

진동 감시용 위치 결정 센서의 위상오차에 대한 실험적 고찰과 비교 평가

The Experimental Study and Comparison on Usage of Vibration Monitoring Sensors for Positioning of Balancing on Rotating Machinery

오 승 태* · 유 무 상* · 봉 석 근*
Seung-Tae Oh, Mu-Sang Yoo and Suk-Keun Bong

(Received November 17, 2014 ; Revised February 10, 2015 ; Accepted February 10, 2015)

Key Words : Vibration Monitoring(진동감시), KeyPhasor(기준위상), Field Shaft Balancing(현장 축 균형잡기), Phase Lag(위상지연), Balancing Weight(균형추)

ABSTRACT

Field balancing is required in any kind of phase information for the determination location balancing mass toward a rotor unbalance mass. Phase or phase angle is a measurement of the relationship of how one vibration signal which relates to another vibration signal and is commonly used to calculate the placement of balance weight. In this paper, A right guideline shows the photo optical speed sensor as the external KeyPhasor is a very useful when diagnosing machinery vibration problems on considering a phase lag comparing to the laser optical speed sensor. Some experimental results generate the interesting phase errors when applying to a wrong conditions. So, Usage of photo optical speed sensor which is used primarily to measure the shaft rotating speed serves as a reference for measuring vibration phase information has effect on the placement of phase angle how it was misunderstood. This paper will help a right method to search for the position of balancing weight and serves as baseline for further measurements using low cost and much easier user convenience. It is concluded that the propose baseline is likely to be applicable to apply to the practical field balancing weight.

기 호 설 명

ψ_{BW} : 중량부착 위상각도
 ψ_{UB} : 불평형 질량 위상각도
 ψ_{HS} : High spot 위상각도
 ψ_{HU} : 불평형 질량의 high spot 위상각도

K_{ϕ} : KeyPhasor
 ψ_{PHL} : 계측기 위상지연에 의한 각도
 ψ_{PA} : 1X절대 위상각도
 ψ_M : KeyPhasor와 진동 pickup간의 각도
 Ω : 회전속도
 δ : 위상이동

† Corresponding Author ; Member, KEPSCO KPS Technical Solution Center
E-mail : stoh@kps.co.kr
Tel : +82-31-710-4507, Fax : +82-31-710-4557
* Member, KEPSCO KPS Technical Solution Center

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2014 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor SungSoo Na
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

r_e : 회전체의 중심이동거리(m)
 r_u : 축 중심으로부터 떨어져 있는 불평형 질량까지의 거리(m)

1. 서 론

발전설비에 대한 진동감시와 진동수준에 대한 중요성이 높아짐에 따라 최근 들어 발전소에서는 진동 상태 감시를 위해 speed sensor의 사용이 보편화 되고 있다. 이런 용도로 photo optical speed sensor는 고가의 laser optical speed sensor에 비해 비용이 저렴하고 사용자가 취급하기가 용이하기 때문에 발전 설비 회전체의 속도 및 진동상태감시용도로 현장에서 보다 광범위하게 활용될 수 있다. 하지만, photo optical speed sensor의 측정원리와 정확한 사용조건을 고려하지 않고 사용할 경우에는 회전체의 불평형 질량에 의한 진동문제가 생겼을 때, 1X성분에 의한 영향도를 최소화 할 수 있는 현장 balancing을 수행할 때 필요한 위상정보를 잘못 파악하여 적용할 수 있다. 이런 이유로 이 논문에서는 photo optical speed sensor와 laser optical speed sensor의 위상오차를 상호 비교하여 외부 KeyPhasor용으로 사용할 수 있도록 각 센서의 올바른 동작조건을 제시하였다. 또한, KeyPhasor기능 중에 shaft precession의

방향을 확인하기 위해서 수행하는 회전체 불평형 질량의 위치검출과 관련된 위상오차 문제를 최소화하고자 하였다. Fig. 1은 회전체의 진동상태 감시 때 사용되는 KeyPhasor의 신호검출을 위한 방법을 나타낸다⁽¹⁾. 검출된 진동신호를 통해 X방향과 Y방향의 위상정보를 확인한다. 확인된 위상정보와 진동측정용 센서와 KeyPhasor에서의 회전 신호 관계를 파악하여 진동상태를 확인할 수 있다.

