초장대교량과 전산구조공학

Super Long Span Bridge & Computational Structural Engineering

박 찬 민*

*한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원 공학박사

1. 개 요

토목공학의 결정체라 할 수 있는 장대교량의 대표적인 형식으로 사장교와 현수교와 같은 케이블 지지교량을 들 수 있다. 최근의 전산구조공학 기술의 발달과 장비, 공법 및 재료의 개발에 힘입어 사장교는 경간장 1,500m~2,000m, 현수교는 3,000m~4,000m에 이르는 초장대교량의 새로운 영역으로 접어들고 있다. 이는 자연지형을 극복하고자 하는 기술적인 목적 외에도 기술자들의 끊임없는 도전 정신과 보다 새로운 것을 추구하는 삶의 욕구가 반영된 결과이다.

우리나라에서는 현재 세계적으로 드물게 장대교량 시장이 활발한 상태이다. 이는 곧 탄탄한 내수 건설시장을 배경으로 국제경쟁력을 갖추기에 아주 적절한 시기라는 것을 의미한다. 즉, 선진 외국의 성공과 실패 사례를 분석하며 우리나라 건설기술의 새로운 성장동력을 마련해야 할 것이다.

1.1 우리나라 장대교량의 발전

우리나라의 장대교량 역사를 태동기와 성장기, 그리고 미래로 구분하여 아래와 같이 요약할 수 있다.

1) 장대교량 태동

○ 1973년 당시 동양 최대 규모의 현수교인 남해대교 시공
○ 1984년 진도와 돌산도를 각각 육지와 연결하는 진도대교와 돌산대교 시공
○ 2000년 서해대교와 영종대교, 2003년 광안대교의 건설로 본격적인 장대교량 시대가 열림

2) 장대교량 성장

○ 1990년대 후반부터 도입된 경쟁적 턴키 및 대안입찰 방식으로 인해 케이블교량의 설계기술 급속 발전
○ 현재 9개의 사장교와 3개의 현수교가 공용 중이며, 17개의 사장교와 2개의 현수교가 시공 중임

3) 장대교량의 미래

○ 2001년 건설교통부 주관 하에 서해안 및 남해안의 도서지역을 통과하도록 전국의 일반국도 노선을 전면 조정
○ 이중, 2호선, 24호선, 77호선은 미개통 구간이 250km 이상이고 해상구간만도 50km이상이며, 선박통행과 지리적 여건을 고려하면 사장교나 현수교와 같은 장대교량의 건설이 예상되고, 계획 중인 서남해안 일대 케이블교량만 30여개에 달함
○ 최근 전남 여수와 광양 사이의 묘도를 연결하는 현수교(광양대교)가 세계 3번째 규모의 주경간장 1,545m로 설계됨

1.2 국내·외 장대교량 실적

1) 가시공 실적

표 1 세계 현수교 Top 5

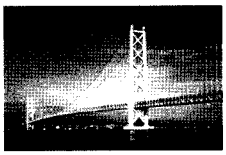
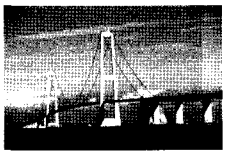
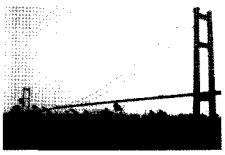
구 분					
교 량 명	Akashi-Kaikyo	Great Belt	Runyang	Humber	Jiangyin
국 가	Japan	Denmark	China	U. K.	China
주경간(m)	1,991	1,624	1,490	1,410	1,385
준공년도	1998	1998	2005	1981	1999

표 2 세계 사장교 Top 5

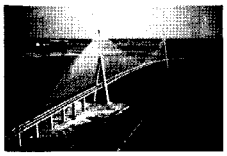
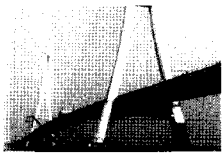
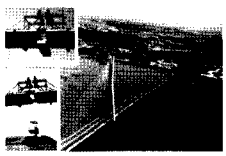
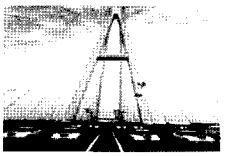
구 분					
교 량 명	Tatara	Normandy	Nanjing 3rd	Nanjing 2nd	Wuhan 3rd
국 가	Japan	France	China	China	China
주경간(m)	890	856	648	628	618
준공년도	1999	1995	2005	2001	2000

