

# 모듈러교량용 절곡형 강재 거더

## Folded Steel Plate Girder for Modular Bridge



조 광 일\*



박 찬 희\*\*



이 필 구\*\*



정 은 진\*\*\*

\* (주)포스코 철강솔루션센터 책임연구원  
 \*\* (주)포스코 철강솔루션센터 전문연구원  
 \*\*\* (주)포스코 철강솔루션센터 연구원

### 1. 개 요

2010년 발생한 서울외곽순환고속도로 부천고가교 화재 사고로 이 구간을 통과하는 일평균 23만대의 차량의 정체와 통행 제한이 예상되었다. 다행히, 한국도로공사의 빠른 결단력과 관련 기관들의 협력 하에 당초 4개월의 공사기간을 1개월 단축하여 교통정체 기간을 조기에 해소하였다. 또한, 화재 지점 전 후로 고가도로 진출입로가 있어 외곽순환도로 전체 교통흐름에 미치는 영향을 최소화할 수 있었다. 이와 같이 재해/재난 발생 시 복구 기간의 단축은 직접적인 경제적 효과뿐만 아니라 간접적인 사회비용 및 환경영향 감소에 큰 역할을 한다. 전 세계적으로 손상교량의 조기 복구, 증가하는 노후교량의 교체와 도심지 교량 건설까지 교량의 단기 건설에 대한 관심이 높아지고 있는 실정이다. 교량 교체 수요의 증가, 도심지 교량 시공 등으로 인한 교통 정체 및 통행권 제한은 단순한 불편함으로 여겨지는 국민의 삶의 질 저하만이 아닌 경제적, 사회적 그리고 환경적 손실을 야기할 수 있다. 이에 교량의 총 사업기간(발주 ~ 완공 시간)을 최소화할 수 있는 강재 모듈러교량 기술의 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

### 2. 모듈러교량 기술의 개념

#### 2.1 기술의 배경

국내에서 일반적으로 알려진 교량 급속시공기술은 현장 공사기간의 최소화를 의미한다. 하지만 전 세계적으로 사용되는 교량 급속시공의 의미는 보다 광범위하게 사용되고 있다. 즉, 현장 공사기간 외에도 발주에서 완공까지의 총 사업기간 단축의 의미로도 사용되고, 또 공사기간 중 실제 차단되는 차선 수(및 차선 차단 시간)의 감소로 평가하여 공사 중 통행되는(또는 통행되지 않는) 차량수의 감소로도 사용되고 있다. 실제로 세계적으로는 각각의 단기 교량 공사의 정의 별 요구 성능에 맞게 교량 기술이 발전되고 있다. 미국연방도로청(Federal Highway Administration, FHWA)에서 적극 홍보 중인 교량급속시공(Accelerated bridge construction)은 prefabricated 부재의 활용 기술과 대형시공 장비(SPMT 등)를 이용한 대블록 공사 또는 교량 일괄 건설방법을 통해 공용 중인 교량의 교체에 활용되고 있으며, 일본의 도심지 급속교체 공법 중에는 교량 건설 중 낮과 밤의 차선 통제 수를 달리하여 도심 내 혼잡시간에 통행 차선을 추가로 활용하는 기술도 존재한다. 하지만 화재, 재난 등으로 교량이

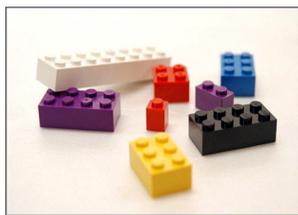
손실되어 빠른 복구가 필요한 경우라면 발주에서 완공까지의 총 사업기간이 최소화 필요하다. 발주에서 완공까지의 총 사업기간을 단축하기 위해서는 설계기간, 제작기간, 시공기간을 단축해야 한다. 하지만, 가장 중요한 요소는 대기시간의 최소화이다. 소재 주문 후 입고를 기다리는 것이 대기시간의 예이며, 이러한 낭비 요소를 최소화 할 시 빠른 사업기간 즉, 현장에 교량요소(모듈)를 빨리 시공 가능하도록 전달할 수 있을 것이다. 각각의 공정 별 소요시간을 분석해보면, 설계 시 각 현장에 맞는 맞춤형 설계를 실시하고 표준화 설계보다는 최적설계를 실시하고 있으며, 이렇게 설계된 교량은 제작 최적화가 아닌 설계 최적화가 되어 적은 양의 다양한 소재 들이 사용되어 소재의 수급에 어려움이 발생될 수 있다.