2. Sensor 시험장치

2.1 Balancing을 위한 KeyPhasor 이론

진동상태 감시를 위해 고정부에 부착되어 KeyPhasor 용으로 사용되는 proximity probe sensor의 기능은 회전수 측정, 주파수 측정, haft precession의 방향확인 및 위상각을 통해 기계의 오기능을 확인할 수 있다. 진동 상태를 확인하기 위해 위상분석은 진동의 trend파악, 축 손상감지, rubbing현상, 축의 불균형 질량 파악, 구조물과 축과의 공진감지, 축의 모드파악, 불안정한 유체 가스의 위치 파악을 위해 활용된다⁽²⁾. 회전체 1X 고진동 발생 시 진동을 저감하기 위해 실시하는 교정방법으로 널리 사용되는 weight balancing은 불평형 질량의 위상을 파악한 후 벡터 선도를 이용한다. 이 때, 필요한 불평형 질량의 크기는 다음과 같이 정리할 수 있다^(2,3).

$$Mr_e = U = mr_u \tag{1}$$

여기서,

- U : 불평형 질량의 크기
- M : 회전체 질량
- m : 불평형 질량

$$\begin{aligned} F &= U\Omega^2 \angle \delta \\ F &= mr_e\Omega^2 \angle \delta \\ F &= mr_u\Omega^2 \angle \delta \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, F : 회전력벡터

식 (2)에서처럼 밸런싱을 적용하기 위해서는 불평형 질량에 대한 정확한 위상정보가 요구된다⁽⁴⁾. 밸런싱 계산 방법을 고려하면, 진동계측기를 이용한 진동진폭과 위상각을 측정하여 high spot위치를 계산하고, 기기별 특성에 따른 로터의 밸런싱 감도와

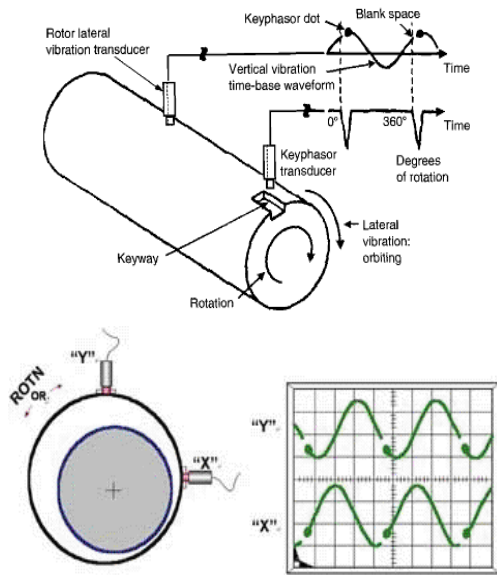


Fig. 1 KeyPhasor signal and vibration signal

위상지연에 대한 특성각도를 이용하여 밸런싱 중량과 부착각도를 벡터 선도상에 표시하여 교정을 수행한다⁽⁵⁻⁷⁾.

$$\begin{aligned} \psi BW &= \psi UB \pm 180^\circ \\ &= (\psi HS - \psi HU) \pm 180^\circ \\ &= (\psi PHL + \psi PA \pm \psi M) \\ &\quad - [90 \times (P_\phi - 1)] \pm 180^\circ \end{aligned} \tag{3}$$

여기서, ψPHL 은 위상지연은 ‘0’
 : 비접촉식 센서 및 KeyPhasor Pulse 적용 시
 $P_\phi = 2.7$ (기기에 따라 변화되는 보정수 값)

2.2 광학센서 위상정밀도 시험

Table 1은 시험에 사용되는 laser optical speed sensor의 사양을 나타낸다. 고가의 laser optical speed sensor의 경우 정밀도에 따라 가격이 책정되며, 사용목적에 맞게 비용을 고려해서 선정하여야 한다. 일반적으로 발전소 회전설비의 상태진단에 사용되는 sensor의 경우, 온라인 현장진단을 목적으로 선정한다. Table 2는 photo optical speed sensor의 사양을 나타내며, 검출형태에 따라 투과형, 미러 반사형, 직접 반사형으로 구분된다.

