

크랭크축의 미세속도변화를 이용한 선박엔진의 착화불량 상태 감시

강호현¹ · 안중환¹ · 김화영^{1,+}

Monitoring of Misfiring Status of Ship Engines Using Minute Speed Changes in the Crankshaft

Ho Hyeon Kang¹, Jung Hwan Ahn¹, and Hwa Young Kim^{1,+}

Abstract

In this study an efficient method for detecting and monitoring engine misfiring, focusing on minute speed changes in the crankshaft is proposed. Its validity is verified using various misfiring cases. Typically, the crankshaft speed fluctuates around the normal value depending on the engine misfiring status. Even a minute speed change in the crankshaft can be estimated by measuring the rotation time of each tooth of the 118-tooth flywheel attached to the crankshaft with a 2-MHz timer. Therefore, a speed pattern for an in-line six-cylinder engine consists of 236 tooth rotation speeds corresponding to the two rotations of the crankshaft, in which all the cylinders complete four-stroke cycle. FFT analysis can reduce the number of components of a speed pattern from 236 to just four major components: – fundamental frequency (f), $2f$, $3f$, $6f$, – This makes the comparison of the misfiring cases simpler and faster. In the experiment, five engine status cases (one normal firing and, four misfiring cases) were simulated. While the $6f$ component was the largest for the normal case, the f component increased as misfiring occurred one, two apart, and two consecutive times. The 3D FFT pattern comprising the ratio of f , $2f$, and $3f$, $6f$ showed that the distance between the misfiring and normal states was larger.

Keywords: Misfiring, Monitoring, Speed change of crankshaft, Flywheel tooth, Ship engine, FFT(Fast Fourier Transform) Pattern

1. 서 론

복수개의 실린더로 구성되는 선박용 디젤 엔진은 선박 운항에 필요한 동력을 생산하는 핵심요소이다. 엔진을 장시간 지속적으로 가동하면 부품결함이나 노후화로 인해 일부 실린더에서 연소가 일어나지 않는 착화불량(Misfiring) 현상이 종종 발생하게 된다. 착화불량은 선박, 자동차, 발전설비 등에서 이용되는 내연기관 시스템의 성능을 저하시키는 주요 원인 중 하나이다. 착화불량이 발생하게 되면 불완전 연소에 따른 유해 배출물 증가로 인한 환경오염뿐만 아니라, 운전성능 저하 및 축 손상에 의한 운전 중단, 비정상적 진동 발생 등 치명적인 고장을 일으킬 수 있다. 또한 착화 주기 불균형은 실린더간 동기화 운동을

어렵게 하여 엔진의 안정적 구동성을 떨어뜨린다. 그 결과 엔진에 의한 과도한 선체진동이 일어나게 되면 승객의 안락성 저하, 승무원의 피로도 증가로 이어진다[1,2].

90년대 이후 엔진의 착화불량 상태를 직관적으로 알려주는 인자-실린더의 압력이나 온도[3], 배기가스 온도[4], 진동[5,6] 등에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 하지만 이러한 인자들은 응답속도와 진단 정확성 등에 한계를 보인다. 실린더의 압력이나 온도의 경우 연소 환경에 노출되는 센서의 수명과 비용 문제가 있고, 배기가스 온도는 반응속도가 느리고 실시간 감시가 어렵다. 또한 이들은 문제 발생 부위를 정확하게 파악하기 어렵다. 진동 신호를 이용하는 방법은 기관 본체의 가속도 신호를 패턴화하여 통계적 적용이 가능한 자동차용 내연기관에는 적용되고 있지만 정형화되지 않은 선박용 내연기관에는 부적합하다. 또한 크랭크축 각속도를 이용하는 방법도 많이 사용되나 진단하기까지 많은 계산을 필요로 하는 단점이 있다[7,8].

