

확장형 칼만필터 알고리즘을 활용한 차량 주행에 따른 마찰소음의 총 음압레벨 예측

Estimation of Total Sound Pressure Level for Friction Noise Regarding a Driving Vehicle using the Extended Kalman Filter Algorithm

김도완 Dowan Kim
한범수 Beomsoo Han
문성호 Sungho Mun
안덕순 Deok-Soon An

정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정 (E-mail : marinater@daum.net)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 학사과정 (E-mail : sc17921792@naver.com)
정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : smun@seoultech.ac.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : dsan@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to predict the Sound Pressure Level(SPL) obtained from the Noble Close ProXimity(NCPX) method by using the Extended Kalman Filter Algorithm employing the Taylor series and Linear Regression Analysis based on the least square method. The objective of utilizing EKF Algorithm is to consider stochastically the effect of error because the Regression analysis is not the method for the statical approach.

METHODS : For measuring the friction noise between the surface and vehicle's tire, NCPX method was used. With NCPX method, SPL can be obtained using the frequency analysis such as Discrete Fourier Transform(DFT), Fast Fourier Transform(FFT) and Constant Percentage Bandwidth(CPB) Analysis. In this research, CPB analysis was only conducted for deriving A-weighted SPL from the sound power level in terms of frequencies. EKF Algorithm and Regression analysis were performed for estimating the SPL regarding the vehicle velocities.

RESULTS : The study has shown that the results related to the coefficient of determination and RMSE from EKF Algorithm have been improved by comparing to Regression analysis.

CONCLUSIONS : The more the vehicle is fast, the more the SPL must be high. But in the results of EKF Algorithm, SPLs are irregular. The reason of that is the EKF algorithm can be reflected by the error covariance from the measurements.

Keywords

extended kalman filter algorithm, Sound Pressure Level(SPL), constant percentage bandwidth analysis, NCPX(Noble Close ProXimity) method, Fast Fourier Transform(FFT) analysis

Corresponding Author : Mun, Sungho, Associate Professor
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea
Tel : +82.2.970.9014
E-mail : smun@seoultech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Sep. 12, 2014 Revised Sep. 15, 2014 Accepted Oct. 2, 2014

1. 서론

차량이 주행하면서 발생하는 소음은 특정높이 및 거리에 마이크로폰을 설치하여 측정하는 Pass-by 방법,

차량의 주행방향과 수직으로 미터기를 측정자의 몸에서 0.5m 이상 떨어지게 하여 디지털소음레벨측정기를 이용하여 소음을 측정하는 DSLM(Digital Sound Level

Meter)방법, 타이어 전면의 웬더 패널(Fender Panel)에 표면마이크로폰을 설치하여 타이어와 도로면 사이에서 발생하는 마찰소음을 주로 측정하는 NCPX(Noble Close ProXimity) 방법이 있다.

여기서, DSLM방법은 다른 방법에 비하여 가장 간단하게 소음을 측정할 수 있는 방법으로 주파수 분석을 수행하지 않고 빠르게 소음을 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 정확한 주파수 별 음향의 특성을 판단하는데 어려움이 있다는 단점을 갖는다. Pass-by 방법을 이용하여 차량의 주행에 따른 소음을 측정할 때 이를 포함한 다른 주변잡음을 함께 받아들이기 때문에 실제 차량주행소음을 이 결과로부터 계산하는 경우, 주파수 별 음향의 중첩을 고려하여야 한다. 따라서 차량주행소음을 측정하는 것에 있어서 다소 불리한 방법이다. 반면, NCPX 계측방법은 타이어와 노면의 접지면으로부터 이물질의 영향을 받지 않는 범위에서 가장 가까운 타이어 근접위치에 표면마이크로폰을 설치함에 따라, 보다 정확한 마찰소음을 측정할 수 있다.

이와 관련하여, 본 연구에서는 주행하는 차량의 타이어와 노면의 마찰로 인해 발생하는 소음을 측정하기 위하여 NCPX 계측방법을 활용하였으며, 주파수 분석의 결과로 측정되어진 주파수 별 음압을 이용하여 최종적인 마찰음향을 도출하였다. 이러한 음압레벨은 속도에 따라 그 크기가 달라지기 때문에 10km/hr의 속도 단위로 마찰음을 측정하였다. 또한, NCPX 계측방법으로 소음을 측정하는 경우, 적은 영향으로 주변소음을 포함시켜 표면마이크로폰으로 전달되며, 차량의 정속유지가 까다롭기 때문에 실제 주행속도는 약 1km/hr정도의 오차를 갖는다. 이러한 측정 시 한계를 확률적으로 최적화 시키고 실제 측정 시 정속유지 및 도로 노면의 선형화 등의 이론적 가정들을 반영하여 속도 별 음압레벨을 예측하기 위하여 확장형 칼만필터 알고리즘을 활용하였다.

2. NCPX 계측

본 연구에서 수행한 마찰소음의 측정은 차량의 주행속도가 60km/hr부터 100km/hr까지 10km/hr 단위에서 각 3번씩 측정하였다. 각 세부 별 예측 모델의 특성을 확인하기 위해 차량은 일반승용차와 SUV(Sport Utility Vehicle)로 구분하고, 도로노면은 일반 아스팔트 포장면과 콘크리트 포장노면으로 구분하였다.

