

<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2022.8.4.407>

JCCT 2022-7-51

## 강철도 복합교량 케이블의 장력 평가기법에 관한 연구

### A Study on Evaluation Method of Cable Tension for Railway Steel Composite Bridge

최정열\*, 이수재\*\*, 정지승\*

Jung-Youl Choi\*, Soo-Jae Lee\*\*, Jee-Seung Chung\*

**요약** 본 연구에서는 약 3년간의 장기계측을 바탕으로 공용중인 복층 교량인 상부 도로교의 신축이음 신축량과 하부 철도교의 케이블 장력 간의 상관관계를 입증함으로써 온도변화에 따른 케이블 장력 평가 경험식을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 케이블별 장력 평가 경험식을 이용한 장력 예측결과는 진동법을 이용한 장력과 3% 이내로 잘 일치하는 것으로 나타나 공용중인 케이블의 장력 예측 및 평가에 실험적인 기법인 진동법과 함께 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 본 연구에서 제안한 신축량 경험식으로 산출한 추정온도를 케이블 경험식에 적용한 결과, 현장시험 진동법 측정결과와 비교시 높은 신뢰수준을 확보할 수 있을 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 추정온도를 반영한 장력 평가 경험식은 향후 기후변화에 따른 케이블의 장력 예측 및 유지관리방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** : 케이블 장력, 신축이음, 온도, 회귀분석, 경험식

**Abstract** In this study, the empirical formula for evaluating cable tension based on long-term measurement for about 3 years according to temperature change was proposed by proving the correlation between the expansion joint displacement of the upper road bridge and the cable tension of the lower railway bridge. The tension prediction results using the empirical formula for tension evaluation each cables proposed in this study were found to be in good agreement with the cable tension using the vibration method within 3%. Therefore, it was analyzed that it could be applied together with the vibration method that was an experimental technique, to predict and evaluate the cable tension in serviced railway steel composite bridge. As a result of applying the estimated temperature calculated by the empirical formula for expansion proposed in this study to the empirical formula, it was analyzed that a high level of reliability could be secured when compared with the vibration method. Therefore, it is judged that the empirical formula for cable tension evaluation reflecting the estimated temperature proposed in this study can be used to predict the tension of cables according to climate change in the future and establish a maintenance plan.

**Key words** : Cable Tension, Expansion Joint, Temperature, Regression Analysis, Empirical Formula

\*정회원, 동양대학교 건설공학과 교수 (제1저자, 참여저자)

\*\*정회원, 서울교통공사 토목처 부장 (교신저자)

접수일: 2022년 6월 9일, 수정완료일: 2022년 7월 1일

게재확정일: 2022년 7월 8일

Received: June 9, 2022 / Revised: July 1, 2022

Accepted: July 8, 2022

\*\*Corresponding Author: mcsoojae@naver.com

Dept. of Civil Engineering Office, SeoulMetro, Korea

## 1. 서론

최근 들어 교량설계 최적화 및 효율화에 따른 초장대 교량 건설이 대중화되고 경관 측면에서의 요구조건 충족을 위해 상부구조의 단면을 작게 하면서 케이블을 도입하여 지간을 증가시킬 수 있는 케이블 교량의 적용 사례가 점차 증가하는 추세이다[1-5]. 본 연구의 대상 교량은 건설 당시 정기적으로 운행하는 한강유람선의 항로 유지를 위해 수로 운항에 지장이 없도록 설계된 장경간 복층 도로-철도 복합교량이다[1-3].

교량의 총길이 1,022.5m 중 한강 통과구간은 660m이며 상부는 도로교로 사용되고 하부는 도시철도 차량이 운행되는 철도교로 시공된 강철도 복합교량이다. 강합성 박스거더 구조인 하부 철도교의 경간장은 90m이나 상부 도로교에 지지되는 케이블에 의해 휨강성이 보완되어 작은 단면으로도 교량 장대화가 가능하였다[1-3].

본 연구의 강철도 복합교량은 그림 1과 같이 도로교의 교각이자 철도교의 지점이 놓이게 되는 도로교 V-leg 끝지점에 케이블을 연결하여 철도교에 부가되는 하중 일부를 상부 도로교에서 지지하는 구조형식이다.



