

도시철도 무인 자동화 운영 노선의 기술적 특성

김용규, 윤용기, 고경준, 김정태, 송용수, 최상원

한국철도기술연구원

ygkim1@krri.re.kr, ykyoon@krri.re.kr, kkj8000@krri.re.kr, jtkim@krri.re.kr, adair@krri.re.kr, swchoi@krri.re.kr

Technical characteristics of unmanned automated operation line of urban railway

Yong-Kyu Kim, Yong-Ki Yoon, Kyeong-Jun Ko, Jung-Tai Kim, Yong-Soo Song, Sang-Won Choi

Korea Railroad Research Institute

요약

도시철도는 지하철, 경전철, 모노레일 등의 차량 및 인프라 특성에 관계없이 GoA3 이상의 무인 자동화 기술 방식이 도입중이며, 파리 1호선의 경우에는 유인운전 상태에서 무인 자동화 기술 방식을 적용하여 개량되었다. 본 논문은 무인 자동화 열차제어시스템으로 운영중인 노선의 기술적 특성에 대해 조사, 분석하였다. 주요 분석 내용은 차륜구조, 노선길이, 역의 수, 역간 거리, 운전시격, 자동화 수준, 정시성 및 안전성 등으로 분류된다.

I. 서론

도시철도 열차제어시스템은 유인운전에서 무인운전으로 자동화 기술을 적용하는 사례가 급증하고 있으며, 개량 또는 신선 건설시에 경제성, 운영, 유지보수 등을 고려하여 다양한 검토가 진행되고 있다[1]. 최근에는 파리의 교통 관련 업무 종사자의 파업에 따라 유인운전 노선의 서비스 중단은 교통 혼란을 유발하였지만, 무인 자동화 노선은 파업 이전과 동일한 서비스가 제공됨으로서 대중교통의 원활한 서비스 제공에도 무인 자동화는 필수 요소임을 입증하였다. 본 논문은 무인 자동화 Best 사례[2]로 언급된 스페인 Barcelona 9호선, 덴마크 Copenhagen 1호선, 프랑스 Paris 1, 14호선, Renne A선, Lyon D선, Lille 1, 2호선, Toulouse A, B선, 영국 London Dockland선, 독일 Nuremberg U2, U3선, 타이완 Taipei Wenhу 선, 이탈리아 Milano 5호선, Turin 1호선, 스위스 Lausanne M2선, 아랍 에미리트 Dubai Red선, 캐나다 Vancouver SkyTrain에 대해 기술적 특성을 조사, 분석하였다. 또한 국내에서 개발된 무인운전 KRTCS[3]에 대해서도 기술적 특성을 제시하였다.

II. 기술적 특성 분석

무인 자동화 차량은 철제차륜과 고무차륜으로 분류된다. 철제차륜은 스페인 Barcelona 9호선, 덴마크 Copenhagen 1호선, 영국 London Dockland선, 독일 Nuremberg U2, U3선, 아랍 에미리트 Dubai Red선, 그리고 캐나다 Vancouver SkyTrain이 대표적인 사례로, 큰 수송량이 요구되는 중전철 노선에서 이용된다. 고무차륜은 수송량이 적은 경전철 노선에 주로 사용되지만, 프랑스 Paris 1, 14호선, Lyon D선, Lille 1, 2호선, 타이완 Taipei Wenhу 선, 이탈리아 Milano 5호선, Turin 1호선, 등의 중전철 노선에도 적용됨에 따라 차륜의 유형은 무인 자동화와는 무관하게 주어진다.

운영 노선의 길이, 역의 수, 역간 거리는 기존의 지하철 노선과 유사한 형태로 가장 긴 무인 자동화 노선은 51.2km, 역간거리 1,800m인 Dubai

Red선이며, 가장 짧은 노선은 6km, 역간 거리 400m인 스위스 Lausanne M2선으로 조사되었다. 이는 무인 자동화 시스템 도입이 노선 길이 및 역간 거리에 무관함을 의미한다. 운전 방식에 있어서 기관사에 의한 에러 발생율이 $10^{-3}/h$, 숙련된 기관사의 경우에는 에러 발생율을 $10^{-4}/h$ 까지 감소되지만, 무인 자동화의 에러 발생율이 $10^{-9}/h$ 로 분석됨에 따라 기관사에 의한 에러 발생율을 2배 이상 개선할 수 있으며, 역간 거리가 짧거나 역수가 많은 구간일수록 기관사의 반복 운전 피로도를 최소화할 수 있는 대체 수단으로 사용될 수 있을 것으로 분석된다.

