

자동차용 판재의 프레스 가공시 방출되는 음향을 이용한 결합 검출에 관한 연구

하성윤*, 최완도, 이대훈**(동아대 대학원 기계공학과)
전언찬, 김종완*** (동아대 기계·산업시스템 공학부)

Research for Defect Detection Using Pressing Sound of Vehicle Plate

S. Y. Ha, H. D. Choi, D. H. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU)
E. C. Jeon, J. W. Kim(Mech. Eng. Dept, DAU)

ABSTRACT

In this paper, it is suggested that the technology sound measurement which is to search the inferiority of the plate during the pressing. We evaluate whether there is a inferiority by analysing and comparing the satisfactory and inferior plate with the method of a spectrum analysis by measuring the sound which is emitted during pressing. We designed the analysis algorithm to detect inferior plate throughout comparison of measured sound data using FFT, DFT and DASYLab S/W. In addition to these, we suggest the way to compare both inferior and satisfactory signal statistically.

Key Words : FFT(고속 푸리에 변환), DFT(이산 푸리에 변환), DASYLab, Spectrum Analysis(스펙트럼 분석)

1. 서론

최근 프레스 가공시 발생하는 불량률의 판별을 위해서 사용되는 기존의 방법들에 투자되는 많은시간과 자본에 관심이 높아지고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 프레스 가공시 발생하는 음향의 주파수 분석을 이용하여 불량판정을 좀더 효율적으로 빠른 시간안에 가능하게 하는 방법을 제시하고자 한다.

본 논문에서는 불규칙적인 입력신호를 DaqBook을 이용하여 측정하고 이 신호를 DasyLab S/W를 통하여 FFT(Fast Fourier Transform)분석하고 이를 자체 개발한 FFT 알고리즘과 비교분석한다. 또한 이산 시간내에서 측정된 신호를 특정주파수 영역내에서 특징점을 찾아 동일신호여부를 찾기위한 통계적 알고리즘을 제시한다. 이 방법을 통하여 실시간내에 평균신호를 찾아 프레스 가공시 발생하는 음향을 이용한 불량여부 판정을 기대할 수 있다.

2. 이론적 배경

2.1 DTFT(discrete time fourier transform)

$$x(n) : \text{absolutely summable } \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)| < \infty \right)$$

이때 $x(n)$ 의 discrete time fourier transform (DTFT)은 다음과 같다.

$$X(e^{j\omega}) = \mathcal{F}[x(n)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (1)$$

또한 이때 inverse discrete time fourier transform (IDTFT)은 다음과 같다.

$$x(n) = \mathcal{F}^{-1}[X(e^{j\omega})] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega})e^{j\omega n} d\omega \quad (2)$$

여기서 연산자 $\mathcal{F}[\cdot]$ 는 이산신호 $x(n)$ 을 라디안 단위로 측정하고 디지털 주파수라 불리는 실변수 ω 을 가진 복소수 연속함수 $X(e^{j\omega})$ 로 변환한다.

DTFT는 다음의 중요한 성질을 가진다.

1. 주기성 : DTFT $X(e^{j\omega})$ 은 주기 2π 로 ω 에 대해

주기적이다.

$$X(e^{j\omega}) = X(e^{j(\omega+2\pi)}) \quad (3)$$

이는 해석을 위한 전체영역 $-\infty < \omega < \infty$ 이 아닌 $X(e^{j\omega})$ 의 단지 한 주기만이 필요함을 의미한다.

2. 대칭성 : 실수 $x(n)$ 에 대하여, $X(e^{j\omega})$ 은 켈레 대칭적이다.

$$X(e^{-j\omega}) = X^*(e^{j\omega})$$

또는

$$\text{Re}\{X(e^{-j\omega})\} = \text{Re}\{X(e^{j\omega})\} \quad (4)$$

(even symmetry)

$$\text{Im}\{X(e^{-j\omega})\} = -\text{Im}\{X(e^{j\omega})\} \quad (5)$$

(odd symmetry)

$$|X(e^{-j\omega})| = |X(e^{j\omega})| \quad (6)$$

(even symmetry)

$$\angle X(e^{-j\omega}) = -\angle X(e^{j\omega}) \quad (7)$$

(odd symmetry)

이는 $X(e^{j\omega})$ 을 그리기 위해서는 단지 $X(e^{j\omega})$ 의 반 주기만을 고려하면 됨을 의미한다.

