

# 민감도 해석을 통한 무조인트 교량의 수치해석 모델 제안

노치욱<sup>1</sup>·김승원<sup>1</sup>·이환우<sup>2</sup>·남문석<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>부경대학교 토목공학과 박사과정, <sup>2</sup>부경대학교 토목공학과 교수, <sup>3</sup>한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

## Numerical Analysis Models for Jointless Bridges Through Sensitivity Analysis

Chi-Oug Noh<sup>1</sup>, Seung-Won Kim<sup>1</sup>, Hwan-Woo Lee<sup>2</sup> and Moon-Seok Nam<sup>3†</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corp, Hwaseong, 18489, Korea

### Abstract

In this study, a jointless bridge that integrates the superstructure and abutment without installing an expansion joint was analyzed. An example of a jointless bridge that has been introduced in Korea since 2009. Owing to the short period of use and lack of experience in design, construction, and maintenance, there is insufficient information regarding the long-term behavior of jointless bridges. When analyzing numerous bridges, the numerical analysis model must maintain the numerical values used and ensure the convenience of model construction. In this study, sensitivity analysis was performed to select a numerical model for various types of jointless bridges using commercial finite element programs, MIDAS Civil and ABAQUS 2018. According to a solid element-based model, we analyzed the mean and maximum relative errors between structural models. Consequently, it was found that the beam element-based model exhibits a significantly small relative error in comparison to the shell element, where a relatively large error was recorded. Therefore, the optimal numerical analysis model, a practical model that maintains the similarity and precision of the displacement shape cause by relative error, was judged to be the most suitable for jointless bridges based on the shell element.

**Keywords** : jointless bridge, numerical analysis model, sensitivity analysis, relative error

### 1. 서론

현재 공용 중인 대부분의 교량은 온도 변화에 따른 상부구조의 변형을 흡수하기 위해 신축이음장치(expansion joint) 또는 교량 받침을 설치한다. 그러나 신축이음장치는 최근 교통량의 증가와 차량의 대형화, 고속화에 의해 파손이 자주 발생한다(Jang, 2011). 또한 제설제 등 오염 물질들을 포함한 우수가 파손된 부분을 통해 유입되어 신축이음장치, 교량 받침 등과 같은 교량 주요 부재를 손상시킨다. 따라서 이러한 문제점을 해결할 수 있는 대안공법이 필요하다. 대안공법으로는 신축이음장치를 설치하지 않고 상부구조와 교대를 일체화하는 무조인트 교량(jointless bridge) 공법이 1930년대 이후 미국, 캐나다를 중심

으로 개발되어 적용되고 있다(KECRI, 2018a).

국내에서 무조인트 교량은 1999년 C교가 최초로 시공되었으나 공용기간이 짧고 설계, 시공 및 유지관리 경험이 부족하여 아직은 구조적 거동에 대한 신뢰도가 부족하다. 그러므로 무조인트 교량의 성능 향상 및 확대 적용을 위해서는 지속적인 추적과 분석을 통해 구조적 거동에 대한 신뢰성 입증에 필요하다.

무조인트 교량의 구조적 거동은 현장 계측 데이터와 수치해석 결과의 비교를 통해 분석할 수 있다. 수치해석을 통해 무조인트 교량을 분석하는 경우 수치해석 모델 선정이 선행되어야 한다. 무조인트 교량의 수치해석 모델은 여러 연구자들에 의해 Table 1과 같이 다양하게 제안되었다. 이는 무조인트 교량의 공법 및 구조 형식과 시공되는 위치에서의 지반조건이 다양하기

†Corresponding author:

Tel:\*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\* E-mail: msnam@ex.co.kr

Received July 9 2021; Revised July 22 2021;

Accepted July 26 2021

©2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1 Domestic and foreign research example

References	Structural model					Soil model		Form
	Superstructure		Substructure		Etc.	Soil-Abutment	Soil-Pile	
	Slab	Girder	Abutment	Pile	Approach slab			
KECRI(1999)	frame	frame	frame	frame	-	EP	NLS	FIAB
Ahn <i>et al.</i> (2009)	frame	frame	frame	frame	-	EP	LS	FIAB
Kim <i>et al.</i> (2010)	solid	plate	plate	frame	solid	EP	-	SIAB
Kim(2011)	beam	beam	beam	beam	-	NLS	EM	FIAB
KECRI(2018b)	plate	frame	plate	frame	-	NLS	NLS	FIAB
	plate	frame	plate	-	-	LS	-	SIAB
KECRI(2019)	plate	frame	plate	frame	-	EP/NLS	-	PIAB
Jorgenson(1982)	plate	frame	plate	frame	-	NLS	-	FIAB
Girton <i>et al.</i> (1989)	beam	beam	beam	beam	-	EM		FIAB
Frosch(2006)	beam	beam	beam	beam	-	LS/NLS	LS/NLS	FIAB
Nikravan(2013)	shell	frame/shell	shell	frame	shell	NLS	NLS	FIAB
Mitchell(2016)	shell	shell	Solid	beam	-	LS	LS	FIAB

때문이다. 다수의 실제 교량에 대한 지속적인 거동 분석을 위해서는 모델링의 편의성과 해석결과의 정확성이 우수한 최적의 표준 수치해석 모델이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 형식을 가진 무조인트 교량에 적합한 수치해석 모델을 제안하기 위해 민감도 해석을 수행하였다.

