

공항 콘크리트 포장 구조해석을 위한 3차원 유한요소 모형 개발

Development of Three-Dimensional Finite Element Model for Structural Analysis of Airport Concrete Pavements

박 해 원	Park, Hae Won	학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : czess@naver.com)
심 차 상	Shim, Cha Sang	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : csshim@koreaexim.go.kr)
임 진 선	Lim, Jin Seon	정회원 · 삼우아이엠씨 기술연구소 선임연구원 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
조 남 현	Joe, Nam Hyun	정회원 · 인천국제공항공사 공항연구소 선임연구원 (E-mail : t99ending@airport.kr)
정 진 훈	Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 사회인프라공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : In this study, a three-dimensional nonlinear finite element analysis (FEA) model for airport concrete pavement was developed using the commercial program ABAQUS. Users can select an analysis method and set the range of input parameters to reflect actual conditions such as environmental loading.

METHODS : The geometrical shape of the FEA model was chosen by considering the concrete pavement located in the third-stage construction site of Incheon International Airport. Incompatible eight-node elements were used for the FEA model. Laboratory test results for the concrete specimens fabricated at the construction site were used as material properties of the concrete slab. The material properties of the cement-treated base suggested by the Federal Aviation Administration (FAA) manual were used as those of the lean concrete subbase. In addition, preceding studies and pavement evaluation reports of Incheon International Airport were referred for the material properties of asphalt base and subgrade. The kinetic friction coefficient between the concrete slab and asphalt base acquired from a preceding study was used for the friction coefficient between the layers. A nonlinear temperature gradient according to slab depth was used as an input parameter of environmental loading, and a quasistatic method was used to analyze traffic loading. The average load transfer efficiency obtained from an Heavy falling Weight Deflectometer (HWD) test was converted to a spring constant between adjacent slabs to be used as an input parameter. The reliability of the FEA model developed in this study was verified by comparing its analysis results to those of the FEAFAA model.

RESULTS : A series of analyses were performed for environmental loading, traffic loading, and combined loading by using both the model developed in this study and the FEAFAA model under the same conditions. The stresses of the concrete slab obtained by both analysis models were almost the same. An HWD test was simulated and analyzed using the FEA model developed in this study. As a result, the actual deflections at the center, mid-edge, and corner of the slab caused by the HWD loading were similar to those obtained by the analysis.

CONCLUSIONS : The FEA model developed in this study was judged to be utilized sufficiently in the prediction of behavior of airport concrete pavement.

Keywords

Airport concrete pavement, Finite element analysis, ABAQUS, FEAFAA, HWD test

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 Oct. 16, 2017 Revised Oct. 16, 2017 Accepted Oct. 25, 2017

1. 서론

현재의 공항포장 설계방법은 FAARFIELD와 같은 설계프로그램의 등장으로 과거의 경험적 설계방법에 비해 큰 발전을 이루었다(Jeong et al., 2010). 하지만 최근에 개정된 FAA의 AC 150/5320-6F 설계법과 그 설계프로그램인 FAARFIELD에서조차 콘크리트 포장 공용성의 주요 인자인 온도, 습도 등과 같은 환경하중의 영향을 고려하지 못하고 있다. 또한 FAA의 설계법을 주로 사용하는 국내 공항포장의 설계법은 원래 미국의 포장조건에 맞추어 개발되었기 때문에 국내의 조건과는 차이가 있다.

환경하중이 콘크리트 포장의 거동에 미치는 영향을 선형연구를 통해 지속적으로 확인되었으며, 우리나라와 같이 계절변화가 뚜렷한 지역에서는 환경하중의 작용을 무시할 수 없다(Kim, 2007; Jeong et al., 2005; Harik et al., 1994; Janssen, 1987). FAA에서도 콘크리트 포장에 작용하는 환경하중의 영향을 인지하고 있기 때문에 FAARFIELD의 서브프로그램인 3차원 공항포장 유한요소해석 프로그램 FEAFAA에서는 온도하중을 고려한 해석을 실시할 수 있다(FAA, 2009). 하지만 FEAFAA에서는 단순히 슬래브 상단과 하단의 온도만 입력하기 때문에 슬래브 깊이에 따른 비선형 온도변화 등과 같이 환경하중을 실제에 가깝게 고려하기에는 한계가 있다.

따라서 인천국제공항공사에서는 환경하중을 고려하여 공항 콘크리트 포장의 장기적인 거동 특성을 분석하고 그 결과를 통해서 설계법을 개선하려는 연구를 수행하고 있다. 기존 공항 콘크리트 포장 해석 프로그램은 입력변수의 범위, 경계조건, 해석방법 등에 제한이 있어 사용자가 환경하중 등의 실제 조건을 해석에 반영하는데 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는 공항 콘크리트 포장의 실제 조건인 환경하중을 교통하중 및 복합하중과 함께 모사할 수 있는 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA) 모형을 개발하고 해석결과를 검증 하였다.