다음의 주파수에서 계산하길 가정하자.

$$\omega_k = \frac{\pi}{M} k, \quad k=0,1,\dots,M \quad (8)$$

이 주파수는 구간 $[0, \pi]$ 사이의 $M+1$ 개의 등간격 주파수들이다. 이때 식(1)은 다음과 같다.

$$X(e^{j\omega_k}) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j\pi k n / M} x(n), \quad k=0,1,\dots,M \quad (9)$$

$\{x(n)\}$ 과 $\{X(e^{j\omega_k})\}$ 이 각각 열벡터 \mathbf{x} 와 \mathbf{X} 로 배열될 때, 다음을 얻는다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{x} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{W} 는 다음과 같이 주어지는 $(M+1) \times N$ 행렬이다.

$$\mathbf{W} = \{e^{-j\pi k n / M}; n_1 \leq n \leq n_N, k=0,1,\dots,M\} \quad (11)$$

또한 $\{k\}$ 와 $\{n\}$ 을 각각 행벡터 \mathbf{k} 와 \mathbf{n} 으로 배열하면 다음과 같다.

$$\mathbf{W} = \left[\exp\left(-j\frac{\pi}{M} \mathbf{k}^T \mathbf{n}\right) \right] \quad (12)$$

따라서 식(12)는 다음과 같다.

$$\mathbf{X}^T = \mathbf{x}^T \left[\exp\left(-j\frac{\pi}{M} \mathbf{n}^T \mathbf{k}\right) \right] \quad (13)$$

2.2 DFS(discrete fourier series)

다음과 같은 주기적 수열을 정의한다.

$$\tilde{x}(n) = \tilde{x}(n+kN), \quad \forall n, k \quad (14)$$

여기서 N 은 기본 주기이며, 주기함수의 푸리에 해석

으로부터 이 수열은 주파수 $\left\{\frac{2\pi}{N} k, k=0,1,\dots,N-1\right\}$ 를 가지고 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{x}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}(k) e^{j\frac{2\pi}{N} kn}, \quad n=0,\pm 1,\dots \quad (15)$$

여기서 $\{\tilde{X}(k), k=0,\pm 1,\dots\}$ 은 이산 푸리에 급수 계수이며, 다음과 같다.

$$\tilde{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j\frac{2\pi}{N} nk}, \quad k=0,\pm 1,\dots \quad (16)$$

복소지수함수항을 표시하기 위해 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 을 이용하여 다음과 같이 표현한다.

$$\tilde{X}(k) = \text{DFS}[\tilde{x}(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) W_N^{nk} \quad (17)$$

$$\tilde{x}(n) = \text{IDFS}[\tilde{X}(k)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}(k) W_N^{-nk} \quad (18)$$

다음식을 수치적으로 구현하는데 있어 loop를 이용하는 등 여러 가지 방법이 있지만 효율적 구현을 위해 다음과 같이 행렬로 구현하기로 한다.

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{W}_N \tilde{\mathbf{x}} \quad (19)$$

$$\tilde{\mathbf{x}} = \frac{1}{N} \mathbf{W}_N^* \tilde{\mathbf{X}} \quad (20)$$

여기서 \mathbf{W}_N 은 다음과 같다.

$$\mathbf{W}_N = [W_N^{kn}, 0 \leq k, n \leq N-1] \quad (21)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N^1 & \dots & W_N^{(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W_N^{(N-1)} & \dots & W_N^{(N-1)^2} \end{bmatrix}$$

DFS와 DTFT의 관계는 다음을 따른다.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}(n) e^{-j\omega n} \quad (22)$$

다음식이 존재하며, 이는 $\tilde{x}(n)$ 의 DFS에서부터 다음을 얻는다.

$$\tilde{X}(k) = X(e^{j\omega}) \Big|_{\omega = \frac{2\pi}{N} k} \quad (23)$$

또한 다음을 가정한다.

