

엔진 양산라인의 충격성 불량유형 신호 진단을 위한 진단시스템 개발[§]

오세도* · 김영진*[†] · 서해윤* · 이태휘** · 이재원**

* 경희대학교 산업경영공학과, ** (주)사이로직

Diagnostic System for Crashing and Damping Signals in Engine-Assembly Line

Oh Se-do*, Kim Young-jin*[†], Seo Hae-yun*, Lee Tae-hwi** and Lee Jae-won**

* Industrial & Management Systems Engineering, Kyung Hee Univ.,

** Psylogic

(Received December 12, 2010 ; Revised May 11, 2011 ; Accepted May 11, 2011)

Key Words: Engine Assembly(엔진조립), Fault Diagnosis(이상진단), Vibration Signal(진동신호)

초록: 본 연구를 통하여 개발하고자 하는 진단시스템은 자동차 엔진 어셈블리라인에서 발생될 수 있는 특정 조립 불량유형을 검사하는 시스템이다. 대상으로 하는 불량 유형은 엔진 고장의 유형 중 커다란 충격성신호가 발생한 후, 보상적인 작은 충격파가 주기적으로 발생하는 형태이다. 이러한 불량유형을 기존의 시간영역분석 진단, 주파수분석, 통계적분석등에 의해 진단할 경우 한계점이 존재한다. 이에 웨이블릿 잡음 제거 전처리 방법, 피크검지 알고리즘, 불순도 최소값 선택 분할 방법을 이용한 새로운 유형의 이상진단 방법을 개발하는 연구를 진행하였다.

Abstract: We develop a diagnostic system to monitor failures in an engine-assembly line. Existing techniques such as sensory analysis, time domain analysis, frequency analysis, and statistical analysis have limitations in the diagnosis of engine-assembly failure when there are abnormal vibration waveforms (crashing and damping signals) during the assembly. We use a wavelet technique to deal with crashing and damping signals. We also implement a new technique for developing diagnostic rules from sensor data, and we demonstrate its validity.

1. 서론

최근 회전 진동기기 및 파워트레인 기계요소(엔진, 변속기)에 대한 초기 품질 확보를 위하여 양산라인에 노이즈를 계측하는 시스템의 적용이 확대되고 있다(한국 계측기 연구조합, 2003). 과거 검사관이나 작업자가 보고, 듣고, 만져보아 검사하는 감성적 검사에 의존하였던 시기가 있었으나 생산라인의 노이즈와 같은 환경적 변수에서 나오는 인적오류를 막을 수가 없고, 생산성을 보장하기 위해서는 빠른 검사가 이루어져야 하는 요구를 만족시킬 수가 없어 자동 진단시스템의 개발이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서 대상으로 하는 엔진 양산라인의 진단 시스템 또한 이러한 요구가 대두되어 여러 제품들이 개발되어 있는 실정이다. 하지만, 대부분의 측정시스템의 진단 기법들이 단순한 회전기기에 기반을 두어 측정과 간단한 통계적 기법을 수행하는 진단 시스템이 대부분이다. 로터 등의 단순 회전진동기기의 경우 진동의 형태가 단순하고 규칙적인 특징을 가지고 있으며, 단순 진동기기보다 조금 더 복잡한 구조를 지닌 변속기의 기어 박스(Gear box)와 같은 경우에도 변속 시 서로 다른 기어비에서 생기는 진동 및 소음이 확연히 다른 형태를 보인다. 이러한 경우 진동 및 소음의 크기에 대한 통계량을 측정해 진단을 수행하는 것이 일반적이다. 주로 해당 주파수의 평균 크기, RMS(Root Mean Square), 첨도, 파고율 등과 같은 기기 특성에 맞는 특별한 통계량을 계산하여 통계적 진단을 수행한다.⁽¹⁾ 그러나 엔진의 경

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC제주) 발표논문임

† Corresponding Author, yjkim@khu.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

