철도교량 자동화 로봇 개발을 위한 기초 연구 A Study for Developing of Rail Bridge Inspection Robot

구자경* 황인호** 이종세*** 이태식**** Koo, Ja Kyung Hwang, Inho Lee, Jong Seh Lee, Tai Sik

ABSTRACT

According to introduce KTX in Korea, rail-road bridge section of KTX was increased approximately 50% of the total length. Bridge is required periodic inspection and check to prevent accident and hazard because various damage which have effects on traffic and replacement of damaged parts is difficult. Specifically, the train as large-scale transportation because accidents led to great damage, preventing these accidents are critical. Well-organized management and maintenance systems are required to prevent the accidents. In the case of roadway bridge, bridge inspection vehicle is used to deploy inspectors in roadway bridge. However, this method requires a lot of time and efforts, and inspectors are exposed to potential hazard. Also, surrounding environment like poor lighting system or electric wire could harm the inspector while repairing. Due to this reason, automatic repairing and inspecting system have been introduced to replace the old methods. Management system of the railroad bridge track for trains uses various advanced equipments, but whereas roadway bridge management system is lacking these efforts. As a result of that, this study looks over the existing management method. and review the method to apply the Bridge Inspection Robot in railroad bridge. Moreover, this study suggests future management technology using inspection robot.

1. 서 론

고속철도(KTX)의 도입에 따라 운행 구간의 직선화가 요구되면서 고속철도 구간은 일반 열차에 비해 교량과 터널구간이 차지하는 비중이 높다. 현재 추가로 진행중인 고속철도 사업을 비롯하여 북한과의 철도 연결에 따른 중국, 러시아 및 유럽까지 대륙철도가 연계될 경우 고속철도에 대한 수요는 더욱 늘 어날 것으로 기대되며, 이에 따라 교량 및 터널구간의 비중은 더욱 높아질 것으로 예상된다.

교량구간은 시공 이후 사용에 따른 열화부위가 발생이 필연적이며, 문제가 발생할 경우 교통 흐름에 많은 영향을 미치게 된다. 이에 따라 기존 일반철도 교량의 노후화와 향후 건설될 고속철도에서의 교량 구간이 증가함에 따라 철도교량의 유지관리를 위한 점검 작업의 중요성은 더욱 높아질 것이다. 그러나 유사한 성격을 갖는 도로교량의 경우 노동인력의 3D 업종 기피와 정보관리의 디지털화를 고려하여 교량 점검 업무의 자동화에 대한 관심이 높은 반면에 철도교량에 대해서는 이러한 관심이 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 문헌조사를 바탕으로 철도교량의 특성과 점검 방법 등을 조사하였다. 이와 함께 현 재 개발 중인 도로교량 점검 로봇의 특성을 분석하였다. 이를 바탕으로 철도교량 점검 로봇을 개발하 기 위해 고려해야 할 사항들을 도출하여 향후 철도교량 점검 로봇의 개발을 돕고자 하였다.

철도교량 특성과 유지관리 업무

2.1 철도교량의 종류와 현황

구자경, 한양대학교, 토목공학과, 박사수료, 정회원, nalty@hanyang.ac.kr, (031)400-5145, (031)418-2974

황인호, 한양대학교, 토목공학과, Post-Doc, 비회원, hinho@ihanyang.ac.kr, (031)400-4685

이종세, 한양대학교, 토목공학과, 교 수, 정회원, jonglee@hanyang.ac.kr, (031)400-5146

수, 정회원, cmtsl@hanyang.ac.kr, (031)400-4108, (031)418-2974 188 **** 이태식, 한양대학교, 토목공학과, 교

철도시설은 구간에 따라 크게 교량, 터널, 옹벽 구간으로 구분되며, 현재 철도구간 중 교량, 터널, 옹벽 구조물이 차지하는 연장은 표 1과 같다. 교량은 구조물 전체 연장의 22%를 차지하며, 고속철도의 경우 교량 연장의 전체의 51%에 달한다. 이는 선형의 곡선을 최소로 하기 위한 결과로써 일반철도의 경우 교량 구간이 약 23% 임을 고려할 때, 고속철도에서 교량시설물의 중요성이 매우 높음을 간접적으로 추정할 수 있다.

