

# 기상과 재료 특성에 의한 공항 콘크리트 포장 팽창줄눈 간격의 적정성 검토

## Propriety Examination of Expansion Joint Spacing of Airport Concrete Pavement by Weather and Material Characteristics

박 해 원 Park, Hae Won | 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : czess@naver.com)  
정 진 훈 Jeong, Jin Hoon | 정회원 · 인하대학교 사회인프라공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** In this study, the propriety of expansion joint spacing of airport concrete pavement was examined by using weather and material characteristics.

**METHODS :** A finite element model for simulating airport concrete pavement was developed and blowup occurrence due to temperature increase was analyzed. The critical temperature causing the expansion of concrete slab and blow up at the expansion joint was calculated according to the initial vertical displacement at the joint. The amount of expansion that can occur in the concrete slab for 20 years of design life was calculated by summing the expansion and contraction by temperature, alkali-silica reaction, and drying shrinkage. The effective expansion of pavement section between adjacent expansion joints was calculated by subtracting the effective width of expansion joint from the summation of the expansion of the pavement section. The temperature change causing the effective expansion of pavement section was also calculated. The effective expansion equivalent temperature change was compared to the critical temperature, which causes the blowup, according to expansion joint spacing to verify the propriety of expansion joint applied to the airport concrete pavement.

**RESULTS :** When an initial vertical displacement of the expansion joint was 3mm or less, the blowup never occurred for 300m of joint spacing which is used in Korean airports currently. But, there was a risk of blow-up when an initial vertical displacement of the expansion joint was 5mm or more due to the weather or material characteristics.

**CONCLUSIONS :** It was confirmed that the initial vertical displacement at the expansion joint could be managed below 3mm from the previous research results. Accordingly it was concluded that the 300m of current expansion joint spacing of Korean airports could be used without blowup by controlling the alkali-silica reaction below its allowable limit.

### Keywords

*Airport concrete pavement, Finite element analysis, Blowup, Expansion joint spacing, Temperature, Alkali-silica reaction, Drying shrinkage*

Corresponding Author : Jeong, Jin Hoon, Professor  
Department of Civil Engineering, Inha University, 100 Inha-ro,  
Nam-gu, Incheon, 22212, Korea  
Tel : +82.32.860.7574 Fax : +82.32.873.7560  
E-mail : jhj@inha.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received May, 20, 2018 Revised May, 20, 2018 Accepted May, 23, 2018

## 1. 서론

블로우업(blowup)은 콘크리트 포장이 온도팽창에 의한 압축력에 견디지 못하고 좌굴을 일으켜 부분적으로

들고 올라가는 현상을 말한다. 블로우업은 일반적으로 기온이 높은 한여름철에 발생하기 쉬우며, 줄눈부 스폴링에 의한 슬래브 간 접촉면 저하, 내구성 균열에 의한

줄눈부 혹은 균열부의 강도저하 등이 블로우업 발생의 위험을 크게 한다(Kerr, 1994). 고속도로나 공항 활주로 등 차량이나 항공기 등이 고속으로 주행하는 곳에 블로우업이 발생할 경우 대규모 사고를 유발할 수 있고 블로우업은 발생시 파손구간이 넓어 유지보수를 실시하기도 쉽지 않다. 블로우업의 발생을 억제하기 위해서는 팽창줄눈의 설치 등으로 콘크리트 슬래브간에 압축응력의 발생을 저하시키는 방법이 있다.

콘크리트 포장에 발생하는 블로우업에 관한 문제는 1925년부터 대두되기 시작하였으며(Buck, 1925), 1975년 미국 오하이오 주의 고속도로에서 블로우업이 발생한 뒤 본격적으로 콘크리트 포장 슬래브의 블로우업에 관련된 연구가 수행되기 시작하였다. 블로우업 현상은 일종의 좌굴(buckling) 현상이므로, Kerr 등(1985)은 콘크리트 포장에 발생하는 블로우업 현상을 2차원 평면에서 탄성지반 위에 조인트를 가지는 빔의 좌굴로 정의하고 역학적 해석을 수행하였다. Yang 등(2017)은 얇은 판을 이용한 블로우업 모사 시험을 통해 얻은 결과를 유한요소해석 결과와 비교하고, 블로우업 현상은 유한요소해석으로 계산된 거동을 따라 움직이고 블로우업 발생 이후 온도가 떨어지는 과정에서의 거동 역시 유한요소해석에 의한 거동과 일치함을 확인하였다. 또한 10~30cm 두께의 콘크리트 포장 슬래브에서 줄눈의 최초 수직변위에 따라 블로우업이 발생하기 시작하는 임계온도(critical temperature)를 계산하였다.

Croll(2005)은 콘크리트 포장에 발생 가능한 블로우업 현상을 해석하였으며 슬래브에 초기 결함(initial imperfection)이 존재할 경우 낮은 온도에서도 블로우업을 발생시킬 수 있다는 결과를 보고하였다. 시공 상의 문제 등으로 슬래브에 최초 수직변위가 생긴 상태에서 온도에 의한 슬래브 팽창이 발생할 경우에도 낮은 온도에서 블로우업이 발생할 수 있다는 결과를 해석적으로 보여주었다.

콘크리트 포장은 재료적 특성이나 지역적 기상요인에 따라 슬래브가 팽창하거나 수축하는 정도에 큰 차이가 있으므로 팽창줄눈의 설치간격을 조절할 필요가 있다. 하지만 팽창줄눈의 설치간격에 대해서는 명확한 기준이 존재하지 않아 고속도로 공사 시에는 특별한 경우가 아니면 일일 시공 마무리 면에 팽창줄눈을 설치하고 있으며, 국내 일부 공항의 경우 경험에 근거하여 약 300m 마다 팽창줄눈을 설치하고 있다. 따라서 본 연구에서는 알칼리-실리카 반응(ASR; alkali silica reaction)과 같은 콘크리트 재료의 팽창특성, 온도 및 습도의 기상조

건 등을 고려하여 현재 시공되고 있는 팽창줄눈 간격에 대한 검토를 수행하였다.

