

가속도 충격파형을 이용한 기기의 결함 위치분석 및 진단사례

Case_study of detecting loose part by acceleration signal

유 무상*·박 승도*·박 현철*·최 낙균*

Mu-sang Yoo, Seung-do Park, Hyeon-cheol Park, Nak-kyun Choi

Key Words : Generator(발전기), Noise source (소음 원), Impact signal (충격 신호), Structure-borne noise (구조기인 소음)

ABSTRACT

The abnormal sound of generator frame is analyzed by a acceleration signal. The spike-like time signal is major characteristics of impacting force. The distributional map of vibration level is one of visualization method. With map, noise source was easily detected. After de_assembly of generator, loose part of internal component is the source of impact force by mechanical movement of stator inherently. In contact condition of part with clearance, the level of impact signal is different at each revolution and impact signal did not happens periodically.

2. Data 취득

1. 서 론

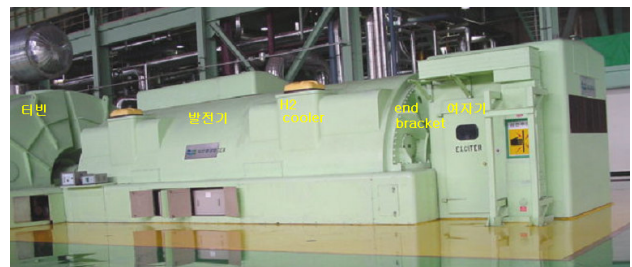
원자력 및 화력발전소등 산업체 회전설비에서 나타나는 다양한 진동 문제점은 설비의 안정된 운전을 확보하기 위하여 많은 관심이 기울여지고 있으며, 다양한 측정 장비와 분석이 이루어지고 있다. 최근에는 현장에서 설비의 운전을 담당하는 운전원에 의하여 소음 문제가 많이 제기되고 있으며, 회전체의 베어링을 중심으로 한 진동 측정과는 달리 소음은 공간으로 전파되는 특성을 가지므로 특정한 측정지점이 관리되기 어렵다. 또한 주기적인 측정이 이루어지지 않기 때문에, 이전부터 발생한 것인지? 정상적인 이음인지?의 근본적인 의문점을 먼저 갖게 된다.

이 논문에서는 운전원에 의해 인지된 발전기 구조물에서의 이상 소음 (Abnormal sound)을 규명하기 위하여 소음신호를 측정하고, 소음 원 분석을 위하여 발전기 프레임에서의 진동신호를 활용하였다. 측정된 진동의 크기는 구조물 표면에서의 진동 에너지 분포를 나타내는 Contour map 형태로 표현하고, 이를 통하여 소음 발생 위치를 추정하였다.

2.1 측정 개요

(1) 설비 사양

발전기는 터빈에 의하여 회전되는 발전기 로터에서 발생하는 전자기력을 이용하여 전기를 발생시키는 전기기기이다. 따라서, 기계적인 진동 특성 및 전기적인 특성을 동시에 지니게 된다. 대상 설비는 500MW 용량의 3600 rpm 회전수를 가지는 표준 석탄화력의 발전기로, 수소 및 수 냉각 방식을 채용하여 구조물이 일반 소용량 발전기보다는 견고하다.



(2) 측정 장비 및 방법

가. 발전기 구조물 표면 (여자기측)을 0.2M 간극 Mesh로 등분하여 진동을 측정하였다.

나. 휴대용 진동장비 (dataPAC 1500)을 이용하여 각 지점에서의 진동값 (변위, 속도, 가속도, 스파이크 에너지)를 측정하고, 그 측정값을 MS사의 Excel 그래프 (표면형)기능으로 Contour map을 작성하였다.

