

# 영덕~오산간 광역도로 영덕1교 사장교의 설계

Design of Yeongduk 1'st Cable Stayed Bridge  
in Yeongduk-Osan Metro Road



박경준\*



정하영\*\*



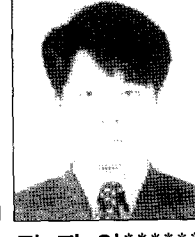
정규봉\*\*\*



안형준\*\*\*\*



양성돈\*\*\*\*



정진일\*\*\*\*\*

\*케이블텍(주) 상무  
 \*\*케이블텍(주) 기술부 차장  
 \*\*\*(주)삼안 부사장  
 \*\*\*\*(주)삼안 이사  
 \*\*\*\*\*(주)포스코건설 차장  
 \*\*\*\*\*(주)포스코건설 과장

## 1. 서론

수도권 남부지역과 서울을 연결하는 영덕~오산간 광역도로 1공구의 영덕1교는 국도 42호선을 횡단하는 교량이며, 용인 및 수원시의 관문성과 흥덕지구 U-city를 대표하는 Landmark로서 상징성이 높은 1면 1주탑 강합성 사장교이다. 비대칭 사교장인 영덕1교 예비 설계 시, 교량전용 해석 프로그램인 RM2006을 이용해서 여러 설계변수를 포함한 구조해석 검토를 수행하여 최적의 교량구조 계획안을 마련하였다. 본고는 영덕1교의 소개와 설계변수 검토 결과를 간략히 소개하여 설계실무자의 참고자료로 활용하고자 한다.

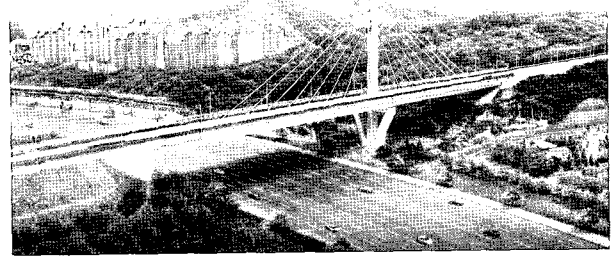


그림 1 영덕1교 조감도

## 2. 영덕1교 소개

1공구의 핵심 교량인 영덕1교를 소개하면 다음과 같다.

- 위치 : 경기도 용인시 기흥구
- 교량형식 : 1면1주탑 비대칭 강합성 사장교
- 연 장 : 90 + 115 = 205m
- 폭 원 : 23.4m (4차로)
- 주 탑 : 1면 콘크리트 주탑

- 보 강 형 : 강합성 상자형
- 케 이 블 : PPWS (Semi fan 12본)
- 정 착 구 : Cold Casting 소켓
- 발 주 처 : 한국토지공사
- 설 계 사 : (주) 삼안
- 시 공 사 : (주) 포스코건설

