

DSP 를 사용한 열차 신호 분석

The Analysis of Railway signal using DSP

김기승* 김치조** 임관수*** 조용기****

Kim, Gi-Seung Lim, Kwan-Soo Kim, Chi-Jo Cho, Yong-Gee

Abstract

It is extremely necessary to use such a secure way to transmit information to a train, which is needed for operating a train. In our system, The information including the allowable velocity of the train, train existence in current area, and other data necessary for operating train, is transmitted in the form of FM signal. Received by the receiver located on train, the signal is filtered, demodulated and analyzed to extract the original information. The analysis of the demodulated signal is done through FFT algorithm using sliding slot. These all are processed digitally by hardware which is implemented by 32bit DSP. The experiments show the validity of the algorithm we presented.

1. 서론

열차운행에 관계되는 정보는 매우 높은 신뢰도를 가지고 지상 통제 장치로부터 운행중인 열차에 전달되어 져야 한다. 보통 전송되는 정보로는 열차의 허용최대 속도, 열차 점유 정보, 레일의 경사도 등 열차 운행에 필요한 정보에 관한 것이며 이러한 정보는 지상 통제 장치로부터 신호 송신 장치로 전달이 된다. 신호 송신 장치는 이 정보가 도달하면 이 정보의 내용에 따라 수 Hz 의 매우 낮은 주파수(Very Low Frequency; VLF)의 신호를 합성하고, 이 합성신호는 주파수 변조 및 증폭이 된 후 레일로 전송이 된다. 이렇게 전송된 신호는 수신 장치내의 대역 통과 필터(BPF : Band Pass Filter), 복조기 및 저역 통과 필터(LPF : Low Pass Filter)를 거친 후 'Sliding Slot'을 사용한 FFT 알고리즘을 사용하여 분석되어진다. 이러한 일련의 과정은 고속의 아날로그-디지털 변환기(ADC : Analogue-Digital Converter) 및 32 Bit DSP 로 구성된 하드웨어를 사용하여 디지털로 처리되며, 실험을 통하여 원래의 열차 신호가 복원되는 것을 확인하였다.

* LG 산전 도시시스템연구실 주임연구원

** LG 산전 도시시스템연구실 선임연구원

*** LG 산전 도시시스템연구실 책임연구원

**** LG 산전 도시시스템연구실 연구실장

2. 정보 전송

2.1. 신호 합성

운행중인 차량에는 열차의 허용최대속도, 목표까지의 거리 등, 운행에 필요한 다양한 정보가 요구된다. 이러한 정보는 n Bit 데이터로 인코딩되고, 이 때 각 비트는 수 Hz 대의 매우 낮은 서로 다른 주파수의 신호로 대응이 되어 있어서 해당 비트 값이 1 또는 0에 따라 대응이 되어진 해당 주파수 신호를 전송신호에 추가 또는 삭제한다. 메시지 길이를 n Bit로 하고, 합성신호를 s(t)라 하면 식(1)과 같이 된다.

$$s(t) = \sum_{i=0}^{i=n-1} 2\pi \cdot b_i \cdot A_i \cdot \sin(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi_i) \quad (1)$$

여기서 b_i 는 메시지의 각 해당 비트 값을 나타내며, F_i , ϕ_i , A_i 는 b_i 에 미리 할당된 신호의 주파수 및 초기 위상, 그리고 진폭을 말한다.

2.2. 신호변조

위의 신호 s(t)는 수 kHz 대의 캐리어신호 c(t)를 사용하여 FM 변조된다. FM 변조된 신호를 v(t)라 하면

$$v(t) = A_o \cdot \sin(2\pi \cdot f_o \cdot t + \int s(t)) \quad (2)$$

따라서

$$v(t) = A_o \cdot \sin(2\pi \cdot f_o \cdot t - \sum_{i=0}^{i=n-1} \frac{2\pi \cdot b_i \cdot A_i}{F_i} \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t + \phi_i)) \quad (3)$$

여기서 A_o 와 f_o 는 캐리어신호의 진폭 및 주파수를 말하고 A_i/F_i 는 변조 지수(Modulation Index)에 해당된다.