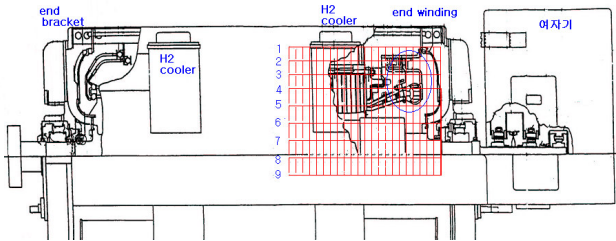
다. 주파수 전용장비 (portable PULSE)를 이용하여 각

† 책임저자, 한전KPS 기술연구원
E-mail : msyoo@kps.co.kr
Tel : (031) 710-4395, Fax : (031) 710-4552

* 한전KPS 보령사업소 예측진단

지점에서의 가속도 파형 및 주파수 신호를 취득하고, 전용 프로그램 (Noise Source Identification) 을 이용한 주파수 대역별 Contour map을 작성하였다.

라. 진동 측정부위에서 1M 떨어진 지점에서의 소음신호를 분석기로 녹음하여, 진동 신호와의 주파수 관련성을 분석하였다.



2.2 진동 측정

(1) 진동값

가. 변위 측정값 (μmp p)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	58	61	60	57	58	68	68	67	63	58	70	56	55	53	53	50
2	61	64	62	57	52	65	65	63	60	62	64	66	64	63	60	56
3	57	60	58	54	52	59	60	58	55	56	61	62	59	58	80	78
4	52	51	51	49	42	49	49	47	47	46	50	51	50	50	49	49
5	43	41	39	38	36	40	41	40	37	35	38	39	39	40	39	41
6	40	38	36	35	33	33	33	32	31	35	40	46	42	36	33	43
7	42	37	45	58	30	28	31	33	29	29	36	44	49	37	35	42
8	33	49	102	107	94	24	26	29	25	23	22	28	35	39	40	42
9	28	41	34	29	20	18	27	18	17	18	17	19	20	28	37	42

회전체인 발전기 로터의 진동영향으로 발전기 양단 end bracket에서 대략 ~50μm로 진동값이 크며, 중앙부에서는 낮게 나타났다. 발전기 상부로 갈수록 양 끝단의 양단 지지 보 형태의 진동영향으로 중앙부가 높게 나타났다.

나. 속도 측정값 (mm/s p)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	11.1	11.6	11.4	11	10.6	12.8	13	13	12.2	10.8	11.1	11.1	10.8	10.5	10.5	10
2	11.4	12.2	11.9	11.3	11.2	12.1	12.4	12	11.3	11.5	12	12.7	13.4	13.1	12.5	11.4
3	11.4	11.5	11.3	10.4	8.9	11.1	11.3	11	10.6	10.4	11.3	11.5	12.2	12.1	11.9	10.8
4	10	9.9	9.5	9.1	7.9	9.3	9.4	9.2	8.8	8.8	9.2	9.5	10	10.3	10.3	9.7
5	8.1	7.8	7.5	7.3	7	7.9	8.1	7.8	7.4	6.5	7	7.2	8	7.2	8.2	8.2
6	7.8	7.3	6.9	6.6	6.3	6.6	6.8	6.6	6.1	6.4	7.7	8.5	9.3	9.1	8.9	8.6
7	8.3	6.3	7.6	9.5	5.8	5.5	6.2	6.4	5.8	5.4	6.7	8.1	9.4	8.8	6.5	8.3
8	5.3	14	17.7	17.7	16.4	4.6	5.2	5.6	5.1	4.4	4.3	5.6	7.6	7.6	5.2	7.5
9	5.6	8.2	6.8	6.8	3.9	3.4	5.1	3.7	3.4	3.4	3.4	3.6	4.4	5.7	5.8	7.8

대략 ~8mm/로 나타나며, 프레임 상부로 갈수록 진동 값이 증가하였다.

