

## 청풍대교(복합사장교)의 계획과 설계

Planning and Design of Cheong-Poong (Hybrid Cable-Stayed) Bridge



유동호\*  
Dong-Ho Yoo



문 창\*\*  
Chang Moon



김진명\*\*\*  
Jin-Myung Kim



박태군\*\*\*\*  
Tae-Kwun Park

### 요 지

청풍대교는 충주호를 횡단하는 중앙경간 327 m의 사장교이다. 지형여건 및 기존접근도로의 선형조건에 부합되도록 교량 계획을 한 결과 57.5 m + 327 m + 57.5 m의 경간구성을 갖는 것으로 계획되었고, 이러한 경간구성에 의해 두드러지게 나타나는 측경간부의 부반력에 대한 구조적인 안정성을 확보하는 것이 구조계획상 기술적으로 가장 주요한 해결 사항으로 대두되었다. 검토 결과 보강형의 형식은 중앙경간에는 강합성거더, 측경간은 콘크리트거더를 각각 적용하는 복합형식으로 계획하고 주탑과 단부교각 사이에 부탑을 설치하며 케이블 배치간격을 변화시켜 배치하는 등의 방안을 고려함으로써 부반력 규모를 효과적으로 감소시킴과 동시에 부재력 발생 규모를 최소화하는 구조계를 계획하였다. 또한 시공계획에 있어 콘크리트 거더인 측경간을 full-staging으로 선 시공한 후 중앙경간부의 시공을 선 시공된 측경간을 이용한 일반크레인으로 접근, 시공하도록 계획하여 데릭크레인과 같은 고가의 특수장비의 사용을 배제하였다. 복합부 연결 상체는 완성 단계 및 가설단계를 통해 나온 단면력을 이용하여 발생하는 부재력의 이력(history)에 대해 안정성을 확보하도록 하였다. 풍동 실험 결과에 따라 vortex 영향을 경감시키고 비틀림 flutter에 대한 안정성을 확보도록 보강형 단면에 extension을 설치하였다.

### 1. 서 언

청풍대교는 충청북도 제천시의 충주댐 상류인 충주호에 가설

\* (주)엔비코건설턴트 대표이사, 구조기술사  
dyoo@envico.biz

\*\* (주)엔비코건설턴트 구조부 차장

\*\*\* 대림산업주식회사 청풍대교현장 소장

\*\*\*\* 대림산업주식회사 청풍대교현장 공무과장, 구조기술사

되는 교량으로 국가지원지방도 82호선의 교통량 증가와 크리프 현상과 강도저하에 따른 노후화로 중앙경간에서 과도한 처짐이 발생하고 있는 기존 청풍교(PSC box girder)의 역할을 대체하기 위해서 계획되었다. 설계시 고려할 사항으로는 지리적으로 가설위치가 내륙호수내에 위치하므로, 자재운반이 육상운반으로 이루어져야 한다는 점을 고려하고, 대형장비의 자유로운 반입반출이 곤란하므로 가급적 소규모 장비에 의한 가설이 가능토록 계획되어야 한다는 점을 들 수 있다. 또한 가설위치의 수심이 대수심부(H = 40 m)에 위치하며 연중 수위의 변화가 심하여 수상작업을 가급적 배제하는 가설계획이 요구되며 아울러 단양8경의 주변 관광자원과 연계하여 경관적으로도 조화를 이루는 교량이 계획되어야 하는 특징이 있다.

### 2. 현황 및 가설 여건

신설교량이 위치하게 되는 지역은 내륙호수(충주호)를 횡단할 뿐만 아니라 접속도로를 이용한 접근조건 또한 굴곡이 심하고 산악지에 위치하고 있어 자재와 장비의 운반에 있어서 작업여건이 어려운 지역이다. 따라서 건설에 필요한 모든 장비와 재료들은 운반조건상의 제약을 고려해야 하고 현지제작을 고려하는 경우에도 가급적 소규모의 작업장으로 공사시행이 가능토록 계획하는 것이 요구되는 지역이다. 이는 운반과 시공을 위해 장비와 재료들이 가능하면 작고 가벼워야 한다는 의미이기도 하며 지역여건상 대규모 장비를 반입할 수 없고, 반입하더라도 그에 따른 공사비 추가부담이 요구되므로 교량구성 부재의 계획과 건설장비의 선정에 신중을 기해야 한다.

가설지점의 여건에 있어 교량계획상 중요하게 고려해야 하는 또 다른 사항은 청풍대교가 횡단하는 충주호의 수심 및 연중수심변화량이다. <그림 1>은 교량가설위치에서의 지난 10년 동안의 수심변화량을 보여주며, <그림 2>는 가설위치의 지형 및 수심현황을 보여준다.

