

## 산업용 소형 스팀터빈

최범석\*

### 1. 서 론

스팀터빈은 보일러에서 발생한 고온, 고압의 증기를 노즐로 분출시켜서 고속의 증기 흐름을 만들고 이것을 회전하는 날개 차에 내뿜어 동력을 얻는 열기관이다. 1896년 C. G. Curtis가 증동형 Curtis 스팀터빈을 고안하여 1903년 W. L. R Emmet에 의해 수직형 Curtis 스팀터빈이 500kW의 출력으로 상업운전된 이후로, 스팀터빈은 꾸준히 개량되면서 산업 전반에서 다양하게 이용되고 있다.

본 원고에서는 선박 등의 추진용으로 사용되는 스팀터빈이나 화력발전소에서 사용되는 대형 발전용 스팀터빈을 제외한 산업용 소형 스팀터빈에 대해서만 설명하기로 한다. 산업용 스팀터빈은 기계, 조선, 발전설비 등 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 주로 기계구동용으로 사용되거나 제너레이터를 연결해 발전용으로 사용된다. 기계구동용 스팀터빈은 플랜트 설비에서 대용량 펌프나 압축기 등을 구동하는데 많이 사용되고, 석유/화학 제품 운반선 및 부유식 원유생산저장하역설비의 하역용 유압펌프를 구동하는 목적으로 사용된다.

스팀터빈 제너레이터는 스팀터빈과 감속기, 발전기를 포함한다. 스팀터빈은 한 단 또는 둘 이상의 압력단에서 유용한 엔탈피 차이를 축동력으로 변환한다. 감속기는 스팀터빈이 효율적인 회전수에서 운전하면서 발전기의 운전속도 매칭이 되도록 하는 역할을 하고, 발전기는 축동력을 전기적인 출력으로 변환해 준다. 스팀터빈 제너레이터는 발전소 및 각종 증기생산 플랜트에서 증기감압 과정에 적용되서 감압밸브를 대체하면서 전기를 생산하는데 사용된다. 보일러, 가열기 등의 증기 생산 설비, 공정 증기 공급헤드, 화학공정 플랜트, 중소형 소각로, 지역난방 플랜트, 냉동 및 저온 플랜트, 천연가스 공급배관 등에 스팀터빈 제너레이터가 사용될 수 있다.

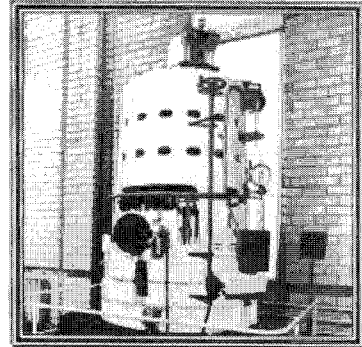


Fig. 1 최초로 상업운전된 스팀터빈  
(GE 제작, Newport Electric Co. 운전)

### 2. 스팀터빈의 분류와 특징

스팀터빈은 출구 스팀조건에 따라 배압터빈과 응축터빈으로 분류할 수 있으며 다음과 같은 특징을 가진다.

#### ■배압터빈(back pressure turbine)

- 배압터빈은 터빈 출구압이 대기압과 같거나 큰 조건에서 작동하도록 설계된 터빈
- 중압에서 고압의 증기를 사용하여 대기압 또는 대기압 이상의 요구 공정헤드까지 팽창시키는데 사용
- 배압터빈은 터빈과 배출되는 스팀에서 대부분의 열을 가지고 있으므로 상대적으로 높은 사이클 효율을 가짐
- 펌프나 압축기 구동용으로 흔히 사용
- 보통 단단 터빈으로 사용
- 터빈에서 배출되는 스팀은 공정라인이나 가열장치에 공급됨

#### ■응축터빈(condensing turbine)

- 응축터빈은 터빈 출구압이 대기압과 보다 낮은 압력에서 작동하도록 설계된 터빈
- 비교적 저압의 증기를 받아들여 대기압보다 낮은 압력의 응축기(condenser)로 증기를 배출하도록 하는 팽창과정을 거침
- 응축기의 냉각수가 대부분의 열을 흡수해버리므로 사이클 효율이 낮음

\* 한국기계연구원 에너지기계연구실  
E-mail : bschoi@kimm.re.kr

- 펌프나 압축기 구동용으로 사용되는 경우는 흔치 않음  
 - 보통 다단터빈의 형태로 사용  
 스팀터빈을 포함하는 축류터빈은 충동형 터빈과 반동형 터빈으로 구분할 수도 있다.

