

하나로 2 차 냉각탑의 공장분해수리

박용철 † · 이용섭 * · 김양곤 ** · 정환성 *** · 임인철 ****

Cooling Tower Overhaul of Secondary Cooling System in HANARO

Young-Chul Park, Young-Sub Lee, Hoan-Sung Jung, In-Chul Lim

Key Words : HANARO (하나로), secondary cooling system (2 차 냉각계통), cooling tower (냉각탑), overhaul (공장분해수리), cooling fan (냉각팬)

Abstract

HANARO, an open-tank-in-pool type research reactor of 30 MWth power in Korea, has been operating normally since its initial criticality in February, 1995. For the last about ten years, A cooling tower of a secondary cooling system has been operated normally in HANARO. Last year, the cooling tower has been overhauled for preservative maintenance including fills, eliminators, wood support, water distribution system, motors, driving shafts, gear reducers, basements, blades and etc. This paper describes the results of the overhaul. As results, it is confirmed that the cooling tower maintains a good operability through a filed test. And a cooling capability will be tested when a wet bulb temperature is maintained about 28 °C in summer and the reactor is operated with the full power.

1. 서 론

30 MWth의 연구용 원자로인 하나로⁽¹⁾는 개방 수조형이며 1995 년 2 월에 초임계에 도달한 이후 정상적으로 운전되고 있다. 지난 10 여 년 동안 하나로 2 차 냉각계통의 냉각탑은 월간 점검⁽²⁾을 통하여 설치상태와 연간 냉각탑 성능시험⁽³⁾을 수행하여 냉각탑 성능이 설계요건을 만족하고 정상적으로 운전되고 있다⁽⁴⁾.

2 차 냉각탑은 콘크리트 구조물로 건조되어 있어 작년에 안전점검을 하고 부분 보수를 하여야 하므로 내장된 충전제 (fill)와 제수제 (eliminator)를 제거하여야 한다. 이 충전제는 2000 년도에 교체한 적이 있으나 많이 노화되어

금번 충전제 제거시 손상되는 것을 감안하여 새 것으로 교체하고 구동부는 공장에 입고하여 분해 수리를 하였다⁽⁵⁾.

본 논문에서는 공장 분해 수리한 내용과 그 결과에 대해 기술하였으며 본 논문은 냉각탑의 설계 요건, 공장분해수리와 구동부에 대한 시험결과로 구성되어 있다. 그리고 냉각탑의 성능은 전 출력으로 운전되고, 습구온도가 28 °C로 유지되는 하절기에 수행할 예정이다. 이러한 시험 결과는 향후 유지보수를 위한 기준자료를 제공하고 유사한 고장에 대한 수리방안의 참고자료로 활용될 것이다.

2. 본론

2.1 설계요건

하나로 노심에서 발생하는 열을 흡수한 1 차 냉각수는 열교환기를 지나면서 2 차 냉각수에 열을 전달한다. 열을 흡수한 2 차 냉각수는 그림 1 과 같이 냉각탑을 거치면서 대기에 열을 전달하여 노심의 열을 제거하고 재순환된다. 이 열은 28 MWth 이며 노심 외에도 반사체, 공기압축기 등 주변기기의 열과 여유를 포함하여 냉각탑의 용량은 33 MWth 로 정하였다. 냉각능력 여유는 약 2 MW 이며

† 회원, 한국원자력연구소

E-mail : ycpark@kaeri.re.kr

TEL: (042)868-8474 FAX: (042)862-1763

* 한국원자력연구소

** 한국원자력연구소

*** 한국원자력연구소

**** 한국원자력연구소

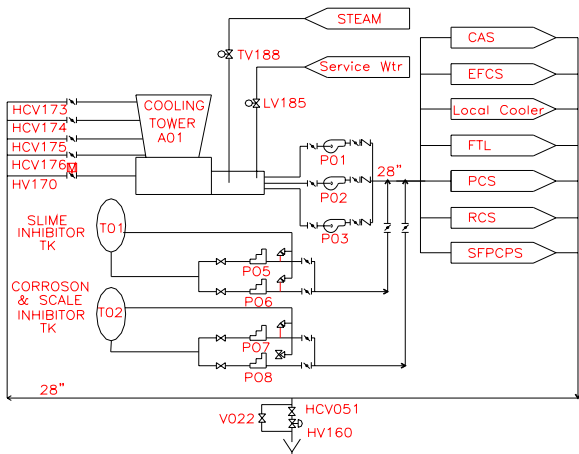


Figure 1 Flow diagram of secondary cooling system

전체 용량의 6%에 해당한다. 이 여유는 냉각탑의 중요성에 비교하면 크지 않으므로 냉각탑 성능이 보증되어야 하나를 안전하게 운전할 수 있다.

