

전동열차 편성량수 설계를 위한 최적화 시뮬레이션

김익희¹ · 윤동희^{2*} · 금기정¹ · 이상명³

¹ 명지대학교 교통공학과, ² 우송대학교 철도경영정책학과, ³ 한국철도공사 연구원 경영연구처

An Optimizing Simulation for Designing the Numbers of Electric Train Car

KIM, Ick Hee¹ · YUN, Dong Hee^{2*} · KUM, Ki Jung¹ · LEE, Sang Myoung³

¹ Department of Transportation, Myongji University, Gyeonggi 449-728, Korea

² Railroad Management, Woosong University, Daejeon 300-718, Korea

³ Management Research Division, Korea Railroad Corporation Research Institute, Daejeon 300-720, Korea

Abstract

The railway service in the Seoul metropolitan area is facing variety of changes such as extension of service coverage, new construction, and introduction of express service which in turn causes changes on demands. The demand affects train operation characteristics (frequency of service, train formation) as well as on the congestion rate which is one of the major evaluation index in metropolitan area user service. For the efficient operation of the train, the relationship among the minimization of fleet number, operating cost, and service level has been analyzed. Using the Powersim, which is a system dynamics (System Dynamics) simulation program for realizing optimized simulation for train-formation, this paper identified that some stations of Gyeong-bu line exceeded limit congestion rate(150%) of a fleet already that means it is best to maintain current condition of the line; however, the Gyeong-in line and the Gwa-chon line showed no excess of the limit congestion rate so that it is possible to reduce 2-4 fleets of train for efficient operation. In addition, in case of Jang-hang line between Cheon-an and Sin-chang, a train consisting of 10 fleets provides services which is same formation of train for Gyeong-bu line. This study proved that the congestion rate will not rise greatly with only 4 fleets of a train for the service in Jang-hang line, and it is considered that a study for shuttle service between Cheon-an and Sin-chang is necessary.

수도권 광역철도는 운영 범위의 공간적 확대 및 신설 건설, 급행전철 도입 등 다양한 환경 변화에 직면하고 있으며 이는 이용수요 변화의 원인이 된다. 또한 시간대별 이용수요는 열차운행 특성(운행횟수, 편성량수 등) 뿐만 아니라 광역철도 이용자 서비스 평가 지표 중의 하나인 차내 혼잡도에도 영향을 미친다. 이에 본 연구는 철도의 효율적 운영을 위한 측면에서 열차 편성량수의 최소화와 운영비용, 이용자 서비스간의 관계를 파악하여 최적의 열차편성 조정 대안을 도출하고자 하였다. 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 시뮬레이션 프로그램인 Powersim을 활용하여 편성량수 최적화 시뮬레이션을 구현하였으며 그 결과 경부선은 현 운행시에도 한계혼잡도(150%)를 초과하는 역이 일부 존재하여 현행 유지함이 최적이라고 분석된 반면 경인선, 과천선 등의 경우 편성량수를 2~4량 감소시켜도 한계혼잡도를 초과하지 않아 적용 가능할 것으로 분석되었다. 또한 장항선 구간(천안~신창)은 경부선과 동일하게 현재 1편성 10량으로 운행되고 있으나 4량 운행시에도 혼잡도가 크게 증가 하지 않으므로 천안~신창구간의 단거리 셔틀운영방안에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Key Words

Electric Car, System Dynamics, Optimizing Simulation, Congestion, Causal Loop Diagram(CLD)
전동차, 시스템 동적 운영, 최적화 시뮬레이션, 혼잡도, 인과지도

* : Corresponding Author
yed0010@korail.com, Phone: +82-41-629-2211, Fax: +82-41-555-7878

I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

최근 수도권광역철도는 운영 범위 공간적 확대 및 신설노선 건설, 급행전철도입 필요성 대두, 운임체계의 다변화 등 매우 다양한 환경 변화에 직면하고 있으며 이는 급격한 이용수요 변화의 원인이라 판단되나, 현재 운행되고 있는 광역철도의 경우 4~10량의 열차단위 고정 편성으로 운영되고 있어 이용수요에 적절한 운송서비스 제공이 곤란하다.

본 연구에서는 광역철도의 노선별 이용수요 및 열차 운행특성을 분석하여 운송서비스 수준(차내혼잡도)을 유지하면서 운영비용을 최소화하기 위해 적정 편성량수 산정 방법을 제시하고 이에 따른 혼잡도 및 비용절감 효과를 검토하고자 한다.

2. 연구 내용

본 연구는 전체 5장으로 구성되어 있으며 연구 내용은 다음과 같다.

제2장에서는 광역철도 열차운영 및 직결운행, 시스템 다이내믹스(SD) 등에 관련 이론 등을 검토하였으며 광역철도의 운행횟수 및 차량소요량 산정방법, 기존 연구를 고찰하였다.

제3장에서는 편성량수 최적화 시뮬레이션 구현을 위한 광역철도의 운행 특성(운행거리, 운행시각, 이용수요 등)을 분석하였으며 운행비용 원단위를 산정하였다.

제4장에서는 편성량수 최적화 시뮬레이션을 구현하였으며, 노선별 편성량수 변동에 따른 총비용(차량구입비 + 운행비용) 및 차내 혼잡도 변화를 분석하였다.

II. 이론적 고찰

1. 관련 이론 검토

시스템 다이내믹스(System Dynamics)이론은 일반 경영관리 분야 및 역사, 생명공학, 물리학, 경제학, 사회학 뿐 아니라 육상/해운물류, 사회 인프라 건설, 철도 등 다양한 교통정책, 국가정책개발 등 매우 광범위한 분야에 걸쳐서 활용되는 이론으로 본 연구에서는 전동열차의

차내 혼잡도 분석과 향후 재차인원(수요)변동에 따른 편성량수 최적화, 일정 수준 차내 혼잡도 유지시의 비용분석 등 복잡한 문제에 대한 해법을 도출하기 위해 적용하였다.

시스템 다이내믹스(SD)이론에는 다양하고 복잡한 변수간 상호관계가 있으며 이는 변수간 피드백 관계(Feedback Relationship), 변수간 시차효과 관계(Time-Delay Relationship), 변수간 비선형관계(Non-Linearity Relationship)이다.

재차인원은 시간대별 승하차수요에 의해 재차용량은 편성량수 및 운행시각에 의해 변하며 차내혼잡도는 재차인원과 재차용량에 의해 산정된다.