그림 1. 강철도 복합교량 전경  
Figure 1. Photograph of railway steel composite bridge

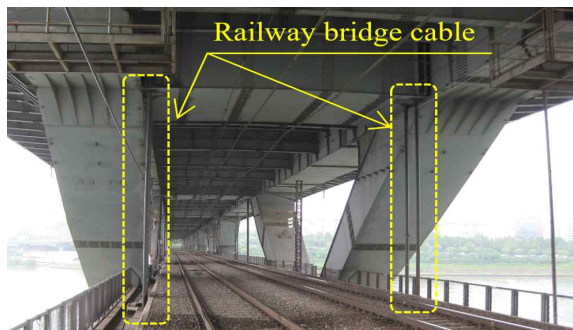


그림 2. 철도교 케이블 전경  
Figure 2. Photograph of railway bridge cables

철도교 케이블은 그림 2와 같이 도로교 V-leg 끝지점에 개소당 2개소씩 상, 하선에 총 56개가 설치되었으며, 직경 7mm의 아연도금 강선 187개로 이루어진 케이블의 길이는 11.535m이고 파단하중은 11,510kN이다.

케이블 교량에 있어서 온도는 중요한 작용하중이며, 온도변화에 따른 교량 상부구조의 온도 신축거동을 평가하는 것이 교량의 전체적인 성능 유지 및 유지관리 측면에서 중요한 요소이다[6,7]. 또한 케이블 장력에 대한 정확한 예측 및 유지관리는 교량 안전성 확보를 위해 필수적이다[8-12].

따라서 본 연구의 강철도 복합교량의 케이블 역시 도로교와 철도교의 안전성 측면에서 중요한 부재로서 거동 특성에 대한 정확한 이해와 이를 바탕으로 한 성능평가 및 유지관리 관련 연구가 필요하다.

그러나 현재 국내에는 본 연구의 대상교량과 같이 철도교 하중 일부를 도로교에 케이블로 지지하는 교량 형식은 없으며 관련 연구가 부족한 실정이다. 또한 케이블 상부 정착단이 설치된 도로교의 계절별 온도변화에 의한 신축이 케이블의 장력변화에 직접적인 영향을 미칠 수 있으나 이에 대한 연구도 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 계절별 대기온도 변화에 따른 도로교 신축이음의 신축량을 측정하고, 자동화계측을 통한 케이블의 장력과 진동법을 이용한 장력을 상호 비교 검증하였다.

또한 대기온도와 도로교의 온도신축량이 케이블 장력에 미치는 영향을 분석하여 케이블 장력 평가를 위한 효과적인 평가기법을 제안하였다.

## II. 현장측정

### 1. 개요

본 연구에서는 철도교 케이블의 장력과 도로교 신축이음 신축량의 상관관계를 비교, 분석하고자 공용중인 상부 도로교의 게르버힌지가 있는 구간을 검토구간으로 선정하였다. 도로교 V-leg를 기준으로 게르버힌지에 가까운 케이블은 외측 케이블로 정의하고 게르버힌지 사이에 있는 케이블은 내측 케이블로 정의하였다.

상, 하선 각 4개소씩 총 8개소에서 측정된 케이블의 장력과 도로교 신축량과의 상호작용을 분석하고자 도로교 게르버힌지 신축이음 2개소의 온도신축량을 함께 측정하였다. 또한 대기온도는 서울시 도로교 계측시스템의

측정결과를 활용하였으며 현장측정 구간의 개요도는 그림 3과 같다.

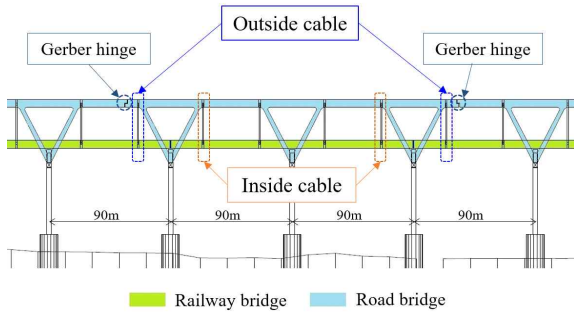


그림 3. Schematic of field measurement section  
 Figure 3. 현장측정 구간 개요

### 2. 케이블 장력변화와 대기온도의 상관관계

케이블 장력은 약 3년간 측정하였으며 측정데이터는 시간당 1개의 데이터를 수집하였다.

