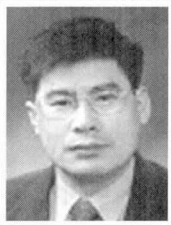


# 에너지절감을 위한 폐열회수용 열압축 기에 대한 고찰

A study for steam energy savings by the thermal vapor recompressor



글 | 李 載 根

(Lee, Jae Keun)

기계안전기술사, 산업기계설비기술사,  
건설기계기술사,  
남해화학(주) 기술팀장(부장).  
E-mail : 2jaekeun@hanmail.net

Recently most companies require various type of energy sources, in order to be more energy efficient in their plant due to the increasing current oil price.

So, the multi-national companies are shaping ideas how to reduce energy costs and use substitute energy.

The purpose of this study is to attempt to save energy by making more valuable high pressure steam through TVR(Thermal Vapor Recompressor) from the surplus low pressure steam of HRB(Heat Recovery Boiler) in sulfuric acid plant.

## 1. 서론

지금의 국제유가는 1차 오일쇼크(1974년) 때 보다는 8배, 2차 오일쇼크(1980년) 때 보다는 2.4배 가량 올라 85달러까지 뛰어 올라 유가가 100달러를 돌파하는 것은 시간문제라 한다.

특히 에너지 다소비업체인 화력발전소, 정유공장, 화학플랜트, 제지공업, 식품공업, 비료공장 등 다량의 증기를 사용하고 있는 산업분야에서는 에너지 절약 및 회수를 위하여 비상경영체제가 요구되는 시점이다.

〈표 1〉 원유가의 오름세와 최근 동향

	Dollar/Barrel								
	2002	2003	2004	2005	2006	2007			
	average	average	average	average	average	1Q	2Q	11.13	
WTI	26.09	31.11	41.50	56.46	66.04	56.37	75.49	91.45	
Brent	25.15	28.70	38.36	38.36	65.06	57.50	75.40	89.33	
Dubai	23.81	26.79	33.74	33.74	61.55	54.39	70.13	85.44	

자료 : 에너지경제연구원

주로 증기의 잠열을 이용하는 증기가열장치는 증발, 농축, 건조, 기타 공정의 증발, 응축과정에서 다량의 폐증기가 발생하게 된다. 이 증기는 설비의 열원으로 사용되는 증기와 비교하면 온도와 압력이 약간 낮을 뿐 거의 동일한 열에너지를 보유하고 있다. 따라서 이러한 폐증기를 압축하여 필요 공정 조건으로 만들어 재사용하는 것은 효과적인 에너지 회수라 할 수 있다.

증기를 압축하는 방법에는 블로워식과 열압축식이 있으며, 본고에서는 열압축기를 이용한 시스템을 소개하고자 한다.

열압축기(TVR : Thermal Vapor Recompressor)란 고압의 구동증기의 열에너지를 이용하여 공정 중에 발생하는 저압의 폐증기 또는 후레쉬증기 등을 회수하는 장치로서, 회수된 증기는 공정에 필요로 하는 증기의 압력으로

압축하여 공정라인에 재투입하는 에너지 절약시스템이다.

구조 및 작동원리에 있어서는 증기 이젝터와 유사하나, 그 적용 범위에서 구별된다.

열압축기의 기본원리는 구동노즐 출구에서의 증기속도가 1000~1400 m/sec의 고속으로 분출하여 흡입의 저속 증기와 난류 혼합하므로 이론적 해석이 어렵고, 실험에는 고가의 고압보일러가 필요하기 때문에 국내에서는 이에 관한 체계적인 연구와 실험결과가 없었다. 따라서 본 연구는 남해화학(주)과 한국열유체기술사(주)가 공동으로 고압(44 bar), 대용량(30ton/hr)의 열압축기를 현장에서의 실정 실험을 통하여 그동안의 경험과 이론을 정립하고, 열압축기 시스템의 신뢰도를 확인하였다.

## 2. 이론해석

(그림 1)은 열압축기의 기본구조와 각부의 명칭을 나타내며, 주요부로는 분사노즐(Jet Nozzle), 흡입실(Suction Chamber), 디퓨저(Diffuser)의 3부분으로 나누어진다.