## 2.2 모듈리교량(Modular Bridge)의 개념

모듈러 기술은 타 산업에서 널리 사용되고 있는 기술로서 자동차, 기계, 전자 산업에서 모듈 기술의 정의는 각각의 맞춤형 제작을 하지 않고 기존 생산라인에서 해당 부품(모듈)만을 대체하여 전체 시스템이 다른 기능을 가지게 하는 것이다. 이러한 개념이 건설로 활용되면 현장에서의 작업이 공장으로 옮겨지게 된다. 기존의 현장별 설계, 제작되던 것이 표준모듈의 조합으로 설계되고 사전에 제작된 모듈을 현장으로 운반하여 시공하게 된다. 모듈리교량은 이와 같이 타 산업의 성공 기술을 교량 산업에 접목하면서 사용자에게 총 사업기간의 단축과 저탄소 제작, 시공 및 건설폐기물 최소화의 새로운 가치를 부여하는 기술이다.

모듈리교량의 정의는 최소의 표준화된 교량 모듈을 공장에서 미리 제작한 후 조합하여 다양한 현장조건에 대응할 수 있는 교량 시스템으로 사업 발주에서부터 최소시간에 완공할 수 있다. 레고블록(lego®)처럼 1단, 2단, 3단 등의 표준모듈의 조합으로 다양한 폭, 길이의 구조물로 조합 설계할 수 있는 것이 모듈러 컨셉(concept)이다(그림 1).

모듈리교량은 표준모듈로 구성되어 표준화된 제작과 제작 최적화로 형고가 일정하고 단면의 변화가 최소화된다.



〈표준모듈 : Lego〉



〈Lego 모듈리교량 컨셉〉

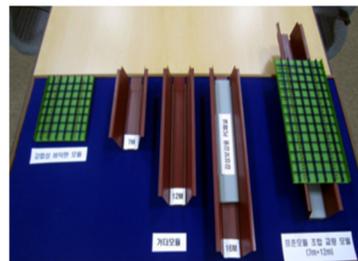
그림 1 모듈리교량의 컨셉

따라서 모듈 조합설계에 따른 설계시간 단축, 소재의 선 구매, 모듈의 선 제작 등 대기시간 등의 낭비요소를 제거하여 사업기간의 최소화에 기여할 수 있다. 그러면서도 기존 맞춤형 설계 교량 대비 과다설계가 되지 않도록 하면서 최소의 모듈 조합으로 다양한 현장조건에 대응할 수 있는 것이 핵심 기술이다(그림 2).

해외에서는 임시교량, 군용교량에서 모듈러 컨셉을 활용한 예가 있다. 표준화된 다수의 트러스 부재 모듈을 조합한 시스템으로 부품의 표준화와 확장이 가능하나 아직은 경제성 및 장기 내구성의 부족으로 응급복구용 임시교량, 전후 복구 교량 등 제한적으로 적용되고 있는 실정이다.

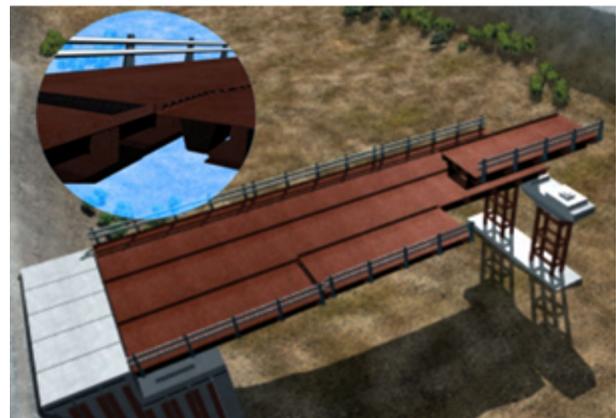
모듈리교량의 사업프로세스는 표준모듈을 생산, 판매, 유통하는 새로운 형태로 기존의 교량 사업프로세스와 차이가 있다. 기존의 사업이 현장별 설계, 즉 현장조건에 맞게 교량을 설계하고 그 설계에 따라 자재 구매, 제작 순이 된다면 모듈리교량은 표준모듈을 부분 또는 완전 선 제작 후, 표준모듈의 조합으로 현장 조건에 맞게 설계하여 표준모듈을 구매, 공급하는 구조이다. 예로, 지간 30m 현장이 발생 시, 표준모듈 7 + 16 + 7m로 조합되어 7m 표준모듈 2개, 16m 모듈 1개의 주문이 이루어진다.

