

철도선로의 용량추정체계

- The Capacity Estimation System for Railroad -

김 동 희 *

Kim Dong Hee

홍 순 흠 **

Hong Soon Heum

김 봉 선 ***

Kim Bong Sun

Abstract

There are two methodologies to increase transport capacity of railway. One is to invest railroad equipment or vehicles, and the other is to improve operation efficiency through optimization. All of these is intended to increase transport capacity by improving the line capacity. So far, we treat the line capacity as the criteria for evaluating investment alternatives or for restricting train frequencies, and this criteria is calculated statical and experimental numerical formula. But, line capacity has special attribute that changes dynamically according to operational conditions, so there is a need of new line capacity estimation system. The Purpose of this paper is to present a new estimation system of line capacity based on the probability simulation and its applications.

1. 서론

한국철도의 수송분담율은 60년대초 88.2% 이던 것이 90년대에는 20.7% 로 더욱 열악한 상황으로 전개되고 있으며, 따라서 철도시스템의 수송능력 증대를 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해서는 시설, 신호, 열차 등의 시설에 자본을 투자하는 방법과 운영 최적화를 통해 이용율을 극대화하고 선로를 균형적으로 활용하는 등의

* 한국철도기술연구원, 운영·정보시스템연구팀, 선임연구원, kdh777@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원, 운영·정보시스템연구팀, 책임연구원, shong@krri.re.kr

*** 인하대학교, 기계공학부 산업공학, 교수, bongsun@inha.ac.kr

운영효율향상의 방법이 있다. 이들은 모두 선로용량을 개선하여 수송능력을 증대시키고자 하는 것이다[1].

철도시스템에서는 선로, 신호, 차량 등과 같은 제한된 자원을 최대한 활용하여 운용 효율을 극대화 시켜야만 한다. 철도의 운용효율은 대부분 계획단계에서 결정되어지며, 신설/개량 투자계획이나 수송계획이 여기에 해당된다. 선로용량(line capacity)은 이를 위한 평가기준치나 한계기준치로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히 고가의 인프라와 열차로 구성된 철도시스템이기에 용량의 오추정으로 인한 손실 및 용량증대를 위한 투자재원 규모는 엄청나다고 할 수 있다.

현재 철도에서 사용하고 있는 선로용량 산출방법은 1945년 일본인 야마기시 데루오가 작성한 식을 근간으로 하고 있으며, UIC 방법과 같은 다른 방법의 적용을 시도하고 있다. 이들은 모두 경험적 수식에 기반한 산출방법들로서 용량에 영향을 주는 인자들의 평균치 및 경험치에 해당하는 값을 사용하고 있으나, 선로용량은 구간운행비율, 운행패턴 등과 같은 실제 운용조건에 따라 동적(dynamic)으로 변하는 특성을 가지고 있어 근본적인 문제점을 내재하고 있다. 따라서 한국 철도시스템의 실정에 적합하면서 합리적인 새로운 용량추정체계가 필요하다[1,2].

본 논문에서는 철도교통계획의 단계적 구조 및 선로계획의 위상을 정립하고 선로용량의 기본개념을 제시한다. 또한 선로계획의 기본이라 할 수 있는 선로용량 산출을 위하여 확률 시뮬레이션에 기반한 새로운 용량추정체계를 제시하고 적용사례를 통해 기존방법들의 결과와 비교·분석하고자 한다.