엔진 원격 모니터링 시스템에서 사용하는 엔진상태 데이터를 이용하는 방식은 현재 유용하게 사용되고 있지만 센서의 설치 및 유지 비용이 많이 들고, 장비의 상태가 어느 정도 악화된 후에야 이상발생을 감지할 수 있으며, 착화불량에 대한 응답속도가 느리다는 한계가 있다. 또한, 기술적 또는 비용적 측면에서

¹ 부산대학교 기계공학부(Mechanical Engineering, Pusan National University) M buliding 117, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro, 63 boen-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

⁺Corresponding author: hyokim@pusan.ac.kr

(Received: Nov. 18, 2021, Accepted: Jan. 27, 2022)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

온라인 모니터링이 어려운 상태 값이 존재하고, 순간적으로 발생하였다가 사라지는 이상 징후나 점진적으로 상황이 악화되는 이상 상태는 감지하기 어려운 측면이 있다[9].

본 연구에서는 기존의 한계를 극복할 수 있는 방법으로 크랭크축의 미세한 회전속도 변동을 인식하여 착화불량을 감시하는 방법을 제안하였다. 크랭크축에 직결된 플라이휠(flywheel) 원주에는 3.05도 간격으로 118개의 톱니(tooth)이 새겨져 있어 톱니 간격의 이동시간을 측정하면 크랭크축의 미세한 회전속도 변화를 인식할 수 있기 때문에 6기통 엔진에서 어떤 형태의 착화불량이 생기는지 인식할 수 있다. 플라이휠 속도패턴을 FFT 분석을 통해 구한 FFT 패턴을 이용하면 감시 알고리즘을 더욱 단순화시킬 수 있어 사용의 편리성을 높일 수 있다.

2. 6기통 디젤엔진의 구조와 작동원리

Table 1은 본 연구에서 사용한 엔진의 주요 제원을 나타내고, 엔진의 대략적인 구조는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1은 엔진이 6개인 직렬 6기통 디젤엔진의 구조를 보는데, 각 엔진의 피스톤이 흡입, 압축, 폭발, 배기의 4행정 사이클을 반복하면서 피스톤 (1,6), (2,5), (3,4)이 짝으로 같은 위치에 있게 된다. 각 엔진에 흡입된 연료가 폭발한 힘으로 피스톤이 직선 왕복운동을 하면 크랭크 축의 회전운동으로 변환되어 동력

Table 1. Specification of test engines.

item	specification
Engine Model	Cummins QSM11-G2
Type	6 Cylinder, In-line, 4 Stroke
Bore&Stroke	125 mm × 147 mm
Fuel System	PT Pump Direct Injection
Piston Speed	8.8 m/s
Firing Order	1-5-3-6-2-4
Compression Ratio	16.3:1
Engine speed	800RPM



Fig. 1. Structure of In-line 6 piston engine.

Firing Order : 1-5-3-6-2-4

Crank angle Piston	first rotation						second rotation					
	60°	120°	180°	240°	300°	360°	420°	480°	540°	600°	660°	720°
1	combustion		exhaust		intake		compression		exhaust		combustion	
2	exhaust		intake		compression		combustion		exhaust		combustion	
3	intake		compression		combustion		exhaust		intake		compression	
4	combustion		exhaust		intake		compression		combustion		exhaust	
5	compression		combustion		exhaust		intake		compression		combustion	
6	intake		compression		combustion		exhaust		intake		compression	

Fig. 2. 4-stroke sequence of 6 pistons.

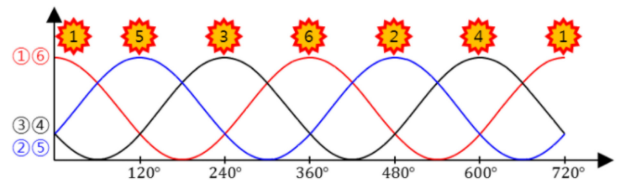


Fig. 3. Explosion sequence of each piston pair.

이 전달된다. 각 피스톤의 1사이클 동작순서를 정리하면 Fig. 2와 같고, 1사이클동안 크랭크 축은 2번 회전한다. 따라서 일정한 회전 출력을 얻기 위해서 120도 마다 1번 폭발해야 하므로 직렬 6기통 엔진에서 피스톤은 크랭크 축에 120도 간격으로 배치되어 있다.

