

곡선교차로상의 P.C.T 거더교 설계사례

Design Example of P.C.T Girder Bridge in the Curved Ramps



김씨동*
See-Dong Kim



고상윤**
Sang-Yoon Ko

1. 개 요

최근 들어 교차로의 설계를 함에 있어 교통흐름을 원활하게 하기 위하여 입체교차로로 계획하고 있으며, 미관과 경제성을 고려하여 다양한 형식의 교량이 설계 및 시공되고 있다.

인주산단교는 충남 아산시 아산만 방조제 인근에 조성된 인주지방산업단지로의 원활한 물동량 수송을 위하여 2006년 아산에서 기본 설계 대안형식으로 발주한 사업내의 교량으로서 총연장 $L = 45 + 55 + 45 = 145$ m의 3경간 연속교이며(그림 1), 인주지방 산업단지 진입램프교로서 산업단지의 랜드마크(land mark) 기능성을 부여하고, Open Web Truss의 개방형 단면으로 구조 안정성이 우수하고 유지관리가 양호한 복합트러스 거더교로 계획하였다(그림 2).

인주산단교는 기본설계가 곡선반경 60m의 강합성 상형교로 계획되었으나, 대안설계 발주 취지에 맞추어 주행성 및 안정성을 확보하기 위해 곡선반경을 확대($R = 100$ m)하여 차량 주행

성을 향상시키고 교량 폭원을 증대하여 도로 기능성 향상, 교차로 주행안정성 및 구조물의 안정성을 확보하도록 계획하였다.

2. P.C.T 거더교 선정배경

P.C.T(prestressed composite truss) 거더는 프리스트레스를 도입한 콘크리트 하현재, 강관 또는 압연형강으로 만들어진 복부재 및 강-콘크리트 합성부재로 형성되는 상현재로 구성되는 프리스트레스트 복합 트러스 거더로서 신개념의 하이브리드(hybrid) 구조체이다.

〈그림 3〉과 같은 곡선교에서 P.C.T 거더교가 강합성상형교 및 PSC 박스교에 비교하여 유리한 점을 정리해 보면,

- 1) 거더 복부를 트러스 구조로 치환하여 장경간화에 따른 거더 자중으로 인한 단면력의 증가를 크게 경감시켜 단면감소 및 장경간화가 가능하여 미관이 수려한 교량설계가 가능하다.