표 1. 철도 노선별 구조물 현황

단위: km(2006. 12.31 기준)

	는 ii · km(2000: 12.01 /)と						
선 별		교 량		터 널		옹 벽	
		개소	연장	개소	연장	개소	연장
계		2,704	307.247	580	359.235	6,108	729.692
고속철도		84	83.078	46	75.621	43	4.024
일반철도	경부선	487	35.977	61	26.26	601	113.907
	중앙선	279	15.687	96	39.551	1019	76.215
	호남선	298	25.584	27	17.42	538	85.601
	전라선	220	23.299	44	38.832	365	42.016
	충북선	118	7.025	13	9.123	236	41.862
	경인선	22	2.331	_	_	58	17.292
	장항선	68	2.492	3	2.207	242	28.056
	영동선	154	6.648	88	21.315	553	50.455
	태백선	67	3.946	53	17.901	372	27.718
	동해선	105	7.485	10	2.212	264	32.599
	대구선	25	5.99	_	_	13	2.442
	경전선	178	11.529	39	13.942	659	67.55
	연결선	20	5.963	5	1.628	1	0.77
	기 타	579	70.213	95	93.223	1144	139.185

출처: 한국철도시설공단 홈페이지(www.kr.or.kr)

교량 종류는 지지형태, 거더와 상판의 연결형태, 재료, 구조형식 등을 바탕으로 구분된다. 교량점검은 이 중 교량의 재료와 구조형식에 따라 점검사항과 점검방법이 달라진다.

재료에 따른 교량의 구분은 목교, 석교, 철근 콘크리트(RC)교, PS콘크리트(PSC)교, 강교 등으로 구분할 수 있으며, 최근에는 RC, PSC, 강교 등이 주로 사용된다. 구조형식에 따라서는 슬래브교, 거더교, 라멘교 등으로 구분된다. 재료별로, 구조형식별로 시공가능한 지간장의 차이가 있으나 일반적으로 강교가 RC 및 PSC교량에 비해 장지간 시공이 가능하다. 재료별 교량형식에 따른 지간장은 표 2와 같이 정리할 수 있다.

표 2. 교량 재료별 구조형식

구조형식		지간장(m)	구조형식		지간장(m)
강교	강판형	15-150		라멘	2-25
	BOX 거더	30-100 pc-7		슬래브	2-25
	강상판형거더 50-80	RC11	T형거더	5-40	
	0 0 2 0 1 1	-		BOX 거더	20-70
	트러스	50-100		슬래브	5-30
	아치교	치교 80-200		빔거더	20-50
	사장교	200-900		BOX 거더	20-200

이 중 철도교량은 '철도설계지침(철도교편)'를 통해 상부구조를 중심으로 강교와 콘크리트교로 구분할 수 있으며, 각 부재별 시공 가능한 교량 형식은 표 3과 같이 정리할 수 있다. 표 3에 나타난 교량형식은 일반 철도교량을 대상으로 하며, 교량 현황을 살펴보면 고속철도의 경우는 이동식 비계공법 (Movable Scaffolding System: MSS)과 프리캐스트공법(Precast Span Method: PSM)을 이용하여 PC Box 교량이 가장 많이 사용되고 있다.

표 3. 철도교량의 재료와 구조형식

	구조형식	구조형식		
강교	트러스교		슬라브교	
	합성거더교		T형 거더교 연속거더교	
	연속교	콘크리트교	라멘교	
	캔틸레버교		박스거더교 세그메탈 교	
	라멘교		아치교	
	낙벤뽀		합성거더교	

고속철도의 경우 2000년을 전후로 건설되어 다양한 신공법이 적용되었으며, 현재까지 사용기간이 10년 미만이기 때문에 전체적으로 안정적이나 일반철도 교량의 경우는 국내 철도의 역사를 고려할 때 지속적인 관리가 요구되는 상황이다.

2.2 철도교량의 점검 업무

주요 시설물의 유지관리는 "시설물 안전관리에 관한 특별법(시특법)"에 의해 관리되며, 시설물에 따르는 전기, 기계 등의 부대시설의 점검 및 진단은 별도 규정으로 관리되고 있다. 시특법에서 규정하는 교량 시설물은 도로교량과 철도교량으로 구분되며, 이 중 철도교량에 대한 시설분류는 표 4와 같다.

표 4. 철도 교량 시설물의 분류

구 분	1종 시설물	2종 시설물
고속철도	●교량	
도시철도	●교량 및 고가교	
일반철도	●트러스교량 ●연장 500미터 이상 교량	연장 100미터 이상의 교량으로서 1종 시설물에 해당하지 아니하는 교량

교량의 점검 및 진단은 교량의 현 상태를 바탕으로 상태평가 및 안전성 평가의 기본자료를 제공하며, 시설물 상태와 노후화 정도에 대한 지속적인 기록의 제공, 그리고 보수 및 성능회복 작업의 우선순위 등을 결정한다. 교량 유지관리 업무는 안전점검과 정밀안전진단 업무로 구분된다. 정기점검은 전반적인 외관형태를 관찰하여 중대한 결함의 가능성을 조기에 발견할 수 있어야 한다. 육안 및 망원경, 거울 등의 보조기구를 사용하여 도보로 접근 가능한 교량의 전반적 외관상태를 조사하며, 외형상 확연히나타나는 손상 및 결함은 특기사항으로 기입하고 상태평가등급은 매기지 않는다.