Fig. 3은 피스톤 (1, 6), (2,5), (3,4)가 짝으로 같은 위상으로 움직이고, 120도 마다 한 번씩 폭발하는 과정을 보이고 있다. 피스톤 폭발순서(Firing Order)는 1-5-3-6-2-4 이다.

3. 크랭크축의 회전속도 측정 시스템

3.1 플라이 휠의 회전속도 변동

플라이휠은 크랭크 축의 한쪽 축에 연결된 큰 원판형의 기계적 장치로 회전 에너지를 일시적으로 저장하며, 축적된 회전 에너지(관성 모멘트)를 이용하여 폭발 외 에너지가 발생되지 않는 행정에서도 피스톤을 원활하게 움직이도록 도와 크랭크 축의 회전 불균형과 회전 진동을 억제하는 역할을 한다.

각 엔진의 폭발이 정상적으로 이루어지지 않으면 회전력이 제대로 전달되지 않아서 해당 위치의 회전속도에 미세한 변동이 생길 것으로 예상된다. 이 미세한 속도 변동은 플라이휠의 원주에 가공되어 있는 톱니(tooth)의 회전속도를 정밀하게 측정하면 알 수 있다.

플라이 휠에는 원주상에 톱니가 118개 파여 있어 톱니간격은 약3.05도이고, 각 톱니간격의 이동시간을 측정하면 각 위치에서 속도변화를 알 수 있다. Fig. 4는 이를 실현하기 위한 측정장치

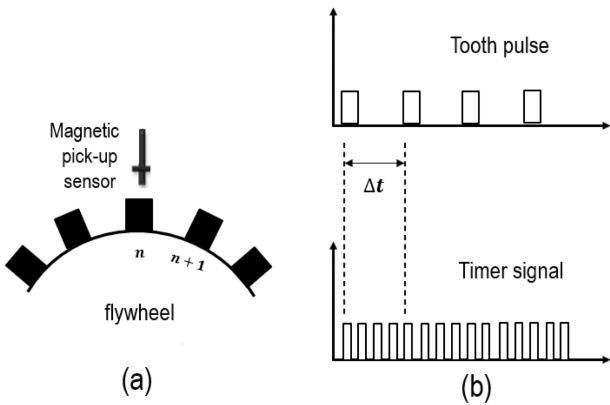


Fig. 4. Measuring flywheel tooth rotation time. (a) magnetic pick-up sensor and flywheel tooth (b) tooth interval and timer signal.

와 신호처리 과정을 보여준다[10]. 근접형 자기센서를 플라이휠 원주 근처에 설치하여 회전하는 n, n+1 번째 톱니가 검출되면 Fig. 4(b)의 펄스신호가 출력된다. 이 펄스 사이가 톱니의 이동 시간(Δt)이고, 이것을 정밀하게 측정하기 위해 2M Hz의 고속 타이머를 사용하였다. 톱니의 이동시간은 식(1)과 같고, 식(2)와 같이 톱니의 개수($N_t = 118 \text{ rpm}$)를 이용하여 플라이휠 속도 (N)를 구할 수 있다.

$$\Delta t = t_{n+1} - t_n \quad (1)$$

$$N = \frac{60}{\Delta t \times N_t} (\text{rpm}) \quad (2)$$

3.2 플라이휠 회전속도 측정 시스템

크랭크 축 2회전당 측정 데이터를 취하기 위해 Fig. 5 처럼 엔코더를 설치하여 Z상 신호를 1회전의 기준점으로 사용하고, 1번 엔진의 연료노즐 구동용 Push rod 위치를 자기센서로 검출하여 6개 엔진동작의 기준점으로 하였다.

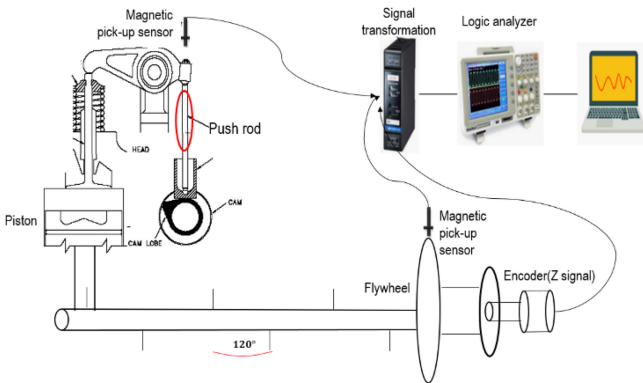


Fig. 5. Flywheel speed measurement system.

