

Cepstrum 과 Comb Lifter 를 이용한 기어드 모터의 소음 분석

이민환[#], 강동배^{*}, 김화영^{**}, 안중환^{***}

Noise Analysis of Geared Motor using Cepstrum and Comb Lifter

Min Hwan Lee[#], Dong Bae Kang^{*}, Hwa Young Kim^{**} and Jung Hwan Ahn^{***}

ABSTRACT

Gearing system emits inconsistent noise from gear teeth impact in case of gear defects. But, it is not easy for inspection operator in production line to distinguish objectively the defective product. Therefore, customer complains continuously bad noise of the geared motor. Because impulsive signal at low frequency has a tendency not to appear in frequency domain, it is difficult to separate the gear inconsistent noise of defective gear from overall geared motor's noise using general signal processing method such as FFT. In this paper, the method to estimate more objectively the inconsistent noise of gearing system and to measure the quantities is suggested. Suggested method uses Cepstrum, Autocorrelation, Comb Lifter and Inverse Cepstrum by turns to make objective quantities about noise level.

Key Words: Cepstrum, Comb Lifter, Frequency Domain(주파수영역), Geared Motor, Gear Noise(기어소음)

기호설명

- $F\{\}$: Fourier Transform
- C_{AA} : Power Cepstrum, C_A : Complex Cepstrum
- S_{AA} : Auto-correlation
- $a(t)$: Time signal of gear inconsistent noise
- C_A^v : Modified Power Cepstrum
- $A(f)^v$: Modified Complex Spectrum

1. 서론

세계적인 자동차의 고급화 추세에 따라 각종

편의장치 및 안전장치 구동을 위한 구동기로서 동력전달용 기어가 장착된 DC 모터의 수요가 급증하고 있다¹. 더욱이 이들 장치가 고속화됨에 따라 기어 조립품에서 발생하는 소음의 종류가 다양해지고 레벨도 커져 생산라인에서는 검출하기 힘든 레벨이라도 고객들의 감성적인 요인 때문에 많은 클레임을 받고 있으며, 결국 많은 품질비용을 지불하고 있는 것이 업계의 공통된 현실이다. 특히, 모터의 기어 소음은 기어의 결함에 의해 발생하는 일종의 주기적인 충격음으로 모터회전 시에 발생하는 다른 기계 부품들의 소음과 결부되어 실제 생산라인에서 검사자들이 판별하기에 많은 어려움

접수일: 2004년 10월 25일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

[#] 교신저자, 대우정밀 기술연구소

E-mail : mhwlee@dpi.daewoo.co.kr, Tel. (051) 509-2091

^{*} 부산대학교 지능기계공학과 대학원

^{**} 부산대학교 기계기술연구소

^{***} 부산대학교 기계공학부

을 겪고 있다.

기어 소음은 모터회전 주파수에 비해 저주파수 이면서 진동 및 소음의 피크치는 높은 특성을 가지고 있는데, 이러한 특성은 푸리에 변환 (Fourier Transform)으로는 쉽게 구분해 내기가 힘들다. 그 이유는 푸리에 변환이 이론적으로 주기적인 신호에 그 배경을 두고 있고 실제적으로 신호를 샘플링하기 위해 사용되는 윈도우(Window) 함수의 특성이 저주파수영역에서 상대적으로 큰 영향을 주기 때문에 본 논문의 대상인 기어 소음과 같이 주기가 길고 진폭은 크지만 진폭의 지속시간이 짧은 임펄스(Impulse)성의 신호에 대해서는 푸리에 변환만으로는 검출이 용이하지 않은 어려움이 있다^{2,3,6}.

이와 같은 이유로 회전기계의 임펄스성의 이상 신호를 검출하기 위해서 Cepstrum 이나 Kurtosis 와 같은 방법들이 널리 사용되어져 왔다. Cepstrum 의 경우 Power Cepstrum 이나 Complex Cepstrum 모두 주기적인 충격신호에 대해 검출하는데 큰 장점이 있지만 주위 노이즈에 대해 신호 대 잡음비가 좋지 않기 때문에 모터회전에 따른 다른 기계적인 노이즈가 포함되어 있는 기어의 충격신호를 검출에 적용하기에는 어려움이 있다^{2,4}. 또한 Kurtosis 와 같은 통계적인 방법은 그 속성상 소음검사의 정밀도 및 신뢰성을 높이기 위한 방법으로는 그 한계를 지니고 있을 수 밖에 없다.

