

## 인천국제공항 여객터미널 전면고가교량 설계



정재동\*



이종신\*\*

### 1. 서 언

고가교량은 인천국제공항을 대표적으로 상징하는 여객터미널과 복합교통센터의 중간에 위치하여 이들 건축물을 통과하는 입·출국 여객의 쾌적한 통행조건을 제공하고 원활한 물류수송기능을 확보하며 지하 구조물 및 여객터미널의 복합교통센터 진입로와의 간섭을 최소화하는데 목적을 두고 설계가 수행되었다. 특히 주변 건축물과의 미적조화를 감안하여 기본 설계시 미관설계

를 수행하여 고가교량의 기능성 외에 상징성을 부여하여 인천국제공항 구조물의 전체적인 조화를 이룰 수 있도록 고려하였다.

### 2. 고가교량 개요

고가교량은 크게 여객터미널의 출발층에 연결되는 폭 35.25m의 본선부 교량(L=585m), 본선부에 접속하기 위한 접속부 교량(L=830m), 접속부 BOX 구조물(L=208m), 복합교통센터로부

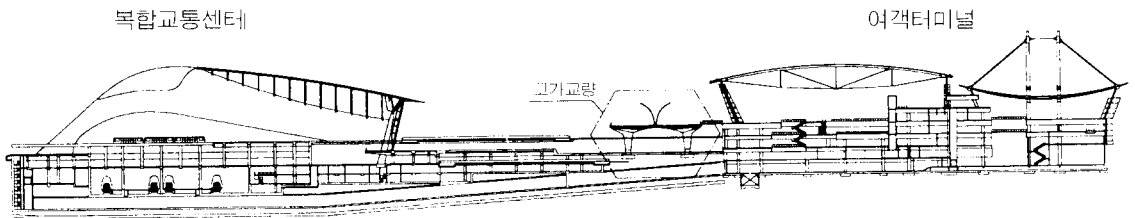


그림 1 고가교량 위치도

\* 정회원·(주)서영기술단 이사, 토목구조 기술사  
 \*\* (주)서영기술단, 과장

· 고가교량의 미관설계는 건축회사인 영국의 TFP사가 수행하였다.

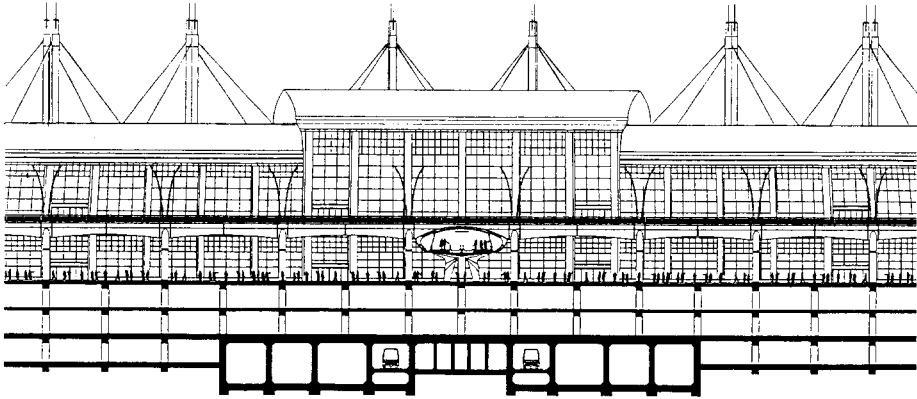


그림 2 가교량 종단면도

터 고가교량에 접속하기 위한 램프교량(L=212m)로 구성되어 있어 전체적으로 교량 1733m, 박스 구조물 208m로 구성되어 있다.

**2.1 본선부 교량**

- 교 형 : 이방향 P.S.C 슬래브교
- 교 폭 : B=35.25m
- 주경간 : L=5@21.5=107.5m

**2.2 접속부 교량**

- 교 형 : R.C 슬래브교
- 교 폭 : B=8.5m
- 주경간 : L=3@15.0=45.0m

**2.3 램프 교량**

- 교 형 : P.S.C 슬래브교
- 교 폭 : B=6.5m
- 주경간 : L=4@28.0=112.0m

**2.4 기초 형식**

- 강관말뚝기초 : 609, t=12mm

**3. 미관설계**

여객터미널과 복합교통센터와의 조화 및 현대성을 가미한 능동적인 형식에 중점을 두고 미관

설계를 추진하였으며 또한 구조적 타당성을 포함한 효과적인 구조물 설계 및 유지보수, 사용자의 편의성을 고려함과 동시에 외국 공항의 고가교량 자료와 기타 고가교량의 자료를 수집·분석하여 그 결과를 본 과업에 적극 활용하고자 하였다.

