

한 에너지절약 및 환경개선효과등의 국가 기여도를 감안한 인센티브 제공에 의해 현재 운영중인 집단에너지사업의 수지를 개선시키고 이를 통해

신규사업의 참여동기를 부여하여 침체된 집단에너지사업부문에 활기를 불어 넣어야 할 것이다.

## 고속진공발란싱에 대하여

현대중공업 중전기사업부 회전기공장  
부장 이학순, 고경만, 대리 최성열

(02) 746-7511, 7526

### 1. 서론

산업의 고도화·고성장화에 따라 대부분의 산업용 회전기계는 고온, 고압, 고속 및 초경량화되어 감에 따라 1차, 2차 또는 그 이상의 위험속도(critical speed)를 넘어 가혹한 환경하에서 운전되고 있다. 이로 인해 진동은 필연적으로 발생하게 되며, 운전신뢰성 및 안전성을 유지하기 위해 여러 가지 troubleshooting 방법들이 고려되고 있다. 대부분의 진동원인중 대다수가 제작 당시 및 운전중에 발생한 unbalance<sup>(1)</sup>가 주된 원인이었다. 이러한 unbalance는 소음·진동을 발생시키며, 특히 고속 회전체의 경우 unbalance에 의한 소음·진동은 기계의 수명 및 제품의 품질, 성능을 저하시키며 심지어 기계의 파손을 초래하기도 한다. 그래서 회전 기계의 수명연장과 제품의 품질, smooth한 운전 및 기계의 신뢰성향상을 위해 제작초기 unbalance를 제거하기 위한 balancing 작업은 매우 중요하고 필수적인 작업으로 인식되고 있다.

ISO 1925(1990)의 balancing 용어에 의하면, 「발란싱이란 회전체(rotor)의 질량 분포를 조사하고 필요하면 이것을 조정하여, 저널에 작용하는 회전속도와 동기(synchronization)인 진동이나 힘을 어느 지정한도 이내로 되도록 하는 작업」으로 정의하고 있다. 즉, 회전체의 무게중심과 축 중심이 일치하지 않는 경우, 회전체의 unbalance에 의한 원심력이 축 중심선에 작용하여 회전속도와 같은 주파수의 진동을 일으킨다. 따라서, unbalance에 의한 진동을 규정치 이내가 되도록 잔류 unbalance량을 조정하는 작업을 balancing이라고 한다.

Unbalance를 제거하기 위해 제작초기 maker에서는 회전체를 balancing machine<sup>(2)</sup>에서 국제규격

(ISO,API등)에 따라 허용한계치 이내로 unbalance를 제거하고 있다. 따라서, 회전체의 용도 및 종류에 따라 balancing machine을 적절하게 선택하여 사용해야 하며, 크게 rigid rotor용 balancing machine과 flexible rotor용 balancing machine으로 구분된다.

최근에는 balancing machine이 발달하여 rigid rotor는 제작상의 오류나 공진등의 특별한 요인이 부가되지 않는 한 balancing 방법 자체가 원인으로 작용하는 경우는 거의 없으나, 규정에 맞지 않는 balancing 절차를 택했을 경우 unbalance에 의한 진동이 발생할 수 있다. 특히, 보일러 급수펌프, 증기 및 가스 터빈, 고압 원심압축기등의 회전기계는 1차 또는 2차 위험속도 이상에서 운전되는 flexible rotor이기 때문에 rigid rotor와는 달리 적절한 탄성회전체의 발란싱방법으로 unbalance 수정을 실시해야 한다.

본론에서는 unbalance의 발생원인, 회전체의 분류, 회전체에 따른 발란싱 machine 및 현대중공업 고속진공발란싱 설비에서 실제 발란싱작업 사례를 들어, flexible rotor에 있어서 고속발란싱이 필요한 이유를 설명한다.

기본적인 발란싱에 관한 이론 및 발란싱 방법<sup>(3),(4),(5),(6)</sup>과 현장에서 실시하는 field balancing 방법<sup>(3),(4),(5),(6)</sup>은 많은 문헌에 상세히 설명되어 있고 여기에서는 지면관계상 생략한다.

### 2. 회전체 분류 및 발란싱 방법

#### 2.1 개요

회전기계의 unbalance는 축 중심선에 대하여 회전체의 질량 분포가 비대칭으로 되기 때문에 발생

하고, 그 원인으로는 부품자체가 비대칭에서 오는 설계 또는 제도오차, 불균일한 재질 및 가공오차, 조립오차 등이 있다.

