

IoT를 접목한 지하철 객차 내 혼잡도 평준화 시스템 설계

김미례¹, 조인호^{2*}

¹과학기술연합대학원대학교 교통물류시스템 및 ITS공학, ²한국철도기술연구원 추진시스템연구팀

Design of Congestion Standardization System Based on IoT

Mi-Rye Kim¹, In-Ho Cho^{2*}

¹Transportation and Logistics System & ITS Engineering, University of Science and Technology

²Propulsion System Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 수도권 지하철은 1974년, 서울 1호선 개통을 시작으로 현재 일일 7,289천 명을 수송하는 가장 중요한 교통수단 역할을 하고 있다. 이처럼 서울 지하철은 2011년 이후 지속적으로 증가하는 수송인원을 처리하고 있지만, 제한된 지하철 용량과 배차시간 때문에 지하철 내의 혼잡도는 계속 증가하고 있는 실정이다. 이에 서울시는 서울역, 시청역, 교대역 등 12개의 역사에 후회통로 건설 등의 혼잡역사 구조 개선사업을 시행하고 있다. 하지만 이러한 사업은 한 역사 당 평균 186억 원의 대규모 공사비에 비해 미미한 개선 효과를 보이면서 혼잡도 개선을 위한 차선책이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 효율적인 객차 및 역사 내 혼잡도 완화를 위해 IoT를 접목한 혼잡도 평준화 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템을 바탕으로 예상 효과 분석을 진행하였고, 분석 결과 한 객차에 승차하는 인원이 기존 34명에서 최대 20명으로 감소되는 효과가 나타났다. 이와 더불어 기존 침두시 20대의 열차 운행대수가 24대로 증차될 수 있다고 분석되면서 운영 효율성 측면에서 효과가 있을 것으로 사료된다.

Abstract The Seoul Metropolitan Subway, which started operating in 1974, plays a major role in transporting 7,289 thousands passengers daily. This trend of a steadily increase in passengers from 2012 has increased the congestion rate because of the limited capacity and time. To solve this problem, Seoul city is consistently working on improving the subway facilities, such as the construction of a detour path. This project, however, has only a slight effect on improving the congestion rate and is too expensive to construct the facilities. Hence, this study suggests The Congestion Standardization System based on the IoT for improving the subway congestion rate. Based on the system, the expected effect analysis was performed, which resulted in a decrease in ride passengers from 34 to 20. In addition, this expected effect analysis shows that the number of subway vehicles can increase from 20 to 24. The suggested system will have a significant effect on the efficiency of the management system.

Keywords : Congestion Standardization System, Improvement of Congestion, IoT, Subway, Sadang Station

1. 서론

지하철이란 대도시에서 교통의 혼잡을 완화하고, 빠른 속도로 운행하기 위한 지하철도를 의미한다. 우리나라에는 1974년, 서울 1호선 개통을 시작으로

일일 7,289천 명을 수송하는 가장 중요한 교통수단 역할을 하고 있다. 이처럼 서울 지하철은 2011년 이후로 지속적으로 증가하는 수송인원을 처리하고 있지만, 제한된 지하철 용량과 배차시간 때문에 지하철 내의 혼잡도는 계속 증가하고 있는 실정이다.

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

*Corresponding Author : In-Ho Cho(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5469 email: inhocho@krrri.re.kr

Received February 19, 2016

Revised (1st April 25, 2016, 2nd May 2, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

이를 해결하기 위한 방안으로 서울시는 서울역, 시청역, 교대역 등 12개의 승강장에 우회통로 건설 등의 혼잡승강장 구조 개선사업을 시행하고 있다. 하지만 이러한 사업은 한 승강장 당 평균 186억 원의 대규모 공사비에 비해 미미한 개선 효과를 보이면서 혼잡도 개선을 위한 차선책이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 기존 설비를 최대한 활용하여 객차 내 혼잡도를 완화할 수 있는 시스템을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 혼잡도 평준화 시스템은 기존 방안들과 달리 객차 내 인원 조절뿐만 아니라 하중센서-게이트 간 연동 기능을 함께 적용함으로써, 게이트부터 승객들 조절할 수 있는 원거리 혼잡도 완화를 위한 대안을 제시하였다. 제안하는 시스템을 사당역에 적용하여 효과분석을 진행함으로써 향후 객차 및 승강장 내의 혼잡도 개선사업 추진 시 적용 가능한 대안으로 활용하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 혼잡도 개선 연구

