

교통개방을 위한 에폭시 아스팔트 콘크리트의 강도 예측모델 개발

A Development of Strength Prediction Model of Epoxy Asphalt Concrete for Traffic Opening

백유진* · 조신행** · 박창우*** · 김낙석****

Baek, Yu Jin · Jo, Shin Haeng · Park, Chang Woo · Kim, Nakseok

Abstract

It is important to decide traffic opening time for construction plan of epoxy asphalt pavement. For this purpose, strength prediction model of epoxy asphalt concrete is required. In this study, Marshall stability was measured according to temperature and time for making strength properties equation. Strength prediction model was developed using chemical kinetics considering temperature variation. The traffic opening time of epoxy asphalt pavement on bridge deck has been predicted using the developed model. The prediction and actual traffic opening times were different by 17-days, because weathers of year 2009-2011 used in prediction model were different from weather of year 2012. When the prediction model used the actually measured temperatures of pavement, the difference between real opening time and prediction opening time was two days. The correlation analysis result between measured strength and prediction strength revealed that the R^2 using accurate temperature of pavement was 0.95. An improved precise prediction result is to be obtained if the prediction model uses accurate temperature data of pavement.

Keywords : epoxy asphalt, chemical kinetics, traffic opening time, strength prediction model

요 지

교통개방시점의 예측은 공사 계획을 위해 중요하며 이를 위해 에폭시 아스팔트 혼합물의 양생에 따른 강도를 예측하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 에폭시 아스팔트 혼합물의 양생온도와 시간에 따른 마찰안정도를 측정하고 이를 이용해 강도 발현식을 구하였으며, 변화하는 온도와 강도에 따른 반응속도를 반영할 수 있도록 화학적 반응속도론을 이용하여 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 개발하였다. 예측모델을 사용하여 에폭시 아스팔트 포장에 적용된 국내 교량에 대해 교통개방시기를 예측하였다. 2009년~2011년의 기상조건에 따라 가정된 포장체 온도를 사용한 예측결과는 실제 교통개방일과 17일의 차이가 발생했으나 이는 2012년의 실제 기상상태와의 차이 때문이다. 실제 측정된 포장 온도를 예측모델에 대입할 경우 2일의 교통개방가능일 차이가 있었으며, 상관관계 분석 결과 R^2 가 0.95로 실제 강도값과 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 기상 상태와 포장체의 온도에 대한 충분한 데이터를 확보한다면 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 사용하여 상당히 신뢰도 있는 교통개방 가능 시기의 예측이 가능한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 에폭시 아스팔트, 화학반응속도론, 교통개방시기, 강도 예측모델

1. 서 론

에폭시 아스팔트 바인더는 일반 아스팔트 바인더와 에폭시 수지의 결합으로 열경화성의 특성을 가지며 아스팔트 혼합물을 매우 우수한 공용성을 갖게 한다(Huang, 2003). 에폭시 아스팔트 포장은 교차로, 버스정류장 등 가혹한 조건하에 적용이 가능하며, 특히 교면포장에 요구되는 방수성, 휨추중성이 우수하고 내구성이 뛰어난 뿐 아니라 일반 아스팔트 콘크리트 포장에 비해 얇은 포장두께로 고정하중의 감소

가 가능하여 장대교량의 적용에 유리하다. 이러한 이유로 에폭시 아스팔트 포장은 미국, 중국 등 국외에서 교면포장 재료로 많이 사용되고 있으며 국내에서도 에폭시 아스팔트 포장에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다(김병현, 2011). 최근 국내에서도 장경간 강바닥판 교량의 교면포장으로 에폭시 아스팔트 포장이 적용되고 있으나 국외 시공경험과 비교하였을 때 에폭시 아스팔트에 대한 연구와 시공 경험은 아직까지도 많이 부족하다. 에폭시 아스팔트에 혼합되는 에폭시 수지는 액상 또는 고체상으로 존재할 수 있는 다양한 물

*경기대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail : lemon8738@naver.com)

**정희원 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : roadcreator@gmail.com)

***정희원 · 승화 명품건설 기술연구소 차장 · 경기대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (E-mail : cwpark@newsh.co.kr)

****정희원 · 교신저자 · 경기대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : nskim1@kgu.ac.kr)

성을 가진 물질로 경화제와 반응하여 경화가 이루어져야 사용할 수 있으며, 온도와 시간에 따라 경화 반응속도가 변화하여 강도 발현 정도의 차이를 발생시킨다(이창훈, 2009). 때문에 일반 아스팔트 포장과 달리 에폭시 아스팔트 포장을 적용할 경우 교통개방은 일정수준 이상의 강도가 발현된 이후에 해야 하는데, Chemco 에폭시 아스팔트 포장 시방서에 따르면 시공 현장에서는 교통개방시기를 결정하기 위해 생산 혼합물로 공시체를 제작하여 현장에 보관 후 안정도를 측정하여 교통개방 수준에 도달 여부를 확인하는 방법이 시행되고 있다(<http://www.chemcosystems.com>). 그러나 이는 기온과 기상상황에 따른 교통개방시기를 알 수 없어 공사 계획의 수립을 어렵게 하며 많은 양의 공시체를 제작하여 일일이 강도를 측정하는 것 또한 매우 번거로운 일이다. 본 연구에서는 에폭시 아스팔트 포장의 현장 적용 활성화를 위해 에폭시 경화 반응의 특성을 분석하고 이를 통한 에폭시 아스팔트 포장의 강도 예측모델을 수립함으로써 향후 에폭시 아스팔트 적용 시 교통개방시기를 예측하여 보다 원활한 공사계획 수립의 자료로 사용하고자 한다.

