



## 천연가스 폐압발전 활성화의 당위성에 대한 열역학적 분석

†하종만 · 홍성호 · 김경천\*

한국가스공사, \*부산대학교

(2012년 11월 5일 투고, 2012년 12월 28일 수정, 2012년 12월 28일 채택)

## Thermodynamic Analysis on the Feasibility of Turbo Expander Power Generation Using Natural Gas Waste Pressure

†Jong Man Ha · Seongho Hong · Kyung Chun Kim\*

R&D Division, Korea Gas Corporation,

\*School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received November 5, 2012; Revised December 28, 2012; Accepted December 28, 2012)

### 요약

터보팽창기를 이용한 폐압발전에서 전력생산량과 온도의 산출식의 열역학적 유도과정을 제시하였고, 전력생산량은 압력차가 아니라 압력비가 주요변수임을 밝혔다. 천연가스 폐압발전 인입부의 고압가스는 전기에너지(비용) 투입이 거의 없이 무상으로 얻어지는 에너지라는 사실을 보임으로써, 폐압이 지금까지는 별로 주목받지 못하였지만 새로운 청정에너지원 중의 하나임을 밝혔다. 공급가스 온도보상을 위한 방법으로 팽창 후의 heating 방식을 택한다면, 전력생산과 더불어 냉열을 이용할 수 있고, 냉열이용량 만큼 heating 에너지를 줄일 수 있으므로 경제성을 배가시킬 수 있다.

**Abstract** - Thermodynamic equations for the electric power and temperature in a turbo expander generator (TEG) using pressure energy in a natural gas line are derived. From the equations, it was shown that dominant factor is not the pressure difference but the pressure ratio. The high energy level in the inlet of TEG can be made from nearly no expense of electric energy input, which means TEG can be treated as one of newly available clean energy source. If a post heating method is chosen to heat up expanded natural gas, the usage of cold energy is possible without a refrigeration cycle. The combined TEG and refrigeration system enhances economic benefit much more.

**Key words** : turbo expander, power generation, waste pressure, feasibility, sustainable energy

### 1. 서론

가스의 액화(liquefaction)공정에서 다단의 압축팽창을 반복함으로써 초저온을 생성하는 데 있어 팽창기는 필수설비이다. 주로 왕복동식 팽창기를 사용하였으나, 사용범위의 확대와 효율향상을 위하여 터보팽창기(turbo expander, 이하 TE)로 많이 전환되었다. TE는 액화공정 외에도 응용범위가 다양한 데, 에너지 회수에 효과적으로 사용된다[1-3].

우리나라 천연가스 사업은 액화천연가스(LNG)를 인수하여 초저온저장, 고압기화 후 전국의 주배관망으로 송출하고, 각 지역에 분포한 도시가스사에 공급하는 데, 수요처로 보내는 공급관리소에서 정압기(pressure regulator)를 통하여 천연가스의 감압이 이루어진다. 이 때 버려지는 압력에너지(이하 폐압)를 TE를 이용하면, 감압과 함께 전기를 생산하는 것이 가능하다[1,2].

한국가스공사(KOGAS)에서는 터보팽창기를 이용한 전력생산(turbo expander generation, 이하 TEG)에 관한 타당성 연구를 수행하였고[4], 그 결과의 일부를 발표하였다[5]. 시간별 유량 변화가 심한 수급패턴에서

†Corresponding author:jmha@kogas.or.kr

Copyright © 2012 by The Korean Institute of Gas

전력생산량을 예측하는 algorithm을 제시하였고, 가스 공사 관할의 어느 한 정압기지에 대한 case study를 통하여 TEG 폐압발전의 규모와 경제성평가 결과를 보여주었다. 현재 TEG 폐압발전의 실증운영이 150 kW 규모로 추진 중에 있다[6].

본 논문에서는 선행논문[5]의 후속으로, 폐압발전 전력생산량과 전후단 온도에 관한 계산식의 열역학적 유도과정을 제시하고, 폐압발전이 단순히 미활용에너지 이용의 차원을 넘어서는 의미가 있음을 밝혀보고자 한다. 폐압발전이 경제성이 있을 수 밖에 없는 근본적인 이유를 세 가지 관점에서 고찰하여 경제성의 이론적 근거를 제시하고, 폐압이 신재생에너지로서의 자격을 가지고 있음도 살펴본다.