민감도 해석은 구조모델, 지반모델, 온도 하중, 사각을 변수로 하였고 상용 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS Civil(MIDAS IT, 2020)과 ABAQUS(SIMULIA, 2020)를 사용하였다. 수치해석 모델의 정확성은 상대오차 분석을 통한 정량적 평가에 의해 검증하였다. 상대오차는 solid 요소 기반인 모델을 기준으로 하여 평균값과 최대값을 산정하였고 상대오차가 작으며 실용적인 모델을 무조인트 교량을 대표할 수 있는 수치해석 모델로 제안하고자 한다.

## 2. 무조인트 교량

무조인트 교량은 교량 상부구조 즉, 슬래브 또는 바닥판에서 단순히 신축이음장치를 설치하지 않는 교량을 총칭한다(KECRI, 2018a). 무조인트 교량은 상부구조와 교대의 일체화 방법에 따라 크게 3가지 형식으로 분류된다. 첫 번째, 완전일체식 교대 교량은 상부구조가 단부 벽체 및 기초부에 완전일체화하여 교량 받침이 없는 형식이다. 두 번째, 반일체식 교대 교량은 상부구조와 일체로 시공되는 단부 벽체와 교량 받침이 있는 형식이다. 세 번째, 흥벽일체식 교대 교량은 기존 조인트 교량의 신축이음장치를 제거한 후 상부구조와 교대 흥벽을 일체화하여 무조인트 교량으로 변경하는 형식이다. 일반적으로 무조인트 교량의 사각은 교축 직각 방향에서 최대 30° 까지 허용되고 최대 연장 길이는 완전일체식 교대 교량의 경우 콘크리트 교 180m, 강교 150m 이하, 반일체식 교대 교량의 경우 콘크리

트교 500m, 강교 400m 이하로 적용하는 것을 권장하고 있다(KECRI, 2018a).

## 3. 수치해석 모델

기존 연구의 수치해석 모델 사례를 Table 1과 같이 구조모델, 지반모델, 무조인트 교량의 공법 형식에 따라 분류하였다. 구조모델은 상부구조와 하부구조, 부속시설에 적용된 요소들을 나타냈다. 요소 명칭은(beam, frame, plate, shell 등) 각 연구에서 명시한 바에 따랐다. 지반모델은 지반-교대, 지반-말뚝에 적용되는 요소이다. 지반모델의 명칭은 비선형 스프링을 NLS(nonlinear spring), 선형 스프링을 LS(linear spring), 등가 모델을 EM(equivalence model), 토압을 EP(earth pressure)로 나타냈다. 무조인트 교량의 공법 형식에 따른 명칭은 완전일체식 교대 교량을 FIAB(full-integral abutment bridge), 반일체식 교대 교량을 SIAB(semi-integral abutment bridge), 흥벽일체식 교대 교량을 PIAB(parapet wall-integral abutment bridge)로 나타냈다.

### 3.1 구조모델

구조모델에서는 교량의 주요 부재인 바닥판, 거더, 교대 벽체 등을 유한요소를 사용하여 교량의 기하 형상을 구현하였다. 먼저 본 연구의 구조모델에 적용할 요소를 선정하기 위해 국내외 연구 문헌에서 사용된 수치해석 모델 사례를 분석하였다. 바닥판과 거더, 교대 벽체의 경우 beam(frame) 요소와 shell(plate) 요소가 가장 많이 사용되었고 말뚝의 경우 beam 요소만을 사용하였다. 이를 참고하여 본 연구에 사용될 구조모델은 Table 2와 같이 beam 요소만을 사용한 모델(모델 1)과 beam 요소와

shell 요소를 혼용한 모델(모델 2)로 분류하였다. 또한 이와 같이 분류된 모델의 정확성을 판별해 줄 수 있는 모델이 필요하여 구조물의 형상을 가장 잘 묘사할 수 있는 solid 요소 기반인 모델(모델 3)을 추가로 분류하였다(Table 2).

모델 1은 전 부재가 beam 요소로 구성되었고 바닥판이 거더에 합성된 모델이다. 모델 2는 바닥판과 교대 벽체의 경우 shell 요소, 거더와 가로보, 말뚝의 경우 모델링의 편의성을 고려하여 beam 요소를 적용한 모델이다. 모델 3은 solid 요소를 기반으로 한 구조모델이고 말뚝은 beam 요소를 적용한 모델이다. 단, 강박스 거더교의 경우 거더와 가로보는 판 구조물의 특성을 고려하여 shell 요소를 적용하였다. 여기서, 각각의 구조모델은 모델링에 사용된 요소만 다를 뿐 요소망(mesh)은 모두 동일하다. 이와 같은 구조모델은 반일체식 교대 교량(steel box

거더)의 모델 1, 완전일체식 교대 교량의 모델 2, 흉벽일체식 교대 교량의 모델 3을 예시로 하여 Fig. 1에 나타냈다.