2. 에폭시의 경화 반응

에폭시 아스팔트 바인더는 2액형의 반응형 재료로 A재(에폭시 수지)와 B재(아스팔트+경화제)를 혼합하여 사용하는데 일반적인 아스팔트는 온도 저하에 따라 경화가 완료되지만 에폭시 아스팔트는 에폭시 반응에 따른 추가적인 경화메커니즘을 통해 최종 강도에 도달하는 양생 과정을 거치게 된다. 에폭시 아스팔트 혼합물은 생산 후 일반 아스팔트 혼합물 수준의 마찰안정도인 약 6,000N~8,000N를 나타내나 시간이 지나면 에폭시 반응에 의해 최종적으로는 60,000N~80,000N의 마찰안정도를 나타내게 된다.

에폭시 아스팔트 내부의 에폭시 수지가 경화제와 혼합되어 경화 반응이 시작되면 선형의 에폭시 수지는 가교구조를 갖는 분자로 전환하게 되는데, 가교구조란 다리구조라고도 하며 사슬 모양의 구조를 가진 천연 또는 합성 고분자화합물을 결합시켜 3차원 그물구조를 지닌 새로운 화학결합을 만드는 반응을 말한다. 이러한 사슬 모양 고분자에서 사슬 사이의 다리 역할을 하는 물질을 경화제라고 한다. 이와 같은 에폭시 반응은 반응자체가 복잡하고 그에 따른 물성의 차이가 발생하므로 화학적, 물리적, 열적 특성에 대한 이해가 중요하다(조철희, 2007).

국내 ○○대교의 교면포장으로 에폭시 아스팔트 포장을 적용함에 있어 시방서에서는 소형차량 통행은 25,000N 이상, 완전 교통개방은 40,000N 이상의 마찰안정도를 요구하는데 이는 강상판 장대교량의 경우 차량 통행시 발생하는 교량의 처짐과 진동에 견디고, 교량 구조물을 안전하게 보호하기 위해서이다. 에폭시 반응은 일반적인 화학반응과 마찬가지로 온도에 큰 영향을 받으며, 이로 인해 에폭시 아스팔트 포장의 강도 발현은 기온과 기상상태에 따른 포장체의 온도에 따라 달라진다.

에폭시 아스팔트 포장의 적용 시 교통개방시점을 결정하기 위해 중국 난징대교를 비롯한 국외 시공사례에서는 포장 포설에 사용된 혼합물로 공시체를 제작하고 시공 현장에서 포

장과 동일한 조건하에 노출시킨 후 마찰안정도 측정을 통해 교통개방 가능 수준의 강도 발현을 판단하게 된다. 이와 같은 방법은 측정강도 값에 의해 교통개방시점이 결정되기 때문에 공사계획 수립을 어렵게 하며 시일 경과에 따른 강도 발현을 확인하기 위해 많은 공시체를 필요로 하게 된다. 따라서 본 연구에서는 에폭시 반응에 기초한 에폭시 아스팔트의 강도 예측모델을 개발하고자 하며, 향후 이를 통해 교통개방 가능 시기를 예측하여 합리적인 공사 계획을 수립할 수 있을 것이다.

3. 반응속도론

에폭시 아스팔트 혼합물의 강도는 에폭시 반응에 의한 바인더의 경화 정도에 영향을 받기 때문에 에폭시 아스팔트 강도 예측모델은 기본적인 화학 반응속도론에 기초하여야 한다. 화학 물질의 반응속도는 어떤 화학반응이 일어나는 속도를 말하며, 단위 시간당 생성물 농도의 증가 또는 감소로 정의된다. 일반적인 화학 반응의 반응속도를 정량적으로 묘사하기 위해서는 단위 시간당 반응물이나 생성물 농도의 변화량이 명기되어야 한다(McMurry, 2009). 그러나 아스팔트 혼합물의 강도는 화학적 반응을 정량화하기 어렵기 때문에 이를 감안하여 아스팔트 혼합물의 강도 발현을 반응상태의 지표로 사용하여야 하며, 시간과 온도에 따른 에폭시 반응속도와 강도의 상관관계는 화학공학의 반응속도론에 근거하여 도출되어야 하므로, 본 연구에서는 화학 반응속도론과 실내 실험을 통해 도출된 에폭시 반응속도와 강도의 상관관계식을 이용하여 강도 예측모델을 개발하고자 한다.

3.1 Ludwig Ferdinand Wilhelmy 반응식

독일의 화학자인 Ludwig Ferdinand Wilhelmy가 처음으로 화학 반응속도에 대한 정량적 접근을 시도하였다. Wilhelmy의 식은 미분방정식을 이용하여 반응과정을 해석하였으며 식 (1)과 같은 반응속도의 온도의존성을 설명할 수 있는 경험식을 제안하였으나 정방향과 역방향에 대한 속도상수가 평형상수와 일치되어야 하는 온도의존성의 요구조건을 만족시키지 못하는 한계가 있다(이익춘, 1991).

$$k = Ae^{DT} \quad (1)$$

3.2 Arrhenius 방정식

1889년 Svante Arrhenius는 Jacobus Henricus van't Hoff가 제안한 방정식을 바탕으로 반응속도에 온도가 미치는 영향이 크다고 지적하며, 간단하지만 정확하고 일정한 반응속도의 온도의존성에 대한 식 (2), (3)과 같은 Arrhenius 방정식을 제시하였다(<http://goldbook.iupac.org>).