## II. TE 유동과정의 일(work)과 온도

### 2.1. TE 유동에서의 전력생산량 관계식

논문 [5]에서 정압기유동과 TE 유동의 공정특성 비교와 TE 유동에서 생산되는 일의 양(전력생산량)에 관한 내용을 논의하였다. Fig. 1에서 보여지듯이 정압기 유동은 압력 강하시, 등엔탈피 과정으로써 생산되는 일은 없으나(점A에서 점B로 수평이동), TE 유동은 등엔트로피 과정으로써(점A에서 점C로의 수직하향 이동), 단위질량당 발생하는 일의 양은 엔탈피 차인

$${}_1w_2 = h_1 - h_2 \quad (1)$$

으로 표현된다.

TE 유동에서의 전력생산량은 엔탈피의 상태량 data(또는 이의 그래프)를 가지고 계산하는 것이 정확한

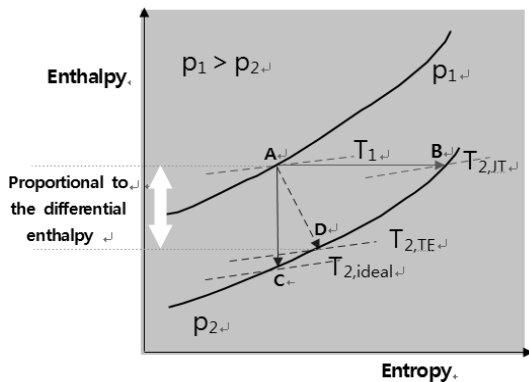


Fig. 1. Expansion processes in a pressure regulator and a turbo expander (Actual Amount of Electricity Production).

방법이지만, 측정가능한 물리량인 압력과 온도를 변수로 하는 식으로 표현하는 것도 매우 유용하다. 관계식을 유도하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- ① 작동유체인 천연가스를 이상기체로 취급한다.
- ② 천연가스를 simple compressible substance로 취급한다.
- ③ TE유동을 가역과정으로 이상화한다.
- ④ TE유동을 단열과정으로 취급한다.

가정①에 의하여 천연가스는 이상기체 상태방정식  $Pv = RT$  을 만족하고, 가정②에 의하여 일에 관련된 지배적인 인자는 압력과 체적으로 취급한다.

가정③에 의하여 TE 유동에서 마찰등에 의한 energy loss를 무시한다.

가정④는 TE의 외부와의 접촉면적이 적고, 유체유동이 빠르므로 단열과정으로 취급한다. 이상의 가정은 유동의 특성을 손상시키지 않으면서 식으로 표현하기 위한 근사화의 전제조건이다[7,8].

열역학 제1법칙적인 에너지보존방정식은  $\delta Q = dU + \delta W$  이며, 단위질량당 표현은

$$\delta q = du + \delta w \quad (2)$$

이다. 가정②에서 일은  $\delta w = Pdv$ 이며, 가정③의 가역과정에서의 열은  $\delta q = Tds$  이다. 따라서 식(2)는

$$Tds = du + Pdv = dh - vdp \quad (3)$$

로 표현할 수 있으며, 가정④에 의하여  $ds = 0$  이므로

$$dh = vdp \quad (4)$$

이다. TE 유동과정에서의 일은 식(1)에서  $dw = -dh$  이므로

$${}_1w_2 = h_1 - h_2 = - \int_1^2 vdp \quad (5)$$

이다. 가역단열과정 열린 계에서의 일은  $\int_1^2 Pdv$  이

아니라, 식(5)와 같이  $- \int_1^2 vdp$  로 표현된다.