현재까지 지하철의 혼잡도 개선을 위해 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 연구들에는 ‘도시철도 신호체계 개선 및 운영 효율화에 관한 연구’, ‘지하철 객차 내 혼잡도 개선을 위한 다중회귀분석 적용 연구’, ‘지하철 혼잡승강장 구조 개선사업 연구’ 등이 있다. 기존 연구들은 각각 혼잡도 개선을 위한 다양한 접근 방법들을 제시하였지만, 비용이나 기술적인 한계 때문에 실제 적용 가능한 개선책은 되지 못하고 있다.

이지선 등[1]에 의하면 승객들이 특정 객차에 집중되면서 승·하차 지연문제를 야기하고, 이로 인해 열차 운행 지연되면서 지하철 혼잡도 문제가 발생한다고 기술되어 있다. 이와 관련하여 위 연구에서는 열차를 기다리는 승객들에게 전 역의 객차별 혼잡도 정보를 제공하여 승객의 분포를 분산시키는 대안을 제시하였다. 하지만 위 연구는 여러 가지 대안으로 개략적인 연구를 진행함으로써 대안들의 구체적인 활용방법 제시가 부족하다는 점에서 한계가 있다.

김동욱 등[2]에서는 다중회귀 분석을 통해 지하철 객차 내 혼잡도 완화를 위한 최적화 설계 연구를 진행하였다. 이 연구에서는 스크린 도어의 적외선 센서로 승·하차 인원을 산정하여 객차 내 혼잡도를 알려주는 대안을 제

시하였다. 하지만 스크린 도어의 적외선 센서로 승·하차 인원을 측정하는 방법은 객차 및 승강장 내의 혼잡상황에서의 오차율이 크다는 한계점을 지니고 있다.

조성근 등[3]은 지하철 혼잡도 해소 방법으로 ATO 열차의 연속배차 및 커트맨의 도입을 제시하였다. 이러한 접근 방법은 ATO열차를 도입 비용 및 각 역별 커트맨의 인건비 등으로 막대한 비용이 발생한다는 점에서 한계를 가지고 있다.

김동희[4]의 연구에서는 수도권 지하철 7개 역의 계획 정차시분과 실제 정차시분을 자체 개발한 소프트웨어를 활용하여 비교·분석하였다. 지하철의 혼잡상황 때문에 계획과 실제 정차시분의 차이가 크다는 결론을 제시하고 있지만, 구체적인 승객 통제 대안이 없다는 한계가 있다.

정구인[5]의 연구에서는 지하철 객차 내의 혼잡도 개선을 위해 진동차량의 대차에 응하중 압력센서를 부착하여 승객하중을 측정하는 연구를 진행하였다. 위 연구는 실제 지하철 환경에서의 기술적, 환경적 요구사항을 분석하여 하중센서의 오차 범위를 줄이고 신뢰성을 확보할 수 있는 방안을 제시하였다. 하지만 객차 내 혼잡도 정보를 알려주는 범위까지만 연구가 진행되었기 때문에 실제적인 혼잡도 개선을 위한 해결책은 되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 지하철 환경에 적용할 수 있도록 오차율을 낮추고, 운영 효율은 향상시킬 수 있는 방안을 고려하여 하중센서에 IoT기술을 접목한 혼잡도 개선 시스템을 제시하였다.

3. 수도권 지하철 운행현황

3.1 운행현황

1~9호선의 지하철 이용객은 일일 평균 약 729만 명이 다. 서울인구의 약 70%가 지하철을 이용하는 만큼 1~9호선의 평균 혼잡도는 155%를 보이고 있다.