2.1. 표면마이크로폰

NCPX 계측방법을 통하여 타이어와 포장노면사이에

서 발생하는 소음을 측정하기 위해 표면마이크로폰을 타이어에서 인접한 특정위치에 설치하게 된다. 표면마이크로폰은 다른 마이크로폰과는 다르게 곧은 면에 설치하기 위해 제작되어진 마이크로폰이다. 본 연구에서 사용한 표면마이크로폰은 Brüel & Kjær사의 B&K 4949종이며, 이 마이크로폰은 표면에 발생하는 압력을 측정하기 위하여 개발되어진 특수 마이크로폰이다. 또한 항공기나 주행차량에 부착하여 측정하는 경우, 이에 대한 영향을 최소화하도록 설계되었다. 이 제품에 대한 바람의 영향연구는 기존연구에서 실시되었으며, 500Hz보다 높은 주파수에서 바람의 영향을 대부분 받지 않는 것으로 확인되었다(Mun and Cho, 2008).

이러한 이유로 본 연구에서는 표면마이크로폰을 사용하였으며, 실제 측정 전 압력변화로 음압을 측정하는 마이크로폰에 미칠 수 있는 이물질의 영향을 최소화하기 위하여 타이어 전면 웬더 패널에 마이크로폰을 설치하였다. 다음 Fig. 1은 마찰음을 측정하기 위하여 측정 전 마이크로폰을 설치한 사진이다.

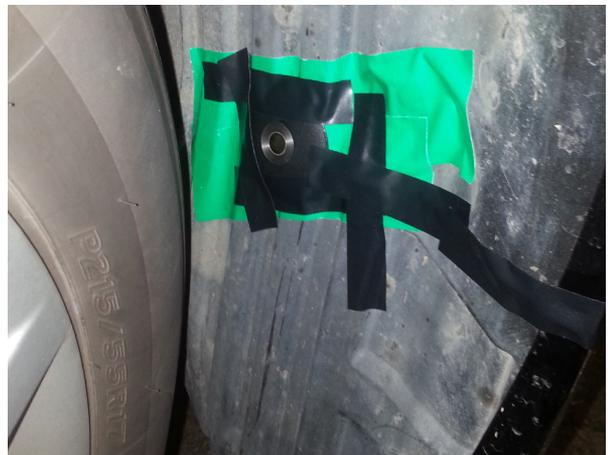


Fig. 1 Installment of a Surface Microphone

2.2. 주파수 분석

본 연구에서 수행한 NCPX 계측방법을 통하여 아날로그신호로부터 디지털신호까지 수집되는 기본구성도는 다음 Fig. 2와 같다.

소리에 대한 압력의 변화를 표면마이크로폰으로 받은 아날로그적 신호를 펄스장비를 활용하여 디지털신호로 전환함과 동시에 주파수 분석을 실시하게 된다. 이 과정에서 주파수 별 음압레벨을 산정하게 되고, 이에 대한 파워함으로 총 음압레벨을 산정하게 된다.

이 과정에서 A, B, C 그리고 D 청감보정회로 중 인간의 청감능력에 가장 잘 부합하는 A-청감보정회로를 사

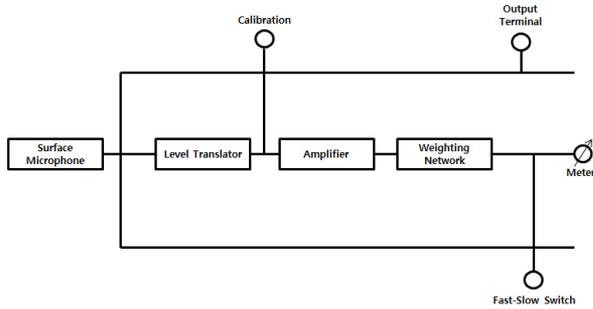


Fig. 2 Block Diagram for Noise from Surface Microphone

용하여 총 음압레벨을 dB(A)단위로 도출하였다. 또한, 주파수 분석을 수행하는 과정에서 기본적인 주파수 분석은 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform, DFT)의 반복되는 행렬의 계산에 대한 시간적 단점을 줄이기 위해 유도된 고속푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)분석에 입각하여, 실제 도출하는 주파수 별 음압레벨은 특정 밴드폭에 일정한 가중치를 부여하여 각 밴드폭에 대한 음압레벨을 도출하는 CPB(Constant Percentage Bandwidth) 분석방법으로 도출하였다. 다음 Fig. 3은 본 연구에서 실시한 CPB 분석의 결과이다.