■ 충동형 터빈(impulse turbine)

- 충동형 터빈은 거의 대부분의 팽창이 노즐에서 일어남
- 높은 날개부하를 가짐
- 구조가 간단하고 콤팩트함
- 효율이 낮은 편

■ 반동형 터빈(reaction turbine)

- 반동형 터빈에서는 노즐과 로터 블레이드 양쪽에서 팽창이 일어남
- 날개부하가 낮음
- 같은 출력을 내기 위해서는 더 많은 단이 요구되고 크기가 커짐
- 효율이 높은 편

대부분의 소형 스팀터빈은 충동형이거나 충동형에 가깝게 설계한다.

터빈을 단단 터빈(single stage turbine)과 다단 터빈(multistage turbine)으로 구분할 수도 있고, 부분흡입(partial admission) 터빈과 전흡입(full admission) 터빈으로 구분하기도 한다. 또한 추기(extraction) 유무에 따라 스팀터빈을 분류하기도 한다. 소형 스팀터빈에서는 여러 가지 이유에서 부분흡입의 충동형 터빈이 많이 사용되고 있다.

### 3. 기계구동용 스팀터빈

스팀터빈은 보일러 급수펌프, 압입송풍기, 블로어워, 공기 압축기 및 기타 플랜트용 회전기기의 주요 구동원으로 사용된다. 스팀터빈 구동장치는 변속을 위한 인터터를 장착한 유도모터와 같은 기능을 할 수 있다. 스팀터빈은 다음과 같은 이유에서 펌프나 압축기의 구동장치로 적합하다.

- 넓은 속도영역에서 운전이 가능하다.
- 따라서 펌프나 압축기가 가정 효율이 좋은 운전점에서 작동될 수 있도록 조절이 가능하고, 유량조건의 변화에 따라 시스템 수두/압력 곡선에 매칭을 시킬 수 있다.
- 폭발성이 있거나 부식성이 높은 환경에서도 사용할 수 있다.
- 빠르고 신뢰성있는 시동능력을 가진다.
- 고속으로 회전하는 기기의 직접구동에 적합하다.
- 과부하가 걸렸을 때도 멈추지 않는다.
- 시동 토크가 크다.
- 신뢰성이 있고 유지보수가 쉬운 장치이다.

- 제어하기 쉽다.

다음은 펌프/압축기 구동용 스팀터빈 선택을 위한 Selection Data이다.

■ Turbine Basic Selection Data Required

-Minimum requirements:

- inlet steam pressure and temperature
- exhaust steam pressure
- pump power (rated max.,-min.)
- pump speed (rated max.,-min.) and maximum allowable over-speed for trip
- speed control (manual or type of process signal)
- site conditions: indoor/outdoor and ambient conditions
- cooling water data (pressure, temp and cleanliness)

-Any off-normal steam or pump operating conditions:

- affects turbine steam path areas and ability to make power
- low power conditions create high exhaust temperature (affects lubrication method)

-Type of pump and service:

- centrifugal or positive displacement
- normal or quick start
- continuous or standby duty
- site electrical rating (if electrical accessories are involved)

-Specifications:

- customer required scope and turbine shop tests
- API-611/612-3rd or 4th editions (API data sheets required)
- steam cost evaluation
- sound level requirements

### 4. 폐압/폐열 회수용 스팀터빈

대부분의 발전소와 증기생산 플랜트에서는 증기 분배 및 이송배관의 비용을 절감하기 위해 사용처보다 높은 압력의 증기를 생산하고, 사용처에서는 감압밸브로 적절한 압력의 증기로 변환하여 사용하므로 결과적으로 감압과정에서 에너지를 낭비하게 된다. 기존 공정의 감압밸브를 소형 스팀터빈으로 대체하면 사용처에서 요구되는 증기를 공급하는 동시에 발전을 할 수 시스템의 구현이 가능하다.

최근 일본에서 소형관류보일러를 대상으로 하는 발전시스템을 개발하고 있으며, 미국, 일본, 독일 등을 중심으로 폐압을 활

용하는 스팀터빈 발전기를 상용화하여 증기 생산 플랜트에 보급이 확산되고 있다. 국내에서는 해외 제품의 소형 스팀터빈을 공정용 등으로 부분적으로 사용하고 있으며, 일부업체를 중심으로 해외 스팀터빈을 수입하여 화학공장, 발전소 및 소각로 등에 적용하여 폐압을 활용하는 사례가 늘고 있다. 또한 국내에서도 수입에만 의존하던 소형 스팀터빈 개발에 착수하여 설계 및 제작기술 확보를 위한 연구가 진행 중이며, 그림 2는 폐열/폐압을 이용하는 스팀터빈 발전설비의 설치 모습이며, 그림 3은 국내 독자모델로 개발 중인 스팀터빈의 유동해석 결과이다.

### 5. 스팀터빈의 주요 구성품 및 요소기술

산업용 소형 스팀터빈은 다음과 같은 주요 구성품들을 갖는다.