## 2. 블로우업에 대한 유한요소해석

### 2.1. 유한요소 모형개발

범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유한요소해석을 실시하였다. 콘크리트 포장에 발생하는 블로우업을 해석하기 위한 유한요소모형은 Yang 등(2017)의 연구에서 제시하고 있는 2차원 모형을 참고하였다. Fig. 1은 공항 콘크리트 포장의 블로우업 해석을 위한 유한요소모형이다. 표층은 500mm 두께의 콘크리트 슬래브, 하부층은 아스팔트 안정처리기층으로 하여 2개의 층으로 구성하였다. 블로우업에 대해서 좌굴 해석을 실시하기 위해 콘크리트 슬래브는 ABAQUS에서 제공하는 beam 요소인 B21 요소로 구성하였으며, 하부층은 4절점 plane-stress 요소인 CPS4R 요소를 적용하였다. 또한, 콘크리트 슬래브와 하부층이 마찰에 의해 거동하도록 설정하고 두 층간의 마찰계수는 Park(2009)의 연구를 참고하여 적용하였다. Table 1은 각 층의 입력 물성값이며 콘크리트 슬래브와 아스팔트 안정처리기층의 일반적인 물성값을 적용하였다.

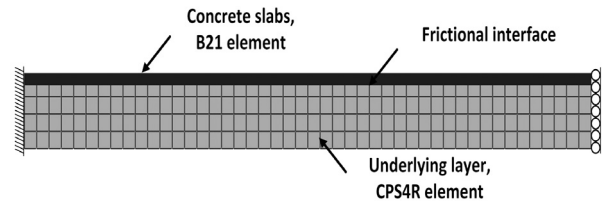


Fig. 1 Finite Element Model of Airport Concrete Pavement for Blowup Analysis

Table 1. Material Properties of Pavement Layers

Property	Concrete slab	Underlying layer
Elastic modulus (MPa)	28,000	1,379
Poisson's ratio	0.18	0.35
Unit weight(kN/m <sup>2</sup> )	24.0	23.0
Coefficient of thermal expansion(/°C)	1.0×10 <sup>-5</sup>	-
Frictional coefficient	-	4.8

### 2.2. 유한요소 해석결과

콘크리트 포장에 발생하는 블로우업 현상은 포장체의 초기 상태에 영향을 받는다. 줄눈부에 최초 수직변위가 없는 상태라면 블로우업이 발생하기 위해 필요한 콘크

리트 슬래브의 팽창량이 상대적으로 커야 하지만, 시공 결합이나 건조수축 등에 의해서 줄눈부에 최초 수직변위가 발생한 상태( $w_{initial} > 0$ )라면 상대적으로 낮은 온도에서 블로우업이 발생할 수 있다. Fig. 2는 최초 수직변위 유무에 따른 블로우업 발생 경향을 나타낸 것이다.

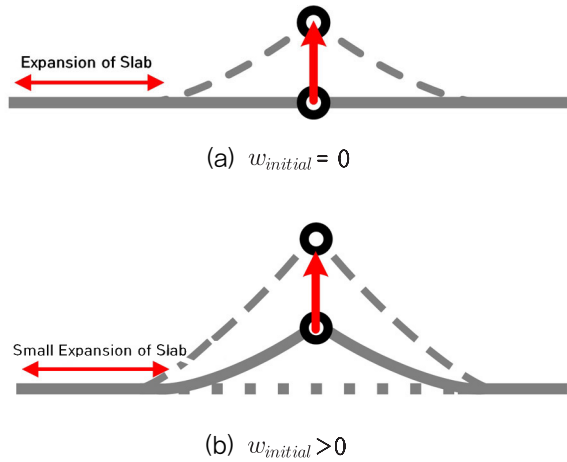


Fig. 2 Blowup Occurrence Tendency according to Initial Vertical Displacement( $w_{initial}$ )

콘크리트 포장 슬래브는 깊이에 따른 온도 또는 건조수축의 변화에 의해서 컬링과 같은 형상변화를 일으킨다. Beckemeyer 등(2002)의 연구에서는 슬래브의 컬링에 의한 수직변위를 계측하였으며 우각부에서 최대 2mm의 수직변위가 발생하는 것으로 확인하였고, Jeong 등(2004)은 콘크리트 슬래브의 우각부에서 수직변위의 변화를 계측하여 재령 2년의 콘크리트 슬래브에 최대 2.6mm의 수직변위가 발생함을 확인하였다. 선행연구결과를 참고하여 실제 슬래브에 발생 가능한 최초 수직변위를 3mm로 판단하였다. 공항 콘크리트 포장의 경우 대체로 평탄성 관리가 잘 되고 있기 때문에 팽창줄눈의 국부적인 위치에서 수직변위가 발생할 요인을 컬링으로 한정하고, 최초 수직변위의 크기 변화에 따라 임계온도의 변화를 확인하기 위해 최초 수직변위 1mm, 3mm, 5mm 조건에서 해석을 실시하였다. Fig. 3은 최초 수직변위에 따라 블로우업을 해석한 결과이다. 최초 수직변위 1mm, 3mm, 5mm에 대해서 블로우업이 발생하기 시작하는 온도 상승량은 각각 101℃, 61℃, 49℃로 계산되어 최초 수직변위가 클수록 온도 상승량이 작아도 블로우업이 발생할 수 있는 것으로 나타났다.

