

GPC를 이용한 아스팔트 혼합물의 단기노화 조건에 따른 노화도 분석

Analysis of Binder Aging Levels in Asphalt Mixture Caused by Short-term Aging Conditions Using the GPC Technique

김영삼	Kim, Yeongsam	강원대학교 지역건설공학과 석사과정 (E-mail : kysvrt@hanmail.net)
윤지현	Yun, Jiyeon	강원대학교 지역건설공학과 석사과정 (E-mail : music_0431@naver.com)
정승호	Jeong, Seunggho	정회원 · 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원 (E-mail : ngjsh@hanmail.net)
김광우	Kim, Kwangwoo	정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : asphaltech@hanmail.net)

ABSTRACT

PURPOSES : This study aims to show the difference of the binder aging level in the hot-mix asphalt (HMA) mixture after short-term aging (SA) under different aging conditions, such as mixture temperature and duration in hour.

METHODS : Three SA times (i.e., 1 h, 2 h, and 4 h) at two temperatures (i.e., 160°C and 180°C) were used for the normal mixtures prepared using a PG64-22 asphalt. The field long-term aging (LA) was simulated by applying the same LA procedure (65 h at 110°C) to all compacted specimens, prepared at the air void of 7% using each SA-treated mixture, in a convection oven. The binder aging level was measured in terms of large molecular size by gel-permeation chromatography (GPC) from the mixture and the absolute viscosity (AV) from the recovered binder. The aging levels were evaluated using those two properties after SA and LA, and then compared based on the normal SA (NSA) mixture (1 h at 160°C). The service life reduction caused by SA in various conditions was estimated based on the aging level of the field cores from different locations in various service lives.

RESULTS : The results of the laboratory evaluation indicated that the binder of the mixture, which was treated at longer SA time and higher temperature, showed a significantly higher aging level than the NSA mixture. The binder aging level from a longer time, such as 2 h and 4 h SA, or at a higher temperature (180°C), were estimated to be similar to that of the mixtures, which had already been in field service for several years.

CONCLUSIONS : The HMA mixture should be produced at a moderate temperature, such as 160°C, and placed within a limited hauling and queuing time to avoid a significant short-term aging of the binder before placement in the field pavement. The SA for a longer time at a higher temperature than the NSA condition was found to be detrimental to the service life of the asphalt pavement.

Keywords

short-term aging, GPC, absolute viscosity, asphalt pavement, service life reduction

Corresponding Author : Kim, Kwang Woo, Professor
Department of Regional Infrastructure Eng., Gangwon National University,
1, Gangwondaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do, 24341, Korea
Tel : +82.33.250.6467 Fax : +82.33.242.2095
E-mail : asphaltech@hanmail.net

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Nov. 28, 2015 Revised Dec. 02, 2015 Accepted May. 24, 2016

1. 서론

아스팔트의 노화(aging)는 화학적 산화(oxidation) 반응이며 주로 아스팔트 내의 방향족(aromatic) 물질이 산

소와 반응하여 일어난다. 산화는 온도가 높으면 반응이 촉진되어 더 급속히 일어나지만 상온에서는 장기간에 걸쳐 서서히 진행된다(Kim et al. 2016). 아스팔트의 노화는 믹

서에 투입 시 고온의 골재와 비벼지며 시작되어 혼합물 운반·대기 중의 단기노화(short-term aging: SA)와 중장기적으로 공용 중에 장기노화(long-term aging: LA)로 구분된다.

SA를 세분하면 고온 골재와의 접촉, 혼합(mixing or blending), 출하된 혼합물의 운반·대기(hauling and queuing) 등의 과정에 일어나는 것으로 본다. 하지만 아스팔트가 고온골재와 접촉 시 그리고 운반·대기 중에 혼합물의 온도와 시간 등이 어느 정도 노화에 영향을 미치는지는 잘 알려져 있지 않다. 특히 혼합물이 트럭에 적재되어 있는 시간이 SA 기간 중 가장 길며 온도도 높아 그 시간에 가장 큰 노화가 발생된다. 이를 모사하여 본 연구에서 실험실 단기노화는 비빈 혼합물을 160°C 오븐에서 1시간 보관 후 다지는 것을 기준으로 하였다. 이는 플랜트에서 트럭에 적재된 일반 아스팔트 혼합물 온도를 평균 160°C, 운반·대기 시간을 평균 1시간으로 본 것이다. 현장에 운반되어 폐이버로 펼쳐진 혼합물은 급격히 식으며 140°C 전후에서 다짐이 시작되어 기준밀도의 96%인 공극률 7% 정도로 포설된다. 하지만 실내 혼합물은 목표공극률 4%로 공시체를 제조해야 하므로 몰드에 투입 과정 등의 온도 손실을 고려하여 150°C 정도에서 다짐을 시작한다. 그러나 국토부지침(MOLIT, 2014)은 다짐온도에서 1시간 보관토록 되어 있어 실제 현장의 단기노화를 제대로 모사하지 못하도록 되어 있다.