우, 특성상 회전운동뿐만 아니라 내부 실린더의 상하 운동이 결합된 운동 형태를 가지고 있어 진동이 상하 또는 좌우로 규칙적인 형태를 띠지 못하고 진동들 간의 간섭으로 인해 감쇄 또는 증폭이 되는 복잡한 형태의 진동특성이 나타난다. 이러한 특성으로 인해 때때로 일반적으로 사용되는 통계적 진단 기법만으로는 불량률의 검출이 힘든 상황이 존재한다. 현재 엔진 생산라인에서는 변속기나 로터와 같이 진단이 간편한 형태의 운동 성향을 띠는 기기에 적합한 진단 시스템만이 도입된 실정이다. 이 시스템들은 통계량 분석과 주파수분석 정도의 기능만 내장하고 있어, 제대로 된 불량률의 검출이 이루어지지 못하는 부분이 있다. 엔진의 진동특성을 반영하지 못해 생기는 일례로 진동레벨(RMS)이 낮더라도 이음이 섞여 있을 경우에는 엔진 부품이 이상상태로 전이되고 있음을 나타내기도 하는 예를 들 수 있다. 이 경우 단순히 진동레벨만을 검사하여 통계적으로 진단하게 되는 경우 이러한 유형의 엔진을 검사로서 골라내는 것은 쉽지 않다. 즉 엔진의 경우 단순히 계량적 평가를 실시할 경우, 이상 상태를 바로 진단할 수 없으며 고장의 형태에 대한 완벽한 검출이 불가능하다는 것이다. 그렇기에 엔진의 특수한 운동특성을 반영한 진단 시스템이 개발되어져야 한다.

2. 관련 시스템 및 연구현황

2.1 관련시스템

엔진진동과형 데이터는 H자동차의 전주 공장 생산라인에 설치된 콜드테스터에서 실험 측정된 데이터이다. 디젤 트럭용 엔진의 데이터를 이용했으며, 엔진의 상단 헤드부와 하단의 블록부에 2곳에 가속도 센서를 부착시켜 측정되었다. 측정시 엔진을 콜드테스터 상에서 맞물려 1000RPM으로 회전할 때의 진동을 측정하였다. Fig. 1에 H자동차 전주공장의 콜드테스터와 각 센서의 부착위치를 나타내었다.

불량률이 매우 낮은 엔진의 특성에 따라 불량시료 데이터는 실험을 통해 얻어냈다. 모든 측정 조건은 동일하며, 불량유형은 엔진의 부품의 결합으로 인한 불량이나 아닌 조립과정에서 조립의 실수로 발생하는 불량에 한정한다. 본 연구에서는 조립과정에서 일부러 만들어낸 불량유형을 콜드테스터에서 실험 측정하여 얻어진, 레이블링

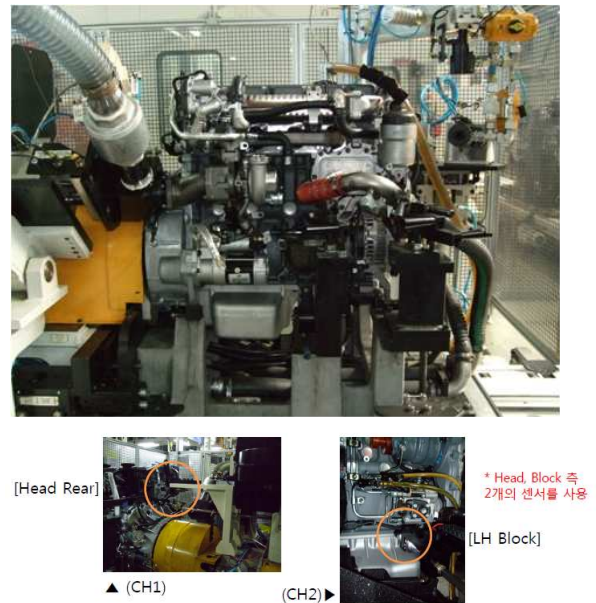


Fig. 1 Engine cold-tester in H motors

(labeling)이 되어 있는 데이터를 활용해 분석하고 이를 통해 고장진단 시스템을 구축하였다.

2.2 관련 연구 현황

2.2.1 단순 시계열 분석의 한계

엔진진동의 로우(raw)데이터는 가속도센서로 측정된 시간영역데이터이다. 이 데이터를 육안으로 분석해보면 차이점이 뚜렷하게 나타나는 고장유형도 있지만, 별다른 차이점을 발견할 수가 없는 고장유형도 있다. 엔진은 여러 부품들이 수직상하 운동과 더불어 회전 운동, 커플링등과 같은 복합적 진동들이 한꺼번에 발생하기 때문에 부품간의 간섭이 생길 수 있다. 이로 인해 진동과형이 복잡하고, 이상충격신호들이 정상신호에 의해 상쇄되거나 숨어있는 경우가 있어 시간영역데이터를 통해 이를 검지해내는 데에 어려움이 따른다.