3.2 지반모델

지반모델에서는 토압 또는 지반과 구조물간의 상호작용에 의한 변위와 지반반력의 거동을 구현한다. 본 연구에서 사용된 지반모델은 국내·외 연구문헌에서 가장 많이 사용된 선형과 비선형 스프링 모델을 모두 적용하였다. Table 3에서 Case 1의 KBDC는 선형 스프링 모델이고 Case 2의 NCHRP 및 Reese 모델은 비선형 스프링 모델이다(KECRI, 2016). Fig. 2는 지반-교대에 대한 스프링 모델별로 수평변위와 지반반력의 관계를 표현한 그림이다. KBDC 조건은 교대 벽체 깊이에 관계없이 지반반력이 일정하고 NCHRP 조건은 교대 벽체 깊이가 깊어질수록 지반반력이 증가한다. 민감도 해석에 적용된 교량의 최대 벽체 깊이가 4m 미만이므로 교대 벽체 깊이 0~1m, 1~2m,

Table 2 Classification of Structural models

Structural Model	Slab	Girder	Cross beam	Abutment	Pile
M 1	beam	beam	beam	beam	beam
M 2	shell	beam	beam	shell	beam
M 3	solid	solid(PSC-I girder) shell(steel box girder)		solid	beam

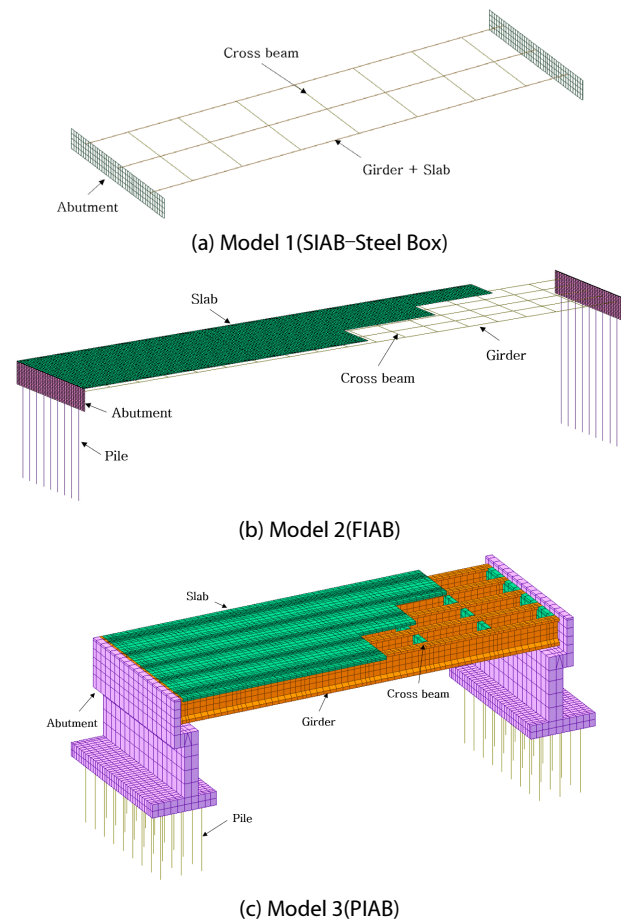


Fig. 1 Structural model example

Table 3 Soil model for sensitivity analysis

Interaction	Soil model	
	Case 1	Case 2
Soil-Abutment	KBDC	NCHRP
Soil-Pile	KBDC	Reese

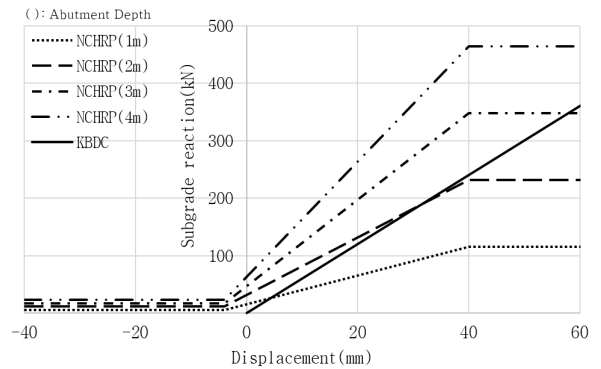


Fig. 2 Soil model of soil - abutment(KECRI, 2016)

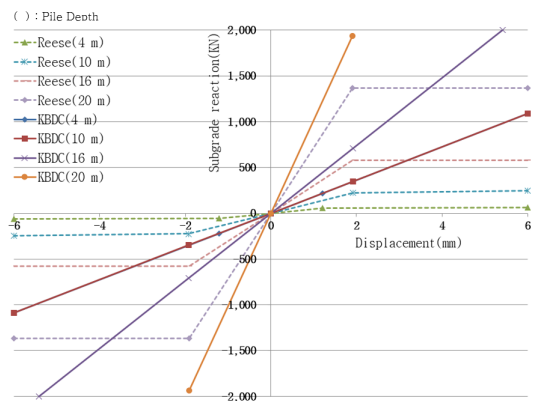


Fig. 3 Soil model of soil - pile(KECRI, 2016)

2~3m, 3~4m에 대한 지반반력을 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 3은 지반-말뚝에 대한 스프링 모델이며 KBDC의 선형 스프링 모델과 Reese의 비선형 스프링 모델이다. 두 모델 모두 말뚝 깊이가 깊어질수록 지반 반력이 증가하였다. 민감도 해석에 적용된 교량의 말뚝 깊이가 20m 미만이므로 말뚝 깊이 0~4m, 4~10m, 10~16m, 16~20m에 대한 지반반력을 나타냈고 KBDC 조건은 실선, Reese 조건은 점선으로 표현하였다.