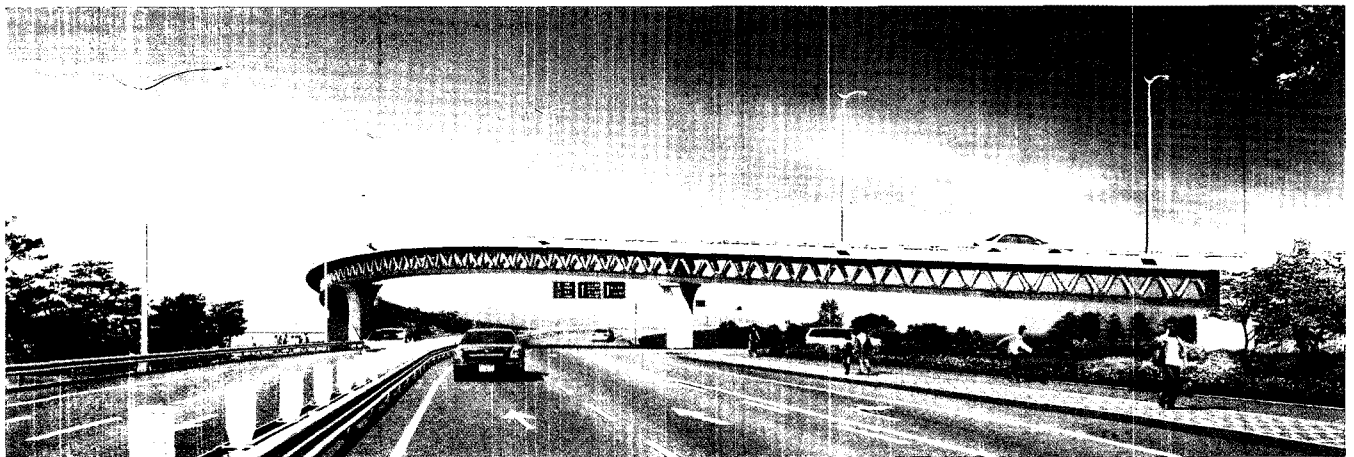


그림 1. 인주산단교

* 정회원, (주)동일기술공사 구조부 상무
praha7777@daum.net

** (주)동일기술공사 구조부 과장

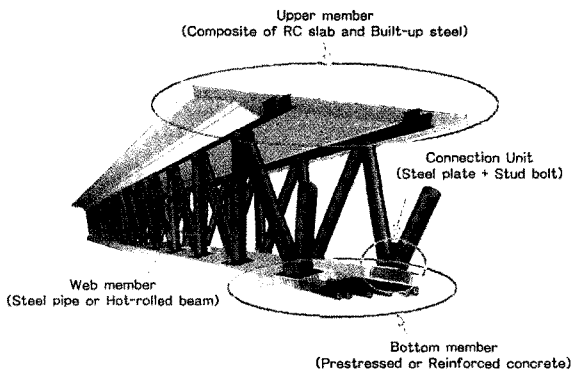


그림 2. P.C.T 거더교 개요도

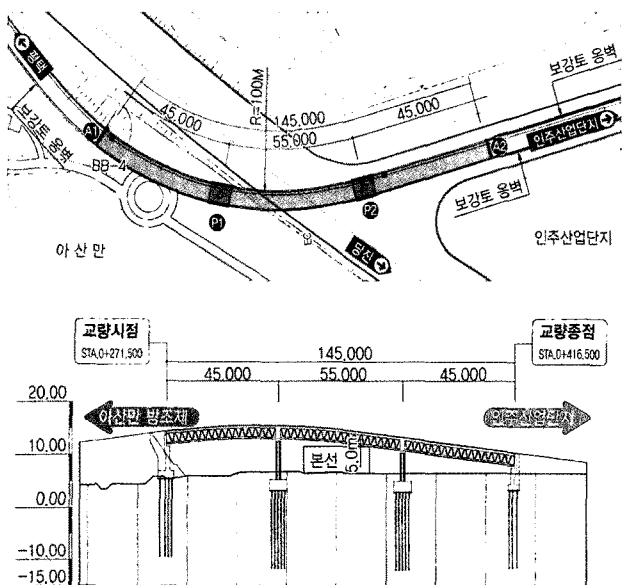


그림 3. 인주산단교의 평면도 및 종단면도

- 2) 부재 요소간의 상호 구속 작용으로 인한 압축응력 손실을 크게 줄일 수 있어, 사용 중 균열 발생문제를 줄일 수 있으며, 하현재에 높은 수준의 압축 응력을 도입할 수 있어 큰 비용 없이도 극한하중상태까지의 안전성의 확보가 가능하다.
- 3) 상현재에 합성 구조를 적용함으로써 트러스 복부재의 경사각을 황금비율에 가까운 60°로 제작할 수 있어 미관을 크게 향상시킬 수 있고, 별도의 PS강재 배치 없이도 중간 지점부에서의 거더를 구조적으로 연속하는 것이 가능하다(강합성 상형교와 동일한 설계개념의 적용).
- 4) 각 부재요소의 분리제작을 통해 평면 및 종단상으로 임의의 곡선형상을 갖는 부재의 제작이 가능하고 제품의 표준화가 용이하며, 공장 제작을 통한 품질향상 및 제작 단가 절감을 기대 할 수 있다.
- 5) 산간지역 또는 하천통과구간의 경우 ILM, MSS, FCM 등 기존 모든 가설공법이 가능하므로 적용성이 우수하고 급속시공이 가능하며, 가설시의 거더 자중을 크게 경감시

켜 가설장비 비용을 크게 절감할 수 있다.

- 6) 공장제품과 동일한 조건으로 거더를 제작할 수 있어 품질관리 용이하고, 제작장의 재사용으로 공기단축이 가능하다.

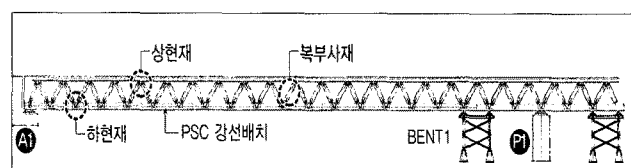
따라서, P.C.T 거더교는 트러스 구조로 인하여 경간장이 늘어나도 고정하중의 증가가 적어 장경간 교량에 대한 적용성이 우수하며, 외국의 경우 복합트러스 거더에 적용된 경간장은 주로 70 m ~ 90 m이고, 최근에는 100 m 이상의 장경간 교량에 적용되고 있다.

3. 인주산단교의 구조 안정성 확보

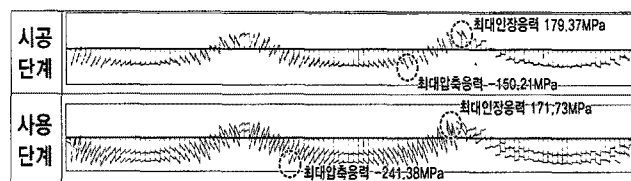
3.1 시공단계를 고려한 설계

인주산단교의 구조해석은 P.C.T 거더교량의 특성에 따라 강과 콘크리트 복합재료를 각각 구조부재로서 모델링하여 수행하였으며, 사용하중 재하 시 뿐만 아니라 시공단계에 따른 구조부재의 시간 의존적 재료특성 및 구조거동을 고려하여 해석을 수행하였다.