Table 2는 직접 반사형 중에서도 확산 반사형으로 광원이 렌즈를 통과 후 확산된 빛이 검출물체에 반사되어 수광되며, 수광량의 증감으로 물체의 유·무를 판별하는 원리를 이용하는 타입으로 검출하고자 하는 물체의 크기, 색상, 재질에 따라 반사광량과 검출거리가 바뀌는 특성을 가지고 있다. 이런 이유로, 실제 현장에서 진동측정 중에 발생한 위상오차에 대한 검증이 필요하여 laboratory용 시험 장치를 활용해서 발생의 원인을 검토하였다. 시험에 사용된 센서의 경우, 측정하고자 하는 물체의 검출위치에 따라 감도볼륨을 이용하여 감도 위치를 조절할 수 있다. Fig. 2는 현장 진동상태 감시를 위해 선정된 센서의 치수와 구조를 나타내며, 주변 환경에 맞도록 감도 조정 기능을 포함하고 있다. 감도볼륨을 조절해가며 위상값의 변화결과를 확인하였다. 특히, 선택된 photo optical speed sensor의 경우에는 검출영역에 대한 오차를 확인하기 위하여 빛의 밝기, 감도, 전압 변화를 달리 적용하였다. Table 3은 위상 오차변화를 확인하기 위한 시험조건으로 외란에 의한 변화를 배제하고 현장 측정환경을 고려하여 7가지 조건을

Table 1 Selected specifications for laser optical speed sensor

Parameter	Value	Units
Range	100~2000	mm
Angle of incidence	+/-80°	degree
Speed range	0.1~250000	rpm
Dimension	D20×L70	mm
Operating temp.	-10~+50	℃
IP rating	IP67	-
Housing types	Plain body+fixing slots	
Power	5	Vdc
	Current 30	mA

※ Application : ideal for phase & speed monitoring balancing on rotating machinery

Table 2 Selected specifications for photo optical speed sensor⁽⁸⁾

Parameter	Value	Units
Range	100~20000	mm
Angle of incidence	+/-80°	degree </td
Speed range	0.1~250000	rpm
Dimension	D24×L78.6	mm
Operating temp.	-10~+60	℃
IP rating	IP66	-
Housing types	Plain body+fixing slots	
Power	12~24(Within ±10 %)	Vdc
	Current : 45	mA

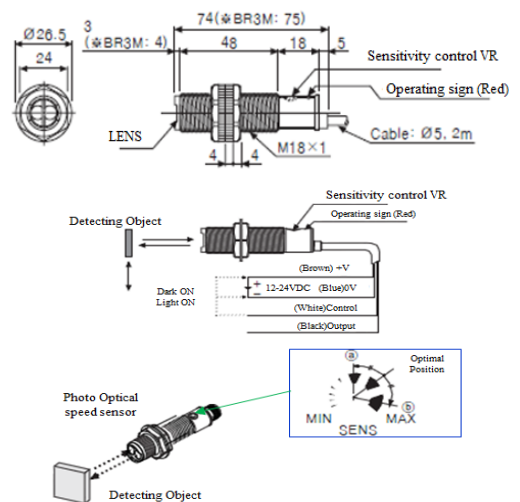


Fig. 2 Structure of the selected photo optical speed sensor⁽⁸⁾

Table 3 Test conditions for each sensor

No.	Type A/B (laser/photo)	Type C (proximity probe)
1 Measuring voltage	0~25 V	-12.5~12.5 V
2 Rotating speed	Speed=115 rpm vs. 3600 rpm	
3 Sensibility volume	VR Loc.= Min.	-
	VR Loc.= Max.	
4 Sampling numb.	Sampling No.=128 vs. No.=360	
5 Sensor direction	Horizontal(90°) vs. Vertical(0°)	
6 Quantity of light	DARK ON/OFF	-
7 Detecting distance	Measured distance	

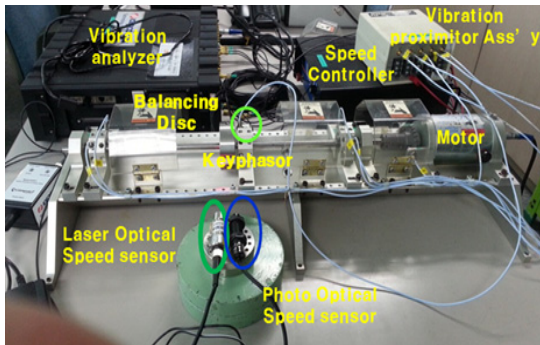


Fig. 3 Test rig for measuring sensor phase errors

선정하였다.