Kerr 등(1985)은 최초 수직변위 발생에 영향을 미치는 다양한 요인들이 존재하기 때문에 해석 결과인 Fig. 3의 곡선들의 하향의 변곡점인 가장 낮은 온도를 안전 온도로 정의하여 관리를 할 것을 제안하였다. 하지만 Yang 등(2017)은 얇은 판을 이용한 모형실험 결과와

해석결과의 비교를 통해 일단 블로우업이 발생하게 되면 온도가 다시 떨어지지 않고 유지된 상태에서 수직변위가 급격히 진전됨을 확인하였다. 따라서 블로우업이 발생된 상황이라면 포장은 이미 그 기능을 상실하여 유사한 온도에서 블로우업이 심각해지는 것으로 나타난 것이다. 또한 엄격하게 관리되는 공항 콘크리트 포장에는 현실적으로 슬래브 컬링 이외의 요인에 의한 추가적인 최초 수직변위가 발생하기 어렵다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 블로우업을 발생시키는 온도 상승량인 Fig. 3에 보인 최초 수직변위 별 곡선들의 임계온도를 관리기준에 고려하였다.

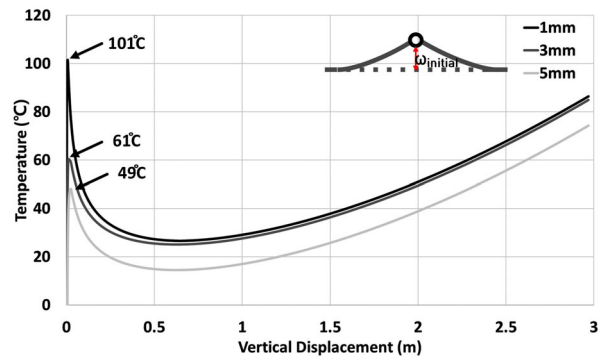


Fig. 3 Vertical Displacement of Expansion Joint according to Temperature Increase by Initial Vertical Displacements ( $w_{initial}$ )

### 3. 콘크리트 슬래브의 최대 팽창량 산출

외기에 노출되어 있는 콘크리트 포장 슬래브는 기상 및 재료 등의 다양한 조건에 의해서 팽창과 수축을 한다. 콘크리트 슬래브의 팽창은 인접한 콘크리트 포장에 의해 구속되어 압축응력을 발생시키며 이로 인해 줄눈부에서 블로우업 현상이 발생할 수도 있다. 본 연구에서는 인천국제공항을 예시로 하여 공항 콘크리트 포장에 이론상 발생 가능한 최대 팽창량을 계산하였다.

#### 3.1. 콘크리트 슬래브의 온도 변화량

현재 인천국제공항공사는 공항 콘크리트 포장 설계법을 개발하기 위하여 공항포장 장기거동 특성분석의 연구를 수행하고 있다. 이를 위하여 인천국제공항 3단계 건설현장에는 제2여객터미널 계류장 구간에 온도계, 수평변위계, 정적변형률계 그리고 동적변형률계 등 다양한 계측기를 매설하여 2016년 11월부터 계측을 실시하고 있다.

본 연구에서는 이곳에서 수집된 온도 자료를 사용하여

공항 콘크리트 포장 슬래브의 온도변화를 조사하였다. 온도계는 슬래브 중앙부에 50mm, 150mm, 250mm, 350mm, 450mm의 깊이로 매설되어 있다. Fig. 4는 2017년 여름철 인천국제공항의 일 공항기상대에서 수집된 대기 온도와 포장 슬래브의 깊이별 온도변화를 나타낸 것이다. 2017년의 일 최고기온은 8월 5일에 36.0℃로 가장 컸으며 전후 3일 동안 비는 내리지 않았다. 슬래브의 온도변화는 대기온도의 변화에 영향을 받았으며, 상부 표면에 가까울수록 대기온도의 일변화에 영향을 많이 받았고 깊이가 깊어질수록 대기온도의 일변화에 의한 영향을 적게 받았다.

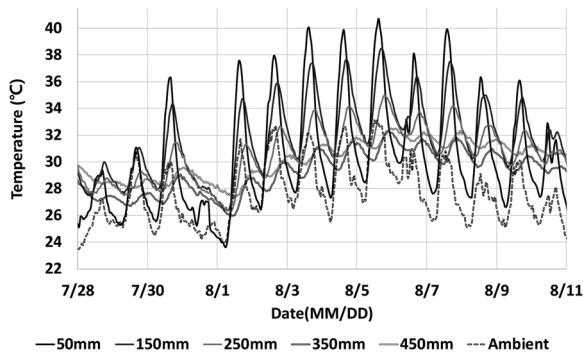


Fig. 4 Temperature of Ambient Air and Concrete Slab according to Depth in 2017 Summer

7월 28일부터 8월 11일까지 날짜마다의 일 최고온도와 슬래브 깊이별 온도의 평균값이 최고가 될 때의 각

Table 2. Daily Maximum Ambient Air and Average Slab Temperature Measured in 2017 Summer

Date (m/d)	Daily maximum temperature (°C)	Concrete temperature (°C)					
		50mm	150mm	250mm	350mm	450mm	Ave.
7/28	27.6	29.5	29.4	28.3	27.2	28.3	28.5
7/29	30.8	31.2	30.6	28.9	26.9	28.1	29.1
7/30	30.4	36.7	33.6	29.7	27.5	28.3	31.1
7/31	26.2	27.6	28.0	27.6	27.5	28.5	27.8
8/1	32.0	37.7	34.0	29.6	26.9	27.8	31.2
8/2	32.9	38.1	35.2	31.2	28.7	29.1	32.5
8/3	32.5	40.7	36.8	32.3	29.7	30.1	33.9
8/4	33.4	40.1	36.7	32.7	30.1	30.6	34.1
8/5	33.9	40.8	37.8	33.5	30.8	31.1	34.8
8/6	31.4	38.3	35.2	32.5	30.9	31.5	33.7
8/7	31.2	40.1	36.8	32.7	30.5	31.0	34.2
8/8	29.7	36.8	34.3	31.5	29.8	31.2	32.7
8/9	30.9	36.4	34.5	31.5	29.7	30.9	32.6
8/10	28.6	33.3	31.8	30.4	29.4	30.2	31.0
8/11	30.5	35.2	33.3	30.6	29.0	29.7	31.6
Ave.	30.9	31.9 ÷ 30.9 = 1.03					31.9