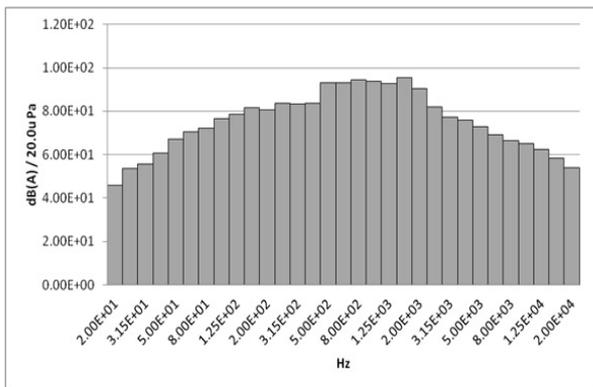


Fig. 3 Example for CPB Analysis

본 연구에서 활용하고자 하는 음향특성은 총 음압레벨로써, 분석되어진 주파수 별 음압레벨은 다음 Eq. (1)과 같은 방법의 파워합으로 인해 총 음압레벨이 계산되어진다.

$$L_W = 10 \log \left(\sum_{b=1}^n 10^{\frac{SPL_b}{10}} \right) \quad (1)$$

여기서, b 와 n 은 각각 밴드 폭 순번과 총 밴드 폭에 대한 수를 의미하며, L_W 는 총 음압레벨, SPL_b 는 각 밴드 별 음압레벨을 의미한다.

2.3. 마찰소음 측정 가정

차량의 주행속도는 타이어와 노면사이의 마찰음에 큰 영향을 미친다. 따라서 측정 시 주행속도의 오차범위를 1km/hr로 제한하였고 오차범위 내에서 차량의 주행속도가 3초 이상 되도록 유지하였으며, 이 시간 내의 디지털신호에 대하여 주파수 분석을 실시하였다. 결국, 측정 시 주행속도의 1km/hr의 오차범위 내에서 정속을 3초간 유지했다는 가정을 적용하였다.

또한, 기존연구(김도완, 안덕순, 문성호, 2013)에서 노면의 상태에 따른 음향의 영향이 매우 큰 것으로 나타났다. 정확한 마찰소음을 측정하기 위해, 노면의 포장상태 뿐만 아니라 실제 노면위의 영향을 고려하여 측정 전 시험구간의 상태(이물질 및 파손 등)를 확인하고, 청결 상태를 유지하였다. 이로써 노면의 상태는 각 도로 특성에 맞는 상태가 선형적으로 유지된다는 가정을 적용하였다.

마이크로폰의 설치장소가 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 엔진과 다소 가까운 위치에 설치되었기 때문에 이 마이크로폰이 외부소음을 함께 측정하지만, 기존의 연구(한봉구, 김도완, 문성호, 김하연, 2013)에서 엔진소음을 포함하는 차량의 외부소음은 마찰소음 자체에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 판단하였다. 따라서 이로 인한 영향은 없다고 가정하였다.

3. 노면 마찰음 측정결과 및 기존 예측모델

3.1. 마찰소음 측정결과

차량의 주행속도는 10km/hr간격으로 측정되었으며, CPB분석을 통하여 도출된 주파수 별 음압레벨에 대하여 Eq. (1)을 이용하여 총 음압레벨을 다음 Fig. 4와 같이 산출하였다.

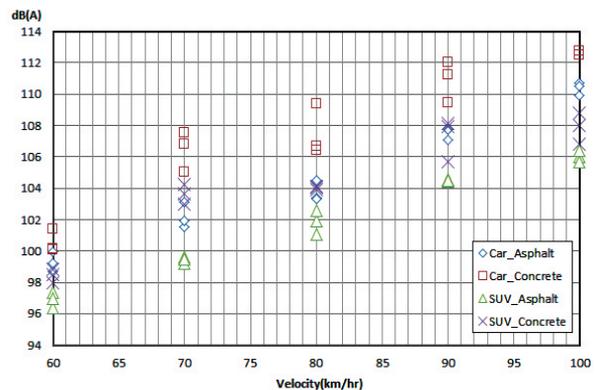


Fig. 4 Result of NCPX Method

NCPX 측정결과, 노면의 공극이 적은 콘크리트 포장 이 아스팔트 포장에 비해서 더 큰 마찰소음을 발생시키는 것을 확인하였다. 또한 공차중량이 더 무거운 SUV 차량이 일반 승용차보다 더 적은 마찰소음을 발생시킨다는 결론을 내렸다.

또한, 같은 조건 하에 3회 측정된 결과가 상이한 것으로 보아, 본 연구에서 정한 이론적 가정이 정립되지 않은 것으로 판단하였다.

3.2. 기존 예측모델

기존 연구(Bloemhof, 1986; Cho and Mun, 2008a; Cho and Mun, 2008b; Cho and Mun, 2008c)에서는 NCPX 계측방법에 의해 마찰소음을 측정하는 경우, 차량의 주행속도와 총 음압레벨의 관계를 다음 Eq. (2)와 같이 규명하였다.

$$L_W = \alpha + \beta \ln(V) \quad (2)$$

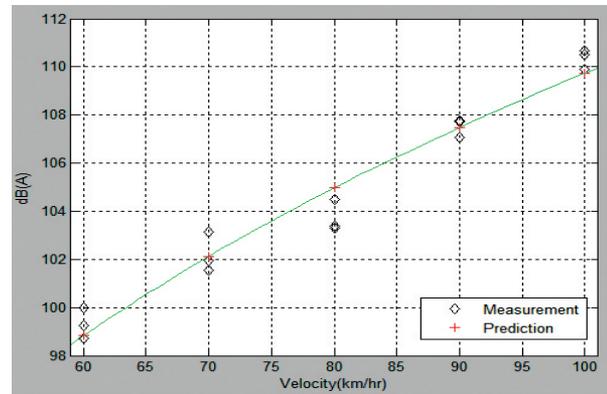
여기서, α 와 β 는 회귀계수를 의미하며, V 는 차량의 주행속도를 의미한다.