여기서 단열과정에서의 압력과 비체적의 관계는

$$Pv^k = C = \text{일정} \quad (6)$$

이므로, 위의 식(5)와 식(6)을 결합하면

$$\begin{aligned} {}_1w_2 &= - \int_1^2 v \, dP = - C^{\frac{1}{k}} \int_1^2 P^{-\frac{1}{k}} \, dP \\ &= - \frac{k}{k-1} (Pv^k)^{\frac{1}{k}} \left[ P_2^{\frac{k-1}{k}} - P_1^{\frac{k-1}{k}} \right] \\ &= \frac{k}{k-1} P_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 여기에 가정①을 적용하면

$$w = \frac{k}{k-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (8)$$

이다. 여기서  $R_g$  는 기체상수이며 천연가스의 주성분인 메탄(CH<sub>4</sub>)은 0.51835 (kJ/kgK)의 값을 가지고,  $k$  는 비열비로써 기체상태 CH<sub>4</sub>의  $k$  는 보통 1.3을 사용하고, 온도  $T$  는 절대온도 (K)이다.

여기에 아래와 같이 TE유동에서 정의한 효율  $\eta$  를 도입하면

$$\eta = \frac{\text{real } \Delta h}{\text{ideal } \Delta h} \quad (9)$$

주어진 조건에서의 전력생산량은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} w &= h_1 - h_2 = \eta (h_1 - h_{isen}) \\ &= \eta \frac{k}{k-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

엔탈피차인 전력생산량은 식(10)와 같이 압력과 온도의 함수로 표현된 관계식을 얻게 되었다. 식(10)는 ①~④로 설정된 가정에서 유도된 식이므로 실지와와의 차이가 있지만 공학적으로 매우 유용한 식이며, 유동의 특성을 압력과 온도와 관계하여 한 눈에 파악할 수 있게 해준다.

질량유량  $\dot{m}$  에 대한 전력생산량은 다음 식으로 유도된다[5].

$$\dot{W} = \dot{m} w = \dot{m} \eta \frac{k}{k-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (11)$$

## 2.2. 입구(또는 출구)의 온도 관계식

이상기체에서 정압비열  $c_p$  를 상수로 취급하면, 엔탈피차  $dh$  는 온도차  $dT$  에 비례하여  $dh = c_p dT$  이다.

따라서, 식(10)의  $h_1 - h_2 = \eta (h_1 - h_{isen})$  는  $c_p (T_1 - T_2)$  이므로

$$T_1 - T_2 = \eta \frac{1}{c_p} \frac{k}{k-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (12)$$

그런데, 이상기체에서는  $\frac{k}{k-1} R_g = c_p$  이므로  $\frac{1}{c_p} \frac{k}{k-1} R_g = 1$  이다. 이상을 정리하면

$$T_1 - T_2 = \eta T_1 \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (13)$$

여기서, 식(13)을 변형하여 TE 출구의 온도  $T_2$  를 구하면 다음과 같다.

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 - \eta \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} \quad (14)$$

식(14)는 inlet 조건으로 주어진  $T_1$  에 대하여 온도강하가 이루어진 후단온도  $T_2$  를 구하는 식이다. 그러나, 천연가스 공급관리소에서 감압 후 출구온도  $T_2$  는 0 °C를 요구하고 있으므로, 현장에서의 관심은 온도보상을 위한 예열에 요구되는 입구온도  $T_1$  이다.  $T_1$  은 식(14)를 변형하면 아래와 같다.

$$T_1 = T_2 / \left\{ 1 - \eta \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} \quad (15)$$

## 2.3. TE유동에 대한 열역학적 분석

TE 유동을 가역 단열과정으로 가정하여 관계식을 유도하는 것은 공정의 근사화로써 타당하다. 이러한 가정은 실제와 약간의 차이가 있으나, 온도와 압력을 변수로 하여 유동특성을 파악하는 데 많은 도움을 줄 수 있다. 예를 들면 식(11)에서 TE 유동과정은 압축기 (compressor) 유동과정의 역과정(reverse process)임을 보여주고 있다.

식(11)이 내포하고 있는 TE유동의 주목할만한 특징을 살펴본다.