온도를 Table 2에 나타냈다. 일 최고기온과 슬래브 평균온도의 최고값 간의 상관관계를 분석한 결과 최고 슬래브 평균온도는 일 최고기온의 약 1.03배로 나타났다. 인천국제공항의 최근 20년간 최고기온은 2014년 8월 2일에 관측된 36℃로 확인이 되었다. 따라서 일 최고기온 36℃의 1.03배인 약 37℃를 인천국제공항 콘크리트 포장 슬래브의 평균 온도로 사용하였다. 도로공사표준시방서(MOLIT, 2015)에서는 기온이 4℃ 이하이거나 35℃ 이상인 경우에 콘크리트의 타설을 제한하고 있으므로 보수적으로 동절기 무렵에 타설된 콘크리트 슬래브의 온도를 0℃로 설정하여 여름철 콘크리트 슬래브의 최고 온도인 37℃까지 팽창한다고 가정하였다.

### 3.2. 콘크리트의 재료팽창률 산출

콘크리트 포장은 온도변화 뿐만 아니라 재료의 특성에 의해 팽창을 하기도 한다. 재료특성에 의한 팽창은 주로 콘크리트 슬래브의 ASR을 일컫으며, 공항 콘크리트 포장의 주요한 파손 원인이다. 콘크리트의 ASR 팽창량 시험은 모르타르 봉 시험(ASTM C 227, KS F 2546), 축진 모르타르 봉 시험(ASTM C 1260), 콘크리트 각주 시험(ASTM C 1293, KS F 2585) 등이 있으며 이 중 1년 이상의 장기재령에 대한 시험은 ASTM C 1293의 콘크리트 각주 시험이 유일하다. ASTM C 1293의 기준에서는 시험 결과 재령 1년 동안 0.04% 이상의 팽창이 발생한 경우 ASR에 의한 팽창이 발생했다고 판단하고 있다.

공항 콘크리트 포장의 팽창줄눈 설계에 ASR 팽창량을 적용하기 위해서는 1년이 아닌 재령 20년의 콘크리트 포장에 발생할 수 있는 ASR 팽창량을 알아야 한다. 하지만 20년간 발생한 ASR 팽창량을 실내실험으로 측정하는 것이 현실적으로 불가능하므로 본 연구에서는 ASTM C 1293을 적용한 Bakharev 등(2001)의 시험결과를 바

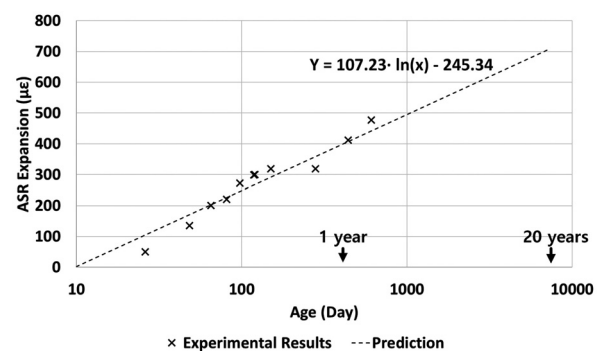


Fig. 5 Prediction of ASR Expansion of Airport Concrete Pavement at Its 20 Years Age

탕으로 1년 동안 400 $\mu\epsilon$ 의 팽창이 발생하는 조건에서의 추세식을 적용하여 재령 20년 동안 발생 가능한 최대 ASR 팽창량을 구하였다. Fig. 5는 1년 동안 400 $\mu\epsilon$ 의 허용 ASR 팽창량이 발생한 콘크리트에 대하여 20년간 발생 가능한 ASR 팽창량을 예측한 결과 710 $\mu\epsilon$ 의 값이 예측되었다.

### 3.3. 콘크리트의 건조수축률 산출

콘크리트의 건조수축은 시멘트풀의 수분이 증발하면서 발생되며, 처음 건조될 때 수축이 최대로 일어나며 이 수축의 상당 부분은 재습윤 되어도 원 상태로 돌아오지 않는다(Kim, 2003). 콘크리트의 건조수축 발생량을 예측하기 위한 수많은 경험식들이 존재하며 대표적으로 ACI 209 모형(Rhodes etc., 1997), CEB-FIP 모형(CEB-FIP, 1990), BP 모형(Bazant et al., 1978), Yang의 모형(Yang 등, 2004) 등이 있다. 본 연구에서는 콘크리트 포장 슬래브의 두께 및 형상을 고려한 실험을 통해 개발된 Eq. (1)의 Yang 등(2004)의 모형을 사용하여 콘크리트 포장 슬래브에 발생 가능한 평균 건조수축의 크기를 예측하였다.

$$\epsilon_s(t) = \frac{a_1 \times t}{a_2 + t} \times [1 + a_3 \exp(a_4 \times V/S)] \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_s$  : Drying shrinkage( $10^{-6}$ )

$t$  : Age(days)

$V/S$  : Volume-surface ratio

$a_1, a_2, a_3, a_4$  : Prediction constants

KS F 2595를 참고하여 각주형 콘크리트 공시체에 발생하는 건조수축의 크기를 측정하였다. 공시체는 인천국제공항 3단계 건설현장의 콘크리트 포장에 사용되



Fig. 6 Laboratory Test for Drying Shrinkage of Concrete

는 콘크리트 슬래브의 배합을 사용하여 제작하였으며, 150mm×150mm×550mm의 크기로 3개를 제작하였다. Fig. 6은 건조수축 시험의 전경으로 온도 2 $^{\circ}\text{C}$ , 습도 50%를 유지하는 항온항습실에 시편의 모든 면에서 증발이 일어날 수 있도록 배치하였다. 각 공시체의 좌우면에 길이방향으로 부착된 변형률계를 사용하여 약 90일 동안 건조수축을 측정하였다.

