

공항 콘크리트 포장 설계를 위한 환경하중 산정방법 개발

박주영* · 홍동성** · 김연태*** · 정진훈****

Park, Joo-Young*, Hong, Dong-Seong**, Kim, Yeon-Tae***, Jeong, Jin-Hoon****

Development of Environmental Load Calculation Method for Airport Concrete Pavement Design

ABSTRACT

The environmental load of concrete pavement can be categorized by temperature and moisture loads, which mean temperature distribution, and drying shrinkage and creep in the concrete slab. In this study, a method calculating the environmental load essential to mechanistic design of airport concrete pavement was developed. First, target area and design slab thickness were determined. And, the concrete temperature distribution with slab depth was predicted by a pavement temperature prediction program to calculate equivalent linear temperature difference. The concrete drying shrinkage was predicted by improving an existing model to calculate differential shrinkage equivalent linear temperature difference considering regional relative humidity. In addition, the stress relaxation was considered in the drying shrinkage. Eventually, the equivalent linear temperature difference due to temperature and the differential shrinkage equivalent linear temperature difference due to moisture were combined into the total equivalent linear temperature difference as terminal environmental load. The environmental load of eight civilian and two military airports which represent domestic regional weather conditions were calculated and compared by the method developed in this study to show its application.

Keywords : Airport concrete pavement, Environmental load, Temperature distribution, Differential shrinkage, Stress relaxation

초 록

콘크리트 포장의 환경하중은 온도하중과 수분하중으로 구분할 수 있으며, 이는 콘크리트 슬래브 내의 온도분포와 건조수축 및 크리프를 의미한다. 본 연구에서는 공항 콘크리트 포장의 역학적 설계에 필요한 환경하중을 산정할 수 있는 방법을 개발하였다. 먼저, 대상 지역과 설계 슬래브 두께를 결정한 후, 포장 온도 예측 프로그램을 사용하여 예측된 슬래브 깊이에 따른 콘크리트 온도분포를 등가선형 온도차이로 환산하였다. 기존 건조수축 예측 모형을 개선하여 지역별 상대습도를 고려하여 콘크리트의 건조수축을 예측한 후 부등건조수축 등가선형 온도차이를 환산하였다. 또한, 응력이완을 건조수축에 반영하였다. 결국, 온도에 의한 등가선형 온도차이와 수분에 의한 부등건조수축 등가선형 온도차이를 합하여 최종 환경하중인 총 등가선형 온도차이를 산정하였다. 적용 예를 보이기 위해 지역별 기상조건을 대표할만한 국내 민간공항 8곳 및 군공항 2곳의 환경하중을 본 연구에서 개발된 방법으로 계산하고 비교하였다.

검색어 : 공항 콘크리트 포장, 환경하중, 온도분포, 부등건조수축, 응력이완

* 정희원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정, 공학석사 (pjy0704@naver.com)

** 인하대학교 토목공학과 공학석사, 한국수자원공사 사원 (astroe@nate.com)

*** 인하대학교 토목공학과 석사과정 (kysamgo@naver.com)

**** 정희원 · 교신저자 · 인하대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (Corresponding Author · Associate Professor, Inha University · jhj@inha.ac.kr)

Received September 5 2012, Revised November 20 2012, Accepted February 15 2013

1. 서론

최근의 포장 설계는 기존 현장 실험을 바탕으로 제안된 경험적 설계 방법에서 환경하중 및 교통하중에 의한 포장 거동을 해석하고 잔존 수명을 예측하는 역학적-경험적 설계 방법으로 전환되고 있다. 외국의 역학적-경험적 설계 방법은 미국의 AASHTO 2002 MEPDG(Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide)가 대표적이며, 국내에서도 우리 실정에 맞는 역학적-경험적 기반의 한국형 포장 설계법 연구가 진행되었다 (Park et al., 2012).

공항 포장 분야의 경우, 미국의 FAA(Federal Aviation Administration)는 모노그래프에 기반한 기존의 경험적 설계 지침인 AC 150/5320-6을 3차원 유한요소해석에 의한 응력으로 슬래브 두께를 결정하는 역학적 설계 지침인 AC 150/5320-6E로 수정하였다 (FAA, 2009). 하지만 이 설계법은 도로 포장 설계법에 비해 변수가 다양하지 않아 매우 보수적인 설계를 하며, 특히 환경하중을 고려하지 않는 단점을 갖고 있다(Jeong et al., 2010). 온도 및 습도와 같은 기상작용으로 인해 콘크리트 포장 슬래브에는 컬링 및 와핑의 거동이 유발되며, 이 거동이 자중, 다웰바, 보조기층과의 마찰 등에 의해 구속되면 응력이 발생되고 교통하중이 복합적으로 작용하여 슬래브에 파손을 야기한다. 따라서 환경하중을 고려하지 않는 기존의 역학적 설계로는 실제 공용성을 합리적으로 정확하게 예측할 수 없으므로, 환경하중을 공항 포장 설계에 반영하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 공항 콘크리트 포장 슬래브에 작용하는 온도하중과 수분하중의 서로 다른 환경하중 요소를 슬래브 상하부 간의 온도차이 하나로 나타내고 합할 수 있는 방법을 제시하였다. 국내 민간 및 군 공항 10곳을 대상으로 지역 별 슬래브 깊이에 따른 온도분포와 부등건조수축을 슬래브 상하부 간의 등가선형 온도차이로 환산하였고, 장기적으로 발생하는 콘크리트의 부등건조수축에 응력이완을 고려하였다.