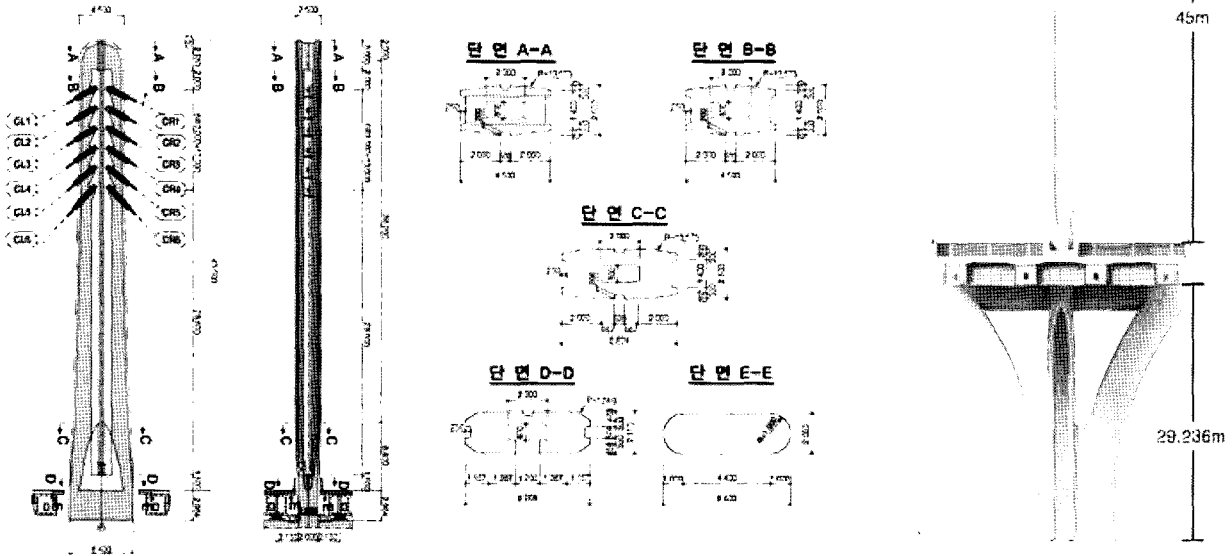
## 3. 주요 구조 계획

영덕1교의 주요 구조 계획을 아래와 같이 요약 기술하였다.



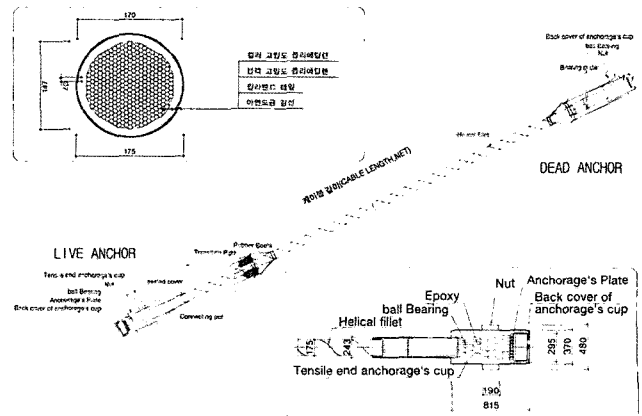
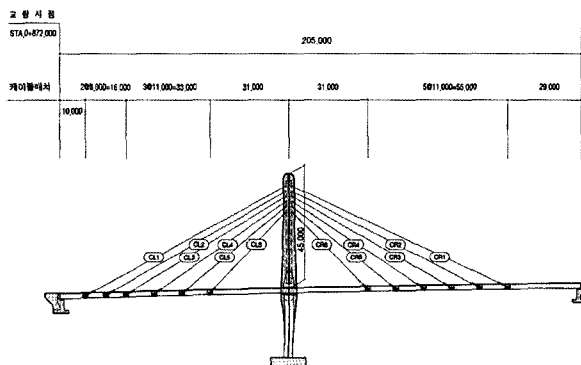
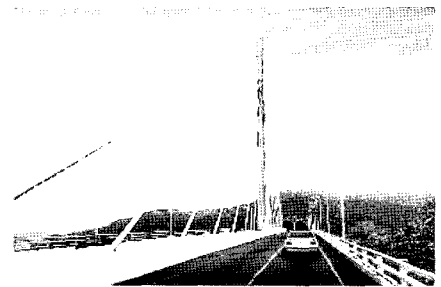
### 3.2 주탑 계획

- 주탑형식 : 교각 일체형 1면 콘크리트 주탑
- 교각형식 : 개단면 콘크리트 교각
- 주탑높이 : 보강형 상단에서 45m
- 사용재료 : 1종 40MPa
- 기초형식 : 연암지저 직접기초
- 경관특성 : 주탑 전면 및 측면에 U자형태의 음각처리로 U-City를 상징



### 3.3 케이블 및 정착구

- 케이블 개수 : 시점부 6열, 종점부 6열 총 12열 배치
- 케이블 배치방식 : Fan형 배치
- 케이블 간격 : counter weight 설치구간-8m간격/일반구간-11m간격
- 케이블 종류 : PPWS 케이블 (367-Ø7mm, D=175mm, 3중방식처리)
- 인장강도 : 1,670MPa, 탄성계수 : 200GPa, 허용장력 : 1,081MPa
- 케이블 정착구 : Cold Casting 소켓
- 긴장단 위치 : 보강형



