

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.7.935

하나로 2차 냉각탑의 냉각팬 감속기의 진동분석

박 용 철**

* 원자력(연) 연구로 공학부

Vibration Analysis of a Cooling Fan Gear Reducer of the Secondary Cooling Tower in HANARO

Young Chul Park**

* Dev. of Research Reactor Engineering, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received January 6, 2010 ; Revised May 12, 2010 ; Accepted May 20, 2010)

Key Words: HANARO(하나로), Cooling Tower(냉각탑), Gear Reducer(기어 감속기), High Vibration Analysis(고진동 분석)

초록: 하나로는 한국에 설치되어 있는 열출력 30MW의 개방 수조형 연구로 이다. 이는 발전로와 달리 원자로에서 발생하는 열을 이용하여 전기를 생산하는 것 대신에 원자로의 노심 온도를 유지하기 위하여 냉각탑을 통해 대기로 이 열을 냉각한다. 냉각탑 월간 점검 중에 냉각탑 4번의 냉각팬 감속기가 기준을 상회하는 고진동을 기록하였다. 본 연구의 목적은 고진동의 원인을 찾아 정상적으로 수리하기 위함이다. 연구 방법은 FFT 스펙트럼 기법을 적용하여 고진동의 원인을 분석하였다. 그 결과 고진동 주파수는 피니언 기어의 고유 진동수의 두 배인 354Hz이었다. 피니언 기어를 점검한 결과 이빨 표면이 깨져 있었다. 깨진 피니언 기어를 제거하고 새것으로 교체한 후에는 감속기는 정상적으로 작동하였다.

Abstract: HANARO is an open-tank-in-pool-type Korean research reactor that generates 30MW of thermal power. It differs from power plant reactor in that the heat generated by HANARO is exhausted into the atmosphere through a secondary cooling tower, thus maintaining the core temperature constant. During every monthly inspection of the cooling tower, large vibrations that exceeded the permissible limit were observed at cooling fan gear reducer No. 4 of the cooling tower. The purpose of this study is to identify the origin of the large vibration and to repair it. FFT spectrum analysis is performed to identify the part that caused the large vibration. The results of the frequency analysis showed that the vibration frequency was 354 Hz, which is twice the natural frequency of the pinion gear. A check of the pinion gear revealed that there was a crack on the surface of the pinion gear. After the gear was replaced, the reducer operated normally.

1. 서 론

하나로⁽¹⁾(HANARO: High flux advanced neutron applied reactor)는 열출력이 30MW인 개방수조형 연구로 이며 고속 중성자를 이용하는 원자로이다. 이는 발전로와 달리 노심에 생기는 열로 전기를 생산하는 것 대신에 열을 냉각시켜 노심에서의 핵반응을 지속적으로 유지한다. 하나로에는 이 핵반응으로 생기는 중성자를 이용하여 동위 원소 생산, 방사선 조사를 이용한 재료 특성 연구, 반도체 생산 등 다목적으로 활용하고 있다.

원자로에서 발생하는 열은 1차 냉각수에 흡수되어 열교환기를 통해 2차 냉각수로 전달되고, 이 열은 냉각탑을 지나면서 대기와 열교환하여 제거된다. 이와 같은 냉각탑의 성능을 확인하기 위하여 냉각탑 성능 시험⁽²⁾과 월간 점검⁽³⁾을 한다. 또한 냉각팬 감속기에 진동 감지기를 설치하여 제어실에서 운전 중에도 실시간 진동을 확인한다.

이 진동 감지기는 냉각팬 4번의 진동이 관리기준(8mm/s)⁽³⁾을 상회하고 있음을 지시하였다. 정지 후 휴대용 진동 측정기로 모터의 전단과 후단을 수직, 수평 및 축 방향으로 각각 측정하여 진동 상태를 확인하였다. 이를 수리하기 위하여 축정열, 체결 볼트 조임, 주유 등을 하였으나 고진동은 해소되지 않았다. 이의 원인을 분석하기 위

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, ycpark@kaeri.re.kr

해 주파수 분석을 하였다.