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{N}, \quad \omega_k = \frac{2\pi}{N} k = k\omega_1 \quad (24)$$

$\text{DFS}[X(k)] = X(e^{j\omega_k}) = X(e^{j\omega_1 k})$ 이고, 이는 DFS가

$\omega_1 = \frac{2\pi}{N}$ 의 간격을 가지고 DTFT를 균일하게 표본화함으로써 얻어짐을 의미한다.

2.3 FFT(fast fourier transform)

N 점 수열 $x(n)$ 을 생각하자. 이 수열의 DFT는 다음과 같다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (25)$$

여기서 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ 이다. $X(k)$ 중에서 하나의 표본을 얻으려면, N 번의 복소수 곱셈과 $N-1$ 번의 복소수 덧셈이 필요하다. 따라서 모든 DFT계수의 집합을 얻기 위해 N^2 번의 복소수 곱셈과 $N(N-1) \approx N^2$ 의 복소수 덧셈이 필요하다. 이를 수식적으로 나타내면 N 점 Data에 필요한 DFT 계산의 수는 N^2 에 비례한다.

$$C_N = O(N^2) \quad (26)$$

이를 개선하기 위한 알고리즘은 자료표본마다 계산 수가 일정해야 하고 총계산의 수는 N 에 대해 선형적으로 증가해야 한다. 따라서 N^2 에 대한 의존성을 $\{W_N^k\}$ 의 주기성과 대칭성을 이용하여 줄이는 알고리즘을 이용하여 계산과정을 다음과 같이 줄인다.

$$C_N = O(N \log N) \quad (27)$$

이 알고리즘은 주기성만을 고려한 Goertzel 알고리즘을 보다 개선한 방법이며, 증명없이 사용하도록 한다.

3. 알고리즘 구현

3.1 Algorithm I - FFT Algorithm

우선 DaqBook을 이용하여 다음과 같이 block diagram을 구성하였다. 불규칙적인 입력 신호에 대해 시간영역 그래프와 자체 DasyLab을 이용한 FFT 분석 그래프가 결과로 도출된다.

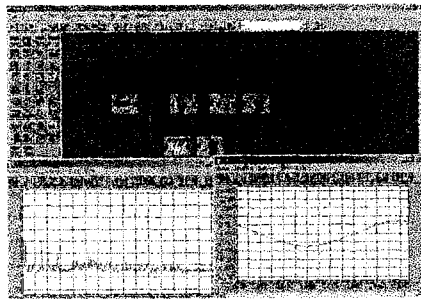


Fig1. System build using DaqBook/216 & DasyLab

입력된 신호의 시간영역에서의 파형은 다음과 같다.

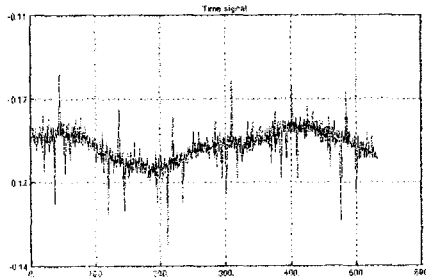


Fig2. Time wave of input signal with DaqBook

동일음향을 총 100회 측정하여 최초 침두값이 $\pm 0.2\%$ 내에 있는 데이터들을 10개씩 묶어 평균값을 낸후 그 평균치의 FFT 분석후 그래프를 다음과 같이 도시하였다.

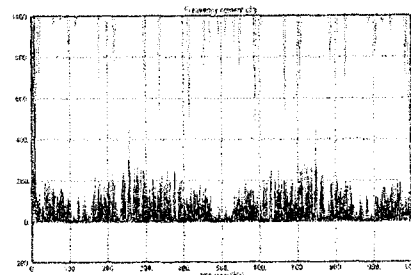


Fig3. Spectrum diagram with FFT about identical sound

3.2 Algorithm II - 비교 Algorithm

승용차용 후판에 프레스 가공하는 음향을 100회 측정하고, DasyLab S/W로 FFT분석하여 데이터를 하드 디스크에 저장하였다. 그리고 특정한 주파수 11개의 대역폭에 대한 FFT 변환값을 특징점으로 선택하였고, 표준편차 10%이내의 주파수 영역으로 조정하였다. 이들 특징점의 주파수와 같은 대한 평균값을 계산하였다. 이에 대한 결과를 아래표에 나타내었다. 그리고 이 값을 기준값으로 사용하였다.

