

시드니 Anzac Bridge 수명 연장을 위한 주요 작업 Major Work to Extend the Lifespan of the Anzac Bridge in Sydney



김 경 식^{1)*}

Kim, Kyung Sik

이번 해외번역기사에서는 BRIDGE DESIGN & ENGINEERING 2012년 12월호에 기술기사로 게재된, 호주 시드니에 위치한 사장교 Anzac Bridge를 대상으로 진행된 보수작업에 대해 소개한다. 본 기사는 Rod Oates, Eric Kuhn, Andrew Thompson, Xavier Koscher, Robert Craig 등에 의해 작성되었고, 각자의 소속은 기사의 말미에 밝힌다.

교통 수요 증가와 발전된 교량 기술을 근거로 Anzac Bridge에 대한 업그레이드를 고려하였고 케이블 수명을 연장하고 유지관리 접근성 및 보행자 안전 향상을 목적으로 하는 2년간의 정교한 보수프로그램에 들어갔다. 본 교량은 1990년대 초반에 완공된 후 보행자 및 자전거를 제외하고도 일일 차량통행량이 125,000대에 이르는 사장교이다(Fig. 1).

발주처인 New South Wales의 도로해양부

(Roads & Maritime Services)는 본 교량에 대한 구조성능을 면밀히 살핀 후 교량 수명 연장을 위한 추가적인 유지관리 작업을 검토하였다. 검토된 사항으로 사장재 진동, 수분침투 및 내구성, 사장재 내하력, 방호책 업그레이드 등이 포함되었다. 본 재건 프로젝트를 위해 도로해양부는 후레씨네(Freyssinet), 볼더스톤(Baulderstone), 세이즈 오토매니션(Sage Automation) 등과 기술제휴를 맺었다. 두 단계로 진행된 본 프로젝트의 1단계는 기존 구조물에 대한 조사분석과 설계개발을 포함하는 타이트한 6개월 일정으로 구성되었다. 2단계는 2년일정의 프로그램으로 1단계에서 설계된 유지 보수 작업의 실행을 담고 있다. BSA와 Aurecon, Cardo and Leonhardt, Andra & Parnet 등 컨설팅회사와의 공조를 통해 1단계는 계획대로 추진되었다. 2단계는 현재 절반 이상 진행된 상태인데, 2011년 8월에 착수되어 2013년 9월 완료 예정이다. 본 교량은 2면 케이블 배치된 사장교로서 중단면의 양단에 두

1) 청주대학교 토목공학과

* E-mail : kkim@cju.ac.kr



Fig. 1

개의 보강거더가 배치된 트윈거더(twin girder) 형식이다. 프리스트레스트 콘크리트로 구성된 각 거더의 높이는 1.8m로 일정하나 폭은 1.5m~1.35m의 범위를 가진다. 철근콘크리트 바닥판은 간격 5.1m로 배치된 횡거더(cross-girder)에 의해 지지된다.

본 교량은 32.2m의 전형적인 바닥판 폭을 가지는 총연장 805m의 3경간 연속 사장교이다. 주경간은 345m, 측경간 120m으로 구성되고 총 128개의 사장케이블이 높이 120m의 주탑에 연결되었다. 사장케이블은 PWS(parallel strand wire) 방식으로 25~74 스트랜드로 구성되며 최장 195 m의 길이를 가진다. 바닥판은 원래 보행자/자전거 도로를 포함 6차선으로 설계되었으나 차선수 증가에 대한 성능이 검증되어 현재 8차선으로 운용되고 있다(Fig. 2).