다. 가속도 측정값 (g p)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.52	0.58	0.62	0.54	0.55	0.63	0.68	0.65	0.62	0.64	0.75	0.63	0.6	0.62	0.57	0.55
2	0.58	0.6	0.57	0.62	0.53	0.63	0.66	0.65	0.64	0.6	0.72	0.71	0.72	0.64	0.71	0.62
3	0.64	0.56	0.58	0.58	0.56	0.6	0.62	0.6	0.57	0.57	0.74	0.65	0.64	0.65	0.67	0.6
4	0.47	0.46	0.48	0.52	0.48	0.58	0.61	0.55	0.51	0.47	0.59	0.61	0.6	0.52	0.68	0.64
5	0.46	0.58	0.48	0.51	0.4	0.55	0.57	0.54	0.5	0.38	0.5	0.47	0.62	0.58	0.64	0.54
6	0.44	0.51	0.44	0.62	0.37	0.59	0.63	0.56	0.54	0.54	0.72	0.65	0.68	0.62	0.64	0.64
7	0.36	0.33	0.39	0.5	0.49	0.5	0.62	0.59	0.53	0.52	0.61	0.7	0.73	0.64	0.58	0.68
8	0.46	0.68	1.22	1.61	1.11	0.54	0.61	0.59	0.54	0.27	0.34	0.65	0.72	0.63	0.46	0.48
9	0.29	0.3	0.23	0.23	0.22	0.51	0.55	0.54	0.52	0.33	0.64	0.58	0.58	0.62	0.66	0.78

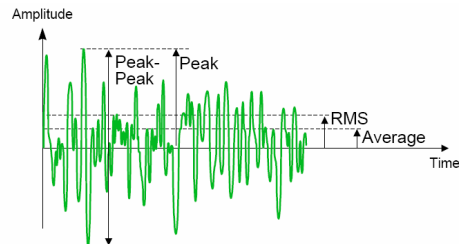
대략 ~0.6g의 진동값을 가지며, 0.7g 이상의 값이 부분적으로 나타났다.

(2) 스파이크 에너지

가. RMS 신호처리

진동의 시간파형 신호는 저주파 및 고주파 대역 Filter처리를 거쳐, 일정한 시간동안의 최대/ 최소값으로 그 크기가 결정된다. 이는 실시간동안의 변화인 True peak 와 평균적인 신호의 크기인 RMS로 대별된다.

RMS 값은 진동이 기계에 미치는 파괴적 영향을 평가하는데 사용되며, ISO 진동규격(10816-1)에서도 RMS 진동값(10~1k Hz 대역의 broad band)으로 베어링진동을 평가하도록 권고하고 있다.⁽¹⁾



$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$$Average = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$$

$$Crest Factor : \frac{Peak}{RMS}$$

나. 충격신호의 처리

베어링 결함과 같은 시간파형의 특성으로 RMS 측정으로는 그 결함의 초기 상태를 인지하기는 어려우며, 다음은 ISO에서 제시하는 대안이다.⁽¹⁾

- . Overall 진동
 - realtime peak 가속도
 - crest fact 측정 (peak/RMS)
 - RMS 와 peak 가속도 측정값의 곱
- . 주파수 분석
- . 충격 펄스기법
- . 충격펄스 신호의 포락선 (envelope)분석

이러한 측정기법은 다음과 같이 제작사마다 유사한 개념과 용어로 개발되어 있다.⁽²⁾

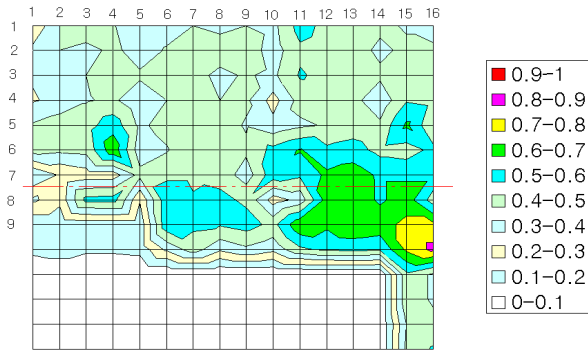
용어	제작사
Spike Energy	IRD
Envelope	ENTEK-IRD
Shock Pulse	SPM
High Frequency Acceleration	SKF
PeakVue	CSI

