

조립식 교량 관련 국내외 기술 개발 현황



길 경흥배 \ 한국도로공사 도로교통연구원 특수교량팀장 \ 전화 031-371-3330 \ E-mail hgjl@ex.co.kr

1. 서론

2010년 우리나라에서 가장 번잡한 도로 중 하나인 서울외곽순환고속도로의 중동IC 근처에서 하부공간을 불법 점유한 탱크로리에 서 발화한 대형 화재가 부천고가교의 일부 구간을 심각하게 손상하여 장기간의 교통차단 및 대대적인 보수·보강을 요하는 사태가 발생하였다. 기본적인 손상 현황 및 정도의 파악과 더불어 가장 먼저 고려된 사항은 조속한 재개통 방안이었다. 손상 구간의 철거, 보수·보강과 일부 구간의 교체에 대한 기술 검토가 우선 수행되었다. 공기단축이 최우선적으로 요구되는 상황에서 조립식 교량 공법만이 유일한 대안으로 제시되었으며, 강재박스거더와 프리캐스트 바닥판을 적용한 조립식 가설 공법이 사고 후 100여일 만에 서울외곽순환고속도로를 재개통하는데 큰 기여를 하였다. 조립식 교량 공법을 이용한 급속시공은 이와 같은 비상 상황뿐만 아니라 교통량이 많아 교량의 신설과 기존 교량의 노후화에 따른



[그림 2] 부천고가교 프리캐스트 바닥판 패널 거치

교체와 가설에 따른 교통 혼잡을 최소화하기 위해 단기간에 작업을 수행해야 하는 경우 필수적인 공법으로 제시되고 있다. 또한 고품질 확보와 혼잡지역에서의 신설 교량 가설을 위해서도 적용되는 조립식 교량 가설 공법은 미국을 중심으로 관련 연구 개발이 국내외에서 꾸준히 수행되어왔다.

조립식 교량(Prefabricated Bridge Elements & Systems)에서 요소(Elements)는 바닥판, 거더, 교각, 교대와 같이 교량을 구성하는 각 구조 요소를 조립식화하는 것을 의미하며, 시스템(Systems)은 상부구조 전체 시스템, 하부구조 전체 시스템, 혹은 교량 전체 시스템을 일괄 가설하는 것을 의미한다. Partial-depth 와 Full-depth 프리캐스트 바닥판에서부터 적용되기 시작한 조립식 교량 공법은 거더와 바닥판 일체 가설, 상부구조 전체 프리캐스트 혹은 조립 가설, 프리캐스트 교각 및 코핑부, 하부구조 전체, 혹은 전체 교량을 현장인근에서 조립해서 일괄 가설하는 것으로



[그림 1] 부천고가교 손상 부위 철거

발전되어왔다. 재료도 기존에 많이 활용되고 있는 프리스트레스트 콘크리트와 강재 뿐만 아니라 경량화를 위해 FRP 바닥판과 같은 신재료를 활용한 조립식 구조물도 개발 및 적용되고 있다. 현재 국내에서는 경제적인 이유와 장비 등의 제한으로 인하여 현장 작업을 중심으로 한 교량 건설이 대부분이다. 그러나 교량이 노후화 됨에 따라 손상부위에 대한 국부적인 보수·보강 수요증가와 더불어 교량 요소의 부분적인 교체나 전면교체에 대한 수요도 증가할 것으로 예상된다. 또한 신설교량의 가설에도 고품질 확보와 작업성 개선을 위해 조립식 교량 요소를 활용한 급속시공법의 적용이 확대될 것으로 기대된다. 이 글에서는 최근의 조립식 교량과 관련한 유럽, 일본, 미국의 기술개발 동향과 국내 기술 동향에 대해 논한다.