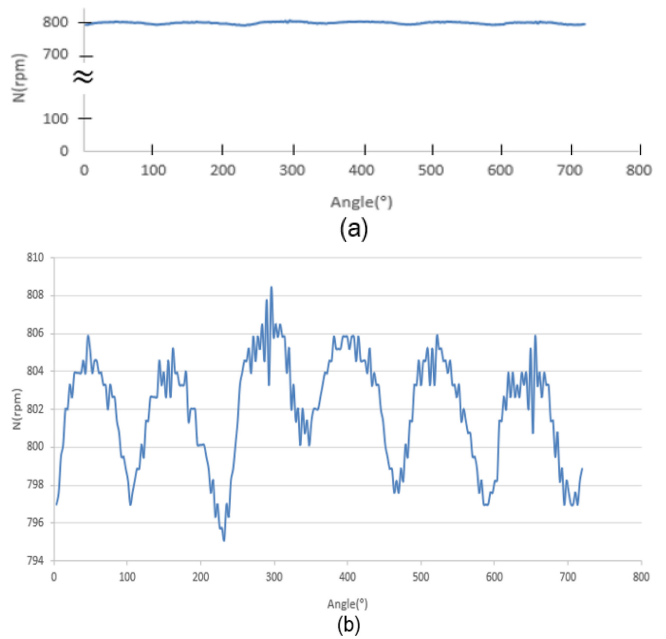


Fig. 6. Variations of flywheel speed in normal state. (a) without enlargement for two rotation, (b) enlarged for two rotation.

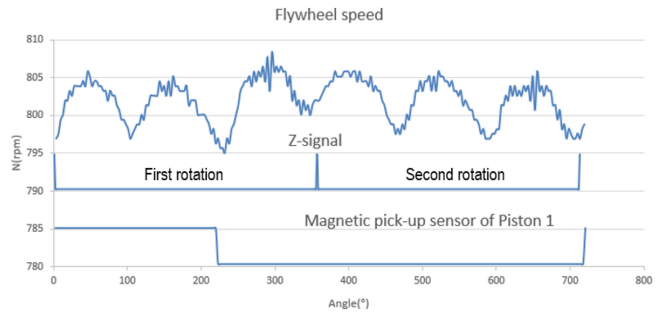


Fig. 7. A set of measured flywheel speed triggered by Z phase during two rotations of crank shaft.

Fig. 6(a)는 위의 과정을 거쳐 얻은 정상상태에서의 플라이휠 속도를 나타낸다. 전체를 보면 속도변동이 거의 보이지 않지만 이를 확대하면 Fig. 6(b) 처럼 720도 동안 6개의 봉우리(Peak)를 가지는 사인파형의 변동을 볼 수 있다. 각 봉우리는 피스톤 1-5-3-6-2-4의 각 폭발에 의한 최대속도에 해당한다.

Fig. 7은 크랭크 축 2회전당 플라이휠 회전속도, 2회의 Z상, 1회의 1번 자기센서 신호의 위상을 보여준다.

4. 동작상태에 따른 속도패턴 분석

4.1 정상상태 속도패턴

Fig. 8은 6개 엔진이 정상적으로 동작했을 때 플라이휠의 속도변동을 나타낸다. 800 RPM으로 회전하는 플라이휠의 1회전당 시간은 0.075 초이고, 2회전당 시간은 0.15초이다.

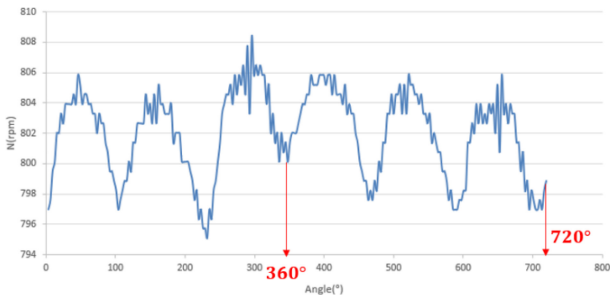


Fig. 8. Variations of flywheel speed under normal state.