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (3)$$

k는 속도상수로 절대온도 T에 의존하며 농도와는 무관하다. R은 기체상수, A는 지수 앞 인자(pre-exponential factor)이고 E_a는 활성화 에너지(activation energy)이다. McMurry

(2009)에 의하면 활성화 에너지는 반응물에서 생성물로 변화하기 전 부딪히는 장벽과 같은 개념으로 활성화 에너지가 클수록 반응속도의 온도에 대한 의존도가 크다. Arrhenius 방정식이 중요한 이유는 한 온도 T의 k를 알면 다른 온도 T'의 k를 이용하여 활성화 에너지를 계산할 수 있기 때문이다. 황광춘(2011)과 Bahram Keyvani(2010) 등은 Differential Scanning Calorimeter(DSC) 분석을 통해 활성화 에너지를 측정하고 Arrhenius 방정식을 이용하여 에폭시 수지의 시간과 온도에 따른 경화 반응을 분석하였다.

3.3 Williams-Landel-Ferry 방정식

Wilhelmy의 반응속도식은 화학반응의 일반적인 형태를 제시하는 수준이며, Arrhenius의 방정식은 특정 온도에서의 반응속도를 나타내는 식으로 온도 변화에 따른 반응속도를 묘사하기에는 부족함이 있다. 이를 보완하고자 시간과 온도 중첩에 관련된 경험적 방정식으로 식 (4)과 같은 Williams-Landel-Ferry(WLF) 방정식이 있다. A는 생성물이며, C_{1,2}는 생성물 A를 맞추기 위해 조정되는 경험적 상수이다. T_g은 마스터커브를 구축하기 위한 기준온도 이고 T는 실험 온도이다. T는 T_r 이상 온도에 적용하여야 하며, 실험을 수행한 온도 T 이외의 온도 T'에 대한 온도상수 추정 가능하다(Sullivan, 1990).

$$\log A = \frac{-c_1(T-T_r)}{c_2+(T-T_r)} \quad (4)$$

Sopade, P.A.(2003)의 연구에 의하면 Arrhenius 방정식은 반응속도와 온도의존성에 대한 분석으로 사용되지만, WLF 방정식은 온도와 점도의 관계를 멱함수 법칙에 의해 입증하여 다양한 분야에서 온도와 시간, 그리고 점도에 관한 연구에 적용되고 있으며, Horng-Jer Tai(2000)은 WLF 방정식을 적용하여 에폭시 경화 반응속도에 대한 연구를 수행하였다.

4. 에폭시 아스팔트 강도 예측모델 개발

본 연구에서는 실내 실험을 통해 에폭시 아스팔트 혼합물의 온도와 시간에 따른 마찰안정도를 측정하여 각 양생온도에 따른 강도 예측식을 결정한다. 이를 반응속도론에 근거하여 연속적인 온도 변화에 따라 강도 발현 정도를 예측할 수

있는 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 수립하고 모델의 검증을 위해 실제 현장에서의 실험 결과와 비교 분석하였다.

4.1 실내실험

에폭시 아스팔트 혼합물은 시간과 온도에 따라 강도 발현 정도의 차이가 발생하므로 마찰 공시체를 제작하여 40°C, 50°C, 60°C, 80°C에서 각각 양생시킨 후 표 1과 같이 양생 시간에 따른 마찰안정도를 측정하였다.

운반시간에 대한 모사를 위해 혼합된 에폭시 아스팔트 혼합물을 120°C 오븐에 1시간 동안 보관한 후 마찰다짐기를 이용해 양면 50회 다짐을 실시하여 마찰공시체를 제작하였다. 에폭시 아스팔트는 생산 후 포설까지의 시간동안 약120°C의 고온에 있게 되며 이때 매우 활발한 에폭시 반응이 일어나게 됨으로 이를 반영하고자 하였으며 포설직후의 마찰안정도, 즉 120°C 1시간 보관 후 제작된 공시체의 마찰안정도를 초기 마찰안정도로 하였으며 이때의 양생시간을 0으로 보았다.

마찰안정도의 측정은 KS F 2337(마찰 시험기를 사용한 역청 혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법)에 따라 양생시간과 온도에 따라 오븐에 보관된 공시체를 60°C 항온수조에서 30분간 수침 후 마찰안정도를 측정하였다.

마찰안정도 측정 결과 온도가 높을수록 강도발현이 빠르며, 양생시간에 따른 강도발현 경향을 보면 초기에는 비교적 완만한 반응속도를 보이다 약 10,000N에 다다르면 반응속도가 증가하고 일정한 기울기의 강도 발현을 보이며 어느 정도 최대강도에 근접되면 다시 강도 증가속도가 감소하는 S자형 곡선을 그리는 것을 알 수 있었다.

