

경간장 600-1000m급  
일부 타정식 사장교의  
시공기술 개발과  
경제성평가 기술개발  
최종보고서

2016. 10.

Infrastructure  
R&D Report

주관연구기관 / 충북대학교 산학협력단

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

# 제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "경간장 600-1000m급 일부 타정식 사장교의 시공기술개발과  
경제성평가 기술개발에 관한 연구"과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 10.

주관연구기관명 : 충북대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 원 정 훈

# 보고서 요약서

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                            |                                                                                                          |                               |         |                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------------------------|
| 과제고유번호                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 14CTAP-C<br>078811-01                                      | 해 당 단 계<br>연 구 기 간                                                                                       | 2014.8.14<br>~2016.8.26       | 단 계 구 분 | 총 단 계                                           |
| 연구사업명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 국 토 교 통 기 술 축 진 연 구 사 업                                    |                                                                                                          |                               |         |                                                 |
| 연구과제명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 최 상 위<br>과 제 명                                             | 경간장 600-1000m급 일부 타정식 사장교의<br>시공기술개발과 경제성평가 기술개발에 관한 연구                                                  |                               |         |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 단위과제명                                                      | -                                                                                                        |                               |         |                                                 |
| 연구책임자                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 원정훈                                                        | 총연구기간<br>참 여<br>연구원수                                                                                     | 총 : 6명<br>내부 : 6명<br>외부 :   명 | 총연구비    | 정부 : 100,000천원<br>기업 :     0천원<br>계 : 100,000천원 |
| 연구기관명 및<br>소 속 부 서 명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 충북대학교 산학협력단                                                |                                                                                                          | 참여기업명                         | -       |                                                 |
| 국제공동연구                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 상대국명 : -                                      상대국연구기관명 : - |                                                                                                          |                               |         |                                                 |
| 요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                            |                                                                                                          |                               | 보고서면수   | 100                                             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>· 일부타정식 사장교를 중앙경간 600-1000m에서 기존 사장교와 현수교 형식에 비해 경제성을 갖는 교량형식으로 개발하기 위해 연구를 수행함.</li> <li>· 중앙경간 810m의 3경간 사장교를 개념 설계하여 타정케이블 개수에 따른 주요 부재의 구조 응답을 분석한 결과, 대상 교량에 대해 6쌍의 타정 케이블을 갖는 시스템이 최적으로 분석됨.</li> <li>· 일부타정식 케이블 시스템은 공용 중과 시공 중 동하중에 대한 안전성을 확보해주는 방법으로 분석됨.</li> <li>· 일부타정식 사장교의 시공방법으로 FCM과 온도활용 키세그먼트 폐합방법을 해석적으로 검증한 결과, 안전은 확보되나 온도 상승 과다로 작업성 저하됨.</li> <li>· FCM 시공법과 변위제어 장치를 활용한 방법을 제안하여 시공 기술 개발함.</li> <li>· 일부타정식 케이블 시스템 채용으로 자정식 사장교에 비해 거더 강재량 24% 감소, 주탑 콘크리트 물량 5% 감소, 케이블 1% 감소되는 것으로 분석됨.</li> <li>· 대상 교량에 대한 개략공사비를 검토한 결과, 자정식에 비해 일부타정식 사장교의 공사비가 13.5% 감소되는 것으로 분석됨.</li> </ul> |                                                            |                                                                                                          |                               |         |                                                 |
| 색 인 어<br>(각 5개 이상)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 한 글                                                        | 일부타정식, 자정식, 사장교, FCM, 키세그먼트                                                                              |                               |         |                                                 |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 영 어                                                        | partially earth-anchored cable system, self-anchored cable system, cable-stayed bridge, FEM, key segment |                               |         |                                                 |

# 요 약 문

## I. 제목

경간장 600-1000m급 일부 타정식 사장교의 시공기술개발과 경제성평가 기술개발에 관한 연구

## II. 연구개발과제 개요

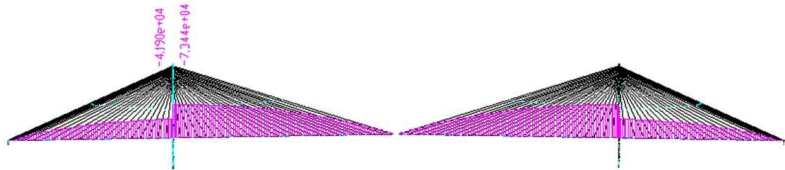
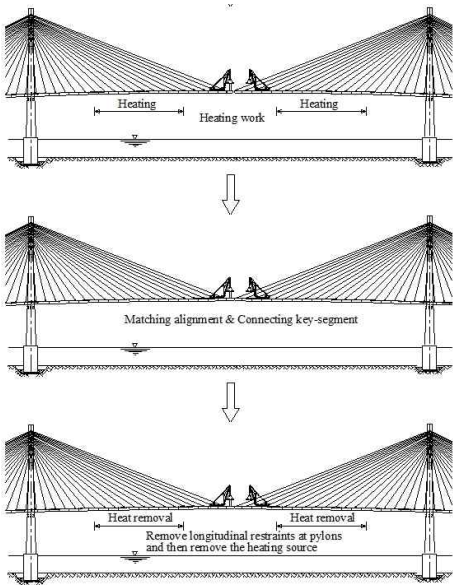
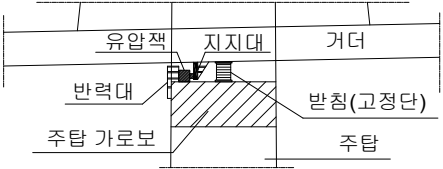
일부타정식 사장교는 개념적으로 제안되어 거더 압축력 감소라는 구조효과에 대해서는 검증되었지만, 구조효과와 부합되며 경제성과 시공성을 확보할 수 있는 상세 시공 기술과 경제적인 효과에 대한 연구는 부재하다. 따라서 개념 제안이후 후속 연구결과 부재로 설계자, 시공자, 발주자 모두에게 잘 알려져 있지 않은 생소한 형식이다. 일부 타정식 사장교는 초장대 사장교를 대상으로 하였지만, 최근 연구결과에 의하면 일반적인 사장교 경간장 범위인 경간장 300m에서 500m에서도 FCM 공법으로 시공이 가능한 것으로 분석되었다.

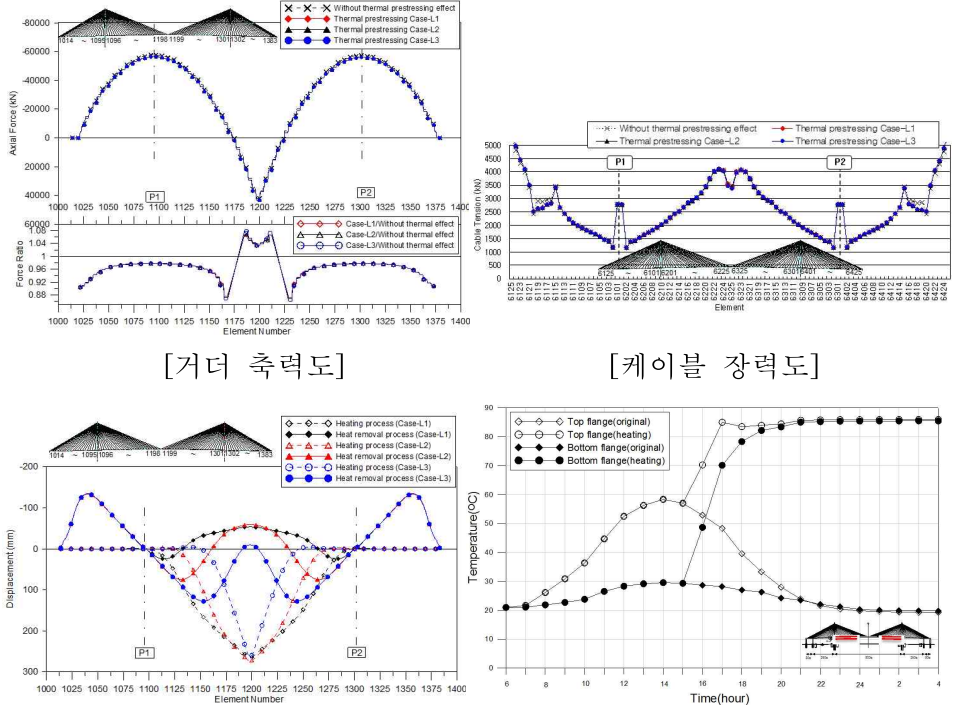
본 연구에서 중점을 두고 있는 것은 사장교와 현수교의 경제성 우월의 비교 영역인 경간장 600m-1000m 범위에서 일부타정식 사장교가 경제성을 확보할 수 있다는 것이며, 이를 위해 사장교의 구조효과를 반영함과 동시에 시공 중 발생할 수 있는 문제점을 해결한 실현가능한 상세 시공기술을 개발해야 한다는 것이다

따라서 본 연구개발은 일부타정식 사장교를 중앙경간 600-1000m에서 기존 사장교와 현수교 형식에 비해 경제성을 갖는 교량형식으로 개발하기 위해 최적 일부타정 케이블 시스템 분석, 시공법 분석 및 개발, 경제성 분석을 통해 경제성을 확보한 일부타정식 사장교 시공기술을 개발하는 것이다. 본 연구개발의 성과를 통해 설계자들은 중앙경간 600-1000m 범위에 경제성과 안전성을 확보할 수 있는 교량을 설계할 수 있는 기술을 확보할 수 있으며, 시공자들은 세계 시장 개척에 도움이 되는 또 하나의 우월한 시공 기술을 확보할 수 있다

### III. 연구개발 수행내용 및 결과

| 연구 내용                                                                 | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>최적 일부 타정 케이블 시스템 분석</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>중양경간 810m의 3경간 사장교 Concept 설계 수행           <div data-bbox="475 470 1396 1086"> </div> </li> <li>자정식 VS 타정 케이블 수에 따른 일부타정식 부재력 비교           <div data-bbox="454 1160 1407 1415"> </div> </li> <li>주탑의 최대 휨모멘트 비교           <ul style="list-style-type: none"> <li>일부타정식 사장교에서 교축방향 최대 휨모멘트 60% 감소</li> </ul> </li> <li>6쌍의 타정 케이블을 갖는 시스템을 최적으로 선정(L-EA-6)</li> </ul> |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>공용 중 동적 안전성 분석</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>자정식 사장교와 최적 일부타정식 사장교에 대해 공용 중 지진하중과 풍하중 거동 분석           <ul style="list-style-type: none"> <li>풍하중 영향 47% 감소, 지진하중 영향 70% 감소</li> </ul> </li> <li>타정 케이블에서 주탑 등의 안전성 확보 위해 케이블 장력이 증가되며, 거더와 주탑의 안전성은 향상.</li> </ul>                                                                                                                                                |

| 연구 내용                                                          | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>기존 제안 시공법 분석</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gimsing 제안법과 국내 관련 특허 등 기존 시공법 분석 결과, 기존 방법의 경우 장경간 사장교에 적용 시 별도 가설 장비 필요하므로 시공비가 상승함.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>특수교량 시공법 분석</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>사장교 FCM 공법과 현수교 가설공법 등 분석결과, FCM 공법의 적용이 가능함.</li> <li>일부타정식 사장교에 FCM 공법 적용 시 문제점 <ul style="list-style-type: none"> <li>타정케이블에 의해 폐합 전 고정부 압축력 차이로 set-back 시 큰 변위 발생하여 적용이 어려우므로 별도 시공기술 개발 필요</li> </ul> </li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p>→ 중앙경간 810m의 폐합전 거더 축력 분포도</p> <p>→ set-back시 이동량 : 2.44m</p> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>시공법 제안</li> </ul>       | <p>1) FCM+온도 활용 폐합 방법</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>온도 프리스트레싱 기법을 활용하여 키-세그먼트 폐합</li> <li>고정장치 해제하지 않고, 온도팽창으로 연결</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                               | <p>2) FCM +변위제어 장치 방법</p>  <ul style="list-style-type: none"> <li>set-back을 제어할 수 있는 장치를 고안하여 축력 비대칭에 의한 지나친 변위를 제거하는 방법</li> <li>set-back을 위해 고정장치를 해제하기 전에 반력대, 유압잭, 지지대로 구성된 고정단 변위제어 장치를 설치</li> </ul> |

| 연구 내용                               | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div> <div>■ 해석을 통한 검증</div> </div> | <div> <div>1) FCM+온도 활용 폐합 방법</div> <div> <div>： 구조계 변화 발생하므로 상세 시공단계 해석으로 안전성 확인</div> <div>  <div> <div>[거더 축력도]</div> <div>[케이블 장력도]</div> <div>[거더 처짐]</div> <div>[온도 가열시 상하부 플랜지 온도 변화]</div> </div> </div> </div> </div> <div> <div>→ 구조계 변화로 인한 2차 응력에 대해 시공 단계 안전성은 확보.</div> <div>→ 플랜지 온도 과다로 작업성 저하</div> </div> |

| 연구 내용                          | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>▪ 물량 감소 효과 분석</p>           | <p>1) 거더 물량 감소 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 자정식과 일부타정식 사장교의 주탑부 거더의 최대 응력 수준 유사하도록 단면 재설계</li> <li>· 최대 압축력을 받는 주탑부 거더 <ul style="list-style-type: none"> <li>：자정식 거더 단면적 = 1.8(일부타정식 사장교 거더 단면적)</li> </ul> </li> <li>· 전 단면에 걸친 개략검토 <ul style="list-style-type: none"> <li>：자정식 거더 평균 단면적 = 1.32(일부타정식 거더 평균 단면적)</li> </ul> </li> </ul> <p>→ 전체 거더 강재량을 검토한 결과,<br/>일부타정식 사장교의 적용으로 강재량 24% 감소 가능.</p> <p>2) 주탑 물량 감소 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 주탑 하단부 leg 단면에 대해 P-M 상관도 분석 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 일부타정식 케이블 시스템 채용으로 인한 단면 감소 <ul style="list-style-type: none"> <li>：11m×10m → 11m×7.5m (교축직각 방향 × 교축 방향)</li> <li>：콘크리트 물량 감소 : 16.2%, 사용 철근량 감소 : 13.1%</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>· 주탑 중간부 leg 단면 <ul style="list-style-type: none"> <li>：콘크리트 물량 감소 : 3.7%, 사용 철근량 감소 : 3.3%</li> </ul> </li> <li>· 주탑 상단부 leg 단면 : 축력 지배로 감소 효과 미비</li> </ul> <p>→ 일부타정식 사장교의 주탑 물량은 자정식에 비해 5.0% 감소함.</p> <p>3) 케이블 물량 감소</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 동일 거더 단면에 대해 일부타정식 사장교에서 케이블 장력이 증가되나, 자정식 사장교에서는 거더 중량이 증가함</li> <li>· 거더 단면 증가를 반영해서 케이블 물량 검토</li> </ul> <p>→ 일부타정식 사장교의 케이블 물량은 자정식에 비해 0.8% 감소함.</p> |
| <p>▪ 경제성 평가 (공사비 감소 효과 분석)</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 일부타정식 사장교의 적용으로 상부 거더, 주탑, 케이블의 물량 감소 가능</li> </ul> <p>→ 공사비 감소 가능</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· 기존 교량 공사비 내역을 기준으로 개략적인 공사비 감소를 검토한 결과,</li> </ul> <p>→ 자정식에 비해 일부타정식 사장교 적용으로 공사비 13.5% 감소</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

#### IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구 과제를 통해 얻은 성과는 경간장 600-1000m를 갖는 일부타정식 사장교의 시공 기술 및 경제성 평가로 구체적인 연구 성과는 다음과 같다.

- 최적 일부타정식 케이블 시스템 분석 기술
- 일부타정식 사장교 상세 시공 기술
- 일부타정식 사장교의 동적 안전성 효과 분석 기술
- 일부타정식 사장교의 경제성 평가

본 연구 과제를 통해 얻은 학술적 성과는 다음과 같다.

- 국제학술지(SCIE) 논문 2편 게재됨.
- 국내 학진등재 논문 2편 게재됨.
- 국내 특허 1건 출원됨.

#### V. 연구목표 달성 및 효과

질적 성과지표에 대한 결과는 다음 표와 같다. 주탑 구조 성능만 목표로 한 25%에 도달하지 못했으나, 긍정적인 경제성 평가인 공사비가 목표치에 도달하였으므로 본 연구의 질적 성과지표는 달성되었다고 판단된다.

| 단위 성과            | 질적 성과지표   | 목표치          | 달성치                                          | 달성도  |
|------------------|-----------|--------------|----------------------------------------------|------|
| 일부타정식 사장교 구조 효과  | 거더 구조 성능  | 단면 감소 20% 이상 | 단면 감소 24.2%                                  | 100% |
|                  | 주탑 구조 성능  | 단면 감소 25% 이상 | 단면 감소 5.0 %                                  | 20%  |
|                  | 케이블 구조 성능 | 전체 물량 감소>증가  | 전체 물량 감소 0.8%                                | 100% |
| 일부타정식 사장교 시공기술   | 전문가 검증    | 시공 지침서 작성    | 시공 지침서 확인                                    | 100% |
| 일부타정식 사장교 경제성 평가 | 물량        | 자정식의 85-90%  | 자정식의 86.5%<br>(설계물량에 근거한 개략<br>공사비 감소 13.5%) | 100% |
|                  | 공사비       | 자정식의 85-90%  |                                              | 100% |

양적 성과지표로는 주탑 구조 성능만 목표치에 도달하지 못했으나, 긍정적인 경제성 평가인 공사비가 목표치에 도달하였으므로 본 연구의 질적 성과지표는 달성되었다고 판단된다.

| 양적 성과지표     | 최소성과목표 | 최종성과목표 | 성과 | 최소성과목표<br>달성도 |
|-------------|--------|--------|----|---------------|
| SCI(E) 학술지  | 2      | 2      | 2  | 100%          |
| 일반학술지(학진등재) | 2      | 2      | 2  | 100%          |
| 국내특허출원      | 1      | 2      | 1  | 100%          |
| 국외특허출원      | -      | 1      | 0  | -             |

본 연구 과제를 통해 경간장 600-1000m 범위의 사장교 건설 비용의 감소(15% 이상)를 증명함으로써 일부타정식 사장교의 우수성을 설계자 및 시공자에게 인식시켜 장대교량 시장에 관심을 가지고 있는 국내 건설사의 투자를 유도할 수 있다.

## VI. 연구성과 활용계획

본 연구개발 연구성과의 구체적인 활용 방안은 다음과 같다.

- 개발 기술의 국내 특허 등록과 해외 특허 등록 추진으로 일부타정식 사장교 시공 원천기술 확보
- 경제성 평가 부분을 반영한 논문을 해외에 게재하고 학술발표회를 통한 설계자, 시공자, 발주자 홍보하여 실제 교량 설계와 시공 유도
- 해외 교량 시장 진출에 활용

# S U M M A R Y

The structural effect of a partially earth-anchored cable-stayed bridge (PEACSB) developed by Gimsing was already verified. However, it is noted that there is little study on the detailed construction method for the PEACSB incorporated with economic feasibility. Even though the development of the partially earth-anchored cable system (PEACS) have been mainly focused on the cable-stayed bridge with the ultra long span length over 1,000 m, recent researches reveal that the PEACS can also be applied to cable-stayed bridges with main span lengths of between 300 m and 500 m constructed by the free cantilever construction method (FCM).

This project focuses on application of the PEACS to the cable-stayed bridges with main span lengths of between 600 m and 1000 m, where bridge engineers should select the optimal bridge type between cable-stayed bridges or suspension bridges after careful consideration. If the detailed technology for the construction of PEACSB is developed, which can overcome the problem in construction sequence, this type bridge can be dominant solution in this area. Thus, the object of this project is to investigate the optimal PEACS, develop detailed construction methods, and evaluate economical aspects of the PEACSB. Using results of this project, design engineers can design the special cable-stayed bridge while guaranteeing the safety and economical feasibility. Bridge contractors can have a predominant construction technology useful for finding oversea construction markets.

In order to investigate the response of partially earth-anchored cable-stayed bridges, a three-span cable-stayed bridge with a main span length of 810 m is designed preliminary. By investigating the structural behaviors of girders, pylons, cables through finite element (FE) model, the PEACS with six pairs of earth-anchored cables anchored to each abutment is selected as the optimal PEACS for the considered bridge. The selected PEACS can enhance the dynamic responses for seismic and wind loads both during and after construction. In operational phase, the peak moment of pylon is reduced by 47% and 70% for wind and seismic loads, respectively.

For the construction method of a PEACSB, the existing special erection method is not adequate for the considered PEACSB with main span lengths of between 600 m and 1000 m owing to the economic feasibility. This project evaluates two alternative methods. One is to use FCM method and thermal prestressing method in connecting key-segment. The other is to use FCM method and to install the special displacement control device, which constitutes reaction frames, hydraulic jacks, and supporting frames.

Since the method using the thermal prestressing method gives birth to residual stress in the system, the detailed construction sequence analysis is performed. The analysis results show that this method can guarantee the structural safety during the construction process. However, in the practical point, the heavy temperature rise is harmful for workers. Thus, the second method is recommended for connection the key-segment since this method do not occur residual stress while giving any hazard for work procedure.

To give economic advantages of PEACSB, the reduced material is calculated. The steel in the deck can be reduced by 24% and concrete of pylons can be reduced by 5%. For the stay cables, the amount of cables is reduced slightly. As a result of material decrement, the total construction cost can be approximately reduced by 13.5%.

# CONTENTS

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introduction .....                                       | 14 |
| 1.1 Objectives .....                                        | 14 |
| 1.2 Project definition, scope, distinction .....            | 21 |
| 1.3 Related developed technology .....                      | 23 |
| 1.4 Outstanding and discrimination of project results ..... | 24 |
| 2. Results .....                                            | 26 |
| 2.1 Summary of results .....                                | 26 |
| 2.2 Results .....                                           | 34 |
| 3. Project outcome and actual performance .....             | 95 |
| 4. Achievement of project goal and effects .....            | 97 |
| 4.1 Qualitative achievement .....                           | 97 |
| 4.2 Quantitative achievement .....                          | 98 |
| 4.3 Expected effect .....                                   | 98 |
| 5. Utilization of results and additional researches .....   | 99 |
| References .....                                            | 99 |

## 목 차

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 제1장 연구개발과제 개요 .....           | 14 |
| 1.1 연구개발 필요성 및 목적 .....       | 14 |
| 1.2 연구개발의 정의, 범위, 특징 .....    | 21 |
| 1.3 관련분야의 국내외 기술개발 현황 .....   | 23 |
| 1.4 연구개발 결과의 우수성 및 차별성 .....  | 24 |
| 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 .....     | 26 |
| 2.1 연구개발 결과 요약 .....          | 26 |
| 2.2 연구개발 주요 내용 .....          | 34 |
| 제3장 최종 연구성과 및 적용실적 .....      | 95 |
| 제4장 연구목표 달성 및 효과 .....        | 97 |
| 4.1 질적 성과 목표 달성도 .....        | 97 |
| 4.2 양적 성과 목표 달성도 .....        | 98 |
| 4.3 기대효과 .....                | 98 |
| 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ..... | 99 |
| 참고문헌 .....                    | 99 |

# 제1장 연구개발과제 개요

## 1.1 연구개발 필요성 및 목적

### 가. 연구개발 필요성

#### (1) 케이블 교량 건설 현황

사장교와 현수교 건설이라는 케이블 교량의 설계 및 시공은 2000년대 이전까지 경험과 기술력을 바탕으로 한 유럽과 일본의 일부 건설사들이 갖는 고부가가치의 특수 시장 영역이었다. 국내의 경우, 서해대교(사장교)와 영종대교(현수교)가 2000년 초에 완공된 후 시장규모가 급속히 성장하여(1990년 후반부터 2010년까지 약 4.5조원, 2011년 이후 약 6.7조원(길홍배 외, 2009)) 국내 케이블 교량의 설계 및 시공기술은 최근 비약적으로 발전하였다<sup>1)</sup>. 최근에는 순수 국내 기술로 케이블 교량이 설계 및 시공되고 있으며, 국내에서 축적된 기술력을 바탕으로 국내 건설사들은 적극적으로 해외시장을 개척하고 있으며 시공 성과도 나타나고 있다. 국내·외의 가시적인 성과는 세계 최고 수준의 경제성 및 기술경쟁력을 갖춘 장경간 케이블 교량 자립 건설기술 확보라는 목표를 설정한 정부의 적극적인 R&D지원(초장대 교량 사업단)과 해외 시장 개척이라는 국내 건설사의 의지가 함께 한 결과라고 할 수 있다.

2001년 서해대교의 건설 이후 국내에는 많은 수의 사장교가 건설되었으며, 가장 큰 경간장을 갖는 사장교는 2009년에 완공된 중앙경간 800m의 인천대교이다. 인천대교 건설 이후 국내 케이블 교량의 건설 기술은 중앙지간 1000m 이상의 현수교 시공 기술의 개발에 초점을 두고 진행된 결과, 인천대교를 넘어서는 사장교 건설보다는 다수의 장대 현수교가 완공되거나 건설 중에 있으며, 사장교의 경우 경간장 500m 이내에서 주로 건설되고 있다.

장경간화에 따른 내풍 안정성 문제 이외에 사장교가 갖는 기술적인 난제 중의 하나는 장경간화에 따른 사장 케이블 수의 증가와 그로 인한 거더 압축력의 증가 문제이다. 지나친 압축력에 의한 거더의 좌굴 문제를 해결하기 위해서는 거더 단면의 증가 또는 고강도 강재의 사용이 필연적이며, 이는 장대 사장교가 현수교보다 경제성이 떨어지는 중요한 요소이다. 사장교와 현수교의 경제성을 좌우하는 경간장의 결정은 지역적 특징 등의 다양한 요소에 의해 좌우되나, 최근 국내의 건설 경향을 살펴보면, 일반

1) 길홍배, 박종철, 조준상, 정경자, 장갑철(2009). 국내·외 장대교량 시장 전망, 한국강구조학회지, Vol.21, No.3, pp.10-16.

적으로 지간장 800m까지는 사장교를 선호하며, 그 이상에서는 현수교를 경제적으로 선호하는 것으로 보인다.

## (2) 일부타정식 사장교의 제안과 시공 문제점

현재 건설되는 대부분의 사장교는 모든 케이블들을 주탑과 거더에 정착하는 자정식 케이블 시스템(self-anchored cable system)을 채택하고 있다. 거더에 정착된 케이블 장력의 수평성분은 압축력을 거더에 발생시키므로, 자정식 사장교는 주탑부에 위치한 거더에 가장 큰 압축력이 발생하는 그림 1.1과 같은 축력분포를 나타낸다. 사장교 경간의 증가는 케이블 수와 장력의 증가를 초래하고, 이는 다시 압축력의 증가를 야기하게 되며, 지나친 압축력은 거더의 좌굴 문제를 발생시키므로 자정식 사장교의 경우 장대화에 한계점을 보인다.

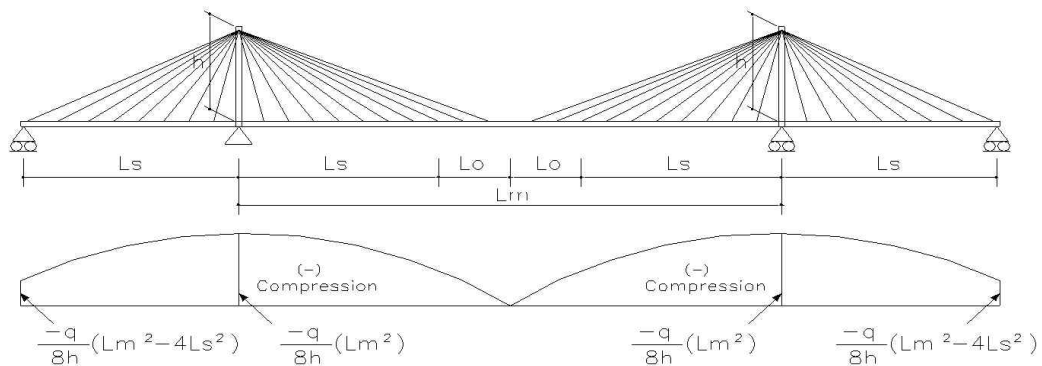


그림 1.1 자정식 사장교의 축력 분포

사장교 거더에 발생하는 최대 압축력을 감소시키기 위해 Gimsing은 일부타정식 케이블 시스템(partially earth-anchored cable system)을 갖는 사장교를 제안하였다 (Gimsing, 1997)<sup>2)</sup>. 일부타정식 사장교는 거더의 압축력을 저감시키기 위해 측경간 외측 케이블의 일부를 거더가 아닌 앵커 블록이나 교대 등에 정착하고 거더의 받침 조건으로 모든 지점에서 교축방향 가동단을 채용한 형식이다.

정착조건과 경계조건의 변화로 인해 최대 압축력은 감소하게 되고 중앙경간의 중앙부에서는 인장력이 발생하게 된다(그림 1.2). 최대 압축력의 감소는 좌굴 문제를 해결하여 경간장을 증가시킬 수 있으며, 주경간이 1,000m이상에 이르는 장대 사장교의 건설이 가능하게 된다. 일부타정식 사장교의 중앙경간장은 자정식에 비해 이론적으로  $\sqrt{2}$  배 증가할 수 있는 것으로 알려져 있으며, Nagai et al.(1997)의 연구도 1.18~1.27

2) Gimsing, N.J. (1997). Cable Supported Bridges, 2nd edition, Wiley West Sussex, UK.

배 중앙경간이 증가될 수 있는 것으로 분석되었다<sup>3)</sup>.

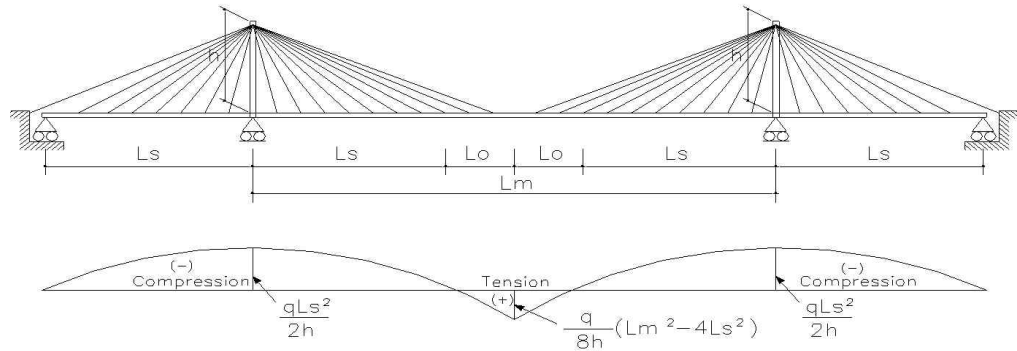


그림 1.2 일부타정식 사장교의 축력 분포

일부타정식 사장교에 대한 연구는 초장대 교량을 대상으로 진행되고 왔다(Xie et al., 1997<sup>4)</sup>; Sun et al., 2009<sup>5)</sup>; Zhibin et al., 2016<sup>6)</sup>). 초기에 제안되었던 일부타정식 사장교는 중앙경간 1,000m 이상의 초장대 교량을 대상으로 제안된 형식이며, 효과를 극대화시키기 위해 기존의 시공방법이 아닌 그림 3과 같이 중앙경간 중앙 거더 부분을 먼저 시공하기 위한 특별한 시공방법을 필요로 한다(Gimsing, 1997). Gimsing에 의해 제안된 방법은 일부 타정식 케이블 시스템의 효과를 극대화하기 위하여 중앙 거더를 먼저 가설하고, 주탑부 거더를 FCM으로 가설하여 폐합하는 방법으로 중앙부 거더를 가설하기 위해서는 pilot 로프와 hauling rope 시스템 같은 현수교 주케이블 가설 장비들이 별도로 필요하게 되는 문제점이 존재한다.

중앙 거더를 먼저 가설하기 위한 주케이블 가설 장비들이 비록 현수교 주케이블 가설 장비보다는 규모는 작지만 이런 장비를 설치해야 한다는 것은 사장교 시공보다는 현수교 시공을 택하는 것이 보다 경제적인 수 있음을 의미한다. 또한, 케이블 시공 장비의 운영에 필요한 공간이 확보가 어려우며, 중앙 거더 가설시의 내풍 안정성에도 문제가 될 수 있다.

- 3) Nagai, M., Izawa, M. and Hiroshi, N. (1997). Basic Plan and Design of Cable Stayed Bridge, Morikita Publishing Co., Japan(In Japanese).
- 4) Xie X., Yamaguchi, H. and Nagai, M. (1997). "Static Behaviors of Self-anchored and Partially Earth-anchored Long-span Cable-stayed bridges", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 5, No. 6, pp.767-774.
- 5) Sun, B., XIAO, R.-C., and JIA, L.-J. (2009). "Trial Design of a Proposed Partially Ground-Anchored Cable-Stayed Bridge with a Main Span 1400 m", Bridge Construction.
- 6) Zhibin, J., Shiling, P., Xing, W., Hongyan, L., and Shizhong, Q. (2016). "Partially Earth-Anchored Cable Bridge: Ultralong-Span System Suitable for Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Cables", Journal of Bridge Engineering, Vol. 21, No 6.

### Partially Earth Anchored Cable Stayed Bridge



### Erection Procedure

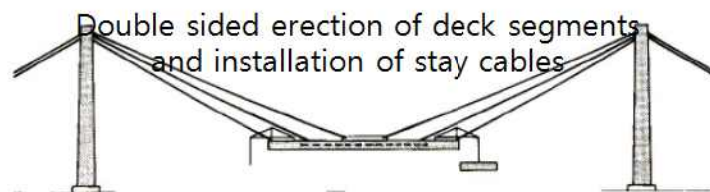
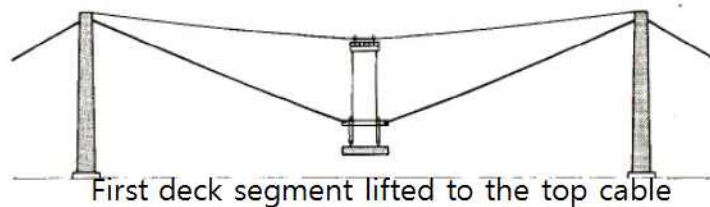
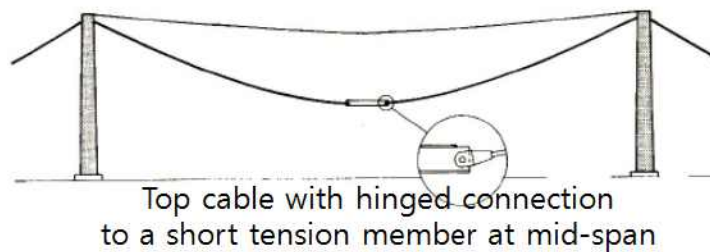
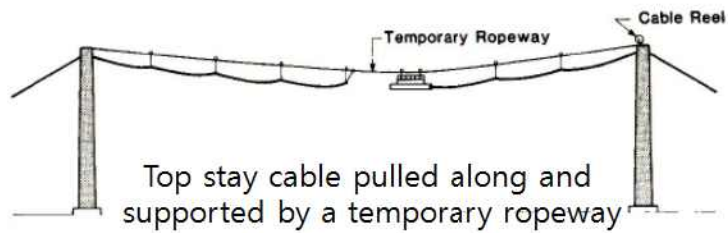
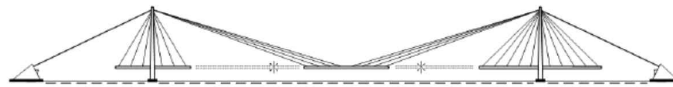


그림 1.3 일부타정식 사장교의 시공방법(Gimsing)

최근의 연구결과에 의하면, 사장교 시공방법으로 가장 널리 이용되는 방법인 Free Cantilever Method (FCM) 공법이 일반적인 사장교의 경간장 범위에서 일부타정식 사장교의 시공방법으로도 적용 가능한 것으로 나타났다(Gimsing, 2006)<sup>7)</sup>. FCM 공법에

7) Gimsing, N.J. (2006). "Evolution in Span Length of Cable-stayed Bridges." in Challenges in the 21st Century: Proceedings of International Conference on Bridge Engineering, Hongkong, China, CD-ROM(Paper No. KN-001).

의한 상부구조 연속화는 키-세그먼트라 불리는 마지막 세그먼트를 양쪽 캔틸레버 사이에 설치함으로써 이루어지며, 일반적으로 키-세그먼트를 설치하기 위해서는 set back과 reset back이라 불리는 방법이 적용된다(그림 1.4). 이 방법은 set back 작업에 의해 키-세그먼트를 인양할 공간을 확보한 후, 키-세그먼트를 인양하고, reset back에 의해 키-세그먼트와 인접 캔틸레버 끝단을 접촉시킨 뒤 연결하는 방식이며, set back시 주탑과 거더사이에 시공 중 안전을 확보하기 위해 설치된 고정장치를 해제하여 이동을 가능하게 한다.

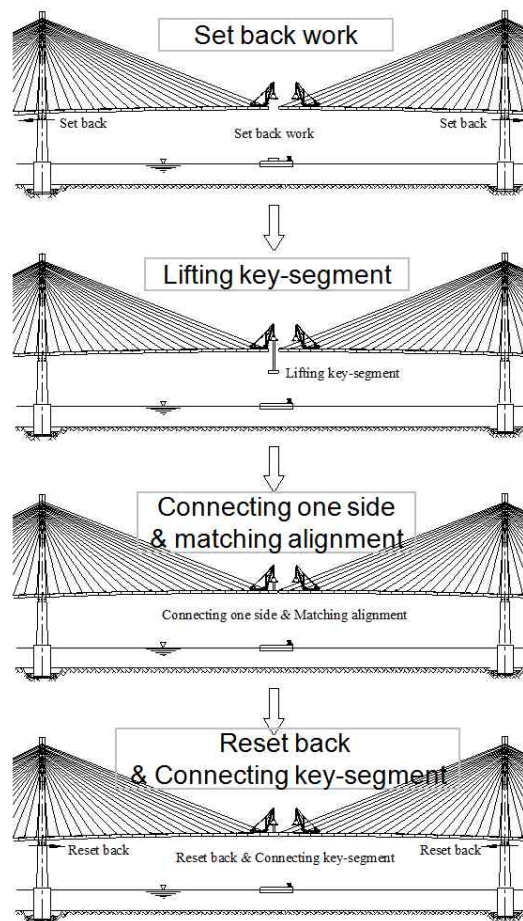


그림 1.4 FCM공법의 key-segment 폐합

일부타정식 사장교는 외측 케이블의 일부가 거더 외부에 정착되므로, 시공 중 고정장치 좌·우의 측경간 거더와 중앙경간 거더의 최대 압축력이 비대칭이 되며(그림 1.5), 이 압축력의 차이로 인해 고정장치에 상당한 크기의 수평력이 발생하게 된다. Set back을 위해 고정장치를 해제하게 되면, 수평력이 거더에 전달되어 거더에 상당한 크기의 이동량이 발생되므로 장경간에서는 기존의 set back과 reset back 방법을 일부타정식 사장교의 키-세그먼트 폐합에 적용하기가 어렵다. 경간장이 길어질수록 일부 타

정 케이블의 수가 증가되므로, 고정장치의 수평력이 증가되어 이동량을 제어하기가 사실상 불가능해진다. 그러므로 장경간의 일부타정식 사장교를 FCM 공법으로 시공하기 위해서는 key-segment를 폐합을 포함한 새로운 시공방법이 필요하다(Won et al., 2008a)<sup>8)</sup>.