표 3 국내 장대교량 실적

구 분	교 량 명	준공년도	경간구성(m)	상부형식
사장교	진도대교	1984	70+344+70	강상판상형
	돌산대교	1984	85+280+85	강상판상형
	올림픽대교	1990	150+150	PSC BOX
	신행주대교	1995	2@50+120+2@50	강합성형
	서해대교	2000	200+470+200	강합성형
	영흥대교	2001	110+240+110	강상판상형
	삼천포대교	2003	103+230+103	강합성형
	제2진도대교	2005	70+344+70	강상판상형
	어등대교	2005	105+105	강상판상형
현수교	남해대교	1973	128+404+128	강상판상형
	영종대교	2000	125+300+125	복층트러스
	광안대교	2003	200+500+200	복층트러스

2) 국내·외 계획/시공 중인 장대교량

표 4 계획·시공중인 현수교

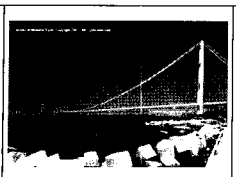
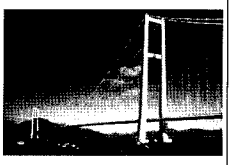
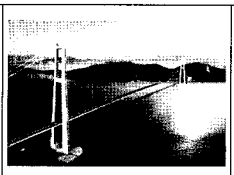
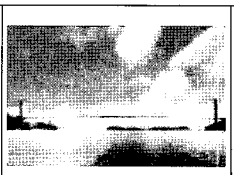
구 분					
교 량 명	Messina	Xihoumen	Kwangyang	Tsing Lung	Hardanger
국 가	Italy	China	Korea	China	Norway
주경간(m)	3,300	1,650	1,545	1,418	1,380
준공년도	미정	2008	2012	2008	2011

표 5 계획·시공중인 사장교

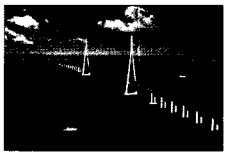
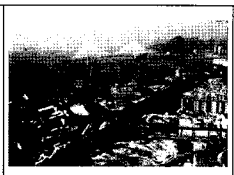
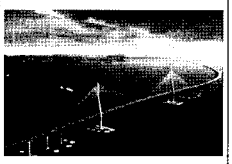
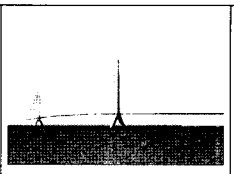
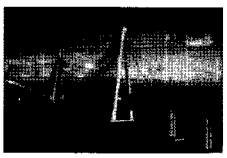
구 분					
교 량 명	Sutong	Stonecutters	Incheon	Chongming	Jintang
국 가	China	China	Korea	China	China
주경간(m)	1,088	1,018	800	720	620
준공년도	2008	2008	2009	미정	2010

표 6 국내 장대교량 계획·시공

구 분	교 량 명	준공년도	경간구성(m)	상부형식
사장교	금빛대교	2007	120+198+480+198+120	복합트러스
	마창대교	2008	170+400+170	강합성형
	청풍대교	2008	22+35+327+35+22	복합형
	인천대교	2008	80+260+800+260+80	강상판상형
	거가대교	2009	220+475+220 106+2@230+106	강합성형
	고하-죽교	2009	200+500+200	강상판상형
	우두-종화	2010	35+82+230+82+35	PSC
	신완도대교	2011	90+200+140	강상판상형
	돌산-화태	2012	71+189+500+189+71	강합성형
현수교	소록대교	2008	110+250+110	강상판상형
	적금-영남	2010	310+850+180	강상판상형
	광양대교	2012	357.5+1,545+357.5	강상판상형(이중)

본 고에서는 국제경쟁력을 갖추기 위해 앞으로 우리가 확보해야 할 전산구조공학 기술에 대하여 간략히 살펴보고자 한다.

2. 해석/설계법의 발전

현재로서는 3,000m를 넘는 교량이 현실화되고 있으며, 이

러한 초장대교량의 대표 형식이라 할 수 있는 현수교의 발전은 설계이론과 컴퓨터 및 재료의 발전과 맥을 같이 한다. 1883년에 준공된 Brooklyn교(경간장 486m)는 활하중에 의해 발생하는 변형의 영향을 무시하고 보강형의 단면력을 해석하는 탄성이론(elastic theory)으로 설계되었다. 1909년에 지어진 미국의 Manhattan교(경간장 448m)는 활하중에 의한 보강형의 변형 영향을 고려하는 처짐이론(deflection theory)을 적용하여 이전의 현수교에 비해 보강형이 날렵해졌으며, 이 후 1931년에 드디어 경간장 1,000m가 넘는 George Washington교(1,067m)가 탄생하였다.