첫째, 전력생산량은 압력차  $P_1 - P_2$  가 아니라 압력비  $P_2/P_1$  가 변수이다. 압력차가 클수록 얻을 수 있는 일의 양은 많지만, 압력차가 아니라 압력비가 관건이다. 예를 들어, 100 bar에서 20 bar로 감압할 때 차압은 80 bar이지만, 10 bar에서 2 bar로 감압하는 8 bar의 차압에서도 같은 양의 일을 생산한다. 팽창감압비가 1/5

로 같기 때문이다. 압력차의 정도가 아니라 감압비가 변수라는 사실은, 저압에서 운영되고 있는 도시가스 사 배관망에서도 많은 전력생산 잠재량을 가지고 있음을 시사하고 있다.

둘째, 전력생산량은 TE 입구온도  $T_1$  에 비례하므로,  $T_1$  이 클수록 전력생산은 커진다. 그러나 전력생산을 높이기 위한 목적으로 열(비용)을 투입하여  $T_1$  을 높이는 것은 바람직하지 않다. 식(11)에서  $T_1$  의 단위가 절대온도이기 때문이다. 예를 들어  $T_1$  을 10℃에서 60℃로 올리면 예열량은 몇 배가 더 필요하지만, 전력생산량은  $(273.15+60) / (273.15+10) = 1.176$ , 약 17% 정도의 증가만이 가능할 뿐이다.

### III. TEG 시스템 구성

TEG 설치는 아래 Fig.2. 와 같이 기존에 설치되어 있던 정압기 한 열을 TEG로 대체하여, TEG와 정압기를 병렬로 연결하여 구성한다. TEG의 설정압력을 정압기 압력보다 약간 높게 setting 함으로써, 가스가 TEG를 먼저 흐르게 되고, TEG의 용량을 넘어서는 유량은 정압기 쪽으로 넘어가게 된다.

기저부하의 물량은 TEG로 정압을 수행하면서 전력을 생산하고, TEG에서 처리하지 않는 물량은 병렬 연결된 정압기로 by-pass 되어 정압처리하는 개념으로 운영하는 것이다. 또한 TEG에서 고장이 발생하게 되면, TEG가 닫히고 병렬연결된 정압기가 정압을 수행하는 system을 구성하여 안전을 확보한다.

정압기와 마찬가지로 TEG도 수요처로 보내지는 가스의 온도 0℃ 이상을 맞추기 위하여 히터를 설치하게 되는데, 히터의 위치는 TEG 전단에 설치(예열)하거나, 또는 후단에 설치(후열)하여도 된다. 이 때 예열이나 후열에서 소요되는 연료의 열량은

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \quad (16)$$

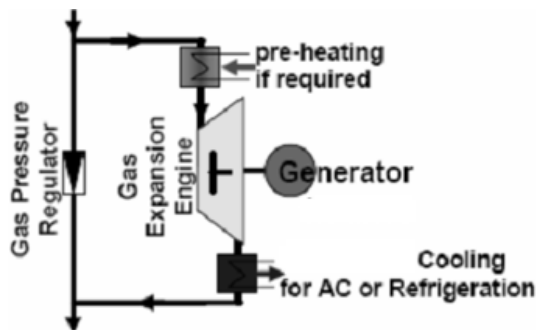


Fig. 2. turbo expander generator system.

이다.[9]

### IV. TEG 전력생산 경제성의 근거

TEG 발전은 여차피 버려지는 폐압을 이용하는 것이므로 경제성을 높일 수 있는 것이 당연하지만, 미활용에너지의 회수 차원을 넘어선다. 더욱이 폐압발전의 경제성이 전기나 가스의 정책적 가격결정에 의한 거래구조의 인위성에서 발생하는 것은 더더욱 아니다. TEG 발전이 근본적으로 경제성 있을 수밖에 없는 근거를 공학적측면에서 세 가지로 고찰해보고자 한다.