2. 환경하중 산정 순서

공항 콘크리트 포장의 환경하중은 슬래브 내부의 온도분포에 의한 온도하중과 슬래브 상하부 간의 부등건조수축에 의한 수분하중으로 구분된다. 본 연구에서는 슬래브 내부의 비선형 온도분포와 슬래브 상하부 간의 부등건조수축을 슬래브 상하부 간의 등가선형 온도차이로 각각 환산하고, 장기 부등건조수축에 대한 응력이완을 고려한 후 총 등가선형 온도차이로서 합산하였다.

먼저, 민간공항이 위치한 지역 중에서 국내의 지역별 기상을 대표할만한 광주, 김포, 대구, 양양, 울산, 인천, 제주, 청주의 8곳과 군공항이 위치한 수원, 충주의 2곳을 Figure 1과 같이 대상지역으로

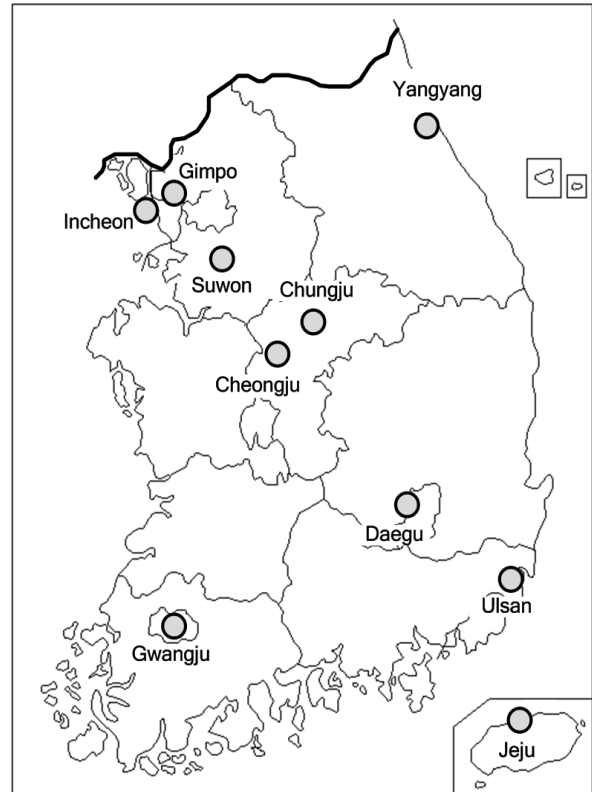
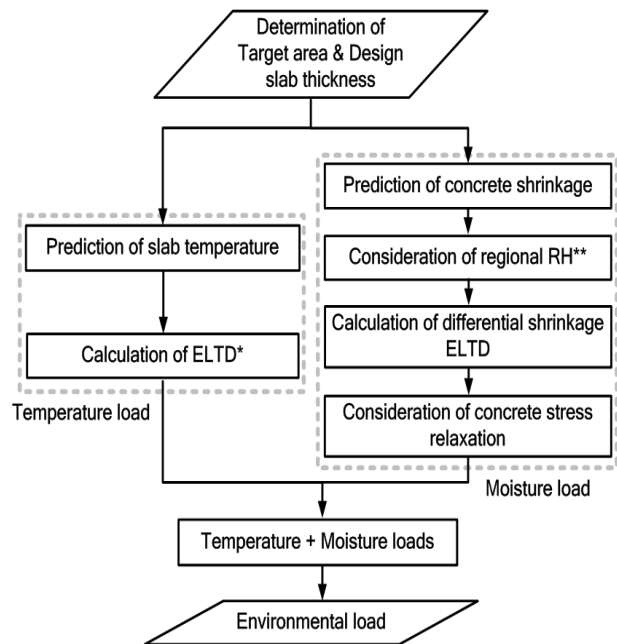


Fig. 1. Locations of target areas



* ELTD : Equivalent linear temperature difference

**RH : Relative humidity

Fig. 2. Calculation procedure of environmental load

Table 1. Monthly maximum daily temperature change and monthly average relative humidity of target areas

	Region	Month											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Monthly Maximum Daily Temperature Change (°C)	Cheongju	12.0	14.8	14.5	17.0	14.5	11.5	9.9	9.6	12.7	14.4	15.2	13.3
	Chungju	13.8	17.0	15.6	18.1	15.9	13.4	12.2	11.8	13.6	16.4	17.3	14.6
	Daegu	10.7	13.1	13.8	14.7	13.2	13.1	11.6	11.3	11.5	13.1	15.0	12.5
	Gimpo	11.1	12.6	11.7	14.1	12.2	10.7	9.7	9.2	11.4	13.1	12.8	10.4
	Gwangju	11.0	13.4	14.1	15.9	12.6	10.7	9.8	9.9	10.8	13.1	14.1	11.8
	Incheon	11.5	11.4	11.0	12.7	11.4	9.8	9.7	9.7	12	12.4	12.8	10.0
	Jeju	7.7	9.6	9.2	10.3	8.4	8.3	8.8	7.5	7.7	7.7	9.5	7.2
	Suwon	11.7	13.8	12.6	15.7	13	11.7	10.2	9.5	11.9	14.8	15.2	12.1
	Ulsan	10.4	12.7	12.1	10.8	9.4	7.9	9.8	8.8	8.7	10.3	12.3	10.9
	Yangyang	10.9	12.4	12.7	11.1	10.8	9.0	10.3	8.9	13.3	17.1	13.2	10.4
Monthly Average Relative Humidity (%)	Cheongju	77	73	70	63	66	68	77	82	80	76	70	73
	Chungju	69	66	63	54	60	65	76	80	79	75	64	66
	Daegu	57	64	66	60	63	65	80	80	79	74	60	61
	Gimpo	66	64	60	58	65	67	74	76	73	64	58	57
	Gwangju	73	70	68	66	70	72	81	81	76	71	65	68
	Incheon	69	68	66	66	74	74	82	82	76	64	62	65
	Jeju	64	67	66	66	72	82	82	79	78	70	61	65
	Suwon	73	69	69	65	73	73	82	86	81	74	68	68
	Ulsan	51	67	71	68	73	76	83	82	81	75	63	57
	Yangyang	47	60	71	58	64	73	75	79	76	68	43	41

