



황낙연



김창환

(주)대우건설, 경부고속철도 8-2공구

# 경부 고속철도 교량 건설공법

## - 8-2공구를 중심으로 -

### 1. 머리말

고속철도에서는 고속주행으로 인한 탈선을 방지하기 위하여 연직 또는 평면선형에 대하여 매우 엄격히 제한하고 있다. 종방향 경사는 2.5% 이하, 평면곡선반경에 대하여는 7,000 m 이상으로 규정하고 있으므로, 도로는 물론 일반철도에 비하여 교량구조물 발생은 더욱 증가된다. 한편 고속철도 교량은 구조물의 안전성 뿐만 아니라 승차감을 위하여 동적거동에 대하여 엄격히 제한된다. 또한 교량과 레일의 상호작용 등에 따라 무한장 개념의 레일에 악영향을 피하기 위해 교량의 종방향 변위도 제한되기 때문에 지간 장이 짧고 상판 구조물은 큰 강성을 갖게 된다. 보통 경간구성을 볼 때 3@25 m나 2@40 m가 일반적이며, 이러한 형식으로 이루어진 1개소 교량의 연장은 수십 m에서 수 km에 이른다. 그동안 이러한 교량건설을 위하여 여러 공법이 적용되어 왔으며 경제성, 시공속도 그리고 형하공간이 무엇인가에 따라 그 공법이 결정되었다. 초기에는

MSS 공법이나 FSM 공법이 그 주류를 이루었으나 점차 다양한 건설공법들이 적용되었는데, 이는 국내 교량건설 발전에 크게 기여하고 있으며 시공 또는 설계의 교량기술자들에게도 훌륭한 참고가 되고 있다. 이러한 의미에서 본 글에서는 고속철도 교량건설 공법에 대하여 언급하고자 하며, 주로 8-2공구에 적용된 사례를 중심으로 간략하게 소개하고자 한다. 대우건설컨소시엄에 의해 시공되고 있는 경부고속철도 8-2공구는 MSS 공법 위주로 설계된 교량을 PSM공법으로 설계변경하였고, 김천 시가지를 통과함에 따라 도로, 철도, 하천 등 각종 지장물에 대한 효율적인 대안설계를 통하여 다양한 교량형식 및 건설공법이 적용되었기 때문이다.

### 2. PSM 공법

#### 2.1 개요 및 특성

PSM(Precast Span, Method) 공법은 공장에서 25 m

full span의 PC BOX를 생산, 특수 장비로 교각에 운반하여 거치하는 공법으로서 다음과 같은 특성을 지닌다.

■신속한 공정

한경간의 25 m PC BOX 상관을 3일에 하나씩 생산하여 거치하므로 MSS 교량공법과 비교할 때 약 6~7배 공기가 빠름.

■양호한 품질관리

공장내부에서 기계화된 시공이므로 최상의 품질확보가 가능함.

■경제성

제작장 건설, 특수장비 사용등으로 초기투자비가 크므로 적어도 3.0-4.0 km 이상에서 경제적임.

(8-2공구의 경우 약 7km 구간이 PSM 교량임)

■리스크 존재

교각 시공이 우선되어야 하며 교량중간에 타공법 교량이 미리 시공완료되어야 함. 또한 장비의 고장은 공정에 악영향을 주게됨.

2.2 생산

생산이 이루어지는 공장은 그림 1과 같은 구조로 구성된다.



그림 1 PC BOX 생산공장 구성도

생산과정은 크게 다음과 같이 분류된다.

① 철근작업

철근 cage를 만들어 타설장에 설치하고 기타 추가 철근작업 수행함(사진 1).

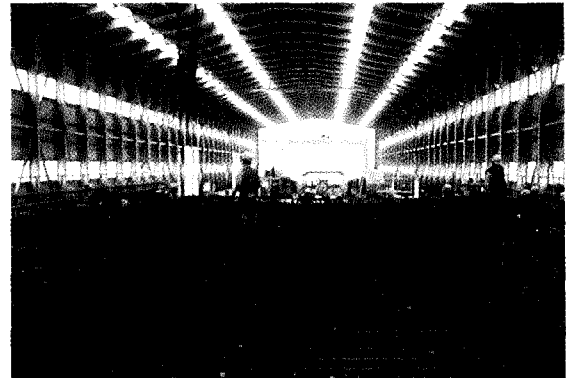


사진 1 슬라브 철근 작업

② Pre tensioning

유압 jack을 이용하여 벽체 및 바닥 슬라브에 설치된 강연선을 일시에 긴장함(사진 2). 각 강연선당 21.3 ton, 전체적으로는 20,000 ton의 인장하중임.

