



[2020-3-WD-003]

풍력발전기 상태 감시를 위한 SaaS 클라우드 인프라 내 데이터 처리 알고리즘 개선 연구

이광세¹⁾ · 최정철^{1)*} · 강민상³⁾ · 박사일²⁾ · 이진재³⁾

Study on Enhancement of Data Processing Algorithm in SaaS Cloud Infrastructure to Monitor Wind Turbine Condition

Gwang-Se Lee¹⁾ · Jungchul Choi^{1)*} · Minsang Kang³⁾ · Sail Park²⁾ · JinJae Lee³⁾

Received 17 October 2019 Revised 21 January 2020 Accepted 21 January 2020

ABSTRACT In this study, an SW for the analysis of the wind-turbine vibration characteristics was developed as an application of SaaS cloud infrastructure. A measurement system for power-performance, mechanical load, and gearbox vibration as type-test class was installed at a target MW-class wind turbine, and structural meta and raw data were then acquired into the cloud. Data processing algorithms were developed to provide cloud data to the SW. To operate the SW continuously, raw data was downloaded consistently based on the algorithms. During the SW test, an intermittent long time-delay occurred due to the communication load associated with frequent access to the cloud. To solve this, a compression service for the target raw data was developed in the cloud and more stable data processing was confirmed. Using the compression service, stable big data processing of wind turbines, including gearbox vibration analysis, is expected.

Key words Wind turbine(풍력터빈), SaaS cloud(SaaS 클라우드), Big data processing(빅데이터 처리), Condition monitoring(상태감시)

Nomenclature

SaaS : software as a service
SCADA : supervisory control and data acquisition
WAN : wide-area network

1. 서론

풍력터빈의 상태에 관한 데이터를 연속적으로 또는 이벤트에 따라 취득하고 분석하는 기술은 풍력터빈을 효율적으로 운영 및 유지보수(이하 O&M) 하기 위해 필수적이다^[1,2]. 풍력터빈의 상태는 SCADA를 통해 확보 할 수도 있지만, 경우에 따라 추가적으로 센서를 설치하여 데이터를 취득 할 수 있다. 현장에서 센서를 설치하여 상태를 분석 할 경우, 신호 노이즈 저감 및 접지를 고려하여 측정 시스템을 설치해야하며, 가혹한 진동/습도/온도 조건에서의 시스템 생존 방안을 모색해야 한다. 마지막으로 원격에서 장

1) Senior Researcher, Korea Institute of Energy Research

2) Researcher, Korea Institute of Energy Research

3) Engineer, Korea Institute of Energy Research

*Corresponding author: jungchul.choi@kier.re.kr

Tel: +82-64-800-2227

Fax: +82-64-805-2203

기간 취득한 데이터를 효율적으로 관리하기 위한 방법론이 준비 되어야 한다.

일반적으로 풍력터빈 상태는 공학적 방법론을 통해 분석^[3]하나 최근 빅데이터 분석을 이용한 방법론이 논의되고 있는데, 이 때 또한 장기간 풍력터빈의 상태를 취득하고 효율적으로 관리하기 위한 인프라 개발이 요구된다^[4,5].

풍력발전기 운영 및 유지보수 기술을 개발하기 위해, 빅데이터 처리 목적의 SaaS 클라우드가 응용 가능하며, 이를 풍력터빈 측정시스템과 연계 할 수 있다^[6].

일반적으로 누적 된 온라인 상 데이터에 대한 처리 방법론은 데이터 찾기/다운로드/정렬/분석/보고의 절차를 가지고, 서버와 클라이언트가 WAN를 통해 연결되어 네트워크 상 데이터를 처리한다. 빅데이터를 처리 시 원격 서버와 클라이언트가 모든 데이터를 WAN 통신 환경에서 처리한다면, 네트워크 상 데이터 처리 시간이 증가하여 분석을 위한 비용이 증가 될 것이다.

이에, SaaS 클라우드 내 데이터 관리와 연산 컴퓨팅 환경을 조성하고 고속의 통신 장비로 연결한다면, 대량의 데이터 네트워크가 필요한 연산은 SaaS 클라우드 내 수행한 후 결과만을 클라이언트에 전송하여 데이터 통신에 따른 풍력터빈 상태 분석 시간을 줄 일 수 있다.