최초 완공이 다가왔을 때 사장케이블은 풍우 진동(rain-wind induced vibrations)에 의한 피해를 받는 것으로 관찰되었는데 과도한 진동은 시간이 지나면 스트랜드의 피로수명 단축을 야기할 것으로 당시에는 예측하였다. 오늘날에는 이러한 문제를 해결하기 위한 두 가지 기법이 제안된다. 하나는 사장케이블 외피에 나선방향

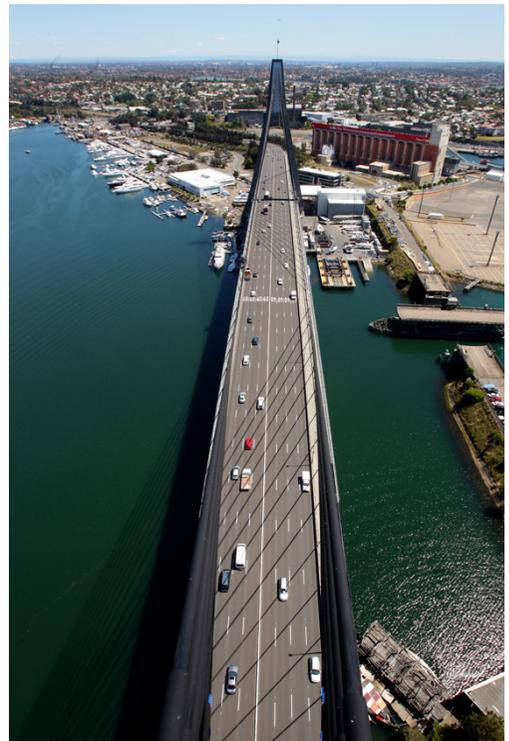


Fig. 2

으로 리브를 설치하는 방법이고 다른 한 가지는 사장케이블의 바닥판 앵커리지에 댄퍼를 부착하는 방법이다. 도로해양부는 프레시네사와 감쇠

시스템을 적용하고자 논의하면서 상대적으로 긴 케이블에는 IRD(internal radial damper)형식을, 중간 또는 짧은 케이블에는 IHD(internal hydraulic damper)형식을 적용하고자 하였다. 그러나 상세설계단계에서 심미적 일관성 및 댐퍼의 유지관리 표준화 등을 이유로 내세워 IRD형식만이 최종 적용하기로 하였다. 이미 공용중인 케이블에 어떻게 나선형 리브를 설치하는 문제는 여전히 남았다.

이러한 문제에 대한 해결책으로 3mm폭 리브를 케이블외피에 용접부착을 수행하는 전용의 용접 로봇을 개발하였다. 이 로봇은 케이블 표면을 따라 움직이며 자동화 용접이 가능한 모듈을 포함하고 있다. 이러한 전용의 자동화용접 로봇장치는 후레 쾰너사와 Alpin Technik & Ingenieurservice사가 공동으로 개발하였는데 사장교에 적용된 사례가 전무한 상태였으므로 현장적용 전 실물크기로 광범위한 사전 시행연습이 수행되었다. 이러한 사전 시행연습을 통해 장치에 더욱 정교하고 다양한 개선을 통해 보다 강력한 로봇장비로 재탄생되어 127개 사장케이블 대상으로 현장적용되었다(Fig. 3).

자동화용접 로봇이 제공하는 장점은 크게 두 가지로 요약된다. 첫째로 작업자의 고소작업을 원천 제거한 안전성을 들 수 있다. 용접작업을

포함하여 작업 중 수행되는 품질검사가 모두 지상에서 모두 조작·운전되므로 작업자의 안전은 완벽하게 보장된다. 본 로봇장치에 갖춰진 카메라는 진행되는 용접작업에 대한 연속적 검사를 가능하게 하여 혹시 하자가 발생하더라도 바로 확인되어 해결될 수 있었다.

두 번째 장점은 케이블외피를 제거하고 교체하는 비용 뿐 아니라 비계설치 및 고소작업비용을 절감할 수 있는 경제성을 들 수 있다. 케이블 진동을 최소화하기 위한 IRD형식 감쇠장치가 바닥 기준 1.5m 높이 지점에 설치되었다. 댐퍼를 지지하고 횡하중을 전달하기 위해 강재튜브 골조에 두 개의 보조튜브가 바닥판 레벨에서 연결되었다. 댐퍼와 케이블요소는 이중부속 연결구조(two-part connection)로 상호 연결되었다(Fig. 4).