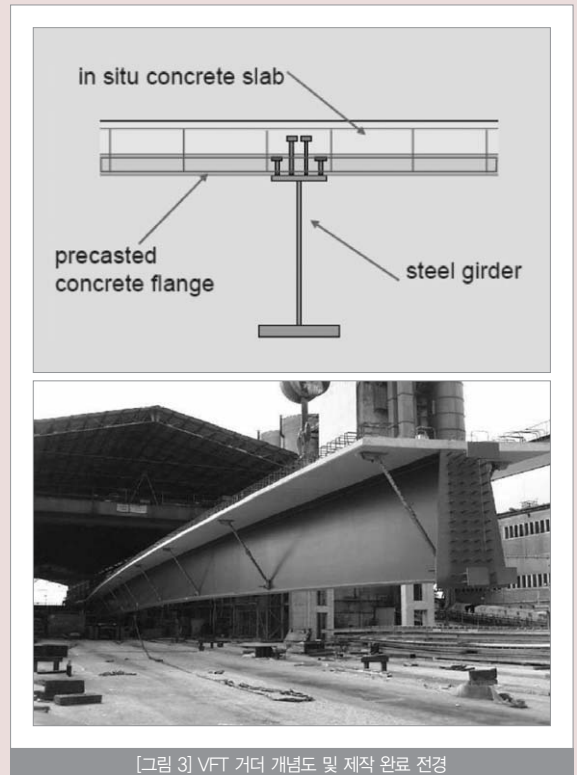
2. 유럽의 기술 동향

교통이 혼잡한 유럽에서도 현장에서의 가설시간을 감소시키는 것은 주요한 과제로 인식되고 있으며, 현재 적용되고 있는 조립식 교량 기술로는 프리캐스트 바닥판, 상하부 구조 일괄가설 공법 등이 활용되고 있는 것으로 보고되고 있다. 프리캐스트 바닥판의 적용은 주로 강재 거더와의 합성을 위해 주로 적용되고 있다. 특히 프랑스, 스웨덴 등에서 강합성 교량 건설에 Full-depth precast 바닥판이 활용되고 있는 것으로 보고되어 있다. 또한 현장 작업시간을 최소화하기 위해 프리캐스트 바닥판과 바닥판의 이음부 콘크리트를 현장에서 타설 하지 않고, 매치캐스팅(Match casting)을 하거나 요철, 돌기 등을 이용하여 연결부의 상대 처짐을 방지하는 Dry joints에 대한 연구도 최근 진행되었다.

독일은 현장타설 바닥판을 의무적(Obligatory)으로 고려해야 하지만, 조립식 교량 개발의 일환으로 프리캐스트 바닥판에 대한 연구가 진행중인 것으로 보고되어있다. 또한 독일에서는 강재거더와 Partial-depth 프리캐스트 바닥판(Precasted concrete flange)을 합성한 VFT(Verbundfertigträger, a pre-fabricated composite girder) 거더를 활용한 시공법이 다양하게 적용되고 있는 것으로 보고되어 있다. 바닥판의 잔여두께(In-situ concrete slab)를 현장에서 타설하는 VFT 거더 기법은 독일뿐만 아니라 폴란드와 같은 다른 유럽국가에서도 활용되고 있다. 영국에서는 Full-depth 프리캐스트 바닥판 보다는 Partial-depth 프리캐스트 바닥판이 주로 활용된 것으로 보고되어 있다. 이런 Partial-depth 프리캐스트 바닥판은 잔여 바닥판 두께의 현장 타설 콘크리트 작업을 위한 거푸집 역할을 한다.

유럽에 있어 조립식 교량 건설의 경쟁력 향상을 위한 기술개발을

위한 합동연구프로젝트인 ELEM 프로젝트가 2008년에 시작되었다. ELEM 프로젝트는 독일, 스웨덴 등이 중심이 되어 착수되었으며, 조립식 교량 건설의 경제성 향상과 가설 시간단축 등을 목표로 하고 있다. 또한 EU국가들의 도로관련 연구기관 포럼인 FEHRL(Forum of European National Highway Research Laboratories)에서 2020년까지 장기간의 연구개발 과제로 추진 중인 “Forever Open Road” 프로젝트에서도 포장을 포함한 도로의 조립식 건설이 주요한 연구아이템 중의 하나로 선정되어 추진 중에 있다.