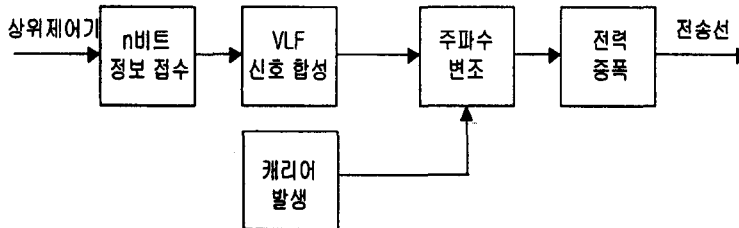


그림 1. 신호 전송부 블로도

3. 정보 분석

차상에 수신된 변조신호는 전복조 대역통과 필터(Pre-Demodulation Band-Pass Filter), 복조기(demodulator), 후복조 저역 통과 필터(Post-Demodulation Low-Pass Filter)를 통해 복조된다. 최적의 복조를 위해서는 복조기를 거치기 전에 DC 성분 제거가 선행되어야 한다. 이렇게 VLF

를 뽑아 낸 후 그 신호의 스펙트럼을 FFT를 사용하여 분석함으로써 본래의 메시지를 알아 내게 된다.

3.1. 디지털 필터

사용되는 필터는 IIR(Infinite-Impulse Response)필터로서, 여기서는 주로 다른 타입에 비해 주파수 선별성이 좋은 타원(elliptic) 타입을 사용하고, 캐리어 필터용으로는 버터워스(Butterworth) 타입을 사용한다. 이 때 필터의 전달 함수는 다음 식(4)와 같이 된다.

$$H(Z) = \prod_{i=1}^{n/2} \frac{b_{i0} + b_{i1}Z^{-1} + b_{i2}Z^{-2}}{1 + a_{i1}Z^{-1} + a_{i2}Z^{-2}} \quad (4)$$

여기서 n은 필터의 차수; n/2는 필터 셀의 수, 그리로 i는 셀의 인덱스를 나타낸다. 원하는 특성에 맞는 필터계수를 적절히 선정함으로써 원하는 특성을 얻을 수 있다.

3.2. FFT (Fast Fourier Transform)

차상수신기의 경우 수신신호에 실리는 Noise는 White Noise라 할 수 있고 따라서 White Gaussian Noise의 경우에 최적의 특성을 나타내는 푸리에 변환을 사용하여 신호검출을 한다. N차 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform; DFT)은 다음과 같이 정의된다:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j2\pi \cdot n \cdot k / N} \quad (5)$$

x(n)은 연속신호 x(t)의 샘플링한 값이고 X(k)는 주파수 $f = k \cdot f_s / N$ 에서의 주파수 성분이다. 여기서 f_s 는 샘플링주파수이다.

FFT에 의해 복조된 신호의 스펙트럼을 실시간으로 분석하는 데에 있어서는 신호의 일부만을 사용한다. 무한으로 계속되는 신호의 일부를 시간에 따라 움직이는 Sliding Slot을 통해 관측하는 것으로 볼 수 있다. 만약 sliding slot의 크기를 L이라 하면

$$y_k(n) = \sum_{i=n-L+1}^n x(i) \cdot e^{-j2\pi \cdot i \cdot k / N} \quad (6)$$

사용되는 창 함수는 방형(rectangular) 창을 사용하고 식(7)과 같으며,

$$w[n] = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

신호의 주파수 분해능을 Δf , 창의 크기를 L이라 하면 다음 식(8)과 같은 관계가 있다.

$$L \geq \frac{f_s}{\Delta f} = \frac{1}{\Delta f \cdot T} \quad (8)$$

L 값이 크면 클수록 신호분석도 정확하고 Noise에 대해 면역도 좋지만, 응답시간이 길어지는 단점이 있다. 이런 단점을 극복하기 위해 더블 슬라이딩 슬롯 알고리즘이 있다.

4. 열차 정보 분석 H/W 및 S/W

4.1. 열차 정보 분석 H/W

수신 보드의 구성은 그림 2에 나타내었다. 레일을 통하여 수신된 신호는 Input Transformer를 통하여 적절한 크기로 보드에 입력된다. Band Pass Filter를 거쳐 잡음을 제거한 후 Demodulator에서 복조가 이루어진다. 이 복조된 신호를 DSP를 이용하여 디지털 신호 처리를 하면 열차 정보가 복원된다.