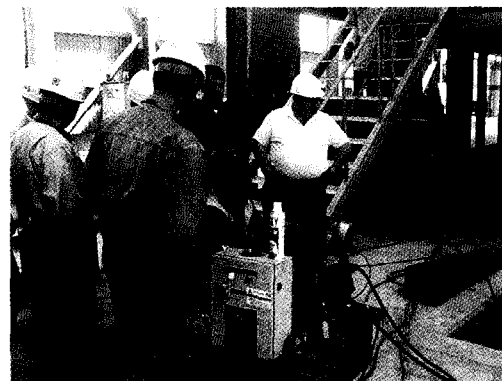


사진 2 Pre-Tensioning 위한 Jack 가동

③ 타설 및 양생

타설은 바닥부터 시작하여 벽체 슬라브 순이며 타설(사진 3) 후 12시간의 증기양생(사진 4)을 실시하고, 양생후에는 prestressing된 강연선을 양단에서 절단함(사진 5 및 그림 2).

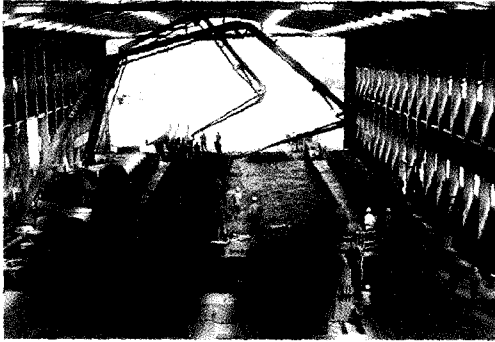


사진 3 콘크리트 타설

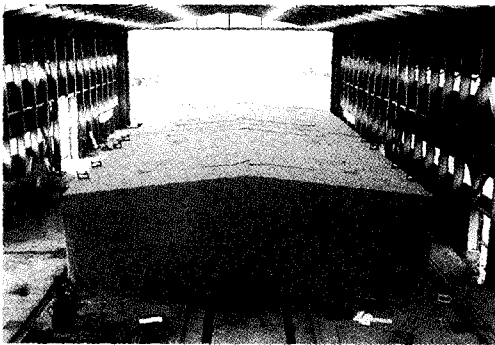


사진 4 양생

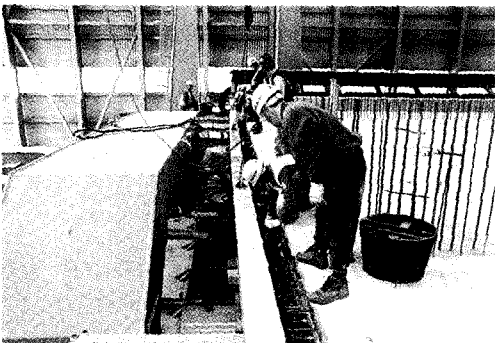


사진 5 Detensioning 후 절단

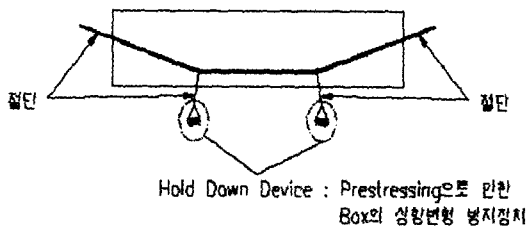


그림 2 프리스트레스된 강연선 절단

### 2.3 운반 및 거치

16개의 바퀴축으로 구성된 110 ton의 trailer를 통하여 공장으로부터 해당 교량으로 운반되며 해당 교각에서 launching 장비를 통하여 거치된다(사진 6, 7, 8).

