

# 서해대교의 유지관리

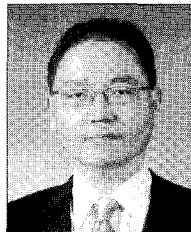
## Maintenance of the Seohae Bridge



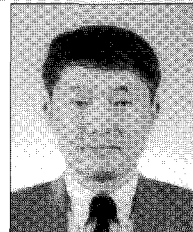
박종철\*



임채운\*\*



길흥배\*\*\*



박찬민\*\*\*\*

\* 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원  
 \*\* 한국도로공사 서해대교관리소 과장  
 \*\*\* 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원  
 \*\*\*\* 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원

### 1. 개요

2000년대 들어 서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 대형 교량이 완공된 것을 기점으로 하여 국내 케이블교량의 기술 수준과 시장은 급속히 성장하고 있다. 지난 해 개통된 국내 최장 사장교인 인천대교를 포함하여 2009년 말 기준으로 25 개의 케이블교량이 공용중에 있으며, 서·남해안의 국도 노선을 중심으로 하여 50여 개의 케이블교량이 계획·시공중에 있다. 이들 교량이 대부분 완성되는 시기인 2015년경이면 본격적인 유지관리체제로 접어들게 되어 유지관리기술의 중요성이 높아지고 있다.

일반적으로 케이블교량은 케이블로 지지되는 교량(cable-supported bridge)의 줄임말로써, 사장교(cable-stayed bridge)와 현수교(suspension bridge) 및 이들 두 교량의 복합형태를 포함하는 교량형식을 의미한다. 이러한 케이블교량의 유지관리는 케이블교량만이 가지는 독특한 구조적 특성 뿐만 아니라 사회·경제적으로도 중요한 시설물로 인식되기에 남다른 유지관리체계가 요구된다. 즉, 일반교량의 유지관리와 달리 별도의 전담조직을 두어 관리하는 것이 일반적이며, 이들 조직의 유지관리체계는 전문인력, 운영시스템, 점검 및 부대

시설로 구성된다. 운영시스템에는 체계적인 유지관리와 교량의 안전성 평가를 위하여 전산화된 교량관리시스템과 정보기술을 융합한 계측시스템이 포함된다.

본고에서는 보다 앞선 운영시스템을 도입한 서해대교 유지관리 전반에 대한 소개와 지난 십여 년간의 유지관리를 통해 얻은 경험과 축적기술을 설명하고자 한다.

### 2. 서해대교 현황

2000년 12월에 준공된 서해대교는 경기도와 충청남도 경계에 위치한 아산만을 횡단하는 해상교량으로써 총연장은 7,310m이며, 사장교와 PSC 박스거더교로 구성되어 있다(그림 1). PSC 박스거더교는 가설방법과 구조형식에 따라 FCM(Free Cantilever Method)에 의한 교량과 PSM(Precast Segmental Method)에 의한 교량으로 구분된다. 평택항의 주항로부에 위치하는 사장교는 990m의 5경간 연속교(60+200+470+200+60m)로써 강합성형이며, 주경간 기준으로 국내 두 번째 길이의 사장교이다. 예비항로부에 위치한 FCM교는 교장 500m(85+2@165+85m)의 4경간 연속교이며, 주두부가 교각과 강결된 라멘형식이다. PSM교는 60m를 한 경