#### 4. 민감도 해석

##### 4.1 대상 교량

Table 4의 교량 형식과 구조적 기하 조건은 민감도 해석 대상 교량의 기초 데이터이다. 반일체식 교대 교량은 국내에서 유일한 steel box 거더 형식인 A교와 무조인트 교량 중 신축 연장이 140m로 가장 긴 콘크리트 교인 B교를 대상으로 하였다. 완전일체식 교대 교량과 홍벽일체식 교대 교량은 벽체 깊이가 가장 깊어 지반의 영향이 큰 C교와(4.25m) D교(3.65m)를 대상으로 하였다. 민감도 해석은 대상 교량의 자체를 분석한 것이 아니고 대상 교량의 기초 데이터를 기반으로 민감도 해석 변수의 변화에 따른 교량 형식별 거동을 분석한 것이다.

##### 4.2 해석 변수

Table 5의 구조모델 M 1 ~ M 3는 Table 2의 모델 1 ~ 3을 의미하고 지반모델은 Table 3의 Case 1, 2와 같다. 민감도 해석 변수인 교량의 사각은 0°, 15°, 30°의 조건을 적용하였다. 사각 0°는 직교를 분석하기 위함이고 15°는 일반적으로 설계에서 직교로 취급하는 한계를 고려한 값이다. 그리고 30°는 무조인트 교량의 설계지침에서 허용하는 최대 사각을 적용한 값이다.

Table 4 Sensitivity analysis of target bridge

Bridges	A	B	C	D
Form	SIAB	SIAB	FIAB	PIAB
Span(m)	43(1@43)	140(4@35)	90(3@30)	30(1@30)
Width(m)	15.600	12.455	11.690	12.150
Skew(°)	8	0	30	30
Foundation (Type)	inverse T	inverse T	-	-
Pile	steel pipe	steel pipe	H - beam	steel pipe

Table 5 Sensitivity analysis range

Bridges	Form	Structural model	soil model	Skew(°)	Temp.(°C)
A	SIAB	M 1	Case 1	0	+30
B	SIAB			15	
C	FIAB			30	
D	PIAB	M 3	Case 2		-30

무조인트 교량의 거동에 가장 큰 영향을 주는 온도 하중을 해석 변수로 하였다. 온도 하중은 설계 표준 온도인 10°C를 기준으로 도로교설계기준(MOLIT, 2016)의 강합성교와 콘크리트 교의 설계 시 최저, 최대 온도를 고려하여 -30°C와 +30°C를 적용하였다. 온도 하중은 교대 벽체를 제외한 바닥판, 거더, 가로보에 재하하였다.

#### 4.3 분석 방법

Table 6은 민감도 변수에 따른 수치해석 모델의 정확도를 평가하기 위한 분석 방법이다. 평균 상대오차는 변위값 분포 형상의 유사성을 분석하기 위함이고 최대 상대오차는 수치해석 모델의 정밀도를 분석하기 위해 사용되었다. 분석기준은 구조물의 형상과 세부적인 거동을 상세히 반영할 수 있는 solid 요소 기반인 모델 3을 대상으로 하였다. 분석 위치는 온도 하중으로 인한 변위가 가장 크게 발생하는 교대 벽체 상단을 대상으로 하였다.

#### 5. 해석결과

##### 5.1 A교 모델

Fig. 4와 같이 사각이 증가할수록 교량 중심에서 예각부까지의 길이(L<sub>1</sub>)는 증가하고 둔각부까지의 길이는(L<sub>2</sub>) 감소하게 된다. 따라서 온도 변화의 영향을 가장 많이 받는 바닥판의 경우 사각 변화가 클수록 예각부와 둔각부에서의 변위값( $\delta = \alpha \Delta TL$ ,  $\alpha$ =열팽창계수,  $\Delta T$ =온도변화량,  $L$ =온도영향 길이)의 변화가 직교에 비하여 증가한다. 따라서 무조인트 교량의 교대 벽체 변위 형상은 사각이 증가할수록 둔각부의 변위는 감소하고 예각부의 경우는 증가한다.