이때, 혼잡도는 차량 정원에 대한 승차인원의 비율이며 승객의 편의성 및 열차의 안전과 정시운행을 고려하여 설정한다. Table 2와 같이 기준이 되는 혼잡도는 승차인원 160명이며 이를 100%로 정의하고 있다.[7]

Table 1. Operation Status of Metro Line 1~9

	Number of Weekday Operation	Annual Total PASGR (thousands)	Congestion Rate (%)
Line 1	517	170,807	144
Line 2	551	755,604	202
Line 3	410	10,729	147
Line 4	496	293,775	189
Line 5	465	308,201	154
Line 6	356	312,163	130
Line 7	421	197,176	172
Line 8	306	378,302	139
Line 9	540	88,927	115
Total	4,508	140,314	158

Seoul Statistics Information System, 2015

Table 2. Congestion Rate

No.	Passenger (Person)	Congestion Rate	No.	Passenger (Person)	Congestion Rate(%)
1	54	34%	7	240	150%
2	94	59%	8	280	175%
3	120	75%	9	320	200%
4	160	100% (Standard)	10	368	230%
5	184	115%	11	400	250%
6	216	135%	12	432	270%

1호선부터 9호선까지의 탑승객 수 및 혼잡도를 나타내는 Table 1의 운행현황에 따르면 수도권 노선의 혼잡도는 한국철도공사에서 정하는 기준 혼잡도(100%)보다 모두 높게 나타났으며 2호선, 4호선이 가장 높은 혼잡도를 보이고 있다. 이러한 높은 혼잡도를 보이는 이유는 환승역을 통하여 집중되는 승객들이 주요 원인으로 제기되었고, 이에 따라 서울시에서는 혼잡도 완화 대책으로 환승통로를 늘리는 혼잡승강장 구조 개선사업을 진행하였다.[7] 하지만 4호선 사당역을 포함한 일부 승강장들은 예산부족 및 긴 공사기간으로 인해 구조 개선사업이 지연되어 이를 보완할 수 있는 차선책이 필요한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 4호선 사당역을 대상으로 지하철의 혼잡도 평준화를 실현하기 위해 저비용, 단기간, 높은 운영효율성 등을 고려한 시스템을 제안하고자 한다.

3.2 사당역 운행현황

4호선 운행현황을 보여주는 Table 3과 같이 4호선은 당고개역에서 남태령역까지 총 26개 구간을 운행하고 있으며 배차간격은 첨두시(RH) 3분, 비첨두시(NH) 5분을 보이고 있다. 이러한 운행환경에서 4호선의 혼잡도는

189%이며 4호선 중에서도 사당역의 혼잡도가 가장 높은 것으로 나타났다.[7] 이러한 이유로 사당역은 정차지연이 빈번히 발생하면서 Table 4와 같이 열차 운행 횟수가 계획 대비 4대 감축 운행되고 있는 실정이다. 이는 승강장 및 객차 내 혼잡도로 인해 승차지연이 운행지연으로 이어진 것으로 추정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혼잡도로 인해 운행지연이 가장 빈번히 이루어지는 8:00부터 9:00시까지의 데이터를 분석하여 혼잡도를 개선해 보고자 한다.

2015년 1월부터 11월까지의 승·하차 인원을 보여주는 Table 5와 같이 승·하차 인원간의 차이는 평균 2배 이상인 66,673명의 차이를 보이고 있다. 또한 승·하차 인원간의 최대차는 73,546명으로 게이트 조절을 통한 혼잡도 평준화 시스템을 적용했을 시 혼잡도 개선에서 큰 효과를 보일 것으로 사료된다.

4호선 사당역 게이트는 Fig 1과 같이 총 10개이며 외부에서 승강장내로 진입하는 승차게이트가 총 4개, 승강장 내에서 외부로 나가는 하차 게이트가 총 6개로 구성되어 있다.

Table 3. Operation Status Table of Metro Line 4

Line	Section	Number of Station	Travel Time (min.)	Interval (min.)		Congestion Rate
				RH	NH	
4	Danggogae - Namtaeryeong	26	53	3	5	189%

Table 4. Service Delay Time and Scheduling

	Average Service Delay Time (min.)	Subway Scheduling (Number)
Plan	2.5	24
Service	3.0	20

Table 5. Ride and Alight Passenger of Sadang Station

Month	Time	Time	
		8:00~9:00	
		Ride PASGR	Alight PASGR
2015.11		123,890	52,713
2015.10		123,932	53,226
2015.9		115,119	49,283
2015.8		105,209	41,190
2015.7		118,326	44,780
2015.6		116,345	49,773
2015.5		114,774	54,177
2015.4		126,462	58,025
2015.3		128,481	59,248
2015.2		91,408	36,420
2015.1		112,516	44,229