게다가 혼합물이 트럭에 적재되어 교통정체나 작업 지연 등으로 운반·대기시간이 1시간 이상은 물론 3~4시간 되는 경우도 있다. 이러한 현장의 경우 혼합물 온도강하에 따른 다짐도 저하를 우려하여 플랜트에서 온도를 더 높여 출하하는 것이 관례이다. 또한 기온이 낮은 초겨울 포설 시는 하절기보다 20~30°C 높게 혼합물이 출하되기도 한다. 하지만 이와 같이 더 높고 긴 온도와 시간이 노화도에 어떤 차이를 가져오는지는 연구된 바가 드물다. 따라서 다짐온도 유지를 위해 출하 온도를 높인 것이 단기노화를 얼마나 더 심화시키는지를 노화 측면에서 분석할 필요가 있다.

적재상태로 노화가 발생하는 단기노화에 비해 장기노화는 상온에서 골재에 의한 흡수 및 넓은 포장표면을 통한 휘발, 산소접촉에 의한 산화가 서서히 진행된다. 하지만 장기노화는 단기노화된 혼합물이 포설되고부터 시작되므로 단기노화 상태가 이후 장기노화도 증가에 큰 영향을 미친다. 즉, 단기노화가 심한 혼합물을 포설하면 급격한 취성 증가 등으로 공용수명이 단축될 소지가 크다. 노화가 많이 된 혼합물을 포설하면 그 포장은 상대적으로 높은 노화 상태에서 공용을 시작하며, 그에 따른 장기노화 속도도 빠르게 될 것이므로 공용수명도 그만큼 단축될 것이다(Kim et al. 2016).

그러므로 본 연구의 목적은 아스팔트 혼합물의 단기노화 시간과 온도가 바인더 노화에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 구명하는 기초연구를 수행하는 것이다. 이를 위해 바인더는 국내에서 가장 널리 사용되는 PG 64-22 일반(무개질) 아스팔트와 보편적으로 쓰이는 13mm 표층용 밀입도(dense-graded asphalt: DGA) 혼합물을 사용하였다. 제조된 혼합물을 인공 단기노화 및 장기노화 처리하였으며, 노화 특성으로 절대 점도(absolute viscosity: AV)와 대형분자(large molecular size: LMS) 비율(%)을 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 사용 재료

본 연구에서는 한 가지 신규바인더(PG 64-22)로 최대치수 13mm 화강암 굵은골재, Screenings 잔골재, 석회석분 채움재로 밀입도 혼합물을 제조하였다. 국토교통부 지침 WC-1 입도로 배합설계를 수행하여 결정된 최적아스팔트 함량의 아스팔트와 골재를 패들 믹서에 넣고 1분간 비벼 혼합물(loose mixture)을 제조하였다.

2.2. 인공 노화

인공 단기노화(short-term aging: SA) 조건(온도 및 시간)에 따른 노화 정도를 분석하기 위하여 Table 1

Table 1. Details of Artificial Aging Conditions for Asphalt Mixture

Mixture	Condition	Artificial aging			Note	
		SA on loose mixture after blending for 1 min.				LA on Ø=100mm specimen prepared at the air void of 7±0.5%
		Binder	Agg.	SA treatment		
WC-1 DGA with PG64-22	Temp. (°C)	160	165	160	110	
		180	185	180		
	Duration (hr)	1, 2, 4			65	

에서와 같은 조건을 적용하였다. 160℃, 1시간 단기노화를 표준단기노화(normal short-term aging: NSA)로 하고 그 외의 조건은 노화 정도의 차이를 보기 위해 실험 설계한 것이다. 180℃는 동절기 국내에서 흔히 볼 수 있는 적재혼합물의 온도이며 일반 혼합물의 평균 온도라고 간주되는 160℃보다 20℃ 높은 것이 어떤 노화차이를 보이는지를 비교하기 위한 것이다. 2시간 단기노화 역시 국내에서 흔히 볼 수 있는 운반·대기 시간이다. 하지만 현장여건에 따라 4시간까지의 경우도 있어 장시간 단기노화가 어떤 차이를 유발하는지를 파악하기 위한 것이다.

장기노화(long-term aging: LA)는 SA처리 혼합물로 직경 100mm, 공극률 $7 \pm 0.5\%$ 의 공시체를 선화다짐기로 제조하여 110℃ 대류(forced draft)오븐에서 65시간 처리하였다. Yun et al.(2014), Jung et al.(2007)은 밀입도 일반 및 개질 아스팔트 혼합물을 단기노화 후 공시체를 제조하여 24시간부터 96시간까지의 몇 단계 장기노화를 통해 적정 장기노화시간을 약 48시간으로 제시하였다. 하지만 이는 순수 LMS의 증감에 근거한 것으로 이를 절대 점도로 확인하는 못하였다.

하지만 본 연구에서 장기노화 목표 절대점도를 신규바인더를 RTFO(rolling thin film oven) 처리 후 PAV (pressure aging vessel) 처리한 바인더의 노화 정도와 유사한 점도가 얻어지도록 혼합물 장기노화 방법을 개발한 것을 사용하였다(Kim et al. 2014). PAV 바인더의 노화 정도는 현장에 포설된 아스팔트 혼합물이 약 5~6년 정도 노화된 상태를 모사한 것으로 알려져 있다. 그간의 예비실험에 의하면 AV $2,000 \pm 400$ poise(p)인 신규 바인더(PG64-22)를 RTFO 처리하면 $4,000 \pm 800$ p, 그리고 RTFO 후 PAV 처리하면 $12,000 \pm 2,400$ p 정도의 점도가 얻어졌다(Kim et al. 2016). 이는 실제 국내도로에서 얻어진 데이터에 의하면 약 5, 6년 정도 공용된 혼합물에서 추출·회수하여 측정된 점도와 유사하다(Kim et al. 2015).