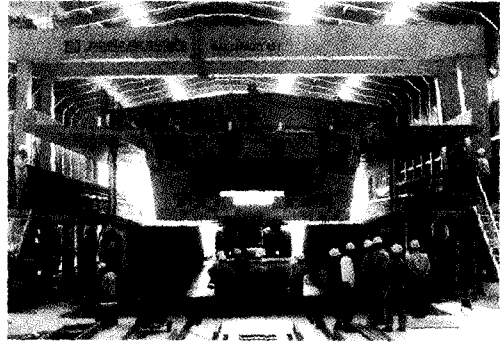


사진 6 Trailer에 lifting

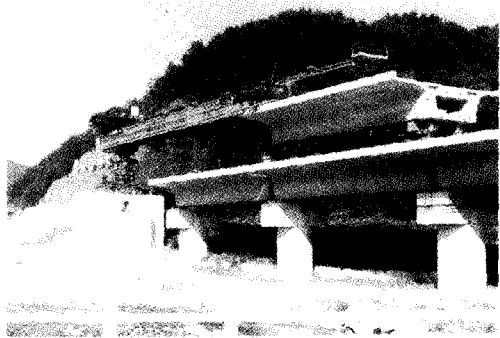


사진 7 운반

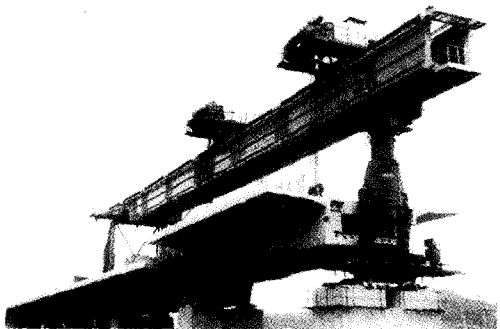
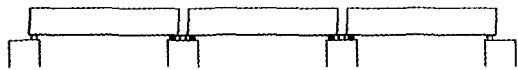


사진 8 거치

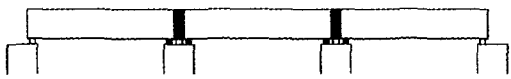
## 2.4 연속화 작업

거치후에는 2@25 또는 3@25로의 연속화 작업이 이루어진다.

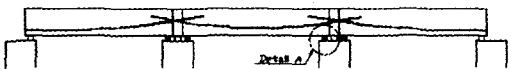
### ① PC Box 거치완료 상태



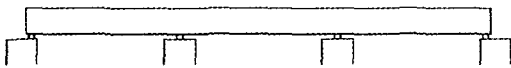
### ② Joint부 현장타설



### ③ Post-Tension 작업



### ④ 임시 받침 제거 및 영구받침으로 지지



## 3. 80 m 일체타설 MSS 공법

### 3.1 개요

MSS(Movable Scaffolding System) 공법은 현재 고속철도 교량건설에 가장 많이 사용하고 있는 공법으로 주로 2@40 m 경간에서 사용되고 있다. MSS 공법은 다양한 비계형식이 있으나 고속철도 교량에서는 거의 대부분이 하부 이동식 비계공법이다. 8·2공구는 감천 통과부인 모암고가 560 m 구간에 대해서 수리단면 확보를 위하여 PSM이 아닌 40 m 경간의 MSS로 계획하였다. MSS 공법 전후는 PSM 교량이어서 공정상 MSS 교량을 먼저 시공하게 되었다. 그러나 기존 2@40 MSS 공

법으로는 공기를 맞추기 어려워 이의 개선책을 강구하였는데, 80 m를 한꺼번에 타설하는 공법이 그것이다. 기존 공법의 상판은 48 m + 32 m 로 분리 타설하였는데 이는 매우 많은 작업공정이 소요되고 세심한 camber관리가 필요하였다(그림 3, 4, 5). 80 m를 한꺼번에 타설하는 장점은 공기를 줄일 수 있을 뿐만 아니라(기존 60일 → 40일) 지지거더의 개선으로 camber

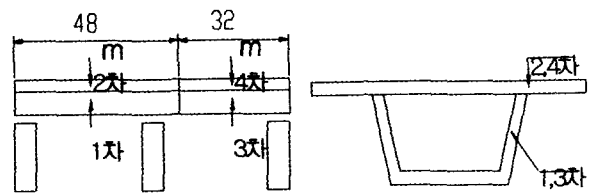


그림 3 기존 MSS 공법 타설 과정

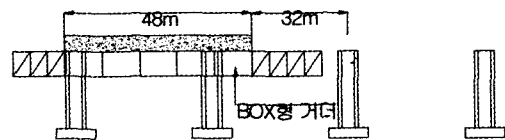


그림 4 기존 MSS의 Stage 1(48 m 타설)

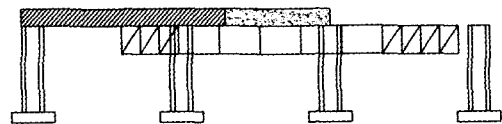


그림 5 기존 MSS의 Stage 2(이동후 32 m 타설)