본 논문에서는 자동차용 DC 모터의 기어에서 발생하는 소음에 대해 Power Cepstrum 과 Quefreny 영역에서의 Comb Liftering 을 통해 분리된 기어의 이상신호를 다시 Inverse Cepstrum 해서 시간영역으로 변환하여 주어진 소음 신호를 증폭하는 단계를 설명한다. 또한 처리된 신호에 대해 계산된 표준편차 및 신호의 형태를 통하여 양산라인에서의 검사자 및 고객으로부터 클레임이 걸린 제품과 정상적인 제품들간의 비교평가를 실시하고 그 신뢰성을 검증함으로써 기어 소음에 대해 객관적이고 정량적으로 판별해 낼 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 이론적인 배경

2.1 Cepstrum 이론

기본적으로 Cepstrum 영역과 일반적인 Spectrum 영역에서 사용되는 용어가 구별이 되는데 Bogert 는 Table 1 과 같이 용어를 구분하였다^{2,7}.

Table 1 Terms of Cepstrum and Spectrum

Spectrum	Cepstrum
Frequency	Quefreny
Harmonics	Rahmonics
Filter	Lifter
Magnitude	Gammitude
Phase	Saphe

Power Cepstrum 의 정의는 식 (1)과 같다. S_{AA} 는 시간신호에 대한 Auto-correlation 을 나타내고 식은 (2)와 같다.

$$C_{AA} = |F^{-1}\{\log S_{AA}(f)\}|^2 \quad (1)$$

$$S_{AA} = |F\{a(t)\}|^2 \quad (2)$$

식 (2)로 Cepstrum 을 실행할 경우 Low Quefreny 에서는 크기가 증폭되고 High Quefreny 에서는 그 크기가 작아지는 특성을 가지게 된다. 이 특성은 종종 원하는 신호 피크 값이 주위의 신호에 묻혀 주기성을 찾기 힘들어지는 결과를 초래하게 된다. 따라서 이러한 약점을 보완하기 위해 Randall 은 다음과 같이 수정된 Power Cepstrum 식을 제안하였다².

$$\begin{aligned} \overset{\vee}{C}_{AA} &= F^{-1}\{\Gamma_{AA}(f)\} \\ \Gamma_{AA} &= 2 \log S_{AA}(f) \quad , f > 0 \\ \Gamma_{AA} &= \log S_{AA}(f) \quad , f = 0 \\ \Gamma_{AA} &= 0 \quad , f < 0 \end{aligned} \quad (3)$$

FFT 를 이용한 신호분석에 있어서 흔히 사용되는 것이 Power Spectrum 인데 신호의 절대값만을 나타낸 것으로 주파수별 신호의 크기를 분석할 때 유용한 정보가 된다. 그러나 단지 절대값만을 나타내기 때문에 역변환을 위해 필요한 위상에 대한 정보 잃어버리는 결점이 있다. 위상정보를 포함하기 위해서는 Complex Spectrum 을 이용하는데, 이 또한 Power Spectrum 보다 주파수별 진폭의 차이가 작아지기 때문에 모터에 구동되는 기어의 소음과 같은 주기적인 충격신호는 다른 기계음에 묻혀서 그에 대한 분석능력이 떨어진다. 따라서, 두 가

지를 조합하여 Power Spectrum 을 이용하는 Power Cepstrum 으로 주기신호를 평가하고 별도로 Complex Spectrum 을 이용하여 Power Spectrum 에 위상을 부여함으로써 완벽한 형태의 역변환은 아니지만 우리가 원하는 신호에 대해 증폭하여 분리해 낼 수 있다.

식 (4)는 위상을 가지는 Complex Cepstrum 의 정의식이다.

$$C_A = F^{-1} \{ \log A(f) \}$$

$$A(f) = F \{ a(t) \} = |A(f)| e^{j\phi(f)} \quad (4)$$

$$\log A(f) = \ln |A(f)| + j\phi(f)$$

식 (4)의 역변환을 이용하여 주어진 신호에 대해 역변환을 행하여 시간에 대한 임펄스성의 충격 신호를 증폭하여 표현할 수 있다.