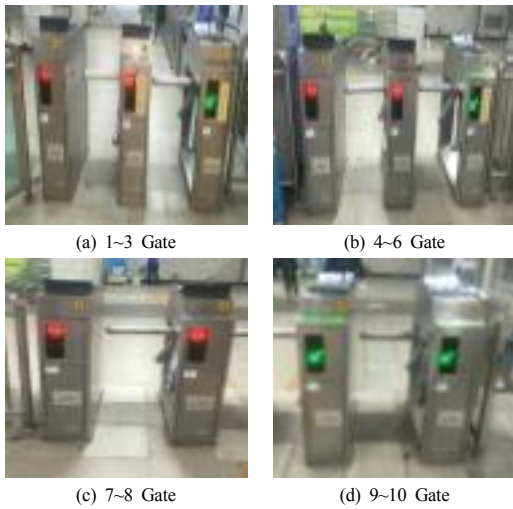


Fig. 1. Gate Status of Sadang Station

4. IoT를 접목한 혼잡도 평준화 시스템

4.1 시스템 정의 및 구성

제안하는 기술은 IoT 기술을 접목한 하중센서 측정시스템이다. Fig 2에서와 같이 지하철이 전 역에 도착하게 되면 옹하중 센서로 무게를 측정한 뒤 탑승 인원수를 계산한다. 측정된 탑승인원수는 해당 역에 열차가 도착하기 전 전광판 및 게이트로 전송하여 객차 및 승강장 내의 승객수를 조절하는 방안이다. 구성 시스템은 Fig 3와 같이 (a)블루투스 4.2를 활용한 근거리 무선통신 장치, (b)옹하중 제어장치, 기존 설비인 (c)승강장 내 전광판과 출입게이트 등이다.

4.2 시스템 동작원리

Fig 2에서 보여주는 혼잡도 평준화 시스템의 동작원리는 열차가 이전 역에서 정지하였을 때 옹하중 센서가 공기스프링의 압력을 측정하여 승객 하중을 계산하고, 이를 승객 수로 변환하여 탑승인원을 산정한다. 산정된 승객 수는 Fig 4의 그림과 같이 무선 원거리 통신으로 다음역의 전광판에 ‘매우 혼잡’은 빨간색, ‘혼잡’은 주황색, ‘보통’은 노란색, ‘여유’는 녹색 등의 신호로 표시된다. 또한 산정된 승객 수가 혼잡할 시에는 혼잡도에 따라 게이트 수를 줄여 승강장내로 유입하는 승객을 조절하게 된다.