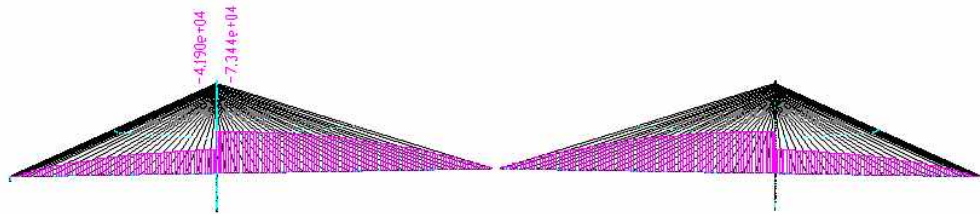


그림 1.5 고정장치 해전 전 거더 축력 분포도

#### 나. 연구개발 목적

일부타정식 사장교는 개념적으로 제안되어 거더 압축력 감소라는 구조효과에 대해서는 검증되었지만, 구조효과와 부합되며 경제성과 시공성을 확보할 수 있는 상세 시공 기술과 경제적인 효과에 대한 연구는 부재하다. 따라서 개념 제안이후 후속 연구결과 부재로 설계자, 시공자, 발주자 모두에게 잘 알려져 있지 않은 생소한 형식이다. 일부 타정식 사장교는 초장대 사장교를 대상으로 하였지만, 최근 연구결과에 의하면 일반적인 사장교 경간장 범위인 경간장 300m에서 500m에서도 FCM 공법으로 시공이 가능한 것으로 분석되었다(Won et al., 2008b)<sup>9)</sup>.

본 연구에서 중점을 두고 있는 것은 사장교와 현수교의 경제성 우월의 비교 영역인 경간장 600m-1000m 범위에서 일부타정식 사장교가 경제성을 확보할 수 있다는 것이며, 이를 위해 사장교의 구조효과를 반영함과 동시에 시공 중 발생할 수 있는 문제점을 해결한 실현가능한 상세 시공기술을 개발해야 한다는 것이다. 현재 설계자, 시공자, 발주자가 가지는 일부타정식 사장교에 대한 인식과 이를 해결하기 위해 필요한 연구 중점사항과 연구목적은 그림 1.6과 같이 도식화하여 나타낼 수 있다.

- 
- 8) Won, J-H., Cho, K-I., Yoon, J-H. and Kim, S-H. (2008a) "Innovative Key-segment Closing Method using Thermal Prestressing Technique for Partially Earth-anchored Cable-stayed Bridges." Advances in Structural Engineering, Vol. 11, No. 5, pp. 549-564.
- 9) Won, J-H., Park, S-J., Yoon, J-H. and Kim, S-H. (2008b) "Structural Effects of Partially Earth-anchored Cable System on Medium-span Cable-stayed Bridges." International Journal of Steel Structures, Vol. 8, No. 3, pp. 225-236.



그림 1.6 연구 배경 및 목적

본 연구개발의 목적은 상세 시공기술 개발과 경제성 평가를 통하여 설계자, 시공자 및 발주자의 관심을 유도하여 탁월한 구조적 효과와 경제성을 갖는 일부타정식 사장교가 실제로 설계되고 시공이 되도록 하는 것이다. 본 연구개발의 성과를 통해 설계자들은 중앙경간 600-1000m 범위에 경제성과 안전성을 확보할 수 있는 교량을 설계할 수 있는 기술을 확보할 수 있으며, 시공자들은 세계 시장 개척에 도움이 되는 또 하나의 우월한 시공기술을 확보할 수 있다.

## 1.2 연구개발의 정의, 범위, 특징

### 가. 연구개발의 정의

본 연구개발은 일부타정식 사장교를 중앙경간 600-1000m에서 기존 사장교와 현수교 형식에 비해 경제성을 갖는 교량형식으로 개발하기 위해 최적 일부타정 케이블 시스템 분석, 시공법 분석 및 개발, 경제성 분석을 통해 경제성을 확보한 일부타정식 사장교 시공기술을 개발하는 것이다.

- 경간장 600-1000m를 갖는 일부타정식 사장교의 상세 시공기술 개발
- 물량 감소(거더, 주탑, 케이블 등)를 통한 공사비 감소 평가



그림 1.7 연구내용 Outline

### 나. 연구개발의 범위

본 연구개발은 중앙경간 600-1000m 범위의 일부타정식 사장교의 시공기술과 경제성을 평가하는 것으로 연구 범위는 다음과 같다.

- 일부타정식 사장교 구조 효과 평가 - 거더, 주탑, 케이블 구조 성능 분석

- 일부타정식 사장교 시공 기술 개발
- 일부타정식 사장교 경제성 평가 - 물량과 개략 공사비 평가

#### 다. 연구개발 특징

일부타정식 사장교는 개념적으로 제안되었으나, 구체적인 설계 및 시공실적이 전 세계적으로 거의 없다. 국내의 경우, 400m 이하 경간장을 갖는 일부타정식 사장교를 대상으로 본 연구진의 연구책임자가 구조적인 효과와 시공방법에 대한 연구를 수행한 적이 있으나, 기존의 자정식 사장교에 비해 경제적으로 우월한 결과까지는 도출하지 못하였다. 또한, 1000m 이상의 초장대 사장교에 대해서는 시장 선점을 위해 공법에 대한 개념적인 특허 등이 국내 한 건설회사에 의해 출원 및 등록되어 있다.

몇몇 연구자들의 시도에도 불구하고, 일부타정식 사장교는 아직 일반 설계자, 시공자 및 발주자에게 그 효과와 경제성이 인식되지 않고 설계 및 시공이 되고 있지 않은 것은 현실성과 시공성을 확보한 상세 시공기술이 제시되지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구개발은 경제성을 확보할 수 있다고 판단되는 600-1000m 경간장을 대상으로 설계와 시공이 적용 가능한 상세 시공기술을 개발한다는 것이 기존 연구와 차별화됨과 동시에 중요한 원천 기술개발 연구 내용이다.

본 연구개발이 갖는 기술개발의 특징을 기술적 측면, 경제산업적 측면, 사회문화적 측면으로 분석하면 다음과 같다.

##### ○ 기술적 측면

- 시공 원천 기술의 개발
- 시공과정의 안전성을 검증하는 설계 및 해석 기술 개발

##### ○ 경제산업적 측면

- 자정식 사장교와 현수교의 경계 영역에서의 경제성 확보 교량 형식 제시로 장경간 교량 건설 비용 감소
- 해외 교량 건설 시장 개척에 있어 다양한 건설 옵션 추가로 경쟁력 확보

##### ○ 사회문화적 측면

- 경관적으로 미적인 면과 상징적인 면을 갖는 교량 형식의 다양화에 기여

### 1.3 관련분야의 국내외 기술개발 현황

일부타정식 사장교는 Gimsing에 의해 개념적으로 처음 제안되었으며, Müller (1992)에 의해 지간 중앙부 인장력을 제거하기 위한 bi-stayed system이 제안되었었다<sup>10)</sup>. 일본에서는 Otsuka 등(1990)<sup>11)</sup>이 중앙경간에 내부 힌지를 설치하는 일부타정식 합성 사장교를 연구하였고, Nagai 등은 중앙경간 1400m의 일부타정식 사장교를 연구한 적이 있다. 현재까지도 일부타정식 사장교에 대한 연구는 주로 중앙경간 1000m이상의 초장대 교량을 대상으로 진행되고 왔다(Xie et al., 1997; Sun et al., 2009; Zhibin et al., 2016).

국내에서는 Won 등(2008b, 2008c<sup>12)</sup>)이 중앙경간 340m의 일부타정식 사장교를 제안하여 구조적인 효과를 분석하여 자정식과 비교한 연구가 있으며, Won 등(2008a)이 동일한 일부타정식 사장교에 대해 시공단계 해석을 통해 온도효과를 이용한 FCM 공법의 key-segment를 폐합하는 연구를 수행하여 결과를 발표한 적이 있다. Won 등의 연구는 일부타정식 사장교의 가능성을 보였으나, 또한 향후 장대경간으로 경간장이 증가될 경우 발생할 수 있는 문제점과 이에 대한 상세 시공방법의 보완을 필요로 한다.

일부타정식 사장교에 대한 특허는 국내 4건, 미국 2건, PCT 1건, 중국 1건이 등록되어 있으며, 이 중에서 중국 1건을 제외한 미국과 PCT 등록건은 국내 특허 4건의 발명자가 해외에 출원한 특허로 연구과제 최초 제안시와 새로 추가된 특허는 없는 것으로 조사되었다. 표의 1~3번 특허는 처음 Gimsing이 제안한 1000m 이상의 일부타정식 사장교에서 중앙경간을 먼저 시공하는 방법에 대한 것과 중앙경간에 인장력을 도입하여 압축력을 저감시키는 방법으로 본 연구에서 개발한 시공기술과 차이가 있다. 표의 4번 특허는 온도를 이용한 방법으로 개념적 및 해석적으로만 증명되어 있다. 본 연구에서는 기존 특허와 차별화된 특허를 제안하여 출원하였다.

- 특허 출원번호: 10-2016-0094689 (접수번호 1-1-2016-0725215-14)
- 발명의 명칭: 고정단 변위제어장치 및 그를 이용한 일부타정식 사장교 키세그먼트 거더 폐합방법

10) Müller, J.(1992). "The Bi-stayed Bridge Concept - Overview of Wind Engineering Problems." Proceedings of the 1st International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, pp. 237-245.

11) Otsuka, H., Tanaka, H., Noguchi, J., Etoh, T. and Sakai, I.(1990). "Partially anchored composite cable-stayed bridge." Proceedings of the IABSE Symposium, Brussels, pp.347-351.

12) Won, J-H., Yoon, J-H., Park, S-H. and Kim, S-H. (2008c) "Effects of Partially Earth-anchored Cable Systems on Wind Dynamic Loads." Wind and Structures, Vol. 11, No. 6, pp. 441-453.

표 1.1 관련 기존 특허

| No | 출원국 | 특허명                                                                                                                                                                       | 출원인                                                                                          | 비고       |
|----|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1  | 국내  | 주경간 긴장수단을 이용한 일부 및 전부 타정식 사장교와 그 시공 방법(PARTIALLY AND FULLY EARTH-ANCHORED CABLE-STAYED BRIDGE USING MAIN SPAN PRESTRESSING APPRATUS AND CONSTRUCTION METHOD FOR THE SAME) | 지에스건설 주식회사, 오베아롭코리아(주)                                                                       |          |
| 2  | 국내  | 힌지 연결부를 이용한 일부 타정식 사장교 및 그 시공 공법 (PARTIALLY EARTH-ANCHORED CABLE-STAYED BRIDGE USING HINGE CONNECTION PARTS AND CONSTRUCTION METHOD FOR THE SAME)                         | 지에스건설 주식회사                                                                                   |          |
| 3  | 국내  | 긴장재와 측방 정착블록을 이용한 일부 타정식 사장교 시공 방법(PARTIALLY EARTH-ANCHORED CABLE-STAYED BRIDGE CONSTRUCTION METHOD USING MAIN SPAN PRESTRESSING APPRATUS AND ANCHORING BOX)              | 지에스건설 주식회사                                                                                   |          |
| 4  | 국내  | 온도 프리스트레싱 공법에 의한 일부타정식 사장교의시공방법(CONSTRUCTION METHOD OF PARTIALLY EARTH-ANCHORED CABLE-STAYED BRIDGE USING THERMAL PRESTRESSING CONSTRUCTION METHOD)                       | 연세대학교                                                                                        |          |
| 5  | 미국  | Method of constructing partially earth-anchored cable-stayed bridge using thermal prestressing technique                                                                  | Yonsei University                                                                            | 4번과 동일   |
| 6  | 미국  | Partially and fully earth-anchored cable-stayed bridges using main-span prestressing unit and method of constructing the same                                             | Jung Hwi Noh, Sang Hoon Lee, Jong Heon Park, Naeem U. Hussain, Matt Carter, Niels J. Gimsing | 1 번 과 동일 |
| 7  | PCT | PARTIALLY/COMPLETELY EARTH-ANCHORED AND CABLE-STAYED BRIDGE USING A MAIN SPAN TENSION MEANS, AND METHOD FOR CONSTRUCTING SAME                                             | GS ENGINEERING & CONSTRUCTION CORP., OVE ARUP & PARTNERS KOREA LTD.                          | 1 번 과 동일 |
| 8  | 중국  | Partial earth anchor intersecting cable-stayed bridge                                                                                                                     | Hunan University                                                                             |          |

## 1.4 연구개발 결과의 우수성 및 차별성

최근 국내 건설사들은 고부가 가치 시장으로 평가받고 있는 해외 장대교량 건설 시장에 참여하기 시작했다. 현대건설과 SK건설이 시공하고 있는 터키 보스포러스 제3교, 현대건설이 수주한 칠레 차카오 교량 외에도 장대교량 기술 선진국이라고 불리는 영국에도 삼성물산이 머시 게이트웨이 프로젝트 사장교 프로젝트에 참여한 것은 국내 건설사의 기술 기반 장대교량 시장 진입을 의미한다고 할 수 있다. 본 연구개발에서 개발된 일부타정식 사장교 시공기술은 건설사의 해외 시장 개척에 도움이 되는 또 하나의 무기이자 원천기술이 될 수 있으며, 향후 공동연구로 보다 발전될 수 있을 것이다.

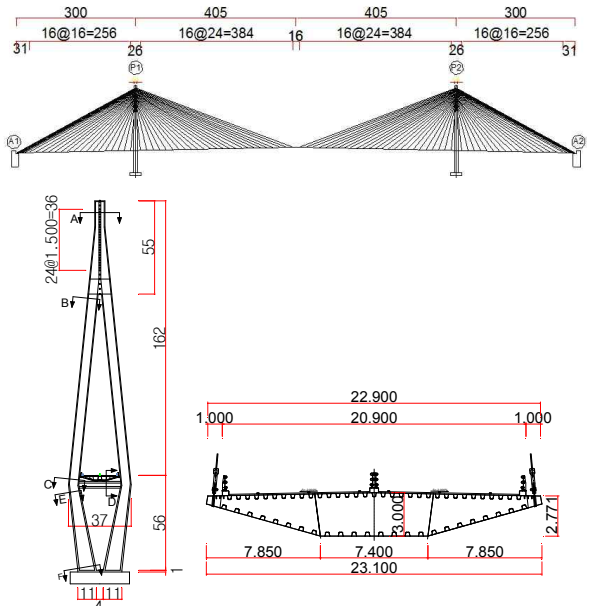
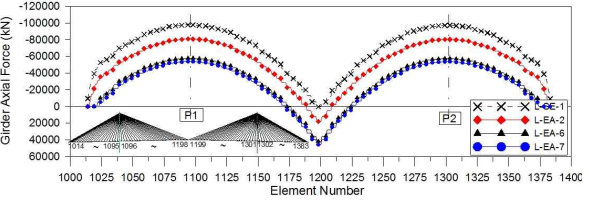
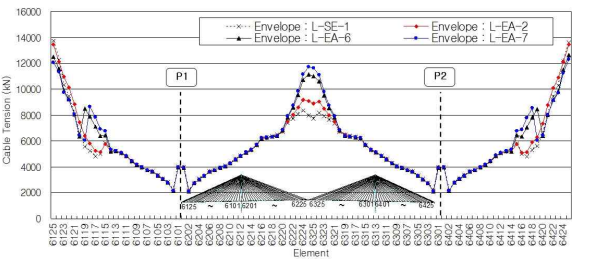
현재의 국내 장대교량 시장과 일부타정식 사장교의 기술개발의 필요성을 바탕으로 내부 역량과 외부 환경에 대한 SWOT분석을 실시하였다. 국내 사장교 기술은 자립화에 성공한 것으로 평가되고 있으며, 다수의 실적을 가지고 있다. 또한 고부가 가치 해외 교량 건설시장에 진입하였으며, 전문화된 기술역량을 확보하고 있다. 현 시점에서는 초장대의 흐름을 따르면서도 내부적으로 원천기술을 바탕으로 한 내실화가 절실히 필요하다고 할 수 있다. 본 연구 개발은 아직 시공실적이 전무하고 기술개발이 부족한 경간장 600-1000m의 일부타정식 사장교 기술을 개발하여 실제 시공에 적용하는 것으로 국가 R&D 투자를 시발점으로 원천기술을 확보하여 진입 시장의 점유율을 높일 수 있을 기회가 될 것이라고 판단한다.

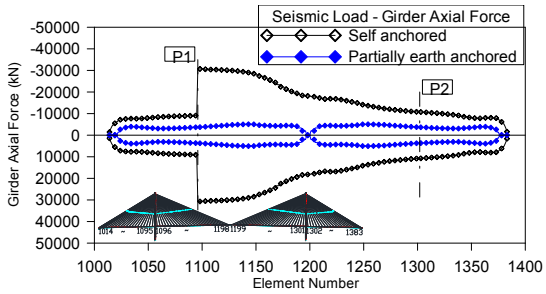
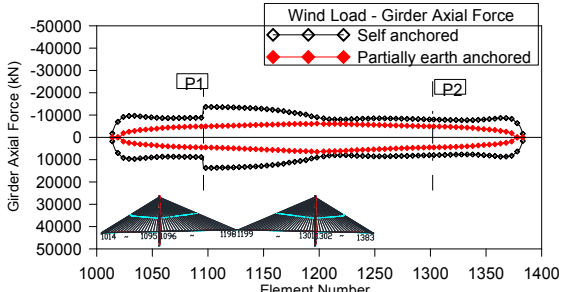
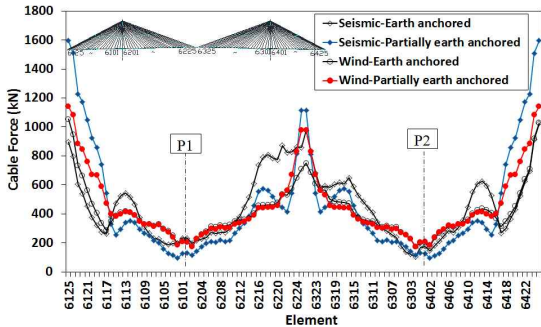
|                                                                                                                           |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <div>내부 역량</div> <div>외부 환경</div>                                                                                         | <b>강점(Strength)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 국내 사장교 기술 자립화</li> <li>▪ 국내 건설사 시공 실적 다수</li> <li>▪ 전문화된 연구진의 관련 분야 실적</li> </ul> | <b>약점(Weakness)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 초장대화에 초점을 둔 내실화 부족</li> <li>▪ 사장교 시공 원천 기술 부족</li> <li>▪ 건설사의 교량 신기술 R&amp;D 투자 부족</li> </ul> |
|                                                                                                                           | <b>기회(Opportunity)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 고부가 가치 해외 교량 건설 시장 진입 성공</li> <li>▪ 일부타정식 사장교 실용화 실적 전무</li> </ul>             | <b>SO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 국내 사장교 자립 기술 다양화 전략</li> <li>▪ 일부타정식 사장교 원천 시공기술 확보 전략</li> </ul>                                       |
| <b>위협(Threat)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 초장대 케이블 교량에 집중된 관심</li> <li>▪ 기술 선점 위한 개념 수준의 특허 난립</li> </ul> | <b>ST</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 경제성 분석을 통한 일부타정식 사장교의 활용성 부각 전략</li> <li>▪ 기술의 내실화를 통한 특허 회피 전략</li> </ul>                  | <b>WO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 국가 R&amp;D 투자 활용한 원천기술 확보 전략</li> <li>▪ 내실화를 통한 부가가치 증대 전략</li> </ul>                                   |
|                                                                                                                           |                                                                                                                                                | <b>WT</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 연구 실적 논문을 통해 홍보 인식 전환 전략</li> <li>▪ 일부타정식 사장교의 실용 특허 개발 전략</li> </ul>                                   |

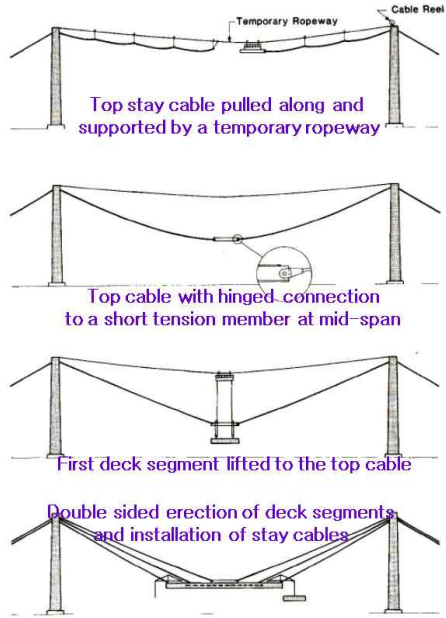
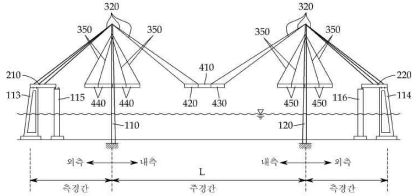
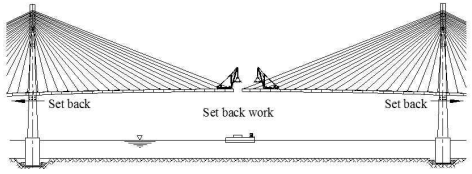
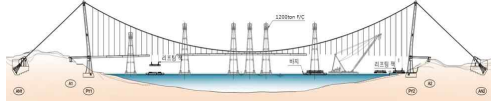
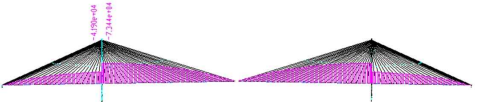
그림 1.8 SWOT 분석

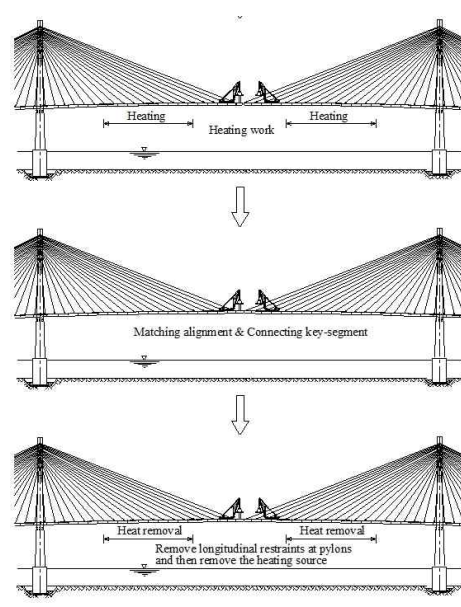
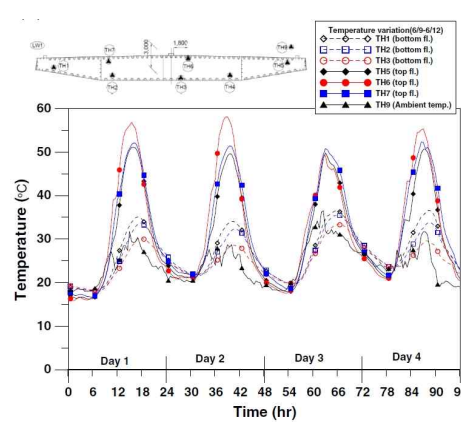
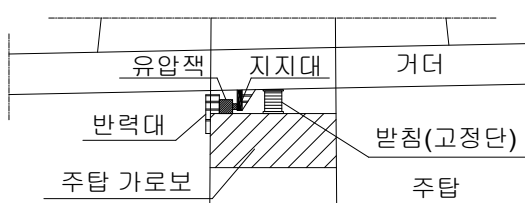
## 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

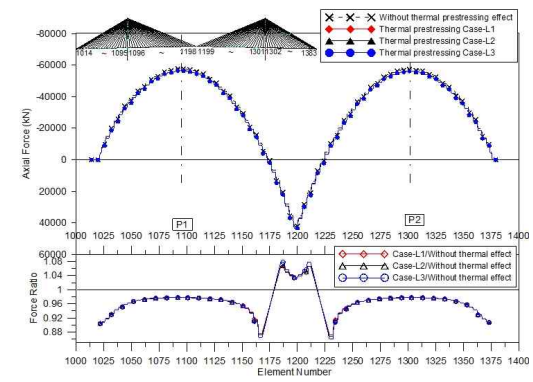
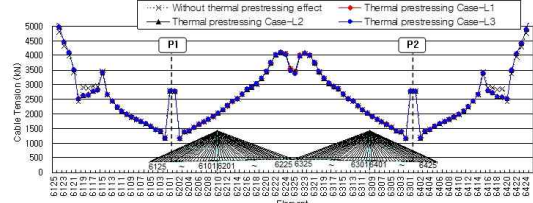
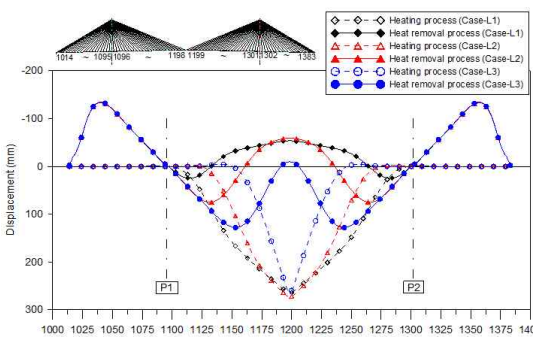
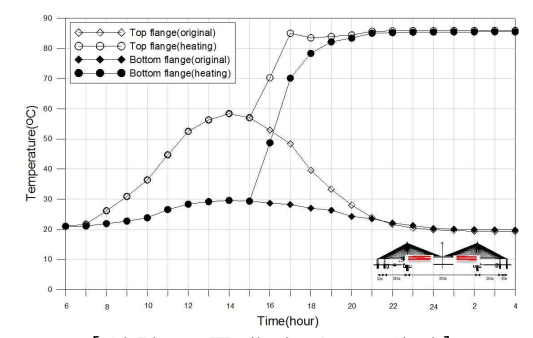
### 2.1 연구개발 결과 요약

| 연 차  | 연구 내용                       | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | <p>■최적 일부 타정 케이블 시스템 분석</p> | <p>1) 중앙경간 810m의 3경간 사장교 Concept 설계 수행</p>  <p>2) 자정식 VS 타정 케이블 수에 따른 일부타정식 부재력 비교<br/>- 거더 축력도</p>  <p>- 케이블 장력도</p>  <p>3) 주탑의 최대 휨모멘트 비교<br/>- 일부타정식 사장교에서 교축방향 최대 휨모멘트 60% 감소</p> <p>4)소결: 6쌍의 타정 케이블을 갖는 시스템을 최적으로 선정(L-EA-6)</p> |

| 연 차  | 연구 내용           | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | ■공용 중 동적 안전성 분석 | <p>1)자정식 사장교와 최적 일부타정식 사장교 모형에 대해 공용 중 동적 안전성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 주탑 모멘트<br/>: 고유진동수 변화로 풍하중에 의한 영향 47% 감소, 지진하중에 의한 영향 70% 감소</li> <li>- 지진하중에 의한 거더 축력 비교</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 풍하중에 의한 거더 축력 비교</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>- 케이블 장력 비교</li> </ul>  <p>2) 소결</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 타정 케이블에서 주탑 등의 안전성 확보 위해 케이블 장력이 증가되며, 거더와 주탑의 안전성은 향상됨.</li> </ul> |

| 연 차  | 연구 내용          | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | ■ 기존 제안 시공법 분석 | <p>1) Gimsing 제안법</p>  <p>2) 국내 관련 특허</p>  <p>3) 소결<br/>: 기존 방법의 경우 장경간 사장교에 적용 시 별도 가설 장비 필요하므로 가설비 상승</p>                                                                                                           |
|      | ■ 특수교량 시공법 분석  | <p>1) 사장교 FCM 공법</p>  <p>2) 현수교 가설 공법</p>  <p>3) 일부타정식 사장교 FCM 공법 문제점</p>  <p>→ 폐합 전 주탑 고정부 압축력 차이로 set-back시 2.44m 움직임 발생</p> |

| 연 차  | 연구 내용    | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | ■ 시공법 제안 | <p>1) FCM+온도 활용 폐합 방법</p> <p>· 제안방법</p>  <p>· 시공 중 사장교 온도 분포 분석</p>  <p>2) FCM +변위제어 장치 방법</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- set-back을 제어할 수 있는 장치를 고안하여 축력 비대칭에 의한 지나친 변위를 제거하는 방법</li> <li>- set-back을 위해 고정장치를 해제하기 전에 반력대, 유압잭, 지지대로 구성된 고정단 변위제어장치를 설치</li> </ul>  |

| 연 차  | 연구 내용       | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도 | ■ 해석을 통한 검증 | <p>1) FCM+온도 활용 폐합 방법</p>  <p>[거더 축력도]</p>  <p>[케이블 장력도]</p>  <p>[거더 처짐]</p>  <p>[상하부 플랜지 온도 변화]</p> <p>→ 플랜지 온도 과다로 작업성 저하 &amp; 기존 특허와의 차이 미비</p> <p>2) FCM +변위제어 장치 방법</p> <p>→ set-back과 reset-back이 구조계 변화 없이 진행되어 잔류 응력 발생하지 않음.</p> |

| 연 차       | 연구 내용                     | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
|-----------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----|---------|----------|---------------------------|-----|-----------|-------|----------|------------------------|-----|-----------|-------|----|----------|--|------|----------------------|------|----------------------|------|-----|----------------------|------|----------------------|------|
| 2차년도      | ■시공 중 안전성 평가              | <div>1) 중앙경간 810m의 3경간 사장교 설계</div> <div>- 자정식과 일부타정식 사장교(측경간 6쌍의 케이블들이 타정)</div> <div>- 시공 중 불리한 시공 상태에 대해 안전성 검토</div> <table><tr><th>모형</th><th>설명</th><th>케이블 시스템</th></tr><tr><td>Case1-SA</td><td rowspan="2">측경간 완성 전 캔틸레버 상태가 가장 긴 경우</td><td>자정식</td></tr><tr><td>Case1-PEA</td><td>일부타정식</td></tr><tr><td>Case2-SA</td><td rowspan="2">측경간 완성 후 중앙경간부가 폐합되기 전</td><td>자정식</td></tr><tr><td>Case2-PEA</td><td>일부타정식</td></tr></table> <div>2) 시공 중 주탑 최대 발생 휨모멘트 비교</div> <table><tr><th>하중</th><th colspan="2">비율 (B/A)</th></tr><tr><td rowspan="2">지진하중</td><td>Case1-PEA/Case1-SA =</td><td>0.92</td></tr><tr><td>Case2-PEA/Case2-SA =</td><td>0.99</td></tr><tr><td rowspan="2">풍하중</td><td>Case1-PEA/Case1-SA =</td><td>0.51</td></tr><tr><td>Case2-PEA/Case2-SA =</td><td>0.76</td></tr></table> | 모형      | 설명 | 케이블 시스템 | Case1-SA | 측경간 완성 전 캔틸레버 상태가 가장 긴 경우 | 자정식 | Case1-PEA | 일부타정식 | Case2-SA | 측경간 완성 후 중앙경간부가 폐합되기 전 | 자정식 | Case2-PEA | 일부타정식 | 하중 | 비율 (B/A) |  | 지진하중 | Case1-PEA/Case1-SA = | 0.92 | Case2-PEA/Case2-SA = | 0.99 | 풍하중 | Case1-PEA/Case1-SA = | 0.51 | Case2-PEA/Case2-SA = | 0.76 |
|           | 모형                        | 설명                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 케이블 시스템 |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| Case1-SA  | 측경간 완성 전 캔틸레버 상태가 가장 긴 경우 | 자정식                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| Case1-PEA |                           | 일부타정식                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| Case2-SA  | 측경간 완성 후 중앙경간부가 폐합되기 전    | 자정식                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| Case2-PEA |                           | 일부타정식                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| 하중        | 비율 (B/A)                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| 지진하중      | Case1-PEA/Case1-SA =      | 0.92                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
|           | Case2-PEA/Case2-SA =      | 0.99                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
| 풍하중       | Case1-PEA/Case1-SA =      | 0.51                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
|           | Case2-PEA/Case2-SA =      | 0.76                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |
|           | ■물량 감소 효과 분석              | <div>1) 중앙경간 810m의 3경간 사장교 설계</div> <div>- 자정식과 일부타정식 사장교(측경간 6쌍의 케이블들이 타정)</div> <div>- 거더, 주탑, 케이블 물량 감소 분석</div> <div><div>SECTION A: 0.45, 2.00, 2.00, 0.45, 7.00, 6.00</div><div>SECTION B: 0.45, 5.10, 0.45, 7.00, 6.00</div><div>SECTION C: 0.45, 5.10, 0.45, 7.00, 6.00</div><div>SECTION D: 1.00, 0.50, 1.00, 0.1, 0.1, 4.50</div><div>SECTION E: 0.00, 4.00, 0.40, 1.5, 6.00</div><div>SECTION F: 0.00, 8.00, 1.00, 0.01, 11.00</div><div>Legend:<br/>◆ Free in longitudinal and transverse direction ↔ Free in longitudinal direction<br/>● Fixed in longitudinal and transverse direction ⚡ Free in transverse direction<br/>P1 ↔ ◆ for Partially earth anchored cable system<br/>(●)(⚡) for Self anchored cable system</div></div>                                                                  |         |    |         |          |                           |     |           |       |          |                        |     |           |       |    |          |  |      |                      |      |                      |      |     |                      |      |                      |      |

| 연 차  | 연구 내용         | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2차년도 | ■ 물량 감소 효과 분석 | <p>2) 거더 물량 감소 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>자정식과 일부타정식 사장교의 주탑부 거더의 최대 응력 수준 유사하게 단면 재설계</li> <li>최대 압축력을 받는 주탑부 거더 : 자정식의 거더 단면적<br/>= 1.8(일부타정식 사장교 거더 단면적)</li> <li>전 단면에 걸친 개략검토 : 자정식 거더의 평균 단면적<br/>= 1.32(일부타정식 거더 평균 단면적)</li> </ul> <p>→ 전체 거더 강재량을 검토한 결과, 일부타정식 사장교의 적용으로 강재량 24% 감소 가능한 것으로 분석됨.</p> |
|      |               | <p>3) 주탑 물량 감소 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>주탑 하단부 leg 단면에 대해 P-M 상관도 분석</li> <li>일부타정식 단면 감소 분석</li> <li>자정식 P-M 상관도</li> </ul>                                                                                                                                                                                 |
| 3차년도 | ■ 물량 감소 효과 분석 | <p>자정식과 일부타정식 사장교의 주탑부 leg 단면에 대해 P-M 상관도를 분석하고, 일부타정식 단면 감소를 분석한 결과, 일부타정식 사장교의 적용으로 주탑부 leg 단면의 강재량 13.1% 감소 가능한 것으로 분석됨.</p>                                                                                                                                                                                                   |
|      |               | <p>4) 단면 감소 효과 분석</p> <p>자정식과 일부타정식 사장교의 주탑부 leg 단면에 대해 P-M 상관도를 분석하고, 일부타정식 단면 감소를 분석한 결과, 일부타정식 사장교의 적용으로 주탑부 leg 단면의 강재량 13.1% 감소 가능한 것으로 분석됨.</p>                                                                                                                                                                             |

| 연 차  | 연구 내용                     | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2차년도 | ■물량 감소 효과 분석              | <ul style="list-style-type: none"> <li>· 주탑 중간부 leg               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 콘크리트 물량 감소 : 3.7%</li> <li>- 사용 철근량 감소 : 3.3%</li> </ul> </li> <li>· 주탑 상단부 leg               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 감소효과 미비(축력지배 단면)</li> </ul> </li> </ul> |
|      |                           | 4) 케이블 물량 감소 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 동일 거더 단면에 대해서는 일부타정식 사장교에서 케이블 장력이 증가하나, 자정식 사장교에서는 거더 중량이 증가함</li> <li>- 거더 단면 증가를 반영해서 케이블 물량 검토</li> </ul> → 일부타정식 사장교의 케이블 물량은 자정식에 비해 0.8% 감소함.                                                                                |
|      | ■경제성 평가<br>(공사비 감소 효과 분석) | 1) 일부타정식 사장교의 적용으로 상부 거더, 주탑, 케이블의 물량 감소 가능<br>→ 공사비 감소 가능<br><br>2) 기존 교량 공사비 내역을 기준으로 개략적인 공사비 감소를 검토한 결과,<br>→ 자정식에 비해 일부타정식 사장교 적용으로 공사비 15% 감소                                                                                                                                       |

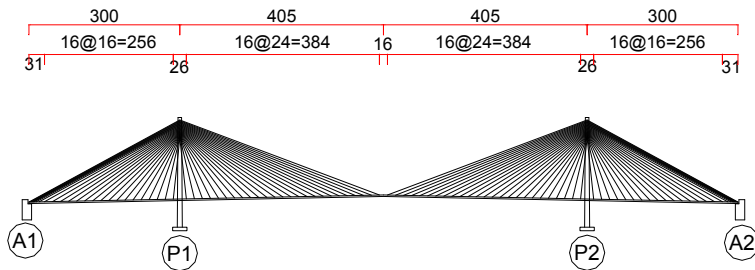
## 2.2 연구개발 주요 내용

가. 최적 일부타정 케이블 시스템 분석

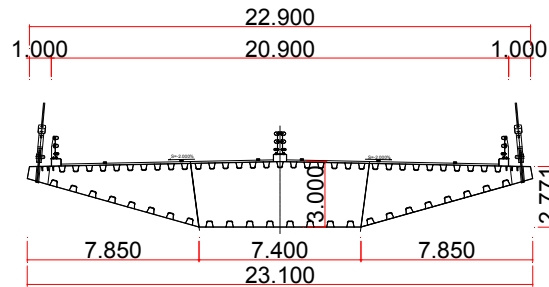
(1) 3경간 일부타정식 케이블 사장교 개념 설계

(가) 주요 단면과 물성치

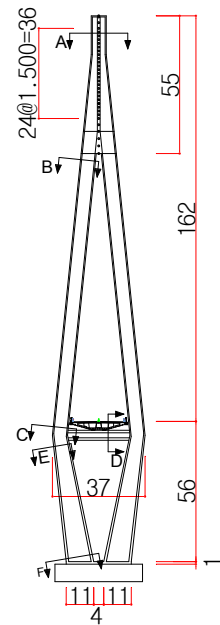
본 과제에의 대상인 경간장 600-1000m 일부타정식 사장교의 시공기술을 개발하기 위해 중앙경간 810m의 사장교를 개념 설계 수준으로 설계하였다.



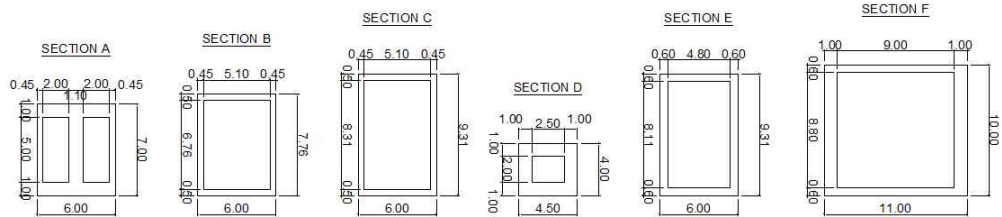
(a) 경간구성



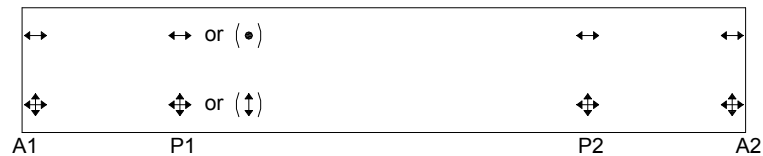
(b) 거더 단면도



(c) 주탑



(d) 주탑 단면도



- ↔ Free in longitudinal and transverse direction ↔ Free in longitudinal direction
- Fixed in longitudinal and transverse direction ↑ Free in transverse direction
- P1 { ↔ ↔ for Partially earth anchored cable system
- (•)(↑) for Self anchored cable system

(e) 받침 조건

그림 2.1 개념 설계 교량

경간 구성은 300m+810m+300m로 총 교량 길이는 1,410m이다. 강상형 박스 단면의 폭은 22.90m이며, 높이는 2.77m인 4차로 교량이며, 주탑은 218m의 콘크리트 주탑으로 구성하였다. 상세한 내용은 다음 그림 2.1과 같다. 주요 물성은 다음 표와 같이 설정되었다.