#### 4.1. 고압가스 생성과정

TEG는 고압의 가스가 저압으로 강제감압되면서 버려지는 압력에너지를 회수하는 것이므로, 여차피 고압으로 만들 때에 투입되었던 에너지(또는 비용)를 회수하는 것으로 생각될 수도 있다. 이러한 시각은, TEG를 단순히 공정효율 향상에 의한 미활용에너지 회수 차원으로 잘못 이해하게 된다. 그러나, 천연가스의 TEG 발전은 전혀 다른 관점에서 고찰해야만 한다. 기체보다 액체가 훨씬 적은 에너지로 압력을 높여줄 수 있는데 우리나라 천연가스 사업은 액체상태의 LNG를 수입하여 사용하기 때문이다.

인수된 LNG는 초저온 상태에서 저장되었다가, 펌프에 의해 고압으로 승압한 다음 고압의 LNG를 해수를 사용하여 기화하고, 기화된 가스(NG)는 전국 주배관망을 통하여 송출된다. 즉, 압력을 높이는 과정은 액체 상태에서 승압하는 것으로써, 기체상태의 가스를 승압하여 주배관망으로 송출하는 것이 아니다. 승압이 액체 상태에서 이루어짐으로써 TEG 발전에서 회수하는 압력에너지는 거의 무상으로 얻어지는 것과 마찬가지로 가스라인에서의 폐압은 지금까지는 간과되었던 새로운 청정에너지원이다.

LNG 인수기지 운영과정에서 처음과 끝인 LNG 인수 시 상태와 NG 배관망 송출 시의 상태는 아래 Table 1 과 같다.

이 공정에 대하여 액체상태의 천연가스를 승압할 때와 기체상태의 천연가스를 승압할 때의 각 경우에 대하여 투입되는 에너지(또는 비용)을 비교해 본다.

Table 1. States of intake and outlet

	온도 $T$	압력 $P$	상태
인수 (in)	- 162 ℃	1 bar	액체
송출 (out)	0 ℃ 이상	71 bar	기체

**4.1.1. 액체상태(LNG)에서 승압 후 고압액체를 기화(NG)하는 공정**

액체상태의 LNG를 고압으로 승압하는 과정은 고압펌프 가동으로 전기에너지(동력, 가동비용)가 투입된다. 펌프에 의하여 액체에 주어지는 동력을 수동력,  $L_w$ , 이라고하고, 펌프를 운전하는데 필요한 동력을 축동력,  $L$ , 이라 하면 펌프의 효율  $\eta$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{수동력}}{\text{축동력}} = \frac{L_w}{L} \quad (17)$$

고압펌프 수동력은 아래 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} L_w &= \gamma_{LNG} H H V = \gamma_{LNG} \frac{P_{out} - P_{in}}{\gamma_{LNG}} V \\ &= (P_{out} - P_{in}) \cdot V \end{aligned} \quad (18)$$

$\gamma_{LNG}$  는 LNG의 비중량 (specific weight,  $N/m^3$  ),  $H$  는 펌프의 수두 (hydraulic head, m),  $V$  는 체적유량 ( $m^3/s$ ),  $\Delta P = P_2 - P_1$  (bar)는 전후단 압력차를 나타낸다. 입출양단 상태는,  $T_{in} = -162^\circ C$ ,  $P_{in} = 1$  bar,  $P_{out} = 71$  bar 이다. 시간당 1톤의 LNG에 대하여  $L_w$ 를 계산하여 보면  $L_w = \Delta P \cdot V = 4.264$  kW이며, 여기서, 펌프가동에 필요한 축동력  $L$  (비용)은  $\eta$  를 0.85로 하면,  $L = L_w / \eta = 5$  kW 이다.

**4.1.2. 액체상태(LNG)에서 기화 후 기체(NG)를 승압하는 공정**

LNG를 기화하여 완전히 기체상태에서 고압으로 승압하는 과정은 압축기 가동으로 전기에너지(동력, 가동비용)가 투입된다. 압축기에 의하여 기체에 주어지는 동력을 공기동력,  $L_a$ , 이라고하고, 압축기를 운전하는데 필요한 동력을 축동력,  $L$ , 이라 하면 압축기의 효율  $\eta$  는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{공기동력}}{\text{축동력}} = \frac{L_a}{L} \quad (19)$$

고압압축기의 공기동력은 아래 식(20)과 같다.

