

토목부분- 유지관리 기술동향 및 발전방향에 관하여

KCEM



공정식, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수
 박경훈, 한국건설기술연구원 선임연구원
 임종권, 아이엠기술단 대표이사

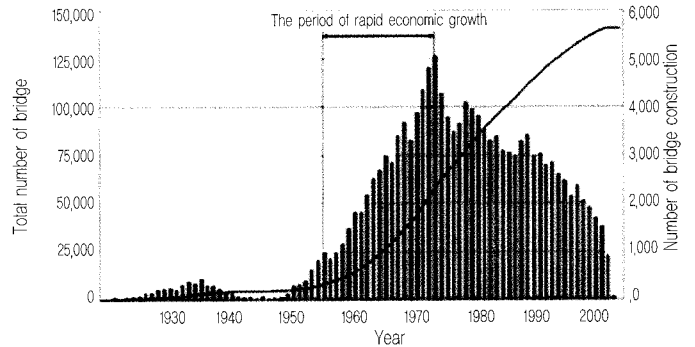


그림 1. 일본의 연도별 교량 신축 개소 및 누적량

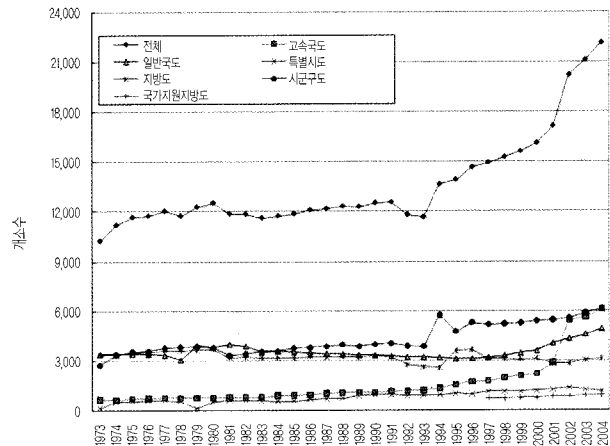


그림 2. 국내의 관리 주체별 연도별 교량 개소 누적량

1. 서론

일반적으로 선진국의 경우 사회기반시설물의 건설은 2차 세계대전 후인 50년대부터 증가하기 시작하여 1970년대 및 80년대에 정점을 이루고 있는 경향이 있다. (그림 1) 국내의 경우 6.25 전쟁의 여파로 선진국 보다는 사회기반시설물의 본격적인 건설이 늦어졌으나 경제적 성장이 이루어지던 70년대부터 사회기반시설물의 확충이 이루어져 왔으며 교량의 경우 90년대 초에는 지자체의 사회기반시설물 확충 및 2000년대 초에는 고속도로 교량의 확충으로 많은 수의 교량이 신설되었다. (그림 2)

국내의 경우 경제 성장 최우선 기조로 인해 시설물의 유지관리 보다는 신규건설에 대부분의 건설 역량이 집중 되었으며 이러한 불균형은 성수대교 붕괴(94년), 삼풍백화점 붕괴(95년) 등 90년대 연쇄적으로 발생한 주요 사회기반시설물의 붕괴를 야기하는 결과를 낳았다고 해도 과언이 아니다.

성수대교 붕괴로 사망 32명 부상 17명의 인명피해가 발생하였고 삼풍백화점의 경우 사망자 501명, 실종 6명, 부상 937명의 인명 피해가 발생하는 등 주요 사회기반시설물의 파괴는 시설물의 폐기 및 신축 비용을 제외하더라도 심각한 경제적 손실을 야기한다.

재난에 가까운 붕괴가 아니더라도 일반적으로 많은 사회기반 시설물은 환경 또는 하중의 영향으로 인해 점진적 열화를 경험하게 되며 적절한 유지관리 조치가 수반되지 않는 경우에는 시간이 지날수록 기능을 상실하게 된다. 잘 설계된 구조물의 경우, 공용기간을 넘어서도 열화의 정도가 심각하지 않은 경우도 있으나 적절히 유지관리 되지 못한 시설물의 경우 심각한 사회비용 손실을 유발하기도 한다. 일례로 1986년 준공된 당산철교는 공용수명의 반을 채우지 못하고 철거 및 신설됨으로서 1,000억원 이상의 비용 손실을 야기하였다. 표 1은 세계의 주요 교량 붕괴 피해 사례를 보여 주고 있으며 설계 및 시공 결함 뿐 아니라 부적절한 유지관리가 교량 붕괴의 큰 원인임을 보여주고 있다. 따라서 선진국에서는 주요 사회기반시설물의 유지관리를 위해서 다양한 정책을 수립하고 막대한 예산이 투입되고 있는 실정이다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 세계 최강 기술국이라 자처하는 미국에서조차 현지시간으로 2007년 8월 1일 미시시피강을 가로질러 미네아폴리스의 도심지를 연결하는 고속도로(I-35W)가 붕괴하여 인명사상 피해를 유발하는 등 토목 시설물 유

지관리의 기술적 수준은 선진국에서도 아직 완벽히 확보되어 있다고 볼 수 없다.

본고에서는 토목 관련 사회기반 시설물의 국내외 유지관리현황을 살펴보고 유지관리를 위해 필요한 항목들을 분석함으로써 비용 뿐 아니라 성능 효율적인 시설물 유지관리를 위하여 고려되어야 할 사항들에 대해 논하고자 한다. 유지 관리 되어야 할 사회기반시설물은 매우 다양하여 모든 사회기반시설물의 유지 관리에 대한 현황을 파악하고 분석하기에는 필자의 지식에 한계가 있다. 따라서 본고에서는 주요 사회기반시설물 중 하중 및 환경의 영향이 비교적 심각하고 유지관리에 따른 사회경제적 파급 효과가 비교적 큰 교량 구조물을 위주로 사회기반시설물의 현황과 향후 방향에 대한 논의를 하고자 한다. 특히 교량 구조물은 그 중요성 때문에 세계 각국에서 다양한 Bridge Management System(BMS)을 개발하여 관리하고자 하고 있으며 이러한 관리 시스템은 타시설물의 관리 시스템 개발의 프로토타입을 제공하는 측면이 있으므로 타시설물의 유지관리 방향 설정에도 도움이 되리라 판단된다.