4.2 에폭시 아스팔트 강도 발현식 수립

4.2.1 온도별 강도 발현식

강도 예측모델을 개발하기 위해 우선적으로 각 온도별로 양생시간과 강도의 상관관계를 알아보았다. 강도 예측모델은 최고 강도의 예측이 목적이 아니라 교통개방 가능 강도의 예측임으로 최고 강도 부근에서 반응속도가 느려지는 부분을 생략하여 식을 단순화 시켰다. 식 (1)의 Wilhelmy 식을 참고하여 지수함수 형태로 온도별 강도 발현식을 그림 1과 같이 단순회귀모형을 사용하여 구하였으며, 강도 발현식을 Wilhelmy의 반응식 형태로 변형하기 위해 식 (5)와 같은 모습으로 변환하고 각각의 상수를 구해 표 2에 정리하였다.

표 1. 온도 별 마찰안정도 측정 결과

40°C		50°C		60°C		80°C	
양생시간 (h)	마찰안정도 (N)	양생시간 (h)	마찰안정도 (N)	양생시간 (h)	마찰안정도 (N)	양생시간 (h)	마찰안정도 (N)
0	6,623	0	6,623	0	6,623	0	6,623
48	9,164	12	6,500	12	8,791	8	11,200
72	10,191	24	7,800	24	15,747	12	22,000
96	12,057	48	17,400	36	31,636	24	55,100
120	16,743	72	28,300	48	44,290	-	-
144	21,199	96	43,500	-	-	-	-
168	24,627	120	53,400	-	-	-	-
192	31,150	-	-	-	-	-	-
216	37,645	-	-	-	-	-	-
312	57,233	-	-	-	-	-	-

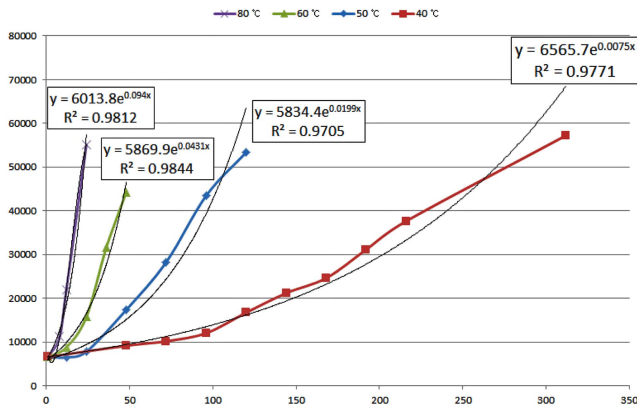


그림 1. 양생시간과 온도별 강도 발현식

표 2. 온도에 따른 양생시간과 강도발현식의 상수결정

마살안정도 (N) = A · e ^(a · t)			
온도(°C)	A	a	R ²
40	6565.7	0.0075	0.9771
50	5834.4	0.0199	0.9705
60	5869.9	0.0431	0.9844
80	6013.8	0.0940	0.9812

$$f(N) = A \cdot \text{EXP}(a \cdot t) \quad (5)$$

실험을 통해 얻어진 강도 발현식은 실험 온도에서 양생시간에 따른 강도를 나타내므로 임의의 온도에서의 강도 발현식을 구하기 위해서는 식 (4)의 WLF 방정식을 적용하여 보다 일반적인 형태의 강도 발현식을 만들 필요가 있다.

WLF 방정식의 경우 실험을 수행한 온도 T 이외에 임의의 온도 T에 대한 온도상수 추정이 가능할 뿐 아니라 온도와 점도의 관계를 멱함수 법칙에 의해 입증하였으므로 점탄성 재료인 아스팔트의 특성 또한 반영이 가능할 것으로 판단된다. Horng-Jer Tai(2000)는 Rabinowich model과 WLF 방정식을 적용한 식 (6)을 이용하여 에폭시 경화 반응속도에 대하여 연구를 수행하였다. k_{d0} , a_d , C_1 은 실험에 의한 경험적 상수이다.

$$\ln K_d = \ln K_{d,0} + \frac{\alpha_d(T - T_r)}{c_1 - (T - T_r)} \quad (6)$$

표 3. 실내실험 결과 와 강도 예측모델 결과 비교

40°C			50°C			60°C			80°C		
양생시간 (hr)	f (N)	f* (N)	양생시간 (hr)	f (N)	f* (N)	양생시간 (hr)	f (N)	f* (N)	양생시간 (hr)	f (N)	f* (N)
0	6,623	6,623	0	6,623	6,623	0	6,623	6,623	0	6,623	6,623
48	9,164	9,493	12	6,500	8,346	12	8,791	10,761	8	11,200	13,588
72	10,191	11,365	24	7,800	10,517	24	15,747	17,485	12	22,000	19,463
96	12,057	13,607	48	17,400	16,702	36	31,636	28,410	24	55,100	57,195
120	16,743	16,290	72	28,300	26,522	48	44,290	46,162	-	-	-
144	21,199	19,503	96	43,500	42,118	-	-	-	-	-	-
168	24,627	23,349	120	53,400	66,883	-	-	-	-	-	-
192	31,150	27,954	-	-	-	-	-	-	-	-	-
216	37,645	33,467	-	-	-	-	-	-	-	-	-
312	57,233	68,755	-	-	-	-	-	-	-	-	-