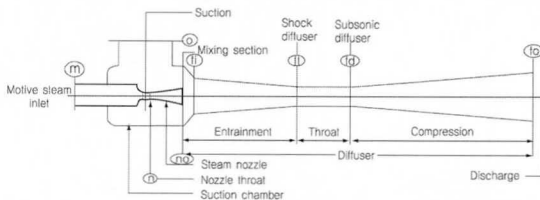


Fig.1 Basic structure of Thermo-compressor

(그림 2)는 열압축기의 각부의 작동상태에 대한 압력변화와 속도변화를 나타낸다. 열압축기의 작동원리는 구동증기(1)가 구동노즐(2)을 통과함으로써 보유하는 열에너지가 속도에너지로 변환하며, 이에 따라 흡입실내에 진공을 형성시켜 유체를 흡입하게 된다.

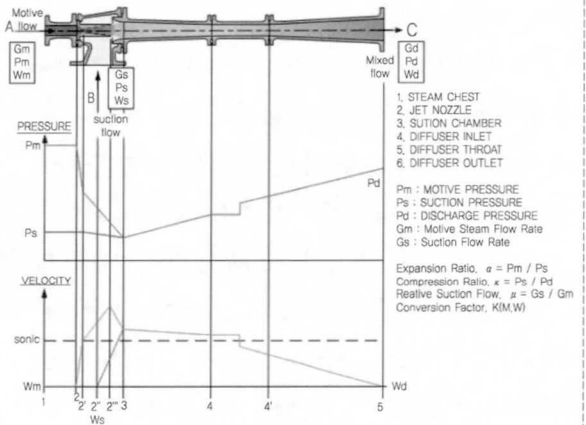


Fig.2 Characteristic Curves of Pressure and Velocity

흡입실에 도달한 흡입기체는 디퓨저의 입구부(3)에서 구동증기와의 속도 차에 의한 마찰항력, 즉, 흡인력에 의하여 가속된다. 이렇게 하여 양 유체는 디퓨저의 축소부를 지나면서 운동량이 교환되며, 구동증기는 감속, 흡입증기는 가속되어 디퓨저 목부(4)에 이르게 된다. 디퓨저의 목부에서는 양 유체가 완전히 혼합되어 거의 균일한 속도분포를 갖는 흐름으로 안정된 후, 유로면적이 점차 커지는 디퓨저의 확대부(5)를 지나면서 다시 운동에너지가 압력에너지로 환원됨으로써 구동 및 흡입유체의 혼합유체는 압축되어 토출이 가능하게 된다.

이러한 유동과정을 거치는 구동증기 및 흡입기체에 의한 각부의 손실 및 엔탈피의 변화 등을 정확히 이론적으로 해석하여 주어진 설계조건에서 열압축기가 최고효율을 유지할 수 있도록 각부의 주요 치수를 결정하고, 제작된 열압축기의 작동성능곡선을 사전에 예측하는 것은 상당한 노력을 요한다.

이와 같이 분사 노즐은 유동 형태에 의하여 아음속 유동에서는 축소 분사노즐, 초음속 유동에서는 축소-확대 노즐로 설계되어지며, 초음속 유동의 경우 마하 3~4의 고속 유동이 이루어짐으로 제작

과정이 매우 중요하다.

디퓨저(3,4,5)에서는 운동에너지 교환, 혼합, 초음속 유동, 충격파의 발생, 동결현상 등 매우 복잡한 유동이 발생하므로 이론적인 해석이 불가능하며, 설계 및 제작에는 매우 신중을 기하여야 한다.

〈그림 3〉은 열압축기 내부 유동상태의 변화를 I-s 선도상에 나타낸 것이다. m은 구동노즐입구에서의 구동증기상태, o는 흡입기체의 상태, fo는 혼합기체의 토출상태를 나타낸다. m ~ no'와 구동증기의 가역단열변화과정인 팽창과정으로서 손실을 무시한 경우이며, 실제의 경우는 m ~ 1과 같이 비가역단열변화과정이 된다.

구동노즐입구의 압력 Pm의 증기는 노즐에서 분사되어 압력 Pno까지 단열팽창한다. 상태 f는 상태 no'과 상태 a의 혼합상태로서 혼합기체의 압축과정을 가역단열변화로 취급하여 손실을 무시한 경우이며, f1 ~ fo'은 실제의 경우를 나타낸다.

일반적으로 비가역 과정에서 엔트로피는 증가하여 에너지 손실이 발생하므로 여기서는 실제 열압축기를 계산할 경우의 각부에서 운동량 교환 시에 발생하는 유로에서의 마찰손실 및 난유에 의한 손실, 충격파 등을 고려한 각부의 유동상태의 해석이 필요하다.

### 2.1 구동 노즐의 목부와 출구 직경 계산

열압축기의 설계와 관련하여 가장 관심이 있는 부분이 구동 노즐의 목부 직경과 디퓨저 목부의 직경이다. 일반적으로 구동 노즐의 목부 직경에 대한 이론 계산식 및 실험결과에 대한 자료는 많이 발표되어 있으며, 식을 정리하면 다음과 같다.