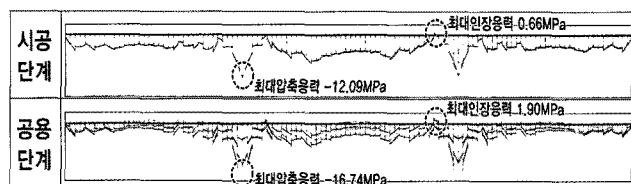
각각의 해석단계에 따른 응력검토 위치 및 검토단계를 개략적으로 나타내면 <그림 4>와 같으며, 시공단계 및 사용하중 재하시에 대하여 상현재, 하현재 및 복부사재 모두 허용응력 이내의 응력을 나타내어 구조 안정성을 확보하였다.



(a) 응력검토위치



(b) 상형 강재 발생응력(SM 570)



(c) 하형 콘크리트재 발생응력(fck = 45 MPa)

그림 4. 인주산단교 단계별 응력검토

3.2 곡선교를 고려한 설계

3.2.1 가설중 인양 및 전도 안전성 검토

1) 검토목적

복합트러스거더 교량인 인주산단교는 지상에서 38.75~42.50 m 길이로 세그먼트(segment)를 조립 후, 크레인에 의하여 교대 및 가설벤트 상에 인양 거치하게 된다. 이때 구조물은 상부 바닥판이 타설되기 전으로 비합성 단면 상태에 있게 되며, 또한 해석대상 교량인 인주산단교는 곡선반경 $R = 100.0$ m의 곡선교량으로 거더 자중에 의하여 세그먼트에 비틀림이 발생하게 된다. 인주산단교의 세그먼트 지상조립 및 가설벤트 상에 인양 거치하는 가설단계를 <표 1>에 나타내었으며, 가설 단계별 해석은 지상 조립된 세그먼트의 크레인 인양 시 구조안정성 및 부재 발생응력의 검토를 수행하고, 가설벤트 거치시의 복합트러스거더의 전도 안정성에 대하여 검토하였다.

2) 크레인 인양 시 구조 안정성 해석

3경간 연속거더교 중 평면곡선선형의 영향이 가장 크다고 판단되는 첫 번째 경간에 대하여 <그림 5>와 같은 3차원 모델로서 해석을 수행하였으며, 해석결과 하현 콘크리트의 인장응력과 상현재 및 복부사재의 최대 발생응력이 <그림 6>과 같이 모두 허용치 이내로 나타났다.

3) 가설 중 전도 안정성 해석

전도 안정성에 대한 검토는 첫 번째 경간에 대하여 해석을 수행하였으며, 해석결과 부반력이 발생하지 않는 것으로 나타났다(<그림 7>).

4) 검토결과

① 복합트러스거더 세그먼트의 인양 시 각 부재에 발생하는 인장응력 및 압축응력 모두 허용응력 이내로 구조적으로 문제없다고 판단되며, 본 해석에서 선정된 케이블 지지 위치는 케이블에 압축력이 발생되지 않는 적정 위치로서 크레인 인양 시 곡선 거더교의 구조안정성을 확보하였다.

② PLATE 해석과 FRAME 해석 검토결과, 복합트러스 거더 세그먼트의 인양 거치 후 시점측 교대 및 가설벤트 받침에 모두 부반력이 발생하지 않으므로 구조물에 전도의 위험은 없는 것으로 판단되었다.