이와 같이 사업절차와 사전제작, 자재 선 구매 등으로 설계,



표준모듈 3종 기본타입	
7m	Type ① (12mm)
12m	Type ② (18mm)
16m	Type ③ (24mm)

〈표준 교량 모듈〉



〈표준 모듈 조합 교량시스템〉

그림 2 표준모듈 조합 교량

제작의 대기시간을 최소화하여 전통적 주문제작 시장에서 기성품 시장으로의 변환되는 사업구조이다.

- ① 다양한 현장조건에 대응 가능한 단면, 폭, 길이 방향으로 확장되는 표준모듈 사전제작
- ② 표준모듈 데이터베이스(이하 DB) 활용 모듈조합 설계
- ③ 표준모듈 구매
- ④ 모듈 현장운반 및 조립/현장 시공

### 3. 강재 모듈러교량 기술의 개발 현황

#### 3.1 모듈러교량 연구단

국토부와 국토교통과학기술진흥원에서는 이러한 국가적 위기에 대응하면서 SOC 건설에서의 저탄소 요구에 대응하기 위해 건설기술혁신사업의 지원으로 2010년부터 (재)포항산업과학연구원(연구책임자: 윤태양) 주관의 “모듈러교량 기술개발 및 실용화 연구단”이 출범되었고 현재 주관기관은 (주)포스코로, 연구과제 명칭은 “직선교량의 공사기간 단축을 위한 표준모듈 활용 조립식교량 기술개발” 변경되어 연구가 진행되고 있다. 본 연구단은 국가적 위기에 대응할 수 있는 모듈러 사업프로세스와 제작/공사 중 탄소 저감의 개념을 정립하고 교량 총 사업기간의 급격한 단축과 제작/공사 중 발생하는 탄소저감의 저감을 목표로 이를 이룰 수 있는 영구 교량시스템을 개발하고 상용화하는데 그 목표가 있다.

연구단은 2개의 세부연구과제(1세부: 강재 모듈러교량 기술개발, 2세부: 프리캐스트 모듈러교량 기술개발), ‘강합성 모듈러 상부구조’, ‘프리캐스트 모듈러 상부구조’, ‘모듈

러하부구조’, ‘모듈러교량 통합정보화 시스템’, ‘모듈러교량 사업지원 기술’의 5개의 핵심 activity로 구성되어 있으며, 총 34개의 기관이 참여하고 있다. 4년 10개월의 연구개발 기간 동안 교량 상부, 하부, 부대시설 표준모듈 등의 구조 시스템 개발과 현장 조립시공 및 Test bed 검증 외에도 통합정보화시스템 개발, 법/제도 개선 및 건설표준 개발, 사업 모델 개발 등의 사업화지원 기술을 개발 중에 있다(그림 3).

#### 3.2 강재 모듈러교량

기존의 강박스거더 교량은 부부재가 많아 절단 및 용접량이 많으며, 현장에 맞춤 설계를 실시하여 단면이 복잡하고 형고도 다변하여 부재의 종이 소량으로 많아 제작 시 자재 구매와 제작 표준화의 어려움이 있었다. 강재 모듈러교량 상부구조는 절곡 강거더와 강합성 반두께 바닥판으로 구성된 표준모듈을 사용한다. 절곡형 강재 거더(이하 절곡 거더) 절곡 거더는 강판을 절곡하여 제작하여 절단, 용접공정 없이 단면을 구현하는 ‘강재 모듈러 절곡 거더 기술’을 확보하여 거더 제작비 및 제작 중 CO<sub>2</sub> 20% 감축이 가능하다.

