

터빈발전기의 축계 진동 해석: 열박음형과 용접형 로터의 진동 특성 비교

하현천*, °박철현*, 최성필*, 김계연**

Vibration Analysis of Rotating System in a Turbine and Generator Set: Comparison of Shrunk-fit Disc Rotor and Welded Drum Rotor

Hyun Cheon Ha, °Chul Hyun Park, Seong Pil Choi and Kay Youn Kim

ABSTRACT

Excessive vibration magnitude results in serious damage and economic losses in the turbine and generator system. Therefore, it is of importance to evaluate the accurate dynamic characteristics of the system in advance. In this paper, rotordynamic characteristics of both the shrunk-fit disc and welded drum rotors have been investigated to ensure an excellent running behavior of the system in which low-pressure (LP) turbines of a nuclear power plant were retrofitted to improve thermal efficiency and reliability. Analysis shows that the welded drum rotor has good torsional characteristics rather than the shrunk-fit disc rotor. In addition, verification testing of field test was performed to confirm the retrofit. Test results are good agreement with analysis ones.

1. 서론

중기터빈과 같이 고속으로 운전 하는 대형 축계 설계에서 가장 중요하게 고려되는 것이 안전성(운전 신뢰성)과 운전 효율이다. 안전성은 운전 중에 기계의 파손을 방지하고 오랜 시간 동안 수명을 유지하기 위한 필수 요건으로서 축의 기계적 특성, 재질, 배어링과 시일의 구조 및 형상 등이 안전성에 영향을 미치는 요소이다. 또한 석탄, 석유 등 연료의 매장이 한계에 도달하고 있는 현 시점에서 연료의 효과적인 활용과 더불어 중기터빈의 효율 향상은 발전설비에서 매우 중요하다. 기본적으로 열역학적 특성 즉, 중기의 압력과 온도가 설비의 효율에 크게 영향을 미치고 있지만, 동일한 조건에서는 블레이드의 형상, 시일과 배어링의 구조 등이 효율에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 안전성과 효율이 우수한 중기터빈을 설계하기 위해서는 축계 설계 기술이 가장 중요한 핵심 기술이라고 할 수 있다. 특히 오늘날에는 터빈 효율 상승과 경량화(제작 절감)를 위해 중기터빈이 점차 고온, 고압화, 고밀도화로 설계되고 있는 추세이므로 신뢰성 유지를 위한 축계 설계 기술이 더욱 중요시 되고 있다. 왜냐하면, 터빈발전기에서 공진등에 의한 과도한 진동 진폭은 설비의 파손

뿐만 아니라 운전 정지, 보수 등에 따른 엄청난 경제적 손실을 초래하기 때문이다.

최근에는 발전설비 제작 업체들이 개발된 신기술을 노후 발전소의 효율과 신뢰성 향상을 위해 적용(retrofit)하는 서비스 사업에 많은 비중을 두고 있다. 이러한 서비스 산업은 제작업체로서는 매출과 이익 증대는 물론이고, 신기술에 대한 현장 실증시험 결과를 효과적으로 얻을 수 있기 때문에, 고객으로서는 신규 발전소 건설에 비해 훨씬 적은 비용으로 기존 노후발전소의 효율 향상과 수명 연장을 도모할 수 있기 때문에 양자 모두 만족해 하는 사업으로 활발히 추진하고 있다. 이러한 retrofit는 대부분 축계에서 일어난다. 결국 발전설비 전체에서 보면, 가장 일을 많이 하는 터빈 축계 즉, 배어링, 시일, 블레이드 등에서 자주 손상이 발생하기 때문이다. 따라서 중기터빈 로터 교체나 배어링 시일 변경 등과 같은 retrofit를 성공적으로 수행하여 계의 신뢰성과 수명연장을 도모하기 위해서는 축계의 진동 특성을 정확하게 평가하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 대형 중기터빈발전기의 축계 설계에 대한 개요와 이를 위한 진동 해석 기법에 대해 소개코자 한다. 그리고, 진동 해석 결과의 한 예로서 실제 원자력 터빈의 신뢰성 향상을 위해

* 한국중공업 기술연구원

** 한국전력 전력연구원

교체한 저압 터빈의 건전성 평가를 위해 수행한 열박음형 로터와 용접형 로터의 진동 특성 해석 사례를 제시코자 한다. 기존의 열박음형 로터에서 비틀림진동에 대한 공진여유가 매우 작아서 블레이드 파손이 우려되어 왔기 때문에, 비틀림 공진여유 확보를 위해 용접형 로터로 교체하였다.