$$L_a = \frac{k}{k-1} \dot{m} R_y T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (20)$$

LNG는 메탄을 주성분으로 하여 여러 탄화수소의 혼합물이므로, 1bar에서 LNG가 완전히 기화하면  $-82^\circ C$ 가 된다. 입출양단 상태는,  $T_{in} = -82^\circ C$ ,  $P_{in} = 1$  bar,  $P_{out} = 71$  bar 이다. 시간당 1톤의 NG에 대하여  $L_a$ 를 계

산하여 보면  $L_a = 199.69$  kW이며, 여기서, 압축기에 필요한 축동력  $L$  (비용)은  $\eta$  를 0.85로 하면,  $L = L_w / \eta = 234.93$  kW 이다.

**4.1.3. 고압생성의 공정의 분석에 따른 폐압발전의 경제성 측면**

고압펌프와 압축기의 효율을 같다고 보고, 펌프에 들어가는 동력과 압축기에 들어가는 동력을 비교하면

$$L_w / L_a = 4.264 / 199.69 = 0.0213 = 2.1 \%$$

이다. LNG가 고압의 NG로 주배관망으로 송출되는 과정에서, 승압에 소요되는 동력을 비교하여 보면, LNG를 승압하여 기화하는 KOGAS 공정의 경우는 LNG를 NG로 먼저 기화하고, 기화된 NG를 승압하는 경우에 비하여, 약 2~3% 정도의 전기에너지만이 소요될 뿐이다.

고압가스 생성의 98%는 해수에서 얻은 기화용 열 에너지로써, 결국 TEG에서 사용하는 고압의 에너지 준위는 동력투입이나 비용이 거의 없이 해수에서 무상으로 주어지는 것으로 보아도 무방할 것이다.

**4.2. 카르노 사이클 이론에 의한 열역학적 근거**

전기는 수력, 화력, 원자력, 그리고 재생에너지인 태양광, 풍력등에서 얻어지는 고급에너지이다. 우리나라 발전량의 상당부분을 차지하는 화력발전은 화석연료의 열에너지를 열기관(heat engine)을 통하여 기계에너지인 회전력으로 전환하고, 여기서 전기에너지를 얻게 된다.

열기관이 이루는 연속순환공정(사이클)에서 기준이 되는 사이클이 카르노 사이클 (Carnot cycle)이다 [6,7]. 가역적 공정으로 이루어져 있는 카르노 사이클은 최대의 효율을 나타낼 수 있는 이상적인 열기관사이클로써, 카르노 사이클의 이론열효율  $\eta_{carnot}$  는 인입 에너지에 대한 방출에너지와의 비로써, 또는 고열원과 저열원의 온도비로써 나타낼 수 있다.

$$\eta_{carnot} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (21)$$

카르노 이론에 의하면 열기관의 효율이 아무리 좋을 지라도, 즉 최대의 효율을 얻을 수 있는 이상적 경우라 할 지라도, 반드시 한계가 주어지며, 그 한계는 식 (21)에서 나타내는 바와 같이 고열원의  $T_1$ 과 저열원의  $T_2$ 가 결정한다. 화력발전의 경우,  $T_1$ 과  $T_2$ 의 한계로 인하여 전력생산 효율이 보통 35% 내외로써 100 KJ의 열에너지를 투입하면 35 KJ 정도의 전기에너지를 얻을 수 있을 뿐이다.

TEG의 전력생산은 전적으로 등엔트로피과정에서의 엔탈피차에 의하여 생산되는 것이다. 수요처로의 공급조건인 0 °C를 맞추기 위하여 승온과정에서의 예열 또는 후열에 소요되는 열에너지는 전력생산용이 아니라, 소비자의 구매조건을 맞추기 위한 heater 가동에 사용되는 것일 뿐이다. 후단 온도를 0 °C로 맞추기 위하여 heating 하여 주는 것이지만, 이것을 전력생산에 들어가는 열 (또는 비용)으로 취급한다 하더라도, 화력발전과 비교하면 열이용율이 매우 높다. 100 KJ의 열에너지를 사용하여 85 KJ의 전기에너지를 얻을 수 있기 때문이다. 화력발전에 비하여 약 2.5 배의 효율을 보여준다. TEG는 기계에너지(폐압)를 기계에너지(회전축 구동)으로 바꾸어주기 때문이며, 일반적으로 기계에너지를 기계에너지로 변환하거나, 회전에너지를 전기에너지로 변환하는 데는 큰 에너지손실이 없다.