표. 2.1 대상 교량의 주요 단면 물성치

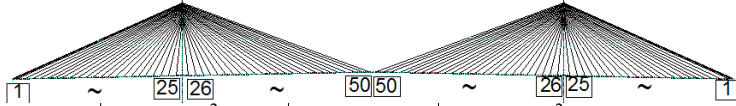
| Member |                | $A_{CS}$ (m <sup>2</sup> )                                                         | $I_y$ (m <sup>4</sup> )    | $I_z$ (m <sup>4</sup> ) |                            |
|--------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Girder |                | 1.022                                                                              | 42.946                     | 1.254                   |                            |
| Pylon  | United part    | 22.006–38.978                                                                      | 71.305–663.741             | 129.983–345.591         |                            |
|        | Separated part | 12.097–30.230                                                                      | 65.054–544.107             | 102.823–395.802         |                            |
| Cable  |                |  |                            |                         |                            |
|        |                | Cable No.                                                                          | $A_{CS}$ (m <sup>2</sup> ) | Cable No.               | $A_{CS}$ (m <sup>2</sup> ) |
|        |                | 1                                                                                  | 0.0150                     | 26                      | 0.0048                     |
|        |                | 2                                                                                  | 0.0141                     | 27                      | 0.0030                     |
|        |                | 3                                                                                  | 0.0114                     | 28                      | 0.0033                     |
|        |                | 4                                                                                  | 0.0108                     | 29                      | 0.0036                     |
|        |                | 5                                                                                  | 0.0096                     | 30                      | 0.0039                     |
|        |                | 6                                                                                  | 0.0084                     | 31                      | 0.0045                     |
|        |                | 7                                                                                  | 0.0081                     | 32                      | 0.0045                     |
|        |                | 8                                                                                  | 0.0081                     | 33                      | 0.0048                     |
|        |                | 9                                                                                  | 0.0081                     | 34                      | 0.0048                     |
|        |                | 10                                                                                 | 0.0081                     | 35                      | 0.0051                     |
|        |                | 11                                                                                 | 0.0072                     | 36                      | 0.0057                     |
|        |                | 12                                                                                 | 0.0066                     | 37                      | 0.0060                     |
|        |                | 13                                                                                 | 0.0063                     | 38                      | 0.0063                     |
|        |                | 14                                                                                 | 0.0060                     | 39                      | 0.0066                     |
|        |                | 15                                                                                 | 0.0057                     | 40                      | 0.0072                     |
|        |                | 16                                                                                 | 0.0051                     | 41                      | 0.0081                     |
|        |                | 17                                                                                 | 0.0048                     | 42                      | 0.0081                     |
|        |                | 18                                                                                 | 0.0048                     | 43                      | 0.0081                     |
|        |                | 19                                                                                 | 0.0045                     | 44                      | 0.0081                     |
|        |                | 20                                                                                 | 0.0045                     | 45                      | 0.0084                     |
|        |                | 21                                                                                 | 0.0039                     | 46                      | 0.0096                     |
|        |                | 22                                                                                 | 0.0036                     | 47                      | 0.0096                     |
|        |                | 23                                                                                 | 0.0033                     | 48                      | 0.0102                     |
|        |                | 24                                                                                 | 0.0030                     | 49                      | 0.0108                     |
|        |                | 25                                                                                 | 0.0048                     | 50                      | 0.0108                     |

표 2.2 대상 교량의 주요 재료 물성치

| 재료               | 부재         | 탄성계수<br>( $E_{CS}$ , kN/m <sup>2</sup> ) | 포아송 비 | 단위중량<br>( $g_s$ , kN/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------|------------------------------------------|-------|---------------------------------------|
| Concrete (50MPa) | Pylon      | $3.10 \cdot 10^7$                        | 0.167 | 24.53                                 |
| Steel (SM520)    | Girder     | $2.10 \cdot 10^8$                        | 0.300 | 77.00                                 |
| Cable (1770MPa)  | Stay cable | $2.00 \cdot 10^8$                        | 0.300 | 77.00                                 |

(나) 적용하중

적용 하중은 시공단계 하중, 활하중과 지진하중, 풍하중이 주요 하중으로 고려되었다. 시공단계 하중으로는 자중, 추가 사하중, 가설 작업하중 등이 고려되었다. 자중 계산에 적용된 단위 중량은 강재의 경우 77.0 kN/m<sup>3</sup>, 콘크리트의 경우 24.5kN/m<sup>3</sup>이 적용되었으며, 거더의 경우 부부재의 영향을 반영하기 위해 활중계수 1.3을 적용하였으며, 케이블의 경우 MS type를 대상으로 하여 활중계수 1.18을 적용하였다.

포장, 차량 방호벽, 난간, 조명등, 스포일러(spoiler), 편이시설 등의 추가적인 하중의 영향을 고려하기 위해 55.45kN/m를 재하하였으며, 데릭크레인의 운영으로 인한 영향과 작업하중(10kN/m)도 고려되었다.

활하중은 도로교설계기준에 따른 1등급으로 반영하였으며, 지진하중의 경우도 도로교설계기준에 따라 적용되었다. 지진하중은 다중모드 스펙트럼 해석 방법을 적용하였으며, 탄성지진응답계수는 도로교설계기준에 따라 다음 식과 같이 적용하였다.

$$C_{sm} = 1.2AS / T_m^{2/3} \leq 2.5A \quad (2.1)$$

여기서, 가속도계수는 0.154이며, 지반계수는 1.2이다. 지진해석의 경우 응답스펙트럼 해석방법이 적용되었다. 해석에 고려된 진동모드 수는 245개이다.

동적 풍하중의 영향은 장경간 교량의 풍하중 거동 분석에 효율적으로 적용되는 다중모드 버펫팅 해석 방법을 통해 분석하였다(Simiu and Scanlan, 1996<sup>13</sup>); Jones and Scanlan, 2001<sup>14</sup>). 동적 풍하중은 지진하중과 달리 저차모드의 응답이 중요하므로 본 연구에서는 50개의 진동모드가 버펫팅 해석에 적용되었다. 구조댐핑은 0.005로 가정되었으며, 공기동역학적 admittance 함수는 일정상수 1로 가정되었다. 풍속 분포는 대수 기하학적 분포로 가정되었으며, 속도 변동 성분의 스펙트럼 밀도 함수는 Kaimal

13) Simiu, E. and Scanlan, R. H. (1996), Wind effects on structures, 3rd edition, John Wiley&Sons, NewYork.

14) Jones, N.P. and Scanlan, R.H. (2001). "Theory and Full-bridge Modeling of Wind Response of Cable-supported Bridges." Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 365-375.

spectrum 함수로 가정하였다. 해석에 적용된 변동 풍속에 대한 기본 물성치는 Table 3과 같으며,  $V_b$ 는 36.8 m/s,  $z_0$ 와  $k_t$ 는 교축 직각 방향 바람에 대해 각각 0.0075와 0.17, 교축방향 바람에 대해서는 각각 0.05와 0.19가 적용되었다.

## (2) 자정식과 타정 케이블 수에 따른 일부타정식 사장교 부재력 비교

### (가) FE 해석 모델

대상 교량에 대해 RM 프로그램을 활용해 FE해석을 수행하였다<sup>15)16)</sup>. 모든 케이블이 거더에 정착된 자정식의 경우와 측경간 외측 케이블 일부가 타정된 경우를 대상으로 해석이 수행되었으며, 최적의 타정 케이블 시스템을 찾기 위해 타정 케이블의 수를 변화시키며 해석을 수행하였다. 다음 그림은 외측 케이블 6쌍이 타정된 시스템의 FE해석 모델을 나타내고 있다.

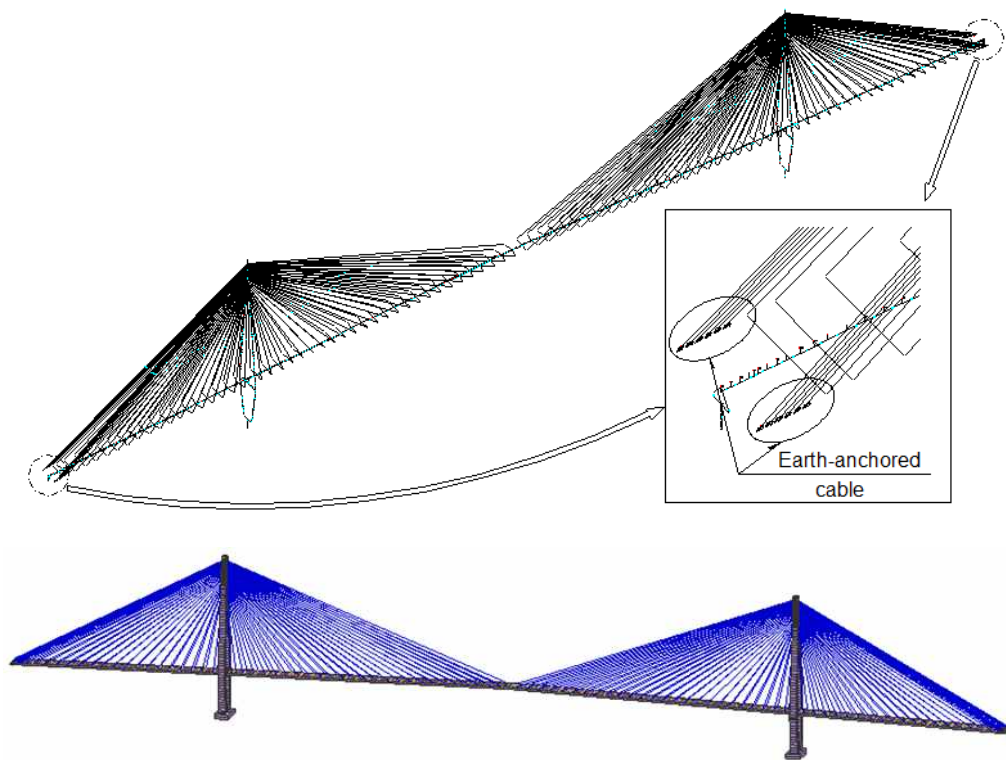


그림 2.2 대상교량의 FE 해석 모델

자중, Derrick crane 운영하중, 작업하중, 2차사하중을 고려한 FCM 시공단계 해석을

15) Pircher, H. (2004). User Guide for RM2004 and GP2004, TDV Ges.m.b.H., Austria.

16) Janjic, D.; Pircher, M.; Pircher, H. (2003). "Optimization of cable tensioning in cable-stayed bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 131-137.

진행하였으며, 완성된 상태에 대해 활하중과 지진하중, 풍하중을 고려하여 해석을 수행하였다. 최대 부재력을 산정하기 위해 사용된 하중조합은 다음 표와 같은 LRFD 기준을 적용하였다.

표 2.3 적용 하중조합

| 하중               | 하중 조합                  |
|------------------|------------------------|
| D = 사하중(시공단계 하중) | $1.25D + 1.75L$        |
| L = 활하중          | $1.25D + 1.4W$         |
| W = 풍하중          | $1.25D + 1.35L + 0.4W$ |
| E = 지진하중         | $1.25D + 0.25L + 1.0E$ |

대상 교량의 최적 일부타정 케이블 시스템을 결정하기 위해 타정 케이블 수를 변화시키면서 구조 거동을 분석하였으며, 자정식으로 모형화한 경우도 해석하여 결과를 비교하였다. 해석에 고려된 모형은 다음 표와 같다.

표 2.4 해석에 적용된 모형 설명

| 모형     | 설명                               |
|--------|----------------------------------|
| L-SE-1 | 자정식 사장교 모형                       |
| L-EA-2 | 측경간 외측 케이블 2 쌍이 타정된 일부타정식 사장교 모형 |
| L-EA-6 | 측경간 외측 케이블 6 쌍이 타정된 일부타정식 사장교 모형 |
| L-EA-7 | 측경간 외측 케이블 7 쌍이 타정된 일부타정식 사장교 모형 |

#### (나) 거더에 발생하는 부재력 비교

자정식과 타정 케이블 수의 변화에 따른 일부 타정식 사장교의 거더에 발생하는 모멘트도를 분석한 결과, 타정 케이블 수의 증가에 따라 타정케이블들 인접부의 거더 휨 모멘트가 다소 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다.

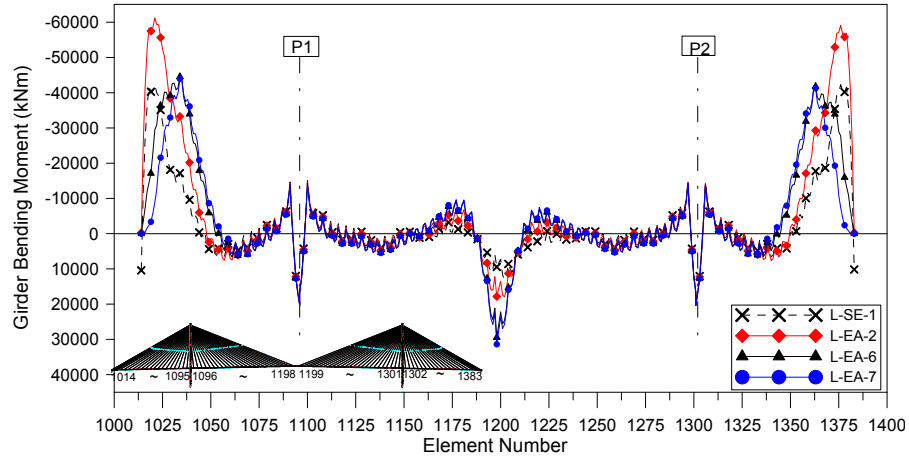


그림 2.3 시공 완료 시 거더에 발생하는 모멘트 분포도

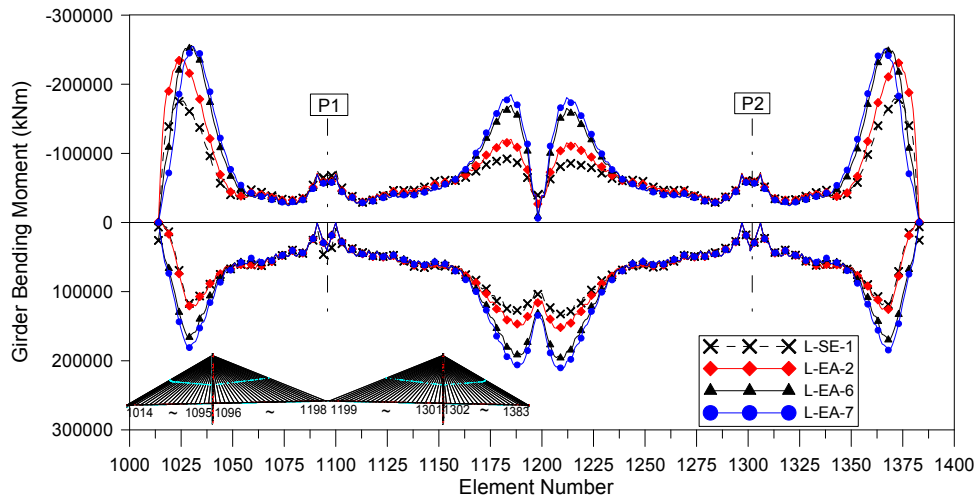


그림 2.4 하중조합 반영한 거더 휨모멘트 포락선도

타정 케이블 수 변화에 따른 거더에 발생하는 모멘트 변화를 분석하였다. 하중 조합의 최댓값을 비교하면, 타정 케이블 수가 증가함에 따라 주탑부 근처 거더에서 발생하는 최대 압축력은 크게 감소한다. 2쌍 타정시 최대 압축력은 17% 감소하고, 6쌍을 타정시킬 경우, 41% 감소하며, 7쌍 타정시 약 45% 감소된 것으로 나타났으므로 일반적으로 알려져 있는 일부 타정식 사장교의 구조적 효과를 확인 할 수 있다.

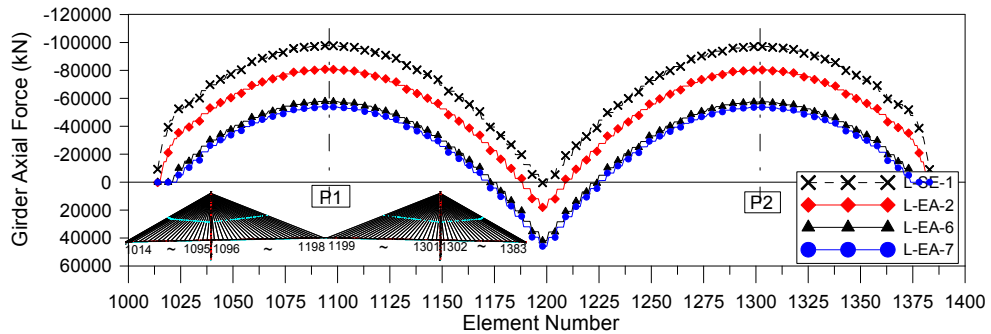


그림 2.5 시공 완료 시 거더에 발생하는 축력 분포도

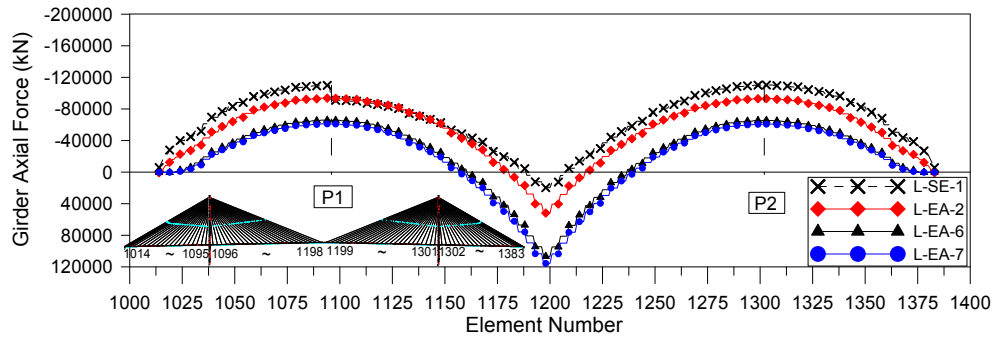


그림 2.6 하중조합 반영한 거더 축력 분포도(최대값 조합)

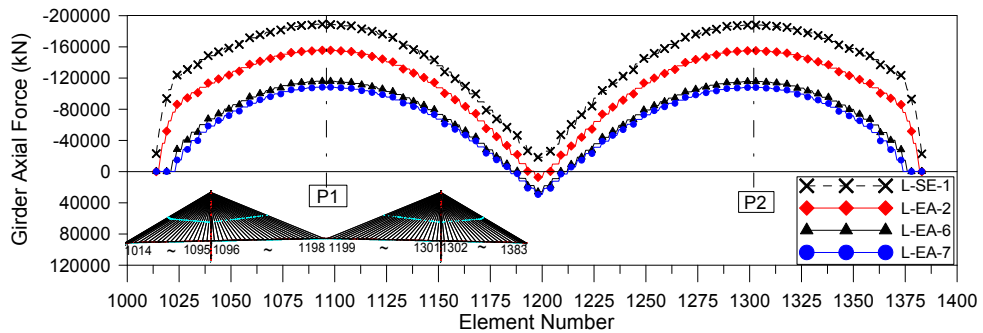


그림 2.7 하중조합 반영한 거더 축력 분포도(최소값 조합)

(다) 타정 케이블 수 변화에 따른 케이블 장력의 변화 분석

타정 케이블의 설치로 측경간 케이블의 장력 변화가 발생하며, 타정 케이블 인접 부분에서 변화가 크게 발생하였다. 중앙경간부에서는 타정 케이블 수 증가함에 따라 케이블 장력이 증가되므로, 타정 케이블 수 선택에 있어 중앙부 케이블 장력 변화를 깊게 살펴보아야 한다. 단, 본 결과는 일부타정식의 거더 압축력 감소효과로 거더 단면적 감소에 의해 발생하는 케이블 장력 감소는 반영하지 않은 결과이다.

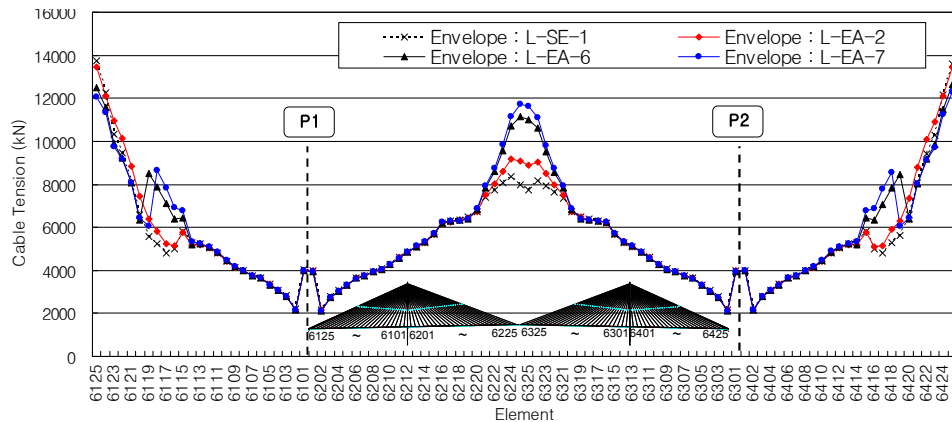


그림 2.8 하중조합 반영한 케이블 장력 포락선도

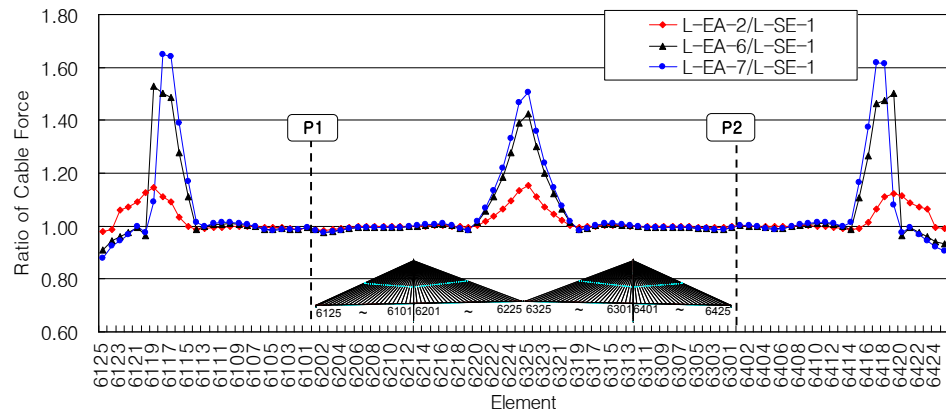


그림 2.9 자정식과 일부타정식 케이블 장력 비교

(라) 주탑 거동에 대한 일부 타정 케이블 시스템의 효과 분석

타정 케이블 시스템은 주탑의 교축방향 거동에 영향을 미치므로 주탑의 교축방향 최대 휨모멘트를 비교하여 다음 표에 나타내었다. 앵커 케이블에 해당하는 외측 케이블이 교량 외부에 정착(타정)됨으로써 주탑의 교축방향 거동을 제어할 수 있으므로 일부 타정 케이블 시스템에서는 주탑의 교축방향 모멘트가 최대 60% 감소되는 것으로 분석되었다.

표 2.5 케이블 시스템에 따른 주탑의 최대 휨모멘트 비교 (kNm)

| 하중 및 하중조합        | L-SE-1  |        | L-EA-2  |        | L-EA-6  |        | L-EA-7  |        |
|------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                  | Mz      | Ratio* | Mz      | Ratio* | Mz      | Ratio* | Mz      | Ratio* |
| 고정하중(D)          | 43966   | 1.00   | 38201   | 0.87   | 17982   | 0.41   | 10439   | 0.24   |
| 활하중(L)           | 692899  | 1.00   | 637293  | 0.92   | 578407  | 0.83   | 562010  | 0.81   |
| 풍하중(W)           | 1431465 | 1.00   | 715088  | 0.50   | 609108  | 0.43   | 595394  | 0.42   |
| 지진하중(E)          | 2227891 | 1.00   | 636381  | 0.29   | 664344  | 0.30   | 667547  | 0.30   |
| 1.25D+1.75L      | 1267531 | 1.00   | 1163014 | 0.92   | 1034690 | 0.82   | 996566  | 0.79   |
| 1.25D+1.4W       | 2059009 | 1.00   | 1048874 | 0.51   | 875229  | 0.43   | 846600  | 0.41   |
| 1.25D+1.35L+0.4W | 1562957 | 1.00   | 1194132 | 0.76   | 1046970 | 0.67   | 1009920 | 0.65   |
| 1.25D+0.25L+1.0E | 2456073 | 1.00   | 843456  | 0.34   | 831423  | 0.34   | 821098  | 0.33   |
| Envelope value   | 2456073 | 1.00   | 1194132 | 0.49   | 1046970 | 0.43   | 1009920 | 0.41   |

\* Moment ratio for self-anchored cable system (L-SE-1).

(마) 부반력 변화와 신축이음부 신축량 변화

□ 교대부 부반력 변화와 신축이음부 신축량 변화를 분석한 결과, 측경간 외측 케이블들이 타정됨으로 교대부에 발생하는 받침 부반력은 60~70% 크게 감소됨을 확인할 수 있으나, 신축이음부 변위는 증가되는 것으로 분석되었다.

표 2.6 부반력 비교 (kN)

| 하중조합             | L-SE-1 |        | L-EA-2 |        | L-EA-6 |        | L-EA-7 |        |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                  | 부반력    | Ratio* | 부반력    | Ratio* | 부반력    | Ratio* | 부반력    | Ratio* |
| 1.25D+1.75L      | 31266  | 1.00   | 22514  | 0.72   | 11685  | 0.37   | 9811   | 0.31   |
| 1.25D+1.4W       | 19980  | 1.00   | 14666  | 0.73   | 5141   | 0.26   | 3660   | 0.18   |
| 1.25D+1.35L+0.4W | 29106  | 1.00   | 21123  | 0.73   | 10429  | 0.36   | 8614   | 0.30   |
| 1.25D+0.25L+1.0E | 18154  | 1.00   | 12969  | 0.71   | 4258   | 0.23   | 3014   | 0.17   |
| Envelope value   | 31266  | 1.00   | 22514  | 0.72   | 11685  | 0.37   | 9811   | 0.31   |

\* 자정식 사장교(L-SE-1)에 대한 발생 부반력 비

표 2.7 신축이음부 신축량 비교

(mm)

| 하중 및 하중조합 |      | L-SE-1 | L-EA-2 | L-EA-6 | L-EA-7 |
|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| 고정하중(D)   |      | -70.7  | 4.9    | 122.7  | 141.1  |
| D+L+0.3W  | +변위  | -7.1   | 564.6  | 889.6  | 1000.9 |
|           | - 변위 | -181.6 | -587.1 | -651.4 | -721.5 |
| D+E       | +    | 108.7  | 497.5  | 462.5  | 484.5  |
|           | -    | -250.1 | -487.7 | -217.0 | -202.2 |
| Envelope  | +    | 108.7  | 564.6  | 889.6  | 1000.9 |
|           | -    | -250.1 | -587.1 | -651.4 | -721.5 |

(바) 대상 교량에 대한 최적 일부타정 케이블 시스템

자정식 사장교와 일부타정식 사장교의 구조 효과를 전반적으로 비교한 결과, 일부타정식 사장교는 알려진 바와 같이 거더부 압축력 감소에 효과가 있다. 또한, 주탑부 휨 모멘트 감소가 커서 주탑의 단면 크기를 감소시킬 수 있다. 반면, 신축이음부 증가와 케이블 장력이 일부 증가되는 단점을 갖고 있다. 그러나 거더부 압축력 감소에 기인한 거더 단면 감소효과가 반영되면, 케이블 장력의 증가는 미소할 것으로 판단된다.

표 2.8 자정식과 일부타정식 사장교 구조효과 비교

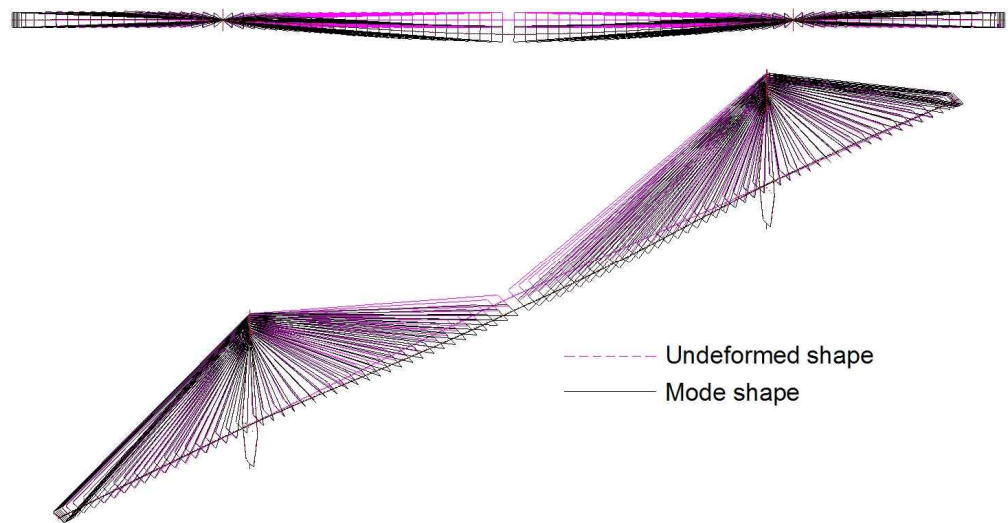
| 부재력       |       | 자정식 케이블 시스템 | 일부타정식 케이블 시스템 |
|-----------|-------|-------------|---------------|
| 거더        | 휨 모멘트 | ○           |               |
|           | 축력    |             | ◎             |
| 케이블 장력    |       | △           | △             |
| 주탑 휨모멘트   |       |             | ◎             |
| 받침부 부반력   |       |             | ◎             |
| 신축이음부 이동량 |       | ◎           |               |

Symbols: ◎-very good system, ○-relatively good system, △-similar effect system

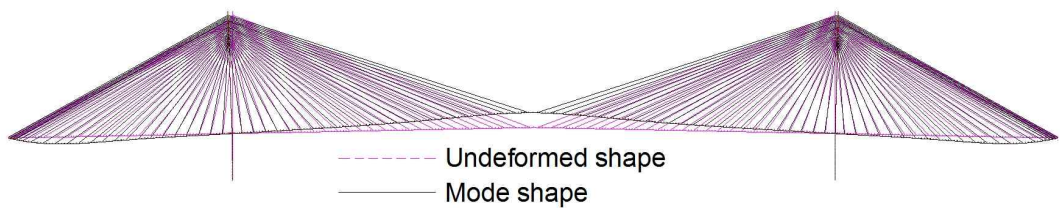
타정 케이블 변화에 따른 다양한 부재력을 비교한 결과, 대상교량에 대한 최적 일부타정식 케이블 시스템은 측경간 외측 케이블 6 쌍이 타정된 모형인 것으로 분석되었다.

## 나. 동적 안전성 분석

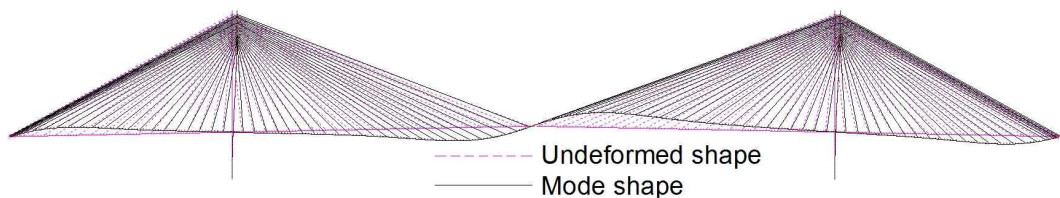
타정된 케이블은 주탑 거동을 보다 직접적으로 제어하기 때문에 일부타정식 모형은 자정식 모형과 비교하여 진동 모드와 고유진동수의 변화가 발생할 수 있다. 자정식 사장교와 일부타정식 사장교 모형의 저차 모드 진동형상을 분석하여 그림 2.10과 그림 2.11에 나타내었다. 자정식 사장교 모형의 경우, 1차 모드는 교축직각방향, 2차 모드와 3차 모드에서는 연직방향 진동이 나타났으나, 일부타정식 사장교 모형에서는 1차 모드는 동일하나 2차 모드에서 연직과 교축방향이 결합된 형태의 진동모드가 나타났으며, 3차 모드에서 연직방향 진동 모드가 발생하였다.



(a) 1차 진동모드( $f=0.0951\text{Hz}$ , transverse direction)

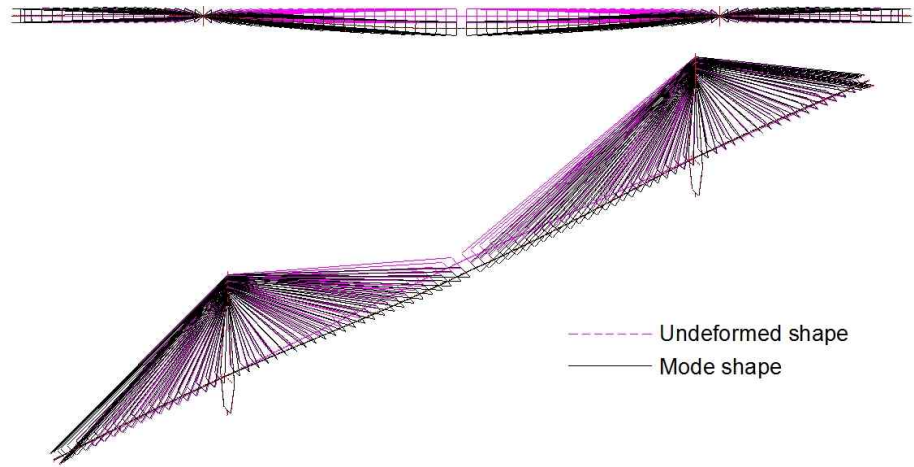


(b) 2차 진동모드( $f=0.2215\text{Hz}$ , vertical direction)

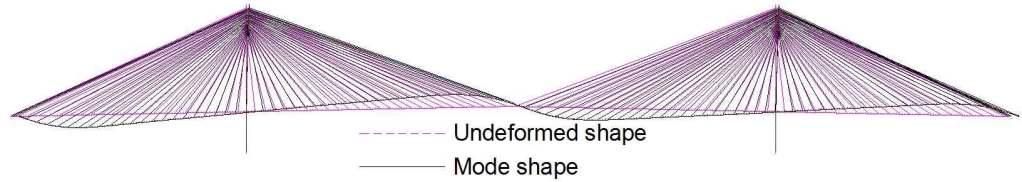


(c) 3차 진동모드( $f=0.2636\text{ Hz}$ , vertical direction)

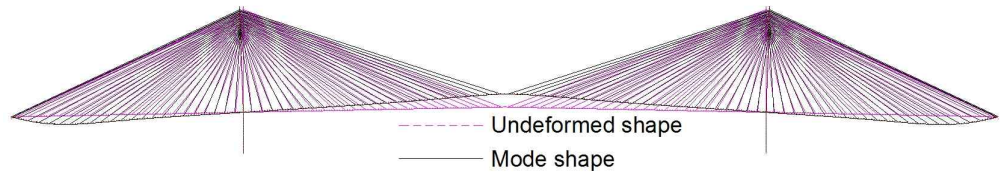
그림 2.10 대상 자정식 사장교의 주요 진동 모드



(a) 1차 진동모드 ( $f=0.0947\text{Hz}$ , transverse direction)



(b) 2차 진동모드 ( $f=0.1616\text{Hz}$ , vertical+longitudinal direction)



(c) 3차 진동모드 ( $f=0.2326\text{ Hz}$ , vertical direction)

그림 2.11 대상 일부타정식 사장교의 주요 진동 모드(L-EA-6)

주요 고유진동수에 대해 결과를 비교하여 다음 표 2.9에 나타내었다. 표로부터 일부타정식 모형의 주탑의 교축방향과 거더의 연직방향 고유진동수가 자정식 모형의 고유진동수와 차이가 크게 발생하였음을 알 수 있다. 고유진동수의 차이는 타정 케이블들이 주탑의 교축방향 거동을 제어하였기 때문인 것으로 파악될 수 있다. 즉, 일부타정식 사장교의 경우, 타정 케이블들이 주탑의 변형을 감소시키는 앵커 케이블의 역할을 하므로 거더의 수직방향 운동을 제어하게 된다. 따라서 수직 모드에서의 고유치가 차이가 많이 발생하였으며, 횡방향 모드에는 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

표 2.9 자정식 사장교와 일부타정식 사장교의 주요 고유치 비교

(Unit: Hz)

| 진동 형상                 | 해석 모형                | Mode Number          |         |        |        |        |
|-----------------------|----------------------|----------------------|---------|--------|--------|--------|
|                       |                      | 1                    | 2       | 3      | 4      | 5      |
| Vertical              | L-SE-1 <sup>1)</sup> | 0.2215               | 0.2636  | 0.3860 | 0.4345 | 0.4874 |
|                       | L-EA-6 <sup>2)</sup> | 0.1616 <sup>3)</sup> | 0.2326  | 0.3547 | 0.4378 | 0.4883 |
|                       | Difference           | -37.07%              | -13.33% | -8.82% | 0.75%  | 0.18%  |
| Transverse            | L-SE-1               | 0.0951               | 0.2698  | 0.4554 | 0.5304 | 0.6236 |
|                       | L-EA-6               | 0.0947               | 0.2642  | 0.4391 | 0.5176 | 0.6260 |
|                       | Difference           | -0.42%               | -2.12%  | -3.71% | -2.47% | 0.38%  |
| Pylon<br>Longitudinal | L-SE-1               | 1.5180               |         |        |        |        |
|                       | L-EA-6               | 1.6281               |         |        |        |        |
|                       | Difference           | 6.76%                |         |        |        |        |
| Pylon<br>Transverse   | L-SE-1               | 0.3523               |         |        |        |        |
|                       | L-EA-6               | 0.3529               |         |        |        |        |
|                       | Difference           | 0.17%                |         |        |        |        |

1) 자정식 사장교 모형

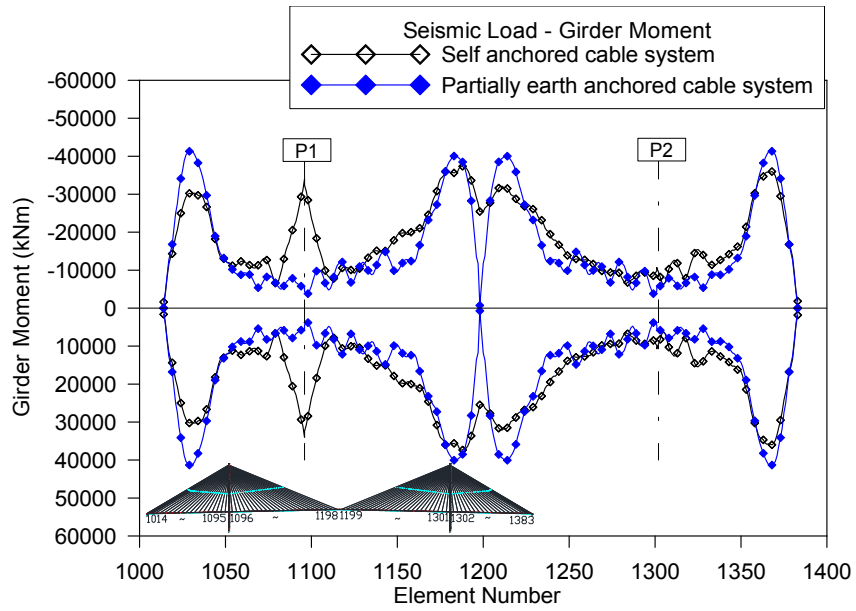
2) 일부타정식 사장교 모형

3) Mode shape of only this frequency is combined mode of a vertical and a longitudinal direction.