본 연구에서는 빅데이터 정렬 코드를 SaaS 클라우드 내 서비스화하고, 이를 바탕으로 클라이언트에서 풍력터빈 진동 특성을 분석하는 소프트웨어를 개발하였다. 해당 소프트웨어를 운영하는 SaaS 클라우드는 MW 급 풍력터빈의 출력성능/기계하중/중속기진동 측정시스템과 연동되었다. SaaS 클라우드를 이용한 빅데이터 정렬 서비스의 활용 여부에 따른 데이터 처리 소요 시간을 분석하여 클라우드 서비스의 성능 개선 지표로서 분석하였다. 이 때, 데이터 처리 소요시간 개선을 위해 전송 데이터 압축 알고리즘을 개발하여 그 성능을 확인하였다.

2. SaaS 클라우드 구성

SaaS 클라우드는 다중 레이어 시스템으로 구성된 DB로부터 메타데이터와 원데이터를 분리하여 관리한다. 메타데이터는 MongoDB 서버에서 관리하며, 원데이터는 FTP 서버를 통해 관리한다.

본 연구에서 MW 급 풍력터빈에 출력성능/기계하중/중속기진동 측정시스템을 설치하고 이를 SaaS 클라우드에 연계하였다. 총 36 채널의 데이터를 동기화하여 취득하며,

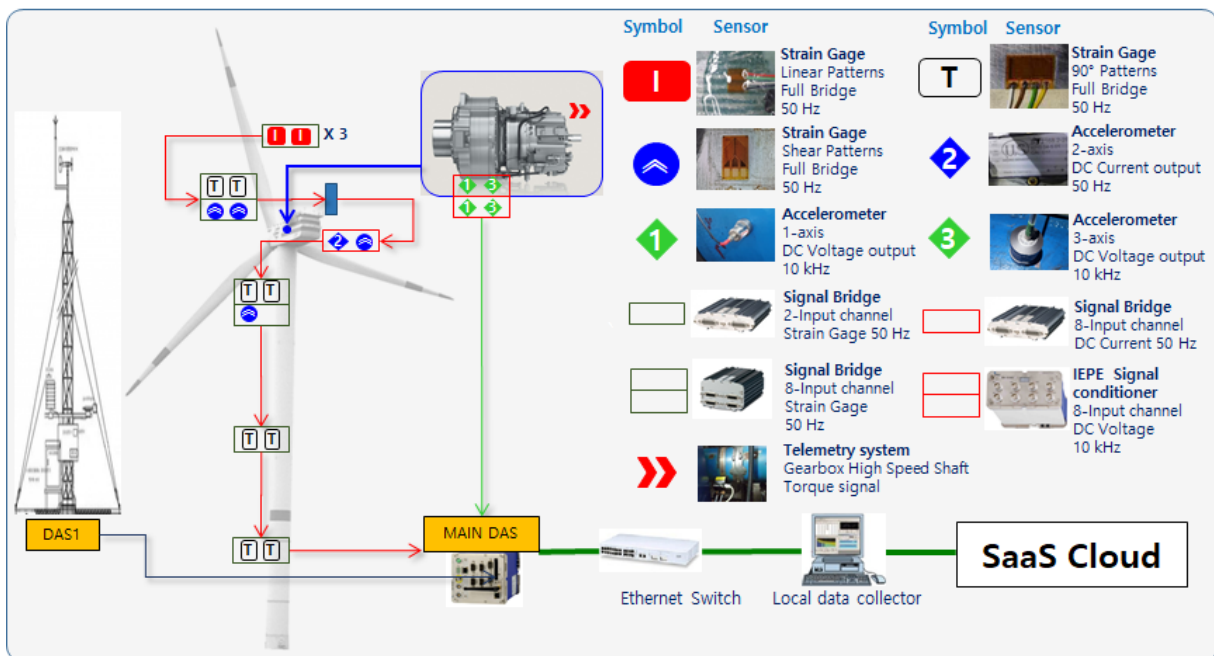


Fig. 1. Measurement system for MW-class wind turbine in power performance, mechanical load and gearbox vibration tests