본 논문은 냉각팬의 고진동 원인을 분석하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 교환) 스펙트럼 분석 기법을 이용한 주파수 분석과 수리 결과에 대해 기술하고 있다.

2. 본 론

2.1 2차 냉각탑

열을 흡수한 2차 냉각수는 Fig. 1과 같이 냉각탑 상부에 있는 셀(cell)의 분배기(distributor)로 유입된다. 유입된 물은 냉각탑 내부에 있는 충진제(fill)를 따라 흐른다. 이 때 상부에 설치된 냉각팬의 흡입력에 의해 외기가 하부 측면 개구부로 유입되어 충진제 사이를 흐르는 냉각수와 교차하여 열교환을 한다. 냉각된 2차 냉각수는 저수조(basin)에 모여 순환 펌프에 의해 재순환된다.

이러한 과정을 거치면서 냉각탑이 제거할 수 있는 열용량은 원자로 외에도 반사체, 공기 압축기 등 주변 기기의 열과 여유를 포함하여 33MW이다. 냉각탑은 냉각팬으로 외기를 강제 통풍하여 이 열을 제거하고 40°C의 2차 냉각수 3600m³/h를 32°C로 냉각할 수 있다.⁽⁴⁾

냉각팬은 그림과 같이 모터, 축 및 감속기를 거쳐 동력이 전달된다. 이 모터는 회전수를 고속(1770 rpm)과 저속(880 rpm)으로 조절할 수 있다. 감속기는 1/6.5의 감속비를 유지하기 위해 이빨수가 6개인 피니언 기어와 39개인 베벨 기어로 구성된다. 피니언 기어가 모터로부터 회전력을 받아 냉각팬에 연결된 베벨 기어에 전달하여 감속된다. 감속된 회전수는 날개가 6개인 냉각팬을 고속과 저속으로 각각 회전할 수 있다.⁽⁵⁾

그리고 냉각팬 회전시 진동이 유발되므로 진동으로 인한 더 큰 사고를 막기 위해 감속기 하부에 진동 감지기가 설치되어 있다. 냉각팬에서 기준 이상의 진동이 발생하면 진동 감지기에 의해 고진동 경보가 발생한다. 그리고 제어실 기록계에는 실시간 진동값이 기록되어 진동 상태를 감시할 수 있다.

2.2 냉각팬의 고진동 발생

하나로 운전 중에 Fig. 2와 같이 냉각팬 4번에서 고진동이 발생하였다. 이 자료는 감속기에 부착된 진동 감지기가 감지한 진동을 기록계를 통해 얻어 것이다. 그림에서 보여 주는 바와 같이