Fig. 7은 건조수축 공시체에 대한 시험결과와 Yang의 모형을 이용한 건조수축 예측량을 비교한 것이다. Yang의 모형과 실내실험 결과의 오차가 재령 90일 동안 5% 이내를 유지하도록 건조수축 예측상수를 구하였으며,  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 의 값은 427.6, 33.47, 2.10, -0.0194로 각각 결정되었다. 각 예측상수들은 Lim 등(2009)이 제시하고 있는 화강암과 사암을 굵은 골재로 하는 콘크리트 포장 슬래브의 건조수축 예측상수의 범위 안에 포함되는 합리적인 값들로 판단되었다.

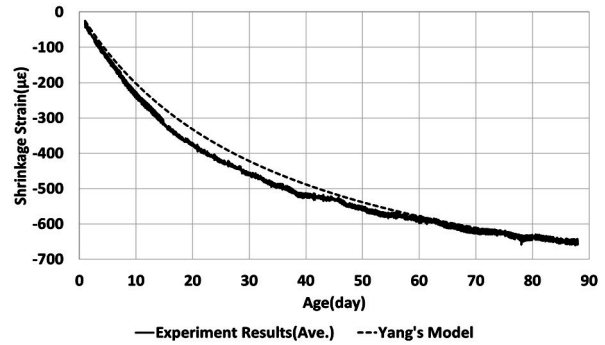


Fig. 7 Comparison of Drying Shrinkage between Test and Analysis Results

Yang의 모형과 실내실험으로 얻은 건조수축 예측상수를 사용하여 콘크리트 포장 슬래브에 실제로 발생 가능한 건조수축의 크기를 예측하였다. 인천국제공항 3단

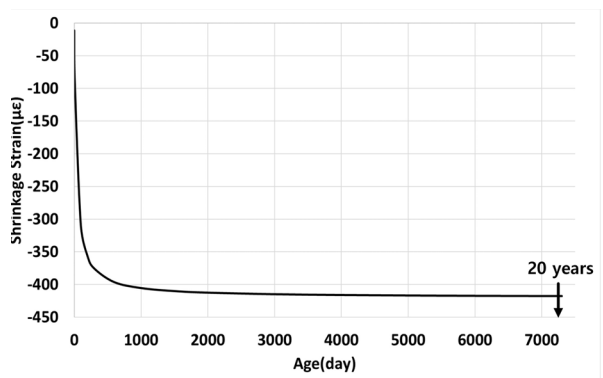


Fig. 8 Drying Shrinkage of Concrete Pavement in Incheon International Airport Predicted by Yang's Model

계 건설현장 계류장 구간의 콘크리트 포장을 대상으로 하여 Fig. 8과 같이 재령에 따른 건조수축의 변화를 예측하였다. 공시체의 모든 면에서 증발이 발생한 실내시험과 달리 상부표면에서만 증발이 발생한 6,000mm×6,000mm×500mm 크기의 콘크리트 슬래브의 재령 20년 건조수축은 약 420με으로 예측되었다.

### 3.4. 콘크리트의 슬래브의 총팽창량

본 연구에서 예측된 온도 변화량, ASR에 의한 팽창률, 건조수축률을 적용하여 재령 20년 콘크리트 슬래브에 작용하는 각각의 팽창량과 수축량을 계산하였다. 각 팽창량과 수축량은 대상이 되는 인접한 두 개 팽창줄눈 사이의 콘크리트 포장구간의 길이에 따라 변하게 된다. 온도 상승에 의한 팽창량, ASR에 의한 팽창량, 그리고 건조수축에 의한 수축량을 각각 Eq. (2)부터 Eq. (4)까지와 같이 계산하였으며, 이들을 모두 합한 값은 연속된 두 팽창줄눈 사이 포장구간의 총 팽창량( $\Delta L_{sum}$ )이 되었다.

$$\Delta L_T = \alpha_c \times \Delta T \times L \quad (2)$$

여기서,  $\Delta L_T$  : Thermal expansion of pavement section between adjacent expansion joints(mm)

$\alpha_c$  : Coefficient of thermal expansion of concrete(/°C)

$\Delta T$  : Temperature change(°C)

$L$  : Expansion joint spacing(mm)

$$\Delta L_{ASR} = \varepsilon_{ASR} \times L \quad (3)$$

여기서,  $\Delta L_{ASR}$  : ASR expansion of pavement section between adjacent expansion joints(mm)

$\varepsilon_{ASR}$  : ASR expansion strain of concrete slab( $10^{-6}$ )

$$\Delta L_{sh} = \varepsilon_{sh} \times L \quad (4)$$

여기서,  $\Delta L_{sh}$  : Drying shrinkage of pavement section between adjacent expansion joints(mm)

$\varepsilon_{sh}$  : Drying shrinkage strain of concrete slab( $10^{-6}$ )

$$\Delta L_{sum} = \Delta L_T + \Delta L_{ASR} + \Delta L_{sh} \quad (5)$$

여기서,  $\Delta L_{sum}$  : Sum of expansion of pavement section between adjacent expansion joints(mm)