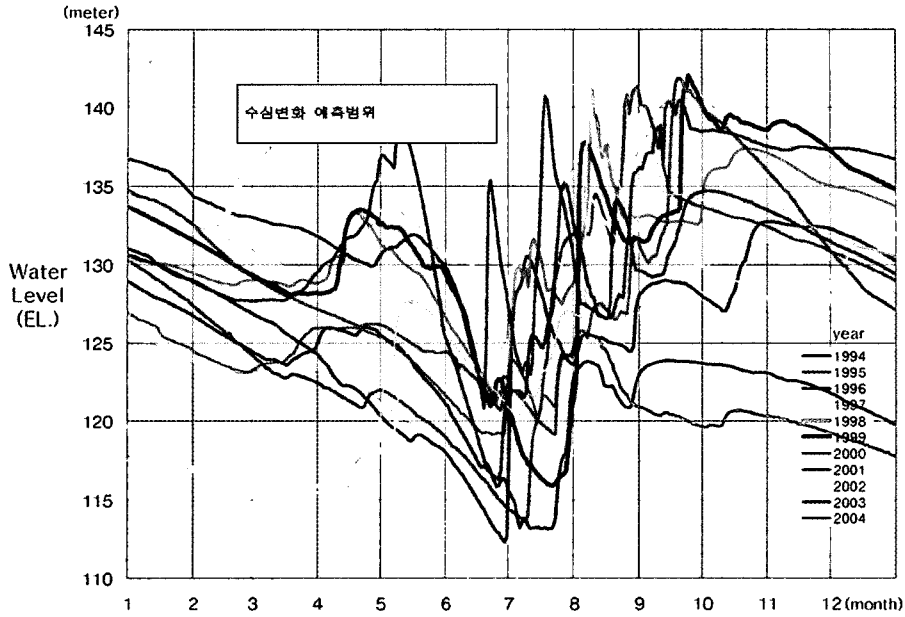


그림 1. 지난 10년간의 수심변화 현황

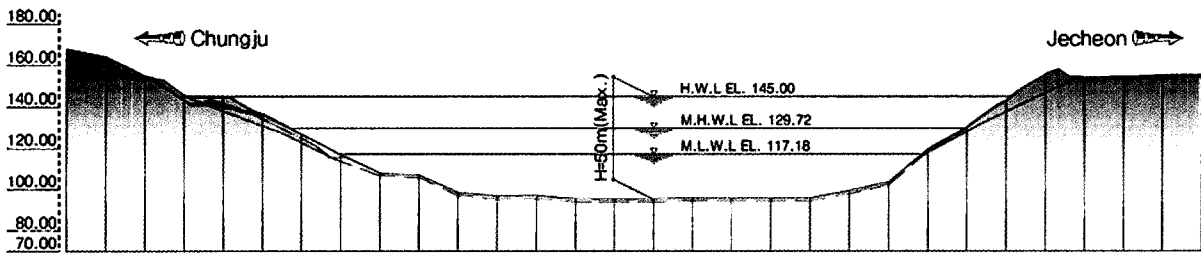


그림 2. 지형종단 및 수심조건

하상기초의 시공성은 하저면의 조건이 약간의 굴착으로 양호한 지지층을 확보할 수 있다 하더라도 기초시공기간 동안의 수심과 수심의 변동에 우선적으로 직접적인 영향을 받게 된다. 물론 공사비 측면에서도 수심증가에 따른 공사비 증가는 단순히 비례하기 보다는 오히려 포물선의 비율로 증가하게 된다는 점에도 유의할 필요가 있으며, 아울러 안전의 보장과 품질에 대한 신뢰도를 확보하는 것이 불리해지기 마련이다.

〈그림 1 과 2〉는 호수 중앙부에서의 연중 수심변화가 약 20 m 이상으로 나타나고 있음을 보여준다. 따라서 이러한 위치에 수중기초를 시공하기 위해서는 수심변화에 대응할 수 있는 높이의 가물막이 시설을 필요로 한다는 의미가 되며, 그 경우가물막이의 높이는 최대 45m 정도의 규모를 필요로 하게 되는 결과가 된다. 이러한 규모의 가물막이는 그 소요공사비 뿐만 아니라, 가물막이 자체의 시공에 소요되는 공기도 상당기간 필요할 것이므로 그에 따른 전체공기의 연장을 초래하는 상황이 된다고 볼 수 있다. 따라서 공사비 및 공기뿐만 아니라 시공중의 안전과 품질에 대한 신뢰도 제고차원에서 가급적 수중에서의

대형기초의 계획은 지양하는 것이 바람직하며 이를 감안한 경간장의 증가를 적극적으로 고려할 필요가 있다.

교량을 계획함에 있어 교량의 총연장에 대해서 또 다른 주목할 점이 있다. 본 교량은 새로 계획된 도로노선이 아니라 교량의 양측에서 기존에 공용중인 도로구간에 접속토록 계획되어 있으므로 교량 시·종점부 도로선형을 고려해야 한다. 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 교량의 시·종점부 기존도로는 그 선형이 불량하므로 교량구간을 임의로 연장하는데 제약이 따르고, 반면 교량의 적정연장을 확보하기 위해 인접도로의 선형개선을 고려하는 경우에는 주변지역의 자연환경을 대규모로 훼손하는 것을 감수해야 하므로 바람직하지 못하다. 이러한 주변 기존도로 여건의 제약사항은 교량의 총연장에 대한 제약으로 연관시켜 생각해야 하고 결과적으로 교량구간 내에서 대수심 기초를 피하기 위해 중앙경간장을 키우게 되면 그 결과로 인해 교량의 축경간장은 상대적으로 짧아질 수밖에 없게 됨을 의미한다.

위에 설명된 주변현황에 대한 이해로부터 청풍대교의 계획에 있어 중점적으로 고려해야 할 점을 아래에 기술하였다.

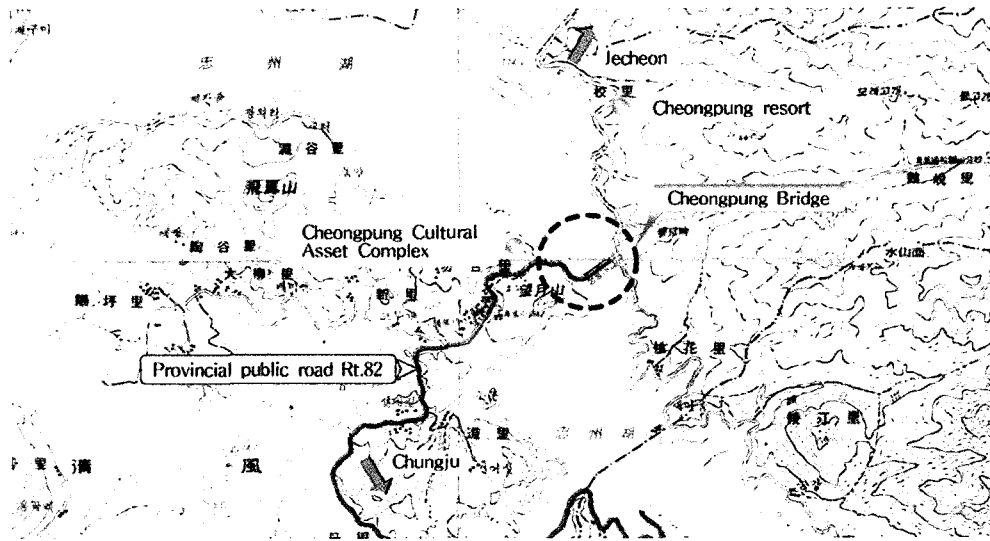


그림 3. 위치도

- 1) 소요건설장비는 가급적 소규모로 계획
- 2) 현장 제작장은 가급적 소규모로 계획
- 3) 각종자재들의 현장반입은 육상운반으로 고려
- 4) 대수심기초를 가급적 배제할 수 있도록 중앙경간의 길이를 가능한 확대
- 5) 중앙경간의 길이에 관계없이 교량 총연장은 제약을 받음

상기한 사항들은 상호간에 모순되는 조건들이 있으므로, 교량계획시에는 이러한 점들이 상충되는 것을 최소화 하면서 최적의 해결책을 찾는 방향으로 검토하였으며 이에 대해 다음 장에서 기술하였다.

### 3. 경간구성과 교량형식

경간구성을 위해서는 기초와 교대의 위치를 결정하는 것이 필요한데, 기초위치를 최저수위(LWL)에서 기초저면이 들어가지 않으면서 동시에 가능한 한 수심이 낮은 곳에 배치하여 보면 중앙경간장인 약 300 m 이상의 규모를 필요로 하게 된다. 이러한 규모의 중앙경간장을 유지하기 위해서는 경계성 측면에서 보더라도 케이블리지 형식의 교량인 사장교형식을 우선적으로 고려할 필요가 있는데 이 경우, 앞서 언급한 접속도로의 제약에 따른 교량의 총연장 제한(약 450 m), 즉 교대위치선정의 제약을 감안하면, 통상적인 3경간 사장교에 비해 측경간 길이(중앙경간장과 측경간장의 비율)가 상대적으로 작게 계획됨을 의미한다. 이러한 경우 경간구성의 비대칭성은 구조계획 및 설계과정에서 일반적인 사장교계획과 비교할 때 부반력, 케이블장력조절난이도, 비대칭에 의한 주탑의 부재력 등의 처리를 위

한 기술적인 해소방법에 대해 보다 신중한 접근이 요구된다.