하나로 냉각탑은 4 개의 셀로 구성되어 있다. 열을 흡수한 냉각수는 각 셀의 분배장치로 유입되어 단말에 붙은 노즐에 의해 충전제에 고루 분배된다. 충전제는 유입된 물의 유로를 제공하여 강제로 통풍되는 공기와 교차하면서 열전달이 이루어 지도록 한다. 이때 40 °C의 냉각수 3600 m³/h 이 32 °C로 냉각되어 베이진에 모여 냉각펌프에 의해 재순환된다.

강제로 통풍되는 공기는 각 셀의 상부에 설치된 냉각팬에 의해 하부 측면 개구부로 유입되어 냉각수와 교차하여 열전달하고 상부에 있는 송풍구 (fan stack)로 배기된다. 냉각팬은 회전수를 고속 (1770 rpm)과 저속 (880 rpm)으로 조절할 수 있는 모터로부터 구동축을 거쳐 감속비가 1/6.5 인 감속기를 통해 고속과 저속으로 각각 회전한다. 냉각팬 회전시 진동이 유발되므로 진동으로 인한 더 큰 사고를 막기 위해 감속기에 진동 스위치가 달려 고진동시 고진동 고장 경보가 발생하고 자동으로 해당 냉각팬이 정지된다.

그리고 열을 흡수한 공기는 다수의 수분을 함유한 상태이므로 이 대로 대기로 배출되면 냉각수 손실을 유발하고 주변을 오염시킨다. 이를 방지하기 위해 제습제가 분배관 상부에 설치되어 있다. 수분을 함유한 공기가 제습제를 지나면서 수분이 응축되고 공기만 배출되어 주변오염을 방지한다.

2.2 공장분해수리

금번 수리는 제작사에서 다음과 같이 충전제 등의 교체와 구동부 분해수리를 하였다⁽⁵⁾.

- 1) 송풍구의 노후부품 수리

- 2) PVC 충전제 전량 교체
- 3) PVC 제습제 전량 교체
- 4) PVC 제습제와 충전제의 목재 지지대 전량 교체
- 5) 용수 분배장치 노즐 전량교체
- 6) 냉각팬 모터의 베어링 등 노후부품 교체
- 7) 전동축의 노후부품 교체
- 8) 기어 감속기의 베어링 등 노후부품 교체
- 9) 냉각팬 날개 정비
- 10) 기기 기초면의 노후부품 수리

2.2.1 송풍구

송풍구는 그림 2 와 같이 냉각탑 상부에 설치되어 냉각팬이 흡입한 공기를 대기로 보내기 위한 배기구이다. 이 송풍구의 옆 벽을 구동축이 관통하여 외부에 있는 모터로부터 감속기에 동력을 전달한다. 이 관통 틈새를 통해 외부공기가 유입되면 이 공기는 냉수와 교차하여 열전달이 이루어지지 않으므로 냉각수를 냉각하는 유효한 공기가 아니다. 따라서 금번 수리에서는 냉각효율을 높이기 위해 관통부위 틈새를 막고, 이음부분의 손상된 실링 (sealing)을 보완하였다.

2.2.2 충전제

충전제는 그림 3 과 같이 벌집모양으로 성형되어 있어 전열판을 따라 냉각수가 흐르고 그 공간을 따라 강제 순환되는 공기가 흘러 교차하면서 열전달이 이루어진다. 열전달이 잘 이루어지기 위해서는 공기와의 접촉면적이 커야 하므로 단위면적당 표면적이 클수록 열효율이 우수하다. 하나로에 사용한 모델은 KFILM-CF13/17/20 이며 두께 0.4 mm 의 PVC 소재로 성형하여 성형 후의 두께가 0.25 mm 이상을 유지하고 피치 17 mm 로 전열판이 접촉되어 있다.