이용자 서비스인 혼잡도 기준에 의해 적정 편성량수 운영 전략이 결정되며 이 기준을 초과하면 운행시각 조정을 통해 재차용량을 증가 시키는 피드백 메커니즘을 나타낸다.

또한 편성량수 변화는 현실적으로 즉시 시행되기 보다는 편성량수 조정 전략 수립이후 실제 적용시점까지 시간 차이가 발생하게 되어 시차효과가 있으며 열차운행특성 및 이용자서비스의 경우 비선형관계 모형이 고려된다.

수도권광역철도의 열차운행횟수, 차량소요량 등은 시간대별 이용수요 및 혼잡도를 근거로 산정되며 한국철도

<Table 1> The standard of congestion estimation

Passenger distribution in vehicle	passenger (person)	congestion (%)
2 people in 3 references seats, 5 people in 7 references seats	38	24%
All of the seats are full	54	34%
All of the seats are full - 2 person pieces which are short the handle - 5 person pieces which are long the handle	92	58%
the ground on All of the seats are full (54 person)		
All of the seats are full - 2 person pieces which are short the handle (8 person) - 5 person pieces which are long the handle (30 person) - 3 people stand to each entrance (24 person)	116	73%
All of the seats are full - 2 person pieces which are short the handle (8 person) - 7 person pieces which are long the handle (42 person) - 7 people stand to each entrance (56 person)	160	100%

Passenger distribution in vehicle	passenger (person)	congestion (%)
All of the seats are full - 3 person pieces which are short the handle (12 person) - 8 person pieces which are long the handle (48 person) - 6 people stand to each entrance (48 person) - 5 people × 5 line in central of Car (25 person)	181	113%
All of the seats are full - 3 person pieces which are short the handle (12 person) - 8 person pieces which are long the handle (48 person) - 8 people stand to each entrance (64 person) - 8 people × 5 line in central of Car (40 person)	218	136%
All of the seats are full - 3 person pieces which are short the handle (12 person) - 8 person pieces which are long the handle (48 person) - 10 people stand to each entrance (80 person) - 10 people × 5 line in central of Car (50 person)	244	153%
All of the seats are full - 3 person pieces which are short the handle (12 person) - 8 person pieces which are long the handle (48 person) - 15 people stand to each entrance (120 person) - 10 people × 5 line in central of Car (50 person)	284	178%
the ground on no space in vehicle		
All of the seats are full - 3 person pieces which are short the handle (12 person) - 8 person pieces which are long the handle (48 person) - 15 people stand to each entrance (120 person) - 8~9 people × 10 line in central of Car (80~90 person)	320	200%
The passenger wild body which is adheres closely and each entrance is congested	368	230%
The passenger is very pressed. - each entrance and the center in vehicle is congested	400	250%
Saturation capacity in vehicle - passenger is very difficult to board the vehicle	432	270%

reference) The standard of congestion estimation, Korail Internal Data, 2011

공사의 혼잡도 적용 기준(150%)은 <Table 1>과 같다.

최적화 이론은 경제·사회 활동의 주체가 자신이 추구하는 목적 달성을 위해 주어진 조건하에서 최선의 대안, 가장 효율적 대안을 선택하는 것으로 결정 변수(Decision Variable)들의 함수로 표현되는 목적 함수

(Objective Function)와 주어진 조건을 나타내는 제약 조건식(Constraints)으로 구성된다.

$$\begin{aligned} \text{Max (또는 Min)} \quad & Z = U(x_1, x_2) \\ \text{s.t.} \quad & C(x_1, x_2) \leq b \\ & x_1, x_2 \geq 0 \end{aligned}$$

여기서, $\text{Max } Z = U(x_1, x_2)$: 효용 극대화(목적 함수)

$C(x_1, x_2)$: 비용 함수(제약 조건)

x_1, x_2 : 효용 영향 미치는 요인

(설명변수)

2. 기존 연구 고찰

정예성 외 1명(2007)은 광역철도 중앙선의 6개 열차를 대상으로 이용수요 및 혼잡도 목적측조에 의해 편성량수에 따른 차내용량 및 혼잡도 변화를 분석하였다.

단, 상기 연구에서는 편성량수와 혼잡도 변화 분석시 열차운행시각 및 시간별 이용수요는 동일함을 가정하여 첨두 및 비첨두 시간별 이용 특성 반영에 대해서는 보완이 필요할 것으로 판단된다.

김경식(2009)은 기존의 버스운영계획 모형을 시스템 다이내믹스(SD)관점에서 검토하였으며 이는 버스운행 특성(시간대별 배차간격, 정류장 간격, 노선길이 등)에 따른 교통비용 변화를 분석하였다.

상기 연구에서 교통비용은 운영자 비용(대당 차량운행비용)과 이용자 비용(승객 대기시간 및 통행시간비용)으로 구분하여 적용하였으며 이는 운영자 비용(차량 구입비용 및 운영비용) 및 이용자서비스(차내 혼잡도)를 최적화 시뮬레이션 모형에 반영하였다는 면에서 본 연구와 유사하다고 할 수 있으며 첨두시 및 비첨두시 운행시각 변화 및 시간대별 이용수요 변동 특성 반영을 위해 재차용량 산정시 이를 추가적으로 검토하였다.

III. 현황 분석

1. 노선별 이용수요 분석

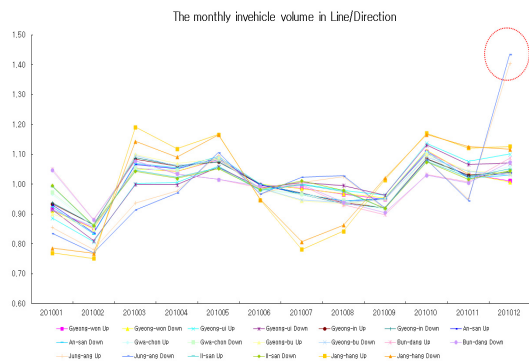
수도권 광역철도 각 노선의 상·하행에 따른 월 재차인원 분석 결과 노선별 열차운행특성(운행시각, 편성량수, 정차패턴 등)에 따라 다소 이용수요 차이는 있으나, 월 재차인원 변동 추이는 유사하게 나타났다.