4.2 착화불량(misfiring) 속도패턴

착화불량 상태를 모사하기 위해 Fig. 5에서 Push rod를 제거하여 엔진에 연료분사를 못하게 함으로써 착화를 막았다.

Fig. 9는 6번 실린더가 착화불량(빨간색)일 때 정상신호(파란색)와 비교한 것이고 6번 실린더의 착화불량 일 때를 case 1으로 한다. 착화순서(Firing Order)에 따라 6번 피스톤의 속도가 낮아졌다가 다시 속도가 점점 돌아오는 것을 보면 6번 피스톤에 착화 불량이 생겼다는 것을 알 수 있다.

같은 방법으로 2개 실린더가 하나 건너서 착화불량(cross misfiring)인 경우 즉, 5,6번 실린더와 6,4번 실린더를 각각 착화불량으로 했을 때를 각각 case 2, case 3으로 하고 속도패턴 비교는 각각 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 그리고 2개 실린더가 연달아 착화불량(continuous misfiring)인 경우 즉, 6,2번 실린더를 착화불량으로 했을 때를 case 4로 하고 속도패턴 비교는 Fig. 12와 같다.

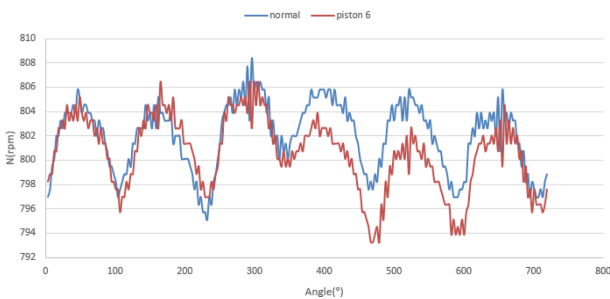


Fig. 9. Comparison of misfiring at piston 6(case 1) and normal

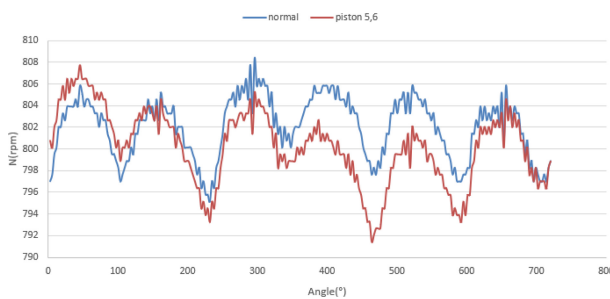


Fig. 10. Comparison of misfiring at piston 5 and 6(case 2) and normal

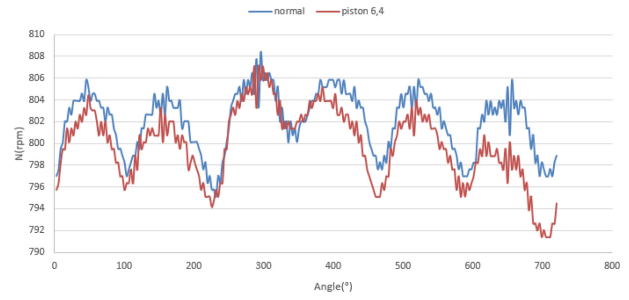


Fig. 11. Comparison of misfiring at piston 6 and 4(case 3) and normal

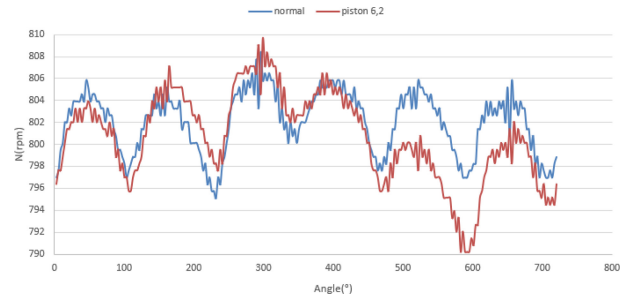


Fig. 12. Comparison of consecutive misfiring at piston 6 and 2(case 4) and normal