대부분의 회전체는 기계조립에 앞서 제작사에 의해 발란싱이 이루어진다. 불평형의 제거는 회전체의 balance quality<sup>(7),(8)</sup> 및 발란싱 비용을 고려할 때 발란싱 machine 및 방법등을 올바르게 선택해야 한다.

이 절에서는 회전체의 분류, 회전체에 따른 발란싱 방법 및 설비 등에 대해서 설명한다.

## 2.2 회전체의 분류

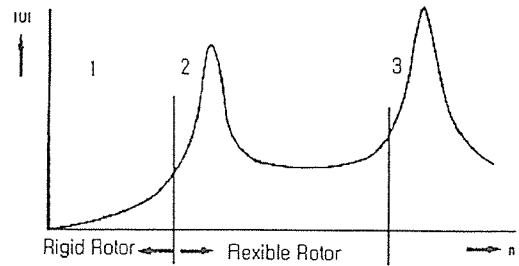
회전기계는 크게 rigid rotor<sup>(1)~(4)</sup>와 flexible rotor<sup>(1)~(4)</sup>로 분류한다. 여기서 rigid rotor란 사용 운전범위내에서 회전수를 변화시켜도, 그리고 베어링조건을 변화시켜도 회전체의 상태가 변화하지 않는 회전체로서, 일반적으로 회전체의 1차 critical speed의 70% 이하에서 운전되는 회전체를 말한다.

이러한 회전체의 발란싱은 임의의 회전수에서 임의의 단면 또는 양면으로 발란싱을 실시할 수 있다.

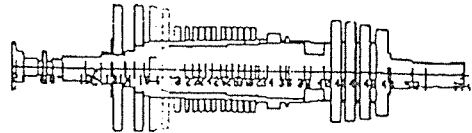
Flexible rotor란 회전수, 그리고 항상 그런 것은 아니지만 베어링조건에 의해서도 발란싱 상태가 변화하는 회전체로서 일반적으로 1차 위험속도의 약 70%이상에서 운전되는 회전체를 말한다. 따라서 회전기계의 balancing quality에 대한 규격도 rotor에 따라 다르게 된다.

ISO 1925(1990)의 balancing 용어에 의하면 회전체를 크게 다음과 같이 3 종류로 분류하고 있다. 그림 1은 위험속도에 따른 rotor의 분류 및 회전수에 따른 rotor의 굽힘모드를 나타내고 있다.

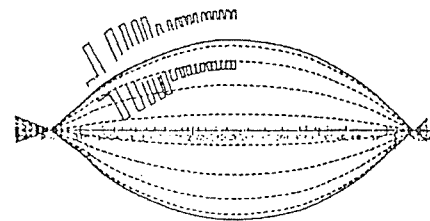
- (1) 강성회전체(Rigid Rotor) : 임의로 선정된 2면에서 발란스를 잡고, 최고속도 이하의 임의 속도에서 사용시에 가까운 지지조건으로 회전시켜도 회전체의 변형에 의해 베어링 하중이 허용치를 초과하지 않는 회전체
- (2) 탄성회전체(Flexible Rotor) : 강성회전체의 정의를 만족하지 않는 회전체
- (3) 준강성회전체(Quasi-Flexible Rotor) : 현저한 휨이 생기지 않는 저속에서, 실속도에서의 사용에 견디는 만족한 발란싱이 가능한 탄성회전체



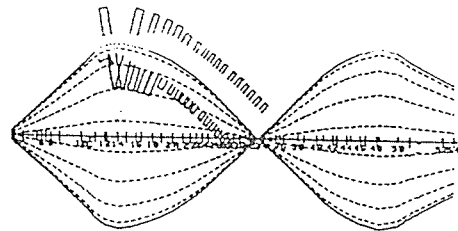
a) Rotor의 위험속도 곡선



b) Rigid Rotor 상태(영역 1)



c) Rotor의 1차 굽힘모드(영역 2)



d) Rotor의 2차 굽힘모드(영역 3)

그림 1 위험속도에 따른 회전체 분류 및 회전수에 따른 rotor의 bending mode

## 2.3 회전체에 따른 Balancing 방법

발란싱의 목적은 현지에 설치되었을 때 임의의 회전체가 만족스러운 운전을 하도록 하기 위한 것이다. 여기서 '만족스러운 운전'이라는 것은 회전체에 존재하는 인발란스에 의해 야기되는 진동이 허용치 이상으로 되지 않는 것을 의미한다. 특히, 탄성회전체의 경우에는 최대 운전속도(service speed)까지 어떤 속도에서든 회전체에서 발생하는 변형의 크기가 허용치이하가 되어야 하는 것을 의미한다. 탄성회전체의 발란싱방법으로는 여러가지 방법이 있지만, 영향계수법 또는 모드발란싱법<sup>(1)~(4)</sup>등을 이용하여 전 운전속도영역에 대해 이루어진다.