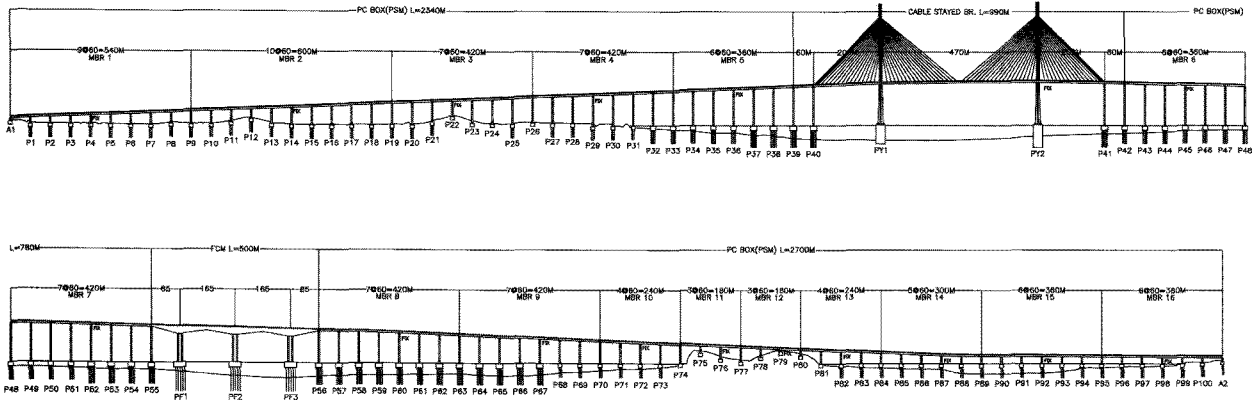


그림 1 서해대교 일반도

간으로 하여 3~10경간이 연결된 연속교가 16개가 있으며, 총 길이가 5,820m나 된다. 사장교의 교폭은 34m로 상·하행선이 일체지만, FCM교와 PSM교의 교폭은 31.4m로 상·하행선이 분리된 형태이다.

서해대교는 한국도로공사의 서해대교관리소가 유지관리를 담당하고 있으며, 전담조직으로 관리소장을 비롯한 운영팀, 홍보팀, 교량관리팀이 교량의 점검, 계측, 홍보, 전산 및 시설물관리 등의 업무를 수행하고 있다(표 1). 서해대교의 주요 통계치는 표 2와 같다. 교통량의 경우 1993년 실시설계 당시 2011년의 일교통량을 7만 8천여 대로 예측했는데, 2008년 실제 일교통량이 6만 9천여 대로서 향후 3년간의 증가율을 감안한다면 예측과 비슷한 것을 알 수 있다.

표 1 서해대교 인원 구성

구분	계	사무	토목	정보통신	전기	운전
인원	17	2	10	2	1	2

### 3. 서해대교 점검

서해대교의 점검은 시설물의 안전관리에 관한 특별법을 기본으로 하며, 국가적 시설물로서의 중요성을 감안하여 보다 강화된 자체규정에 의해 점검을 실시하고 있으며, 매년 도보점검을 비롯한 정기점검, 정밀점검, 특별점검 등을 시행하고 있다(표 3).

특별점검은 정기적인 점검 이외의 해빙기, 연휴기간 등 계절적인 이유와 기타 특수한 목적에 의해 실시한다. 특히, 신축이음장치에 대한 손상이 증가하는 추세여서 이에 대한 특별점검에 중점을 두었다. 신축이음장치의 경우 대부분 레일식 조인트의 서포트빔 하부패드 손상에서 일차적으로 발생하였으며, 레일파단으로 인한 신축이음장치 전면교체도 3건이 있었다. 2008년에는 서포트빔이 파손되어 임시 보수한 일부 신축이음장치를 교통 안전성 및 구조물 내구성 확보를 위해 레일식에서 핑거식으로 개량공사를 수행하였다.

표 2 서해대교 주요 통계치(2008년 기준)

구분	예산집행 (백만원)	방문객 (명)	기상(2001-2008년)		교통량(대)		전력사용량 (kwh)
			기온(℃)	풍속(m/s)	연간	일평균	
통계치	3,980	40,591 (12,223탐)	평균 13.5 최고 35.7 최저 -16.4	평균 4.72 순간 34.09 최대 23.17	25,278,685	평일 62,904 주말 84,596	1,235,112 (128백만원)

