolite were statistically different than the control; they were not statistically different than one another.

Interaction plots for the densification data are shown in Figure 7. Interaction plots are just another way to graphically visualize the data. From these plots, a couple of conclusions can be made. One, the granite aggregate consistently produced lower air void contents, based on both compaction temperature and the

presence of any additive. And two, Evotherm produced lower air void contents over the range of compaction temperatures.

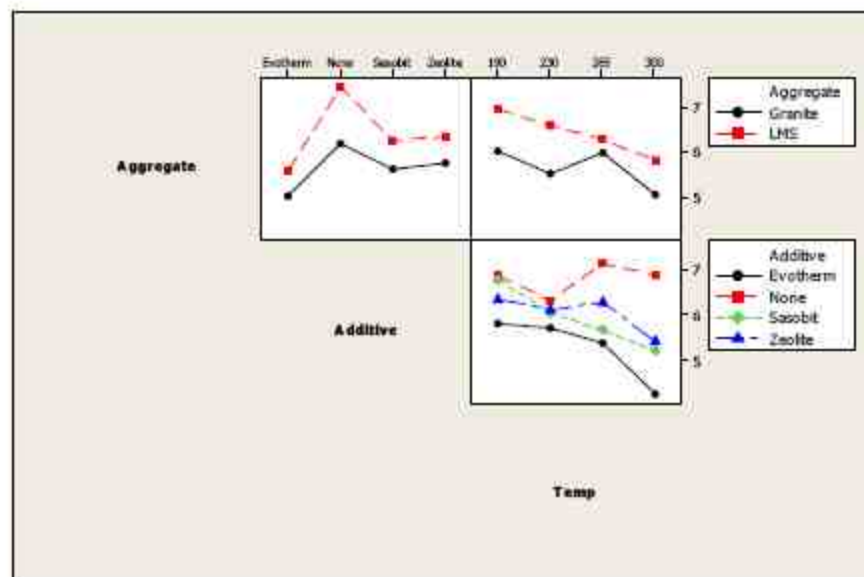


Figure 7. Interaction Plots for Densification Data

Numerically speaking, Evotherm lowered the air void content by an average of 1.5 percent, with a 95 percent confidence interval of 1.2 to 1.8 percent. For the Sasobit®, it lowered the air void content by 0.9 percent, with a 95 percent confidence interval of 0.6 to 1.2 percent. Zeolite lowered the air void content by an average of 0.8 percent, with a 95 percent confidence interval of 0.5 to 1.1 percent. All results were compared to the control mixtures data compacted at 300°F (149°C). It is ultimately believed that the addition of any additive will ease the field compaction of hot mix asphalt, based upon the statistical findings from the densification data.

Resilient Modulus

The data for the resilient modulus tests are provided in the Appendix, Tables A1 through A8. An ANOVA was performed to determine which factors (aggregate type, additive, and compaction temperature) significantly affect the measured resilient modulus. These results are presented in Table 8. Based on the results, only two factors (compaction temperature and additive) and two interactions (between compaction temperature and additive and

between additive and aggregate type) had a significant effect on the resilient modulus.

Table 8. ANOVA Results for Resilient Modulus

Source	DF	Adj. MS	F-stat	p-value	Significant*
Temp	3	5.68E+10	5.51	0.001	Yes
Additive	3	2.96E+10	2.87	0.038	Yes
Agg	1	2.23E+10	2.16	0.143	No
Temp*Additive	9	2.90E+10	2.81	0.004	Yes
Temp*Agg	3	7.92E+09	0.77	0.514	No
Additive*Agg	3	4.08E+10	3.96	0.009	Yes
Temp*Additive*Agg	9	1.18E+10	1.14	0.336	No
Error	160	1.03E+10			
Total	191				

* = Significant at the 95 percent confidence interval

Tukey's post-ANOVA test was conducted on the resilient modulus data to compare the different additives to the control and to each other, as was done for the densification data. From these results, it was concluded that Evotherm increased the measured resilient modulus the most, with zeolite next. Sasobit® actually decreased the measured resilient modulus, according to the data. However, none of the additives significantly affected the measured resilient modulus values, one way or the other, based on the Tukey's rankings.

Interaction plots for the measured resilient modulus data are shown in Figure 8. Interaction plots are just another way to graphically visualize the data. From these plots, a couple of conclusions can be made. First, the limestone aggregate consistently produced higher resilient modulus values for two of the three additives and over the range of compaction temperatures. And second, Evotherm produced higher resilient modulus values over the range of compaction temperatures, except for the 300°F (149°C) compaction temperature, but an outlier may possibly be skewing the zeolite test results.

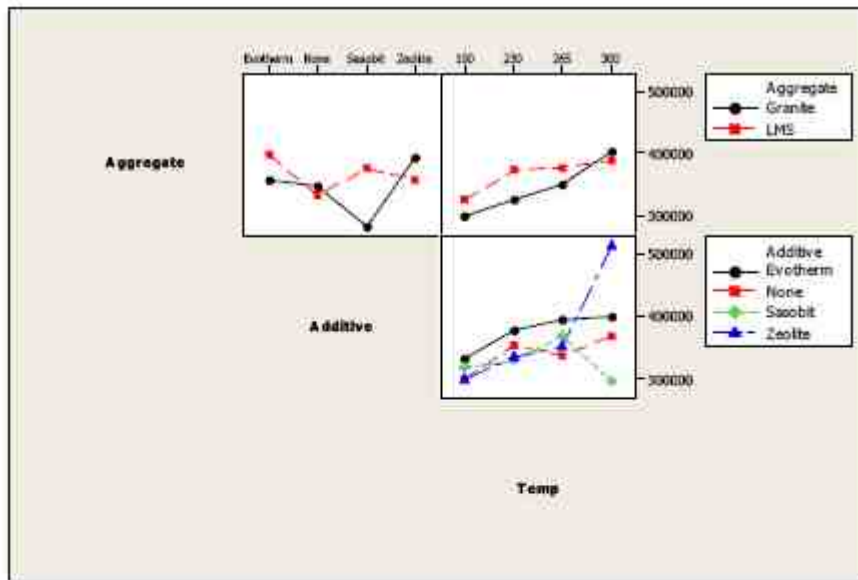


Figure 8. Interaction Plots for Resilient Modulus

APA Rutting

Once each set of test samples were tested to determine its resilient modulus value, they were placed in an oven at 147°F (64°C) for a minimum of six hours to ensure that they were equilibrated to the APA test temperature. They were then placed in the Asphalt Pavement Analyzer to determine their rutting potential at a temperature of 147°F (64°C). The rutting results for the granite and limestone aggregates are shown in Figures 9 and 10 with the supporting data for the replicates shown in the Appendix, Tables A1 through A8.

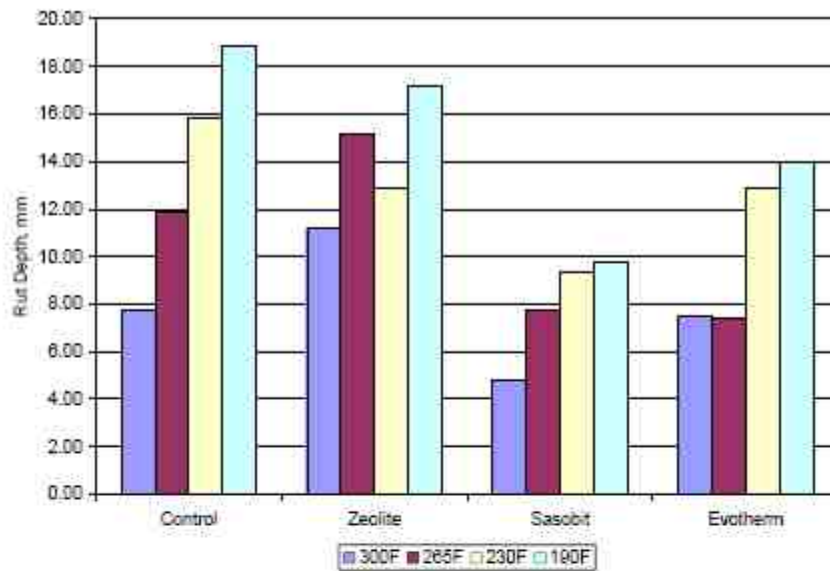


Figure 9. APA Rutting Results for Granite Aggregate

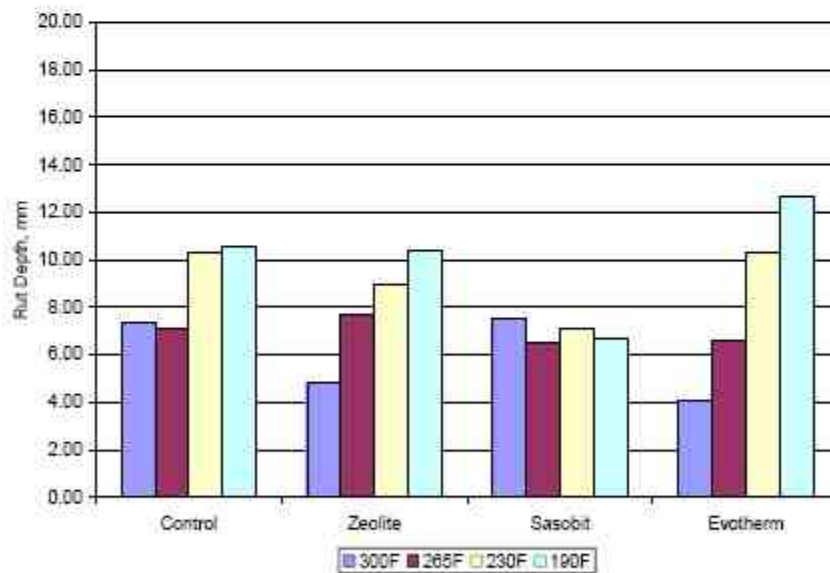


Figure 10. APA Rutting Results for Limestone Aggregate

Analysis of variance results from the rutting data are presented in Table 9. Based on these results, all factors and interactions except for the one three-way interaction between

compaction temperature, additive, and aggregate type were found to be significant.

Table 9. ANOVA Results for APA Rutting

Source	DF	Adj. MS	F-stat	p-value	Significant*
Temp	3	483.59	36.64	0.000	Yes
Additive	3	37.67	2.85	0.039	Yes
Agg	1	591.93	44.85	0.000	Yes
Temp*Additive	9	32.23	2.44	0.012	Yes
Temp*Agg	3	40.73	3.09	0.029	Yes
Additive*Agg	3	64.88	4.92	0.003	Yes
Temp*Additive*Agg	9	24.82	1.88	0.058	No
Error	160	13.20			
Total	191				

* = Significant at the 95 percent confidence interval

A Tukey's post-ANOVA test was performed on the rutting results to compare the different additives. The results from the Tukey's suggested that the Evotherm lowered the rut depths the most (by an average of 1.8 mm); Sasobit® decreased the rut depths by 1.4 mm, while the zeolite decreased the rutting potential by an average of 0.2 mm. However, none of the additives significantly increased or decreased the rutting potential compared to the hot mix asphalt control samples, based on Tukey's rankings.

Interaction plots for the measured rutting data are shown in Figure 11. From these plots, a couple of conclusions can be made. First, the limestone aggregate consistently produced lower rutting values for the control and all additives and over the range of compaction temperatures. And second, the additives produced lower rutting values over the range of compaction temperatures, except for the zeolite at the 265°F (129°C) compaction temperature, but this may be caused by variability in the test data.

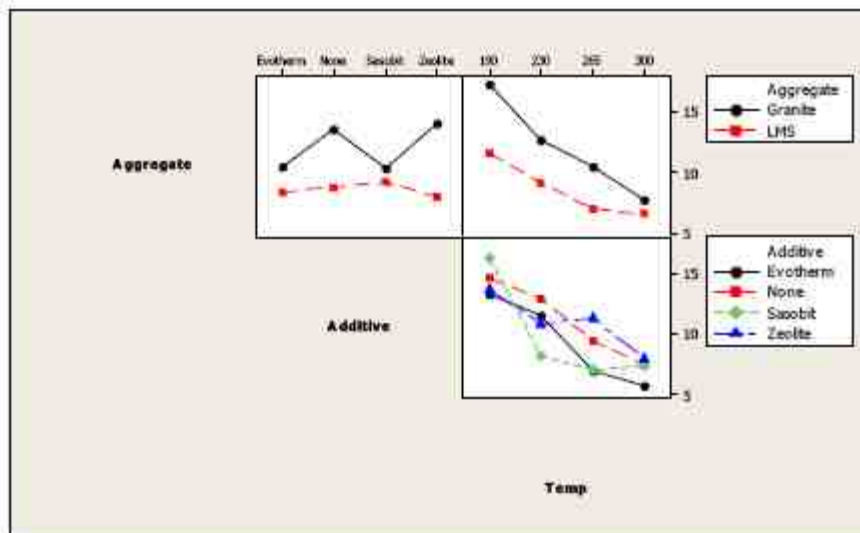


Figure 11. Interaction Plots for APA Rutting

Strength Gain

The strength gain experiment was conducted to evaluate the rutting potential immediately after construction. The results from the strength gain experiment for both aggregates are presented in Figures 12 and 13. The results indicated that although the strength varied over the different aging times, there was no change in strength for either the control mix or for the warm mix at a particular age time. This means that there is no evidence to support the need for a cure time before traffic can be allowed on the asphalt mixture containing Aspha-min®. The data for the Sasobit® generally indicated reduced aging of the binder, except for the long term aging samples for the limestone aggregate. Previous research conducted at 41°F (5°C) on a Stone Matrix Asphalt (SMA) mixture containing Sasobit® indicated no difference in tensile strength between the control and warm mixes (14). Also, based on the rutting data discussed earlier, there is no evidence to support the need for a cure time before traffic can be allowed on the asphalt mixture containing Sasobit®. This is consistent with the reported congealing point (212°F (100°C)) for Sasobit® (4). Schumann Sasol (now Sasol Wax) reports that a project in Italy was opened to traffic five hours after paving began (15). Sasobit® is also being used in the repaving of Frankfurt airport. Twenty-four inches of HMA is placed in a 7.5 hour window. The runway is then reopened to jet aircraft at a

temperature of 185 °F (85°C). Evotherm® shows evidence of strength gain with time, but the strengths at all but one aging period for the granite aggregate are numerically superior to that of the control mixture; for the limestone aggregate, the Evotherm® resulted on lower, but comparable values to the control mixture.

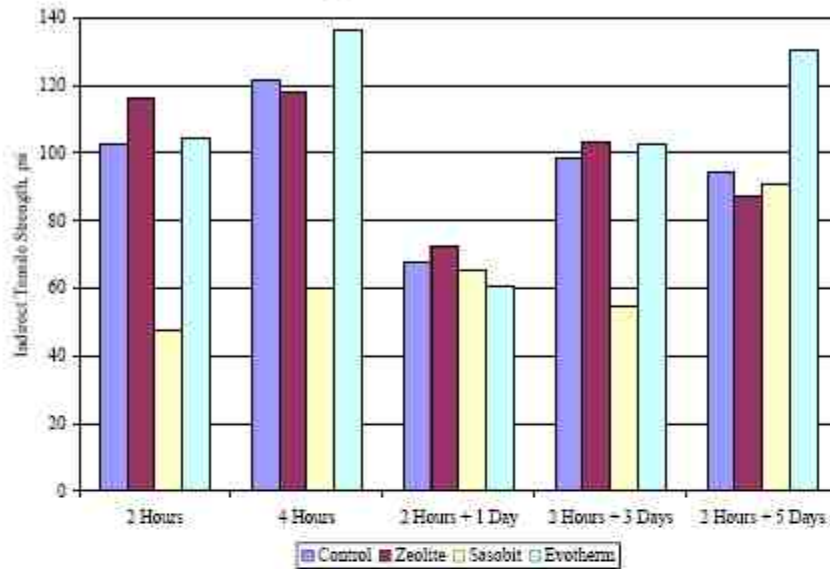


Figure 12. Strength Gain Results – Granite

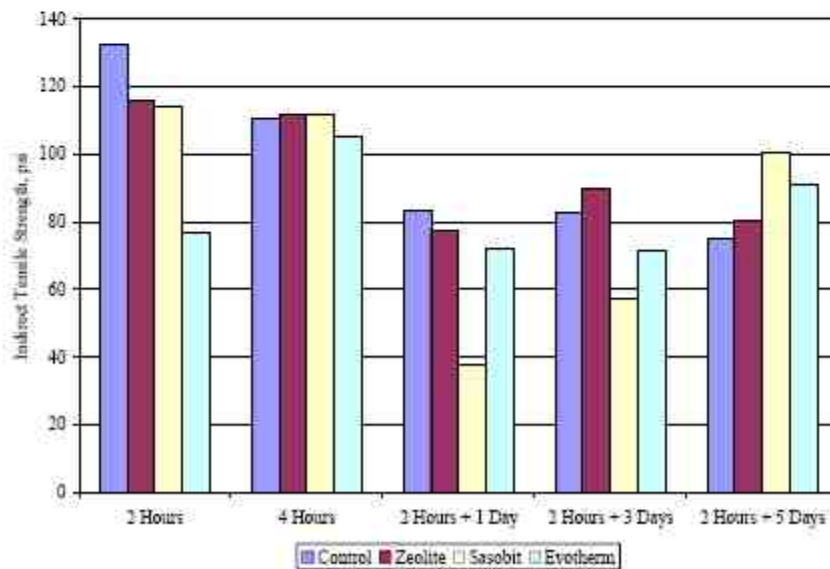


Figure 13. Strength Gain Results - Limestone

Critical Compaction Temperature

In order to accurately evaluate the warm asphalt additives, a comparison was made between the test results for each of the different additives and the test results for the control mix at a normal compaction temperature, this being at 300°F (149°C) for this particular study.