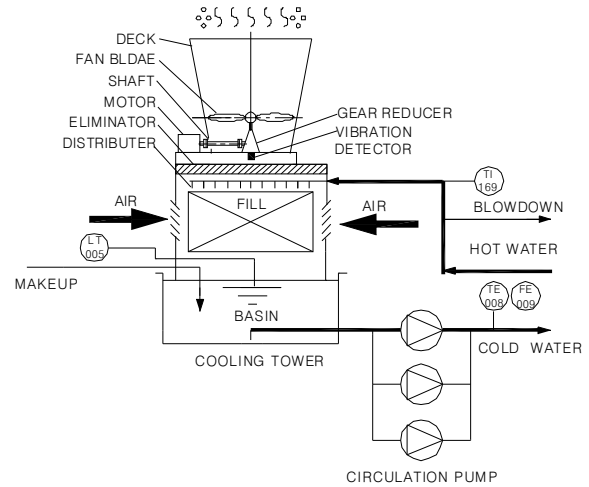


Fig. 1 Flow diagram of secondary cooling system

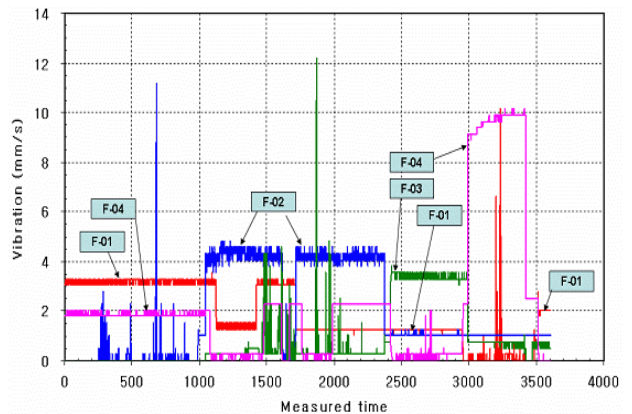


Fig. 2 High vibration of no. 4 cooling fan in HANARO cooling tower

냉각팬은 냉각 부하에 따라 고속과 저속, 정지 및 기동이 교대로 이루어지고 있다. 냉각팬 4번이 약 10mm/s의 진동을 기록하여 고진동으로 판정하고 냉각팬 1번으로 교체 운전을 하였다.

진동을 유발할 수 있는 주요 원인은 체결 볼트의 풀림, 축정열의 이탈, 모터 베어링 마모, 감속기 기어 마모, 감속기 베어링 마모, 날개 무게 불평형, 회전체 무게 불평형 등이다. 그리고 운전 조건에 따라 냉각팬 날개 주위를 흐르는 유체에 의한 유체 유발 진동 등이다. 특히 하나로와 같이 냉각 용량에 따라 고속과 저속으로 운전하는 경우에는 날개 무게에 의한 원심력과 관성력이 작용하여 구동부의 손상으로 고진동이 발생한 사례도 있다.⁽⁶⁾

2.3 냉각팬 주파수 분석

고진동 원인을 분석하기 위해 정지 기간 중에

체결 볼트의 풀림, 축정열 상태 및 모터의 진동 등을 측정한 결과 정상 상태를 유지하지만 진동 값은 낮아지지 않았다. 이의 정확한 원인을 분석하기 위해 주파수 분석을 하였다. 분석 장비는 VIBXPERT⁽⁷⁾를 사용하여 FFT 스펙트럼 분석 기법으로 분석하였다.

해석 결과는 Fig. 3에서 보여 주는 바와 같이 분석 장비의 제작사가 제공한 자료에 따라 판별하였다. 이에 따르면 하나로 냉각탑은 모터 동력이 35kW이고 기초가 고정되어 있어 그룹 2에 해당한다. 따라서 진동값이 4.5mm/s RMS(root mean square, 제곱근 평균) 값 이상을 가지면 진동으로 인해 손상된 것으로 판단하였다.

이 분석 장비를 이용하여 냉각팬 모터의 진동을 축에 수직, 수평 및 축방향으로 각각 측정하여 Table 1에 나타내었다. 진동값은 진폭과 진동 속도로 각각 표시하였다. 그 결과 대부분의 냉각팬은 기준 이하의 낮은 진동값을 보여 고진동의 원인이 되지 못하였다.

고진동을 분석하기 위하여 감속기를 중심으로 진동값을 측정하고 FFT 스펙트럼 주파수 분석을 하였다. 동력이 전달되는 과정에 따라 주요 구성품별 주파수를 Table 2에 나타내었다. 각 구성품의 주파수 영역은 모터의 기본 주파수 60Hz를 기준으로 계산하였다. 고진동 주파수와 일치하는 주파수를 가진 부품이 고진동의 원인이다. 그리고 냉각팬 4번에서 고진동이 발생하므로 이를 비교하기 위하여 각 냉각팬을 차례대로 분석하였다.

냉각팬 1번의 FFT 스펙트럼은 Fig. 4에서 보여

주는 바와 같이 가장 큰 진동은 355Hz에서 1.85mm/s를 보이고 있다. 이 주파수는 모터 회전 주파수의 약 12의 배수이며 감속기 피니언 기어 이빨 수의 2배이다. 감속기 피니언 기어가 높은 진동에 크게 기여하고 있다. 그러나 이 값은 기준 이하이다.

Fig. 5에는 2번 감속기의 FFT 스펙트럼을 보여 주고 있다. 가장 큰 진동은 30Hz에서 1.92mm/s를 나타내고 있다. 이는 모터 회전 주파수에 의한 진동이며 기준 이하이다.