2. 증기 터빈 축계 설계

2-1 축계 개요

증기터빈은 보일러 또는 원자로에서 발생된 고온·고압의 열에너지를 운동에너지로 전환시키는 원동기이다. 그 작동은 노즐을 통과한 고속의 고온·고압 증기가 회전익(moving blade 또는 bucket 이라고 함)에 충돌되면, 충동 작용과 반동 작용에 의해 로터는 회전에너지를 얻게 된다. 이 회전에너지는 커플링으로 서로 연결된 로터를 통해 발전기로 전달되어 전기를 생산하게 된다. 일반적으로 증기 터빈발전기는, Fig.1 과 같이, 고·중압 터빈, 저압 터빈 A, 저압 터빈 B, 발전기, 그리고 여자기(exciter) 등으로 구성되어 있다. 여기서 축계는 로터, 회전익, 축을 지지하는 베어링, 작동 유체의 누설 방지를 위한 패킹 시일, 여러 개의 축을 연결하는 커플링 등으로 구성되어 있다.

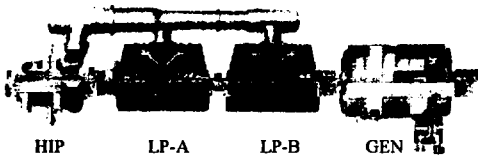


Fig.1 Schematic view of a steam turbine and generator set

증기 터빈은 동력을 얻는 방식에 따라 충동식(impulse type)과 반동식(reaction type)으로 나뉘어지며, 충동식 터빈에는 디스크형 로터가 반동식 터빈에는 드럼형 로터가 사용된다. 이들 로터는 제작 방법에 따라 크게 다음 세가지로 분류된다(Fig.2 참조).

- 일체형(integral type) 로터
- 열박음형(built-up or shrunk-fit type) 로터
- 용접형(welded type) 로터

로터를 제작하는 방법은 제작사 별로 각각의 장점을 지니고 있으나, 일체형과 열박음형은 디스크형 로터 제작에, 일체형과 용접형은 드럼형 로터 제작에 주로 사용된다. 최근에는 로터 제작기술의 발달로 인해 대부분의 디스크형 로터들이 일체형으로 제작되는 추세이다.

2-2 축계 설계 고려 요소

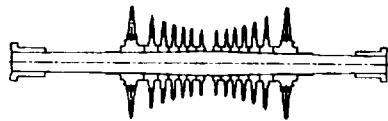
증기터빈의 축계는 고온·고압의 증기와 직접 접

촉하면서 고속으로 회전을 하는 부품이므로 여러 가지의 복합적인 응력 즉, 열응력, 굽힘 응력, 전단응력 등을 받으며, 매우 가혹한 조건에서 운전된다. 따라서, 회전 축계 설계를 위해서는 주어진 조건하에서 기계의 성능이 유지될 수 있도록 정적 특성뿐만 아니라 동적 특성을 충분히 고려해야 한다. 축계의 기본 형상과 치수가 결정되면, 축의 굽힘 및 비틀림 응력 계산, 축의 정적 처짐량 계산, 증기압에 의한 영향, 베어링 하중 계산, 축계 굽힘/비틀림 진동 해석, 안정성 해석 등을 통해 - 필요하다면 치수와 형상을 조정해 가면서 - 최종의 축계 형상과 치수를 결정한다. 이와 같이 증기터빈의 축계 설계를 위해 반드시 고려되는 기본적인 요소는 다음과 같다.