2. 유한요소해석 모형의 개발

2.1. 모형의 구조적 특징

공항 콘크리트 포장에 대한 3차원 FEA 모형을 개발하기 위하여 본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 개발된 해석 모형은 FEAFAA에 비해서 해석방법을 사용자가 선택할 수 있고 입력변수의 범위를 자유롭게 설정할 수 있기 때문에 실제에 가까운 해석결과를 도출할 수 있는 장점이 있다.

ABAQUS로 개발한 모형과 FEAFAA 모형의 차이점을 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1. Difference between Models Developed by ABAQUS and FEAFAA

	ABAQUS	FEAFAA
Analysis object	Various structures	Concrete pavements
Analysis method	Static, Dynamic, etc.	Static
Material property	Defined by user	Linear elastic
Boundary condition	Defined by user	Invariable
Loading condition	Defined by user	Limited
Environmental loading	Nonlinear temperature distribution	Linear temperature gradient

FEA를 위한 포장체의 구조는 인천국제공항 제2 여객 터미널 계류장의 콘크리트 포장을 대상으로 하였다. 대상 구간에는 공항포장 설계법 개발을 위해서 다양한 계측센서와 계측시스템이 설치되어 있으며 이를 사용하여 해석결과와 실측결과를 비교할 수 있다. 개발된 모형에 사용된 포장체의 단면 구성은 Fig. 1과 같다. 노상 1,800mm, 린콘크리트 보조기층 150mm, 아스팔트 기층 50mm의 두께를 갖는 22,000mm×22,000mm×2,000mm(길이×폭×두께) 크기의 하부층 위에 6,000mm×6,000mm×500mm(길이×폭×두께)의 콘크리트 슬래브 9개를 가로와 세로 3×3으로 모형화하였다.

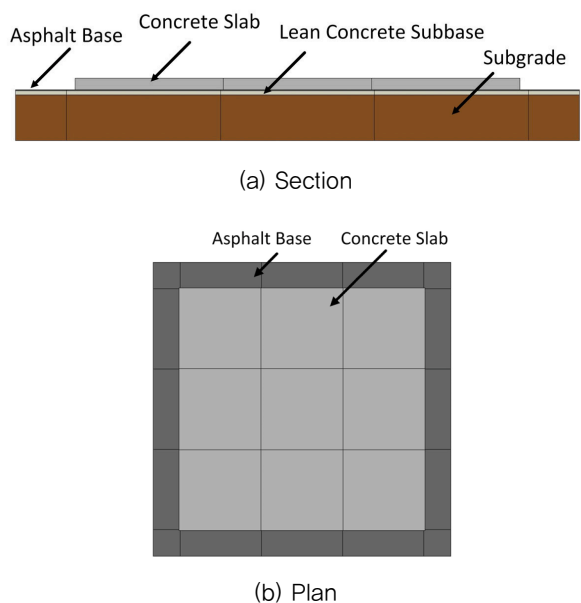


Fig. 1 FEA Model of Airport Concrete Pavement

콘크리트 포장에 대해서 적용이 가능한 FEA 모형의 대표적인 요소(Element)는 Fig. 2와 같다. 이 중 가장 일반적으로 사용되는 요소는 상대적으로 해석시간이 짧은 Fig. 2(a)의 8절점 요소이다. 하지만 일반적인 8절점 요소는 Fig. 3(b)에 보인 것처럼 Fig. 3(a)의 물체의 실제 힘을 충분히 표현하지 못해 해석의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 20절점 요소의 경우 휨해석 결과의 정확도가 높아 과거에 비선형 분포의 온도가 작용하는 콘크리트 포장에 대한 3차원 FEA 모형에 사용된 적이 있다(Siddique et al., 2005). 하지만 해석에 걸리는 시간이 8절점 요소를 사용한 모형에 비해 비약적으로 증가하기 때문에 규모가 큰 FEA 모형에 적용하기에는 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 힘을 잘 모사할 수 있는 Fig. 3(c)의 8절점 Incompatible 요소를 사용하였으며, FEAFAA에서도 동일한 요소를 사용하고 있는 것을 확인하였다(Ju et al., 1996; FAA, 2007).