Fig. 6은 3번 감속기의 FFT 스펙트럼을 보여 주고 있다. 가장 큰 진동은 30Hz에서 1.68mm/s의 진동을 보이고 있다. 이는 2번 냉각팬과 같이 모터 회전 주파수에 의한 진동이며 기준 이하이다.

Table 1 Field vibration record of each cooling fan motor before repair

Description	Vertical (V)		Horizontal (H)		Axial (A)		
	rms	P-P	rms	P-P	rms	P-P	
NO. 1 motor	Velocity (mm/s)	0.58	3.89	1.00	6.30	1.08	6.17
	Displacement (mm)	3.03	15.54	3.48	17.70	5.64	28.30
NO. 2 motor	Velocity (mm/s)	1.04	6.24	1.10	6.40	3.16	13.54
	Displacement (mm)	7.24	30.02	4.84	22.88	17.37	60.52
NO. 3 motor	Velocity (mm/s)	1.58	7.55	1.05	6.32	2.81	12.29
	Displacement (mm)	8.64	32.12	4.72	21.52	15.34	56.76
NO. 4 motor	Velocity (mm/s)	1.19	6.84	2.00	11.40	1.32	7.86
	Displacement (mm)	2.56	15.51	3.73	22.17	5.88	30.62

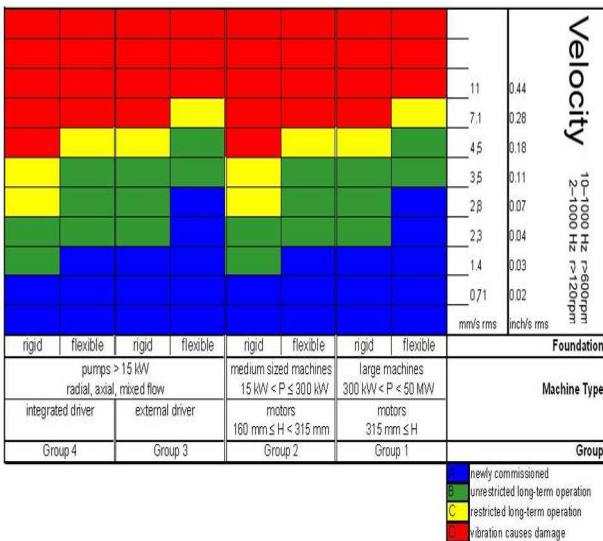


Fig. 3 The criteria of FFT spectrum analysis

Table 2 Frequency band of cooling fan components

Description	Value	Component	Frequency (Hz)
Motor rpm	1770	Main shaft (1X)	29.50
Gear ratio	6.5	Gear reducer shaft	4.54
Fan rpm	272	Fan revolution	4.53
Number of fan blade (EA)	6	Fan blade	27.20
Number of input gear teeth (EA)	6	Gear mesh	177.00
Number of output gear teeth (EA)	39		