일반적인 열압축기의 흡입 압력은 임계압력  $[P_c = P_m(2/(k+1))^{k/(k-1)}]$ 보다 작은 상태가 되며, 이

때 구동 노즐 목부에서 증기속도는 음속으로 다음과 같다.  $(P_c)P_o$

$$V_n = \sqrt{2\left(\frac{x}{x+1}\right) P_{mo} \nu_{mo}} \quad (2.1)$$

여기에서,

$V_n$ : 구동 노즐 목부 유속, m/s

$x$ : 증기 비열지수, 1.3 or 1.135

$P_{mo}$ : 구동 증기 압력, Pa

$\nu_{mo}$ : 구동 증기 비체적, m<sup>3</sup>/kg

또한 구동 노즐 목의 단면적을 구하면,

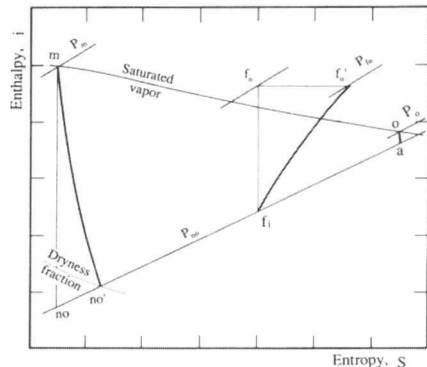
$$A_n = \frac{G_{mo}}{\sqrt{x\left(\frac{2}{x+1}\right)^{\frac{x+1}{x-1}} \frac{P_{mo}}{\nu_{mo}}}} \quad (2.2)$$

여기에서,

$A_n$ : 구동 노즐 목부 단면적, m<sup>2</sup>

$G_{mo}$ : 구동 증기 유량, kg/hr로 된다.

구동 노즐의 유동형태를 i-s 선도에서 표시하면, 〈그림 3〉과 같다.



〈그림 3〉 Millier Diagram for Typical Thermo-compressor

여기서 구동 노즐 내에서의 증기흐름을 다음과 같이 가정한다.

- (1) 노즐 주위로의 열의 출입이 없는 단열상태로 "dq = 0" 이다.

- (2) 노즐내의 유동은 기계적인 일은 없으므로 "A W<sub>no</sub> = 0" 이다.
- (3) 노즐은 수평상태로 놓여 있어 위치에너지에 관하여 "AZ<sub>m</sub> = AZ<sub>no</sub>" 이거나, 비엔탈피의 차에 비하여 위치에너지의 차는 극히 작아서 "A(Z<sub>no</sub> - Z<sub>m</sub>) ino - im)" 이다.

## 2.2 디퓨저 목부 직경의 계산

디퓨저 축소부는 저속의 흡입증기와 고속의 구동증기에 의하여 가속, 혼합이 이루어지는 부분으로, 적절한 단면적을 가져야 한다. 특히 불필요한 와류 손실이 없는 구조가 되어야 한다. 구체적인 흐름방향의 단면 축소율은 속도분포의 발달과정을 파악하여야 결정이 가능하다.

흡입 유체와 구동 유체의 흐름해석 및 이를 통한 축소부의 형상 결정에는 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 구동증기는 노즐 유출에서 유출한 후 확산되는 일은 없다.
- (2) 축소부의 임의의 단면에서 압력은 균일하다.
- (3) 축소부에서 흡입유체가 점유하는 체적내의 질량은 흡입유체의 정지 질량과 같다.

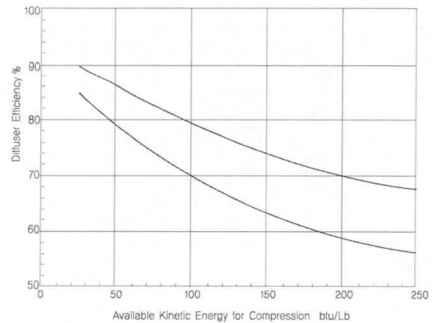
이상과 같은 가정 하에 축소부 내의 임의의 위치에서 미소체적(dL×Ad)을 점유하는 흡입유체의 질량 m<sub>s</sub>가 구동 유체의 가속력에 의하여 가속된다고 하자.

현장에서의 열압축기의 디퓨저 설계/제작에 활용되고 있다. 초음속 유동상태에서 혼합, 압축과정이 진행되는 디퓨저 축소부의 축소각은 2°를 적용하여 디퓨저 입구부에서 박리에 의한 손실을 방지하고 있다.