4.3 FFT 패턴

정상상태의 속도패턴을 FFT 분석하면 Fig. 13과 같다. 첫번째 성분은 6개 봉우리를 포함하는 주기(기본 주파수 $f=6.69$ Hz) 성분이고, 두번째 성분은 기본주파수의 2배수, 즉 봉우리 3개씩 주기에 해당하고, 6배수 각 봉우리의 주기에 해당한다. 앞에서 실험한 착화불량 속도패턴을 FFT 분석하면 각각 Fig. 14-Fig. 15와 같다. 여기서 1,2,3,6배수 주파수 성분의 진폭으로 FFT 패턴을 나타내면 Table 2와 같다.

정상상태에서 6배수 성분이 가장 크지만, 착화불량이 많을수

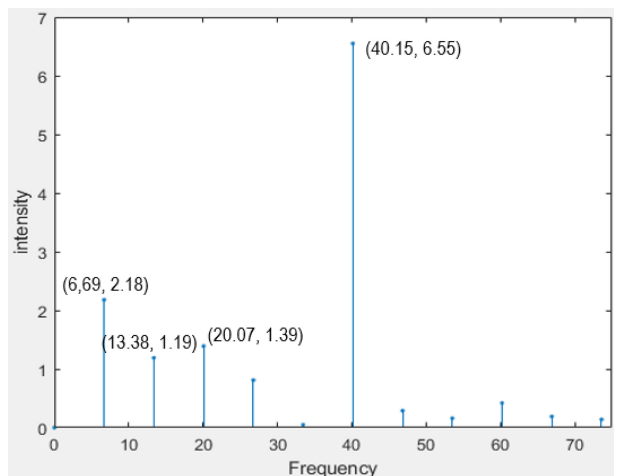


Fig. 13. FFT result for normal firing.

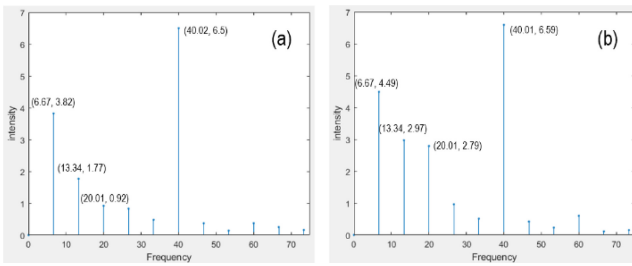


Fig. 14. FFT results for (a) case 1. (b) case 2.

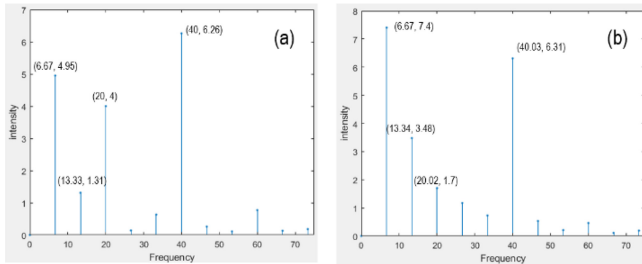


Fig. 15. FFT results for (a) case 3. (b) case 4.

Table 2. 4 major spectral intensity for normal/misfiring cases.

	1f	2f	3f	6f
Normal	2.19	1.20	1.40	6.55
Case 1	3.82	1.77	0.92	6.50
Case 2	4.49	2.97	2.79	6.59
Case 3	4.95	1.31	4.00	6.30
Case 4	7.40	3.48	1.70	6.31

록, 또 연달아 생길수록 6배수 성분과 1배수 성분의 크기 격차가 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 속도패턴으로 유추할 수 있는데, 6기통 엔진이기 때문에 실린더 6개씩 폭발이 이루어지는 특성상 6배수가 가장 지배적일 수 밖에 없지만 착화불량이 일어나면서 6배수 영향이 작아지고, 연속해서 2개의 착화불량이 생겼을 때, 1배수 성분이 6배수 성분의 진폭을 뛰어넘는 것을 알 수 있다