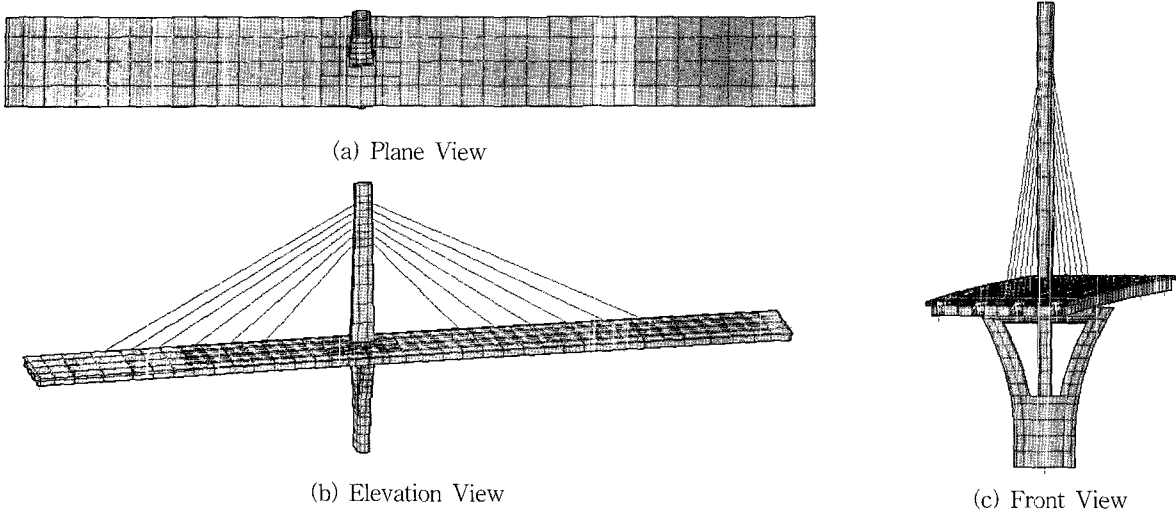


그림 5 모델링

#### 4. 구조해석 모델링

영덕1교에 대하여 3차원으로 구조이상화하여 전체계 구조해석을 수행하였다. 구조해석에는 비선형 범용유한요소 해석 프로그램인 RM2006을 사용하여 보강형 및 주탑은 절점당 6개의 자유도를 갖는 3차원 뼈대요소를, 케이블은 3차원 케이블요소를 사용하여 아래와 같이 모델링 하였다.

- 보강형 및 주탑의 실제 제작 및 가설 길이에 맞춰 부재를 배치하고 절점은 단면의 상단에 위치시킴.
- 보강형이 합성형임을 감안하여 콘크리트 슬래브와 강형부를 분리하여 절점 및 부재를 정의함.
- 완전 합성을 가정하여 슬래브 부재와 강형 부재의 모든 절점들을 강체로 연결하여 상대변위가 발생하지 않도록 함.

표 1 사용 프로그램 요약

프로그램 명칭	개발사	프로그램 종류	설계 적용 분야
RM2006	오스트리아, TDV사	교량전용 구조 해석 프로그램	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시공단계 전용해석 프로그램</li> <li>• 비선형을 고려한 교량 해석</li> <li>• Time-Dependent 해석</li> </ul>

#### 5. 초기치 해석

사장교 시스템의 초기치를 결정하는 방법으로는 순방향 해석(Forward Analysis)을 통한 방법, 역방향해석(해치 계산, Backward Analysis)을 통한 방법, 그리고 이 둘을 혼용한 반복계산을 통해 결정하는 방법이 있다. 기본적으로

역방향 해석을 하기 위해서는 시간의존적인 재료 특성을 지닌 콘크리트 부재의 시간적 역해석이 가능하여야 하나 이를 구현하기가 어렵고, 콘크리트 재료의 시간이력에 생기는 오차를 결국 순방향해석의 반복계산에 의해 소거해야만하므로 절차상으로 오히려 명료하지 못할 수도 있다. 따라서 본 해석에서는 순방향해석을 통하여 사장교 시스템의 초기평형상태를 결정하였다.