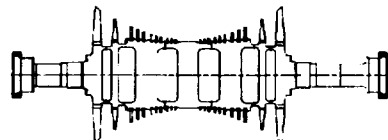
- Rotor stress and deflection
- Bearing loading
- Thrust loading
- Shaft flexibility
- Critical speeds & mode shapes
- Torsional natural frequencies
- Material properties
- Differential expansion
- Allowable vibration limit
- Allowable life cycles



(a) Integral type



(b) Built-up or shrunk-fit type



(c) Welded drum type

Fig.2 Types of turbine rotors

3. 축계 진동 해석

3-1 횡진동 해석

회전기계의 축계에서는 불평형 질량동에 의해

필연적으로 진동이 발생한다. 불평형의 가진주파수는 회전수와 같기 때문에 만일 회전수와 계의 고유진동수가 일치하면 공진이 발생하여 큰 진동이 일어나게 된다. 따라서 축의 재원이 결정되면, 축의 진동 특성을 평가해서 축계에서 공진 또는 과도 진동이 발생하지 않도록 해야 한다. 이를 위해 축계의 위험속도, 불평형 응답, 과도 응답, 안정성 특성 등을 평가하여 설계 기준을 만족하지 않을 경우에는 로터 직경, 베어링 형상, 시일 형상, 베어링 스펙 등의 설계 변경을 추진한다.

3-2 비틀림진동 해석

대형 터빈발전기는 여러 개의 로터가 연결되어 있기 때문에 일반적으로 비틀림 강성이 낮아 운전속도까지 여러 개의 고유진동수를 포함하고 있다. 따라서, 설계 단계에서 비틀림 진동 문제는 대단히 중요하게 고려되어지고 있다. 터빈발전기에서 비틀림 진동을 일으키는 주요한 가진력은 1x 성분보다도 전력 계통의 상 불평형(phase unbalance)에 의한 2x 성분(120 Hz)의 토크 변동이다. 터빈발전기 시스템에서 비틀림 진동에 대한 감쇠는 대단히 작기 때문에 고유진동수가 이러한 가진주파수 근처에 존재하게 되면 비틀림 진동은 매우 크게 증폭된다. 특히, 이 때의 비틀림 진동 모드는 저압 터빈의 블레이드와 연결되어 블레이드에 큰 진동을 야기시켜 피로 강도 측면에서 문제가 되는 경우가 많다. 따라서 시스템의 비틀림 고유진동수와 모드는 항상 터빈발전기 시스템의 신규 설계 및 retrofit을 위해 주의 깊게 고려되어진다.

3-3 안정성 해석

증기터빈과 같이 유막 베어링을 사용하는 회전 기계에서는 oil whirl/whip 과 같은 불안정 진동과 시일 내부의 불평형 증기력에 의해 steam whirl 과 같은 불안정 진동이 발생한다. 베어링과 시일의 강성 및 감쇠 계수를 고려해서 축계에서 불안정 진동 특성을 평가한다. 만약 불안정 진동이 발생하면, 안정성 특성이 우수한 베어링 또는 시일이 사용될 수 있도록 개선한다.

특히 증기터빈의 고압(HP)터빈 로터에는 고온, 고압의 증기력과 고속회전으로 인하여 불안정요인이 발생이 많으므로 텀링패드 저어널베어링을 사용하여 축계의 안정성 향상을 도모하고 있다. 정상상태에서 oil whirl/whip 이 발생하지 않는 베어링에서도 지진과 같은 큰 가진력에 의해 불안정 현상이 발생하는 경우가 있으므로 설계변수와 베어링의 동특성과의 관계를 정확히 해석하여 축계가 안정하게 운전되도록 설계하여야 한다.

3-4 해석 이론 및 모델링

해석의 첫번째 단계는 실제 기계에 대한 수학적 모델을 유도하는 것이다. 그러나 실제 기계는 형상이 매우 복잡하고, 다양한 운전 조건 및 주변 환경 때문에 정확하게 시스템을 모델링하는 것은 대단히 어렵다. 증기 터빈 축계는 유한요소법을 이용하여 수학적 모델을 구축한다. 이 때, 로터의 유연성(flexibility)은 물론, 정확한 예측을 위해 블레이드와 기초(foundation)의 유연성도 고려한다. 축계의 진동 해석을 위한 지배방정식은 일반적으로 다음과 같은 운동방정식이 이용된다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F(t) \quad (1)$$

여기서 M 은 질량 행렬, C 는 감쇠 행렬, 그리고 K 는 강성 행렬이다. 횡진동 해석의 경우 감쇠 행렬 C 는 베어링 및 시일 등의 점성 감쇠 뿐만 아니라 자이로스콧프 행렬을 포함하고 있으며, 비틀림 진동의 경우는 감쇠가 대단히 작기 때문에 이항은 일반적으로 무시한다.