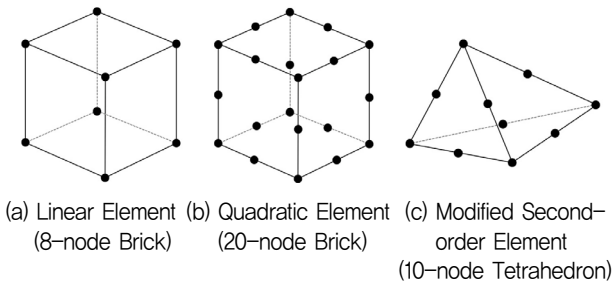


Fig. 2 Mesh Elements Generally Used in FEA

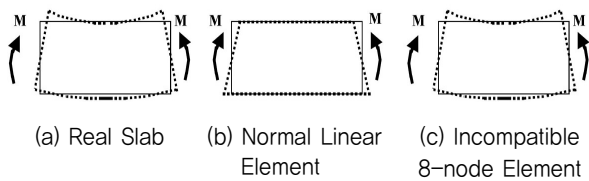


Fig. 3 Comparison of Flexural Behavior between Real Slab and Finite Elements

2.2. 포장 물성과 해석 조건

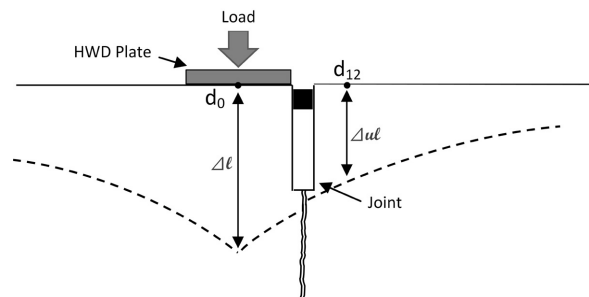
개발된 해석모형의 입력값으로 사용된 포장층별 물성은 Table 2와 같다. 콘크리트 슬래브의 물성은 인천국제공항 3단계 건설현장에서 제작한 공시체의 실내시험 결과를 사용하였다. 린콘크리트 보조기층의 물성은 FAA의 포장 매뉴얼(FAA, 2009)에서 제시된 시멘트 안정처리 기층의 물성을 사용하였으며, 아스팔트 기층과 노상층의 물성은 선행연구와 인천국제공항의 포장평가보고서를 참고하였다(FAA, 2009; Park, 2011; Kim, 2014; Incheon Airport, 2013; Incheon Airport, 2015). 선

행연구를 참고하여 콘크리트 슬래브와 아스팔트 기층 사이의 운동마찰계수를 두 층 사이의 마찰계수로 사용하였다(Park, 2009).

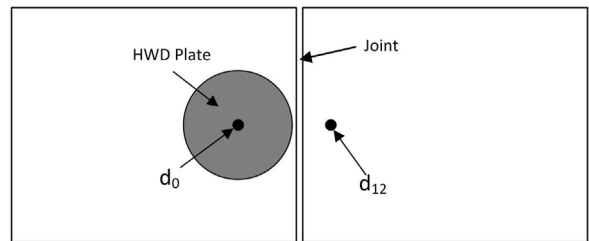
Table 2. Material Properties of FEA Model

Category		Concrete slab	Asphalt base	Lean concrete subbase	Subgrade
Elastic modulus	(psi)	4,075,000	200,000	500,000	15,000
	(MPa)	28,100	1,379	3,447	103
Poisson's ratio		0.18	0.35	0.2	0.4
Unit weight (kN/m ³)		2.30	2.26	2.20	1.90
Coefficient of thermal expansion (1/°C)		1.0×10 ⁻⁵	-	-	-
Coefficient of friction(μ_k)		4.8		-	

HWD(Heavy Weight Deflectometer) 현장시험 결과를 FEA 모형의 하중전달률(Load Transfer Efficiency, LTE)로 사용하였다. HWD 현장시험은 인천국제공항 3단계 건설현장의 재령 100일을 초과한 콘크리트 슬래브에 대해서 5개의 각기 다른 슬래브에서 24시간 동안 5회에 걸쳐서 실시하였다. Eq. (1)에 의해서 계산된 하중전달률을 Table 3에 정리하였으며, 평균 LTE는 84%로 나타났다.



(a) Section



(b) Plan

Fig. 4 HWD Test for LTE Determination

$$LTE = \left(\frac{\Delta ul}{\Delta l} \right) \times 100\% \quad (1)$$

여기서,

LTE : Load Transfer Efficiency (%)

Δl : Displacement at d_0 caused by HWD load

Δul : Displacement at d_{12} caused by HWD load

d_0 : Centroid of HWD plate

d_{12} : Sensor point apart form 30cm at HWD plate centroid

Table 3. LTE Test Results

Location	LTE (%)				
	1st Test	2nd Test	3rd Test	4th Test	5th Test
	11:00 AM	3:00 PM	9:00 PM	3:00 AM	7:00 AM
A	83	85	86	86	84
B	84	84	86	83	85
C	83	82	86	85	85
D	86	83	84	84	83
E	83	83	84	84	84
Ave.	84	83	85	85	84
Total ave.	84				

해석모형에서 슬래브 간에 설치된 다웰바의 스프링상수를 변화시키면서 HWD 하중을 가하고 각 경우의 LTE를 정리하였다. 스프링상수와 LTE의 관계를 Fig. 6과 같이 나타내고 현장시험의 평균 LTE 84%에 해당하는 스프링상수를 찾았다. Fig. 5는 FEA 모형의 줄눈부에