일일 케이블 장력 측정결과, 표 1과 같이 외측 케이블의 측정 장력의 일일 변화범위는 380.8~427.9kN이며, 내측은 235.3~292.9kN으로 나타나 외측 케이블의 장력 변화가 내측 대비 약 58% 큰 것으로 분석되었다.

이는 도로교 V-leg에 설치된 교량받침이 고정단으로서 온도변화에 따른 도로교의 신축거동으로 인해 외측 케이블의 장력변화가 상대적으로 크게 발생한 것으로 분석되었다.

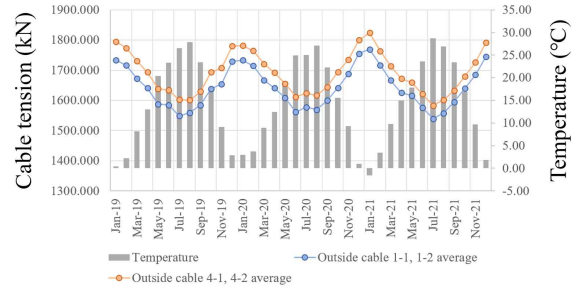
표 1. 케이블 장력 일일 측정 결과

Table 1. Measurement results of daily cable tension

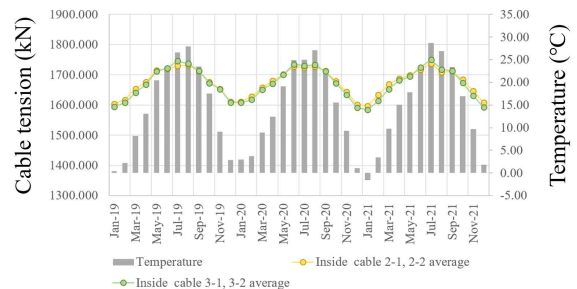
Position	Cable No.	Measured tension (kN)		
		Max.	Min.	Variation
Out side	Average	1,903.0	1,491.5	411.5
	1-1	1,917.6	1,536.8	380.8
	1-2	1,827.5	1,399.6	427.9
	4-1	1,966.5	1,548.8	417.7
	4-2	1,900.5	1,480.9	419.6
Inside	Average	1,781.4	1,522.4	259.1
	2-1	1,805.5	1,537.2	268.3
	2-2	1,751.8	1,516.5	235.3
	3-1	1,609.4	1,316.4	292.9
	3-2	1,959.1	1,719.4	239.7

케이블 장력은 그림 4와 같이 계절별 온도변화에 따라 주기적으로 변화하는 것으로 나타났다. 도로교 게르버 힌지에 가까운 외측 케이블은 그림 4와 같이 대기온도와

반비례하며, 내측 케이블은 대기온도와 비례관계에 있는 것으로 분석되었다.



(a) Outside cable



(b) Inside cable

그림 4. 케이블 장력과 온도와의 상관관계

Figure 4. Relationship between cable tension and temperatures

### 3. 도로교 신축변위와 대기온도의 상관관계

도로교 신축이음의 신축량과 대기온도는 약 3년간 측정하였으며 측정빈도는 10분당 1개의 데이터를 수집하였다. 온도변화에 따른 도로교의 신축변위량 측정결과, 신축이음부 양단에서 최소 -38.39mm(-13.38℃), 최대 66.22mm(+32.08℃) 발생하였으며 그림 5와 같이 신축이음 변위와 대기온도는 계절변화에 따라 일정한 주기성을 갖고 변화하는 것으로 나타났다. 또한 대기온도와 신축량은 선형관계이나 대기온도는 기상조건에 따라

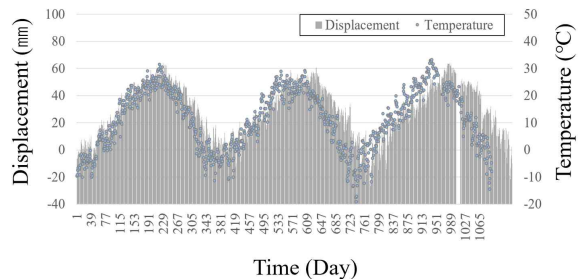


그림 5. 대기온도와 도로교 신축 변위의 상관관계

Figure 5. Relationship between temperatures and displacement by road bridge expansion

급격하게 변하는 반면 도로교 신축량은 상대적으로 느리게 반응하는 것으로 분석되었다.