제작 초기에 회전체를 발란싱할 때는 balancing machine상에서 직접 unbalance를 제거한다. 하지만, 비용적인 측면이나 작업시간에 의한 손실 및 발란싱 품질등의 관점에서 회전체의 종류에 따라 balancing machine이 달라진다<sup>(2)</sup>.

특히, 강성회전체는 임의의 속도에서 발란싱을 하더라도 운전속도의 전영역에 대해서 발란싱 품질이 유지되는 회전체이므로, 발란싱 작업 비용과 발란싱 작업시간등을 고려할 때, 저속발란싱 machine으로 발란싱이 가능하다.

하지만 탄성회전체는 운전속도 전 영역에서 축의 편심뿐만아니라 축의 굽힘도 고려해야 하므로 balancing quality 및 운전신뢰성을 위해 고속발란싱설비에서 반드시 발란싱을 실시해야 한다.

국제규격에는 엄밀하게 rigid rotor와 flexible rotor에 대한 발란싱방법 및 기준등을 엄밀하게 구분하고있다. 즉, ISO1940(1990)은 강성회전체의 발란싱방법 및 기준, 즉 unbalance quality에 관련한 국제규격으로서 탄성회전체에 바로 적용할 수 있는 것은 아니다.

ISO11342는 탄성회전체의 발란싱 방법 및 기준, 즉 발란싱 설비에서 사용되는 기준이 조립 설치된 기계에 규정되는 진동한계치 또는 회전체에 규정되는 unbalance 한계치를 계산하는 방법등이 설명되어 있다. 이렇게 국제 규격에서 조차 강성회전체와 탄성회전체의 발란싱방법 및 발란싱 품질에 대해 엄격히 구분하고 있는 것은 rotor에 따라 적합한 발란싱방법 및 설비를 사용하지 않으면 rotor에 대한 balance quality를 달성하지 못하며, 운전신뢰성을 확보할 수 없기 때문이다. 따라서, 기계의 수명연장 및 운전신뢰성 향상을 위해서는 적절한 발란싱 방법 및 설비에서 시험을 하여야 한다.

### 2.4 Balancing M/C의 분류

Balancing M/C은 설비에서 회전체만을 분리하여 unbalance를 수정하는 기계로서 그 구조는 회전체를 구동시키는 구동부, 회전체의 진동을 감지하는 pedestal 및 진동을 분석하는 컴퓨터 분석장치로 크게 나눌 수 있다. Balancing M/C은 회전체의 크기와 특성에따라 여러가지 형태의 Balancing M/C이 사용되고 있다. 여기서는 크게 rigid rotor용 balancing M/C과 flexible rotor용 balancing machine으로 구분하여 설명한다.

#### 2.4.1 Rigid rotor용 balancing machine

이 balancing M/C은 저속의 상태에서 회전체의 인발란스에 의해 발생한 원심력을 페테스탈에서 측정하여 컴퓨터 분석장치의 계산에 의해 인발란스를 제거(단면 또는 양면)한다. 그림 2는 rigid rotor용 저속 balancing M/C를 나타낸다.