다. real time peak 가속도

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1:	0.21:	0.4:	0.48:	0.41:	0.32:	0.36:	0.4:	0.38:	0.4:	0.37:	0.54:	0.47:	0.43:	0.42:	0.39:	0.36:
2:	0.33:	0.4:	0.36:	0.43:	0.34:	0.41:	0.4:	0.44:	0.46:	0.35:	0.48:	0.45:	0.44:	0.38:	0.42:	0.42:
3:	0.31:	0.34:	0.4:	0.45:	0.42:	0.43:	0.43:	0.38:	0.41:	0.38:	0.51:	0.47:	0.43:	0.42:	0.44:	0.45:
4:	0.29:	0.33:	0.39:	0.42:	0.32:	0.4:	0.44:	0.4:	0.42:	0.26:	0.44:	0.45:	0.43:	0.33:	0.49:	0.47:
5:	0.41:	0.46:	0.46:	0.56:	0.38:	0.44:	0.43:	0.44:	0.39:	0.33:	0.38:	0.41:	0.45:	0.42:	0.62:	0.4:
6:	0.44:	0.42:	0.43:	0.67:	0.34:	0.39:	0.47:	0.48:	0.42:	0.53:	0.61:	0.52:	0.54:	0.47:	0.45:	0.53:
7:	0.11:	0.21:	0.25:	0.25:	0.43:	0.48:	0.48:	0.46:	0.35:	0.56:	0.52:	0.62:	0.66:	0.58:	0.58:	0.58:
8:	0.32:	0.23:	0.53:	0.54:	0.21:	0.57:	0.51:	0.53:	0.48:	0.25:	0.33:	0.65:	0.68:	0.58:	0.66:	0.45:
9:	0.12:	0.12:	0.14:	0.14:	0.13:	0.57:	0.52:	0.51:	0.54:	0.47:	0.68:	0.62:	0.69:	0.67:	0.72:	0.72:
	0.13:	0.16:	0.12:	0.12:	0.13:	0.32:	0.45:	0.32:	0.38:	0.33:	0.48:	0.52:	0.53:	0.51:	0.72:	0.83:
															0.48:	0.38:
															0.48:	0.38:
															0.41:	0.44:
															0.43:	0.51:

~0.4 g 이하의 값을 가지나 0.6 g이상의 값이 여자기측 베어링 중심부근인 #8 line 부근에서 집중적으로 나타나는 것

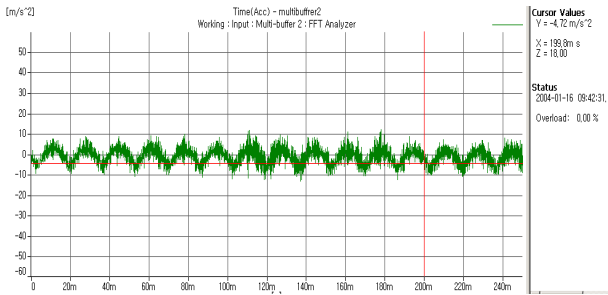
을 확인 할 수 있었다.



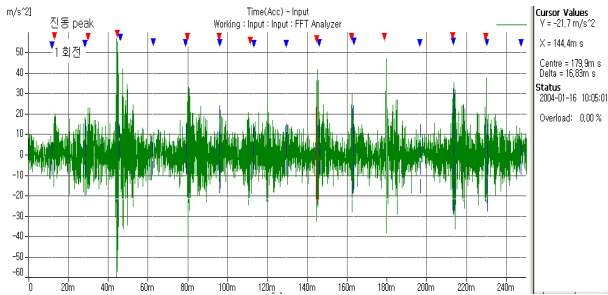
최대값을 나타내는 지점인 Base 부근이 가장 높게 나타나고, 좌측 상부방향으로 진동 에너지가 전달되는 형태로 나타났다.

(3) 시간파형 분석

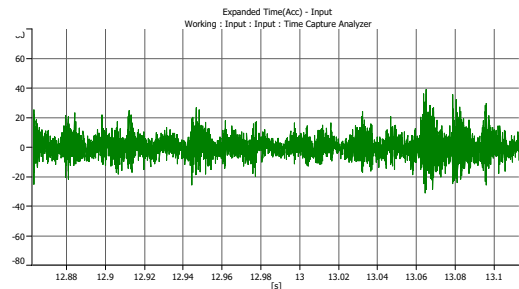
가. 가속도 값이 적은 지점에서는 발전기의 회전수인 1/60초 주기를 가지는 sine 파형으로 나타났다. 발전기 로터의 회전에 따른 진동 영향이 프레임에 전달되었다.



나. 가속도 값이 큰 지점에서는 time 신호에 Impact hammer로 가진한 것처럼 진동의 peak 신호가 나타났다.