Fig. 2의 불량유형은 정상엔진보다 충격량이 큰 파형으로 육안으로 구별이 확실하고 RMS, 첨도, 파고율등의 통계량을 구해 분석하는 방법으로 쉽게 진단해 낼 수 있는 형태의 고장유형이다.⁽³⁾ 이러한 유형의 불량으로는 타이밍 체인의 기어물림이 맞지 않는 경우, 헤드 부분에 이물질이 유입된 경우(주로 가공에 쓰이는 쇼트볼이 주로 유입됨.)를 예로 들 수 있다. 이러한 불량 유형의 경우 엔진이 기동을 함에 따라 지속적으로 정상의

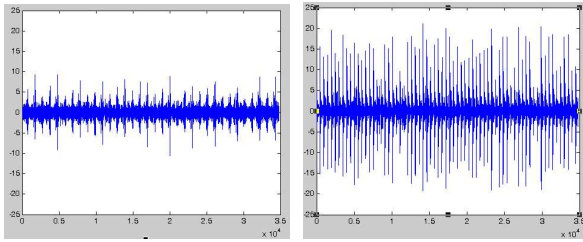


Fig. 2 Comparison of normal(left) engine and case 1 abnormal(right) engine (Timeseries Waveforms)

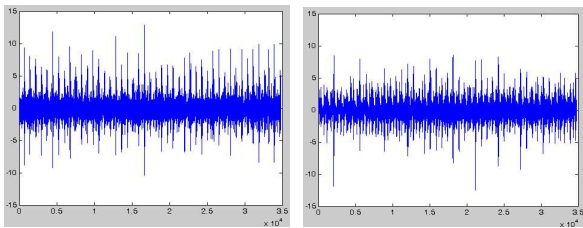


Fig. 3 Comparison of normal(left) engine and case 2 abnormal(right) engine (Timeseries Waveforms)

진동과는 차별된 크기의 진동과 소음을 유발되므로 RMS와 같은 특정 통계량을 이용해 쉽게 분석이 가능하다.

그러나 Fig. 3의 고장유형의 경우 정상적 피크 신호 사이에 이상충격이 일어나는 형태의 불량유형이다. 이러한 유형은 피크와 피크사이에서 충격성 이상신호가 발생한 후, 보상적인 감쇄작용이 주기적으로 발생한다. 이러한 유형의 불량으로는 실린더 블록의 오일젯의 장착방향이 불량하거나 구부러져 있어 간섭이 있는 경우, 크랭크축의 평면도가 불량한 경우 등을 예로 들 수 있다. 이러한 불량 유형의 경우 캠이나 실린더의 운동이 따라 일정 사이클 별로 미세한 충격성 진동이 발생되며, 충격성 진동 직후 진원과 떨어진 다른 부분과의 어떠한 상호작용에 기인하여 감쇄작용이 일어나기도 한다. 이러한 경우 다른 소음이나 진동사이에 작은 이상 피크신호가 숨어 있는 경향이 있다. 따라서 정상과형과 비교하여 뚜렷한 차이점을 찾아내기 힘들며 단순히 통계량을 구해 진단을 하여도 양품과의 구분이 뚜렷하게 되지 않아 어려움이 따른다.

2.2.2 주파수 분석의 한계

결국 시간영역 통계 분석의 한계점 때문에 주파수 영역에서의 분석이 고려되어 진다. 주파수 분석기법은 이미 많은 회전 진동기기 등에서 널

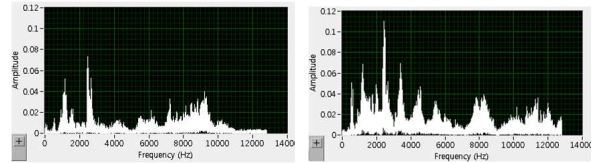


Fig. 4 Comparison of normal(left) engine and case 1 abnormal(right) engine (Frequency Spectrums)