TEG가 온도보상을 위하여 화석연료를 사용한다고 할지라도 발전원가가 쌀 수 밖에 없고 저탄소 발전이라고 할 수 없다.

#### 4.3. 냉열활용 저탄소 고효율 발전시스템

4.1절에서 TEG 발전의 source인 고압은 거저 얻어지는 것과 마찬가지로 보여주었고, 4.2절에서는 TEG 발전 시 후단 온도보상에 투입되는 연료를 발전에 소요되는 열에너지로 취급한다고 하더라도, 일반 화력발전에 비하여 2.5배의 열기관효율이 높다는 것을 논증했다. 이상의 조건 만으로도 TEG 발전이 고효율 저탄소 발전임을 충분히 인정해 줄 수 있지만, 후단 온도보정을 위한 연료를 줄일 수 있다면, 더욱 저탄소 발전에 가까워지고 경제성 또한 높아진다. 예를 들어, 예열의 경우 인근의 폐열 (인근 화력발전소의 폐열 등)을 이용할 수 있으며, 공기열원 가스히트펌프, 지열 가스히트펌프 등을 이용하면 적은 비용으로 온도보정에 필요한 열에너지를 공급할 수 있다. 캐나다에서는 연료전지와 TEG를 연계하여 총 2MW의 전기를 생산하는 project가 진행 중이다[10][11]. 연료전지발전 중의 생성되는 고온폐열수를 TEG 예열에 사용함으로써 거의 제로탄소 전력생산 구현에다가 경제성을 더욱 높여주고 있다.

온도보정을 위한 heater는 TEG 전단에 설치(예열)하거나, TEG 후단에 설치(후열)하여도 된다. 후열의 경우 TEG에서 나오는 가스는 영하 수 십도로 내려가게 되는데, 이 때의 냉열을 이용하면 별도의 전기에너지 소요 없이 냉열을 거저 얻는 것이 되고 (또 다른 전기생산과 같음), 또한 냉열사용량 만큼 TEG 후열에 필요한 연료를 줄일 수 있으므로 저탄소 발전에다 경제성은 이중으로 배가된다.

천연가스 공급관리소에서의 냉열이용방법으로는

하절기에 인근의 냉난방에 효과적으로 사용할 수 있고, 계절과 무관하게는 저온저장, 제빙, 저온분쇄등에 이용할 수 있다[12].

## V. 재생에너지로서의 의미

재생에너지로서의 중요한 요건은 환경친화적이면서 지속가능한 (renewable, sustainable) 에너지이다. 이러한 관점에서 볼 때 폐압은 재생에너지로서의 자격을 많이 갖추고 있으며, 다른 재생에너지와 비교할 때, 상대적으로 우위의 장점도 많이 가지고 있다.

첫째 지속가능한 에너지이다. 우리나라에 천연가스가 가정용이든 산업용이든 연료로써 계속 사용되어지는 한, 수요처 공급에서는 항상 압력강화가 이루어지므로, 천연가스 배관망에서의 폐압은 지속적으로 존재할 수 밖에 없는 에너지원이 된다.

둘째, 예측가능한 양질의 에너지이다. 천연가스 수요는 지역별로 계절별로 다르기는 하지만, 전국의 모든 공급관리소에서는 공급량에 관한 시간별 데이터가 20여년간 축적되어 있다. 따라서, 발전량 예측이 가능하다. 이는 태양광발전이나 풍력발전과 비교할 때 상대적으로 우위를 가진다.

셋째, 적은 공간으로 발전이 가능하고 운영과 관리가 용이하다.