Eq. (5)에 의해서 계산된 인접한 두 개 팽창줄눈 사이의 콘크리트 포장구간의 총 팽창량을 Eq. (6)과 같이 콘크리트 열팽창계수와 구간의 길이로 나누는 방법으로 등가의 온도 변화량의 합으로 변환하였다.

$$\Delta T_{sum} = \frac{\Delta L_{sum}}{\alpha_c \times L} \quad (6)$$

여기서,  $\Delta T_{sum}$  : Sum of temperature change(°C)

팽창줄눈의 간격을 50m부터 450m까지 50m 단위로 증가시키면서 그 구간에 발생 가능한 팽창량을 계산하였다. Table 3은 팽창줄눈 간격별로 온도에 의한 팽창량, ASR에 의한 팽창량, 건조수축에 의한 수축량과 함께 총 팽창량을 정리한 것이다. 팽창줄눈의 간격에 따라 구간의 총 팽창량은 달랐지만 이를 등가의 온도변화로 환산한 결과 동일하게 65°C의 온도 상승으로 계산되었다.

Table 3. Prediction of Total Expansion of Section according to Expansion Joint Spacing

Expansion joint spacing	Expansion		Contraction	Total expansion	
	Temperature	ASR	Drying shrinkage	$\Delta L_{sum}$ (mm)	$\Delta T_{sum}$ (°C)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(°C)
50m	18.5	35.5	-21.0	33.0	66.0
100m	37.0	71.0	-42.0	66.0	
150m	55.5	106.5	-63.0	99.0	
200m	74.0	142.0	-84.0	132.0	
250m	92.5	177.5	-105.0	165.0	
300m	111.0	213.0	-126.0	198.0	
350m	129.5	248.5	-147.0	231.0	
400m	148.0	284.0	-168.0	264.0	
450m	166.5	319.5	-189.0	297.0	

## 4. 팽창줄눈 간격의 적정성 분석

### 4.1. 유효 팽창줄눈폭 산정

포장체의 팽창을 완충하기 위한 목적으로 콘크리트 슬래브를 타설할 때 팽창줄눈을 함께 설치하며, 국내 공

항 활주로의 경우 약 300m 간격으로 설치하고 있다. 팽창줄눈의 폭은  $19\text{mm} \pm 3\text{mm}$ 이며 일반적으로 19mm가 적용되고 있다. Fig. 9는 일반적인 공항 활주로 끝단의 포장 평면도이다. 본 연구에서는 인천국제공항의 활주로처럼 활주로 중앙에는 아스팔트 포장이, 양 끝단에는 콘크리트 포장이 위치하는 경우 Fig. 9와 같이 콘크리트 포장 구간 양끝에만 팽창줄눈이 존재하지 않는 경우, 콘크리트 포장 구간 양끝과 구간 내 한 개의 팽창줄눈이 존재하는 경우, 콘크리트 포장 구간 양끝과 구간 내 두 개 이상의 팽창줄눈이 존재하는 경우의 세 가지 조건이 있다고 가정하였다.

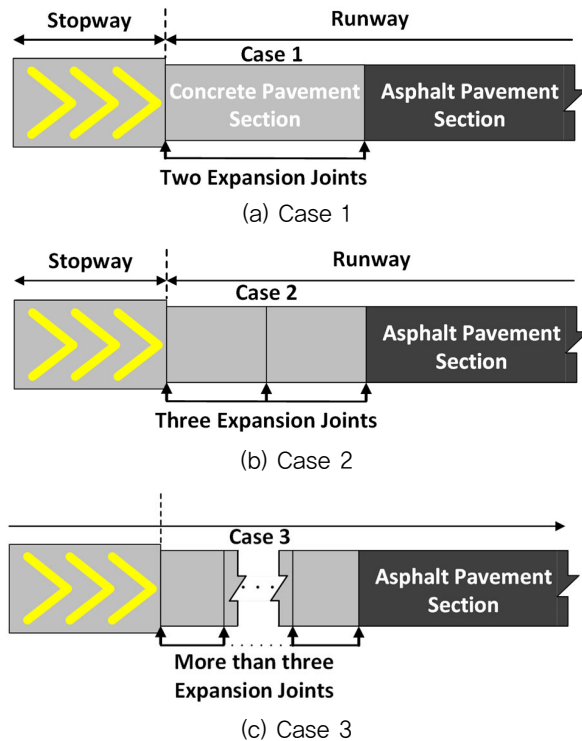


Fig. 9 Cases for Installation of Expansion Joints in Concrete Pavement

Fig. 9(a)의 Case 1의 경우 콘크리트 포장 구간 하나가 양끝에만 팽창줄눈을 갖고 있으므로 19mm 팽창줄눈 2개의 폭인 38mm를 유효 팽창줄눈폭으로 갖게 된다. Fig. 9(b)의 Case 2의 경우는 각 콘크리트 포장 구간이 가운데 설치된 팽창줄눈의 완충작용을 나누어 갖게 되므로 1.5개의 폭인 28.5mm를 유효 팽창 줄눈폭으로 갖는다. Fig. 9(c)의 Case 3의 경우처럼 팽창줄눈이 다수일 경우는 각 콘크리트 포장 구간이 각 팽창줄눈의 완충작용을 나누어 갖게 되므로 1개 폭인 19mm의 유효 팽창 줄눈폭에 수렴하게 된다. 따라서 콘크리트 포장 구간의 팽창줄눈 설치 상태에 따라 하나의 팽창줄눈이 감당할 수 있는 유효 팽창량이 다르며 이를 Eq. (7)과 같이 나

타낼 수 있다.

$$W_{eff} = \frac{W_{ej} \times N_{ej}}{N_{slab}} \quad (7)$$

여기서,  $W_{eff}$ : Effective width of expansion joint(mm)