4. 진동법을 이용한 케이블 장력 평가결과

본 연구에서 제시하고자 하는 장력평가 기법에 대한 적정성 검증을 위해 “시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법”의 교량 세부지침을 준용하여 그림 6과 같이 진동법으로 케이블의 장력을 측정하였다.

진동법과 자동화계측을 이용한 측정 장력의 차이는 표 2와 같이 약 5.7% 미만으로 나타나 자동화계측을 통한 케이블 장력측정기법은 적정한 것으로 분석되었다.

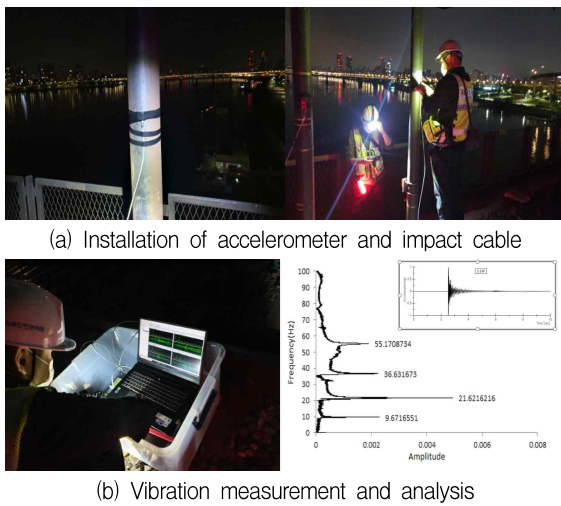


그림 6. 진동법 시험 전경  
Figure 6. Photographs of vibration method

표 2. 진동법 및 자동화계측 측정 장력 비교  
Table 2. Comparison of cable tension between vibration method and automation measurement results

Position	Test method	Measured tension (kN)		Ratio (%)
		Vibration	Automation	
Out side	Cable 1-1	1,684.0	1,696.0	99.3
	Cable 1-2	1,585.9	1,551.3	102.2
	Cable 4-1	1,651.3	1,688.0	97.8
	Cable 4-2	1,618.2	1,670.1	96.9
Inside	Cable 2-1	1,669.8	1,718.8	97.2
	Cable 2-2	1,624.9	1,688.1	96.3
	Cable 3-1	1,567.2	1,517.6	103.3
	Cable 3-2	1,844.5	1,956.9	94.3

III. 케이블 장력 평가 경험식 제안

본 연구에서는 온도변화에 따른 케이블의 장력을 평가할 수 있는 경험식을 산출하고자 온도와 케이블 장력에 대한 3년간의 측정결과를 이용한 회귀분석을 수행하였다.

케이블별 온도변화에 따른 장력 측정결과와 회귀분석 결과, 그림 7과 같이 결정계수가 0.96 이상으로 산출되어 온도와 케이블 장력은 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 수행한 장기계측을 통한 온도와 케이블 장력의 상관관계를 실험적으로 입증함으로써 그림 7과 표 3과 같이 1차 함수 형태의 케이블별 장력 평가를 위한 경험식을 도출하였다.