Fig.3은 단일 터빈 로터 축계의 진동 해석을 위한 유한요소 모델의 예이다. 터빈 블레이드는 집중 질량 및 관성으로 모델링 하고, 감쇠는 베어링의 유막 감쇠만을 고려한다. 정확한 평가를 위해 기초의 강성 효과를 고려하며, 특히 축계의 변단부 요소의 강성 행렬은 경험에서 얻어진 유효 강성 직경을 이용한다.

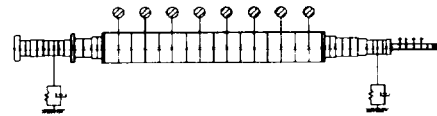


Fig.3 FEM model of a single rotor-bearing system

터빈발전기의 축계 모델링이 끝나면, 축계의 진동 해석을 수행하기 위해 먼저 로터를 단순 지지된 경우로 가정하여 고유치 해석을 수행한다. 그리고, 전체 축계에 대한 고유치 해석, 강제 진동 응답 해석, 안정성 해석 등을 수행한다.

4. 축계 진동 해석 사례

본 논문에서는 최근 원자력 저압터빈을 retrofit 한 터빈발전기의 축계 신뢰성 평가를 위해 수행한 결과이다. 이 터빈발전기는 25년간 운전 되어 왔으나, 저압 터빈의 블레이드에 high cycle stress에 의한 크랙이 자주 발생하여 왔기 때문에 효율과 신뢰성 높은 로터로 개보수 하였다. Fig.4는 저압 터빈 로터의 개보수 후의 로터 형상을 보여주고 있다. 기존의 저압 터빈 로터는 열박음형(shrunk-fit disc type) 로터로서 운전 중에 응력부식균열 및 고주기 피로에 의해 shrink-fit, keyway, disc face, blade attachment 등에서 수십 개의 균열이 발견되었다. 또한 축계의 비틀림 진동에 대한 공진여유가 매우

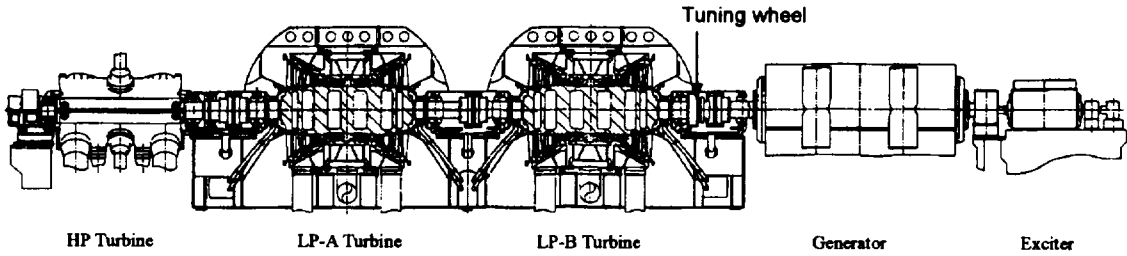


Fig.4 Schematic view of a newly modified turbine and generator system

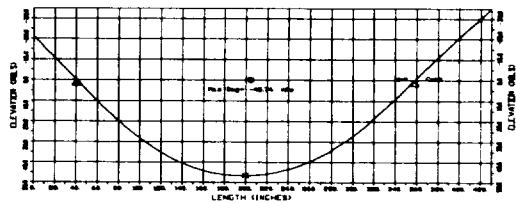
작아서 블레이드 파손이 우려되어 왔었다. 따라서 이 retrofit 은 저압 터빈 로터의 응력부식균열과 비틀림 공진에 기인되는 고응력 부의 손상을 방지코자 수행되었으며, 로터를 용접형(welded drum type)으로 교체하였다. 개보수에 의해 저압 터빈은 형상뿐만 아니라 단(stage) 수도 8 개에서 11 개로 변경되어 기존 형상과는 완전히 서로 다른 형상이다. 본 해석에서는 retrofit 에 대한 진전성 평가를 위해 축계진동 해석을 수행하였다.