Line	Barcelona 9	Copenhagen 1	Rennes A	Lyon D	Lille 1, 2
Wheel type	Steel	Steel	Rubber	Rubber	Rubber
Length(km)	28.5	14.3	8.56	12.5	13.5(1), 31.5(2)
Stations	24	15	15	15	18(1), 44(2)
Opening year	2009	2002	2002	1991	1983(1), 1989(2)
Line	London Doc	Nuremberg U2, U3	Taipei Wen	Milan 5	Paris 1, 14
Wheel type	Steel	Steel	Rubber	Rubber	Rubber
Length(km)	38	13.1(U2), 9(U3)	25.2	12.6	16.6(1), 9(14)
Stations	45	16(U2), 13(U3)	24	19	25(1), 9(14)
Opening year	1987	2010(U2), 2008(U3)	1996	2013	2011(1), 1998(14)
Line	Lausanne M2	Vancouver SkyTrain	Dubai Red	Turin 1	Toulouse A, B
Wheel type	Rubber	Steel	Steel	Rubber	Rubber
Length(km)	6	29.5(C), 28.9(E), 25.5(M)	51.2	13.2	12.5(A), 15(B)
Stations	14	26(C), 20(E), 17(M)	29	21	18(A), 20(B)
Opening year	2008	2009(C), 1985(E), 2002(M)	2009	2006	1993(A), 2007(B)

Table 1. Analysis of technical Characteristics(1)

운전시격은 노선의 특성을 기반으로 경제성, 인구 분포에 따른 이용객 예측을 통해 정해지며, 이용 승객수의 증가에 따라 운전시격은 더욱 작게 주어진다. 지하철의 경우에는 운영 노선의 40% 이상에서 180초의 운전시격으로 운행되며 러시아워에는 운전시격을 120까지 유지한다. 무인 자동화 노선은 대부분 120초 이하의 운전시격을 유지하며, 러시아워에는 자동 무인화의 특성에 의해 더욱 짧은 운전시격이 적용된다. 가장 짧은 운전시격은 프랑스 Lille 1, 2호선으로 러시아워에 66초로 열차를 운행한다. 또한 프랑스 Toulouse A, B선 80초, Paris 14호선 85초, Lyon D선 90초, Rennes A선 100초의 운전시격으로 러시아워에 열차를 운영하는 것으로 확인되었다.

Line	Barcelona 9	Copenhagen 1	Rennes A	Lyon D	Lille 1, 2
Headway(sec)	180	120	100	90	66
passengers	38,500	12,000	6,000	15,000	11,000(1, 2)
Automation Level	GoA4	GoA4	GoA4	GoA4	GoA4
Speed(km/h)	29	40	32	30	34
Line	London Doc	Nuremberg U2, U3	Taipei Wen	Milan 5	Paris 1, 14
Headway(sec)	300	180	120	180	120(1, 85(14))
passengers	6,000	12,800	28,400	10,700	25,000(1, 14)
Automation Level	GoA3	GoA4	GoA4	GoA4	GoA4
Speed(km/h)	18	34.4(U2), 26(U3)	42	30	30(1), 40(14)
Line	Lausanne M2	Vancouver SkyTrain	Dubai Red	Turin 1	Toulouse A, B
Headway(sec)	150	360(C), 120(E, M)	180	180	80
passengers	5,600	15,000(C), 16,000(E), 15,000(M)	26,000	23,000	7,000(A), 7,000(B)
Automation Level	GoA4	GoA4	GoA4	GoA4	GoA4
Speed(km/h)	18	35(C), 44(E), 33(M)	42	25.5	33

Table. 2 Analysis of technical Characteristics(2)

무인 자동화 노선의 자동화 단계는 대부분 GoA4를 적용한다. 영국 London Dockland선은 GoA3로 운영중이며, 프랑스 Paris 1호선은 GoA2로 영업 운행중인 노선을 GoA4로 개량하여 무인 자동화를 실현하였다. 스페인 Barcelona 9호선의 GoA4 도입은 바르셀로나 지하철의 열차 시간 준수, 서비스의 규칙성, 운영 요원, 시설 및 설비의 완전한 가용성을 목적으로 시작되었다. 덴마크 코펜하겐 1호선의 GoA4는 무인 자동화 운전을 통한 서비스 가용성 98.6%로 세계 최고의 무인운전 지하철로 알려져 있다. 프랑스 Lyon D선은 MAGGALY(Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise)라는 시스템을 적용하여 GoA4를 구현하였으며, 프랑스 Paris의 RATP는 파리 14호선의 GoA4 완전 자동화 시스템 도입 성공 이후에 Paris의 모든 지하철 노선을 무인 자동화 시스템으로의 교체를 계획하였다. 관련 시범사업은 파리 지하철에서 가장 번화하고 가장 많은 관광객이 이용하는 1호선을 선택하여 2005년 파리 14호선과 같은 SAET(Train Operation Automation System)를 적용하였다. 이는 2019년 철도 노조의 파업시에 1호선은 운행 서비스에 영향을 주지 않음으로서 무인 자동화는 대중교통의 역할을 중단없이 실행할 수 있음을 증명하였다.