우선 이러한 경간구성을 갖는 교량에 적용 가능한 몇 가지 교량형식들을 대안으로 고려해 보면 <그림 4>와 같다. 대안 1은 사장교형식으로서 교량기초를 가급적 수심이 낮은 곳으로 배치하면서 측경간측에 back stay를 배치하는 방안으로서 back stay 설치구간(측경간의 길이)은 평면곡선으로 연결되는 접근도로의 선형과 간섭되지 않는 범위 내에서 배치되도록 하는 방안이다. 대안 2는 일종의 타정식 사장교로서 대수심기초를 배제하는 경간장을 확보하고 그에 따라 짧아지는 측경간의 불리한 점을 해소하는 차원에서 back stay를 교량후방에 지중 anchor 형식으로 배치하는 방안이다. 접근도로의 선형문제를 감안한 anchor stay 배치를 고려하여야 하고 anchor stay를 지지하기 위한 지중앵커가 별도로 요구되는 형식이다. 대안 3은 현수교안으로서 특징은 2안과 유사하다고 볼 수 있다. 이와 같이 몇 가지 대안에 대하여 검토한 결과 공기, 공사비, 시공성 등 종합적 측면에서 적절하다고 판단되는 3경간 사장교형식을 교량형식으로 선정하게 되었다. <그림 4>는 교량형식 선정시 검토한 비교대안들이다.

### 4. 부반력 저감계획

결정된 교량형식에서 보는 바와 같은 경간구성의 불균형은 과도한 부반력을 유발하게 되고 이러한 반력분포에 대해 구조물 거동의 균형을 유도하기 위해서는 주탑에 작용하는 모멘트의 규모와 그 작용위치, 케이블배치 및 장력분배와 조절, 단부 교각 또는 교대의 규모에 대해 주의할 필요가 있다. 설계수행시에 이러한 부반력에 대응하는 방안을 다각도로 검토하여 적

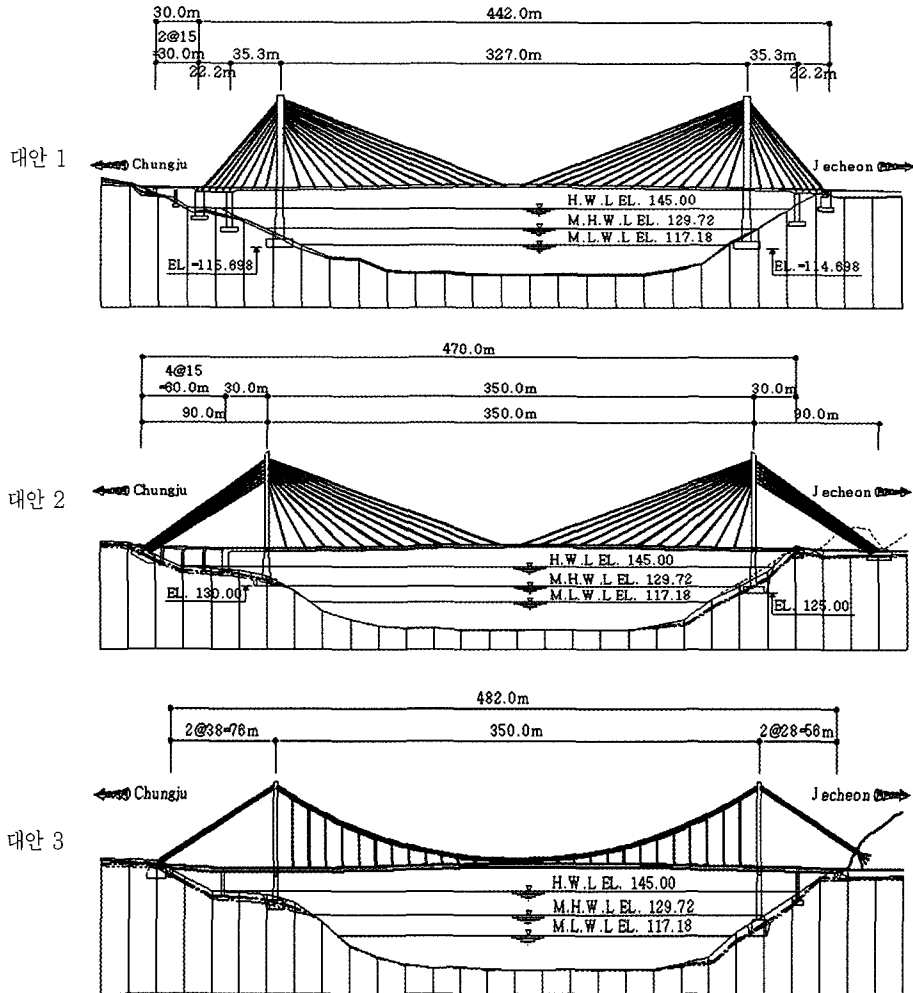


그림 4. 교량 대안

용하였으며 이에 대해 다음에 기술하였다.

첫째로 weight를 이용한 방법을 들 수 있다. 경간장비에 따른 불균형을 해소하는 방법의 일환으로 중앙경간부와 측경간부의 단면형식을 다르게 하여 복합형식을 적용하였는데 이는 상부구조의 고정하중에 의한 효과를 고려한 것이다. 해외의 많은 사례에서 보듯이 고정하중에 의한 부반력 해소를 가장 효과적으로 기대할 수 있는 방안으로, 중앙경간의 상부구조형식은 경량구조라고 할 수 있는 steel deck과 steel girder 그리고 측경간의 상부구조형식은 concrete deck과 concrete girder를 복합으로 구성하는 방안을 생각해볼 수 있다. 하지만, 중앙경간부에 steel deck과 girder를 사용하는 경우에 부재운반의 제약을 감수하고, 현지조립장규모 증가 및 특수한 가설장비가 필요하는 등 현지여건상 불리한 점이 많고 아울러 공사비도 증가하는 것으로 판단되었다. 따라서 중앙경간부는 현지여건 상 운반, 제작, 가설에 있어 상대적으로 장점이 많아 유리한 강합성 플레이트거더, 측경간은 콘크리트 거더 형식을 적용하는 것으로 결

정하였다. 강합성 거더와 콘크리트 거더를 복합구조로 연결하여 주는 접합부의 위치는 기본적으로 주탑부근에 설치하는 것이 부반력을 해소하는 효과를 가장 크게 기대할 수 있는데 이에 대해 주탑위치 전, 후를 대상으로 하여 구조적인 기능의 차이와 시공성 측면에서의 차이를 세부적으로 검토한 결과, 접합부의 위치는 주탑위치보다 전방(중앙경간측)으로 배치토록 계획하였다.

