

T/G Gear Box의 파손원인조사

심 종 성*

1. 서언

본 학회에서는 1991년 3월, 국내에서 현재 가동 중인 열병합발전소내에서 발생한 Turbine과 Generator(T/G)를 연결하는 gear box(사진 1.2)의 파손원인을 규명해내는 연구용역을 의뢰받았다. 연구용역을 의뢰받게 된 배경은 열병합발전소의 가동을 중단해야만 하는 심각한 문제에 대한 책임소재를 밝히기 위한 것이었다. 즉, Gear box의 파손원인이 “국내기술에 의해 완성된 진동기초의 설계오류 또는 시공결함에 의한 것인지?” 또는 “외국기계제작회사에서 납품한 기계자체의 문제인지?”를 규명하기 위함이었다. 이 문제는 양자가 서로의 의견을 강력히 주장할 수 밖에 없었으며, 따라서 학회가 제3자의 입장에서 면밀한 검토를 통하여 진단결과를 제출하게 되었다.

본 연구를 수행하기 위한 연구비는 천사백만원(학회 overhead 3%)이었으며, 연구에 참여하게된 학회회원은 한양대학교의 조효남 교수, 이희현 강사 및 필자 그리고 한국과학기술원의 이동근 교수로 구성되었다.

2. 연구진행

발생된 문제에 대한 해결을 위하여, 본 연구진이 계획한 연구방법은 우선 양자가 서로 의견을

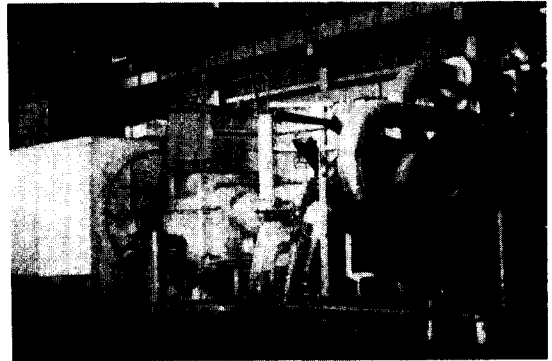


사진 1. 문제가 된 gear box 전경

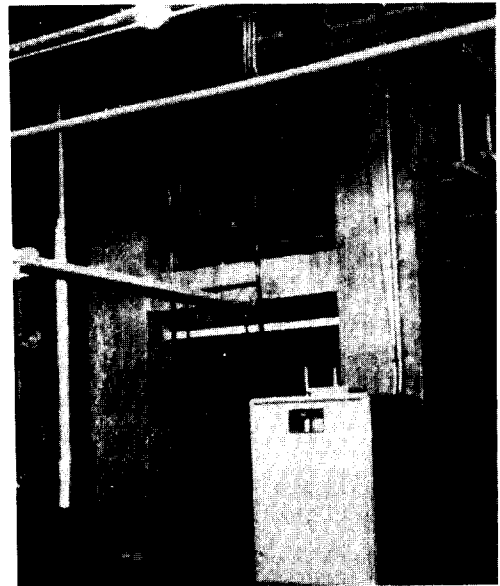


사진 2. T/G 기계진동기초전경

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수

표 1. 기존 구조계산서의 비교결과 요약

항 목	구조물설계회사	기계제작회사
구조 해석 모델	상부구조물과 바닥매트로 분리하여 해석. 상부구조물은 보요소로 구성된 3차원 구조물로 모형화하고, 바닥매트는 3차원 solid요소로 모형화하여 해석.	전체 구조물을 보요소로 구성된 3차원 구조물로 모형화하여 해석.
지 반 탄 성	상부구조물은 지반에 완전히 고정된 것으로 간주하였으며, 바닥매트는 탄성 지반상에 놓인 것으로 간주하여 지반과 접하는 절점에 지반 탄성을 고려한 3방향 병진 스프링 부여	지반과 접하는 바닥매트를 하나의 보요소로 모델링하고, 이 요소에 지반 탄성을 고려한 수평, 수직 및 종방향 회전 스프링 부여.
콘 크 리 트 물 성	$E_c=3.41 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $G_c=1.46 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$E_c=3.6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ $G_c=1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
감 쇠 비	콘크리트: $\xi=0.06$	콘크리트: $\xi=0.015$ 지 반: $\xi=0.5$ (수직) $\xi=0.3$ (횡방향) $\xi=0.05$ (종방향 로킹)
동 적 하 중	Generator와 Turbine의 동적 불평형력	Generator의 Turbine의 동적 불평형력
최 대 진 동 변 위	0.00187mm(종방향) 0.00708mm(횡방향) 0.00558mm(수 직)	0.0408mm(종방향) 0.0197mm(횡방향) 0.0278mm(수 직)
최 대 진 동 속 도	$v=1.264\text{mm/s}$ (수직방향) 공진가능성이 없는 under tuned structure	$v=11\text{mm/s}$ 이상(기동 중양) 공진가능성 시사 (1990년 가을에 측정된 값과 유사하다고 주장함)
고 유 진 동 수	상부구조물(수직: 36.08 Hz, 횡: 6.87 Hz, 종: 5.87 Hz) 바닥매트(수직: 10.65 Hz, 횡: 6.37 Hz, 종: 8.52 Hz)	확인 안됨

달리하고 있는 구조물설계회사의 구조계산서 및 기계제작회사의 구조물에 대한 의견서의 내용을 비교·검토한 후, 차이점을 도출하고 문제점을 해결하기 위하여 현장에서 측정을 통하여 얻은 각종 data를 근거로 한 구조해석을 다시 수행함으로써, gear box부근에서 허용치 이상의 상대변위가 발생하는가의 여부를 조사하는 것으로 하였다.