표 3 서해대교 점검

구분	점검 방법	점검 빈도	현행법규	
주간도보점검	도보에 의한 육안관찰	1회/주		
정기점검	육안 및 접근가능부위 육안점검	2회/년	좌동	
정밀점검	초기점검	시설물관리를 위한 초기자료 축적	준공후 6개월 이내	좌동
	정밀점검	교량전체에 대한 정밀점검	행선별 1회/2년	B급 1회/2년
정밀안전진단	교량전체에 대한 정밀안전점검	준공후 10년, 이후 5년	B급 1회/5년	
긴급점검	특별점검	필요시(태풍, 우기, 결함발생시 등)	필요시	
	손상점검	각종 사고 등 구조물 손상 발생시	손상발생시	

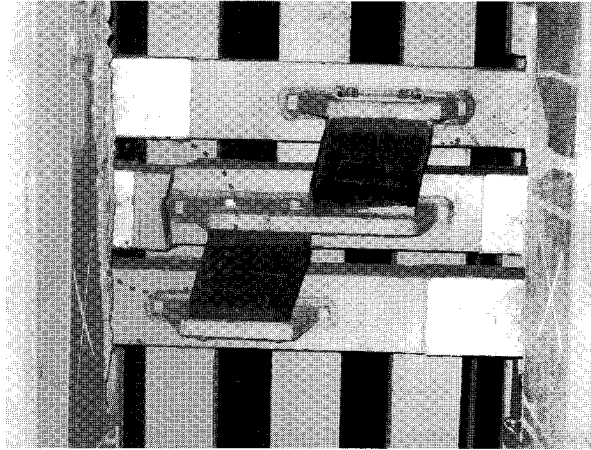


그림 2 신축이음장치 서포트빔 파손사례

정기점검은 교량의 상태변화를 관찰하여 손상을 조기에 발견함으로써 시설물의 기능적 상태를 판단하고 정밀조사가 필요한 부위를 파악하기 위함이며, 두 개조로 구성된 점검인원이 매년 상·하반기 2회 실시하고 있다. 정밀점검은 시설물의 물리적·기능적 결함을 조기에 발견함은 물론 신속하고 적절한 조치를 취함과 동시에 구조적 안전성 및 결함의 원인 등을 조사·측정·평가하여 장·단기 보수 계획 등 유지관리 업무에 활용코자 하기 위함이며, 두 개조로 구성된 점검인원이 상·하행선을 구분하여 2년 단위로 번갈아 수행하고 있다(표 4). 정밀점검시 상부구조의 접근을 위한 굴절식 교량점검차와 사장교 점검대차, 해상부 교각 점검을 위한 해상보트 등이 사용된다. 특히, 서해대교 전

구간에 대하여 부재별, 중요성의 우선순위별 혹은 하자유형 조사분석을 통하여 하자발생 빈도가 높은 부재를 대상으로 기획점검을 실시하여 점검업무의 합리성을 도모할 수 있었다. 교량 및 주요 부재의 기획점검은 점검의 집중도를 높이고, 동일부재를 짧은 시간에 집중적으로 점검함으로써 점검 일관성 확보 및 보수보강 공사를 개별점검 후 실시할 수 있어 유지관리에 유리한 점이 많다.

점검결과는 서해대교 교량관리시스템(SHBMS)에 전산입력된다. SHBMS는 서해대교의 효과적인 점검 및 손상 이력 관리를 위해 준공 당시 개발된 전산화된 유지관리용 시스템으로서 IT기술의 발전과 디지털 영상기술의 발전을 기반으로 지속적인 업그레이드가 이뤄졌다. 기존의 텍스트 위주의 관리시스템과 점검대장을 이용하여 점검이력관리를 하는 방법은 점검정확도가 떨어지고, 이원화된 점검시스템으로 점검효율성이 떨어지는 단점이 있었다. 그러므로 개선된 유지관리시스템에서는 점검대장을 관리시스템에 포함시켜, 점검이력관리 업무를 일원화하였으며, 디지털 사진 및 외관 조사망 그림을 이용하여 그래픽 중심의 유지관리시스템을 개발하여 점검 후 점검기록시 발생할 수 있는 위치와 점검자의 주관적인 판단을 보정함으로써 점검의 정확성과 효율성을 증대시켰다(그림 3). 지금이야 디지털 사진이 보편화되고 당연시되는 세상이 되었지만 첫 개발 당시를 돌이켜 보면 점검사진을 시스템에 업로드하기 위해 보편화된 필름 카메라와 스캐너를 적용하느냐 아니면 갓 나오기 시작한 디지털 카메라를 적용하느냐를 두고 중대한 내부적 토의를 거쳤던 기억이 새롭다.