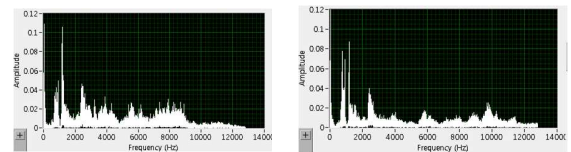


Fig. 5 Comparison of normal(left) engine and case 2 abnormal(right) engine (Frequency Spectrums)

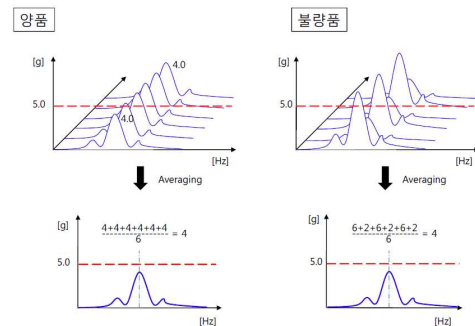


Fig. 6 Crash and damping signal in frequency domain analysis

리 사용되고 있는 진단 기법 또는 전처리 방법이다. 이때 푸리에 변환은 매우 중요한 의미를 갖는다. 시간영역을 주파수영역으로 변환하는 데에 이용되기 때문이며, 특히나 엔진과 같은 회전 진동기기의 진동과형을 해석하는데 있어 해당 주파수영역의 신호가 다량으로 출현하는 지를 판단하여 불량을 검사할 수 있다.⁽²⁾

푸리에변환을 이용한 주파수 분석에는 한계점이 존재하는 데, 이는 주파수영역으로 변환 시 시간의 차원이 사라지게 된다는 점이다. 이러한 특징 때문에 엔진의 고장유형 중 불규칙한 이상음 들이 발생 및 상쇄를 반복하는 충격성 신호를 내포한 불량 유형의 경우는 검지해내지 못한다.

예를 들어 Fig. 4의 불량유형의 경우 거의 모든 주파수 대역에서 신호가 증가하며 특히 고주파대역인 10000Hz 대역 이상에서 뚜렷한 차이를 보이므로 진단이 수월하나 Fig. 5의 고장유형의 경우 뚜렷한 차이가 없고 오히려 불량이 양품보다

작은 신호량(dB)를 가지는 경우도 있다.

이는 충격성 신호의 보상적 감쇄에서 기인하는 현상이다.

Fig. 6의 예와 같이, 푸리에 변환의 경우 시간에 따라 변화되는 신호를 분석할 수 없는 문제점을 내포하고 있기 때문에 엔진 고장의 유형 중 주기적으로 커다란 충격성신호가 발생한 후, 보상적 감쇄가 발생하는 불량유형의 경우 판별이 불가능하다는 한계점을 지닌다.

3. 이상진단 시스템 개발

3.1 충격성 신호를 감안한 신호 전처리

웨이블릿은 디지털 신호 처리 및 이미지 압축, 심전도 파형 분석등에 사용되는 유용한 수학 함수이다. 이는 푸리에 변환이 시간영역을 고려하지 못하는 단점을 해결할 수 있는 방법론이라 할 있다. 푸리에의 [주파수, 주기]영역과는 달리 웨이블릿 변환의 경우 [시간, 음계(scale)]영역으로 분석하며 각 음계는 일정범위의 주파수대역을 갖는다.

웨이블릿 변환은 잡음제거(De-noising) 방법으로 많이 사용된다. 웨이블릿 함수를 이용해 신호를 각각의 잔물결 신호(웨이블릿)들로 나눌 수 있고, 각각의 쪼개진 잔물결 신호들을 분석 또는 가공하여 (단순화 또는 백색 잡음제거) 신호별로 잡음을 제거한다. 이렇게 처리된 신호들은 다시 합치는 것이 선형적으로 이루어지기 때문에 신호의 분해/재조립이 매우 간편하게 이루어질 수 있다. 이렇게 각각의 필터링된 레벨의 파형들에서 노이즈를 제거하면 원래 중요정보는 그대로 남아 있고 노이즈가 제거된 깨끗한 파형을 얻어낼 수가 있다. 웨이블릿 변환은 이미 영상이나 심전도, 파일압축 등에서 많이 쓰이고 있다. 특히 ECG 진단에 유용하게 쓰였던 것으로 근거항으로 인한 노이즈를 제거해 스무스한 파형을 만들고 그것을 디텍팅에 활용함으로써 99퍼센트의 검지율을 보인 사례가 있다.⁽⁴⁾ 이러한 연구에서 착안하여 해당 엔진의 진동신호를 멀티 스테이지 필터링을 이용해 5레벨로 나누고, 각각의 레벨별 노이즈를 제거한 후, 이를 다시 재 결합시켜, 피크의 정보는 그대로이나 단순한 형태의 파형을 만들어 분석을 할 수 있다.