미관설계시 우선적으로 고가교량과 관련된 교하 지상·지하 구조물의 제원을 파악하여 효율적인 지간구성과 함께, 주변 건축구조물과의 조화를 위해 고가교량을 콘크리트 구조물로 설계함을 원칙으로 하여 구조물 완공후의 질감, 균열 억제 등을 감안한 부대설계 및 구조설계를 고려하여 미관설계를 추진하였다.

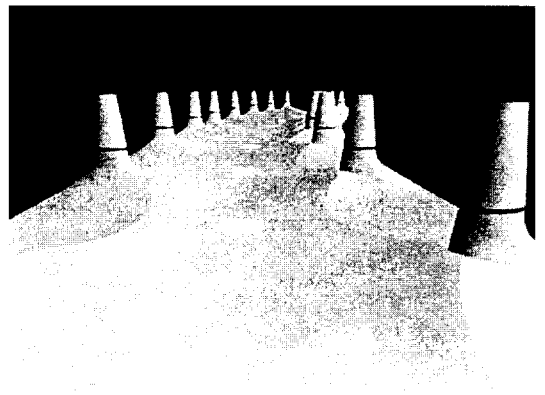


그림 3 본선부 교량의 3D 모델 1

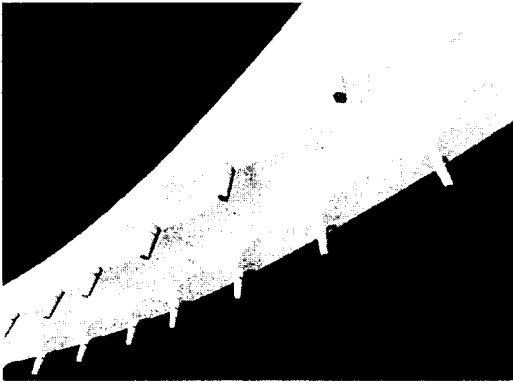


그림 4 본선부 교량의 3D 모델 2

#### 4. 본선부 교량의 구조설계

##### 4.1 구조계획

본선부 교량의 교하도로와의 건축한계 확보 및 교하도로 주행시 이용자의 쾌적성을 고려 교축방향 지간이 21.5m, 교축직각방향 지간이 20.5m에 해당하는 이방향 플레이트 슬래브교로 구조계획을 수행하였으며 교하도로의 조건에 의해 비대칭 구조물로 교량단면이 계획되었다.

지간구성에 의해, 또한 콘크리트 구조물의 균열 억제를 감안하여 이방향 P.S.C 슬래브교로서 구조형식을 선정하였으며, 구조물 해석시 shell 요소를 사용한 FEM 해석을 수행하였으나 교량의 하면단면변화가 양방향 아치형태로서 비교적 복잡하게 구성된바 단면강성산정 및 구체사하중, 프리스트레스의 등가하중 산정의 타당성 검증에 위해 솔리드(solid) 해석을 통한 대체계산을 수행토록 하였다. 또한 구조물의 단면이 2.8m 0.75m로 다양하게 변화하는 바, 수화열 해석을 통해 적절한 수화열 제어방안을 강구하였다.

광폭의 교량이며 또한 지간구성에 비해 구체사하중이 다소 큰 점을 감안하고 연약 지반상에 가설되는 점에 따른 가설 동바리 계획과 콘크리트 타설시 교하면의 질감 확보 및 미관 설계시 고려된 양방향 아치형태의 면 구성을 감안한 거푸집 설계 역시 중점적으로 고려된 사항이었다.

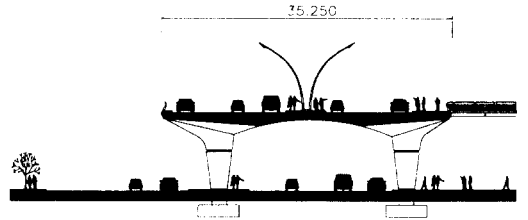


그림 5 본선부 교량의 횡단면도

##### 4.2 모델링

구조물의 거동이 지간구성에 의해 양방향 거동을 하며, 또한 모델에 프리스트레스의 등가하중 산정을 위하여 shell 요소를 사용한 FEM 모델을 구성하였다.