Fig. 3은 센서 오차를 확인하기 위한 시험 장치로 밸런싱 측정과 교정을 위해 기 구비된 장비를 나타낸다. 시험장치의 구성은 구동용 모터와 모터의 속도를 제어할 수 있는 제어기, 유연커플링, 밸런싱 디스크, photo optical speed sensor, laser optical speed sensor, KeyPhasor, 진동 측정 분석 장비인 ADRE 408(미, GE), 신호처리용 PC로 구성 되어 있다.

3. Sensor 시험결과

Table 3은 측정조건을 나타내며, 주어진 조건에 따라 시험을 수행하였다. 그 위상각 결과를 Table 4와 같이 정리하였다. 측정된 진동 값은 Type A가 Type B보다 약 0.02 μm(P-P)~0.05 μm(P-P)차이로 거의 동일하게 나타났다.

시험결과에서 나타나는 것처럼 photo optical speed sensor는 사용 환경에 따라 laser optical speed sensor에 비해 위상오차가 크게 변화함을 확

Table 4 Test results for position phase of sensors

No.	Type A	Type B	Type C
	Laser optical speed sensor	Photo optical speed sensor	KeyPhasor
1 Measuring voltage	0~25 V		-12.5~12.5 V
	A ∠ 68	A ∠ 72	A ∠ 104
2 Rotating speed	① Speed=115 rpm		
	A ∠ 80	A ∠ 48	A ∠ 102
	② Speed=3600 rpm		
	A ∠ 26	A ∠ 344	A ∠ 46
Speed regulation rate (%)	3601~3602	3582~3612	3601~3602
3 Sensibility volume	① Speed=115 rpm, VR Loc.= Min.		
	A ∠ 26	No Data	A ∠ 47
	② Speed=3600 rpm VR Loc.= Max.		
4 Sampling numb.	① Number=128, speed=115 rpm		
	A ∠ 81	A ∠ 46	A ∠ 101
	② Number=360, speed=115 rpm		
	A ∠ 81	A ∠ 46	A ∠ 101
5 Sensor direction	① Horizontal(angle=90 deg.)		
	A ∠ 48	A ∠ 81	A ∠ 103
	② Vertical(angle=0 deg.)		
6 Quantity of light	① Light off		
	A ∠ 344	A ∠ 26	A ∠ 47
	② Light on		
7 Detecting distance (mm)	A ∠ 341	A ∠ 24	A ∠ 47
	d ≥ 150	100 ≤ d ≤ 2000	Always detecting (gap fixed)

* A (vibration value μm: 1X P-P) ∠ phase angle(°)

Table 5 Impact factors for phasor errors

No.	Results			Weight value
	Strong	Normal	Weak	
1 Measuring voltage	○			5
2 Rotating speed	○			5
3 Sensibility volume		○		3
4 Sampling numb.			○	1
5 Sensor direction			○	1
6 Quantity of light		○		3
7 Detecting distance	○			5