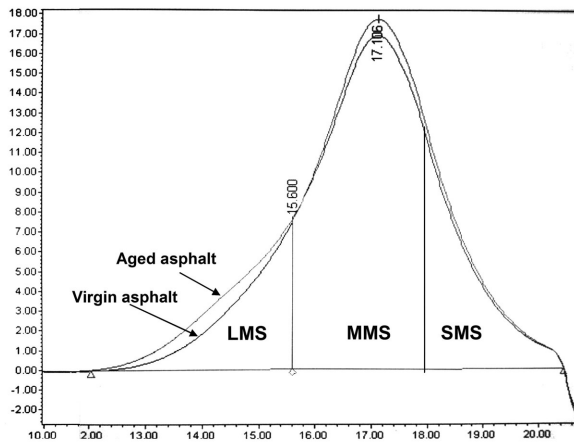
2.3. 노화도 측정

일반적인 노화도 측정기법은 바인더를 혼합물로부터 추출(extract)·회수(recover)하여 점도나 침입도 또는 DSR로 강성을 측정한다(Asphalt Institute 2002). 하지만 이들 방법은 바인더를 추출·회수하는데 상당한 시간이 걸리며 또한 점도나 DSR 측정에도 많은 노력과 시간이 소모되며 아울러 측정오차도 수반된다. 이에 본 연구에서는 gel-permeation chromatograph(GPC)를

이용하여 아스팔트 대형분자(large molecular size: LMS) 비율(%)을 측정하고 실제 추출·회수된 바인더에서 측정된 점도와 상관성 분석을 통해 노화도를 평가하였다. 이는 향후 GPC 기법만으로 노화도를 추정할 수 있는 데이터 축적을 위한 것이다. GPC 시험으로부터 얻어지는 아스팔트의 LMS는 절대점도(absolute viscosity: AV), stiffness($G^*/\sin \delta$) 등과 매우 상관성이 높은 것으로 알려져 있다(Kime et al. 2005, Ahn et al. 2002, Kim and Burati, 1993, Kim et al. 2005, 2011).

본 연구에서 사용된 GPC 시험은 아스팔트 혼합물을 녹이고 바인더를 추출·회수하는 등의 과정없이 혼합물 샘플로부터 2시간 이내에 LMS를 3회 측정하고 평균값으로부터 점도 등을 추정하여 그 혼합물의 노화 정도를 판별할 수 있다. 일반적인 GPC 시험은 바인더 샘플로부터 LMS를 측정한다. 하지만 본 연구에서는 Kim et al. (2006)이 개발한 혼합물로부터 바인더를 추출·회수하지 않고 바로 LMS를 측정하는 기법을 썼다. 그러므로 이 방법을 사용하면 Abson 방법 등으로 바인더를 추출·회수하는 과정을 거치지 않고도 LMS로부터 절대점도를 추정(estimation) 할 수 있어 많이 사용되고 있다(Kim et al. 2014, Lee et al. 2014, Doh et al. 2008, Lee et al. 2008). 그리고 여러 가지 물리적 특성 중 바인더의 노화 정도를 나타내는 지수로 가장 널리 쓰이는 절대점도(AV)를 LMS와 연관지어 노화 조건별 노화 상태를 추정하였다.

GPC 시험은 혼합물을 노화처리 후 무작위로 약 8g의 시료를 채취하여 4분법으로 두 번 나누어 1g의 혼합물 입자를 Tetra·hydro·furan(THF) 용액에 녹였다. 이때 샘플 농도는 아스팔트 함량을 고려하여 0.25 wt % 되도록 하였고, 0.45 μ m filter를 통해 거른 후 1회 50ml의 샘플을 주입기(Injection module)에 넣어 LMS를 측정하였다. 주입된 샘플은 THF 용액(mobile phase)이 유동하는 관을 따라 35℃로 유지되고 있는 두 개의 직렬 칼럼으로 1ml/min의 속도로 이동되었다. 아스팔트 분자는 이 두 칼럼을 통과하면서 크기에 따라 분류되어 LMS, 중형분자인 MMS(medium molecular size)와 소형분자 SMS(small molecular size) 순으로 검출된다(Fig. 1(a)). 전체 곡선하의 면적에 대하여 해당 부분의 면적 비율(%)을 구하여 이중 물성과 상관성이 가장 큰 LMS 비율만을 분석에 사용하였다. Fig. 1(b)는 본 연구에서 사용된 GPC 장비와 컴퓨터 시스템을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 2 Illustration of (a) Abs. Viscosity Equipment and (b) Cannon Manning Viscometer



(b)