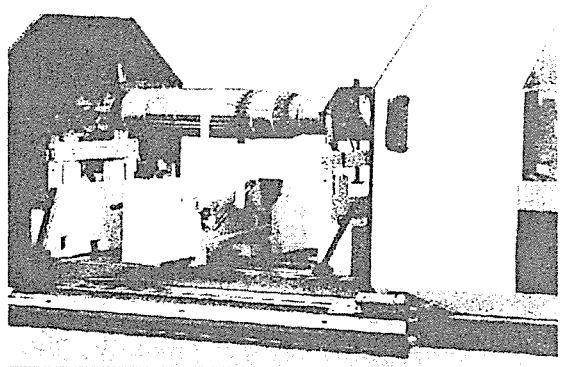


그림 2 Rigid Rotor용 저속 balancing M/C

#### 2.4.2 Flexible rotor용 balancing facility

Flexible rotor는 critical speed 수에 따라 여러개의 발란스면이 필요하며, 전 운전속도영역에 걸쳐 rotor의 bending mode shape에 맞게 발란싱이 이루어져야 운전신뢰성을 얻을 수 있다. 이러한 rotor의 balancing은 매우 위험하기 때문에 폭발에 견딜 수 있는 bunker에서 시험하며, 이 경우 블레이드에 의한 공기저항의 영향을 줄이기 위해 bunker 내부를 진공처리하여 시험한다. 이 결과 flexible rotor를 발란싱하기 위해서는 그림 3과 같은 고속진공발란싱 시험 설비가 필요하다.

다음은 현대중공업에서 보유하고 있는 대·소형 고속 진공 발란싱 시험 설비에 대한 제원, 사양을 표 1, 2에 나타내고 시험 대상 회전체에 대하여 간략하게 정리한다.

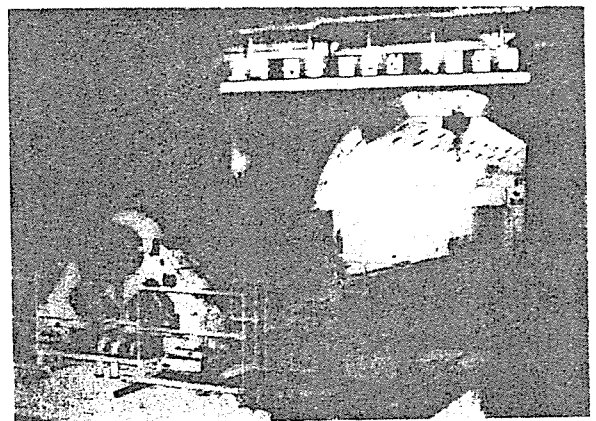


그림 3 고속진공발란싱 설비

표 1 대형 고속진공 발란싱설비 사양

ITEMS	TECHNICAL DATA		
Vacuum Tunnel	■ Diameter :	8 Meter	
	■ Length :	20.5 Meter	
	■ 진공도 :	1 mbar (absolute)	
Test Capacity	Group	DH11	DH8
	Rotor Weight (Ton)	200	32
	Rotor Diameter (m)	6	6
	Rotor Length (m)	18.5	16.1
	Bearing Span (mm)	min. 2,650	min. 1,900
	Journal Dia. (mm)	800	400
	Max. Speed (rpm)	4,500	8,000

■ DH11/DH8은 Bearing Pedestal의 종류임

표 2 소형 고속진공 발란싱설비 사양

ITEMS	TECHNICAL DATA		
Vacuum Chamber	■ Diameter :	2 Meter	
	■ Length :	6.6 Meter	
	■ 진공도 :	1 mbar (absolute)	
Test Capacity	Group	DH6	DH4
	Rotor Weight (Ton)	8	1.25
	Rotor Diameter (m)	1.7	1.7
	Rotor Length (m)	6	6
	Bearing Span (mm)	min.300	min. 200
	Journal Dia.(mm)	240	125
	Max. Speed (rpm)	15,000	30,000

■ DH6/DH4는 Bearing Pedestal의 종류임

시험 대상 회전체로는

- 1) 가스터빈/발전기 로터
- 2) 화력용 스팀터빈/발전기 로터
- 3) 원자력용 스팀터빈/발전기 로터
- 4) 산업용 스팀터빈 로터
- 5) 박용 터빈 로터
- 6) 고압원심압축기
- 7) 보일러급수 펌프 로터/터빈로터
- 8) 산업용 중·소형 회전기계 로터

시험가능 최대 용량은 최대 1500MW까지 이다.

### 3. 고속진공발란싱 설비에서의 시험사례

본 고속진공발란싱 설비에서는 rigid rotor발란싱인 저속발란싱(weight balancing)과 전 운전속도영역에서 unbalance를 제거하는 고속발란싱(mode balancing)의 두가지 방법을 동시에 수행하고있다.

먼저, 회전체를 발란싱 하기 위해서는 ISO1940

또는 end user가 제시해준 한계치나 국제규격에 따라 저속발란싱을 수행하게 된다. 그리고 운전속도 영역에 걸쳐 수행하는 고속발란싱은 고객이 요구하는 한계치 또는 고객의 제시가 없을 경우 ISO11342에 제시된 한계치로 발란싱한다.