2.2 Comb Liftering

대역폭 Δ 와 Center Queffency τ_i 를 갖는 Ideal Bandpass Lifter 는 식 (5)와 같다.

$$|G_i(e^{j\tau})| = \begin{cases} 1 & ; |\tau - \tau_i| < \frac{\Delta}{2} \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

실제 수학적 모델링에 의해 구현 가능한 Actual Bandpass Lifter 는 식 (6)으로 표현되어질 수 있지만 Center Queffency 주위로 작은 Lobe 가 존재하기 때문에 파워의 손실을 발생시키고 주위의 신호를 같이 포함시켜 신호의 파워에 대한 분산을 크게 하는 약점을 가진다⁵.

$$G_i(e^{j\tau_i}) = \sum_{n=0}^p g_i(n) e^{jn\tau_i} = 1 \quad (6)$$

$g_i(n)$: Lifter coefficient

따라서 본 논문에서는 실제 실시간 분석이 아닌 신호를 Power Cepstrum 한 결과에 대해 후처리하는 방식을 채택하고 프로그램에서 조건식을 이용하여 Ideal 한 Lifer 를 구현하였다. 또한 주기신호를 완전히 추출하기 위해 관련된 Rahmonics 와 대역폭을 입력하고 조건식을 반복 실행하여 Comb Lifer 를 구현하였다.

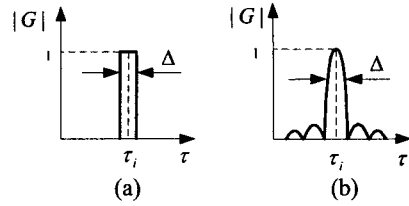


Fig. 1 (a) Ideal bandpass lifter (b) Actual bandpass lifter

3. 측정 및 Cepstrum 을 이용한 분석

3.1 자동차용 DC Motor 소음/진동 측정

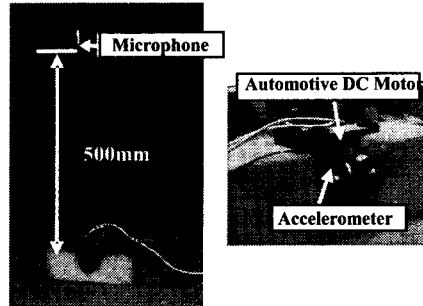


Fig. 2 Setup to measure noise/vibration of DC motor

본 실험을 위해서 마이크로폰과 가속도 센서를 동시에 사용하여 분석을 실시하였다. 소음의 주파수 대역은 0~12.5KHz 까지 8Hz 간격으로 샘플링 하였고, 진동신호는 0~800Hz 까지 0.5Hz 간격으로 샘플링 하였다. 무향실의 크기는 2.6m x 2.6m x 2.25m 이고 최대 암소음은 20dB(A)이하이다. 소음과 진동에 대한 두 가지 신호에 대해 시간데이터와 FFT 결과를 비교하면 거의 비슷한 형태의 결과를 얻을 수 있다. 이는 진동이 소음에 직접적인 영향을 미친다는 것을 의미하고 기어의 저주파수 영역에서의 임펄스성의 신호를 분석하기 위해서는 소음신호 보다는 진동에 대한 신호를 높은 해상도로 측정하는 것이 유리하다. 따라서 본 연구에서는 진동신호를 측정데이터로 삼고 분석을 실시하였다.

3.2 Gear Impulse 신호분석

Fig. 3 은 웜 기어(감속비 7.33:1, 회전수 3600RPM)의 기어 소음에 의한 임펄스 신호의 형

태를 나타낸 시간 신호이다. 그림에서와 같이 실험 대상 모터의 기어회전주기에 일치하는 임펄스 신호를 정확하게 관찰할 수 있다. 그러나 이러한 신호는 전형적인 예로서 실제 생산라인에서 나타나는 진동신호는 모터 회전자 및 브러시, 정렬오차 등에 의한 진동들이 함께 섞여있기 때문에 기어에 의한 신호를 쉽게 구분하기 힘들다.