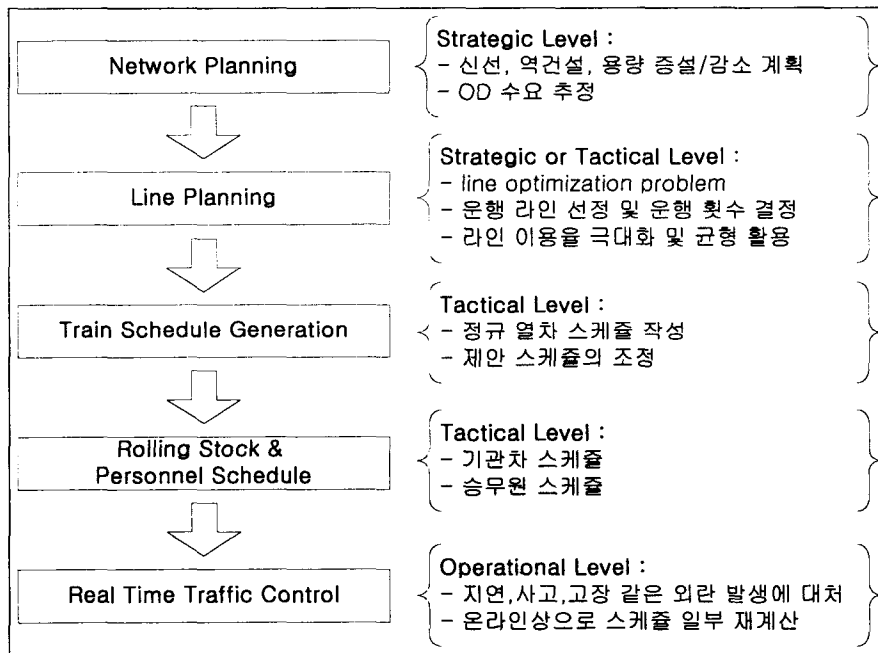


그림 1. 철도교통계획의 단계구조

2. 철도교통계획과 선로용량

2.1 교통계획 단계와 선로계획

철도교통계획(railway traffic planning)은 여타 분야의 계획기능과 마찬가지로 장기 계획, 중기계획, 단기계획, 실시간 관리와 같이 단계적 기능별로 해당 범위의 문제들을 해결함으로써 체계적이고 합리적으로 수행될 수 있다. Bussieck(1997)은 그림 1과 같은 철도교통계획의 단계구조를 제시하고 각 단계별 연구사례들을 조사·비교한 바 있다[3].

전략적 수준인 장기계획은 신선 혹은 역건설, 용량증설/감소계획, 수송수요예측과 같은 내용을 포함하고 있는 네트워크 계획(network planning)이 해당되며, 전략적 혹은 전술적 수준인 중기계획에는 운행선로선정 및 운행횟수결정, 선로이용율 극대화 및 균형활용 등과 같은 내용을 포함하는 선로계획(line planning)이 해당된다. 그리고 전술적 수준인 단기계획에는 정규열차 스케줄 작성(train schedule generation)과 기관차 및 승무원 스케줄 작성(rolling stock & personnel schedule generation)이 해당된다. 마지막으로 계획대로 운영하면서 실시간으로 발생하는 지연, 사고, 고장과 같은 이례적 사건, 즉 외란요인들에 대한 대처와 그로 인한 스케줄의 국부적 조정문제와 같은 운영 수준의 실시간 흐름제어 기능(real-time traffic control)이 있다.

2.2 수송능력과 선로용량

철도수송시스템(railway transit system)에서 용량(capacity)은 수송능력의 중요 특정 도구이며, 기존의 용량계산은 이론과 실재를 접목하기 위하여 각종 제약과 비율모수 및 환원계수들의 적용과 같은 여러 가지 방법들을 사용하고 있다. 수송능력의 일반적인 정의는

“동일 선로에 단위시간당 수송할 수 있는 편도 최대승객수”

라고 할 수 있으며,

$$\text{수송능력} = \text{선로용량(열차수/시간)} \times \text{열차용량(고객수/열차)} \dots\dots\dots (1)$$

으로 구성된다[4]. 또한 한국철도에서 사용하고 있는 선로용량은

“일반적으로 임의의 일정한 선로구간에서 1일 동안 일방향으로(편도) 운행 가능한 최대 열차횟수를 말한다. 선로용량에는 역간운행시분, 폐색방식, 열차속도, 대피시설유무 등이 영향을 미치며, 주로 역간을 단위로 계산하게 된다”

라고 정의된다[2]. 열차용량은 객차당 승객수, 열차당 객차수, 조정계수로 구성되어 있으며, 조정계수는 주요 연구과제로 남겨져 있다[6].