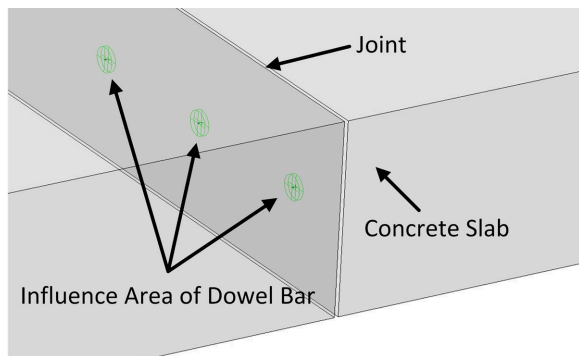


Fig. 5 Influence Area of Dowel bar in FEA Model

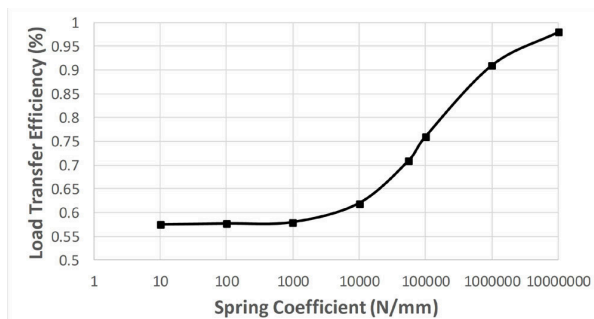


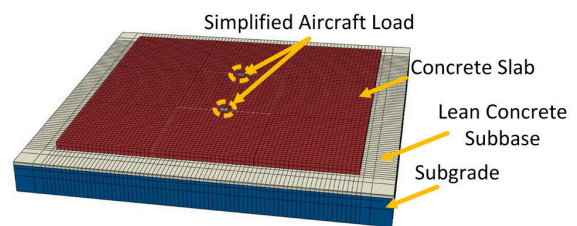
Fig. 6 Relation between Spring Coefficient and LTE of FEA Model

직경 5cm로 모사된 다웰바의 영향면적을 나타낸다.

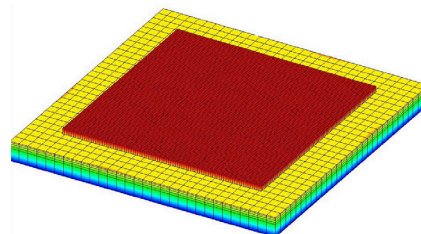
이 외에도 슬래브 상부 표면과 하부 표면의 온도를 입력변수로 사용하는 FEAFAA와는 달리 본 연구에서 개발된 ABAQUS 모형은 슬래브 깊이에 따른 비선형 온도구배를 입력변수로 사용하기 때문에 실제와 유사한 환경하중의 조건을 구현할 수 있다.

3. 유한요소해석 모형의 검증

개발된 FEA 모형의 신뢰성을 검증하기 위해서 FEAFAA 모형과 동일한 조건에서 해석을 실시하고 결과를 비교하였다. FEAFAA의 입력자료, 해석방법 등의 조건이 상대적으로 제한적이기 때문에 개발된 모형의 조건을 최대한 FEAFAA에 맞추어 유사하게 설정하였다. 해석방법은 정적해석(static analysis)으로 한정하고 HWD 현장시험에서 얻은 LTE를 두 해석모형에 동일하게 반영하였다. A380 항공기의 단일 기어를 단순화한 형태의 운하중 1쌍을 1개 슬래브 내의 서로 마주보는 모서리에 동시에 가하였다. Fig. 7(a)는 본 연구에서 ABAQUS를 사용하여 개발된 공항포장 해석모형이며 Fig. 7(b)는 FEAFAA의 공항포장 해석모형이다. FEAFAA에서는 4inch(102mm) 미만의 포장층을 설계할 수 없으므로 두 모형 모두에서 5cm의 아스팔트 기층을 제외하였다. FEAFAA는 3차원 유한요소해석을 수행할 수 있으나 모형을 시각화하는 기능을 갖고 있지 않으므로 Tecplot 360을 이용하여 Fig. 7(b)와 같이 시각화 하였다.



(a) ABAQUS Model



(b) FEAFAA Model

Fig. 7 FEA Models of ABAQUS and FEAFAA

ABAQUS와 FEAFAA 모형으로 환경하중(온도하중)만 작용할 때, 교통하중(항공기하중)만 작용할 때, 복합하중(환경하중과 교통하중)이 동시에 작용할 때의 3가지의 조건에 대해서 유한요소해석을 실시하고 발생된 응력을 비교하였다. FEAFAA에 설정되어 있는 Mesh의 크기를 알 수 없어 특정 깊이에서의 해석 결과를 ABAQUS 해석결과와 비교하는데 어려움이 있었다. 따라서 FEAFAA에서 해석 결과를 알 수 있는 위치인 슬래브의 상단과 하단에 발생한 응력만을 비교하였다. 환경하중의 경우 슬래브 상단과 하단 간의 온도차이(ΔT)를 -20°C 로 정하고 표면으로부터 깊어질수록 온도가 일정한 비율로 높아진다고 가정하였다. 이러한 경우에는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮기 때문에 슬래브 상부가 하부보다 많이 수축하여 Fig. 8과 같이 슬래브의 끝단이 위로 말려 올라가는 형태의 상향결링(Upward Curling)이 발생한다. 환경하중만 작용한 경우 본 연구에서 개발된 FEA 모형의 슬래브 상단에 발생한 최대인장응력은 0.843MPa 이었고, FEAFAA 모형에서는 0.826MPa 으로 계산되어 차이가 매우 작게 나타났다. Fig. 9는 슬래브 상단에 발생한 인장응력과 하단에 발생한 압축응력을 Fig. 8에 보인 x축에 따라 나타낸 분포도이며, 본 연구에서 개발된 모형으로 해석