표 4 서해대교 정밀점검 세부일정

구분	점검 일수	정밀점검						
		굴절차 점검		해상 점검		일반구간 점검		
		위 치	일수	위 치	일수	1조	2조	일수
평균		3기		6.3기/일				
계	156		35		13			83
3월	19	P1~P21(22) PF1~P69(23)	15					
4월	19	P21~P35(15) P65~P86(15)	10	(PY1~2, PF1~3) P56~72)	3			
5월	20	P35~P51(12) P86~P96(10)	8	(P82~P100)	4	포장, 케이블 등 노선상부 점검 (A1~P55, 4,110m)	포장, 조인트 등 노선상부 점검 (P55~A2, IC, 7,237m)	6
6월	15	P51~P55(4)	4			내부점검(A1~P35)	내부점검(FCM, P55~75)	13
7월	7					내부점검(P35~P55)	내부점검(P76~89)	7
8월	6					이동식점검차(강형구간)	내부점검(P90~A2)	6
9월	16					이동식점검차(보강형)	내부점검(IC 2교~3교)	16
10월	21			전구간(41기)	6	사장교(기초)	내부점검(IC 1교)	2
11월	19					사장교(주탑)	내부점검(IC 4교~5교)	19
12월	14					육상부 교각점검(56기)	육상부 교각점검(35기)	14

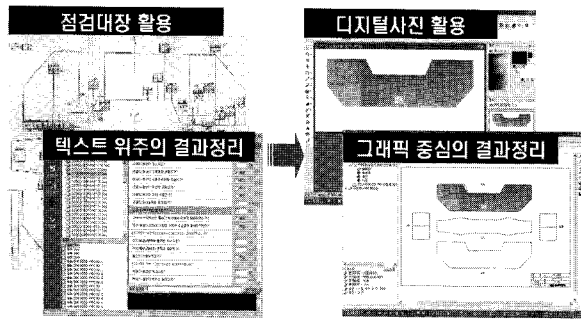


그림 3 서해대교 교량관리시스템 개선사항

2009년에는 SHBMS의 운영체제를 서버 클라이언트(CS) 방식에서 웹(web) 방식으로 변경하였다. 기존 CS방식은 타 부서에서 조화나 공유가 불가능한 단점이 있었다. 또한 특수 부재의 다양화 및 각종 부재의 세밀한 분류로 인하여 시스템 사용이 복잡함으로 인하여 시스템 입력 및 관리방법을 개선시켰다.

#### 4. 서해대교 계측

서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 케이블교량에는 체계적인 유지관리와 안전성 평가를 위하여 전산화된 교량관리시스템과 더불어 계측시스템이 구축되어 운영되고 있다. 이 들 교량에 있어서 계측시스템 기술인 구조전전성모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)은 교량 유지관리의 한 분야로써 지난 이십여 년간 세계적으로 많은 발전을 이뤘었다. 서해대교의 주요 부위에 설치된 계측센서로부터 수집된 신호는 데이터로거를 통해 광통신으로 서해대교관리소에 설치된 계측서버로 실시간으로 전송된다. 이렇게 전송된 신호는 통계처리 및 분석과정을 거쳐 데이터베이스에 저장되며, 교량 관리자는 실시간 자료 및 저장된 데이터베이스를 조회하며, 이를 통해 교량에 발생하는 다양한 상황에 적절히 조치할 수 있도록 한다.