두 번째는 측경간부에 부탑설치하는 방안이다. 측경간부 콘크리트 거더에 의한 counter-weight 효과를 최대화하기 위해서는 측경간 상부구조를 가능한 한 무겁게 할 필요가 있는데 이 때 증가하는 고정하중에 의한 부재의 휨모멘트 역시 증가하게 된다. 이러한 과도한 부재력을 케이블 장력에 의해서만 해소하려고 하는 경우 케이블에 부담이 증가(장력증가)하고 이는 결국 주탑에 부담으로 작용하게 되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해소하는 목적으로 주탑과 단부교각 중간부분에 추가교각을 설치하여 측경간부 거더에 발생하는 부재력을 해소하도록 하였다. 또한 이 추가교각은 부반력에 대한 저

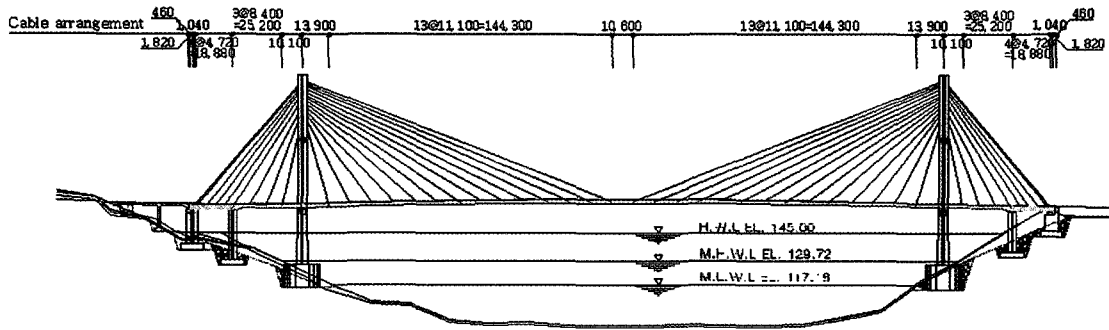


그림 5. 케이블 배치 및 종단면도

항이 교대부 또는 단부교각부에서만 이루어지는 것을 일부 분담하여, 특정위치에서의 부반력 과다에 따른 구체규모증가를 억제하는 역할도 수행한다.

세 번째는 back stay 케이블의 적절한 재배치를 들 수 있다. 측경간부에서 추가교각의 설치 및 단면규모의 증가는 이 부분의 강성이 증가하는 결과를 초래하고 그 결과로 측경간의 유연도가 감소하게 되며 측경간에 배치되어 있는 back stay들은 강성이 큰 구조물(anchor span)에 정착되는 결과가 되어 anchor stay의 역할을 하게 된다. 이 때 각 케이블에 도입되는 장력은 거더축의 강성 및 지점조건에 따라 특정위치에 편중되어 작용될 수 있으므로 장력의 균등분포와 아울러 부반력의 원활한 분배를 도모하기 위해 적절한 케이블의 배치를 고려하여야 한다. 본 설계에서는 측경간단부에서 부탑까지는 4.72m, 부탑에서 주탑부까지는 8.4m로 케이블 배치간격에 변화를 주어 배치하고 케이블의 장력조절을 시행한 결과, 부탑과 단부교각/교대에서 부반력의 크기를 균일한 분포로 얻을 수 있었다.

### 5. 상부구조

앞서 언급한 바와 같이 보강형의 단면은 경간장의 불균형을 해소하기 위해 중앙부와 측경간부의 단면형식을 다르게 적용하였다. 중앙부는 강합성 플레이트 거더형식이며, 측경간은 콘크리트 edge 거더 형식의 단면을 적용하였고, 특히 부탑과 단부교각 사이의 보강형 단면은 counter weight 효과를 극대화하기 위해 충실단면으로 계획하였다.

(그림 6)은 중앙경간과 측경간에 대한 단면형상이다. 교량의 특성상 측경간 비가 짧고 육상부에서 시공이 가능한 지형조건에 착안하여 측경간의 콘크리트 부분을 full-staging으로 선시공한 후 이 부분을 활용하여 자재 및 장비 반입 통로로 이용할 수 있게 하였다.

따라서 중앙경간측 보강형 세그먼트의 시공은 선시공된 측경간을 이용하므로 별도로 주두부(pier table)를 설치해야 할 필

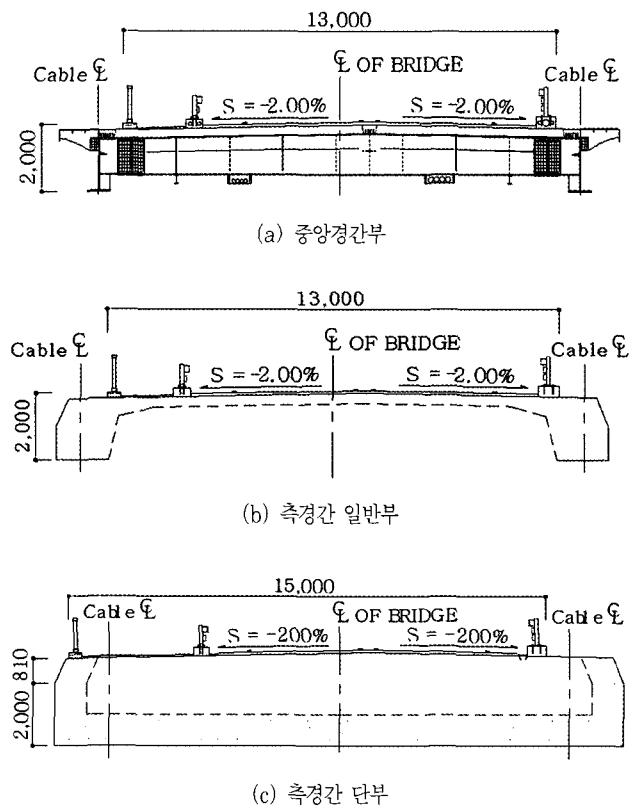


그림 6. 보강형 단면 형상

요가 없으며 육상 크레인인 100톤급의 Hydraulic 크레인을 사용하여 기 시공된 세그먼트의 선단에서 plate 거더(7 ton 이하), floor beam, stringer(6 ton 이하) 및 PC바닥판(16 ton 이하)의 순서로 거치토록 계획하였다.

강 콘크리트 복합부는 이중 재료인 강과 콘크리트가 교축방향으로 접합되어 보강형의 과대한 축력 및 휨모멘트에 저항하도록 배치되었다. 접합부에는 강형의 plate 거더와 콘크리트 edge 거더가 일체로 거동할 수 있도록 충분한 보강이 이루어져 있는데 접합면에 스티드, 강봉이 설치되어 콘크리트 타설시 상당한 주의를 요하게 된다. 본 과업에서는 가벤트 상면에서 작업하도록 하여 비교적 작업여건이 양호하도록 계획하였다.