5. 동작상태 판단을 위한 알고리즘

5.1 정규화 FFT 패턴

크랭크 축의 속도패턴으로 엔진의 실린더별 착화상태를 정상인지 비정상인지 유추할 수 있지만 비교할 데이터가 너무 많고 환경잡음으로 패턴형상이 왜곡될 수 있는 문제점이 있다. 반면에 FFT 패턴은 4개 주파수 성분만 가지고 판단할 수 있고 잡음 성분은 무시할 수 있어 훨씬 간편하고 신뢰성이 높다. 단지 신호의 크기에 따른 영향을 줄이기 위해 식(3)처럼 6배수 성분을

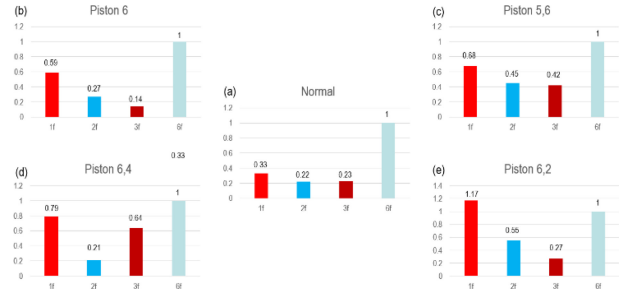


Fig. 16. Normalized FFT patterns: (a) Normal firing. (b) case 1 (c) case 2 (d) case 3 (e) case 4.

기준으로 나머지 3개 성분을 정규화 시켜 FFT 패턴을 만들었다. Fig. 16은 앞에서 실험한 5개 경우에 대해 정규화한 FFT 패턴을 나타낸다.

$$d_n = \left[\frac{S_n}{S_6} \right], n = [1, 2, 3, 6], S = intensity \quad (3)$$

5.2 3차원 벡터 패턴

정규화 FFT 패턴에서 case 1을 예로 들면, 6배수 성분을 제외하고 나머지 3개의 성분으로 벡터 패턴을 만들면 식(4)에 의해 $V_{nor} = [0.33 \ 0.22 \ 0.23]$ 으로 나타낼 수 있다.

$$V = [d_1 \ d_2 \ d_3] = \left[\frac{S_1}{S_6} \ \frac{S_2}{S_6} \ \frac{S_3}{S_6} \right] \quad (4)$$

그리고 데이터들의 오차를 줄이기 위해 위와 같은 과정들을 5번 반복하여 5회 평균값을 구한다. Table 3은 착화정상, 착화불량 경우의 평균값을 나타낸다.

5.3 벡터패턴의 거리에 따른 착화상태 판단

벡터패턴을 3차원 공간상에 표시하면 Fig. 17 처럼 된다. 착화정상에서 다른 상태점까지 거리를 식(5)에 의해 구하면 Table 4와 같이 구해진다.

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5)$$

Table 4와 Fig. 17을 보면 정상상태를 기준으로 착화불량이 많

Table 3. Average FFT vector of normal/misfiring cases.

Case	Average vector(V_{avr})
Normal	[0.332 0.252 0.238]
Case 1	[0.562 0.294 0.13]
Case 2	[0.648 0.456 0.408]
Case 3	[0.766 0.17 0.614]
Case 4	[1.17 0.55 0.27]

Table 4. Distance between normal firing and each misfiring case.

Case	distance
Case 1	0.2
Case 2	0.37
Case 3	0.54
Case 4	0.92

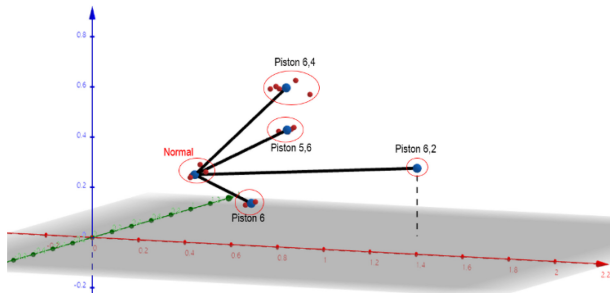


Fig. 17. Vectors and distance values in a 3-D space.

