

등가재령을 이용한 Whitetopping 포장의 교통개방 시기 예측에 관한 연구

The prediction of traffic opening time in Whitetopping
construction based upon concrete equivalent age

임수혁* 김 인태** 조윤호***
Im, Soo Hyuk Kim, In Tai Cho, Yoon Ho

1. 서론

Whitetopping 유지보수공법은 포설 후 1일 이내에 교통개방이 가능하고 영구 변형으로 인해 손상된 기존의 아스팔트 층 위에 일정 두께의 콘크리트를 직접 덧씌우기하는 공법을 말한다.(1) Whitetopping은 조기 교통개방을 위해 강도발현이 높은 3종 시멘트를 사용한다. 포설 후 1일 이내에 줄눈 절삭과 교통개방을 하는 특수한 조건이므로 그 시기 추정은 의미가 있다. 본 연구진은 과거 온도만을 이용한 성숙도 실험을 통하여 교통개방 압축강도를 추정하였으나 이를 Whitetopping 포장 현장에서 적용한 결과 실제로 많은 차이가 있었다.(2) 같은 배합 임에도 불구하고 대기온도가 다르면 동일한 성숙도 관계식을 적용할 수가 없었다.(3) 따라서 본 연구에서는 대기온도에서 얻은 등가재령과 온도와의 관계를 통해서 교통개방 시기를 예측하여 보았다.

2. 성숙도 및 등가재령의 개념

미국 ASTM에서는 시간-온도의 관계요소로부터 콘크리트의 성숙도 계산을 두 가지의 함수로 제시하였다.(4) 가장 많이 사용하는 것은 Nurse-Saul 식으로 콘크리트의 강도를 누적 양생 온도와 시간과의 관계로 <식 1>과 같이 나타내며 기준온도(T_0)는 일반적으로 -10°C 를 사용한다.

$$M = \sum (T - T_0) \times \Delta t \quad \text{<식 1>}$$

여기서, M=콘크리트의 성숙도 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$)
 T=콘크리트의 양생온도 ($^{\circ}\text{C}$)
 T_0 =기준온도 ($^{\circ}\text{C}$)
 Δt =시간간격 (hour)

다른 식은 화학분야에서 잘 알려져 있는 Arrhenius 공식으로 <식 2>와 같다. 등가재령(t_e)은 상이한 온도를 가지는 콘크리트의 양생정도를 기준 양생온도 조건하에 양생재령으로 변환한 시간을 의미한다.(5) 활성화 에너지는 시멘트의 종류, 물-시멘트비, 혼화재료에 따라 값이 다르다. 혼화재료를 사용하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트의 활성화 에너지는 $40,000 \sim 45,000 \text{ J/mol}$ 이다. <표 1>은 공시체와 모르타르 시편의 압축강도에 기초한 활성화 에너지 값을 나타내며 <표 1>에서 혼화재료와 물-시멘트비를 고려하여 본 연구에서는 $44,600 \text{ J/mol}$ 을 사용하였으며 기준온도(T_r)는 20°C 를 사용하였다.(6, 7)

* 비회원 · 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 · 02-816-0251(E-,mail : tkdboy98@hotmail.com)
** 비회원 · 중앙대학교 공과대학 토목공학과 Post-doctor · 02-816-0251(E-,mail : kit1998@hotmail.com)
*** 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수 · 02-820-5336(E-,mail : laminatedcho@hotmail.com)



$$t_e = \sum e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad \text{<식 2>}$$

여기서, t_e = 동가제령
 T = 콘크리트의 온도 (°K)
 T_r = 기준온도 (°K)
 Δt = 시간증가량 (hour or day)
 E = 활성화에너지
 R = 가스상수, 8.3144 J/(mol · K)

<표 1> 공시체와 모르타르 시편의 압축강도에 기초한 활성화에너지 값(7)

구 분 (시멘트)	활성화에너지 (kJ/mol)			
	W/C = 0.45		W/C = 0.60	
	Concrete	Mortar	Concrete	Mortar
Type I	63.6	61.1	48.0	43.6
Type III	43.6	40.1	44.0	42.6
Type + Accelerator	44.6	54.1	50.2	52.1

3. 본 실험

3.1 실험목적

대기 온도가 다른 환경에서의 성속도는 강도와 줄눈 절삭 시기 및 교통개방 시기를 일정한 값으로 예측하기에 어려움이 있다. 따라서 본 실험의 목적은 대기 온도가 다른 환경에서도 이를 예측하기 위해 대기의 평균온도를 이용하여 콘크리트 슬래브의 동가제령으로 교통개방 시기를 예측하기는 것이다.