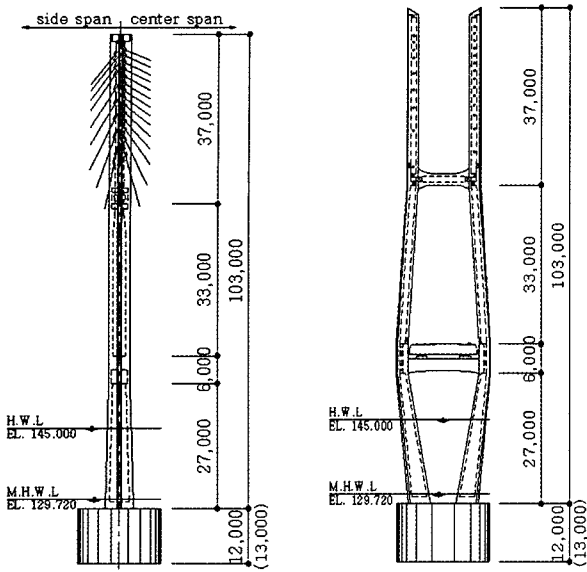


그림 7. 주탑 개요

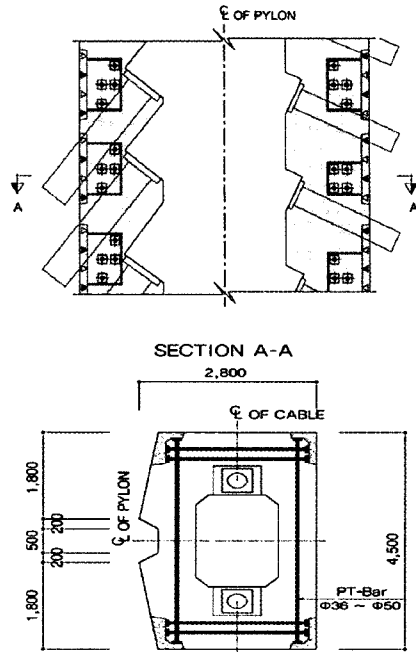


그림 8. 주탑 정착부 상세

## 6. 주 탑

사장교 주탑의 형상은 교량의 조형미와 상징성에 중요한 부분을 차지한다. 주탑의 형상이 H형인 경우에는 케이블의 정착 구조가 간단해지며 시공성이 우수하고, 주행시 개방감이 좋은 장점이 있는 반면 하부기초의 규모가 커지는 단점이 있다. 본 과업에서는 지형상 하부기초의 크기에 따라 암굴착량의 변화가 큰 지역이므로 하부기초가 불필요하게 증가하는 것을 방지하기 위하여 주탑 하부의 형상을 약간 안쪽으로 모으는 수정된 H형상의 콘크리트 주탑으로 결정하였다. 주탑의 높이는 103 m, 단면이 하단부에서 5.3 m × 6.0 m(중공단면, 벽체 두께 교축방향 800 mm, 교축직각방향 600 mm), 상단부는 2.8 m × 4.5 m(중공단면, 벽체두께 교축방향 800 mm, 교축직각방향 600 mm) 그

리고 케이블 정착부의 교축방향 벽체 두께는 1.3 m로 변화되는 형상을 갖고 있다. 보강형의 지지를 위해 설치되는 하단부 가로보와 보강형의 상단부에 설치되는 가로보는 PS콘크리트로 구성되어 있다. 콘크리트 강도는 프리스트레스 도입을 위해 40 MPa를 적용하였으며 주탑 레그의 효율적인 타설을 위해 평균 4.0 m 높이로 세그먼트를 분할하여 시공토록 하였다.

주탑부 정착방식은 강재앵커빔을 삽입한 복합방식과 post-tensioning 방식을 생각할 수 있다. 일반적으로 복합형식이 시공이 편리하고 기능에 대한 신뢰도가 높다고 볼 수 있지만, 본 교량에서는 <그림 7, 8>에서 알 수 있듯이 케이블 배치에 있어서 경간구성의 비대칭으로 인해 forestay와 backstay의 케이블

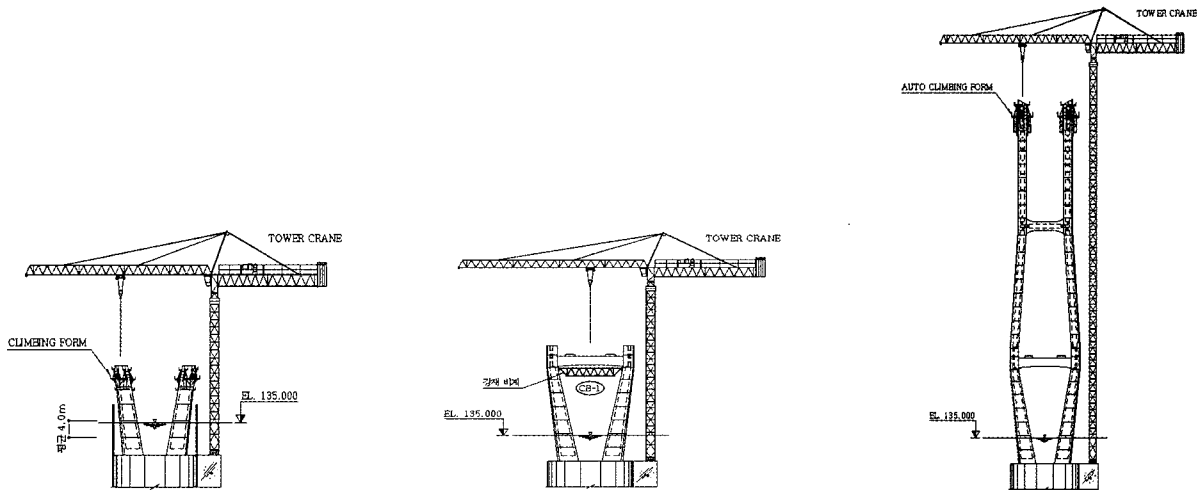


그림 9. 주탑가설 순서도

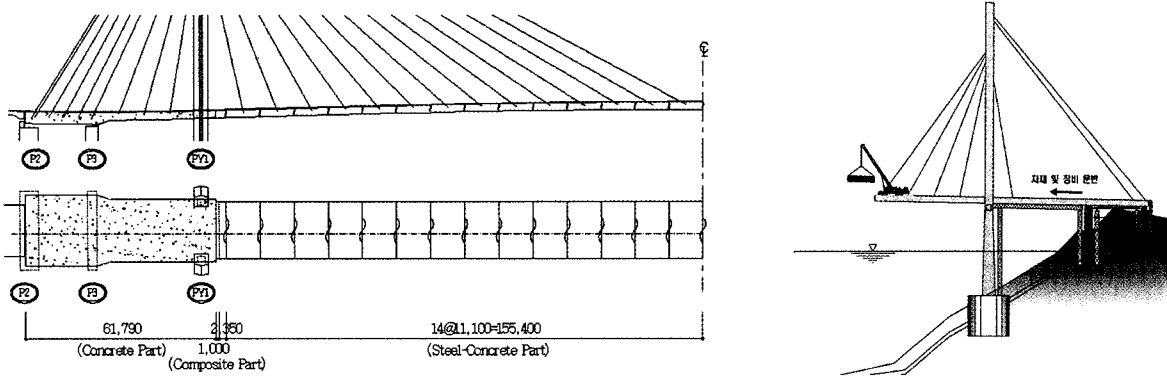


그림 10. 복합부 위치 및 상부구조 가설 방법

배치에 있어 차이가 많이 발생하는데, 가설장비 여건상 분할시공을 전제로 볼 때, segment 분할이 곤란하고 그로 인해 제작난이도가 필요이상으로 증가할 것으로 판단되었다. 따라서, 제작 및 설치에 있어 오히려 불리한 것으로 예상되어 이를 배제하고 concrete 현장타설과 함께 post-tensioning에 의한 보강방식을 주탑정착부 구조로 채택하였다.