The reason for this comparison was to determine a critical compaction temperature; a minimum compaction temperature to where warm mix laid at any temperature below this compaction temperature, the performance of in-place asphalt will not be as good as hot mix asphalt laid at normal compaction temperatures. The test results for these comparisons can be seen in Table 10. In Table 10, the row labeled "none" refers to hot mix asphalt without any warm mix additives added. It does not mean hot mix that was mixed and compacted at normal temperatures and let cooled to the particular compaction temperature, but rather mixed and compacted at the two different temperatures evaluated, these being 265°F (129°C) and 230°F (110°C).

Observation of the results for the densification data indicated, all processes were either statistically the same, or significantly improved the compaction of the samples, down to 230°F (110°C). All equal signs seen in Table 10 indicate that there is no statistical difference between the process in question and hot mix asphalt at 300°F (149°C). The less than (<) sign means the performance is not as good as typical hot mix asphalt, where the greater than (>) sign indicates performance that is better than HMA. The values in parentheses indicate the p-value of each comparison, to illustrate the significance of the comparison. For example, at the 230°F (110°C) compaction temperature, all process significantly improved the densification, but based on the individual p-values, Evotherm® improved the densification the most.

Regarding resilient modulus, all processes neither significantly increased nor decreased the measured resilient modulus values, down to 230°F (110°C). This holds true for the mix type with no additive as well. This suggests that no additive will affect the stiffness of an asphalt mixture.

Based on the results for the APA rutting tests, Sasobit® neither increased nor decreased the rutting potential, down to 230°F (110°C). For the zeolite, there was a significant increase in

the rutting results for both compaction temperatures. Observation of the p-values suggests that the rutting was more significant at the 265°F (129°C) compaction temperature; however, this may be due to some testing variability from the APA device. The test results for the Evotherm suggest that there may be an increased potential for rutting at the 230°F (110°C) compaction temperature.

Table 10. Results of Comparison of Additives to Hot Mix

	Air Voids		Resilient Modulus		APA Rutting	
	265	230	265	230	265	230
None	= (0.8895)	= (0.1161)	= (0.9695)	= (0.9969)	= (0.3071)	< (0.0002)
Zeolite	= (0.2250)	> (0.0122)	= (0.9968)	= (0.9391)	< (0.0025)	< (0.0420)
Sasobit	> (0.0006)	> (0.0059)	= (1.0000)	= (0.8911)	= (0.9926)	= (0.9752)
Evotherm	> (0.0000)	> (0.0001)	= (0.9801)	= (0.9987)	= (0.9833)	< (0.0087)

Moisture Sensitivity

As was mentioned before, ASTM D 4867 was used to determine the moisture sensitivity test results. A compaction temperature of 250°F (121°C) was selected based on compaction, modulus, and rutting results to be an acceptable temperature for all three processes. The results for both aggregates are shown in Table 11. Also included in Table 11 are test results from TSR samples that were prepared from oven dry aggregate in the gyratory compactor after being aged at 300°F (149°C) for two hours, except for the Sasobit®, which was aged at 250°F (121°C), as stated in ASTM D 4867. This testing was conducted to see what kind of behavior the additives exhibited in the mixture. From the test results for samples prepared with oven dry aggregate in Table 11, the presence of zeolite decreased the TSR value, but still resulted in an acceptable value, while the Sasobit® lowered the TSR value to an unacceptable value.

Table 11. Tensile Strength Results for Granite and Limestone

Aggregate	Mix Type	Indirect Tensile Strength		TSR, %
		Unsaturated, psi	Saturated, psi	
Granite	Control	126.6	123.4	0.97*
Granite	Zeolite	155.0	126.3	0.81*
Granite	Sasobit®	59.5	40.6	0.68**
Granite	Zeolite	67.2	40.4	0.60**
Granite	Control	75.9	88.3	1.16
Granite	Zeolite	72.5	48.7	0.67
Granite	Sasobit®	53.2	38.0	0.71
Granite	Evotherm	70.8	67.7	0.96
Limestone	Control	109.5	71.2	0.65
Limestone	Zeolite	86.6	44.2	0.51
Limestone	Sasobit®	53.9	49.1	0.91
Limestone	Evotherm	75.0	46.8	0.62

Note: * Indicates Samples were prepared in SGC following ASTM D 4867

Note: ** Indicates Samples were prepared in SGC following ASTM D 4867
with 250°F compaction temperature

Once this testing was concluded, TSR samples were then produced at a lower compaction temperature (250°F (121°C)) using the bucket mixer, as previously discussed in this report. Initially, testing was performed without the presence of any type of anti-stripping agent. Results from this testing showed that the zeolite lowered the TSR value as compared to the control mixture (Table 8); the resulting TSR value does not satisfy the recommended minimum value for Superpave mixes (minimum of 0.80). The test results also exhibited some variability in the data from one aggregate type to the next. For example, the Sasobit® increased the resistance to moisture for the limestone, but decreased the resistance for the granite, compared to their corresponding control mixes, whereas the Evotherm® did the opposite, increasing the TSR with the granite aggregate and decreasing the TSR with the limestone aggregate compared to the corresponding control. It is believed that the testing precision is decreased when the tensile strength values are low, which is apparent in this case.

Figure 14 presents a sample containing Aspha-min® exhibiting a cohesive failure. It is believed that the binder was somewhat emulsified due to the moisture released from the Aspha-min®, causing the cohesive failure. It is possible that a cure time

would dissipate the moisture in the binder, eliminating the potential of a cohesive failure.

In Figure 15, the conditioned control sample exhibited an adhesive failure. But the unconditioned control samples also exhibited visual stripping resulting from adhesive failures. It is expected that the adhesive failure resulted from moisture remaining in the aggregate from the lower mixing and compaction temperature. However, the cohesive failure in the samples containing the Aspha-min® resulted in lower tensile strengths.



Figure 14. Example of Cohesive Stripping Failure – Granite



Figure 15. Example of Adhesive Stripping Failure – Granite

It is believed that the failing TSR values were possibly due to several factors, those being moisture retained in the aggregate, or due to residual moisture left behind by the microscopic foaming

process of the zeolite. To evaluate these hypotheses, additional TSR tests were conducted with the granite aggregate as shown in Table 12. To determine if the lower TSR values were caused by moisture in the aggregate, TSR testing was conducted using oven dry aggregate. The aggregate was placed in a 250°F (121°C) oven prior to mixing to make sure there was no internal moisture present. Test results from the oven dry aggregate also resulted in failing TSR values; therefore the decrease in tensile strength is not believed to be solely due to internal aggregate moisture.

To determine if the moisture resistance could be increased, anti-stripping agents were then evaluated. First, one type of liquid anti-stripping agent, ARMAZ LOF 6500, was used with the control and zeolite mixtures. This additive is routinely used with the granite aggregate source. For the control mixture, the liquid anti-strip visually reduced the adhesive failure, increased the unsaturated tensile strengths while the saturated tensile strengths remained the same as the control mixture without liquid anti-strip. For the mixture with zeolite, the liquid anti-strip increased the unsaturated tensile strengths, but it decreased the saturated tensile strengths, thus resulting in a low TSR value (0.38). The decrease in the saturated tensile strength may possibly be due to a reduction in binder viscosity from the liquid anti-stripping agent.

Table 12. Additional Tensile Strength Results for Granite Aggregate

Anti-Stripping Additive	Mix Type	Indirect Tensile Strength		TSR
		Unsaturated, psi	Saturated, psi	
0.75% LOF 6500	Control	104.7	90.5	0.86
0.75% LOF 6500	Zeolite	96.0	36.2	0.38
1% Lime	Zeolite	110.6	85.5	0.77
1.5% Lime	Zeolite; Two-stage addition	79.9	69.3	0.87
1.5% Lime	Zeolite; All Added Dry	90.2	67.3	0.75
0.4% Magnabond	Sasobit	17.5	16.5	0.94

Hydrated lime was then evaluated. Hydrated lime was used in two different percentages (1 and 1.5 percent), while for the 1.5 percent added hydrated lime, it was evaluated in two methods – all added dry and in a two stage addition (0.5 percent added to wet aggregate and the remaining percent added to the dry aggregate). For the addition of just the one percent hydrated lime, it was added

to the dry aggregate. From the results in Table 12, the hydrated lime increased the TSR value to just below the minimum requirement for Superpave mixes.

As was mentioned before, the use of 1.5 percent hydrated lime was evaluated in two methods. First, 0.5 percent was added to the wet aggregate. This was performed to try and improve the adhesive failure exhibited in the previous trials. The remaining percent was added to the dry aggregate to possibly solve the cohesive failure seen in the previous trial as well. From the test results, this added amount of hydrated lime produced an acceptable TSR value. But the split addition process may possibly add unnecessary cost, so the 1.5 percent hydrated lime was evaluated again, but added all at once to the dry aggregate. Results indicated a decrease in TSR value to an unacceptable value.

Regarding the Sasobit®, Sasol recommended adding a liquid anti-stripping agent that has been commonly used in commercial paving applications. Kling Beta 2912 is manufactured by AKZO Nobel and is more commonly known as Magnabond. Additional TSR testing was conducted using Magnabond at a percentage of 0.4 by weight of binder. These test results are also included in Table 12. The results indicated a substantial increase in the TSR value, compared to the test results from the PG 64-22 binder with only Sasobit® added. The additional TSR testing using the liquid anti-stripping agent resulted in an acceptable value, based on Superpave requirements. However, the individual tensile strengths (both unsaturated and saturated) were substantially lower than the other strengths obtained.

Mead Westvaco developed an alternate formulation with different adhesion promoters for the limestone aggregate. The TSR tests were repeated using the bucket mixer as described previously using this alternate formulation. The unsaturated strength of the samples produced with the new formulation were 85.6 psi, and the saturated strength was 93.5 psi resulting in a TSR of 1.09. From the results, the resistance to moisture increased by approximately 50 percent compared to the original formulation. The conditioned samples exhibited no visible stripping, neither adhesive nor cohesive.

Hamburg Wheel-Tracking Device

To validate the TSR results, test samples were prepared and tested in the Hamburg wheel-tracking device. This device is used to predict moisture damage of hot mix asphalt. It also has been found to be sensitive to several factors, including asphalt cement stiffness, length of short-term aging, compaction temperature, and anti-stripping treatments (16). All these factors have previously been observed as possible problem areas in the evaluation of warm asphalt mixes, so the test results from the Hamburg wheel-tracking device may be vital in accurately establishing a good performing warm asphalt mix.

Test results from the Hamburg wheel-tracking device are presented in Table 13. Also included are the corresponding TSR values for each of the mix types. From these test results, the Hamburg test results varied in relation to the test results from the TSR testing. In some cases, the Hamburg confirmed the data determined from the TSR test (Evotherm), while in other cases the Hamburg data showed a decrease in the moisture resistance of a particular mix. This is mainly true for the mixes containing Sasobit®. The Hamburg test results also confirmed the conclusion that the mixture containing zeolite had a lower resistance to moisture than the control mixture. This is based on the stripping inflection point. When describing the stripping inflection point, it is the number of passes at which the deformation of the sample is the result of moisture damage and not rutting alone. Illustration of the stripping inflection point is shown in Figure 16. It is related to the resistance of the mix to moisture damage. The lower the stripping inflection point is an indication of a decrease in the resistance to moisture for an asphalt mix. Stripping inflection points over 10,000 cycles, in a general sense, represent good mixes.

Table 13. Hamburg Wheel Tracking Device Results

Aggregate	Mix Type	Treatment	Stripping Inflection Point, cycles	Rutting Rate, mm/hr	TSR
Granite	Control	None	6500*	1.841	1.16
Granite	Sasobit®	None	3975	2.961	0.71
Granite	Zeolite	None	3450	5.139	0.67
Granite	Evotherm	None	NA	1.708	0.96
Granite	Zeolite	1.5% Hydrated Lime 2 Stage Addition	8500*	1.912	0.87
Granite	Zeolite	1.5% Hydrated Lime All Added Dry	NA	0.687	0.75
Granite	Sasobit®	0.4% Magnabond	NA	0.164	0.94
Limestone	Control	None	2500	4.284	0.65
Limestone	Zeolite	None	1700	2.835	0.51
Limestone	Sasobit®	None	2900	3.976	0.91
Limestone	Evotherm	None	2550	3.178	0.62

Note: * individual sample did not have a stripping inflection point; reported value is average of 10,000 cycles and recorded stripping inflection point of second sample; NA = No stripping inflection point determined

The rutting rate determined from the Hamburg test results correlated well with the stripping inflection point; that as the inflection point increased, indicating an increase in moisture resistance, the rutting rate decreased. Rutting rate is defined as the slope of the secondary consolidation tangent, as seen in Figure 16. The addition of Sasobit® improved the rutting rate in all cases as compared to the control mixes, except for the granite aggregate using PG 64-22. This corresponds to the findings with the APA. The test results indicated that the addition of liquid anti-stripping agent in combination with Sasobit® produced the lowest rutting rate, which in turn will result in an added benefit of decreased rutting potential of asphalt mixes produced at lower operating temperatures.

The Hamburg results also indicated the split addition of 1.5 percent hydrated lime improved both the stripping inflection point and the rutting rate, when compared to the results with just zeolite added. In terms of rutting rate, this was an improvement of 63 percent. The addition of 1.5 percent dry lime resulted in no occurrence of a stripping inflection point 10,000 cycles and further improvement in the rutting rate.

The results from the Hamburg wheel-tracking device correlated well with the TSR values, validating the earlier claim that the addition of zeolite increased the potential for moisture damage. The Hamburg results for the addition of 1.5 percent dry lime indicate a mixture resistant to moisture susceptibility while

the TSR results were marginal. Generally, the Hamburg wheel-tracking test is considered to be the more accurate predictor of moisture damage as compared to the TSR test. Lime will also stiffen the binder (17), thus also providing a benefit in the rutting potential of warm mixtures that are compacted at a lower temperature (less than 250°F (121°C)).

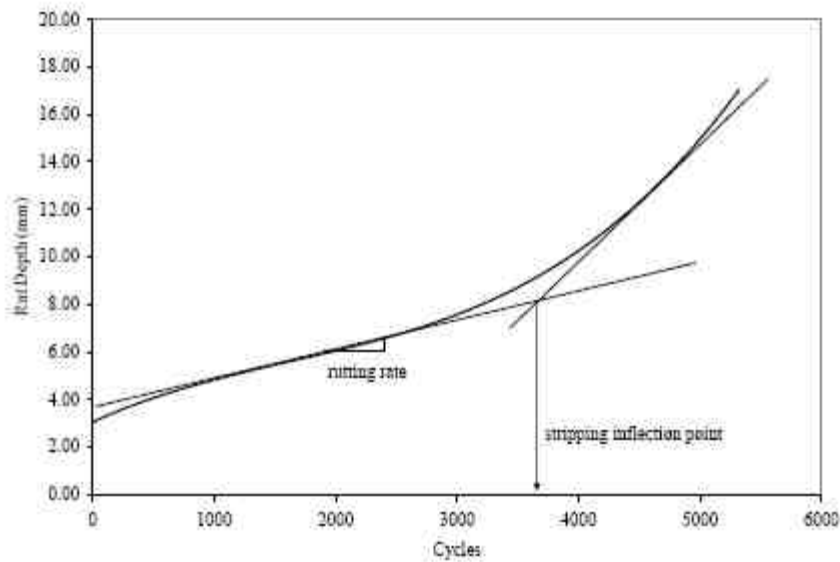


Figure 16. Hamburg Test Results, Defining Rutting Rate and Stripping Inflection Point

Conclusions

Based on the results from the lab testing using all three warm asphalt additives, the following conclusions were made:

- The gyratory compactor was not sensitive to the reduction in compaction temperature. Therefore, all test samples to simulate field compactability were compacted in the vibratory compactor.
- The addition of any warm mix processes lowers the measured air voids in the gyratory compactor. While this may indicate a reduction in the optimum asphalt content, at this time it is believed that additional research is required

and that the optimum asphalt content of the mixture determined without any additives included should be used. It should be noted that the optimum asphalt content of the mixture without the addition of any additive was used for all of the testing completed in this study.