열압축기 목부 길이는 {3.5 ~ 4.5} Dd의 값을 적용하며, 디퓨저의 확대부 확대각은 양각 7° 부근에

서 손실이 최소가 된다.

디퓨저에서의 압축 효율은 <그림 4>에서 보는 바와 같이  $\eta_d = 0.6 \sim 0.9$ 까지 범위가 넓고, 효율이 낮은 편이다.



<그림 4> 디퓨저의 압축효율

## 2.3 열압축기 출구부에서 유체의 온도계산

열압축기 내부에서의 유동은 아주 짧은 시간 안에 유동이 완료됨으로 에너지 보존의 법칙을 적용한다. 따라서 열압축기 출구에서의 온도계산은 Motive의 보유 엔탈피와 흡입유체의 엔탈피의 합에 해당하는 온도이다. 증기와 공기가 혼합되어 있는 경우에는 총 엔탈피 = 출구 압력에 해당하는 포화증기의 엔탈피(증기유량×비엔탈피) + 공기를 증기의 포화온도까지 상승시키는데 필요한 엔탈피(공기유량×온도상승×공기의 비열) + 증기와 공기를 포화온도 이상 가열하는데 필요한 엔탈피(증기와 공기의 유량×온도상승×증기와 공기의 혼합비열)로 구분하여 계산하면 출구온도를 계산할 수 있다.

## 2.4 열압축기의 배관치수 결정

각종 유체의 배관 내의 유속 결정은 압력손실과 관련되어 있으므로 일반적으로 적용하는 경제유

속이 존재한다. <표 2>에는 열압축기 설계와 관련하여 현장에서 채용하고 있는 압력조건에 따른 각종 유체의 경제유속을 나타내고 있다.

<표 2> 각종 유체의 배관 경제유속

구 분	압 력 범 위	경제속도	비 고
진공배관	0.1 ~ 1.0 mbarA	80 m/s	
진공배관	1.0 ~ 100 mbarA	60 m/s	
진공배관	100 ~ 100 mbarA	40 m/s	
스팀배관	0 ~ 25 barA	30 m/s	
응축수배관		1.0 m/s	
C/W 배관		2.5 m/s	

### 3. 시운전 결과

구 분	기준 시설	승압시설 스팀사용		비 고
		검토시	시운전 실적	
스팀 사용량 (톤/시간)	650#	26	11 (12)	11
	150#	0	15 (18)	15
	계	26	26 (30)	26
공급압력(kg/cm <sup>2</sup> )	13.5	13.5	13.0	
공급온도 (°C)	197	197	200	*온도조절 가능

650# 스팀소비량 감소 : 15톤/시간

### 4. 절감예상효과(보일러 B.C사용량 절감) 가. 절감효과 산출

구 분	연차 보수 (일)	스팀 절감 (톤/시간)	B.C절감 (k $\phi$ , 백만원)		전력감소 (kwh, 백만원)		총 절감액 (백만원)
			절감량	절감액	감산량	손실액	
'07년 하반기(#1)	23	10	380	172	1,493	55	117
'08년 상반기(#3)	25	10	413	187	1,493	55	132
'08년 하반기(#2)	30	15	743	337	2,239	108	229
계	55	25	1,156	524	3,732	163	361

'07년 하반기 연차보수는 30일 이내 승압시설 설치 및 테스트로 실 운전 23일 적용

나. 연간 절감 효과(기준 : B.C 453원/ 전력 68원/kw)

- '07년 : 약 120백만원
- '08년 이후 : 약 360백만원

### 5. 맺음말

우리나라는 에너지소비 세계 10위, 석유수입 세계 4위, 석유소비 세계 7위의 에너지소비국이다.

이렇게 불리한 여건 때문에 우리나라는 다른 어느 나라보다도 국제유가의 등락에 직접적인 영향을 받게 된다. 또한 에너지 다소비 기업체의 경우는 경쟁력 강화를 위한 에너지 절감을 위한 다각적인 기술연구를 도모하고 있다.

따라서 본인이 소속된 남해화학(주)의 경우도 에너지절감을 기하기 위하여 황산공장 열회수 보일러에서 발생된 잉여스팀을 이용한 스팀승압시설을 설치하여 연간 360백만원의 경비절감을 한 실적이 있다.

끝으로, 본 연구 및 설치·시공작업을 추진하는 동안 많은 도움을 주신 한국열유체기술사(주) 이종수 사장님, (주)영진산업 조병식 사장님 등 관계자 분께 감사의 마음을 전한다.

(원고 접수일 2008년 1월 15일)