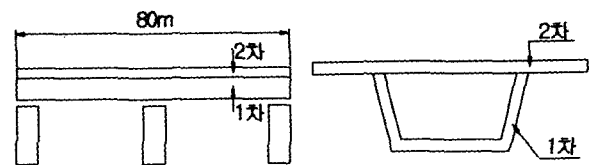


그림 6 신공법 MSS 타설 과정

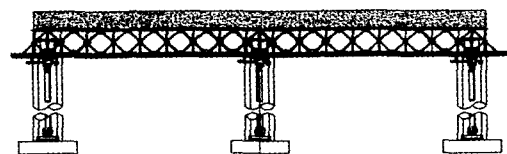


그림 7 신공법 MSS 교량 80 m 타설

관리가 불필요하다는 점이다(그림 6, 7).

### 3.2 지지 가설구조물

가설구조물은 상부 box의 form과 이를 지지하고 교각 앞으로 전진하는 주거더로 구분된다. 80 m를 일시 타설하는 계획에 따라 가설구조물이 새로 제작되었다(그림 8).

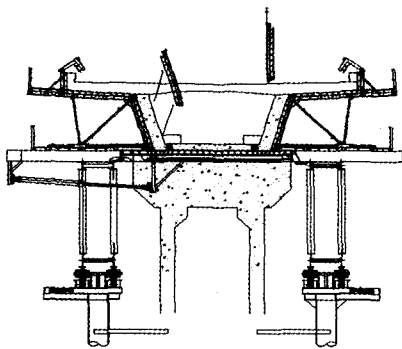


그림 8 신공법 가설구조물 단면도

이는 기존구조물과 비교하여 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 주거더는 truss형으로서 기존의 box형과 비교하여 가볍고 풍압을 적게 받는 유리한 구조형식이다. 둘째, 상판거푸집은 알루미늄 재질을 사용하여 역시 중량을 감소시켰다. 이로 인하여 전체 90 m길이의 truss형 거더 가설구조물의 상부 form은 110 ton, truss형 거더는 570 ton으로서 기존 구조물의 상부 form 200 ton, 거더 600 ton보다 연장이 큼에도 불구하고 오히려 가벼운 구조물로 제작할 수 있었다. 또한 충분한 강성을 갖도록 하여 처짐이 허용치 이내가 됨에 따라 camber 관리를 하지 않아도 되었다. 곡선구간 적용은 하부지지 truss 구조물이 교각좌우로 이동가능하므로 이를 조정하였고, truss와 중간 trussform에 의해 분리된 상부 form이 segment화되어 있으므로 이를 적정히 조정하므로써 가능하였다(사진 9). 또하나의 특성으로서 이동시 roller 구동방식을 채택한 것이다. 이 경우 자

중의 1%의 launching 하중이 필요하다. 10 % 자중의 launching 하중을 필요로 하는 기존의 pad 방식보다 유리하다 하겠다.



사진 9 신공법 MSS 장비 이동

## 4. FSM 공법

FSM(Full Staging Method) 공법은 동바리공법으로서 고속철도 교량공사에 MSS 공법과 더불어 많이 적용되었다. 본래 고속철도 FSM 교량 상판은 단순 동바리로서만 지지되는 경우로만 설계되었으나 실제로 도로, 철도 등 형하공간의 제약으로 인하여 동바리만의 지지로 시공하는 경우는 많지 않다. 8-2공구의 경우 FSM 교량은 PSM 및 MSS 적용이 곤란한 경우에 주로 적용되었다. PSM 적용이 곤란한 곳은 25 m 경간의 확보가 어려운 경우이고, MSS 적용이 어려운 곳은 장비의 해체 및 재조립으로 인하여 시간손실이 야기되는 구간과

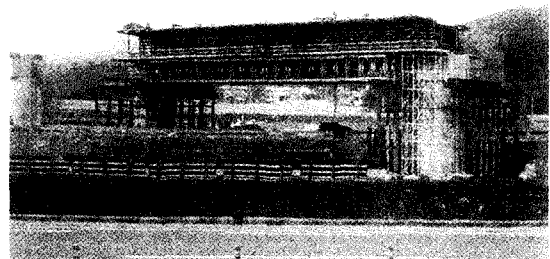


사진 10 1@40의 FSM 교량 시공

이동식 거더로 인한 형하공간 미확보 구간 등이다. 따라서 지지 가설구조물은 문형 구조물이며, 종방향 거더는 truss 형식 또는 beam 형식이 되었다(사진 10).