- 터빈 케이싱
- 노즐 및 로터 블레이드, 휠
- 회전축계, 씰, 베어링
- 기어박스
- 가버너
- Control system, 보기 시스템



Fig. 2 시멘트공장 폐열이용 스팀터빈 발전설비

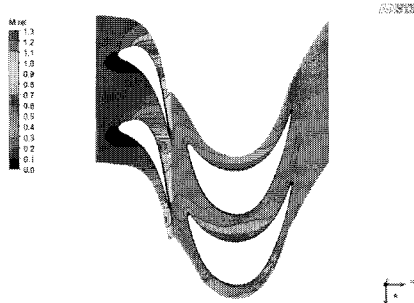


Fig. 3 폐압발전용 스팀터빈 유동해석

노즐은 증기를 가속시켜 터빈입구의 압력을 운동에너지로 변환시키는 역할을 한다. 로터 블레이드는 회전하면서 유체의 운동에너지를 흡수해서 회전력을 발생시킨다.

반동형 터빈에서는 회전하는 로터열 전후로 압력차이가 존재하므로 블레이드 팁에서의 누설과 축방향 스러스트가 중요한 인자가 될 수 있다. 베어링은 스러스트 베어링과 레이디얼 베어링이 사용되며, 타입에 따라 볼베어링과 저널슬리브베어링이 있다.

가버너는 터빈으로 보내지는 스팀의 양을 조절하여 발생하는 기계적 일의 양을 조절하는 장치이며, 직동식 플라이휠, 유압식, 오일 릴레이 가버너가 있다.

산업용 소형 스팀터빈의 개발을 위한 요소기술은 다음과 같다.

- 열역학적 설계 기술
- 공력설계 기술(노즐, 로터 블레이드, 유로 등)
- 회전체진동 제어기술(회전축, 베어링, 씰 등)
- 터빈 제작 기술
- 성능평가 기술
- 스팀터빈 적용 기술(응용시스템 설계, selection, 개조)
- 운전 및 진단 기술

그림 4와 5에는 소형 스팀터빈의 설계 workflow와 회전체 동역학 설계 절차를 도식화 하였다.

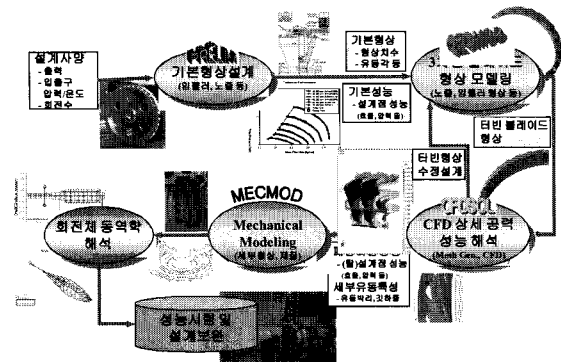


Fig. 4 소형 스팀터빈 설계 절차

### 6. 소형 스팀터빈 성능시험

스팀터빈 성능시험은 대략 다음과 같은 절차를 가져야 한다.

1. 시험 진행 계획(advance planning for test)
2. 시스템 격리(cycle isolation)



Fig. 5 소형 스팀터빈의 회전체동역학 설계 절차

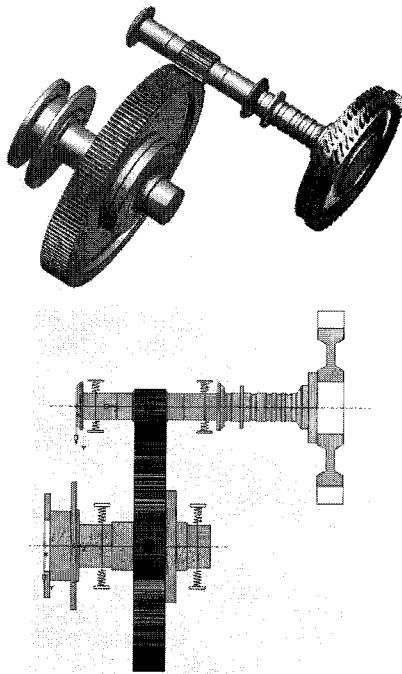


Fig. 6 소형 스팀터빈 3차원 형상 및 회전체동역학 모델링

3. 예비실험(preliminary tests)
4. 실험수행(conduct of test run)
5. 데이터 정리(data reduction)
6. 시험 결과의 계산/평가(computation of test results)
7. 시험결과 재현성(repeatability of test results)

시험 진행 계획에서는 터빈 설치 이전에 터빈과 터빈 응용 시스템의 측정을 위한 계획이 수립되어야 하는 단계이다. 이 계획에는 실제의 위치 및 설치를 위한 준비, 충분한 재현성을 가지는 시험결과를 얻기 위해 필요한 측정 횟수 등이 포함되어야 한다. 터빈 실험의 재현성을 위해서는 명확한 시스템 격리가 필수적이다.