사용된 DSP는 TMS320C32-50로서 고속 부동 소수점 32Bit 연산이 가능하고, 32Bit 외부 데이터 접근을 할 수가 있다. AD 변환기는 8 채널 12Bit 변환기로서 변환 시간이 1.6 μ s의 고속 형으로서 polling 방식에 의하여 데이터를 읽어 오도록 하였다.

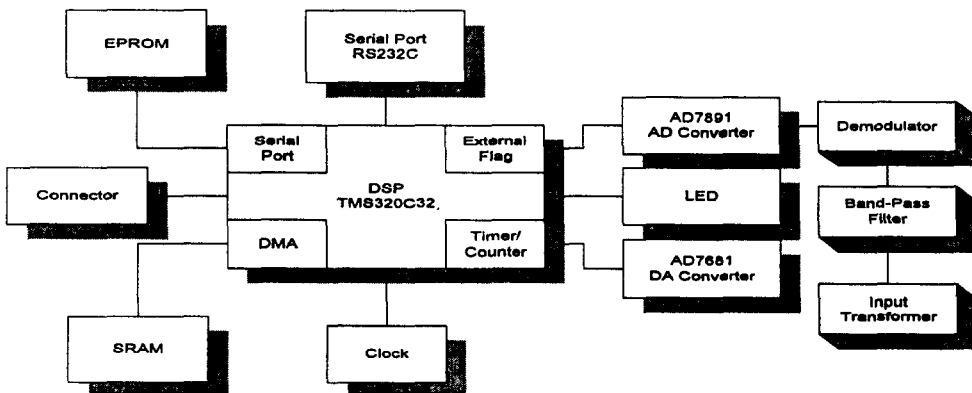


그림 2. 열차 정보 분석 하드웨어 블록도

4.2. 열차 정보 분석 S/W

송신기에서 전송된 변조 신호는 복조기에서 복조되어 아날로그 디지털 변환기를 거쳐 DSP로 입력된다. DSP는 그림 3와 같은 알고리즘으로 신호를 복원하여 차상장치로 전달하게 된다.

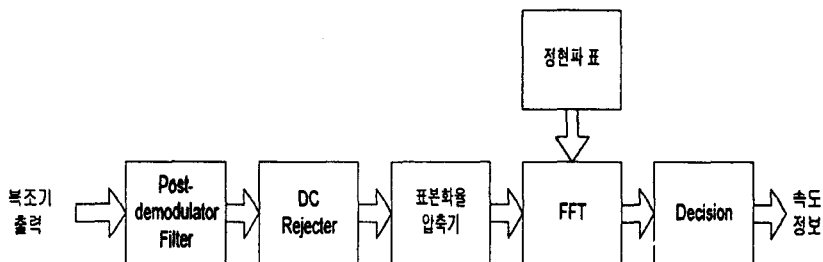


그림 3. 열차 정보 분석 소프트웨어 알고리즘

DC Rejecter 는 High Pass IIR Filter 로 구현이 되며 출력 신호의 직류 신호를 막는 역할을 수행하며, 식(9)와 같이 Butterworth 형태로 구성된다.

$$y(n) = -a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) + b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + b_2 x(n-2) \quad (9)$$

여기서 $y(n)$ 은 각 순간의 출력값이고 $x(n)$ 은 $y(n)$ 의 입력이다. 이 방정식을 Z 변환하면 식(4)와 같은 전달함수로 나타낼 수가 있다. 이 필터의 계수값은 필터 설계 프로그램을 통하여 얻을 수가 있으며, 식(10)과 같은 전달 함수가 된다.

$$H(Z) = \frac{1 - 2Z^{-1} + Z^{-2}}{1 - 1.9564Z^{-1} + 0.9573Z^{-2}} \quad (10)$$

DC Rejecter 의 출력신호의 표본화율이 128Hz 인 반면에 FFT 에서 사용되는 표본화율은 64Hz 이므로 표본화율을 낮출 필요가 있다. 이 역할을 표본화율 압축기에서 그림 4 와 같이 수행한다.