위 식의 회귀계수는 다양한 최적화 방법을 통해 구해 질 수 있으며, 본 연구에서는 이러한 회귀계수를 구하기 위하여 선형회귀분석을 실시하였다. 선형회귀분석은 각 주행속도 별로 3차례 시도되어진 측정에 대하여 최소오차자승법을 적용한 방법으로, 각 회귀계수에 대하여 미분한 뒤 역행렬을 구함으로써 도출되어진다. 이에 대한 각 회귀계수의 결론은 다음 Table 1과 같다.

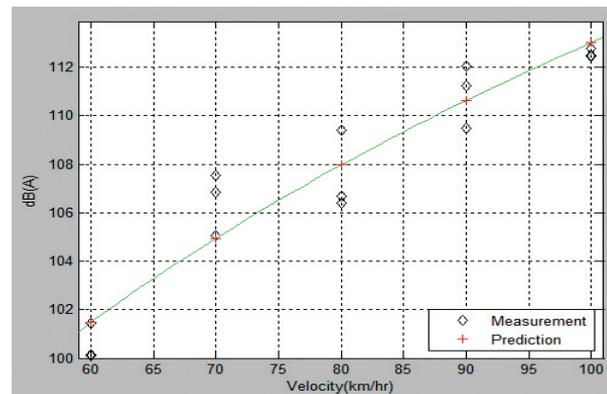
Table 1. Coefficients from Regression Analysis

Condition		Coefficients	
Vehicle Type	Road Type	α	β
Car	Asphalt	11.4907	21.3323
Car	Concrete	9.0522	22.5734
SUV	Asphalt	21.6714	18.3422
SUV	Concrete	25.9065	17.9420

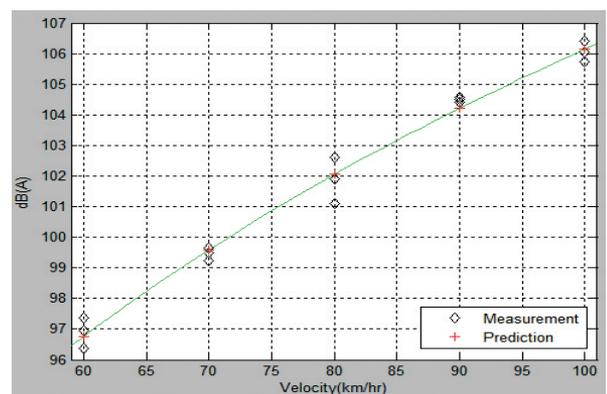
최소오차자승법에 의하여 결정되어진 회귀방정식을 이용하여, 실제 측정값과 비교한 결과는 다음 Fig. 5와 같다.