2.1 기존 구조계산서의 검토

진동기계기초 구조물 설계시 사용한 구조해석 모델과 입력변수 그리고 해석결과를 요약하면 표 1과 같으며, gear box가 파손되었던 문제 발생 후 기계제작회사에서의 이에 대한 검토를 위하여 수행한 구조해석모델, 입력변수 및 구조해석결과는 표 1에 비교되어 서술되었다.

2.2 현장조사

표 1에서 비교하여 도시된 바와 같이 구조물 설계회사와 기계제작회사의 진동기계기초의 동적 구조해석을 위한 각종 입력변수(지반의 물성, 콘크리트물성, 감쇠비 등)는 서로 상이하나, 양자 모두가 그들이 선택한 참고문헌을 근거로 하고 있어, 본 연구에서는 현장실측 및 시험을 통한 결과를 근거로 구조해석을 다시 수행하는 것으로 계획하였다.

현장에서 측정은 지반조사, 구조물의 치수측정, 비파괴시험, 기계 정지시 추를 이용한 충격시험 및 기계 가동시 동적거동측정으로 나누어 실시하였다. 지반조사는 탄성파를 이용하여 지반의 동특성을 조사하여 이 값을 구조해석시 반영하고자 하기 위함이며, 구조물의 개략적인 치수 측정은 구조물이 설계도면에 따라 시공되었는지 확인하고 아울러 기계 가동중 구조물에 이상 변위가 발생했는지의 여부를 확인하기 위해 실시하였다. 콘크리트 물성 파악을 위한 비파괴시험에서는

초음파 탐사와 슈미트 햄머에 의한 콘크리트의 압축강도, profometer에 의한 철근배치상황 및 균열폭과 균열깊이 등을 조사하였다. 시험측정은 기계 정지시의 충격시험과 기계 가동시의 동적저동측정으로 나누어 실시하였는데, 충격시험에서는 무거운 추를 구조물에 충격시켜 그때 발생하는 3방향 자유진동을 측정하여 FFT 분석기를 이용하여 시간영역 또는 진동수 영역에서 구조물의 고유진동수와 감쇄비를 추정하였고, 동적시험에서는 기계 가동중 구조물의 3방향 정상상태진동을 측정하였다. 이때 측정시 야기될 수 있는 오차를 가급적 줄이기 위하여 측정기의 위치를 2회이상 바꾸면서 측정하였다.



사진 3. T/G 기계진동기초의 비파괴 시험 광경

2.3 현장 측정 결과 요약

• 지반의 물성: T/G 기계진동기초의 지반에 의한 물성을 조사하기 위하여 실시한 boring 결과는 지표면으로부터 매립토층, 세립토 및 조립토 등으로 구성된 퇴적토층, 풍화암층 및 기반암으로 구성되어 있었으며, 기초의 영향을 미치는 지반의 동적특성은 P-wave 및 S-wave를 이용하여 산정하였다.

• 구조물의 물성: 철근위치 및 콘크리트의 물성을 파악하기 위하여서는 비파괴 시험(사진 3)을 이용한 복합강도 추정법을 이용하였으며, 이들 결과를 요약하면 표 2, 3과 같다. Schmidt hammer와 초음파 탐사를 실시한 결과에 의하여 추정된 콘크리트의 압축강도는 설계기준강도인 240kg/cm²보다도 다소 낮음을 알 수 있었다.

• 구조물의 형상: 기계 가동중 구조물에 이상변위가 발생했는지 여부를 확인하고 시공정밀도를 측정하기 위하여 현장에서 측량이 가능한 기둥에 대하여 트랜스 측량을 실시하였다(사진 4). 트랜스 측량 결과 기둥 C₆는 약 3.1cm 좌측으로, 기둥 C₁은 1.7cm 우측으로 경사져 있음을 알 수 있었는데, 이러한 변위는 최초 구조물 시공시 발생된 시공오차인 것으로 판단되나, 확인할 수는 없었다.