Table 6 Sensitivity analysis methods

Analysis methods	Formula	Remarks
average relative errors	$\frac{1}{n} \sum \frac{ M_i - M_3 }{M_3} \times 100(\%)$	M <sub>i</sub> (i = 1, 2)  n : number of comparison node
maximum relative errors	$\text{Max}(\frac{ M_i - M_3 }{M_3}) \times 100(\%)$	

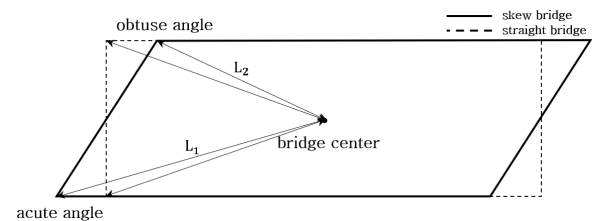
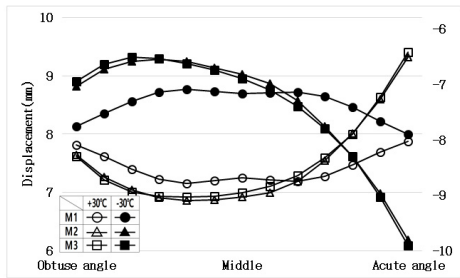


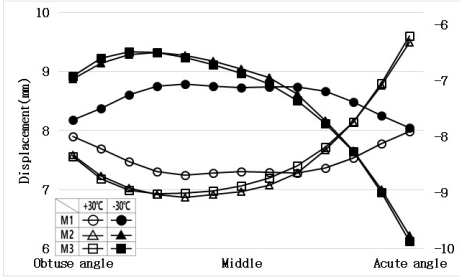
Fig. 4 Geometry of bridges with skew

설계기준에서 제시한 한계 사각인 30°의 경우를 기준으로 기반조건에 따라 구조모델, 온도 하중별로 구분하여 Fig. 5(a)와 (b)로 나타냈다. Fig. 5(a)와 (b)에서 모델 1~3은 각각 원형, 삼각형, 사각형으로 나타냈고 내부가 비어있는 것은 +30°C, 채워져있는 것은 -30°C의 변위를 의미한다. 좌측 변위값은 +30°C의 경우이고 우측 변위값은 -30°C의 경우이다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 교대 벽체 변위 형상은 +30°C에서 아래로 볼록, -30°C에서는 위로 볼록한 곡률을 가진다. 이는 온도 변화의 영향이 상대적으로 작은 교대 벽체에는 온도 하중을 재하하지 않아 구속이 된 상태에서 바닥판, 거더 등의 신축이 작용하여 나타난 것이다. 이와 같은 구속력으로 인해 중앙부의 변위는 둔각부의 변위 보다 작은값이 나타나게 된다.



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 5 Displacement shape(SIAB-Steel Box)

Table 7 Average and maximum relative errors of Case 1 (SIAB-steel box)(unit:%)

Skew(°)	0		15		30		
	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	2.5	2.3	3.2	4.5	5.3	9.1
	Max.	7.3	6.6	11.6	13.2	16.2	19.8
M 2	Avg.	0.2	0.2	0.3	0.4	0.7	0.9
	Max.	0.3	0.4	0.7	0.8	1.6	1.5

Table 8 Average and maximum relative errors of Case 2 (SIAB-steel box)(unit:%)

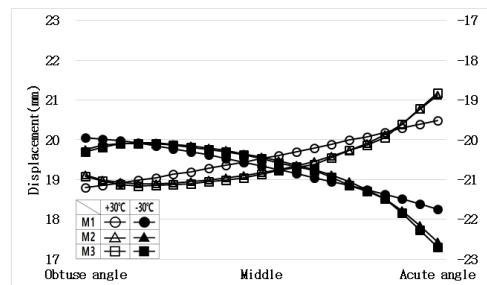
Skew(°)	0		15		30		
	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	2.4	2.3	3.4	4.4	6.1	9.0
	Max.	7.0	6.7	11.8	13.5	16.8	20.0
M 2	Avg.	0.2	0.2	0.4	0.4	0.8	0.8
	Max.	0.4	0.4	0.8	0.8	1.8	1.7

평균 및 최대 상대오차를 기반조건에 따라 Tables 7~8과 같이 사각, 온도별로 정리하여 나타냈다. 모델 1의 상대오차는 평균 9.1%, 최대 20.0% 이하로 나타났고 모델 2는 평균 0.9%, 최대 1.8% 이하로 나타났다. 이와 같이 모델 1과 모델 2의 상대오차에 차이가 발생한 이유는 구조모델에 사용된 요소의 영향으로 판단된다. 모델 1은 바닥판이 beam 요소인 거더에 포함되어 모델링되었기 때문에 바닥판이 solid 요소로 모델링된 모델 3 보다 온도 하중의 영향이 작다. 따라서 모델 1은 모델 3 과의 거동에 차이가 발생하였고 이에 따른 상대오차는 다소 크게 발생하였다. 반면 모델 2는 바닥판이 shell 요소로 모델링되어 온도 하중의 영향을 모델 3과 같이 반영할 수 있기 때문에 상대오차가 미소하였다. 평균 및 최대 상대오차 분석결과 모델 2는 모델 1에 비하여 변위 형상의 유사성 및 정밀도가 우수하였다. 따라서 반일체식 교대 교량(steel box 거더교)인 A교의 경우 모델 2를 거동 분석을 위한 실용적인 모델로 판단하였다.