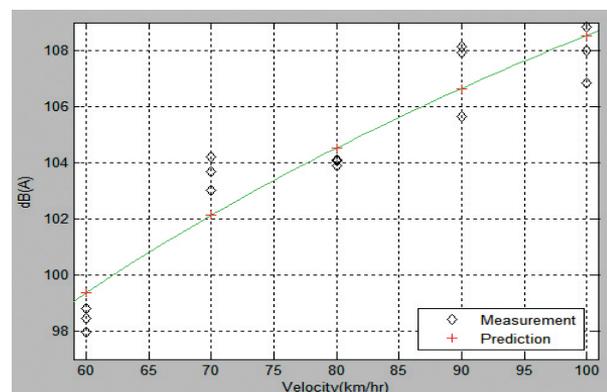
(a) Car, Asphalt



(b) Car, Concrete



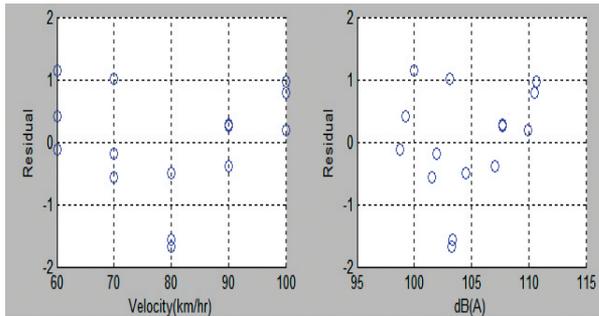
(c) SUV, Asphalt



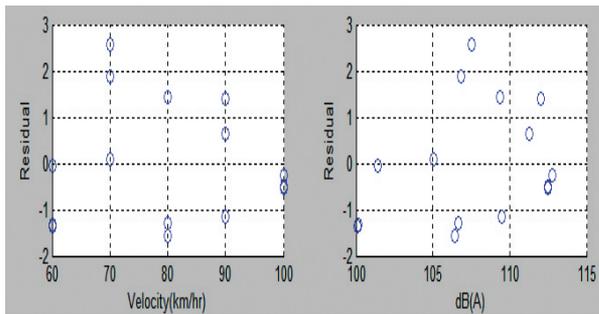
(d) SUV, Concrete

Fig. 5 Result of Regression Analysis

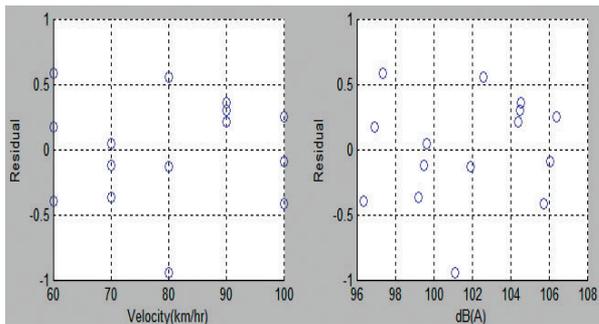
Fig. 5에서 볼 수 있듯이, 선형회귀분석은 최소오차자승법을 활용하였기 때문에 확률적 오차의 적용이나 잡음의 영향력이 포함되지 않는다. 이러한 확률적 접근을 시도하지 않고 최소자승법을 활용한 잔차에 대한 결과 및 통계적 결과(결정계수, 유의수준, F-분포에 의한 검정통계, RMSE)는 다음 Fig. 6 및 Table 2와 같다.



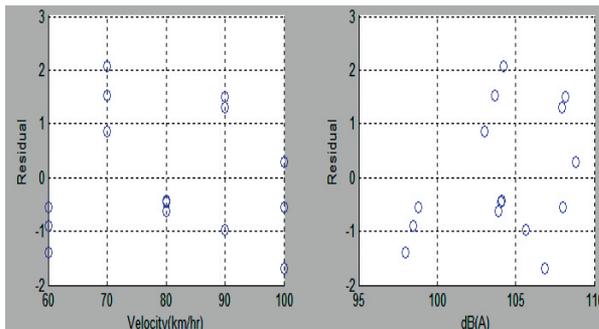
(a) Car, Asphalt



(b) Car, Concrete



(c) SUV, Asphalt



(d) SUV, Concrete

Fig. 6 Residual Result of Regression Analysis

Table 2. Static Result of Regression Equations

Condition	Vehicle Type	Car	Car	SUV	SUV
	Road Type	Asphalt	Concrete	Asphalt	Concrete
Coefficient of Determination		0.9559	0.9113	0.9856	0.8898
F-test statistic		282.1089	133.4878	889.5155	105.0086
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000
RMSE(dB(A))		0.8267	1.2718	0.4003	1.1397

확률적 결과를 토대로 확인한 결과, 각 예측모델은 통계적으로 유의하다는 결과를 확인하였으며, 이때 값이 모두 85% 이상으로 높은 추세의 일치성을 보였으며, RMSE 오차값은 최소 0.4dB(A)에서 최대 1.3dB(A)까지 나타났다.

4. 칼만필터 알고리즘

칼만필터 알고리즘은 통계적인 접근으로써, 대부분 두 개 이상 변수의 특별한 관계 내에서 특정한 변수를 추정하는 경우에 사용되는 추정알고리즘이다. 이 알고리즘은 변수에 대한 오차공분산과 통계적 가중치를 활용함으로써, 연속적 추정을 수행하는 컴퓨터알고리즘의 한 종류이다. 칼만이득(Kalman Gain)이라고 불리는 통계적 가중치는 오차공분산과 측정값과의 잡음, 상태 전이에서의 잡음과의 연산으로 계산되어진다. 이러한 칼만이득은 추정의 단계에서 사용되어지며, 이 추정단계로 거친 값은 다시 상태전이행렬의 이용으로 예측단계로 접어들어 실제 다음 값의 예측결과를 제시한다. 이 예측단계는 보정의 개념으로 적용되어 진다.

이러한 통계적 방법의 접근으로 인하여 칼만필터 알고리즘 내에서는 예측과 추정의 구분을 확실하게 구분짓는다. 다음 Fig. 7은 칼만필터 알고리즘의 순서도이다.

칼만필터 알고리즘의 적용은 초기 오차공분산과 초기 값의 선정으로 시작된다. 이는 사전 값과 사후관계를 정의하는 상태전이행렬(A)과 전이당시의 잡음을 이용하여 예측단계를 거치게 된다. 이 과정에서 이전단계의 오차공분산을 함께 예측하게 된다. 이후, 측정 값과 이전예측값의 관계를 정의하는 함수(H)와 잡음의 연산으로 인해 칼만이득을 계산하게 된다. 칼만이득은 저주파 통과필터 내 이동평균 재귀식의 가중치와 같은 역할을 하는 함수로써, 측정 값과 사전추정 값의 연산으로 인해 사후추정 값을 다시 연산하게 된다. 마지막 단계로 다음 단계에서 사용될 오차공분산을 추정하면서, 사후추정 값과 오차공분산 값을 다시 초기단계의 예측단계를 거치게 된다.