4-1 단일 로터 진동 특성 비교

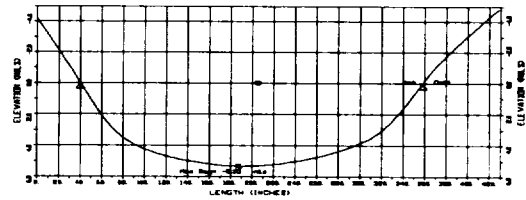
축의 굽힘 등에 의해 기존의 열박음형 로터의 shrunk-fit 부위등에서 과도한 응력이 작용하게 고주기 피로 손상이 발생한 것으로 판단 된다. 본 해석에서는 용접형 로터로의 교체 효과를 평가하기 위해 먼저, Fig.5 에서와 같이, 열박음형 로터와 용접형 로터의 정적 처짐을 비교하였다. 이 결과에서 보면, 열박음형 로터에서는 중앙단에서 최대 처짐량이 46.3 mils 인 반면, 용접형은 5.3 mils 밖에 안된다. 따라서 용접형 로터의 최대 처짐량이 열박음형 로터에 비해 9 분의 1 정도 밖에 안되므로, 국부적으로 작용하는 응력이 줄어들 것으로 예상된다. 이는 용접형 로터가 열박음 로터에 비해 상대적으로 무게는 작고, 축의 유효 강성 직경이 크기 때문이다.

Fig.6 과 7 은 두 가지 형태의 로터에 대한 위험속도 선도(critical speed map) 및 모드 형상을 각각 보여주고 있다. 위험속도 선도의 결과에서는 유효 강성 직경의 증가에 따라 용접형 로터의 모든 위험속도가 열박음형 로터에 비해 크게 증가하였으며, 1 차 위험속도의 경우 764 rpm 에서 1220 rpm 으로 약 60 % 정도 증가를 하였다. 또한, 용접형 로터의 2 차 위험속도는 2038 rpm 으로서 정격 운전속도 1800 rpm 이상인 것을 알 수 있다. Fig. 7 은 베어링을 포함한 지지강성이 약 8×10^6 lb/in 를 갖는 축계에 대한 모드 형상을 보여주고 있다. 1 차 위험속도에 대한 열박음형 로터의 모드 형상은 완전한 flexible mode 이고, 용접형 로터의 1 차 모드 형상은 강체모드에 근접되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 용접형 로터가 1 차 위험속도 통과시 최대

진폭이 열박음형 로터에 비해 대단히 작게 나타날 것으로 사료된다.