사장교 설계는 크게 전체계 해석과 시공단계 해석으로 나눌 수 있다. 전체계 해석에서는 구조물의 제원과 케이블의 단면 및 장력을 산정하고 시공단계 해석에서는 각 단계별로 케이블의 도입장력을 정하며 제작 및 시공 솟음량을 결정한다. 하지만, 본 교량은 가설벤투에 의한 일괄 가설적 성격이 짙으므로 정밀한 시공단계 해석결과가 완성계 목표 초기형상을 만족하는 케이블 장력분포를 시공단계를 고려하여 초기도입 장력의 산정이 가능하므로 본 해석에서는 케이블 장력 및 제원 결정에 있어서도 완성계와 시공단계를 동시에 고려하였다. 즉, 전체계 해석과 시공단계 해석을 구분하지 않고 일련의 해석과정을 통해 목표로 하는 케이블 장력조건을 산정하였다.

일반적으로 초기치 해석시 주안점을 열거하면 다음과 같다.

- 주탑 교축방향 휨모멘트 최소화
- 연속 지지보와 유사한 상부구조의 모멘트 분포
- 중간지점의 부반력 및 부모멘트 최소화
- 케이블 장력분포 허용범위 만족
- 바닥판 콘크리트 응력 허용수준 만족

표 2 영덕1교 가설순서 요약

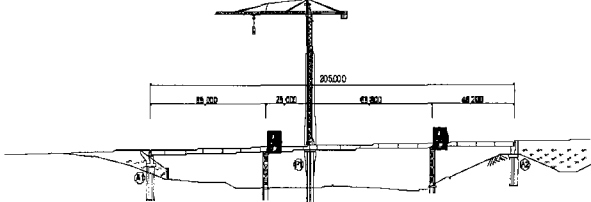
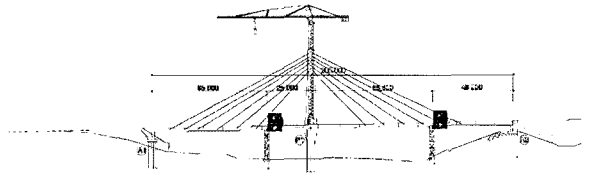
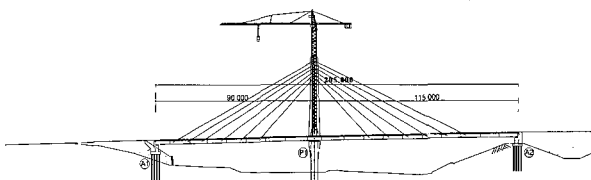
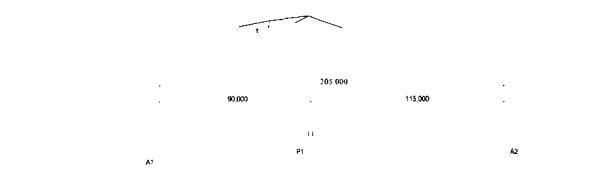
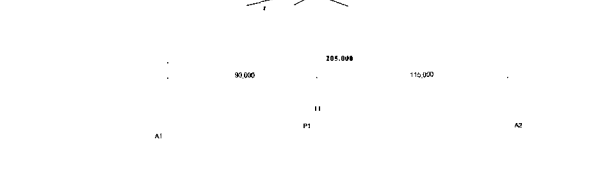
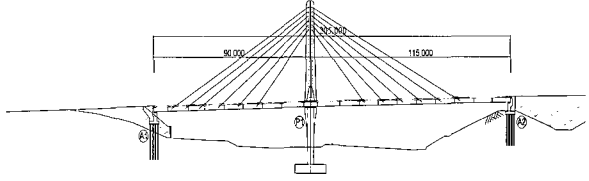
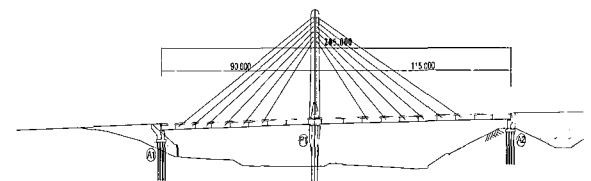
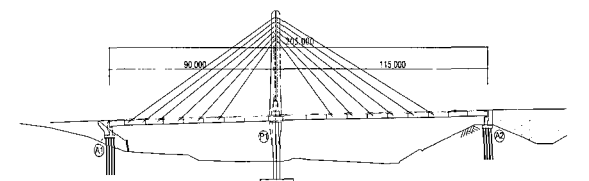
단계	내용	해석 단면	해석 순서	시공 순서
1단계	보강형 거치 (ILM 공법)	합성전	↓	↓
2단계	케이블 거치-1차 케이블장력 도입			
3단계	가설 밴드 제거			
4단계	슬래브 타설			
5단계	합성단면 거동(크리프&건조수축 30일)	합성후	↓	↓
6단계	2차 케이블 장력 도입 (초기장력 도입)			
7단계	포장 및 방호벽 가설			
8단계	콘크리트 장기거동해석 (크리프&건조수축 10000일)			

본 영덕1교 초기치 해석시 변수항목은 다음과 같다.