따라서 본 연구에서는 에폭시 경화 반응속도에 대한 식 (6)과 온도에 따른 양생시간과 강도의 상관관계식 식 (5)를 사용하여 에폭시 아스팔트 경화 반응에 따른 임의의 온도에 적용가능한 강도 발현식을 도출하고자 하였다. 양생시간과 강도의 함수로 나타난 상관관계식에 온도에 대한 변수를 반영하기 위해 WLF 방정식을 적용하여 시간과 온도를 모두 고려한 식 (7)과 같은 강도 발현식을 수립하였다. 식 (7)을 도출하기 위해 적용된 강도의 범위는 강도발현식의 단순화와 현장에서 교통개방 가능 시기 결정을 목표로 한 모델 개발을 고려하여 완전 교통개방 가능 안정도인 40,000N로 결정하였다.

$$f^*(N) = A \cdot \text{EXP}\left(\frac{c_1(T - T_r)}{c_2 - (T - T_r)} \cdot t\right) = A \cdot \text{EXP}(a_T \cdot t) \quad (7)$$

f^* : 예측 강도 (N)

A: 특성 상수

C_1, C_2 : 온도변화의 특성을 나타낼 수 있는 상수

T: 포장 표면 온도(°C)

T_r : 기준온도(40°C)

t: 포장표면온도 유지 시간(hr)

특정상수 A는 에폭시 아스팔트의 양생이 이루어지지 않은 초기값을 의미하며, 표 1의 양생시간 0hr에 해당하는 값으로 6,623을 사용하였다. 특성 상수 A는 에폭시 아스팔트 혼합물의 골재입도, 바인더 함량 등에 따라 변화하는 값으로 예측모델에 적용하고자 하는 에폭시 아스팔트 혼합물의 고유 값이라 할 수 있다. C_1, C_2 는 온도변화의 특성을 나타낼 수 있는 상수로 실험과 경험을 통해 결정되는데, 본 연구에서는 실내실험 결과와 로지스틱 회귀모형의 최대우도추정법을 적용하였다. 최대우도추정법을 사용하여 로지스틱 반응함수를 추정하고 SPSS를 통해 회귀계수의 유의성을 검정하였으며, 결과 C_1 은 0.4065, C_2 는 221로 결정하였다. T는 포장체의 온도이며, t는 온도가 유지된 시간이다. T_r 은 기준온도로 40°C로 하였으며, 40°C 이하의 온도에서 경화 반응이 매우 느리기 때문에 강도 발현에서 무시할 수 있는 수준이다. 기준온도에서 a_T 값은 0.0075 이다.

4.2.2 실내실험 결과와 강도 발현식 결과 비교

식 (7)의 강도 발현식에 의해 계산된 강도값($f^*(N)$)과 실측 마찰안정도와와의 비교는 표 3과 같다. 강도발현식과 실측값과는 40,000N까지는 상당히 유사한 결과를 나타내나, 40,000N 이상에서는 그 차이가 다소 커지는데 이는 강도발현식의 단순화를 위해 교통개방 가능 안정도인 40,000N까지 반영하여 식을 모델링하였기 때문이다.

4.3 에폭시 아스팔트 강도 예측모델 개발

현장에서의 에폭시 아스팔트 포장은 계속해서 변화하는 기온과 기상상태에 노출되어 있으므로 일정한 온도에서의 강도발현을 예측하는 강도발현식(식 (7))을 변화하는 온도에 따라 강도예측이 가능한 강도 예측모델로 변환시켜야 한다.

4.3.1 전통적 전이 상태 이론의 통계역학

에폭시 아스팔트의 반응은 매우 복잡하며, 에폭시의 화학적 반응 뿐 아니라 다양한 요소들이 복합적으로 작용하여 경화를 일으키고 강도발현속도에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 복잡한 에폭시 아스팔트 반응에 비해 단순한 강도 발현식의 형태를 취하는 방법으로 해석하고자 하였으며, 이를 위해 화학의 전통적 전이 상태 이론의 통계역학에서 분배함수(q)를 구하는 식 (8)을 참고하여 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 개발하고자 하였다. 전통적 전이 상태 이론은 매우 복잡한 반응에 비해 단순한 속도식이라도 정성적 방법으로 이해될 수 있도록 골격을 제공해준다(이익준, 1991).

$$q = \sum_i \left(g_{ei} \cdot e^{-\frac{e_i}{kT}} \right) \cdot \left(g_{vi} \cdot e^{-\frac{v_i}{kT}} \right) \cdot \left(g_{ri} \cdot e^{-\frac{r_i}{kT}} \right) \quad (8)$$

q : i 번째 해당하는 3가지 에너지 형태에 따른 분배함수

g_{ei}, g_{vi}, g_{ri} : i 번째 해당하는 에너지상태 수

e_i, v_i, r_i : i 번째 해당하는 서로 다른 형태의 에너지

4.3.2 강도 예측모델 개발

에폭시 아스팔트의 반응속도는 초기엔 느리지만 시간이 지남에 따라 점점 빨라지는 경향을 보인다. 따라서 강도 발현 정도에 따라 동일한 온도에 노출되어도 다른 반응속도를 보이게 된다. 또한 에폭시 아스팔트 혼합물은 골재 입도, 입형, 생산 온도 등에 영향을 받아 포장 직후의 초기강도에도 차이가 있으며 이와 같은 상황을 예측모델에 반영하고자 온도 변화시점에서의 강도수준을 초기값으로 하여 강도 증가 수준을 결정하는 예측모델을 수립하였다.