• 자유진동: 구조물의 고유진동수 및 감쇄비를 실측하기 위하여 사진 5와 같이 지상에서 약 5.7m되는 점에 콘크리트 블록(0.4×0.6×1.3m)을 이용하여 충격을 가함으로써 자유진동을 측정하였다. 측정된 변위 및 가속도 이력곡선은 그림 1과 같으며, 측정된 신호는 filtering 한 후, 변위신호는 시간영역에서 처리하고, 가속도 신호는 FFT (Fast Fourier Transform) 분석기에 의해 그림

표 2. Schmidt Hammer에 의한 콘크리트강도 추정 결과(kg/cm²)

position	average restitution value	compressive strength before correction	correction coefficient with age	compressive strength
G ₁	38	310	0.67	207.7
G ₂	37	297	0.67	199.0
G ₄	36	284	0.67	190.3
G ₃	39	323	0.67	216.4

표 3. 초음파 탐사에 의한 콘크리트강도 추정 결과(kg/cm²)

position	Pulse velocity(km/s)	average restitution value	compressive strength	remarks
C5	3.92	41	209.3	direct method
C3	3.94	39	202.2	direct method
MG7	3.93	41	211.2	direct method



사진 4. 구조물의 이상변위 확인을 위한 트랜시트 측량 광경

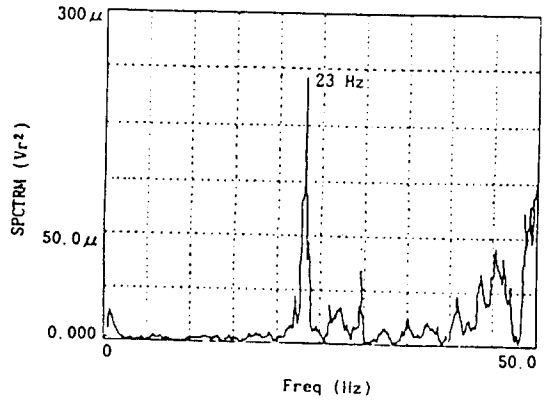


그림 2. 가속도 신호의 spectra

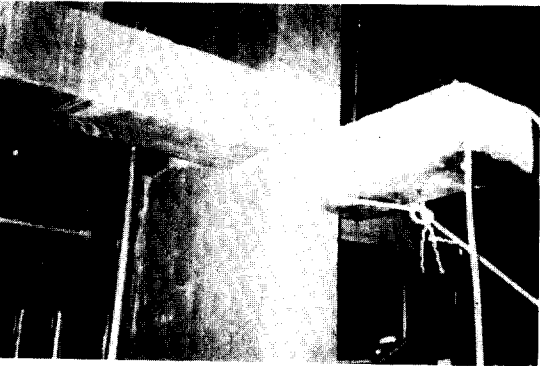
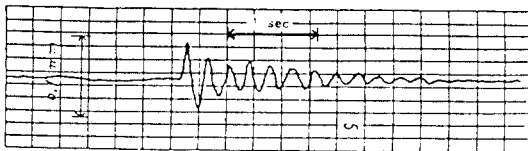


사진 5. 자유진동을 측정하기 위한 추의 타격 광경



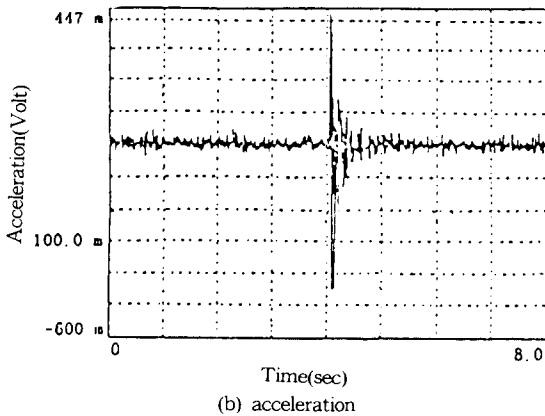
(a) longitudinal displacement

2와 같이 진동수 영역에서 처리되었다.

• 정상상태진동 : 그림 3에 표시된 위치에서 기계가동시 측정된 구조물과 기계의 정상상태진동 및 기계제동시 진동 이력곡선의 대표적인 예는 그림 4, 5와 같다(사진 6). 그림 4를 살펴보면 측정점 2, 3에서 기계진동진폭과 구조물의 진동진폭은 거의 유사함을 알 수 있는데 이로부터 구조물과 기계는 일체가 되어 진동하는 것으로 판단되므로 앵카볼트의 조임상태는 양호할 것으로 추측된다.

한편 그림 2로부터 기계 제동시 순간적인 과도한 하중이 작용하여 100% 기계 가동시 보다 매우 큰 진동이 발생하는 것을 알 수 있다. 표 6.은 100% 기계 가동시 및 기계 제동시 측정된 최대 처짐을 나타낸다.