Fig. 1 Illustration of (a) Chromatograms and (b) GPC System used in this Study

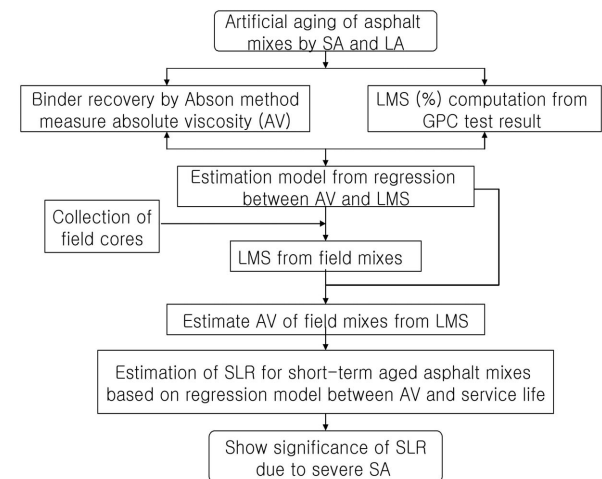
AV는 “KS M 2247: 2005 아스팔트의 절대 점도 시험 방법”에 의하여 추출·회수한 바인더에서 측정되었다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 사용된 60°C로 온도가 조절된 유조에서 점도를 측정하는 시험 장치이며, Fig. 2(b)는 사용된 Canon Manning viscometer를 보여준다.



(a)

2.4. 회귀분석 및 노화도 추정

본 연구에서는 인공노화시킨 혼합물의 LMS를 측정하고, 또한 추출·회수한 바인더로부터 절대점도를 측정하여 회귀분석을 통해 두 특성간의 상관관계를 분석하였다. 또한 국내 고속도로 현장으로부터 다양한 공용연도의 코어를 채취하여 LMS를 측정하였다. 그리고 이 LMS를 이용하여 현장혼합물의 추정점도(estimated AV: EAV)를 구하여 공용연도(service life: SL)와 EAV 관계를 회귀분석하였다. 그리고 회귀식에 SA 혼합물의 AV를 대입하여 공용(노화)연도를 추정하였다(Fig. 3).



Note, SA: short-term aging, LA: long-term aging
LMS: large molecular size, SLR: service life reduction

Fig. 3 Flow Chart of Study Process

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공노화

Table 2. Change of LMS, Absolute Viscosity(AV) and S_D due to Various Aging Levels of DGA Mixture

Mixture	Aging	Material temp. (°C)		SA		LA	LMS (%)	AV (p)	Note
		Binder	Agg.	at (°C)	for (hr)	at 110°C for (hr)			
DGA (62-22)	NA	160	0	0	0	0	17.01	1,807	Virgin
		160	165	0	0	0	17.54	1,864	Mixed for 1 min.
		160	185	0	0	0	17.87	1,918	
	SA	160	165	160	1	0	20.51	3,610	
					2	0	21.53	6,254	
					4	0	24.67	12,739	
		160	185	180	1	0	21.08	5,743	
					2	0	26.02	19,437	
					4	0	30.34	97,200	
	LA	160	165	160	1	65	25.23	14,770	
					2	65	27.66	26,571	
					4	65	29.32	65,291	
		160	185	180	1	65	28.16	35,704	
					2	65	29.95	112,392	
					4	65	35.16	360,595	

*NA : no aging

인공노화 혼합물에서 측정된 대형분자비율(LMS (%)) 과 혼합물로부터 Abson 방법으로 추출·회수한 바인더로부터 측정된 절대점도(AV)를 Table 2에서 보여준다. 이 AV와 LMS의 회귀분석결과 지수함수 모델이 가장 높은 결정계수(R² > 0.98)를 보였다(Fig. 4). 표의 첫 3 줄은 순수바인더(virgin), 160°C 바인더를 165°C, 185°C 골재와 1분간 믹서로 비빈 직후 무작위로 채취한 혼합물로부터 측정된 값들이다. 반면에 제일 끝의 180°C 4시간 SA 후 LA 처리한 경우는 AV > 360,000p이었다. 이는 일반적인 reclaimed asphalt pavement(RAP)의 노화 정도 이상의 값으로 SA가 심할 경우 같은 LA처리에도

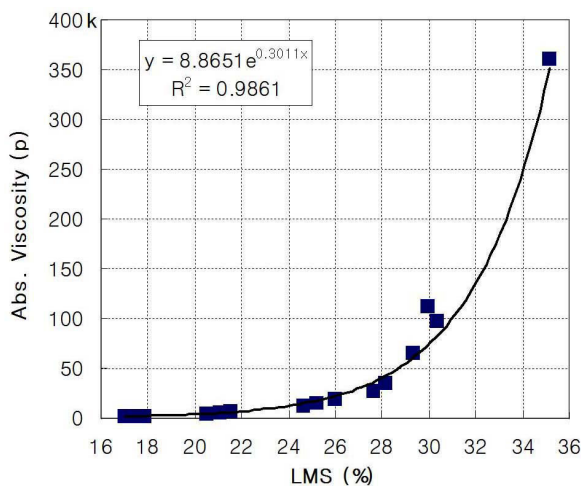


Fig. 4 Relationship of abs. Viscosity and Lagre Molecular Size (LMS)

이와 같이 크게 점도가 증가됨을 보여준 것이다.