#### 3.1 Case 1 : 200MW급 Steam Turbine Balancing

97년 12월 13일, 200 MW급 LP Steam turbine rotor의 balancing을 수행하였다. 표 3은 본 설비에서 발란싱한 로터의 제원을 나타내며, 그림 4는 spin bunker에 설치된 LP steam turbine rotor를 나타낸다. 그림 5는 진동측정용 센서 부착 위치 및 발란싱 수정면(4 plane)을 나타내며, 그림 6은 전체 발란싱 schedule를 나타내고 있다. 여기서 저속의 상태 즉, rotor의 축변형이 작용하지 않는 저속의 상태에서 발란싱(weight balancing)을 수행한 후, 고속발란싱으로 전 운전 속도 영역에 걸쳐 진동한계치 이내로 발란싱을 수행하였다.

표 3 200MW Steam turbine 제원

Maker	Siemens
Flow type	Double flow
Output	200 MW
Operating Speed	3600 RPM
Overspeed	3960 RPM(110 %)
First Critical Speed	1710 RPM
Total Weight	23.4 Ton



그림 4 발란싱 설비에 장착된 LP Rotor

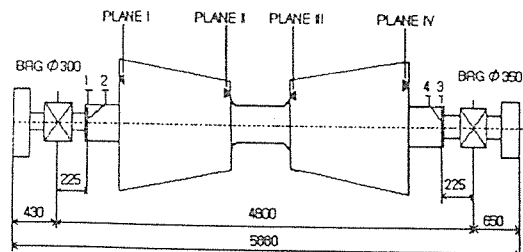


그림 5 진동측정용 센서부착위치 및 발란싱면

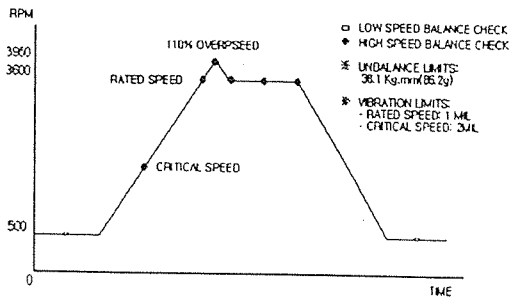


그림 6 고속진공발란싱 Schedule 및 한계치

그림 7은 저속 및 고속발란싱을 수행하기 전에 취득한 초기 unbalance를 기록한 polar plot이다. 여기서 알 수 있듯이, 초기 불평형이 상당히 큰 것을 알 수 있다.

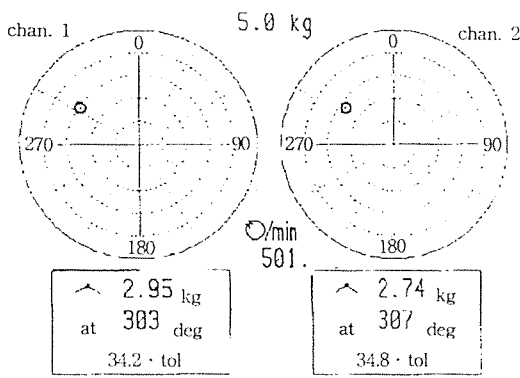


그림 7 초기 unbalance

그림 8은 초기 불평형을 저속발란싱한 후의 잔류 언발란스량을 나타낸 polar plot이다. ISO1940에 제시된 steam turbine의 등급은 G2.5 이지만, 저속 발란싱 결과를 보면 이보다 등급이 훨씬 양호한 G1.2로 수정된 것을 알 수 있다.

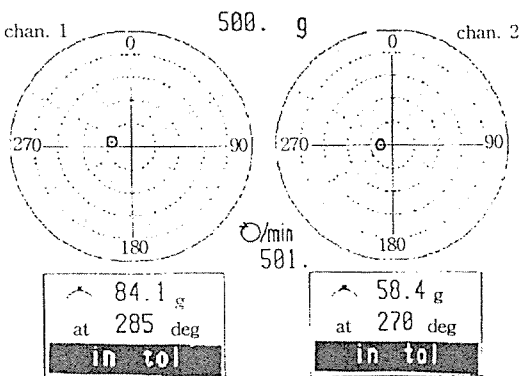


그림 8 저속발란싱후의 unbalance

그림 9는 저속발란싱후 초기 unbalance 진동치를 운전영역에 걸쳐 기록한 bode plot을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 비록 저속상태에서 발란싱규격보다 훨씬 양호하게 언발란스를 수정하였

지만, 위험속도 및 운전속도에서 기준 한계치(2 mils/1 mils)를 초과하였다. 즉, flexible rotor를 저속발란싱 machine에서 제시된 규격보다 양호하게 발란싱을 하였다더라도, 실제 운전영역에서는 회전체의 굽힘모드에 의해 진동한계치를 넘는 경우가 많다. 이러한 flexible rotor는 회전체의 mode shape를 고려하여 전 운전영역에 대하여 진동한계치 이내로 언발란스를 수정하는 고속발란싱을 하여야 한다.