예비실험은 다음과 같은 이유에서 수행된다.

- 터빈 밸브 포인트의 위치를 정하기 위하여
- 터빈 사이클을 격리시키고 사이클의 water balance를 맞추기 위하여
- 내부적인 사이클 조건(장비 운전 변화 등)을 점검하기 위하여
- 시험 계측장치의 작동을 점검하고 시험자가 시험절차에 익숙해 질 수 있도록 하기 위하여
- 계측기를 점검하거나 교정할 필요가 있는지 점검하기 위하여
- 터빈 조건에 대한 예비평가를 하기 위하여

성능시험은 계획된 시험절차에 따라서 수행 하여야 하고, 시험을 진행하는 동안 계측된 값이 일관성을 가지는지 확인해야 한다. 2시간 정도의 시험에서 권장되는 측정 주기는 아래의 예보다 적어야 한다.

- 매 2분 : 주 유량(primary flow), 출력, 출력측 회전수
- 매 10분 : Throttle 유량 계산에 영향을 주는 2차 유량 (secondary flow), 주 압력(primary pressures), 주 온도(primary temperatures)
- 매 20분 : Throttle 유량 계산에 영향을 주지 않는 2차 유량 (secondary flow)
- 매 20분 : 발전기 출력 계산에 영향을 주지 않는 2차 전기적인 데이터
- 매 30분 : integrated flow, integrated electric-power measurements

시험된 결과에 대한 일관성과 신뢰성을 검증해야 한다. ASME PTC 19.1에 시험 데이터의 검증에 필요한 절차를 기술하고 있다.

터빈 시험 결과에 대한 계산은 ASME PTC 6S와 NEMA Standard Publication No. SM 24 등에 나타난 절차를 따른다.

시험 재현성은 긴 시간 동안의 시험에서 동일한 입력과 출력 관계의 시험 결과를 제공할 수 있는 시험 계측 시스템의 능력이다. 시험의 절대적인 정확도를 역설하지는 않지만 계측의 정확도가 높으면 오랜 시간동안의 재현성도 높아지는 것이 일반적이다. 따라서, 계측시스템의 초기비용 및 운전비용을 고려

표 1 터빈 성능시험의 재현성 예

turbine type	type test	repeatability
condensing, non-extraction, super-heated inlet stream	steam rate	±0.5%
condensing, regenerative cycle, superheated inlet stream	maximum capacity	±0.5%
	heat rate	±0.5%
condensing, reheat-regenerative cycle, superheated inlet stream	enthalpy-drop	±0.3~±0.5%
	maximum capacity	±0.5%
	heat rate	±0.5%
condensing, regenerative cycle, saturated inlet stream	heat rate	±0.5%
non-condensing, non-extraction, super-heated exhaust	enthalpy-drop	±0.5%
	maximum capacity	±0.3%
noncondensing, extraction	enthalpy-drop	±0.6~±0.7%
	maximum capacity	±0.5%
	steam rate without extraction	±1.8%
	steam rate with extraction	±2.4%
special procedures	heat rate	±0.7%

한 측정장비의 적절한 조합이 필요하다. 다음 표는 스팀터빈 시험의 재현성 예를 보여준다.

### 7. 소형 스팀터빈 관련 규격

- ANSI/ASME PTC 6-1996-Steam Turbines

- ANSI/ASME 6A-2000-Appendix to PTC 6-Test Code for Steam Turbines
- ANSI/ASME PTC 6S-1988 (R2003)-Procedures for Routine Performance Test of Steam Turbines
- ANSI/ASME PTC 6 Report 1985 (R1997)-PTC 6 Report-Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines
- ANSI/ASME PTC 4.4-1981(R2003)-Gas Turbine Heat Recovery Steam Generators
- ANSI/ASME PTC 46-1996-Performance Test Code on Overall Plant Performance
- ASME Binder-Single Individual Binder for 2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code
- ASTM DS67B-Handbook of Comparative World Steel Standards: Third Edition
- ANSI/API 611-General-Purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services
- ANSI/API Std 612 / ISO 10437-Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries-Steam Turbines-Special-purpose Applications, Sixth Edition
- ANSI/API Std 613-API Standard 613, Special Purpose Gear Units for Petroleum, Chemical and Gas Industry Services
- API Std 614-Lubrication Shaft-Sealing and Control-Oil Systems for Special-Purpose Applications
- NEMA Standard Publication No. SM 24-1991(R1997) - Land Based Steam Turbine Generator Sets 0-33,000 kW