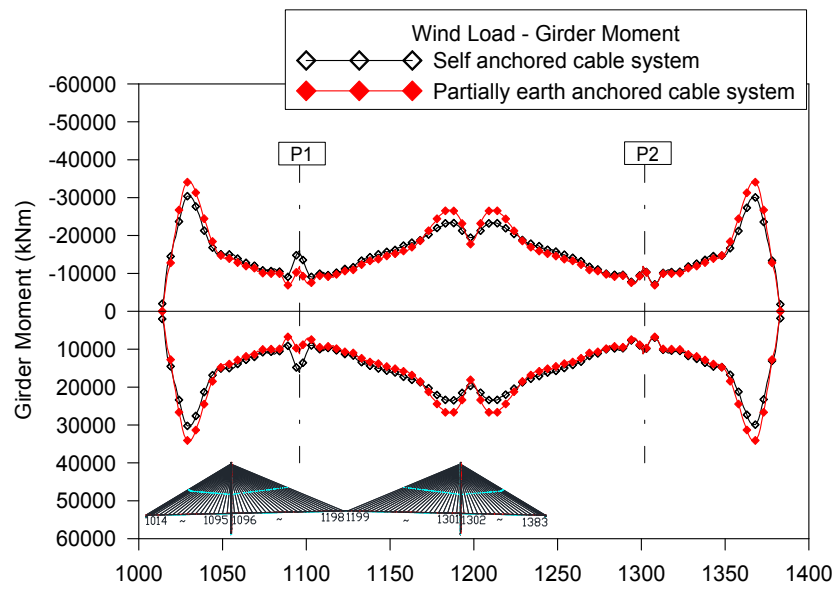
자정식 모형과 일부타정식 모형에서 지진하중과 풍하중에 의해 발생하는 거더 휨모멘트와 축력을 분석하여 그림 2.12와 그림 2.13에 나타내었다. 지진 하중에 대한 거더 휨모멘트를 보면, 자정식 모형은 주탑 P1에서 교축방향 고정이므로 휨모멘트가 집중되나, 일부타정식 모형은 교축방향 가동단이므로 주탑부에 집중되는 모멘트가 발생하지 않음을 알 수 있다. 주탑 P1부를 제외하고는 발생하는 휨모멘트의 크기가 유사하나, 최댓값은 일부타정식 모형에서 약간 증가됨을 알 수 있다. 풍하중의 경우에도 지진하중과 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 분석되었다.

거더 축력을 비교하면, 자정식 모형에서 주탑 P1에서 집중된 축력이 일부타정식 모형에서 분산됨을 알 수 있다. 지진하중과 풍하중에 의해 발생된 거더 축력은 일부타정식 모형이 자정식 모형보다 작으며, 특히 지진하중에서 감소되는 크기가 큼을 알 수 있다.

케이블 축력의 경우(그림 2.14), 측경간의 타정된 케이블들과 인접 케이블, 그리고 중앙경간 중앙부 케이블에서 자정식 모형보다 일부타정식 모형의 케이블 장력이 증가되었음을 알 수 있다. 따라서 타정 케이블에서는 동적 하중에 대해 주탑 등의 구조물 안전성을 확보하기 위해 장력이 증가되고 있음을 알 수 있다.

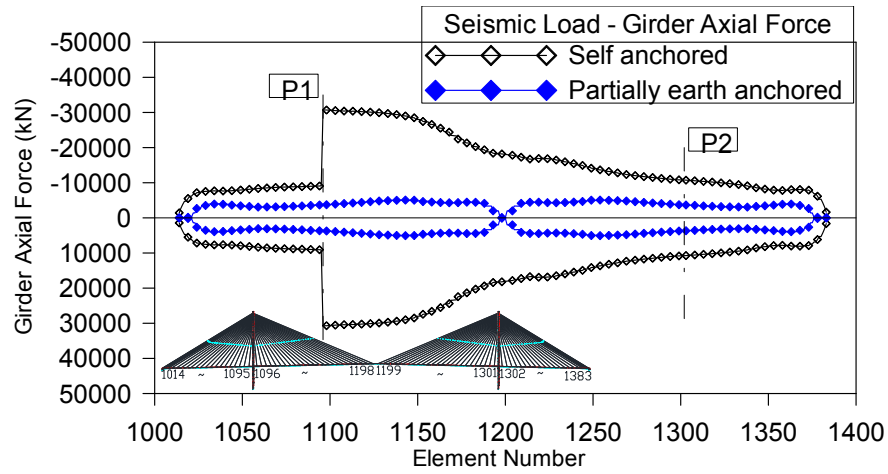


(a) 지진하중

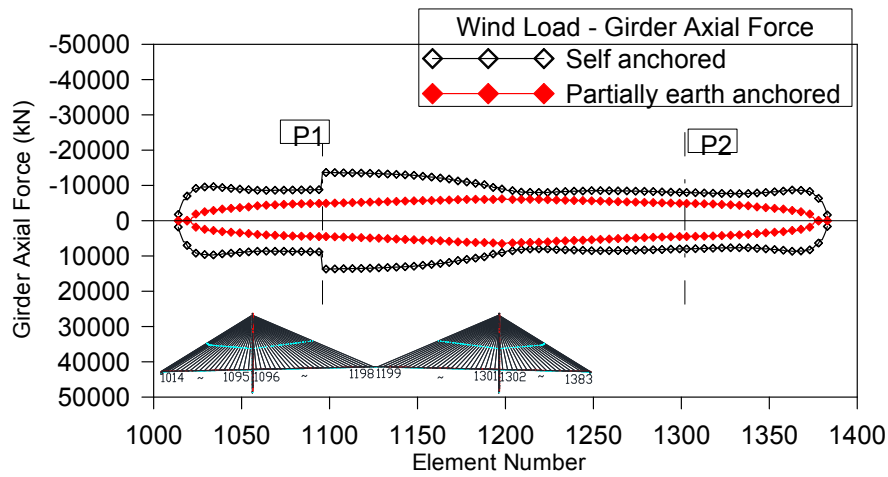


(b) 풍하중

그림 2.12 지진하중과 풍하중에 의한 거더 모멘트 비교



(a) 지진하중



(b) 풍하중

그림 2.13 지진하중과 풍하중에 의한 거더 축력 비교

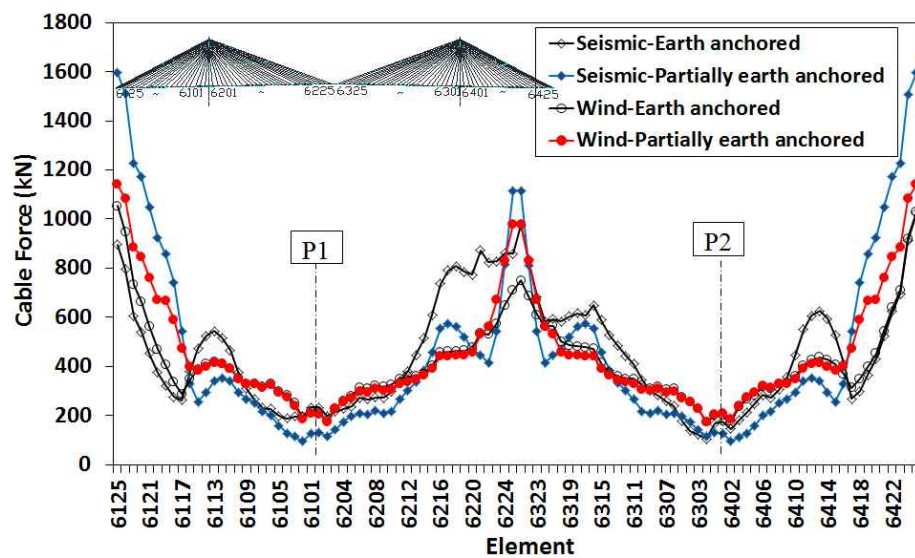


그림 2.14 지진하중과 풍하중에 의한 케이블 장력 비교

## 다. 기존 제안 시공법 분석

### (1) Gimsing 제안법

일부타정식 케이블 시스템을 처음 주장한 Gimsing은 초장대 사장교에 관심을 두고 시스템을 처음 제안하였으며, 초장대 사장교에서 구조적 효과를 얻기 위해서는 중앙경간부터 시공하는 다음 그림과 같은 시공방법을 제안하였다.

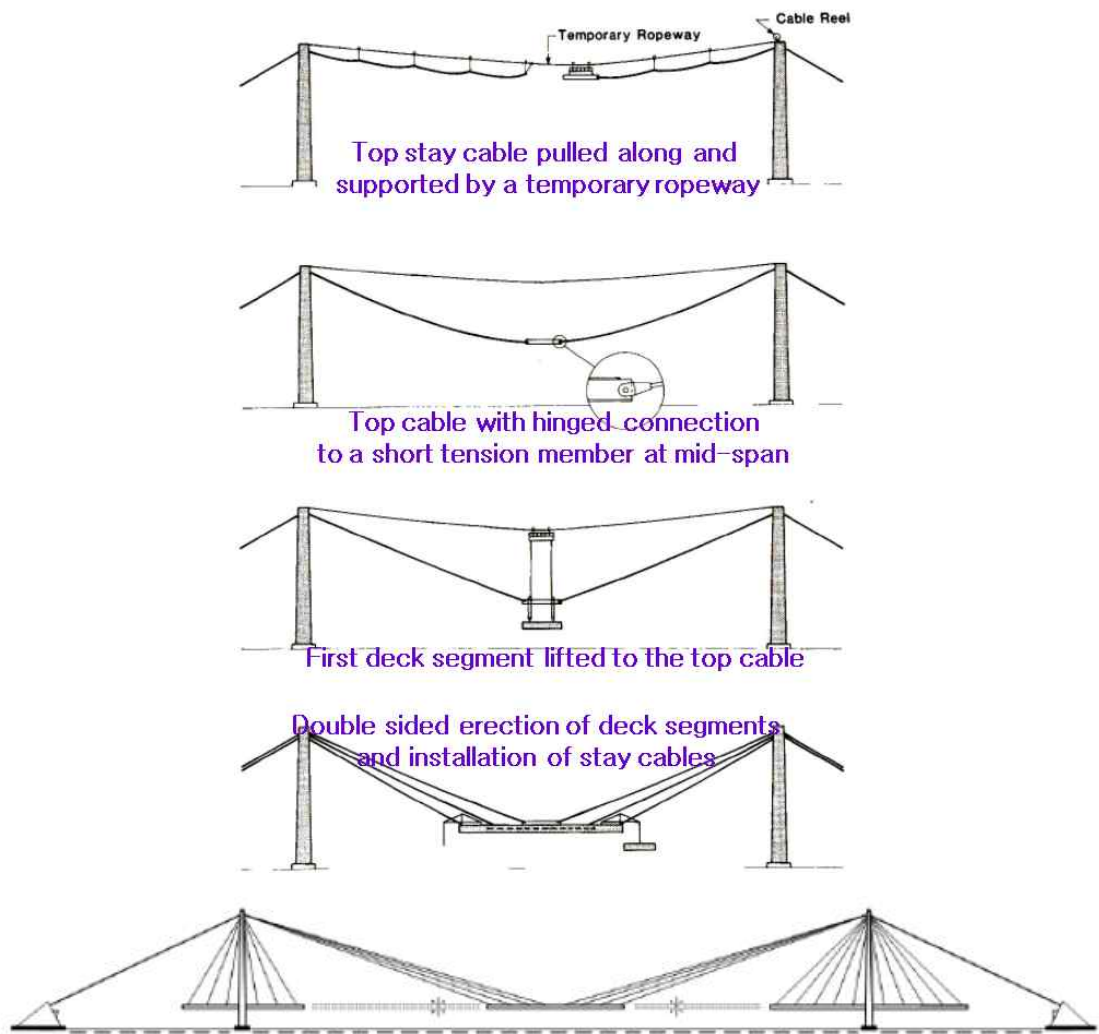


그림 2.15 Gimsing에 의해 제안된 일부타정식 사장교 시공방법

제안된 방법은 중앙경간 세그를 먼저 가설하기 위해 별도의 임시 케이블을 설치하여야 한다. 임시 케이블의 설치 방법은 현수교 캐트윅 로프 가설과 같이 쉽지 않은 작업이며, 현수교의 사례에서 알 수 있듯이 특별한 가설 장비가 필요하므로 본 과제에서 대상으로 하는 경간장에는 가설비가 증가하므로 적합하지 않은 방법으로 평가된다.

## (2) 기존 특허 방법의 분석

국내 특허로 힌지 연결부를 이용한 일부 타정식 사장교 및 그 시공 공법이 있으며, 시공 방법은 다음 그림과 같다. 제안 공법은 Gimsing이 제안한 방법과 같이 중앙부부터 시공하며, 주탑부에서는 FCM 방식으로 시공하여 폐합하는 같은 방식이나 타정 케이블의 정착이 힌지로 분리된 경간에 정착되므로 힘이 사장교 거더로 전달되지 않도록 한 점이 다른 점이다. 제안 공법의 경우도, 중앙부 가설을 위한 별도의 케이블 시스템이 필요하므로 본 과제의 대상 경간장에서는 가설비 증가를 가져오는 요인이 되어 적절하지 않은 것으로 분석되었다.

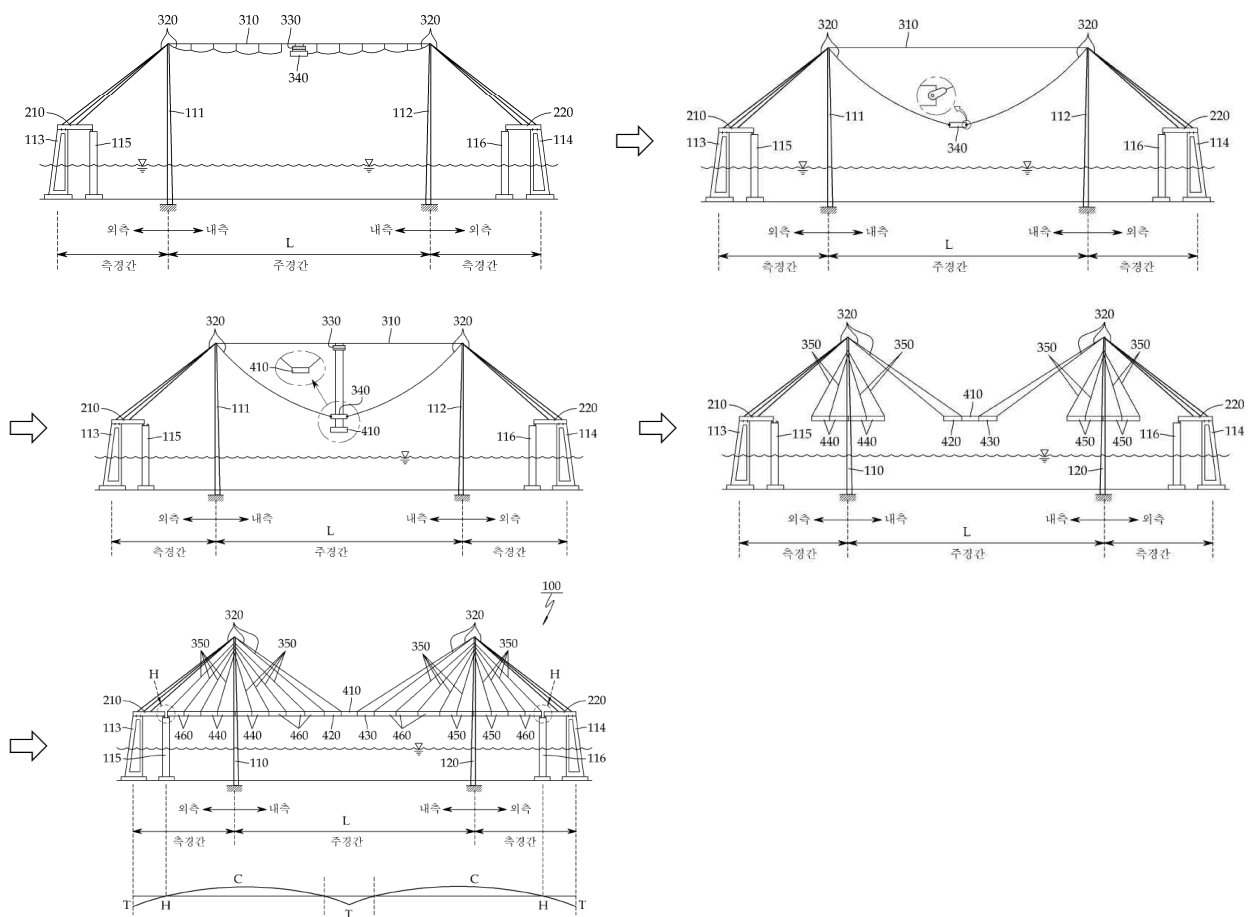


그림 2.16 국내 특허에서 제안된 방법

국내외 관련 기술을 분석한 결과, 현재까지 제안된 방법은 중앙경간 1000m 이상의 초장대 사장교를 위한 시공기술로 중앙경간부 거더를 설치하기 위해 별도의 케이블을 가설되어야 한다. 별도 케이블은 현수교의 파일럿 로프, 캣워크 로프, 홀링 로프와 같은 시공방법으로 가설되어야 하므로 본 과제에서 대상으로 하고 있는 600m-1000m 중앙경간에서는 적합하지 않은 가설방법이다.

## 라. 특수교량 시공법 분석

### (1) 사장교 FCM 공법

사장교 시공 방법에서 가장 일반적으로 시공되는 공법은 FCM 방법으로 가설크레인을 이용하여 한 세그먼트씩 좌·우 대칭으로 시공하는 방법으로 케이블을 지지구조로 활용하므로 임시 구조물의 설치를 최소화하고 동시에 주변의 영향을 받지 않고 효율적으로 시공할 수 있는 방법이다. 다음 그림은 FCM 공법으로 시공되는 사장교의 전경을 나타낸다.



그림 2.17 FCM 공법으로 시공되는 사장교 예

FCM 공법으로 시공되는 사장교 거더의 폐합은 다음 그림과 같은 키-세그먼트라고 불리는 마지막 세그먼트를 설치함으로써 이루어지며, 키-세그먼트를 설치하기 위해서는 set-back과 reset-back이라는 공정이 이루어진다.

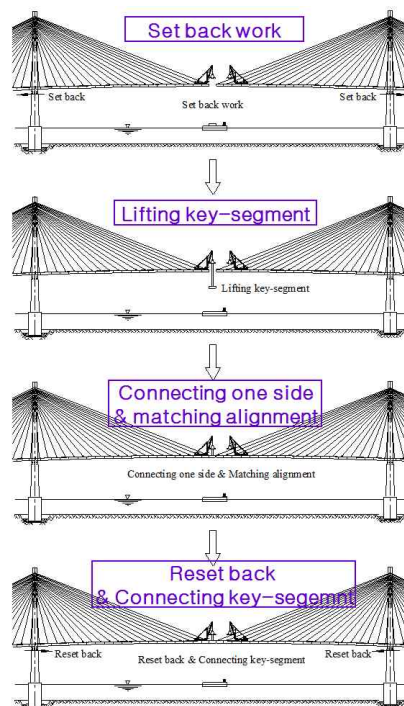


그림 2.18 FCM 공법의 키-세그먼트 설치 과정

## (2) 일부타정식 사장교의 FCM 공법 적용 문제점 분석

FCM 공법 시공 중 안정성을 확보하기 위하여 주탑과 거더를 임시 고정장치로 고정시켜야 한다. 거더 연결의 마지막 단계인 key-segment 설치를 위해서는 인양 공간이 확보되어야 하므로 set-back 작업을 통해 key-segment 양쪽 거더를 뒤로 후진시킨 후 key-segment를 인양하고 한 쪽을 먼저 연결한 후 다시 후진된 거더를 원 위치시키는 reset-back 작업이 실시된 후 key-segment를 완전히 연결한다. 주목해야 할 점은 set-back 작업을 위해 임시 고정장치를 해제해야 한다는 것이다. 자정식 사장교의 경우, 임시 고정장치 좌·우 거더의 축력의 차이가 크지 않으나, 일부타정식 사장교에서는 케이블의 일부가 외부에 정착되므로 임시 고정장치 좌·우의 축력차이가 크게 된다. 다음 그림은 L-SE-6 일부타정식 사장교 해석 모형을 대상으로 시공단계 해석에서 산출한 대상 일부타정식 사장교의 임시 고정장치 해체 전 축력 분포도이다.

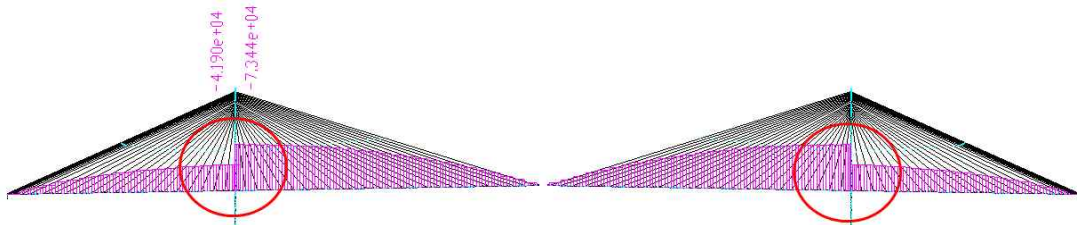


그림 2.19 일부타정식 사장교의 폐합 전 축력 비대칭

해석 대상 교량의 경우, 축력 차이로 인해 임시 고정장치에 발생하는 수평 반력은 31,540kN이며, 임시 고정장치를 해제하면 수평 반력 때문에 거더의 변위가 측경간으로 약 2.440m 발생하게 된다. 즉, 일부타정식 사장교에 있어서 기존의 FCM 방법의 적용은 시공 중 안전성에 큰 문제점을 발생시킬 수 있다.

## (3) 현수교 가설방법 분석

대부분의 현수교는 타정식으로 앵커리지에 정착되는 케이블이 먼저 설치된 후 케이블을 이용하여 거더가 설치된다. 케이블은 중량이 커서 한 번에 가설되는 것이 불가능하므로 소선단위 가설 또는 스트랜드 단위 가설의 방법이 적용된다. 케이블을 가설하기 위해서는 캣워크 로프, 홀링로프 등이 먼저 설치되어야 하며, 이는 시공 안전성이 확보되어야 하는 고난위도의 작업공정이며, 가설공사의 비용이 증가되게 하는 요소 중의 하나이다. 다음 그림은 일반적인 현수교의 시공 순서를 나타낸다. Gimsing등에 의해 제안된 일부 타정식 사장교 시공방법의 중앙부분 거더를 설치하기 위해서는 그림과 같은 현수교의 케이블 설치 과정을 일부 따라야 하며, 이는 일부타정식 사장교의 경제

성을 저해시키는 요소로 작용한다.

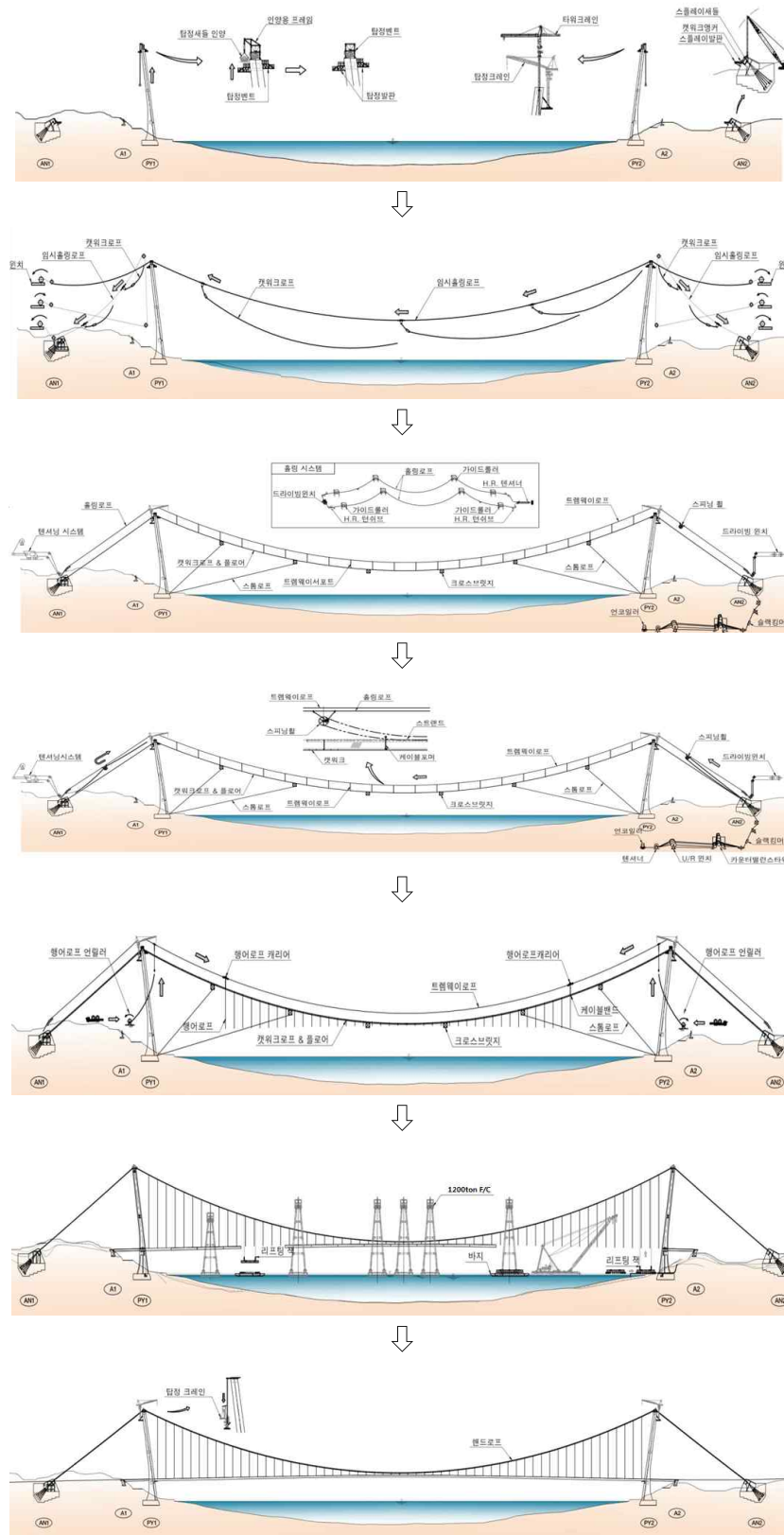


그림 2.20 일반적인 현수교 케이블과 거더 시공순서

## 마. 시공기술 제안 및 검증

### (1) FCM 방법+온도활용 폐합방법

#### (가) 제안방법

주탑부 임시 고정장치 해제 시 발생하는 축력 비대칭 문제를 해소하기 위해 set-back을 하지 않고 key-segment를 폐합하는 방법을 제안하였다. 제안방법은 기존의 방법과 움직이는 방향을 반대로 하는 것으로 key-segment를 계획보다 작게 제작한 후 인양 후 캔틸레버부 거더 내부를 가열하여 신장시킨 후 연결하는 방법이다. 자세한 시공방법은 다음 그림과 같다.

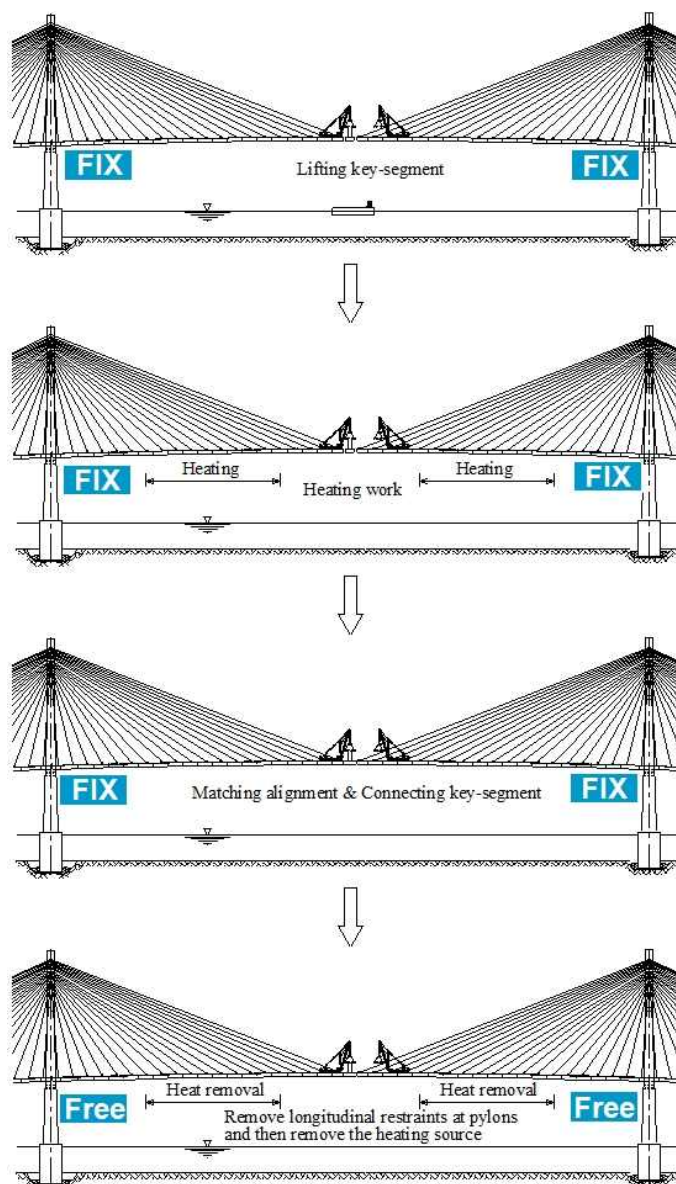
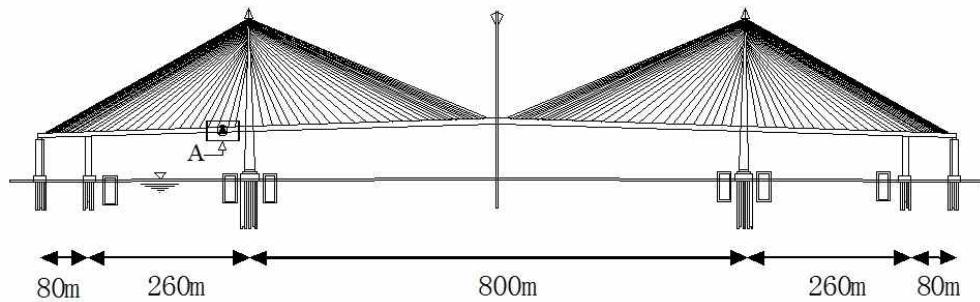


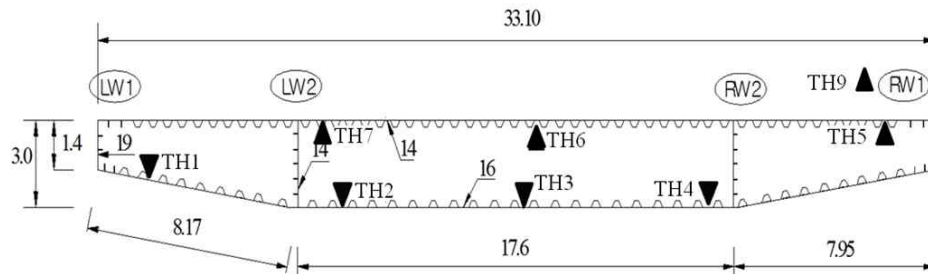
그림 2.21 온도효과를 활용한 일부타정식 사장교 key-segment 폐합 방법 제안

(나) 시공 중 사장교 온도 분포 분석

제안방법의 효과를 분석하기 전에 사장교의 시공 중 온도분포 특성을 해석적으로 분석하였다. 실측자료가 존재하는 인천대교를 대상으로 일사의 영향을 고려한 열전달 해석이 수행되었다. 대상 교량의 제원과 온도 측정위치는 다음 그림과 같다.



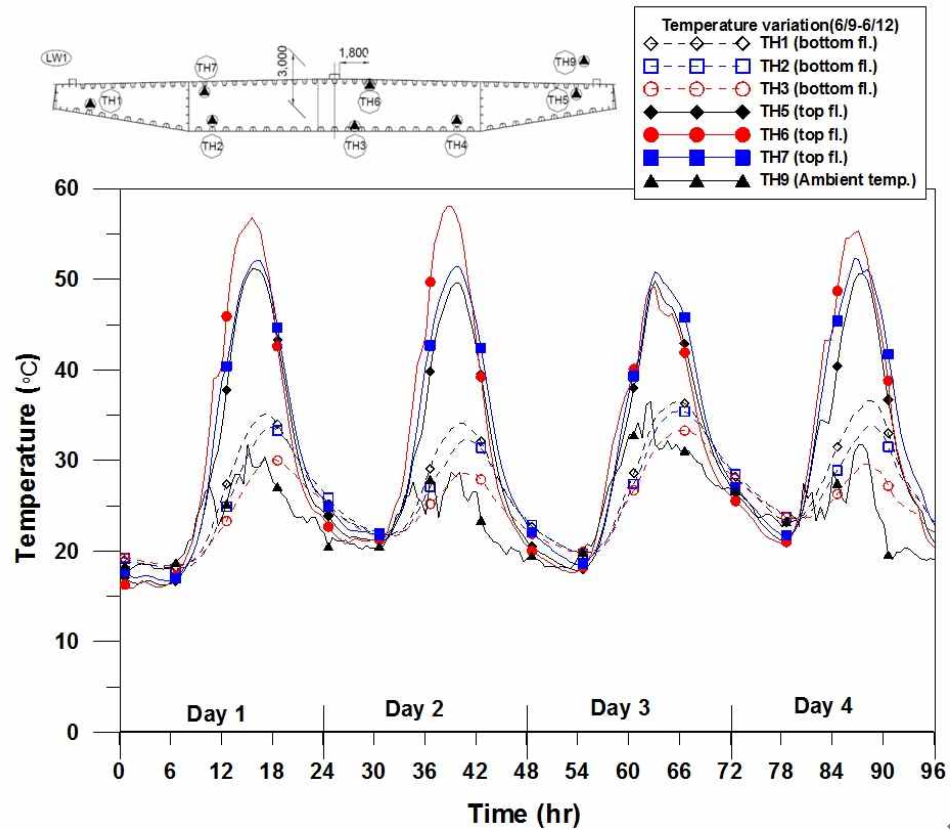
(a) 종단면도



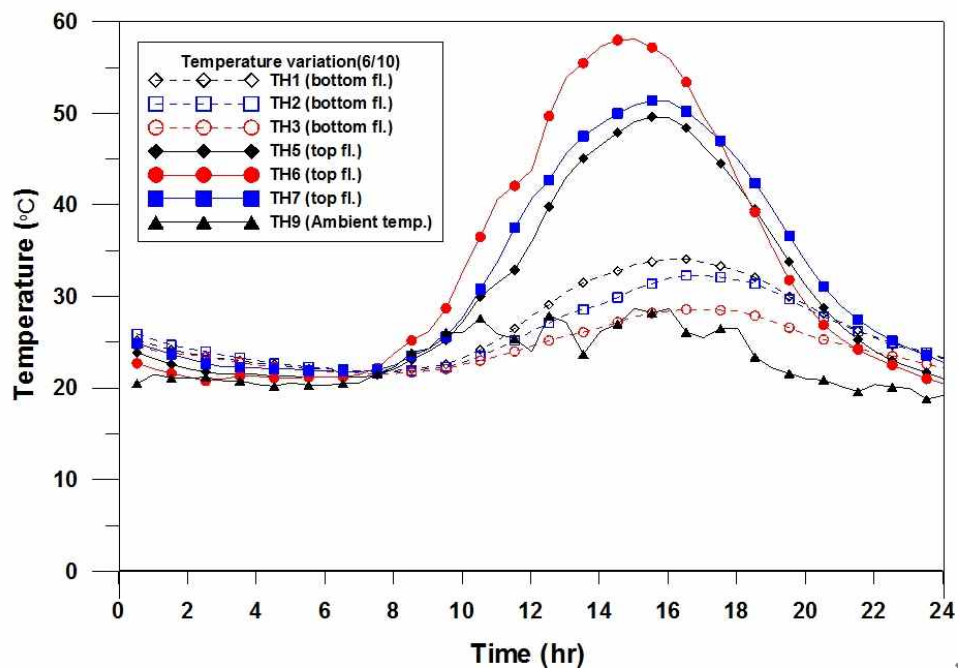
(b) 거더 단면도

그림 2.22 열전달 해석 대상 교량

대상 교량에 대한 계측 자료를 분석하여 그림 2.23~그림 2.25에 나타내었다. 낮과 밤에 따라 변화는 상·하부 플랜지의 온도 변화 경향을 확인할 수 있으며, 상부 플랜지는 일사에 노출되어 변화폭이 크나, 하부 플랜지는 변화폭이 작음을 알 수 있다. 야간에는 내부 공기, 상·하부 플랜지의 온도가 일정하게 되는 경향을 나타내므로 key-segment 폐합은 온도가 일정해지는 새벽이 적절함을 알 수 있다.