1946년 컴퓨터가 등장한 이래 신속한 대량 계산이 가능해지면서 매트릭스 구조해석법(응력법, 변위법)과 Newton-Raphson method, Sky-line solver 등으로 이어져 현재의 유한요소해석법(Finite Element Method)이 개발되었다.

또한, 컴퓨터의 기술진보 속도는 놀랄만한 것으로 현재 세계 최장의 교량인 Akashi해협대교(일본, 경간장 1,990m)의 구조해석이 1998년에 EWS(Engineering Work Station)를 이용해 수행되었지만, 현재는 약 2만 차원의 행렬이 구성되는 이 교량의 구조해석을 PC 수준에서 처리할 수 있다.

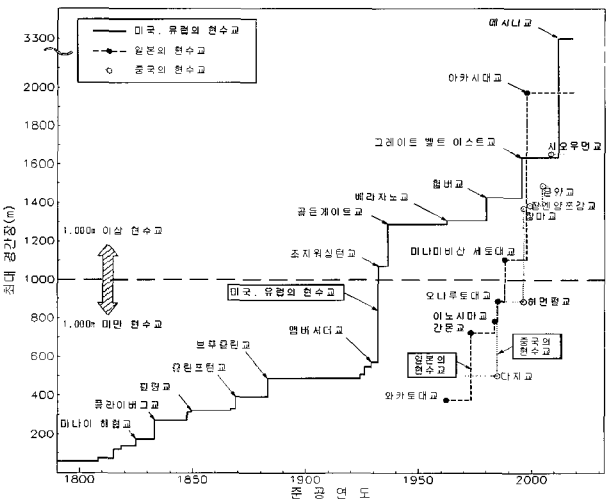


그림 1 세계 현수교의 장대화

3. 초장대교량과 전산구조공학

장대교량에서 그 기술의 수준은 설계 및 시공이 가능한 중앙경간장의 크기로 평가할 수 있다. 현재 기술 수준에서 사장교 형식에서는 중앙경간장 1,500m이상, 현수교 형식에서는 3,000m이상될 때 초장대교량이라 정의할 수 있다. 이와 같은 초장대교량의 시대를 맞이하여 세계 일류기술을 확보하고 나아가 세계시장에서 경쟁력을 가지며 이와 같은 고부가가치 시장을 선점하기 위하여 시급히 풀어야 할 전산구조공학 기술 분야에서 크게 몇 가지만 정리하여 본다.

3.1 위험도 분석기술

초장대교량은 기존 교량과 달리 시공 중 또는 공용 중에 태풍이나 지진, 충돌 등에 의한 위험을 사전에 검토하여 충분한 대비해야 한다. 따라서,

- ㅇ 자연재해나 재난 등에 대한 검토는 극한상태 위험도를 분석하고, 신뢰도 기반의 분석을 위한 요소기술 개발이 선행되어야 하며, 이를 통하여 극한 상태에 대한 관리 기법은 물론 기준 제시가 가능하다.
- ㅇ 초장대교량에 작용 할 수 있는 지진 또는 해일과 같은 극한 하중은 초장대교량이 위치한 광범위한 지질구조 및 해협 지형 특성에 따라 다양한 형태로 발현하게 되므로, 시공간적 상관관계를 고려한 해석이 요구된다.
- ㅇ 선박 등에 의한 충돌은 교량 전체의 안전과 밀접한 관련이 있으므로 충돌에 대비한 보호공의 설계 및 강도 평가(에너지 흡수 능력 평가)에 대한 분석이 필요하다.
- ㅇ 초장대교량에 대한 위험도 분석은 안전도에 대한 분석뿐만 아니라 사용성의 한계 상태에 대한 분석도 함께 고려되어야 하며, 초장대교량의 설계기술은 한계상태설계 및 성능기반설계를 기본으로 이루어져야 한다.