성형 후 충전제의 실제 크기 (1821 mm x 1050 mm x H 524 mm) 대로 접촉하여 충전제 블록을 제작하고 내역시험을 하였다. 이 시험방법은 성형

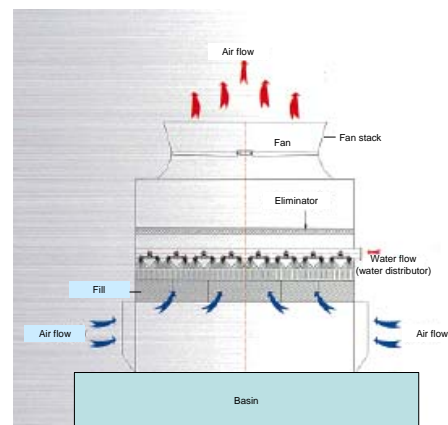


Figure 2 Cooling tower flow diagram

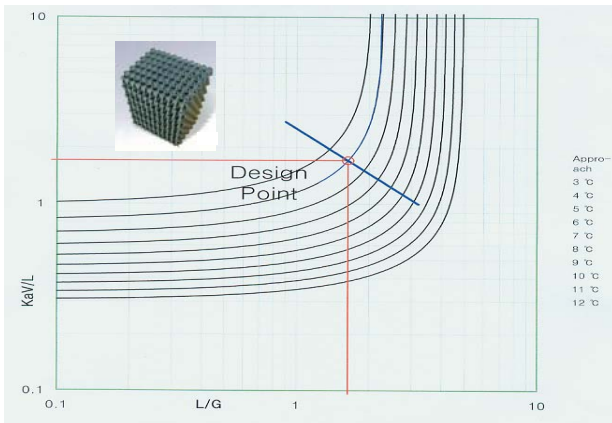


Figure 3 Characteristic curve of cooling tower

후 온도 60 °C에서 100 kgf/m²의 하중을 걸어 30 분간 유지하여 기준치인 25 mm 이상의 처짐과 비틀림을 점검하였다⁶⁾. 모두 건전한 것으로 판단되어 내구성이 확인된 상태에서 동일 방식으로 220 개의 블록을 제작하였다.

이러한 블록은 현장에서 제작하여 운반중의 손상을 최소화하여야 하나, 접착제가 인화성 물질이고 동절기라 화재의 위험이 있어 공장에서 제작하여 현장에 설치하였다. 특히 설치 후 블록의 간격은 1 cm 이내로 유지하여 이 틈새로 다량의 공기나 물이 흘러가지 않도록 하여 열교환이 잘 이루어지도록 하였다.

그림에서 충진제의 냉각능력 특성곡선을 보여주고 있다. 설계조건에서 냉각탑 특성 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$KaV / L = 2.532 \times (L / G)^{-0.8}$$

냉각탑 특성값 (KaV/L)은 냉각수 (L)와 공기 (G)의 비로 표시하며 설계조건에서 KaV/L 및 L/G는 각각 1.708 및 1.636 이다⁷⁾. 이는 냉각탑 성능시험시 활용될 예정이며 냉각능력을 판단하는 관계식이다.

2.2.3 제습제

제습제는 분배관 상부의 냉각팬 아래에 설치되어 냉각수와 열교환된 더운 공기가 제습제를 지나면서 응축되어 공기만 배출된다. 하나로에 사용한 모델은 그림 4 와 같이 KEL-15C/10C 이며 이 손실은 총순환 유량의 0.002%이내로 제한하고 있다. 제작 및 설치 방법은 충진제와 동일하며 크기는 600 mm x 1830 mm x H146 mm 이고 피치가 38.1 mm 이다. 총 200 개의 블록이 설치되어 있다.

그리고 충진제와 제습제가 처지지 않도록 하기 위해 바닥에 목재 지지대를 깔고 그 위에 충진제와 제습제가 설치된다. 이 목재는 박달나무 (Douglas fir)를 수입하여 옹이, 갈라짐, 뒤틀림 등이 없는 것을 선별하였다. 방부방식은 목재가