선정하고 대기온도 및 상대습도 등의 기상자료를 수집하였다. An et al. (2004)이 개발한 포장 온도 예측 프로그램을 사용하여 300mm, 350mm, 400mm, 450mm, 500mm 두께의 슬래브 깊이 에 따른 비선형 온도분포를 예측하고, Mohamed et al. (1997)의 모형을 사용하여 등가선형 온도차이로 환산하였다.

Yang et al. (2009)의 모형, ACI 209 모형(ACI, 1997), GL 2000 모형(Gardner, 2004), 그리고 B3 모형(Bazant et al., 1995) 을 서로 비교하고, 300mm 이상의 큰 형상비(Volume to Surface Ratio: V/S)를 고려하여 공항 포장 콘크리트 슬래브에 적합한 Yang et al. (2009)의 모형을 본 연구에 적용하였다. 지역별 상대 습도를 고려할 수 있는 B3 모형을 사용하여 Yang et al. (2009)의 모형을 개선하고, 콘크리트 슬래브의 평균 건조수축을 예측하였다. Jeong et al. (2011)의 모형을 사용하여 평균 건조수축을 부등건조 수축 등가선형 온도차이로 환산하고, Park et al. (2009)의 모형으로 콘크리트 슬래브의 응력이완을 고려하였다.

최종적으로는 Figure 2와 같이 온도와 수분에 의한 두 가지 등가선형 온도차이를 합하여 공항 콘크리트 포장의 최종적인 환경 하중을 산정하였다. Table 1에는 대상 지역의 최대 일교차와 평균 상대습도를 월별로 나타내었고, 이중 콘크리트 포장 슬래브에 가장

큰 응력이 발생하는 최대 일교차가 가장 큰 달과 평균 상대습도가 가장 작은 달을 표시하였다(MOCT, 2004; KMA, 2010).

3. 온도하중

포장 온도 예측 모형을 사용하여 공항 콘크리트 포장 슬래브의 깊이에 따른 온도분포를 예측하였다. 예측된 비선형 온도분포는 구조해석에 쉽게 적용하기 어려우므로 역학적으로 등가인 선형의 온도차이로 환산되었다.

3.1 콘크리트 슬래브 내 비선형 온도분포 예측

An et al. (2004)는 콘크리트 포장에서, 슬래브 깊이별로 1시간 간격으로 측정된 자료와 열평형 방정식 및 열전도 이론에 기초하여 태양흡수율, 복사율, 열확산계수, 열전도율, 전달계수, 대기복사계 수, 표면열전달계수, 태양상수, 천정각 등을 입력변수로 하는 포장 온도 예측 모형을 개발하였다. 온도는 각 월의 대표일에 24시간 동안 30분 간격으로 슬래브의 깊이에 따라 비선형으로 예측되며, 그 흐름도는 Figure 3과 같다.

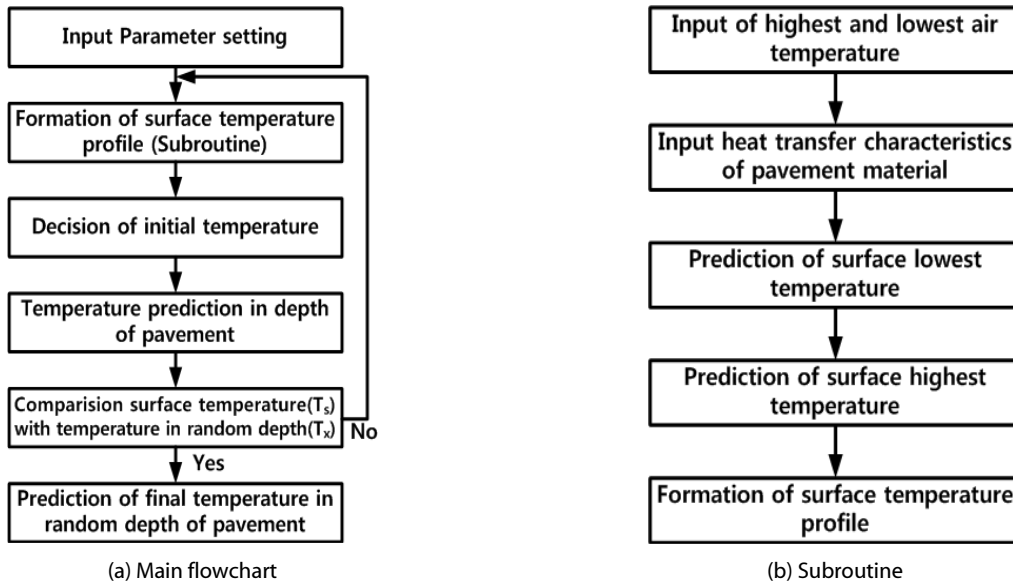


Fig. 3. Flowchart for prediction of concrete pavement temperature (An et al., 2004)