Fig. 3



Fig. 4

케이블진동이 선단(locking wedge)에 전달되지 않도록 하기 위해서는 앵커 후면 고정점이 필요하다. 댐퍼의 효율을 극대화하기 위해서 고정점과 댐퍼사이 팔길이(lever arm)는 최대화할 필요가 있었다. Anzac Bridge에 적용된 이중 연결구조에서 앵커와 DC(deviation collar)는 서로 분리시켜 DC는 댐퍼튜브내에 위치시켰다. 그러나 댐퍼효율향상을 위해 기존 이탈기(deviator)는 제거하고 후레시네사가 설계한 새로운 것으로 교체하였다. 이러한 해법의 장점으로는 먼저, 기존 선단 댐퍼 튜브는 댐퍼로부터 설계하중에 저항할 수 있는 적정 강성을 가지고 있다는 것이다. 추가적으로 바닥판 케이블 고정점은 가동되어 진동영향하에 케이블 휨작용에 의한 피로손실을 방지한다. 또한 댐퍼는 저면설치가 가능해져 시각적 충격효과를 최소화하고 장기 유지관리에 유리해진다.

본 사장교는 케이블 전장에 대해 그라우팅처리하는 것으로 설계되었으나 그라우팅을 하지 않고 왁스채움 앵커로 재설계되었다. 그 결과 HDPE 덕트는 폼워크 튜브(formwork tube)와 지름 8mm 배수구를 통해 앵커바닥까지 연장되었다. 이러한 배수시스템은 폼워크 튜브안을 배수하기에는 적절하지 않았고, 게다가 케이블 상부에 열팽창용 슬리브길이 또한 충분하지 않았다. 이후 앵커저면과 배수구를 분리시켰으나 이는 수분침투로 인해 배수상황을 악화시켰다. 프로젝트의 일부로서 BSA는 케이블시스템의 배수상황을 개선작업을 수행하고 있다. 케이블 상부 슬리브 부근 파손부위를 수리하고 열팽창 제어를 위해 Rope Access Technique이 사용될 예정이다. 폼워크 튜브내 HDPE 덕트는 유지관리 접근성을 높이기 위해 Alpin Technik & Ingenieurservice가 개발한 특수 절단장치를 이용하여 제거될 예정이다. 보강형 아래 콘크리트 앵커리지에 지름 30mm 구멍을 뚫어 앵커리지영역의 배수를 허

용한다.

교량시공시 스트랜드는 전장에 걸쳐 HPDE 코팅으로 보호 처리되었고 내구성향상을 위해 페트로리엄 왁스로 채움 처리되었다. 앵커리지 단부에는 앵커리지에서 강제썰기(steel wedge)가 스트랜드를 고정할 수 있도록 HDPE 코팅이 제거되었다. 앵커 전면에는 앵커캡(anchor cap) 처리하였고 후면에는 축봉장치(stuffing box)를 가지는 케이블과 분리하였다. 다음으로 이 두 영역에는 스트랜드의 부식을 방지하기 위해 왁스가 주입되었다. 앵터 저면에 대한 검사결과 왁스의 질은 시간의 흐름에 따라 악화되었고 일부 위치에서는 누출현상도 나타났다. BSA는 케이블 손상 없이 왁스를 제거할 수 있는 기법을 고안하기 위해 광범위한 현장 조사에 착수했다.

그 해법으로 특정위치에 앵커 지압판을 통해 가열봉을 삽입하여 왁스를 녹인 후 유도된 위치로 흘러나오게 하는 방법이 제시되었다. 이렇게 기존 왁스가 제거되면 각 앵커에는 시린젝트 왁스(Cirinject wax)로 불리는 새로운 왁스로 재주입된다. 바닥판 레벨에서 케이블요소에 새롭게 추가된 성분은 유지관리대상의 증가를 초래하고 결과적으로 기존 접근시스템의 업그레이드를 요구하게 된다.