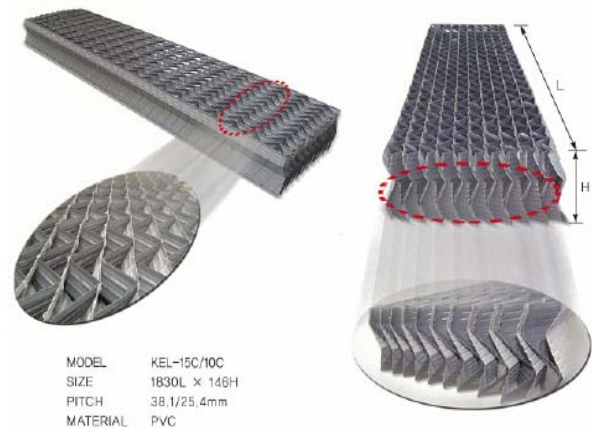


Figure 4 View of eliminator

압식 방부처리법을 적용하여 방부제의 주입 압력은 10 kgf/cm² 이상이다. 사용한 방부제는 규정에 적합한 친환경 약제 (CCA-3)를 사용하였다⁶⁾.

2.2.4 PVC 용수 분배장치

열을 흡수한 냉각수가 냉각탑으로 되돌아 오면 열교환이 잘 되도록 냉각수를 고루 분배하기 위해 분배장치가 설치된다. 이 장치는 제습제와 충진제 사이에 스프링클러설비처럼 1/100 구배의 분배망을 형성하고 각 단말에 분사노즐이 달려 있다. 이 노즐은 냉각수에 소용돌이를 일으켜 충진제에 고루 분배해 준다.

하나로에 사용된 분사 노즐은 그림 5 와 같이 KSN-NS5 모델이며 1.2 m 수두에서 8.5 m³/h 이상의 유량이 분사된다. 이 노즐이 손상되는 경우 냉각수가 집중 폭우처럼 쏟아지므로 충진제가 파이는 등 손상되고, 냉각수가 충진제에 고루 분사되지 못하여 열전달 효율이 저하되므로 전량 교체하였다.



Figure 5 Water distributor nozzles

2.2.5 냉각팬 모터

냉각팬 모터는 냉각팬을 회전시키기 위해 37 KW의 동력을 공급하는 장치로서 변속장치에 의해 1770 rpm과 880 rpm의 고속과 저속회전이 가능하다. 모터 진동의 주요 원인은 베어링이며 이 베어링은 1995년도 정상 가동 후 10년 이상 사용한 것이므로 새 것으로 교체하였다. 공장에서 시험 결과는 표 1과 같이 설계 기준을 만족하였다.

2.2.6 구동축

모터와 감속기를 연결하는 구동축은 양쪽 모두 고무 부싱이 들어 있는 커플링 플랜지로 연결되므로 축 연결의 유연성을 가진다. 하나의 구동축 모델은 Malley series 175 twinflex drive shaft이다. 구동축은 균일하게 회전할 수 있도록 무게 균형시험을 하였다. 이 시험은 G6.4를 기준하고 불균형량은 10 gr-rad 이내로 조정하였다. 조절 결과는 표 2와 같으며 기준요건을 모두 만족하고 무게균형을 이루고 있다.

2.2.7 기어 감속기

기어 감속기는 모터의 회전수를 1/6.5로 감속하여 냉각팬에 전달한다. 동력의 전달과정은 피니언 기어가 수평으로 전달되는 동력을 받아 같이 물리는 베벨기어에 전달하여 수직방향으로 회전력이 전달된다. 베벨기어의 수직축 다른 끝에는 냉각팬이 부착되어 있어 날개가 수평방향으로 회전한다. 피니언 기어와 베벨기어의 이빨수는 6개와 39개로 구성되어 감속비를 만족한다. 피니언 기어와 베벨기어에 각각의 축을 지지하기 위한 베어링과 오일 리테이너가 있으며 이들을 전량 교체하였다. 각 기어의 이빨면을 조사하였을 때 4번 냉각팬의 피니언 기어 이빨면이 그림 6과 같이 손상되어 있음을 발견하였다. 이 피니언 기어는 모터와 동일한 회전을 하므로 기어표면이 잘 마모되지 않도록 열처리 되어 있으나 금번 분해시 여러 곳에서 표면이 손상된 것이 발견되었다. 손상원인은 발견하지 못하였으나 노화로 인한 것으로 추정된다. 이러한 표면은 면접촉을 불안정하게 하여 진동을 유발하고, 이 표면이 손상되면 내면은 더 쉽게 마모될 수 있다. 그러나 현재의 상태는 심하지 않으므로 예비품을 확보하여 교체할 예정이다.