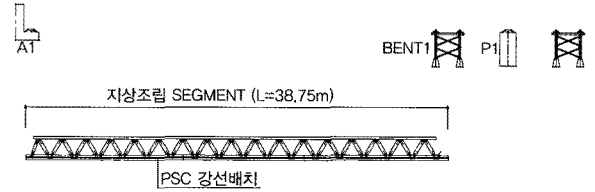
3.2.2 바닥판 타설시 좌굴안전성 검토

1) 검토목적

인주산단교 복합트러스거더 교량은 세그먼트 연결 후 바닥판 콘크리트가 합성되기 전까지 거더 단면은 <그림 8>

표 1. 인주산단교의 가설단계

- 세그먼트(segment) 지상조립
 - 12.50 ~ 15.00 m 길이의 세그먼트를 경간별로 3개씩 1차 PS긴장에 의하여 지상에서 조립



- 세그먼트(segment) 인양거치
 - 지상조립된 38.75 ~ 42.50 m의 세그먼트를 크레인에 의하여 교대 및 가설벤트 상에 인양거치

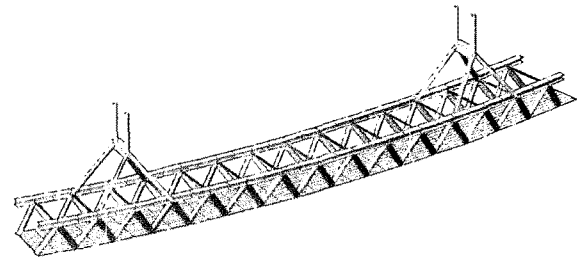
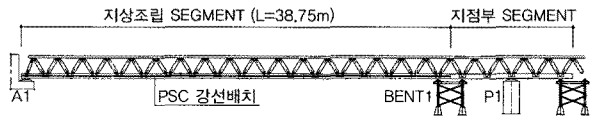


그림 5. 인양 안정성 검토에 대한 해석 모형

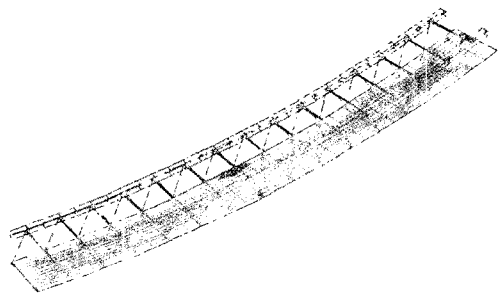


그림 6. 인양시 하현 콘크리트 최대 인장응력 분포

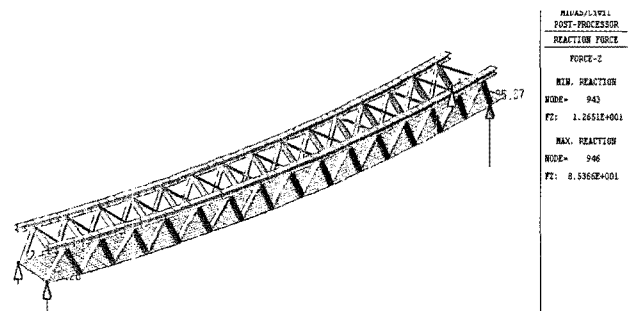


그림 7. 전도 안정성 해석 결과

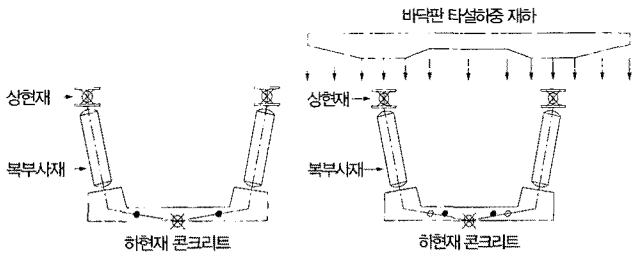


그림 8. 복합트러스 거더 교량의 비합성 단면 형상

과 같은 비합성 상태에 있게 되며, 단면의 상부는 상현재와 브레이싱에 의하여 격자 형태로 지지되게 된다. 바닥판 콘크리트 합성후 상현재가 콘크리트 속에 매립되면 상현재 및 브레이싱 부재의 좌굴은 콘크리트에 의하여 구속되므로, 합성단면을 구성하기 전까지의 시공단계에 대하여 상현재 및 브레이싱에 대하여 좌굴검토를 수행하였고 복합트러스거더의 구조안정성을 검토하였다.

2) 좌굴 안정성 해석

인주산단교의 좌굴해석은 지상조립된 세그먼트의 인양기 치후의 첫 번째 경간에 대한 안정성 검토와 바닥판 타설 시의 안정성 검토로 2개의 서로 다른 시공조건을 고려하여 수행되었으며, 바닥판 타설 시의 안정성 검토는 각 경간별로 바닥판 타설에 대한 좌굴검토를 수행하였다.

3) 검토 결과

- ① 지상조립 세그먼트의 가설벤트 거치후의 좌굴검토 결과 임계하중에 대한 안전율은 36.312로 좌굴안정성을 확보하였다.
- ② 모든 세그먼트의 연결 후 바닥판 타설 하중 재하시의 좌굴검토는 제1경간의 바닥판 타설을 먼저 수행하는 경우가 안전율이 가장 낮았으나 그 값은 18.733으로 좌굴에 대하여 안정성을 확보하였다. 또한, 교량전체에 대하여 바닥판 타설 하중을 재하하는 경우의 좌굴 안전율도 <표 2>와 같이 제1경간 중앙부가 가장 낮은 값을 나타냈으며, 안전율 23.454로 시공 중 좌굴에 대한 안정성도 충분히 확보하였다.