문형가설구조물은 동바리구조보다 강성이 약하여 상판 무게로 인한 처짐이 발생하므로 상판에 대한 camber control이 매우 중요하다. camber는 1차 타설된 U형 콘크리트 중량으로 인한 처짐으로부터 시작하여 가설구조물과 U형 콘크리트 강성의 합성 그리고 Post tensioning된 효과 등을 고려한 단계적인 처짐에 대한 검토가 고려되어야 한다. 그리고 최종 영구하중 단계에서 크립와 건조수축효과로 인한 처짐등을 고려하여 열차운행시 20 mm 이하로 처짐이 발생하도록 camber의 조정이 이루어져야 한다.

## 5. 2주형 강합성교 시공

### 5.1 개요

경부고속철도 교량구조는 대부분이 PC BOX 교량으로 건설되어 왔다. PC BOX는 프랑스 Systra에서 설계하였는데, 40 m 경간이 표준화되다시피 하여 그 이상의 경간이 필요한 곳도 굳이 40 m로 설계한 경우도 많았다. 이러한 교량의 형하공간은 도로 등이 통과하게 되는데 도로를 횡단하는 문형 라멘형식의 하부구조로 설계되어 있는 것이 특색이다. 8·2공구는 이러한 문형 라멘의 하부구조를 없애고 대신 50 m의 강합성교량으로 대체하였다. 이는 라멘구조에 교량받침을 둘 경우 강성이 다름에 따른 부등변위 문제 그리고 시공성 등에서 문제가 있었기 때문이었다. 이에 따라 1@50, 2@50, 1@35 등의 강합성교량이 적용되었다. 단면형식은 2주형(double I beam) 플레이트 거더 구조이다(그림 9).

최대 강재두께는 100 mm이며, 대부분 주요 부재에서 50 mm 이상의 극후판이 사용되었다. 이는 국내 교량에서 극후판 강재의 도입을 촉진시키는 계기가 되었는데,

이로 인하여 포스코에서는 극후판 강재의 재질향상을 도모하여 상용화하였으며, 고속철도 공단에서는 극후판 사용을 위한 제작시방서의 개정을 진행중에 있다.

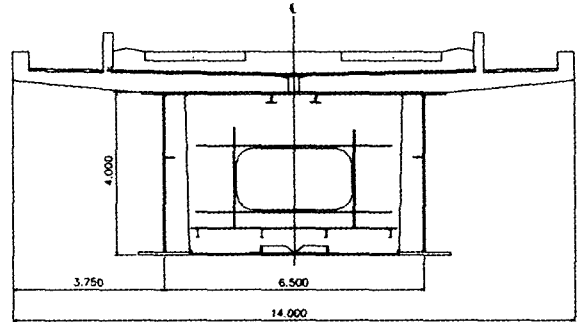


그림 9 2주형 강합성교 단면

### 5.2 강합성교의 시공

강재는 거의 SM520을 사용하였으며, Charpy Energy는  $-20^{\circ}$  에서 40 J 이상으로 규정하였다. 교량부재 제작은 우수한 용접장비 및 용접사들을 보유하고 있는 대우조선소에서 이루어졌다. 후판용접에 따른 최상의 품질확보가 중요한 만큼 저수소계 용접봉(ASTM 기준으로 8 mg/l 이하)을 사용하였으며, 공장에서는 용접방법으로 SAW(Submerged Arc Welding), 현장에서는 FCAW(Flux Cored Arc Welding)가 주로 수행되었다. 주형높이가 4.0 m이므로 운반이 문제가 되었는데, 거제 대우조선에서 마산까지는 해상의 바지선을 이용하였고, 마산에서 현장까지는 국도를 통하여 운반하였다. 각 주형의 연결은 볼트가 아닌 용접인데, 이것은 후판에 따른 볼트시공의 어려움도 있지만 용접이 보다 하중전달에 확실하고 유지관리에 유리하기 때문이다. 공장 및 현장에서의 용접검사는 초음파검사(UT) 및 자기탐상검사(MT)에 의해 시행되었으며 엄격한 품질관리하에 용접이 이루어졌다.