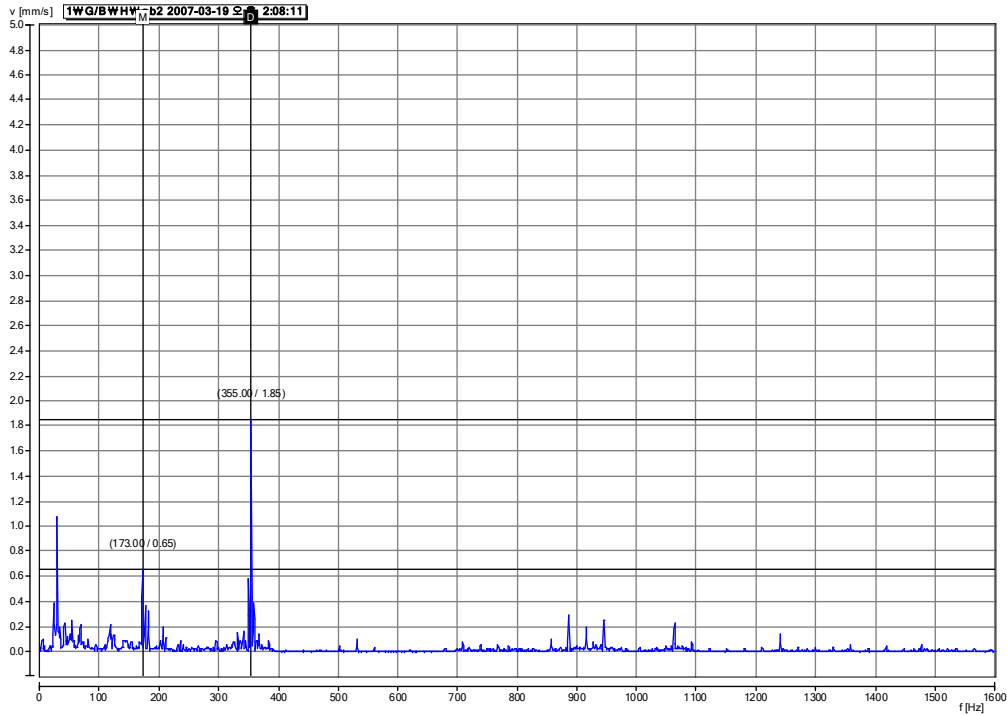


Fig. 4 FFT spectrum measured in no. 1 gear reducer

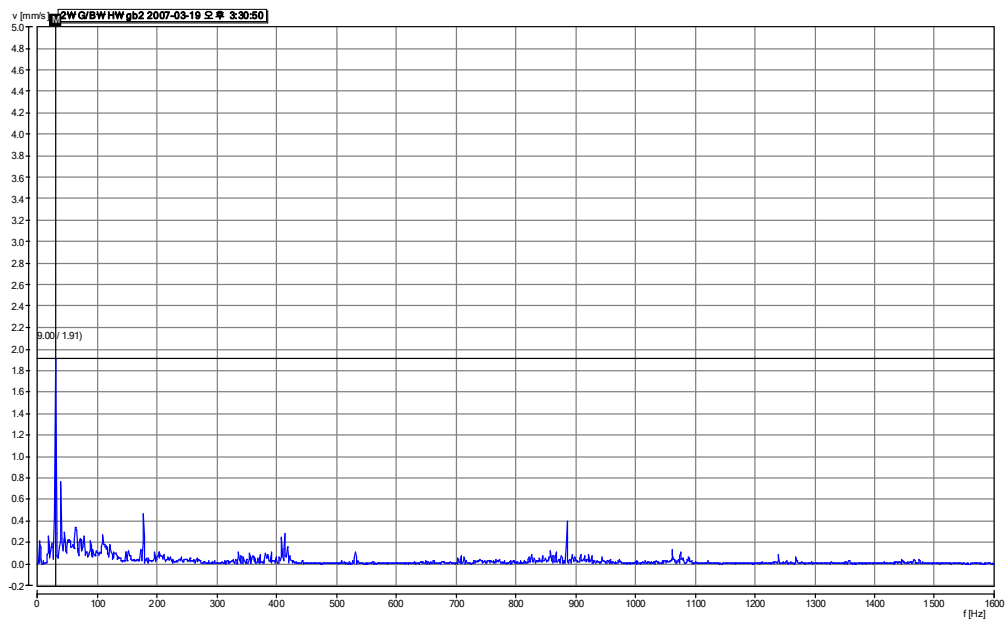


Fig. 5 FFT spectrum measured in no. 2 gear reducer

Fig. 7은 4번 냉각팬의 FFT 스펙트럼을 보여 주고 있다. 가장 큰 진동값은 354Hz에서 7.66mm/s를 보여 주고 있다. 이는 1번 냉각팬과 마찬가지로 감속기의 피니언 기어가 크게 기여하고 있다. 그리고 177Hz부근에서도 1.57mm/s의 진동이 발생하고 있다. 이는 피니언 기어와 베벨 기어의 맞물림 (gear mesh)에 의해 베벨 기어에서 발생하는 진동이며 기준 이하이다.