AV 1,807p(LMS 17.01)인 64-22 바인더를 160°C로 가열하여 165°C와 185°C 골재와 1분간 믹서로 비빈 후에 바인더를 추출·회수하여 측정된 AV는 각각 1,864p (LMS 17.54)와 1918p(LMS 17.87)였다. 이는 AV 측정 오차범위 이내의 매우 미미한 증가이다. 이를 통해 아스팔트가 골재와 접촉 시 순간 연소(instant burning)로 많은 노화가 발생될 것이라는 가설은 근거가 없는 추측임을 확인할 수 있었다.

그렇지만 160°C에서 1시간 SA 후 AV는 약 3,610p로 2배 정도 증가하였으며 온도가 더 높고 시간이 증가되면 AV는 모두 현저히 높아졌다. 이를 한눈에 보기 위해 Fig. 5는 160°C에서 1시간 단기노화 후 측정된 AV =

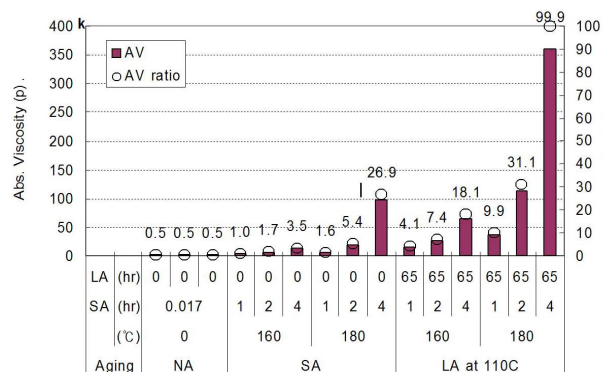


Fig. 5 Absolute Viscosity and Its Increased Ratio based on SA for 1 Hour at 160°C (NSA)

3,610p를 1로 놓고 이에 비례한 타 SA 조건에 의한 점도 증가 비(AV ratio)를 그림으로 나타내었다. 즉, 표준단기노화(NSA)를 1로 놓고 이와 비교한 노화도를 보고자 한 것이다.

같은 160℃에서 SA 시간이 2, 4배 늘어남에 따라 AV는 NSA에 비해 1.7, 3.5배 증가했다. 또한 180℃로 1, 2, 4시간 SA 후에는 1.6, 5.4, 26.9배 높아져 혼합물 온도와 시간증가의 심각성을 확인할 수 있었다. 이는 표준단기노화(160℃ 1시간)에 비해 20℃ 높은 온도로 4시간 유지하면 약 27배까지 점도가 높아져 SA 온도와 시간이 매우 중요함을 발견한 것이다.

온도와 시간을 달리하여 SA 처리한 혼합물로 공극률 7 ±0.5%로 제조한 공시체를 110℃에서 65시간 장기노화(LA)시켰을 때 그 심각성은 더욱 크게 나타났다. 160℃ 1시간 SA 처리한 NSA 혼합물로 공시체를 제조하여 LA 처리 후의 AV는 NSA만 처리한 것에 비해 약 4배 증가되었다. 이때의 AV는 Table 2에서 보듯이 약 15,000p이나 온도는 160℃로 같지만 시간을 2, 4배 더 오래 처리한 혼합물의 LA 처리 후 점도 비는 약 7, 18배(AV= 26,571, 65,291p)로 크게 증가하였다. 따라서 같은 온도라도 시간의 증가로 노화도가 크게 높아짐을 보였다.

이보다 더 심각한 것은 180℃에서 1, 2, 4시간 SA 처리된 혼합물의 LA 처리 후 점도 비율이 각각 약 10, 31, 100배 증가되었다는 점이다. 이 중에서도 특히 180℃, 2, 4시간 SA 혼합물의 경우 공시체 제조 당시 이미 단기노화로 바인더 점도가 약 19,000, 97,000p 이상 높아져 있어서 LA 조건이 모두 같음에도 더욱 심하게 노화가 된 것이다. 따라서 SA시 이미 높은 온도와 긴 시간으로 노화가 많이 진행된 혼합물은 같은 공용조건에도 점도 증가율이 매우 높을 것임을 추정할 수 있다. 따라서 현장에서 장시간 덤프트럭에 적재된 상태로 운반·대기하거나, 이때 온도저하를 우려하여 출하온도를 높인 혼합물이 포설되면 급속한 조기 노령경화로 이어지게 될 것이다. 이는 기존의 연구(Lee et al. 2015)에서 얻어진 결과와도 유사한 것이다.