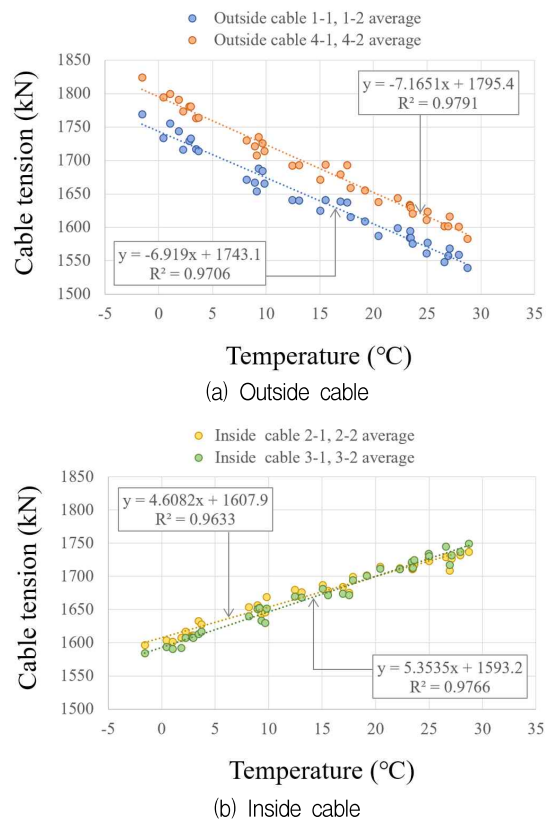


그림 7. 케이블 장력 평가 경험식  
Figure 7. Empirical formula for cable tension evaluation

표 3. 케이블 장력 경험식  
Table 3. Empirical formula for cable tension evaluation

Position	Cable No.	Empirical formula*	R <sup>2</sup>
Outside	1-1, 1-2	y = -6.919x + 1,743.1	0.97
	4-1, 4-2	y = -7.165x + 1,795.4	0.98
Inside	2-1, 2-2	y = 4.608x + 1,607.9	0.96
	3-1, 3-2	y = 5.354x + 1,593.2	0.98

\* x : Temperature (°C), y : Cable tension (kN)

#### IV. 분석 및 고찰

##### 1. 진동법을 이용한 본 연구의 경험식 적정성 분석

본 연구에서 제안한 표 3의 케이블 장력 경험식과 진동법을 이용한 장력 측정결과는 그림 8과 같다. 본 연구에서 제안한 경험식에 의한 예측 장력과 현행 케이블 장력 평가기법인 진동법을 이용한 측정결과는 표 4와 같이 약 3% 미만의 차이로 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 경험식은 공용중인 케이블의 장력 예측 및 평가에 실험적인 기법인 진동법과 함께 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

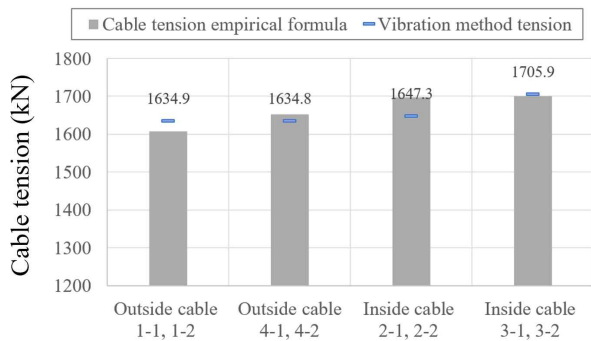


그림 8. 케이블 장력 비교(진동법 vs. 경험식)

Figure 8. Comparison of cable tension (vibration method vs. empirical formula of this study)

##### 표 4. 케이블 장력 평가결과 비교(진동법 vs. 경험식)

Table 4. Comparison of cable tension evaluation results (vibration method vs. empirical formula of this study)

Position	Cable No.	A	B	C	A/B(%)
Outside	1-1, 1-2	1,634.9	1,607.5	19.6	101.7
	4-1, 4-2	1634.8	1,652.1	20	99.0
Inside	2-1, 2-2	1,647.3	1,697.8	19.5	97.0
	3-1, 3-2	1,705.9	1,700.3	20	100.3

A : Cable tension measured by vibration method (kN)

B : Cable tension predicted by empirical formula of this study (kN)

C : Atmospheric temperature of test day (°C)

##### 2. 도로교 신축량과 대기온도 상관관계 분석

도로교 신축량과 대기온도 측정결과의 선형회귀분석 결과는 그림 9와 같다. 도로교 게르버힌지의 신축량과 대기온도의 상관관계 분석결과, 그림 9와 같이 선형회귀식의 결정계수가 0.99로 산출되어 신축량과 온도는 상관관계가 높은 것으로 분석되었다. 도로교 신축량 변화에

직접적인 영향을 미친 유효 대기온도를 바탕으로 도로교의 선팽창계수를 산출하였다. 온도변화에 따른 구조물의 신축량은 재료의 선팽창계수와 온도변화 및 구조부재의 길이에 선형비례관계이다. 또한 재료의 선팽창계수는 신축량과 온도의 선형회귀함수의 기울기를 의미한다[2]. 본 연구의 측정결과를 이용한 온도와 신축량의 상관관계식의 기울기는 2.237이므로 대상구간의 교량 길이인 242.65m를 반영하면 실제 도로교의 신축량에 영향을 미친 선팽창계수는  $9.21 \times 10^{-6}$ 으로 산출된다. 따라서 일반적인 도로교 설계기준에 제시된 강재의 선팽창계수인  $1.2 \times 10^{-5}$  보다 약 30% 작은 것으로 분석되었다.