- All processes improved the compactability of the mixtures in both the SGC and vibratory compactor. Statistics indicated an average reduction in air voids up to 0.77 percent for the Aspha-min® zeolite, 0.89 percent for the Sasobit®, and up to 1.53 percent for the Evotherm in the vibratory compactor. Improved compaction was noted at temperatures as low as 190°F (88°C) for all three additives.
- The addition of any warm mix process evaluated in this study does not affect the resilient modulus of an asphalt mix compared to mixtures having the same PG binder. Improved density improves the measured resilient modulus. Therefore, there would not be any effect on pavement thickness design when using warm asphalt mixes.
- The addition of Sasobit®, zeolite, or Evotherm does not increase the rutting potential of an asphalt mix. The rutting potential increased with decreasing mixing and compaction temperatures and this may be related more to the decreased aging of the binder. However, the mixes containing Sasobit® were less sensitive (in terms of rutting) to the decreased production temperatures than the control mixes were.
- The indirect tensile strengths for mixes containing Sasobit® were lower, in some cases, as compared to the control mixes. This reduction in tensile strength is believed to be related to the anti-aging properties of Sasobit® observed in the binder testing. Other laboratory tests (APA and Hamburg) indicated good rutting resistance for the mixes containing Sasobit®.
- There was no evidence of differing strength gain with time for the mixes containing any additives as compared to the control mixes. The addition of Aspha-min® or Evotherm may not require a cure time for the asphalt mixture prior to opening to traffic. Field data from Europe supports the fact that the addition of Sasobit® does not require a cure time for the asphalt mixture prior to opening to traffic, as well.

- The lower compaction temperature used when producing warm asphalt with any such warm mix additive may increase the potential for moisture damage. The lower mixing and compaction temperatures can result in incomplete drying of the aggregate. The resulting water trapped in the coated aggregate may cause moisture damage. Reduced tensile strength and visual stripping were observed in both the control and warm asphalt mixes produced at 250°F (121°C).
- Various anti-stripping agents were evaluated to mitigate the potential for moisture damage. Hydrated lime used with zeolite appeared to be effective with the granite aggregate. The addition of 1.5 percent hydrated lime resulted in improved cohesion and moisture resistance over the warm mixtures without hydrated lime. The addition of AKZO Nobel Magnabond (Kling Beta 2912) improved the TSR values to acceptable levels for the Sasobit®. An alternate Evotherm formulation provided good moisture resistance for the limestone aggregate.
- Hamburg wheel-tracking tests indicated good performance in terms of moisture susceptibility and rutting for the mixtures containing Sasobit® and Magnabond. Hamburg results also suggested the lime will also assist in the rutting resistance of warm mixtures with Aspha-min® compacted at lower temperatures due to the lime stiffening the asphalt binder.

Recommendations

Based on the research conducted to date, the following is recommended when using any warm mix additive to reduce hot mix asphalt production temperatures:

- The modified binder including Sasobit® needs to be engineered to meet the desired Performance Grade. As an example in this study, a PG 58-28 was used as the base asphalt with the addition of 2.5 percent Sasobit® to produce a PG 64-22.

- The optimum asphalt content should be determined without the addition of any warm mix additive. Additional samples should then be produced so the field target density can be adjusted (e.g. If the laboratory air void content with any additive included was decreased in the lab by 0.5 percent, then the field target density should be increased by 0.5 percent).
- Based on the compaction and rutting results, a minimum field mixing temperature of 275°F (135°C) and a minimum field compaction temperature of 250°F (121°C) is recommended. If the mixing temperature is below 275°F (135°C), then the high temperature grade should be bumped by one grade. Performance testing can be conducted to predict field performance. Field compaction will dictate the true minimum compaction temperature depending on a number of factors.
- Tensile strength ratio testing should be conducted at the anticipated field production temperatures. If test results determined are not favorable, anti-stripping agents should be added to the mix as an anti-stripping agent to increase the tensile strength ratio.
- More research is needed to further evaluate field performance, the selection of the optimum asphalt content, and the selection of binder grades for lower production temperatures.

Acknowledgements

The authors would like to thank Hubbard Construction Company, MeadWestvaco Asphalt Innovations, Sasol America, NAPA and FHWA for funding this study.

References

1. The Asphalt Pavement Association of Oregon, "Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit"; Centerline, The Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem, OR; Fall 2003.
2. Stroup-Gardiner, M and C. Lange. *Characterization of Asphalt Odors and Emissions*. Proceedings of the Ninth International Conference on Asphalt Pavements. Copenhagen, Denmark. August 2002.
3. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Warm Mix Technologies and Research. www.fhwa.dot.gov/pavement/wma.html. Accessed February 17, 2004.
4. Damm, K-W, J. Abraham, T. Butz, G. Hildebrand and G. Riebeschl. *Asphalt Flow Improvers as 'Intelligent Fillers' for Hot Asphalts – A New Chapter in Asphalt Technology*. In Journal of Applied Asphalt Binder Technology, April 2002, Pp 36-69.
5. U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration. "Warm Mix Technologies and Research". www.fhwa.dot.gov/pavement/wma.html. Accessed February 17, 2004.
6. Zhou, Z., Y. Zhang, J. W. Tierney and I. Wender. *Producing Fuels from Fischer-Tropsch Waxes*. In Petroleum Technology Quarterly, Winter 2004.
7. Butz, T., I. Rahimian, and G. Hildebrand. *Modifications of Road Bitumens with The Fischer-Tropsch Paraffin Sasobit®*. In Journal of Applied Asphalt Binder Technology, October 2001. Pp 70-86.
8. Brits, C. H. *Sasobit Investigation*. Report No. 100035/S9/2004/11/05/CHB/av/1, Geostrada Engineering Materials Laboratory, South Africa, 2004.
9. Sasol Wax. "Roads and Trials with Sasobit®" <http://www.sasolwax.com/data/sasolwax/Bitumen%20Modification/Roads%20and%20trials%20e.pdf> Accessed, May 13, 2005.
10. Bahia, H. U., and D. I. Hanson. "A Project NCHRP 9-10 Superpave Protocols for Modified Asphalt Binders," Draft Topical Report (Task 9), Prepared for National

- Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, May 2000.
11. Huner, M. H. and E. R. Brown, "Effects of Re-Heating and Compaction Temperature on Hot Mix Asphalt Volumetrics." NCAT Report No. 01-04, National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL, 2001.
 12. Lottman, R. P., "Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete," National Cooperative Highway Research Program Report 246, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1982.
 13. Huber, G. A., R. L. Peterson, J. A. Scherocman, J. D'Angelo, M. Anderson, and M. S. Buncher. *Determination of Moisture in Hot-Mix Asphalt and Relationship with Tender Mixture Behavior in the Laboratory*. Transportation Research Record 1813 Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D. C. 2002. Pp 95-102.
 14. Butz, T. "Sasobit®: Characterization of Properties and Effects on Binder and Asphalt", 41st Conference of the Association of Road and Traffic Engineers, Saxonia, Leizig, Germany, 2005.
 15. Schumann Sasol. "State Road, Piemont Italy." Product Information, Hamburg, November 2001.
 16. Aschenbrener, Tim. *Evaluation of Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot Mix Asphalt*, Transportation Research Record 1492 Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C. 1995. Pp 193-201.
 17. Little, D. and J. Epps "The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt." National Lime Association, 2001.

Appendix

Table A1. Test Results for Granite HMA

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	7.5	467,171	10.4
300	6.0	294,065	8.1
300	6.3	572,998	9.2
300	5.3	420,863	7.6
300	6.1	215,163	7.0
300	5.7	218,717	4.1
Average	6.2	364,830	7.7
Std Dev.	0.7	145,399	2.2
265	5.9	272,652	13.4
265	5.5	239,237	12.5
265	9.7	289,367	9.0
265	7.1	577,025	12.1
265	7.0	281,952	13.4
265	6.6	366,632	10.9
Average	7.0	337,811	11.9
Std Dev.	1.5	124,486	1.7
230	4.3	315,579	18.9
230	5.8	310,433	10.8
230	5.5	426,761	18.1
230	5.4	349,150	15.9
230	4.9	485,897	19.5
230	5.5	276,334	11.6
Average	5.2	360,692	15.8
Std Dev.	0.5	79,815	3.8

Table A2. Test Results for Granite WMA with Zeolite

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	5.0	687,767	10.1
300	5.6	682,167	11.7
300	5.8	487,386	13.8
300	5.2	433,168	15.5
300	4.7	529,635	10.4
300	4.4	477,301	5.9
Average	5.1	549,571	11.2
Std Dev.	0.5	109,286	3.3
265	5.7	509,675	10.6
265	5.2	272,691	15.1
265	5.7	543,764	14.3
265	6.2	280,185	12.9
265	7.1	290,417	22.0
265	7.2	254,065	15.8
Average	6.2	358,466	15.1
Std Dev.	0.8	131,313	3.9
230	6.8	401,439	12.8
230	6.5	169,512	9.8
230	6.2	320,211	14.1
230	5.0	596,461	8.9
230	5.9	300,014	13.9
230	5.6	458,273	17.8
Average	6.0	374,318	12.9
Std Dev.	0.6	146,646	3.2

Table A3. Test Results for Granite WMA with Sasobit

Compact Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	5.3	256,341	6.7
300	5.3	345,309	2.2
300	5.4	216,508	7.1
300	4.9	296,066	5.4
300	4.2	408,657	2.8
300	5.3	291,797	4.5
Average	5.1	302,446	4.8
Std Dev.	0.5	67,503	2.0
265	5.2	294,986	4.4
265	6.0	220,596	10.2
265	6.0	199,955	10.0
265	5.5	459,184	10.4
265	5.0	376,923	6.2
265	4.9	232,128	5.0
Average	5.4	297,295	7.7
Std Dev.	0.5	102,136	2.8
230	5.2	245,023	11.5
230	6.0	400,953	11.4
230	5.8	230,897	6.0
230	5.6	196,361	8.4
230	6.0	288,890	8.6
230	5.5	270,607	10.3
Average	5.7	272,122	9.4
Std Dev.	0.3	70,788	2.1

Table A4. Test Results for Granite WMA with Evotherm

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	4.0	494,925	6.4
300	4.1	255,852	7.0
300	4.1	325,132	8.4
300	3.2	398,841	6.7
300	4.1	422,122	8.6
300	4.1	471,223	7.7
Average	3.9	394,683	7.5
Std Dev.	0.4	90,320	0.9
265	5.0	396,105	6.4
265	5.8	721,394	7.0
265	5.1	302,279	4.8
265	5.1	252,856	8.6
265	5.6	264,369	8.3
265	5.5	502,908	9.3
Average	5.4	406,652	7.4
Std Dev.	0.3	180,682	1.7
230	5.7	305,878	10.1
230	6.9	256,110	12.3
230	5.3	286,165	14.7
230	4.5	364,771	10.1
230	4.5	360,688	16.6
230	4.5	230,165	13.6
Average	5.2	300,630	12.9
Std Dev.	1.0	54,599	2.6

Table A5. Test Results for Limestone HMA

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	8.0	298,143	5.4
300	7.1	327,752	7.8
300	6.6	497,695	7.8
300	7.7	295,254	6.8
300	8.2	396,668	10.4
300	8.4	420,900	5.9
Average	7.7	372,735	7.3
Std Dev.	0.7	80,123	1.8
265	7.3	337,083	5.7
265	7.5	435,035	4.1
265	7.4	287,729	6.3
265	7.3	337,065	10.1
265	7.5	338,496	10.6
265	7.2	303,359	5.7
Average	7.4	339,795	7.1
Std Dev.	0.1	51,236	2.6
230	7.7	398,798	7.6
230	7.3	222,463	5.0
230	7.7	302,232	9.9
230	7.5	316,623	8.7
230	7.1	454,714	16.1
230	7.4	390,027	14.4
Average	7.5	347,476	10.3
Std Dev.	0.2	83,153	4.2

Table A6. Test Results for Limestone WMA with Zeolit

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	6.1	478,491	4.4
300	6.5	350,333	3.9
300	5.7	475,634	8.3
300	5.7	666,245	7.4
300	5.2	322,710	2.9
300	5.3	604,166	2.1
Average	5.8	482,930	4.8
Std Dev.	0.5	135,372	2.5
265	7.2	418,459	6.7
265	5.9	309,849	5.7
265	6.9	329,377	4.5
265	6.3	315,048	9.8
265	6.0	378,661	7.3
265	6.3	324,986	12.5
Average	6.4	346,063	7.7
Std Dev.	0.5	43,127	2.9
230	6.1	434,645	10.9
230	6.3	282,399	13.0
230	5.9	278,984	7.8
230	6.6	378,760	5.2
230	6.3	205,147	9.6
230	6.4	206,560	7.4
Average	6.3	297,749	9.0
Std Dev.	0.2	92,500	2.8

Table A7. Test Results for Limestone WMA with Sasobit

Compact. Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	5.4	337,358	8.4
300	5.5	297,320	14.7
300	5.6	471,217	4.8
300	5.3	255,892	7.9
300	5.4	181,684	9.0
300	5.1	209,677	15.9
Average	5.4	292,191	10.1
Std Dev.	0.2	104,360	4.3
265	6.2	636,016	8.4
265	5.5	446,225	6.9
265	6.4	253,693	5.8
265	5.7	332,667	3.1
265	5.3	542,245	8.0
265	6.4	434,460	7.1
Average	5.9	440,884	6.5
Std Dev.	0.5	137,965	1.9
230	7.1	298,667	5.2
230	5.9	333,557	7.2
230	6.7	444,113	8.1
230	6.6	600,905	8.3
230	6.5	330,688	5.5
230	6.0	317,233	8.5
Average	6.5	387,527	7.1
Std Dev.	0.5	116,373	1.5

Table A8. Test Results for Limestone WMA with Evotherm

Compact Temp. °F	AVC Air Voids, %	Resilient Modulus, psi	APA Rut Depth, mm
300	4.8	347,682	2.4
300	4.8	563,202	5.1
300	4.7	271,011	3.2
300	4.5	537,561	4.3
300	4.2	375,629	4.3
300	4.3	337,883	5.1
Average	4.6	405,495	4.1
Std Dev.	0.3	117,647	1.1
265	5.7	310,068	9.0
265	5.2	279,233	6.9
265	5.4	410,908	4.4
265	5.3	538,571	4.6
265	5.4	430,599	6.7
265	5.7	336,251	8.2
Average	5.5	384,272	6.6
Std Dev.	0.2	95,404	1.9
230	6.5	435,817	14.0
230	6.0	453,508	12.2
230	6.4	716,368	6.1
230	6.0	379,249	11.3
230	5.9	352,414	11.5
230	6.6	424,074	6.9
Average	6.2	460,238	10.3
Std Dev.	0.3	130,948	3.1

Table A9. Indirect Tensile Strength (psi) as a Function of Aging Time

Granite	2 Hours	4 Hours	2 Hours + 1 Day	2 Hours + 3 Days	2 Hours + 5 Days
Control	102.6	121.5	67.4	98.6	94.3
Zeolite	116.4	118.2	72.2	103.0	87.0
Sasobit	47.5	59.8	65.3	54.7	91.0
Evotherm	104.4	136.3	60.5	102.6	130.5
Limestone	2 Hours	4 Hours	2 Hours + 1 Day	2 Hours + 3 Days	2 Hours + 5 Days
Control	132.1	110.5	83.2	82.9	74.9
Zeolite	115.6	111.5	77.6	89.7	80.5
Sasobit	113.8	111.7	37.7	57.3	100.4
Evotherm	76.9	105.1	72.2	71.4	91.0

제 7장 참고문헌

건설동향, "중온아스팔트포장-교토기후협약을 대비한 친환경적 포장", 건설기업정보, 2007년 6월, pp 32-33.