표 1. 교량 붕괴 피해 사례

국가	교량명	교량형식	붕괴일시	붕괴위험	피해	비고
미국	wheeling교	현수교	1854. 05. 17	바람에 의한 flutter 현상	-	-
미국	Ashlabula교	트러스교	1876. 12. 29	설계, 시공결함	열차 6량, 사망 90명	경제성 잉여 부재수 과다 절감
스코틀랜드	타코(Tay bridge)	트러스교	1897. 12. 28	설계, 시공결함	열차 6량, 사망 75명	건설 후 2년만에 붕괴
캐나다	Queec교	켄틸레버	1907	설계, 시공결함	사망 75명	경제성 잉여 부재수 과다 절감
미국	나이아가라 폭포교(Falls View Bridge)	아치교	1938.01. 27	빙하로 인한 교대 손상	사전 교량통제로 인명 피해 예방	-
스웨덴	Sando Arch Bridge		1939	설계결함	-	-
미국	타코마교(TacomaNarrows Bridge)	현수교	1940. 11. 07	바람에 의한 flutter 현상	차량 2대	건설 후 3년만에 붕괴
캐나다	Peace River Bridge		1957	하상세굴(scour)	-	-
미국	제2내로우교(Second Narrow Bridge)	트러스교	1958. 06. 17	기존 교량의 확장공사 중 발생	사망 18명	1930. 9.13 바지선의 충돌로 1차 붕괴사고 발생
호주	King Street Bridge		1962	강재 재질 및 설계 결함	-	-
미국	Silver Bridge	현수교	1967. 12. 15	현수교 suspension chain eye bar의 피로 파괴	차량 37대, 사망 46명, 부상 9명	FCM(Fracture Critical Member)에 대한 연구 시작
스웨덴	Alm Bridge		1970	선박충돌	-	-
호주	West Gate교	steel box	1970.10. 15	시공결함	사망 35명	-
미국	Sunshine Skyway Bridge	트러스교	1980. 05. 09	돌풍으로 인한 화물선 교각 충돌	-	차량1대, 사망 35명
미국	Mianus river Bridge	트러스교	1983. 06. 28	Pin hanger의 과도한 corrosion에 의한 손상	차량 4대, 사망 3명, 부상 3명	-
미국	Schoharie Creek Bridge		1987. 04. 05	하상세굴(scour)	차량 5대, 사망 10명, 부상 3명	-
대한민국	성수대교	트러스교	1994. 10. 21	Fatigue	사망 32, 부상 17명	-
미국	Arroyo Pasaiero Bridge		1995. 03. 10	하상세굴(scour)	사망 7명	-
미국	Wainut Street Bridge	트러스교	1996. 01	하상세굴(scour)	-	-
이스라엘	Maccabian 보도교		1997	설계, 시공결함	사망2명, 부상 60여명	-
미국	laegar교		1998. 01	해체작업 중 중앙지간 추락	사망 1명, 부상 2명	-
트리니다드 토바고	Lance Milan 현수교		1998	노후화	-	-
일본	kurushima교		1998. 06	케이블 파단에 의한 가지주 단면 전복	사망7명	-
남아공	Injaka교		1998. 06	시간붕괴	사망 14명, 부상 13명	-
미국	Lowe Motor Speedway pedestrian교		2000. 05. 20	-	사상 109명	-
미국	Hoan Bridge		2000. 12. 13	Steel Girder의 손상으로 과도한 처짐 발생	-	폐쇄 후 폭파로 철거
미국	Queen Isabella Causeway		2001. 09. 15	바지선 충돌	차량 12대, 사망 8명	-
포르투갈	Castelo de Paiva교		2001. 03. 04	노후화	차량 3대, 사망 67명	-
포르투갈	Douro River Bridge		2001.05	하상세굴(scour)	사망 70여명	-
미국	Arkansas River Bridge		2002. 05. 26	바지선 충돌	사망 70여명	-
멕시코	만자날로 교량		2003. 11	상판 낙고	-	-
중국	텐찰타이대교		2004. 06	하상세굴(scour)	-	-
인도네시아	알페라교	2004. 12	강재부식	-	-	주민들의 방노로 붕괴위험
나이지리아	누카이교		2005. 08	하상세굴(scour)	20여명 실종	-

2. 본론

2.1 사회기반시설물 유지관리 현황

사회기반 시설물 유지관리의 목적은 최소의 비용으로 요구되는 성능을 만족하도록 사회기반시설물을 유지관리하는 것으로 축약될 수 있으며 사회기반시설물 유지관리의 내용은 크게 시설물 유지관리 데이터베이스, 비용 모델, 성능 모델 및 유지관리 의사결정 부분으로 구분할 수 있다. 이는 다시 시설물 기본 자료 DB, 시설물 제원 DB, 유지관리 DB, 비용정식화, 비용발생시기 예측, 성능/ 상태 분석, 진단점검, 성능/상태 예측, 보수보강, 프로젝트 레벨 시설물 관리 및 의사결정 모델, 네트워크레벨 시설물 관리 및 의사결정 모델 등의 세부항목으로 구분할 수 있으나 현재까지 개발 사용되고 있는 시설물 관리 시스템은 이들 항목을 모두 포함하는 경우는 거의 없고 그 중 기본이 되는 몇 가지 항목을 이용 시설물 관리의 기초적인 자료만을 분석 제공하고 있는 실정이다. 본고에서는 국내외 시설물 유지관리 관련 제도 및 시스템을 간략히 분석함으로써 구조물 유지관리의 현황을 짚어보고 차세대 시설물 유지관리 시스템의 구성 요소를 파악해 보고자한다.

2.2 각국 유지관리 현황 및 시스템

사회기반 시설물 마다 고려되는 공용수명은 다르나 교량의 경우 비교적 심각한 환경조건에서 30년 정도가 지나면 주요 보강이 이루어진다는 점을 고려할 때 제2차 세계대전 이후 많은 기반시설물을 건설한 선진국에서 80년대에 이르러 시설물의 효율적인 유지관리를 위해 다양한 노력을 경주하고 있는 것은 당연한 조치로 판단된다. 시설물 관리의 중요성이 증대하며 CEB, FIP, IABSE, OECD, PIARC와 같은 다양한 국제기구와 BAST, LCPC, NCHRP, TRL과 같은 연구 기관들로부터 시설물 유지관리와 관련한 연구가 수행되었으며 보고서들이 제출되었다. 또한 유지관리와 관련한 표준화 작업은 AFNOR, ASTM, BSI, CEN, DIN, ISO와 같은 기관에서 연구되어져 왔다.

일례로 ISO에서 2001년 기존 시설물 평가를 위한 가이드라인이 제시되었으며 (ISO 13822: Bases for design of structures, Assessment of existing structures, preliminary and detailed assessment) 토목과 관련한 5개의 국제기관(CEB, CIB, fib, IABSE, and RILEM)이 협력하여 1971 결성한 the

Liaison Committee에서 구조물의 안전도 평가 기술 발전을 위해 발족시킨 JCSS (Joint Committee on Structural Safety)에서는 2001년 구조물 안전도 평가 확률 모델을 이요하여 시설물 유지관리 평가의 기본 모델을 수립하였다.