고려청자색의 도장은 상도 70~90  $\mu\text{m}$ , 중도 130~140  $\mu\text{m}$ , 하도 45  $\mu\text{m}$ 의 두께로 시행되었다. 현장에서의

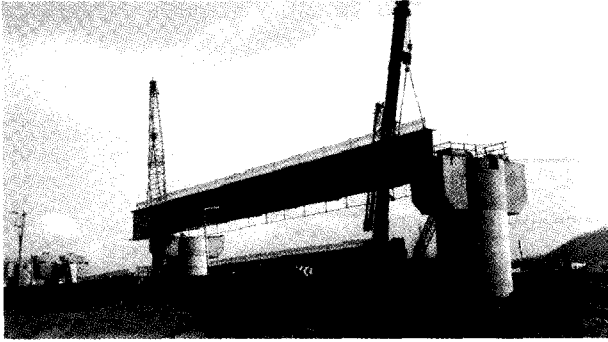


사진 11 강합성교의 주거더를 들어올리는 모습(2@50)

시공은 모두 들어올리기식으로 이루어졌다(사진 11). 각 주형을 개별적으로 교각에 거치하고 격벽을 연결한다음에 슬라브 타설 순으로 시공하였다(사진 12). 단, 1@35 구간은 경부선 철도교차 구간으로서 전체 강재중량이 170 ton인 바 지상에서 모두 조립한 다음 2대의 crane을 이용하여 일시에 들어올려 거치하였다.

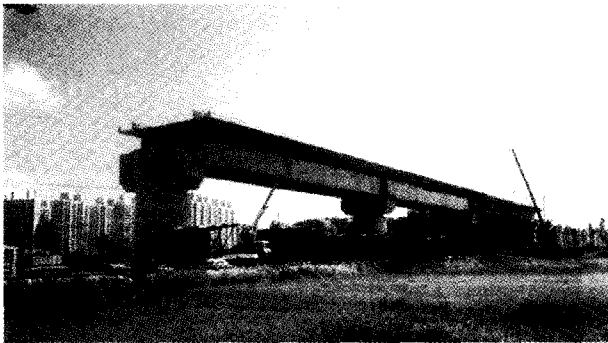


사진 12 시공된 강합성교(2@50)

## 6. 강아치교의 시공

### 6.1 적용 배경

8-2공구의 모암고가는 경부고속도로와 2개소에서 교차한다. 그중 20°로 교차되는 구간이 아치교 적용 구간인데, 이 구간의 당초 설계는, 앞절 강합성교에서 언급된 바와 같이, 문형 라멘형식(4개)의 하부구조 및 MSS공법의 상부구조로 되어 있었다(그림 10, 11).

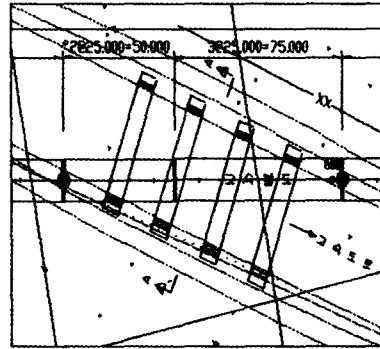


그림 10 기존설계의 평면도

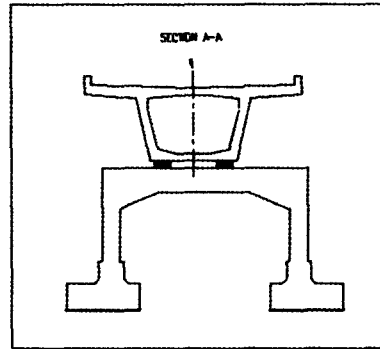


그림 11 기존설계의 교량 단면

당초 설계는 여러 가지 문제점을 제기하였는데, 가장 큰 문제는 시공성, 즉 교통통제없이 작업이 불가능하다는 점이였다. 따라서 라멘 구조형식을 없애고, 장경간의 대체교량을 검토하게 되었다. 대체교량으로서 70 m + 140 m + 70 m 3연속 경간의 FCM교량과 125 m 단순경간의 Bow String 형식의 아치교를 검토하였다.

보다 경제적인 점과 시공성을 감안하여 그림 12와 같은 아치교가 선정되었다.