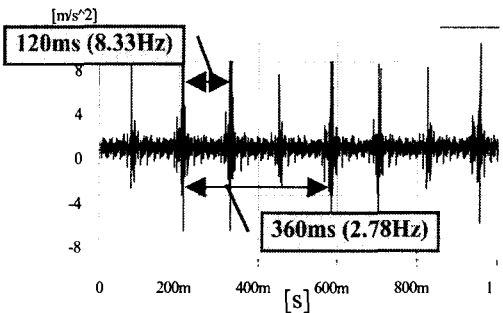


Fig. 3 Time signal for inconsistent gear noise

3600 RPM 을 주파수로 환산하면 60Hz 이고 이것을 다시 감속비에 의한 기어의 회전수를 계산하면 8.18Hz 로서 Fig. 3 에 나타난 임펄스 성분과 거의 일치함을 확인할 수 있다. 따라서 이것은 기어가 1 회전할 때마다 어떠한 결함에 의해 충격이 발생하고 있음을 의미한다. 또한 그 주파수의 3 배가 되는 시점에서 또 하나의 주기성분이 관찰이 되는데 이것 또한 3 줄 나사인 웜의 한 나사산에 문제가 있음을 의미한다고 볼 수 있다.

Fig. 4 는 Fig. 3 의 시간데이터를 FFT 분석한 결과를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 60Hz 의 모터의 회전주파수는 FFT 스펙트럼으로부터 정확하게 확인할 수 있지만 8Hz 대의 임펄스성의 기어 회전특성은 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다.

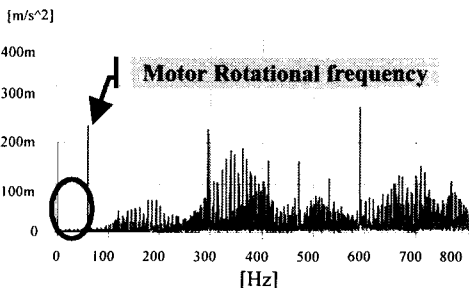


Fig. 4 FFT analysis of gear vibration

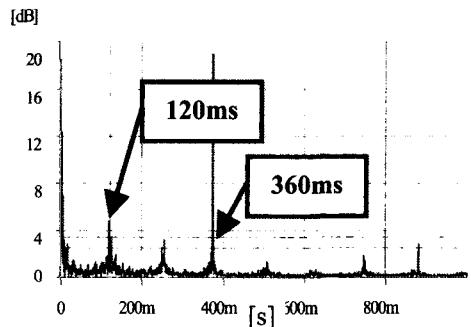


Fig. 5 Power cepstrum analysis of gear vibration

Fig. 5 는 Fig. 3 과 Fig. 4 를 이용하여 Power Cepstrum 의 결과를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 Power Cepstrum 은 FFT 에서 볼 수 없었던 8.33Hz(120ms)의 임펄스 신호를 잘 나타내고 있을 뿐만 아니라 2.78Hz(360ms)의 신호와 관련된 주기 신호 역시 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Power Cepstrum 은 식 (1)에서와 같이 Auto-Correlation 을 이용한 변환이기 때문에 고주파 대역인 low quefreny 에서는 값이 커지고 저주파 대역인 high quefreny 에서는 값이 작아지는 특성을 나타내지만 임펄스형의 주기신호를 분석하는 데는 아주 유용하다. 그러나, 앞에서 언급한 바와 같이 Power Cepstrum 은 Power Spectrum 을 통한 Auto-Correlation 을 이용하기 때문에 그 위상을 잃어버리게 되므로 역변환을 통한 신호처리는 불가능해지는 약점이 있다.

3.3 Modified Power Cepstrum

Power Cepstrum 이 위상을 잃어버리는 결점을 보완하고 Power Cepstrum 이 가지는 주기적인 임펄스 신호에 대한 식별능력을 유지하기 위한 방법으로 식 (7)과 같이 Modified Power Cepstrum 을 제안하였다. Modified Power Cepstrum 은 기존의 Complex Cepstrum 과 Power Cepstrum 의 내용을 부분적으로 수용하였다. 진폭에 대한 절대값 대신 절대값의 제곱을 채용함으로써 Power Cepstrum 의 Auto-Correlation 을 이용한 효과를 기대하고 또한 Complex Cepstrum 자체의 각 절대값에 대한 위상을 이용할 수 있도록 시도하였다. 이를 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\overset{\nabla}{C}_A = F^{-1} \{ \log \overset{\nabla}{A}(f) \} \quad (7)$$