본 연구에서는 지반탄성의 영향을 고려함과 동시에 구조물과 하중의 실제상황을 제대로 반영

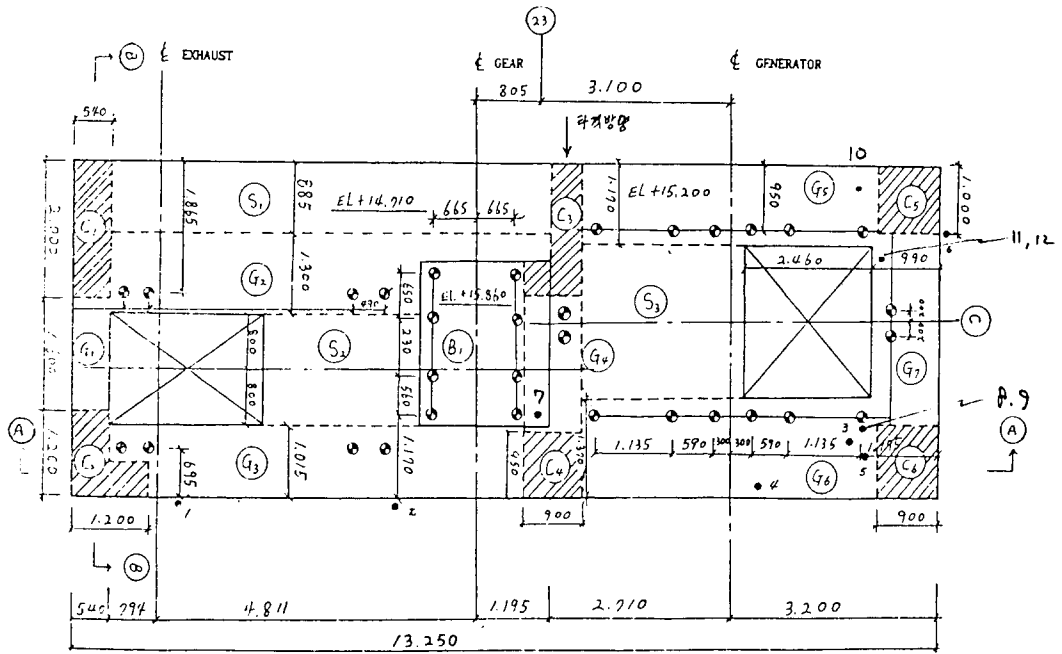


(b) acceleration

그림 1. 자유진동의 변위 및 가속도 이력곡선



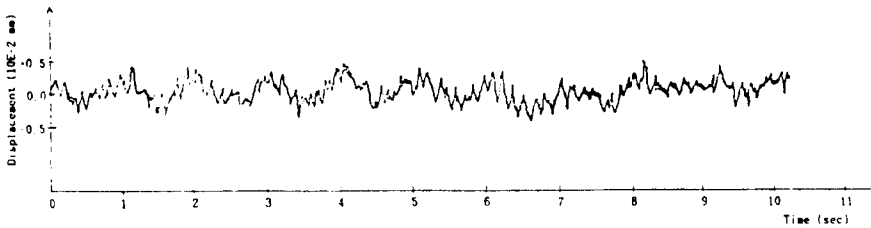
사진 6. 정상상태의 구조거동을 측정하는 광경



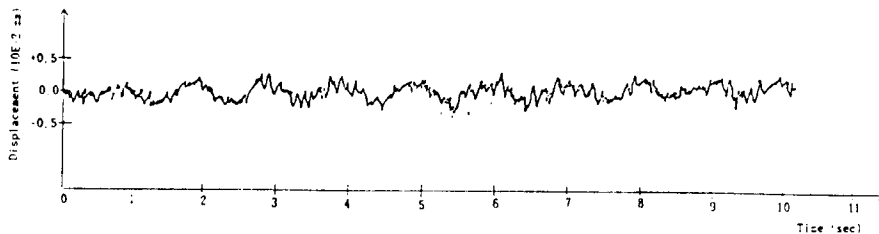
측점 1,2,3: 자유진동에 대한 횡방향변위 및 가속도
 측점 4: 자유진동에 대한 수직방향변위 및 가속도
 측점 5,6: 자유진동에 대한 종방향 변위 및 가속도
 측점 7,9: 정상상태진동에 대한 횡 방향 변위

측점 8: 정상상태진동에 대한 기계의 횡방향 변위
 측점 10: 정상상태진동에 대한 수직방향 변위
 측점 11,12: 정상상태진동에 대한 종방향 변위