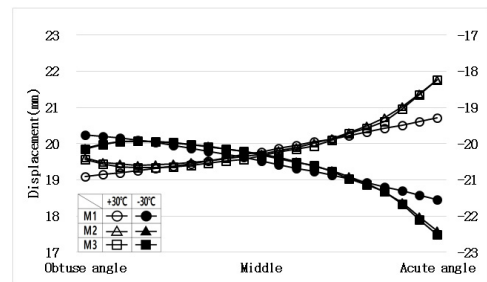
5.2 B교 모델

Fig. 6은 B교의 사각 30°일 때 온도 하중에 대한 구조모델별 변위 형상을 Case 1과 Case 2의 경우로 나타낸 그래프이다. 그리고 모델 1, 2의 평균 및 최대 상대오차는 Case 1과 Case 2에 대하여 Tables 9~10에 정리하였다.

Tables 9~10에서 모델 1의 상대오차는 평균 1.5%, 최대 4.8% 내외로 나타났고 모델 2는 평균 0.5%, 최대 0.6% 내외로 나타났다. 평균 및 최대 상대오차 분석결과 모델 2는 모델 1에 비하여



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 6 Displacement shape(SIAB-PSC-I)

**Table 9** Average and maximum relative errors of Case 1 (SIAB-PSC-I)(unit:%)

Skew(°)	0		15		30		
Temp.(°C)	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	1.0	0.9	1.0	0.9	1.5	1.0
	Max.	2.9	2.8	3.1	3.4	3.3	4.2
M 2	Avg.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Max.	0.3	0.3	0.6	0.2	0.4	0.4

**Table 10** Average and maximum relative errors of Case 2 (SIAB-PSC-I)(unit:%)

Skew(°)	0		15		30		
Temp.(°C)	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	1.0	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0
	Max.	3.5	3.0	3.8	3.4	4.8	4.3
M 2	Avg.	0.2	0.1	0.5	0.1	0.3	0.1
	Max.	0.3	0.3	0.6	0.2	0.4	0.4

모델 3과의 유사성 및 정밀도가 우수하였다. 따라서 반일체식 교대 교량(PSC-I 거더)인 B교의 경우도 모델 2를 거동 분석을 위한 실용적인 모델로 판단하였다.

5.3 C교 모델

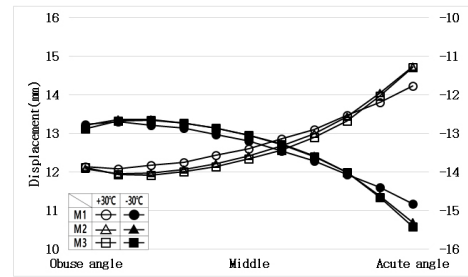
Fig. 7은 C교의 사각 30°일 때 온도 하중에 대한 구조모델의 변위 형상을 Case 1과 Case 2의 경우로 나타낸 그래프이다. 그리고 모델 1, 2의 평균 및 최대 상대오차는 Case 1과 Case 2에 대하여 Tables 11~12에 정리하였다.

Tables 11~12에서 모델 1의 상대오차는 평균 2.0%, 최대 3.8% 내외로 나타났고 모델 2는 평균 0.6%, 최대 1.1% 이하로 나타났다. 완전일체식 교대 교량인 C교는 반일체식 교대 교량인 A교와 B교의 상대오차 분석결과와 같이 모델 1의 상대오차는 다소 크게 발생하였고 모델 2의 상대오차는 무시할 수 있을 정도로 미소하였다. 평균 및 최대 상대오차 분석결과 모델 2는 모델 1에 비하여 모델 3과의 변위 형상의 유사성 및 정밀도가 우수하였다. 따라서 C교의 경우도 모델 2를 거동 분석을 위한 실용적인 모델로 판단하였다.

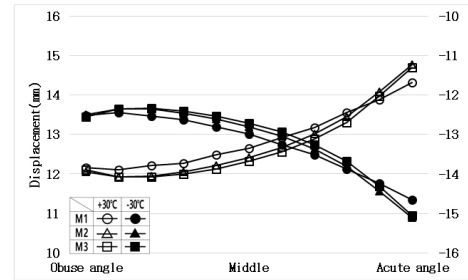
5.4 D교 모델

Fig. 8은 D교의 사각 30°일 때 온도 하중에 대한 구조모델의 변위 형상을 Case 1과 Case 2의 경우로 나타낸 그래프이다. 이때의 모델 3에 대한 평균 및 최대 상대오차는 Case 1과 Case 2에 대하여 Tables 13~14에 정리하였다.