- 부재별 단면계원 결정
- 케이블 초기장력 결정
- 시공방법 및 순서 결정

본 해석에서는 영덕1교의 가설중 ILM공법에 의해 보강형이 런칭완료 후 주탑이 가설된 상태를 1단계를 시작하여 포장 및 방호벽 설치가 완료되고 나서 10000일이 경과된 시점을 Target으로 하여 초기치 해석을 수행하였다. 영덕1교의 가설순서를 요약하면 표 2, 표 3과 같다.

표 3 가설순서 및 해석 개념도

<p>1단계 : ILM 런칭 후 주탑가설</p> <p>▶ ILM 런칭완료</p> 	<p>2단계 : 케이블 거치 (1차장력도입)</p> <p>▶ 케이블 거치-1차 장력도입</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 타워크레인을 이용하여 사제 Cable을 가설한다.</li> <li>② 1차 Cable 장력 도입(430~160 kN의 장력 도입)-부반력 미발생</li> </ol> 
<p>3단계 : 가설밴드 제거</p> <p>▶ 밴드 제거</p> <p>나머지 1, 3번밴드 제거</p> 	<p>4단계 : 상부슬래브 타설</p> <p>▶ 슬래브 타설</p> <p>프리캐스트 판넬을 이용하여 바닥판 콘크리트 타설</p> 
<p>5단계 : 합성후 단면고려 (크리프와 건조수축고려 30일)</p> <p>▶ 합성후 단면고려</p> 	<p>6단계 : 케이블 초기장력 도입</p> <p>▶ 케이블 초기장력 도입</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 사제 Cable 장력 도입(초기장력 도입)</li> <li>② 긴장작업 완료 후 타워크레인 해체</li> </ol> 
<p>7단계 : 포장 및 방호벽, 방호책 설치</p> <p>▶ 포장, 방호벽 등 부대공 완료</p> 	<p>8단계 : 완공후 콘크리트의 장기거동 해석 (크리프와 건조수축 10000일)</p> 

## 6. 예비설계

사장교는 일반 거더교와 달리 주탑고나 케이블 배치 등의 주요 설계인자를 적절하게 결정하는 것이 구조적인 안정성과 경제성을 확보하는데 주요 관건이 된다. 따라서 본 영덕1교는 주탑고, 케이블 배치 형식, 케이블 본수에 따른 설계변수 분석을 통해 최적의 제원을 결정하였다.

### 6.1 주탑고 검토

주탑고는 주형의 단면력 및 활하중에 의한 케이블의 응력변동 폭에 큰 영향을 주는 설계인자이다. 주탑높이가 높으면 케이블부재의 연직분담율(케이블의 진담하중/전체 연직하중)이 커져 주형의 단면력을 줄일수 있으나 케이블 피로문제가 발생할 수 있으며 주탑이 낮으면 피로에는 유리하나 주형이 분담율이 커서 비경제적인 설계가 될 수 있다. 일반적으로 사장교의 주탑비(주탑높이/중양지간장)는

1/5이다. 주형을 거치하기 위해 탄성지점의 의미를 갖는 일반 사장교와는 달리 넓은 교폭을 가진 영덕1교는 주형의 강성이 커서 구조적 거동이 다를 수 있기 때문에 주변 경관과의 조화, 구조적 안정성을 고려한 주탑 높이를 산정하기 위하여 주탑고를 40.0m, 45.0m, 50.0m로 변화시켜 주탑 높이에 대한 적정성을 검토하였고 그 해석 결과를 표 4~ 표 6에 요약하였다.