<Table 2> The monthly invehicle volume in Line/Direction

(Unit : 10,000person/mon.)

Line	Gyeong-won		Gyeong-ui		Gyeong-in		An-san		Gwa-chon	
	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down
201001	4,998	4,468	748	755	7,267	6,379	1,599	1,342	2,299	2,192
201002	4,661	4,172	681	669	6,713	5,869	1,438	1,210	2,036	1,948
201003	5,744	5,151	845	824	8,419	7,396	1,833	1,552	2,492	2,378
201004	5,686	5,108	848	823	8,238	7,217	1,809	1,531	2,493	2,363
201005	5,901	5,308	893	872	8,358	7,307	1,869	1,584	2,591	2,446
201006	5,442	4,900	828	815	7,759	6,796	1,713	1,452	2,333	2,220
201007	5,382	4,826	844	829	7,540	6,562	1,665	1,404	2,293	2,181
201008	5,271	4,745	825	822	7,301	6,355	1,623	1,369	2,227	2,136
201009	5,181	4,678	812	794	7,154	6,256	1,635	1,383	2,181	2,073
201010	6,052	5,456	959	933	8,442	7,370	1,898	1,611	2,630	2,478
201011	5,640	5,069	907	879	8,004	6,996	1,760	1,479	2,426	2,285
201012	5,517	4,934	928	883	8,088	7,077	1,784	1,496	2,520	2,362
Average	5,456	4,901	843	825	7,773	6,798	1,719	1,451	2,377	2,255
Line	Gyeong-bu		Bun-dang		Jung-ang		Il-san		Jang-hang	
	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down	Up	Down
201001	9,906	10,491	3,204	3,193	743	595	959	887	73	73
201002	9,337	9,862	2,689	2,686	679	549	831	767	71	72
201003	12,092	12,581	3,285	3,287	814	651	1,011	929	112	106
201004	11,744	12,174	3,153	3,154	849	691	989	908	105	102
201005	11,924	12,413	3,096	3,099	954	788	1,019	937	110	109
201006	10,842	11,312	3,012	3,030	839	689	946	875	89	88
201007	10,374	10,876	3,032	3,044	874	729	964	901	74	75
201008	10,273	10,771	2,838	2,865	891	732	943	872	79	80
201009	10,457	10,897	2,739	2,763	797	655	887	819	96	95
201010	12,098	12,525	3,148	3,141	940	771	1,041	957	110	109
201011	11,480	11,977	3,073	3,064	827	673	988	905	106	105
201012	11,375	11,834	3,317	3,277	1,221	1,022	1,015	931	106	104
Average	10,992	11,476	3,049	3,050	869	712	966	891	94	93

reference) Integrated Railway Information System(IRIS) the monthly volume in metropolitan, Korail Internal Data, 2010



<Figure 1> The monthly invehicle volume in Line/Direction

단, 중앙선의 경우 경춘선 전동열차 운행시점인 12월에 월평균 재차인원이 급증하였으며 이는 상봉역간 환승 수요 증가가 원인이라 판단된다.

수도권 광역철도 각 노선의 시간대별 일평균 승차인원을 분석한 결과 시간대별 주중 수요의 경우 모든 노선에 대해 오전 첨두(07~09시)와 오후 첨두(17~20시)에 높게 나타났으며 이는 광역철도의 대중교통 이용 특성상 통근, 통학에 의한 수요 비율이 크기 때문이라 분석된다.

또한 첨두시간 이용수요는 차내 혼잡도 결정에 중요한 영향을 미치므로 본 연구의 편성량수 최적화 시뮬레이션 구현시 고려하였다.

2. 노선별 열차운행비용 원단위 산정

본 연구에서는 노선별 최적 편성량수 산정을 위해 총비용(차량구입 및 운행비용)과 차내혼잡도를 목적함수로 하는 Multi-Object Optimal Simulation을 구현하였다.

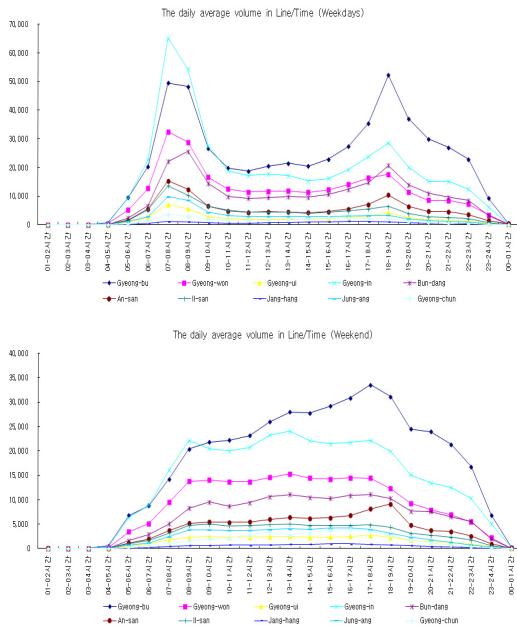
한국철도공사 광역철도의 연간 원가자료 분석 결과 전체 비용항목은 28개이며 편성량수에 의해 영향을 받는 비용항목은 객차청소료, 동력비, 열차운영수수료로

<Table 3> The daily average volume in Line/Time

(Unit : per/day)