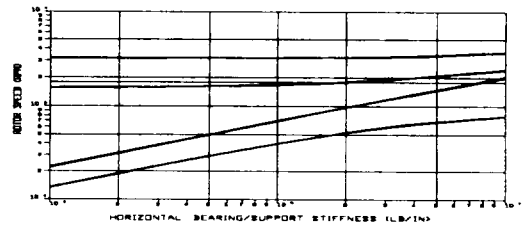


(a) Shrunk-fit disc type

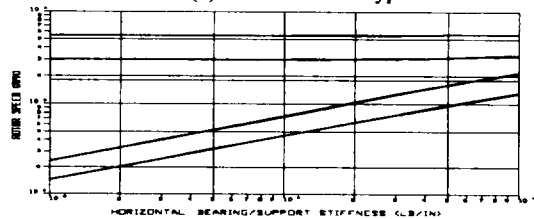


(b) Welded drum type

Fig.5 Shaft deflection of a single rotor

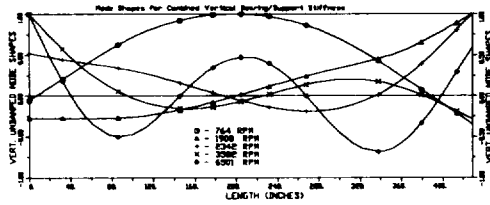


(a) Shrunk-fit disc type

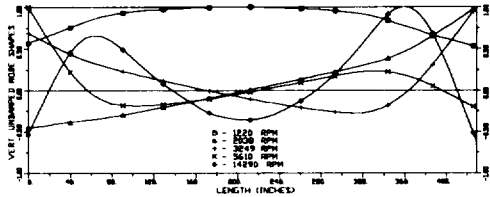


(b) Welded drum type

Fig.6 Critical speed maps



(a) Shrunk-fit disc type



(b) Welded drum type

Fig. 7 Mode shapes

4-2 비틀림 진동 특성 비교

기존의 열박음형 로터에서는 축계 비틀림 공진에 대한 여유가 매우 작아 블레이드의 피로 파손을 가중시킨 것으로 판단되었다. 본 해석에서는 용접형 로터로의 교체함으로써 비틀림 진동 특성이 개선되는 효과를 평가하기 위해 열박음형 로터와 용접형 로터의 비틀림 진동 특성을 비교하였다. Fig. 8 과 9 는 열박음형 로터와 용접형 로터에 대해 각각의 비틀림 고유진동수와 모드 형상을 보여주고 있다. 그리고, Table 1 에 비틀림 고유진동수의 계산 결과를 나타내었다. Fig. 8 과 Table 1 에서 보는 바와 같이 열박음형 로터는 용접형 로터에 비해 비틀림 진동 모드 형상이 더욱 복잡하고 다양하게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 열박음형 로터는 120 Hz 근처에서 여러 개의 저압 터빈 모드를 갖는 반면, 용접형 로터는 운전 범위 내에 저압 터빈 모드가 발생하지 않는다. 이러한 이유는, 로터의 형상만 비교 해도 알 수 있듯이, 용접형 로터의 로터의 직경과 관성 모멘트가 열박음형 로터에 비해 훨씬 크다. 결과적으로 용접형 로터는 더 큰 비틀림 강성을 갖게 되어 열박음형 로터 보다 양호한 비틀림 진동 특성을 갖게 된다. 특히, 해석 결과에서 보면, 기존의 열박음형 로터의 축계에서 발전기 모드의 비틀림 고유진동수가 121.8 Hz 로서 발전기 로터의 기본 가진 주파수 120 Hz 와 상당히 근접해 있었음을 알 수 있다. 이것이 블레이드 파손의 한 원인이 되어 왔을 것으로 예상된다. 그런데, Fig. 9(a)에서와 같이, 교체된 용접형 로터의 축계에서도 발전기 모드의 비틀림 고유진동수가 122.1 Hz 로서 여전히 공진 여유가 거의 없다. 설계상 공진

회피 영역은 제작사 마다 서로 다르게 적용하고 있으나, 여기에서는 60 ± 3 Hz 와 120 ± 6 Hz 를 적용하였다. 이를 적용하면, 용접형 로터의 비틀림 고유진동수가 공진 회피 영역내에 존재하게 되므로 고유진동수 변경을 위한 설계 변경이 요구된다. 이를 위해, Fig. 4 에서 보는 바와 같이, 저압 터빈 B 와 발전기 사이의 축에 튜닝 휠(tuning wheel)을 추가하였다. 튜닝 휠은 질량을 최대화 하고, 비틀림 강성은 최소화할 수 있는 구조로 하였다. 이렇게 개선한 축계의 비틀림 고유진동수를 계산한 결과, Fig. 9(b)에서와 같이, 발전기 모드의 비틀림 고유진동수가 122.1 Hz 에서 113.3 Hz 로 줄어 들었다. 따라서 열박음형 로터를 용접형 로터로 교체함으로써 비틀림 공진을 피파하였다고 판단된다.

Table 1 Comparison of torsional natural frequencies between the shrunk-fit and the welded rotors

[unit: Hz]

Mode	Shrunk-on disc type (old rotor)	Welded drum type (new rotor)	
		Without tuning wheel	With tuning wheel
1 st mode	12.8	15.3	15.3
2 nd mode	22.2	23.8	24.1
1 st HP mode	37.4	41.9	41.9
1 st LP mode	58.9	-	-
2 nd LP mode	65.9	-	-
3 rd LP mode	101.0	-	-
4 th LP mode	108.7	-	-
1 st GEN mode	121.8	122.1	113.3
2 nd HP mode	137.1	135.3	135.3

5. 결론

대형 고속 터빈발전기의 안전 운전을 도모하고, 고효율, 고성능의 터빈 시스템을 설계하는데 있어서 축계 진동 해석 기술은 매우 중요하다. 본 논문에서는 터빈발전기의 축계 설계에 대한 개요와 이를 위한 진동 해석 기법에 대해 소개하였다. 그리고, 열박음형 로터와 용접형 로터 축계에 대한 진동 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용접형 로터는 열박음 로터에 가볍지만, 축의 유효 강성 직경이 커서 처짐량이 적고 위험 속도가 높아진다.
2. 용접형 로터는 열박음 로터에 비해 양호한 비틀림 진동 특성을 나타낸다.
3. Turning wheel 로터 비틀림 진동의 고유진동수를 효과적으로 줄일 수 있다.