표 5를 보면 최외측 케이블을 제외한 모든 케이블에서 주탑고가 높으면 활하중에 의한 변동응력은 작아져 주탑고가 높은 것이 유리한 것으로 나타났는데 이는 케이블의 경사각에 의해 수직력보다 수평력(교축방향축력)의 영향을 더 받기 때문이다. 주탑고가 보강형에 미치는 영향을 살펴보면 주탑고가 높을수록 케이블의 연직 분배율이 높아져 보강형의 부재력 및 처짐이 작아져 주탑고가 높은 것이 유리한 것을 확인할 수 있었다.

주탑에 대한 주탑고의 영향을 검토한 결과, 주탑고가 낮을수록 주탑에 작용하는 축력, 모멘트가 작아져 안전하였

표 4 주탑높이별 해석 결과 요약

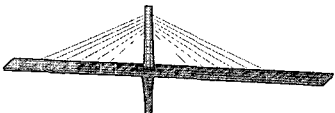


구분	주탑고 40.0m	주탑고 45.0m	주탑고 50.0m	
형식				
연직 분담율	52.8%	58.6%	62.9%	
최대 변동응력	104.0MPa	97.8MPa	92.2MPa	
보강형	최대 정모멘트	16949.8KN·m	14310.3KN·m	11992.0KN·m
	최대 부모멘트	-23166.6KN·m	-16147.0KN·m	-10312.4KN·m
	최대 축력	-11178.9KN	-11496.4KN	-11909.4KN
	최대 변위	425.1mm	304.6mm	252.4mm
주탑	최대 모멘트	-9213.6KN·m	-9659.1KN·m	-10110.4KN·m
	최대 축력	-93901.3KN	-97052.8KN	-100032.3KN
	최대 변위	-12.75mm	-6.14mm	+11.98mm

표 5 주탑높이별 케이블 변동응력 검토

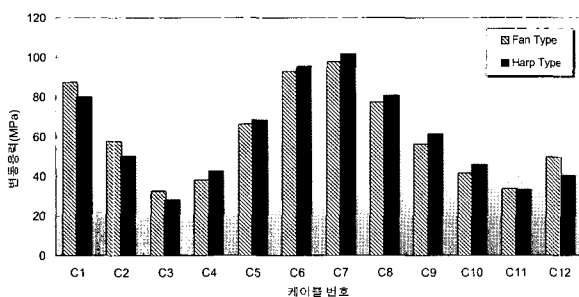
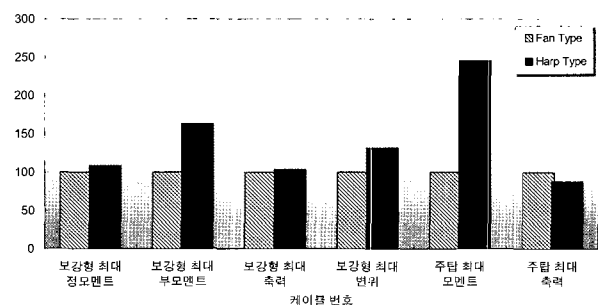


표 6 주탑높이별 부재력 및 변위 검토(%)



고, H=45m일 경우 주탑의 최대 변위가 가장 적게 발생하였다. 따라서 주탑고가 보강형과 주탑에 미치는 영향을 동시에 고려하고, 주탑 최대 변위 및 경제성, 경관성을 고려하였을 때 주탑고 H=45m인 경우를 가장 최적화된 높이로 결정하였다.

### 6.2 케이블 배치 형식 검토

교량의 측면에서 본 케이블의 배치 형식은 방사 타입, 팬 타입, 하프 타입이 대표적이다. 대체로 사장교에서는

주로 팬 타입 혹은 하프 타입이 많이 적용된다. 배치 형식에 따른 팬 타입과 하프 타입의 장단점은 표 7과 같다.

일반적으로 하프 타입이 팬 타입에 비해 역학적인 효율이 좋지 않다고 알려져 있지만 지간이 300~400m정도까지는 팬 타입뿐만 아니라 하프 타입에서도 보강형을 최소판 두께로 설계할 수 있으므로 정략적인 검토가 필요하다. 또한 비대칭 사장교인 영덕1교는 구조적 거동이 다를 수 있으므로 구조적 안전성, 경제성 및 경관성을 고려하여 배치 형식을 검토하였고 그 해석 결과를 표 8~표 10에 요약하였다.