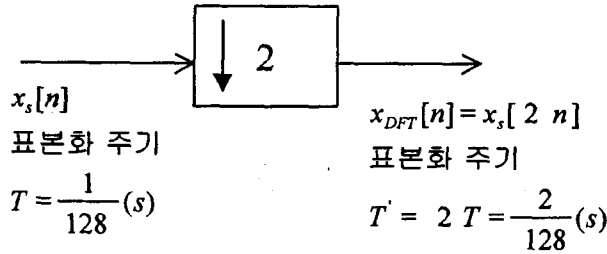


그림 4. 표본화율 압축기의 표현

또한 FFT 를 수행하기 위해서는 한 주기의 정현파표와 여현파표가 필요한데 이 표들은 식 (14)의 함수에 의한 수치표에서 얻어진다. 정현파의 1/4 주기만을 저장하여 전체 주기를 대칭으로 재구성하여 전체 주기를 얻는다. 여현파는 상 이동을 통해 같은 표에서 쉽게 구할 수 있다.

$$\sin(2\pi \times n/N) \quad (\text{단, } n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (11)$$

Decision 에서는 FFT 후에 신호의 0 과 1 을 결정할 수 있도록 최소값과 최대값을 주어 결정하게 된다.

5. 실험 결과

크기가 같고 주파수가 각각 $f_1=20\text{Hz}$, $f_2=25\text{Hz}$, $f_3=30\text{Hz}$ 인 세 개의 신호가 합성된 신호를 방형창을 사용하여 FFT 연산을 하고 그 출력을 비교하였다. 샘플링 주파수는 100Hz 로 하고 창 의 길이 L 은 100 샘플수로 하였다. 그림 5 는 그 결과를 보여 준다.

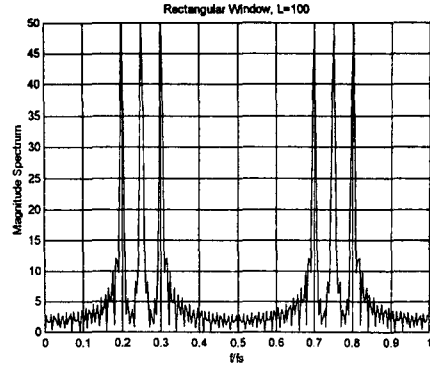
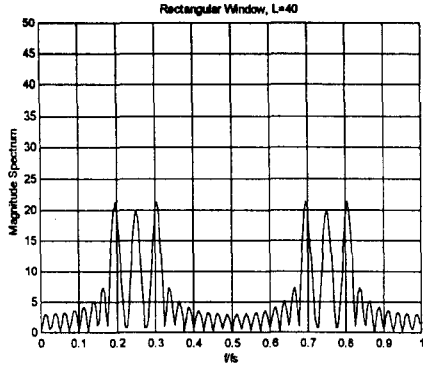


그림 5. 방형창 시뮬레이션 파형

그림 6은 디지털 필터의 동작을 알아보기 위한 것으로서 채널 2는 입력 파형, 채널 1의 출력 파형을 나타낸다. 구형파는 200Hz에 8kHz의 잡음을 추가하여 필터링한 파형이고 정현파는 400Hz에 8kHz의 잡음을 추가하여 필터링한 파형이다. 채널 1에서 잡음이 제거된 후의 파형을 볼 수가 있다.

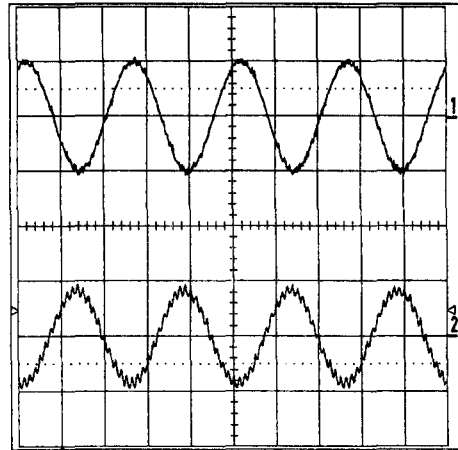
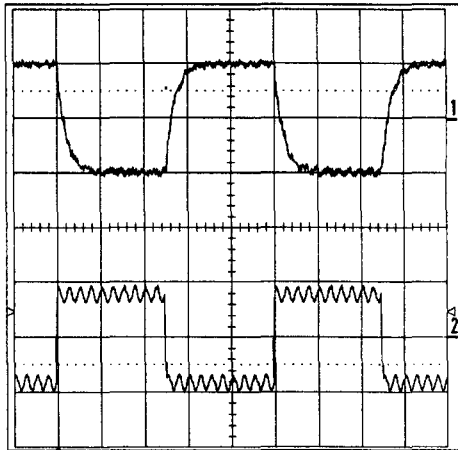