Table 1. Channel list in measurement system

#	Loc.	Description	Fs	Unit
1	Blade1	Blade 1 middle edgewise bending moment	50 Hz	kNm
2		Blade 1 root edgewise bending moment		kNm
3		Blade 1 middle flapwise bending moment		kNm
4		Blade 1 root flapwise bending moment		kNm
5	Blade2	Blade 2 middle edgewise bending moment	50 Hz	kNm
6		Blade 2 root edgewise bending moment		kNm
7		Blade 2 middle flapwise bending moment		kNm
8		Blade 2 root flapwise bending moment		kNm
9	Blade3	Blade 3 middle edgewise bending moment	50 Hz	kNm
10		Blade 3 root edgewise bending moment		kNm
11		Blade 3 middle flapwise bending moment		kNm
12		Blade 3 root flapwise bending moment		kNm
13	Tower	Tower top North-South bending moment	50 Hz	kNm
14		Tower top East-West bending moment		kNm
15		Tower middle North-South bending moment		kNm
16		Tower middle East-West bending moment		kNm
17		Tower base North-South bending moment		kNm
18		Tower base East-West bending moment		kNm
19	Controller	Tower top torsional moment	50 Hz	kNm
20		Wind speed measured by nacelle anemometer		m/s
21		Wind direction measured by nacelle wind vane		deg
22		power		kW
23		rotor speed		RPM
24		generator speed		RPM
25		pitch angle of blade1 (collective pitch)		deg
26	Met. Mast	yaw angle (= nacelle direction)	5 kHz	deg
27		rotor azimuth angle		deg
28		Wind speed		m/s
29		Wind direction		deg
30	Gearbox	Air temperature	5 kHz	°C
31		Planetary gear vertical vibration		m/s ²
32		Housing axial vibration		m/s ²
33		Housing lateral vibration		m/s ²
34	Generator	Housing vertical vibration	5 kHz	m/s ²
35		Drive-End lateral vibration		m/s ²
36		Non Drive-End lateral vibration		m/s ²

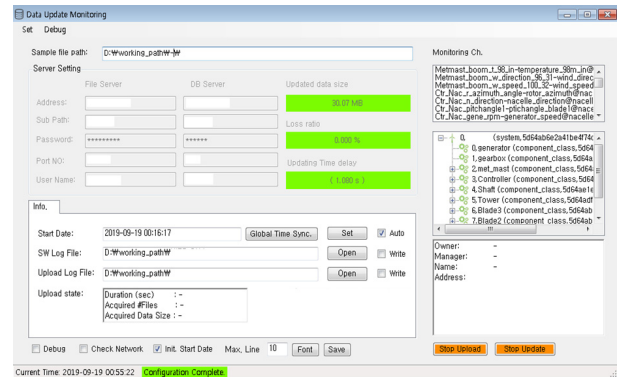


Fig. 2. Structured data uploader

각 채널의 설정은 Table 1과 같다. 이와 같이 측정 시스템 구성을 정의하기 위해, Fig. 2와 같이 SaaS 클라우드 인프라로 데이터를 업로드하는 소프트웨어를 c# 코드 기반의 개발하였다. 해당 SW는 측정데이터에 관한 메타데이터 및 원데이터를 구조에 맞게 SaaS 클라우드로 업로드하기 위해 데이터 구조화 모듈, 원데이터 변환 모듈, 로컬 파일과 DB 연계 모듈, 데이터 업로드 모듈을 포함한다. 측정시스템의 내 시그널 컨디셔닝을 위해 imc DAQ를 이용하였다.

3. SaaS 클라우드 기반 진동 분석 서비스

3.1 진동 특성 분석 방안

진동 분석은 ISO 10816-21에 따라 수행하였고, 이 때, 주파수 별 증속기 진동 RMS에 따라 MW 풍력터빈의 상태를 추정 하였다. 우선 ISO 10816-21는 다음과 같이, 각 주파수 별 진동 수치 RMS를 정의한다^[7].

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} a_w^2(t) dt} \quad (1)$$

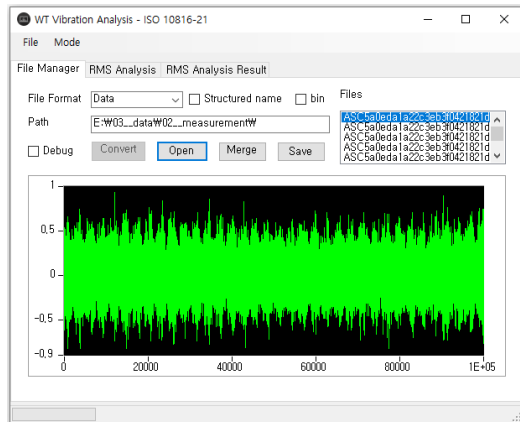
여기서, $a_w(t)$ 는 특정 주파수 영역에서 측정 된 가속도 또는 속도이며, ISO 10816-21은 각 주파수 별 가속도와 속도 RMS에 따른 상태 추정을 따로 정의한다. 0.1 Hz에서 10 Hz 까지의 주파수 구간과 10 Hz에서 2 kHz 구간으로 나뉘어 가속도 RMS가 계산되며, 10 Hz에서 1 kHz 주파수 구간에서는 속도 RMS가 계산된다. 0.1 Hz에서 10 Hz 까