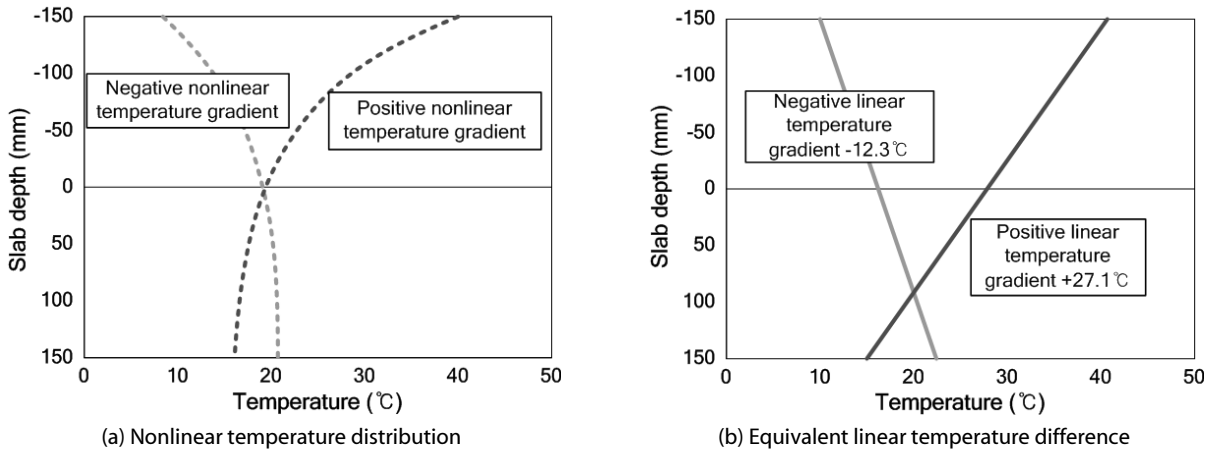


Fig. 4. Example of conversion of nonlinear temperature distribution to equivalent linear temperature difference

3.2 슬래브 상하부 간의 등가선형 온도차이

슬래브 내의 온도분포는 복잡한 비선형이기 때문에 구조해석 시 입력하기 까다로우므로, Mohamed et al. (1997)가 제안한 모형을 사용하여 역학적으로 등가인 선형의 슬래브 상하부 간의 온도차이로 환산하기로 하였다. 비선형 온도분포를 식 (1)과 같이 3차 포물선으로 표현한 후 식 (2)와 같이 등가선형 온도차이로 환산하였다. 먼저, 슬래브 내 특정 깊이에서의 슬래브 하단에 대한 온도 차이는 식 (1)에 의해 계산될 수 있다.

$$\Delta T = A + Bz + Cz^2 + Dz^3 \quad (1)$$

여기서, ΔT 는 특정 깊이와 슬래브 하부 간의 온도차이(°C),

A, B, C, D 는 비선형 온도분포에 대한 3차 포물선의 계수, z 는 슬래브의 중앙을 기준으로 위쪽은 (-), 아래쪽은 (+)로 정의된 특정 깊이까지의 거리이다. 식 (1)에서 결정된 3차 포물선의 계수를 이용하여 슬래브 상부와 하부 간의 등가선형 온도차이를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta T_{eq} = -12 \left(\frac{Bh}{12} + \frac{Dh^3}{80} \right) \quad (2)$$

여기서, ΔT_{eq} 는 등가선형 온도차이(°C), h 는 슬래브의 두께, B, D 는 식 (1)에 보인 3차 포물선의 계수이다. 슬래브 깊이에 따른 비선형 온도분포를 등가선형 온도차이로 변환하는 개념을

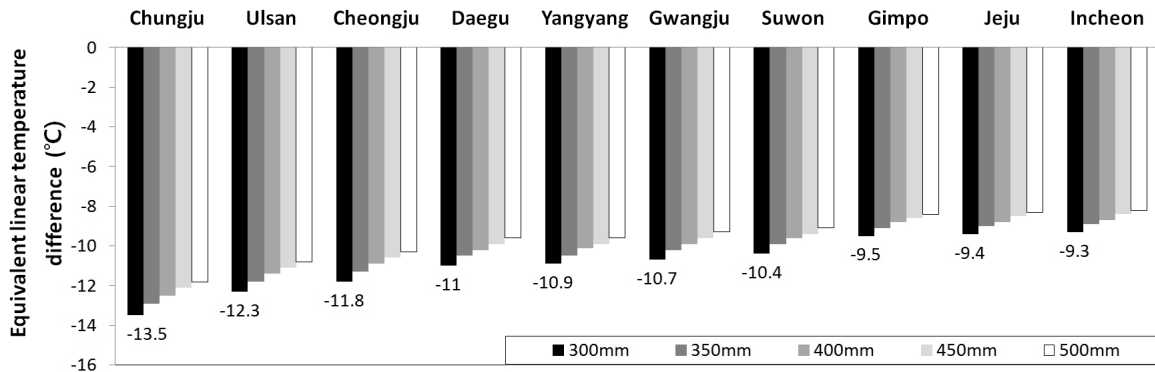


Fig. 5. Regional maximum negative equivalent linear temperature difference

Figure 4에서 보였다. 이상의 방법으로 국내 민간공항 및 군공항 소재 지역들 중 광주, 김포, 대구, 수원, 양양, 울산, 인천, 제주, 충주, 그리고 충주의 10곳에 대한 등가선형 온도차이를 계산하였다. 콘크리트 포장은 대기에 접한 슬래브 상부의 건조수축이 하부보다 커서 마치 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮아서 더 많이 수축하는 것과 동일한 효과를 나타낸다. 이에 따라 양(+)의 온도차이 보다는 음(-)의 온도차이가 최종적으로 계산되는 환경하중을 좌우하므로, 본 논문에서는 슬래브 상하부 간의 최대 음(-)의 등가선형 온도차이를 온도하중으로 결정하였다. 계산 결과, Figure 5와 같이 형상비 300mm일 때 월별 최대 일교차가 컸던 충주의 온도차이의 절댓값이 -13.5°C로 가장 컸고, 일교차가 작았던 인천이 -9.3°C로 가장 작았다. 그리고 슬래브 두께가 두꺼울수록 온도차이의 절댓값이 조금씩 감소하는 경향을 보였다.