그림 6. 잡음이 있는 구형파의 필터 입출력 그림 7. 잡음이 있는 사인파의 필터 입출력

그림 8은 400Hz 정현파에 8kHz의 잡음을 추가하여 516개의 샘플링으로 FFT를 시뮬레이션한 그림이다. 샘플링 시간은 20 μ s이다. 그림 9은 DSP 보드에서 FFT의 동작을 알아보기 위하여 잡음이 없는 300Hz의 사인파를 입력하여 출력한 그림으로서 FFT가 잘 동작함을 보여 주고 있다. 샘플링 주기는 20 μ s이고 8192개의 샘플을 가진다.

그림 10은 그림 6의 채널 1의 파형을 FFT한 후의 파형으로서 잡음이 있음에도 불구하고 기본 주파수의 크기가 다른 주파수에 비하여 현저하게 크게 나타남을 알 수가 있다. 또한 그림 11에서도 마찬가지로 기본 주파수가 매우 크게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 정확하게 파형의 기본 주파수를 찾는 것을 알 수가 있다. 이 기본 주파수를 찾는 알고리즘을 구

현하여 최대값과 최소값을 정하여 그 범위 내에 기본 주파수가 존재하게 되면 송신기에서 보낸 주파수의 존재를 판단할 수가 있게 된다.