지의 진동은 10분 이상 측정된 데이터를 바탕으로 처리하며, 10 Hz에서 1 kHz 이상 구간의 진동에 대해서 1분 이상 측정된 데이터를 이용하여 분석한다.

각 계산된 가속도와 속도 RMS는 그 결과를 통계적 수치표와 비교하여 증속기 상태를 추정하기 위해 응용 된다.

Table 2. Estimation table for wind turbine condition according to RMS calculation in ISO 10816-21

Acceleration frequency range	Acceleration (m/s^2)		
	Zone B	Zone C	Zone D
$\leq 0.1 \sim 10$ Hz	$0.3 \leq$	—	≤ 0.5
$10 \sim 2$ kHz	$7.5 \leq$	—	≤ 12.0
Velocity frequency range	Velocity (mm/s)		
	Zone B	Zone C	Zone D
$10 \sim 1$ kHz	$3.5 \leq$	—	≤ 5.6

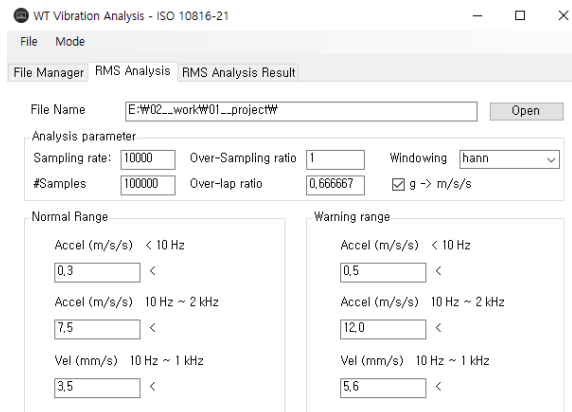


(a) Continuous data acquisition and integration

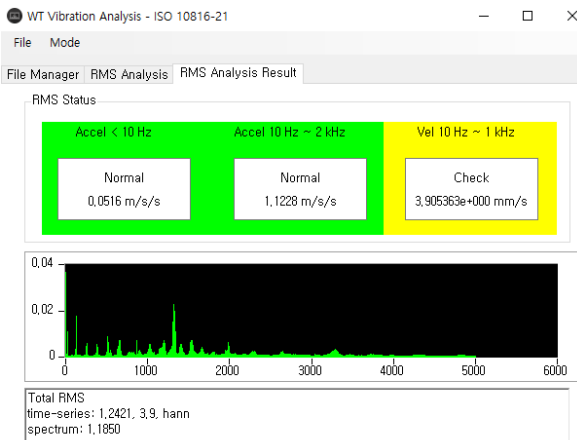
Table 2는 주파수별 진동 RMS에 따른 3 MW 이하 풍력터빈의 진동 상태를 추정하는 표이다.

이에, 식 (1)을 통해, 주어진 기간에서 진동 RMS를 계산하고, 이 후 Table 2를 바탕으로 Fig. 3과 같이 증속기 진동 상태를 추정하는 소프트웨어를 개발하였다. 즉, 현장의 측정 시스템으로부터 SaaS 클라우드로 데이터가 구조적으로 업로드 되었고, 그 데이터를 이용하여 원격에서 Fig. 3과 같이 진동 상태를 ISO 10816-21에 기반 하여 분석할 수 있는 데이터 처리 구조를 완성하였다.

해당 서비스의 성능은 클라우드로 부터 정렬 된 데이터를 확보하는 시간과 연관한다. 이에 다음 절에서, 정렬된 데이터를 확보하는 알고리즘에 따라 소요되는 시간을 클라우드 데이터 처리 성능으로서 분석하였다.