Line/Time	Gyeong-bu	Gyeong-won	Gyeong-ui	Gyeong-in	Bun-dang	An-san	Il-san	Jang-hang	Jung-ang	Gyeong-chun
01-02	4	2	0	1	1	2	4	0	0	0
02-03	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1
03-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04-05	742	445	12	560	93	59	43	2	13	37
05-06	9,510	5,128	872	9,430	2,393	1,662	1,517	160	1,192	358
06-07	20,294	12,681	2,510	22,621	6,702	5,536	5,278	436	2,900	1,378
07-08	49,512	32,529	7,116	65,167	22,023	15,283	13,579	1,206	9,866	3,659
08-09	48,198	28,808	5,564	54,355	25,645	12,413	10,331	1,048	8,545	2,961
09-10	26,688	16,612	2,810	27,504	14,408	6,564	6,402	729	4,389	1,882
10-11	19,811	12,471	2,082	18,850	9,889	4,760	5,058	627	3,318	1,567
11-12	18,751	11,441	1,864	17,124	9,309	4,334	4,446	584	2,877	1,596
12-13	20,459	11,635	1,915	17,704	9,455	4,521	4,309	704	2,843	1,755
13-14	21,504	11,831	1,938	17,133	9,779	4,517	4,359	745	2,828	1,758
14-15	20,449	11,352	1,823	15,285	9,558	4,270	4,044	879	2,691	2,079
15-16	22,873	12,194	2,092	16,082	10,682	4,631	4,447	1,039	2,759	2,420
16-17	27,353	14,080	2,512	19,234	12,414	5,468	4,857	1,226	3,063	2,406
17-18	35,484	16,341	3,015	23,804	14,743	7,149	5,464	1,198	3,146	2,176
18-19	52,297	17,639	4,189	28,638	20,694	10,445	6,384	1,078	3,275	2,087
19-20	37,031	11,492	2,653	20,140	13,964	6,376	3,853	708	2,126	1,129
20-21	30,005	8,610	1,688	15,198	11,026	4,716	2,811	538	1,505	793
21-22	26,979	8,461	1,650	15,049	9,630	4,603	2,559	465	1,189	616
22-23	22,922	7,224	1,216	12,462	8,482	3,546	2,030	325	882	424
23-24	9,310	3,417	524	6,239	3,211	1,525	836	140	372	155
00-01	531	208	6	343	147	319	141	41	22	5
Average	21,696	10,608	2,002	17,622	9,344	4,696	3,865	578	2,492	1,302

reference) Integrated Railway Information System(IRIS) the timely volume in metropolitan, Korail Internal Data, 2010~2011



<Figure 2> The daily average volume in Line/Time

<Table 4> The Cost list in Metropolitan

Division	Items	Division	Items
Personnel expenses	Basic pay	Overhead Expenses	Advertising expenses
	Allowance		Other expenses
	Incentive		Metropolitan contact expenses
	Miscellaneous allowances	Property Expenses	Insurance fee
	Severance payment		Fuel and light prices
	Fring benefits		Railcar cost
Overhead Expenses	Other employee benefits	Charges for the Use of Infrastructure	Repair & Maintenance Expenses
	Traveling expenses		Depreciation cost
	Charge (Train operation)		Depreciation cost (Railcar)
	Charge (Metropolitan)		Redemption cost
	Charge (Management facility)		Electric power
	Cost of cleaning up passenger car		Diesel power
Charge (Affiliate)	Train	Train	
Payment commission		High speed Train	

note) Black mark is train service cost items

<Table 5> The Method of Train service cost unit

Division	Contents
Analytic Condition	<ul style="list-style-type: none"> ○ The Cost items in Metropolitan : 28 items - Train service cost (Cost of cleaning up passenger car, Train operation charge, Power cost) ○ The contents for classification is followed - Gyeong-bu (Gyeong-bu Express, Seoul Metro 1 line Byeong-jum car depot 2nd Line involved) - Il-san (Seoul Metro 3 line involved) - Gwa-chon (Seoul Metro 4 line involved)
Method of train service cost Unit	<ul style="list-style-type: none"> ○ Train service cost analysis - the monthly service cost in Line (January~July, 2010) ○ Train Operation volume analysis ○ The estimation of Train service cost Unit - $Train\ service\ cost\ Unit(won/car \cdot km) = \frac{Train\ service\ cost(um)}{Train-km \times car}$

reference) The monthly cost in 2010, Korail Internal Data, 2011

판단된다. 이에 인건비(기본급, 복리후생비, 성과상여수당 등) 및 시설사용료 등 편성량수에 의한 영향이 미미하다고 판단되는 항목은 원단위 산정시 제외하였다.

열차운행비용 원단위는 노선별 연간 열차운행실적

(열차키로)과 운행비용, 노선별 전동열차 편성량수에 의해 산정하였다.

안산선, 과천선, 일산선의 경우 유사한 변동 패턴을 보인 반면, 중앙선과 분당선의 경우 2009년 11월 이후 지속적 감소 추세를 보였으며 이는 운행비용이 미미하게 감소한데 비해 운행실적은 급증하였기 때문이라 분석된다.

또한 장항선의 경우 열차운행실적 및 비용 변동이 매우 불규칙한 반면, 원단위는 10.0수준으로 거의 변동 없음을 알 수 있다.

IV. 편성량수 최적화 시뮬레이션

1. 전제조건

본 연구에서는 사회·경제적 특성 및 기타 외부환경 변화를 반영한 최적화 방안 제시 및 정책 의사결정 지원이 가능한 Powersim이라는 프로그램을 활용하여 “전동열차 운행편성 최적화 시뮬레이션”을 구현하였다.

<Table 6> The monthly Operation Cost unit in Line

(Unit : won/car-km)

Division		Gyeong-bu	Gyeong-won	Gyeong-ui	Gyeong-in	Bun-dang	An-san	Il-san	Jang-hang	Jung-ang	Gwa-chon
2009	Jan.	29.3	33.5		36.1	59.8	31.0	27.5	9.8	19.7	40.9
	Feb.	29.5	33.7		36.4	60.0	30.7	27.8	9.9	19.5	40.8
	Mar.	29.4	33.3		36.2	59.7	30.6	27.9	9.9	18.6	40.5
	Apr.	27.3	31.2		33.3	55.4	29.2	24.8	8.9	17.2	38.2
	May	26.4	33.6		33.0	60.0	17.1	16.5	9.8	19.0	33.5
	June	30.8	34.8		37.5	61.8	31.1	27.3	9.9	19.2	41.1
	July	27.7	35.9	35.5	35.1	61.8	17.8	18.7	10.4	20.1	35.5
	Aug.	30.8	34.8	36.3	38.0	62.5	31.1	34.6	10.5	20.1	41.6
	Sep.	27.5	34.7	35.4	34.6	62.5	17.8	17.1	10.5	21.1	35.1
	Oct.	27.5	34.7	36.4	34.5	62.6	17.6	17.6	10.5	19.7	35.0
	Nom.	29.5	37.4	37.1	37.6	63.0	17.6	18.4	11.0	19.7	35.1
	Dec.	28.5	36.0	36.6	35.4	62.2	17.6	18.3	10.9	17.3	34.9
2010	Jan.	29.7	33.9	38.5	32.8	60.8	16.6	17.1	11.4	17.6	33.1
	Feb.	28.7	32.3	38.6	32.9	61.7	17.5	17.3	11.3	18.4	34.8
	Mar.	28.4	31.5	36.1	29.4	56.1	13.8	16.3	9.9	15.3	28.2
	Apr.	34.5	31.5	36.9	33.4	57.7	25.9	32.7	10.4	15.7	35.4
	May	34.3	31.6	36.8	32.9	52.8	25.9	52.0	10.3	16.3	35.3
	June	30.5	30.9	36.5	32.8	52.0	27.1	27.3	10.2	15.7	36.5
	July	31.2	31.4	37.7	33.0	50.5	26.6	27.3	10.4	15.8	36.1
Average	2009	28.7	34.5	36.2	35.6	61.0	24.1	23.0	10.2	19.3	37.7
	2010	31.1	31.9	37.3	32.5	55.9	21.9	27.2	10.6	16.4	34.2