3.2 실험방법

대기온도가 다른 환경에서 실험하기 위하여 기상예보를 통해 맑은날의 오전과 오후, 흐리고 비가 오는날의 오전과 오후로 나누어 <표 2>와 같은 조건으로 실험을 실시하였다. 따라서 실제 Whitetopping 포장의 슬래브를 모사하기 위하여 각 실험마다 슬래브(90×90×10cm)를 제작하였으며 실제 대기의 온도에 영향을 받을 수 있도록 실외에 타설하여 양생하였다. 또한 공시체를 제작하여 타설 완료 후 4시간부터 6, 8, 10, 12, 15, 24시간의 압축강도와 줄눈 절삭시 압축강도를 측정하였다. 성속도 측정을 위해 데이터 수집이 용이한 i-button을 슬래브 중앙, 공시체 중앙에 매립하였으며 실험시 대기 온도를 측정하였다. 줄눈 절삭은 타설 완료 후 4시간 후 부터 30분 간격으로 절삭하였다. 콘크리트 타설후 실제 현장에서 사용하는 양생제를 살포하였으며, 공시체 표면에도 양생제를 살포하여 슬래브 옆에 두고 대기의 영향을 받게 하였다. 성속도와 강도의 관계에 미치는 대기 습도의 영향은 문헌고찰 결과 크지 않다고 한다.(3) 따라서 습도에 의한 영향은 고려하지 않았다. 실험 진행을 위한 조건과 최종배합은 <표 2>와 <표 3>과 같으며 배합의 경우 과거 실내 실험 및 현장 시공(국도 17호선)에 사용하였던 배합과 동일하게 사용하였다.

<표 2> 실험 순서 및 조건

(기상청)

	1차 7월28일 20시	2차 8월4일 08시	3차 8월25일 08시	4차 8월30일 20시
대기상태	흐리고 비	맑음	흐리고 비	맑음
최고온도(°C)	(29.6) 26 (28.5)	(27.7) 32.5 (34.2)	(23.6) 18.6 (25.3)	(29) 28 (31.2)
최저온도(°C)	(24.7) 20.8 (22.2)	(23.6) 24.3 (25.5)	(16.5) 16.7 (16.7)	(21.7) 22 (20)
평균온도(°C)	(27) 23.1 (25.4)	(24.8) 28.5 (29.3)	(20.6) 17.6 (21.2)	(24.6) 24.1 (25.6)
일조(Σhr)	(1.2) 0 (2.6)	(0.5) 6.4 (7.5)	(0.1) 0 (6.8)	(6.3) 0.2 (7.8)



<표 3> 최종배합

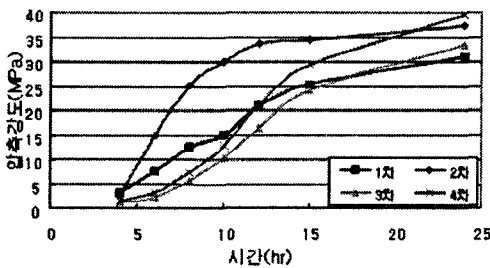
(단위량 : kg/m³)

G _{MAX} (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	W	C	S	G	고성능 감수제	공기 연행제	조강 혼화제
25	18~22	3~7%	34~40	40~45	170이하	450~ 490	700~ 800	900~ 1000	1~2%	0~0.03%	2~5%