박태순, 정규동, 이홍재, 김명, 김윤수, "중온아스팔트 혼합물의 성능 및 특성연구", 한국도로학회 학술발표대회 논문집, 2007년 10월.

조신행, 전순제, 전준영, 류덕현, "중온형 아스팔트 콘크리트 특성연구", 한국도로학회 논문집, 제1권 1호, 2008년 3월

국토정책, "저탄소 녹색성장을 위한 교통정책 방향", 국토연구원 제 202호, 2008.11

J.W. Button, C. Estakhri, A. Wimsatt, "A Synthesis of Warm Mix Asphalt", Texas Transportation Institute, 2007. 4

G.C. Hurley and B.D. Prowell, "Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt", NCAT Report 05-06, 2005. 6.

Advanced Asphalt Technologies, "Performance Evaluation of High RAP Base Mixture Containing Sasobit," Advanced Asphalt Technologies, LLC, Sterling, VA, August 2005.

Advanced Asphalt Technologies, "Performance Evaluation of High RAP Surface Mixture Containing Sasobit," Advanced Asphalt Technologies, LLC, Sterling, VA, December 2005.

Andersen, E., "WAM Foam®: An Environmental Friendly Alternative to Hot Mix Asphalt." Norwegian Public Roads Administration, Norway, Presentation to WMA Scan Team, May 2007.

The Asphalt Pavement Association of Oregon, "Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit"; Centerline, The Asphalt Pavement Association of Oregon, Salem, OR, Fall 2003.

Australian Asphalt Pavement Association, "Frankfurt Takes Off from Asphalt," www.aapa.asn.au/docs/frankfurt.html

Barthel, W., Marchand, J., and Von Devivere, M., "Warm Mix Asphalt by Adding a Synthetic Zeolite," Proceedings of the Third Eurasphalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Eurasphalt, Breukelen, The Netherlands, 2004, Pp 1241-1249.

Berntsen, G. "NPRA's Experience with WAM Foam Pavements." Norwegian Public Roads Administration, Norway, Presentation to WMA Scan Team, May 2007.

Butz, T., Rahimian, I., and Hildebrand, G., "Modifications of Road Bitumens with the Fischer-Tropsch Paraffin Sasobit®," Journal of Applied Asphalt Binder Technology, Vol. 1, No. 2, October 2001, Pp. 70-86.

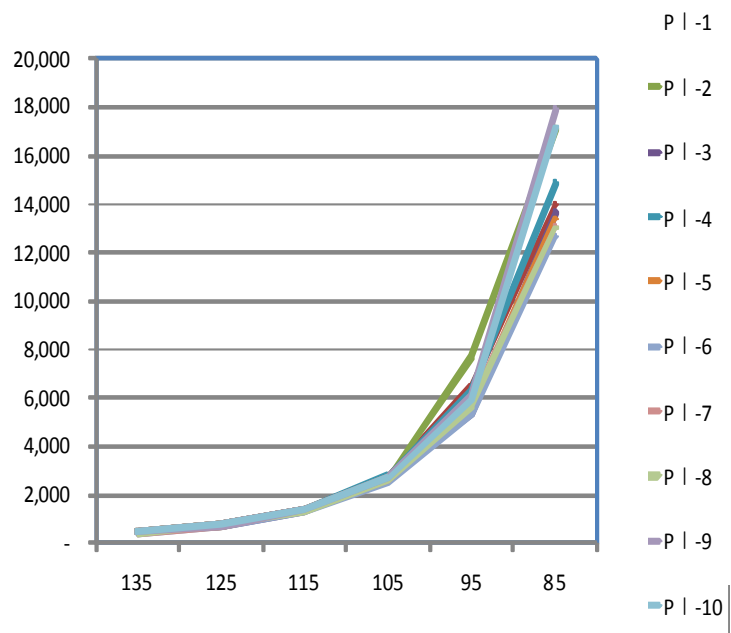
Butz, T., "Sasobit®: Characterization of Properties and Effects on Binder and Asphalt," 41st Conference of the Association of Road and Traffic Engineers, Saxonia, Leipzig, Germany, 2005.

제 8장 부록

제 1절 종류, 함량 및 온도에 따른 중온아스팔트 점도측정 데이터

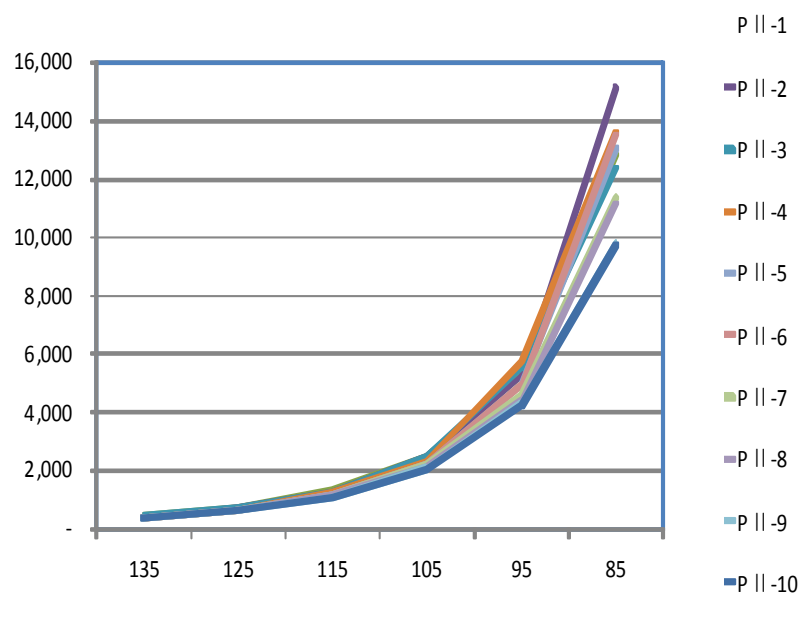
PI

	PI-0	PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PI-5	PI-6	PI-7	PI-8	PI-9	PI-10
?											
135	-	467	454	457	464	451	430	444	441	468	461
125	-	772	750	755	775	750	704	750	760	752	758
115	-	1,397	1,365	1,350	1,420	1,360	1,297	1,357	1,330	1,402	1,382
105	-	2,760	2,675	2,745	2,795	2,765	2,525	2,630	2,595	2,725	2,685
95	-	6,460	7,712	5,310	6,280	5,640	5,340	5,860	5,670	6,120	5,920
85	-	13,970	17,120	13,670	14,870	13,400	12,650	13,070	13,020	17,920	17,170



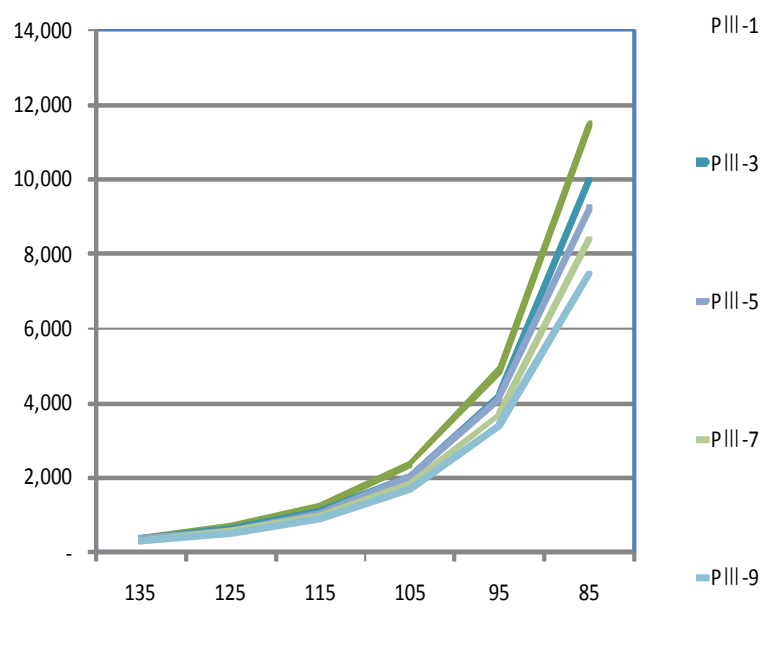
Р II

	Р II-0	Р II-1	Р II-2	Р II-3	Р II-4	Р II-5	Р II-6	Р II-7	Р II-8	Р II-9	Р II-10
135	-	434	424	428	414	412	402	392	381	376	376
125	-	720	700	711	686	667	654	654	637	621	620
115	-	1,302	1,242	1,287	1,247	1,157	1,172	1,157	1,157	1,102	1,092
105	-	2,500	2,460	2,495	2,345	2,235	2,230	2,250	2,135	2,095	2,070
95	-	5,290	5,240	5,510	5,740	4,980	4,910	4,580	4,385	4,290	4,230
85	-	12,870	15,120	12,370	13,600	13,050	13,520	11,360	11,170	9,783	9,750



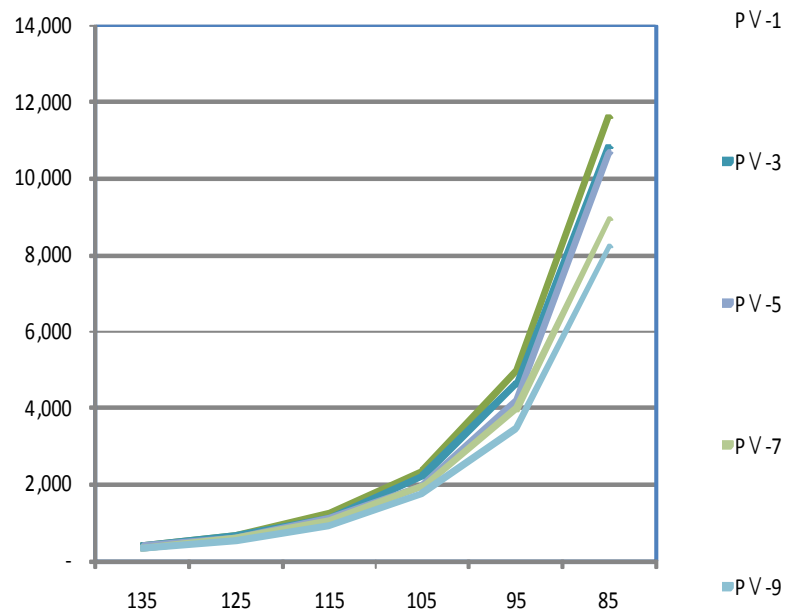
РІІІ

	РІІІ-0	РІІІ-1	РІІІ-2	РІІІ-3	РІІІ-4	РІІІ-5	РІІІ-6	РІІІ-7	РІІІ-8	РІІІ-9	РІІІ-10
?											
135	-	415	-	373	-	363	-	340	-	325	-
125	-	694	-	622	-	601	-	563	-	529	-
115	-	1,267	-	1,087	-	1,065	-	987	-	907	-
105	-	2,390	-	2,067	-	2,020	-	1,855	-	1,687	-
95	-	4,860	-	4,240	-	4,160	-	3,720	-	3,430	-
85	-	11,470	-	9,975	-	9,225	-	8,400	-	7,470	-



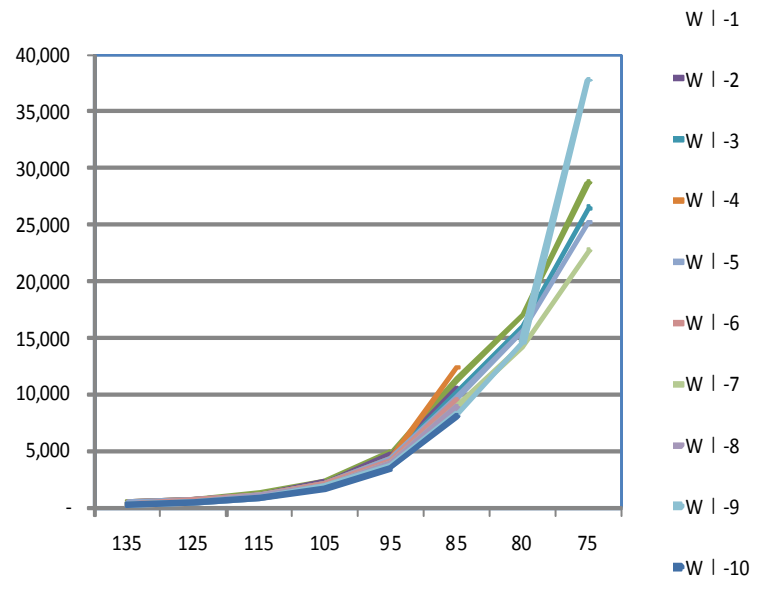
PV

	PV-0	PV-1	PV-2	PV-3	PV-4	PV-5	PV-6	PV-7	PV-8	PV-9	PV-10
135	-	408	-	390	-	366	-	354	-	332	-
125	-	664	-	650	-	607	-	586	-	531	-
115	-	1,227	-	1,127	-	1,082	-	1,047	-	947	-
105	-	2,370	-	2,235	-	1,982	-	1,932	-	1,780	-
95	-	4,960	-	4,610	-	4,190	-	3,975	-	3,470	-
85	-	11,620	-	10,820	-	10,670	-	8,940	-	8,220	-



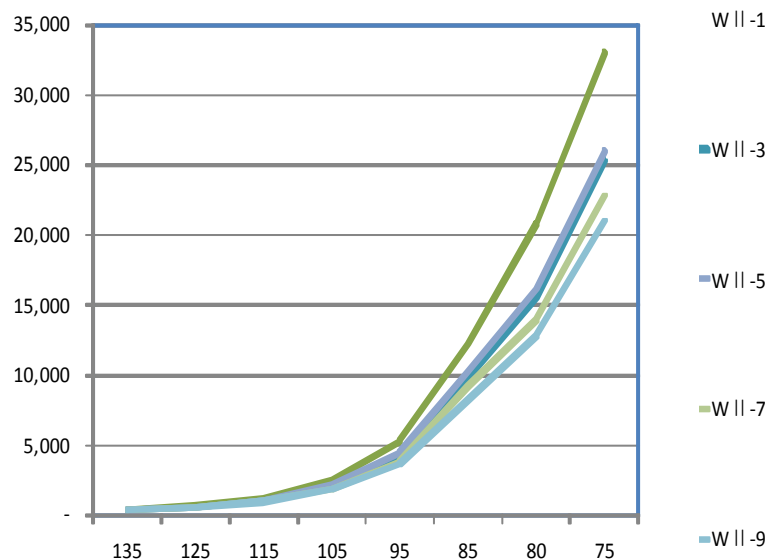
WI

	WI -0	WI -1	WI -2	WI -3	WI -4	WI -5	WI -6	WI -7	WI -8	WI -9	WI -10
135	-	399	385	366	379	373	362	362	362	334	329
125	-	661	645	626	607	620	596	577	576	556	547
115	-	1,197	1,155	1,110	1,102	1,115	1,045	1,027	1,007	947	957
105	-	2,265	2,195	2,092	2,037	2,095	1,992	1,897	1,907	1,822	1,762
95	-	4,810	4,620	4,295	4,340	4,380	4,155	3,965	3,865	3,730	3,595
85	-	11,270	10,500	10,220	12,370	9,725	9,475	8,975	8,875	8,250	8,075
80	-	17,020	-	16,050	-	15,600	-	14,300	-	14,600	-
75	-	28,700	-	26,450	-	25,250	-	22,650	-	37,750	-