서해대교 개통과 더불어 운영을 시작한 계측시스템은 계측 장비와 통신장비의 노후화로 인하여 2008년과 2009년에 재구축사업이 수행되었다. 재구축사업에서는 8년간의 운영경험과 축적된 데이터 분석을 토대로 계측센서에 대한 개선방안 및 선별작업이 이뤄졌으며, 유닉스 기반 하에 웹 GUI(Graphic User Interface)를 구현하였다(그림 4). 계측대상 구간을 사장교로 특정하고, 장기적인 관점에서 효율성이 떨어지는 센서는 줄이거나 제외하였으며, GPS(Global Positioning System)를 새롭게 도입한 것이 재구축사업의 큰 특징이다(표 5, 표 6). 상대적인 물리값을 나타내는 기존 센서의 한계를 극복하고 절대변위 측정을 통해 교량의 형상관리가 가능하고 안개나

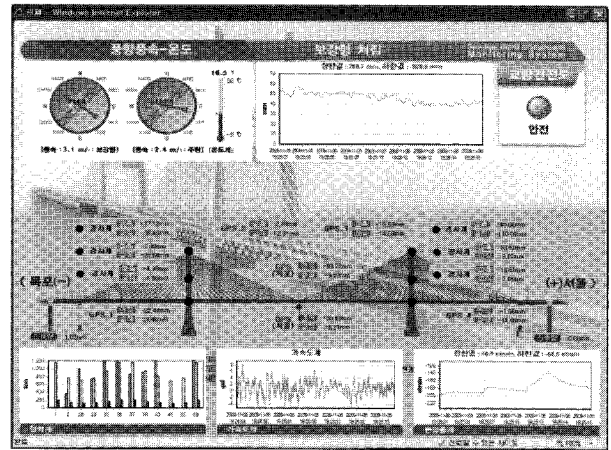


그림 4 서해대교 계측시스템 웹 GUI

표 5 기존 센서종류 및 수량(2000년)

센서종류		수량	사장교	FCM	PSM	
계		190	121	42	27	
정적	경사계	6	6	-	-	
	변위계(수위식)	3	-	2	1	
	변형률계(진동현식)	5	5	-	-	
	신축변위계	2	2	-	-	
	온도계	24	14	10	-	
	하중계	4	-	2	2	
동적	가속도계(1축)	Force Balance형	28	20	4	4
		Piezoelectric형	24	24	-	-
	처짐계(레이저식)	1	1	-	-	
	변형률계(전기저항식)	87	44	23	20	
	지진계	2	2	-	-	
풍향 풍속계	조음파형	2	2	-	-	
	프로펠러형	2	1	1	-	

표 6 재구축시 센서종류 및 수량(2009년)

센서종류		수량	비고	
계		96		
정적	경사계	6	교체	
	신축변위계	2	교체	
	온도계	18	교체, 추가	
동적	가속도계	Force Balance형	21	교체
		Piezoelectric형	24	교체
	처짐계(레이저식) <sup>주)</sup>	2	교체	
	변형률계(전기저항식)	10	교체	
	지진계	2	교체	
	풍향풍속계(프로펠러)	3	교체	
GPS 시스템	8	신규		

주) 기존 처짐계 1개를 FCM교에 이동설치

강우와 같은 측정방해 요소에 대한 제약이 적은 것이 GPS의 장점이다. 사장교 온도계의 경우는 다른 센서와 달리 오히려 늘렸다. 이는 교량의 응답에 영향을 미치는 지배적인 요소가

온도와 같은 환경요소이기 때문에 이를 정확히 분석할 필요가 생겼기 때문이다. 즉, 케이블교량의 지배적인 설계하중은 지진이나 바람 - 경우에 따라서는 편재하나 만재하된 차량하중 - 이지만 이는 공용중 발생가능성이 희박하여 교량 응답으로 나타나지 않는 반면, 평상시에는 온도에 의한 거동이 가장 크기 때문이다.