선로용량은 개념상 한계용량과 실용용량, 경제용량으로 구분할 수 있으며, 한계용량은 설계용량과도 같은 의미이고 물리적인 한계치를 말한다. 실용용량은 유효시간대, 유지보수, 운전취급 등과 같은 실제 운전조건을 고려하고 있는 개념이며, 일반적인 선로용량이 여기에 해당된다. 경제용량은 최저의 수송원가를 반영한 1일 최대열차횟수를 나타내는 개념이다. 또한 Krueger(1999)는 한계용량과 실용용량 외에도 점유용량(used capacity)과 가용용량(available capacity)의 활용 필요성을 추가로 제시한 바 있다[5]. 지금까지 사용된 선로용량 계산법에는 일본의 야마기시 데루오가 1945년에 작성한 식을 근간으로 한 야마기시 방식과 유럽철도연맹의 UIC 산정방식이 있으며, 김연규와 박인기(1997)는 야마기시 방식의 문제점을 지적하고 UIC 방식을 적용하고 그 결과를 비교·제시하였다[1]. 이들 방법은 모두 이론적인 한계용량을 산출하고 여기에 경험적인 선로이용률 혹은 운영여유율을 반영하여 실용용량을 계산하고 있으며, 아직까지는 실용용량을 직접 계산할 수 있는 방법은 알려져 있지 않다.

선로용량은 식2와 같이 대상으로 하는 주기시간(T)을 운행시격(Headway)으로 나누는 수치, 즉 운행횟수(frequency)에 해당되는 개념이며, 운행시격은 다시 최소안전시격(minimum safe separation time), 제어역 정차시간, 그리고 운영여유시간으로 구성된다. 따라서 선로용량의 최대화는 운행시격의 최소화를 의미하며, 이는 다시 최소안전시격, 정차시간, 여유시간의 최소화를 의미하게 된다.

$$\text{선로용량} = \frac{\text{주기시간}}{\text{운행시격}} = \frac{\text{주기시간}}{\text{최소안전시격} + \text{제어역정차시간} + \text{운영여유시간}} \dots\dots\dots (2)$$

3. 확률실험에 의한 용량추정

합리적인 투자분석과 효율적인 운영계획에 있어서 선로용량은 그 기준치로서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 기존의 야마기시 방식이나 UIC 방식 등은 운행조건에 따라 다변하는 동적인 특성을 반영하지 못하는 근본적인 문제점을 내재하고 있다. 따라서 본 연구에서는 확률적인 모의실험에 기반한 새로운 선로용량 추정체계를 제시하고자 한다.

3.1 실험의 개념 및 사용자조정 모수

실험에 의한 선로용량 추정체계는 대상구간의 선로용량을 모집단으로 설정하고 혼합패턴에 따른 무작위추출을 수행하여 N개의 표본집단을 구성한다. N개의 표본집단에 대한 실험결과인 열차횟수에 대하여 통계분석을 수행하고 그 결과를 이용하여 대상구간의 선로용량을 설명하는 방식이다.

제안된 시뮬레이션 방식의 용량추정 체계에서는 모의실험을 위하여 사용자가 다음과 같은 실험모수(experiment parameter)들을 설정할 수 있도록 하고 있다.

- 실험횟수(N)
- 선로이용율(α)
- 안전시격 여유율(γ)
- 실험주기(T)
- 주행시간 여유율(β)
- 구간수 조정 여유율(δ)

여기에서 실험횟수를 통하여 표본집단을 구성하는 실험결과치의 갯수를 조정할 수 있으며, 실험횟수가 많을수록 분산이 감소되어 실험결과치의 정밀도는 높아진다. 또한 실험주기는 선로용량 산출시 기준시간을 지정하는 것으로 일반적으로 1일(1440분) 또는 시간단위를 사용하며, 하루 이상의 실험주기를 지정할 경우 실험횟수와 마찬가지로 실험 정도는 높아지게 되고 그 결과는 1일에 대한 용량값으로 환산하여 산출하게 된다. 선로이용율, 주행시간 여유율, 안전시격 여유율, 구간수 조정 여유율은 모두 열차간 최소차두간격 결정시 여유시간을 첨가하는 용도로 사용된다. 김연규, 박인기(1997)에서는 선로이용율은 1일을 대상으로 할 경우 0.67을, 하루보다 적은 시간단위 용량을 대상으로 할 경우 0.33을 기본값(default value)으로 설정하고 있으며, 구간수 조정 여유율은 구간수당 0.25분이라는 기본값으로 설정하고 있다. 나머지 여유율들은 모두 그 기본값으로 1.0 이라는 비율로 설정하게 된다. 이들은 모두 실제로 열차를 발생시켜 순서를 조성해 나가는 모의실험 수행시 열차간 최소차두간격을 산정할 때 이용되는 모수들로써, 측정 또는 산출된 열차종간 최소안전시격을 기준으로 첨가되는 여유시간을 결정하게 된다.