이전의 접근배치(access arrangements)는 바닥판 레벨에서 각각의 케이블에 접근하기 위한 임시 고착선(static line)을 수반했었다. 재건 사업을 위하여 교량 전지기간에 걸쳐 임시 접근 통로가 필요했다. 경제성 분석 워크샵(value-for-money workshop)을 통하여 보도에 임시 접근로를 추가하는 것이 장기적 관점에서 더 효율적 접근시스템을 제공할 수 있다고 결정되었다. 교량 종방향 650m에 걸쳐 바닥판 레벨의 새로운 보도가 폭 700mm로 보강형 외측에 설치되었다. 생애비용과 현장시공성 등을 고려하여 재질을 격자형 FRP요소가 포함된 알루미늄구조로 정하

였다.

시공 중 재료 및 크레인 이동을 위하여 교량 보도에 설치된 레일에 BSA가 설계한 운송시스템이 운영된다. 바닥판 레벨에서 주탑 상부까지 접근성을 위해 내부사다리와 별도로 신형의 산업용 리프트가 설치된다. 이 신형 리프트는 500kg의 작업하중 용량을 가진다. 유지관리 장비의 이동시 안전성을 향상하기 위하여 300kg의 작업하중을 증가할 수 있는 새로운 호이스트가 설치된다. 이 호이스트는 주탑내에서 작업자 비상상황 발생시 탈출구의 역할도 수행한다.

바닥판 하부 유지관리를 위한 캐트워크(catwalk)가 설치되어 교량 양단의 여덟 개 케이블 앵커리지에 대한 접근성을 제공한다. 교량의 기하학적 형상 때문에 바닥판 하부 갠트리(under-deck gantry)만으로는 앵커리지에 대한 접근이 불가능한 것으로 판단되었다. 캐트워크는 알루미늄 재질의 와렌트러스 구조로 보강형 아래 10.3m 간격으로 지지된다. 알루미늄은 장기적인 면에서 우수한 유지관리 조건 때문에 선택되었다. 트러스구조는 L-형상의 조립단면으로 보강형 내측에 연결된다.

교량 북측지점의 보도에 대한 안전펜스의 적정성을 검토한 결과 기존 안전펜스는 강도 및 안전에 대한 요구조건을 만족하지 못하는 것으로 파악되었다. 또한 남측지점에도 안전펜스의 설치가 필요한 것으로 결정했다. 3m 높이의 알루

미늄 기둥과 레일시스템으로 새로운 안전펜스를 구성하게 된다. 펜스 프레임은 4.5m간격의 지지주둥과 주둥 중간의 2차부재로 구성된다. 지름 170mm의 상부 레일은 주둥에 볼트연결되어 종방향 안정성을 확보하는 문형 프레임(portal frame)을 형성한다. 상부 레일에는 신축이음을 설치하여 온도에 따른 움직임을 허용하고 향후 교체가 가능하도록 한다. 펜스 기둥은 변단면 알루미늄 I-단면으로 제작되며 면외 강성을 향상하고 뒹(warping)을 최소화하기 위해 약간의 곡률을 넣는다. 변단면을 채용한 이유는 시각적 효과뿐만 아니라 기둥의 효율을 높이기 위해서이다.

기사작성자 소개

Rod Oates: New South Wales 도로해양부 매니저

Eric Kuhn: Alpin Technik사 매니저

Andrew Thompson: Baulderstone사 매니저

Xavier Koscher: Freyssinet사 매니저

Robert Craig: Sage Automation사 매니저

담당 편집위원: 김경식
(청주대학교 토목공학과 조교수)
kkim@cju.ac.kr