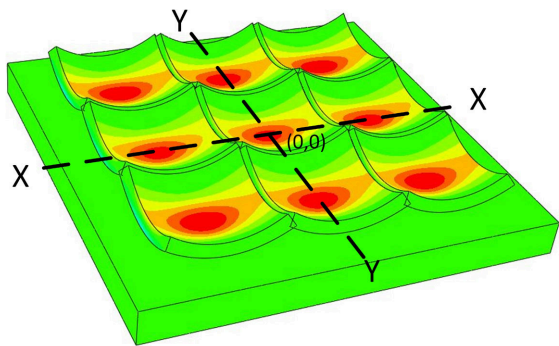


Fig. 8 Upward Slab Curling by -20°C of Temperature Difference between Top and Bottom of Slab

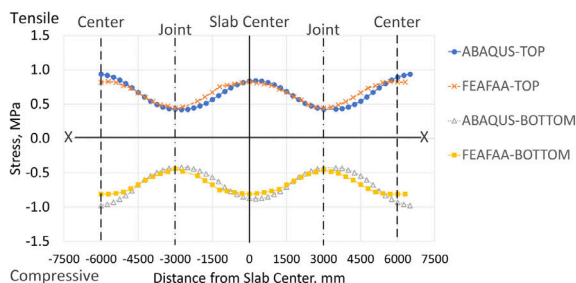


Fig. 9 Stress Distribution at Top and Bottom of Slab Caused by Environmental Loading

한 결과와 FEAFAA 모형으로 해석한 결과가 거의 일치하는 것을 확인하였다. 그래프에서 '+'는 인장응력이고 '-'는 압축응력을 나타내며, 환경하중만 작용할 때 슬래브 중심의 상단에서 최대인장응력이 발생하고, 슬래브 중심의 하단에서 최대압축응력이 발생하였다. 또한 상향결링 때문에 위로 말려 올라간 슬래브 모서리의 응력의 크기는 슬래브 중심에 발생한 최대인장응력의 절반 수준으로 비교적 작았다.

슬래브 양 끝단에 하중이 각각 작용한 경우 슬래브에 가장 큰 응력이 발생되는 것으로 판단하여 Fig. 10에 원으로 나타낸 것과 같이 항공기 하중을 슬래브의 서로 마주보는 양쪽 단부의 중앙(Case 1)부로부터 우각부(Case 3)까지 이동시키면서 해석을 실시하였다. 유도로나 계류장에서 항공기는 Fig. 8의 x축이나 y축과 같이 슬래브 중심을 따라 설치된 항공등하를 따라 저속으로 이동하기 때문에 도로의 자동차에 비해 대체로 원터링의 크기와 편차가 작다.

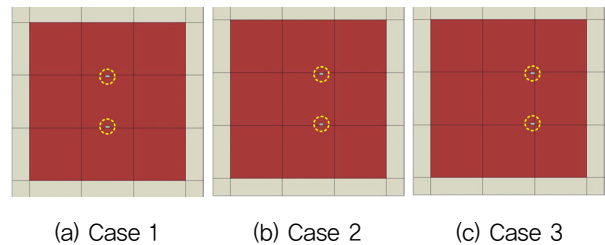
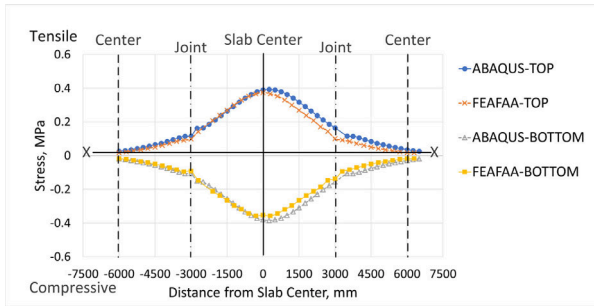


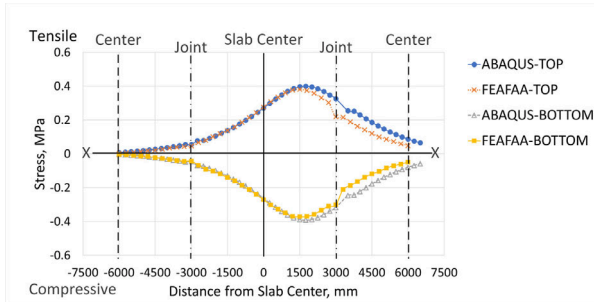
Fig. 10 Locations of Simplified Gear Loading