4. 수분하중

콘크리트의 건조수축을 예측하기 위해 국내외에서 많은 연구가 수행되었다. 본 논문에서는 공항 포장에 가장 적합한 모형을 찾기 위해 Yang et al. (2009), ACI(1997), Gardner(2004), 그리고 Bazant et al. (1995)가 제안한 모형을 서로 비교하였다. 콘크리트 포장의 경우, 슬래브의 상부는 대기에 노출되고, 하부는 보조기층과 접하여 노출되지 않으므로, 슬래브 상부의 건조수축이 하부보다 점점 더 커지는 부등건조수축이 발생된다. 따라서 Jeong et al. (2011)의 모형을 사용하여 콘크리트 슬래브의 평균 건조수축 변형률을 부등건조수축 등가선형 온도차이로 환산하고 Park et al. (2009)의 모형을 사용하여 장기 부등건조수축에 대한 응력이완을 고려하였다.

4.1 콘크리트의 건조수축 예측 모형

본 논문에서는 공항 콘크리트 포장에 가장 적합한 건조수축 예측 모형을 선정하기 위하여 Yang et al. (2009)의 모형, ACI

209 모형(ACI, 1997), GL 2000 모형(Gardner, 2004), 그리고 B3 모형(Bazant et al., 1995)의 총 4가지 모형을 비교하였다. ACI 209 모형(ACI, 1997)은 초기 재령 콘크리트의 건조수축 예측에는 합리적이지만, 상대습도 80% 미만과 이상에 대해 다르게 제안된 두 예측식의 결과와 경향이 크게 다르며, 재령과 강도 등 건조수축에 영향을 미칠만한 변수를 포함하지 않기 때문에 장기 건조수축 예측에는 적당하지 않다고 보고되었다(Gardner, 2004). Gardner (2004)는 Bazant와 Panula가 1978년부터 축적해온 RILEM Data Bank의 107개 콘크리트 건조수축 실험 자료를 GL 2000 모형(Gardner, 2004) 및 B3 모형(Bazant et al., 1995)에 의한 예측결과와 비교하고, 이들 모형의 정확도를 검증하였다. GL 2000 모형은 96%를 초과하는 상대습도에 대한 건조수축을 예측할 수 없는 한계가 있다고 보고하였고, B3 모형은 수분확산 이론에 기초하여 다양한 변수를 고려하므로 초기 및 장기 재령의 건조수축을 비교적 합리적으로 예측하지만, 공항 포장 슬래브와 같이 큰 형상비를 갖는 콘크리트의 건조수축 예측에는 무리가 있다고 보고하였다.

공항 콘크리트 포장 슬래브는 횡방향으로 연속하여 연결되므로 슬래브 측면에서의 수분 증발은 무시될 수 있으며, 상부 표면에서만 증발이 일어난다고 가정할 수 있다. 기존 연구자들은 건조수축에 영향을 미치는 여러 인자 중 형상비(Volume to Surface Ratio: V/S)의 영향이 매우 크다고 보고하였다. 형상비는 콘크리트 시편의 전체 체적에 대한 건조수축이 발생하는 표면적의 비를 말하며, 공항 콘크리트 포장과 같이 두꺼운 슬래브의 경우 300mm~500mm 범위의 큰 형상비를 갖는다. ACI 209, GL 2000, 그리고 B3 모형은 25mm~150mm 범위의 작은 형상비를 갖는 콘크리트의 건조수축은 정확하게 예측하지만, 그 이상의 형상비에 대해서는 정확하지 않다. 그 이유는 이들 3개의 모형이 실제 콘크리트 건조수축 실험 자료를 회귀분석하여 제안되었으나, 150mm 이상의 형상비에 대한 실험 자료는 매우 적었기 때문이다.

본 논문에서는 위 4가지 모형 중 공항 콘크리트 포장 슬래브의 형상비에 맞도록 제안된 Yang et al. (2009)의 모형을 수분하중

Table 2. Coefficients of Yang model (Yang et al., 2004)

Coarse Aggregate	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
Limestone	362.9	36.71	1.613	0.0372
Sandstone	431.7	33.30	2.204	0.0194
Granite	491.7	27.43	0.635	0.01956

모형의 기본 형태로 사용하기로 하였다. Yang et al. (2009)는 콘크리트 건조수축에 영향을 주는 주요 인자는 형상비, 골재 종류, 재령, 온도, 습도 등이며, 이중 굵은 골재의 영향이 가장 크다고 보고하였다. 또한, 굵은 골재의 물성 중 흡수율과 비중이 건조수축 및 열팽창에 의한 콘크리트 체적변화에 영향을 미친다고 하였다. 항온(20℃) 및 항습(60%) 조건에서 석회암, 사암, 화강암 세 종류의 굵은 골재에 대하여 콘크리트 시편의 형상비를 달리하면서 최대 1,014일 동안 건조수축을 측정하였다. 사용된 형상비는 22.2mm, 40mm, 85.7mm, 200mm였으며, 특히 화강암 골재에 대해서는 잔골재의 종류를 달리하면서 형상비 300mm에 대한 실험을 추가로 실시하였다. 측정된 자료를 사용하여 재령과 형상비를 독립변수로 하는 이중 비선형 회귀분석을 수행하고, 식 (3)의 건조수축 예측 모형을 개발하였다. 굵은 골재 종류 별 모형 상수는 Table 2와 같다.

$$\epsilon_{sh} = \frac{a_1 t}{a_2 + t} \times [1 + a_3 e^{(-a_4 V/S)}] \quad (3)$$

여기서, ϵ_{sh} 는 건조수축 변형률, t 는 재령(일), V/S 는 형상비(mm), a_1, a_2, a_3, a_4 는 모형 상수이다.