본 시스템은 현재 3개의 표준모듈(7, 12, 16 m)로 구성되

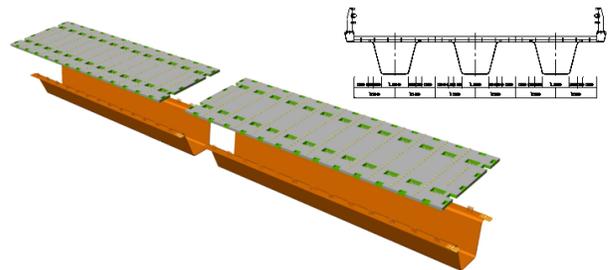


그림 4 강재 모듈러교량 상부구조

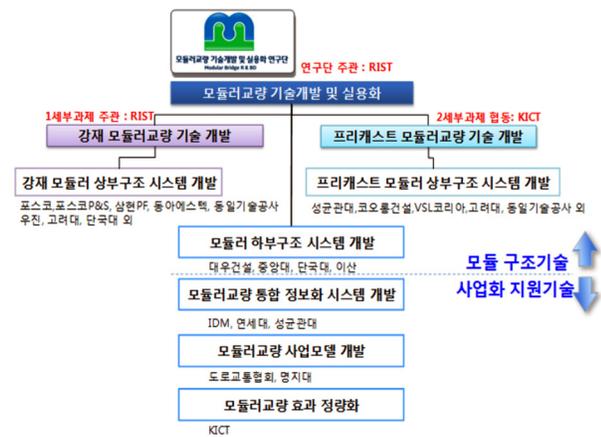


그림 3 모듈러교량 연구단 구성 체계

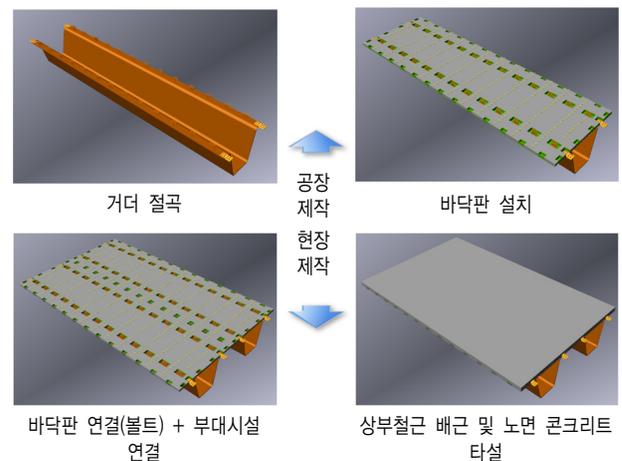


그림 5 강재 모듈러교량 시공순서



(a) 강거더 모듈 운반

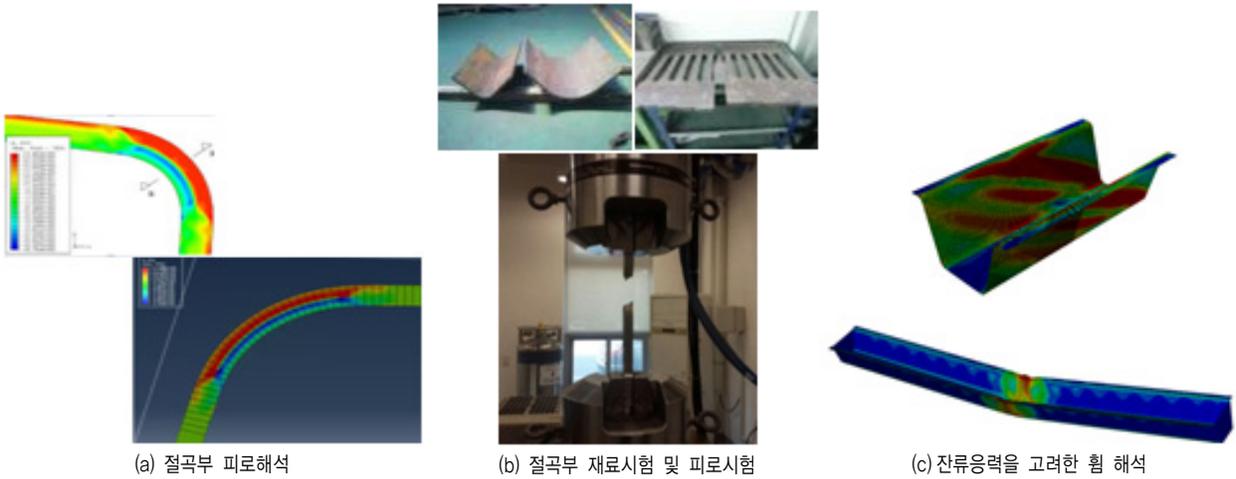


(b) 거더 시공



(c) 현장 재하시험

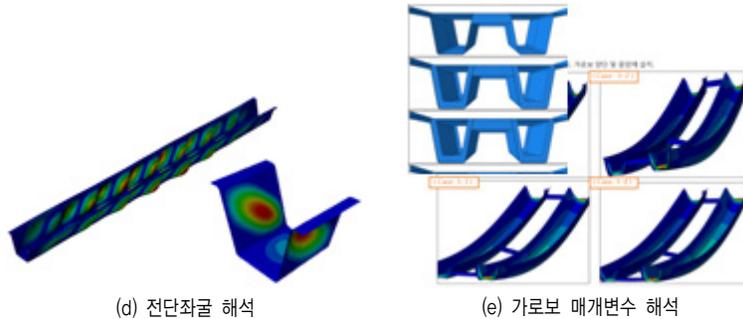
사진 1 절곡 거더 Test-bed



(a) 절곡부 피로해석

(b) 절곡부 재료시험 및 피로시험

(c) 잔류응력을 고려한 휨 해석



(d) 전단좌굴 해석

(e) 가로보 매개변수 해석

그림 6 절곡 거더 성능 평가



사진 2 강재 모듈러교량(21m) 제작 시물레이션

어 기간 40 m 이내에 표준모듈 조합 설계될 수 있으며, 표준모듈은 동일 형고를 유지하여 모듈 조합이 가능하다.

강합성 반두께 바닥판은 강거더와 조기 합성작용으로 모듈에 강성을 보장하고 교축직각방향은 볼트연결로써 현장 급속연결이 가능하다. 공장에서 절곡 거더와 강합성 반두께 바닥판을 설치하여 현장으로 운반하며 각 모듈은 현장에서 볼트 체결과 상부 마무리 콘크리트 시공을 실시한다 (중, 횡 구배 설치 등) (그림 5).