Fig. 11은 항공기 하중을 Case 1부터 Case 3까지 가하였을 때 본 연구에서 개발한 모형과 FEAFAA 모형에 의한 해석 결과를 Fig. 8에 보인 x축에 따라 비교한 것이다. 슬래브 상단에 인장응력과 하단에 압축응력이 발생하였으며 최대응력은 두 개 기어하중의 중앙부에서 발생하였다. 항공기 하중에 의한 최대인장응력은 0.4MPa 전후로 나타나 등가선형온도차이 -20°C 의 환경하중에 의한 최대인장응력 0.84MPa 보다 작았다. FEAFAA의 최대응력이 Case에 따라 큰 차이가 없었던 것과 달리 본 연구에서 개발된 모형의 경우 기어하중이 우각부에 가까울수록 최대응력의 크기가 점점 커졌다. 따라서 Case 1과 Case 2에서는 두 모형 간의 최대인장응력의 차이가 0.02MPa 이하로 비교적 작았으나 Case 3에서는 0.09MPa 의 큰 차이가 발생하였다. Case 3의 두 모형 간의 최대인장응력의 차이는 줄눈부에 가까울수록 커졌는데, 이는 두 모형에서 슬래브 간의 하중전달을 적용하는 방식이 서로 다르기 때문으로 판단되었다. 하지만 FEAFAA 모형의 하중전달의 적용방식은 프로그램 매뉴

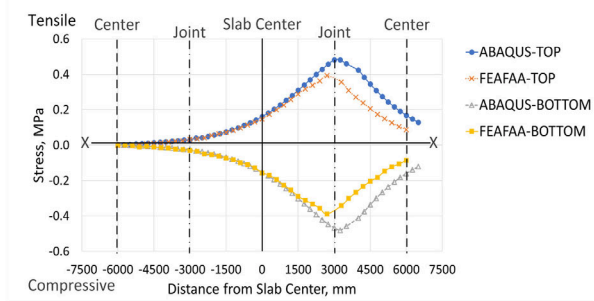
업 등에서 확인할 수 없었다.



(a) Case 1



(b) Case 2

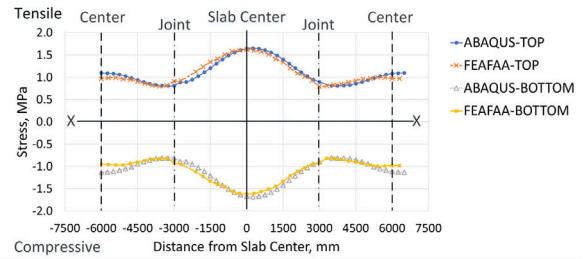


(c) Case 3

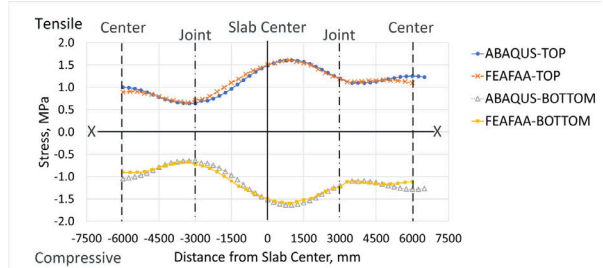
Fig. 11 Stress Distribution at Top and Bottom of Slab Caused by Traffic Loading

Fig. 12에서는 환경하중과 교통하중이 합해진 복합하중이 작용할 때 항공기하중의 위치에 따른 해석결과를 두 모형에 대해서 비교하였다. 환경하중에 대한 해석과 같이 -20°C 의 슬래브 상하부 간 온도차이를 적용하고 Case 1, Case 2, Case 3의 위치에 기어하중을 가하여 해석을 수행하였다.

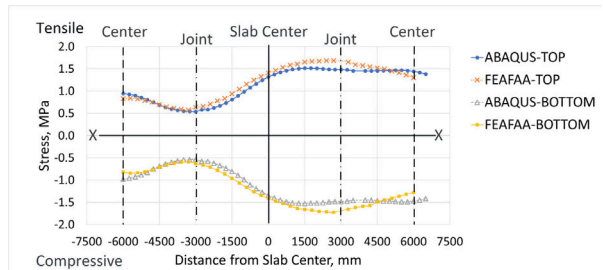
그 결과 Case 1과 Case 2에서는 두 모형 간 최대인장응력의 차이가 0.02MPa 이하로 작게 나타났으며, Case 3에서는 0.17MPa 의 상대적으로 큰 최대인장응력의 차이가 발생하였다. 따라서 복합하중이 작용하는 경우에도 항공기하중이 우각부로 이동하면 인장응력과 압축응력이 커진다는 것을 확인하였다.