Figure 6 Damage of pinion gear surface

Table 1 Motor repair results

Fan	Criteria	#1	#2	#3	#4
Motor serial NO.		902202-001	902202-002	902202-003	902202-004
Noise (dB)	85	83	83.5	83	83.2
Vibration (μm)	50.8	1.9	3.1	3.2	3.1
Revolution (rpm)	1770/880	1776/885	1776/885	1776/885	1776/885
Temp. °C-4hr	75	72	71	71	71
Insul'n resist.(MΩ)	800	800	800	800	800
Bearing NO.	6311/6313	replaced			

Table 2 Weight balance test results of drive shafts

Drive shaft (gr-rad)		Before repair	After repair
#1	Right	9.4@269°	2.237@183°
	Left	34.873@168°	6.627@306°
#2	Right	23.106@325°	3.266@347°
	Left	27.95@328°	1.686@311°
#3	Right	47.583@217°	0.505@263°
	Left	33.283@44°	5.049@147°
#4	Right	14.96@198°	1.501@54°
	Left	82.212@138°	1.716@122°

Table 3 Test results of gear reducer after repair

Gear reducer	Criteria	#1	#2	#3	#4	
Input rpm	1770	1750	1750	1750	1750	
Output rpm	272.3	269.2	269.2	269.2	269.2	
Noise dB)	<84	80/78	79/78	84/82	82/80	
Vibration (mm/s)	Hor.	<3	0.69	0.69	0.69	0.69
	Ver.		0.70	0.68	0.72	0.72
	Axi.		0.69	0.68	0.70	0.70
Temperature	<80°C	33~37	33~38	32~38	33~39	
Contact surface	0.15~0.51	0.32	0.45	0.5	0.43	
Bearing	Replaced Pinion: 34306/34500+HM813844/HM813810, Bevel gear: 6277/6220+526/522					

수리 후 감속기 오일 ISO VG220)을 주입하여 표 3에 나타낸 바와 같이 감속비, 소음, 진동 및 온도 등 구동시험을 하였다. 이 시험은 무부하 상태에서 요구 회전수를 얻기 위해 15 kW의 시험모터가 사용되었다. 그리고 치차면의 접촉상태에 대해

Table 4 Weight balance test results of blade

Blade NO.	1	2	3	4	5	6
Fan 1	0	161	0	0	0	0
Fan 2	0	110	195	0	0	15
Fan 3	0	0	91	0	0	33
Fan 4	0	0	0	130	12	0

조사한 결과는 표에서와 같이 모두 설계기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

2.2.8 냉각팬 날개

하나로 냉각탑의 냉각팬 날개는 총 6 개이며 당 초에는 FRP 로 제작되었으나 약품처리된 냉각수와 날개 표면의 공기와의 마찰로 인하여 표면이 거칠 어지는 현상이 발견되어 알루미늄 (AL6063) 재질 로 교체하였다. 이 날개는 약 5 년간 사용해 왔으 며 날개이면에는 이끼 등의 이물질이 발견되어 제 거하였다.

날개의 무게 불균형 상태를 확인하기 위해 무 게 균형시험을 하였다. 시험 방식은 날개 전체를 허브에 고정하여 수평축에 붙여 시계방향으로 회 전하다가 정지할 때의 역회전이 5 도 미만일 때 무게 균형이 유지되는 것으로 간주한다. 이를 만 족하기 위해 각 날개에 부착된 불균형량은 표 4 에 나타낸 바와 같으며 이를 조정하였을 때 기준 요건을 만족하였다.

그리고 날개 각도는 풍량과 관계되어 모터의 동력과 냉각탑 성능과 관계되므로 수리 전과 동일 하게 6 도로 조정하였다. 이는 풍량이 많으면 냉 각 성능이 향상되나 모터의 부하가 증가하므로 지 나치게 크게 하면 모터에 과부하가 걸린다. 설치 당시에는 5 도를 기준하여 설치하였으나 냉각효율 을 향상시키기 위해 6 도로 조정한 것이므로 수리 전의 성능과 비교하기 위해 동일 각도로 조정하였 다.