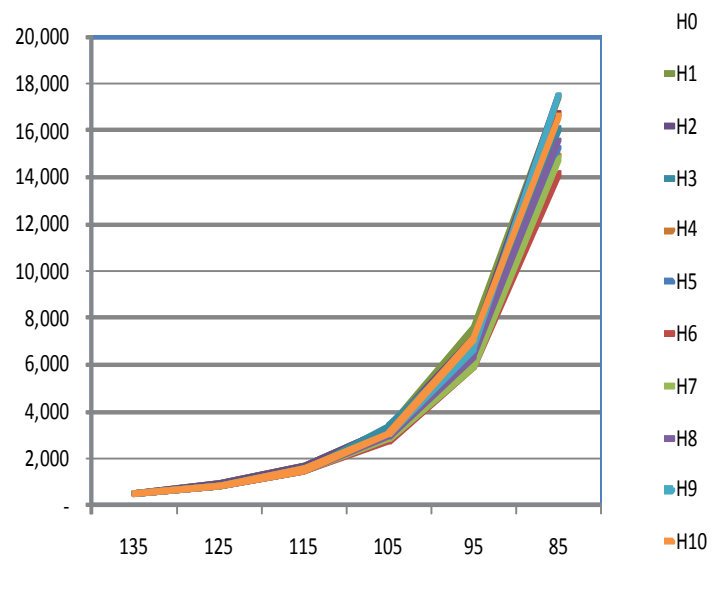
WII

	WII-0	WII-1	WII-2	WII-3	WII-4	WII-5	WII-6	WII-7	WII-8	WII-9	WII-10
135	-	418	-	376	-	381	-	358	-	335	-
125	-	705	-	617	-	634	-	588	-	550	-
115	-	1,270	-	1,095	-	1,122	-	1,032	-	967	-
105	-	2,460	-	2,085	-	2,145	-	1,930	-	1,807	-
95	-	5,370	-	4,220	-	4,480	-	3,925	-	3,715	-
85	-	12,250	-	9,775	-	10,270	-	9,275	-	8,275	-
80	-	20,850	-	15,520	-	16,200	-	14,020	-	12,870	-
75	-	33,050	-	25,350	-	26,050	-	22,850	-	21,050	-

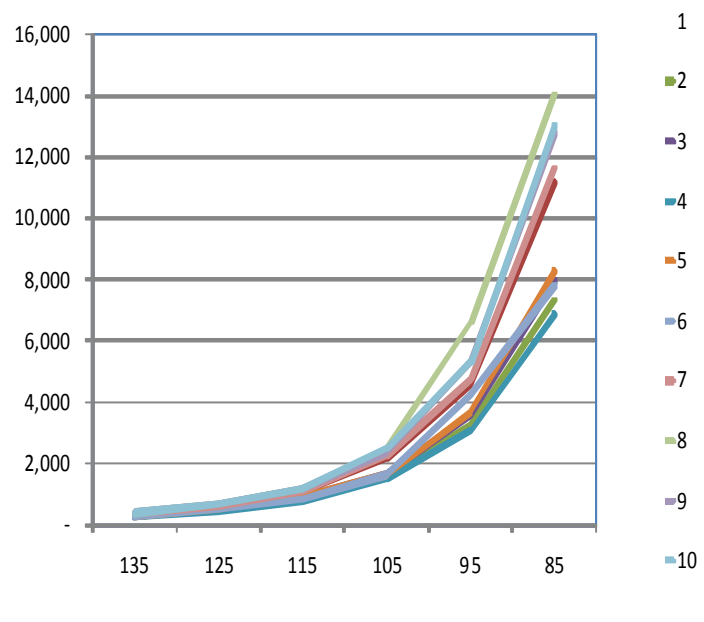


H

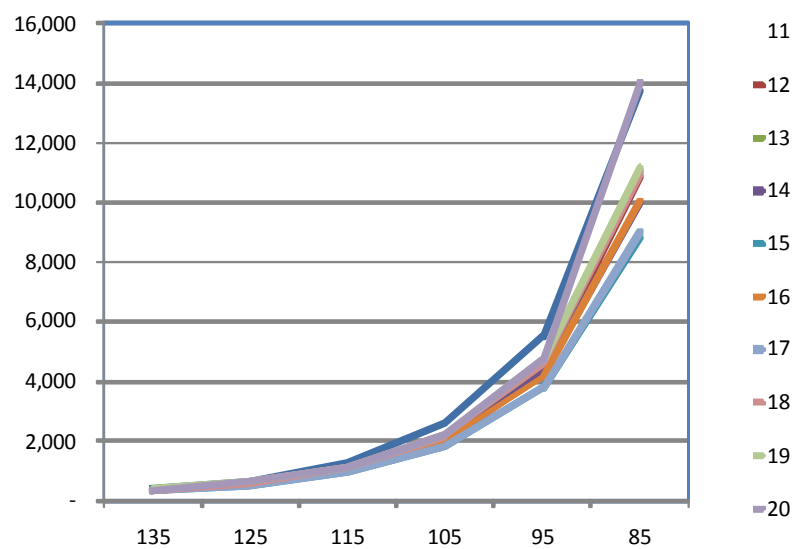
	H0	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10
135	519	520	523	505	474	470	461	480	492	502	506
125	871	905	886	843	806	786	777	787	814	857	841
115	1,625	1,655	1,642	1,515	1,467	1,437	1,417	1,427	1,485	1,550	1,512
105	3,230	3,285	3,245	3,355	2,875	2,825	2,760	2,805	2,915	3,065	3,080
95	7,430	7,600	7,130	6,812	6,200	6,180	5,950	5,940	6,410	6,720	7,130
85	16,720	17,370	17,500	16,070	14,920	15,270	14,120	14,770	15,570	17,520	16,620



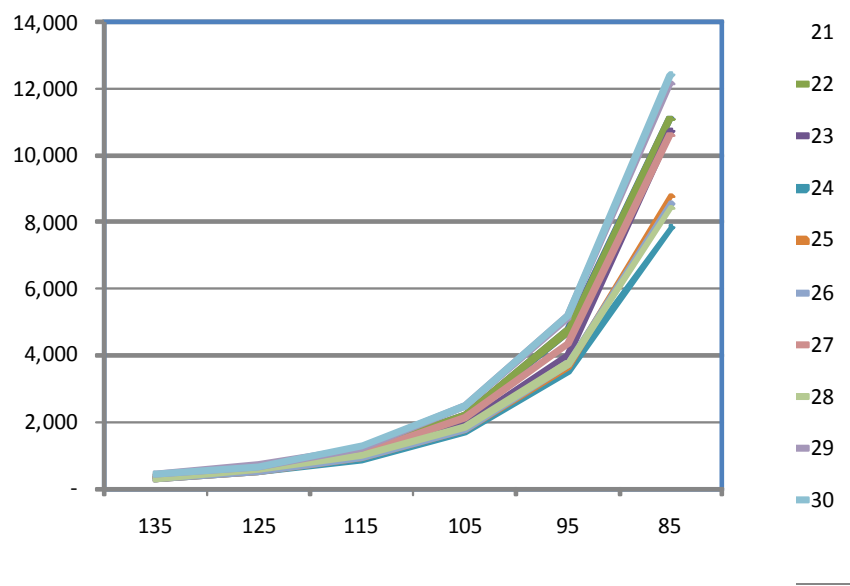
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
?										
135	370	294	305	279	320	306	381	392	394	392
125	623	484	514	461	531	499	635	661	665	667
115	1,132	950	895	806	952	871	1,092	1,202	1,212	1,217
105	2,175	1,597	1,707	1,502	1,642	1,642	2,232	2,455	2,380	2,465
95	4,530	3,265	3,575	3,065	3,685	4,240	4,760	6,620	5,340	5,310
85	11,170	7,340	7,980	6,860	8,270	7,820	11,620	14,020	12,770	13,020



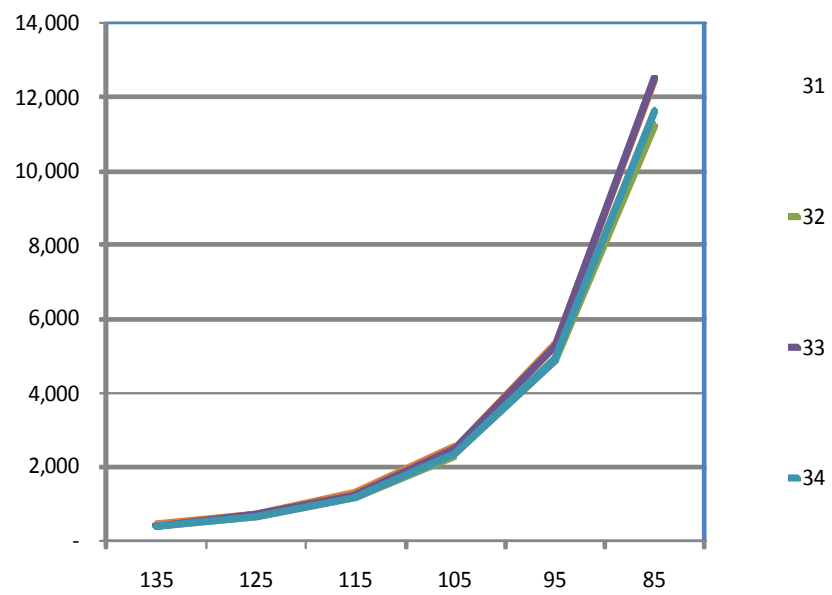
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
135	399	353	337	341	320	349	319	363	386	363
125	676	590	566	577	525	575	534	607	624	617
115	1,272	1,072	1,022	1,020	957	1,047	952	1,107	1,122	1,085
105	2,625	2,075	1,945	1,987	1,797	2,007	1,822	2,170	2,205	2,195
95	5,490	4,360	4,610	4,240	3,765	4,130	3,745	4,570	4,710	4,700
85	13,720	10,870	11,100	9,975	8,825	10,050	9,025	10,970	11,170	14,020



	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
135	371	374	327	305	316	330	370	339	411	411
125	633	627	557	508	524	547	598	557	696	665
115	1,142	1,142	992	877	947	962	1,072	987	1,237	1,262
105	2,230	2,235	1,905	1,705	1,775	1,805	2,140	1,855	2,485	2,465
95	4,750	4,730	3,990	3,550	3,680	3,730	4,360	3,750	5,170	5,210
85	11,120	11,100	10,720	7,825	8,775	8,550	10,620	8,425	12,170	12,420

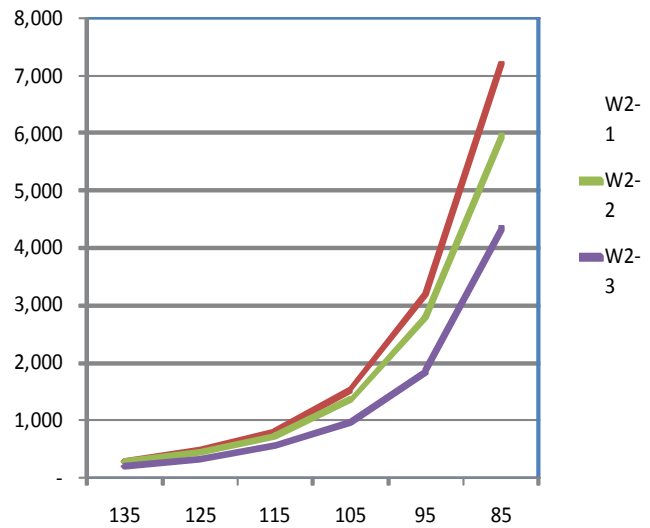


	31	32	33	34						
135	432	405	424	405						
125	722	664	714	670						
115	1,297	1,217	1,262	1,207						
105	2,525	2,315	2,515	2,345						
95	5,290	4,890	5,280	4,930						
85	12,470	11,220	12,520	11,620						



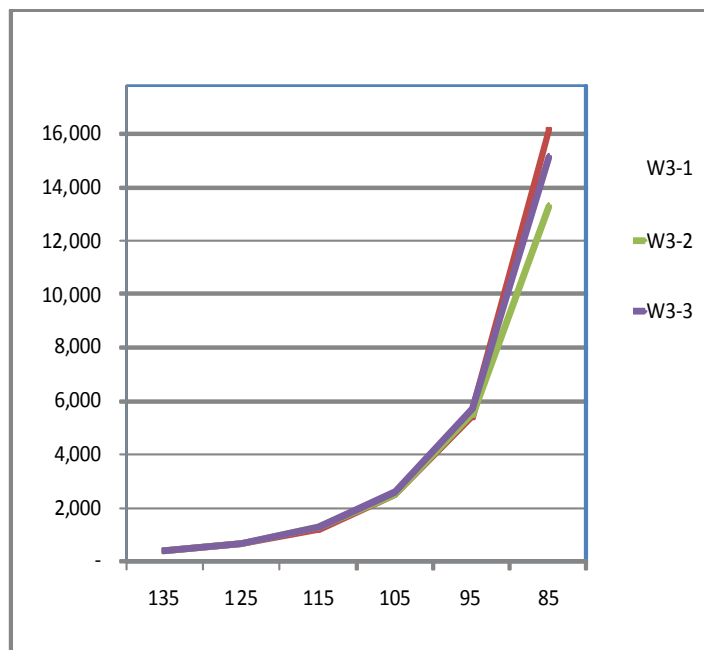
W2

	W2-1	W2-2	W2-3
?			
135	277	272	188
125	466	425	328
115	810	724	547
105	1,537	1,347	962
95	3,195	2,805	1,865
85	7,210	5,950	4,330



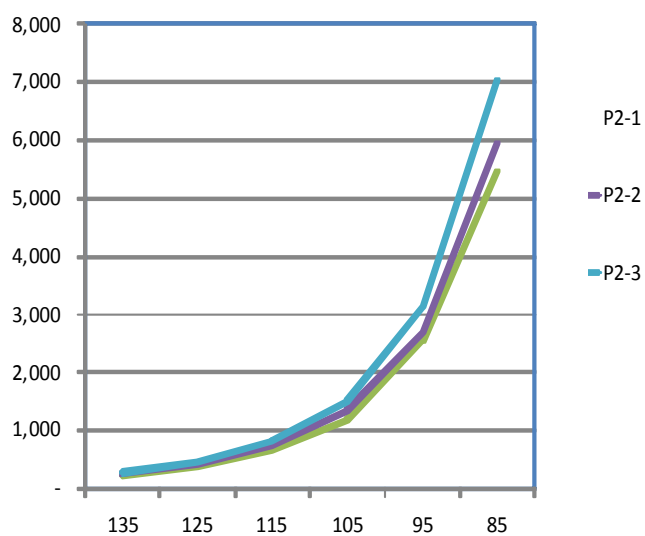
W3

	W3-1	W3-2	W3-3
?			
135	377	401	404
125	641	680	699
115	1,217	1,272	1,267
105	2,485	2,505	2,585
95	5,360	5,470	5,690
85	16,150	13,270	15,120



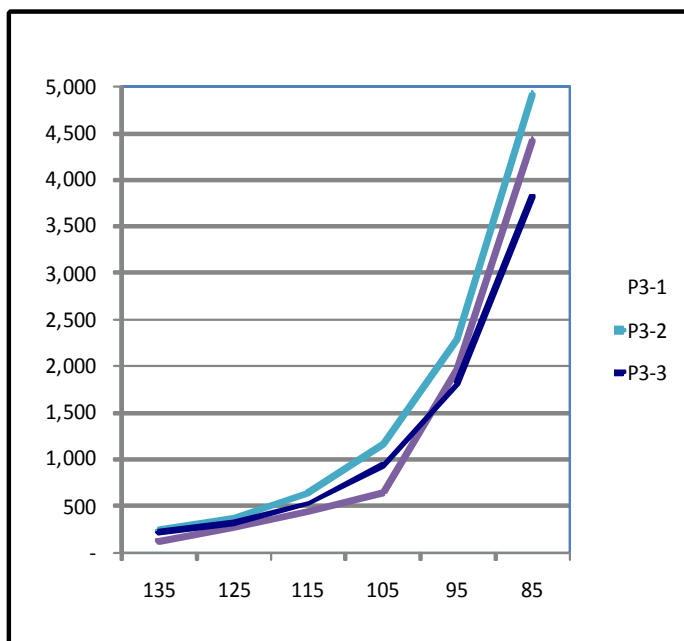
P2

	P2-1	P2-2	P2-3
?			
135	232	257	285
125	375	427	467
115	647	732	808
105	1,185	1,347	1,512
95	2,530	2,685	3,125
85	5,470	5,940	7,030