구조물의 단면특성상 구체 사하중이 구조물에 미치는 영향이 기타하중에 비해 지배적이므로, 단면변화가 심한 고가교량의 경우 사하중 재하와 단면의 강성산정을 위해 self weight 기능을 사용하여 해석하였다. 또한 부가사하중, 보도하중, 차륜·차선 하중(DB-24, DL-24) 등은 일반적인 해석프로그램의 경우 절점 또는 요소에 적용되어야 하나, 이를 감안하여 요소구성을 한 모델링은 실질적으로 모사하기가 매우 곤란하다.

구조물 해석시 이러한 점을 감안, 단면의 강성변화를 비교적 쉽게, 그리고 절점 또는 요소에 하중을 재하하지 않아도 절점하중으로 치환할 수 있는 선처리기능(pre-processing)과 해석결과 검

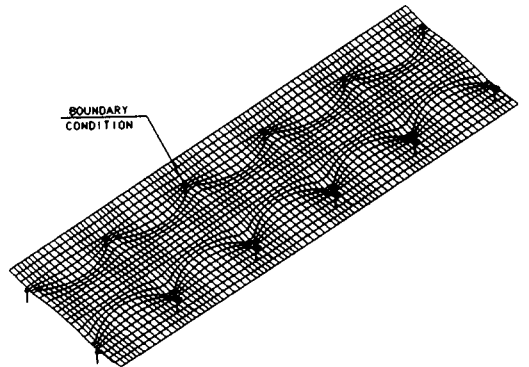


그림 6 판해석 모델링

토시 단면 slice에 의한 graph 처리기능 등을 보유한 후처리기능(post-processing) 등을 감안하여 해석프로그램(LUSAS)를 선정하였다.

모델링 시에는 단면도심을 따라 shell 요소를 구성하였으며, 요소별로 각 절점에서의 강성을 해석 프로그램의 선처리 기능을 활용하여 2차원 또는 3차원의 Linear, Quadratic 또는 Cubic 등의 함수를 이용하면서 구성하였다.

구조물의 특성상 구조물의 자중(self weight)이 부가사하중 및 활하중에 비해 지배적일 것으로 고려하여 구조물 자중에 의한 해석을 우선 수행하여 적절한 텐던 profile을 구성토록 하였다.

### 4.3 텐던 profile의 구성

구체 사하중 해석결과 일반적인 플랫 슬래브와 달리 양방향 아치형태에 의한 단면강성과 연속시간인 점에 의해 교축방향의 응력은 비교적 강성이 큰 교각으로부터 아치형태의 축을 따라 거더 교량과 유사한 결과가 나타났으며 교축직각방향으로는 시간 중앙부에서 거의 균일한 응력분포가 나타났다. 즉, 지점부 주위의 국부적인 영역에서의 주응력 백타가 사각의 형태로 나타날뿐 교축, 교축직각방향으로 각각의 거동이 비교적 명확하게 드러났다.

따라서 교축방향의 텐던은 양방향 아치정부를 기준으로 배치하였다. 텐던 profile은 연속교의 형태를 감안 비교적 곡선 배치함이 구조적으로

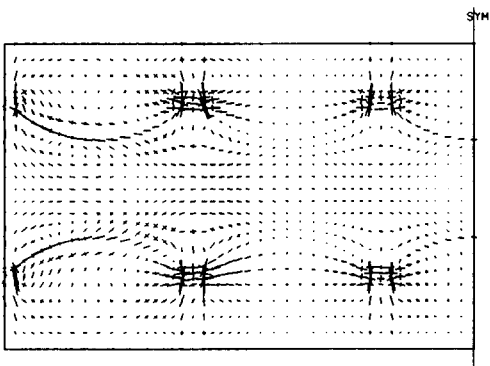


그림 7 구체사하중 해석에 대한 주응력 벡터(Vector)

유리하나, 교량단부에서 도심을 축으로하여 배치할 경우 시간 중앙부에서 곡률배치가 단면변화로 인해 어렵고 교축직각방향 텐던과의 간섭과, 시공시 교하면의 양방향 아치형태에 곡선배치를 할 경우 텐던 배치가 매우 복잡한 점 등을 감안하고 또한 교량의 교축방향 단면 자체가 곡선인 점을 고려하여 직선배치를 하였다.