그림 3. 자유진동과 정상상태진동 측정을 위한 측정



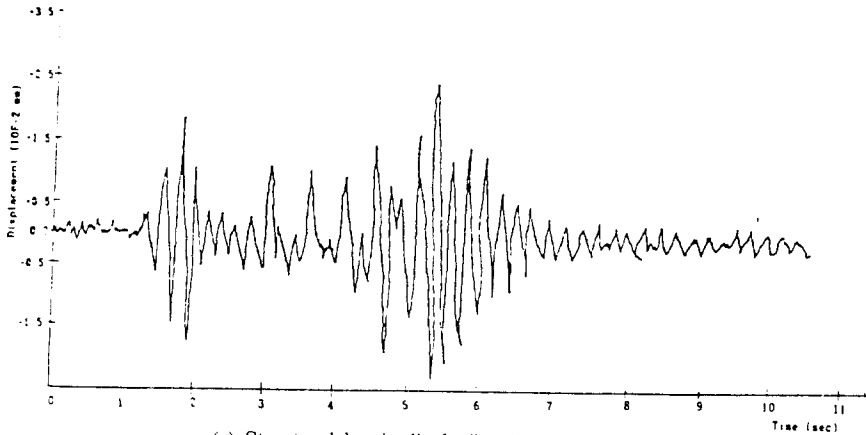
(a) Machine vibration at point 2



(b) Structure vibration at point 3

(a) 측정 2에서의 기계의 진동
 (b) 측정 3에서의 구조물의 진동

그림 4. 종방향에 따른 정상상태진동



(a) Structural longitudinal vibration at point 6

그림 5. 축점 6에서 기계제동시 증방향 진동

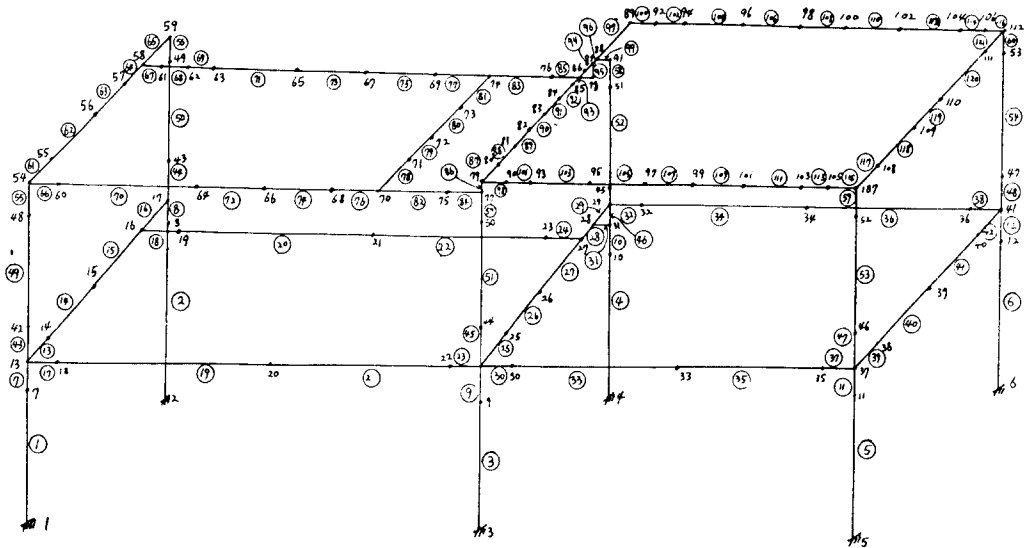


그림 6. 구조물설계회사가 사용한 구조해석모형

하기 위하여 그림 8과 같은 구조해석 모형을 사용하였다. 그림 6과 8의 주된 차이점은 바닥매트를 플레이트 요소로 모델링하여 상하부 구조물이 함께 해석되도록 하였으며 최상부에서의 높이차를 제거했다는 것이다.

본 해석에서는 콘크리트의 탄성계수를 계산하기 위한 설계기준 강도는 비파괴시험에서 얻어지는 결과를 활용하였고, 지반탄성의 영향을 고려하기 위해서는 지반조사 자료를 활용하였다. 표 4는 본 연구대상 구조물의 진동해석을 위한 자료를 정리한 것이다. 표 4에서 콘크리트 압축강도는 여러부위에서 측정된 강도의 평균치이며 지반

특성자료는 측정자료중 지표면에서 약 7m되는 곳에서의 값이다. 한편 구조물의 동적해석시 콘크리트 동탄성계수를 사용하였는데 동탄성계수는 영국시방서에서 제안하고 있는 공식을 사용하였다.

• 고유치해석결과

표 5는 그림 8의 구조해석모형을 범용 구조해석 모형을 범용 구조해석 software인 GT-STRUDL을 이용하여 본 연구대상 구조물의 고유치 해석을 수행한 결과 얻어진 구조물의 첫번째 10개모드의 고유 진동수이다. 이러한 고유진동수를 표 6의 현장측정치와 비교해 볼때 두값은 유사함을 알