주탑의 가설은 두 부분으로 구분하여 시공토록 계획하였다. 하단부(우물통상단~보강형)의 경우는 단면형상의 변화가 심하고, 가물막이 내부의 협소한 작업공간에서 거푸집의 이동이 원활하도록 하기 위해서 자동식보다 형상변화의 적응성이 좋고 규모가 작은 일반 거푸집을 적용하였으며, 상단부(보강형~탑정부)는 동일단면이 연속되고 고소작업의 여건을 감안하여 품질 확보에 유리하고 작업원의 안전성을 확보할 수 있는 자동식 이동거푸집을 사용토록 계획하였다.

### 7. 상부구조 접합부 계획

위에서 언급하였듯이 부반력 저감대책으로 중량에 의한 효과를 위해 두가지 다른 상부구조형식을 채택한 바 있으며 따라서 이들 서로 다른 상부구조가 일체구조로 역할을 할 수 있도록 (복합구조화)하기 위한 강합성 플레이트 거더교와 콘크리트 edge 거더간의 접합이 요구된다.

우선 접합부의 위치는 구조적인 기능을 발휘하는데 문제가 없으면서 부반력 감소효과를 최대로 하는 지점이어야 하고 또한 시공성이 좋은 지점에 위치하여야 한다. 부반력에 대한 대응효과를 최대화하기 위해서는 가급적 주탑가까이에 접합부를 설치하는 것이 요구되며 FSM 방식으로 측경간이 시공되도록 계획하였으므로 교대, 교각 및 주탑을 FSM 구간에 포함되도록 콘크리트 타설구간을 정하는 것이 도움이 될 수 있다. 반면에 접합부가 주탑위치에 놓이게 되는 경우에는 주탑부의 교좌장치 및 wind bearing 등의 설치와 함께 구조상세가 지나치게 복잡

하게 되어 오히려 시공신뢰도의 저하요인이 될 수 있는 점도 감안하였다. 또한 접합부의 위치(단면의 강성이 급변하는 위치)가 케이블 정착부와 근접하게 되는 경우 인접한 케이블들 간에 장력의 편차가 심해질 수 있으므로 이러한 경우는 가급적 피하는 것이 요구된다고 볼 수 있다. 이러한 구조적 측면, 시공적 측면의 제반 요소들을 고려하여, 몇가지 case에 대한 parametric study를 수행한 결과 접합부위치를 첫 번째 fore-stay 케이블과 주탑사이에서 주탑위치로부터 4.75m 떨어진 위치에 놓이도록 계획하였다. 접합부의 상세설계는 접합면에 작용하는 외력을 고려하게 되는데 사장교는 그 공법의 특성상 시공과정 중에서 부재력의 다양한 변화를 거치게 된다.

〈그림 11〉은 가설단계를 포함하는 구조해석 결과로부터 정리된 접합부 위치에서의 축력, 전단력, 휨모멘트를 보여주며 이는 가설단계에서부터 교량수명 내에 발생하는 부재력의 변화를 나타낸다. 사장교의 특징으로부터 알 수 있듯이 주탑위치 근처의 상부구조는 케이블 인장력의 수평성분에 의해 발생한 축력에 지배를 받고, 축력의 크기는 캔틸레버 공법을 적용하는 가설단계 동안 점진적으로 증가하여 시공이 완료된 시점에서 가장 큰 값을 나타내며, 공용 중에는 이 규모가 다소 증가하게 되는

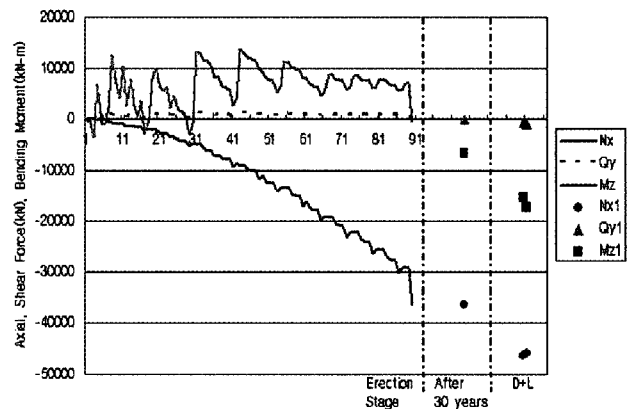


그림 11. 접합부에서의 부재이력그래프

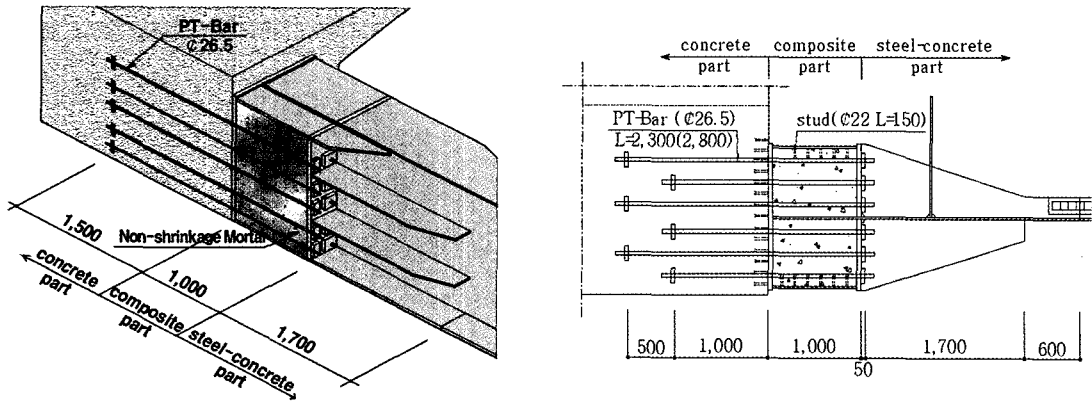


그림 12. 복합부 단면

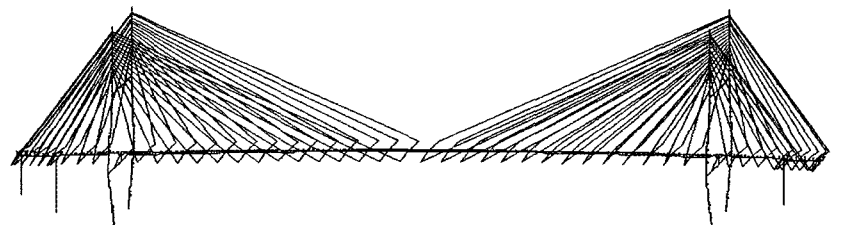
것을 알 수 있다. 반면에 접합부 위치에 발생하는 휨모멘트의 경우는 시공 중의 구조계에서는 정모멘트가 작용하고 공용 중에는 부모멘트가 작용하게 된다. 그 크기에 있어서는 단계별로 변화가 다소 있기는 하나 시공이 진행되어 가면서 정모멘트의 크기가 다소 줄어드는 경향을 나타낸다.