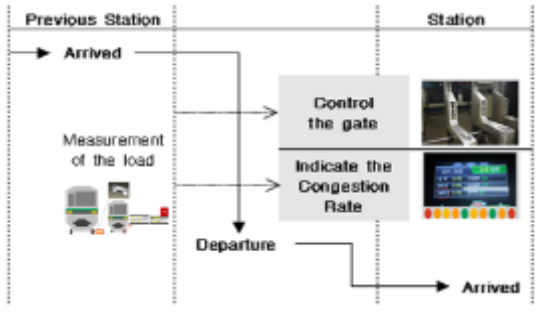


Fig. 2. Structure of The System

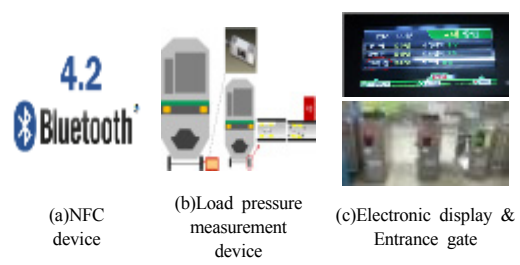


Fig. 3. Components of The System

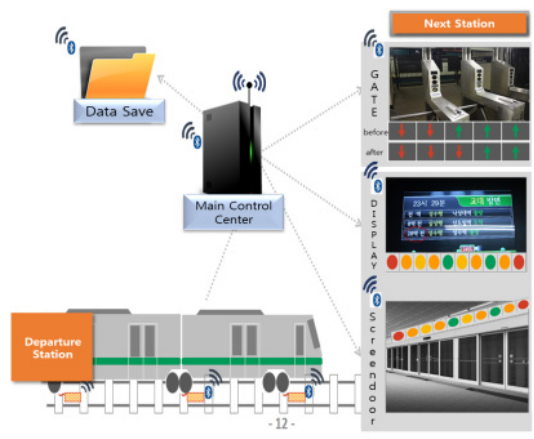


Fig. 4. Congestion Rate Notifying System

4.3 예상효과 분석 및 결과

4호선 사당역의 하중분포 연구 자료와 서울시의 Raw Data를 활용하여 예상 효과 분석을 진행하였다. 통계 데이터는 서울시 2015년 1월~10월 첨두시 평균 승차인원 데이터를 활용하였다. 기본 가정은 전광판 혼잡 안내 표시로 승객들이 승강장 내에 동일하게 분포되어 있는 것으로 한다. 분석 기준시간은 8:00~9:00이며, Table 6과 같이 기존 열차 운행 시간표에 따라 20대의 열차를 효과

분석에 적용하였다.

기존 하중분포 연구에서는 TGIS에서 실측된 자료에 근거하여 각 객차별 승·하차 승객의 분산도를 추정하였다.[1] 객차별 평균 하중분포를 나타내는 Table 7에서 보면 일반적으로 3호차, 6호차에 승객이 집중하는 형태로 나타났고, 이 비율을 기준으로 침두시 사당역 4호선에서 승차하는 인원을 Table 8 표와 같이 산출해 보았다. 산출한 결과를 토대로 Table 9에 나타나 있는 것과 같이 사당역의 출입 게이트 개수를 줄였을 때의 승차인원을 감소율을 추정하여 객차별 승차 인원을 도출해 보았다. 감소율은 1개의 출입 게이트 축소시 25%의 승객이 감소할 것이라고 가정하여 최대 40%까지의 승차인원이 감소할 것이라고 가정하여 분석하였다.

분석결과를 나타내는 Table 9의 Total을 보면 출입 게이트를 감소시킴으로써 전체 탑승인원도 함께 줄고 있는 것으로 나타나고 있다. 하지만 이는 실제로 승객이 줄어드는 것이 아니라 한 열차 당의 탑승인원이 감소함으로써 혼잡도를 감소시키는 것으로 판단해야 한다. 또한, Table 10의 시간표에서 추가할 수 있는 차량 수를 산정해 보았을 때 제안된 시스템이 열차 지연을 없애면서 총 4대의 차량을 추가 투입할 수 있을 것으로 분석되었다. 결론적으로, 열차의 추가 투입으로 평균 배차간격을 3.5분에서 2분으로 좁힐 수 있는 것으로 나타났고, 이는 더 많은 승객을 더 낮은 혼잡도로 운송할 수 있다는 결과로 이어지면서 승객들의 편의를 향상시킬 수 있는 것으로 사료된다.

Table 6. Metro Line 4 Timetable on RH hours

Number	Time	Number	Time
1	8:02	11	8:31
2	8:04	12	8:34
3	8:08	13	8:37
4	8:10	14	8:40
5	8:13	15	8:43
6	8:17	16	8:46
7	8:20	17	8:49
8	8:23	18	8:53
9	8:26	19	8:57
10	8:29	20	9:00

Table 7. Ride Passenger on RH hours

(unit: %)										
0 car	1 car	2 car	3 car	4 car	5 car	6 car	7 car	8 car	9 car	Total
7.4	7.3	7.5	14.3	9.8	11.1	14.8	9.0	9.2	9.6	100

Table 8. Ride Passenger on RH hours

(unit: person)										
0 car	1 car	2 car	3 car	4 car	5 car	6 car	7 car	8 car	9 car	Total
338	332	345	653	450	509	676	410	423	440	4,576

Table 9. Ride Passenger After Controlling The Gate

(unit: person)											
	0 car	1 car	2 car	3 car	4 car	5 car	6 car	7 car	8 car	9 car	Total
25%	254	249	259	490	337	382	507	308	317	330	3431
30%	237	233	242	457	315	356	473	287	296	308	3203
35%	220	216	224	424	292	331	440	267	275	286	2974
40%	203	199	207	392	270	305	406	246	254	264	2745

Table 10. Metro Line 4 Timetable on RH hours

Number	Time	Number	Time
1	8:02	13	8:31
2	8:04	14	8:34
3	8:06 (+)	15	8:37
4	8:08	16	8:40
5	8:10	17	8:43
6	8:13	18	8:46
7	8:15 (+)	19	8:49
8	8:17	20	8:51 (+)
9	8:20	21	8:53
10	8:23	22	8:55 (+)
11	8:26	23	8:57
12	8:29	24	9:00

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문은 지하철의 객차 및 승강장 내 혼잡도를 완화하기 위해 IoT를 접목한 혼잡도 평균화 시스템을 제안하였다. 또한, 제안한 시스템에 대하여 지하철의 운행현황 및 배차시간, 객차 하중분포 등의 Raw Data를 활용한 예상 효과 분석을 진행하였다.