$W_{ej}$ : Actual width of expansion joint(mm)

$N_{ej}$ : Number of expansion joint

$N_{slab}$ : Number of pavement section

팽창줄눈이 완전히 닫히기 직전까지 콘크리트 포장은 팽창에 대한 여유를 갖고 있으며, 팽창줄눈이 완전히 닫힌 뒤에도 콘크리트 슬래브가 팽창하면 압축응력이 발생한다. 따라서 콘크리트 슬래브에 압축응력을 발생시키는 연속된 두 팽창줄눈 사이 포장구간의 유효 팽창량은 Eq. (8)과 같이 총 팽창량에서 유효 팽창줄눈폭을 빼서 계산할 수 있다.

$$\Delta L_{eff} = \Delta L_{sum} - W_{eff} \quad (8)$$

여기서,  $\Delta L_{eff}$ : Effective expansion of pavement section(mm)

$\Delta L_{sum}$ : Sum of actual expansion of pavement section(mm)

$W_{eff}$ : Effective width of expansion joint(mm)

Eq. (8)에 의해서 계산된 인접한 두 개 팽창줄눈 사이의 콘크리트 포장구간의 유효 팽창량을 Eq. (9)와 같이 콘크리트 열팽창계수와 구간의 길이로 나누어 유효 팽창을 유발하는 등가의 온도 변화량으로 변환하였다.

$$\Delta T_{eff} = \frac{\Delta L_{eff}}{\alpha_c \times L} \quad (9)$$

여기서,  $\Delta T_{eff}$ : Temperature change causing effective expansion of pavement section( $^{\circ}\text{C}$ )

## 4.2. 팽창줄눈 간격 검토

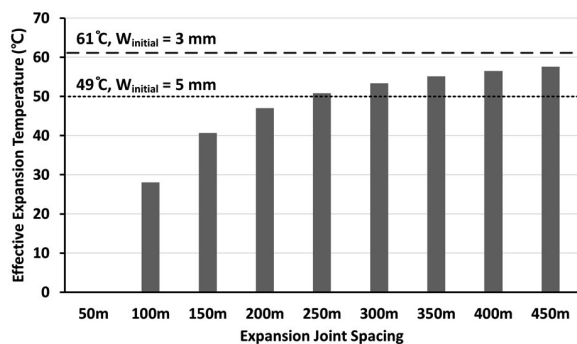
Fig. 3의 유한요소해석 결과에서 보인 것과 같이 팽창줄눈이 완전히 닫힌 뒤에도 콘크리트 슬래브의 팽창이 증가할 경우 최초 수직변위( $w_{initial}$ ) 1mm, 3mm,

5mm가 팽창줄눈부에 존재하는 상태에서 블로우업이 최초 발생하는 임계온도는 101°C, 61°C, 49°C로 계산되었다. Fig. 10은 최초 수직변위와 팽창줄눈의 간격에 따른 블로우업 발생 가능성을 Fig. 9에 보인 각 Case별로 분석한 결과이다. 팽창줄눈부의 최초 수직변위가 1mm인 경우의 임계온도인 101°C에 대해서 콘크리트 포장 구간의 팽창줄눈 설치 상태에 상관없이 블로우업이 발생하지 않는 것으로 계산되었다. 최초 수직변위 3mm의 임계온도 61°C에 대해서도 Case 3의 400m 이상의 팽창줄눈 간격에서만 블로우업 발생 위험이 있는 것으로 나타나 현행 300m의 팽창줄눈 간격에서는 블로우업이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 최초 수직변위 5mm의

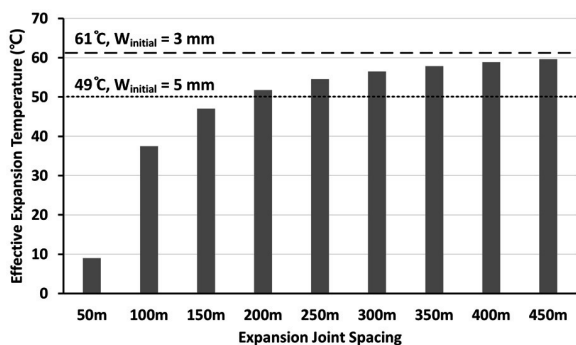
임계온도 49°C에 대해서는 Case 1에서는 250m 이상, Case 2에서는 200m 이상, 그리고 Case 3에서는 150m 이상의 팽창줄눈 간격에서 블로우업 발생 위험이 있는 것으로 확인되었다.