$$A(f) = F \{ a(t) \} = |A(f)| e^{j\phi(f)}$$

$$\overset{\nabla}{A}(f) = |A(f)|^2 e^{j\phi(f)} \quad (8)$$

$$\log \overset{\nabla}{A}(f) = 2 \ln |A(f)| + j\phi(f)$$

3.4 Comb Lifter 와 역변환을 이용한 분석

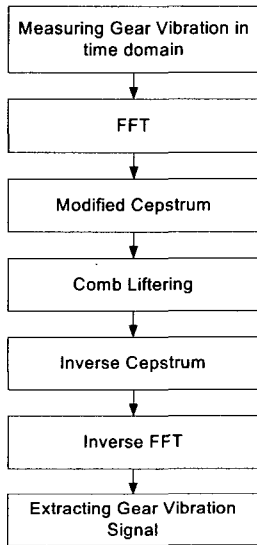
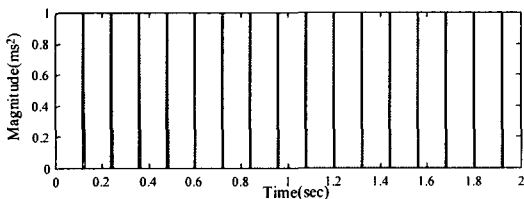
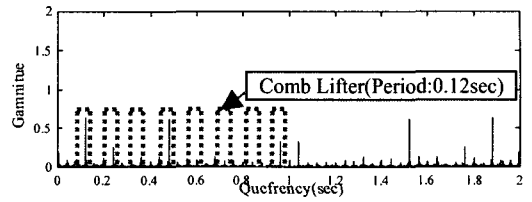


Fig. 6 Sequence of signal processing to extract gear impulse vibration

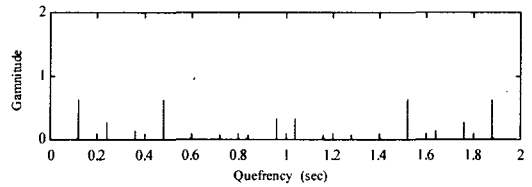
Fig. 6 은 시간에 따른 모터의 진동신호를 측정하여 단계별로 신호처리를 실시하여 최종적으로 원하는 기어의 임펄스 신호를 추출하는 과정을 설명하는 블록선도이다. 최종적으로 추출된 임펄스 신호를 이용하여 대상제품의 이상유무를 정량적인 값으로 환산하여 객관적인 판정이 가능하게 하였다.



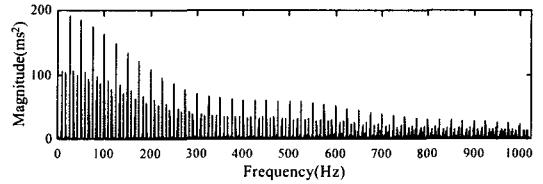
(a) Unit Impulse Time Signal (Period : 0.12 sec)



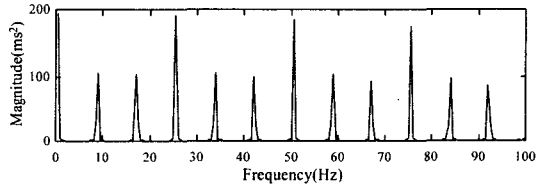
(b) Modified Power Cepstrum



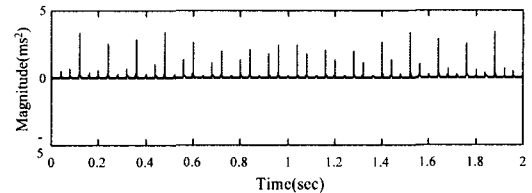
(c) Comb Lifting



(d) Inverse to FFT (0~1000Hz)



(e) Inverse to FFT (0~100Hz)



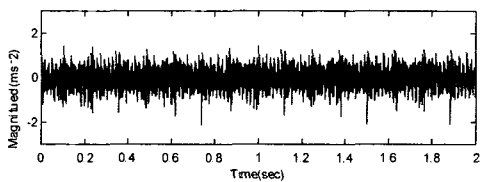
(f) Inverse to Time Signal

Fig. 7 Signal processing results of periodic unit impulse

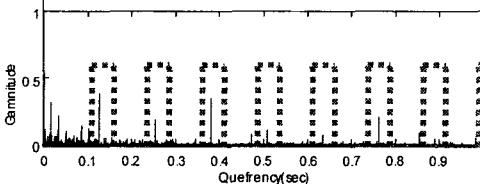
Fig. 7 은 주기 0.12 초의 단위 임펄스를 갖는 시간신호에 대해서 Fig.6 과 같이 신호처리를 수행한 결과를 단계별로 나타낸 그래프이다. Modified Power Cepstrum 한 결과에 나타난 임펄스 신호의 주기에 맞게 Comb Lifter 를 적용하여 임펄스 신호만을 추출하고 이것을 다시 역변환하여 FFT 한 결과를 나타내었다. FFT 결과로부터 임펄스 주기로 부터 파생된 8.33Hz(1/0.12sec=8.33Hz)의 조화성분