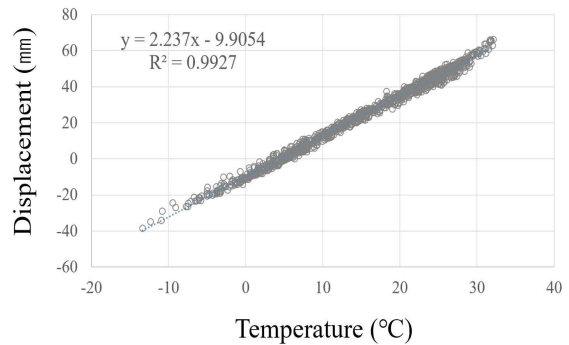


그림 9. 신축량 및 온도의 상관관계

Figure 9. Relationship between temperatures and displacement by road bridge expansion

도로교 신축량 측정결과를 이용하여 산출한 유효 대기온도는 실제 도로교의 신축에 직접적인 영향을 미친 유효 대기온도이다. 유효 대기온도와 실제 대기온도의 편차는 그림 10과 같이 최소 -2.98°C와 최대 +2.61°C의 편차를 나타내었다. 실제 대기온도 범위별 편차는 표 5와 같다.

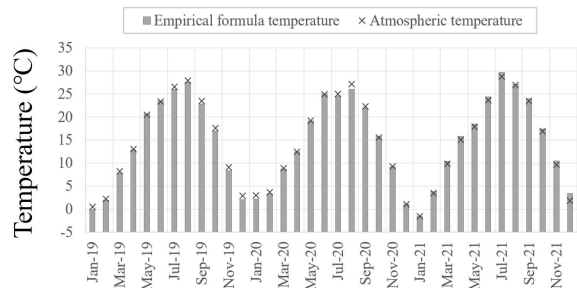


그림 10. 유효 대기온도와 실제 대기온도 비교

Figure 10. Comparison of temperature between effective and actual atmospheric temperature



표 5. 실제 대기온도 범위별 유효 대기온도의 편차  
Table 5. Deviation of effective atmospheric temperature according to actual atmospheric range

A	Test day	B	Ratio (%)
Total	1,086		100
< -10	4	-2.23~-0.03	0.4
-10 ≤ T < 0	75	-2.98~1.54	6.9
0 ≤ T < 10	303	-1.88~1.86	27.9
10 ≤ T < 20	298	-2.89~2.22	27.4
20 ≤ T < 30	383	-1.91~2.61	35.3
30 <	23	-2.22~0.55	2.1

A : Actual atmospheric temperature range (°C)

B : Deviation of effective atmospheric temperature (°C)

### 3. 온도추정식을 이용한 케이블 장력의 적정성 분석

진동법을 이용한 측정 장력을 기준으로 경험식에 의한 장력과 추정온도를 경험식에 적용한 장력을 분석하였다. 도로교 신축량을 이용하여 산출된 추정온도를 반영한 케이블의 장력은 표 6과 같이 진동법을 이용한 측정 장력과 3% 미만의 차이로 잘 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 추정온도를 이용한 장력 평가기법은 공용중인 케이블의 장력 예측 및 평가에 실험적인 기법인 진동법과 함께 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

표 6. 온도추정식을 적용한 케이블 장력 평가결과 비교  
Table 6. Comparison of cable tension evaluation results (vibration method vs. estimated temperature of this study)

Position	Cable No.	A	B	A/B(%)
Outside	1-1, 1-2	1,634.9	1,628.5	100.4
	4-1, 4-2	1,634.8	1,681.0	97.2
Inside	2-1, 2-2	1,647.3	1,684.2	97.8
	3-1, 3-2	1,705.9	1,678.7	101.6

A : Cable tension measured by vibration method (kN)

B : Cable tension predicted by estimated temperature of this study (Figure 9) (kN)

## V. 결론

본 연구에서는 공용중인 장경간 복층 도로-철도 복합교량의 상부 도로교의 신축이음 신축량과 하부 철도교의 케이블 장력 간의 상관관계를 현장 시험데이터를 바탕으로 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 케이블 현장측정을 통해 도로교 신축량과 대기온도에 대한 경향을 분석하여 계절별 온도

변화에 따른 케이블 장력 변화 특성을 실험적으로 입증하였으며 케이블 장력 특성을 반영한 케이블별 장력 평가 경험식을 제안하였다.