## 5. 결론

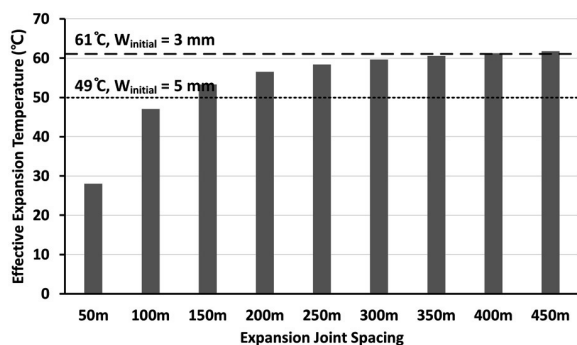
1. 콘크리트 슬래브에 발생할 수 있는 온도변화, 재료팽창 그리고 건조수축의 최대값을 고려하여 인접한 두 개 팽창줄눈 사이에 위치한 콘크리트 슬래브 구간의 최대 팽창량을 계산하였다. 일 최고기온과 슬래브 깊이별 평균온도 간의 상관관계를 분석하여 콘크리트 슬래브에 최대 발생 가능한 온도변화를 예측하였고, 대표적인 재료팽창인 ASR에 의한 팽창을 계산하였으며, 실내시험 결과와 슬래브의 형상비를 고려할 수 있는 Yang의 모형을 사용하여 슬래브의 건조수축을 예측하였다. 또한 온도팽창, 재료팽창, 건조수축을 합하여 콘크리트 슬래브의 총 팽창량을 계산하고, 슬래브의 팽창을 완충할 수 있는 유효 팽창줄눈폭을 팽창줄눈 간격에 따라 계산하였다.
2. 유한요소해석 모형을 이용하여 콘크리트 포장에 블로우업이 발생하기 시작하는 임계온도를 팽창줄눈부에 존재하는 최초 수직변위에 따라 계산하고, 팽창줄눈 간격에 따라 블로우업 발생 가능성을 검토하였다. 팽창줄눈부의 수직변위가 3mm 이하로 관리되는 경우에는 현행 300m의 팽창줄눈 간격에서는 블로우업이 발생하지 않는 것으로 검토되었다. 만약 최초 수직변위가 5mm까지 발생한 경우에는 콘크리트 포장 구간의 팽창줄눈 설치 상태에 따라 150m의 팽창줄눈 간격에서도 블로우업이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다.
3. 하지만 기존 연구결과를 통해 슬래브 커팅에 의한 줄눈부의 수직변위가 3mm 이내라는 것을 확인하였으며 대표적인 재료팽창 현상인 ASR을 잘 관리한다면 현행의 간격으로 팽창줄눈을 설치해도 블로우업이 발생하지 않을 것으로 판단하였다. 다만, 팽창줄눈부의 관리 부실 등으로 스폴링에 의한 줄눈부 단면감소나 내구성 균열 등으로 인한 강성 저하가 발생할 경우 예기치 못한 블로우업이 발생할 가능성이 있으므로 팽창줄눈부의 파손이나 이물질 침투 등을 지속적으로 관리할 필요가 있다고 판단하였다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 10 Possibility of Blowup Occurrence according to Initial Vertical Displacement and Spacing of Expansion Joint



## 감사의 글

본 논문은 인천국제공항공사의 지원을 받아 수행된 “공항 포장(강성) 장기거동 특성분석을 통한 공항포장설계법 개발 (1) (No. BEX00625)” 자료에 근거하여 수행되었으며 연구 지원에 감사드립니다.

## REFERENCES

- ASTM (2008). “Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-silica Reaction”, *ASTM Standard C 1293*, American Society for Testing and Materials. Pennsylvania. USA.
- ASTM (2010). “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-bar Method)”, *ASTM Standard C 227*, American Society for Testing and Materials. Pennsylvania. USA.
- ASTM (2014). “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-bar Method)”, *ASTM Standard C 1260*, American Society for Testing and Materials. Pennsylvania. USA.
- Bakharev, T., Sanjayan, J. G., and Cheng, Y. B. (2001). “Resistance of Alkali-activated Slag Concrete to Alkali-Aggregate Reaction”, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, No.2, pp. 331-334.
- Bazant, Z. P. and Panula, L. (1978). “Practical Prediction of Time-dependent Deformations of Concrete. Part 1. Shrinkage; Part 2. Creep”, *Materials and Construction*, Vol.11, No.5, pp.317-328.
- Beckemeyer, C. A., Khazanovich, L., and Yu, T. H. (2002). “Determining Amount of Built-in Curling in Jointed Plain Concrete Pavement: Case Study of Pennsylvania 1-80.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1809, pp.85-92.
- Buck, C. D. (1925). “Repair of Concrete Road Blow-ups in Delaware”, *Engineering News Record*, Vol.95, No.11, pp.432.
- CEB-FIP (1990). *CEB-FIP Model Code 1990: Design Code*. Comite Euro-international Du Beton Federation International de la Precontrainte, Thomas Telford Ltd., London, UK.
- Croll, J. G. (2005). “Thermal Buckling of Pavement Slabs”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, Vol.158, No.2, pp.115-126.
- Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2004). “Early-age Curling and Warping Behavior: Insights from a Fully Instrumented Test-slab System.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1896, pp.66-74.
- Kerr, A. D. and Dallis Jr., W. A. (1985). “Blowup of Concrete Pavements”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.111, No.1, pp.33-53.
- Kerr, A. D. (1994). “Blowup of a concrete pavement adjoining a rigid structure.”, *International journal of non-linear mechanics*, Vol.29, No.3, pp.387-396.
- KSA (2014). “Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-aggregate Combinations(Mortar-bar method), *KS F 2546*, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KSA (2015). “Standard Test Method for Dry Shrinkage Crack in Concrete”, *KS F 2595*, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- KSA (2015). “Standard Test Method for Alkali-silica Reaction of Concrete”, *KS F 2585*, Korean Standard Association, Seoul, Korea.
- Lim, J. S., Choi, K. H., Lee, C. J., and Jeong, J. H. (2009), “Modeling of Differential Shrinkage Equivalent Temperature Difference for Concrete Pavement Slabs”, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Korean Society of Road Engineers, Vol.11, No.4, pp.59-68.
- Park, M. G. (2009). *A Study on Friction between Slab and Different Types of Base of Concrete Pavement*. Master Thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Rhodes, J. A. and Carreira, D. J. (1997). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. ACI 209R-92, American Concrete Institute, Michigan. USA.
- Yang, G. and Bradford, M. A. (2017). “A Refined Modelling for Thermal-induced Upheaval Buckling of Continuously Reinforced Concrete Pavements”, *Engineering Structures*, Vol.150, pp.256-270.
- Yang, S. C., Ahn, N. S., Choi, D. U., and Kang, S. M. (2004). “Drying Shrinkage of Concretes According to Different Volume-Surface Ratio and Aggregate Types”, *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Korean Society of Road Engineers, Vol.6, No.4, pp.109-121.