<Table 7> The Estimated method of Invehicle Demand and Capacity in vehicle

Division	Estimated method
<p>Invehicle Demand</p>	<p>1) Estimation of daily invehicle demand in Line/Direction 1-1) Estimation of daily boarding passenger rate in Line 1-2) Analysis of monthly invehicle demand in Line/Direction 2) Estimation of daily invehicle demand in Line/Station 2-1) Estimation of monthly invehicle demand rate in Line/Station ※ Calculation (1) and (2-1) 3) Estimation of Hourly invehicle demand in Line ※ Calculation (2) and daily average boarding rate in hourly</p> <pre> graph TD A1[Daily boarding passenger Rate in Line] --- B1[Daily invehicle Demand in Direction] A2[Monthly invehicle Demand in Direction] --- B1 A1 --- B2[Monthly invehicle rate in Station] A2 --- B2 B1 --- C1[Daily invehicle Demand in Station] B2 --- C1 B1 --- C2[Daily average boarding Rate in Hourly] B2 --- C2 C1 --- D[Hourly invehicle demand] C2 --- D </pre>
<p>Invehicle Capacity</p>	<p>1) Estimation of Hourly invehicle capacity in Line 1-1) The number of Electronic car in train : 4~10 Car 1-2) The capacity per Car : 160 person/car 1-3) The train services frequency per Hour ※ Determine time headway according to Peak/Non-peak Hour train service</p> <pre> graph TD A1[The number of Electronic car in train] --- B[Hourly invehicle capacity] A2[The capacity per car] --- B A3[The train services frequency per Hour] --- B </pre>

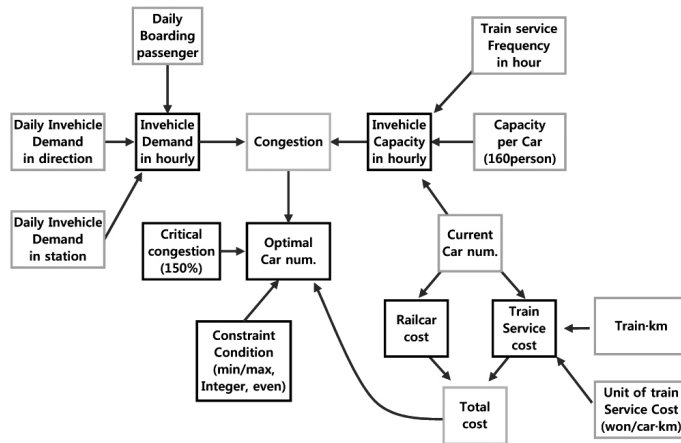
인과지도(Causal-Loop Diagram, 이하 CLD)는 최적화 시뮬레이션 설계시 고려한 관련 Data간 영향관계를 도식화한 결과이며 본 연구에서는 시간대별 일평균 승차인원, 구간 재차인원, 차내 혼잡도, 차량구입 및 운행비용, 재차용량, 편성량수 등을 고려하였다.

최적화 시뮬레이션의 입력자료인 구간 재차인원 및 재차용량은 광역철도 노선별 수송실적(시간대별 일평균 승차인원, 역별 월 재차인원, 기본 편성량수, 열차운행시각 등)을 근거로 하였으며 산정 방법은 다음과 같다.

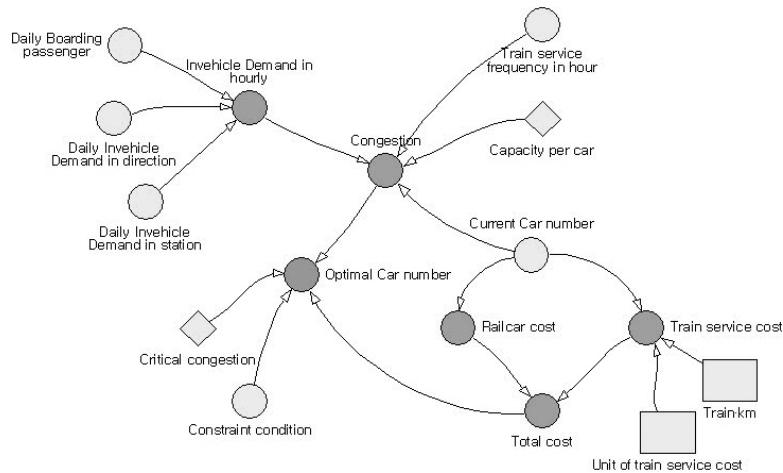
2. 시뮬레이션 설계

현재 노선별 편성량수에 따른 1시간 재차용량과 재차인원(수요)을 분석하여 차내 혼잡도를 산정하고 그 결과와 한계 혼잡도(150%)를 비교하여 편성량수 증가 및 감소를 판단하였다.

이후 편성량수 변화에 따른 총비용(차량구입 및 운행 비용)절감 효과 및 차내 혼잡도 변화 분석을 통해 노선별 적정 편성량수를 검토하였다.



<Figure 3> The concept diagram of Simulation



<Figure 4> The Causal-Loop diagram of Simulation

3. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 시간대별 이용수요를 기준으로 평균혼잡도, 첨두혼잡도, 최대혼잡도로 구분하였다.

평균혼잡도는 1년간 열차운행시간 동안의 시간 단위 혼잡도 전체 평균을 의미하며 첨두혼잡도는 1일 중 첨두시간(07시~09시, 18시~20시)의 시간 단위 혼잡도에 대한 평균이다.

또한 최대혼잡도는 1년 중 역별 혼잡도가 가장 높았던 시간 단위 혼잡도를 의미한다. 혼잡도는 운행 편성량수 결정시 중요 요인이며 시간대별 이용 수요 및 운행시격(횟수)에 따라 달라진다.