정기 정밀점검은 시설물의 현상태를 정확히 판단하고 최초 또는 이전에 기록된 상태로부터의 변화를 확인하며 구조물이 현재의 사용 요건을 만족시키고 있는지 여부를 판단하는 것으로 초기점검과 정기정 밀점검으로 구분되며, 간단한 측정기구를 이용하여 정기점검보다 상세히 점검한다.

긴급점검은 손상점검과 특별점검으로 구분되며, 손상점검은 비계획적인 점검으로 재해나 사고에 의해 비롯된 시설물의 손상을 긴급히 점검하는 것이며, 특별점검은 정밀점검의 수준으로 실시되는 점검으로 기초침하 또는 세굴과 같은 결함이 의심되는 경우나 사용제한 중인 시설물의 지속적인 사용여부를 판단해야 하는 경우 실시한다.

안전점검을 실시한 결과 시설물의 재해 및 재난 예방과 안전성 확보 등을 위하여 필요하다고 인정되는 경우에는 정밀안전진단이 이뤄진다. 또한 교량별 점검사항을 살펴보면 RC 및 PSC교는 교량형식과 점검부위에 따라 차이는 있으나 균열 및 파손, 박리, 노출이 주요 점검사항이며, 강교의 경우 변형과 균열 및 파손, 표면의 부식과 오염이 주요 점검사항이다.

3. 도로교량 점검 로봇의 검토

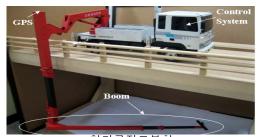
철도교량 점검 로봇의 개발 방향은 목적과 기능이 유사한 도로교량 점검 로봇을 통해 살펴볼 수 있다. 본 연구는 현재 교량점검 로봇을 개발중인 교량검사 로봇 개발연구단(Bridge Inspection Robot Development Interface; BIRDI)의 개발내용을 중심으로 도로교량 점검 로봇의 기능을 정리하였다.

3.1 로봇 플랫폼 시스템

교량 점검을 위해서는 원하는 부위에 점검장치가 접근해야 한다. 기존 교량 점검은 굴절차 또는 고가 사다리를 이용하여 작업자가 점검 부위에 접근하여 검사하였으나 이는 안전성, 효율성 및 경제적 측면에서 많은 문제를 갖고 있다.

현재 개발 중인 점검로봇은 기존 교량 점검에서 활용하고 있는 굴절차를 개선하여 교량유지관리를 위한 로봇 플랫폼의 메인 프레임으로 개발하고 있다. 개발중인 장비는 기존 굴절차에 비해 소형이며, 4 관절 붐과 붐의 말단에 장착될 로봇 플랫폼으로 구성되어 있으며, 편도 3차선 교량의 점검을 고려하여 하부 붐의 길이를 최대 12m, 3단으로 구성하고 50kg의 로봇 플랫폼 장착 시 15cm 이내의 처짐이 발생하도록 설계되었다. 또한 저속주행장치를 장착하여 붐을 펼친 상태로 이동이 가능하며, GPS 시스템을 이용해 점검위치를 정확히 측정하며, 각종 센서를 통해 현재 작업중인 붐의 상태를 모니터링 할 수 있게 하였다.

굴절로봇차 말단에 장착되어 비전시스템의 이동을 담당하는 로봇플랫폼은 수평·수직 이송부와 수평유지부로 구성되었으며, 유지관리의 편의를 위해 탈착이 가능하게 설계되었다. 또한 조정자가 로봇의상태를 알 수 있도록 PHANTOM omni haptic 장치를 장착하였다. 말단 로봇플랫폼은 haptic으로부터받은 신호를 확인하고 feedback된 값을 3D로 구현할 수 있도록 개발중에 있다.





<첨단굴절로봇차>

<하단 붐>

그림 1. 첨단굴절로봇차 모형(1/10 scale)

3.2 머신비전 시스템

머신비전 시스템은 굴절로봇차 말단 로봇플랫폼에 장착되어 영상자료를 획득하고 자동화 시스템을 통한 이미지 분석 및 위험요소를 감지하는 기능을 수행하여 기존의 작업자에 의한 육안 조사 자료를 수작업에 의해 데이터화하는 일련의 과정을 디지털화 한다.