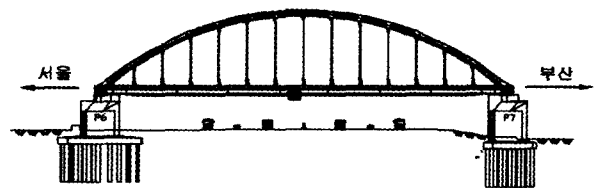


그림 12 아치교 단면

## 6.2 아치교 제작

철관 제작은 충북 진천에 소재한 대우건설 철구조사업소에서 수행되었다. 강합성교와 마찬가지로 50 mm 이상의 후판 강재가 많이 적용되었으며, 용접은 앞서 소개한 내용과 유사하다. 용접의 대부분을 차지하는 필렛용접의 목두께는 대부분 최소치인 7 mm인데 이것은 계산상 소요 용접치수에 근거하여 산정된 것으로 불필요한 용접을 지양하였다.

각 부재들은 welding shrinkage와 camber를 고려하여 제작되었으며, 또한 부재들의 정확한 치수관리를 위해 가조립을 실시하였다(사진 13). 아치부재는 지상에 놓혀 있는 상태로 검사하였다(사진 14). 또한 편의상 tie chord와 분리하여 가조립을 수행하였다. 그러나 아치부재와 tie chord 연결부는 실제형상으로 가조립을 실시하여 그 정확성을 검사하였다(사진 15).



사진 13 교량상판 가조립



사진 14 아치부재 가조립 검사

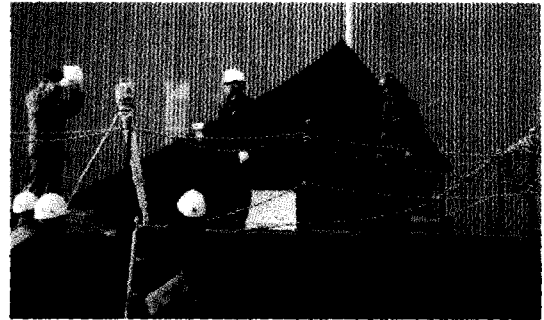


사진 15 아치 및 Tie chord 연결부 가조립 검사

## 6.3 회전공법에 의한 아치교의 시공

현장작업은 교각시공이 완료될쯤 tie chord를 지지할 가벤트 설치작업부터 시작하였다. 본 교량건설에 필요한 가벤트는 편의상 또는 시공 순서상 다음과 같이 구분하였다.

- stage 1 : tie chord 지지용 가설구조물
  - stage 2 : 아치지지용 가설구조물
  - stage 3 : 아치회전을 위한 고속도로 횡단 가설구조물
- 시공법에 대한 설명은 다음과 같다(그림 13, 14).
- stage 1위에 교각 6번(서울방향쪽)과 연결된 아치교를 고속도로 외부를 따라 고속도로와 나란하게 시공한다. 이때 아치부재는 stage 2를 통하여 지지된다(사진 16).
  - 아치교 시공과정 동안 stage 3가 시공된다. stage 3 가설구조물은 truss형식으로서 stage 1 끝단에서 고

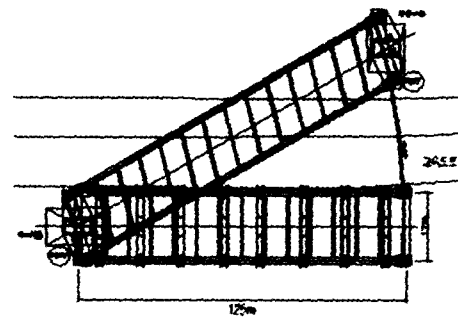


그림 13 회전에 의한 거치 평면도



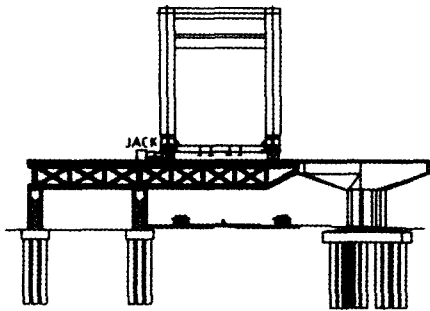


그림 14 회전에 의한 거치 단면도

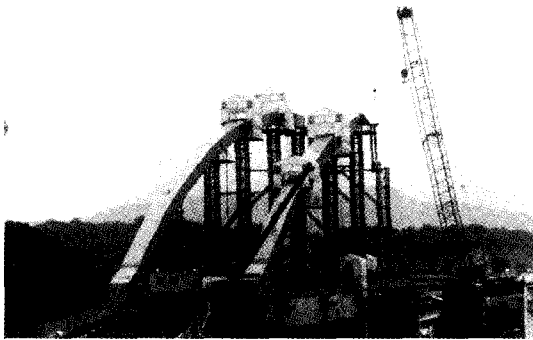


사진 16 아치교 건설

속도로 상공으로 횡단되어 교각 7번과 연결된다.