이러한 진동 peak는 발전기의 회전주기로 나타나나, 그 크기는 매 주기마다 다르며 peak 신호가 발생하지 않기도 하였다. 다소 비선형적인 진동특성이 나타났다.

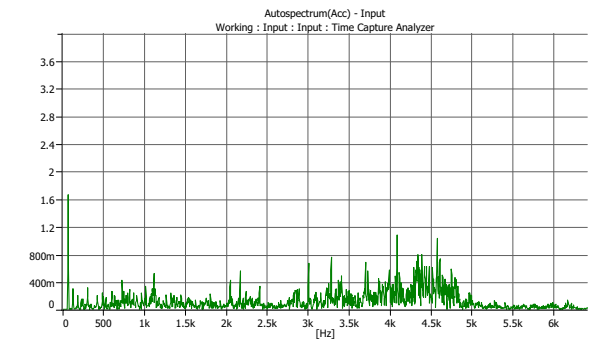
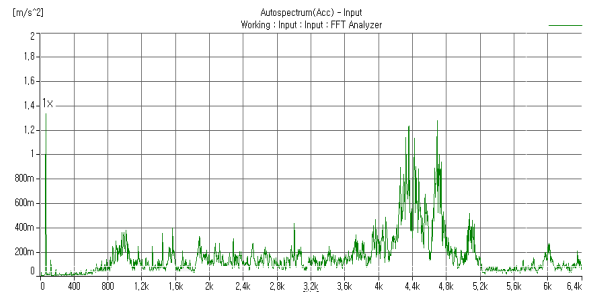


다. 충격신호는 최초 발생시점에는 그 에너지가 크고 신호도 예리하게 시작되나, 구조물을 통하여 전달되면서 감쇄되어 진동의 크기도 감소하고 신호의 파형도 다소 무디게 나타났다.

(4) 주파수 분석

가. 저 주파수영역에서는 회전동기 성분인 60Hz 진동성분이 지배적이며, 발전기의 기계적/ 전기력 가진력의 결과인 60 및 120Hz의 배수인 harmonic 진동성분이 나타났다.

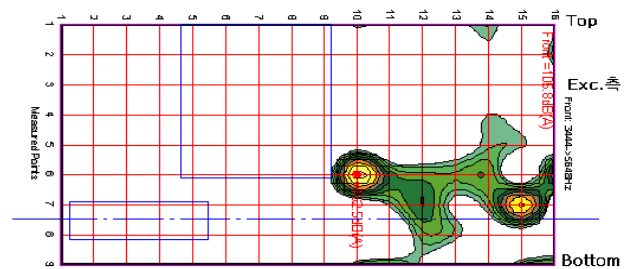
나. ~1k Hz 및 3.6 ~5.6k Hz대역에서의 구조물의 공진으로 추정되는 진동주파수 성분이 관찰되었다. peak 신호의 특성으로 주파수상의 진동 크기는 적게 지시되며, 발전기 내부 부품의 고유주파수를 알 수 없어 개별적인 주파수에 대한 설명은 곤란하였다.



2.3 주파수 분포지도

(1) 3.4 ~5.6kHz 대역

고유주파수로 추정되는 주파수대역을 기준으로 주파수별 진동크기를 측정 공간좌표상의 분포를 분석하였으며, 상대적으로 진동이 큰 지점이 2개로 나타났다.

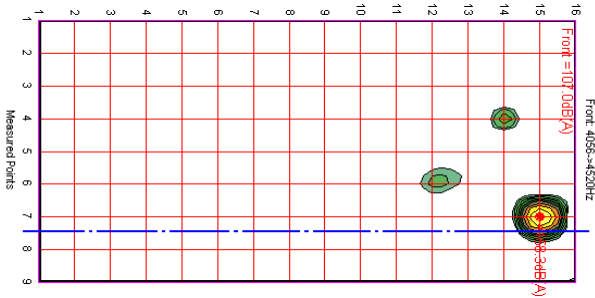


이는 앞에서 분석한 가속도 값의 분포와 유사하며, #10 ~15 줄/ #6 ~9칸에서 에너지가 집중 발생함을 알 수 있었

다.