편성량수 감소 여부는 앞서 검토한 바와 같이 한계 혼잡도(150%)를 기준으로 하였으며 전동열차 운행 특성

을 감안하여 최소 4량~최대 10량 범위에서 2량 단위로 변화하면 분석하였다.

노선별 편성량수에 따른 혼잡도 및 총비용(차량구입 및 운행비용)의 민감도를 분석한 결과 편성량수 감소시 시간당 재차용량이 감소됨에 따라 혼잡도는 증가하였으며 총비용은 감소하였다.

평균혼잡도의 경우 비첨두시 이용 수요가 포함되어 있어 모든 노선이 한계 혼잡도를 초과하지 않는 것으로 나타났으나 경부선 최대혼잡도의 경우 현행 유지(1편성 10량)시에도 174%로 초과하는 것으로 분석되었다.

이는 운행노선 및 정차역 이용 특성에 의해 전체 혼잡도는 낮게 산정되었으나 일부 환승역 및 대표역의 혼잡도는 높기 때문이라 판단되며 이에 편성량수에 따른 역별 최대혼잡도 변화도 검토하였다.

<Table 8> Variation of congestion according to Electric Car number

Line	Electric Car #.	Congestion			Total Cost (100million won)
		Average	Peak	Max.	
Gyeongbu	Current Level	0.74	1.17	1.74	214.27
	(- 2)	0.92	1.46	2.17	184.81
	(- 4)	1.23	1.95	2.90	155.35
	(- 6)	1.84	2.93	4.35	125.89
Gyeongwon	Current Level	0.29	0.43	0.77	181.53
	(- 2)	0.36	0.54	0.96	152.07
	(- 4)	0.48	0.72	1.28	122.61
	(- 6)	0.72	1.08	1.92	93.15
An-san	Current Level	0.22	0.37	0.75	157.98
	(- 2)	0.27	0.46	0.93	128.52
	(- 4)	0.36	0.61	1.25	99.06
	(- 6)	0.54	0.92	1.87	69.60
Gyeongin	Current Level	0.43	0.62	1.18	174.12
	(- 2)	0.54	0.77	1.47	144.66
	(- 4)	0.72	1.03	1.96	115.20
	(- 6)	1.08	1.54	2.94	85.74
Il-san	Current Level	0.20	0.30	0.75	155.70
	(- 2)	0.25	0.38	0.94	126.24
	(- 4)	0.33	0.51	1.25	96.78
	(- 6)	0.50	0.76	1.88	67.32
Gyeongchun	Current Level	0.24	0.24	0.76	125.48
	(- 2)	0.32	0.32	1.02	96.02
	(- 4)	0.48	0.49	1.53	66.56
Bun-dang	Current Level	0.35	0.48	1.16	103.27
	(- 2)	0.52	0.71	1.74	73.81
Gwa-chon	Current Level	0.32	0.54	1.19	157.86
	(- 2)	0.40	0.67	1.49	128.40
	(- 4)	0.53	0.90	1.99	98.94
	(- 6)	0.79	1.35	2.98	69.48
Jung-ang	Current Level	0.24	0.38	1.03	127.96
	(- 2)	0.33	0.51	1.37	98.50
	(- 4)	0.49	0.76	2.06	69.04
Jang-hang	Current Level	0.12	0.13	0.35	148.27
	(- 2)	0.14	0.16	0.44	118.81
	(- 4)	0.19	0.22	0.59	89.35
	(- 6)	0.29	0.33	0.88	59.89
Gyeongui	Current Level	0.27	0.50	1.07	128.65
	(- 2)	0.36	0.66	1.43	99.19
	(- 4)	0.55	0.99	2.15	69.73

note) Congestion is average of high position 20%
reference) The metropolitan rail cost in 2010, Korail Internal Data, 2011

<Table 9> Analysis result of timely maximum congestion

Line	Station	Electronic Car #			
		Current Level	- 2	- 4	
Gyeongui (8 Cars)	Gajwa	0.25	0.33	0.50	
	Goksan	0.62	0.83	1.24	
	Geumneung	0.39	0.52	0.78	
	Geumchon	0.32	0.43	0.64	
	Neunggok	1.03	1.37	2.05	
	Munsan	0.14	0.19	0.29	
	Baengma	0.62	0.82	1.24	
	Susaek	1.09	1.45	2.18	
	Sinchon	0.21	0.28	0.42	
	Unieong	0.43	0.57	0.86	
	Wallong	0.21	0.29	0.43	
	Ilsan	0.54	0.72	1.09	
	Tanhyeon	0.48	0.64	0.97	
	Paju	0.17	0.23	0.34	
	Pungsan	0.58	0.78	1.17	
	Haengsin	1.09	1.45	2.17	
	Hwajeon	1.10	1.46	2.19	
DMC	0.26	0.34	0.51		
Seoul station	0.00	0.00	0.00		
Gyeongui Line	1.07	1.43	2.15		
Line	Station	Electronic Car #.			
Gyeongbu (10 Cars)		Current Level	- 2	- 4	- 6
	Gwanak	0.96	1.19	1.59	2.39
	Gwangmyeong	0.01	0.01	0.02	0.03
	Guro	2.49	3.11	4.14	6.21
	Gunpo	0.80	1.00	1.33	2.00
	Geumjeong	1.57	1.97	2.62	3.94
	Namyong	1.37	1.72	2.29	3.44
	Dangjeong	0.77	0.97	1.29	1.93
	Daebang	1.62	2.02	2.70	4.04
	Doksan	1.07	1.34	1.79	2.68
	Dujeong	0.16	0.20	0.26	0.39
	Myeonghak	0.89	1.12	1.49	2.23
	Byeongjeom	0.42	0.52	0.70	1.04
	Seoksu	0.97	1.22	1.62	2.43
	Seonghwan	0.18	0.22	0.30	0.45
	Seryu	0.44	0.55	0.73	1.10
	Sema	0.33	0.41	0.54	0.82
	Songtan	0.27	0.33	0.44	0.67
	Suwon	0.61	0.77	1.02	1.53
	Singil	1.63	2.04	2.72	4.08
	Anyang	0.93	1.16	1.54	2.32
	Osan	0.31	0.39	0.52	0.77
	Yongsan	1.41	1.76	2.35	3.53
	Uiwang	0.75	0.94	1.26	1.88
	Jije	0.23	0.29	0.39	0.58
	Jiksan	0.16	0.20	0.27	0.40
	Jinwi	0.27	0.34	0.45	0.68
	Cheonan	0.13	0.16	0.21	0.31
	Pyeongtaek	0.23	0.29	0.38	0.57
	Hwaseo	0.65	0.81	1.09	1.63
	Noryangin	1.62	2.03	2.71	4.06
	Seoul station	0.00	0.00	0.00	0.00
Seojeongri	0.25	0.32	0.42	0.63	
Sindorim	1.88	2.35	3.14	4.71	
Yeongdeungpo	1.69	2.12	2.82	4.24	
Osan Univ.	0.32	0.40	0.53	0.79	
Geumcheon-gu Office	1.03	1.28	1.71	2.56	
Sungkyunkwan Univ.	0.72	0.90	1.20	1.80	
Gasan Digital Complex	1.04	1.30	1.73	2.60	
Seodongtan	0.00	0.00	0.00	0.00	
Gyeongbu Line	1.74	2.17	2.90	4.35	