이 잘 나타나고 있다. 또한 전체 샘플링 주파수 대역에서는 저주파대역에서의 신호가 커지고 고주파로 갈수록 감소하는 윈도우 함수에 의한 특성을 잘 보여주고 있다. 단계별 그래프에서 한가지 주목할 것은 원 신호로부터 Cepstrum 변환할 때 변환된 유효시간축의 길이가 반으로 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이것은 Auto-Correlation 의 특성으로 생각된다. 최종적으로 시간데이터로 변환된 신호를 살펴보면 원 신호에 비해 증폭되고 주위에 또 다른 임펄스 성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 증폭현상은 임의적으로 절대값을 제곱한 Modified Power Spectrum 에 의한 것으로 생각되고 주위의 임펄스 성분은 윈도우 함수에 의한 영향에 의한 것으로 추정된다. 그러나, 이러한 왜곡현상에도 불구하고 추출된 신호는 원래 신호에 대해 목적하는 임펄스 신호 검출에 유효할 것으로 판단된다.

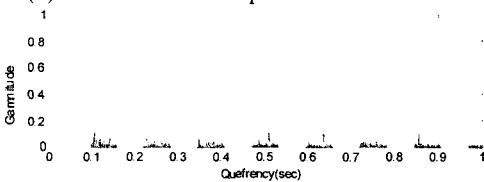
Fig. 8 은 이러한 신호처리절차를 통해서 분석한 결과를 나타낸 것이다. (a)는 기어 임펄스 신호가 모터 노이즈에 묻혀있는 시간 데이터이고 (b)는 Modified Cepstrum 을 실행하고 기어의 회전주파수에 따라 Comb Lifting 을 실행하는 것을 나타내었다. 그리고, (c)는 Comb Lifter 에 의해 Lifting 된 Cepstrum 이고, 마지막으로 (d)는 역변환에 의해 최종적으로 얻어진 기어 임펄스 신호이다.



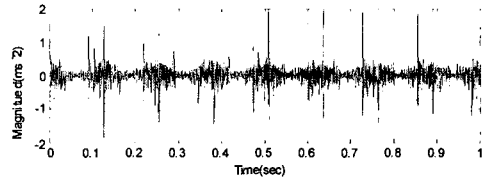
(a) Time Signal to have gear impulse



(b) Modified Power Cepstrum & Come Lifter



(c) Comb Lifting



(d) Extracted Time Signal

Fig. 8 Signal processing to extract gear impulse signal buried in motor noise

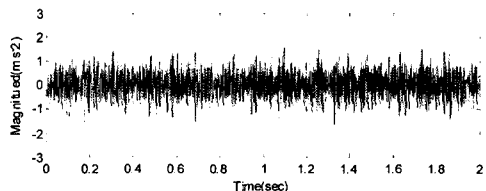
3.5 제안된 신호처리방법의 유효성 검증

3.5.1 유사 신호패턴을 갖는 제품의 선별

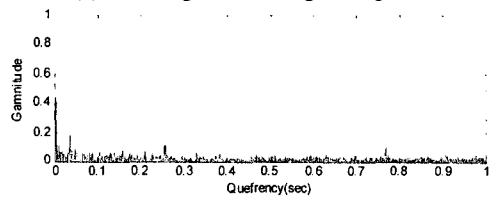
실제 생산라인에서 소음검사자 및 고객으로부터 기어 소음으로 검출된 불량품과 양품에 대해 지금까지 설명한 신호처리방법을 이용하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