에폭시 아스팔트의 양생과정에서 온도가 변화할 때 그 전까지의 양생시간을 $t_{(n-1)}$ 이라하고 이때의 강도를 $f_{(n-1)}^*$ 라 하면, 이것은 다음 양생단계의 초기값이 된다. 계산하고자 하는 임의의 온도에서의 강도발현식에서 강도 $f_{(n-1)}^*$ 에 해당되는 수정시간 t_n^* 를 구하여 이를 시점으로 하여 양생 시간 동안 증가하는 강도를 계산함으로써 예상되는 강도 f_m^* 를 구할 수 있다. 식 (10)은 본 연구를 통해 제안한 에폭시 아스팔트의 강도 예측모델이며, 식 (9)는 모델에 사용되는 수정시간(t_n^*)을 계산하는 식이다.

$$t_n^* = \left[\frac{1}{a_{Tn}} \ln \left(\frac{f_{(n-1)}^*}{A} \right) \right] + t \quad (9)$$

$$f_m^* = A \cdot e^{(a_{Tn} \cdot t_n^*)} \quad (10)$$

t_n^* : 수정시간(hr)

t : 양생 온도(T)의 유지시간(hr)

a_{Tn} : 양생 온도(T)에 따른 상수

f_m^* : 양생 후 예측 강도(N)

5. 에폭시 아스팔트 강도 예측모델의 현장 적용성 검토

에폭시 아스팔트 콘크리트의 강도 예측모델을 검증하기 위해 최근 에폭시 아스팔트 포장이 적용된 ○○대교의 현장데이터를 사용하여 예측모델과 실측데이터 사이의 상관성을 분석하였다.

5.1 강도 예측모델을 적용하여 교통개방시기 예측

강도 예측모델은 양생기간이 필요한 에폭시 아스팔트 포장에 대해 시공 지역과 시기에 따라 교통개방 가능 시기를 예측하는데 그 목적이 있다. 에폭시 아스팔트 포장이 적용된 ○○대교는 전라남도 광양지역에 위치하며 포장은 2012년 4월 15일로 계획되었다. 본 연구에서는 이 지역의 2009년에서 2011년까지의 4월, 5월의 일 최고기온과 기상상태를 예측모델에 반영하여 ○○대교의 교통개방가능 시기를 예측하였다. 기온이 낮고 비가 오거나 구름이 많은 흐린날은 강도 증가가 미미할 것으로 판단되어 양생 기간에서 제외하였으며 맑은 날의 기온에 따라 포장체의 온도를 기존 포장온도 데이터를 참고하여 가정하였다.

강도 예측모델의 현장 적용성의 검증을 위해 본 연구에서 제시한 강도 예측모델(f_m^*)을 사용하여 ○○대교 포장을 계획한 4월 15일부터 3년간 교통개방 가능시기를 예측하였으며, 결과는 표 4와 같다.

각 년도별로 4월 15일 시공하였을 경우, 전면 교통개방 가능 안정도인 40,000N 이상이 되는 시기는 2009년은 5월 11일, 2010년은 5월 30일, 2011년은 5월 29일로 기상 상태에 따라 차이가 있다. 2012년의 경우 기상 상태의 예측이 어려움으로 과거 3년간의 교통개방 가능시기를 평균적으로 적용하였을 때, 5월 23일에 교통개방 가능 강도에 도달하는 것으로 예측되었다.

5.2 강도 예측모델의 검증

2012년 4월 15일에 에폭시 아스팔트 혼합물로 ○○대교의 교면포장을 실시하였으며, 이때 생산된 혼합물로 공시체를

표 4. 교통개방 시기 예측 결과

연도	기상상태		강도 예측모델			교통개방 시기
	실 양생 기간(day)	비/흐림 (day)	t_n^* (hr)	a_T	f_m^* (N)	
2009	20	7	105	0.0173	40,448	5월 11일
2010	23	23	120	0.0153	41,176	5월 30일
2011	25	20	119	0.0153	40,978	5월 29일

제작하여 현장에 보관한 후 마살안정도를 측정하였으며 결과는 표 5와 같다.

에폭시 아스팔트는 혼합물을 생산하여 현장으로 운반되는 동안 고온의 생산온도가 유지되어 경화가 진행되므로 생산 시료를 사용하여 공시체를 제작하고 운반 및 포설시간(약 1시간~1시간 30분) 동안 120°C 오븐에 보관 후 양생온도에 따른 마살안정도를 측정하였으며, 양생 없이 포설 직후의 마살안정도는 6,800N이었다. 현장 보관으로 실외양생조건을

표 5. 실외양생 마살안정도

안정도 확인일시	양생시간(hr)	실외양생 결과(N)
4월 15일	0	6,800
4월 17일	53	7,900
4월 18일	78	8,800
4월 22일	174	9,000
4월 23일	198	9,900
4월 24일	222	13,000
4월 26일	268	13,300
4월 27일	292	16,700
4월 28일	316	22,400
5월 02일	408	26,600
5월 03일	435	27,000
5월 04일	459	30,100
5월 07일	531	50,800
5월 09일	582	53,900

통해 결정된 교통개방시기는 그림 2와 같이 전면 교통개방 가능일이 520시간 후인 5월 6일로 나타나 강도 예측모델을 통하여 예측된 시기와는 약 17일의 차이가 발생하였다. 이는 2009년~2011년과 기상과 2012년의 기상상태의 차이 때문이다.