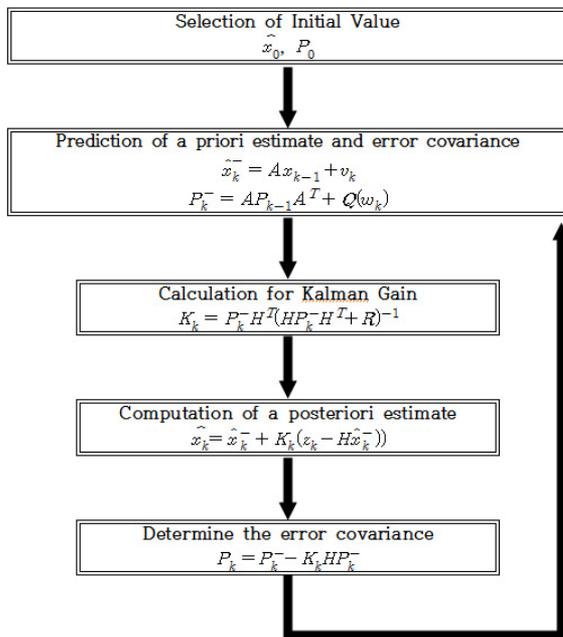


Fig. 7 Procedures for Kalman Filter Algorithm

이러한 과정을 시간대 별로 폐구간 내에서 반복하여 통계적 오차를 반영한 예측결과를 도출하게 되는 알고리즘이다.

본 연구의 전 장에서는 이전연구에서 도출한 속도와 마찰음의 관계식을 해결하기 위하여 회귀분석을 수행하였지만, 회귀분석은 단순히 최소오차자승법에 기초하기 때문에 이보다 통계적으로 접근하기 위하여 확장형 칼만필터 알고리즘을 활용하도록 하였다.

4.1. 확장형 칼만필터 알고리즘

확장형 칼만필터 알고리즘은 칼만필터 알고리즘의 직전단계에서 그 다음 단계로 예측하는 과정의 상태전이 행렬이 선형적인 관계를 갖지 않는 경우, 이를 해결하기 위하여 직전단계와 다음 단계의 관계를 함수로 정의하는 알고리즘이다. 이 과정에서 측정 값과 예측 값의 관계 역시 함수로 정의가 가능하다. 따라서 전 단계 추정 값과 사후추정 값의 관계를 정의하는 상태전이행렬은 다음 Eq. (3)과 같이 정의할 수 있게 된다.

$$\hat{x}_k^- = f(\hat{x}_{k-1}, vel_{k-1}) + v_k \quad (3)$$

여기서, \hat{x}_k^- 는 사후 예측 값이며, vel_{k-1} 와 v_k 는 각각 직전 주행속도와 그 상태에서의 잡음을 의미한다.

결국, 예측자는 칼만필터 알고리즘의 순서도에서 마지막 단계의 사후추정 값과 속도의 관계로 구성되어진

함수에 상태전이 시 발생하는 잡음을 더함으로써 구해질 수 있다.

또한, 측정자와 예측자의 관계를 정의하는 함수(H) 역시 확장형 칼만필터의 사용으로 인하여 함수로 표현되어질 수 있다.

본 연구에서는 속도에 대하여 상태전이를 하는 과정에서 활용되어지는 상태전이함수를 파워급수 중 테일러 급수에 근간하여 적용하도록 하였다. 이때, 테일러 급수의 무한대적 미분의 합을 최소화하기 위하여 4차 이상의 고차미분방정식은 무시한 테일러 급수를 적용하였다. 이에 대한 테일러 급수의 적용함수는 다음 Eq. (4)와 같다.

$$A(x) = \sum_{n=0}^3 \frac{f^{(n)}(\gamma)}{n} (x-\gamma)^n \quad (4)$$

여기서, n 은 고려할 고차방정식의 수를 의미하며, 이 전이방정식은 $[\gamma \ x]$ 사이의 폐구간 내에서 적용하도록 한다.

4.2. 확장형 칼만필터 알고리즘의 적용

확장형 칼만필터 알고리즘은 대부분 두 개 이상의 변수의 관계에서 특정변수의 정확한 예측을 위해서 사용되어지나, 본 연구에서는 단순히 단계(주행속도 증가에 따른)에 따른 통계적 접근을 수행하기 위해 사용하였다. 이를 수행하기 위해서 추정관계함수가 필요하게 되는데, 이것을 기존연구의 Eq. (2)를 사용하도록 하였다. 이는 Eq. (3)과 같이 테일러 급수의 미분방정식에 적용되었다.

확장형 칼만필터 알고리즘의 적용에 앞서 오차공분산 및 초기 값을 선정하여야 한다. 이는 측정 값의 평균을 적용하였으며, 각 상황 별 오차 공분산은 다음 Table 3의 측정 오차공분산을 적용하였다.