결론적으로 냉각팬 4번의 고진동은 장기간 사용으로 인한 감속기 피니언 기어의 손상에 의한 것으로 판단된다. 그리고 나머지 냉각팬의 진동값은 기준 이하를 나타내어 진동에 의한 손상은 없는 것으로 판단하였다.

2.4 수리 및 결과

냉각팬 4번의 감속기를 분해한 결과 Fig. 8(a)에

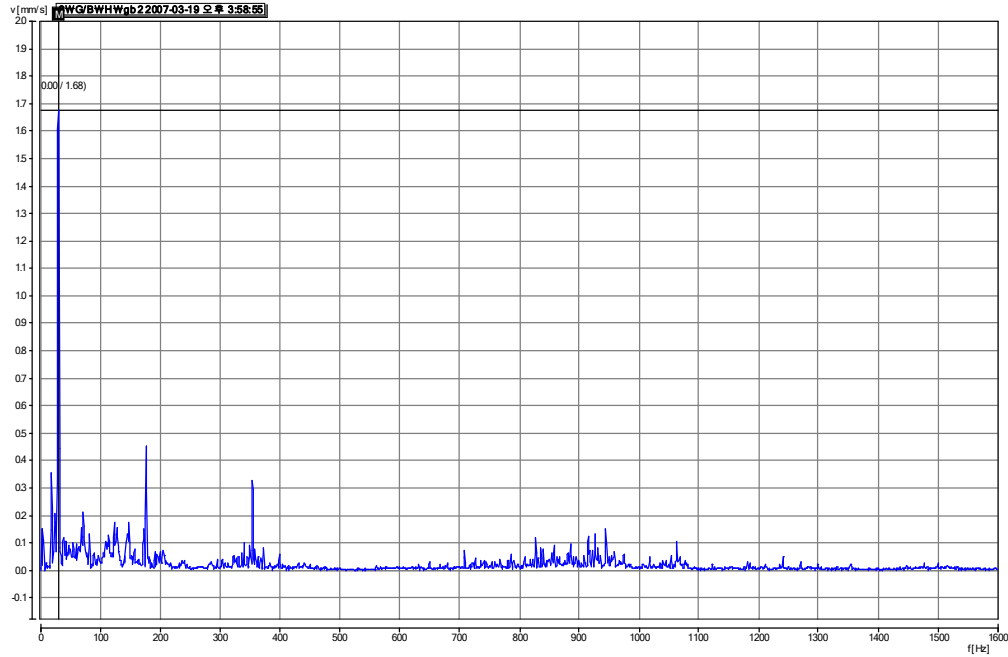


Fig. 6 FFT spectrum measured in no. 3 gear reducer

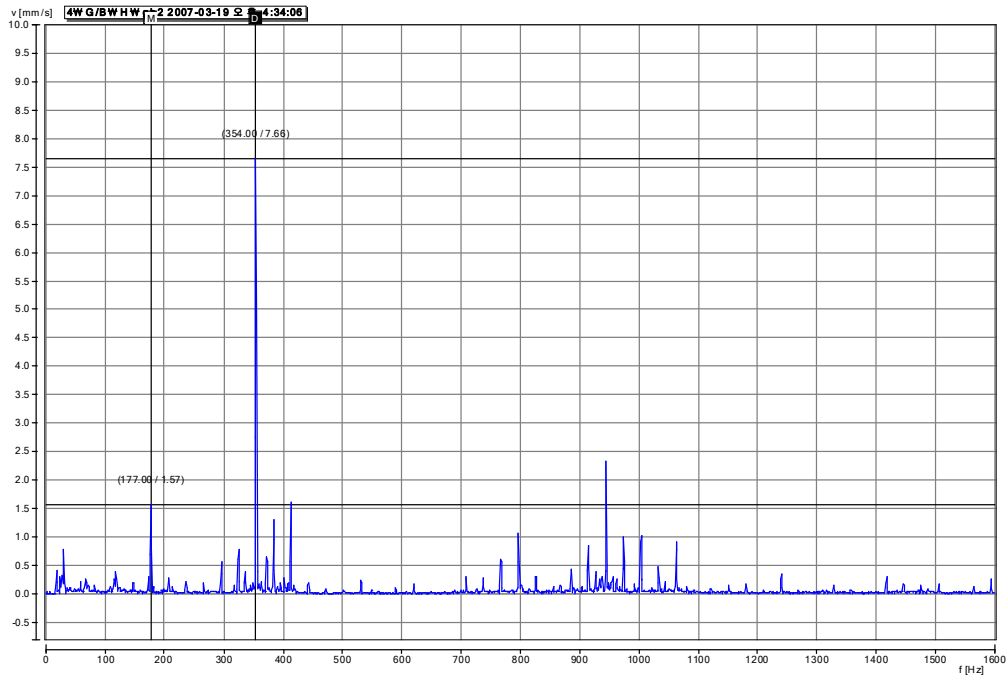


Fig. 7 FFT spectrum measured in no. 4 gear reducer

서 보여 주는 바와 같이 사용한 피니언 기어의 이빨 일부가 깨져 있었고 기어 이빨 표면도 많이 손상되어 있었다. 이러한 손상에 의해 고진동이 발생한 것으로 추정된다.

이 손상의 주요 원인은 치면의 강도를 높이기 위해 표면을 열처리한 것인데 일반적인 제작 기법이다. 하나로가 초임계에 도달한 이후 약 13년

간 사용하여 노화에 의해 열처리 표면이 손상된 것으로 판단된다. 특히 감속기의 피니언 기어는 모터에 직결되어 있어 모터와 동일한 회전수로 회전하므로 더 많이 마모될 수 있다.