2.2.1 유럽

국제 기준에 부합하는 시설물 평가 모델에 따른 시설물 유지관리 기법은 유럽에서 활발히 개발 되었으며 유럽연합의 발족과 함께 다양한 연구가 수행되어 왔다. 그 중에서도 대표적인 연구는 COST345 (Procedures required for assessing highway structures, European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, European Commission, Brussels), LIFECON (Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, European Union, Brussels), BRIME (Bridge Management in Europe), SUSTAINABLE BRIDGES (Sustainable Development, European Union, Brussels), SAMCO (Structural Assessment Monitoring and Control, European Union, Brussels), SAMARIS (Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures, European Union, Brussels) 등을 꼽을 수 있으며 이와는 별도로 각국 마다 각국의 실정에 맞는 시설물 관리

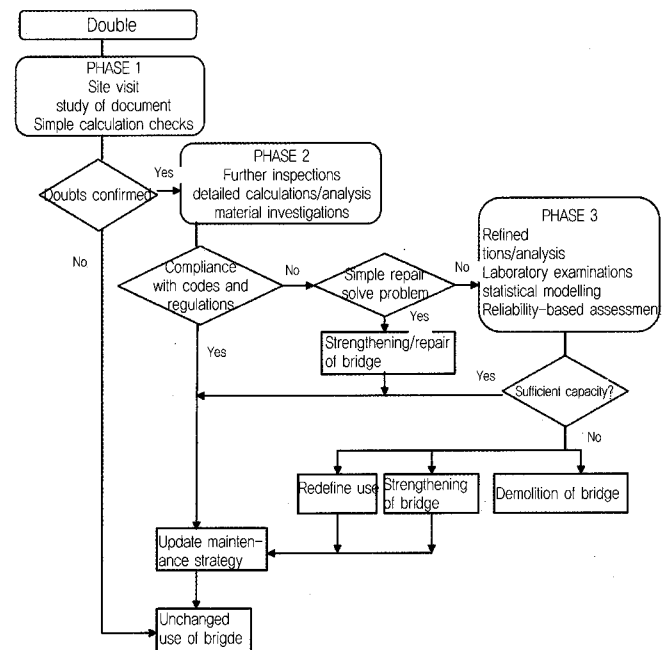


그림 3 Sustainable Bridges에서 제안한 시설물 평가 순서도

체계를 구축하고 있다. 일례로 영국 등에서는 Highway Agency에서 개발한 Design Manual for Roads and Bridges(DMRB, Highway Agency 1998)에 터널을 포함한 도로관련 시설물의 관리에 대한 부분이 수록되어 있으며 (DMRB 3.1.3 - 3.1.6), Office of Government Commerce에서 발행한 Whole-life Costing and Cost Management 가이드라인에는 시설물의 생애주기비용분석에 대한 방법들이 소개되어 있다. 그림 3은 Sustainable Bridges에서 제안한 시설물 평가 순서도를 보여주고 있다. 재미있는 사실은 시발점이 Doubts로 규정되어 있다는 점이다. 이는 각국마다 다를 수 있는 시설물 관리 프로세스의 시발점을 분쟁의 소지 없이 규정하려는 노력의 일환으로 보인다.

앞서 열거한 기관에서 수행한 대부분의 연구 결과는 시설물 관리시스템 개발이라기 보다는 시설물 유지관리를 위한 가이드라인 작성의 성격이 강하다. 일례로 COST345 보고서는 하중(action), 부재 물성에 따른 결함의 종류(defects), 진단(inspection), 비파괴검사 및 재하시험을 포함한 다양한 조사(investigations), 자료관리(data management), 상태평가(condition assessment), 자격 및 검증(qualification and certification) 등으로 구성되어 있으며 유럽 여러 국가의 현황을 조사하고 이를 바탕으로 작성한 제안을 수록하고 있다.

BRIME에서는 기존의 교량관리시스템(BMS)을 검토하고 통합적인 BMS를 제안하고 있다. BRIME에서는 세계 여러 나라에서 통용되고 있는 BMS를 파악하고자 설문지를 작성하여 배포하였으며 이중 16개 단체로부터 받은 설문 결과를 분석 정리하였다. 설문 결과 12기관이 컴퓨터 기반의 BMS를 사용하고 있으며 대부분의 국가는 3-5 단계의 상태 등급 기반 DB를 구축하고 있으나 DB의 형식 및 구성은 제각각 달라 Norway의 경우 147개의 Table에 1228개의 필드를 사용하는 반면 Finland의 경우 250개의 데이터 필드를 사용하고 있는 것으로 조사되었다. 설문 에 응한 16개 기관은 미국(FHWA, CA - California DOT[Department of Transportation], NY - New York city DOT), 스웨덴(SE), 포르투갈(PT), 아일랜드(IE), 크로아티아(CRO), 벨기에(BE), 슬로바니아(SI), 스페인(E), 영국(UK), 프랑스(F), 독일(D), 노르웨이(NO), 핀란드(FIN), 덴마크(DK)이며 설문 조사 내용 중 FHWA를 제외한 다른 기관에서 응한 BMS 현황을 요약한 표를 보고서에 수록하고 있다. (표 2, 표 3). 보고서로부터 비교적 많은 국가 및 기관에서 BMS를 운용하고 있으며 현황 파악만을 위한 데이터베이스 수준을 넘어 유지관리를 위한 의사결정 지원도구로 활용하려 한다는 것을 알 수 있다. 하

지만 의사결정 지원도구의 핵심 요소인 건전도 평가(safety assessment), 생애주기비용분석(whole life costing), 열화 예측(deterioration prediction), 보수보강 대안 산출(alternative maintenance strategies) 등의 기능은 매우 부족하다는 것 또한 알 수 있다. BRIME 리포트에는 이밖에도 교량 관리에 소요되는 비용에 대한 설문 결과 분석도 실고 있다.

표 2. BRIME에서 조사한 각국의 BMS 활용 현황

Main Functions of BMS	D	DK	E	F	UK	NO	FIN	SI	CA	NY (state)
Name	SIB-Bauwerke	Dambro		Edouard and OA	NATS	Brutus				
Time of operation (years)	New	20			15	2	3	5		4
Number of bridges managed	34,600	1,400	15,000	22,000	9,500	17,000	15,000	1,760	25,000	10,000
Inventory of existing stock	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Schedule of inspection	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Condition of structures (rating, ...)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Bid for maintenance funds	No	Yes		Yes	Yes	Yes	?		Yes	Yes
Prioritising of maintenance work	No	Yes		Yes	Yes	Yes	?	Yes	Yes	Yes
Budget planning (long term)	No	Yes		No	Yes	Yes	Yes			Yes
Registering detailed cost information for actions	Yes	Yes		Yes						Yes
Safety assessments	No			No	Yes					Yes
Taking into account alternative maintenance strategies	No			No	Yes					Yes
Application of whole life costing	No			No	Yes					Yes
Road user delays	No			No	Yes					Yes
Deterioration prediction	No	No	No	No	No	No	Yes	No	Yes	Yes

표 3. BRIME에서 조사한 각국의 BMS 활용 현황 (계속)