(2) 4.0 ~4.5kHz 대역

진동 peak 신호가 크게 나타나고, 시간과형상의 peak가 “▷”처럼 예리하게 나타나는 지점에서의 주파수 대역을 기준으로 다시 분석한 결과 1개 지점으로 압축되었다.

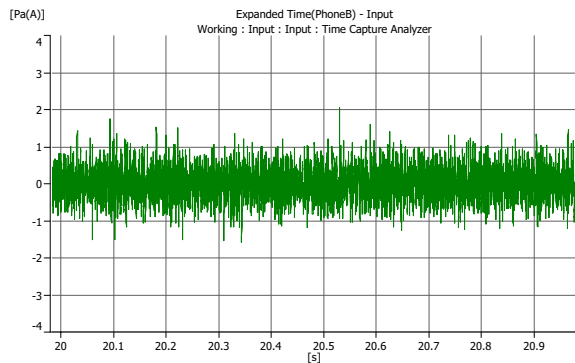


2.4 소음신호 분석

(1) 시간과형

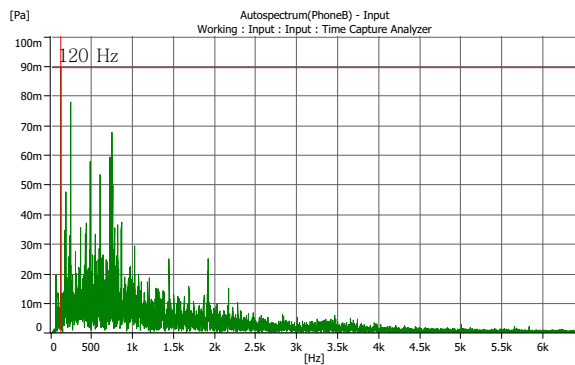
가. 현장에서는 둔탁한 배경음속에서 “딸그락~ 딸그락~”하는 다소 날카로운 금속성 이음이 청취되었다. 이러한 이음은 구조물 표면에서 측정된 가속도 파형을 소리로 재생하면 분명하게 나타났다.

나. 발전기 구조물에서 1M 떨어진 지점에서 소음신호를 취득하였으나, 충격성 신호의 분별력이 크지 않았다.

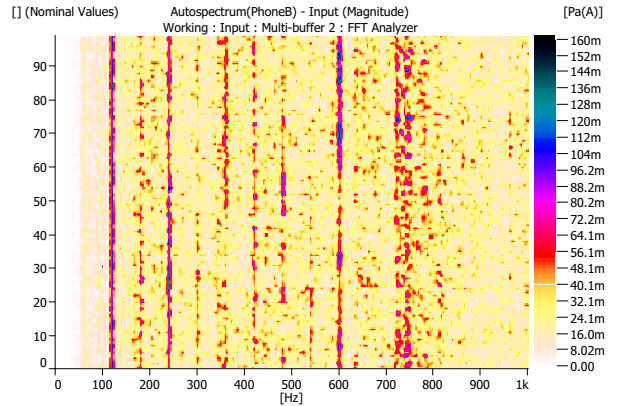


(2) 주파수 특성

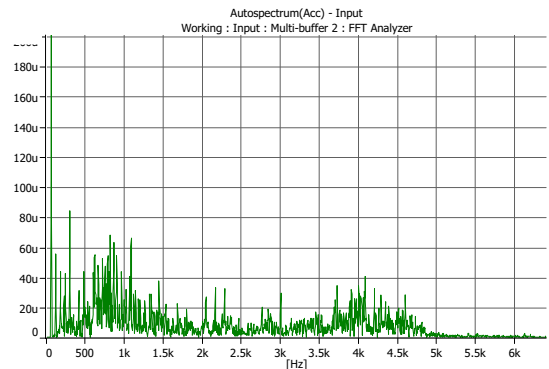
가. 120Hz 및 이의 Harmonic 성분이 지배적으로 나타났다.



나. 시간대별로 주파수의 변화는 미미하며, 120Hz Harmonic 성분의 진폭이 불규칙하게 증가하였다.



다. 가속도 신호를 적분하면 진동의 속도신호를 얻게 되며, 이러한 속도신호의 주파수분포는 소음의 주파수별 분포와 유사한 것을 확인할 수 있었다.