3.2 안전시격과 실험체계

선로용량에 상응하는 값을 도출하기 위하여 구간운행 열차중 비율에 따른 열차를

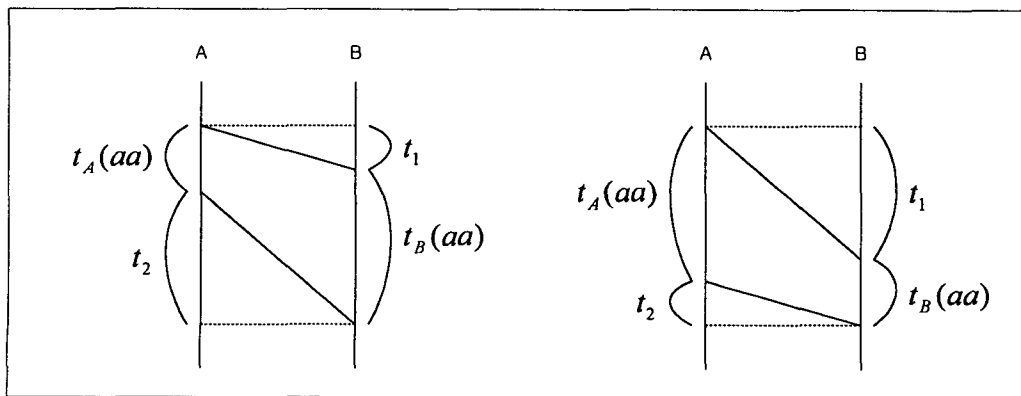


그림 2. 열차간 안전시격 체계(복선구간의 경우)

발생시켜 실제로 붙여나가는 방식으로 모의실험이 수행된다. 여기에서 그림 2와 같이 열차종 순서 유형에 따른 열차간 차두간격을 알아야 한다. t_1, t_2 는 각각 선행열차와 후행열차의 구간운전시분을 나타내며, $t_A(aa), t_B(aa)$ 는 열차간 출발시격과 도착시격을 의미한다. 이를 위해서는 실제 해당구간의 운행 차두간격을 실측을 통하여 파악하는 것을 원칙으로 하며, 불가능할 경우 식3과 같이 적합한 산출식에 의하여 추정을 해야만 한다.

$$\begin{aligned}
 \text{출발시격} &= \frac{0.06 \times (N2 \cdot \text{평균신호간격} + \text{열차장} + \text{절연거리})}{\text{고속열차속도}} + \text{전철기취급시분} \\
 \text{도착시격} &= \frac{0.06 \times (M \cdot \text{평균신호간격} + \text{열차장} + \text{신호확인거리} + \text{절연거리})}{\text{고속열차속도}} \\
 &+ \text{전철기취급시분} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

단, N1, N2 는 확보해야만 하는 신호폐색의 개수이며, 5현시 구간의 경우 각각 4와 3을, 3현시 구간의 경우 2와 2를 사용한다. 평균신호간격은 대상으로 하는 선구의 신호폐색거리 평균값이며, 열차장은 상급고속열차의 열차길이를 말한다. 신호확인거리는 기관사가 육안으로 신호를 확인할 수 있는 거리를 나타내며, 전철기취급시분은 선행열차의 통과후 후행열차의 진로설정을 위하여 필요한 전철기 전환시간을 의미한다. 선행열차가 고속일 경우 출발시격 공식을, 후행열차가 고속일 경우 도착시격 공식을 적용한다. 후자의 경우 도착시격으로부터 출발시격이 역으로 계산 가능하다. 출발역 혹은 도착역 기점에서의 열차간 시격이 최소안전시격이 된다.

선로이용율에 영향을 미치는 인자들에선 선로유지보수 시간 이외에도 여러 가지가 있다. 따라서 4~5시간의 유지보수 시간을 제외한 약 20시간(0.83%)의 시간대 전체를 열차설정에 사용할 수는 없다. 본 연구에서 제시하는 실험에 의한 용량추정 체계에서는 실험횟수를 제외한 나머지 조정모수들로 인한 추가 여유시간이 여기에 해당된다.