이를 개선하기 위해 Fig. 8과 같이 새로 제작하여 교체하였다⁽⁸⁾ 기어 맞춤을 원활하게 하기 위해 피니언 기어 외에 베벨 기어도 함께 교체하였다.

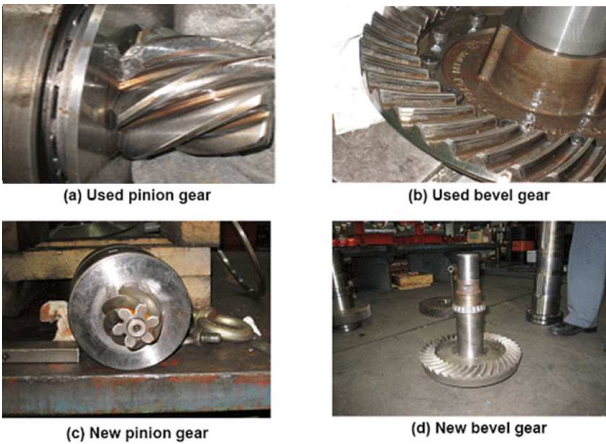


Fig. 8 Used and new pinion gears and bevel gears of no. 4 gear reducer

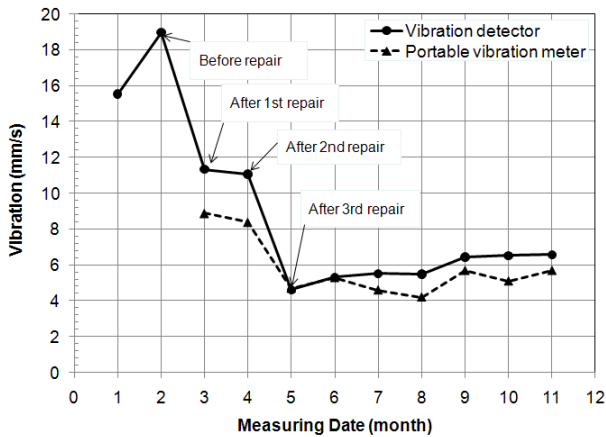


Fig. 9 Vibration development of no. 4 cooling fan

기어 표면은 치면의 강도를 높이기 위해 열처리를 하였다.

이 과정에서 베벨 기어의 외륜과 내륜의 편차는 각각 -0.01~0.02mm와 0~0.02mm를 나타내었다. 이는 허용 범위⁽⁹⁾ +/-0.05mm 이내이나 진동을 더 낮추기 위해 외륜을 기준으로 내륜을 가공하여 동심을 잡았다. 내륜은 크롬 도금으로 0.5 mm 두께로 육성하여 가공하였다. 그리고 조립시 기어 물림이 원활하지 않는 부분은 래핑하여 기어 백래쉬를 허용 범위⁽⁹⁾ 0.33 ~0.47mm 이내로 유지하였다.