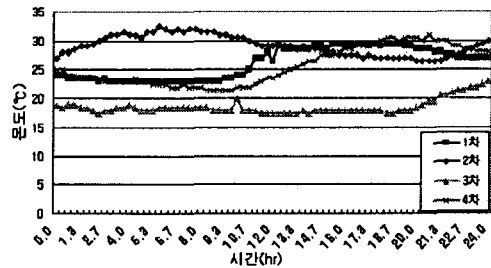
4. 실험결과

4.1 압축강도

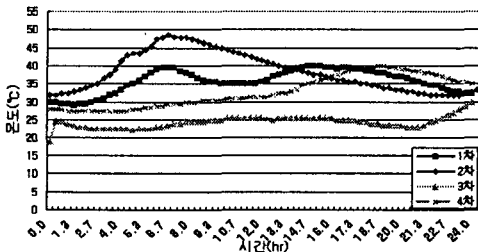
압축강도 측정은 타설 완료 후 4, 6, 8, 10, 12, 15, 24시간에서 측정하였으며 재하면은 자동연마기로 연마하였다. 압축강도 시험결과는 <그림 1>과 같으며, <그림 2>는 각 실험의 대기의 온도변화, <그림 3>은 슬래브의 온도변화, <그림 4>는 공시체의 온도변화를 나타낸다. 압축강도의 경우 대기의 온도변화에 큰 영향을 받는 것을 알 수가 있다. 2차 실험의 경우 가장 높은 대기 온도에서 실험이 진행되었기 때문에 양생 8시간에 25MPa의 강도에 도달하였다. 교통개방 허용강도가 22.5MPa (230kgf/cm²)인 것을 감안하면 10% 정도 높은 수치로서 8시간 이내에 교통 개방이 가능함을 보여준다. 그러나 동시간대(8hr) 가장 좋은 강도를 보이는 2차 실험과 가장 저조한 3차 실험의 경우 80% 정도의 강도 차이를 보이고 있다. 즉 교통개방은 포설 후 흐리고 비가 올 경우에는 8시간 만에 교통 개방이 불가함을 보여준다. 그러나 어떠한 경우이든 여름철에 시공하는 경우에는 15시간 이내에 교통 개방이 가능함을 보여주고 있으며 양생 초기 온도가 강도 발현 시기에 영향을 크게 미치고 있음을 보여주고 있다.



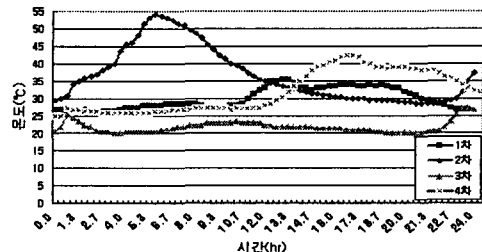
<그림 1> 압축강도 결과



<그림 2> 대기의 온도변화



<그림 3> 슬래브의 온도변화

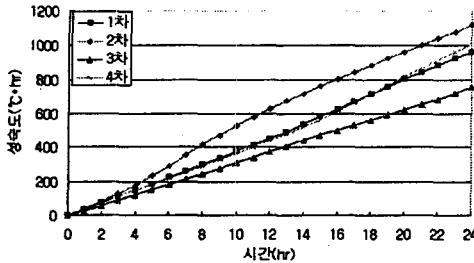


<그림 4> 공시체의 온도변화

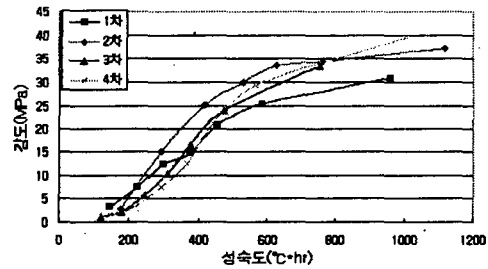
4.2 성숙도와 압축강도

<그림 5>는 각 실험의 시간에 따르는 성숙도 값을 보여주는 그림이다. 동일 성숙도 값에 도달하는 시간은 각 실험마다 차이가 있음을 보여주고 있다. <그림 6>은 각 실험에서 얻은 압축강도 값과 압축강도 측정 시의 성숙도 값을 비교한 그림이다. 동일한 강도 값에 대한 성숙도의 값이 다를 수 있다. 대기온도는 콘크리트 슬래브 온도 및 성숙도와 밀접한 관계로서 대기온도가 높을수록 수화반응이 빨리 일어나 초기 콘

크리트 강도발현에 유리하기 때문이다.(2) 즉 성속도 값의 차이는 대기온도에 영향을 받는 슬래브 온도 차이를 의미하는 것이다. <그림 5>와 <그림 6>에서 배합이 동일할 때 성속도 값이 같으면 강도도 같다는 성속도 이론은 실제와 다를 수 있다.(3) 즉 대기조건이 다른 환경에서 양생된 콘크리트의 성속도와 강도는 일치하지 않다는 것이다.