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

Fig. 12 Stress Distribution at Top and Bottom of Slab Caused by Combined Loading

4. 유한요소해석 모형의 적용

본 연구에서 개발된 FEA 모형을 이용하여 HWD 현장시험에 대한 해석을 실시하였다. 하중 위치에 따른 콘크리트 포장의 반응을 조사하기 위하여 HWD 하중의 위치는 Fig. 13과 같이 슬래브의 중심, 모서리 중앙, 그리고 우각부로 정하였다.

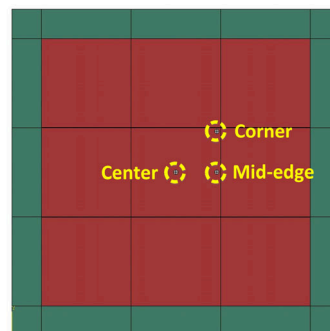


Fig. 13 Locations of HWD Loadings

현장시험의 경우 결과의 신뢰도를 높이기 위하여 4개 슬래브의 동일한 위치에 HWD 하중을 가하였다. HWD 시험 당시 Fig. 14와 같이 슬래브 깊이별로 5곳에서 측정된 콘크리트의 온도를 유한요소해석의 입력값으로 사용하였다. 또한 HWD 시험에 사용된 5ton, 13ton,

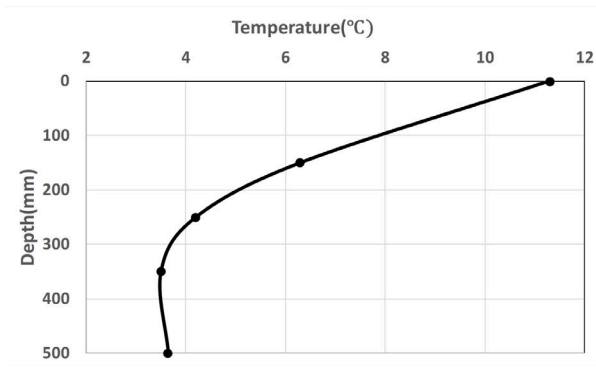


Fig. 14 Nonlinear Distribution of Concrete Temperature According to Slab Depth Measured at HWD Test

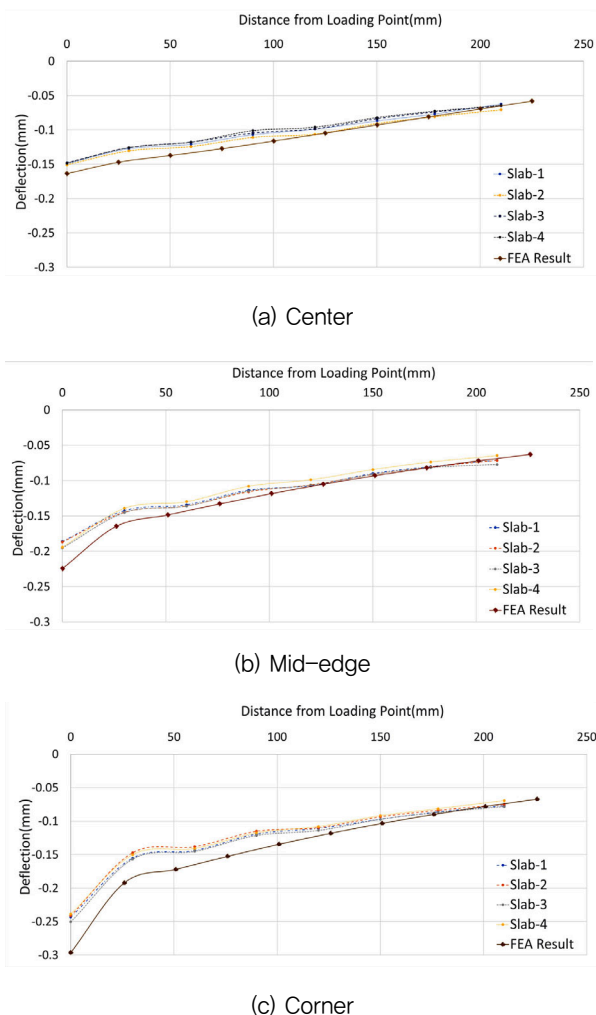


Fig. 15 Deflection Basin of Concrete Slab Caused by HWD Loading

21ton, 그리고 27ton의 4단계 하중을 유한요소해석의 입력값으로 사용하였다. 해석 결과 슬래브 표면에 발생한 처짐의 형상을 Fig. 15와 같이 시험 결과와 비교하였다.