[그림 3] VFT 거더 개념도 및 제작 완료 전경

3. 일본의 기술 동향

일본에서도 프리캐스트 바닥판, 프리캐스트 교각 등의 콘크리트 구조 요소를 이용한 조립식 교량에 대한 개발과 함께 강재 교량의 조립식 건설도 적용되고 있다. 특히 前田(Maeda), 鹿島(Kajima), 三井住友(Sumitomo Mitsui)와 같은 대형 건설사들이 기술 개발의 주체가 되어 조립식 교량 가설 관련 기술을 개발하고 있는 특징도 있다. 또한 지진이 빈번한 일본의 상황을 고려하여 교각 등의 내진 성능 확보가 필수적인 요구사항이 되며 상대적으로 연성 확보를 위한 강재 사용이 많고, 복합구조인 CFT(Concrete Filled

Tube) 구조나 SRC(Steel Reinforced Concrete) 구조의 채움이 활발하게 시도되었다.

일본에서는 대형 크레인이나 대형자주대차(大型自走台車)를 이용한 일괄 가설공법도 혼합한 도심 구간을 중심으로 적용되고 있다. 대형자주대차(Heavy-duty carrier)는 일반적으로 Turn Table, Table Lift, 대형다축대차로 구성되어 있다. 대형자주대차를 이용하여 상부구조 전체나 일정구간을 동시에 이동·가설하거나 상부 구조와 교각을 일괄 가설하는 공법도 종종 시도되고 있다. 일괄가설을 위한 구조물은 경량화를 위해 강구조물을 주로 적용하고 있다. 특히 강상판과 강재 박스거더나 플레이트 거더를 조합하여 경량화 시킨 상부구조가 대표적인 구조물 사례이다. 상부구조와 교각을 동시에 가설하는 경우에는 강재 교각을 이용하며, 현장에서 기초와 볼트 연결을 하고 있다.



[그림 4] 대형자주대차와 크레인 활용 거더 가설



[그림 5] 대형자주대차 활용 상하부 일괄 가설

4. 미국의 기술 동향

미국은 1950~1960 년대에 대부분의 고속도로망이 건설되었으며, 이들 교량의 손상과 노후화 및 용량 부족 등의 문제가 심각한 실

정이다. 따라서 교통차단을 최소화하며 이들 교량을 보수, 보강 혹은 교체할 수 있는 조립식 공법과 급속시공 건설 기술에 대한 니즈(Needs)가 꾸준히 제기되어왔다. 1990년대 중반 이후, 연방 도로청(Federal Highway Administration, FHWA) 및 AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials)의 주도하에 교통통제 최소화, 시공기간 단축, 생애주기비용 감소, 시공품질 및 안전 향상 등을 목표로 교량급속시공(Accelerated Bridge Construction, ABC)을 위한 사전조립식 교량 요소와 시스템(Prefabricated Bridge Elements & Systems, PBES)의 개발 및 보급에 많은 노력을 기울여 왔다. 조립식 교량 요소(Prefabricated Bridge Elements)는 바닥판, 거더, 교각, 교대 등의 구조 요소를 의미한다. 교량 요소를 활용한 조립식 교량 건설 공법의 경우, 프리스트레스트 콘크리트 거더나 강재 거더 위에 Full-depth 프리캐스트 바닥판을 거치하고 전단 연결재를 통해 합성시키는 방법이 교량 상부구조의 건설에 가장 일반적으로 활용되고 있다. 프리캐스트 바닥판 패널과 패널의 연결부 상세, 프리캐스트 바닥판과 주거더의 연결 구조 등에 대한 다수의 연구가 수행되어, 다양한 연결부 형식이 개발 및 적용되고 있다. New York State DOT(Department of Transportation)는