측정 값과 예측 값의 관계는 전 장의 선형회귀식의 결론에 대한 오차공분산을 활용하였다.

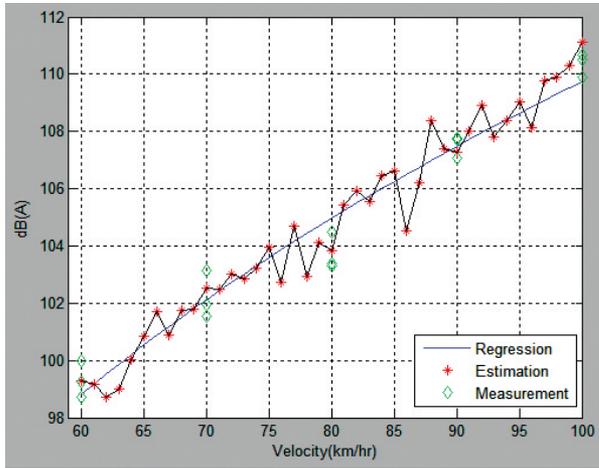
Table 3. Error Covariance

Condition	Vehicle Type	Car	Car	SUV	SUV
	Road Type	Asphalt	Concrete	Asphalt	Concrete
Error Covariance		0.7886	1.8663	0.1849	1.4988

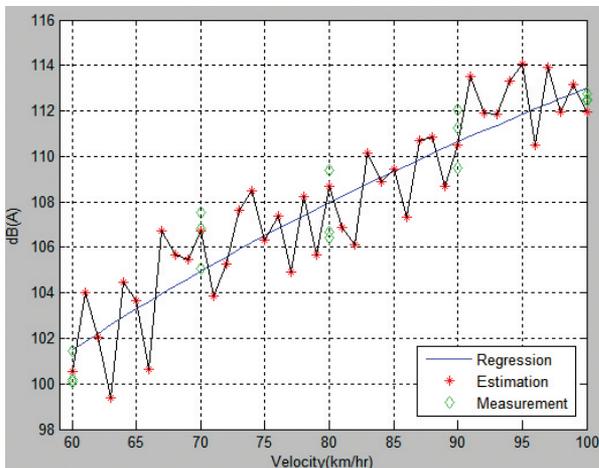
4.3. 확장형 칼만필터 적용 결과

확장형 칼만필터의 적용 초기단계는 주행속도의 초기

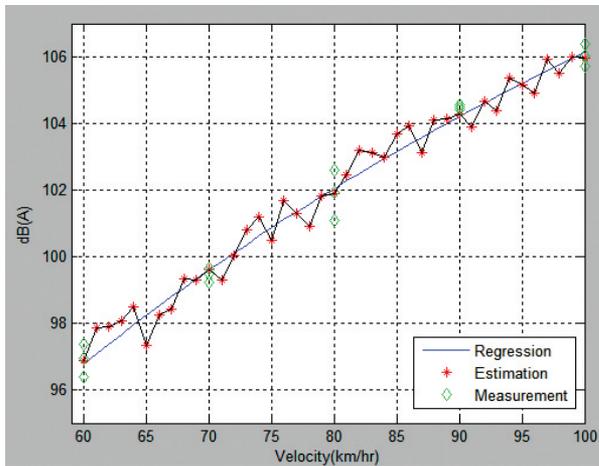
값인 60km/hr로 결정하였으며, 단계간격은 1km/hr로 선정하여 초기 주행속도를 제외한 40단계의 예측으로 100km/hr의 주행속도까지 예측을 수행하였다. 이에 대한 예측결과는 다음 Fig. 8과 같다.



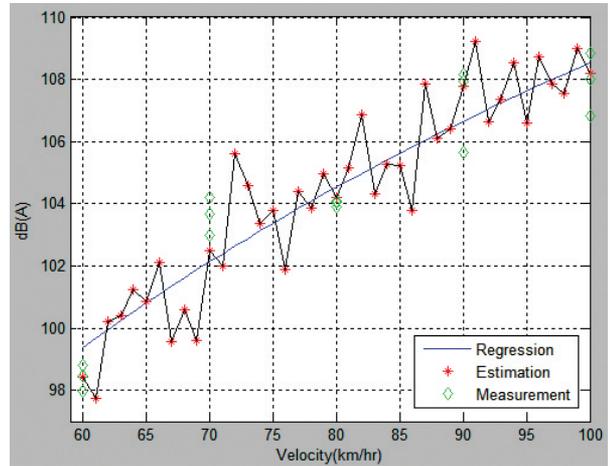
(a) Car, Asphalt



(b) Car, Concrete



(c) SUV, Asphalt



(d) SUV, Concrete

Fig. 8 Application of EKF Algorithm

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 확장형 칼만필터의 적용결과, 오차공분산이 큰 콘크리트 포장면에서는 주행속도가 변함에 따라 다소 큰 범위로 총 음압레벨이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

확장형 칼만필터 알고리즘 적용에 따른 결정계수 및 RMSE 오차 값은 다음 Table 4와 같다.