Tables 13~14에서 모델 1의 상대오차는 평균 8.8%, 최대 17.9% 이하로 나타났고 모델 2는 평균 2.5%, 최대 3.8% 이하로 나타났다. 여기서, 모델 2에서 발생한 상대오차 3.8%는 약



(a) case 1



(b) case 2

**Fig. 7** Displacement shape(FIAB)

**Table 11** Average and maximum relative errors of Case 1 (FIAB)(unit:%)

Skew(°)	0		15		30		
Temp.(°C)	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	1.3	1.0	1.4	1.0	1.8	1.2
	Max.	1.9	2.4	2.5	3.1	3.3	3.8
M 2	Avg.	0.4	0.3	0.5	0.2	0.5	0.2
	Max.	0.6	0.6	0.7	0.6	0.7	0.7

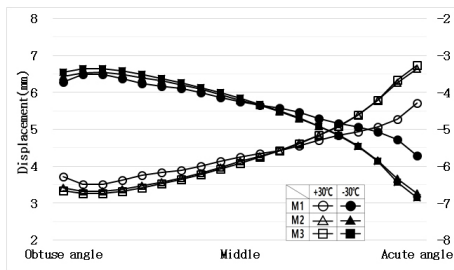
**Table 12** Average and maximum relative errors of Case 2 (FIAB)(unit:%)

Skew(°)	0		15		30		
Temp.(°C)	+30	-30	+30	-30	+30	-30	
M 1	Avg.	1.5	1.3	1.6	1.4	2.0	1.6
	Max.	2.3	1.7	2.6	2.1	3.0	2.7
M 2	Avg.	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
	Max.	0.8	0.8	0.9	0.8	1.1	1.0

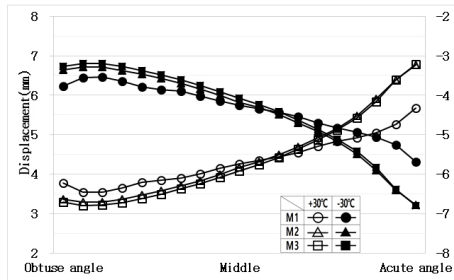
0.16mm의 변위 차이로 무시할 수 있는 수준으로 판단된다. 이는 장교 2교의 교대 벽체 상단에서의 변위가 약 4mm로 미소하여 작은 변위 차이임에도 불구하고 상대오차가 크게 나타나기 때문이다. 평균 및 최대 상대오차 분석결과 모델 2는 모델 1에 비하여 모델 3과의 유사성 및 정밀도가 우수하였다. 따라서 흥벽일체식 교대 교량인 D교의 경우도 모델 2를 거동 분석을 위한 실용적인 모델로 판단하였다.

5.5 해석 프로그램에 따른 비교

민감도 해석 시 해석 프로그램에 따른 영향을 판단하기 위하여 사각 30°의 경우를 해석하였다. 비교 대상 프로그램은 MIDAS



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 8 Displacement shape(PIAB)

Table 13 Average and maximum relative errors of Case 1 (PIAB)(unit:%)

Skew(°)		0		15		30	
Temp.(°C)		+30	-30	+30	-30	+30	-30
M 1	Avg.	3.2	3.2	3.4	3.4	7.4	6.4
	Max.	7.5	9.2	11.1	12.5	16.7	17.9
M 2	Avg.	1.2	1.3	1.1	1.3	1.0	1.5
	Max.	2.4	2.3	2.1	2.1	2.0	3.3

Table 14 Average and maximum relative errors of Case 2 (PIAB)(unit:%)

Skew(°)		0		15		30	
Temp.(°C)		+30	-30	+30	-30	+30	-30
M 1	Avg.	3.3	3.4	3.7	3.8	8.6	8.8
	Max.	7.3	7.2	11.5	11.5	17.6	17.7
M 2	Avg.	2.3	2.5	2.3	2.4	1.7	1.9
	Max.	3.6	3.8	3.5	3.6	2.7	2.9

Table 15 Relative error between analysis programs (skew:30°)(unit:%)

Soil model	Case 1		Case 2	
	+30	-30	+30	-30
Temp.(°C)				
A bridge(M3)	0.6	0.6	0.4	0.6
B bridge(M1)	0.0	0.0	1.4	1.3
B bridge(M2)	0.2	0.1	1.1	1.0
C bridge(M1)	0.1	0.1	2.0	2.3
C bridge(M2)	0.2	0.3	2.1	2.7
D bridge(M1)	0.5	0.1	1.8	5.0
D bridge(M2)	1.4	0.9	4.7	8.1

Civil과 ABAQUS를 사용하였다. Table 15에서는 ABAQUS를 비교 기준으로 한 해석 프로그램에 따른 상대오차를 나타냈다. 분석결과 A, B, C교의 경우는 2.7% 이하, D교의 경우는 8.1%

이하로 약 0.3mm 변위 차이에 대한 값으로 미소하였다. Case 1의 경우 보다 Case 2의 상대오차가 상대적으로 크게 발생하였다. 이는 해석 프로그램에 따른 비선형 스프링 적용의 차이가 있는 것으로 판단된다.