서해대교의 축적된 장기 계측데이터를 토대로 연간 보고서 발간 및 다양한 연구가 수행되었으며, 이는 서해대교의 유지관리에 직·간접적으로 활용되거나 설계에 피드백되었다. 대표적인 유지관리 활용사례로 신축량 계측을 통해 신축거동이 원활하지 않은 것을 확인하여 P39 받침부를 교체(2002년)하였고, 교량 동특성 계측 및 버퍼링 해석결과를 반영한 케이블 덤퍼 교체(2006년)가 있다. 또한 설계에 대한 피드백으로는 변형률 계측을 통해 밝힌 케이블교량의

충분한 활하중 여유도는 ‘케이블강교량 설계지침’의 설계 활하중 감소에 인용된 바 있다. 준공후 현재까지의 주요 계측데이터 분석결과를 표 7에 정리하였다.

또한 장기간의 연구를 통해 데이터 상관분석을 위한 통계분석기법, 온도거동을 규명하는 SARX(Singular spectrum analysis based AutoRegressive eXogenous)모델, 모드형상을 실시간 추출하는 TDD(Time Domain Decomposition)기법, 데이터 성분추출 프로그램 등을 그림 5~7과 같이 개발하였으며, 재구축사업시 시스템에 적용시켰다.

### 5. 서해대교 재난 및 통합관리

‘고속도로 재난관리매뉴얼’에 따라 재난유형별 재난관리 체계를 구축하고 있으나 해상교량인 서해대교 기상특성을

표 7 주요 계측데이터 분석결과

구분	계측데이터 분석결과	비고
고정하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 실측 고정하중, 장기계측을 반영한 유한요소모델 업데이트 및 설계검증</li> <li>■ 계측/형상측량을 통한 보강형 캠퍼관리 : -10cm 변화</li> <li>* 크리프, 건조수축에 의한 장기처짐입</li> </ul>	2007년 (4차측정시)
활하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 설계차량하중의 5~12% 이내</li> <li>■ 피로응력 : 허용피로응력(상세범주 B, C) 이내</li> </ul>	
온도하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 설계온도범위 이내 : 설계 -20/20/55℃ &gt; 계측 -17/13/42℃</li> </ul>	보강형
케이블장력	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 설계장력 이내 : 준공 초기 케이블장력의 92~104%</li> </ul>	
풍하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 설계풍속 이내 : 설계 53m/s &gt; 계측 33.9m/s</li> <li>* 계측값은 Gumbel분포에 의한 100년 재현풍속임</li> <li>■ 풍속모델 : Weibull, Gumbel 적용 타당</li> <li>■ 풍거동 : 변위응답은 설계값 이내</li> <li>* 예 : 수평변위 설계 ±189mm &gt; 계측 ±10~30mm</li> <li>■ 주풍향 : 북서풍</li> </ul>	상관높이
지진하중	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 실제 지진시(소규모) 구조거동 정상</li> <li>* 2003.10.13 18:12 충남 당진 규모 3.6 지진시 3.45gal 관측</li> </ul>	
크리프, 건조수축	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 주탑변위(PY1/PY2) : 설계 +57.7/-19.8mm &lt; 계측 +87.7/-32.4mm</li> <li>* 설계값은 준공후 30년임</li> </ul>	2008년
지점침하	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 계측 및 형상측량 결과 침하 없음</li> </ul>	주탑기초