<그림 5> 시간에 따른 각 실험의 성속도



<그림 6> 성속도와 강도의 관계

4.3 줄눈 절삭 및 교통개방 시간의 결정

콘크리트 포장에서 줄눈 절삭 시기선정은 중요하다. 그 시기가 늦어질 경우 콘크리트 포장체 상하부 온도에 의한 휨(컬링, curling)이나 내부의 건조수축으로 인하여 인장응력이 발생하여 초기 균열의 원인이 된다. 작업이 빠를 경우 골재가 튀거나 혹은 미세한 균열을 유도함으로써 장래에 스폐링(spalling)등의 문제를 불러올 수 있다. 일반적으로 Whitetopping 슬래브의 줄눈 절삭은 포설 후 6~7시간 정도로 알려져 있다. 국내의 경우 줄눈 절삭 시기가 기능공의 경험에 의하여 결정되는 경우가 대부분이다. 그러나 앞서 살펴본 것과 같이 Whitetopping 포장의 초기 강도가 대기조건, 포설 시간대에 따라 변하므로 줄눈 절삭 시기도 달라져야 한다. 타설 완료 후 슬래브의 거푸집을 탈형한 4시간부터 30분 간격으로 줄눈 절삭을 실시하였다. 4번의 실험모두 컷 절삭에서는 골재 뿔 또는 모서리가 부서지는 상태를 보였다. 즉 4시간 전에 절삭하는 것은 좋은 것이 아니다. 7~9차에 걸쳐 줄눈 절삭을 시도하며 골재 뿔 현상이 일어나지 않고 깨끗한 상태를 절삭 시기로 판단하였다. <그림 7>은 줄눈 절삭 시기 선정을 보여주는 과정이다. <표 4>는 각 실험마다 줄눈 절삭 시기와 당시의 압축강도 및 성속도 값을 보여주고 있다. 대기조건 및 건설 시간에 따라 줄눈 절삭 시기가 조건에 따라 달라지는데 여름철의 경우 약 4시간 30분에서 7시간에 이를 때까지 변동함을 알 수 있다. 그러나 슬래브든 시편이든 콘크리트의 성속도를 이용하면 줄눈 절삭 시기의 성속도 값은 200~245정도로 판단된다. 또한 본 실험에서는 허용강도 22.5MPa(230kgf/cm²)을 교통개방시간으로 선정하였는데 줄눈 절삭 시기선정과 마찬가지로 대기조건에 따라 각 실험 모두 일치하지 않음을 알 수 있었다. 특히 2차 실험의 경우 성속도가 365~385 사이에서 허용강도에 도달한 반면 다른 실험은 450~510정도임을 보여주고 있다. 대기온도에 따라 콘크리트의 수화반응 시간은 일단 결정되는 것으로 판단되나 슬래브가 받는 대기온도의 차이와 더불어 기상 조건이 강도의 발현 시기 차이를 가져온 것이다. 따라서 초기의 경우 일정한 성속도 값만으로는 줄눈 절삭 및 교통개방 시기를 제시하는 것은 어려운 일로 판단된다.