접합부에서 이러한 축력과 모멘트의 변화를 감안하여 응력검토를 수행한 결과, 가설단계의 진행에 따라 케이블 인장력의 수평성분이 축적되어 증가되므로 접합부에 작용하는 압축응력은 꾸준히 증가하게 되는 반면 휨모멘트에 의한 변화는 무시할 만한 수준으로 나타나며 또한 모멘트에 의한 단면의 인장응력 수준은 누적된 축력성분에 의한 압축응력에 의해 충분히 상쇄되고도 남을 만한 수준으로 나타남을 알 수 있었다.

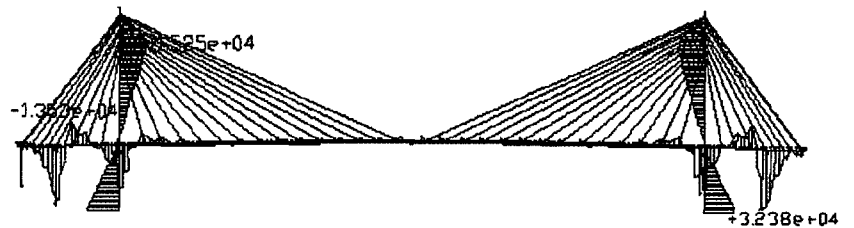
또한 이러한 축적되는 축력성분은 접합면에 pre-stressing 효과를 유발하게 되므로 강봉 등에 의한 인위적인 post-tensioning 작업을 현저히 줄일 수 있게 된다.

이러한 접합부에서의 구조거동 분석을 통해 상세설계를 수행하였는데, 접합면의 상세는 <그림 12>에서 보듯이 강재거더 부분과 콘크리트 부분, 그리고 두 부분의 복합부분으로 구성된다. 복합부위는 서로 다른 구조형식을 갖는 단면 사이에서 힘을 분배하고 효과적으로 전달할 수 있도록 강재거더 부분과 콘크리트 edge 거더 사이에 위치한다. 양측에 배치되는 bearing plate에 지지된 post-tensioning bar는 강재거더에서 복합부를 관통하여 콘크리트 edge 거더에 연결되는데, 이들은 시공초기단계에서 축력의 도입이 충

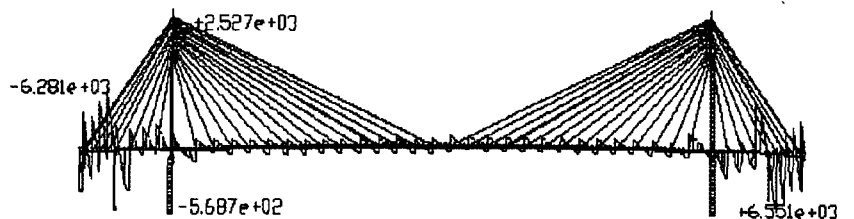
분하지 않아 휨모멘트에 의한 인장력발생이 단면을 지배하는 경우에 효과적으로 pre-stressing 역할을 할 수 있는 수준으로 검토하여 배치하였다. 전단력의 효과적인 전달을 위해 복합부 전면부에 전단연결재를 설치하였으며 복합부구조 내측에는 전단연결재와 함께 국부적인 변형을 방지하도록 무수축 모르타르를 충전토록 계획하였다. 접합부분은 임시 가설벤트상에서 시공되도록 시공계획이 수립되어 있으므로 접합부의 상세가 다소 복잡하기는 하나 시공에는 큰 문제가 없다고 판단하였다.



(a) Modeling



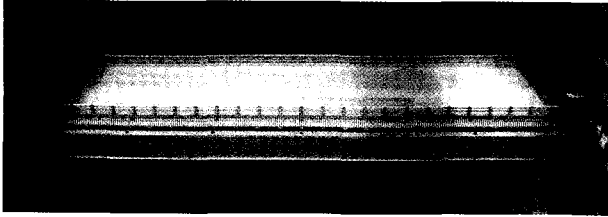
(b) BMD



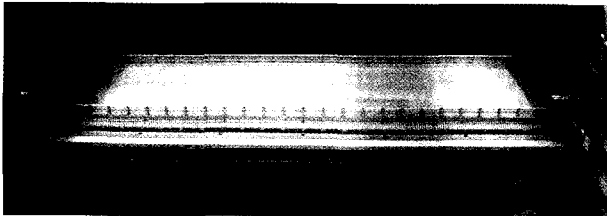
(c) SFD

그림 13. 해석모델링 및 초기 평형 조건





(a) 기본단면



(a) Extension을 부착한 단면

그림 14. 보강형 2차원 모형

### 8. 고정하중시 초기평형상태

사장교에 있어서 초기평형상태는 시공이 완료된 시점 또는 크리프 등의 고정하중 성분 재하가 완료된 시점에서 계획선형을 만족하면서 동시에 보강형, 케이블, 주탑 등 각 구조요소의 부재력 수준을 적정수준으로 유지하도록 하는 상태를 의미하는데 이러한 초기평형상태에서의 부재력들은 사장교 시공단계에서의 부재력 이력을 고려하여 결정되어야 한다. 초기평형상태의 결정을 위해 설계자는 몇 가지 조건을 선정하고 그 조건들을 만족하도록 시공단계를 고려한 구조해석을 수행하게 되는데 청풍대교에 있어서는 아래와 같은 초기조건을 고려하였다.

- 1) 탑정부에서 수평방향 변위는 zero 로 함
  - 2) 중앙경간부의 거더에서 휨모멘트의 균등분포
  - 3) 경간장 불균형에 따른 케이블 장력분포에 의한 주탑 중간부에서의 모멘트 최소화
  - 4) 부탑과 단부교각/교대에서 부반력 발생규모 분배
- 〈그림 13〉은 위에서 언급된 조건을 만족하는 초기평형상태의 만족할 만한 결과를 보여준다.

### 9. 풍동실험

본 과업에서 수행한 풍동실험은 거더단면, 독립주탑모형, 전교모형 및 가설단계모형 각각에 대하여 수행하였으며 거더단면에 대한 풍동실험과 진동저감대책에 대한 방법을 아래에 기술하였다. 최초로 계획된 보강형에 대한 풍동실험 결과, 설계풍속 38.4 m/s에서 vortex shedding과 torsional flutter가 발생함을 알 수 있었다. 이에 대한 진동억제방안으로 〈그림 14〉에서 보