그림 10은 고속발란싱후에 취득한 진동데이터를 나타낸 bode plot이다. 즉, Mode shape를 이용하여 전 운전영역에 대해 발란싱함으로써 한계치 이내로 진동치를 유지할 수 있었다.

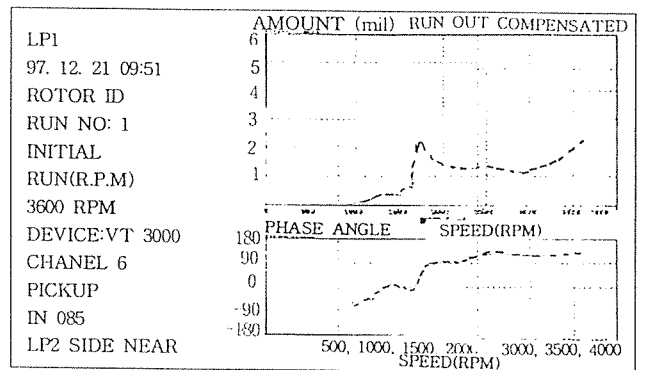


그림 9 고속발란싱전 취득한 초기 진동치

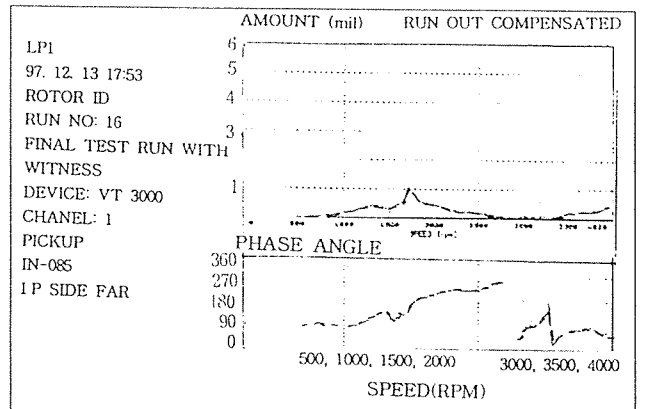


그림 10 고속발란싱후 취득한 final 진동치

### 3.2 Case 2 : 14MW급 박용 steam turbine balancing

소형 고속발란싱 설비에서 97년 9월 30일 LNG 선 구동용 HP steam turbine rotor를 발란싱하였다. 표 4는 소형설비에서 발란싱한 로터의 제원을 나타내며, 그림 11은 spin bunker에 실제 설치된 박용 steam turbine을 나타낸다. 그림 12는 steam turbine의 진동측정용 센서 부착 위치 및 발란싱 수정면을 나타내며, 그림 13은 전체 발란싱 schedule를 나타내고 있다.

표 4 14MW 박용 Steam turbine 제원

Maker	HHI
Flow type	Single flow
Output	14.4 MW
Operating Speed	5721 RPM
Overspeed	6293 RPM(110 %)
1차 Critical Speed	5400 RPM
Total Weight	1.5 Ton