5.2.1 실기상 상황을 적용한 교통개방시기 계산

앞서 예측한 교통개방일과 실 교통개방 가능일의 차이는 예측에 사용된 기상 상태가 2012년 4월~5월의 실제 기상 상태와 차이가 있기 때문이며, 예측모델의 적합성을 확인하기 위해 실제 기상상태를 반영하여 예측모델로 강도를 계산하였다. 포장체의 온도는 온도센서를 포장에 설치하고 데이터로거를 통해 시간별 포장체의 온도를 저장하였다. 20초 간

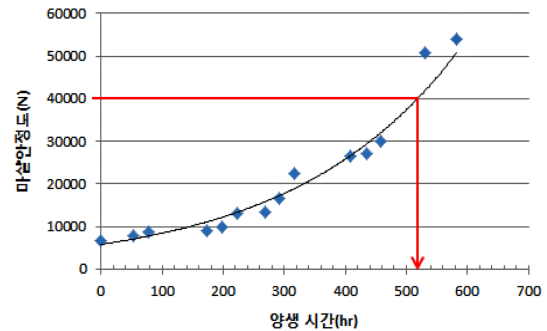


그림 2. 실교통개방시기 결정

표 6. 강도예측모델 적용 결과

강도 예측 시기	날씨	최고 기온 (°C)	포장 온도 (°C)	강도 예측모델				
				$\frac{1}{a_{Tn}} \ln\left(\frac{f_{n-1}}{A}\right)$	표면 온도 유지 시간 t (hr)	t_n^* (hr)	a_r	f_{tn}^* (N)
포장초기값	-	-	-	-	-	-	-	6,800
4월 15 일	구름조금	19.7	64	1	4	5	0.0495	8,290
16 일	맑음	21.6	47	17	7	24	0.0133	9,098
17 일	맑음	17.6	45	34	6	40	0.0094	9,627
18 일	구름많음	18.0	45	40	5	45	0.0094	10,091
19 일	비/5mm	13.1	32	-	-	-	-	-
20 일	비/1mm	15.4	33	-	-	-	-	-
21 일	비/89mm	15.2	28	-	-	-	-	-
22 일	구름조금	16.9	44	56	5	61	0.0075	10,476
23 일	맑음	19.1	47	34	6	40	0.0133	11,346
24 일	구름많음	20.1	48	35	7	42	0.0153	12,625
25 일	비/65.5mm	17.1	35	-	-	-	-	-
26 일	맑음	18.0	46	57	6	63	0.0113	13,515
27 일	맑음	19.3	47	54	7	61	0.0133	14,833
28 일	맑음	19.7	48	53	7	60	0.0153	16,506
29 일	흐림	18.1	44	122	5	127	0.0075	17,136
30 일	비/3mm	17.3	40	127	4	131	0.0075	17,658
05월 1일	비/17mm	17.8	35	-	-	-	-	-
2 일	비/0.2mm	22.1	47	74	5	79	0.0133	18,872
3 일	구름조금	23.1	48	69	6	75	0.0153	20,682
4 일	맑음	23.0	50	59	7	66	0.0193	23,669
5 일	비	27.9	50	66	6	72	0.0193	26,569
6 일	맑음	24.1	52	60	7	67	0.0233	31,284
7 일	맑음	23.6	50	81	7	88	0.0193	35,801
8 일	구름조금	23.1	50	88	6	94	0.0193	40,188
9 일	맑음	24.9	52	77	7	84	0.0233	47,321

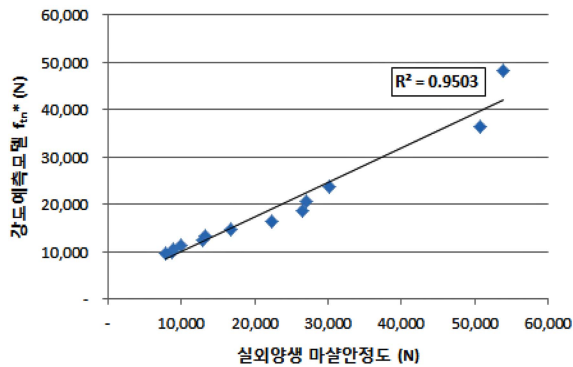


그림 3. 실외양생 마찰안정도와 강도예측(f_m)결과 비교

격으로 저장된 온도에 대해 40°C 이상인 시간대의 온도의 평균을 포장온도로 하였으며, 강도 예측모델을 사용하여 표 6과 같은 결과를 얻었다.

강도 예측모델을 사용하여 예측한 결과 5월 8일에 교통개방강도에 도달하는 것으로 나타났으며, 실제 공시체의 마찰안정도 측정결과에 의한 교통개방일 5월 6일에 비해 2일 차이가 발생하였다. 이는 포장체 온도가 40°C 이하일 경우 양생의 진행이 전혀 되지 않는 것으로 가정하였기 때문이며, 예측모델은 포장의 보호를 위해 다소 보수적인 필요가 있으므로 타당한 수준의 차이로 받아들일 수 있을 것이다.