교축직각방향의 텐던은 지점부 영역에서 비교적 큰 정·부 모멘트의 발생으로 인해 지점부 주위에 비교적 집중된 텐던 배치를 수행하였으며 켈틸레버부 영역에서는 단면도심을 따르도록 하여 텐던 profile을 구성하였다.

프리스트레스의 효과를 구조물에 적용하기 위해 등가하중법을 사용하였으며 교축방향 텐던의 등가하중은 텐던의 직선배치로 인해 정착구 위치에서 집중하중으로 처리하였으며 교축직각방향 텐던의 등가하중은 단면변화와 텐던 profile의 변화가 함께 있는 영역으로 단면을 도심축으로 직선배치한 후 편심, 단면-텐던 곡률을 고려 등가하중을 산정하였으며 이러한 해석결과의 검증을 위해 solid 요소를 사용하여 해석결과를 상호 비교검토 하였다.

· 텐던제원

- 사용 P.S 강재 : KSD 7002, SWPC 7B- $\phi$  12.7mm
- 항복강도 :  $\sigma_{py} = 160\text{kg/mm}^2$
- 인장강도 :  $\sigma_{pu} = 190\text{kg/mm}^2$
- 단 면 적 :  $A_p = 98.71\text{mm}^2/\text{strand}$
- 사용텐던 : 0.5-31EA
- 긴장력 :  $\sigma_{pi} = 0.75\sigma_{pu}$



그림 8 교축방향 텐던의 직선배치

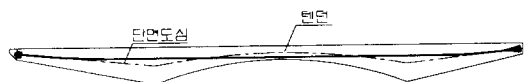


그림 9 교축직각방향 텐던의 배치

#### 4.4 솔리드 해석

shell 해석의 적용시 단면의 강성산정의 정확도와 program의 self weight 기능을 사용함에 따른 구조물의 구체 사하중 해석의 정확성 및 프리스트레스의 등가하중 치환의 타당성 여부를 검증하기 위해 솔리드(solid) 해석을 수행하였다. 솔리드 해석시 교축직각방향 텐션의 프리스트레스 효과는 3D-BAR 요소를 활용하여 프리스트레스 힘을 온도하중으로 치환하여서 고려하였다.

해석결과 구체자중은 shell 해석 결과와 비교시 각각의 해석결과 반력차가 최대 0.76%로서 유사한 결과가 나오에 따라 shell 해석시 적용한 구조물 강성이 비교적 정확하게 산정되었음을 검증하였으며 사하중, 프리스트레스 작용에 따른 각각의 해석결과 응력의 분포와 크기 역시 비교

적 유사하게 나타났다.

단, shell 해석 결과 지점부에서 응력집중이 크게 나타났으나 솔리드 해석시에는 완화된 응력이 산출된 바 이를 토대로 shell 해석 결과의 응력 집중현상을 설계시 적절히 판단하여 고려하였다.

#### 4.5 부가사하중 및 활하중 재하

부가 사하중 및 활하중의 재하시 절점 또는 요소하중으로 재하하기 위해서는 차륜하중, 차선하중 등의 위치를 미리 감안한 모델링이 선행되어야 하나 실질적으로 다양한 하중변화를 감안할 때 이러한 모델링은 현실적으로 모사하기가 어려운 점을 감안 해석프로그램 내의 선처리 기능을 활용하여 임의 위치에서 재하될때 절점하중으로 치환토록 모사하였다.