라. 소음신호를 이용한 이음의 분석을 시도하였으나, 배경소음의 크기에 비하여 비주기성인 충격성 이음의 크기가 작아 세밀한 분석은 어려웠다.

3. 분석 결과 및 현장 점검

3.1 측정 결과

(1) 출력에 따른 소음의 변화

가. 정격출력인 500MW에서 400MW로 감발되면서 이음이 현저히 감소하였으며, 300MW 이하에서는 거의 들리지 않았으며 측정 장비로 진동 및 소음 값이 수치화되어 기록되지는 않았다.

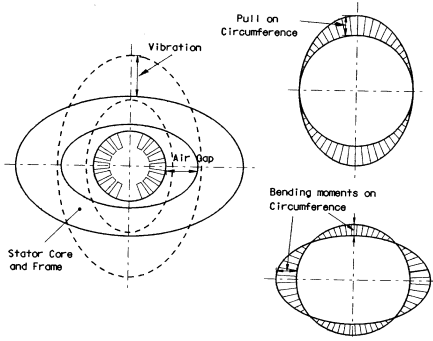
나. 출력 감소에 따른 이음의 감소는 충격에너지 역시 감소하였다는 것이며, 이는 발전기 출력이 감소함에 따라 발전기 고정자에서의 전자기적인 힘에 의한 움직임 역시 감소된 결과로 판단하였다.

(2) 발전기 고정자에서의 전기적인 가진

가. 운전중 회전자 로터의 강력한 자계에 의하여 고정자 철심이 극 (N, S 극)수에 따라 변형이 되기 때문에 철심

진동이 발생하게 된다.

나. 1회전에 2번의 자기력 (3600rpm 기기) 변화에 따라 진동주파수는 120 Hz가 된다.

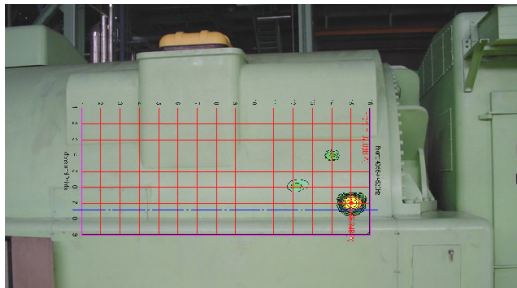


(3) 이음발생의 위치분석

가. 현장에서 청취되는 이음은 발전기구조물에서 발생한 구조기인 소음 (structure-borne noise)로 판단하였다.

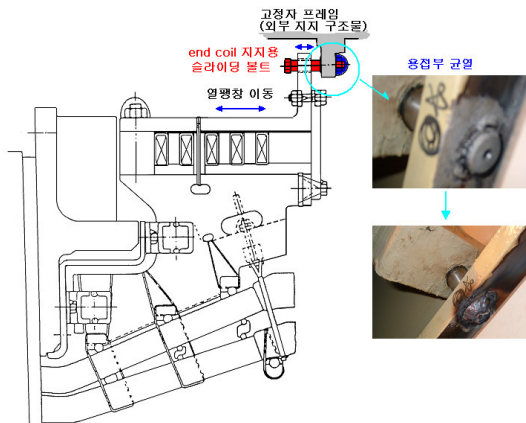
나. 이러한 소음은 충격성 가짐에 의하여 발생한 것이고, 가진원은 시간파형상의 peak 신호 및 주파수 특성으로 분석을 시도하였다.

다. contour map을 근거로 하여 다음과 같은 위치를 제시하였다.



3.2 내부 점검

(1) 발전기 내부 점검결과



가. 발전기 내부 구조물 (고정자)를 지지하며 열팽창을 흡수하는 슬라이딩 볼트가 외부 구조물 (프레임)과 연결되는

지점에 용접이 되어있었다.

나. 점검결과 볼트 용접부에 균열이 발생하여 볼트 체결부에서의 간극에 따른 이완 현상이 발생하였다.

다. 발전기에서 발생하는 기계적인 회전에 따른 60Hz 및 전자기적인 120Hz 진동에 의하여, 볼트 연결부에서의 상대적인 움직임으로 인한 간섭현상으로 충격이 발생하였다.