- 아치교 건설이 완료되면 stage 1 및 stage 2를 제거한다.
- 교각 6번을 회전축으로 원호를 그리듯 아치교를 회전하여 고속도로 건너편 교각 7번에 거치한다. 회전은 가설 truss상부표면에 설치된 레일과 교량 하부 pad의 접촉면이 외부의 밀어내는 하중에 따라 미끄러지면서 이루어진다(사진 17).

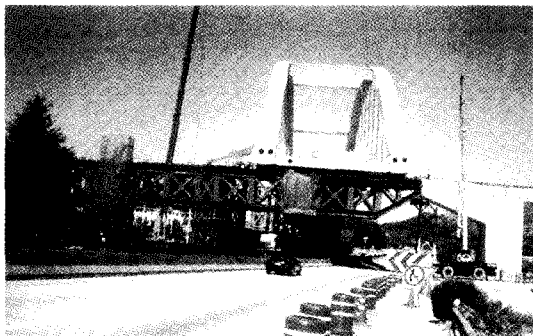


사진 17 아치교 회전

본 교량은 세계적 규모의 TGV 고속철도 교량으로서 자연친화적 교량으로 평가되고 있다. 무엇보다 교통의 흐름에 방해를 주지않는 공법으로서 의미를 가지며, 국내에서 첫 시도된 신공법이라 하겠다.

## 7. 트러스교의 시공

모암고가의 경부고속도로 교차구간중 45°로 교차되는 구간은 당초 설계가 아치교 경우와 같이 문형 라멘형식(2개)의 하부구조이었다. 그러나, 아치교와 같은 사유로 대체교량을 적용하게 되었다. 대체교량으로서 65 m 트러스교로서 당초 하로교로 계획되었으나 강제중량의 절감을 위하여 상로형으로 변경되었다(그림 15). 이는 하로형에 비해 15-20% 정도의 강제 절감 효과가 있는 것으로 평가되었기 때문이다. 전체 강제중량은 450 ton이며, 고속도로임을 감안하여 제작된

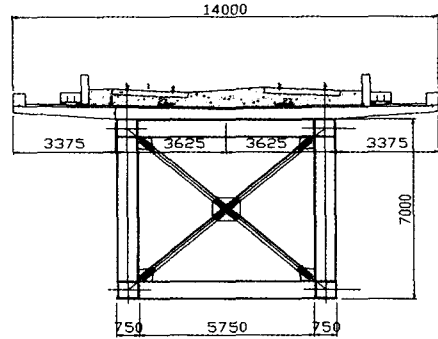


그림 15 트러스교 단면

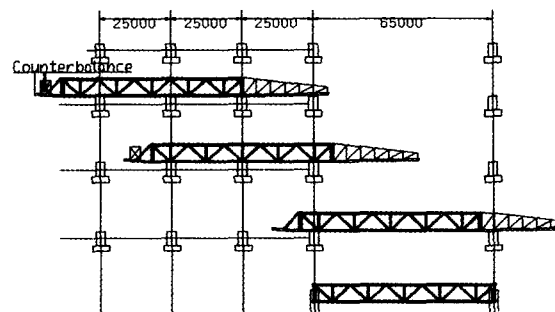


그림 16 트러스교 시공과정

truss교를 후방에서 밀어내는 공법을 채택하여 현재 시공중에 있다(그림 16).

## 8. 맺음말

지금까지 고속철도 교량 건설공법에 대하여 8-2공구에 적용된 사례를 중심으로 간략하게 언급하였다. 8-2공구는 국내에 적용되었던 고속철도 교량 건설공법중 FCM 시공법을 제외하고는 모두 적용되었고, 공법개선을 통해 Value Engineering의 효과를 기한 대표적인 현장이다. 다양한 공법속에 그리고 엄격한 품질관리체계하에 고속철도공사에서 축적된 교량건설기술은 향후 국내외의 교량건설에 유익하게 이용될 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. 8-2공구 PSM 공법 소개(토목학회지, 2000. 6)
2. Design and construction of the first Steel and Composite bridges for the Seoul-Busan High Speed Rail Project(ICSCS01 학술발표대회 논문집, 2001.06)
3. 한국 고속철도 교량의 강합성교 적용 사례(철도학회, 2001 춘계학술대회 논문집)