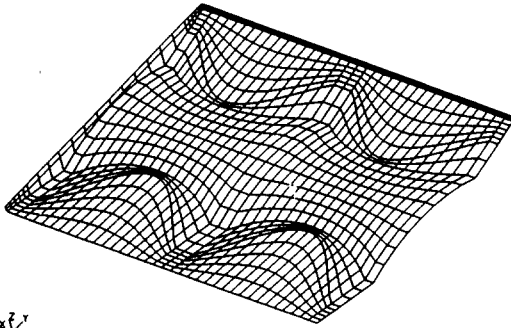


그림 10 솔리드 모델링

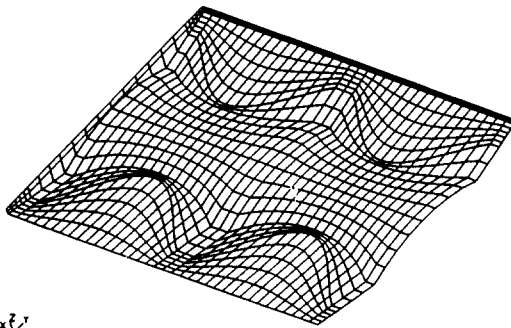


그림 11 솔리드 모델링에서 P.S 효과를 고려하기 위한 Bar 요소의 도입

#### 4.6 해석결과

정적해석결과는 작용하중상태에 따라 사용하중 상태에서 각각 다음의 4단계에 걸쳐 응력검토를 수행하였다.

- 1) 구체사하중+P.S(즉시손실후)
- 2) 총사하중+P.S(장기손실후)
- 3) 총사하중+활하중+P.S(장기손실후)
- 4) 총사하중+활하중+온도변화+P.S(장기손실후)

휨응력 검토결과는 각각의 하중조합에 따라 부재위치별로 교축·교축직각방향을 해석프로그램

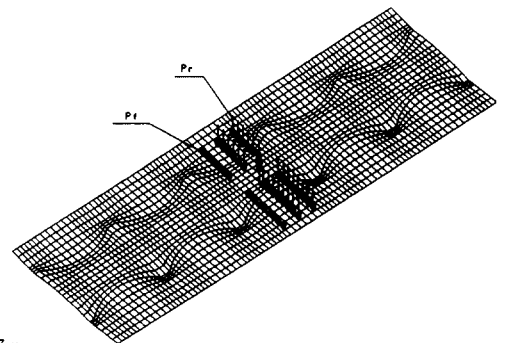


그림 12 차선하중(DB-24)의 재하

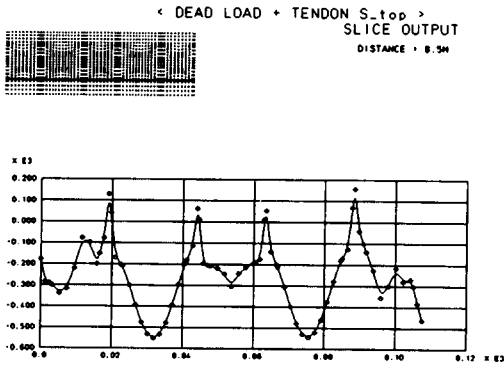


그림 13 Slice graph output

의 후처리 기능중 slice graph를 사용하여 부재 전위치에 대해 상·하면의 휨 압축·인장 응력 초과 여부를 검토하였다.

또한 강도검토를 통해 구조물의 극한하중상태에서의 안전도를 확보하였으며, 파괴시 연성확보를 위해 도로교 표준시방서의 최대, 최소강재비 검토를 수행하였다.

해석결과 휨 응력은 각각의 하중상태에서 허용 응력을 만족하고 휨, 전단강도 역시 극한하중 상태에서 충분한 안전도를 확보하는 것으로 나타났으나, 지점부(단면높이 H=2.8m) 부위에서 최소 강재비를 만족하지 못하는 것으로 나타나, 구조물의 연성확보를 위해 지점부 부위에서 추가로 텐던을 배치하여 재해석을 수행하였다.

#### 4.7 내진설계

구조물의 자체중량이 비교적 크나(자중에 의한 지점 최대반력  $R_{max} \approx 1830\text{ton}$ ) 교하도로의 통행차량 및 보행자 등이 중압감을 느끼지 않고 대형구조물을 지지할 수 있는 최소한의 단면으로 하부구조를 계획하여야 하므로 일반적인 내진설계의 수행이 불가한 바, 면진교좌장지(LRB)를 사용하여교량하부로 전달되는 지진력을 분산시키고 더불어 기초(말뚝기초)의 크기도 상시하중에 의해 결정될 수 있도록 고려하였다.

또한 면진교좌장지(LRB)의 사용에 따른 비선형 특성을 고려한 해석을 수행하였다.