2.2.9 기기 기초면의 보수

기기 기초면은 공통베드로 제작되어 그 위에 모터와 감속기가 각각 설치된다. 공통베드는 탄소 강에 아연도금을 하여 부식을 방지 하고 있으나 모터와 감속기가 설치되는 접촉면은 기계가공된 것이므로 부식되어 있었다. 금번 수리에서는 부식 된 면을 제거하고 철판을 보강하여 기계가공으로 수평을 유지하였다. 그리고 나머지 부분은 다시 도금하여 부식을 방지하였다.

2.3 구동부 시험

그림 7 에서 10 은 현장 설치 후 냉각팬 구동모 터의 진동상태를 나타내고 있다. 수리 전후와 비 교하여 관정 기준치 8 mm/s 를 한계치로 하여 나

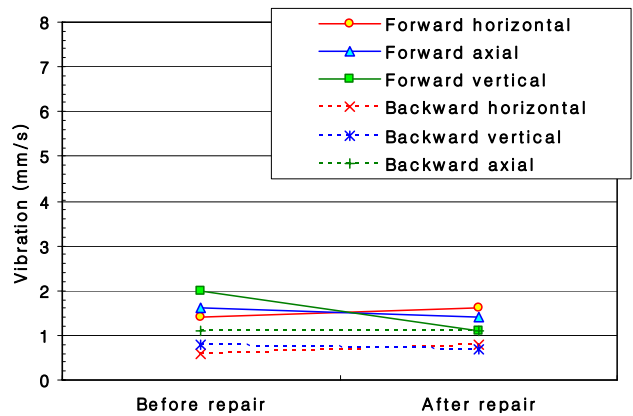


Figure 7 Vibration of motor NO. 1

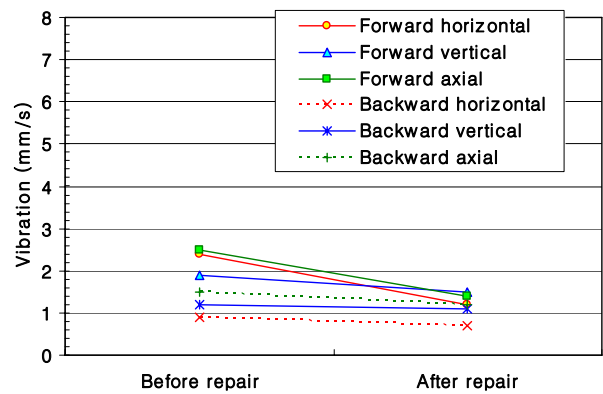


Figure 8 Vibration of motor NO. 2

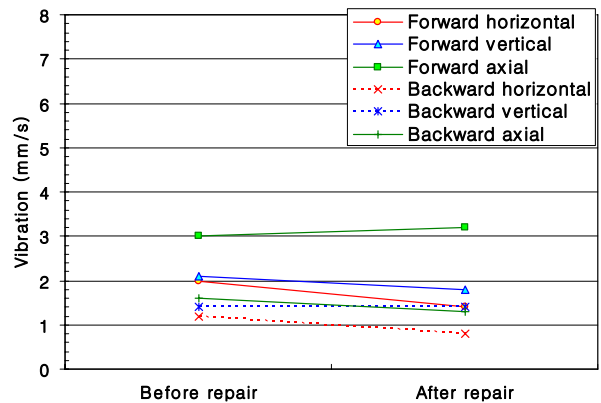


Figure 9 Vibration of motor NO. 3

타내었으며 점검 결과는 관정기준치를 만족하고 수리 전보다 양호한 상태를 보이고 있다.

그림 11 은 현장설치 후 냉각팬 감속기의 진동 상태를 나타내기 위해 모터와 동일한 방식으로 수 리 전후와 비교하여 나타내었다. 설치자의 착오로 3 번과 4 번의 감속기가 바뀌었으므로 그림에서도 수리전의 진동값을 바꿔 감속기를 기준으로 진동 값을 표시하였다. 감속기 4 번을 제외한 감속기들 은 설계 기준을 만족하고 수리전보다 개선되었음 을 보이고 있다.