감속기를 수리하여 냉각팬을 가동하였을 때 냉각팬 4번 감속기의 진동을 수리 이전과 비교하기 위하여 진동은 진동 감지기와 휴대용 진동 측정기로 각각 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 진동 감지기의 진동값이 휴대용 진동 측정기보다 높게 표시되었으나 그 추이는 비슷하였다. 3차에 걸쳐

수리한 결과 진동값은 수리전보다 약 60%로 감소된 값을 보이고 관리 기준 이내에서 안정된 상태를 보이고 있다. 그러나 여전히 다른 냉각팬 보다 약 2배 높은 값을 보이고 있으므로 주기적인 관찰이 필요하다.

금번 주파수 분석을 통하여 냉각팬 4번 외에 1번 냉각팬에서도 비슷한 주파수에서 진동을 보이고 있다. 따라서 진동 추이를 관찰하고 예비품을 확보하여 고장에 대비할 예정이다.

3. 결 론

냉각팬 4번의 고진동을 분석하기 위해 FFT 스펙트럼 기법으로 주파수를 분석하고 그 원인을 찾았다. 그리고 이를 제거하여 정상적인 운전 상태를 유지할 수 있었다. 이 과정에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 냉각팬 4번의 고진동은 354Hz에서 발생하였다. 이 주파수는 모터 회전 주파수의 약 12의 배수이며 감속기 피니언 기어 이빨 수의 2배이다. 따라서 감속기 피니언 기어가 높은 진동에 크게 기여하였으며 기어 이빨 표면이 손상되었음을 확인하였다.

(2) 피니언 기어가 손상된 부위는 치면의 강도를 높이기 위해 열처리한 부분이다. 이는 13년간의 장기간 사용으로 인한 노화로 추정된다.

(3) 감속기 기어 수리후 진동은 수리전보다 약 60%로 감소되었다. 관리 기준보다 낮은 값에서 안정된 상태를 보였다. 그러나 다른 냉각팬보다 약 2배 높은 값을 보이므로 주기적인 관찰이 필요하다.

(4) 1번 냉각팬에서도 4번 냉각팬과 같이 비슷한 주파수에서 1.83 mm/s의 진동을 보이고 있으므로 고장에 대비하여 예비품이 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부가 주관하는 국가 원자력 연구개발 계획의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러 분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Park, Y. C. and Wu, J. S., 1996, "System Performance Test in HANARO," the Proceeding of

- the 5th ASRR Vol. 1, pp. 240-246.
- (2) Park, Y. C., 2000, "Cooling Tower Capability Test Procedure," Periodic Inspection Procedure, HANTAP-05-RS-ROP-PI-34, KAERI.
- (3) Park, Y. C., 1999, "Cooling Tower Inspection," Periodic Inspection Procedure, HANTAP-05-RS-ROP-PI-30, KAERI.
- (4) Park, Y. C., et al., 2000, "Evaluation for the Cooling Capability of Secondary Cooling Tower in HANARO," Proceeding of the KFMA Annual Meeting 2000, pp. 345~350.
- (5) Park, Y. C., et al., 2007, "The Results of a Site Repair after a High Vibration Trip of a Secondary Cooling Fan in HANARO," Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting.
- (6) Park, Y. C., et al., 2007, "Cooling Tower Overhaul of Secondary Cooling System in HANARO," Proceedings of the KSME 2007 Spring Meeting, pp.2714~2719.
- (7) PRUFTECHNIK, "VIBXPERT, FFT Data Collector & Signal Analyzer," Instruction Manual.
- (8) Park, Y. C., 2009, "Technical Specification for Repair of Cooling Tower in HANARO," HAN-SE-DD-SP-711-09-001, KAERI.
- (9) Marley, "Field Repair Instruction Manual of Series 22.2 & 22.3, Gear Reducer" p.7.