[그림 6] Full-depth 프리캐스트 바닥판 가설



[그림 7] 거더와 바닥판의 합성 가설 시스템



[그림 8] 교각 코핑부 조립식 가설



[그림 9] 콘크리트 패널 이용 조립식 교대 건설

고강도를 갖는 Ultra-high-performance concrete(UHPC)를 활용한 바닥판의 개발 및 적용을 통해 압축강도와 인장강도의 향상과 더불어 전단연결재의 높이를 줄여 작업성을 향상하기 위한 시스템 개발도 하였다. 기초, 교각, 교대 등의 하부 구조의 조립식 건설은 바닥판이나 거더 등의 상부 조립식 건설 보다는 활성화되어 있지는 않으며, Texas DOT(TxDOT) 등에서 콘크리트 교각, 코핑부 등을 프리캐스트화해서 시공한 사례가 보고되어 있다. 교각 블록과 블록 사이의 연결부 상세와 중강진 지역에서의 조립식 교각 내진 성능 확보에 대해 TxDOT, California DOT(Caltrans) 등에서 연구를 진행해온 것으로 보고되어 있다.

조립식 교량 시스템(Prefabricated Bridge Systems)은 현장에서의 작업을 최소화하기 위해 SPMTs(Self-propelled Modular Transporters)와 같은 대형수송장비를 이용하여 상부구조 전체나 상하부 구조 일체를 가설하는 것을 의미한다. 기존 교량의 철거, 신설 교량의 수송 및 일괄 가설에 활용되고 있는 SPMTs(용량: 500~5,000tons)는 조선소 등에서 대규모 블록의 이동 등에 사

용되는 플랫폼 장비로 여러 개의 축으로 구성되어 있으며, 1인치 이내의 정밀도로 조종이 가능한 장비이다. 네덜란드 등에서 교량의 일괄 건설을 위해 적용되기 시작한 SPMTs는 FHWA에서 교량 교체 및 건설에서 현장 교통차단 시간을 감소하기 위하여 도입 및 전파를 위해 노력하고 있는 가장 핵심적인 시스템 중의 하나이다. SPMTs의 운영에는 상당히 많은 비용이 수반되지만, 현장에서의 교통차단 횟수 감소, 기존 교량 철거 단순화, 가교 건설의 불필요, 작업 공정의 단순화와 같은 직접적인 비용 절감 이외에도 도로 사용자비용과 같은 간접비용의 최소화도 꾀할 수 있으므로 좀 더 효율적인 시스템으로 고려되고 있다. Florida주와 Utah주에서 SPMTs를 이용하여 단시간에 교량 교체를 한 사례가 있으며, 이 장비의 활용을 위한 매뉴얼이 FHWA와 Utah DOT에서 최근 제정되었다.



[그림 10] SPMTs 이용 기존 교량 철거



[그림 11] SPMTs 이용 신설 교량 설치

FHWA와 주(州) DOT 등에서 조립식 교량 가설 기법적용을 적극 추진 중이지만, 일반적인 교량건설 방식에 대비한 조립식 교량 건설의 경제성에 대한 의문은 미국 내에서도 지속적으로 제기되어

왔다. 생애주기비용 등을 전체적으로 고려한 경우 조립식 교량 건설이 보다 바람직한 것으로 논의되어 왔지만, 단일 교량 건설프로젝트에 조립식 교량 건설 공법을 적용하면 현장작업 위주의 일반적인 교량 건설 공법 보다 고가(高價)의 대안이 될 수도 있다. 이런 문제점들을 지양하고 조립식 교량 건설의 비용 최적화를 위해 Massachusetts DOT(MassDOT)에서는 단일 교량을 발주하기 보다는 일정 구간에 있는 조립식 교량들을 하나의 프로젝트로 묶어서 하는 일괄 발주를 통해, 설계와 건설에 있어 효율성을 추구한 사례도 있다.