* Applied weight value : strong=5, normal=3, weak=1

인할 수 있었다. 7가지 조건에 대한 결과에서 나타나는 것처럼 적절한 전압범위, 고속조건, 감도의

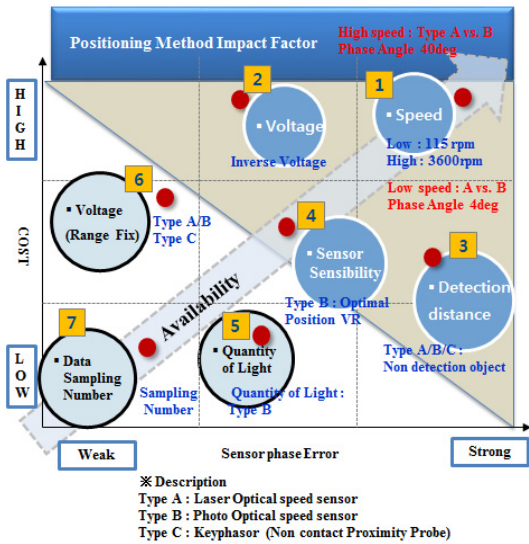


Fig. 4 Positioning results for impact factor on phase error test of each sensor

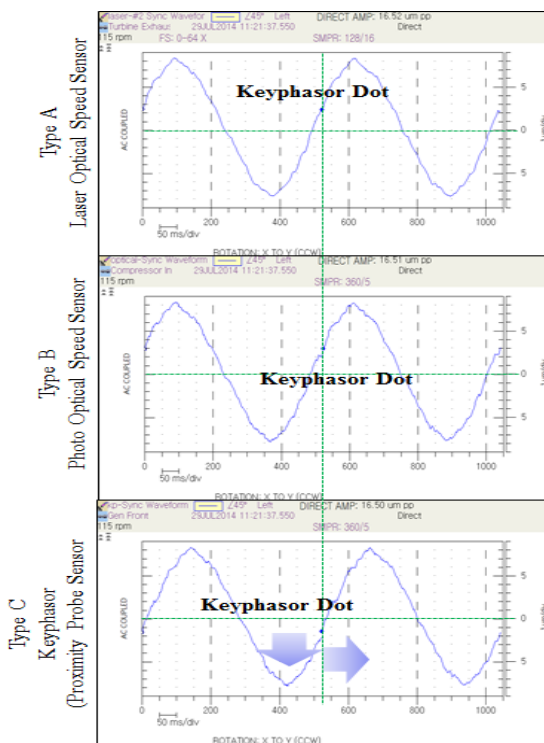


Fig. 5 Comparison of measurement results at each sensor signal

조정을 고려했을 때 위상오차를 줄일 수 있는 조건을 도출할 수 있음을 확인하였다. Table 5는 측정조

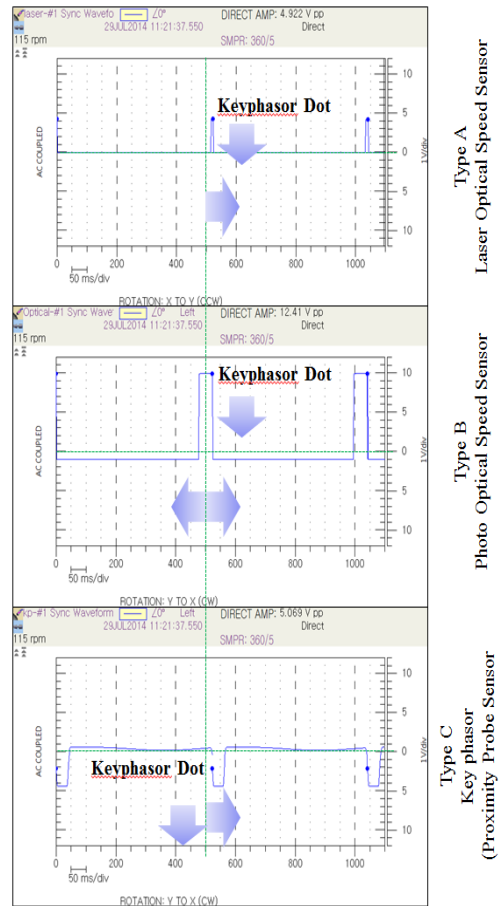


Fig. 6 Comparison of measurement results for each sensor pulse signal

건에 대한 시험결과를 주요 영향인자를 확인할 수 있도록 한 가중치별 분류표이다. Fig. 4는 Table 5에서 가중치에 의해 핵심영향인자를 평가하기 위한 영역별 위치를 나타내는 분석결과를 나타낸다. 전압에 대한 영향도는 각 센서가 권장하는 전압 범위 내에서 이용할 경우에는 위상 값을 검출할 수 있지만, 전류 값을 반대로 인가할 경우, 위상 값을 검출할 수가 없거나 검출신호가 반대로 확인되었다. 속도 변동률에 의한 영향은 고속조건에서 위상오차가 더 크게 발생하였다. 또한, photo optical speed sensor의 회전속도 검출결과가 Type B와 Type C에 비해 보다 큰 속도 변동률을 확인하였다. 샘플링 수는 위상오차에 대한 영향도가 없었으며, 감지거리와 감도 조절의 경우에는 위상을 검출 할 수 있는 영역에 범위 내에 있거나 없는지 센서의 동작 상태를 확인할