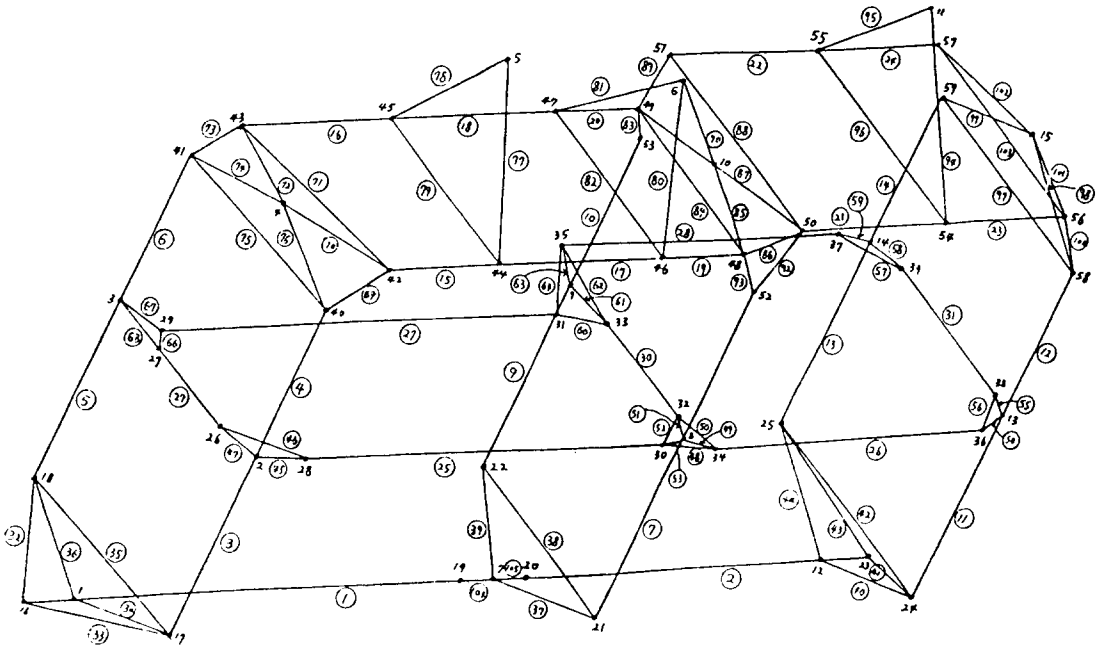


그림 7. 기계제작회사가 사용한 구조해석모형

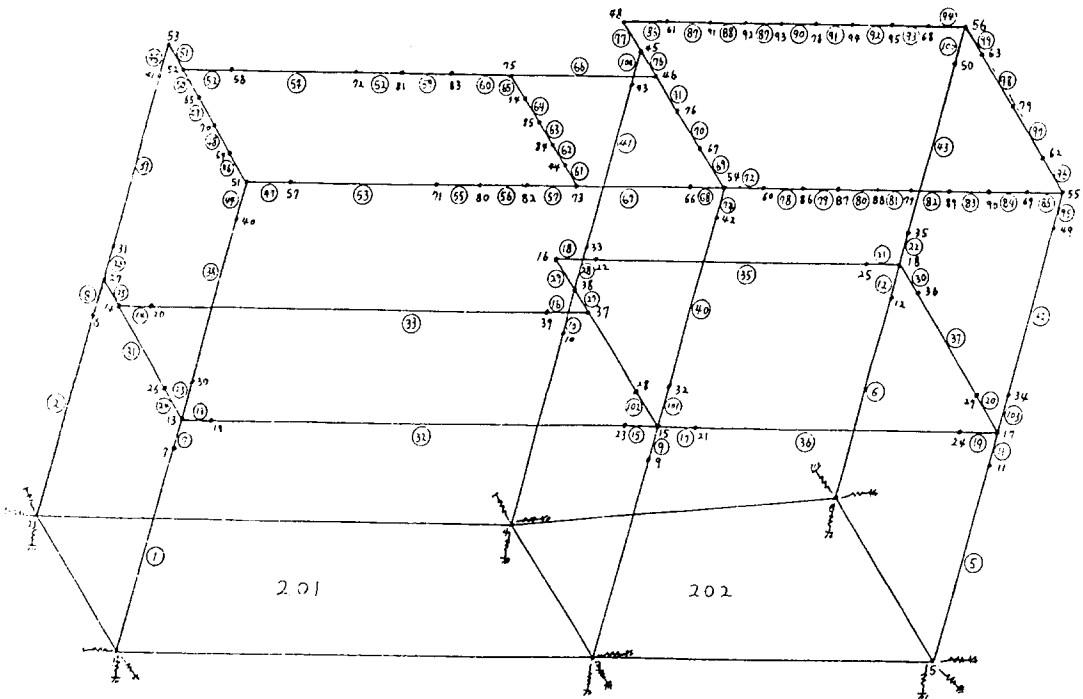


그림 8. 본 연구구역에서 사용한 구조해석모형

표 4. 비파괴시험과 지반시험에서 얻어진 입력변수

Concrete strength (kg/cm ²)	dynamic shear modulus of soil (kg/cm ²)	poisson ratio of soil	unit weight of soil (t/m ³)
205	10,900	0.38	1.743

표 5. 계산된 고유진동수(Hz)

mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
natural frequency	3.65	4.52	7.21	7.76	10.67	14.16	16.5	17.71	20.22	23.13

표6. 측정된 최대 변위(mm)

	transverse	longitudinal	vertical
at operation	0.0017	0.0017	0.00087
at shut down	-	0.022	0.0017

수 있으며 따라서 본 연구에서 채택한 구조해석 모형의 타당성을 확인 할 수 있다.

계산된 10개의 모드로 부터 판단해 볼 때 첫번째 모드는 다른 모드에 비해 구조물의 횡방향 진동이 다른 방향진동에 비해 크고, 두번째 모드는 종방향 진동이 그리고 일곱번째 모드는 수직방향진동이 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 첫번째 모드는 횡방향진동 모드, 두번째 모드는 종방향 그리고 일곱번째 모드는 수직방향진동 모드임을 알 수 있었다. 그림 9~11에 진동모드를 도시했다.