5. 국내 기술개발 동향

국내의 조립식 교량 관련 기술개발은 1990년 후반부터 국책연구과제 등을 통해 지속적으로 수행되어 왔다. 해상교량인 서해대교 사장교 구간에 프리캐스트 바닥판이 적용된 후, 중부내륙고속도로 여주JC 근처의 고속도로 시험도로 구간에 위치한 삼승1교에 중방향으로 긴장재를 갖는 Full-depth 프리캐스트 바닥판이 처음 시공되어, 기술의 적용성을 검증하였다. 이후 청주육교, 유성IC교 등의 고속도로 개량 공사 및 긴급 보강에 적용되어 왔으며, 교통혼잡 구간의 신설교량 건설에도 적용된 사례가 있다.

Full-depth 프리캐스트 바닥판 개발로 시작된 국내 조립식 교량 관련 기술 개발은 연구거꾸집으로 활용되는 Partial-depth 프리캐스트 바닥판, 교각 등의 조립식 하부구조 시스템 개발, 거더와 바닥판의 일체화 혹은 프리캐스트 바닥판의 중량을 이용한 거더 구조 합리화 시스템 개발 등으로 확장되어 왔다. 또한 전문업체들에 의해 다양한 현장 조립식 PSC 거더 및 바닥판 가설 시스템이 개발되어 왔다. 조립식 교량 건설에서 가장 문제가 되는 블록과 블록 사이의 연결부 상세, 거더와 바닥판과의 합성을 위한 전단 포켓 구조 상세, 상·하부구조의 경량화 등에 대한 연구도 국내에서 다양하게 수행되어 왔다.

시간 20~60m 도로교의 상부구조와 하부구조 모듈러 시스템 개발을 목적으로 하고 있는 대형 국책연구과제인 모듈러 교량 기술 개발 연구개발사업이 2010년에 시작되어 2015년까지 183억원의 예산으로 현재 진행되고 있다. 사전 제작된 상·하부 표준 모듈 개발 및 조합 설계, 각 모듈의 기능적 부품화, 폭·길이·단면 자유 확장성을 갖는 모듈러 교량 등의 세부 기술들이 개발될 예정이다. 또한 보다 지능적이고 친환경적인 미래지향적 교량 개발을 목표로 현장에서의 교통차단을 최소화하기 위한 교량 건설 시스템의 개발도 포함하고 있는 “지능형 친환경 교량” 개발 과제도 곧 추진될 것으로 예상되고 있다.

6. 결론

현장 작업을 최소화하고 고품질을 확보하기 위한 조립식 교량 건설, 급속시공 시스템에 대한 국내외의 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 조립식 교량 건설을 위해 필수적인 교량의 상·하부 구조 요소, 가설 시스템, 요구되는 내구성을 만족시킬 수 있는 연결부 등에 대한 기술개발이 국내외에서 꾸준히 수행되어 왔다. 또한 UHPC, FRP 등의 고성능 재료를 활용한 구조물의 경량화 및 슬림화도 함께 연구되어 왔다.

SMPTs(Self-propelled Modular Transporters), 대형자주대차(大型自走台車) 등의 대형수송장비를 이용한 교량 일괄가설 시스템이 유럽, 일본, 미국 등에서 활성화되고 있지만, 국내에서는 거의 적용되지 않고 있는 실정이다. 국내에서도 교량의 상부 전체나 상·하부를 일체로 하여 이동, 가설하기 위한 장비 및 운용 기술 개발도 필요할 것으로 판단된다.

조립식 교량, 모듈러 교량 관련 기술의 개발은 교량의 품질관리 확보에 기여할 수 있을 뿐만 아니라 고공에서의 작업 감소에 따른 안전사고의 예방과 국제적인 화두로 지속적으로 제시되고 있는 CO₂의 감축에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. **S**