Line	Station	Electronic Car #.			
		Current Level	- 2	- 4	- 6
An-san (10 Cars)	Oido	0.06	0.07	0.09	0.14
	Jeongwang	0.13	0.16	0.21	0.32
	Singi oncheon	0.14	0.18	0.24	0.35
	Ansan	0.28	0.36	0.47	0.71
	Gongdan	0.32	0.40	0.53	0.80
	Gojan	0.39	0.48	0.64	0.96
	Jungang	0.48	0.59	0.79	1.19
	Hanyang Univ. at Ansan	0.53	0.66	0.89	1.33
	Sangnoksu	0.66	0.83	1.10	1.65
	Banwol	0.68	0.85	1.14	1.71
	Daeyami	0.70	0.88	1.17	1.76
	Surisan	0.73	0.91	1.21	1.82
	Sanbon	0.81	1.02	1.36	2.03
	Ansan Line	0.75	0.93	1.25	1.87

note) Congestion is average of high position 20%, the basis of upper Line

최대혼잡도 산정 결과, 경부선의 경우 현행 유지시에도 한계혼잡도(150%)를 초과하는 역(구로, 신도림, 영등포 등)이 다수 발생하고 있다.

또한 안산선의 경우 현재 1편성당 10량으로 운행되고 있으나 4량(6량 감소) 운행시에도 차내혼잡도가 크게 증가하지 않는 것으로 분석되었으며 향후 수인선(인천~수원)개통시 현재 운행구간(한대앞~금정)의 경우 이용수요가 감소할 것으로 예상된다.

따라서 이러한 경우 구간 셔틀운송방안에 대해 열차 운행 효율성이 있는지 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4. 분석 결과 종합

앞의 분석 결과에 의하면 경부선의 경우 현 운행시에도

<Table 10> Analysis result of Optimizing effect in Line
(Unit : Car, 100million won)

Line	Current Level			Optimizing			Effect		
	Car #.	Congest.	Total cost	Car #.	Congest.	Total cost	Car #.	Congest.	Total cost
Gyeongbu	10	1.74	214.27	10	1.74	214.27	0	0.00	0.00
Gyeongwon	10	0.77	181.53	6	1.28	122.61	-4	0.51	-58.92
Gyeongchum	8	0.76	125.48	6	1.02	96.02	-2	0.26	-29.46
Ansan	10	0.75	157.98	6	1.25	99.06	-4	0.50	-58.92
Bundang	6	1.16	103.27	6	1.16	103.27	0	0.00	0.00
Gyeongin	10	1.18	174.12	8	1.47	144.66	-2	0.29	-29.46
Gyeongui	8	1.07	128.65	6	1.43	99.19	-2	0.36	-29.46
Gwachon	10	1.19	157.86	8	1.49	128.40	-2	0.30	-29.46
Jungang	8	1.03	127.96	6	1.37	98.50	-2	0.34	-29.46
Janghang	10	0.35	148.27	4	0.88	59.89	-6	0.53	-88.38
Il-san	10	0.75	155.70	6	1.25	96.78	-4	0.50	-58.92

혼잡도가 한계혼잡도(150%)를 초과하는 역이 일부 존재하므로 편성량수 조정하지 않고 현행 유지함이 적절하다고 판단되며 경인선, 과천선 등의 경우 2~4량 조정이 가능할 것으로 분석된다.

또한 장항선의 경우 역별 이용 수요 많지 않아 해당 구간에서의 셔틀운송 방안 검토가 필요할 것으로 판단된다.

노선별 적정 편성량수 및 이에 따른 총비용 절감 효과 산정 결과는 <Table 10>과 같다.

V. 결론 및 향후 연구과제

1. 연구 종합 및 결론

광역철도는 버스와 더불어 이용수요가 많은 주요 대중교통수단이며 공공서비스 제공을 목적으로 전동차 확충시 일부 정부 재원지원이 이루어지고 있다.

이에 효율적 운영계획 수립이 요구되고 있으나 현재 광역철도의 경우 4~10량의 열차단위 편성으로 고정운영되고 있어 이용수요에 능동적 대응이 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 현재 운영중인 광역철도의 노선별 열차운행 특성 및 시간대별 이용수요 변동 특성을 분석하여 효율적 운영계획 수립을 위한 편성량수 최적화 시뮬레이션을 구현하였으며 이에 따른 혼잡도 및 총비용 절감 효과를 제시하였다.

경부선의 경우 현행 열차운영(10량/편성)을 유지함에도 혼잡도가 150%를 초과하므로 편성량수 감소시 고객 서비스 수준 저하를 야기할 수 있으므로 현행 유지가 적절하다고 판단된다.

반면, 장항선 구간(천안~신창) 경우 경부선과의 직결운행을 고려하여 현재 1편성 10량으로 운행되고 있으나 4량 운행시에도 혼잡도 증가가 크지 않으므로 장항선(천안~신창)구간의 단거리 셔틀운송방안에 대한 검토가 필요할 것이라 분석된다.

중장기 광역철도 노선망 확충 및 직결 연계 방안 등을 고려할 경우 보다 지속적 분석이 필요하다고 판단되나 역별 혼잡도를 감안할 경우 일부 운행노선은 2~4량의 편성량수 조정이 가능할 것으로 검토되었으며 이는 대중교통 정책 수립 및 운영 효율화에 기여할 것으로 예상된다.