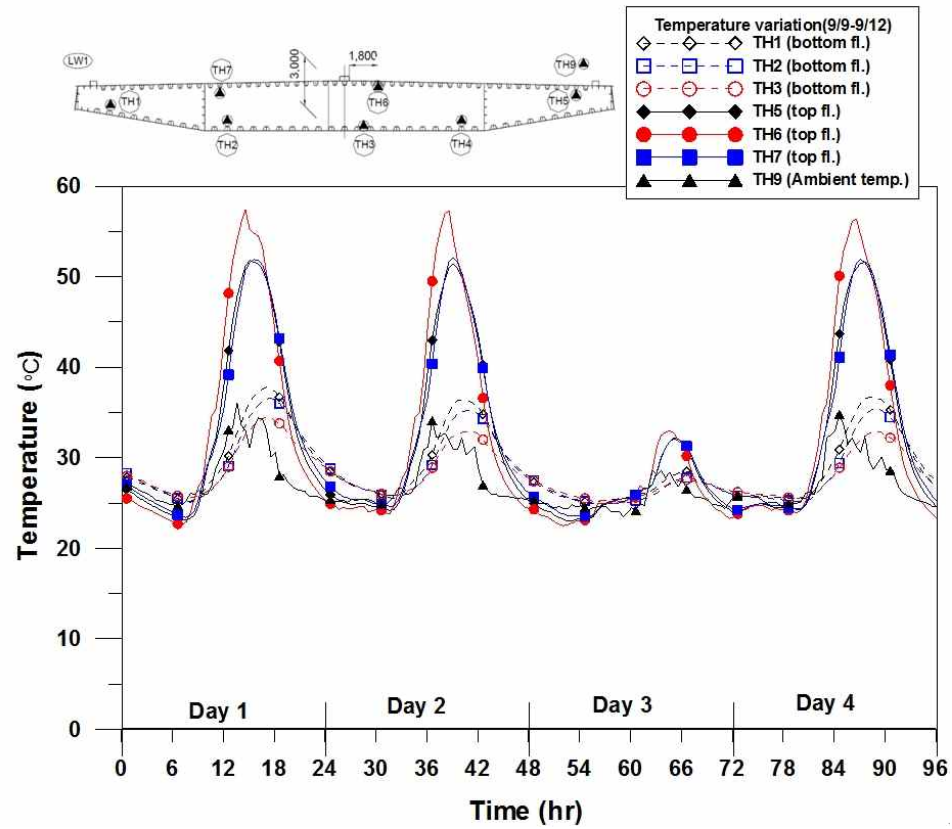


(a) 4일 연속 온도 변화 분석

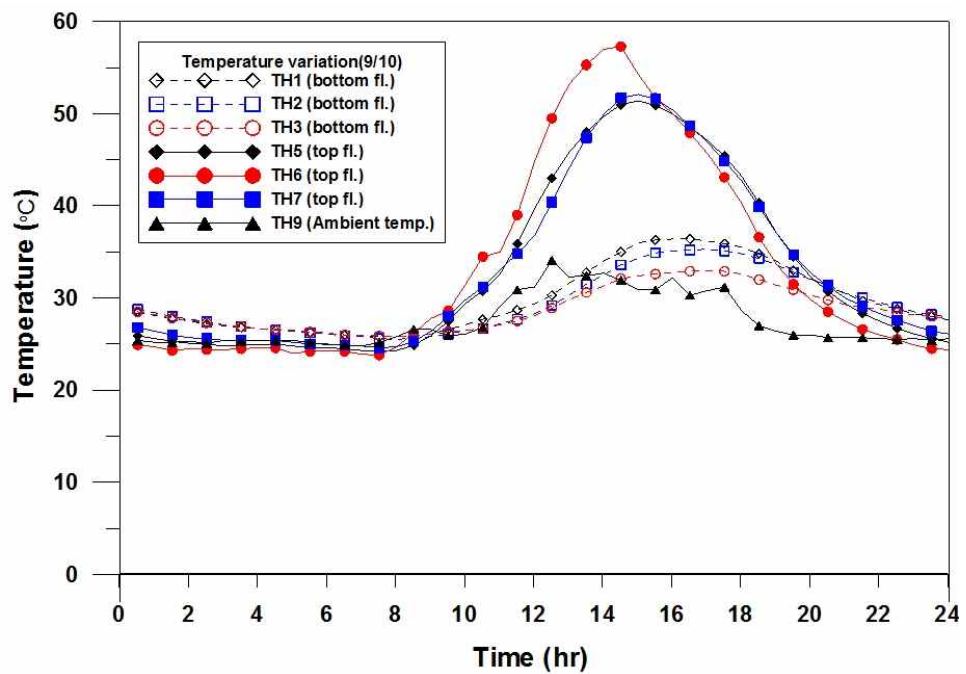


(b) 2일차의 온도 변화 분석

그림 2.23] 6/9-6/12 온도 변화 분석

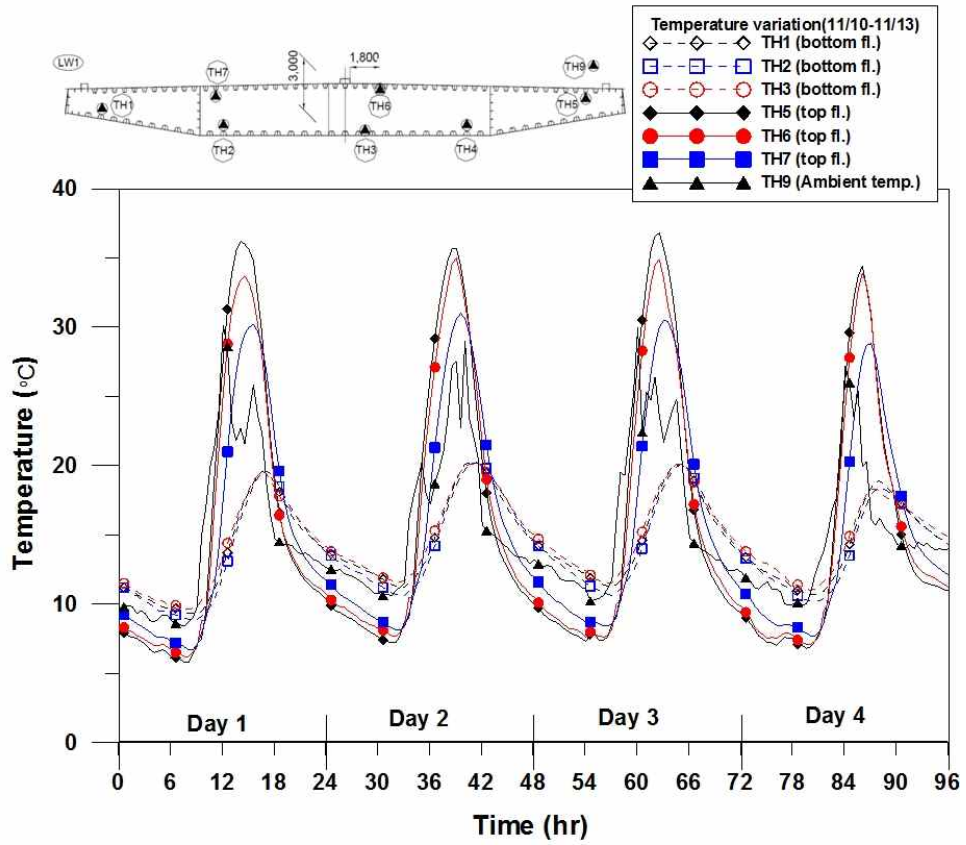


(a) 4일 연속 온도 변화 분석

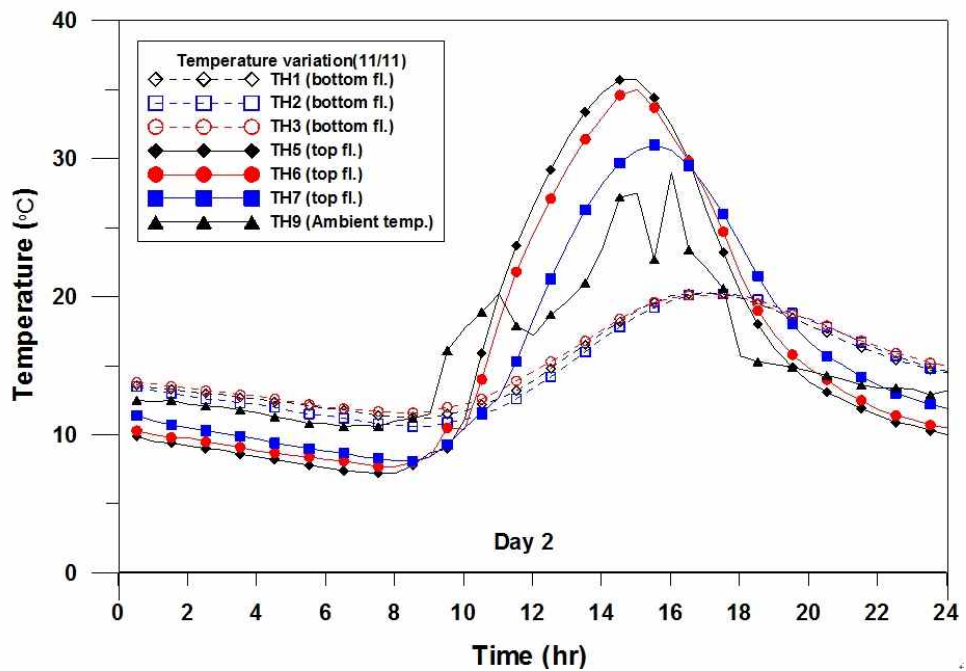


(b) 2일차의 온도 변화 분석

그림 2.24 9/9-9/12 온도 변화 분석



(a) 4일 연속 온도 변화 분석



(b) 2일차의 온도 변화 분석

그림 2.25 11/10-11/13 온도 변화 분석

LUSAS를 활용한 열전달해석이 수행되었으며, FE모델은 다음 그림과 같다.

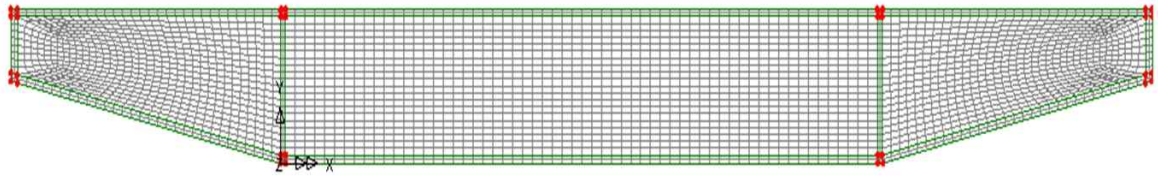


그림 2.26 열전달해석 FE모델

인접 기상청의 일사 에너지 자료를 고려한 열전달 시간해석은 다음 그림과 같은 방법으로 진행되었으며, 주요 입력 자료는 다음 표와 같다.

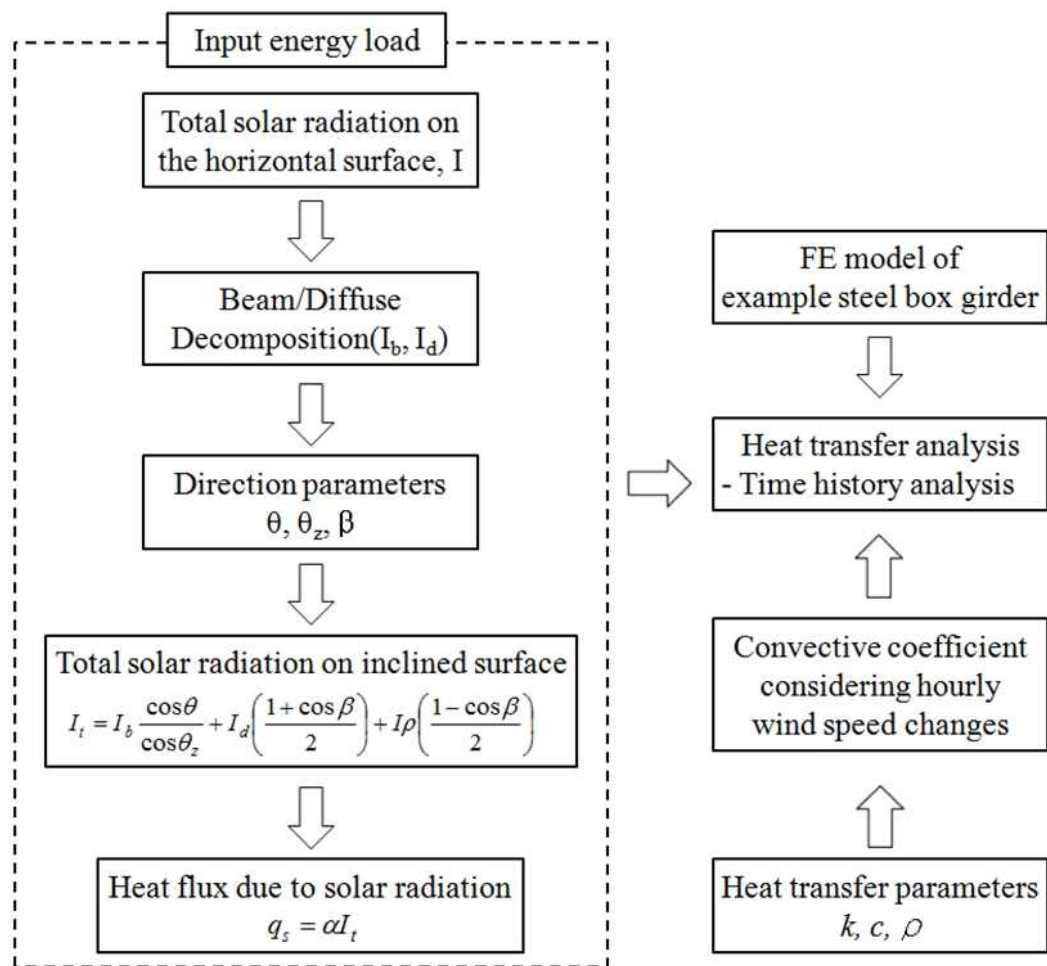
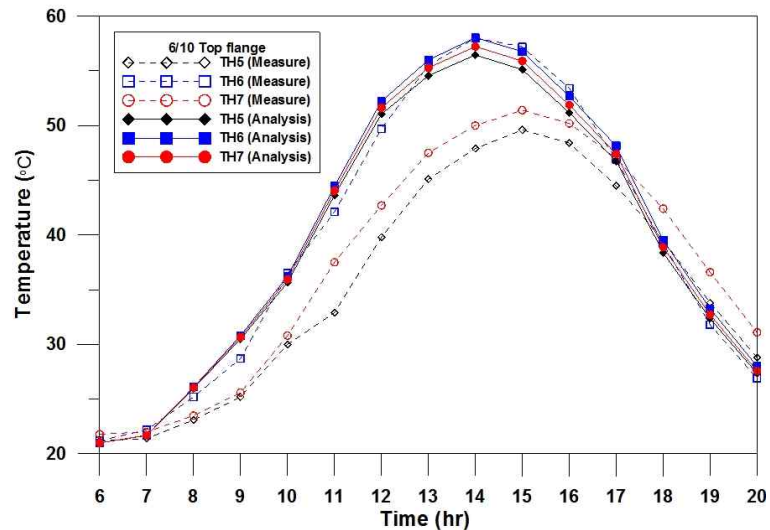


그림 2.27 열전달 해석 과정

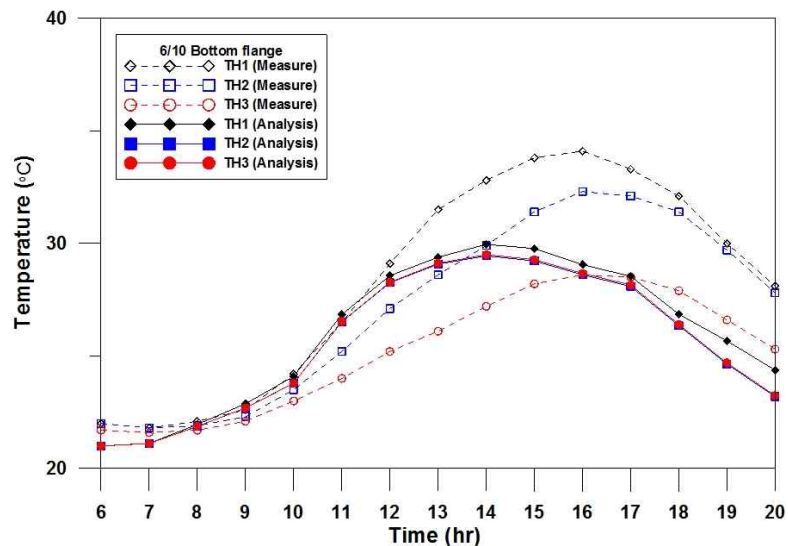
표 2.10 해석에 적용된 주요 물성치

| 항목              | 물성                                   | 입력치                                                     |
|-----------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Solar radiation | Latitude of the object bridge        | 37.24°                                                  |
|                 | Solar factor                         | 1353W/m <sup>2</sup>                                    |
|                 | Reflectance of the sea-surface       | 0.2                                                     |
|                 | Absorptivity                         |                                                         |
|                 | Upper flange                         | 0.75                                                    |
|                 | Lower flange                         | 0.7                                                     |
| Heat transfer   | Heat conductivity(W/m2)              | 60.5 (steel box), 0.026 (air)                           |
|                 | Specific heat(J/kg°C)                | 434 (steel box), 1006 (air)                             |
|                 | Density (kg/m3)                      | 7854 (steel box), 1.293 (air)                           |
|                 | Convective heat transfer coefficient | Linear interpolation of the values proposed by Kehlbeck |

해석 결과와 측정값을 비교·분석한 결과, 상부플랜지의 경우, 중앙 부분은 예측 값이 측정값과 유사하나 외측으로 나갈수록 차이가 발생함을 알 수 있다.

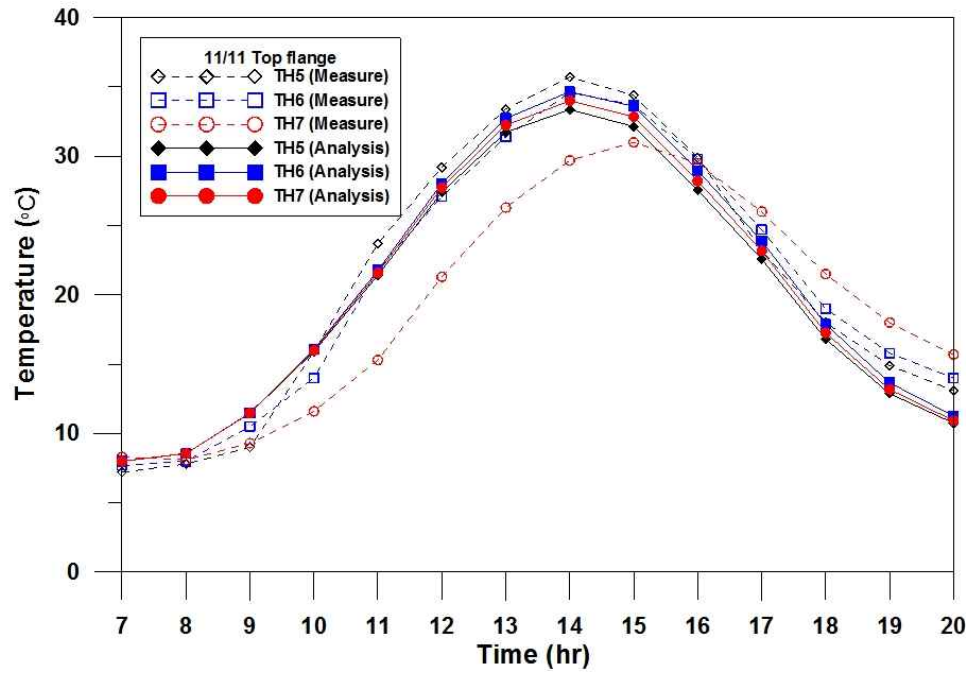


(a) 상부플랜지

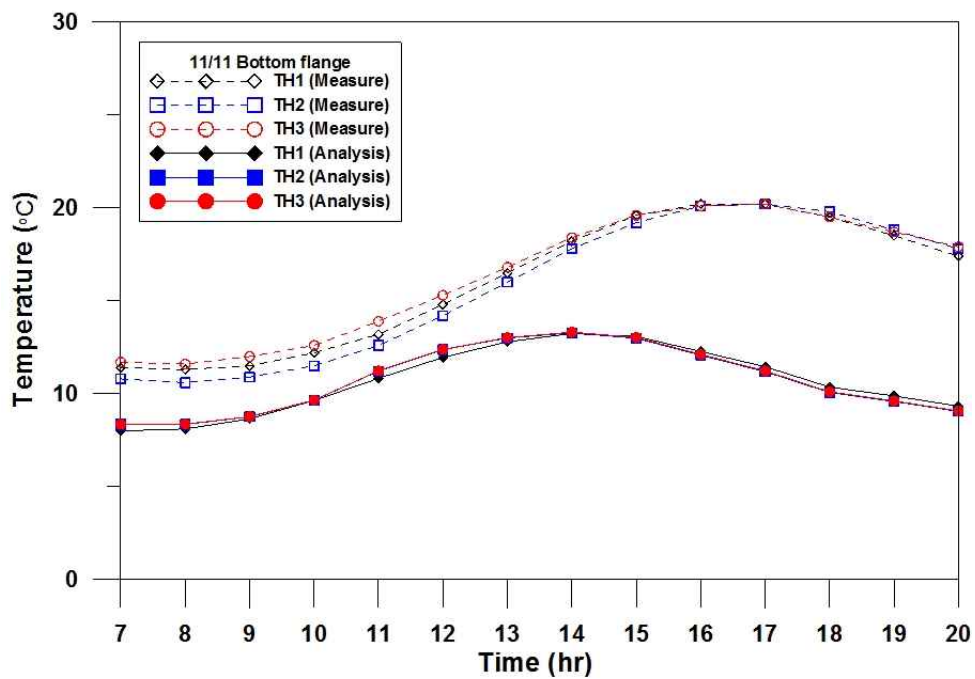


(b) 하부플랜지

그림 2.28 해석과 실측값 결과 비교(6/10)



(a) 상부플랜지



(b) 하부플랜지

그림 2.29 해석과 실측값 결과 비교(11/11)

박스 거더 내부 공기의 온도 변화를 살펴보면, 상부 플랜지에 인접한 부분이 변화가 크며, 하부 플랜지에 가까운 쪽이 온도 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

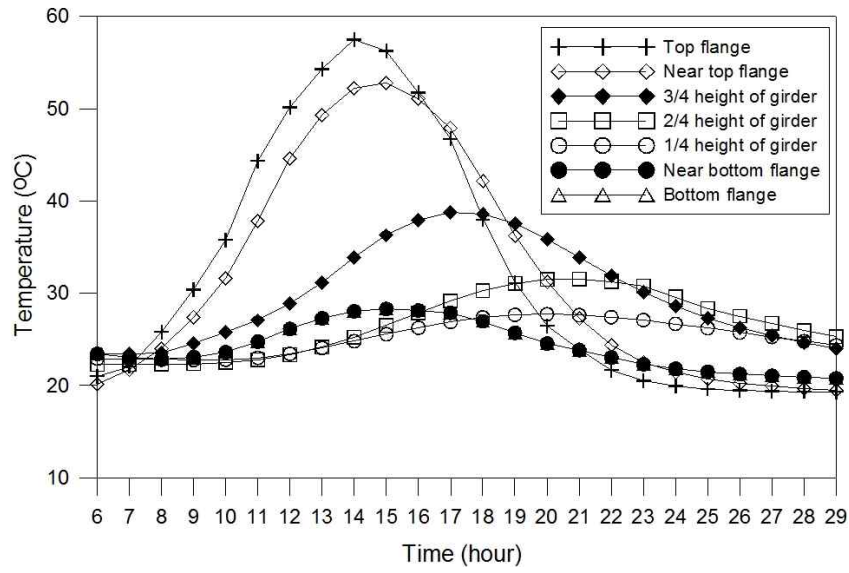


그림 2.30 박스 내부 온도 변화 이력(6/10)

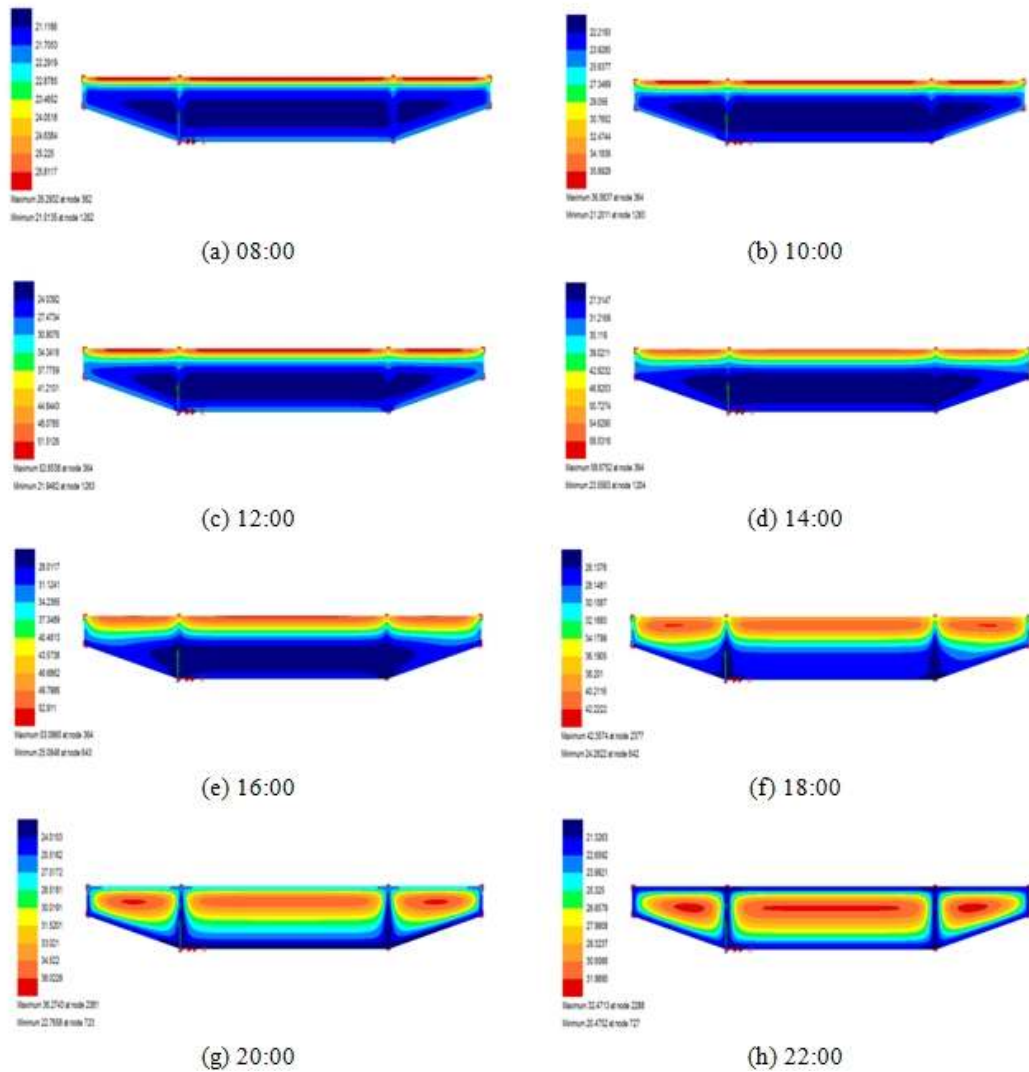


그림 2.31 박스 내부 온도 contour 변화(6/10)

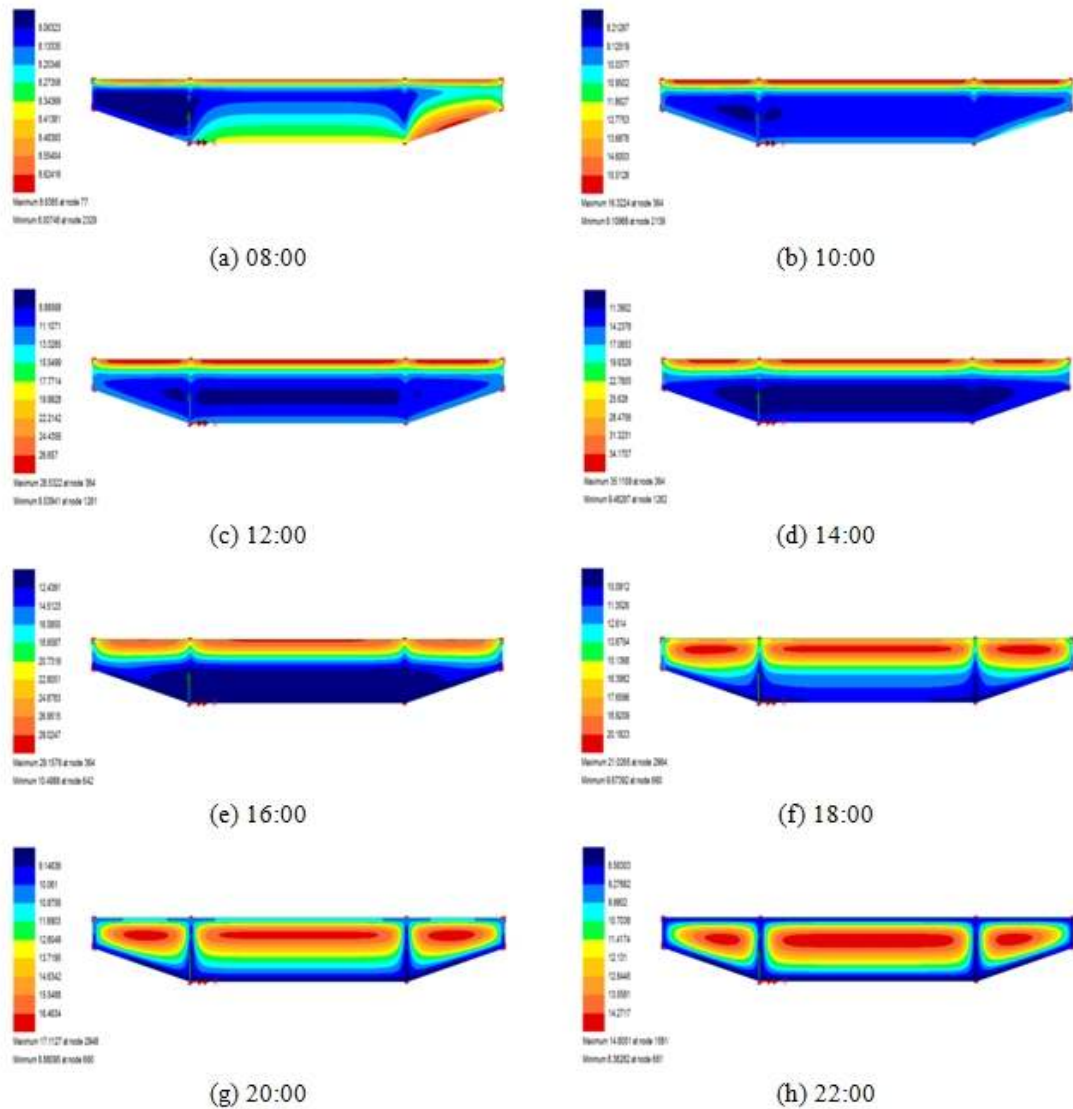


그림 2.32 박스 내부 온도 contour 변화(11/11)

온도 계측 데이터와 박스 내부 온도 변화 해석을 통한 시공 중 강박스 사장교 온도 분포 분석 결과 박스 거더 상·하부 위치에 따른 온도 변화가 일사에 의해 발생하며, 온도가 일정해 지는 시간대를 찾을 수 있다. 또한, 내부 공기의 변화와 내부 공기와 상·하부 플랜지 사이의 열전달도 확인할 수 있었다. 따라서 적용 제안 방법은 박스 거더 내부에 온풍의 공기를 주입하여 가열하는 방식으로 적용되며, 야간에 온도가 일정한 시간대에 적용되는 것이 합리적이다.

(다) 시공단계 해석을 통한 검증

박스 내부를 가열하는 방법에 대해 시공단계 해석을 수행하여 가능성과 주요 부재에 미치는 영향을 분석하였다. 온도 가열 구간은 3가지 경우를 고려하였으며, 신축량은 100mm로 설정하였다.

표 2.11 가열온도 및 가열길이

| 해석 모형           | 열팽창 계수                                            | 가열길이  | 반복 해석에 의한 결과           |                       |
|-----------------|---------------------------------------------------|-------|------------------------|-----------------------|
|                 |                                                   |       | 적용 $\Delta T$          | 늘음량( $\Delta L$ ) (m) |
| Case-L1, L2, L3 | $1.2 \times 10^{-5} / \text{m/m}^{\circ}\text{C}$ | 160 m | $54.9^{\circ}\text{C}$ | 0.100                 |

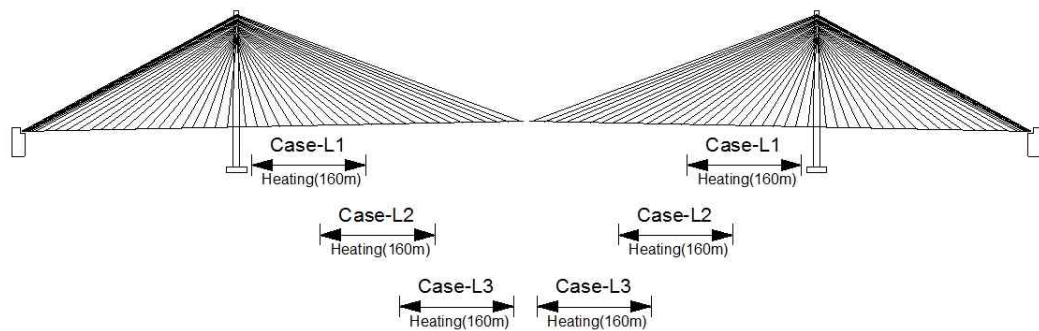


그림 2.33 고려된 해석 Case

시공단계 해석을 통해 제안 방법이 미치는 영향을 주요 부재에 대해 검토하였다. 시공단계 해석을 통해 제안방법에 따른 거더 휨모멘트도, 축력도, 변위, 케이블 장력을 분석한 결과, 주탑에 가깝게 가열 구간을 설정(Case-L1)하는 것이 가장 효과적인 것으로 분석되었다. 또한, 제안 방법은 일부타정식 사장교의 key-segment를 폐합할 수 있게 할뿐만 아니라 거더에서 발생하는 최대 압축력과 휨모멘트를 감소시킬 수 있는 것으로 분석되었다.