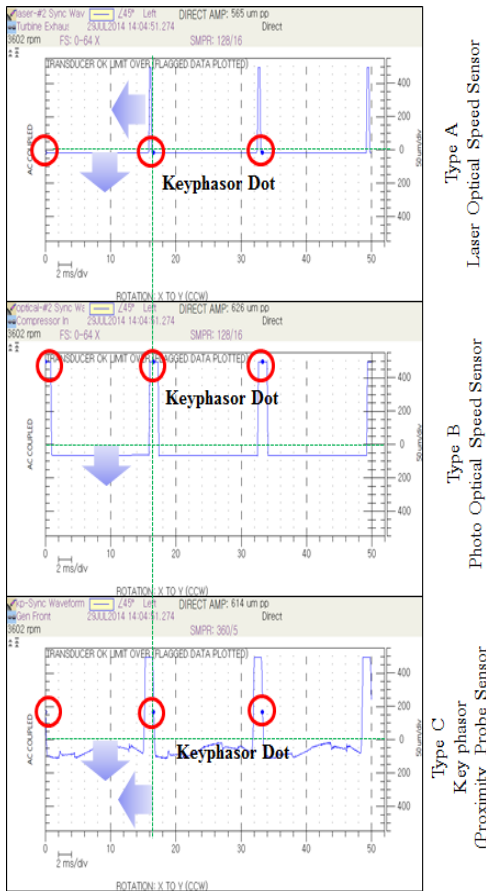


Fig. 7 Comparison of measurement results for each sensor pulse signal(KeyPhasor voltage = negative phase-sequence)

수 있었다.

Fig. 5는 검출된 센서 신호결과를 나타낸다. Type A와 Type B는 Type C에 비해 앞선 위상임을 확인할 수 있다. Type A와 B는 Fig. 3과 같이 외부에서 측정했을 때의 결과이며, Type C는 시험 장치에 고정된 비접촉 proximity probe를 통해 검출된 신호결과를 나타낸다. Fig. 6은 각 센서의 동기신호 결과를 나타낸다. Laser optical speed sensor의 진폭시간 변화 결과는 8.728 ms 간격으로 517.5 ms 주기로 발생한다. Photo optical speed sensor의 신호는 46.56 ms 등시간 변화 간격으로 517.5 ms 주기로 발생한다. 마지막으로 KeyPhasor는 5.781 ms의 위상 지연을 가지고 52.188 ms의 진폭 시간 변화 간격으로 517.5 ms의 주기로 발생하는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 Fig. 6의 시험결과에서 Type C의 전압을

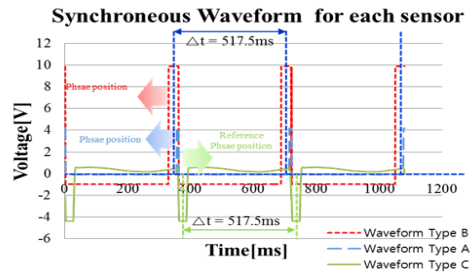


Fig. 8 Comparison of relation for the position of phase at each sensor

반대로 인가하였을 때의 위상결과를 나타낸다.