• 정상상태 진동해석 결과

본 연구에서는 gear box 부위의 파손원인을 규명하기 위하여 Generator와 Turbine 동적 불평형력에 의해 gear box 주위의 절점들에 발생하는 동적변위 이력곡선을 그려 보았다. 그림 12은 Gear Box 부위의 마주보는 절점들에 대한 상대 변위이력곡선의 일례를 보여 준다. 상대 변위 이력 곡선들로 부터 최대 상대변위를 구한 결과 0.0009mm임을 알 수 있었다. 따라서 Gear Box 부위의 절점들에 대한 상대변위로 인한 구조상 문제는 없는 것으로 사료된다. 한편 그림 3에 표시된 측정절점에서의 최대변위를 구조해석에 의한 결과와 비교하면 표 7과 같다.

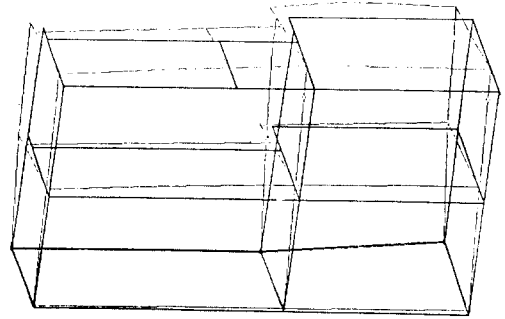


그림 9. 진동 mode 1

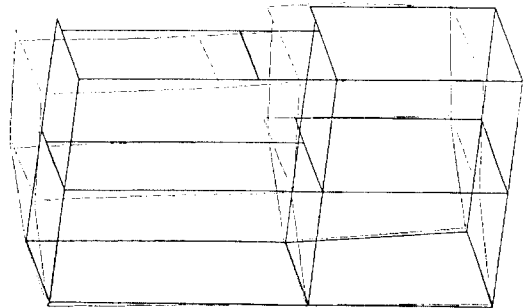


그림 10. 진동 mode 2

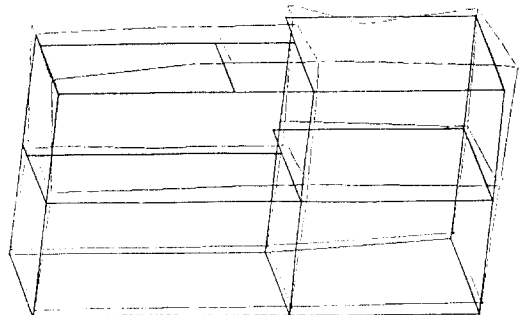


그림 11. 진동 mode 7

표 7. 측정된 최대동적변위와 계산된 최대동적변위의 비교

joint	54	69	68	63
measured	0.0017	0.0015	0.00087	0.0017
calculated	0.0013	0.0013	0.0019	0.0017

표 7로 부터 계산치와 측정치는 매우 유사함을 알 수 있으며 또한 이 값들은 여러 진동기준과 비교해 볼 때 사람이 감지할 수 있을 정도에 속한다는 것을 알 수 있었다(그림 13).

JOINT 46-75
 - : 46 + : 75

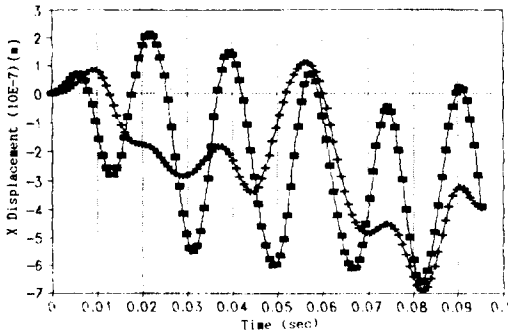


그림 12. 절점 46과 75의 횡방향 변위

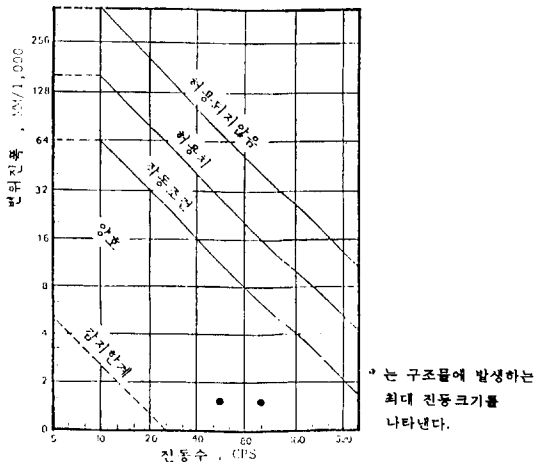


그림 13. 측정치와 진동기준과의 비교

• 기존 해석 결과와의 비교

현장 측정 결과와 본 연구에서 수행한 진동해석 결과를 구조물설계회사의 구조계산서 및 기계제작 회사 의견서와 비교 검토하여 확인된 사항들을 정리하면 다음과 같다.