두 제품은 시간 신호상으로는 별로 차이가 없지만 묻혀있는 기어 소음으로 인해 실제 감성적인 측면에서 고객으로부터 클레임을 받는 제품이다. 또한, 소음 검사자에 따라 혹은 작업시간 누적에 의한 피로도에 따라 합부 판정이 달라질 수 있기 때문에 생산라인에서 균일한 소음관리가 힘든 제품이라 할 수 있다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 기어 소음 성분이 섞여 있는 제품과 양호한 제품에 대한 신호처리방법에 따른 결과들을 각각 표시하고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 추출된 기어 임펄스 신호는 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 적절한 방법을 통해 정량적으로 두 제품을 선별할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Time Signal to have gear impulse



(b) Modified Power Cepstrum

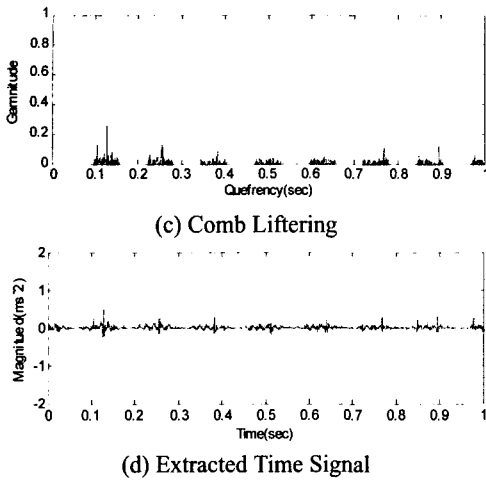


Fig. 9 Signal processing result of good geared motor

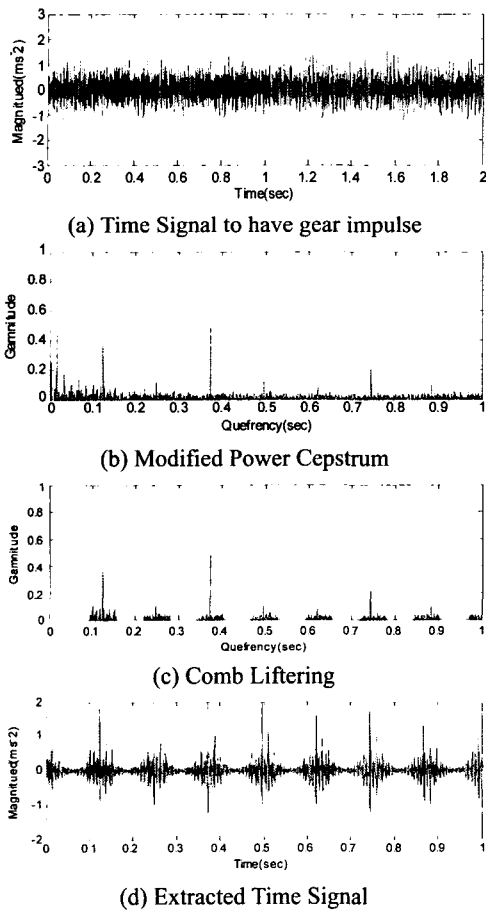


Fig. 10 Signal processing result of bad geared motor

3.5.2 생산라인과 신호처리에 의한 합부 판정 비교

생산라인에서 검사된 제품을 선별하여 제안된 Cepstrum 분석법을 이용하여 평가내용을 서로 비교하였다. 소음검사자(Noise Inspector)에 의해 감성적으로 평가된 내용을 Table 2 에 정리하였다. Cepstrum 분석법을 이용한 판정에서는 추출된 임펄스 신호를 이용하여 식 (9)와 같이 편차제곱(Deviation Square)을 정의하였다. 편차제곱은 통계에서 말하는 표준편차나 분산과 유사하나 계산된 값들간의 차이를 크게 하기 위해서 분산에서 나누어지는 분모인 모집단에 대한 크기를 배제하였다.

Table 2 Test result of Noise Inspector and Cepstrum

No.	Dev. square	Noise Inspector	Cepstrum
1	9.8516	High Pitch Noise (Motor)	Good
2	22.9883	Good	Good
3	88.6697	Gear Noise	Gear Noise
4	472.0182	Bad Noise (Motor & Gear)	Gear Noise
5	99.0336	Gear Noise	Gear Noise
6	126.1834	Gear Noise	Gear Noise
7	151.3267	Gear Noise	Gear Noise
8	133.8939	Gear Noise	Gear Noise
9	202.8854	Gear Noise	Gear Noise
10	42.2487	Gear Noise	Gear Noise
11	72.2365	Gear Noise	Gear Noise
12	21.4828	Good	Good
13	46.8199	Gear Noise	Gear Noise
14	25.0813	Good	Good
15	122.6450	Gear Noise	Gear Noise
16	9.1291	Good	Good
17	17.5222	Good	Good
18	77.4510	Gear Noise	Gear Noise
19	314.0853	Gear Noise	Gear Noise
20	21.4001	Good	Good
21	9.3477	Good	Good
22	13.1928	Good	Good
23	22.4019	Alignment error	Good
24	44.0258	Good	Gear Noise
25	274.8901	Gear Noise	Gear Noise
26	12.5311	Good	Good