Fig. 6과 비교했을 때 KeyPhasor dot의 위치가 센서 타입에 따라 변화된 위상결과를 확인할 수 있다. 회전축계에 고정된 KeyPhasor용 proximity probe의 위상을 기준으로 하였을 때, 회전속도와 위상측정용으로 사용하는 각 센서의 위상정보는 저속에서 보다 고속 운전조건에서 위상오차가 보다 크게 발생함들이 연구를 통해 확인할 수 있다. 또한, Fig. 8에서처럼 센서 유형에 따라 위상정보를 잘못 판정할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 종합적인 결과를 정리한 Table 4를 검토하였을 때, 센서의 위상오차를 최소화⁹⁾할 수 있는 조건들을 도출 할 수 있다. 회전하지 않는 고정부에 부착된 KeyPhasor의 위상은 현장 Balancing을 수행할 때 가장 정확한 위상정보로 이용할 수 있다²⁾. 만약, KeyPhasor용 센서가 부착되어 있는 많은 경우에는 외부센서를 이용해 보다 정확한 위상정보를 확인해야 한다. 회전체 발전설비가 구축되어 있는 현장에서 photo optical speed sensor를 이용 시에 laser optical speed sensor에 비해 위상 오차가 10~15 % 높게 발생함을 확인하였으며, 실제 KeyPhasor 위상결과와 비교했을 경우에는 18~23 %의 위상오차가 발생하였다. Table 4에서 확인되는 것처럼 고속(3600 rpm) 기준으로 베어링 지지부에 설치된 KeyPhasor의 위상정보인 46°와 비교하였을 때, laser optical speed sensor의 값은 26°, photo optical speed sensor는 34°로 16° 더 차이가 나타났다.

4. 결 론

이 논문에서는 KeyPhasor용 센서에 의한 위상정보를 확인할 수 없을 경우, 가격적으로 가장 저렴한 photo optical speed sensor를 이용하여 위상오차를

최소화 할 수 있는 시험결과를 다음과 같이 얻었다.

(1) 비교시험을 통해 고속(3600 rpm)에서 위상오차가 저속(115rpm)에서 보다 크다는 사실을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로, photo optical speed sensor는 실제 현장 밸런싱을 수행하는 운전속도인 저속일 때 위상정보는 유용하나 고속의 경우에는 다소 높은 위상오차로 인하여 위상정보의 이용이 어려울 것으로 판단된다.

(2) 센서의 입력전압 연결을 역상으로 인가 시에 위상값은 상하 대칭의 위상변화가 발생하였다.

(3) 감지거리에 대한 신호 확인 및 감도조절부의 위치를 최대위치로 조절했을 때 위상오차가 낮게 나타났다.

(4) Photo optical speed sensor를 이용한 위상 pick-up 시에는 감도의 위치가 Min위치, 빛의 양은 낮게, 회전속도는 저속조건에서 전압변화는 넓게 조정했을 때 위상 오차를 낮출 수 있다는 것을 확인하였다.

(5) Photo optical speed sensor의 경우에 속도 변동률에 대한 변화폭이 가장 크게 나타났다.

References

(1) Muszyńska, A., 2005, Rotordynamics, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC., New York.
 (2) Donald, E. B., 2002, Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics, Bently Pressurized Bearing Press, Minden Nevada.
 (3) Eshleman, R. L., 2001, Balancing of Rotating Machines, Vibration Institute.
 (4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.
 (5) John J. Y., 2012, On Two-plane Balancing Of Symmetric Rotors, ASME Turbo Expo, Turbine Technical Conference & Exposition, Structure and Dynamics : Rotordynamics, pp. GT2012-68061.

(6) John, J. Y., 1979, The Practical Vibration Primer, Houston : Gulf Publishing Company, p. 19.

(7) Koo, J. R. and Song, O. S., 2010, Study on Field Balancing Optimization Considering Specific's Rotating system, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 219~220.

(8) Autonics BR Series Manual, 2013, BR Series Catalogue, pp. 1~6.

(9) Lee, J. S., Kim, J. E. and Kim, Y. Y., 2006, A Feasibility Study on the Application of Topology Optimization Method for Structural Damage Identification, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16. No. 2, pp. 115~123.



Seung Tae Oh worked as machine design and an NVH engineer in Hyosung R&D Center and HHI. He received the M.S. degree in precision mechanical engineering from Pusan National University, Korea in 2003. Since 2013, He has currently been working as Senior engineer in KEPCO KPS. His primarily research fields are the rotordynamics and bearing & dynamic analysis including noise control of rotating machinery.



Mu Sang Yoo received the M.S. degree in mechanical engineering from Dong-A University, Korea in 1985. Since 1986, he has been worked for KEPCO KPS as the vibration diagnosis expert. Currently, He has been working as chief engineer in KEPCO KPS. His primarily research fields are the vibration diagnosis including Noise analysis in Power plant equipment.