식 (3)의 건조수축 예측 모형은 재령과 형상비만을 독립변수로 사용하므로 지역별 기상조건을 고려하지 못하는 한계가 있다. 따라서 지역별 상대습도를 변수로 추가하기 위하여 ACI 모형, GL 2000 모형, B3 모형을 다시 분석하였다. 앞서 언급하였듯이 ACI 모형과 GL 2000 모형은 상대습도를 정확하게 반영하기 어려운 형태이므로, 식 (4)의 Bazant 모형(Bazant et al., 1978) 중 상대습도 부분을 식 (3)에 추가하여 식 (5)의 모형으로 수정하였다. Yang et al. (2009)의 실험에 사용된 상대습도가 60%이므로 이를 모형에 반영하였다.

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{ush} (1 - RH^3) \quad (4)$$

여기서, ϵ_{ush} 는 최종 건조수축 변형률, RH 는 상대습도이다.

$$\epsilon_{sh} = \frac{a_1 t}{a_2 + t} \times [1 + a_3 \exp(-a_4 V/S)] \times \frac{(1 - RH^3)}{(1 - 0.6^3)} \quad (5)$$

4.2 부등건조수축 등가선형 온도차이

본 논문에서 제안된 식 (5)의 건조수축 예측 모형은 슬래브 깊이에 따른 건조수축의 변화를 고려하지 않고 슬래브 두께 전체의 평균적인 건조수축을 예측한다. 콘크리트 포장 슬래브의 경우, 상부 표면은 대기에 노출된 반면 하부는 보조기층과 접하여 대기에 노출되지 않으므로 슬래브 깊이에 따른 건조수축의 크기가 다르다(Lim et al., 2009). Janssen(1987)은 슬래브 깊이에 따라 변하는 건조수축의 분포를 비선형 온도분포와 유사하다고 보고하였고, Eisenmann et al. (1990)은 이러한 부등건조수축을 등가의 온도차이로 환산하는 연구를 수행하였다. Jeong et al. (2011)와 Lim et al. (2009)는 현장 콘크리트 포장 슬래브의 변형률을 측정하고, 부등건조수축을 역학적으로 등가인 선형의 온도차이로 환산하는 모형을 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$\Delta T_{sh} = \frac{ah}{\alpha_c} \epsilon_{sh} \quad (6)$$

여기서, ΔT_{sh} 는 부등건조수축 등가선형 온도차이(℃), h 는 슬래브의 두께(mm), α_c 는 콘크리트의 열팽창계수(1/℃)이다. Lim et al. (2009)는 Yang et al. (2004)의 모형으로 예측된 건조수축과 실제 콘크리트 포장 슬래브에서 측정된 건조수축 간의 관계를 회귀분석하여 회귀계수 a 의 값으로 약 0.002를 얻었다. Jeong et al. (2011)는 동일한 방법으로 ACI 건조수축 모형에 대하여 약 0.004의 a 값을 얻었다. 본 연구에서 제안된 모형은 Yang et al. (2004)의 모형을 기반으로 하므로, 0.002를 a 의 값으로 사용하였다.

4.3 콘크리트의 응력이완

콘크리트 포장 슬래브의 체적이 변하면 자중, 보조기층과의 마찰, 길어깨, 타이바, 다웰바 등에 의한 구속으로 인하여 슬래브 내부에 응력이 유발된다(Park et al., 2009). 장기간 구속된 슬래브에 발생하는 실제 응력은 이론적으로 예측한 것보다 작는데, 이는 콘크리트의 물성인 크리프 및 응력이완(Stress Relaxation)과 관련이 있다. 그러므로 이론적으로 계산된 응력에 이를 고려하여 실제와 근사한 응력을 도출할 필요가 있다. 온도는 짧게는 1일, 길게는 1년을 주기로 상승과 하강을 반복하므로 슬래브에는 압축과 인장응력이 번갈아 발생한다. 이에 따라 온도에 의한 압축과 인장의 응력이완은 상쇄되어 무시할 수 있다. 반면 건조수축은 대기와 접하여 증발이 일어나는 콘크리트 슬래브 상부 표면에서 크게 발생하므로 증발이 일어나지 않는 슬래브 하부와의 건조수축 차이는 점점 커지게 된다. 이 부등건조수축에 의해 슬래브 상부에는 인장응력이 지속적으로 증가하고 이에 상응하는 응력이완도 발생하게 된다.

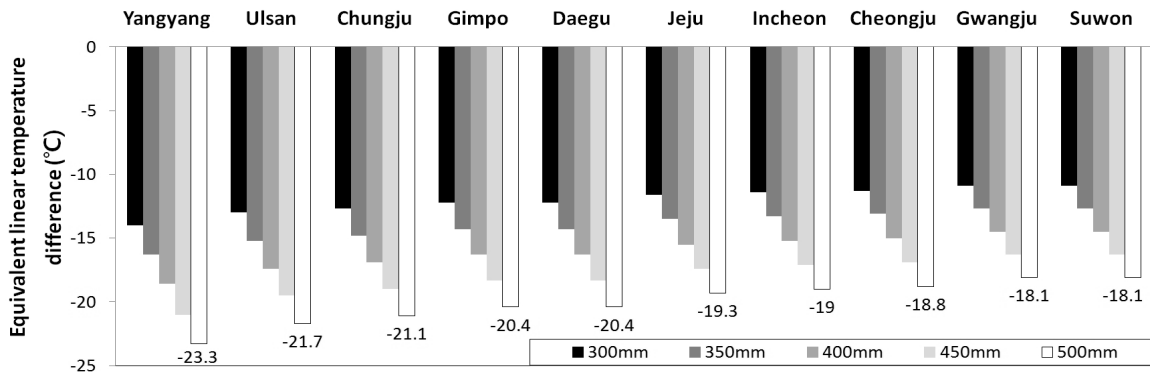


Fig. 6. Regional maximum negative differential shrinkage equivalent linear temperature difference considering stress relaxation