2. 향후 연구과제

본 연구의 부족한 점을 보완하고 본 논문과 관련하여

지속적으로 검토되어야 할 향후 연구 과제를 다음과 같이 제시하였다.

1) 본 연구에서는 시간대별 이용수요 특성을 반영하기 위해 첨두시와 전체 운행시간으로 구분하여 혼잡도를 산정하고 이에 따른 적정 편성량수를 제시하였으나 광역 철도의 운행 특성중 하나인 직결운행에 의한 영향은 고려하지 못한 면이 있다.

또한 본 연구에서 구현한 편성량수 최적화 시물레이션의 경우 1년간 역별 시간 단위 이용수요를 근거로 재차인원(수요)과 재차용량을 산정하였으나 2개 이상 노선이 접속되는 환승역 수요를 구분하지 못하였다.

향후 연구에서는 단일노선이 뿐만 아니라 연계 노선 이용 수요를 분석하고 환승역의 접근 통행특성을 고려한 노선별 적용 기준에 대해 검토할 계획이다.

2) 본 연구에서는 편성량수 감소시 열차 추가 편성에 따른 운행시각 조정은 분석에서 제외하였으나 최적화 시물레이션 구현시 운행시각 변화 영향을 반영하도록 구현하였으므로 이에 따른 혼잡도 및 비용 절감 효과 검토가 가능할 것이라 판단된다.

향후 운행시각 조정에 따른 혼잡도 및 비용 절감 효과에 대해 추가 검토할 계획이다.

3) 본 연구과제 수행을 통해 얻은 결과에 의하면 이용수요를 고려한 편성량수 조정은 비용 절감 측면에서 긍정적 효과가 있다고 판단되나 이는 차내혼잡도 증가라는 이용자서비스를 고려할 때 민감한 문제라고 판단된다.

따라서 보다 정확한 편성량수 최적화 방안을 제시하기 위해서는 단기간 분석이 아닌 이용 수요에 대한 지속적 모니터링과 단계적 접근 방안이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 열차운영계획시스템 개발 연구(과제번호 R&D 11PRTD-C059366)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

알림 : 본 논문은 대한교통학회 제65회 학술발표회 (2011.10.21)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

REFERENCES

1. Kim, S. C.(2000), "Evaluation of bus operation

strategies by development of bus route simulation model", Master's Degree thesis, University of Seoul.

2. Korea Institute for Industrial Research(2001), "Traffic survey of the metropolitan railway in 2001".

3. Kim, H., Kim, C. S. and Kim, Y. G.(2006), "Development of methods for capacity management of inter-regional railway", The Korea Transport Institute.

4. Jung, Y. S. and Kim, M. H.(2007), "The Research on the Adequacy of Urban Trainset(- focus the Jung-ang Line for Urban -)", Proceedings of the Conference, Korea Society for Railway.

5. Kim, D. H.(2007), "Implications of System Dynamics on Time-Lag approach", Journal of Public Policy Review, Vol.21, No.2, Institute of Public and Administration in Chung-Ang university, pp.5-25.

6. Lee, G. S., Cha, G. B. and Yoon, I. Y.(2008), "A study on the improvement of the congestion level for each car in urban railways", Proceedings of the Conference, Korea Society for Railway.

7. Korea Railroad Corporation(2008), "The result of the congestion investigation in 2007".

8. Choi, Y. E., Kim, S. S., Lee, C. J. and Kim, M. S.(2008), "The Valuation of Passenger comfort Benefits in Urban Railroads", Proceedings of the Conference, Korea Society for Railway.

9. Kim, K. S.(2009), "System Dynamics Interpretation on Bus Scheduling Model", Journal of Intelligent Transportation System, Vol.8, Issue 1, pp.1-8.

10. Bae, C. B., Kim, H. and Wang, H. J.(2009), "A new paradigm on the reshuffling of railway network for direct operation", The Korea Transport Institute.

11. Kim, D. H.(2009), "An Estimation Model of

- the Minimum Required Dwell Time for Urban Railway”, Journal of the Korean Society for Railway, Vol.12, No.6, the Korean Society for Railway, pp.953-960.
12. Park, C. H., Kim, B. S., No, S. H. and Jang, S. Y.(2010), “A study on the headway calculating method in the metropolitan railway system”, Proceedings of the Conference, Korea Society for Railway.
 13. Kim, I. H., Lee, K. T., Kim, C. H. and Kum, K. J.(2010), “A Study on simulation design for the Optimum Number of Ticket Booth”, Journal of Korean Society of Transportation, Vol.28, No.2, Korean Society of Transportation, pp.77-85.
 14. Korea Railroad Corporation(2010), “The result of the congestion investigation in 2009”.
 15. Korea Railroad Corporation(2010~2011), “Integrated Railway Information System (IRIS) Data”.
 16. Korea Railroad Corporation(2011), “The standard of congestion estimation”.
 17. Kim, I. H., Lee, S. M., Kim, C. H. and Bae, Y. G.(2011), “A Study on the Efficiency of rolling stocks formation in Electric Multiple Unit”, Korea Railroad Corporation Research Institute.
 18. Korea Railroad Corporation(2011), “The metropolitan rail cost in 2010”.
 19. Korea Railroad Corporation(2011), “The regular survey of railway user service in 2011”.
 20. Eom, J. K., Choi, M. H., Kim, D. S. and Song, J. Y.(2012), “Evaluation of Metro Services based on Transit Smart Card Data - A Case Study of Incheon Line 1”, Journal of the Korean Society for Railway, Vol.15, No.1, the Korean Society for Railway, pp.80-87.
 21. Korea Railroad Corporation(2012), “The result of the congestion investigation in 2011”

☞ 주 작성 자 : 김익희
 ☞ 교 신 저 자 : 윤동희
 ☞ 논문투고일 : 2011. 11. 10
 ☞ 논문심사일 : 2012. 1. 5 (1차)
 2012. 5. 18 (2차)
 2012. 5. 29 (3차)
 2012. 6. 14 (4차)
 ☞ 심사판정일 : 2012. 6. 14
 ☞ 반론접수기한 : 2012. 10. 31
 ☞ 3인 익명 심사필
 ☞ 1인 abstract 교정필