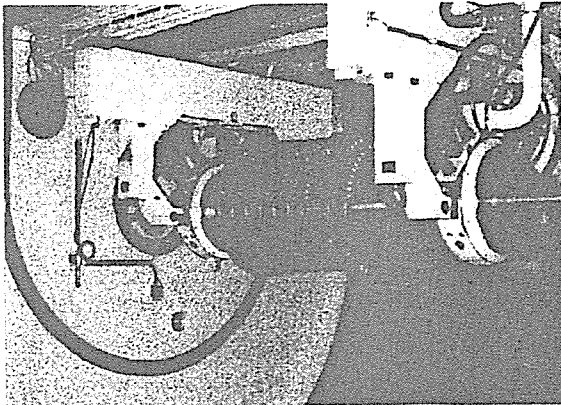


그림 11 발란싱 설비에 장착된 박용스팀터빈

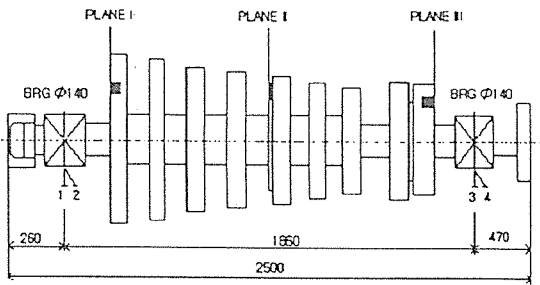


그림 12 진동측정용 센서부착위치 및 발란싱면

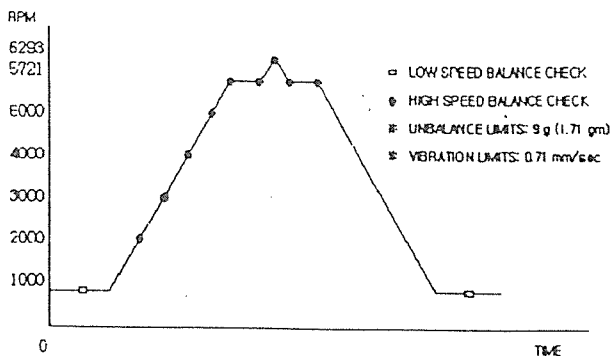


그림 13 고속진공발란싱 Schedule 및 한계치

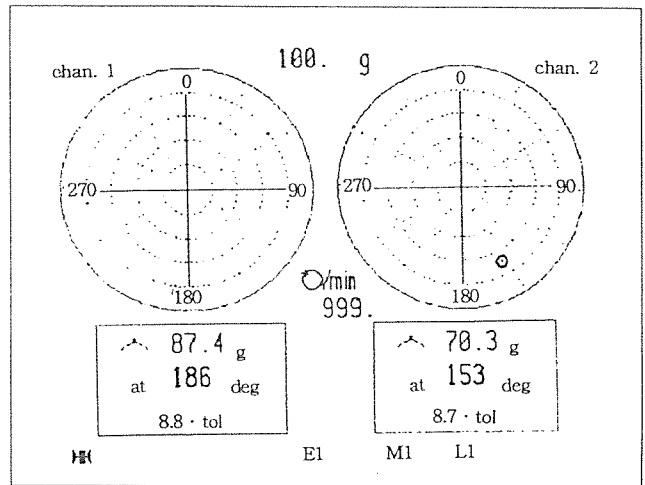


그림 14 초기 unbalance

그림 14는 저속 및 고속발란싱을 수행하기 전에 취득한 초기 언발란스를 기록한 polar plot이다. 여기서도, 초기 불평형이 상당히 크게 나오고 있다.

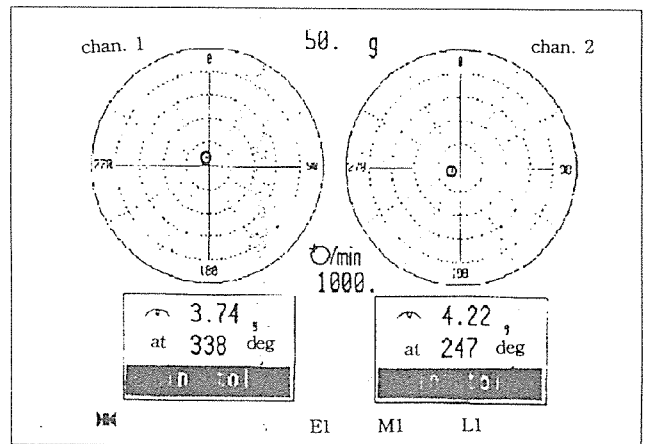


그림 15 저속발란싱후의 잔류 unbalance

그림 15는 초기 불평형을 저속발란싱한후의 잔류언발란스량을 나타낸 polar plot이다. ISO1940에 제시된 등급(G2.5)보다도 더 양호하게 발란싱(G0.6)이 이루어진 상태다.