선로용량 즉, 열차횟수는 주기시간과 열차운행시격으로 구성되며, 실제로 운용 가능한 유효 열차간격을 설정함으로써 선로용량을 도출할 수가 있게 된다. 사용자 조정모수들은 식4와 같이 이러한 유효 열차간격(운행시격)을 도출할 때 사용된다.

$$\begin{aligned}
 \text{평균운행시분} &= (\text{표준운전시분} + \text{평균정차시분}) \times \beta \\
 \text{운행시격} &= (\text{최소안전시격} \times (1 + \alpha)) \times \gamma + (\text{구간수} \times \delta) \dots\dots\dots (4)
 \end{aligned}$$

여기에서 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 각각 선로이용율, 주행시간 여유율, 안전시격 여유율, 구간수 조정 여유율이며, β 는 운전시분에 탄력시분을 고려함으로써 실제로 열차를 설정할 때에 탄력성을 고려하는 것과 같은 개념이다. γ 는 대피와 같은 증소요시분 또는 열차간 시격의 탄력성을 반영하기 위하여 사용될 수 있다. 실험은 대상으로 하는 선구내의 애로구간에 해당되는 단위구간에 대하여 수행하게 되며, 이러한 단위구간의 개수에 따라

표 1. 5개 선구에 대한 비교

선구	A-B	B-C	C-D	D-E	E-F	
혼합비율	108:10:4	108:33:8	107:37:7	106:17:22	103:33:5	
UIC방식	142	157	150	143	148	
야마기시 방식	121	155	140	134	134	
실험 방식	Range	127-142	156-174	148-164	124-160	132-153
	Fit	N(136, 2.54)	N(167, 3.08)	N(156, 2.46)	N(142, 5.65)	N(145, 3.45)
	90%	133.38-138.62	164.11-169.89	153.42-158.58	138.09-145.91	141.94-148.06
	95%	132.88-139.12	163.56-170.44	152.93-159.07	137.34-146.66	141.36-148.64
	99%	131.89-140.11	162.48-171.52	151.96-160.04	135.88-148.12	140.22-149.78

추가적으로 여유시분이 고려되어야 한다. δ 는 이를 반영하기 위한 모수이다. 이러한 조정모수들을 사용하지 않고 실험을 수행하여 결과를 도출할 경우 최소한의 운행시분과 최소한의 안전시격만을 사용하고 해당 구간의 특성만을 고려한 한계용량에 해당되는 값이 산출된다.

4. 적용사례

김연규와 박인기(1997)의 기존연구에서는 야마기시 방식을 적용한 결과에 비해 실제 운행설정회수가 상회하고 있다는 문제점을 지적하고, UIC 방법을 적용하여 선로용량 값을 산출하여 야마기시 결과와 비교하였다[1]. A역에서 F역까지 5개 선구를 분석대상으로 하였으며, 열차종은 모두 3개 급으로 분류하였다. 통일호 이상의 열차를 1급으로, 비둘기열차를 2급으로, 그리고 화물열차를 3급으로 분류하고, 각 선구별로 열차종 혼합비를 사용하였다. 시뮬레이션 실험에서는 표본크기를 1000회로 하였으며, 그 결과 및 비교내용이 표 1에 제시되어 있다. 모수는 $\alpha=0.67$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$, $\delta=0.25$ 를 사용하였다. 야마기시 방식의 결과와 비교를 살펴보면, 5개 선구중에 3개 선구가 범위값을 벗어남을 알 수 있다. UIC 결과와의 비교에서 보면 전체적으로 범위값 사이에서 결과들이 나타남을 보여주고 있다. 또한 열차스케줄의 전면 개편 및 선로용량에 영향을 주는 인자들의 변화들로 인하여 99년 야마기시 방식으로 재산정한 선로용량 값과의 비교가 그림 3에 제시되어 있다. 재산정 결과는 여전히 실제운행횟수보다 전체적으로 낮게 나오고 있으며, 실험결과는 실제 운행횟수를 포함하고 있는 것으로 나타나 있다.