Main Functions of BMS	BE (Wallonie)	CRO	IE	PT	SE
Name	BDOA		Project...		SAFEPRO
Time of operation (years)	22	2		3	12
Number of bridges managed	5 000	1 200	> 1 800	1 400	15 000
Inventory of existing stock	Yes	Yes		Yes	Yes
Schedule of inspection	Yes	Yes		Yes	Yes
Condition of structures (rating, ...)	Yes	Yes		Yes	Yes
Bid for maintenance funds	Yes	Yes		Yes	Yes
Prioritising of maintenance work	Yes	Yes		Yes	Yes
Budget planning (long term)	No	No		No	Yes
Registering detailed cost information for actions	No	No		No	Yes
Safety assessments					Yes
Taking into account alternative maintenance strategies	No	No		No	Yes
Application of whole life costing	No	No		No	No
Road user delays	No	No		No	Yes
Deterioration prediction	Yes	No		No	Yes

안타깝게도 앞서 전술한 연구 보고서에는 각 기관에서 사용하고 있는 컴퓨터 기반 교량관리시스템을 자세히 소개하지는 않고 있으나 일반적인 교량관리 시스템의 구조는 OECD에서 1992년 제안한 바와 유사한 경우가 대부분일 것이다. (그림 4) 하지만 각국 현황에서 언급한 바와 같이 교량 유지관리용 DB 구축은 어느 정도 되어 있는 편이나 비용 예측, 열화 분석, 성능 변화 등

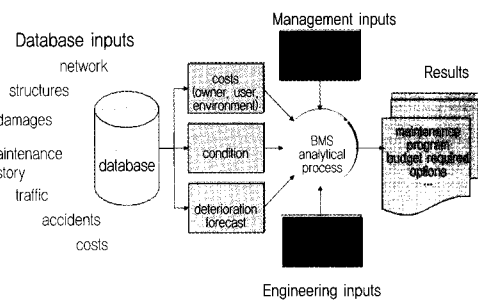


그림 4. 교량 관리 시스템(BMS) 기본 구조 (1992 OECD 보고서)

기본 모델 구축은 부족한 부분이 많고 따라서 보수보상 대안 산출과 같은 유지관리 관련 의사결정 지원모델 또한 부족함이 많다고 판단된다.

2.2.2 미국

전형적인 미국의 교량 관리 시스템으로는 Pontis와 BRIDGIT를 들 수 있으며 그 중 American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)의 Pontis가 비교적 많은 주정부 도로관리국 (Department of Transportation DOT)에서 사용되고 있다. 그림 5와 그림 6은 AASHTO Pontis의 구성 요소와 주정부 사용 현황을 보여 주고 있다. 하지만 BRIME에서 조사한 결과에서도 볼 수 있듯이 미국의 경우는 주정부 차원의 통합 프로그램 이외에도 주의 특성에 따라 독자적인 유지관리 프로그램이 개발 운용되어 사용되는 경우가 많다. California 주정부나 New York city DOT는 그 대표적인 기관으로 독자적인 DB와 유지관리 체계를 구축하고 있다.

Pontis의 특징은 5단계 상태 등급을 기본으로 하며 부재의 열

화 진행을 묘사하기 위하여 probability transition matrix를 사용한 Markov 모델을 사용하고 있다는 점이다. (그림 7) Pontis가 개발되었을 당시만 해도 이러한 상태열화예측 방법은 매우 참신한 방법으로 인정되어 그 후 개발된 많은 시설물 관리 시스템들이 Pontis와 유사한 구성을 가지고 있다. 하지만 개발된지 20년이 넘는 지금 Pontis의 기본 모델은 많은 한계와 문제점 또한 내포하고 있으며 이를 해결하기 위한 다양한 방법들이 개발되고 있다. Pontis 이외에도 미국에서는 다양한 연구 기관에 의해 시설물 유지관리 관련 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 National Cooperative Highway Research Program's (NCHRP), Federal Highway Administration (FHWA), Transportation Research Board (TRB), AASHTO 등의 연구 개발 결과를 참고할 수 있으며 특히 FHWA는 2003년 National Bridge Inspection Standards를 발간하였고 최근에는 University of Delaware와 함께 the Center for Innovative Bridge Engineering을 설립하고 Longterm Bridge Performance Program을 개발하고 있다.

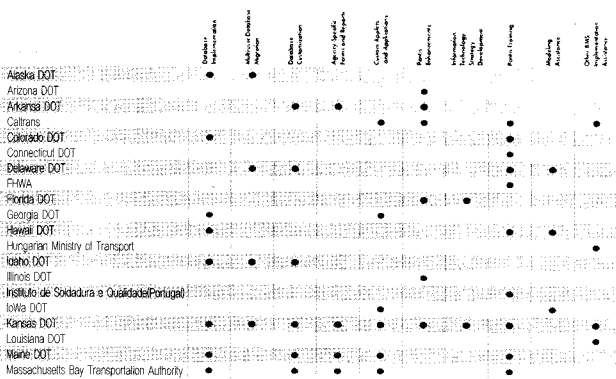


그림 5. AASHTO Pontis 구성 및 주정부 사용 현황

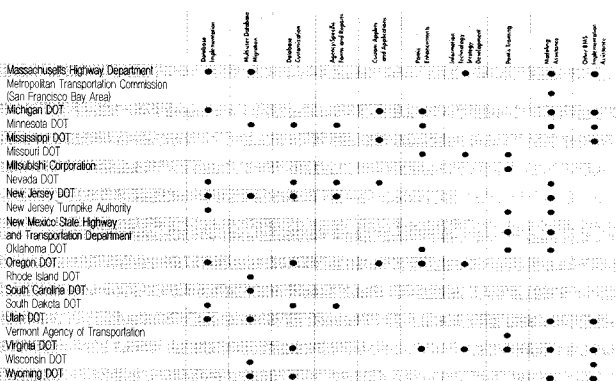


그림 6. AASHTO Pontis 구성 및 주정부 사용 현황 (계속)

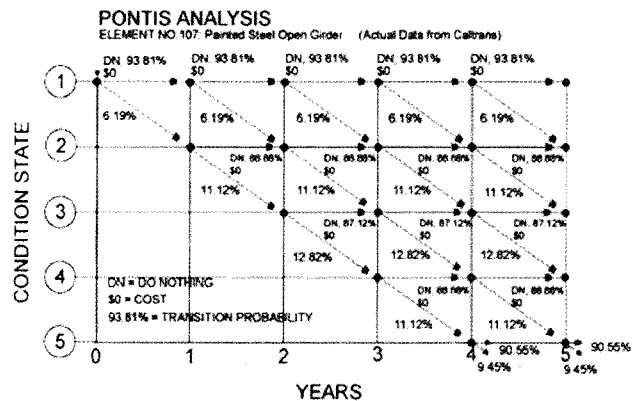


그림 7. Pontis의 Markov 모델

2.2.3 일본

14만개가 넘는 도로교를 가지고 있고 그 중 30-40년 사용된 교량만 35%가 넘는 일본의 경우는 중앙 정부보다는 지방 자치단체에서 교량관리를 하고 있는 것으로 파악된다. Kurihara가 2004년 발표한 내용에 따르면 행정 단위별 시설물 관리 현황은 표 4와 같다. 다양한 기관에서 개발된 교량 관리 프로그램으로는 NILIM (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)의 BMS, Japan Highway Public Corp.의 JH-BMS, Ayaho Miyamoto 교수가 개발한 후쿠오카 현의 J-BMS 등이 있으며 오사카의 한신 지방에 건설된 교량들을 관리하기

위해 별도의 DB가 운영 되고 있는 등 분산적인 교량관리시스템이 개발 사용되고 있다고 판단된다.