2) 도로교 신축량에 영향을 미친 유효온도를 산출하여 본 연구에서 제안한 케이블별 장력 평가 경험식에 적용한 결과, 진동법을 이용한 장력과 3% 이내로 잘 일치하는 것으로 나타나 공용중인 케이블의 장력 예측 및 평가에 실험적인 기법인 진동법과 함께 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

3) 본 연구에서 제안한 신축량 경험식으로 산출한 추정온도를 케이블 경험식에 적용한 결과, 현장시험 진동법 측정결과와 비교시 높은 신뢰수준을 확보할 수 있을 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서 제안한 추정온도를 반영한 장력 평가 경험식은 향후 기후변화에 따른 케이블의 장력 예측 및 유지관리방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] S.W. Kim, J.H. Cheung, S.D Kim "Cable Tension Measurement of Long-span Bridges Using Vision-based System", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection(KSMI), Vol. 22, No. 2, pp.115-123, March 2018. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2018.2.2.115>
- [2] Y.M. Kook, J.Y. Kim, Y.H. Kim, "A Study on Cheongdam Bridge Cable Fuser unit, Inflow Rainwater Prevention Methods", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2013, No.5, pp. 422-427, Spring 2013
- [3] S.C. Kim, S.S. Park, J.D. Lee, J.O. Kang, K.S. Han, "A Study on Interaction of Track Displacement and Structure on Long Span Cheongdam Bridge", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 2003, pp. 117-122, Autumn 2003.
- [4] J.Y. Choi, K.Y. Lee, J.S. Chung, D.H. Ahn, S.H. Kim, "Dynamic Behavior of Direct Fixation Track on Yeongjong Grand Bridge", Journal of the Convergence on Culture Technology(JCCT), Vol. 6, No. 3, pp. 443-448, 2020.
- [5] J.Y. Choi, S.H. Kim, K.Y. Lee, J.S. Chung, "Dynamic Behavior of Track Bridge on Serviced Long-Span Road/Railway Bridge", Applied Sciences, Vol. 10, No. 1, pp. 1-12, 2019.
- [6] J.C. Park "Evaluation of Thermal Movements of

- a Cable-Stayed Bridge Using Temperatures and Displacements Data”, Journal of the Korean Society of Civil Engineers(KSCE), Vol.35, No. 4, pp.779-789, August 2015.
- [7] H.W. Park, B.Y. Ahn, S.S. Lee, J.H. Park, “A Study on Temperature Properties Analysis for Tension Measurement of Steel Cables Using Magnetic Sensor”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 13, No. 2, pp. 181-188, 2009. <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.4.0779>
- [8] M.S. Kang, “Real Time Estimation of Cable Tension from Transverse Vibration Measurement”, Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 125-133, 2018. <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2018.28.1.125>
- [9] H.C. Lee, “Field Application Analysis of Cable Tension Measuring Device on Cable on Cable-Stayed Bridges”, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 22, No. 4, pp. 295-311, 2021. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2021.22.4.2>
- [10] K.T. Yang, “Nondestructive Sensor Development for Cable Tension Measurement”, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 25-30, 2004.
- [11] D.H. Choi, W.S. Park, “Improvement of the Tension Estimation Method for Extradosed Bridge Cables”, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 4, pp. 65-72, 2011. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2011.11.4.065>
- [12] S.J. Nam, S.S. Yhim, “Evaluation of Tension of Stay Cable using MBM(Measurement-based Model)”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 18, No. 3, pp. 93-100, 2014. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.3.093>
- [13] Seoul Metropolitan Government (2021). “A Comprehensive Report on the maintenance of Online Safety Monitoring System for Hangang Bridges.