국내의 경우 실제 현장에서 180℃ 혼합물이 출하 2시간 후에 포설되는 일은 흔히 있을 수 있는 조건이다. 본 연구에서는 이러한 경우 이미 AV가 약 19,000p까지 높아진 혼합물이 포설되므로 불과 몇 년 안 되어 AV가 약 112,000p으로 높아질 수 있음을 실험을 통해 보여준 것이다. 교통정체 또는 동절기 온도저하 우려로 혼합물을 고온 출하하면(트럭으로 장시간 운반해도 온도가 유지되어) 충분한 다짐밀도 확보는 가능할지는 모르나 엄

청난 노화로 인한 조기균열 등의 위험을 안게 될 것이다. 따라서 이러한 혼합물은 급속한 조기노화에 의한 취성 증가로 공용수명이 크게 단축될 수 있음을 보여주는 중요한 시험 결과라 할 수 있다. 또한 180℃ 4시간 SA 후 LA 처리는 AV를 360,000p 이상으로 높여 어떠한 RAP에서도 보기 드문 극심한 노화로써 단기노화의 온도와 시간의 심각성을 확인하게 하였다.

3.2. 공용수명 단축 추정

이와 같이 단기노화가 심하면 공용수명단축(service life reduction: SLR)으로 이어지게 되므로 이를 분석하기 위하여 현장 혼합물을 이용하였다. Table 3은 현장 코어의 공용연도와 혼합물로부터 측정된 LMS를 측정하고 이 LMS를 Fig. 4의 회귀 식에 대입하여 계산한 추정 절대점도(estimated AV: EAV) 값을 보여준다. 표 첫째 줄은 신규혼합물이 160℃에서 1시간 SA된 노화도를 노화 연수로 환산한 것이다.

표 하단의 주석 1에서 보듯이 노화도(agedness)는 노화온도와 시간의 곱으로 나타낼 수 있다. SA 1시간의 공용연수는 160℃×1h=160℃·h 노화도와 우리나라의 연평균 기온 14℃를 이용한 1년간 현장공용 노화도 14℃×365day×24h/day=122,640℃·h를 적용하여 계산하였다. Table 3에서 보듯이 5년 전후의 혼합물의 EAV는 약 11,000~13,000p 정도이고 10년이 넘으면 20,000p 이상, 12년이 넘으면 40,000p 이상이 되는 것을 알 수 있었다.

Table 3. LMS and Estimated Absolute Viscosity(EAV) of Asphalt Mixtures After Various Year Field Services

Service life (yr)	LMS (%)	Estimated AV (p)	Note
0.001 ¹	20.51	4,263	
3.00	23.45	10,331	
4.83	24.37	13,629	
5.75	23.90	11,830	
6.00	24.32	13,425	
6.25	25.28	17,925	
8.25	26.46	25,571	
10.00	25.81	21,026	
11.50	27.01	30,177	
12.83	28.20	43,180	

¹ : 160℃×1h/(14℃×24h/day×365day) = 0.001

이 값들을 Table 2의 SA값과 대략 비교하면 160℃

4h SA에 의한 약 12,700p는 약 6년 정도 노화된 점도이다. 180℃ 4h SA의 약 97,000p는 12.83년의 EAV = 43,346p보다도 2배 이상 높아 SA로 이미 약 13년 된 혼합물보다도 더 노화된 것을 포설하는 것이다. 다시 말하면 SA로 이미 현장에서 그만한 기간을 지난(노화된) 혼합물과 유사 수준의 점도이기 때문에 그만큼 노화되었다고 볼 수 있다. 따라서 포설 후 그만큼 공용기간이 줄어들 것이며 이를 공용수명단축(SLR)으로 정의할 수 있다. Fig. 6은 Table 2의 공용연수(service life)와 LMS의 회귀분석 결과를 보여준다. 공용연수가 오래되면 혼합물은 LMS가 높게 나타나며 공용연수와 LMS는 자연대수 함수적으로 증가되며 $R^2 > 0.90$ 로써 우수한 상관관계를 보였다.

또한 공용연수와 추정절대점도의 상관관계를 회귀분석을 통해 Fig. 7에 나타내었다. 공용연수와 EAV는 자연대수 함수의 관계를 보임을 알 수 있고 $R^2 > 0.92$ 로 역시 우수한 상관관계를 보였다. 이들의 관계식에

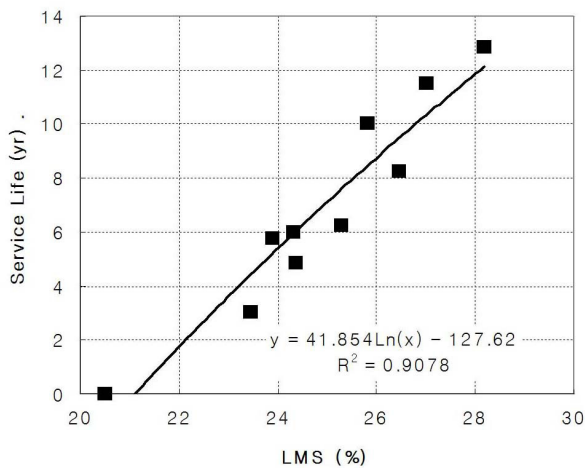


Fig. 6 Relationship of Service Life and Large Molecular Size (LMS)