표 4. 일본 행정 단위별 시설물 관리 현황 (Kurihara 2004)

	National Government	Perfectural Governments	Municipal Governments
Execution of Maintenance	A (Fair)	B (Reactive)	C+(Poor)
Asset Inventory	A (Fair)	B-(Poor)	C (Very Poor)
Maintenance Planning (Short Term)	A (Planned)	B (Reactive)	C (None)
Financial Planning (Long Term)	A-(Planned B- /Reactive)	B-(Reactive)	C (None)
Asset Strategy	B (Poor)	C (Very Poor)	C (None)

2.3 국내 유지관리 현황

국내에서는 90년대 초반 사회기반시설물 붕괴사고가 시발점이 되어 95년 '시설물의 안전관리에 관한 특별법' (이하 시특별법)이 제정되기에 이르렀으며 시특별법에서는 도로시설물, 철도시설물, 항만시설물, 댐, 건축물, 하천시설물, 상하수도/폐기물, 옹벽, 절토사면 등 주요 사회기반시설물을 분류하고 이러한 시설물의 안전점검과 유지관리를 통하여 재해 및 재난을 예방하고, 공중의 안전을 확보하며, 국가 경제의 복리증진을 도모하도록 하고 있다. 시특별법에 따라 국가 주요시설물에 대한 안전성 확보와 유지관리 기술의 개발 및 보급 등을 위하여 한국시설안전기술공단이 설립되었으며 공단에서는 주요사회기반시설물의 안전진단 및 평가, 진단 기술의 연구, 과학적 유지관리체계의 개발, 유지관리에 대한 정보 체계 구축 등의 업무를 담당하고 있다. 또한 교량, 터널, 댐, 상수도, 수문, 건축 등의 시설물에 대하여 진단하드웨어를 개발하고 상태 측정을 위한 표준 외관조사 방법을 제시하고 있으며 안전성 평가를 위한 지침을 마련하고 있다.

시특별법에 의한 시설물의 정기적 또는 비정기적 안전점검에 이외에도 시설물에 대한 효과적 유지관리를 위하여 시설물의 관리주체는 설계도서, 시공관련 자료, 안전점검 및 정밀안전진단 자료, 보수보강자료 등을 보존해야 한다. 이중 시설물 관리대장의 작성 및 제출을 위해 시설물정보통합관리시스템(<http://fms.kistec.or.kr>)이 2003년 개발되었으며 '시설물기본정보', '시설물 안전관리정보', '시설물 비용정보', '시설물 지리정보', '시설물 사고사례정보', '유지관리기술정보', '시설물 연계정보', '시설물 관련업체정보', '점검진단 대가산정' 등의 정보를 제공하고 있다. 이밖에 시설물정보통합관리시스템은 시특별법에 의

해 규정된 국가주요시설물에 대한 정보를 통합 관리하기 위하여 지속적으로 개발되고 있다.

국내의 교량 만을 고려한다면 시설물정보통합관리시스템과는 별도로 국도 및 지방도 관리를 위해서 1985년 개발된 BMS는 이후 명칭을 KOBMS로 변경한 후 현재는 건설 CALS/EC 사업군에 포함되어 건설기술연구원에 위탁하여 운영되고 있으며 건설교통부가 관리하고 있는 일반 국도는 지방국토관리청 산하 각 국토유지건설사무소가 관리주체가 되어 점검, 진단, 유지보수, 하자보수 등의 업무를 수행하고 있다. 고속도로 교량의 경우에는 한국도로공사에서 개발한 HBMS에 의해 기본적인 관리가 이루어지고 있으나 이와는 별개로 시설물의 관리 정보는 시설물정보통합관리시스템에도 저장되고 있어 이중적인 DB 구조를 일부 가지고 있다. 2006년 현재 각 교량 관리주체가 보유하고 있는 교량의 개소 수는 표 5와 같다.

표 5. 국내 교량 현황 (2006년)

구분	개	고속국도	일반국도			특별광역시도	국가지원지방도	지방도시도	군도	구도	
			소계	건교부 관리	시 관리						
계	22,227	6,051	4,903	4,216	687	1,120	913	3,108	2,216	3,664	252
가설교	22,159	6,051	4,903	4,216	687	1,120	894	3,095	2,216	3,628	252
미가설교	68	-	-	-	-	-	19	13	-	36	-

HBMS의 경우 시설물 평가를 위해 부재 단위에서 측정하는 5단계 상태 등급을 사용하고 있으나 그림 8에서 보는 바와 같이 DB 구축 후 7년의 기간 밖에 지나지 않았고 그나마 자료 입력 누락률(표 6)이 높아 가치 있는 자료를 얻기 위해서는 시간이 필요한 상황이다.

교량명	연도별 더디상하행등급						교량역선					
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	1	2	3	4	5	6
월암IC 1P	0	0	0	0	0	0	55.12	22.9	21.5	1	56.12	2001
대강철교(월산)	0	0	0	0	0	0	120.13	26.6	25.87	2	60	2001
대강철교(관교)	0	0	0	0	0	0	120.13	26.6	25.87	2	60	2001
대강철교(관교)	0	0	0	0	0	0	386.4	27.05	26.32	7	58	2001
대강철교(관교)	0	0	0	0	0	0	386.4	27.05	26.32	7	58	2001
자유교 JCT RAMP-A	0	0	0	0	0	0	275	8.9	8.1	5	50	1997
자유교 JCT RAMP-B	0	0	0	0	0	0	288	8.9	8.1	5	50	1997
자유교 JCT RAMP-C	0	0	0	0	0	0	603.22	12.91	8.1	10	54	2001
자유교 JCT RAMP-D	0	0	0	0	0	0	180	8.9	8.1	4	50	2001
자유교 JCT RAMP-E	0	0	0	0	0	0	756.81	8.9	8.1	16	53.4	1997
자유교 JCT RAMP-F	0	0	0	0	0	0	609	8.9	8.1	16	50	1997
자유교 JCT RAMP-G	0	0	0	0	0	0	80	8.9	8.1	2	44.95	1997
자유교 JCT RAMP-H	0	0	0	0	0	0	87	8.9	8.1	2	44.95	1997
신곡교(관교)	0	0	0	0	0	0	130	32	31.32	3	50	1997
신곡교(관교)	0	0	0	0	0	0	130	32	31.32	3	50	1997
김포IC RAMP-F1교	0	0	0	0	0	0	130	8.91	8.1	3	50	1997
김포IC RAMP-F1교	0	0	0	0	0	0	130	8.91	8.1	3	50	1997
함평교(관교)	0	0	0	0	0	0	150	29.41	28.69	3	60	1999
함평교(관교)	0	0	0	0	0	0	150	27.05	26.32	3	60	1999
홍릉교(월산)	0	0	0	0	0	0	150	32	31.27	3	60	1999
함평교(관교)	0	0	0	0	0	0	150	32	31.27	3	60	1999
서울JC R-A-1교	0	0	0	0	0	0	200	13.7	13.1	4	50	1998
서울JC R-A-2교	0	0	0	0	0	0	200	12.5	11.9	5	60	1998
서울JC R-B-1교	0	0	0	0	0	0	852	13.7	13.1	19	60	1998
서울JC R-C-1교	0	0	0	0	0	0	312	12.5	11.9	8	40	1998
서울JC R-C-2교	0	0	0	0	0	0	287	12.5	11.9	8	40	1998