3.2.3 좌·우측 편차응력을 고려한 격점 응력집중 검토

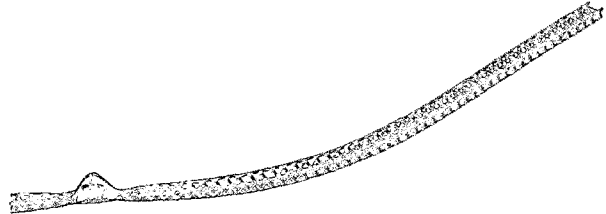
1) 검토목적

복합트러스 거더교는 복부사재가 상부와 하부의 콘크리트 부재와 연결되어 합성단면으로 거동하게 되며, 이때 콘크리트와 강재의 연결은 구멍강판 + 철근매입의 형태로 연결되게 된다. 복부사재는 바닥판에 재하되는 하중을 하부 콘크리트로 전달하게 되며 이에 따라 비교적 큰 축력을 받게 된다. 또한 인주산단교는 곡선교로서 비틀림 발생에

표 2. 전교량 바닥판 타설 하중 동시 재하 시 좌굴검토

구분	MODE 1	MODE 2	MODE 3
임계하중	241.201 tf/m	242.126 tf/m	250.148 tf/m
작용하중	10.284 tf/m	10.284 tf/m	10.284 tf/m
안전율	23.454	23.544	24.324

MODE - SHAPE 1



의한 영향으로 좌우측 사재의 응력에 편차가 발생하여 직교량인 경우에 비하여 보다 큰 응력이 상하부 격점부에 발생하게 되어 FEM해석을 통하여 복부사재 및 보강판에 대한 응력집중을 검토하였다.

2) 해석내용

인주산단교의 복부사재 중 최대축력을 지지하는 1번 교각 지점부 위치의 복부사재와 보강판에 대하여 구조해석을 수행하였으며 작용하중은 인주산단교 본 설계시 설계된 활하중 재하시 최대 축력을 재하하였다.

해석결과는 상하현 격점부에 응력집중에 의하여 발생되며 <표 3, 4>와 같이 최대 주응력 및 최소 주응력은 모두 허용응력 이내로 나타났다.

3) 검토결과

상하현 격점부 검토결과 복부사재와 보강판이 접히는 부위

표 3. 상현 격점부 응력집중 해석 결과

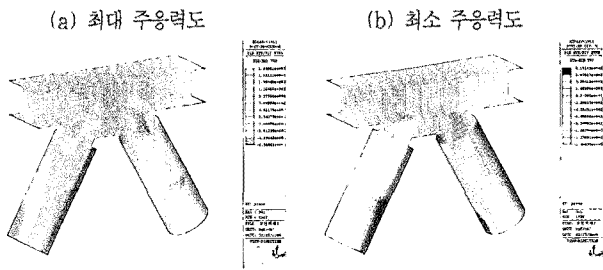
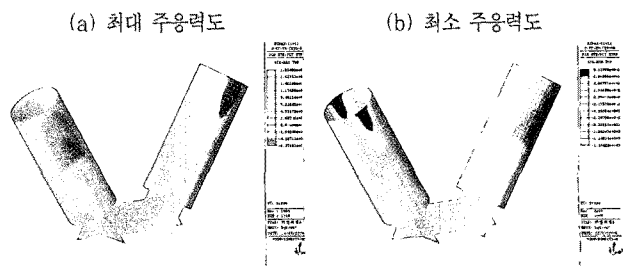


표 4. 하현 격점부 응력집중 해석 결과



에 응력집중이 발생하였으나 보강판의 허용응력 이내의 값을 보였으며, 복부사제의 축응력 및 전단응력 모두 허용응력 이내의 값을 보여 격점부의 응력집중에 대한 구조안정성을 확보하였다.

3.3 해양환경을 고려한 설계

인주산단교는 서해안에 위치한 교량으로 내륙지방에 가설되는 교량에 비하여 특수한 환경에 놓이게 된다. 또한 최근 교량의 가용 수명이 증대함에 따라 100년 이상 내구연한의 확보 및 교량 내구성에 대한 중요도가 높아지고 있다. 이에 따라 인주산단교 설계 시 해양환경을 고려하여 내구성 확보를 위한 방안으로 염분 침투 해석 및 내풍 계를 수행하였다.