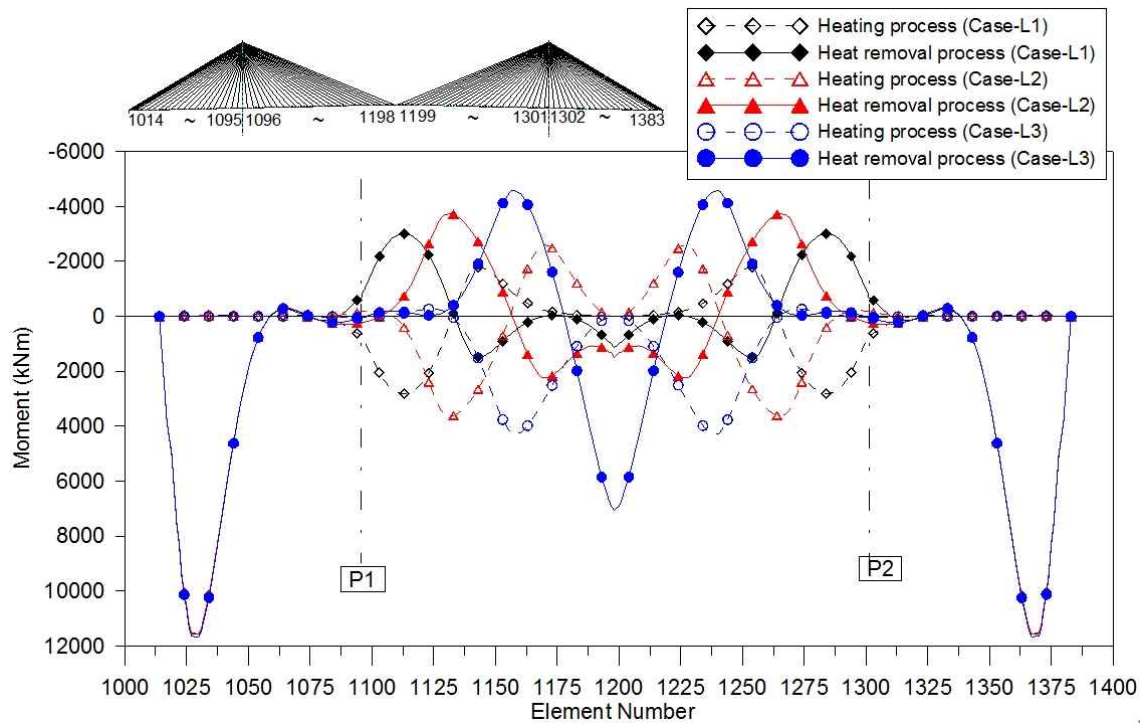


그림 2.34 가열과 열원 제거로 발생된 거더 휨모멘트 비교

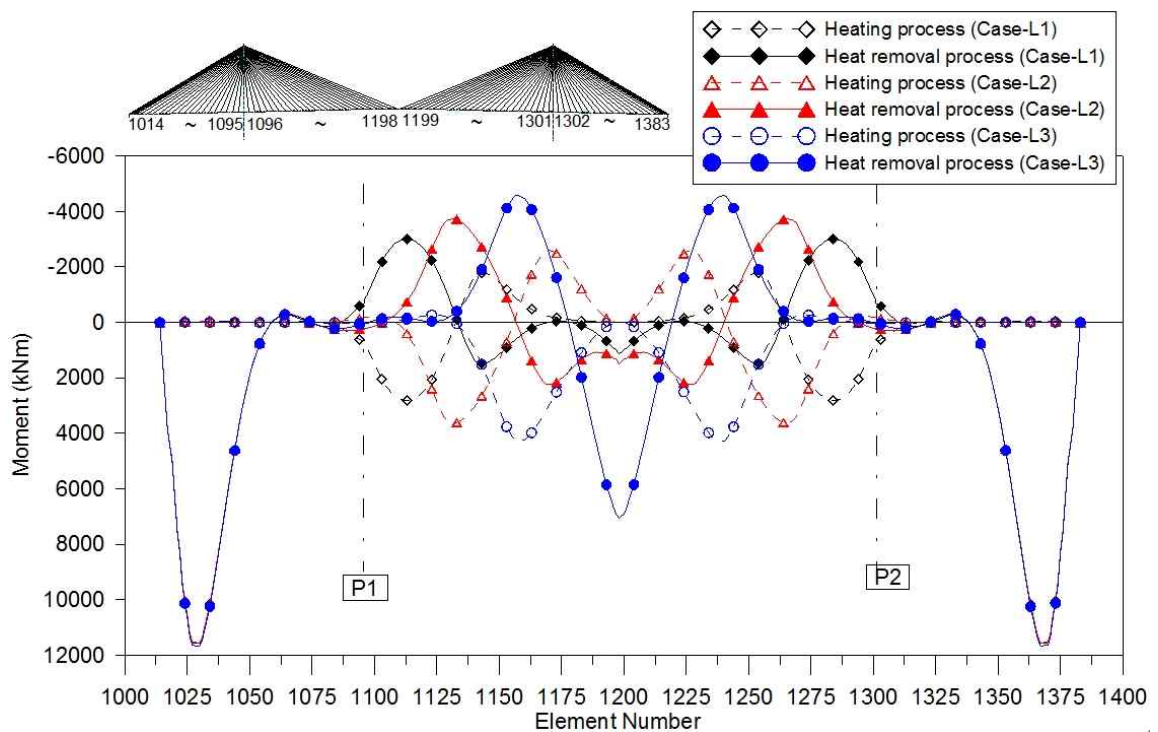


그림 2.35 제안 방법 적용에 따른 시공 완료 후 거더 휨모멘트 분포도

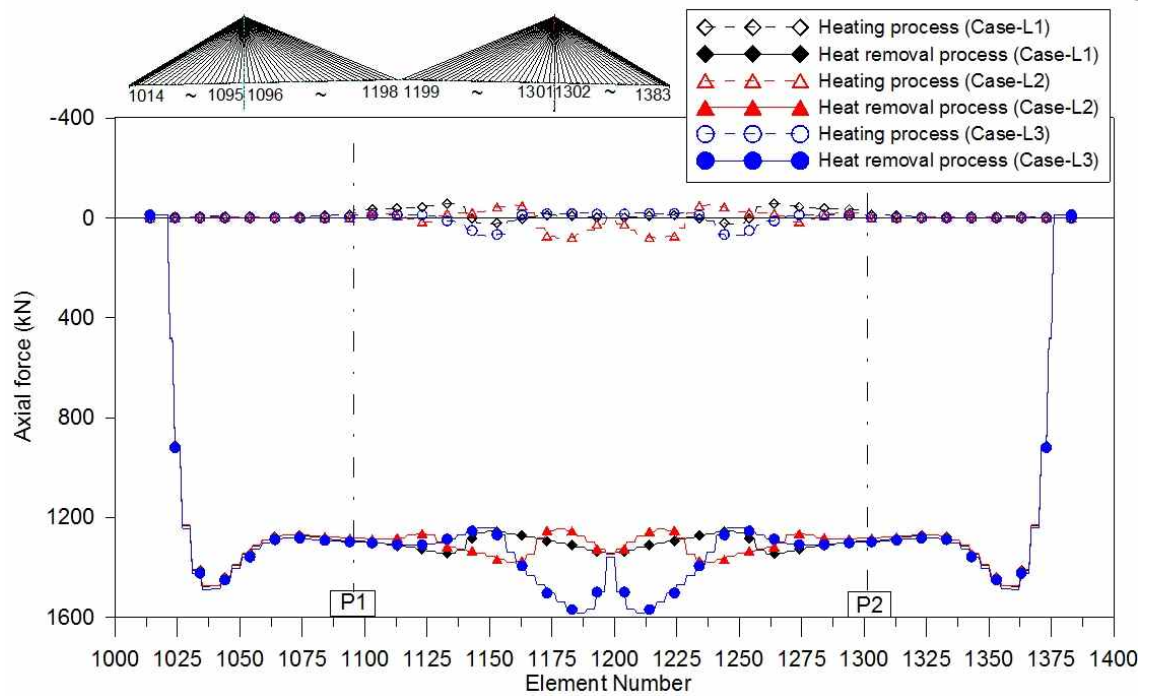


그림 2.36 가열과 열원 제거로 발생된 거더 축력도 비교

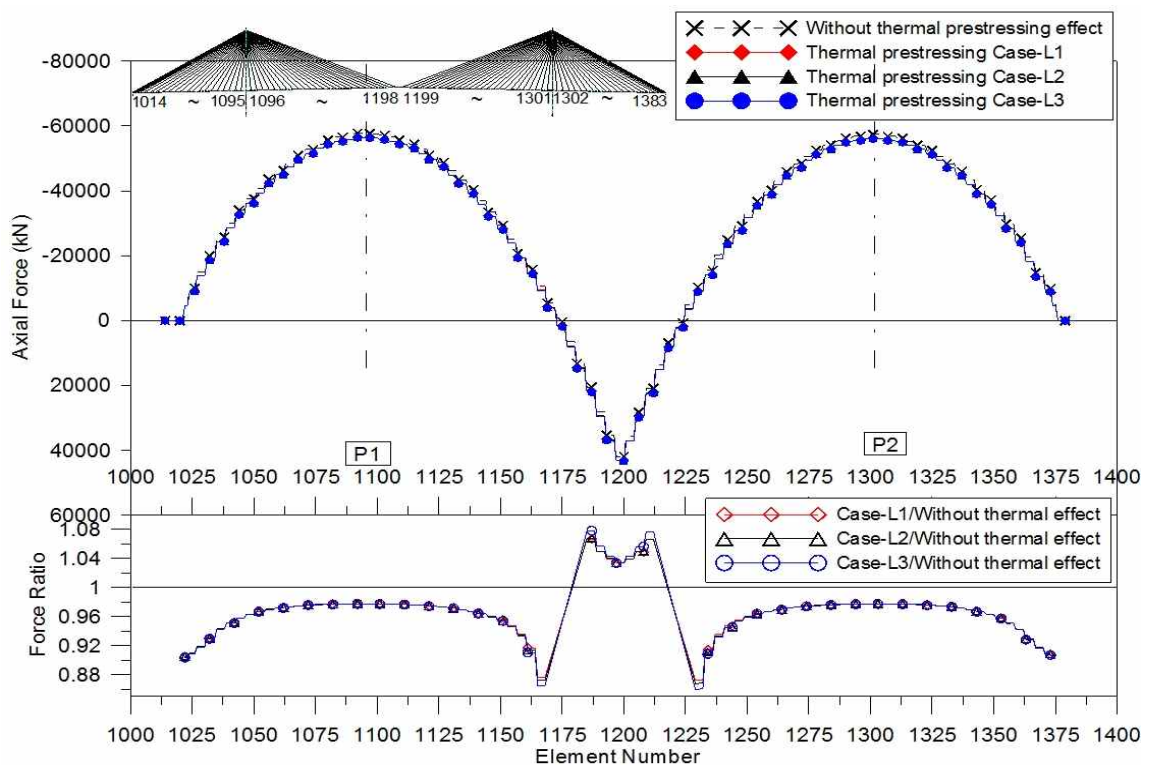


그림 2.37 제안 방법 적용에 따른 시공 완료 후 거더 축력 분포도

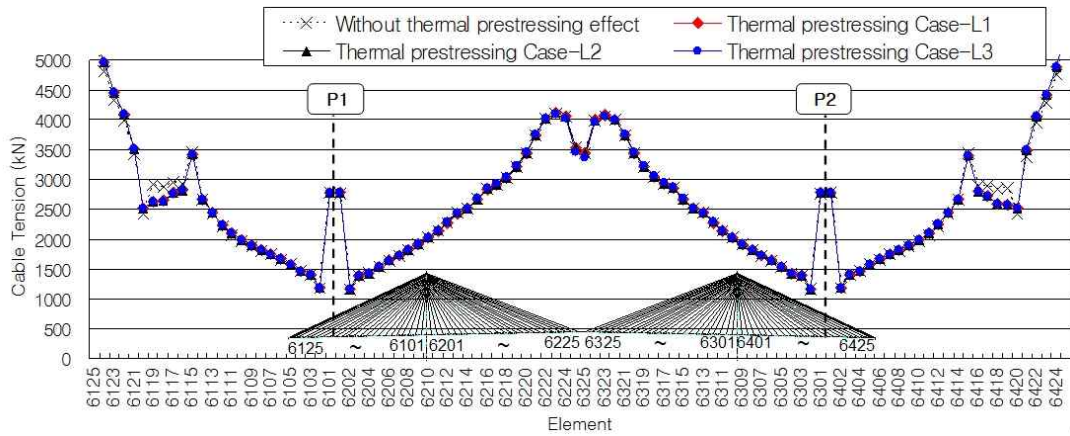


그림 2.38 제안 방법 적용에 따른 시공 완료 후 케이블 장력 분포도

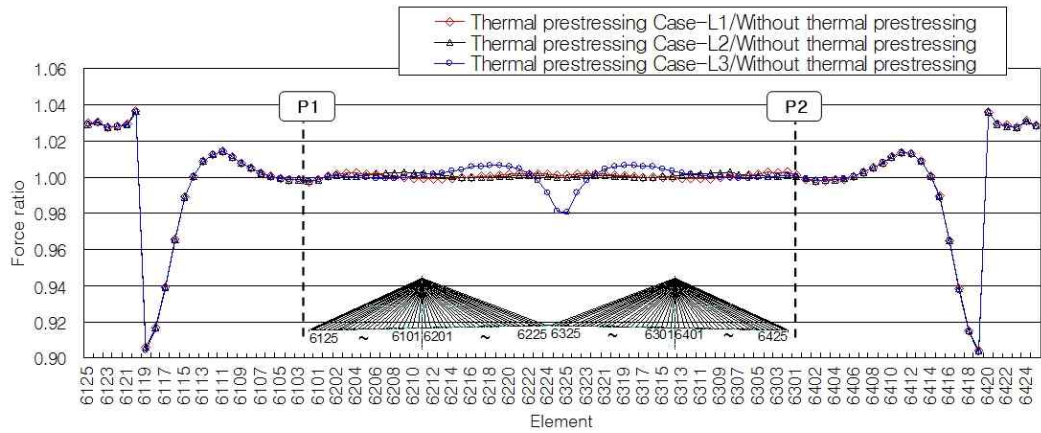


그림 2.39 제안 방법 적용에 따른 시공 완료 후 케이블 장력 비교

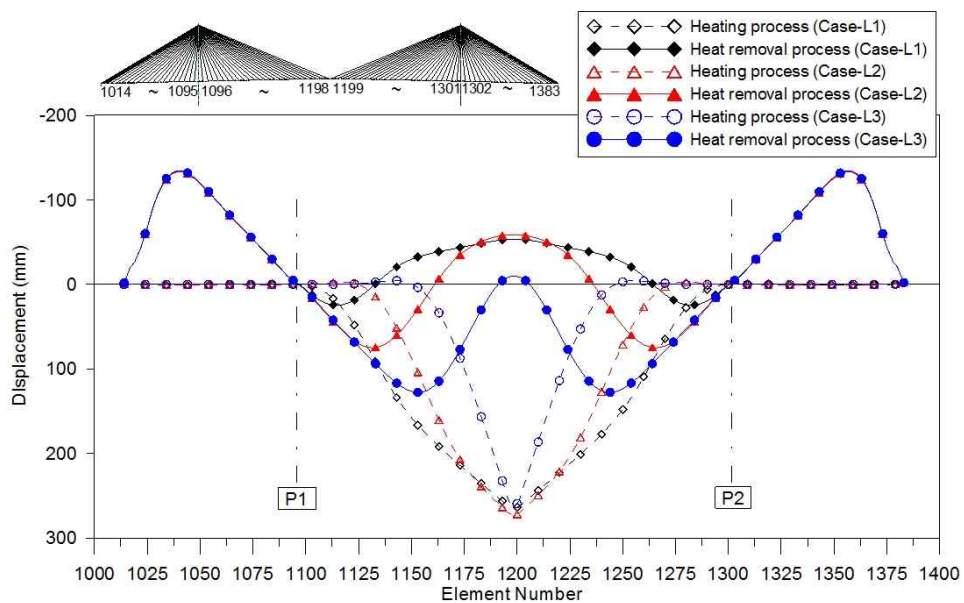


그림 2.40 가열에 따른 거더 변위 발생 비교

(라) 상세 열전달 해석을 통한 검증

열전달해석에서 적용된 온도 예측 모형을 활용하여 내부에 공기(heat flux)를 주입하는 것을 반영한 상세 열전달해석을 수행하여 제안방법을 재검증하였다. 목표 신장량 50mm인 경우에 대해, 가열 유무에 따른 일중 온도 변화를 분석하였다.

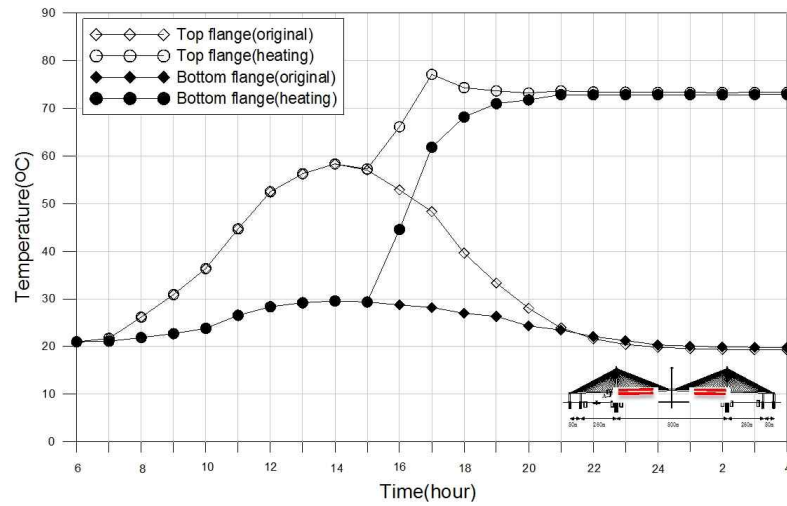


그림 2.41 가열 시작 시각 15시인 경우(일사량이 많은 시간)(6월)

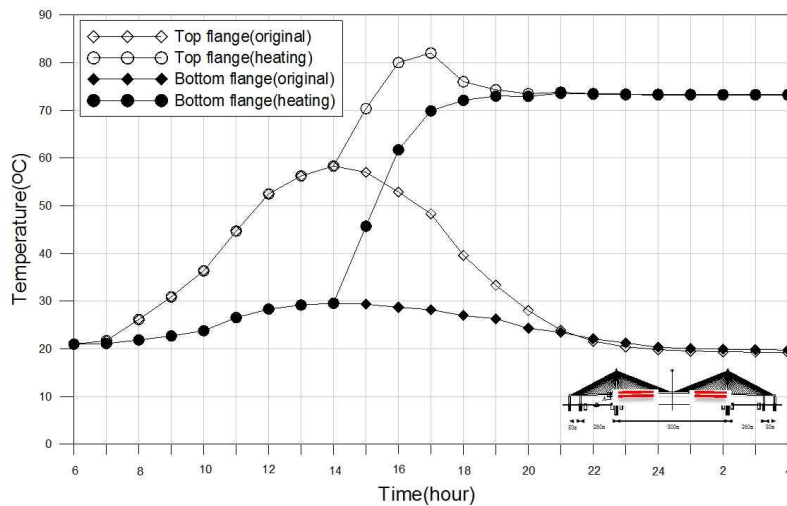


그림 2.42 가열 시작 시각 14시인 경우(6월)

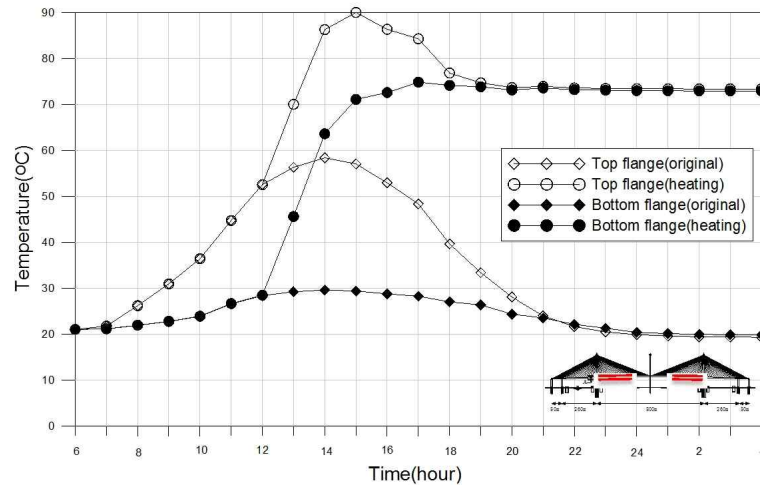


그림 2.43 가열 시작 시각 12시인 경우(6월)

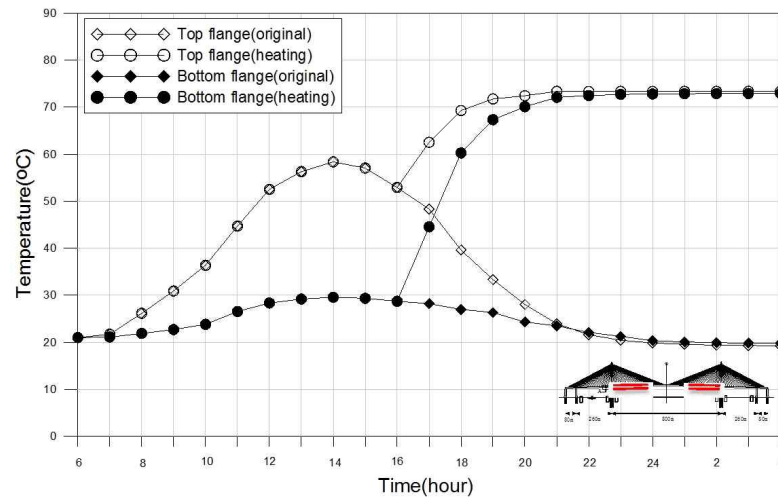


그림 2.44 가열 시작 시각 16시인 경우(6월)

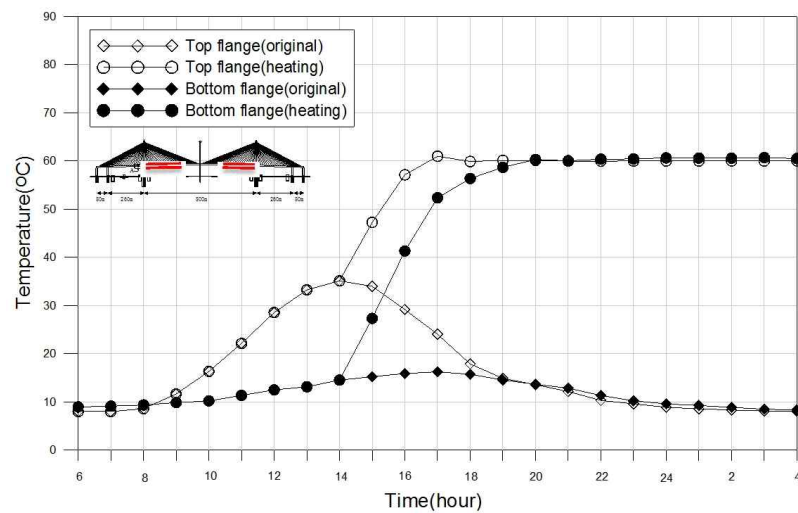


그림 2.45 11월 중 일사량이 많은 시각에 가열 시작한 경우

목표 신장량을 100mm로 변경시켜 가열 유무에 따른 온도변화를 분석하였다. 열 유무에 따른 일중 온도 변화를 분석한 결과, 임의적으로 온도를 가함으로써 상부 플랜지와 하부플랜지에 온도를 일정하게 함이 가능함을 알 수 있다.

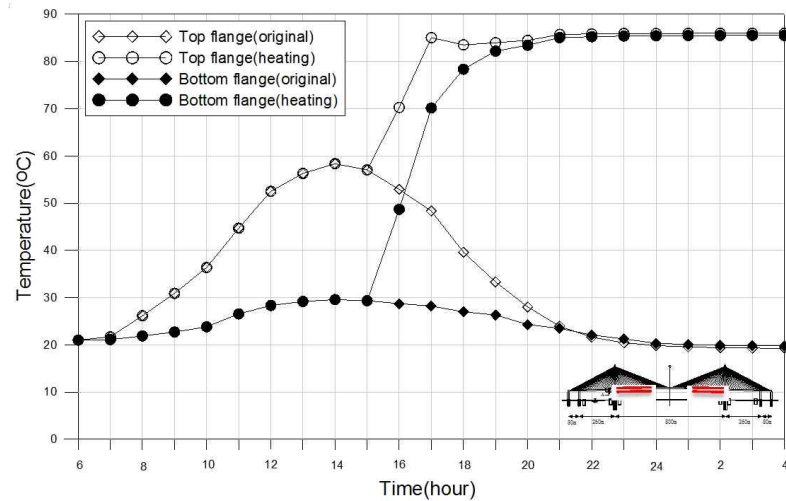


그림 2.46 6월 중 일사량이 많은 시간에 가열 시작한 경우(신장량 100mm)

내부 공기를 가열하여 상·하부 플랜지의 온도가 상승하여 목표 신장량에 도달하였으나, 상·하부 플랜지의 온도가 70°C 이상 되는 것은 key-segment 연결 작업을 하는 작업자의 화상 문제 등 작업 환경에 문제가 될 수 있다. 또한, 기존 특허와의 차별성이 부족하다고 판단된다. 따라서 별도의 시공방법을 제안할 필요가 있다고 판단된다.

## (2) FCM 방법+온도활용 폐합방법

FCM공법으로 시공되는 일부타정식 사장교의 key-segment 폐합작업을 가능하게 하기 위해 고정장치 제거 시 발생하는 변위를 제어할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 set-back을 제어할 수 있는 장치를 고안하여 축력 비대칭에 의한 지나친 변위를 제거하는 방법으로, set-back을 위해 고정장치를 해제하기 전에 반력대, 유압잭, 지지대로 구성된 고정단 변위제어장치를 설치하는 것이다. 상세 내용은 다음 그림과 같다.

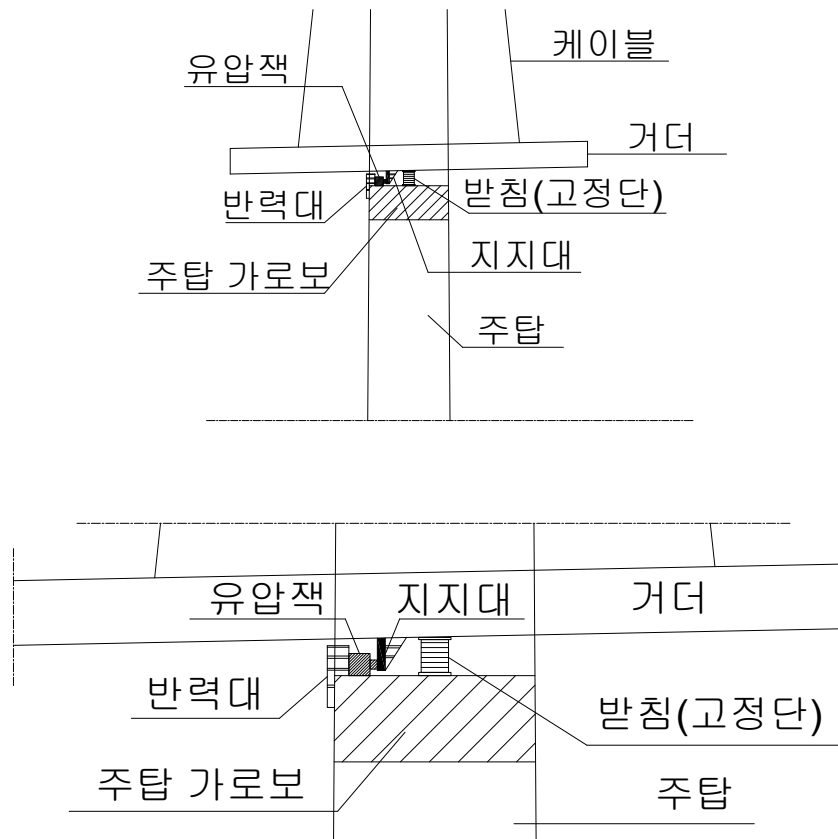


그림 2.47 변위제어 장치 상세

상세 시공단계는 다음과 같다.

- 1) 주탑 가로보 시공 시 반력대를 설치한다. 고정단 받침을 설치한다.
- 2) 주탑부에 설치되는 거더에 지지대를 설치한다(거더 제작 시).
- 3) key-segment 인양 전에 반력대에 유압잭을 설치한다. 이 때 유압잭의 스트로크를 미리 최대 상태에 가깝게 설치한다.

- 4) key-segment 연결 전 한쪽 주탑(예, P1)의 받침의 고정단을 해제한다. 유압잭이 설치되어 있으므로 이 단계에서 거더는 움직이지 않는다.
- 5) 유압잭의 스트로크를 풀어 거더를 측정간으로 50-100mm 이동시킨다.
- 6) key-segment 거더를 인상한다.
- 7) key-segment 거더 한쪽을 기 설치된 거더에 연결한다.
- 8) 유압잭을 작동시켜 이동된 거더를 원위치하고 key-segment 나머지 쪽을 연결한다.
- 9) 유압잭을 제거한다.

변위제어 장치를 활용한 일부타정식 사장교의 시공방법은 통상적인 자정식 사장교의 set back량에 해당하는 변위를 발생시키므로 set back으로 인한 시공 중 안전성이 문제되지 않는다. 또한, 온도를 활용한 폐합방법은 구조계가 다른 상태에서 온도 하중이 가해지고 제거되므로 별도의 2차 응력이 내부에 잔재하므로 구조해석을 통해 안전성을 검토하여야 하나, 변위제어 장치를 활용한 방법은 set back과 reset back이 동일한 구조계에서 수행되므로 잔류응력이 발생되지 않으므로 별도의 구조해석을 수행할 필요는 없다.

변위제어 장치를 활용한 일부타정식 사장교 시공 기술은 사장교의 고부가가치화 과정의 한 가지 방법인 일부타정식 사장교의 설계 및 시공분야에 예측되는 시공 문제점을 사전에 해결할 수 있다. 기존에 제안된 시공방법이 중앙경간장 1,000m 이상의 초장대 사장교에 초점을 둔 것이라면, 변위제어 장치를 활용한 시공방법은 실질적으로 사장교가 비교우위를 가지고, 경제성을 확보하는 중앙경간장 600~1,000m의 영역에서 FCM 시공방법을 갖는 사장교에 적용이 가능한 일부타정식 사장교의 필수 시공 기술이다.

|                                                                  |  |
|------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Step 1</b><br>주탑 가로보<br>반력대<br>설치<br>받침설치<br>(고정단)            |  |
| <b>Step 2</b><br>지지대<br>설치된<br>거더<br>설치                          |  |
| <b>Step 3</b><br>반력대<br>유압잭<br>설치                                |  |
| <b>Step 4</b><br>고정단<br>받침<br>해제                                 |  |
| <b>Step 5</b><br>유압잭<br>스트로크<br>풀어<br>거더 측경간<br>이동<br>(50-100mm) |  |
| <b>Step 6</b><br>키세그먼트<br>거더<br>인상                               |  |
| <b>Step 7</b><br>키세그먼트<br>거더 한 쪽을<br>기 설치 거더와<br>연결              |  |
| <b>Step 8</b><br>유압잭으로<br>거더 원위치 후<br>키세그먼트<br>나머지 측<br>연결       |  |

그림 2.48 변위제어장치를 적용한 시공순서도

## 바. 시공 중 안전성 평가

경제성 평가를 수행하기 전에 일부타정식 사장교의 구조적 장점이 될 수 있는 시공 중 지진 및 풍하중 안전성을 검토하였다. 자정식 사장교의 경우, 시공 중 안전성을 확보하기 위해 별도의 내풍 케이블 등이 필요하나, 일부타정식 사장교의 경우 타정 케이블들을 활용할 수 있으므로 일부타정 케이블 시스템의 시공 중 동하중 안전성을 먼저 평가하여 별도 케이블 채용 여부에 대해 검토하였다.

### (1) 해석 모형

대상교량(중앙경간 810 m의 장경간 사장교)의 FCM 시공 중 취약한 시공 상태 두 가지를 가정하여 지진하중과 풍하중에 대한 일부타정식 케이블 시스템의 동적 안정성을 주탑 거동을 중심으로 분석하였다. 시공 중 취약 단계로 가정된 해석대상 시공단계는 측경간이 완성되기 전 캔틸레버 상태가 가장 긴 경우(Case 1)와 측경간이 완성되고 중앙경간부가 폐합되기 전(Case 2)의 2가지를 가정하였다. 다음 표와 그림들은 해석에 적용된 모형들을 나타낸다.

표 2.12 시공 중 안전성 검토에 고려된 해석 모형

| 모형        | 설명                        | 케이블 시스템       |
|-----------|---------------------------|---------------|
| Case1-SA  | 측경간 완성 전 캔틸레버 상태가 가장 긴 경우 | 자정식 케이블 시스템   |
| Case1-PEA |                           | 일부타정식 케이블 시스템 |
| Case2-SA  | 측경간 완성 후 중앙경간부가 폐합되기 전    | 자정식 케이블 시스템   |
| Case2-PEA |                           | 일부타정식 케이블 시스템 |

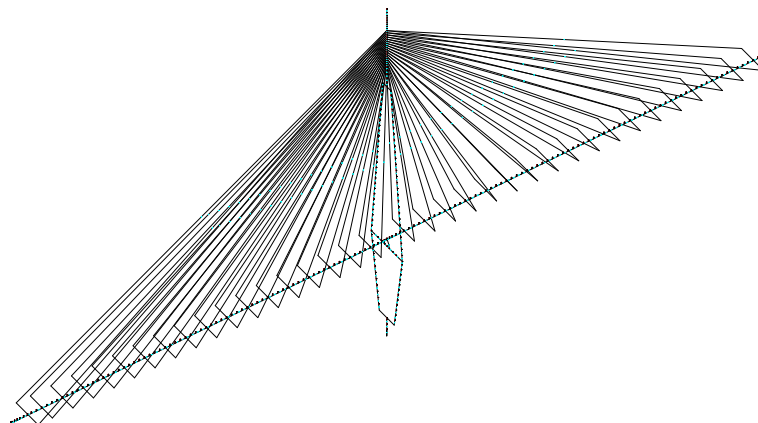


그림 2.49 Case1-SA 모형

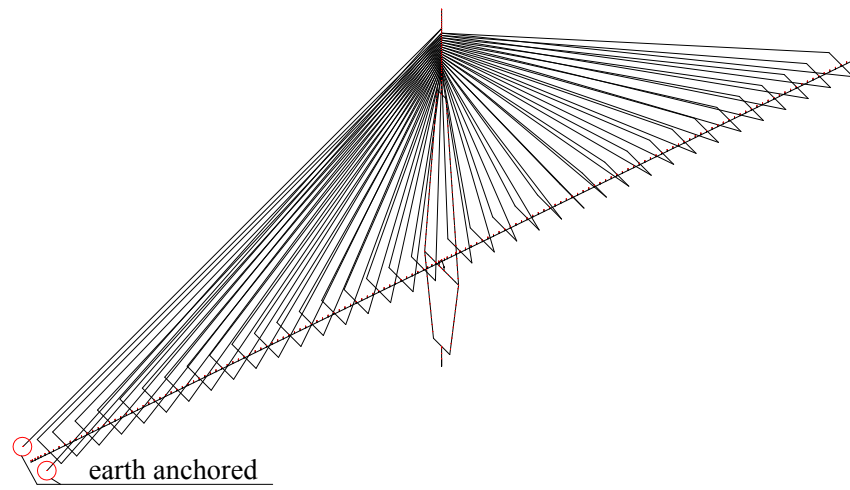


그림 2.49 Case1-PEA 모형

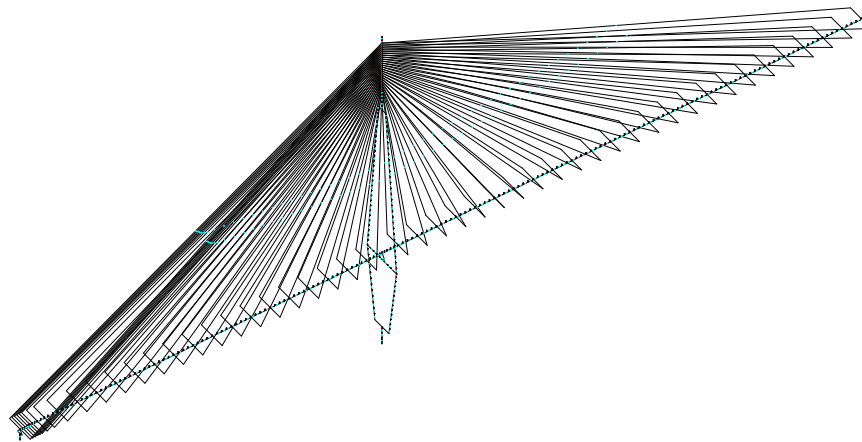


그림 2.51 Case2-SA 모형

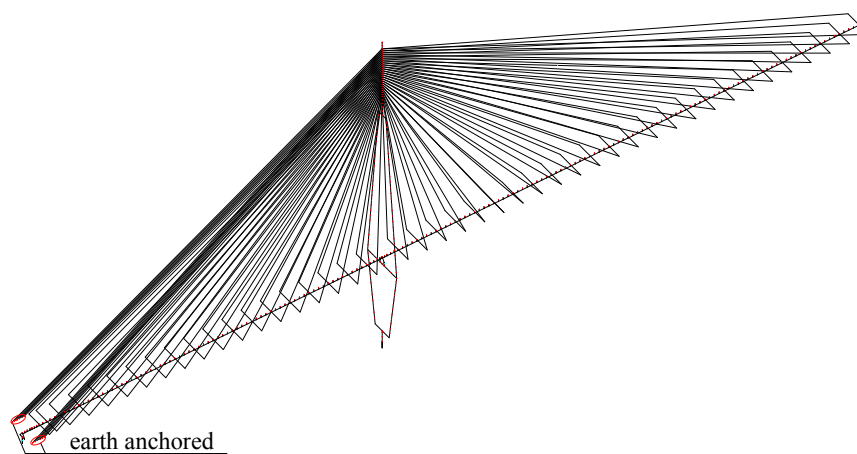
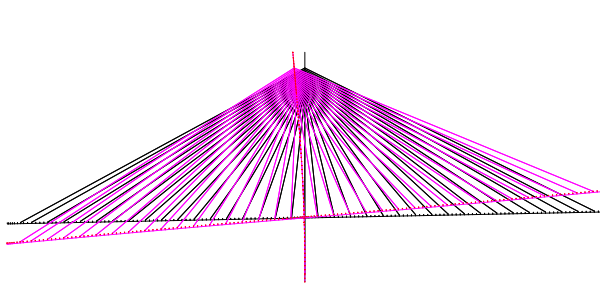


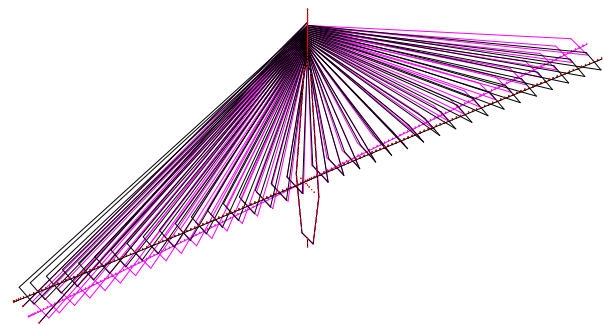
그림 2.52 Case2-PEA 모형

## (2) 해석 결과

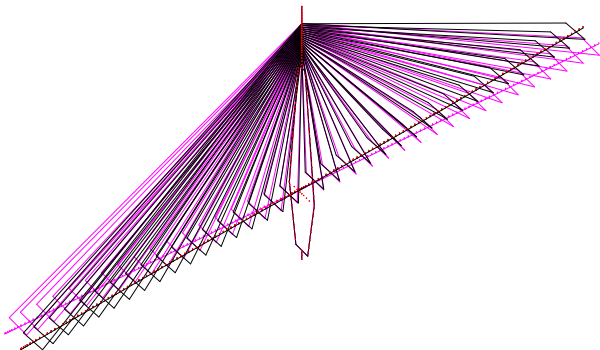
타정 케이블은 주탑과 거더 외부에 연결됨으로 자정식 케이블만을 갖는 시스템보다 주탑의 거동에 직접적인 영향을 많이 주므로 교축방향으로 시공 중 사장교의 동적 거동을 변화시킬 수 있다. Case 1을 대상으로 자정식 케이블 시스템을 갖는 경우 (Case1-SA)의 모드 형상과 일부타정식 케이블 시스템을 갖는 경우(Case1-PEA)의 모드 형상을 분석하였다.



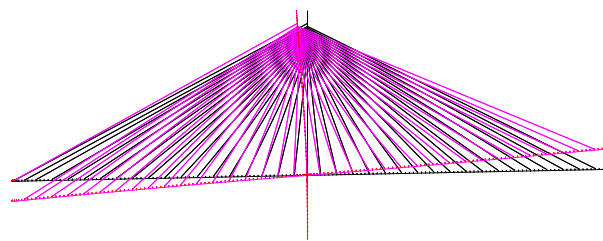
(a) 1차 모드형상( $f=0.0908\text{Hz}$ )



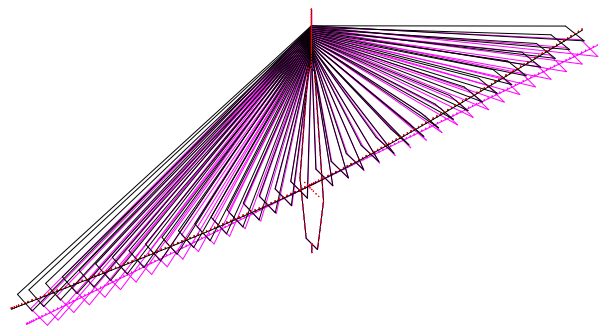
(a) 1차 모드형상( $f=0.0952\text{Hz}$ )



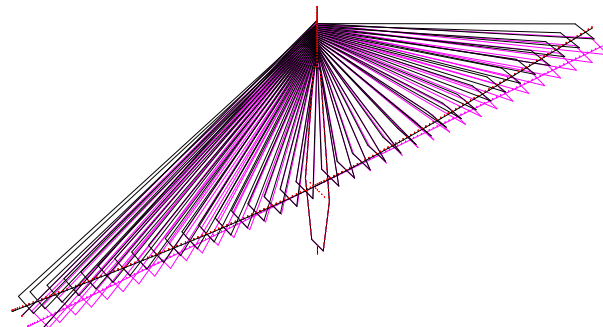
(b) 2차 모드형상( $f=0.0952\text{Hz}$ )



(b) 2차 모드형상( $f=0.1572\text{Hz}$ )



(c) 3차 모드형상( $f=0.1783\text{ Hz}$ )  
그림 2.53 Case1-SA 모형의 저차  
모드형상



(c) 3차 모드형상( $f=0.1783\text{ Hz}$ )  
그림 2.54 Case1-PEA 모형의 저차  
모드형상

자정식의 경우, 연직방향으로의 첫 번째 진동 모드는 1차 모드에서 발생했으나, 일부 타정식의 경우는 2차 모드에서 발생하였으며, 고유 진동수가 크게 변화되었음을 알 수 있다. 반면, 횡방향 첫 번째 진동모드와 주탑의 횡방향 연직모드는 같은 고유진동수를 나타냈다. 또한, Case 1의 자정식 모형과 일부타정식 모형의 주요 고유 진동수를 비교한 결과([표 3.2]), 연직방향 첫 번째 진동수에서 차이가 크게 발생했음을 알 수 있다. 따라서 Case 1과 같이 캔틸레버 상태가 좌우 대칭으로 된 경우, 타정 케이블은 연직방향의 동적 거동에 영향을 미침을 알 수 있다.

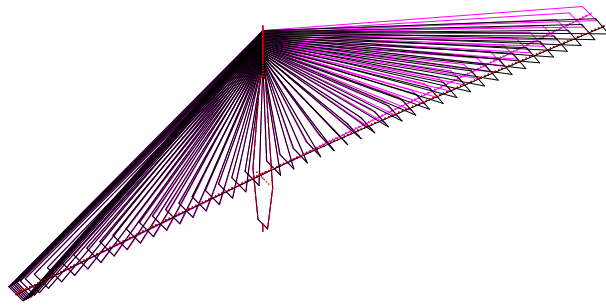
표 2.13 Case 1의 고유 진동수 비교 (Hz)

| 모드 형상   | 해석 모형     | 모드 수   |        |        |
|---------|-----------|--------|--------|--------|
|         |           | 1      | 2      | 3      |
| 연직방향    | Case1-SA  | 0.0908 | 0.5522 | 0.5729 |
|         | Case1-PEA | 0.1572 | 0.5537 | 0.5731 |
| 횡방향     | Case1-SA  | 0.0952 | 0.1783 | 0.8467 |
|         | Case1-PEA | 0.0952 | 0.1783 | 0.8467 |
| 주탑 교축방향 | Case1-SA  | 0.3690 |        |        |
|         | Case1-PEA | 0.3684 |        |        |

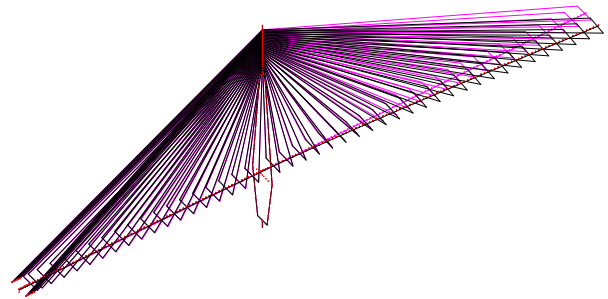
측경간이 연결되고 중앙 경간이 폐합 전인 캔틸레버 상태를 나타내는 Case 2의 주요 진동 모드를 비교한 결과, 1~3차 모드 형상은 동일하게 나타났으나 두 번째 모드인 연직방향에서 고유 진동수 차이가 발생했음을 알 수 있다. 자정식 모형과 일부타정식 모형의 주요 고유 진동수를 비교한 결과에서도 연직방향 고유 진동수들에서만 차이가 발생했음을 확인 할 수 있다. 따라서 Case 2의 경우도 타정된 케이블들은 연직방향의 동적거동에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

표 2.14 Case 2의 고유 진동수 비교 (Hz)

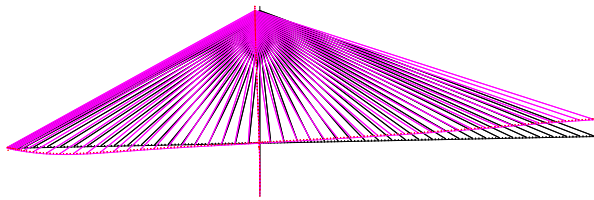
| 모드 형상   | 해석 모형     | 모드 수   |        |        |
|---------|-----------|--------|--------|--------|
|         |           | 1      | 2      | 3      |
| 연직방향    | Case2-SA  | 0.2611 | 0.4719 | 0.5750 |
|         | Case2-PEA | 0.2894 | 0.4926 | 0.5791 |
| 횡방향     | Case2-SA  | 0.0760 | 0.4831 | 0.6875 |
|         | Case2-PEA | 0.0760 | 0.4827 | 0.6836 |
| 주탑 교축방향 | Case2-SA  | 0.3541 |        |        |
|         | Case2-PEA | 0.3545 |        |        |



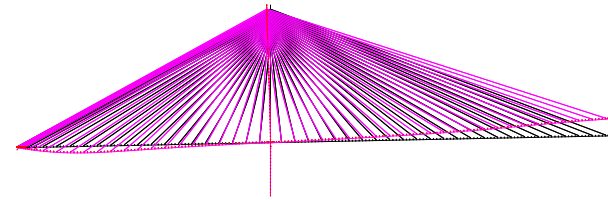
(a) 1차 모드형상( $f=0.0760\text{Hz}$ )



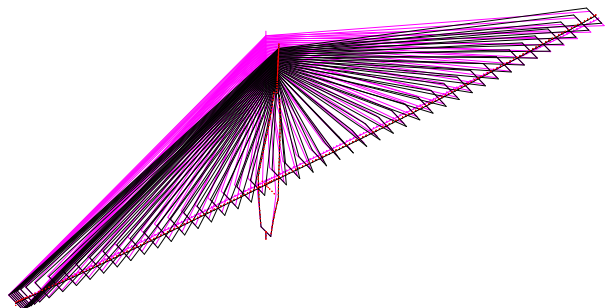
(a) 1차 모드형상( $f=0.0760\text{Hz}$ )



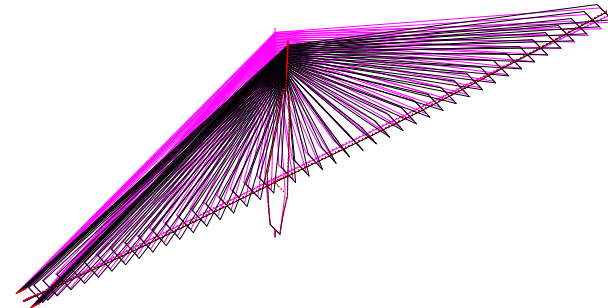
(b) 2차 모드형상( $f=0.2611\text{Hz}$ )



(b) 2차 모드형상( $f=0.2894\text{Hz}$ )



(c) 3차 모드형상( $f=0.3541\text{ Hz}$ )  
그림 2.55 Case2-SA 모형의 저차  
모드형상



(c) 3차 모드형상( $f=0.3454\text{ Hz}$ )  
그림 2.56 Case2-PEA 모형의 저차  
모드형상

고유진동수 변화 결과로부터 일부타정 케이블 시스템은 사장교의 교축직각방향 거동에 미치는 영향이 크므로 주탑 하단의 교축방향 최대 모멘트를 비교하여 다음 표에 나타내었다. 지진하중의 경우, 일부 타정식 모형과 자정식 모형에서 발생한 최대 휨모멘트의 비가 Case 1에서는 0.92, Case 2에서는 0.99로 주경간과 측경간 모두 캔틸레버 상태인 경우에서만 일부타정식 케이블 시스템이 약간의 효과를 갖는 것으로 분석되었다. 그러므로 대상교량의 경우 지진하중에 대한 시공 중 안전성 확보 대책으로 타정 케이블과 같은 외부 케이블의 사용하는 것은 시공 중 안전성 향상에 크게 도움이 되지 않는 것으로 판단된다.