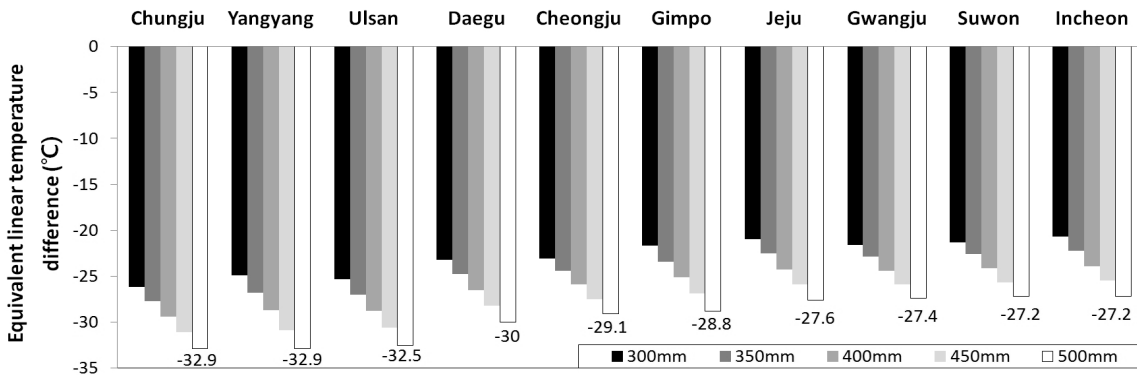


Fig. 7. Regional maximum negative total equivalent linear temperature difference

Park et al. (2009)는 구속 원주형 시편, 자유 건조 원주형 시편, 그리고 자유 건조 각주형 시편의 여러 위치에서 변형률을 측정하였다. 측정된 변형률을 Hossain et al. (2004)의 탄성응력 및 잔류응력 예측 모형에 대입하고 그 차이로 응력이완을 예측하였으며, 이완된 응력과 탄성응력의 비를 바탕으로 식 (7)에 포함되어 있는 응력이완을 모형을 제시하였다. 결과적으로, 식 (6)의 부등건조수축 등가선형 온도차이 모형에 응력이완을 반영하여 식 (7)의 응력이완이 고려된 부등건조수축 등가선형 온도차이 모형을 제안하였다.

$$\Delta T_{sh-re} = \Delta T_{sh}(1 - \phi) \quad (7)$$

여기서, ΔT_{sh-re} 는 응력이완이 고려된 부등건조수축 등가선형 온도차이(°C), ϕ 는 응력이완율($\phi = A/t + B$, A 는 -1.775, B 는 0.6)이다. 온도하중의 경우와 마찬가지로, 식 (5)부터 식 (7)까지를 이용하여 국내 민간공항 및 군공항 소재 지역 중에서 광주, 김포, 대구, 수원, 양양, 울산, 인천, 제주, 청주, 그리고 충주의 10곳에 대해 응력이완이 고려된 최대 음(-)의 부등건조수축 등가선형 온도차이를 예측하였다. 식 (5)에 필요한 상대습도는 항공기상연보 (KMA, 2010)의 연중 최저 월평균 상대습도를 사용하였다. Figure

6에서 보듯이 슬래브가 두꺼울수록 온도차이의 절댓값이 커졌으며, 상대습도가 낮았던 양양의 온도차이 절댓값이 가장 컸고 상대습도가 높았던 수원이 가장 작았다.

5. 총 환경하중

공항 콘크리트 포장 파손에 영향을 미치는 환경하중은 온도하중과 수분하중으로 구분할 수 있으며, 식 (2)의 등가선형 온도차이와 식 (7)의 응력이완이 고려된 부등건조수축 등가선형 온도차이를 합하여 식 (8)의 총 등가선형 온도차이로 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{total} = \Delta T_{eq} + \Delta T_{sh-re} \quad (8)$$

여기서, ΔT_{total} 은 총 등가선형 온도차이이다. 앞서 예측된 공항 소재 10개 지역의 온도하중과 수분하중을 식 (8)과 같이 합하여 Figure 7과 같이 총 환경하중을 예측하였다. 슬래브가 두꺼울수록 온도차이의 절댓값이 컸으며, 온도하중보다는 수분하중의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 밀교차가 크고 상대습도가 낮은 충주의 온도차이 절댓값이 가장 컸고 이와 반대의 조건인 인천이 가장 작았다.

6. 결론

공항 콘크리트 포장의 환경하중을 산정하는 방법을 제시하기 위하여 수행된 본 연구의 주요한 결과는 다음과 같다.