효과 분석 결과 지하철 객차의 가장 혼잡한 6번 칸에 승차하는 인원이 기존 34명에서 최대 20명으로 감소되는 효과가 나타났다. 이와 더불어 기존 침두시 20대의 열차 운행대수가 24대로 증차될 수 있다고 분석되면서 시스템 도입시 운영 효율성면에서 효과가 있을 것으로 사료된다. 이는 기존 혼잡도 완화 사업으로 승강장 확장, 우회통로 건설 등 고비용, 건설기간의 장기화를 일으키는 대안들과는 달리 IoT를 접목한 하중센서를 도입함으로써 비용 절감 및 간단한 설치 방법으로 실제 도입 가능성이 높을 수 있을 것으로 예상된다.

향후 연구에서는 제안한 시스템의 실증 분석 방법으로 ABMS(Agent-Based Modeling and Simulation)기법을 활용하여 승객들의 동선 분포를 파악한 혼잡도 개선 효과에 대한 연구를 진행하여 실제 지하철 이용승객의 편의 향상과 혼잡도 개선을 위한 대안 제시에 크게 기여하고자 한다.

References

- [1] J. S. Lee, H. S. Cho, C. B. Bae, J, J, Lee. "A Study on the Improvement of Railway Signal System and Operating Efficiency", pp. 1-178, The Korea Transport Institute, November, 2011.
- [2] D. W. Kim, W. Y. Kim, J. W. Lee, "A Study on Application of Multiple Regression Analysis and Optimization Design for Improving the Subway Congestion Rate", Korean Institute of Industrial Engineers Fall Conference, Korean Institute of Industrial Engineers, November, 2011.
- [3] S. K. Cho, I. B. Chung, "A Study on the Solution of Train Delay and Congestion on Seoul Subway Line 2", Seoul City Research, pp. 123-135, Mar. 2015.
- [4] D. H. Kim, "An Estimation Model of the Minimum Required Dwell Time for Urban Railway", Korean Society for Railway Journal, pp.953-960, Dec. 2009.
- [5] K. I. Jung, "Urban Rail car pressure sensor response requirements analysis and system design methods required to measure the load pressure measurement study", Korean Society for Railway, Spring Conference, 2014
- [6] Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, "R&D Report on Improvement of Subway Station Utilization Efficiency", pp.1-205, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, June, 2012.
- [7] Seoul Metropolitan City, "A Review of the Congestion Relief Plan on Current Subway Lines", Chapter 14, Integrated Development Plan for the Seoul Subway Master Plan for 10 Years, Seoul Metropolitan City, June, 2013.
- [8] R. H. Jung, J. H. Chung, "Analysis of Route Choice Behavior in Subway Stations", Seoul City Research, pp. 203-214, June 2015
- [9] J. H. Park, S. H. Oh, J. H. Rhee, "A Study on the Analysis of Walking Behavior in Transfer Stations after the Improvement of Walking Environment", Korean Society of Civil Engineers Journal, pp. 189-196 May, 2012

김 미 레(Mi-Rye Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : UST(교통물류시스템 석사)
- 2015년 8월 ~ 2016년 2월 : 한국철도기술연구원 석사후연수연구원
- 2016년 3월 ~ 현재 : UST(교통물류시스템 및 ITS 공학 박사과정)

<관심분야>

철도물류, 교통공학, 철도토목

조 인 호(In-Ho Cho)

[정회원]



- 2009년 2월 : 카이스트(전기 및 전자공학 석사)
- 2013년 2월 : 카이스트(전기 및 전자공학 박사)
- 2013년 1월 ~ 2014년 9월 : LG전자 선임연구원
- 2014년 10월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도추진시스템, 전기자동차 충전기술, 철도물류