3.3.1 염화물 침투 해석

1) 염분 침투 해석 목적 및 염해 대책

염해 침투해석은 설계 성능 저하요인인 염화물에 대하여 피복두께, 콘크리트 재료, 배합 및 방청방식 방법을 체계적으로 정하여 목표내구수명 기간 내에 허용할 수 있는 성능 저하 상태를 넘지 않도록 하는 것을 목표로 한다. 따라서, 염해에 대한 콘크리트 설계 피복두께는 목표수명에 따라 결정되고, 이에 검증은 일반적으로 염해에 대한 내구성 설계 방법으로 사용되고 있는 Fick의 확산법칙을 적용하였으며, 확산계수 D, 콘크리트 표면 염소 이온량 CD는 구조물 위치 실태조사 또는 신뢰할 수 있는 자료를 근거로 하여 설계하여야 한다.

100년의 내구 수명과 염해 저항성이 우수하도록 적정 대책을 설계 반영하였다.

2) 해석내용

① 배합 조건

구분	상부 슬래브			
	350			
fck(kgf/cm ²)				
CASE	1	2	3	4
배합조건	OPC	FA	SGC	3성분
W/C(%)	45	43	42	40
F/A(%)	0	20	0	20
SG'(%)	0	0	50	30
D28(e-12, m ² /s)	10.5	9.38	8.87	7.94

CASE 1 : OPC
 CASE 2 : OPC+F/A
 CASE 3 : OPC+SGC
 CASE 4 : OPC+F/A+SGC

● OPC : 일반 포틀랜드 시멘트
 ● F/A : 혼화재료 (플라이 애쉬)
 ● SGC : 고로 슬래브 분말
 ● 3성분 : 3성분계 시멘트

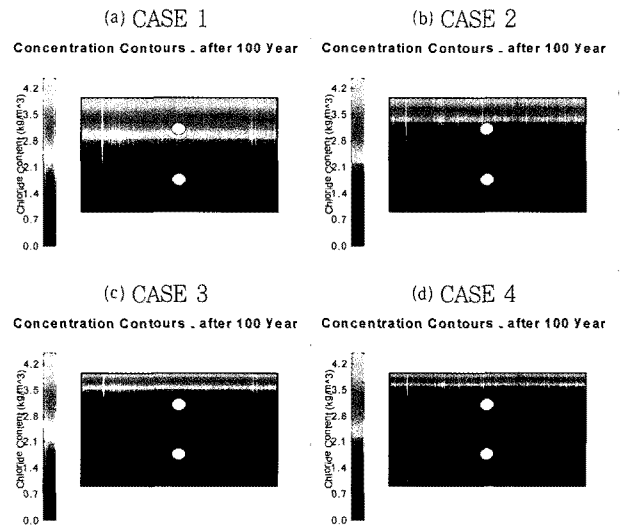
콘크리트 배합 조건에 따라 보통 포틀랜드 시멘트, 플라이애쉬 및 고로슬래그 분말 혼합의 2성분계 배합과 3성분계 배합 구분에 대한 CASE별 침투 해석을 수행하여 목표 내구연한에 적합한 배합기준을 선정하였다

② 환경 및 입지조건

제원 및 조건	상부슬래브
목표 내구수명	100년
환경 및 입지조건	해안 0.1 km 이내
순피복 (mm)	60.5
구조물 두께(mm)	270
최대 표면 염소이온농도(kgf/cm ³)	4.5
염소이온 농도 제한(kgf/cm ³)	1.2

③ 염화물 농도 침투 분포 현황

표 5. 목표내구수명 100년시의 배합별 염화물 침투 현황



④ 해석결과

해석결과 인주산단교 상부구조 설계피복 60.5mm에 대한 내구수명은 배합 Case 4(포틀랜드 시멘트+플라이애쉬+고로슬래그)에서만 121.6년으로 목표내구수명 100년을 만족하는 것으로 나타났다.

3) 검토결과

구분	목표	예측	판정	설계	소요	판정
	내구연한 (years)	내구연한 (years)		피복두께 (mm)	피복두께 (mm)	
CASE 1	100	14.6	NG	60.5	164	NG
CASE 2	100	37.5	NG	60.5	95	NG
CASE 3	100	82.8	NG	60.5	65	NG
CASE 4	100	121.6	OK	60.5	55	OK

해양 환경하에 건설되는 콘크리트 구조물은 사용시멘트의 내해수성은 시멘트 배합의 종류에 따라 차이가 있으며 염해침투 해석결과, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 것에 비하여 고로슬래그 미분말 또는 플라이애쉬를 혼입한 경우가 염화물 이온 확산 억제에 우수한 효과가 있는 것으로 검토되었다.

교량의 상부구조는 3성분계 시멘트(포틀랜드 시멘트, 고로슬래그 미분말, 플라이애쉬) 배합을 적용하여 목표 내구수명인 100년 이상의 내구수명을 확보하였다.