표 7 팬 타입과 하프 타입의 비교

구 분	Fan Type	Harp Type
경관적 평가	구심성이 강해 상징성이 높음 주탑고가 낮으면 시각적으로 충분한 효과를 발휘하기 힘들 사장교에 효과적인 형태	사재가 평행이 되므로 덜 복잡함 시각적으로 안정된 인상을 줌 사재가 면으로 인식 참신한 느낌
구조적 평가	프리스트레스 효과가 좋음 주형에 발생하는 축력이 작음 사재의 연장이 길게 됨 연직하중에 대한 강성이 큼	사재의 도심이 낮아 불리 주형에 발생하는 축력이 큼 주탑부 사재의 교차정착이 용이

표 8 배치형식별 해석 결과 요약

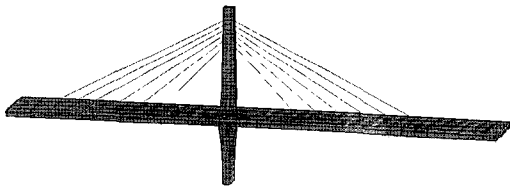
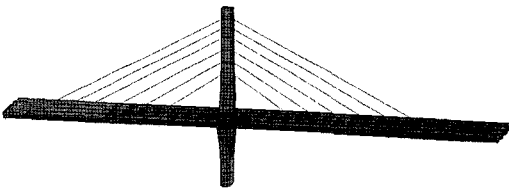
구 분	Fan Type	Harp Type	
형 식			
연직 부담율	58.6%	51.5%	
최대 변동응력	97.8MPa	102.0MPa	
보강형	최대 정모멘트	14310.3KN·m	15524.7KN·m
	최대 부모멘트	-16147.0KN·m	-26450.0KN·m
	최대 축력	-10496.4KN	-10952.8KN
	최대 변위	304.6mm	402.7mm
주 탑	최대 모멘트	-9659.1KN·m	-23804.1KN·m
	최대 축력	-97052.8KN	-85338.8KN
	최대 변위	-6.14mm	42.38mm

표 9 배치형식별 케이블 변동응력 검토

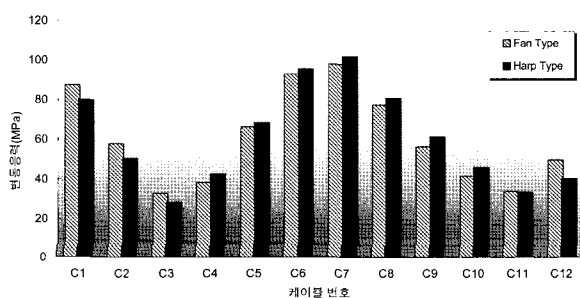


표 10 배치형식별 부재력 및 변위 검토(%)