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 본래의 진동 신호를 5 레벨로 분해하고, Fig. 8의 좌측 신호들처럼

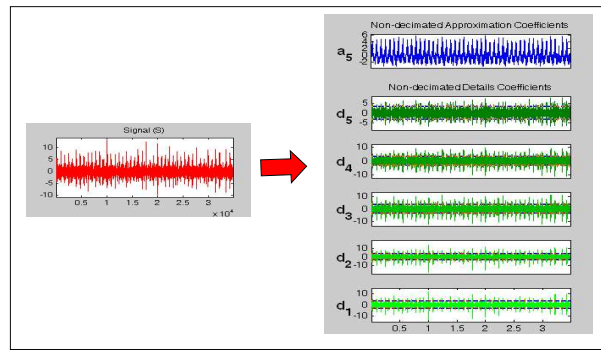


Fig. 7 Wavelet multi-stage filtering

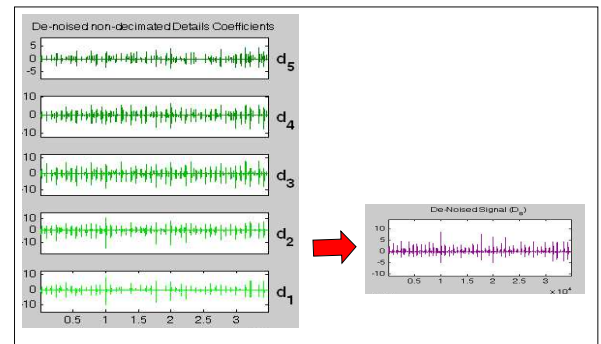


Fig. 8 De-noising and composing

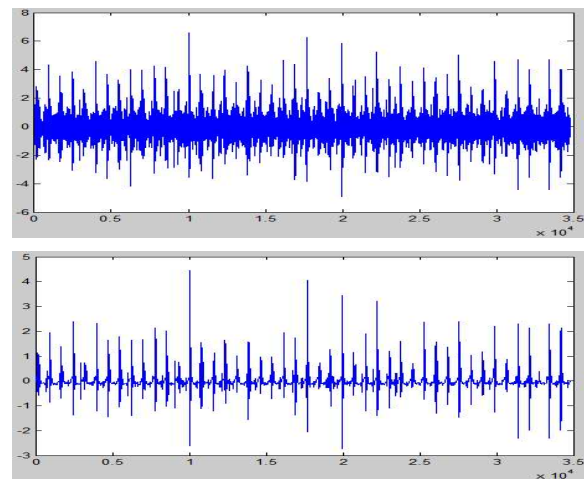


Fig. 9 Normal waveform and de-noised waveform (Normal Engine)

각각의 레벨의 화이트 노이즈를 제거하면 우측의 노이즈가 제거된 파형을 얻어낼 수 있다. 기존의 파형과 웨이블릿 잡음감쇄 방법을 이용한 파형의 비교는 Fig. 9와 같다.

이 신호들을 육안으로 분석해보면 정상파형의 경우 피크의 간격이 비교적 고르고, 피크의 세기가 어느 정도 일정한 반면, 비정상파형의 경우 피크의 간격이 불규칙한 특성을 나타낸다.

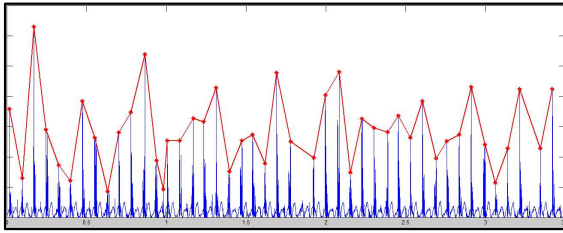


Fig. 10 Peak detection

3.2 피크검지

신호의 절대치를 이용해 피크와 이상신호보다 작은 적정 값을 찾아 검지선을 설정하고 이 선을 넘어가는 충격들이 발생하는 순간부터 다시 선을 넘지 않는 충격이 발생하는 부분까지를 추출해 최대치를 찾는 알고리즘이 있다. 선을 넘은 후부터 넘지 않는 점을 카운트하여 넘지 않는 점이 일정하게 계속 유지되는 경우 마지막으로 선을 통과한 부분까지를 추출해 최대값을 구하는 방법이다.