(a) 줄눈 절삭

(b) 골재 뿔

(c) 줄눈 절삭 시기 결정

<그림 7> 줄눈 절삭 선정 과정



<표 4> 줄눈 절삭 교통개방 시간 결정 결과

구분	절삭 시간 결정					교통개방 시간 결정				
	압축강도 (MPa)	양생시간 (hr)	성속도(℃*hr)			압축강도 (MPa)	양생시간 (hr)	성속도(℃*hr)		
			대기	슬래브	공시체			대기	슬래브	공시체
1차실험	6.41	5시간 30분	185	225	205	22.5	13시간	435	575	495
2차실험	5.24	4시간 30분	160	200	190	22.5	7시간30분	300	365	385
3차실험	3.85	7시간	200	230	210	22.5	14시간 30분	410	490	457
4차실험	4.36	6시간30분	215	245	235	22.5	13시간	427	510	480

5. 교통개방 예측

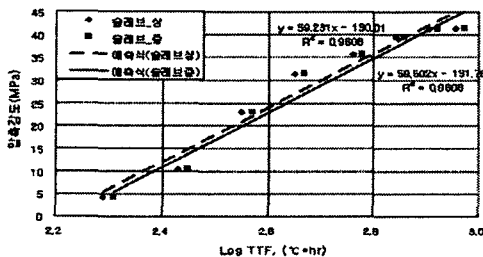
5.1 성속도와 강도의 관계

강도와 성속도의 관계를 제안한 것에는 Nykanen의 지수형태, Bernhardt의 쌍곡선 형태, 그리고 Lew와 Lechard의 점근선적인 형태의 log함수를 사용한 식들이 있다. <그림 8>는 과거 실내에서 똑같이 슬래브를 제작하여 대기온도를 20℃로 일정하게 하고 시간에 따른 압축강도와 성속도를 Nurse-Saul에 의한 방법으로 나타낸 그림이다. Nurse-Saul에 의한 방법은 비교적 압축강도 예측에 정확하지만 콘크리트의 강도는 시간의 증가에 선형의 형태로 발현하지 않기 때문에 실제 콘크리트 강도와 성속도의 관계를 나타내는 것은 한계가 있다. <그림 9>는 과거 실내 실험 데이터를 Arrhenius에 의한 등가재령과 강도 관계를 Carino의 제안식을 사용하여 보여준 그림으로 실제 콘크리트의 강도발현 형태와 비슷하다. 따라서 본 논문에서는 선형 형태로 성속도를 표현한 Nurse-Saul 방법보다 시간의 경과에도 강도변화가 지수 형태를 보이는 Arrhenius에 의한 방법으로 등가재령을 사용하여 Whitetopping 포장의 교통개방 시기를 예측해보았다.

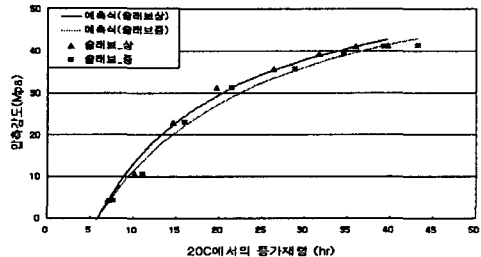
$$\frac{S}{S_{\infty}} = \frac{K_T(t_e - t_0)}{1 + K_T(t_e - t_0)} \tag{식 3}$$

- 여기서, S=압축강도 (MPa)
- S_∞=한계강도 (MPa)
- k_T=양생온도에서의 일정한 상수 값
- t₀=강도발현이 시작한 시간 (hr)

강도발현이 시작한 시간(t₀)은 종결되는 시간이며 ASTM C-403의 penetrometer 시험법을 통해 5.83hr으로 정하였다. S_∞과 k_T은 비선형 회귀식을 통하여 64.99MPa, 0.052 값으로 각각 정하였다.