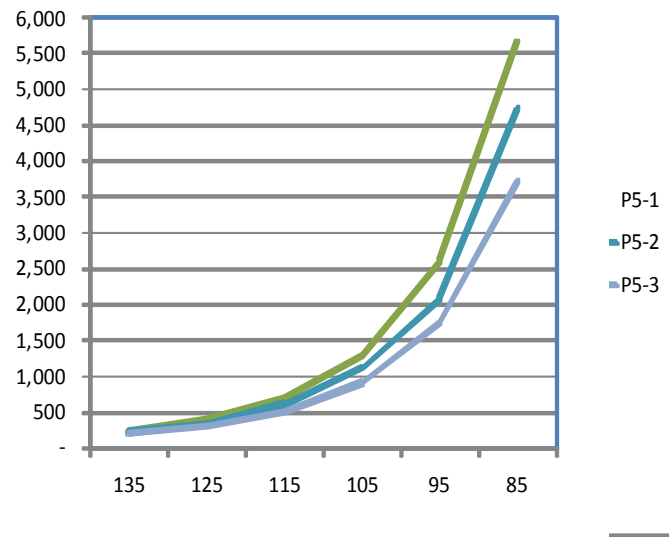
P3

	P3-1	P3-2	P3-3
?			
135	127	236	217
125	279	376	324
115	450	641	529
105	652	1,167	935
95	1,967	2,285	1,822
85	4,415	4,910	3,820



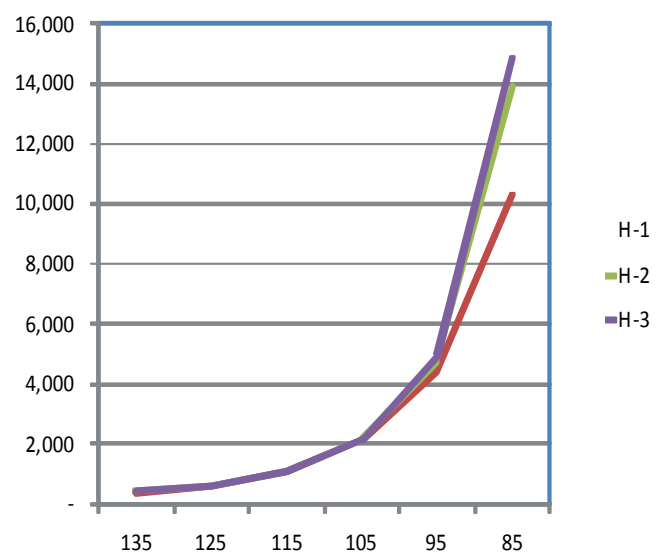
P5

	P5-1	P5-2	P5-3
?			
135	250	227	194
125	404	353	307
115	699	617	514
105	1,295	1,117	915
95	2,615	2,087	1,765
85	5,670	4,730	3,710



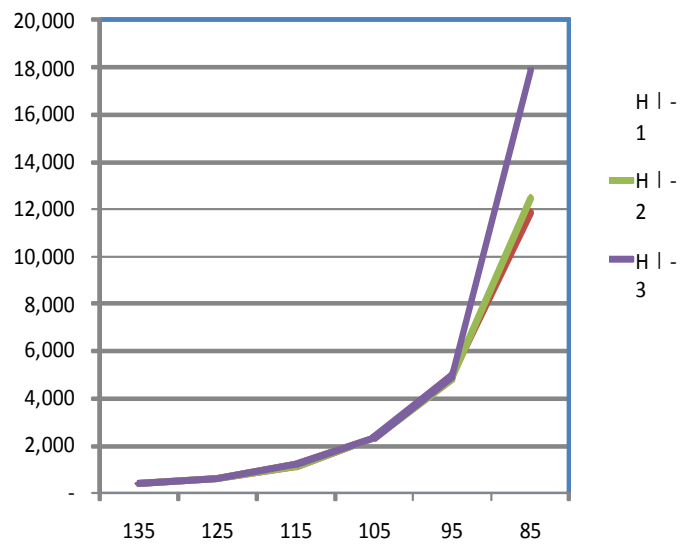
H

	H-1	H-2	H-3
?			
135	374	465	438
125	600	641	620
115	1,065	1,117	1,075
105	2,115	2,185	2,125
95	4,410	4,770	4,930
85	10,300	13,920	14,870



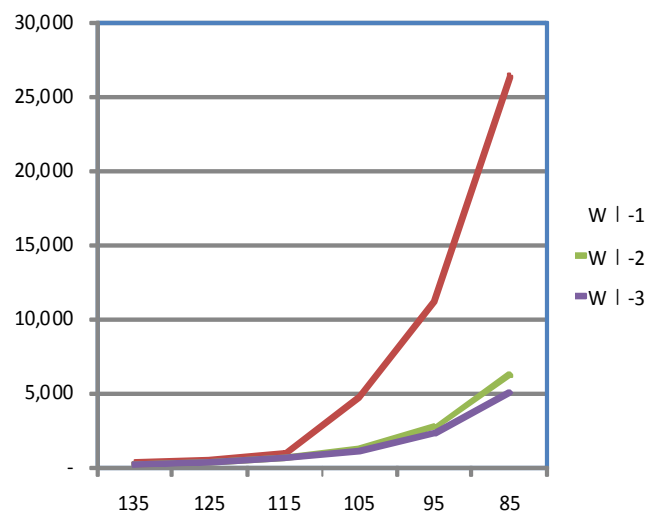
HI

	HI-1	HI-2	HI-3
?			
135	376	367	375
125	638	630	637
115	1,160	1,157	1,180
105	2,345	2,315	2,285
95	4,950	4,870	4,950
85	11,870	12,470	17,870



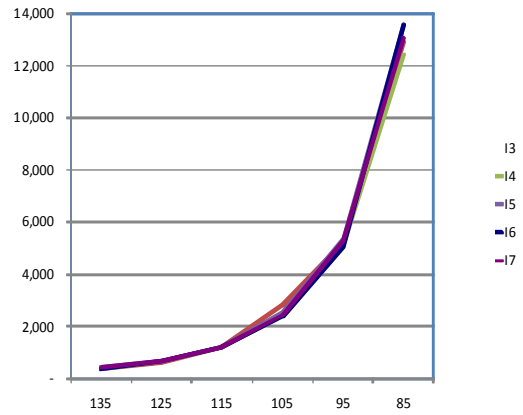
WI

	WI-1	WI-2	WI-3
?			
135	295	258	232
125	486	419	374
115	912	718	642
105	4,800	1,332	1,177
95	11,250	2,745	2,405
85	26,350	6,230	5,060



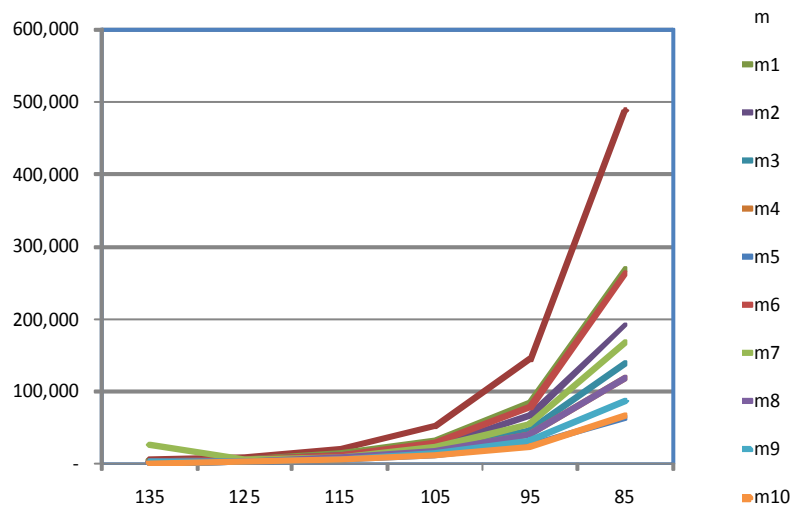
I

	I3	I4	I5	I6	I7
135	383	390	405	388	406
125	639	665	685	649	677
115	1,197	1,225	1,222	1,195	1,202
105	2,805	2,375	2,510	2,365	2,425
95	5,220	5,090	5,310	5,070	5,290
85	12,920	12,420	13,570	13,570	13,070



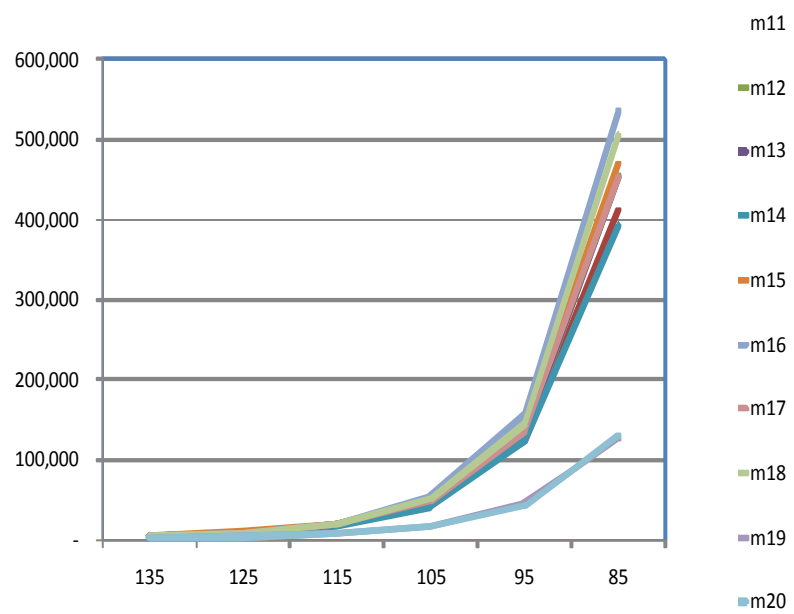
개질

8.5	m	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8	m9	m10
135	5,560	3,360	2,680	2,072	1,842	1,760	2,860	25,560	1,895	1,820	1,540
125	9,980	6,637	5,062	3,925	3,415	3,160	5,600	4,780	3,485	3,420	2,690
115	21,320	14,320	10,620	8,300	7,287	6,120	12,120	9,440	7,430	6,600	5,320
105	51,680	32,400	23,970	18,470	16,220	12,320	29,250	21,880	16,520	13,400	11,270
95	144,000	84,370	66,120	46,250	40,550	25,920	78,500	54,700	40,950	31,800	24,500
85	487,500	269,500	192,000	139,700	117,500	65,120	263,000	168,000	119,700	86,700	66,300



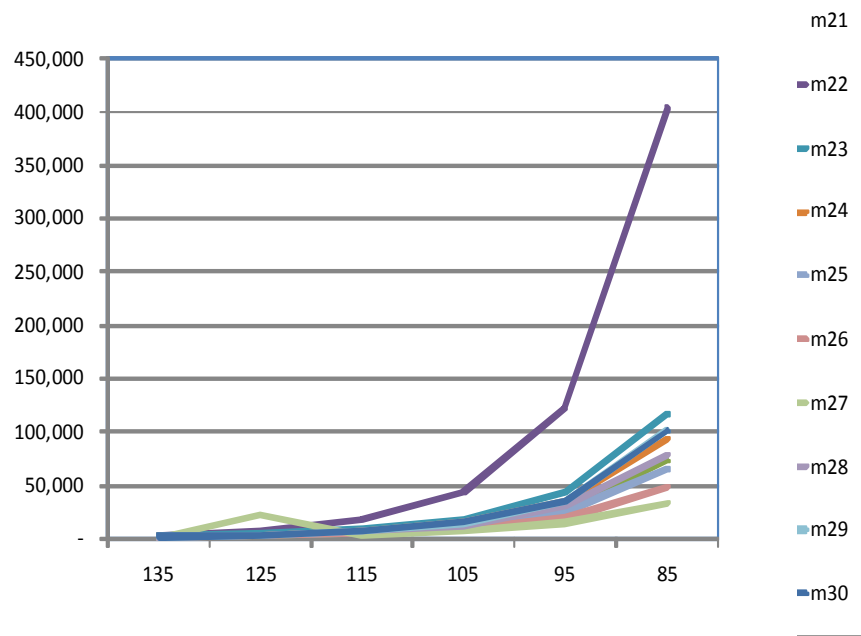
개질

	m	m11	m12	m13	m14	m15	m16	m17	m18	m19	m20
?											
135	5,560	4,480	4,400	4,480	3,710	5,040	4,445	4,920	4,225	2,140	2,280
125	9,980	8,700	8,820	8,540	7,687	9,640	9,212	9,320	8,670	3,940	4,040
115	21,320	19,360	19,560	19,240	16,920	20,480	20,920	19,960	19,370	7,820	8,250
105	51,680	47,500	48,300	48,000	41,450	50,960	54,520	48,720	51,100	17,840	18,170
95	144,000	124,000	127,000	131,000	123,000	139,000	156,200	136,000	144,700	44,900	41,950
85	487,500	412,000	454,000	453,000	392,000	470,000	535,000	453,000	505,000	126,000	129,500



개질

	m	m21	m22	m23	m24	m25	m26	m27	m28	m29	m30
?											
135	5,560	1,920	3,735	2,500	2,080	1,740	1,540	1,430	1,950	2,160	2,155
125	9,980	3,300	7,740	4,450	3,645	3,080	2,560	22,445	3,285	3,860	3,680
115	21,320	6,140	17,770	8,560	7,260	5,720	4,760	3,815	6,430	7,480	7,240
105	51,680	12,160	44,100	17,620	15,320	11,300	9,040	7,150	11,470	15,040	15,470
95	144,000	26,840	123,200	44,200	35,450	25,760	19,280	14,750	30,700	34,680	36,050
85	487,500	72,900	404,000	117,000	93,750	65,100	48,700	33,750	78,900	101,000	100,700



개질

	일반 1	일반 2	일반 3	일반 4	일반 5
?					
135	212	197	275	284	483
125	332	308	438	450	742
115	553	514	731	775	1267
105	977	892	1322	1427	2465
95	1742	1057	2595	2855	5290
85	3805	3325	5570	6250	12450
75	9220	7780	14750	15770	36250

개질

	개질 6	개질 7	개질 8	개질 9	개질 10	개질 11	개질 12
?							
135	585	1265	540	1120	2480	980	2080
125	1502	1925	1350	2020	3000	156	3780
115	2745	3215	2460	3660	5880	2880	7540
105	5420	6280	4500	7360	12040	5580	16980
95	11220	13570	9480	15420	28400	11900	48700
85	26100	32450	21960	42800	75200	29640	290800
75	67900	87800	56200	121000	268000	84000	589000

제 2절 중온아스팔트 혼합물 밀도와 마찰안정도 데이터

개질아스팔트 혼합물 시편의 시험분석 노트

(1) 밀도 (g/cm³)											KS F 2446 : 2000				
항목 시료번호	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)	이론최대 밀도(g/cm³)	아스팔트 트체적	아스팔트 트체적(cm³)	아스팔트 밀도 (g/cm³)					
	건조질량	수중질량	표건질량	측정값	측정값평균										
1-1	1100.10	641.46	1116.04	2.31805		2.311095	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-					
1-2	1093.09	636.04	1112.68	2.29332		2.286444	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-					
1-3	1093.80	637.78	1109.09	2.32077		2.313803		#DIV/0!	#DIV/0!						
1-4	1093.67	639.57	1099.63	2.37723		2.370102		#DIV/0!	#DIV/0!						
1-5	1095.21	639.78	1100.01	2.37970		2.372562		#DIV/0!	#DIV/0!						
					2.33781	2.33080 2.33		#DIV/0!							

(2) 안정도 (N)							KS F 2349 : 2010		
항목 시료번호	아스팔트 함량 (%)	공시체 부 (cm³)	안 정 도				공극률 (%)	공극률 (cm³)	골재 간극률(%)
			측정값 (N)	보정계 수	계산값	계산값 평			
1-1	-	474.58	9153.9	1.04	9520.056	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1-2	-	476.64	10193.3	1.00	10193.3	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1-3	-	471.31	12999.9	1.04	13519.896	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1-4	-	460.06	14738.4	1.09	16064.856	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
1-5	-	460.23	19038.4	1.14	21703.776	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
						11077.751 11078	#DIV/0!		#DIV/0!

■ 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006												
항목 번호	측 정 값					체적당 함수량 (%)	공 시			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)
	1 회	2 회	3 회	4 회	평 균		건 질	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평	
1-1	61.84	61.56	61.74	61.68	61.7050	3.36	-	-	-	-	-	
1-2	62.81	63.20	62.92	63.15	63.0200	4.11	-	-	-	-	-	
1-3	62.06	62.58	62.15	62.33	62.2800	3.24	-	-	-	-	-	-
1-4	59.74	59.65	59.59	59.69	59.6675	1.30	-	-	-	-	-	-
1-5	59.11	59.33	59.21	59.26	59.2275	1.04	-	-	-	-	-	-

(3) 흐름값 (1/100cm)							KS F 2349 : 2010	
1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	평균	흐름값		
61.92	43.26	25.26	38.28	22.2	38.18	38		

(4) 공극률 (%)		KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!		