참고 문헌

- (1) Nelson, H. D., 1980, "A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory", ASME Journal of Mechanical Design, Vol 102, pp.793-803
- (2) Rao, J. S., 1983, Rotor Dynamics, New Age International Publishers.
- (3) Shiraki, K. and Kanki, H., 1979, "A New Vibration Criteria for High Speed Large Capacity Turbomachinery", Proceedings of the 8th Turbomachinery Symposium, pp.59-70.
- (4) Tonnesen, J. and Lund, J.W., 1978, "Some

Experiments on Instability of Rotors Supported in Fluid-Film Bearing", ASME Journal of Mechanical Design, Vol 100, pp.147-155.

- (5) Walker, D.N., Adams, S.L., and Placek, R.J. (1981) Torsional Vibration and Fatigue of Turbine-Generator Shafts, *IEEE Transaction*, Vol. PAS-100, pp.4373-4380.
- (6) Reid, S.R. (1986) Electrical-Mechanical Torsional System Considerations and Analysis for Low Pressure Turbine Rotor Designs *EPRI Rotating Machinery Dynamics, Bearings, and Seals Symposium*, St.. Louis, Missouri

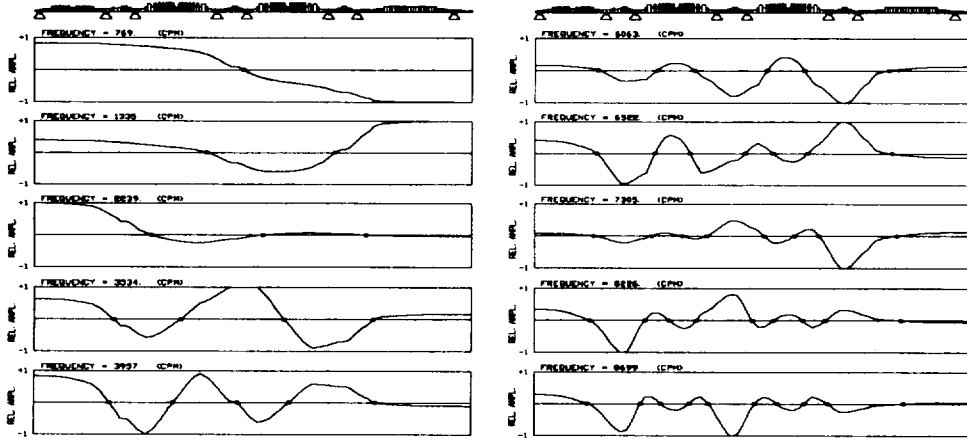
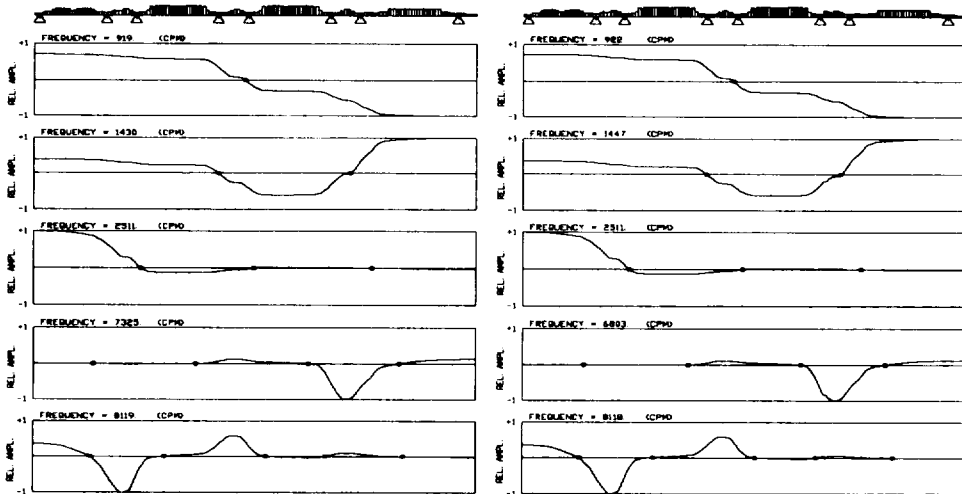


Fig. 8 Torsional mode shapes of the shrunk-fit disc type rotor (old)



(a) Without tuning wheel

(b) With tuning wheel

Fig. 9 Torsional mode shapes of the welded drum type rotor (new)