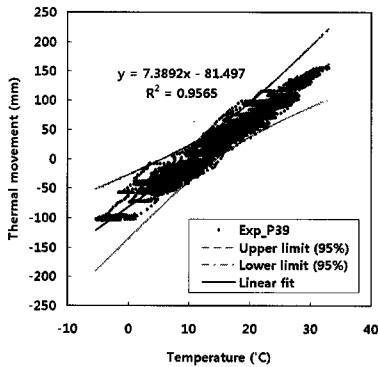


그림 5 상관분석을 이용한 온도-신축거동 분석

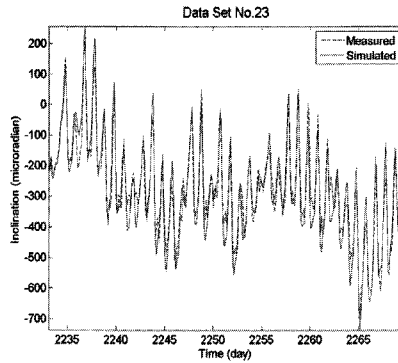


그림 6 SARX모델을 이용한 주탑 경사 분석

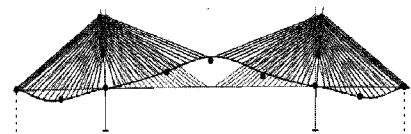


그림 7 TDD기법을 이용한 모드형상 추출

고려하여 자체규정으로 강풍 및 안개 대비태세를 강화하였으며, 풍수해, 테러대응, 안개, 설해, 교통사고, 구조물붕괴,

강풍 등에 대비한 매뉴얼을 작성하고 주기적으로 모의훈련을 실시하고 있다. 2009년에는 서해대교 재난상황 단계별 비상근무 기준 및 도로전광표지 운영기준을 재정립하여 재난관리체계를 개선하였다. 비상근무 기준을 관심, 주의, 경계, 심각단계로 분류하고, 태풍경보 발효시 기준을 보다 세분화하고 심각단계시 교대근무 체계를 구축하였다.

표 8 재난시 비상근무 기준

재난유형	단계	기준	비고
풍수해	관심	호우예비특보	
	주의	호우주의보, 태풍예비특보	
	경계	태풍주의보 : 풍속 14~17m/s 미만	
	심각	호우경보, 태풍경보(비, 바람 3급) : 풍속 17~24m/s 미만 태풍경보(비, 바람 1~2급) : 풍속 25m/s 이상	2교대
강풍	관심	강풍예비특보	
	주의	강풍주의보 : 풍속 14~21m/s 미만	
	경계	강풍경보 : 풍속 21~25m/s 미만	
	심각	풍속 25m/s 이상	2교대
설해	관심	대설 빈발시기	
	주의	대설예비특보, 적설량 3cm 내외 예상시	
	경계	대설주의보	
	심각	대설경보	
안개	관심	안개예보시	
	주의	시정거리 250m 이하	
	경계	시정거리 100m 이하	
	심각	시정거리 30m 이하 시정거리 10m 이하	2교대

준공 당시 개별적으로 개발된 각종 시스템들과 공용중 추가된 시스템들이 이원화되어 있어 효율적 유지관리나 신속한 재난대응에 어려움이 있어 2009년 이들을 통합하여 종합상황실 및 통합관리시스템을 구축하였다(그림 8). 즉, 계측, 교통, 교량정보, 정보통신 및 기타 전기시설물을 관리하는 시스템들을 한 곳으로 모으고, 관제화면은 평상시와 이상상황 발생시로 구분하여 효율적인 관리를 할 수 있도록 구성하였다. 평상시 중앙의 메인화면에는 도로상황을 감시할 수 있도록 CCTV 화면을 배치하였다. 교량의 계측시스템은 계측기기의 종류 및 배치현황, 실시간 모니터링, GPS시스템을 활용한 형상관리 및 데이터베이스 조회화면으로 구성하였다. 교량정보시스템은 교량의 기온, 시정거리, 교통량, 풍속, 강우량 및 차량속도를 관리하는 기상정보시스템, 도로자동감지 및 HBMS로 구성하였다. 교통관리시스템은 도로전광표지(VMS), 비상방송, Hi-Man 및 교통속보 시스템으로 구성하였다. 기타시설물 관리시스템으로 소형전광판, 가로등제어, 전기염해 및 소음관리시스템을 관리하도록 되어있다.