그림 8. HBMS의 연도별 상태 등급 입력 예시

그림 9는 일반 국도에 건설된 교량의 유지관리비와 교량상태 현황을 보여주고 있다. 94년 성수대교 붕괴 사고 이후 지속적으로 시행된 교량개량사업 및 국도확장사업의 결과로 대상교량이 대폭 줄고 유지관리 비용도 낮아진 것을 볼 수 있으나 90년대 초와 2000년대 초에 신설된 교량의 수를 감안할 때 향후 유지관리

표 6. HBMS 강박스 거더교의 자료 입력률

부재명	정상입력건	미입력건	non Value 입력건	합계
거더	25.51%(278 건)	25.78%(281 건)	48.71%(531 건)	1,090건
2차부재	18.44%(201 건)	47.89%(522 건)	33.67%(367 건)	1,090건
바닥판	21.47%(234 건)	29.36%(320 건)	49.17%(536 건)	1,090건
교량받침	25.05%(273 건)	28.07%(306 건)	46.88%(511 건)	1,090건
기초	23.67%(258 건)	27.89%(304 건)	48.44%(528 건)	1,090건
하부구조	24.50%(267 건)	26.61%(290 건)	48.90%(533 건)	1,090건
신축이음	25.60%(279 건)	28.26%(308 건)	46.15%(503 건)	1,090건
교면포장	26.79%(292 건)	23.67%(258 건)	49.54%(540 건)	1,090건
난간 및 중분대	1.65%(18 건)	67.62%(737건)	30.73%(335 건)	1,090건
배수시설	2.29%(25 건)	66.97%(730 건)	30.73%(335 건)	1,090건

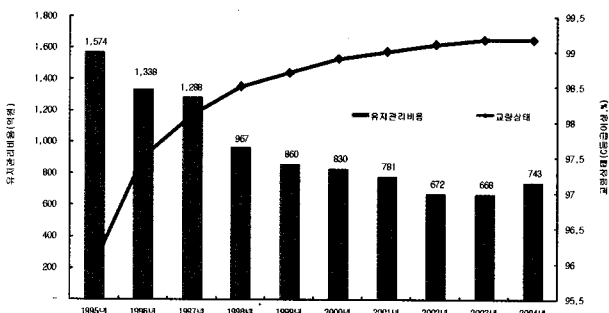


그림 9. 일반국도 유지관리비와 교량의 상태 관계

비의 증가가 예상된다.

교량 이외의 주요 시설물의 유지관리는 시설물 관리 주체에서 주관하는 경우가 많다. 일례로 댐의 경우 시특별, '댐건설 및 주변지역지원 등에 관한 법률'과 동법시행령 (2003.12.29) 제 17 조의 규정, 다목적댐관리규정 (2002.11, 댐 및 하구둑시설물의 안전점검 및 유지보수지침 (2003.09.09) 등을 근거로 수자원공사에서 점검만을 조직 정기적 점검 및 관리를 하고 있으며 댐 통합정보 시스템을 구축하여 운영 중에 있다. 이외에도 농업기반 공사에서는 농촌자원시스템을 구축하였으며 이 시스템은 '시설관리', '시설현황조회', '시설도형정보', '재해관리', '통계연보', '시설현황 집계 및 실적' 등의 메뉴로 구성되어 농촌시설물 유지관리에 관한 정보 등록 및 조회 등이 가능하도록 구성되어 있다.

3. 현 시설물유지관리 시스템의 문제점

현재 통용되고 있는 유지관리 기법 또는 시스템은 현황 파악을 위한 DB 수준의 시스템이 대부분으로 유지관리 공법 및 시기 결정 등 주요 의사결정 지원 기능을 제대로 갖추고 있지 못한 상황이다. 이러한 한계를 극복하고 효용성이 높은 차세대 유지관리 시스템을 구축하기 위해서 이절에서는 유지관리시스템의 기

본 구성을 살펴보고자 한다.

앞서 언급한 바와 같이 사회기반시설물 유지관리의 내용은 크게 시설물 유지관리 데이터베이스, 비용 모델 부분, 성능 모델 부분 및 유지관리 의사결정 부분으로 구분할 수 있고 이는 다시 시설물 기본 자료 DB, 시설물 제원 DB, 유지관리 DB, 비용정식화, 비용발생시기예측, 성능/ 상태 분석, 진단점검, 성능/상태 예측, 보수보강, 프로젝트 레벨 시설물 관리 및 의사결정 모델, 네트워크레벨 시설물 관리 및 의사결정 모델 등의 세부항목으로 구분할 수 있다. 이러한 유지관리 활동은 구조물의 안전성 및 사용성 확보를 위해 생애기간 동안 순환적으로 적용되며 이러한 유지관리의 축적된 결과를 바탕으로 향후 설계 시공될 시설물의 개선 등에 사용될 수 있다. 시설물 관리 시스템을 구성하는 각각의 항목을 분석함으로써 현 시스템이 가지고 있는 단점들을 파악하고 개선안을 제시할 수 있겠으나 이를 위한 많은 연구가 선행되어 다양한 형태의 자료로 배포되어 있으므로 자세한 소개는 생략하기로 하고 여기서는 현 시설물 관리 시스템이 가지고 있는 가장 기본적인 하지만 시스템 개선을 위해 매우 중요한 문제 몇 가지를 논의하기로 한다.