$$\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

편차제곱을 이용하여 기어 소음이 있는 제품과 양호한 제품을 구분하는 기준값을 40 으로 정하고 평가를 실시하였다. 판별기준은 40 이상 기어 소음, 40 미만 양호한 것으로 판정하였다. 기준값은 시험 샘플을 300 개 정도를 선별하여 통계적으로 가장 유의한 값을 선정한 결과이다.

Table 2 에서 편차제곱을 이용하여 판정한 결과를 Cepstrum 항목으로 정리하였다. 소음 검사자에 의한 판정내용과 Cepstrum 을 이용한 신호처리를 이용하여 도출한 판정내용에 대해 서로 비교해보면 단순히 소음불량에 관해서는 88.5%의 정확도를 보이고, 본 논문에서 목표한 기어 소음에 대한 정확도는 96.2%의 높은 신뢰성을 보이고 있다. 또한 정확도는 검사자의 감성적인 평가와의 비교이기 때문에 실제 검사자의 선별정도에 따라 정확도에 차이가 생길 수 있다. 그러나, 이런 경우는 검사자의 감성적인 내용이 제품판정에 영향을 끼치는 것이므로 본 연구에서 제시한 분석방법이 오히려 더 객관적으로 신뢰할 수 있는 결과라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Cepstrum 의 Quefrency 영역에서 Comb Lifter 를 이용하여 기어의 임펄스 신호를 추출하는 신호 처리 방법을 고안하였다.
2. 기존의 Power Cepstrum 을 변형한 Modified Power Cepstrum 을 이용하여 Power Cepstrum 의 신호분석능력을 유지하면서 Quefrency 영역에서의 역변환이 가능하도록 하였다.
3. 고안된 신호처리절차로 추출된 임펄스 신호에 대해 객관적인 판정이 가능한 편차제곱을 정의하였다.
4. 실제 모터에 장착된 기어의 소음에 대해 고안된 신호처리기법의 유효성을 입증하였다.
5. 생산라인의 소음 검사자에 의한 소음검사 결과와 서로 비교함으로써 신호처리 결과가 충분한 신뢰성을 가짐을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업 연구과제의 일부로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Lee, M.H., Kang, D.B., Kim, H.Y., Ahn, J.H., "Development of worm machining method to improve noise and vibration of automotive DC motor," Proc. of the KSPE Spring Annual Meetings, pp. 777-780, 2004.
2. Randall, R.B., "Frequency Analysis," B&K, pp. 16-77, pp. 271-304, 1987.
3. Taylor, J.I., "The Gear Analysis Handbook," VCI, pp. 156-228, 2000.
4. Choi, Y.C., Kim, Y.H., "Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum-Theory," Journal of KSNVE, Vol. 10, No.4, pp. 642-647, 2000.
5. Choi, Y.C., Kim, Y.H., "Detection of Impulse Signal in Noise Using a Minimum Variance Cepstrum Application on Faults Detection in a Bearing System," Journal of KSNVE, Vol. 10, No.6, pp. 985-990, 2000.
6. Cunningham, E.P., "Digital Filtering," Houghton Mifflin, pp. 236-402, 1992.
7. Bogert, B.P., Healy, M.J.R., Tukey, J.W., "The Quefrency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Shape Cracking," Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis, by M.Rosenblatt, Wiley N.Y., pp. 209-243, 1963.
8. Wismer, N.J., "Gearbox Analysis using Cepstrum Analysis and Comb Liftering, Application Note," B&K, 1994.
9. Adams, M.L., "Rotating Machinery Vibration," Marcel Dekker Inc., pp. 225-243, pp. 253-290, 2001.
10. Park, I.K., "Matlab Guide," A-Jin, pp. 41-54, pp. 202-207, 1998.