Table1. Values of statistics analysis

	주파수	특징점의 평균값	표준편차
1	30 ~ 40	172.153	15.66186
2	70 ~ 80	144.92	16.32721
3	242.5 ~ 247.5	218.844	21.83659
4	252.5 ~ 257.5	372.257	10.86461
5	272.5 ~ 277.5	221.031	12.26477
6	370 ~ 380	218.154	22.258
7	620 ~ 630	224.175	21.17263
8	722.5 ~ 727.5	229.754	18.86481
9	742.5 ~ 747.5	385.5	16.90134
10	922.5 ~ 927.5	146.474	9.98938
11	960 ~ 970	176.071	22.75461

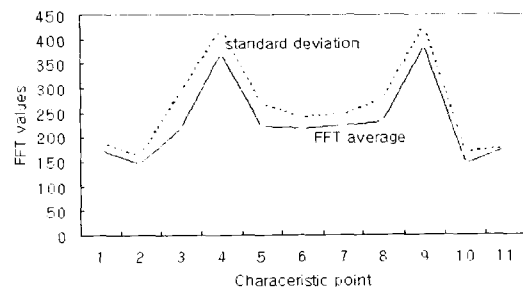


Fig4. FFT average & standard deviation

비교판단 알고리즘은 표준편차 $\pm 10\%$ 의 차이가 발생하는 음을 찾는 것을 주 목표로 하였다. 아직은 이에 대한 기준 또는 표준이 설정되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 시험신호를 100회 측정하고 매회 측정된 데이터를 기준값과 비교하고 기준치를 벗어나는지 안하는지를 컴퓨터가 스스로 인지하도록 프로그램을 개발하였다. 그리고 컴퓨터가 판단한 결과와 연구자가 직접 검토한 결과를 비교하여 프로그램의 신뢰도를 분석하였다. 이에 대한 결과를 표2에 나타내었다.

Table2. Researcher for each characteristic point and computer comparison for inferior-satisfactory

	평균범위	연구자의 비교결과		컴퓨터의 비교결과	
		양호판정	불량판정	양호판정	불량판정
1	154.9~189.4	74	26	73	27
2	130.5~159.3	77	23	77	23
3	197.4~240.4	52	48	50	50
4	335.1~409.5	86	14	81	19
5	198.9~243.1	65	35	62	38
6	196.3~239.9	70	30	66	34
7	201.7~246.5	67	33	60	40
8	296.8~252.6	66	34	65	35
9	347~424	84	16	83	17
10	131.8~161.1	58	42	61	39
11	158.4~193.6	76	24	73	27

4. 결론

판재의 프레스 가공시 발생하는 음향을 총 100회 측정하여 분석한 결과를 3에 기술하였다. 이상의 결과에서 흥미로운 사실을 알수 있다. 먼저 Table1. 과 Fig4.에 나타난대로 타구간보다 월등히 높은 FFT 변환값을 가지는 주파수에서의 표준편차는 상대적으로 낮으며 이점을 가지고 불량신호와 양호신호를 판정한 결과 양호판정이 비교적 용이함을 알 수 있다.

그리고 연구자와 컴퓨터가 각각 판단한 불량과 양호신호의 판단은 컴퓨터의 불량판정이 더욱 많음을 알수 있는데 이는 컴퓨터의 계산범위에 기인한 것으로 보이며, 더욱 정밀한 프로그램의 개발이 필요하다. 이상의 결과에 측정시스템과 분석시스템간의 상호통신속도를 더욱 높이면 프레스가공 불량판정의 실용성을 기대할 수 있을것이다.

5. 후기

본 논문은 동아대학교 신소형제 가공첨정공정기술 연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

6. 참고문헌

- [1] Dennis G. Zill, Michael R. Cullen, Advanced Engineering Mathematic, JONES ANDBARTLETT, 2001
- [2] Ricard S. Figliola Donald E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, WILEY, 1998
- [3] Peter V. O'Neil, Advanced Engineering Mathematics, PWS, 1995
- [4] Vinay K. Ingle John G. Proakis, Digital Signal Processing using MATLAB V4.0, PWS, 1995
- [5] Edward P. Cunningham, Digital Filtering, HOUGH ON MIFFLIN COMPANY, 1997
- [6] Steven W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1997