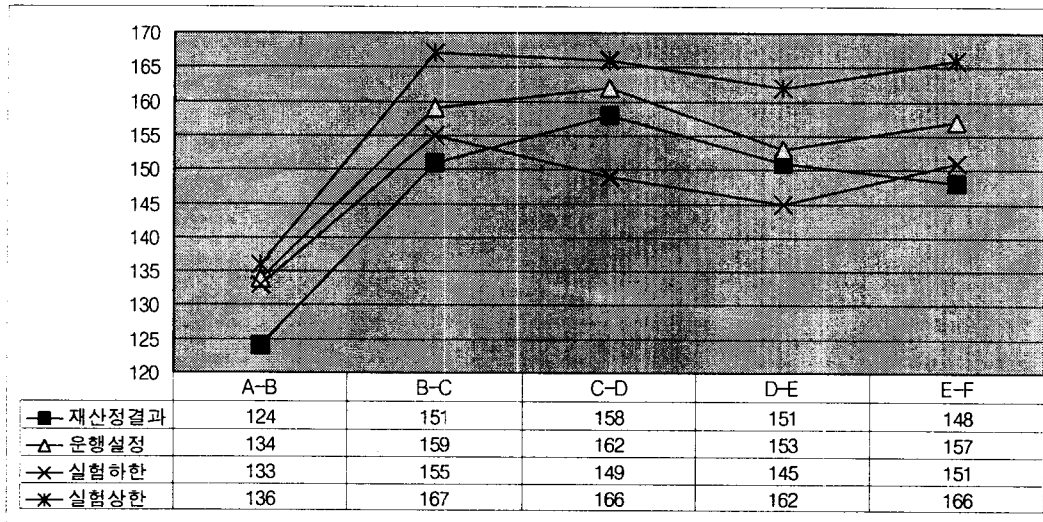


그림 3. 재산정 결과 및 운행실정과의 비교

5. 결론

본 연구에서는 철도에서의 교통계획 및 선로계획의 위상을 소개하였으며, 투자분석과 운영계획의 기준치로서의 선로용량의 개념을 제시하였다. 또한 확률실험에 기반한 새로운 선로용량 추정체계를 개발하였으며, 기존 용량계산방법의 결과들과의 비교분석을 수행하였다.

추후연구과제로는 실험에 사용되는 각종 모수들의 추정 혹은 적합분석이 수행되어야 하며, 합류구간 또는 역을 포함한 특수구간에의 확장적용에 대한 연구가 있어야 하겠다. 또한 선구단위가 아닌 한국철도 전체 네트워크 차원에서의 이용율의 균형적 극대화를 위한 네트워크 용량분석에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

6. 참고문헌

- [1] 김연규, 박인기, 철도운영체계 개선을 통한 수송능력 증대방안, 교통개발연구원, 1997
- [2] 이종득, 철도공학, 노해출판사, 1994
- [3] Bussieck,M.R., Winter,T. and Zimmermann,U.T., "Discrete Optimization in public Rail Transport", Working Paper, 1997
- [4] Kittelson & Associates, Inc., "TCRP Web Document 6 - Transit Capacity and Quality of Service Manual", Transit Cooperative Research Program, 1999
- [5] Krueger,H., "Parametric modeling in rail capacity planning", Proceedings of the Winter Simulation Conference, 1999
- [6] Parkinson, T. and I. Fisher, "TCRP Report 13 - Rail Transit Capacity", Transit Cooperative Research Program, 1996

저 자 소 개

김 동 회 : 인하대학교 산업공학과 학사, 석사, 박사 취득

현재 한국철도기술연구원 운영·정보시스템연구팀 선임연구원

관심분야는 최적화, 컴퓨터 시뮬레이션, 물류시스템, 경제성공학이다.

홍 순 흠 : 서울대학교 전기공학과 학사, 석사, 박사

현재 한국철도기술연구원 운영·정보시스템연구팀 팀장

관심분야는 철도운영정보시스템, 열차제어시스템, 수익관리시스템이다.

류 상 환 : 아주대학교 전자공학과 학사, 석사

현재 한국철도기술연구원 철도신호통신연구팀 책임연구원

관심분야는 열차제어시스템, 제어 및 자동화, 신호처리이다.