절곡 거더는 Test-bed 현장시공(사진 1), 강합성 반두께

바닥판은 21m (7+7+7m) 실교량 시험체 제작, 조립 시물레이션(사진 2)을 통해 제작성 및 현장적용성을 검증하였다. 현재는 지간 40~60m급 시스템을 개발 중에 있다.

### 3.3 절곡 거더 성능검증

앞서 언급한 바와 같이 기존의 강교량과는 달리 모듈러 교량은 절곡 거더를 사용하고 있다. 절곡 거더는 제작 시 소성변형을 통해 형성되는 4개소의 절곡부가 있으며 복부의 두께가 두꺼워 수직 및 수평보강재가 설치되지 않는 특징을 가지고 있다. 따라서 절곡부의 성능 검증 뿐만 아니라 거더의 휨 및 전단 성능에 대한 검증이 필요하여 그림 6과 같이 다양한 해석 및 실험을 통한 검증 연구를 수행하고

있다.

## 4. 맺음말

기후변화로 인한 자연재해와 도로 위 구조물에 피해를 줄 수 있는 각종 사고 위험은 항상 존재한다. 모듈러교량 기술은 이러한 국가위기에 대응할 수 있는 기술이다. 설계, 자재구매, 제작 기간을 최소화하여 발주에서 완공까지 최단기간에 수행, 시민의 삶과 경제권을 조기 정상화할 수 있으며 표준모듈 제작 및 교량 공사 중 발생하는 CO<sub>2</sub>와 건설 폐기물 최소화하고 정량화함으로써 녹색 교량 시장을 선도할 수 있을 것이다. 