3.3.2 내풍 안정성 검토

1) 해석 목적

내풍 안정성 해석의 목적은 동적 내풍 안정성의 필요성을 검토하고 주형단면에 대한 CFD 해석을 통하여 주위의 기류의 양상 및 공기압분포 등을 파악하고 와류방출주파수 등을 산출하여 교량의 내풍 안정성을 확보하는데 있다.

2) 해석 내용

CFD(computational fluid dynamics)모델을 사용하여 교량의 내풍 안정성을 분석하였으며 2차원 단면 교량모델에 대한 기류의 양상을 파악하여 교량의 내풍 안정성을 검토하는 것을 목적으로 CFD 수치해석을 수행하였다(그림 9). 기류의 해석조건은 비정상, 비압축성기류, 일정물성치의 특성을 갖는 유동으로 가정하였다. 지배방정식으로는 비압축성 유동에 대한 연속방정식과 운동방정식(navier-stokes 방정식)을 사용하였으며, 수치해석 시 적용한 경계조건과 물성치는 다음과 같다.

- 유동입구 : $U = 10 \text{ m/s}$ (균등 층류)
- 유동출구 : 압력 일정조건
- 상 하 면 : 미끄러짐 속도조건(slip condition)
- 교량벽면 : 점착조건(no slip condition)
- 대상유체 : 공기(밀도= 1.225 kg/m^3
점도 = $1.7894 \times 10^{-05} \text{ kg/m-s}$)
- 수치모델 : STV_Flow

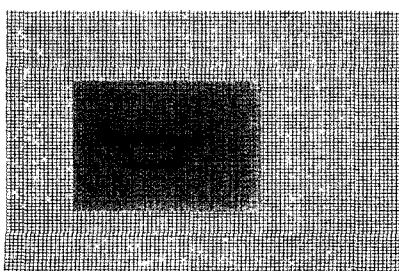


그림 9. 인주산단교 2차원 단면과 모델링 격자

난류모델로는 Smagorinsky가 제안한 LES(large eddy simulation)를 적용했다. 교량 모서리 각 부위에서 다양한 형태로 와류가 방출되기 때문에 접근류의 유동조건이 일정한 경우에도 풍력은 복잡하게 진동하며, 이러한 동적 특성을 분석하기 위해서는 난류의 시간별 변동을 추적할 수 있는 LES모델이 적합하다. 또한 LES모델은 RAM에 비해서 교량단면과 같은 유선변화가 급격한 물체주변에서 난류 유동장을 더 정확하게 계산한다.

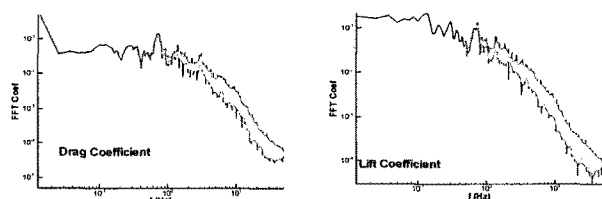
① 와류진동의 주파수 분석

2차원 교량단면의 항력 및 양력계수의 각 주파수 성분을 분석한 결과 전후의 모서리에서 발생하는 다양한 와류방출과 방출조건이 비선형적 변동으로 인해 복잡한 주기의 진동현상이 나타나지만, 항력계수의 신호에는 비교적 현저하게 우세 주파수가 나타난다. 본 해석에서는 1.4초 주기마다 평균 1개씩 큰 와류가 방출되었다(그림 10).

② 압력 분포

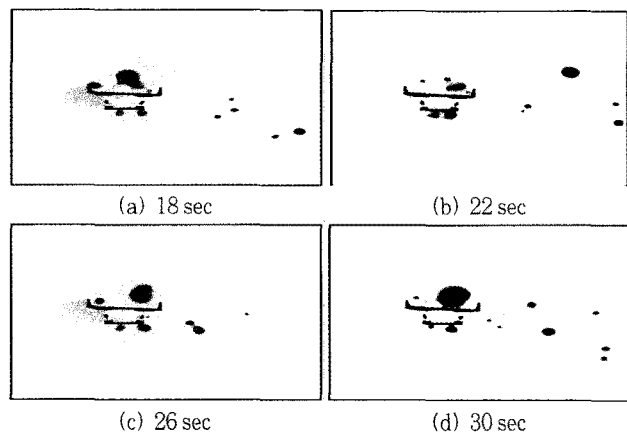
시간별 압력장의 순차적 변화를 살펴보면 와류(압력이 낮은 부분으로 그림에서 청색으로 표시)가 교량 단면의 풍상측 상단과 하단의 모서리에서 생성되어 유동의 흐름을 따라 이동하여 대체로 일정한 간격으로 방출되었다(그림 11).