<그림 8> Nurse-Saul에 의한 성속도와 강도



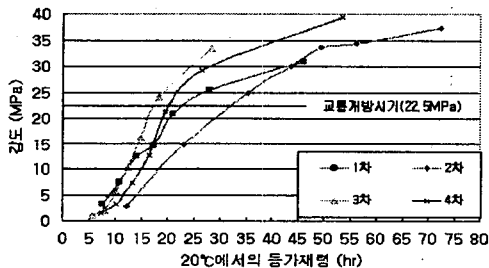
<그림 9> Arrhenius에 의한 강도와 등가재령

5.2 등가재령 예측

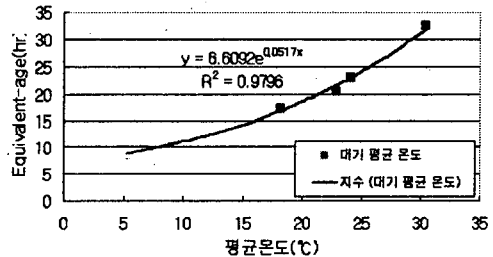
<표 2>와 같이 각 대기조건이 다른 상태에서 실험하여 얻은 온도 데이터를 이용하여 <식 2>로부터 등가재령을 구하고 시간의 경과에 따라 측정된 강도와의 관계를 <그림 10>같이 나타내었다. 높은 대기온도는 콘크리트를 빠른 시간 내에 강도를 얻게 하고 동일시간까지 낮은 대기온도 보다는 큰 성숙도 값을 가지게 한다. 이를 기준온도에 대해서 등가재령으로 환산하면 상대적으로 큰 등가재령을 가지게 된다. 따라서 <그림 10>을 보면 24시간대의 강도 측정 지점에서 대기온도가 가장 높은 2차 실험이 가장 큰 등가재령을 보이며 3차 실험의 경우 가장 작은 등가재령을 보이고 있다. 1차 실험과 4차 실험이 그림처럼 차이를 보이는 원인은 <표 2>에서 알 수 있듯이 평균온도는 비슷하나 4차 실험 다음날 오전의 일조량(7.8)이 1차 실험 다음날 오전의 일조량(2.6)보다 커서 그 교차되는 시점으로부터 4차 실험 때가 1차 실험 때 보다 높은 온도의 영향을 받았기 때문에 4차 실험의 등가재령이 큰 것으로 판단된다. 따라서 등가재령은 대기 평균온도에 영향을 받는 것으로 판단되어 4차에 걸친 실험에서 교통개방 압축강도 22.5MPa에 해당하는 등가재령과 대기 평균온도의 관계를 <그림 11>과 같이 나타내어 보았다. <그림 11>의 예측식은 R-Square 0.9796의 신뢰도를 보이므로 평균온도에 따른 성숙도를 등가재령으로 예측 할 수 있을 것으로 판단된다. 예측식은 다음 <식 4>와 같다.

$$t_e = 6.6092e^{0.0517T_a} \quad \text{<식 4>}$$

여기서, t_e = 허용강도 22.5MPa를 만족하는 시점의 등가재령
 T_a = 평균온도 (°C)



<그림 10> 등가재령과 강도의 관계



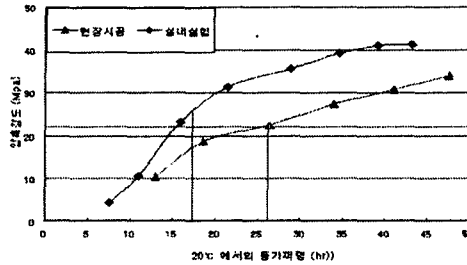
<그림 11> 등가재령과 평균온도의 관계

5.3 예측식의 검증

<그림 11>에서 얻은 <식 4>을 검증하기 위해 과거 실내 실험과 현장 시험시공(국도 17호선)의 평균 대기온도를 대입하여 이를 검증해보았다. 과거 실내 실험과 현장 시험시공의 평균 대기온도는 각각 19.38°C, 26.01°C이었다. <식 4>를 통한 교통개방 시간 예측결과 18.00hr, 25.36hr의 등가재령을 얻을 수 있다. <그림 12>는 예측식으로부터 얻은 등가재령을 각각 실내실험 및 현장시공의 등가재령에 대입하였을 때의 압축강도를 살펴본 그림이다. 실내실험의 경우 등가재령 18.00hr일 때의 강도는 허용강도(22.5MPa)의 10% 정도 큰 강도를 보이고 있으며, 현장시공의 경우 등가재령 25.36hr일 때의 강도는 허용강도(22.5MPa)와 거의 일치하는 강도를 보이고 있다. 또한 실내 실험의 경우 10시간 후에 압축강도 23.05MPa로 교통개방이 가능하다고 판단된 시점과 등가재령 18.00hr에 해당하는 실제시간 10시간 15분으로 그 시기가 거의 비슷하였으며, 현장 시공의 경우 포설 후 10시간에 23.14MPa의 강도를 보여 교통개방을 실시한 시점과 등가재령 23.36hr에 해당하는 실제시간 9시간 50분으로 그 시기가 거의 비슷하였다. 따라서 실내실험 및 현장시공의 교통개방 시기는 각각 대기 평균온도 19.38°C, 26.01°C에서 허용강도 22.5MPa를 만족하는 등가재령 18.00hr와 25.36hr시점에서 가능하다고 판단된다. 슬래브의 온도에 의한 성숙도는 대기온도가 다른 조건에서 동일하게 성숙도와 강도의 관계를 적용을 할 수가 없다. 이는 대기온도에 따르는 초기 콘크리트의 강도발현을 슬래브의 온도만으로 예측하는 것은 한계가 있다는 것이다. 반면에 등가재령은 주어진 기준 온도에서 동일하게 양생된 콘크리트의