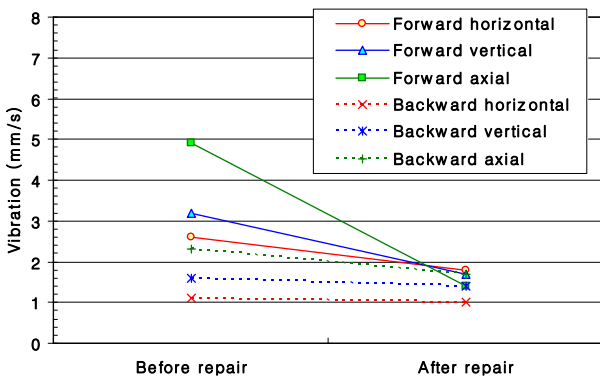


Figure 10 Vibration of motor NO. 4

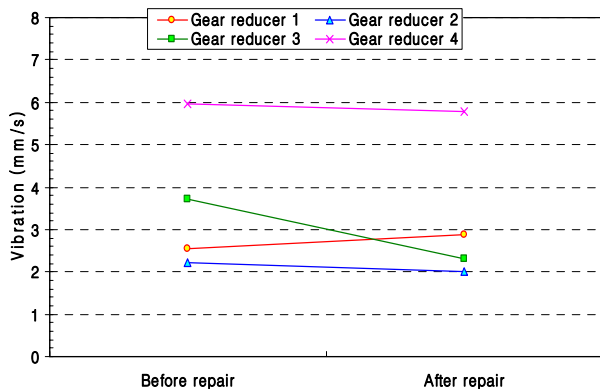


Figure 11 Vibration of gear reducer

그러나 4 번 감속기의 진동은 기준치를 만족하지만 여전히 다른 것보다 높게 나타내고 있으므로 주기점검시 주의 깊게 관찰하여 교체 시점을 정할 예정이다. 이 감속기의 진동을 4 번 모터와 비교할 때 모터는 낮은 진동값을 보이고 있으므로 감속기의 진동이 모터에는 전달되지 않는 것으로 판단된다. 이는 구동축의 플렌지 커플링이 고무부싱으로 연결되어 있어 각각의 진동이 차단되는 것으로 판단된다. 또한 이 부싱은 측정렬이 이탈될 때 제일 먼저 고무 부싱이 손상되므로 이 부싱을 보면 측정렬 상태를 예측할 수 있다.

3. 결론

하나로 냉각탑을 공장 분해수리하여 현장에 설치하고, 가동상태를 점검하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 송풍구의 공기누설 부분을 실링하여 누설량을 최소화하였으므로 냉각탑 성능이 향상 될 것으로 추정된다.
- 2) 노화된 충진제를 전량 교체하고 충진제의 특성 곡선을 구하였으며 향후 냉각탑 성능시험에 적용할 예정이다.
- 3) 노화된 제습제와 분배관의 노즐을 전량 교체하여 냉각수가 고루 분포되도록 하였으며 열교환 효율이 상승할 것으로 추정된다.
- 4) 모터의 노화된 베어링을 교체하였으며 교체 후의 진동상태는 설계기준을 만족하고 수리 전 보다 향상되었다.
- 5) 구동축 및 날개의 무게균형을 재 조정하였으며 모두 설계요건을 만족하였다.
- 6) 감속기의 베어링을 교체하였으며 4 번 감속기를 제외한 나머지는 교체 후의 진동상태가 설계기준을 만족하고 수리 전보다 향상되었다.
- 7) 4 번 감속기는 피니언 기어의 표면이 많이 손상된 상태가 발견되었으며 이로 인하여 진동값이 상승됨을 확인하였다.
- 8) 감속기 4 번의 진동이 설계기준치를 만족하나 높은 상태이므로 수리할 예정이다.

참고문헌

- (1) Y. C., Park, J. S., Wu, 1996, "System Performance Test in HANARO," the Proceeding of the 5th ASRR Vol. 1, pp. 240-246.
- (2) Y. C., Park, 1999, "Cooling Tower Inspection," Periodic Inspection Procedure, KAERI, HANTAP-05-OD-ROP-PI-30.
- (3) Y. C., Park, 2000, "Cooling Tower Performance Test," Periodic Inspection Procedure, KAERI, HANTAP-05-OD-ROP-PI-34.
- (4) Y. C., Park, 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) Y. C., Park, 2006, "Technical Specification for Cooling Tower Overhaul in HANARO," KAERI, HAN-DD-SP-711-06-016.
- (6) KARSE, 1996, "Mechanical Draft Cooling Tower," Standard, B 0003
- (7) CTI, 1988 "Comparative Evaluation of Counter flow Cooling Tower Fills," TP-88-05.