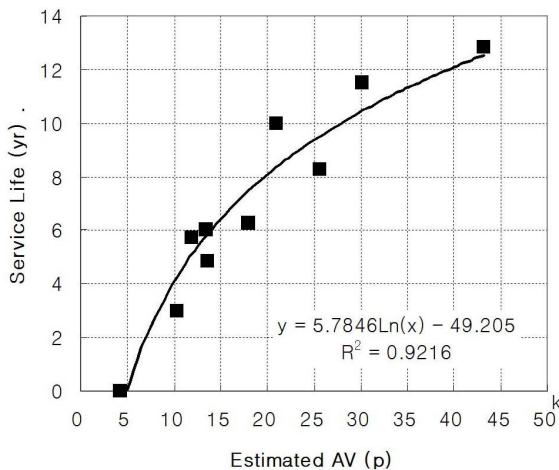


Fig. 7 Relationship of Service Life and Estimated abs. Viscosity

Table 2의 160℃와 180℃ SA 혼합물들의 LMS와 AV를 대입하여 SA에 따른 LMS 증가와 AV 증가가 현장 노화수준으로 몇 년에 해당되는지를 추정할 수 있다.

Table 4는 Table 2의 LMS를 Fig. 6의 함수식 x에 대입하여 얻은 단축수명(SLR by LMS)과 AV를 Fig. 7의 함수식 x에 대입하여 얻은 단축수명(SLR by AV), 그리고 이 둘의 평균값을 보여준다. 계산된 SLR이 0보다 적은 경우는 0으로 표기하였으며, 두 추정 값에 다소 차이는 있으나 평균값으로 보면 그 심각성을 알 수 있다. 표에서 보듯이 160℃ 2시간 SA의 경우 SLR이 1.1년인데 비해 4시간에는 약 6년으로 크게 증가한다. 180℃ 1시간 SA의 경우 SLR이 0.43년으로 비교적 양호한 편이나 180℃ 2시간의 경우 SLR이 8년 이상이다. 한편 180℃ 4시간 SA의 경우 SLR이 16년 이상으로 매우 심각하나 이는 앞의 두 식이 얻어진 범위(LMS=20.51~28.2와 EAV=4,263~43,180p)를 넘어선 값을 대입하여 얻어진 extrapolation이므로 고찰에서는 제외한다. 그렇지만 단기노화가 과다하면 10년 이상 공용된 혼합물보다도 더 높은 점도가 된다는 것을 실험으로 확인하였으며, 그것이 공용수명단축으로 이어질 것이라는 심각성을 확인할 수 있었다. 한편 같은 180℃라도 1시간 노화는 심각성이 낮으나 시간이 길어지면 매우 심각해져 현장운반시간 제한 등에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

Table 4. Estimated Service Life Reduction(SLR) of SA Mixes Based on LMS and AV

Mixture	Aging	SA		LMS (%)	AV (p)	SLR (yr.)		
		at (°C)	for (hr)			by LMS	by AV	Mean
DGA (62-22)	SA	160	1	20.51	3,623	0.00	0.00	0.00
			2	21.53	6,254	0.85	1.36	1.10
			4	24.67	12,739	6.55	5.47	6.01
		180	1	21.08	5,743	0.00	0.86	0.43
			2	26.02	19,437	8.78	7.92	8.35
			4	30.34	97,200	15.21	17.23	16.22

4. 결론

본 연구는 일반 아스팔트 밀입도 인공노화 혼합물과 현장노화 혼합물을 이용하여 노화의 심각성을 분석한 연구로서 결과분석을 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 일반적으로 단기노화(short-term aging: SA) 시 아스팔트가 고온의 골재와 접촉시 순간연소로 노화

가 많이 발생하는 것으로 알려져 있으나 165℃, 185℃ 골재와 160℃ 아스팔트를 1분간 혼합한 전·후의 절대 점도(absolute viscosity: AV)에 별 차이가 없어 이는 근거없는 추측으로 판단되었다.

2. 인공노화 아스팔트 혼합물로부터 추출·회수한 바인더에서 측정된 절대점도(absolute viscosity: AV)와 같은 혼합물에서 바인더 추출·회수없이 GPC로 측정된 아스팔트 대형분자(large-molecular size: LMS) 비율(%) 간에 밀접한 상관관계($R^2=0.98$)가 있어 혼합물에서 단시간(2시간 이내)에 측정된 LMS(%)로부터 AV의 추정에 신뢰성이 높음을 확인하였다.
3. 현장 코어혼합물에서 LMS(%)를 측정하여 AV를 추정하였으며, 노화연수(공용기간)와 LMS(%) 또는 AV 간의 상관관계가 높게($R^2=0.90\sim 0.92$) 나타났다. 이를 근거로 SA 혼합물의 환산노화연수를 추정할 수 있어 정상단기노화(160℃ 1시간)에 비해 20℃ 높은 온도로 4시간 유지하면 약 100배까지 점도가 높아져 SA 온도와 시간이 매우 심각함을 발견하였다.
4. 환산노화연수는 그만큼 기간이 지난(노화된) 혼합물과 유사한 수준으로 단기노화 혼합물이 노화되었다는 의미이며, 이를 사용자 입장에서는 SA에 의해 이미 그만큼 공용수명단축(service life reduction: SLR)이 된 것으로 볼 수 있다. 이렇게 SA에서 과다노화된 혼합물은 인공 장기노화(long-term aging: LA)에 의해 급격한 점도증가가 나타나, 실제 포설되면 매우 심각한 공용수명 단축이 이루어질 것임을 예견할 수 있었다.
5. 교통정체로 장시간 대기 시나 동절기에는 온도유지를 위해 혼합물을 고온으로 출하하여 다짐밀도 확보가 가능토록 하는 것이 관례이다. 그러나 이런 경우 심각한 단기노화로 인해 막대한 공용수명단축 위험을 안게 됨을 본 연구에서 확인하였으며, 이를 근거로 향후 새로운 개념에서의 혼합물 온도관리 기준이 정립되어야 할 것이다.
6. 본 연구 결과는 일반 혼합물에 의한 단기노화의 심각성을 수치로 보여준 한 예이며 이와 같은 현상을 체계적으로 조사 분석한 최초의 기초연구라 할 수 있다. 또한 GPC 방법을 이용할 경우 번거로운 추출·회수와 점도측정 과정을 생략할 수 있어 연구자들은 물론 현장실험실에서도 신속히 혼합물 내 바인더의 특성을 추정할 수 있을 것이다. 하지만 보다 실용적인 결과를 얻기 위해서는 향후 다양한 재료에 의한 현장 및 실내의 추가 연구가 뒤따라야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 2013 학술연구조성비와 국토교통부 (한국산업기술시험원) 지원으로 석재복합 건설신소재 연구소의 시설·장비를 이용하여 수행되었음.