성속도의 값은 같다는 것으로 콘크리트의 강도발현에 영향을 미치는 온도와 동시에 온도에 따른 화학반응의 속도를 고려하여 보다 신뢰할 수 있는 교통개방 평가지표로 사용할 수 있었다. 따라서 대기온도에 따른 영향을 고려하여 그 시기를 예측 할 수 있는 등가재령에 의한 방법은 교통개방 시기의 예측에 적합하다고 판단 된다.



<그림 12> 등가재령을 이용한 교통개방시기 예측

6. 결론

콘크리트 슬래브의 등가재령을 이용하여 교통개방 시기를 예측하여 보았다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Whitetopping 포장에서 같은 배합 일지라도 대기조건이 다른 동일한 강도와 성속도의 관계를 적용할 수 없다. 이는 강도와 성속도의 관계는 대기 조건에 큰 영향을 받아 슬래브의 온도 차이 때문이라 판단 된다.
- (2) 줄눈 절삭 시기의 예측의 경우 등가재령을 동일한 방법으로 적용하여 보았으나 <그림 11>과 같이 높은 신뢰도를 얻을 수 없었다. 줄눈 절삭 시기의 선정은 깨끗이 절삭되는 시점을 선정하였는데 그 시점의 압축강도가 모든 실험의 경우 다르게 측정되어 성속도 개념을 적용할 수 없었다.
- (3) 평균대기 온도를 이용한 등가재령 예측식 <식 4>는 평균온도 15~30°C에서 교통개방 시기를 예측하기에 적합하다고 판단된다. 하지만 평균온도 15~30°C보다 작거나 큰 평균온도에서도 예측이 가능한지 검토가 필요하다고 판단된다.
- (4) 교통개방 시기 예측 방법은 다음과 같다. 먼저 측정된 대기의 평균온도를 예측식을 통해 등가재령을 얻는다. 슬래브로부터 얻은 온도데이터를 <식 2>를 사용하여 시간대별 등가재령을 구한다음 예측식을 통해 얻은 등가재령에 해당하는 시점을 교통개방 시기로 선정한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업 “장수명 친환경 도로포장재료 및 시공기술개발 연구”에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 조윤희외 다수, “중하중 교통도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성포장 재료의 설계 및 시공 기술 개발”, 중앙대학교, 2001
2. 조윤희, “성속도 개념을 이용한 Whitetopping 포장의 현장 적용” 한국도로학회 2005.3
3. 오병환, “성속도 개념을 이용한 콘크리트 초기강도 예측 모델 개발 연구” 콘크리트학회 논문집 제 8권 3호, 1996
4. American Concrete Pavement Association, “Maturity testing of concrete pavements: Applications and



Benefits" ACPA, 2002

5. Tepke, Tikalsky, and Scheetz, "Concrete maturity field studies for highway applications" TRB, 2004
6. Jung and Cho, "The application of maturity method on Whitetopping construction" TRB, 2006
7. Malhotra, V.M. and N.J. Carino, "Handbook on nondestructive testing of concrete" CRC Press, Boca Raton, FL. 1991