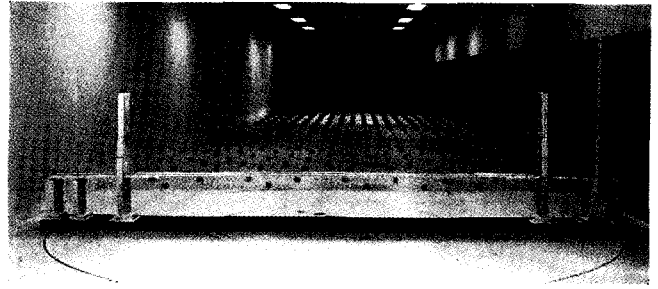


그림 16. 3차원 전교모형

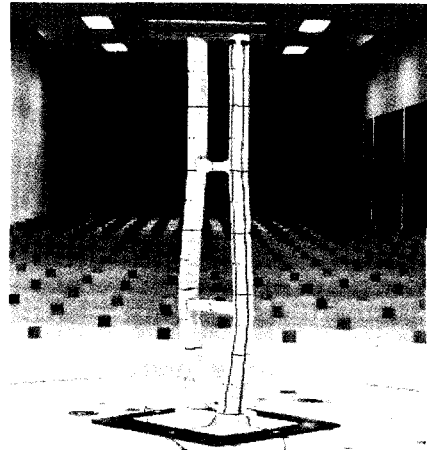


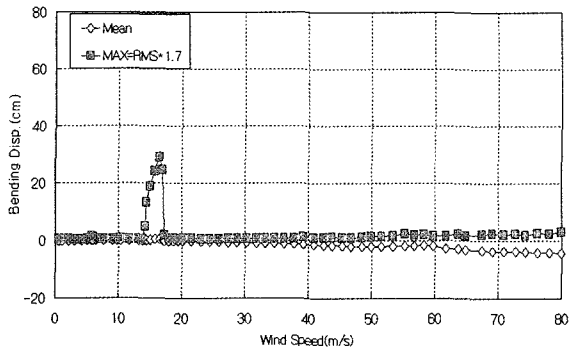
그림 15. 독립주탑 모형

듯이 거더 양측에 extension(fairing의 한 종류)을 부착하는 것으로 제안하고 이에 대해 보강형의 section model test를 다시 시행하였다.

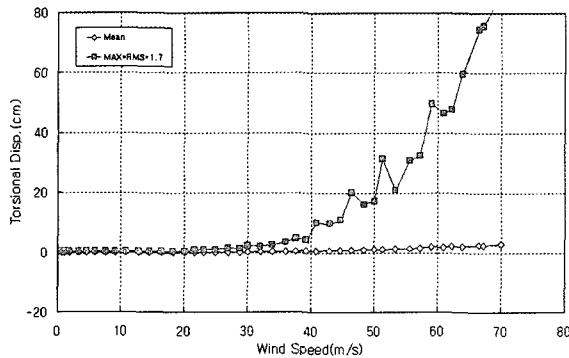
그 결과 추가로 설치한 extension이 vortex shedding과 torsional flutter에 효과적임 확인하였고 이를 구조설계에 반영하였다. 또한 주탑에 대한 실험과 가설단계 실험 결과 바람에 의해 유해한 진동이 발생하지 않음을 확인 할 수 있었다. 〈그림 14~16〉는 풍동실험 모델을 보여주고, 〈그림 17~18〉은 각각의 실험 결과를 보여준다.

### 10. 결 론

충주호에 건설되는 청풍대교는 I 형거더 합성형과 콘크리트 거더를 모두 채용한 복합구조형식의 상부와 변형된 H형의 콘크리트 주탑, 거치식 우물통 기초로 이루어진 사장교로 계획되었다. 또한 계획단계에서 설계단계에 이르기 까지 모든 과정이 순수 국내기술진에 의해 수행된 사업으로서 최근의 케이블 지지교량의 관심이 고조되고 있는 시점에서 볼 때 구조적인 특징의 중요성과 아울러 우리나라 케이블 지지교량의 기술 발전에 있어 중요한 이정표 역할을 할 수 있는 교량이라고 사료된다. 또한 청풍대교는 기존의 콘크리트거더(PSC box) 교량의 기능을

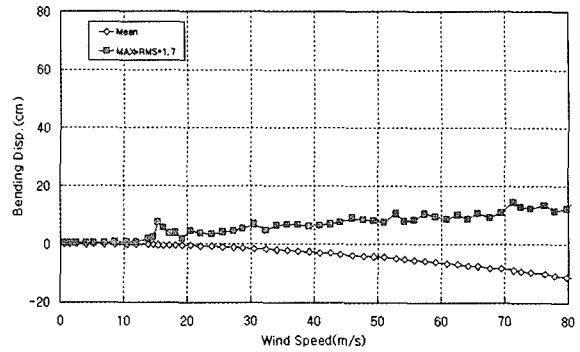


(a) Vortex

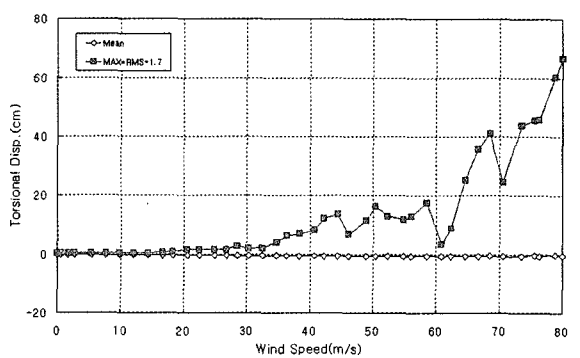


(b) Flutter

그림 17. 기본단면에 의한 실험 결과



(a) Vortex



(b) Flutter

그림 18. extension을 부착한 단면에 의한 실험 결과

대체하면서 동시에 충청북도의 랜드마크로서 관광자원화에도 일조할 수 있을 것으로 기대된다. 공사는 2005년 하반기에 착공되어 현재 약 15%의 공정률을 보이고 있는데, 시점측 교대 및 P1, P2, P3 기초 및 교각 콘크리트 타설 그리고 PY1 및 PY2의 강재우물통 제작, 철근배근이 진행중에 있으며 공사완공은 2010년으로 예정되어 있다. <그림 19>는 청풍대교 시점부 가설 전경사진이며, <그림 20>은 본 논문에서 기술된 교량계획

및 설계에 따른 청풍대교의 컴퓨터 이미지를 보여준다. 공사수행 과정에서 가설엔지니어링의 적극적인 도입을 통해 국내 사장교 기술발전에 있어 시공기술 뿐만 아니라 엔지니어링기술수준 제고와 아울러 국제경쟁력 제고에 이바지하게 되기를 기대한다.

마지막으로 본 설계가 마무리될 수 있도록 협조하여 주시고 공사과정에 지원을 아끼지 않으시는 충청북도 관계자 여러분에게 감사드리며 안전시공을 기원합니다. □

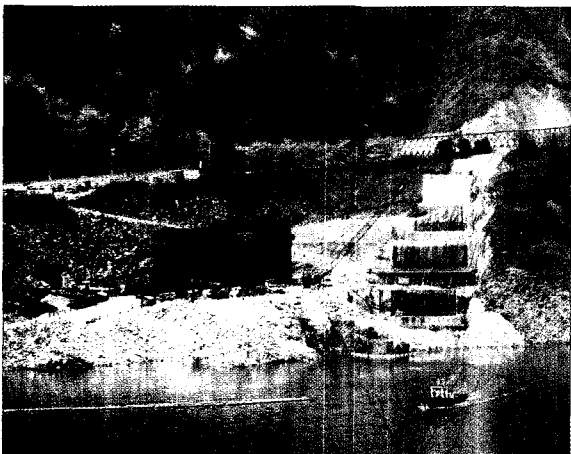


그림 19. 청풍대교 가설 전경



그림 20. 청풍대교 조감도