표 9 도로전광표지 운영기준

구분	기상조건	제한속도
강풍	14~21m/s 미만	80km/h
	21~25m/s 미만	50km/h
	25m/s 이상	교통통제
안개	250m 이하	80km/h
	100m 이하	50km/h
	10m 이하	교통통제
강설	적설량 2cm 미만	80km/h
	적설량 2cm 이상	50km/h
	통행제한 필요시	교통통제
강우	강우시	80km/h

## 6. 맺음말

활성화된 국내 케이블교량 시장은 2015년경이면 본격적인 유지관리체제로 접어들게 된다. 서해대교 건설을 통해 케이블교량의 설계와 시공기술 발전의 토대를 마련한 것처럼 십여 년에 가까운 서해대교의 유지관리를 통해 축적된 경험이 물모델로서 유지관리기술의 발전에 기여할 수 있기를 기대한다. 이를 위해 서해대교와 같은 대형 시설물의 유지관리

표 10 재난관련 주요 시설물

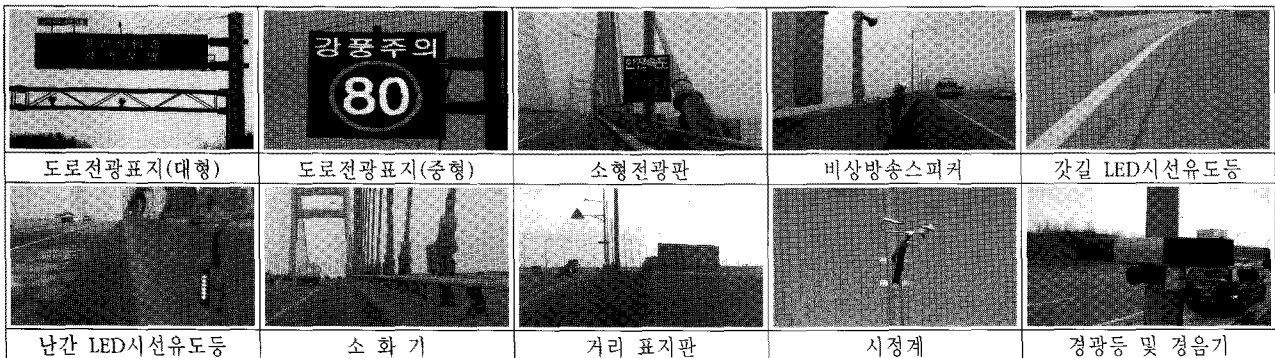




그림 8 종합상황실 관제화면

를 위해 현장에서 노고를 아끼지 않는 전문가들이 있음에 감사한다. 향후 유지관리기술의 발전방향은 IT를 융합한 스마트 모니터링 기술, 통합시스템 구현 및 연계 기술, 로봇을 활용한 점검 기술, 신속한 재난대응 기술로 집약되며, 현재 초장대교량사업단의 ‘Test Bed 사업지원 및 운영기술 개발’ 연구에서 이들 내용이 수행되고 있는데 바람직한 성과를 낼 수 있기를 기대한다.

### 참 고 문 헌

1. 김종훈, 문정원, 이일근, “서해대교 유지관리체계 및 발전방향”, 한국구조물진단학회지, 제10권, 제3호, 2006.
2. 대한토목학회, 케이블강교량 설계지침, 2006.
3. 박종철, 박찬민, 송필용, “계측자료를 이용한 서해대교 사장교 구간의 구조거동 평가“, 대한토목 학회논문집, 제24권, 제2A호, 2004.
4. 박종철, “케이블교량 구조건전성모니터링 기술의 현재”, 한국전산구조공학회지, 제20권, 제1호, 2007.
5. 한국건설교통기술평가원, 초장대교량사업단 상세기획 보고서, 2008.
6. 한국도로공사, 2008년 서해대교 계측보고서, 2009.
7. 한국도로공사, 2008년 서해대교 유지관리 실적보고서, 2009.
8. 한국도로공사, “케이블교량의 장기계측데이터 활용에 관한 연구”, 연구보고서, 2007. [R]

[담당 : 백종균, 편집위원]