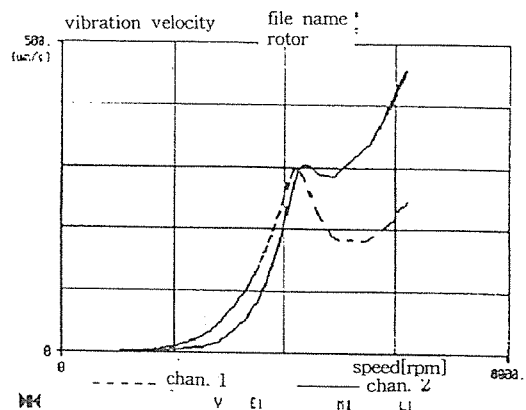


그림 16 고속발란싱후 취득한 final 진동치

이 경우에서도 위험속도 통과시 진동한계치를 초과하여, mode shape를 이용한 고속발란싱으로 진동한계치 이내로 진동치를 유지하게 되었다. 그림 16은 고속발란싱후에 취득한 진동테이타를 나타낸 bode plot이다.

#### 4. 결론

본 논문의 내용에서 알 수 있듯이, unbalance의 원인 및 회전체 분류방법, 회전체 종류에 따른 balancing M/C에 대하여 알아 보았다. 그리고 flexible rotor를 고속발란싱 하여야되는 이유등에 대해서도 설명하였고, 두가지 예에 대하여 검증하였다.

대형 고속터빈/발전기 및 고압원심압축기와 같은 flexible rotor는 운전신뢰성을 보증하기 위해 필수적으로 고속진공 발란싱설비에서 전 운전속도에 걸쳐 balance quality를 유지할 수 있는 고속발란싱을 수행하여야 한다.

적절한 발란싱 방법 및 발란싱 machine를 선택하기 위해서는

- Rigid rotor인지 flexible rotor인지의 구분
- Critical Speed 수
- 사용-용도
- 발란스 규격 등

여러 가지 사항을 고려하여 선택하여야 한다.

〈발란싱 시험실적〉

고객명	Rotor 종류	용량	1차공진 주파수 (rpm)	운전 속도 (rpm)	Balancing Plane 수	발란싱 시험일자
현대전자	스팀터빈	44MW	1750	3600	3	97. 4. 3
현대정유	발전기	120MW	1620	3600	10	97. 6.27
현대정유	스팀터빈	120MW	1600	3600	3	97. 8.19
현대정유	발전기	120MW	1620	3600	10	97. 9. 6
현대상선	HP 스팀터빈	14MW	4500	5671	3	97. 9.26
LG화학	스팀터빈	2MW	6500	8250	3	97.11.15
울산화력	HP 스팀터빈	200MW	1800	3600	3	97.12. 8
	LP1 스팀터빈		1710	3600	5	97.12.12
	LP2 스팀터빈		1760	3600	4	97.12. 5
현대상선	HP 스팀터빈	14MW	4500	5671	3	98. 3. 5
한화에너지	발전기	110MW	1600	3600	10	98. 3.20

#### 〈참고 문헌〉

- (1) ISO 1925 : "Balancing Vocabulary", 1990
- (2) Hatto Schneider, 1991, "Balancing Technology", Schenk, Darmstadt1, Germany
- (3) Fredric F. Ehrich, 1992, "The Handbook of Rotordynamics", McGRAW-HILL, INC. NewYork, USA
- (4) Mark S. Darlow, 1989, "Balancing of highspeed Machinery", Springer-Verlag, NewYork, USA
- (5) Charles Chckson, 1990, "The Practical Vibration Primer", Fifth Ed. Gulf Publishing Co. Houston, USA
- (6) Ronald L. Eshleman, 1989, "Balancing of Rotating Machinery Course Notes", Vibration Institute, USA
- (7) ISO1940: Mechanical Vibration - Balance quality requirments of rigid rotors - Part 1 : Determination of permissible residual unbalance. January 1986  
Part 2 : Assessment of balance errors is in preparation.
- (8) ISO11342: Mechanical Vibration - Methods and criteria for the mechanical balancing of flexible rotors. Feburary 1998.

#### 관련법령 개정내용 요지

- 에너지합리화법 시행규칙중 개정령 (산업자원부령 제4호 : 98. 4. 1)
  - 에너지효율기준 기자재 범위를 승용차에서 모든 자동차로 확대
  - 에너지 사용계획 수립대행자의 기술요원교육을 에너지관리공단 및 산업자원부 장관이 지정하는 비영리 법인이 실시
- 에너지합리화법 열사용 기자재 관리규칙 (산업자원부령 제5호 : 98. 4. 1)
  - 열사용기자재 제조업,시공업 등록 및 형식 승인 관련조항 삭제
  - 검사증의 제교부방법 제시
  - 제조업자의 사전검사 관련조항 삭제 및 자체검사 완화 등