로봇플랫폼에 장착될 카메라는 원격조정에 의해 회전 및 줌이 가능하며, 실내시험을 통해 3.2m 관측거리에서 0.1mm의 균열을 측정할 수 있다. 또한 균열 탐지 및 획득 영상을 사용자의 다양한 요구에 맞게 제공할 수 있게 균열의 진행방향과 진행정도를 측정하기 위한 입력 영상들을 정합하고 출력하기 위한 영상정합 알고리즘을 개발하였다. 이를 바탕으로 정밀 측정 비전 알고리즘의 기능을 개선 및 보완하고, 시스템을 통합하는 지능형 시스템을 구축하여 바닥판의 균열, 백태, 누수, 부식 등을 자동으로 추출할 수 있다.

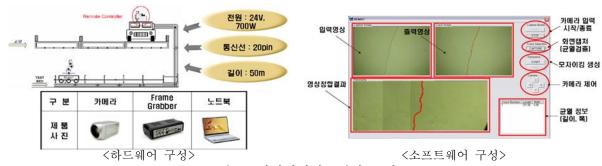


그림 2. 머신비전시스템의 구성

3.3 데이터 관리 시스템

현장에서의 점검 데이터수집에서 DB서버에 데이터가 입력될 때 까지, 매 4번(도면 및 보고서, 현장

야장, 전산입력, 통계 및 분석 보고서)의 유사 작업이 수행되면서 작업효율성 저하 및 입력 오류 등이 발생하며, 각 검사자의 주관적 판단으로 인해 정확하고 객관적인 자료를 얻는데 많은 제약이 있다. 이를 해결하기 위해 머신비전시스템에 의해 획득된 영상자료를 교량 형태 및 부재종류, 위치에 따라 정량적/정성적으로 손상을 표준화 하고 데이터 연계가 가능한 교량관리시스템을 함께 개발하고 있다.

현재 개발중인 교량 점검로봇을 이용하여 사람의 접근이 불가능한 위치에서의 점검을 가능하게 하고 정확한 영상자료와 이로부터 추출된 디지털 데이터를 바탕으로 점검결과의 신뢰도 확보와 함께 교량 생애주기 동안 일관된 데이터 관리가 가능할 것으로 기대된다.

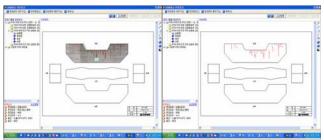


그림 3. 디지털 방식의 균열외관망도

4. 철도교량 점검 로봇 개발을 위한 고려사항

철도교량 점검 로봇의 개발을 위해 개발중인 도로교량 점검 로봇의 개발 방향과 철도교량의 특성을 바탕으로 몇 가지 고려사항을 도출할 수 있다.

4.1 철도교량의 특성

철도교량은 일반철도교량과 고속철도교량으로 구분된다. 일반철도교량의 경우 운행하는 열차가 디젤등 자체동력을 이용하여 운행하는데 반해 고속철도는 운행 구간에 설치된 전력선으로부터 전기를 공급받아 운행하는 전철이기 때문에 교량시설물에 전력공급을 위한 케이블과 이를 지지하기 위한 전주가배치되어 있어 점검 장치의 운영에 영향을 미칠 수 있다.

또한 고속철도 교량은 개통시기가 2000년 이후로 교량 상태가 양호한데 일반철도 교량은 개통시기가 비교적 오래되어 철저한 유지관리가 요구된다.

이를 고려할 때 교량점검 로봇의 개발 시 초기 대상은 일반철도교량을 대상으로 하는 것이 개발이용이할 것으로 판단된다. 그러나 장기적으로는 교량구간의 비중이 높은 고속철도의 건설이 증가할 것을 고려하여 이에 대한 개발방안에 대한 고려가 요구된다.

4.2 교량점검 로봇 적용의 타당성

철도교량은 도로교량과 달리 보행자를 위한 보행통로가 필요치 않으며, 교량폭이 좁다. 도로교량이 차선에 따라 상·하행선을 각각 점검해야 하는 것과 달리 철도교량은 한 번에 상·하행선을 동시에 점검할 수 있다. 또한 철도교량은 궤도에 의해 열차가 유도되기 때문에 도로교량과 같이 가로등이 필요하지 않다. 도로교량의 경우 가로등으로 인해 점검 로봇이 플랫폼을 펼치고 접는 작업이 반복적으로 수행되는데 반해 철도교량은 이러한 작업이 발생하지 않거나 최소로 할 수 있어 도로교량을 점검하는 경우보다 작업효율이 더욱 높을 것으로 기대된다. 앞서 살펴본 교량의 구조적 특성과 함께 교량 조건 등을 고려하면 철도교량 점검 로봇의 개발은 타당할 것으로 판단된다.