3.1 비용 모델

비용 부분은 비용 모델에 따라 다양한 항목으로 이루어질 수 있으나 일반적으로 초기투자비용, 점검 및 진단 비용, 보수보강 비용, 해체 및 폐기 비용, 사용자 비용 등 직간접 비용과 함께 Risk 분석을 위한 구조물 파괴에 따른 추정비용 등으로 크게 구분 될 수 있다. (그림 10) 이 중 특히 구조물 파괴에 따른 추정비용은 최적 보수보강 시나리오 선정 문제를 풀기 위해 반드시 필요한 항목 중 하나임에도 불구하고 많은 자산관리시스템 또는 시설물관리시스템에서는 이를 고려하지 않는 오류를 범하는 경우가 많다. 비용 모델에 있어 또 하나의 중요한 요소는 비용 발생 시기이다. 시설물 유지관리를 위한 계획 수립 시에는 미래에 대한 비용 발생 이벤트를 예측하여야 하며 비용 투입 효과를 정량화하여야 하나 이를 정확히 예측하기란 매우 어려운 일이다. 따라서 비용 부분과 함께 비용 발생 시점은 확률 변수로 표현해야 한다. 또한 현재 통용되고 교량관리 또는 LCC 분석에서는 과거의 보수보강 이력에 따른 비용발생 자료만을 이용하여 미래에 발생할 수 있는 비용을 예측하기 때문에 정확도가 떨어질 뿐 아니라 신공법 신형식의 시설물인 경우 미래 비용을 예측할 수 없

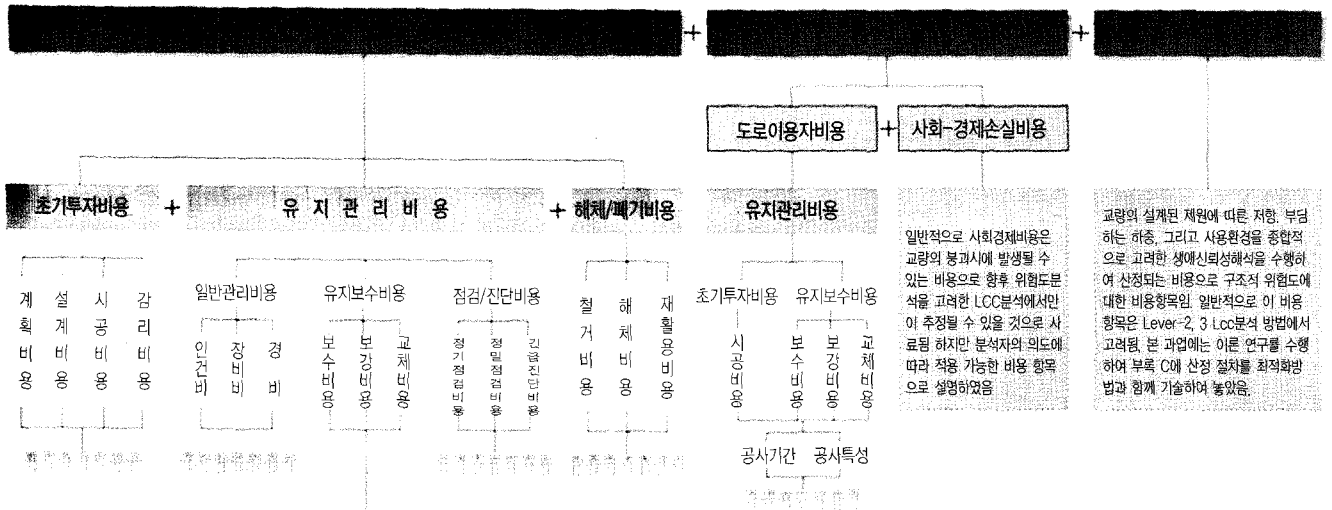


그림 10. 사회시설물 관련 비용 분류 예시

으며 또한 진단검측에 결과에 따른 능동적 유지관리가 어렵다는 단점이 있다.

3.2 성능 및 상태 분석

시설물의 유지관리를 위해서는 구조물의 안전도 및 사용성과 관련한 관리 기준이 마련되어야 한다. 80년대부터 개발된 유지관리기법 및 이를 기반으로하는 유지관리시스템들을 주로 시설물의 상태를 유지관리의 기준으로 잡고 있다. 미국에서는 9단계의 상태 등급이 그리고 국내에서는 5단계의 상태 등급이 구조물의 평가를 위해 사용되고 있다. (표 7)

표 7. 시설물 상태 등급

상태평가			시설안전기술공단 상태등급
미연방	도로국	상태등급	
1	위험상태	고량폐쇄, 보수가능	E등급(1)
2	심각한 상태	보수/보강시까지 교량폐쇄	D등급(2)
3	불량한 상태	즉시 보수/보강이 필요한 상태	
4	한계상태	주요 보강이 필요할 수 있음	
5	보통상태	경미한 보강이 필요할 수 있음	
6	양호한 상태	보수가 필요할 수 있음	C등급(3)
7	비교적 양호한 상태	경미한 보강이 필요할 수 있음	
8	매우 양호한 상태	보수 불필요	B등급(4)
9	건설당시의 상태		A등급(5)

하지만 상태 등급은 내하력 또는 내구성과 같은 시설물의 성능을 나타내기 어렵다는 단점이 있으며 비파괴시험이나 건전도 모니터링 시스템의 검측 결과와 성능 예측 해석 결과 등과는 지

수의 특성이 달라 변환을 해주어야 하는 문제가 있다. 특히 국내의 5단계 등급은 실질적으로 상중하 정도의 관리 등급으로만 쓰이고 있어 보다 발전된 시설물 관리기법과 함께 사용되기에는 문제가 많다. 현재 개발되고 있는 개선된 시설물관리 시스템에서는 연속 함수형태의 건강지수나 신뢰지수 등을 상태 및 성능 등급 평가에 사용하고 있다.

3.3 생애주기분석 protocol

일반적으로 사회기반시설물의 수명은 짧게는 수십년에서 길게는 백년 넘게 고려된다. 시설물의 수명은 공용수명으로 나타내어지며 과거에는 개념적인 공용수명이 사용되어 왔으나 시설물의 생애주기성능(Life-cycle Performance)의 변화와 이에 따른 유지관리 활동을 위한 생애주기비용(Life-cycle Cost) 산출이 중요해지면서 EU에서는 시설물별 설계 공용수명을 표 8과 같이 제안하고 있다.

표 8. Euro Code의 시설물 별 설계공용연수

category	(years)	examples
1	10	Temporary Structures
2	10~25	Replaceable structural parts, e.g. bearings
3	15~30	Agricultural and similar structures
4	50	Building structures and other common structures
5	100	Monumental building structures, bridges, and other civil engineering structures

설계공용연수는 생애주기비용 분석 뿐 아니라 생애주기성능 분석을 위해서도 매우 중요하다. 설계공용연수 동안 강도 높은

하중 작용에 노출되는 사회기반시설물은 심각한 열화를 겪을 수 있으며 이로 인한 성능의 저하를 방지하기 위하여 다양한 보수 보강이 이루어지기 때문이다.

하지만 현재 국내에서는 시설물 별 공용연수에 대한 정의를 정확히 내려져 있지 않은 실정이다. 공용연수 이외에도 비용 정식화 모델, 성능 평가 기법에 따른 불확실성의 고려 등 시설물 생애기간 유지관리 체계 구축을 위하여 필요한 기본 항목들에 대한 정의가 필요하다.