REFERENCES

- Ahn, K. A., Kim, S. W., Lee, Y. K. and Kim, K. W. (2002), "Estimation of binder viscosity in aged asphalt mixture using GPC," Proceedings, 4th International Conference on Road & Airfield Pavement Technology, Kunming, China, April 23.
- Asphalt Institute (2002), "Performance graded asphalt binder specification and testing," Superpave Series No. 1, (SP-1), Lexington, KY, USA.
- Doh, Y. S., Serji N. Amirhanian and Kim, K. W. (2008), "Analysis of unbalanced binder oxidation level in recycled asphalt mixture using GPC," Construction and Building Materials, 22(6), June, 1253-1260.
- Jung, J. H., Cho, B. J., Park, N. W., Kim, K. W. (2007), "Study of artificial aging procedure for asphalt mixtures," Journal of Korean Society of Road Engineers, 9(4), 45-54.
- Kim, K. W., and Burati, J. L. (1993), "Use of GPC chromatogram to characterize aged asphalt cement," Journal of Materials in Civil Engineering, 5(1), ASCE.
- Kim, K. W., Hong, S. K., Cho, M. J. and Doh, Y. S. (2005), "Correlation of binder GPC characteristics and mechanical properties of hot-mix recycled asphalt mixtures," Journal of Korean Society of Road Engineers, 7(1), March, 11-20.
- Kim, K. W., Kim, K. A., Doh, Y. S. and Amirhanian, S. N. (2006), "Estimation of RAP's binder viscosity using GPC without binder recovery," Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 18(4), July/August, 561-567.
- Kim, K. W., Kim, S., Ahn, K. A., Lee, S. J., Yun, Y. B., Han, J. Y. and Yun, J. H. (2014), "Correlation analyses of aging and serviceability properties and development of aging estimation methodology for asphalt pavements," Final Report, Submitted by Kangwon National University to Expressway and Transportation Research Institute, Hwa-sung, Korea.
- Kim, K. W., Lee, G. H. Kwon, O. S., Jeong, K. D. and Amirhanian, S. N. (2005), "Examination of RAP binder rejuvenation level in recycled asphalt mixtures using GPC," Proceedings of 5th ICPT, Ed. by Kim, May, 251-257.
- Kim, S., Lee, S. H., Kwon, O., Han, J. Y., Kim, Y. S. and Kim, K. W. (2016), "Estimation of service life reduction of asphalt pavement due to short-term ageing measured by GPC from of asphalt mixture," Road Materials and Pavement Design, 17(1), 153-167.
- Kim, S. Park, J. and Kim, K. W. (2011), "Correlation analyses for implementation of binder properties for rut- potential estimation of asphalt mixtures," Journal of Testing and Evaluation, ASTM, 39(5), 858-867.

- Lee, S., Han, J. Y., Kim, Y., Kim, S. and Kim, K. W. (2014), "Significance of short-term aging due to high asphalt mixture temperature," *Journal of Advanced Construction Materials*, 19(1), 11-20.
- Lee, S. J., Han, J. Y., Kwon, O. S. Kim, S. and Kim, K. W. (2013), "Binder physical property of HMA mixture after short-term aging treatment," *Proceedings of the Spring Conference, Korean Society of Road Engineers*, Seoul, March 13.
- Lee, S.-J., Kim, H. S., Amirkhanian, S., Kim, K. W. (2008), "Prediction of engineering properties of recycled aged rubberized mixes using GPC." *Urban Transport 2008*, Vol. 91, Sept. 1-2, Malta, 469-478.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2014), "Production and construction of asphalt mixtures".
- Yun, Y. B., Kwon, O. S., Han, J. Y., Kim, Y. S., Kim, S. and Kim, K. W. (2014), "Development of short-term aging protocol for warm-mix asphalt mixtures," *Journal of Advanced Construction Materials*, 19(1), 1-10.