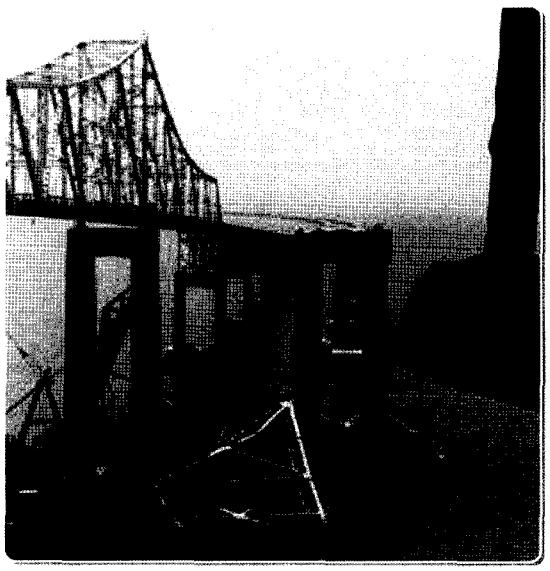


그림 2 화물선 충돌에 의한 Sunshine Skyway교 붕괴, 1980년

3.2 대형기초 해석기술

초장대교량은 경간장이 길어짐에 따라 고정하중이나 사용하중이 증가하게 되고, 상부구조의 하중에 비례하여 주탑과 기초가 대형화되므로 이러한 대형구조물에 대한 합리적인 설계는 교량 전체의 안전성과 경제성을 확보하기 위해 매우 중요하다. 특히, 해양 환경에서의 교량 공사비에서 기초 분야 공사비가 통상 40%이상을 차지하고 있으므로, 초장대교량의 경제성을 확보하기 위해서는 기초관련 설계 및 시공법의 개발을 통하여 기초 시공비용을 절감해야 한다.

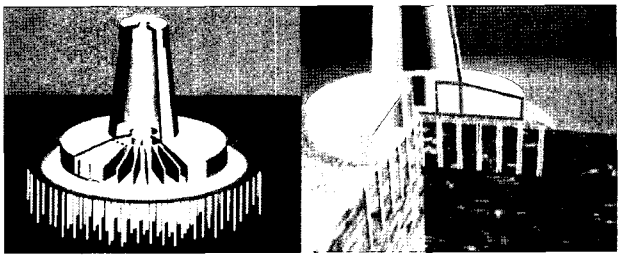


그림 3 말뚝기초 보강형 대형확대기초 예

- ㅇ 앵커리지는 압축력에 대하여 저항하는 일반적인 교량 기초와 달리 케이블에 의한 인장력을 지지하는 구조로서, 초장대교량과 같이 큰 수직력과 수평력을 동시에 지지해야 하는 경우에는 앵커리지시스템에 따라 시공성과 경제성이 크게 달라질 수 있으므로, 합리적인 설계를 위한 심층적인 연구와 해석기술 개발이 필요하다.
- ㅇ 현재의 교량 내진설계는 대부분 상부구조의 해석과 안전에 관심이 집중되어 있고 구조물의 근본이 되는 하부공에 대해서는 심도있는 검토가 진행되지 못하였으나, 초장대교량의 기초는 지진이나 바람에 의한 횡력의 영향이 크기 때문에 이들 하중에 대한 정밀 해석 기법의 개발이 필요하며, 특히 지반과 기초를 연계한 해석기술 개발을 통하여 경제적인 기초설계가 이루어져야 한다.
- ㅇ 대형 콘크리트 구조물에서 시공 초기단계의 수화열 이외에 건조수축 및 자기수축에 의한 구조물의 체적변형을 제어하고, 이를 정확히 구조해석 및 설계에 반영하여 주탑 구조물이 재하 전 단계에서 체적변형을 제어할 수 있도록 해석기술이 필요하다.

3.3 구조 최적화 기술

교량의 지간이 길어질수록 구조물의 차량하중보다는 고정하중의 효과가 더 커지므로 상부구조의 고정하중에 따라 교량 전체의 경제성이 달라진다. 예로써,

- ㅇ 케이블교량은 경간장이 길어질수록 풍하중에 의하여 과다한 변형과 진동이 발생될 수 있으므로, 상부구조 단면은 풍하중을 최소화시킬 수 있도록 선정하고 설계되어야 하며, 자중을 최소화하면서 내풍안전성을 확보할 수 있도록 구조시스템과 단면이 선정되어야 한다.

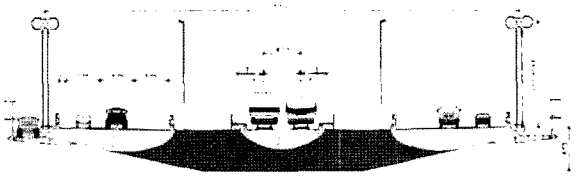


그림 4 이태리 메시나교(지간장 3,300m)의 단면 최적화 예

여기서, 최적의 구조시스템이란 Hybrid 재료, Hybrid 구조시스템을 포함하여 완공 후 뿐만 아니라 시공 중에도 시공성과 안전을 확보할 수 있는 시스템을 의미한다. 따라서, 다양한 재료과 구조부재의 결합, 그리고 시공과정을 손쉽게 모사할 수 있는 해석기술이 필요하다.