표에서 알 수 있듯이 일반적으로 적용되는 자정식의 경우, 풍하중에 의해 발생한 주탑 휨모멘트는 Case 1에서 지진하중의 6.7배, Case 2에서 3.9배이므로 시공 중 동적 안전성은 풍하중에 의해 지배됨을 알 수 있다. 자정식 케이블 시스템 모에서 발생된 최

대 휨 모멘트 값과 비교하여, 일부타정식 케이블 시스템을 적용함으로써 Case 1에서는 풍하중에 의한 영향이 49%, Case 2에서는 24% 감소되는 것으로 분석되었다. 그러므로 시공 중 안전성에 가장 큰 영향을 미치는 풍하중에 대해 일부타정식 케이블 시스템은 사장교의 시공 중 풍하중 안전성을 크게 향상시키는 구조이며, 별도의 내풍 케이블을 설치하지 않고 타정 케이블을 활용하는 것이 가능하다고 판단된다.

표 2.15 주탑의 시공 중 최대 발생 휨모멘트(교축방향) (kNm)

| 하중   | Case   | 자정식 사장교(A)           | 일부타정식 사장교(B)          | 비율 (B/A) |
|------|--------|----------------------|-----------------------|----------|
| 지진하중 | Case 1 | 1,355,832 (Case1-SA) | 1,246,291 (Case1-PEA) | 0.92     |
|      | Case 2 | 1,170,743 (Case2-SA) | 1,166,765 (Case2-PEA) | 0.99     |
| 풍하중  | Case 1 | 9,069,193 (Case1-SA) | 4,617,905 (Case1-PEA) | 0.51     |
|      | Case 2 | 4,557,920 (Case2-SA) | 3,452,082 (Case2-PEA) | 0.76     |

## 사. 물량 감소 효과 분석

### (1) 거더 물량 감소 효과 분석

허용응력설계법에 따른 거더 단면 검토를 실시하였다. 다음 표는 허용응력설계법의 하중조합을 나타내며, 최대 발생 부재를 산출할 때, 허용응력증가계수의 영향을 반영하여 산출하였다.

표 2.16 허용응력하중조합

| 하중               | 하중 조합     | 허용응력증가계수 |
|------------------|-----------|----------|
| D = 사하중(시공단계 하중) | D + L     | 1.00     |
| L = 활하중          | D + L + W | 1.25     |
| W = 풍하중          | D + E     | 1.50     |
| E = 지진하중         |           |          |

지점부 압축력이 최대가 되는 지점(element 1091)을 대상으로 단면검토를 실시하였다. 대상 교량의 단면에 대해 일부타정식으로 검토하면, 안전성 검토 결과는 0.910으로 기준 값 1보다 작아 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

| E/N  | Pt | LC/SUP       | P/S/T : N/R : L/G | Nx     | My      | Mz     |
|------|----|--------------|-------------------|--------|---------|--------|
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXNx       | 0      | 0       | 0      |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINNx       | -82750 | 19      | -33079 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINMy       | -55720 | -452488 | -18830 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXMy       | -55721 | 452521  | -19058 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINMz       | -71571 | 10      | -43757 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXMz       | -52237 | 220841  | 2927   |
| E/N  | Pt | LC/SUP       | P/S/T : N/R : L/G | Nx     | My      | Mz     |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXNx       | 0      | 0       | 0      |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINNx       | -82736 | 19      | -26992 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINMy       | -56272 | -459415 | -15867 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXMy       | -56242 | 459445  | -15417 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MINMz       | -71164 | 6       | -36589 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L MAXMz       | -46434 | 225014  | 9936   |

| Section Properties |                        | 유효좌굴길이                |         | fe                    |                               | 구분  | fbag                      |                           | fbao |                           | fca                         |                             |
|--------------------|------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-------------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A                  | 1.0220 m <sup>2</sup>  | LL                    | 62.0 m  | fey                   | 5,755.853 kgf/cm <sup>2</sup> | U-F | fbagz                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fbao | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcay                        | 1,470.4 kgf/cm <sup>2</sup> |
| Iy                 | 42.9500 m <sup>4</sup> | LT                    | 296.0 m | fez                   | 3,830.383 kgf/cm <sup>2</sup> |     | fbagy                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> |      |                           | fcay                        | 1,625.1 kgf/cm <sup>2</sup> |
| Iz                 | 1.2540 m <sup>4</sup>  |                       |         |                       |                               | L-F | fbagz                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fbao | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcay                        | 1,395.4 kgf/cm <sup>2</sup> |
| 유효좌굴고려 Iz          | 정                      | 1.2302 m <sup>4</sup> | 부       | 1.2514 m <sup>4</sup> | fbagy                         |     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcay                      |      |                           | 1,542.2 kgf/cm <sup>2</sup> |                             |

| LOAD           |             | 검 토 위 치 |        |        | 단 면 력 (tonf, tonf · m) |         |         | stress (kgf / cm <sup>2</sup> ) |           |          |           | allowable stress |     | 좌굴안정검토 |       |     |
|----------------|-------------|---------|--------|--------|------------------------|---------|---------|---------------------------------|-----------|----------|-----------|------------------|-----|--------|-------|-----|
|                |             | Y(m)    | Z(m)   |        | N                      | My      | Mz      | fc                              | fbcy      | fbcz     | f         | fcal             | 판정  | Z축     | Y축    | 판정  |
| AXIAL          | N<br>(min)  | b       | 1.126  | 11.450 | -8275.0                | 1.9     | -3307.9 | -809.687                        | -0.051    | 297.652  | -432.310  | 2100.000         | O.K | 0.371  | 0.319 | O.K |
|                |             | c       | 1.126  | 4.088  | -8275.0                | 1.9     | -3307.9 | -809.687                        | -0.018    | 297.652  | -432.271  | 2100.000         | O.K | 0.371  | 0.319 | O.K |
|                |             | d       | -1.874 | 0.000  | -8275.0                | 1.9     | -3307.9 | -809.687                        | 0.000     | -495.381 | -1437.853 | 1992.831         | O.K | 0.879  | 0.824 | O.K |
|                |             | e       | -1.874 | 3.700  | -8275.0                | 1.9     | -3307.9 | -809.687                        | -0.016    | -495.381 | -1437.872 | 1992.831         | O.K | 0.850  | 0.824 | O.K |
| LONG MOMENT    | Mz<br>(max) | b       | 1.126  | 11.450 | -5223.7                | 2208.4  | 292.7   | -511.125                        | -58.874   | -26.790  | -606.652  | 2100.000         | O.K | 0.393  | 0.360 | O.K |
|                |             | c       | 1.126  | 4.088  | -5223.7                | 2208.4  | 292.7   | -511.125                        | -21.020   | -26.790  | -565.109  | 2100.000         | O.K | 0.373  | 0.340 | O.K |
|                |             | d       | -1.874 | 0.000  | -5223.7                | 2208.4  | 292.7   | -511.125                        | 0.000     | 44.587   | -459.672  | 1992.831         | O.K | 0.342  | 0.307 | O.K |
|                |             | e       | -1.874 | 3.700  | -5223.7                | 2208.4  | 292.7   | -511.125                        | -19.025   | 44.587   | -480.551  | 1992.831         | O.K | 0.333  | 0.317 | O.K |
|                | Mz<br>(min) | b       | 1.126  | 11.450 | -7157.1                | 1.0     | -4375.7 | -700.303                        | -0.027    | 393.735  | -218.507  | 2100.000         | O.K | 0.247  | 0.202 | O.K |
|                |             | c       | 1.126  | 4.088  | -7157.1                | 1.0     | -4375.7 | -700.303                        | -0.010    | 393.735  | -218.488  | 2100.000         | O.K | 0.247  | 0.201 | O.K |
|                |             | d       | -1.874 | 0.000  | -7157.1                | 1.0     | -4375.7 | -700.303                        | 0.000     | -655.292 | -1502.206 | 1992.831         | O.K | 0.884  | 0.836 | O.K |
|                |             | e       | -1.874 | 3.700  | -7157.1                | 1.0     | -4375.7 | -700.303                        | -0.009    | -655.292 | -1502.216 | 1992.831         | O.K | 0.858  | 0.836 | O.K |
| LATERAL MOMENT | My<br>(max) | b       | 1.126  | 11.450 | -5572.1                | 45252.1 | -1905.8 | -545.215                        | -1206.371 | 171.488  | -1677.866 | 2100.000         | O.K | 0.910  | 0.875 | O.K |
|                |             | c       | 1.126  | 4.088  | -5572.1                | 45252.1 | -1905.8 | -545.215                        | -430.711  | 171.488  | -821.045  | 2100.000         | O.K | 0.502  | 0.467 | O.K |
|                |             | d       | -1.874 | 0.000  | -5572.1                | 45252.1 | -1905.8 | -545.215                        | 0.000     | -285.407 | -877.989  | 1992.831         | O.K | 0.549  | 0.512 | O.K |
|                |             | e       | -1.874 | 3.700  | -5572.1                | 45252.1 | -1905.8 | -545.215                        | -389.832  | -285.407 | -1308.611 | 1992.831         | O.K | 0.734  | 0.717 | O.K |

|                        |  |  |
|------------------------|--|--|
| 안전검토 = 0.910 < 1 (O.K) |  |  |
|------------------------|--|--|

지점부 압축력이 최대가 되는 지점(element 1091)의 자정식 모형에서는 축력이 증가하여 일부타정식과 동일한 단면으로는 동일 수준의 안전율을 확보할 수 없다. 단면 재설계를 통해 일부타정식과 유사한 단면이 되는 단면을 설계하였으며, 결과는 다음과 같다(안전성 검토 결과는 0.912로 일부타정식과 유사함).

| E/N  | Pt | LC/SUP       | P/S/T | N/R | L/G | Nx      | My      | Mz     |
|------|----|--------------|-------|-----|-----|---------|---------|--------|
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | Nx  | 0       | 0       | 0      |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | Nx  | -135954 | 30      | -38941 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | My  | -96240  | -303157 | -23327 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | My  | -96241  | 303223  | -23268 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | Mz  | -118642 | 15      | -47369 |
| 1091 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | Mz  | -87323  | 36      | 7456   |
| E/N  | Pt | LC/SUP       | P/S/T | N/R | L/G | Nx      | My      | Mz     |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | Nx  | 0       | 0       | 0      |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | Nx  | -135943 | 32      | -33769 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | My  | -96231  | -309042 | -17001 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | My  | -96232  | 309108  | -16950 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MIN | Mz  | -98736  | 10      | -42466 |
| 1092 | 0  | envelope.sup | T:J:L | MAX | Mz  | -86082  | 39      | 15215  |

| Section Properties     |                        | 유효작굴길이                |         | fe                    |                               | 구분      | fbag                      |                                 | fbao     |                           | fca                       |                           |     |             |       |     |
|------------------------|------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|-------------------------------|---------|---------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----|-------------|-------|-----|
| A                      | 1.8840 m <sup>2</sup>  | LL                    | 62.0 m  | fey                   | 4,692.928 kgf/cm <sup>2</sup> | U-F     | fbagz                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup>       | fbao     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcax                      | 1,380 kgf/cm <sup>2</sup> |     |             |       |     |
| Iy                     | 42.9500 m <sup>4</sup> | LT                    | 296.0 m | fez                   | 3,123.622 kgf/cm <sup>2</sup> |         | fbagy                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup>       |          |                           | fcay                      | 1,551 kgf/cm <sup>2</sup> |     |             |       |     |
| Iz                     | 1.2540 m <sup>4</sup>  |                       |         |                       |                               | L-F     | fbagz                     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup>       | fbao     | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcax                      | 1,310 kgf/cm <sup>2</sup> |     |             |       |     |
| 유효곡고려 Iz               | 정                      | 1.2302 m <sup>4</sup> | 부       | 1.2514 m <sup>4</sup> | fbagy                         |         | 2,100 kgf/cm <sup>2</sup> | fcay                            |          |                           | 1,472 kgf/cm <sup>2</sup> |                           |     |             |       |     |
|                        |                        |                       |         |                       |                               |         |                           |                                 |          |                           |                           |                           |     |             |       |     |
| LOAD                   |                        |                       | 검 토 위 치 |                       | 단 면 력 (tonf, tonf · m)        |         |                           | stress (kgf / cm <sup>2</sup> ) |          |                           |                           | allowable stress          |     | 작 굴 안 정 검 토 |       |     |
|                        |                        |                       | Y(m)    | Z(m)                  | N                             | My      | Mz                        | fc                              | fbcy     | fbcz                      | f                         | fcal                      | 판 정 | Z축          | Y축    | 판 정 |
| AXIAL                  | N<br>(min)             | b                     | 1.126   | 11.450                | -13595.4                      | 3.0     | -3894.1                   | -721.624                        | -0.080   | 350.399                   | -266.050                  | 2100.000                  | O.K | 0.306       | 0.248 | O.K |
|                        |                        | c                     | 1.126   | 4.088                 | -13595.4                      | 3.0     | -3894.1                   | -721.624                        | -0.029   | 350.399                   | -265.990                  | 2100.000                  | O.K | 0.306       | 0.248 | O.K |
|                        |                        | d                     | -1.874  | 0.000                 | -13595.4                      | 3.0     | -3894.1                   | -721.624                        | 0.000    | -583.169                  | -1479.992                 | 1992.831                  | O.K | 0.912       | 0.851 | O.K |
|                        |                        | e                     | -1.874  | 3.700                 | -13595.4                      | 3.0     | -3894.1                   | -721.624                        | -0.026   | -583.169                  | -1480.023                 | 1992.831                  | O.K | 0.884       | 0.851 | O.K |
| LONG MOMENT            | Mz<br>(max)            | b                     | 1.126   | 11.450                | -8732.3                       | 3.6     | 745.6                     | -463.498                        | -0.096   | -68.243                   | -543.738                  | 2100.000                  | O.K | 0.374       | 0.337 | O.K |
|                        |                        | c                     | 1.126   | 4.088                 | -8732.3                       | 3.6     | 745.6                     | -463.498                        | -0.034   | -68.243                   | -543.669                  | 2100.000                  | O.K | 0.374       | 0.337 | O.K |
|                        |                        | d                     | -1.874  | 0.000                 | -8732.3                       | 3.6     | 745.6                     | -463.498                        | 0.000    | 113.577                   | -330.131                  | 1992.831                  | O.K | 0.290       | 0.251 | O.K |
|                        |                        | e                     | -1.874  | 3.700                 | -8732.3                       | 3.6     | 745.6                     | -463.498                        | -0.031   | 113.577                   | -330.166                  | 1992.831                  | O.K | 0.272       | 0.251 | O.K |
|                        | Mz<br>(min)            | b                     | 1.126   | 11.450                | -11864.2                      | 1.5     | -4736.9                   | -629.735                        | -0.040   | 426.236                   | -95.916                   | 2100.000                  | O.K | 0.202       | 0.152 | O.K |
|                        |                        | c                     | 1.126   | 4.088                 | -11864.2                      | 1.5     | -4736.9                   | -629.735                        | -0.014   | 426.236                   | -95.886                   | 2100.000                  | O.K | 0.202       | 0.152 | O.K |
|                        |                        | d                     | -1.874  | 0.000                 | -11864.2                      | 1.5     | -4736.9                   | -629.735                        | 0.000    | -709.384                  | -1518.247                 | 1992.831                  | O.K | 0.904       | 0.851 | O.K |
|                        |                        | e                     | -1.874  | 3.700                 | -11864.2                      | 1.5     | -4736.9                   | -629.735                        | -0.013   | -709.384                  | -1518.262                 | 1992.831                  | O.K | 0.879       | 0.851 | O.K |
| LATERAL MOMENT         | My<br>(max)            | b                     | 1.126   | 11.450                | -9624.1                       | 30322.3 | -2326.8                   | -510.833                        | -808.359 | 209.370                   | -1167.627                 | 2100.000                  | O.K | 0.683       | 0.642 | O.K |
|                        |                        | c                     | 1.126   | 4.088                 | -9624.1                       | 30322.3 | -2326.8                   | -510.833                        | -288.609 | 209.370                   | -584.390                  | 2100.000                  | O.K | 0.405       | 0.364 | O.K |
|                        |                        | d                     | -1.874  | 0.000                 | -9624.1                       | 30322.3 | -2326.8                   | -510.833                        | 0.000    | -348.455                  | -927.415                  | 1992.831                  | O.K | 0.588       | 0.545 | O.K |
|                        |                        | e                     | -1.874  | 3.700                 | -9624.1                       | 30322.3 | -2326.8                   | -510.833                        | -261.217 | -348.455                  | -1220.539                 | 1992.831                  | O.K | 0.708       | 0.685 | O.K |
| 안정검토 = 0.912 < 1 (O.K) |                        |                       |         |                       |                               |         |                           |                                 |          |                           |                           |                           |     |             |       |     |

최대 압축응력이 발생하는 주탑부 거더에서 동일한 안전성 수준을 유지하기 위해서는 자정식 사장교의 단면( $A=1.884m^2$ )적이 일부타정식 사장교 단면( $A=1.022m^2$ )적의 1.843배 증가되어야 한다. 자정식 사장교의 압축력이 일부타정식 사장교의 주탑부 최대 압축력보다 큰 구간을 산정할 때, 전체 교량 연장 1,410m의 75.6%에서 자정식 사장교의 압축력이 일부타정식 사장교의 주탑부 최대 압축력보다 큰 것으로 나타났다.

따라서 일부타정식 사장교를 기준으로 했을 때, 자정식 사장교에서 증가되는 개략적인 물량의 비율을 최대 증가 단면적의 평균과 압축력이 일부타정식 최댓값보다 큰 구

간의 비율로부터 최소 1.32배 증가될 것으로 예측할 수 있다. 2차 부재, 연결부 등을 반영한 중량 할증은 해석 시와 동일하게 30% 할증을 반영하면, 자정식 사장교와 일부 타정식 사장교의 총 강재량은 다음과 같다.

- 일부타정식 :  $1.022m^2 \times 1,410m \times 7.85tf/m^3 \times 1.3 = 14,706ton$
- 자정식 :  $(1.022m^2 \times 1,410m \times 7.85tf/m^3 \times 1.3) \times 1.32 = 19,411ton$
- 감소된 강재량 : 4,705ton

따라서 일부타정식 사장교는 거더의 전체 강재량을 개략 24.2% 감소시킬 수 있다.

## (2) 주탑 물량 감소 효과 분석

콘크리트 주탑에 대해서는 강도 설계법을 활용하여 단면 감소 효과를 분석하였다.

### ○ 주탑 하단 leg의 가장 아래 부분

주탑 하단 leg의 가장 아래 부분은 축력과 모멘트를 모두 최대가 되는 지점으로, 교축방향 크기는 10m이며, 교축직각방향 크기는 11.0m이다. 축력 최대인 경우와 교축방향 모멘트가 최대가 되는 조건에서 P-M 상관도를 작성하여 주탑의 안전성 검토를 수행하였다. 중공 사각형 단면의 내측과 외측에 H32 철근이 배근되었으며, 철근 간격은 125mm 이다.

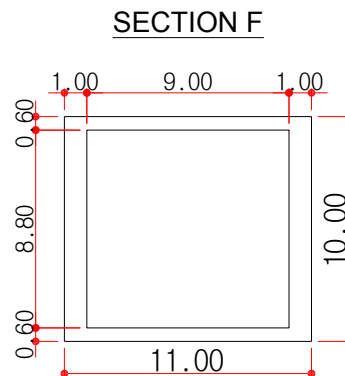
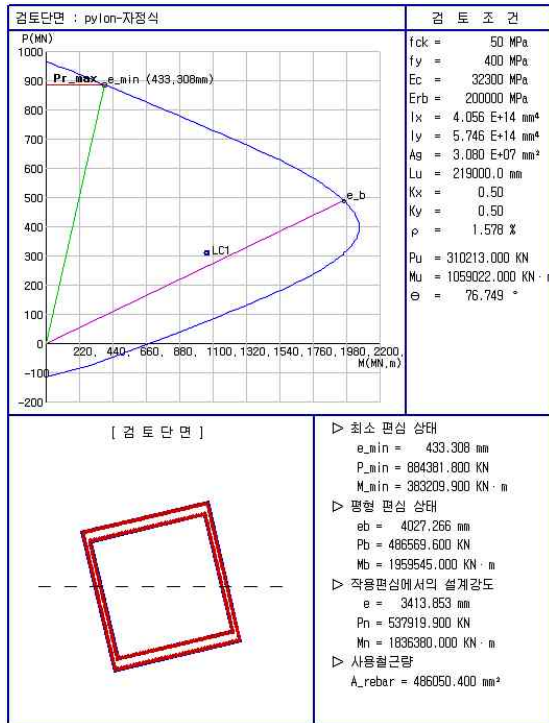
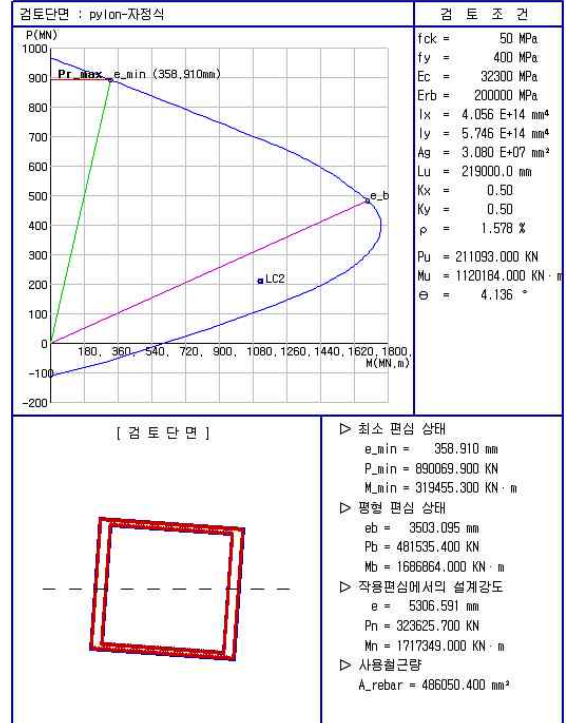


그림 2.57 검토 단면

자정식 단면에 대해 P-M 상관도를 분석한 결과, 대상 단면은 안전성을 확보한 것으로 분석되었다. 일부타정식 사장교에서는 주탑에서 발생하는 교축방향 휨모멘트가 60% 이상 감소하므로 교축방향 단면 크기가 감소될 수 있다. 교축방향 주탑의 크기를 1m, 2m, 2.5m 감소시켜 주탑의 P-M상관도를 분석하였다.

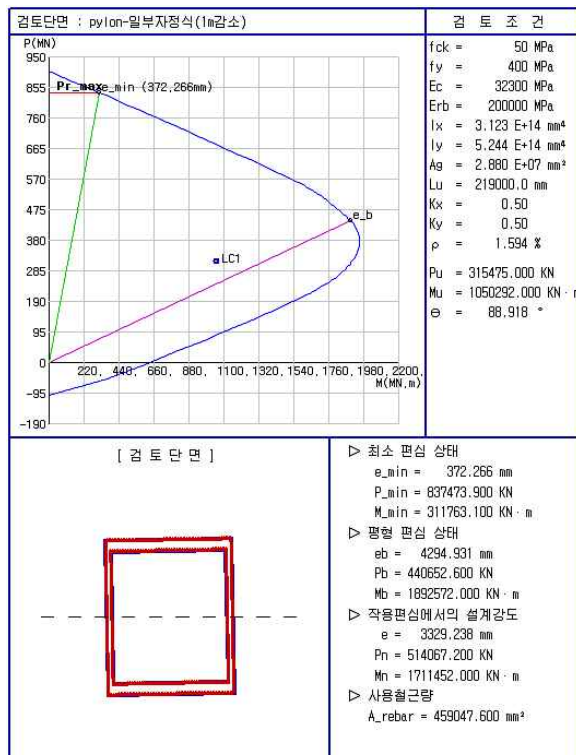


(a) 축력 최대

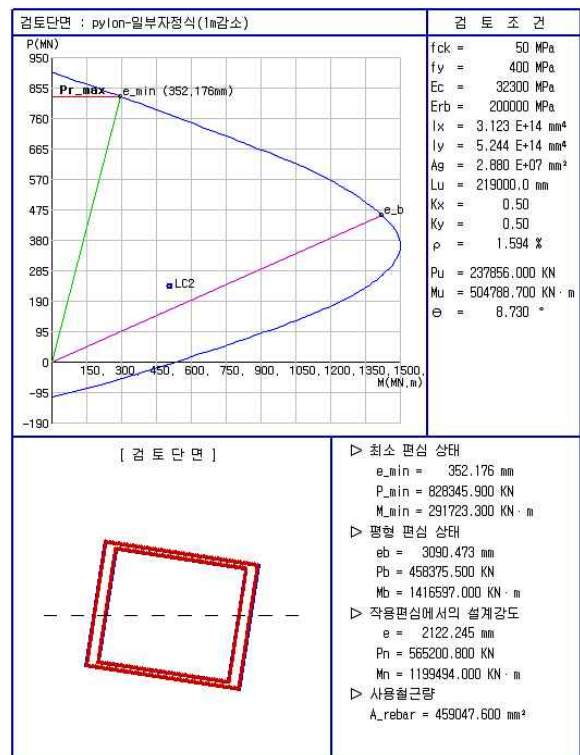


(b) 모멘트 최대

그림 2.58 자정식 사장교 주탑의 P-M 상관도

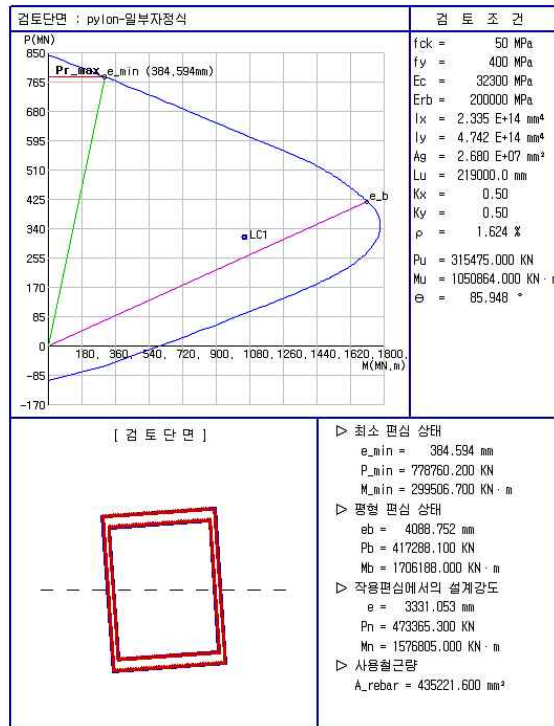


(a) 축력 최대

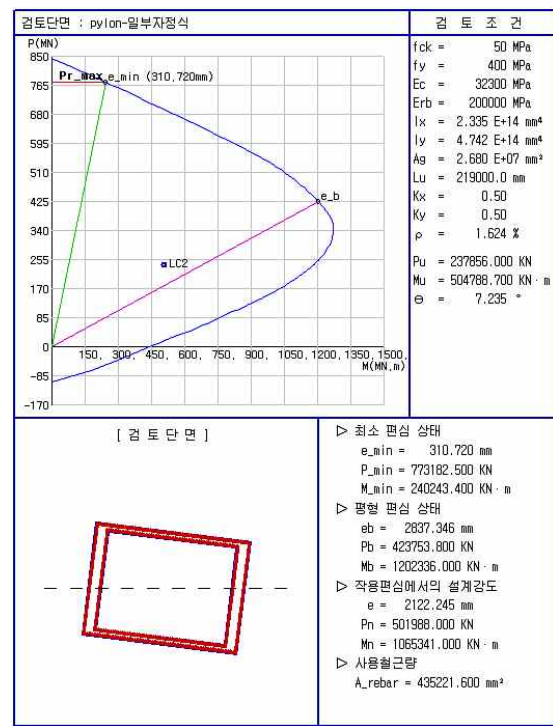


(b) 모멘트 최대

그림 2.59 단면 1m 감소된 일부타정식 사장교 주탑의 P-M 상관도

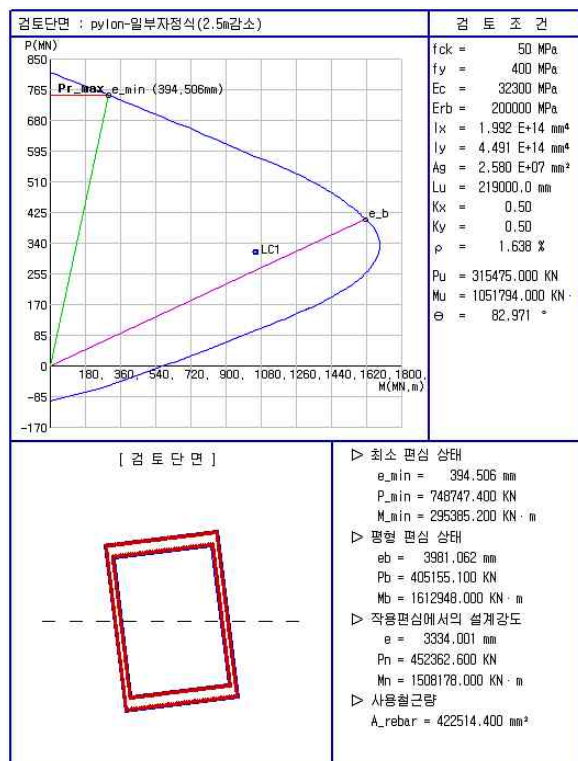


(a) 축력 최대

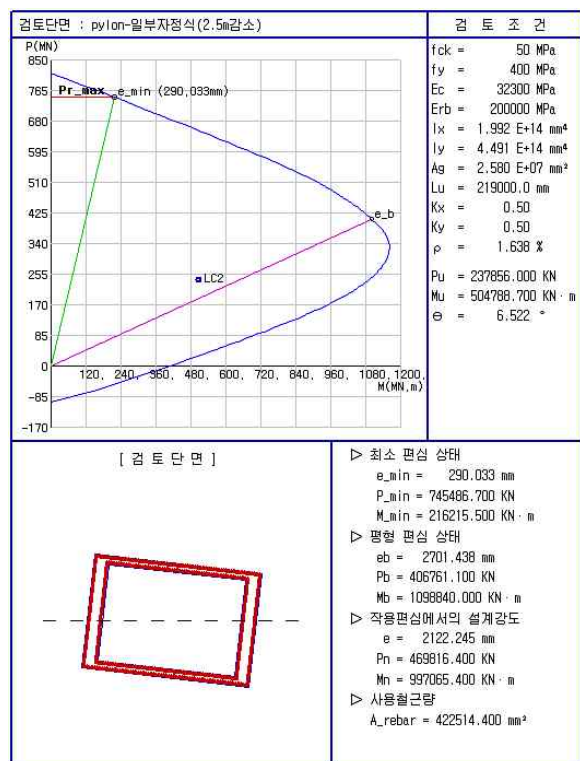


(b) 모멘트 최대

그림 2.60 단면 2m 감소된 일부타정식 사장교 주탑의 P-M 상관도



(a) 축력 최대



(b) 모멘트 최대

그림 2.61 단면 2.5m 감소된 일부타정식 사장교 주탑의 P-M 상관도

단면 감소에 따른 P-M상관도를 분석한 결과, 주탑 leg 하단은 교축방향으로 2.5m 길이 감소가 가능한 것으로 분석되었다.

- 단면 감소 :  $11\text{m} \times 10\text{m} \rightarrow 11\text{m} \times 7.5\text{m}$
- 콘크리트 단면적 감소(주탑 하단부) :  $30.8\text{m}^2$  (자정식)  $\rightarrow 25.8\text{m}^2$  (16.2% 감소)
- 사용철근(H32) 철근량 감소 :  $486,050\text{mm}^2 \rightarrow 422,514\text{mm}^2$  (13.1% 감소)

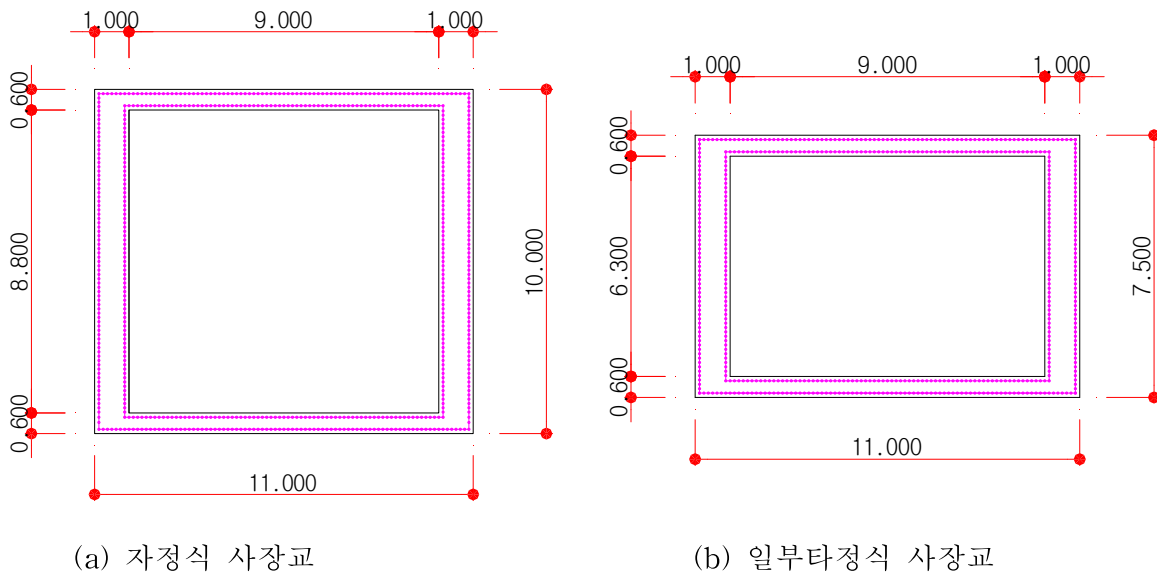
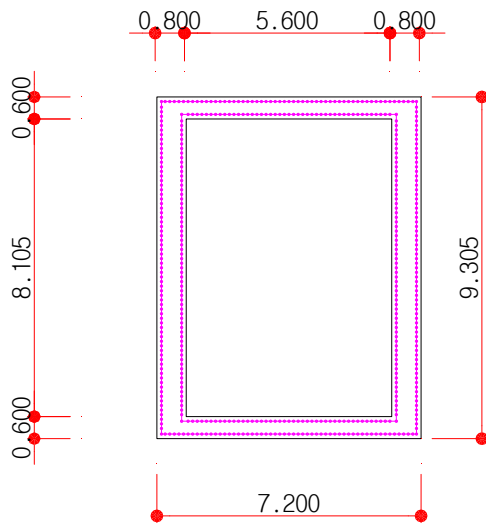


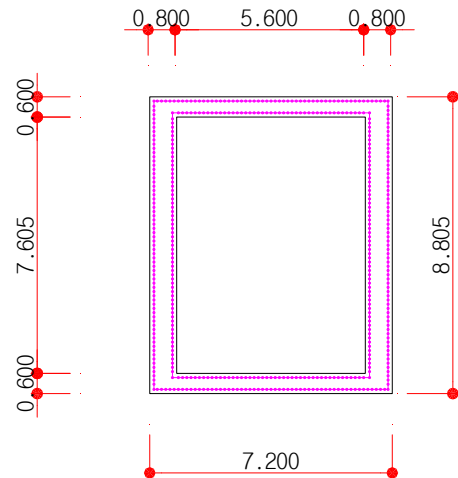
그림 2.62 주탑 하단부 단면 비교

#### ○ 주탑 leg 중간 부분

가로보에 위치한 주탑 leg 부분을 대상으로 자정식과 일부타정식 사장교의 축력 최대인 경우와 교축방향 모멘트가 최대가 되는 조건에서 P-M 상관도를 작성하여 단면 감소효과를 분석하였다. 주탑 leg 하단과 동일한 사용철근과 배근이 적용되었다. P-M 상관도 분석으로 도출한 유사한 수준의 응답을 갖는 단면은 그림 2.63과 같으며, 자정식 사장교와 일부타정식 사장교에서의 P-M 상관도는 그림 2.64와 그림 2.65에 나타내었다.