검지선은 전체 엔진파형의 절대량의 평균에 2배의 표준편차수준을 더한 값으로 설정하였다. 엔진의 충격 파형 데이터는 시료의 개수가 충분히 많고, 0을 기점으로 하여 진동하는 특성이 있어 정규 분포를 따르고 있다. 때문에 이러한 검지선 설정의 의미는 평균이상의 신호 중 약 2.25%의 신호만을 추출해 이 신호들 안에서 피크치를 발견하겠다는 의미이다.

피크 검지 알고리즘을 이용하여 피크신호를 검지한 결과의 예는 Fig. 10과 같다.

이 방법을 이용하여 얻어지는 것은 두 개의 정보이다. 피크의 절대적 수치와 피크가 발생한 지점이 바로 그것이다. 이 두 가지 정보는 우리가 원하는 정상엔진 및 불량엔진을 가려낼 수 있는 변수라고 보기는 힘들다. 하지만 이 두 가지의 정보들의 차이를 단순 계산하여 불량엔진과 정상엔진을 구분할 수 있는 의미있는 특징량인 ‘피크간의 간격’을 얻어낼 수 있다.

이론적으로 정상엔진의 경우 한 사이클당 흡입, 압축, 폭발, 배기를 일정한 시간에 반복하게 되는 과정에서 등간격으로 비슷한 물리량의 충격신호를 내보낸다. 하지만 불량엔진은 연료의 불규칙한 분사, 이물질등 유입, 체인벨트의 맞물림 불량 등의 여러 가지 원인으로 인하여 충격신호가 불규칙적으로 나타나는 경향을 띠게 된다. 피

크 검지 방법을 통하여 얻어진 피크의 위치를 이용하여 피크의 간격을 쉽게 계산해 낼 수 있다.

3.3 진단 법칙 생성

이상신호와 Peak를 검지해 낸 데이터를 통계적 변형 없이 이상 진단에 바로 사용하는 방법을 고려해 볼 필요가 있다. 이러한 방법 중 상한(Upper-limit)과 하한(Lower-limit)을 설정하는 진단 법칙(Diagnostic Rule) 이용해 이상 피크 검지하는 방법이 있다. 이전에 밝힌 바와 같이 엔진 이상 진단에서 가장 의미가 있다고 생각되는 변수는 n 과 $n-1$ 시점의 피크사이의 거리와 n 과 $n-1$ 시점의 피크 변화량이라고 할 수 있다. 이 두 가지의 변수를 이용해 이상과 정상을 판단하는 한계선을 최적으로 정하기 위해서 사용될 수 있는 방법 중 하나가 분류나무(Classification Tree)에서 쓰이는 불순도의 최소화(또는 순수도를 극대화)하는 데이터 분할방법을 쓰는 것이다. 분류나무에서 분류기준으로 많이 쓰이는 불순도의 최소화 방법에는 보통 대표적인 두 가지의 기준 값 중 하나를 이용한다. 지니지수(Gini index)와 엔트로피지수(Entropy index)가 그것이다. 기본적으로 이 두 가지의 지수는 혼잡도를 측정해준다는 의미에서 같은 의미의 기준값이라 할 수 있으며, 본 연구에서 사용된 방법은 계산이 간편한 지니지수를 이용하였다.

지니 지수는 어떠한 변수들이 m 개의 집단으로 나뉘고 $i = 1, 2, \dots, m$ 으로 표기된다고 가정할 경우 다음과 같이 표현된다.

$$Gini(b) = 1 - \sum_{i=1}^m p_i^2$$

p_i 는 특정 범위를 가지고 있는 영역에서 i 집단에 속하는 관찰자들의 비율이다. 이는 이진분류라 가정할 경우 $p_i = 0.5$ 일때(어떠한 영역이 두 집단을 각각 50%씩 포함할 때) 최대 값이 된다.