라. 이러한 접촉부는 간극을 가지기 때문에 비선형적인 특성을 보이며, 충격의 주기성은 있으나 그 크기는 매 회전마다 일정하지 않은 것으로 판단하였다.

(2) 작업후 결과 진동

가. 변위, 속도, 가속도 모두 진동 값이 감소하였다.

나. real_time peak 가속도

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.16	0.36	0.45	0.28	0.24	0.3	0.4	0.3	0.28	0.26	0.37	0.32	0.34	0.35	0.3	0.29
2	0.28	0.29	0.33	0.3	0.26	0.29	0.28	0.29	0.31	0.28	0.35	0.33	0.32	0.33	0.32	0.31
3	0.28	0.27	0.32	0.32	0.29	0.28	0.28	0.28	0.31	0.27	0.3	0.31	0.33	0.36	0.34	0.29
4	0.23	0.26	0.31	0.32	0.25	0.28	0.28	0.28	0.28	0.22	0.34	0.3	0.32	0.29	0.31	0.37
5	0.32	0.41	0.37	0.38	0.3	0.3	0.29	0.28	0.31	0.2	0.26	0.24	0.27	0.3	0.24	0.27
6	0.22	0.31	0.24	0.41	0.3	0.37	0.32	0.32	0.35	0.35	0.4	0.37	0.38	0.37	0.36	0.41
7	0.07	0.14	0.06	0.06	0.06	0.31	0.33	0.32	0.33	0.37	0.36	0.39	0.39	0.39	0.38	0.41
8	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.4	0.35	0.36	0.32	0.17	0.2	0.41	0.35	0.42	0.21	0.24
9	0.09	0.11	0.12	0.12	0.1	0.36	0.32	0.41	0.31	0.33	0.36	0.38	0.4	0.37	0.37	0.42
10	0.11	0.15	0.1	0.09	0.12	0.26	0.31	0.26	0.25	0.15	0.35	0.27	0.27	0.23	0.32	0.32
															0.19	0.25
															0.36	0.39
															0.35	0.3

최대 ~0.8g → ~0.4g로 1/2이상 감소하였다.

4. 결론

본 사례는 발전기에서 발생한 이음(abnormal sound) 현상을 규명하기 위하여 진동/ 소음분석을 실시하고, 현장점검을 통하여 결과를 확인하였으며 다음의 내용을 알 수 있었다.

가. 발생이음과 배경소음의 크기 차이로 인하여 충격성 이음이 소음신호에서는 신호의 분별력을 확인하기가 어려웠다.

나. 단속적인 금속성 이음은 주파수가 높으며, 특정 주파수 대역보다는 기존 주파수의 레벨만 증가하며 white noise 같은 음을 듣게 되었다.

다. 표면에서 측정된 진동신호가 보다 충격 이음을 분별하기가 유리하였다.

라. 충격성 진동은 Impact hammer로 구조물 각 지점을 가진한 결과처럼, 시간파형에서 예리하게 spike 형태로 타 나났다.

마. 회전주기에 따른 충격신호가 나타나나 그 크기 및 발생의 규칙성이 적은 비선형적인 특성은 간극을 가지는 부품 (볼 베어링에서 볼의 회전과 같은)에 의한 것으로 추정하였다.

바. 진동 측정값은 변위보다는 가속도 값이 분석에 유리

하고, RMS 보다는 real time 신호처리가 유용하였다.

사. 주파수 대역별 mapping 전용 프로그램이 아닌 real time 가속도 크기를 이용한 그래프에서도 가진 원의 분석 및 시각화가 가능하였다.

본 사례를 산업 현장에 일반화 할 수는 없으나, 발전기에서의 소음신호 및 가속도 충격파형의 특성을 이용하여 구조물 내부 문제점과의 관련성을 규명하였다.

참 고 문 헌

(1) ISO, 1995, “ ISO 10816-1 (비회전부분의 측정에 의한 기계진동의 평가- 일반적인 지침”.

(2) 봉석근 등 , 2007, “ 기계 상태감시 및 진단- 사내교육용”, 한전KPS.