(5) 포화노 (%)		KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!		

개질 중온아스팔트 혼합물 시편의 시험분석 노트

(1) 밀도 (g/cm³) KS F 2446 : 2000										
항목 시료번호	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)	이론최대 밀도(g/cm³)	아스팔트 체적	아스팔트 체적 (cm³)	아스팔트 밀도 (g/cm³)
	건조질량	수중질량	표건질량	측정값	측정값평균					
2-1	1106.29	645.06	1108.64	2.38641		2.379247	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
2-2	1109.78	647.64	1111.65	2.39172		2.384541	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
2-3	1114.50	634.17	1103.45	2.37491		2.36779		#DIV/0!	#DIV/0!	
2-4	1103.01	642.26	1106.02	2.37841		2.371272		#DIV/0!	#DIV/0!	
2-5	1102.16	646.11	1103.62	2.40904		2.401813		#DIV/0!	#DIV/0!	
					2.38810	2.38093 2.38		#DIV/0!		

(2) 안정도 (N) KS F 2349 : 2010									
항목 시료번호	아스팔트 함 량 (%)	공시체 부 피 (cm³)	안 정 도 (N)				공극률 (%)	공극률 (cm³)	골재 간극률(%)
			측정값(N)	보정계 수	계산값	계산값 평 균			
2-1	-	463.58	11046.0	1.14	12592.44	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2-2	-	464.01	13338.9	1.14	15206.346	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2-3	-	469.28	12295.3	1.09	13401.877	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2-4	-	463.76	14580.6	1.09	15892.854	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2-5	-	457.51	14140.1	1.19	16826.719	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
						13733.554 13734	#DIV/0!		#DIV/0!

(3) 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006												
항목 번호	측 정 값 (mm)					체적당 함수량 (%)	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)
	1 회	2 회	3 회	4 회	평 균		건 조 질 량	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평 균	
2-1	58.94	58.83	58.99	58.85	58.9025	0.51	-	-	-	-	-	
2-2	58.72	58.78	58.73	58.85	58.7700	0.40	-	-	-	-	-	
2-3	60.61	60.83	60.72	60.78	60.7350	-2.35	-	-	-	-	-	-
2-4	60.47	60.04	60.36	60.28	60.2875	0.65	-	-	-	-	-	-
2-5	58.01	58.00	58.05	58.15	58.0525	0.32	-	-	-	-	-	-

(3) 흐름값 (1/100cm) KS F 2349 : 2010						
2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	평균	흐름값
56.23	49.56	40.16	39.8	48.16	46.78	47

(4) 공극률 (%) KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!

(5) 포화도 (%) KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!

가열아스팔트 혼합물 시편의 시험분석 노트

KS F 2446 : 2000									
공			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)	이론최대 밀도(g/c	아스팔트 체적	아스팔트 체적(cm³	아스팔트 밀도 (g/cm³)
건조질량	수중질량	표건질량	측정값	측정값 평균					
1097.17	639.98	1101.57	2.37694		2.369805	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
1091.01	635.62	1097.48	2.36221		2.355123	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
1093.30	644.81	1094.20	2.43285		2.425555		#DIV/0!	#DIV/0!	
1090.38	638.69	1094.09	2.39433		2.387152		#DIV/0!	#DIV/0!	
1090.35	642.66	1091.36	2.43002		2.42273		#DIV/0!	#DIV/0!	
				2.39927	2.39207		#DIV/0!		
					2.39				

KS F 2349 : 2010						KS F 2349 : 2010		
아스팔트 함량 (%)	공시체 부 (cm³)	측정값(N)	보정계수	계산값	계산값 평균	공극률 (%)	공극률 (cm³	골재 간극률(%)
-	461.59	6403.3	1.14	7300	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
-	461.86	8428.3	1.09	9187	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
-	449.39	9585.4	1.19	11407	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
-	455.40	9536.3	1.09	10395	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
-	448.70	10330.6	1.19	12293	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
					9297.745	#DIV/0!		#DIV/0!
					9298			

■ 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006

측				체적당 함수량 (%)	공 시			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)
2 회	3 회	4 회	평 균		건 질	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평균	
59.08	59.12	59.11	59.1175	0.95	-	-	-	-	-	
60.15	60.18	60.13	60.1425	1.40	-	-	-	-	-	
57.00	56.66	56.49	56.6350	0.20	-	-	-	-	-	-
59.58	59.60	59.63	59.6050	0.81	-	-	-	-	-	-
57.21	57.33	57.42	57.3750	0.23	-	-	-	-	-	-

KS F 2349 : 2010

3-1	3-2	3-3	3-4	3-5	평균	흐름값
57	45.22	45.28	49.74	48.44	49.22	49

#DIV/0! #DIV/0!

#DIV/0! #DIV/0!

KS F 2349 : 2010

KS F 2349 : 2010

중온-I 아스팔트 혼합물 시편의 시험분석 노트

(1) 밀도 (g/cm³) KS F 2446 : 2000										
항목 시료번호	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)	이론최대 밀도 (g/cm³)	아스팔트 체적	아스팔트 체적 (cm³)	아스팔트 밀도 (g/cm³)
	건조질량	수중질량	표견질량	측정값	측정값평균					
4-1	1096.11	639.03	1106.82	2.34317		2.336137	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
4-2	1084.48	629.47	1094.32	2.33297		2.325969	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
4-3	1101.11	638.57	1104.79	2.36178		2.354697		#DIV/0!	#DIV/0!	
4-4	1106.02	648.05	1106.94	2.41021		2.402977		#DIV/0!	#DIV/0!	
4-5	1093.45	645.64	1094.82	2.43432		2.427022		#DIV/0!	#DIV/0!	
					2.37649	2.36936		#DIV/0!		
						2.37				

(2) 안정도 (N) KS F 2349 : 2010									
항목 시료번호	아스팔트 함 량 (%)	공시체 부 피 (cm³)	안 정 도 (N)				공극률 (%)	공극률 (cm³)	골재 간극률 (%)
			측정값 (N)	보정계수	계산값	계산값 평 균			
4-1	-	467.79	4010.7	1.09	4371.663	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
4-2	-	464.85	6383.7	1.14	7277.418	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
4-3	-	466.22	6241.5	1.09	6803.235	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
4-4	-	458.89	7383.9	1.14	8417.646	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
4-5	-	449.18	10286.5	1.19	12240.94	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
						6150.772			
						6151			

■ 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006

항목 번호	측 정 값 (mm)					체적당 함수량 (%)	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)
	1 회	2 회	3 회	4 회	평 균		건 조 질 량	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평 균	
4-1	60.41	60.53	60.48	60.43	60.4625	2.29	-	-	-	-	-	
4-2	58.88	59.28	58.91	59.13	59.0500	2.12	-	-	-	-	-	
4-3	60.09	60.77	60.35	60.48	60.4225	0.79	-	-	-	-	-	-
4-4	57.94	58.28	58.11	58.19	58.1300	0.20	-	-	-	-	-	-
4-5	56.47	56.76	56.52	56.63	56.5950	0.31	-	-	-	-	-	-

(3) 흐름값 (1/100cm) KS F 2349 : 2010						
4-1	4-2	4-3	4-4	4-5	평균	흐름값
71.68	62.4	48.24	56.88	47.52	57.34	57

(4) 공극률 (%)

#DIV/0!
#DIV/0!

KS F 2349 : 2010

(5) 포화도 (%)

#DIV/0!
#DIV/0!

KS F 2349 : 2010

중온-II 아스팔트 혼합물 시편의 시험분석 노트

(1) 밀도 (g/cm³) KS F 2446 : 2000										
항목 시료번호	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)	이론최대 밀도(g/cm³)	아스팔트 체적	아스팔트 체적(㎤)	아스팔트 밀도 (g/cm³)
	건조질량	수중질량	표건질량	측정값	측정값 평균					
5-1	1090.61	636.78	1092.72	2.39200		2.384827	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
5-2	1102.54	647.56	1103.40	2.41870		2.411443	-	#DIV/0!	#DIV/0!	-
5-3	1042.52	612.33	1042.94	2.42103		2.413768		#DIV/0!	#DIV/0!	
5-4	1079.96	636.73	1080.46	2.43382		2.426521		#DIV/0!	#DIV/0!	
5-5	1009.42	597.35	1009.83	2.44720		2.439856		#DIV/0!	#DIV/0!	
					2.42255	2.41528 2.42		#DIV/0!		

(2) 안정도 (N) KS F 2349 : 2010									
항목 시료번호	아스팔트 함 량 (%)	공시체 부 피 (cm³)	안 정 도 (N)				공극률 (%)	공극률 (cm³)	골재 간극률(%)
			측정값(N)	보정계수	계산값	계산값 평균			
5-1	-	455.94	7255.3	1.14	8271	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
5-2	-	455.84	7299.2	1.19	8686	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
5-3	-	430.61	6955.3	1.32	9181	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
5-4	-	443.73	8587.2	1.25	10734	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
5-5	-	412.48	7554.4	1.47	11105	-	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
						8712.695 8713	#DIV/0!		#DIV/0!

■ 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006

항목 번호	측 정 값 (mm)					체적당 함수량 (%)	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm³)
	1 회	2 회	3 회	4 회	평 균		건 조 질 량	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평균	
5-1	58.39	58.36	58.41	58.44	58.4000	0.46	-	-	-	-	-	
5-2	58.29	57.66	57.78	57.91	57.9100	0.19	-	-	-	-	-	
5-3	54.81	54.29	54.63	54.74	54.6175	0.10	-	-	-	-	-	-
5-4	55.94	55.81	55.85	55.89	55.8725	0.11	-	-	-	-	-	-
5-5	51.45	51.41	51.48	51.52	51.4650	0.10	-	-	-	-	-	-

(3) 흐름값 (1/100cm) KS F 2349 : 2010						
5-1	5-2	5-3	5-4	5-5	평균	흐름값
45.3	61.2	77.36	86.4	40.5	62.15	62

(4) 공극률 (%) KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!

(5) 포화도 (%) KS F 2349 : 2010	
#DIV/0!	#DIV/0!

제 3절 중온 아스팔트바인더의 DSR 데이터

업 체 명	시료명	Phase angle (δ), °							Complex modulus (G^*), kPa							비고
		40℃	46℃	52℃	58℃	64℃	70℃	76℃	40℃	46℃	52℃	58℃	64℃	70℃	76℃	
뉴페이브 (건교평과제) 중온 개질AP (2011.11)	1	78.0	81.0	83.5	85.5	87.0	88.1	×	49.9	18.8	7.45	3.15	1.43	0.682	×	64
	2	73.8	77.4	80.6	83.1	84.9	86.0	×	60.4	24.3	10.1	4.38	2.02	0.979	×	64
	3	74.7	78.4	81.5	83.9	85.8	87.2	×	64.5	24.6	9.85	4.22	1.93	0.929	×	64
	4	75.1	78.8	81.8	84.2	85.9	87.2	×	65.5	24.6	9.75	4.13	1.89	0.904	×	64
	5	74.9	78.5	81.6	84.0	85.8	87.1	×	68.5	25.9	10.3	4.32	1.94	0.925	×	64
	6	74.0	77.7	81.0	83.5	85.4	86.8	87.9	81.8	30.9	12.1	5.10	2.28	1.07	0.539	70
	7	73.6	77.3	80.6	83.3	85.3	86.8	87.9	92.3	34.3	13.5	5.59	2.47	1.16	0.579	70
	8	74.3	77.8	81.0	83.5	85.5	86.9	88.0	102.0	36.8	14.1	5.76	2.53	1.19	0.581	70
	9	73.2	76.7	80.1	82.8	84.9	86.5	87.6	108.0	40.6	15.7	6.49	2.86	1.34	0.659	70
	3A	72.1	75.3	78.6	81.6	84.0	85.7	87.1	84.5	35.5	15.0	6.39	2.84	1.34	0.668	70
	4A	72.3	75.4	78.6	81.5	83.6	85.0	85.7	94.7	39.1	16.2	6.93	3.13	1.47	0.723	70
	5A	74.9	77.8	80.7	83.2	85.0	86.3	87.1	68.5	27.9	11.5	4.72	2.11	1.01	0.521	70
	6A	73.4	76.5	79.8	82.8	84.9	86.3	87.3	72.7	30.2	12.5	5.05	2.24	1.09	0.557	70
	7A	76.0	79.0	81.9	84.5	86.3	87.6	×	73.8	29.3	11.6	4.59	2.00	0.935	×	64
	8A	75.6	78.8	81.8	84.4	86.3	87.5	×	81.8	32.3	12.7	4.92	2.03	0.957	×	64
	9A	77.0	79.9	82.7	85.1	87.0	88.0	×	80.8	31.0	11.7	4.44	1.71	0.802	×	64
	사	74.2	77.5	80.7	83.3	85.2	86.7	87.8	73.1	29.6	11.9	5.02	2.24	1.07	0.538	70
	아	73.0	76.5	80.1	83.3	85.8	87.8	×	67.0	27.5	10.9	4.17	1.52	0.549	×	64

업체명	시료명	Phase angle (δ), °								Complex modulus (G^*), kPa								비고
		40℃	46℃	52℃	58℃	64℃	70℃	76℃	82℃	40℃	46℃	52℃	58℃	64℃	70℃	76℃	82℃	
뉴페이브 (건교평과제) 중온 개질AP (2011.11)	ㄱ	74.2	77.4	80.6	83.2	85.2	86.7	87.8	×	65.4	27.3	11.5	4.96	2.27	1.07	0.532	×	70
	ㄴ	75.1	78.3	81.2	83.6	85.5	87.0	×	×	61.2	25.3	10.6	4.56	2.05	0.970	×	×	64
	ㄷ	73.8	76.9	80.0	82.7	84.8	86.4	87.5	×	68.2	28.5	12.0	5.19	2.38	1.13	0.567	×	70
	ㄹ	73.5	76.6	79.8	82.5	84.7	86.3	87.5	×	76.4	31.6	13.2	5.67	2.55	1.20	0.594	×	70
	ㅁ	75.1	78.1	81.0	83.5	85.4	86.9	88.0	×	71.4	28.9	11.9	4.98	2.23	1.06	0.530	×	70
	ㅂ	74.7	77.6	80.5	83.1	85.2	86.8	87.9	×	75.2	30.3	12.4	5.23	2.34	1.09	0.535	×	70
	ㅅ	74.4	77.3	80.2	82.8	84.7	86.1	87.0	×	86.7	34.8	14.2	5.98	2.65	1.25	0.624	×	70
	A	74.4	77.1	79.9	82.3	84.2	85.7	86.7	×	77.4	31.4	12.7	5.38	2.40	1.14	0.582	×	70
	B	70.8	73.6	76.7	79.5	81.8	83.7	85.2	×	99.8	43.2	18.7	8.25	3.79	1.81	0.904	×	70
	C	73.1	75.4	77.5	79.5	81.2	82.8	84.1	×	109	46.6	20.0	8.84	4.08	1.94	0.954	×	70
	D	70.1	73.0	76.1	78.8	81.1	82.9	84.3	84.1	143	61.3	26.4	11.6	5.29	2.51	1.24	0.712	76
	E	75.1	78.0	80.8	83.3	85.2	86.7	87.9	×	98.2	38.7	15.4	6.40	2.80	1.27	0.603	×	70
	F	75.2	78.0	80.8	83.3	85.2	86.8	87.9	×	81.5	32.6	13.2	5.49	2.43	1.13	0.547	×	70

제 4절 개질 재생 중온 아스콘 생산시의 대기오염 및
생산온도 측정 데이터

대 기 시 험 성 적 서

2012. 09. 03

문 서 번 호 : 중앙참 제120831-21호
업 소 명 : (주)뉴페이브
주 소 : 인천광역시 남동구 백범로399
대 표 자 : 허 정 도
시료접수일자 : 2012. 08. 31.
검 사 기 간 : 2012. 08. 31. - 2012. 09. 03.
측 정 장 소 : (주)보광산업

- 검 사 결 과 -

발생원의 종류	분석항목				비고
	SO _x (ppm)	NO _x (ppm)	CO (ppm)	CO ₂ (%)	
선별, 건조, 혼합 24m ² , 외	50	324	45	2.0	