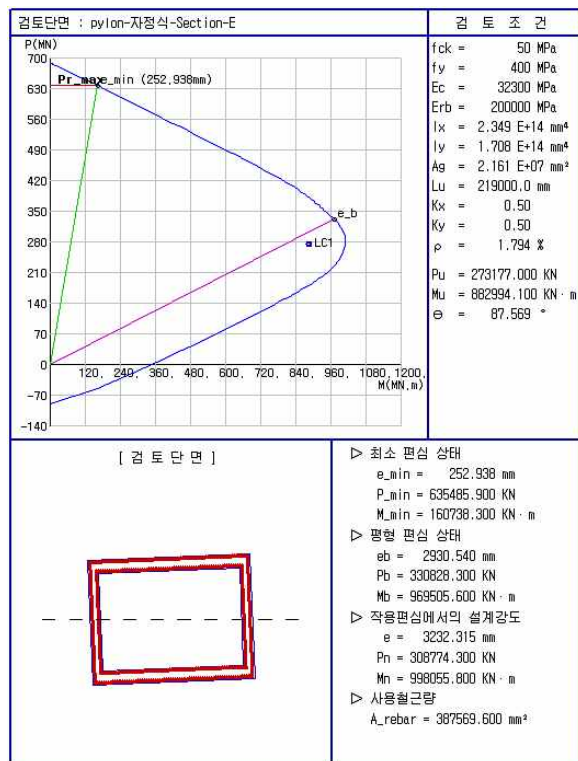


(a) 자정식 사장교

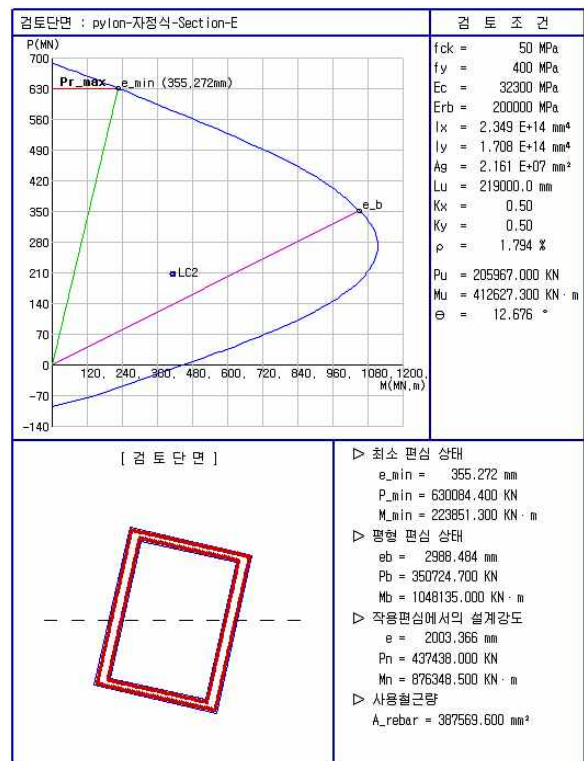


(b) 일부타정식 사장교

그림 2.63 주탑 중간부 leg 최적 단면 비교

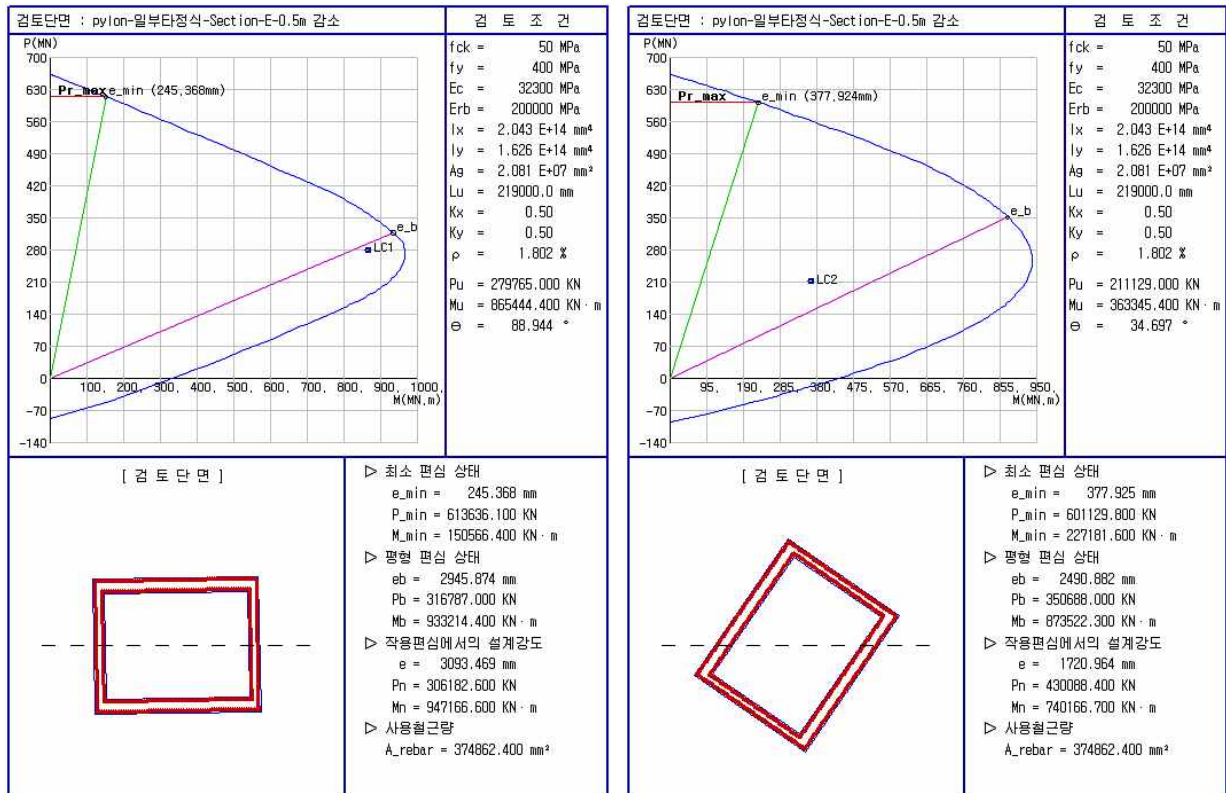


(a) 축력 최대



(b) 모멘트 최대

그림 2.64 자정식 사장교 주탑의 leg 중간부에서의 P-M 상관도



(a) 축력 최대

(b) 모멘트 최대

그림 2.65 일부타정식 사장교 주탑의 leg 중간부에서의 P-M 상관도

단면 감소에 따른 P-M상관도를 분석한 결과, 주탑 leg 중간 부분은 교축방향으로 0.5m 길이 감소가 가능한 것으로 분석되었다.

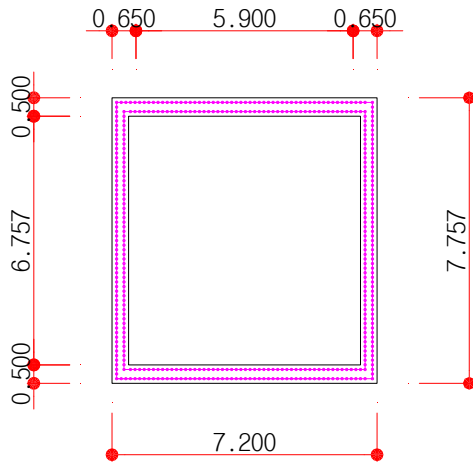
- 단면 감소 :  $7.2\text{m} \times 9.305\text{m} \rightarrow 7.2\text{m} \times 8.805\text{m}$
- 콘크리트 단면적 감소(주탑 하단부) :  $21.6\text{m}^2$  (자정식)  $\rightarrow 20.8\text{m}^2$  (3.7% 감소)
- 사용철근(H32) 철근량 감소 :  $387,569\text{mm}^2 \rightarrow 374,862\text{mm}^2$  (3.3% 감소)

주탑 하단부와 비교해서 중간부는 모멘트 보다는 축력의 영향이 단면의 크기를 지배하는 경향이 강하므로 일부타정식 채용으로 인한 모멘트 감소로 단면감소가 크게 나타나지 않았다고 판단된다.

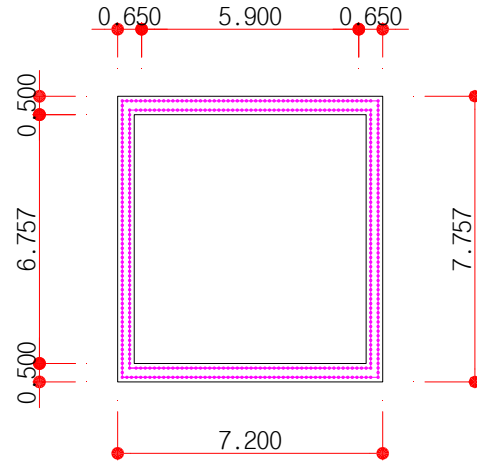
#### ○ 주탑 leg 상단 부분

주탑 leg 상단 부분에 대해 자정식과 일부타정식 사장교의 축력 최대인 경우와 교축방향 모멘트가 최대가 되는 조건에서 P-M 상관도를 작성하여 최적 단면을 비교하였

다. 주탑 leg 하단과 동일한 사용철근과 배근이 적용되었다. P-M 상관도 분석으로 도출한 유사한 수준의 응답을 갖는 단면은 그림 2.66과 같이 동일한 단면으로 산출되었으며, 자정식 사장교와 일부타정식 사장교에서의 P-M 상관도는 그림 2.67와 그림 2.68에 나타내었다.

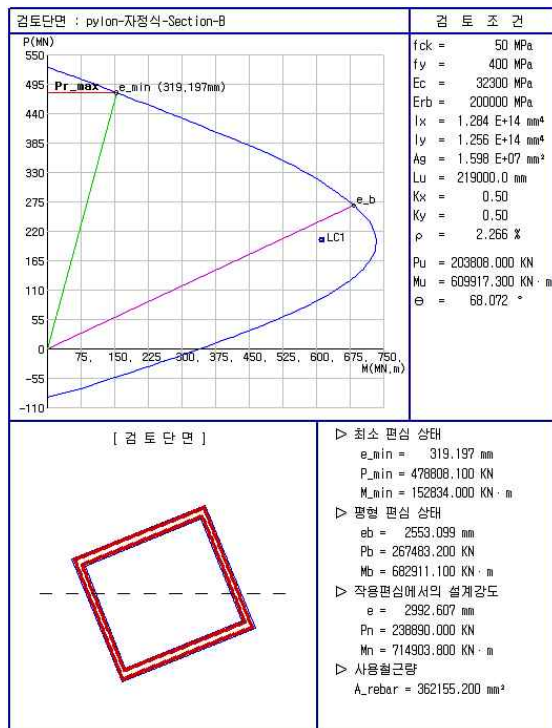


(a) 자정식 사장교

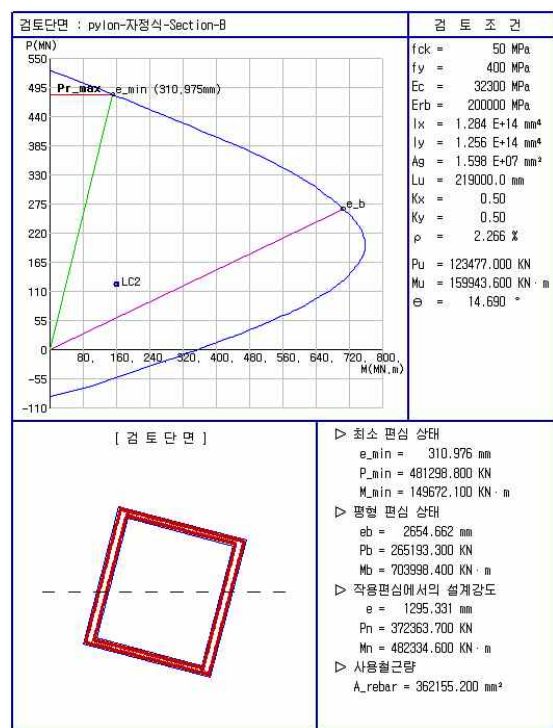


(b) 일부타정식 사장교

그림 2.66 주탑 leg 상단 부분 최적 단면 비교

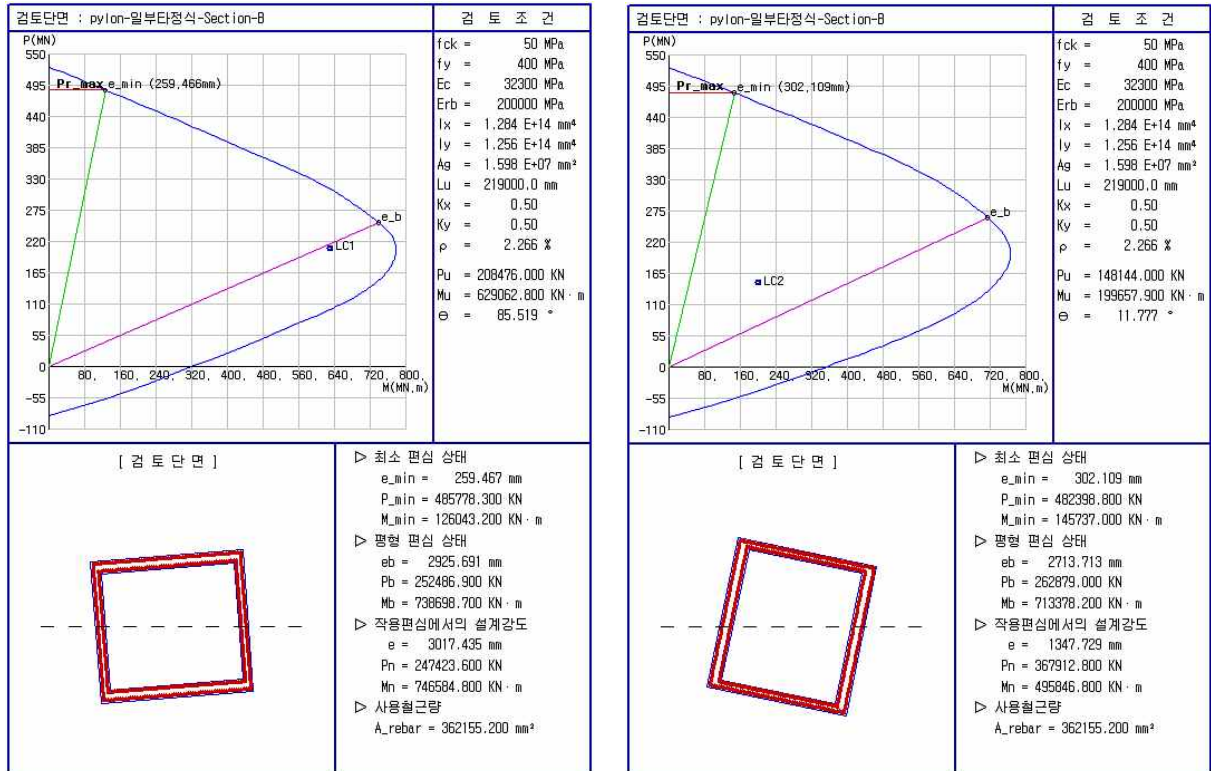


(a) 축력 최대



(b) 모멘트 최대

그림 2.67 자정식 사장교 주탑 leg 상단 부분에서의 P-M 상관도



(a) 축력 최대

(b) 모멘트 최대

그림 2.68 일부타정식 사장교 주탑 leg 상단 부분에서의 P-M 상관도

단면 감소에 따른 P-M상관도를 분석한 결과, 주탑 leg 상단 부분은 자정식과 일부타정식 모두 동일한 단면을 사용하는 것으로 분석되었다.

- 사용 단면 : 7.2m×7.757m
- 사용철근(H32) 철근량 : 362,155mm<sup>2</sup>

주탑 상단부 단면의 안전성을 지배하는 하중은 축력으로 일부타정식 사장교의 효과인 주탑부 휨모멘트 감소로 주탑 leg 상단부의 단면감소는 발생하지 않은 것으로 분석되었다.

#### ○ 주탑 물량 감소 요약

휨모멘트의 영향을 크게 받는 주탑 leg 하단은 교축방향으로 2.5m 길이 감소가 가능하여 콘크리트 단면적 16.2% 감소와 철근량 13.1% 감소를 얻을 수 있다. 그러나 leg 상단으로 올라갈수록 적정 단면의 크기는 축력의 영향에 지배받게 되고 일부타정식 사장교의 적용은 주탑 휨모멘트의 감소는 가능하지만 주탑의 축력 감소는 기대할 수 없다. 주탑 leg 상단으로 갈수록 일

부타정식 사장교 적용으로 인한 주탑 단면 효과는 줄어들게 되어, 주탑 leg 중간 부분에서는 교축방향으로 0.5m 길이 감소가 가능하여 콘크리트 단면적 3.7% 감소와 사용철근량 3.3% 감소가 발생한다. 또한, 주탑 leg 상단에서는 축력이 단면 결정에 지배적인 역할을 하여 일부타정식 적용으로 인한 단면 감소효과는 미비하다. 따라서 대상 사장교의 가로부 중심으로 상단부와 하단부의 높이비 등을 종합적으로 반영했을 때, 약 5.0% 정도의 물량감소가 가능할 것으로 판단된다.

### (3) 케이블 물량 감소 효과 분석

자정식 사장교와 일부타정식 사장교의 구조거동을 분석하면, 동일한 거더단면을 갖는 경우에 일부타정식 사장교의 케이블 장력이 다소 증가되므로 위의 결과처럼 일부타정식 사장교의 케이블 물량이 증가된 것으로 나타났다. 그러나 자정식 사장교에서는 거더의 물량이 증가하므로 이를 반영하여 비교적 정확한 물량을 비교하기 위해 자정식 거더 단면의 단면 증가를 고려해서 재해석을 수행하였다. 또한, 시공 중 안전성을 확보하기 위해 내풍 케이블이 자정식 사장교에 설치되는 것을 가정하였다. 케이블 수는 자정식과 일부타정식 사장교에서 발생하는 응력수준이 유사하게 되도록 하였다.

표 2.17 자중의 영향을 고려한 자정식 사장교의 케이블 발생장력과 허용장력

| 케이블 번호 | 7strand 개수 | Area(mm <sup>2</sup> ) | f <sub>pu</sub> (MPa) | 극한강도(Pu)(kN) | 허용장력    | 발생장력 | 응력수준  |
|--------|------------|------------------------|-----------------------|--------------|---------|------|-------|
| 6101   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3144 | 82.2% |
| 6102   | 20         | 3000                   | 1770                  | 5310         | 2389.5  | 1736 | 72.7% |
| 6103   | 22         | 3300                   | 1770                  | 5841         | 2628.5  | 2255 | 85.8% |
| 6104   | 24         | 3600                   | 1770                  | 6372         | 2867.4  | 2466 | 86.0% |
| 6105   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2666 | 85.8% |
| 6106   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 2905 | 81.0% |
| 6107   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 2989 | 83.4% |
| 6108   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3177 | 83.1% |
| 6109   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3313 | 86.7% |
| 6110   | 34         | 5100                   | 1770                  | 9027         | 4062.2  | 3550 | 87.4% |
| 6111   | 38         | 5700                   | 1770                  | 10089        | 4540.1  | 3881 | 85.5% |
| 6112   | 40         | 6000                   | 1770                  | 10620        | 4779.0  | 4119 | 86.2% |
| 6113   | 42         | 6300                   | 1770                  | 11151        | 5018.0  | 4328 | 86.3% |
| 6114   | 44         | 6600                   | 1770                  | 11682        | 5256.9  | 4412 | 83.9% |
| 6115   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4917 | 85.7% |
| 6116   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 4226 | 65.5% |
| 6117   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 3886 | 60.2% |
| 6118   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 3970 | 61.5% |
| 6119   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 3887 | 60.2% |
| 6120   | 56         | 8400                   | 1770                  | 14868        | 6690.6  | 4399 | 65.7% |
| 6121   | 64         | 9600                   | 1770                  | 16992        | 7646.4  | 5195 | 67.9% |
| 6122   | 72         | 10800                  | 1770                  | 19116        | 8602.2  | 5845 | 67.9% |
| 6123   | 76         | 11400                  | 1770                  | 20178        | 9080.1  | 6138 | 67.6% |
| 6124   | 94         | 14100                  | 1770                  | 24957        | 11230.7 | 6837 | 60.9% |
| 6125   | 100        | 15000                  | 1770                  | 26550        | 11947.5 | 7426 | 62.2% |
| 6201   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3136 | 82.0% |
| 6202   | 20         | 3000                   | 1770                  | 5310         | 2389.5  | 1727 | 72.3% |
| 6203   | 22         | 3300                   | 1770                  | 5841         | 2628.5  | 2239 | 85.2% |
| 6204   | 24         | 3600                   | 1770                  | 6372         | 2867.4  | 2448 | 85.4% |
| 6205   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2648 | 85.2% |
| 6206   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 2892 | 80.7% |
| 6207   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 2974 | 83.0% |
| 6208   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3142 | 82.2% |
| 6209   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3236 | 84.6% |
| 6210   | 34         | 5100                   | 1770                  | 9027         | 4062.2  | 3409 | 83.9% |
| 6211   | 38         | 5700                   | 1770                  | 10089        | 4540.1  | 3658 | 80.6% |
| 6212   | 40         | 6000                   | 1770                  | 10620        | 4779.0  | 3850 | 80.6% |
| 6213   | 42         | 6300                   | 1770                  | 11151        | 5018.0  | 4068 | 81.1% |
| 6214   | 44         | 6600                   | 1770                  | 11682        | 5256.9  | 4222 | 80.3% |
| 6215   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4535 | 79.1% |
| 6216   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 4961 | 76.9% |
| 6217   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 5066 | 78.5% |
| 6218   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 5187 | 80.4% |
| 6219   | 54         | 8100                   | 1770                  | 14337        | 6451.7  | 5327 | 82.6% |
| 6220   | 56         | 8400                   | 1770                  | 14868        | 6690.6  | 5545 | 82.9% |
| 6221   | 64         | 9600                   | 1770                  | 16992        | 7646.4  | 6060 | 79.3% |
| 6222   | 64         | 9600                   | 1770                  | 16992        | 7646.4  | 6247 | 81.7% |
| 6223   | 68         | 10200                  | 1770                  | 18054        | 8124.3  | 6386 | 78.6% |
| 6224   | 72         | 10800                  | 1770                  | 19116        | 8602.2  | 6370 | 74.1% |
| 6225   | 72         | 10800                  | 1770                  | 19116        | 8602.2  | 5741 | 66.7% |

표 2.18 자중의 영향을 고려한 일부타정식 사장교의 케이블 발생장력과 허용장력

| 케이블 번호 | 7strand 개수 | Area(mm <sup>2</sup> ) | f <sub>pu</sub> (MPa) | 극한강도(Pu)(kN) | 허용장력    | 발생장력 | 응력수준  | 자정식과 응력<br>수준 차이 |
|--------|------------|------------------------|-----------------------|--------------|---------|------|-------|------------------|
| 6101   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3081 | 80.6% | 1.6%             |
| 6102   | 18         | 2700                   | 1770                  | 4779         | 2150.6  | 1576 | 73.3% | -0.6%            |
| 6103   | 20         | 3000                   | 1770                  | 5310         | 2389.5  | 1995 | 83.5% | 2.3%             |
| 6104   | 22         | 3300                   | 1770                  | 5841         | 2628.5  | 2168 | 82.5% | 3.5%             |
| 6105   | 24         | 3600                   | 1770                  | 6372         | 2867.4  | 2350 | 82.0% | 3.9%             |
| 6106   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2551 | 82.1% | -1.1%            |
| 6107   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2643 | 85.1% | -1.7%            |
| 6108   | 28         | 4200                   | 1770                  | 7434         | 3345.3  | 2796 | 83.6% | -0.5%            |
| 6109   | 28         | 4200                   | 1770                  | 7434         | 3345.3  | 2914 | 87.1% | -0.5%            |
| 6110   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 3107 | 86.7% | 0.7%             |
| 6111   | 34         | 5100                   | 1770                  | 9027         | 4062.2  | 3357 | 82.6% | 2.8%             |
| 6112   | 34         | 5100                   | 1770                  | 9027         | 4062.2  | 3534 | 87.0% | -0.8%            |
| 6113   | 36         | 5400                   | 1770                  | 9558         | 4301.1  | 3685 | 85.7% | 0.6%             |
| 6114   | 38         | 5700                   | 1770                  | 10089        | 4540.1  | 3733 | 82.2% | 1.7%             |
| 6115   | 46         | 6900                   | 1770                  | 12213        | 5495.9  | 4664 | 84.9% | 0.9%             |
| 6116   | 58         | 8700                   | 1770                  | 15399        | 6929.6  | 4480 | 64.7% | 0.9%             |
| 6117   | 68         | 10200                  | 1770                  | 18054        | 8124.3  | 4910 | 60.4% | -0.2%            |
| 6118   | 72         | 10800                  | 1770                  | 19116        | 8602.2  | 5333 | 62.0% | -0.5%            |
| 6119   | 80         | 12000                  | 1770                  | 21240        | 9558.0  | 5694 | 59.6% | 0.7%             |
| 6120   | 56         | 8400                   | 1770                  | 14868        | 6690.6  | 4325 | 64.6% | 1.1%             |
| 6121   | 68         | 10200                  | 1770                  | 18054        | 8124.3  | 5582 | 68.7% | -0.8%            |
| 6122   | 78         | 11700                  | 1770                  | 20709        | 9319.1  | 6414 | 68.8% | -0.9%            |
| 6123   | 86         | 12900                  | 1770                  | 22833        | 10274.9 | 6897 | 67.1% | 0.5%             |
| 6124   | 110        | 16500                  | 1770                  | 29205        | 13142.3 | 7982 | 60.7% | 0.1%             |
| 6125   | 116        | 17400                  | 1770                  | 30798        | 13859.1 | 8655 | 62.4% | -0.3%            |
| 6201   | 32         | 4800                   | 1770                  | 8496         | 3823.2  | 3050 | 79.8% | 2.2%             |
| 6202   | 18         | 2700                   | 1770                  | 4779         | 2150.6  | 1550 | 72.1% | 0.2%             |
| 6203   | 20         | 3000                   | 1770                  | 5310         | 2389.5  | 1963 | 82.2% | 3.0%             |
| 6204   | 22         | 3300                   | 1770                  | 5841         | 2628.5  | 2137 | 81.3% | 4.1%             |
| 6205   | 24         | 3600                   | 1770                  | 6372         | 2867.4  | 2330 | 81.3% | 4.0%             |
| 6206   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2542 | 81.8% | -1.1%            |
| 6207   | 26         | 3900                   | 1770                  | 6903         | 3106.4  | 2625 | 84.5% | -1.5%            |
| 6208   | 28         | 4200                   | 1770                  | 7434         | 3345.3  | 2765 | 82.7% | -0.5%            |
| 6209   | 28         | 4200                   | 1770                  | 7434         | 3345.3  | 2856 | 85.4% | -0.7%            |
| 6210   | 30         | 4500                   | 1770                  | 7965         | 3584.3  | 3012 | 84.0% | -0.1%            |
| 6211   | 34         | 5100                   | 1770                  | 9027         | 4062.2  | 3231 | 79.5% | 1.0%             |
| 6212   | 36         | 5400                   | 1770                  | 9558         | 4301.1  | 3412 | 79.3% | 1.2%             |
| 6213   | 38         | 5700                   | 1770                  | 10089        | 4540.1  | 3619 | 79.7% | 1.4%             |
| 6214   | 40         | 6000                   | 1770                  | 10620        | 4779.0  | 3757 | 78.6% | 1.7%             |
| 6215   | 44         | 6600                   | 1770                  | 11682        | 5256.9  | 4027 | 76.6% | 2.5%             |
| 6216   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4368 | 76.2% | 0.7%             |
| 6217   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4422 | 77.1% | 1.4%             |
| 6218   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4478 | 78.1% | 2.3%             |
| 6219   | 48         | 7200                   | 1770                  | 12744        | 5734.8  | 4575 | 79.8% | 2.8%             |
| 6220   | 50         | 7500                   | 1770                  | 13275        | 5973.8  | 4877 | 81.6% | 1.2%             |
| 6221   | 58         | 8700                   | 1770                  | 15399        | 6929.6  | 5533 | 79.8% | -0.6%            |
| 6222   | 62         | 9300                   | 1770                  | 16461        | 7407.5  | 6053 | 81.7% | 0.0%             |
| 6223   | 70         | 10500                  | 1770                  | 18585        | 8363.3  | 6646 | 79.5% | -0.9%            |
| 6224   | 82         | 12300                  | 1770                  | 21771        | 9797.0  | 7276 | 74.3% | -0.2%            |
| 6225   | 92         | 13800                  | 1770                  | 24426        | 10991.7 | 7366 | 67.0% | -0.3%            |

위의 표들에 제시된 케이블들의 길이와 단위중량을 고려하여 전체 케이블 중량을 산출한 결과는 다음과 같다.

- 자정식 사장교 케이블 물량  
 $: 3,016.034 \text{ ton} + 107.262 \text{ ton(내풍 케이블)} = 3,123.296 \text{ ton}$
- 일부타정식 사장교 케이블 물량 : 3099.810 ton (23.486 ton 감소, 0.8% 감소)

#### 아. 경제성 평가(공사비 감소 효과 분석)

일부타정식 사장교의 적용으로 자정식보다 상부 거더, 주탑, 케이블 등의 물량을 감소시킬 수 있음을 앞 절에서 확인하였다. 공사비 감소량을 산정하기 위해서 재료비, 노무비, 경비를 산출하여야 하나, 현실적인 어려움을 반영하여 기존 공사의 내역서에 근거한 방법으로 개략적인 공사비 감소량을 산출하였다.

중앙경간 500m인 총 길이 900m(200m+500m+200m)의 자정식 사장교의 00대교의 설계 내역서에서 하부공, 주탑공, 상부공, 케이블공의 공사비를 바탕으로 물량 감소에 기인한 공사비를 개략적으로 산정하였다.

표 2.19 자정식과 일부타정식 사장교의 개략공사비 비교

| 구분   | 공사비(자정식 사장교) | 일부타정식 물량 감소율 | 일부타정식 사장교 공사비     |
|------|--------------|--------------|-------------------|
| 하부공  | 0.196A       | —            | 0.196A            |
| 주탑공  | 0.124A       | 5.0%         | $0.124A(1-0.05)$  |
| 상부공  | 0.524A       | 24.2%        | $0.524A(1-0.242)$ |
| 케이블공 | 0.156A       | 0.8%         | $0.156A(1-0.008)$ |
| 합계   | A            | —            | 0.865A            |

따라서 대상교량에 대해 일부타정식을 적용할 경우, 공사비 13.5%정도 감소를 예측할 수 있다.

## 자. 공사기간

대상 교량에 대해 자정식사장교와 일부타정식사장교로 시공되는 경우에 대해 공사기간을 비교하는 것은 쉽지 않다. 주탑의 높이, 설치되는 거더의 개수, 케이블의 개수는 동일하나 거더, 주탑, 케이블의 구조 성능 향상으로 물량의 감소와 공사비의 감소를 기대할 수 있다. 다만, 일부타정식의 경우 교대에 별도의 정착장치를 일부 설치해야 되므로 일부타정식의 교대 공사기간은 증가할 수 있으나 교대 공사기간이 주탑 공사기간보다 작아 절대공기에 영향을 미치지 않으므로 공사기간은 증가된다고 볼 수는 없다. 따라서 일부타정식 사장교 시스템 적용으로 물량증가에 기인한 공사기간 감소효과는 기대할 수 있으나 공사기간 감소효과를 현 시점에서 정확하게 산출하기는 어려우며, 실제 공사 중 물량 감소를 반영한 합리적인 계획으로 공사기간은 감소될 수 있다고 판단된다.

## 제3장 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구 과제를 통해 얻은 성과는 경간장 600-1000m를 갖는 일부타정식 사장교의 시공 기술 및 경제성 평가로 구체적인 연구 성과는 다음과 같다.

- 최적 일부타정식 케이블 시스템 분석 기술
  - 자정식과 일부타정식 사장교의 거동 및 효과 분석
- 일부타정식 사장교 상세 시공 기술 개발
  - 기존 방법의 문제점 분석과 구조거동 특징을 반영한 시공 기술
  - 해석을 통한 검증
- 일부타정식 사장교의 동적 안전성 효과 분석 기술
  - 시공 중 내풍케이블 대치 가능 시스템
  - 공용 중 동적 거동 감쇠 효과 시스템
- 일부타정식 사장교의 경제성 평가
  - 동일 경간장을 갖는 자정식과 비교
  - 물량 감소 분석
  - 공사비 분석

본 연구 과제를 통해 얻은 학술적 성과는 다음과 같으며, 자세한 내용은 표 3.1과 같다.

- 국제학술지(SCIE) 논문 2편 게재됨.
- 국내 학진등재 논문 2편 게재됨.
- 국내 특허 1건 출원됨.

표 3.1 학술적 성과

| 분류              | 제목                                                                                                                                           | 출판지, 게재연월                                                                      | 주요 내용                                          | 비 고                |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|
| 국제학술지<br>(SCIE) | Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction                                                       | Journal of Constructional Steel Research,<br>Vol. 112, pp. 80-92<br>(2015년 9월) | 온도 활용한 시공기술 적용 가능성을 조사한 사장교 시공 중 온도분포 특성 분포 평가 | 게재됨                |
| 국제학술지<br>(SCIE) | Structural Behavior of a Long-Span Partially Earth-Anchored Cable-Stayed Bridge During Installation of a Key Segment by Thermal Prestressing | Applied Science-Basel<br>Vol. 6, No. 8<br>(2016년 8월)                           | 온도 활용 키세그먼트 폐합법을 해석적으로 평가하고 분석한 논문             | 게재됨                |
| 학진등재<br>논문      | 장경간 사장교에 적용된 일부타정식 케이블 시스템의 지진하중과 풍하중 안전성 향상 효과 분석                                                                                           | 한국안전학회지,<br>Vol. 31, No. 4<br>(2016년 8월)                                       | 일부타정식 사장교의 공용 중 동적 거동 감소 효과 분석                 | 게재됨                |
| 학진등재<br>논문      | 일부타정식 케이블 시스템 장경간 사장교의 시공 중 동적 안전성 분석                                                                                                        | 한국안전학회지,<br>Vol. 31, No. 4<br>(2016년 8월)                                       | 일부타정식 사장교의 시공 중 안전성 분석                         | 게재됨                |
| 특허출원            | 고정단 변위제어장치 및 그를 이용한 일부타정식 사장교 키세그먼트 거더 폐합방법                                                                                                  | 출원번호:<br>10-2016-0094689<br>(접수번호<br>1-1-2016-0725215-14)                      | 일부타정식 사장교 시공 기술                                | 2016년<br>7월<br>출원됨 |

국내 사장교 기술은 자립화에 성공한 것으로 평가되고 있으며, 또한 다수의 실적을 확보하고 있다. 현재 국내 사장교 기술은 고부가 가치 해외 교량 건설시장에 진입하였으며, 전문화된 기술역량을 확보하고 있다. 본 연구 개발은 아직 시공실적이 전무하고 기술개발이 부족한 경간장 600-1000m의 일부타정식 사장교 기술로 실제 시공에 적용하여 시장의 핵심 기술을 선점하는 기회가 될 수 있을 것이다.

## 제4장 연구목표 달성 및 효과

### 4.1 질적 성과 목표 달성도

질적 성과지표에 대한 결과는 다음 표와 같다. 주탑 구조 성능만 목표치에 도달하지 못했으나, 궁극적인 경제성 평가인 공사비가 목표치에 도달하였으므로 본 연구의 질적 성과지표는 달성되었다고 판단된다.

표 4.1 질적 성과 목표 달성도

| 단위 성과 |                        | 질적 성과지표      | 목표치             | 달성치                                                | 확인                         | 달성도  |
|-------|------------------------|--------------|-----------------|----------------------------------------------------|----------------------------|------|
| A-1   | 일부타정식<br>사장교 구조<br>효과  | 거더 구조 성능     | 단면 감소<br>20% 이상 | 단면 감소<br>24.2%                                     | 보고서                        | 100% |
|       |                        | 주탑 구조 성능     | 단면 감소<br>25% 이상 | 단면 감소<br>5.0 %                                     | 보고서                        | 20%  |
|       |                        | 케이블 구조<br>성능 | 전체 물량<br>감소>증가  | 전체 물량<br>감소 0.8%                                   | 보고서                        | 100% |
| A-2   | 일부타정식<br>사장교<br>시공기술   | 전문가 검증       | 시공 지침서<br>작성    | 시공<br>지침서<br>확인                                    | 보고서<br>내용 수록<br>(별책<br>증빙) | 100% |
| A-3   | 일부타정식<br>사장교 경제성<br>평가 | 물량           | 자정식의<br>85-90%  | 자정식의 86.5%<br>(설계물량에<br>근거한 개략<br>공사비 감소<br>13.5%) | 보고서                        | 100% |
|       |                        | 공사비          | 자정식의<br>85-90%  |                                                    | 보고서                        | 100% |

## 4.2 양적 성과 목표 달성도

양적 성과지표에 대한 결과는 다음 표와 같으며, 본 연구의 최소 양적 성과지표는 달성되었다.

표 4.2 양적 성과 목표 달성도

| 양적 성과지표         | 최소성과목표 | 최종성과목표 | 성과 | 최소성과목표<br>달성도 |
|-----------------|--------|--------|----|---------------|
| SCI(E) 학술지      | 2      | 2      | 2  | 100%          |
| 일반학술지<br>(학진등재) | 2      | 2      | 2  | 100%          |
| 국내특허출원          | 1      | 2      | 1  | 100%          |
| 국외특허출원          | -      | 1      | 0  | -             |

## 4.3 기대효과

본 연구 과제를 통해 경간장 600-1000m 범위의 사장교 건설 비용의 감소(15% 이상)를 증명함으로써 일부타정식 사장교의 우수성을 설계자 및 시공자에게 인식시켜 장대교량 시장에 관심을 가지고 있는 국내 건설사의 투자를 유도할 수 있다. 또한, 정형화된 설계 및 시공기술을 보다 다양화 하여 해외 교량 건설 시장 참여 분야 확대에 도움이 될 것이라고 판단한다.

## 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

본 연구개발로 창출된 기술은 원천기술로 국외 교량 건설 진출을 시도하는 건설회사로 이전하고 보다 실용적으로 확장하여 해외 시장 확대에 활용할 수 있다. 구체적인 활용 방안은 다음과 같다.

- 개발 기술의 국내 특허 등록과 해외 특허 등록 추진
  - 일부타정식 사장교 시공 원천기술 확보
- 현재 연구성과 중 경제성 평가 부분을 반영한 논문을 해외에 게재하고 학술발표회를 통한 설계자, 시공자, 발주자 홍보함
  - 중앙 경간장 600-1000m의 사장교 설계 적용(기본 및 실시설계, 터키설계 등)
  - 실제 교량 시공에 활용
- 해외 교량 시장 진출에 활용
  - 특수교량 분야의 기존 성과의 보완 및 특수교량 기술의 다변화
  - 기술 선진화 및 선도로 해외 시장 경쟁력 상승

본 연구개발 과제를 보다 심층 연구하여 다양한 조건의 시공조건, 특히 1000m가 넘는 장경간 사장교에 적용할 수 있는 기술조건에 대한 추후 연구를 실시한다면 보다 혁신적인 사장교 건설 기술 개발이 가능할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 1) 길홍배, 박종철, 조준상, 정경자, 장갑철(2009). 국내·외 장대교량 시장 전망, 한국강구조학회지, Vol.21, No.3, pp.10-16.
- 2) Gimsing, N.J. (1997). Cable Supported Bridges, 2nd edition, Wiley West Sussex, UK.
- 3) Nagai, M., Izawa, M. and Hiroshi, N. (1997). Basic Plan and Design of Cable Stayed Bridge, Morikita Publishing Co., Japan(In Japanese).
- 4) Xie X., Yamaguchi, H. and Nagai, M. (1997). "Static Behaviors of Self-anchored and Partially Earth-anchored Long-span Cable-stayed bridges", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 5, No. 6, pp.767-774.
- 5) Sun, B., XIAO, R.-C., and JIA, L.-J. (2009). "Trial Design of a Proposed

- Partially Ground-Anchored Cable-Stayed Bridge with a Main Span 1400 m”, Bridge Construction.
- 6) Zhibin, J., Shiling, P., Xing, W., Hongyan, L., and Shizhong, Q. (2016). “Partially Earth-Anchored Cable Bridge: Ultralong-Span System Suitable for Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Cables”, Journal of Bridge Engineering, Vol. 21, No 6.
  - 7) Gimsing, N.J. (2006). “Evolution in Span Length of Cable-stayed Bridges.” in Challenges in the 21st Century: Proceedings of International Conference on Bridge Engineering, HongKong,China,CD-ROM(PaperNo.KN-001).
  - 8) Won, J-H., Cho, K-I., Yoon, J-H. and Kim, S-H. (2008a) “Innovative Key-segment Closing Method using Thermal Prestressing Technique for Partially Earth-anchored Cable-stayed Bridges.” Advances in Structural Engineering, Vol. 11, No. 5, pp. 549-564.
  - 9) Won, J-H., Park, S-J., Yoon, J-H. and Kim, S-H. (2008b) “Structural Effects of Partially Earth-anchored Cable System on Medium-span Cable-stayed Bridges.” International Journal of Steel Structures, Vol. 8, No. 3, pp. 225-236.
  - 10) Müller, J.(1992). “The Bi-stayed Bridge Concept - Overview of Wind Engineering Problems.” Proceedings of the 1st International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, pp. 237-245.
  - 11) Otsuka, H., Tanaka, H., Noguchi, J., Etoh, T. and Sakai,I.(1990). “Partially anchored composite cable-stayed bridge.” Proceedings of the IABSE Symposium, Brussels, pp.347-351.
  - 12) Won, J-H., Yoon, J-H., Park, S-H. and Kim, S-H. (2008c) “Effects of Partially Earth-anchored Cable Systems on Wind Dynamic Loads.” Wind and Structures, Vol. 11, No. 6, pp. 441-453.
  - 13) Simiu, E. and Scanlan, R.H. (1996), Wind effects on structures, 3rd edition, John Wiley&Sons, NewYork.
  - 14) Jones, N.P. and Scanlan, R.H. (2001). “Theory and Full-bridge Modeling of Wind Response of Cable-supported Bridges.” Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 365-375.
  - 15) Pircher, H. (2004). User Guide for RM2004 and GP2004, TDV Ges.m.b.H., Austria.
  - 16) Janjic, D.; Pircher, M.; Pircher, H. (2003). “Optimization of cable tensioning in cable-stayed bridges. Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 131-137.

## 주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 최종보고서입니다. 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.