### 6. 결론

본 연구에서는 민감도 해석을 수행하여 무조인트 교량의 거동을 분석하였고 상대오차 분석을 통한 정량적 평가에 의해 최적 수치해석 모델을 선정하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 모델 1은 모델 3과 거동 형상 차이가 있었다. 이는 모델 1의 바닥판이 beam 요소인 거더에 합성되어 있으므로 solid 요소인 모델 3보다 온도 하중에 대한 영향이 작기 때문이다.
- 2) 평균 및 최대 상대오차 분석결과 모델 2는 모델 3과 거동이 유사하였다. 이는 모델 2의 바닥판이 shell 요소로 모델링되어 온도 하중의 영향을 모델 3과 같이 반영할 수 있기 때문이다.
- 3) 수치해석 모델에 사용된 평균 절점(node) 수는 모델 2에서 약 6,299개, 모델 3에서 약 35,481개로 모델 3이 약 5.6배 정도 많고 해석시간 및 메모리 소모량 또한 모델 3이 많이 소요된다. 따라서 무조인트 교량의 최적 수치해석 모델은 변위 형상의 유사성과 정밀도를 유지하면서 실용적인 모델 2가 적절할 것으로 판단한다.

### 감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### References

Ahn, J.H., Yoon, J.H., Jang, J.W., Kim, S.H., Lee, S.W. (2009) Application and Behavior of Integral Abutment Bridge on Multi-span PSC Girder Bridge, *Korean Soc. Civil Eng.*, pp.138~141.

Frosch, Robert J. (2006) Jointless and Smoother Bridges: Behavior and Design of Piles, Purdue University.

Girton, D.D., Hawkinson, T.R., Greimann, L.F. (1989) Validation of Design Recommendation for Integral Abutment, Iowa State University.

Jang, J.W. (2011) Performance Analysis and Parametric Study of Semi-Integral Abutment Bridge Considering Thermal Variation, Master's Thesis, Yonsei University.

- Jorgenson, James L.** (1982) Behavior of abutment Piles in an Integral Abutment in Response Bridge Movements, *Transportation Research Record*, 903, pp.72~79.
- Kim, S.H., Ahn, J.H., Yoon, J.H., Jang, J.W.** (2010) Structural Analysis of Steel Box Integrated Bridge using Plate and Solid, *Proc. 2010 Academic Conf.*, Korean Society of Civil Engineers.
- Kim, W.S.** (2011) Analysis and Prediction for Abutment Behavior of Prestressed Concrete Girder Integral Abutment Bridges, *Korea Concr. Inst. Symp.*, 23(5), Korea Concrete Institute.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI)** (1999) Research on Commercialization of Jointless Bridges, Korea Expressway Corporation Research Institute.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI)** (2016) Improving Performance of Non-Joint Bridges and Research on Jointless of Existing Bridges, Korea Expressway Corporation Research Institute.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI)** (2018a) Design Guidelines for Integral Abutment Bridge (Jointless Bridges), Korea Expressway Corporation Research Institute.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI)** (2018b) A Study on the Application of Expansion of Small Bridges in Integral Abutment Bridge with Reinforced Concrete Link, Korea Expressway Corporation Research Institute.
- Korea Expressway Corporation Research Institute (KECRI)** (2019) Guidelines for the Design of a Parapet Wall Integral Abutment Bridge, Korea Expressway Corporation Research Institute.
- MIDAS IT** (2020) <http://manual.midasuser.com/KR/Civil/890/index.htm>.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT)** (2016) Road Bridge Design Standards, *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*.
- Mitchell, Caleb** (2016) Finite Element Analyses and Proposed Strengthening of a Reinforced Concrete Box Girder Bridge Subjected to Differential Settlement, Kansas State University.
- Nikravan, Navid** (2013) Structural Design Issues For Integral Abutment Bridges, Ryerson University.
- Simulia** (2020) [https://help.3ds.com/2018/english/dssimulia\\_established/simacaeitnrefmap/simaitn-c-contactpairform.htm?contextscope=all](https://help.3ds.com/2018/english/dssimulia_established/simacaeitnrefmap/simaitn-c-contactpairform.htm?contextscope=all).

## 요 지

본 연구의 대상은 신축이음장치를 설치하지 않고 상부구조와 교대를 일체화하는 무조인트 교량이다. 무조인트 교량은 국내에 2009년 이후 본격적으로 도입되었다. 공용기간이 짧고 설계, 시공 및 유지관리 경험이 부족하여 장기거동에 대한 신뢰도가 아직은 부족하다. 수치해석을 통해 다수의 교량을 분석하는 경우 수치해석 모델은 안정적인 정확성 유지와 모델 구축의 편의성이 확보되어야 한다. 본 연구에서는 다양한 형식을 가진 무조인트 교량의 수치해석 모델을 선정하기 위해 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석은 상용 유한요소 프로그램인 MIDAS Civil과 ABAQUS를 사용하여 수행하였다. solid 요소 기반인 모델을 기준으로 하여 구조모델간 평균 및 최대 상대오차를 분석하였다. 해석결과 beam 요소 기반인 모델은 상대오차가 크게 발생하였고 shell 요소 기반인 모델은 상대오차가 아주 미소하였다. 따라서 무조인트 교량의 최적 수치해석 모델은 상대오차에 의한 변위 형상의 유사성과 정밀도를 유지하면서 실용적인 모델인 shell 요소 기반 모델이 가장 적합한 것으로 판단하였다.

**핵심용어** : 무조인트 교량, 수치해석 모델, 민감도 해석, 상대오차