(b) Setting analysis parameter based on ISO 10816-21



(c) Vibration status analysis on single location

Accel < 10 Hz [m/s^2]	Accel 10 Hz ~ 2 kHz [m/s^2]	Vel 10 Hz ~ 1 kHz [mm/s]
0.0728	1.4394	3.5189
0.0462	0.9831	3.4682
0.0421	0.4930	3.3129
0.0698	0.3720	2.2995
0.0418	0.7788	2.1772
0.0257	0.5034	2.9843

(d) Vibration status analysis on multi locations

Fig. 3. Gearbox status evaluation based on ISO 10816-21

3.2 클라우드 서비스 성능

클라우드 내 데이터를 이용하여 3.1절의 결과를 도출하기 위해, 우선 Fig. 4와 같은 절차로 데이터를 처리 및 연산하였다. ‘Case A’는 2에서 4 단계까지의 데이터 처리를 클라우드에서 수행한 경우이며, LAN 또는 WAN 네트워크 상 클라이언트로 데이터를 처리하는 경우를 ‘Case B’와 ‘Case C’로 각각 명명하였다.

본 연구에서 구축된 측정된 시스템은 10 초마다 데이터를 취득하고 해당 데이터를 클라우드로 전송한다. 이에, ISO 10816-21에 따른 풍력터빈 진동 상태 추정을 위해서는, 최소 6 주기의 데이터를 연속적으로 취득 및 통합 후 진동을 분석해야 한다. 센서 별 단위 측정 주기의 원데이터를 개별 다운로드 하고 해석을 위해 정렬하는 과정이 Fig. 4 2)와 3)에 해당한다.

Fig. 5는 각 데이터 처리 방법론에 따른 무차원 데이터

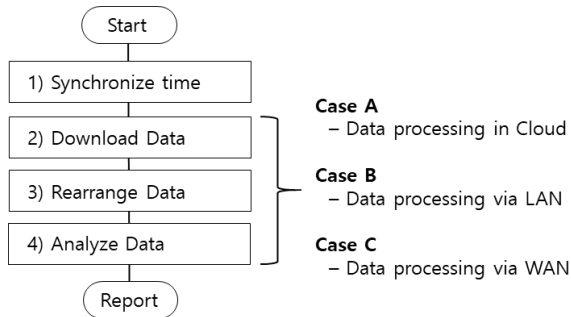


Fig. 4. Algorithms for data processing to analyze wind turbine conditions in SaaS cloud

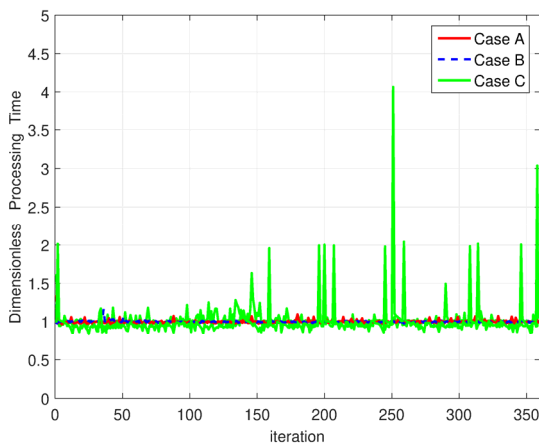


Fig. 5. Dimensionless processing time for each analysis iteration

처리 소요 시간($\tilde{t}_i$)을 나타낸다. 이는, 반복되는 각 데이터 분석마다 소요되는 시간(t_i)을 전 주기 동안 수행되는 데이터 분석 소요 시간의 평균(t_{avg})으로 정규화한 수치를 의미한다.

$$\tilde{t}_i = \frac{t_i}{t_{avg}} \quad (2)$$

단,

$$t_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i \quad (3)$$

총 처리 시간은 1시간이며, 360 주기로 연속 취득된 데이터를 분석하여, N 은 360이다. LAN과 클라우드 내 서비스에 따른 처리 시간들은 전반적인 특성이 크게 차이가 나지 않는 반면, WAN 네트워크를 통해 연결된 경우 몇 차례 불안정한 데이터 처리 시간의 peak이 확인된다. 이는 FTP를 이용하여 작은 크기의 많은 데이터를 WAN을 통해 연속적으로 처리할 경우, 파일 전송마다 클라우드와 원격 지점 간 FTP 연결 및 연결해제에 드는 시간과 불안정성이 증대하는 것에 의한 것으로 추정한다.

Fig. 6과 같이 클라우드 원데이터를 다운로드 하기 전에 클라우드 상에서 데이터 처리하는 요청이 있을 때마다 다운로드 대상 파일을 압축을 하는 서비스를 개발하였다. 이후 압축된 데이터가 전송되고 분석을 위해 정렬된다.