주식회사 중앙환경
대표이사 박 인



경상북도 경산시 정평동 82-3번지

☎ (053)814-5577, 5579

온도측정 데이터

Date Time	CH	DATA	
2012-09-01 0:00	0	20.6	외기온도
2012-09-01 0:10	0	143.4	최초 아스콘 온도
2012-09-01 0:57	0	132.5	포설기 온도
2012-09-01 1:07	0	130.6	포장후 1차 다짐
2012-09-01 1:11	0	22.7	포장시 외기온도
2012-09-01 1:13	0	125.7	포장후 2차 다짐
2012-09-01 2:06	0	130.1	마지막 아스콘 온도

Date Time	T1	T2	외기온도
2012-09-01 2:28	95.5	*****	*****
2012-09-01 2:28	94.9	*****	*****
2012-09-01 2:29	93.7	*****	*****
2012-09-01 2:34	87.7	68.6	*****
2012-09-01 2:35	86.6	69.4	*****
2012-09-01 2:36	85.5	69.2	*****
2012-09-01 2:37	84.4	68.7	*****
2012-09-01 2:38	83.4	68.6	*****
2012-09-01 2:39	82.5	68.4	*****
2012-09-01 2:40	81.5	68.6	*****
2012-09-01 2:41	80.5	69.4	*****
2012-09-01 2:42	79.6	69.2	*****
2012-09-01 2:43	78.8	69.3	*****
2012-09-01 2:44	78	69.7	*****
2012-09-01 2:45	77.2	69.8	*****
2012-09-01 2:46	76.4	70.1	*****
2012-09-01 2:47	75.5	69.7	*****
2012-09-01 2:48	74.8	69.8	*****
2012-09-01 2:49	74.1	69.4	*****
2012-09-01 2:50	73.3	69.2	*****
2012-09-01 2:51	72.7	69	*****
2012-09-01 2:52	72	68.8	*****
2012-09-01 2:53	71.3	68.5	*****
2012-09-01 2:54	70.6	68.4	*****
2012-09-01 2:55	70	68.6	*****
2012-09-01 2:56	69.4	68.4	23.1
2012-09-01 2:57	68.7	68.2	22.4
2012-09-01 2:58	68	67.7	23.2
2012-09-01 2:59	67.3	67.4	21.6
2012-09-01 3:00	66.7	67	22.2
2012-09-01 3:01	66.2	66.7	21
2012-09-01 3:02	65.6	66.3	21.9
2012-09-01 3:03	65.1	66.1	21.2
2012-09-01 3:04	64.3	65.8	21.7
2012-09-01 3:05	64	65.4	22.1

2012-09-01	3:06	63.5	64.7	22.4
2012-09-01	3:07	63	64.4	21.6
2012-09-01	3:08	62.6	64.1	21.2
2012-09-01	3:09	62	63.7	21.7
2012-09-01	3:10	61.6	63.3	20.9
2012-09-01	3:11	61.2	63	21
2012-09-01	3:12	60.8	62.7	21.5
2012-09-01	3:13	60.4	62.3	21.4
2012-09-01	3:14	60	62	21.4
2012-09-01	3:15	59.6	61.7	22.1
2012-09-01	3:16	59.1	61.2	21.8
2012-09-01	3:17	58.7	60.9	21.1
2012-09-01	3:18	58.4	60.6	21.7
2012-09-01	3:19	58	60.2	21.3
2012-09-01	3:20	57.6	59.9	21.5
2012-09-01	3:21	57.2	59.5	21.8
2012-09-01	3:22	56.9	59.3	20.9
2012-09-01	3:23	56.6	59	20.9
2012-09-01	3:24	56.3	58.7	21.2
2012-09-01	3:25	56	58.4	21
2012-09-01	3:26	55.6	58	21.2
2012-09-01	3:27	55.3	57.7	21.4
2012-09-01	3:28	54.3	57.8	21.8
2012-09-01	3:29	54.6	57.1	21.2
2012-09-01	3:30	54.4	56.9	21.7
2012-09-01	3:31	54.1	56.7	21.2
2012-09-01	3:32	53.8	56.4	22.1
2012-09-01	3:33	53.5	56.2	22.4
2012-09-01	3:34	53.3	56	22
2012-09-01	3:35	53	55.8	21.9
2012-09-01	3:36	52.6	55.5	21.9
2012-09-01	3:37	52.5	55.3	20.8
2012-09-01	3:38	52.2	55.1	21.7
2012-09-01	3:39	51.9	54.8	21.9
2012-09-01	3:40	51.7	54.7	21.8
2012-09-01	3:41	51.4	54.4	23
2012-09-01	3:42	51.2	54.3	23.1
2012-09-01	3:43	51	54.1	22.4
2012-09-01	3:44	50.7	53.8	22.4
2012-09-01	3:45	50.5	53.6	21.7
2012-09-01	3:46	50.3	53.5	21.7
2012-09-01	3:47	50	53.3	22.9
2012-09-01	3:48	49.9	53.2	21.9
2012-09-01	3:49	49.7	53	21.6
2012-09-01	3:50	49.5	52.8	22.2
2012-09-01	3:51	49.3	52.6	22.3
2012-09-01	3:52	49.1	52.4	22.1
2012-09-01	3:53	48.9	52.3	21.6
2012-09-01	3:54	48.7	52.1	22.1
2012-09-01	3:55	48.6	51.9	22.3

2012-09-01	3:56	48.2	51.7	22.1
2012-09-01	3:57	48.1	51.6	21.6
2012-09-01	3:58	47.9	51.4	22
2012-09-01	3:59	47.7	51.3	25.8
2012-09-01	4:00	47.4	51	23
2012-09-01	4:01	47.1	50.8	22.7
2012-09-01	4:02	46.9	50.6	22.4
2012-09-01	4:03	46.6	50.4	21.9
2012-09-01	4:04	46.4	50.2	21.9
2012-09-01	4:05	46.1	50.1	22.3
2012-09-01	4:06	45.9	49.9	22.7

제 5절 개질 재생 중온 아스콘의 물성측정



시험성적서

1. 성적서번호 : ICR2012002
2. 의뢰자
 - 업체명 : (주)뉴페이크 허정도
 - 주소 : 인천 남동구 고잔동 664-16(97B-17L)
 - 의뢰일자 : 2012년 09월 10일
 - 시험발급일 : 2012년 09월 26일
3. 시험성적서의 용도 : 품질확인(건설교통기술연구개발사업)
4. 시료명 : PBM 개질 재생 중온혼합물
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
안정도	N	1	18.198	KS F 2349 : 2010
흐름값	1/100 cm	1	33	KS F 2349 : 2010
공극률	%	1	5	KS F 2349 : 2010
포화도	%	1	71	KS F 2349 : 2010
간접인장강도	%	1	1.22	KS F 2382 : 2008
인장강도비(TSR)	-	1	0.84	KS F 2398 : 2005
동적안정도	회/mm	1	6.342	KS F 2374 : 2000

----- 이 하 여 백 -----

확 인	작성자 성 명	정철후	기술책임자 성 명	신동길
비고: 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서, 전체제중에 대한 품질을 보증하지는 않습니다. 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.				

한국건설생활환경시험연구원



인천경기지원 : 405-240 인천 남동구 만수동 1011-1

결과문의 : 인천경기지원 ☎(032)472-9001

총 1 페이지 중 1 페이지

양식QP-20-01-05(1)

시험분석노트

(1) 마찰안정도 (N)

KS F 2446 : 2000

시료번호	항목	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm ³)	이론최대 밀도 (g/cm ³)	아스팔트 체적	아스팔트 체적(㎤)	아스팔트 밀도 (g/㎤)
		건조질량	수중질량	표건질량	측정값	측정값평균					
1		1153.99	670.99	1160.46	2.35763		2.35056	-	11.32	55.420	-
2		1150.25	662.78	1150.71	2.35741		2.35034	-	11.32	55.241	-
3		1153.33	671.15	1161.23	2.35334		2.34628		11.30	55.389	
					2.35613		2.34906 2.349	2.465	11.32		1.038

(2) 안정도 (N)

KS F 2349 : 2010

시료번호	항목	아스팔트 함 량 (%)	공시체 부 피 (cm ³)	안 정 도 (N)				공극률 (%)	공극률 (㎤)	골재 간극률(%)
				측정값 (N)	보정계수	계산값	계산값 평 균			
1		-	489.47	1888.55	0.96	18130.08	-	4.64	22.724	15.965
2		-	487.93	19222.3	0.96	18453.41	-	4.65	22.697	15.973
3		-	490.08	18760.1	0.96	18009.70	-	4.82	23.604	16.118
		5.00					18197.73 18 198	4.70		16.02

■ 밀도-KS F 2353 : 2000, 두께-KS F 2367 : 2006

번호	항목	측 정 값 (mm)					체적당 함수량 (%)	공 시 체 질 량 (g)			겉보기 비중		밀도 (g/cm ³)
		1 회	2 회	3 회	4 회	평 균		건 조 질 량	피복후 건조질량	피복후 수중질량	측정값	측정값 평 균	
1		65.87	65.86	65.87	65.81	65.8525		-	-	-	-	-	
2		65.51	65.50	65.51	65.59	65.5275		-	-	-	-	-	
3		65.61	65.69	65.63	65.62	65.6375		-	-	-	-	-	

(2) 흐름값 (1/100cm)

1	2	3	평균	흐름값
31.64	34.10	33.82	33.19	33

KS F 2349 : 2010

(3) 공극률 (%)

4.70	5
------	---

KS F 2349 : 2010

(4) 포화도 (%)

70.64	71
-------	----

KS F 2349 : 2010

(5) 간접인장강도(MPa)

KS F 2382 : 2008

건조시험용 공시체													
시료번호		1				2				3			
직경(mm)	D	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6		
두께(mm)	t	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회
		65.96	65.85	65.85	65.90	65.96	65.18	65.06	65.08	65.98	65.93	65.97	65.05
	평균	65.89				65.32				65.73			
작용하중	N	12705.0				12775.0				12930.0			

(6) 인장강도비(TSR)

KS F 2398 : 2005

전처리시험용 공시체											
시료번호		4			5				6		
직경(mm)	D'	101.6	101.7	101.6	101.6	101.6	101.6	101.6	101.7		101.6

(6)인장강도비(TSR)

KS F 2398 : 2005

전처리시험용 공시체														
시료번호			4				5				6			
직경(mm)		D'	101.6	101.7	101.6		101.6	101.6	101.6		101.6	101.7	101.6	
두께(mm)	t'	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	
		65.86	65.08	65.08	65.97	65.44	65.44	65.46	65.75	65.71	65.72	65.72	65.77	
	평균	65.50				65.52				65.73				
작용하중		N	10705.0				10775.0				10830.0			
건조강도	2P/(πtD)	S _i	1.21				1.23				1.23			
습윤강도	2P'/(πt'D')	S ₂	1.02				1.03				1.03			
인장강도비	S ₂ /S ₁		0.85				0.84				0.84			

평균

1.223

0.842

시험방법 : KS F 2398 : 2005 (수분 처리 조건은 (a) 조건에 따라 시험함.)

(7) 동적안정도 (회/mm)

KS F 2374 : 2000

시료번호	항목	깊 이 (mm)		변형속도 (mm/min)		동적안정도 (회/mm)	
		45 분	60 분	측정값	평균	측정값	평균
1		1.990	2.100	0.007333	-	5727.27	-
2		1.860	1.960	0.006667	-	6300.00	-
3		1.470	1.560	0.006000	0.006667	7000.00	6342.42
					0.0067		6 342

※ 시험방법 : 2374 : 2010, 2366 : 2010, 2446 : 2000

※ 의뢰자가 제시한 다짐온도 : 140 ℃, 이론밀도 : 2.465 g/cm³로 시험한 결과임.

※ 휠트래킹 시험조건

▶ 시험온도 : 60±0.5℃. ▶ 휠트래킹 시험시간 : 60분. ▶ 차륜 통과 횟수 : 42±1회/분.

▶ 차륜접지압 : 70±1kg(686±10N). ▶ 차륜주행거리 : 23±1cm/회

▶ 시험차륜 : 폭 5cm, 직경 20cm. ▶ 공시체양생 : 실내온도 18시간, 시험온도 6시간

순번	구분	항목명	규격명	단위	결과값
1	1	안정도	KS F 2349 : 2010	N	18 198
2	1	흐름값	KS F 2349 : 2010	1/100cm	33
3	1	공극률	KS F 2349 : 2010	%	5
4	1	포화도	KS F 2349 : 2010	%	71
5	1	간접인장강도	KS F 2382 : 2008	MPa	1.22
6	1	인장강도비(TSR)	KS F 2398 : 2005	-	0.84
7	1	동적안정도	KS F 2374 : 2010	회/mm	6 342

제 6절 포장 코-아의 밀도와 포장두께 측정



시험성적서

1. 성적서번호 : ICR3012001
2. 의뢰자
 - 업체명 : 한뉴에이브 히경도
 - 주소 : 인천 남동구 고잔동 664-16(97B-17L)
 - 의뢰일자 : 2012년 09월 10일
 - 시험발급일 : 2012년 09월 26일
3. 시험성적서의 용도 : 품질확인(건설교통기술연구개발사업)
4. 시료명 : PBM 개질재생 중온 아스팔트 포장 코아
5. 시험결과

시험항목	단위	구분	시험결과	시험방법
밀도(표중)	g/cm ³	1	2.291	KS F 2446 : 2000
밀도(표중)	g/cm ³	3	2.256	KS F 2446 : 2000
밀도(표중)	g/cm ³	3	2.277	KS F 2446 : 2000
밀도(표중)	g/cm ³	4	2.335	KS F 2446 : 2000
밀도(표중)	g/cm ³	5	2.337	KS F 2446 : 2000
밀도(표중)	g/cm ³	6	2.261	KS F 2446 : 2000
두께(표중)	mm	1	65.2	KS F 2367 : 2006
두께(표중)	mm	2	70.8	KS F 2367 : 2006
두께(표중)	mm	3	70.5	KS F 2367 : 2006
두께(표중)	mm	4	67.7	KS F 2367 : 2006
두께(표중)	mm	5	74.6	KS F 2367 : 2006
두께(표중)	mm	6	66.0	KS F 2367 : 2006

* 현장명 : 대구광역시 미하천 2호선 강삼터 앞 사거리

----- 이 하 여 백 -----

확 인	작성자 성 명	정철주	기술책임자 성 명	신동길
비고 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료 명으로 시험한 결과로서 본체제출에 대한 중립을 보증하지는 않습니다. 2. 이 성적서는 정보, 실권, 상권 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 정보 이외의 사용을 금합니다.				

한국건설생활환경시험연구원



인천경기지원 : 405-240 인천 남동구 만수동 1011-1

권파문의 : 인천경기지원 ☎(032)472-9001

용 1 제이치 준 1 제이치

양식QP-20-01-05(1)

시험 분석 노트

(1) 밀도(g/cm³)

KS F 2446 : 2000

		공시체 무게 (g)				겉보기 비중	밀도 (g/cm³)
		건조질량	수중질량	표건질량			
표층	1	1058.29	610.87	1071.45		2.297733	2.290840 2.291
표층	2	1161.67	664.85	1178.26		2.262656	2.255868 2.256
표층	3	1172.26	673.01	1186.24		2.284083	2.277231 2.277
표층	4	1143.27	665.15	1153.23		2.342382	2.335355 2.335
표층	5	1280.04	739.28	1285.33		2.344181	2.337148 2.337
표층	6	1083.78	623.11	1101.10		2.267370	2.260568 2.261

(2) 두께(mm)

KS F 2367 : 2006

표층		1	2	3	4		평균	두께
	1	65.91	64.25	64.92	65.62		65.175	65.18
	2	72.38	70.12	69.22	71.35		70.768	70.77
	3	70.01	71.21	71.53	69.17		70.480	70.48
	4	67.52	67.90	68.03	67.36		67.703	67.70
	5	75.56	73.54	74.82	74.57		74.623	74.62
	6	66.71	65.54	66.13	65.77		66.038	66.04

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

별지 12. 연구개발사업 보고서 표준 서식

국토해양부 소관 연구개발사업 최종보고서·요약서

I. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm * 세로297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
 - 가. 표지 200g/m² 양면 아트지
 - 나. 내용 80g/m² 모조지
4. 인쇄방법
 - 가. 표지 : 바탕 백색,활자 흑색
 - 나. 내용 : 흑색 지정활자

II. 편집순서

1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 요약문
5. 영문 요약서
6. 영문 목차
7. 목차
8. 본문
9. 뒷면지

III. 참고사항

전자조판 인쇄시에는 이에 준한다.