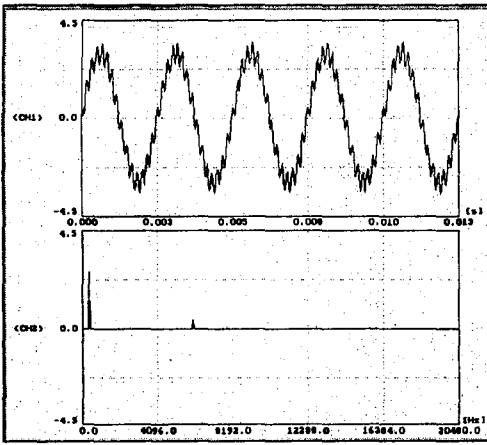


그림 8. FFT의 시뮬레이션

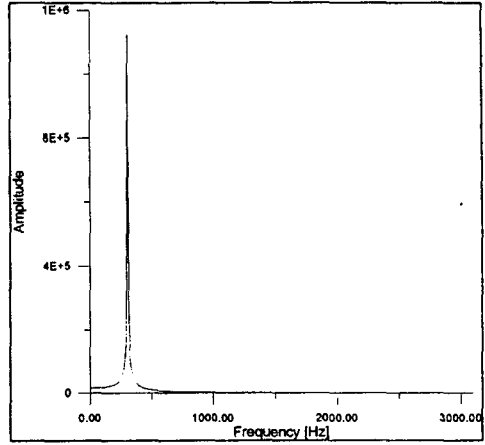


그림 9 사인파의 FFT 파형

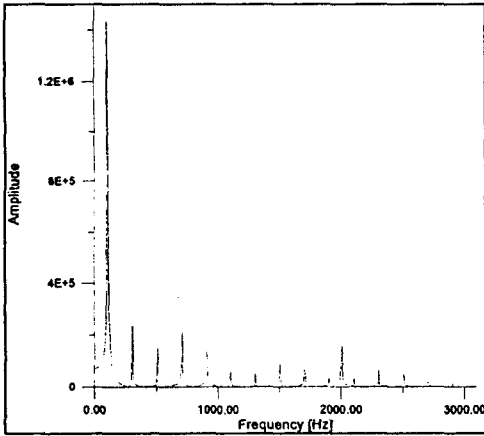


그림 10. 잡음이 있는 구형파의 FFT 파형

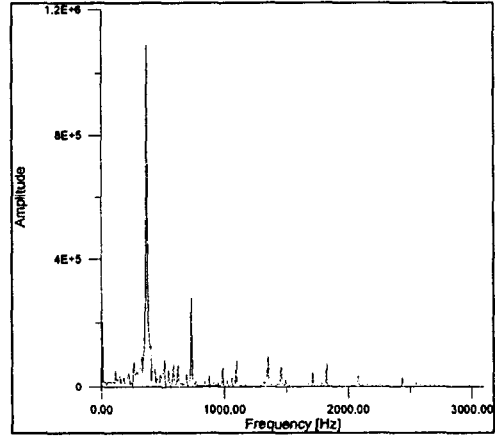


그림 11. 잡음이 있는 사인파의 FFT 파형

그림 12에서는 송신보드에서 출력되는 FM 변조 신호와 정현화된 신호를, 그림 13에서는 송신기의 합성 신호와 수신기 복조기에서 출력되는 복조 신호를 나타내었다. 복조 된 신호가 원래의 신호와 동일하게 나타나는 것을 알 수가 있다. 합성 신호에는 n개의 신호가 합성되어 있으며, 이 신호를 복조하여 수신기에서 FFT에 의하여 n개의 신호의 유무를 Bit로 표시하여 송신기에서 보낸 신호를 다시 복원하게 된다.

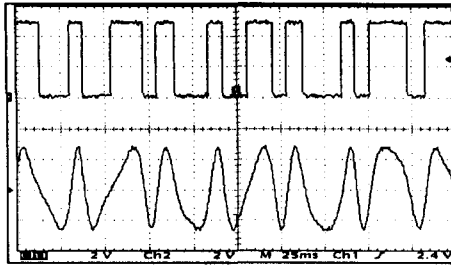


그림 12. FM 변조 신호와 정현화된 신호

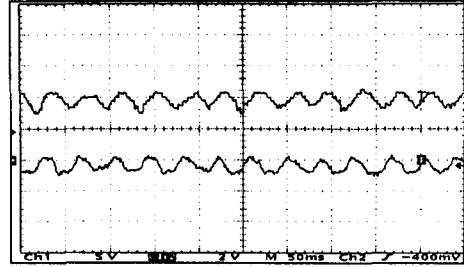


그림 13. 합성신호와 복조기 출력 신호

6. 결론

운행 정보 내용이 VLF 신호의 합성으로 엔코드 되어지고 또 FM 변조되어진 신호로부터 정보 내용을 추출하는 과정을 검토해 봤다. 수신된 신호를 복조 후에 필터와 처리 과정을 DSP를 사용하여 디지털 신호 처리하는 방법을 제시하였다. 또한 복조된 신호의 주파수 분석을 위해 FFT 알고리즘을 사용하였다. 실제적인 FFT 연산을 위해 'sliding slot'을 사용하고 실제 실험을 통하여 정상적으로 신호를 복원하는 것을 보였다. 이와 같이 소프트웨어적으로 신호 처리를 함으로써 하드웨어의 사용을 감소시키고 추가적인 업그레이드가 수월하게 된다. 향후의 과제는 복조부의 소프트웨어화와 열차 정보 분석에 관한 신뢰도를 높이기 위하여 알고리즘을 보완하여야 한다. 즉, 복조 이후에 필터를 한번 더 사용하여 FFT를 수월하게 하도록 하는 방법과 FFT 이후에 오류 검지를 할 수 있는 알고리즘의 추가가 필요하다고 생각된다. 또한 신호 처리에 있어서 Noise에 대한 영향도 더 고려되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Sophocles J.Orfanidis (1996), "Introduction to signal processing", Prentice-Hall
2. Texas Instrument(1990), "Digital signal processing applications with TMS320Family
3. B. P. Lathi (1989), "Modern Digital and Analog communication systems"
4. CSE "Principles of continuous transmission
5. LG 산전(1997), "자동열차제어장치 기술개발에 관한 연구
6. Rulph Chassaing (1992), "Digital signal processing with C and the TMS320C30"
7. 임관수, 김기승(1998), "FFT를 이용한 열차 정보 추출 방법", 한국철도학회 춘계학술대회