4.3 철도교량 점검 로봇 개발의 제약사항

도로교량 로봇의 굴절점검차의 경우 바퀴로 이동하여 운행이 자유로운 반면 철도교량의 경우는 기본 적으로 궤도가 전 구간에 설치되고 이를 이용하는 열차의 특성으로 인해 도로교량의 점검 로봇을 철도 교량에 직접 적용하기에는 무리가 있다. 이에 따라 철도교량 점검 로봇을 개발하기 위해서는 이동을 위한 메인 플랫폼이 어떤 방법으로 이동할 것인가에 대한 방안이 제시되어야 한다.

또한 고속철도의 경우 전철의 특성으로 인해 궤도 상부에 전력 공급을 위한 전기장치가 위치한다. 이 경우 앞서 살펴본 도로교량 점검로봇과 같은 방식으로 철도교량 점검 로봇을 개발하는 경우 전력선이 작업에 영향을 미칠 수 있다. 일반 철도교량의 경우 메인 플랫폼의 이동 수단을 해결하면 큰 변경사항 없이 점검 로봇을 적용할 수 있으나, 고속철도 교량의 경우는 전력을 공급하는 방식을 지중으로부터 공급하여 궤도 상부의 제약사항을 최소화하거나 또는 별도의 점검 방법을 고려하여 점검 로봇을 개발해야 한다. 그러나 전력 공급 방식을 전환하는 것은 열차의 기계적, 전기적 특성이 함께 고려되어야 하기 때문에 충분한 기술적 검토가 뒷받침 되어야 한다.

추가적으로 전력선으로 인한 장비의 기계적 위험을 고려하여 점검 로봇을 제작하는데 있어 그 재료를 강재가 아닌 FRP(fiberglass reinforced plastics)와 같은 복합 소재를 이용하여 개발하는 방안도함께 고려할 필요가 있다. 철도교량이 도로교량에 비해 폭이 좁다는 점을 감안할 때, 현재 12m로 설계된 분의 길이를 축소할 수 있을 것으로 기대되며, 처짐 조건 등을 감안할 때 FRP 소재로의 전환이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구 방안

본 연구는 철도교량 점검 로봇을 개발하기 위한 방안을 모색하는 것을 목적으로 한다. 철도에서 교량은 과거 시설의 노후와 함께 장차 건설될 고속철도의 선형을 감안할 때 유지관리 측면에서 매우 중요한 시설 중 하나임에도 불구하고 궤도 및 기계, 전기시설 등에 비해 유지관리를 위한 연구가 부족하다. 또한 철도교량은 교량이라는 구조적인 특성에서는 도로교량과 유사하나 열차의 통행이라는 사용목적의 차이로 인해 교량 상부에 설치된 시설 및 점검을 위한 고려사항 등에서 도로교량과의 차이가 발생함을 알 수 있다.

그러나 교량의 점검업무를 수행하는데 있어 요구되는 점검사항 및 점검도구 등의 차이가 크지 않기때문에 현재 개발중인 도로교량 점검로봇을 바탕으로 철도교량의 특성을 반영할 경우 철도교량 점검로봇의 개발이 가능할 것으로 기대된다. 단, 장비를 개발할 경우 철도교량의 특성을 고려하여 장비의이동 및 작업방식의 변화 등을 고려하는 것이 요구된다.

현재 본 연구는 살펴본 문제에 대한 해결방안이 부족하며, 고려 사항에 대한 구체적인 해결방안이 추가로 제시되어야 한다. 연구를 통해 철도교량의 유지관리를 위한 점검 로봇의 개발에 관심을 갖고향후 철도교량의 유지관리를 효과적으로 수행하는데 도움이 되는 점검로봇의 개발이 이뤄지길 바란다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 "첨단융합기술개발사업"과 교육인적자원부의 "두뇌한국21(BK21)사업"의 지원으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능하게 한 해당 기관에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. Lee, J.S., Hwang, I., and Lee, H.S. (2007), "Development of Advanced Robot System for Bridge Inspection and Monitoring", *IABSE Symposium*, Weimar, Germany, A-0715.
- 2. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준[철도교편], 건설교통부
- 3. 한국시설안전기술공단(2006), "시설물의 안전관리에 관한 특별법령집", 건설교통부
- 4. 한국시설안전기술공단(2003), "안전점검 및 정밀안전진단 세부지침: 교량편", 건설교통부
- 5. 한국철도시설공단 홈페이지(http://www.kr.or.kr)