표 8은 구조물설계회사에서 산출한 동적특성치, 최대변위 및 최대속도를 본 연구에서 수행한 구조해석결과 및 현장측정결과와 비교 정리한 것이다.

표 8에서 알 수 있듯이 구조물설계회사에 의한 결과는 측정치와 비교해볼 때 모든 동적특성치가 다소 높으며 최대진동변위는 종방향을 제외하고 본 연구에 의한 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 고유진동수가 크게 산출된 원인은 상부구조물의 모든 지점을 고정시켰기 때문이며, 감쇄비가 큰 원인은 측정값을 사용하지 않고 기존 문헌에 제시되어 있는 대표적인 값을 사용했기 때문으로 판단된다.

표 9는 기계제작회사에서 산출한 동적특성치 및 최대 동적응답을 현장측정결과 및 본 연구에서 수행한 구조해석 결과와 비교정리한 것이다.

표 9로 부터 알 수 있듯이 기계제작회사 의견서에 제시된 계산 최대 진동변위 및 속도는 본 연구에서 계산된 값을 훨씬 초과함을 알 수 있는데 이는 표에서 알 수 있는 바와 같이 지반에 대한 감쇄비가 본 연구에서 현장지반조사 결과를 토대로 산출된 값에 비해 낮으며, 구조해석을 위해

표 8. 동적거동 특성과 응답의 비교

	frequency			damping ratio			max. displacement			max. velocity (mm/s)
	later.	longi.	verti.	later.	longi.	verti.	later.	longi.	verti.	
구조물설계회사		6.87	5.87	36.08	6	6	6	0.00187	0.00708	0.00558
this work	measured	3.95	4.12	23.0	3.84	4.47	-	0.0017	0.0017	0.00087
	calculated	3.65	4.52	16.5	-	-	-	0.0028	0.0025	0.0062

표 9. 동적거동 특성과 응답의 비교

		damping ratio				max. displ			max. velocity (mm/s)
		concrete	soil			lateral	longl.	verti.	
			hori.	vert.	rock				
기계제작회사		1.5	30	50	5	0.0197	0.0408	0.028	above 11
this work	measured	3.84	-	-	-	0.0017	0.0017	0.00087	-
	calculated	-	69.6	81.6	7	0.0028	0.0025	0.0062	0.64

구조물 및 하중의 실제 상황을 너무 단순화시키므로 실제상황을 제대로 반영하지 못했기 때문으로 판단된다.

한편 기계제작회사에서 동적해석은 Generator와 Turbine의 동적불평형력을 분리하여 각각에 대해 실시했는데 이 또한 실제상황과 부합되는지에 대한 의문이 있다. 특히 기계제작회사의견서에는 고유치 해석결과에 대한 언급이 없어 그에 대한 확인은 불가능하였다.

3. 결론

T/G 가동중 발생한 Gear Box 파손원인을 조사하기 위하여 실시한 현장측정결과를 이용한 결과, 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

1) 현장 측정치와 구조해석 결과를 토대로 판단해 볼 때 본 연구대상 구조물의 구조상 문제는 없는 것으로 판단된다. 특히 측정된 진동변위를 여러기준과 비교해 볼 때 기계 가동시 구조물에 발생하는 진동은 사람이 감지할 정도에 속한다.

2) 본 연구대상 구조물과 기계의 진동수 차가 커 공진역을 벗어나므로 기계와 구조물이 공진을 일으킬 가능성은 없으며, 감쇄비에 따른 구조물의

동적응답에는 큰 변화가 없는 것으로 판단된다.

3) 구조물설계회사에서 사용한 구조해석 모델은 근사적 모델로서 구조해석 결과 안전한 값이 얻어졌다. 따라서 이 모델을 사용하여 기초설계를 실시할 경우 안전성 문제는 없는 것으로 판단되나, 다소 경제성이 문제가 되었을 것으로 사료된다.

4) 기계제작회사에서 제시한 해석자료의 불충분으로 기계제작회사의 구조해석 모형에 대해서는 충분한 검토를 실시할 수 없었으나 기계제작회사의 해석결과를 측정치와 비교해 볼 때 측정치를 훨씬 초과함을 알 수 있었다. 이는 해석모형 작성시 구조물과 하중의 실제 상황을 제대로 반영하지 못했기 때문으로 판단되며 따라서 해석결과는 타당성이 없어 보인다.

이상의 사실을 토대로 판단해 볼 때 Gear Box 파손의 주된 원인은 구조물의 결함이라기 보다는 기계 자체의 결함인 것으로 판단되나 기계에 대한 조사는 본 연구대상이 아니므로 이에 대한 검토는 실시하지 않았다. 본 연구용역이 끝난 후, 기계제작회사는 연구결과에 승복하여 새로운 형식의 gear를 다시 납품하였으며, 현재 열병합 발전소는 안전하게 운용되고 있다.