- (1) 온도하중을 계산하기 위하여 대상 지역과 설계 슬래브 두께를 결정한 후 An et al.의 포장 온도 예측 프로그램으로 각월의 대표일에 대해 매 시간마다의 슬래브 온도를 깊이에 따라 예측하였다. 예측된 비선형 온도분포는 Mohamed et al.의 모형을 사용하여 등가선형 온도차이로 환산되었다.
- (2) 수분하중을 산정하기 위해 4개의 기존 건조수축 예측 모형을 비교하고, 큰 형상비의 공항 콘크리트 포장 슬래브에 적합한 Yang et al.의 모형을 수분하중 모형의 기본 형태로 사용하기로 하였다. 지역별 상대습도를 고려하기 위해 Bazant et al.의 모형 중 상대습도 인자를 Yang et al.의 모형에 반영하여 새로운 건조수축 예측 모형을 제안하였다. 예측된 건조수축을 Jeong et al.의 모형에 대입하여 부등건조수축 등가선형 온도차이로 환산한 후, Park et al.의 모형을 사용하여 응력 이완이 고려된 부등건조수축 등가선형 온도차이를 구하였다. 최종적으로 온도에 의한 등가선형 온도차이와 수분에 의한 부등건조수축 등가선형 온도차이를 합한 총 등가선형 온도차이를 계산하였다.
- (3) 개발된 방법의 적용 예를 보이기 위하여 국내 민간공항 및 군공항 소재 지역 중에서 지역별 기상을 대표할만한 10개 지역의 총 등가선형 온도차이를 슬래브 두께 별로 계산하였다. 일교차가 크고 슬래브 두께가 얇을수록 온도하중인 등가선형 온도차이가 증가하였고, 상대습도가 낮고 슬래브 두께가 두꺼울수록 수분하중인 부등건조수축 등가선형 온도차이가 증가하였다. 총 등가선형 온도차이는 슬래브 두께가 두꺼울수록 증가하였고 온도하중보다는 수분하중의 영향을 더 크게 받는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 제안된 모형에 대상 지역의 온도와 상대습도, 슬래브 두께를 입력하는 간단한 방법과 절차로 공항 콘크리트 포장의 역학적 설계에 필수적이나 아직까지 반영하지 못하고 있는 환경하중을 합리적으로 산정할 수 있을 것으로 기대된다. 온도하중과 수분하중 외에도 포장파손에 영향을 미칠만한 다른 기상요소를 환경하중에 추가하는 연구도 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부와 건설교통기술평가원의 국토해양기술연구개발사업인 “저탄소 녹색공항 포장시공 및 유지관리기법 개발”과 인하대학교의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- ACI Committee 209 (1997). *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures ACI 209R-92*. ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- An, D. S. and Park, H. M. (2004). “A Study on Pavement Temperature Prediction Models Using Field Inspection Data.” *Proceedings of the KSRE Conference*, Vol. 6, pp. 17-20 (in Korean).
- Bazant, Z. P. and Baweja, S. (1995). “Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-Model B3.” *Materials and Structures*, Vol. 28, No. 6, pp. 357-365.
- 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. 2, No. 65, pp. 301-328.
- Eisenmann, J. and Leykauf, G. (1990). “Simplified calculation method of slab curling caused by surface shrinkage.” *Proceedings of the 2nd International Workshop on the Theoretical Design of Concrete Pavements*, Madrid, Spain, pp. 185-197.
- FAA (2009). “Standards for Airport Pavement Design and Evaluation.” AC 150/5320-6E, *Office of Airport Safety and Standards*, U.S. Department of Transportation.
- Gardner, N. J. (2004). “Comparison of Prediction Provisions for Drying Shrinkage and Creep of Normal-Strength Concretes.” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 767-775.
- Hossain, A. B. and Weiss, J. (2004). “Assessing Residual Stress Development and Stress Relaxation in Restrained Concrete Ring Specimens”, *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, No. 5, pp. 531-540.
- Janssen, D. J. (1987). “Moisture in Portland Cement Concrete.” *Transportation Research Record 1121*, pp. 40-44.
- Jeong, J. H., Lim, J. S., Cheon, S. H., and Kwon, S. A. (2010). “Advanced FAA Design Method for Airport Pavements.” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 12, No. 3, pp. 39-45 (in Korean).
- Jeong, J. H., Lim, J. S., Sun, R. J., and Zollinger, D. G. (2011). “Modeling of Differential Shrinkage of Pavement Slabs.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Vol. 165, No. 1, pp. 3-14.
- KMA (2010). *Annual Aeronautical Meteorological Report*. Korea Meteorological Administration, (in Korean).
- 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 Korean Society of Road Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 59-68 (in Korean).
- MOCT (2004). *Development of Asphalt Pavement Design Guide*. Final Report, Korean Pavement Research Program, Ministry of Construction and Transportation, pp. 29-60 (in Korean).
- Mohamed, A. R. and Hansen, W. (1997). “Effect of Nonlinear

- Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavement.” Transportation Research Record : *Journal of the Transportation Research Board* 1568, pp. 65-71.
- Park, J. W., Jeong, Y. D., Lim, J. S., and Jeong, J. H. (2009). “A Preliminary Study on Reduction of Shrinkage Stress in Concrete Slabs.” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 11, No. 4, pp. 87-94 (in Korean).
- Park, J. Y., Park, J. W., Kim, S. H., Liu, J. H., and Jeong, J. H. (2012). “Comparative Analysis in Sensitivity of Cumulative Fatigue Damage of Mechanistic-Empirical Concrete Pavement Design Programs.” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 15-24 (in Korean).
- Yang, S. C., Ahn, N. S., Choi, D. U., and Kang, S. M. (2004). “Drying Shrinkage of Concretes According to Different Volume-Surface Ratios and Aggregate Types.” *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 109-121 (in Korean).
- Yang, S. C., Lee, C. J., Kim, Y. B., Lee, S. J., Lim, K. S. (2009). “Estimation of Concrete Strength Properties in Concrete Pavement.” *Proceedings of the KSRE Conference*, pp. 519-524 (in Korean).