③ 와도(vorticity) 및 속도 분포



(a) 항력 (b) 양력

그림 10. 단면의 풍력 주파수 해석결과



(a) 18 sec (b) 22 sec (c) 26 sec (d) 30 sec

그림 11. 시간 순차별 순간 압력분포의 변화

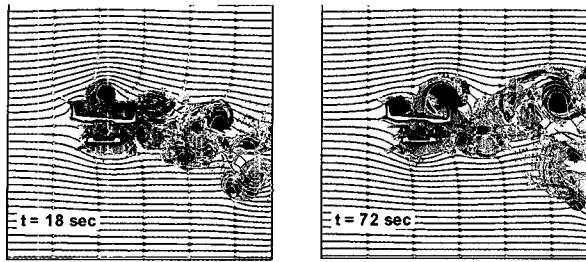


그림 12. 와도분포와 유선: 와도와 유선을 중첩하여 표시

정상상태의 순간 와도(vorticity) 분포를 <그림 12>와 같이 교량 상단과 하단에서 생성된 음과 양의 와도는 등 근형태의 와류(vortex)를 형성하여 후류로 방출되었다. 교량주변의 속도벡터는 <그림 13>과 같으며 교량단면의 후류지역에서 소용돌이 형태의 회전운동, 와류가 뚜렷이 나타났다.

3) 검토 결과

- ① 교량의 2차원 단면 모델에 대하여 수평풍하중 받는 경우의 비정상 유동장을 수치 해석하였다. Navier-Stokes 방정식과 LES 난류모델을 사용한 결과, 유동의 불안정성에 기인한 와류방출(vortex shedding) 현상이 발생했다.
- ② 항력에 대한 FFT주파수 분석결과, 0.73 Hz에서 가장 높은 신호가 나타났다. 이 주파수를 기준으로 와류방출의 무차원 특성치인 Strouhal 수를 계산하면 약 0.27에 해당된다.
- ③ 시간평균 항력계수(drag coefficient)는 약 1.84이며, 시간평균 양력계수(lift coefficient)는 약 0.16인 것으로 나타났으며, 양력계수의 시간별 변동은 항력계수와 유사했다.
- ④ 항력(drag force) 및 양력(lift force)은 평균치를 중심으로 다소 복잡하지만 일정한 주기로 규칙성 있게 진동한다. 복잡한 형태의 진동이 나타나는 것은 각 모서리에서 발생하는 다양한 주기의 와류방출로 인해 양력 및 항력이 영향을 받기 때문이다.
- ⑤ 전체교량(2차원단면 기준)의 항력 및 양력 특성에 가장 민감한 영향을 미치는 것은 풍상측 교량 하단의 모서리와 교량상단의 형상, 그 중에서도 교량 상단의 모서리 형상이었다.

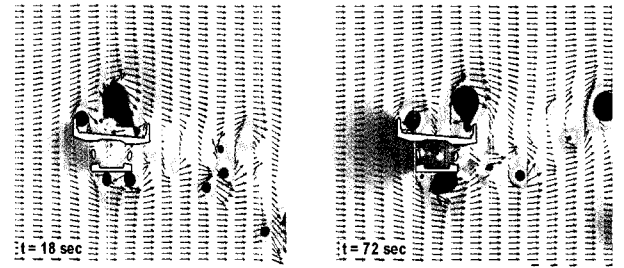


그림 13. 속도장과 압력장: 압력과 속도벡터를 중첩하여 표시

4. 맺음말

인주산단교는 산업단지로 진입하는 산업단지의 관문성 부여 및 해안교량의 구조 안정성을 고려하여 OPEN WEB TRUSS 단면의 신개념 복합 구조형식의 P.C.T 거더교로 계획하였다.

인주산단교는 2006년 충청남도 아산시에서 기본설계 대안으로 발주하여 (주)태영에서 실시, 설계 적격자로 선정되어 현재 시공 중에 있으며, 국내 최초로 곡선반경 $R = 100\text{ m}$ 에 적용된 3경간 연속 P.C.T 거더 교량으로서 2009년에 완공되어 아산시와 평택시, 당진군을 연결하는 국가 중요 산업도로로서 국가 산업발전에 이바지 할 것으로 기대하며, 새로운 교량형식의 설계 및 시공을 통하여 교량 기술 발전에 일익이 되기를 기대한다. □

참고문헌

1. 건설교통부, 도로교설계기준, 2005.
2. 건설교통부, 도로설계편람, 2001.
3. 한국건설기술연구소, PSC 박스 거더교 설계 선진화를 통한 물량 절감, 품질향상 방안수립 연구보고서, 2004.
4. 한국콘크리트학회, 콘크리트설계기준, 2003.
5. 인주지방산업단지 해안진입도로 개설공사 종합보고서, 2006.
6. 강제트러스 합성거더교 적용성 검토, 한국도로공사설계처, 2005.