지니지수를 토대로 [분할 전의 불순도 - (분할 후 불순도1 + 분할 후 불순도2)] 를 최대화 하는 분할을 선택한다는 것이 분류나무의 최저불순도 선택 분할 방법이다. 이러한 방법은 정상엔진 파형에서도 이상신호가 존재하는 경우가 있고, 이상엔진에서도 정상적인 피크신호가 존재하는 엔진의 특성을 감안해 에러를 최대로 줄이고 순수도를 보장받을 수 있는 분류기준선(Splitting line)을 찾는 데 도움을 줄 수 있다. 이렇게 구해진 분

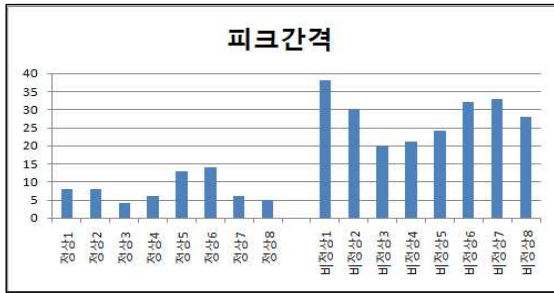


Fig. 11 Result

류기준선을 한계선으로 이용하여 정상 엔진 및 이상 엔진의 피크의 간격을 검사하는 척도로 사용될 수 있다.

위 방법론으로 분류기준선을 계산해보면 피크 간격의 불순도가 가장 적은 피크 간격의 정상범위가 도출된다. 이 진단 법칙을 이용해 이상신호가 얼마나 많이 발생하는지를 진단할 수 있다. 그 결과 비정상엔진의 비정상 간격의 개수는 정상엔진에 비해 약 2배정도 많은 수치로 나타난다. 이를 표로 정리하면 Fig. 11과 같다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 개발된 진단 방법을 통해 시간영역 검사 또는 통계검사를 통해 검사해 낼 수 없는 엔진의 불량유형을 검사해 낼 수 있음이 검증되었다. 이 진단 모듈을 이용해 자동 진단시스템을 구축할 시, 진단 법칙을 이용해 피크의 이상유무를 판단하므로 실시간으로 처리가 가능해 시간적인 비용이 줄일 수 있으며, 명확한 가시화와 보다 좋은 정확성을 보장하여 엔진 생산 공장의 어셈블리라인에 도입된다면 좋은 결과를 보여줄 수 있을 것으로 기대된다.

향후 이 연구를 더 많은 정상 및 불량유형의 데이터를 이용해 학습시킨 후 적용한다면 더 좋은 결과를 낼 수 있으리라 기대하며, 디젤엔진의

데이터만을 이용해 진단 시스템을 개발한 것에 더 나아가 가솔린 및 기타 기체연료를 사용하는 엔진에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다. 진단 시스템 개발방법에 있어서도 진단 법칙과 동시에 고려될 수 있는 인공 신경망이나 계층적 분류방법, 퍼지로지, 베이지안 네트워크 등과 같은 인공지능적 데이터마이닝 및 진단 기법을 도입해 더 나은 검사결과를 도출해 낼 수 있는 방법론을 선택하는 것도 중요한 향후 연구가 될 것이다.

참고문헌

- (1) Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C. and Maynard, K. 2000, "Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics," *Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, May 1-4, pp. 623~634.
- (2) Hammond, J. K. and White, P. R., 1996, "The Analysis of Non-Stationary Signals Using Time-Frequency Methods," *Journal of Sound and vibration*, Vol. 190, No. 3, pp. 419~447.
- (3) Sood, A. K., Friedlander, C. B. and Fahs, A. A., 1985, "Engine Fault Analysis: Part I - Statistical Methods," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 32, No. 4 pp. 294~300.
- (4) Li, C., Zheng, C. and Tai, C., 1995, "Detection of ECG Characteristic Points Using Wavelet Transforms" *IEEE Transactions On Biomedical Engineering*, Vol. 42, No. 1, pp. 21~28.
- (5) Zhunge, Q., Lu, Y. and Yang, S., 1990, "Non-stationary Modelling of vibration Signals for Monitoring the Condition of Machinery," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 4, No. 5 pp. 335~365.