5.2.2 강도 예측모델의 현장 적용성 검증

에폭시 아스팔트 혼합물의 실측 마찰안정도와 강도 예측모델에 의한 마찰안정도를 비교하여 그림 3과 같이 예측모델과 실측 측정값의 상관관계를 분석한 결과 R^2 이 0.9503으로 매우 높은 상관관계를 나타내는 것을 알 수 있었다. 실측 측정값과 예측모델의 결과 값의 차이는 향후 기상 상태와 포장체 온도에 대한 보다 많은 데이터를 축적하고, 예측모델에 사용된 에폭시 반응과 관련된 상수들을 추가적인 실험을 통해 보완한다면 보다 신뢰성 높은 예측값을 얻을 수 있을 것이다.

6. 결 론

차세대 교면포장 기술로 국내 도입 초기인 에폭시 아스팔트 포장은 교통개방을 위한 강도 발현까지 양생 기간이 필요하며, 교통개방 가능 시기의 예측은 공사 계획을 위해 반드시 필요한 사항이다. 이를 위해 본 연구에서는 에폭시 반응에 기초한 에폭시 아스팔트 혼합물의 강도 예측모델을 수립하여 검증하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 에폭시 아스팔트 혼합물 공시체를 제작하여 40°C, 50°C, 60°C, 80°C에서 양생 시간별 마찰안정도를 측정하여 지수함수 형태의 강도 발현식을 도출하고, 화학적 반응속도론에 근거하여 WLF 방정식을 이용한 임의의 온도에서의 에폭시 아스팔트 강도 발현식을 수립하였다. 수립된 강도 발현식으로 온도 변화와 시간적 연속성을 반영한 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 수립하였다.
2. 에폭시 아스팔트 강도 예측모델을 검증하기 위해 ○○대교의 에폭시 아스팔트 포장 공사를 대상으로 교통개방시기를 예측하였으며, 3년간의 기상 자료를 이용해 예측한 교

통개방일과 실제 교통개방일과는 17일의 차이가 발생하였다. 이는 과거 3년의 기상상태와 2012년 4월, 5월의 기상상태의 차이가 크기 때문으로 교통개방일을 예측하는 데는 정확한 기상상태의 예상이 필요한 것으로 나타났다.

3. 실제 현장에서 측정된 포장체 온도를 예측모델에 반영할 경우, 예측모델과 실제 측정된 마찰안정도는 큰 차이가 없으며 상관관계 분석결과 R^2 가 0.9503으로 매우 높은 값을 나타냈다. 교통개방일의 경우 예측모델이 2일 늦는데 이는 예측모델에서 포장체 온도 40°C 이하에서는 강도증가가 없는 것으로 가정하였기 때문이며, 예측모델의 경우 포장의 보호를 위해 다소 보수적인 필요가 있으므로 정확한 포장체의 온도를 반영한다면 예측모델의 결과가 매우 합리적이라고 할 수 있다.
4. 본 연구를 통해 수립된 에폭시 아스팔트 강도 예측모델은 향후 에폭시 아스팔트 포장의 공사 계획 및 관리를 위해 꼭 필요한 품질 정보를 제공할 수 있어 에폭시 아스팔트 포장의 적용에 큰 도움을 줄 수 있으며, 향후 에폭시 아스팔트와 같은 반응형 포장재료의 반응속도 예측에 있어 기초 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2012학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

김병현(2011) 비스페놀형 에폭시 아스팔트 혼합물의 물리적 특성 연구, 석사학위논문, 세종대학교.
 이창훈(2009) 실용 에폭시 핸드북, 교우사.
 이익춘, 이분수, 김시준, 송호봉(1991) 화학반응속도론, 탐구당.
 조철희(2007) Siloxane으로 변성된 에폭시 수지의 경화 거동과 열적 특성, 석사학위 논문, 전북대학교.
 황광춘, 이동춘(2011) 에폭시/폴리옥시프로필렌디아민계의 경화 반응속도 및 동역학 특성 분석, *Polymer(Korea)*, Vol. 35, No. 3, pp. 196-202.
 Chemco System, Chemco 에폭시 아스팔트 포장 시방서.
 John McMurry, Robert C. Fay (2009) 일반화학, 화학교재편찬위원회 옮김. 청문각.
 Bahram Keyvani, Ali Sharif, Manouchehr Khorassani (2010) Determination of Arrhenius Equation Constants for Curing Reaction Kinetics of Fusion Bonded Epoxy, *Journal of Organic Chemistry*, Vol. 1, pp. 15-19.
 Horng-Jer Tai, Hui-Lung Chou (2000) Chemical shrinkage and diffusion-controlled reaction of an epoxy molding compound, *European Polymer Journal*, Vol. 36, pp. 2213-2219.
 Huang, W., Qian, Z., Chen, G., Yang, J. (2003) Epoxy asphalt concrete paving on the deck of long-span steel bridge, *Chinese Science Bulletin*, Vol. 48, pp. 2391-2394.
 Sullivan, J. (1990) Creep and physical aging of composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 207-232.
<http://goldbook.iupac.org>
 Sopade, P. A., Halley, P., Bhandari, B., D'Arcy, B., Doebler, C., Caffin, N. (2003) Application of the Williams - Landel - Ferry model to the viscosity-temperature relationship of Australian honeys, *Journal of food engineering*, Vol. 56, pp. 67-75.

(접수일: 2012.8.10/심사일: 2012.8.28/심사완료일: 2012.8.31)