Grade of Automation	Train operation	Setting Train in motion	Starting and Stopping Train operation	Door control	Operation in event of disruption
GoA 1 (NTO)		ATP with Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 (STO)		ATP and ATO with Driver	Automatic	Automatic	Driver
GoA 3 (DTO)		Driverless	Automatic	Automatic	Train attended
GoA 4 (UTO)		Driverless, Unattended	Automatic	Automatic	Automatic

Fig 1. Grade of Automation

무인 자동화 노선의 중요한 평가 기준인 정시성은 대부분 99% 이상을 확보하고 있으며, 예외적으로 캐나다의 Expo선과 Millennium선이 81%의 정시성을 제공한다. 정시성이 가장 높은 노선은 프랑스 Rennes A선으로 99.66%의 정시성을 제공한다. 정시성 유지의 근본 요소는 노선 운영시 발생된 사고 및 장애, 파업 등에 의한 열차운행 중단이 포함되지만, 무인 자동화 노선에는 현재까지 장애 및 사고에 의한 열차 중단 기록이 없으며, 파업과 무관하게 높은 정시성의 승객 서비스 품질을 제공하는 것으로 분석되었다.

안전성은 국가별, 도시별 특성에 따른 치안 문제가 중요 요소로 작용한다. 무인 자동화 노선은 기관사 부재로 안전성이 더욱 감소될 것으로 예측하였지만, 무인운전에 따른 여유 인력의 차량 또는 역 안전 요원 대체 역

할과 무인 운전용 CCTV, 안전 센서 및 감시장치의 사용은 실제적인 안전성을 유인운전보다 크게 향상하는 효과를 제공하였다. 안전성이 가장 큰 노선은 덴마크 Copenhagen 1호선으로 365일, 24시간 운영에도 불구하고 95%의 높은 안전성을 갖는다. 반면 프랑스 Lyon D선은 무인 자동화 노선 중 가장 최하위인 61%이며, 이는 플랫폼 접근이 제한되지 않는 개방형 철도망에 의한 부정승차율과도 밀접한 관계가 있다.

Line	Barcelona 9	Copenhagen 1	Rennes A	Lyon D	Lille 1, 2
Accessibility	< 80%	< 80%	High	-	High
fraud rate	4	2.7	10.4	6.5	4
Punctuality	94.72	98.7	99.66	97.23	99
Security	-	95	80	61	76.5
Cleanliness	99	90	-	88	80
Line	London Doc	Nuremberg U2, U3	Taipei Wen	Milan 5	Paris 1, 14
Accessibility	< 80%	High	Minimal	< 80%	> 70%, < 80%
fraud rate	0.6	0.9	-	1.0	3.0
Punctuality	99.11	99(U2, U3)	99.73	99	-
Security	89	-	-	-	-
Cleanliness	-	80	94.4	99.37	80(1)
Line	Lausanne M2	Vancouver SkyTrain	Dubai Red	Turin 1	Toulouse A, B
Accessibility	High	High	High	High	< 80%
fraud rate	3.0	5.4(C), 5.5(E, M)	-	-	3.2
Punctuality	-	92(C), 81(E, M)	99	-	-
Security	84	82	-	-	67
Cleanliness	95	87(C), 71(E, M)	-	-	95

Table 3. Analysis of technical Characteristics(3)

국내에서 개발된 무인 자동화 시스템으로 주어지는 KRTCS는 2014년 국가연구개발사업으로 개발 완료된 설계속도 150km/h급 무인 자동화 열차제어시스템으로 한국철도공사의 대불선(대불~일로) 영업선을 활용하였다. 관련 기술의 가장 큰 특징은 세계 최초로 영업선에 LTE-R(Wi-Fi 포함)을 구축하여 3개 컨소시엄이 상호호환성을 갖는 무인운전 열차제어시스템을 개발하였고, 특히 상호호환성 시험, 2편성 시험, 핸드오버 시험 등을 시험선에서 실차 시험으로 추진함으로서 영업선 운전을 위한 상용화 기반과 함께 국산화 기술에 의한 KRS 표준 규격을 2015년 제정하였다. 관련 기술에 대한 상용화 적용 예정 노선은 신림선, 동북선, 위례신사선이 이미 입찰을 통해 확정되었고, 일산선 개량 사업은 기술검토를 통해 2020년 발주 예정으로 주어진다.

III. 결론

본 논문은 무인 자동화 노선의 특징에 대해 비교 분석하였다. 분석 결과는 유인운전에서 무인운전으로의 전환에 필요한 자동화 기술의 확장성이 어떠한 유형의 도시철도 인프라에도 문제가 되지 않음을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 국가연구개발사업 “이동폐색 ATP/ATO 기술 및 장치개발”의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] G. Brodeo, Automation in urban public transportation, RATP report, 2016.02
- [2] P. Menesplier, A. Gue, J. Naoufal, J. Longo, F. Benoit, WORLD'S BEST DRIVERLESS METRO LINES WAVESTONE report, 2018
- [3] Y.K. Kim, J.G. Jeon, J.Y. Kim, Y.G. Yoon, S.C. Oh, J.T. Kim (2018), Construction Plan for Train Control System without Track Circuit for Conventional and High Speed Railway through KRTCS Technical Analysis, Journal of the korean society for railway, Vol 21, No.6, pp.552-561