그 결과 HWD 하중이 슬래브 중심에 가해졌을 때 처짐이 가장 작게 발생하였고, 모서리 중앙과 우각부로 갈수록 처짐이 커졌다. 슬래브의 우각부는 모서리 중앙에 비해서 다웰바의 영향을 상대적으로 적게 받기 때문에 처짐이 더 큰 것으로 판단되었다. HWD 시험결과와 유한요소해석 결과 간 최대 처짐의 차이는 10% 내외로서 슬래브 중심과 모서리 중앙에서는 평균 약 0.03mm의 차이가 났고 우각부에서는 약 0.05mm의 차이가 났다. 따라서 현장시험의 결과가 유한요소해석의 결과와 유사한 것으로 나타나 본 연구에서 개발된 모형이 검증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 환경하중 등의 실제 조건을 설계에 반영하기 위하여, 해석방법을 사용자가 선택할 수 있고 입력변수의 범위를 자유롭게 설정할 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 공항 콘크리트 포장에 대한 3차원 비선형 FEA 모형을 개발하였다. 인천국제공항 3단계 건설현장의 계류장에 위치한 콘크리트 포장을 대상으로 FEA 모형의 구조적 형상을 결정하고 8절점 Incompatible 요소를 모형에 적용하였다. 콘크리트 슬래브의 물성은 현장에서 제작한 공시체의 실내시험 결과를 사용하고 린 콘크리트 기층의 물성은 FAA의 매뉴얼에서 제시한 시멘트 안정처리 기층의 물성을 사용하였다. 또한 아스팔트 기층과 노상층의 물성은 선행연구와 인천국제공항의 포장평가보고서를 참고하였으며, 콘크리트 슬래브와 아스팔트 기층 사이의 마찰계수는 선행연구를 참고하여 두 층 사이의 운동마찰계수를 사용하였다. 슬래브 깊이에 따른 비선형 온도분포를 환경하중의 입력변수로 사용하고 교통하중에 대해서는 준정적 해석방법을 사용하였다. HWD 현장시험 결과로부터 얻은 슬래브 간의 평균 LTE 84%를 스프링 상수로 변환하여 모형의 입력변수로 사용하였다. 본 연구에서 개발된 FEA 모형의 신뢰성을 검증하기 위해서 FEAFAA 모형과 동일한 조건 하에서 해석을 실시하고 결과를 비교하였다. 본 연구에서 개발된 모형과 FEAFAA 모형에 대해서 동일한 조건 하에서 환경하중, 교통하중 그리고 복합하중에 대한 해석을 실시하여 슬

래브의 상단과 하단에 발생한 응력의 크기를 비교한 결과 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 모형을 이용하여 HWD 현장시험에 대한 해석을 실시한 결과 슬래브 중심, 모서리 중앙, 그리고 우각부의 실제 처짐이 해석 결과와 유사한 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 FEA 모형은 공항 콘크리트 포장의 거동을 합리적인 수준에서 예측할 수 있다고 판단되었다.

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

FAA (2007). *FAA Finite Element Design Procedure for Rigid pavements*. Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC, USA.

FAA (2009). *Standard for Airport Pavement Design and Evaluation*. AC 150/5320-6E, Office of Airport Safety and Standards, U.S. Department of Transportation, Washington DC, USA.

Harik, I. E., Jianping, P., Southgate, H., and Allen, D. (1994). “Temperature Effects on Rigid Pavements”, *Journal of transportation engineering*, Vol. 120, No. 1, pp.127-143.

Incheon Airport (2013). *AIRSIDE Pavement Evaluation Final Report*. Incheon International Airport Corporation, Incheon, Korea.

Incheon Airport (2015). *AIRSIDE Pavement Evaluation Final Report*. Incheon International Airport Corporation, Incheon,

Korea.

Janssen, D. J. (1987). “Moisture in Portland Cement Concrete.” *Transportation Research Record*, No. 1121, Transportation Research Board, Washington DC, USA.

Jeong, J. H., Lim J. S., Cheon, S. H., and Kwon, S. A. (2010). “Advanced FAA Design Method for Airport pavements”, *Road*, Korean Society of Road Engineers, Vol. 12, No. 3, pp.39-45.

Jeong, J. H. and Zollinger, D. G. (2005). “Environmental Effects on the Behavior of Jointed Plain Concrete Pavements.” *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 131, No. 2, pp.140-148.

Ju, S. B. and Sin, H. C. (1996). “Incompatible Three-Dimensional Hexagonal Finite Elements by Multivariable Method.” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, No. 7, pp.2078-2086.

Kim, S. M. (2007). “Features of Critical Tensile Stresses in Jointed Concrete Pavement under Environmental and Vehicle Loads”, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 4, pp.449-456.

Kim, Y. T. (2014). *Analysis of Stress in Airport Concrete Pavement Caused by Double Duals in Tandem Gear Loading*. Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea.

Park, M. K. (2009). *A Study on Friction between Slab and Different Types of Base of Concrete Pavement*. Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea.

Park, J. Y. (2011). *Development of Regression Model for Concrete Pavement Slab Fatigue Considering Environmental Loading*. Master's Thesis, Inha University, Incheon, Korea.

Siddique, Z. Q., Hossain, M. and Meggers, D. (2005). “Temperature and Curling Measurements on Concrete Pavement.” *Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium*, Ames, Iowa, USA.