이에 따라, 원데이터 다운로드를 위한 FTP 접속이 1/36

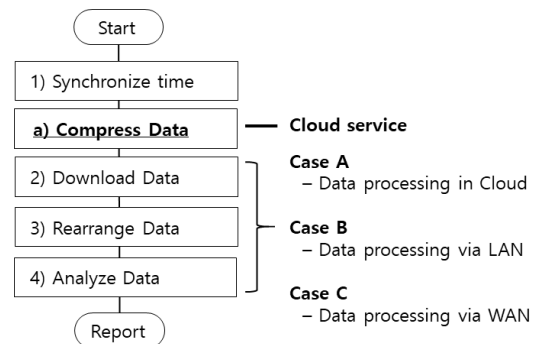


Fig. 6. Algorithms for data processing to analyze wind turbine conditions in SaaS cloud with data compression service

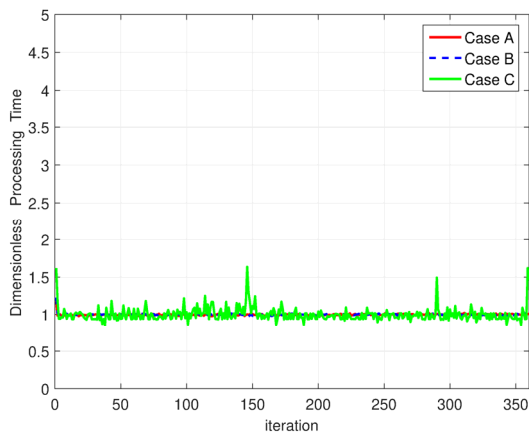


Fig. 7. Dimensionless processing time for each analysis iteration resulted in application of data compression service in cloud

로 감소되었다. 그 결과 Fig. 7과 같이 전반적인 데이터 처리에 소요되는 시간 특성이 개선된 것을 확인할 수 있다. 통신 지연 관련 peak의 횟수와 평균 데이터 처리 시간 대비 peak의 수치도 약 2.5배 저감되었다.

4. 결론

SaaS 클라우드 인프라를 이용하여, 풍력터빈에서 측정된 폭넓은 범위의 주파수 해상도를 가지는(50 Hz 및 5 kHz) 데이터들을 확보하는 서비스를 개발하였고, 해당 데이터들을 진동 분석 프로그램과 연계하였다.

분석 프로그램 이용 시, 빈번한 클라우드 연결에 의한 통신 부하가 증대하여 데이터 처리 시간이 증가하였다. 이를 해결하기 위해, 데이터 압축 처리 알고리즘을 개발하였고, 그 결과 데이터 처리 소요 시간을 개선하였다.

향후 압축 서비스를 기반으로 풍력터빈 상태 데이터를 신속히 제공 받고 서비스화 할 수 있을 것으로 기대하며, SaaS 클라우드 내 다양한 풍력터빈 상태감시 및 유지보수 관련 서비스를 개발할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20183010025530).

References

- [1] Coronado, D., and Fischer, K., 2015, "Condition monitoring of wind turbines state of the art, user experience and recommendations", Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES Northwest, Bremerhaven, Germany.
- [2] Sheng, S., 2015, "Wind turbine gearbox reliability database, condition monitoring, and O&M research update", Proceedings of GRC Annual Meeting.
- [3] Son, E., Lee, G.S., Lee, J., Kang, S., Hwang, S., Park, S., and Kim, S., 2018, "1.5 MW Wind Turbine Noise Measurement and Analysis of Low-Frequency Noise", New. Renew. Energy, **14**(4), 4-13.
- [4] Kellner, T., 2018, "Wind in the Cloud? How the Digital Wind Farm Will Make Wind Power 20 Percent More Efficient", <http://www.gereports.com/post/119300678660/wind-in-the-cloud-how-the-digital-wind-farm-will/>
- [5] Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrrouche, M., Slaoui-Hasnaoui, F., Tameghe, T.A., and Ekemb, G., 2014, "Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges", Energies, **7**(4), 2595-2630.
- [6] Lee, G.S., Choi, J., Kang, S.J., Park, S. and Lee, J.J., 2018, "Development of SaaS cloud infrastructure to monitor conditions of wind turbine gearbox", J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc., **19**(9), 316-325.
- [7] ISO standard 10816-21, 2015, "Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts-Part 21: Horizontal axis wind turbines with gearbox".