아질수록, 연속될수록 거리가 점점 더 멀어진다는 특징을 확인할 수 있다. 반면에 각 상태에서 5회 반복한 벡터점들은 각 상태의 평균점 근처에 분포하고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 시간에 따라 변동하는 선박 엔진의 각 실린더 연소상태를 실시간으로 데이터를 받아 기존 연구의 한계점을 보완하고 비교적 연산과정이 간단한 방법으로 파악하고자 크랭크 축의 미세한 회전속도 변동을 인식하여 착화불량을 감시하는 방법을 제안하였다. 이 방법을 이용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플라이휠 속도패턴을 비교함으로써 몇 번 실린더에 착화불량이 생겼는지 판단할 수 있었다.
- 2) 플라이휠 속도패턴을 FFT 분석한 결과 정상상태에서는 6 배수 성분이 지배적이며 착화실패가 일어날수록 1배수 성분이 지배적이고, 착화불량이 심해질수록 1배수 성분이 지배적으로 바뀌었다.
- 3) 3차원 정규화 FFT 패턴을 공간상에 표시하면 착화불량 상태가 진행될수록 정상상태에서 거리가 더 멀어졌다.

감사의 글

본 연구는 금오기전(주) 주관기관 광역협력권산업육성사업(지역주도형 R&D)의 지원으로 수행한 연구이다(과제번호:P063500009).

REFERENCES

- [1] M. J. Jung, T. O. Kim, J. H. Ahn, and H. Y. Kim, "Development of Vibration Compensator for Vertical Vibration Damping of Ships", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 29, No. 3, pp. 205-210, 2020.
- [2] Y. C. Bae, H. S. Kim, W. R. Lee, D. Y. Lee, and B. S. Kim, "Vibration Analysis and Reduction for Large-scale Diesel Engines", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 10, pp. 1047-1052, 2011.
- [3] J. D. Powell, "Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future", *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, Vol. 115, No. 2B, pp. 343-350, 1993.
- [4] M. Tamura, H. Saito, Y. Murata, K. Kokubu, and S. Morimoto, "Misfire Detection on Internal Combustion Engines using Exhaust Gas Temperature with Low Sampling Rate", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 31, No. 17-18, pp. 4125-4131, 2011.
- [5] A. Sharma, V. Sugumaran, and Devasenapati, S. B., "Misfire Detection in an IC Engine using Vibration Signal and Decision Tree Algorithms", *Measurement*, Vol. 50, pp. 370-380, 2014.
- [6] D. C. Lee, K. S. Joo, T. K. Nam, E. S. Kim, and S. H. Kim, "Development of Engine Vibration Analysis and Monitoring System(EVAMOS) for Marine Vessels", *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 19, No. 2, pp. 155-161, 2009.
- [7] J. G. Park, and W. B. Jeong, "Misfiring Cylinder Detection for Reciprocating Internal Combustion Engine Using Torsional Vibration Signal", *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng.*, Vol. 31, No. 2, pp. 161-169, 2021.
- [8] J. H. Sung, D. S. Kim, J. H. Park, T. Y. Lee, E. G. Kim, J. H. Lim, H. J. Yun, Y. K. Jung, J. H. Lee, J. S. Park, C. H. Kim, J. H. Park, Y. H. Kim, and K. H. Han, "A study on the misfire detection method using the tooth time fluctuation of engine crankshaft", *Trans. Korean Soc. Auto. Eng.*, Vol. 1, No. 8, pp. 47-51, 2004.
- [9] B. Y. Lee, S. J. Ha, and O. T. Lim, "Methodology of Engine Fitness Diagnosis Using Variation of Crankshaft Angular Speed", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1529-1535, 2011.
- [10] S. H. Gawande, L. G. Navale, M. R. Nandgaonkar, D. S. Butala, and S. Kunamalla, "Identification and Analysis of Engine Speed and Noise in In-line Diesel Engine", *JMIE*, Vol. 6, No. 1, pp. 71-74, 2012.