3.4 대변위/진동제어 기술

초장대교량은 진동의 영향이 크기 때문에 설계, 시공 및 유지관리시 면밀한 검토를 통하여 대책을 마련해야 한다. 초장대교량의 불안전성이 가장 높은 시기는 시공단계이며, 이때에는 바람이나 온도, 시공 정밀도 등에 따라 변형이나 진동이 발생되어, 이에 대한 제어대책이 마련되지 못하면 시공 자체가 어려워지거나 불가능해질 수도 있다.

- ㅇ 초장대교량에서는 지진하중과 풍하중뿐만 아니라 사용하중 상태에서도 거더의 처짐이나 주탑의 변형 등이

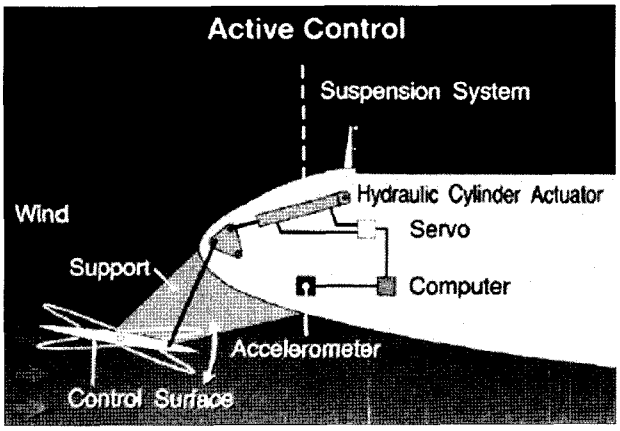


그림 5 능동제어 예시

크기 때문에 구조적인 안전성 외에도 대변형에 의한 사용성이나 2차응력에 대한 충분한 검토가 필요하다.

- 초장대교량의 각 부재 및 시설물(주케이블, 행어, 가로등 등)의 내풍 안전성과 사용성 확보를 위해서는 부재특성에 적합한 진동저감 기술이 필수적이다.
- 교량의 완공 후에 진동문제는 주로 사용성에 초점이 맞추어지나, 시공 중에 불안정한 구조물의 진동제어 문제는 구조물의 안전성에 직결되는 문제이므로 시공 중 진동제어는 매우 중요하다. 이 때, 수동제어와 함께 능동제어를 검토해 볼 필요가 있다.

3.5 CFD

초장대교량은 경간장 변화에 따른 구조계 변화가 다양하여 독특한 동적구조특성을 가지게 되므로 바람에 의한 거동 예측이 어렵게 된다. 초장대교량의 내풍 안정성 평가를 위해서는 교량 특성을 고려하여 매 교량마다 풍동실험을 실시해야 하므로, 이를 위해서는 많은 노력과 시간이 필요함은 물론 경제적인 부담이 커지게 된다. 따라서,

그림 6 Tacoma Narrow교 붕괴, 1940

- CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석방법은 풍동실험과 함께 초장대교량의 내풍설계 및 해석의 핵심이 되는 기술로서 유체-구조물간 상호작용을 고려한 전산해석 기술의 개발이 시급하다.
- 다양한 구조형식의 교량에 대하여 풍동실험과 CFD 방법에 의한 풍거동 평가 결과를 DB화하여 많은 시간과 경제적인 부담이 되는 풍동실험을 최소화하는 것이 필요하며, 이를 위하여 CWE(Computational Wind Engineering) 시스템 구축이 필요하다.

4. 맺음말

본 고에서는 시급히 극복해야 할 고도의 핵심기술 중 전산공학 분야에 대해서 일부 언급하였다. 실제 장대교량 분야의 세계시장 경쟁력이라 함은 공사비 절감이 핵심이라고 판단된다. 최적의 시스템으로 최상의 기능을 수행할 수 있는 교량을 선보이는 것만이 승리할 수 있는 요인이 된다.

이를 위해서는 구조 및 지반, 재료적 거동을 정확히 이해하고 모사하여 실제에 가까운 예측이 가능하도록 해야 한다.

더욱이, 앞으로는 성능기반의 설계법이 국제 표준화 되는 추세이고 이를 위해서는 확률론적인 접근이 더욱 절실해질 것이다. 단순히 안전위주의 접근보다는 보다 정교하고 복잡한 기술이 요구되며, 여기에 전산공학의 끊임없는 진화 내지는 발전의 필요성이 있다.