3.4 의사결정지원시스템

현 시설물 관리 시스템의 가장 큰 문제점 중의 한 가지는 의사결정을 위한 지원도구가 제대로 마련되어 있지 않다는 것이다. 이는 의사지원 요구항목을 고려하여 시스템을 구상하고 이를 위한 DB를 구축한 것이 아니라 현황 파악을 위한 DB만을 구축하였기 때문이다. 표 9는 교량관리시스템의 의사결정지원기능 및 구축현황을 보여주고 있다. 표로부터 알 수 있듯이 기본적인 상태 등급에 대한 DB 기능 및 상태에 따른 보수, 개축 투자 순위 결정 이외에 고급의사결정 지원을 위한 도구가 마련되지 않고 있다는 것을 알 수 있다. BRIME의 조사 결과를 살펴 볼 때 이러한 의사결정 지원도구의 부재는 외국 시설물 관리시스템의 경우도 유사하며 이러한 한계를 극복하고자 개선된 시설물 관리 시스템이 제안 또는 개발되고 있다. 국내의 경우에도 건설기술 연구원 및 협동연구기관에서 개발한 LCMSTEP은 이러한 의사 지원기능을 보유하고 있는 개선된 교량관리시스템으로서 예산 및 성능을 구속조건으로 하여 multi-object optimization을 수행함으로써 주어진 비용 및 성능 제약조건을 만족하는 다중 최적 보수보강 시나리오들을 산출해내는 기능을 가지고 있다.

표 9. 교량관리시스템의 의사결정지원기능 및 구축현황

구분	기능	구축현황	담당부서
교량정보 입력, 수정, 조회	○	국도사무소	
유지관리실적 입력, 수정, 조회	○	국도사무소	
교량현황조사 등 통계자료 작성	○	본부	용역
보수, 개축 투자우선순위 선정	○	본부	용역
중장기 교량 성능 추정	X	본부	
보수보강효과 정량화	X	본부	
유지관리조치에 따른 비용 추정	X	본부, 국도사무소	
최적 유지관리 전략 수립	X	본부, 국도사무소	
장래 유지관리 수요 추정	X	본부	
장래 유지관리 예산의 수립, 배분	X	본부	
교량별, 부재별 유지관리 시나리오	X	국도사무소	
유지관리 스케줄 관리	X	국도사무소	

3.5 자산관리 및 설계 LCC

주요 구조물이 노화함에 따라 상태 및 성능 변화가 발생한다는 사실을 감안할 때 사회기반시설물의 가치를 특정시점에서의 현재자산가치로만 파악하기에는 무리가 있다. 그러나 현재 국내 소개되어지는 자산관리 시스템에서는 사회기반시설물의 가치를 특정시점에서의 환산가치로서만 판단하는 경향이 있다. 이러한 범위 내에서의 생애주기비용 분석은 일반적으로 설계 LCC라 규정되며 비록 공용수명 기간 동안 발생 가능한 보수보강 비용을 예측하되 유사 시설물의 보수보강 이력 데이터로부터 얻어지는 통계적 비용만을 사용하고 있어 확정적 결과만을 산출하게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 이러한 시스템으로는 신공법, 신형식 시설물의 유지관리에 한계가 있을 뿐 아니라 날로 다양해지는 보수보강 공법을 적용하기에도 문제가 많다. 잘못 설계된 자산관리시스템의 가장 큰 단점은 의사 결정 도구로서의 제공되어야 하는 항목 또는 의사결정지원 도구가 부족할 뿐 아니라 근본적으로 구축이 불가능하다는 점이다. 일례를 들어 환경 및 하중 차이에 의한 생애주기성능 변화의 가능성이 고려되지 않는 경우 최적 대안으로 선정된 시설물은 초기 건설 비용이 변하지 않는 한, 그리고 신형식, 신공법이 개발되지 않는 한 영원히 최적 대안으로 남을 수밖에 없으며, 이 경우 유사 구조물의 선택이 없으므로 생애주기 동안의 유지관리 비용을 산출할 수 없다는 궤변적 모순에 빠지게 된다. 따라서 주요사회기반시설물의 유지관리를 위해서는 반드시 성능 또는 상태 변화에 대한 평가가 이루어지고 이 결과가 의사결정시 반영될 수 있어야 한다.

결론

본고에서는 사회기반시설물의 유지관리와 관련한 각국의 기술 동향을 시설물 관리 시스템 관점에서 분석하고 시설물 유지관리 기술의 발전을 위한 방향을 모색하였다. 본문에서도 언급되었듯이 시설물 유지관리 시스템은 단순한 데이터 축적 및 시설물 현황 파악에 머무르지 않고 최적 유지관리를 위한 의사결정 지원도구로서의 기능을 보유하고 있어야 한다. 더 나아가 신공법, 신기술의 개발, IT 기술의 발전 등에 능동적으로 대처할 수 있는 유연성을 가지고 있어야 하며 근래에 또다른 비용 요소로 부각되고 있는 환경 부하 등에 대한 고려도 수반되어야 할 것이다.

현재의 기술 발전 속도를 볼 때 십 수 년 후의 시설물 유지관

리 시스템은 3-D 기반 설계 도면과 함께 RFID 기술로 시설물 제원 DB가 자동 구축 관리되며, 사진검측 및 판독기술로 상태 등급이 평가되고, 다양한 IT 기반의 비파괴검사와 health monitoring 시스템에 기반한 계측으로 성능 평가가 이루어지며, 고도해석 기능을 이용한 열화 및 보수보강의 영향 분석으로 미래 성능 예측이 가능하고, 제약 조건을 만족하는 최적 유지관리 시나리오를 자동 산출 하는 기능을 가지고 있을 수도 있다. 하지만 이러한 시설물 관리 시스템만으로 효과적인 사회기반시설물 관리가 보장되는 않을 것이다. 국내의 경우에는 특히 사회기반시설물의 유지관리 시행 시 지속적으로 문제가 제기 되고 있는 하자담보 책임제도를 개선하려는 노력과 함께 시설물의 유지관리에 있어서도 궁극적으로 모든 의사결정의 주체는 엔지니어라는 점을 고려하여 시설물 관리를 위한 전문가 양성 및 교육 체계 개발이 수반되어야 하는 등 차세대 유지관리 체계를 구축하기 위해서는 보다 넓은 시각에서의 제도 마련과 시스템 개발의 노력이 함께 병행되어야 할 것이다.

감사의 글

본고는 한국학술진흥재단 신진교수연구지원사업(KRF-2006-331-D00564)에 의해 지원되었으며 이에 감사 드립니다.

참고자료

BRIME 보고서 (2001), *Bridge Management in Europe*.

COST345 Final Report, Procedures required for assessing highway structures. European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research. European Commission, Brussels, (<http://cost345.zag.si/>).

FHWA 2002: Federal Highway Administration, National Bridge Inspection Standards.

ISO 13822 (2001). Basis for design of structures- Assessment of existing structures. Geneva: International Organization for Standardization.

LIFECON Report, (2003) Life Cycle Management of

Concrete Infrastructures for Improved Sustainability, Competitive and Sustainable Growth Program, European Union, Brussels.

SAMARIS Report, Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures. 5th Framework program, European Union, Brussels. (<http://samaris.zag.si>)

SUSTAINABLE BRIDGES Report, (2006), Assessment for future traffic demands and longer lives. 6th Framework program. Sustainable Development, European Union, Brussels.