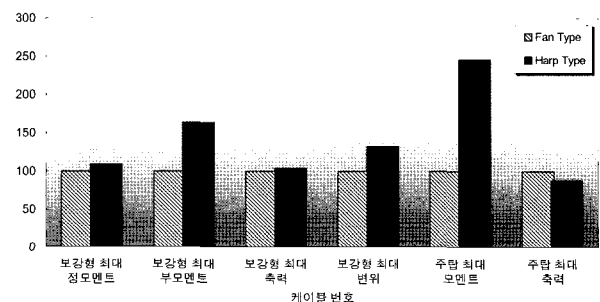
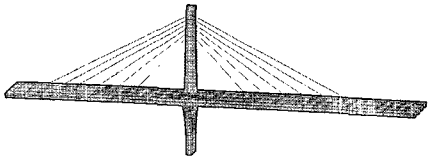
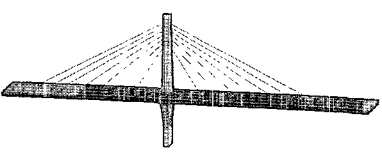
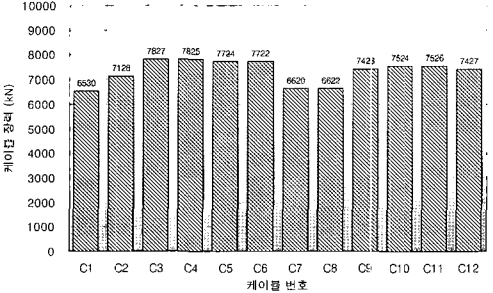
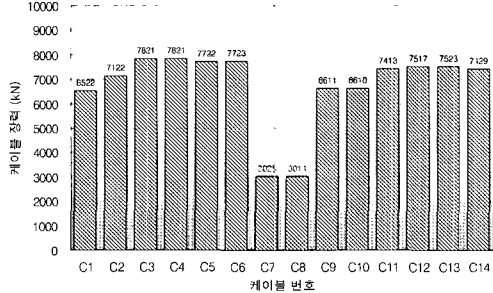
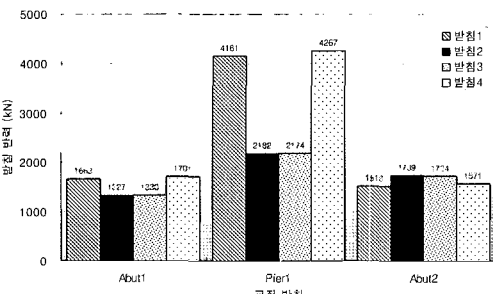
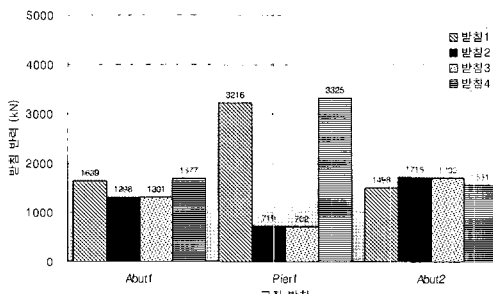


표 11 케이블 본수별 해석 결과 요약

구 분	12열 배치	14열 배치
형 식		
케이블 장력		
받침 반력		

활하중에 의한 변동응력을 검토해 보면 최외측 케이블을 제외한 모든 케이블에서 팬 타입이 하프 타입보다 변동응력이 적게 나와 유리하다는 것을 확인할 수 있었으며, 보강형 및 주탑에 작용되는 전반적인 부재력과 변위가 HARP형보다 FAN형에서 더 유리하므로 구조적 안전성 및 경제성을 고려하여 FAN형으로 케이블 배치형식을 결정하였다.

이들의 효율성을 높일 수 있었다. 14열 배치시는 주탑부에서 가까운 케이블(C7, C8)이 다른 케이블에 비해 장력값이 작았는데 장력을 더 도입하면 주탑부에서 부반력이 발생하는 문제가 발생하였다. 따라서 케이블 본수대비 구조 및 비용 효율성이 우수한 12열 배치로 결정하였다.

### 6.3 케이블 본수 검토

케이블의 본수에 따라 소수단 케이블과 다수단 케이블(멀티케이블)로 나눌 수 있는데 영덕1교는 멀티케이블로 케이블 배치 간격과 본수는 교량의 구조적 안정성뿐만 아니라 케이블과 정착장치 추가에 따른 자재비 및 공사비에도 큰 영향을 미친다. 따라서 본 검토에서는 시점부 counter weight 설치구간은 8m간격으로, 그 외 구간은 11m간격으로 케이블을 배치를 기준으로 정하고 케이블 본수 12열 배치, 14열 배치에 대해 검토하였고 그 해석 결과를 표 11에 요약하였다.

12열 배치시 검토 결과, 모든 케이블의 장력값이 균일하게 나와 모든 케이블을 하나의 직경으로 적용 가능하여 케

## 7. 맺음말

이상으로 영덕1교의 소개와 주요 구조 계획과 예비 설계시 검토한 설계변수 분석을 통한 구조해석 결과를 중심으로 개략적인 사항을 요약 기술하였다. 영덕1교는 청명산 산세와 조화를 이루고 흥덕지구 U-city를 대표하는 Landmark로 1면 1주탑 강합성 사장교로 설계하여 용인시의 21세기 대표교량으로 손색이 없도록 교량의 상징성과 독창성을 부여하였다. 더불어 본 과업이 완벽한 시공이 되도록 관련회사 및 기술자들의 많은 관심과 조언을 부탁드립니다. 