Table 4. Results of EKF Algorithm

Condition	Vehicle Type	Car	Car	SUV	SUV
	Road Type	Asphalt	Concrete	Asphalt	Concrete
Coefficient of Determination		0.9895	0.9640	0.9937	0.9682
RMSE (dB(A))		0.6215	1.1474	0.3827	0.8924

5. 결론

본 연구에서는 통계적 오차를 고려한 주행속도에 따른 총 음압레벨을 예측하기 위하여 확장형 칼만필터 알고리즘을 적용하는 것에 목적을 두었으며, 이로 인한 결과와 단순 선형회귀분석의 결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최소오차자승법을 단순히 활용한 선형회귀분석을 실시한 예측결과와 확장형 칼만필터 알고리즘을 적용한 예측결과를 측정 값과 비교한 결과, 확장형 칼만필터 알고리즘을 적용한 경우 추세(Car/Asphalt : 약 3.36% 우수, Car/Concrete : 약 5.27% 우수, SUV/Asphalt : 약 0.81% 우수, SUV/Concrete : 약 7.84% 우수)와

오차 (Car/Asphalt : 약 0.21dB(A) 우수, Car/Concrete : 약 0.12dB(A) 우수, SUV/Asphalt : 약 0.02dB(A) 우수, SUV/Concrete : 약 0.25dB(A) 우수) 면에서 더 개선된 것으로 판단하였다.

2. 음향이론에서 차량의 주행속도가 증가함에 따라 총 음압레벨이 증가하는 것이 일반적인 것에 반해, 확장형 칼만필터 알고리즘은 오차에 대한 정보를 반영시키기 때문에 감소의 추세를 포함하고 있다.
3. 추세에 대한 정확성을 판단할 수 있는 지표로 활용되어지는 결정계수가 회귀분석을 수행했을 경우보다 EKF 알고리즘을 적용한 경우가 높은 것으로 나타났으나, 실제 측정값과 추세의 비교는 단순히 60km/hr 를 제외한 70, 80, 90, 100km/hr에서 적용되었다. 또한 RMSE 오차에서 두 차종 모두 콘크리트 도로면인 경우 1dB(A)의 다소 큰 오차를 발생하였다. 이 결과로부터 콘크리트 면에서 측정되어진 결과 자체가 큰 오차를 갖는 것으로 판단하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원에서 수행하고 있는 ANC(Active Noise Cancellation)의 방음효과 관련 환산기법 개발과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bongkoo, Han, Dowan, Kim, Sungho, Mun, and Hayeon, Kim. (2013) "A study of Eliminating the Vehicle Noise of Engine RPM from the Friction Noise between Tire and Road Pavement by Using a NCPX method". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 4. pp. 31-42.

Dowan, Kim, Deoksoon, An and Sungho, Mun. (2013) "A study on Development of a Prediction Model for the Sound Pressure Level Related to Vehicle Velocity by Measuring NCPX Measurement". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 4. pp. 21-29.

Dowan, Kim, Yeongsun, Jang and Sungho, Mun. (2013) "A Study on the Vibration Decibel Related to the Shape of Rumble Strip

Located on the Highway Tollgate". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 6. pp. 93-101.

Dowan, Kim, Sooahn, Kwon, Yoonshin, Bae and Sungho, Mun. (2013) "An Analysis of the Asphalt/Concrete Roads Noise in Seoul". *Journal of the Seoul Institute*, Vol. 14, No. 2. pp. 193-209.

Dowan, Kim, Sungho, Mun, Deoksoon, An and Hyeonjang, Son. (2013) "A study on Development of the Prediction Model Related to the Sound Pressure in Terms of Frequencies, Using the Pass-by and NCPX Method". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 15, No. 6. pp. 79-91.

Mun, S., and Cho, D-S and Choi T-M. (2007) "Influence of pavement surface noise : Korea Highway Corporation test road". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34. pp. 809-816.

Mun, S., and Cho, D-S. (2008) "Development of a highway traffic noise prediction model that considers various road surface types". *Applied Acoustics*, Vol. 69. pp. 1120-1128.

Mun, S., and Cho, D-S. (2008) "Determination of the sound power levels emitted by various vehicles using a novel testing method". *Applied Acoustics*, Vol. 69. pp. 185-195.

Mun, S., and Cho, D-S. (2009) "Noise measuring technique and field evaluation based on the effects of vehicles and pavement types". *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 36. pp. 1816-1824.

Sungho, Mun, Kwang-ho, Lee, Dae-Seung, Cho, (2011) "Software Developmet of the Traffic Noise Prediction Based on the Frictional Interaction between Pavement Surface and Tire". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 13, No. 2. pp. 67-75.

Sangyum, Lee, Junghoon, Jin, Sungho, Mun, Hak-Ryong, Moon. (2012) "Study on the Noise Characteristics of Bridge Deck Pavements in Seoul Inner Ring Road". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 14, No. 2. pp. 19-28.

Sangyum, Lee, In-Tae, Kim, Sungho, Mun, Sooahn, Kwon. (2012) "Study on the Functional Evaluation of Permeable Asphalt Concrete Pavement in Seoul City". *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol. 14, No. 3. pp. 33-39.