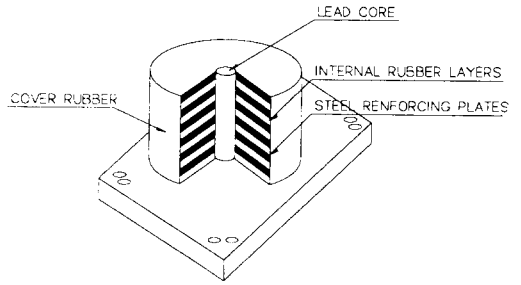


그림 14 면진교좌장지(LRB) 상세도

#### 4.8 수화열 해석

매스콘크리트는 일반적으로 토목 구조물에서는 부재 최소치수가 1.0m이상인 경우를 말하며 고가교량의 경우 부재의 두께가 0.75~2.8m이므로 콘크리트 구조물이 소요의 품질과 기능을 만족할 수 있도록 시멘트의 수화열에 의한 온도응력 및 온도균열에 대한 검토를 수행코자 수화열 해석을 수행하였다.

본 구조물의 수화열 해석은 온도균열지수에 근거를 둔 방법으로 평가하도록 하고 이를 위해 3차원 유한요소 온도해석을 수행하였다. 일반적으로 매스콘크리트 내에서의 온도응력은 구축정도에 따라서 크게 차이가 나며 내부구속일 경우 콘크리트 재령 약 3~5일에 콘크리트 표면에 균열이 발생하며, 외부 구속일 경우에는 재령 14일 이후에 관통균열이 발생하는 것으로 알려져 있다.

해석결과 고가교량은 외부구속이 강한 것으로 나타나 재령 14일 이후에 균열이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났으며 콘크리트 내부의 최대온도는 재령 2일에서 88℃까지 올라가는 것으로 나타났으며, 콘크리트 재령 21일에서 온도균열지수는 0.58이하, 균열 발생확률은 93%이상인 것으로 나타났다.

따라서 파이프-쿨링(Pipe-Cooling)을 통하여 수화열의 영향이 최소가 되도록 설계에 고려하였다.

#### 4.9 거푸집 및 동바리 계획

교량하면 모양이 복잡한 양방향 아치구조로 구성된 바 미관설계시 제시된 형상구현과 우수한

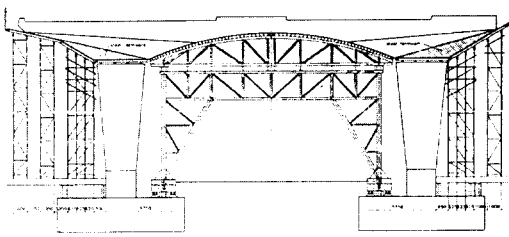


그림 15 동바리 계획

질감형성을 위해 특수형태의 거푸집 설계를 수행하였으며 연약지반상에 가설되는 구조로서 조립·해체를 최소화하고 시공 공기단축을 위해 교각 footing을 활용하여 동바리를 moving system으로 설계하였다. 따라서 상부구조물의 가설은 M.S.S 공법을 채택하여 경간별 시공을 하도록 고려하였다.

또한 동바리 설계는 가설시 동바리 처짐이 최소가 될 수 있도록 고려하여 시공시 캠버관리 등이 용이하도록 하였다.

## 5. 맺음말

본 고가교량은 인천국제공항의 대표적 구조물인 여객터미널과 복합교통센터와의 조화를 위해 미관설계에 따른 기본설계를 수행한 뒤 구조설계를 수행하여 기존의 교량과는 비교적 차별화된 접근을 고려하였다.

그러나, 98년 12월 현재 하부구조(교각) 시공 중인 고가교량은 본선부 교량 상부 구조물 시공시 실제 고려된 미관설계의 형태와 질감이 드러나도록 함은 일반 구조물에 비해 다소 고려할 사항이 많을 것으로 사료되며 또한 매스콘크리트로서의 수화열, 건조수축 등에 의한 균열제어를 위해 품질관리 등에 많은 노력이 경주되어야 할 것은 사실인 것 같다.

끝으로, 이러한 설계 경험과 시공 및 감리 경험을 토대로하여 교량계획시 보다 미적으로 우수하고 구조적으로 안정감 있는 교량설계로의 일부 진보된 노력의 계기가 될 것으로 믿는다. 