기존의 공급관리소 부지를 이용하여 적은 공간이면 폐압발전이 가능하다. 이는 태양광발전과 비교할 때 같은 발전량에 비하여 매우 적은 공간으로도 충분하다. 또한 폐압발전은 기존 가스인프라에 연결함으로써 별도의 운영인력이 필요 없고, 유지비가 거의 들지 않으며, 관리 및 제어가 매우 용이하다.

그 외 TEG 발전의 의미를 살펴보면, 전력수급 안정에 기여할 수 있다. 동절기에는 일반가정에서의 소비가 대량으로 이루어지므로 동절기에는 보다 많은 폐압전력을 얻을 수 있다. 따라서 심화되고 있는 동절기 전력난을 해소하는 데 있어 일정부분 기여할 수 있다.

폐압발전은 상기한 바와 같이 재생에너지로서의 우수성 뿐만 아니라, 본 논문 4장에서 살펴본 바와 같이 경제성이 이미 주어져있는 에너지원이다. TEG 발전의 site를 잘 선정하면, 투자비 회수기간은 보통 3년 내외이며, 가스공사와 도시가스사의 폐압잠재량을 적극적으로 개발한다면, 국가적 차원에서 상당량의 저탄소 에너지를 활용하는 것이 될 것이다.

## VI. 결론

천연가스 배관망의 감압공정에서 터보팽창기를 이용한 폐압발전에 대하여, 그 전력생산량과 온도의 산

출식 유도과정을 제시하였다. 그리고, 전력생산량은 압력차가 아니라 압력비가 변수임을 밝혔다. 이는 가스공사 뿐만 아니라 도시가스사 배관망에서도 폐압발전가능량이 상당함을 시사한다.

천연가스 폐압발전이 경제성이 있을 수 밖에 없는 이유를 3가지의 공학적 근거로 밝혔다.

(1) 폐압발전 인입부의 고압 에너지준위는 전기에너지(비용) 투입이 거의 없이 거저 얻어지는 것이라는 사실을 보여주었다.

(2) 또한, 폐압발전 후단 온도보상을 위해 투입되는 열에너지를 화력발전의 열기관에 투입되는 열에너지로 간주한다 할지라도 화력발전 효율의 2배 이상이다.

(3) 후단온도 보상을 위한 방법으로 후열을 택한다면, 전력생산 외에 냉열을 이용할 수 있고, 냉열이용량 만큼 열에너지투입을 줄일 수 있으므로, 저탄소발전 에다 경제성을 배가시킬 수 있다.

지금까지는 별로 주목하지 않았던 TEG 폐압발전은 본 논문에서 밝힌 바와 같이 활용할 만한 충분한 가치를 지닌 저탄소 경제적 에너지일 뿐만 아니라, 재생에너지의 지속가능성 요건을 만족시키며, 예측이 가능한 양질의 에너지라고 할 수 있다. 따라서, 가스공사와 도시가스사의 많은 정압 site에서 폐압 발전을 활성화 시키는 노력이 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌

[1] Turbo expander-Generators for Natural Gas Applications, GE Energy Oil & Gas, (2008)  
 [2] Low Carbon Technology for a Cleaner World,

CryoStar, (2007)  
 [3] Frank Davis, et al., "Full Load, Full Speed Test of Turbo Expander - Compressor with Active Magnetic Bearings", Proceedings of 35 th turbomachinery Symposium, (2006)  
 [4] KOGAS, "Feasibility Study on the Turbo - Expander Power Generation System for Pressure Let-down Station", (2008)  
 [5] J.M. Ha et al, "Turbo Expander Power Generation Using Pressure Drop in Natural Gas Pipeline", KIGAS, Vol.16, No.3, pp.1~7, (2012)  
 [6] Energy Newspaper, "Turbo Expander Power Generation in Natural Gas Pipeline", (2012.4.13)  
 [7] G.J. Wylen and R.E. Sonntag, "Fundamentals of Classical Thermodynamics", Mcgraw-Hill, (1976)  
 [8] M.J. Morgan and H.N. Shapiro, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", John Wiley & Sons, Inc. Mcgraw-Hill 4th ed., (2000)  
 [9] W. F. Stoecker, "Design of Thermal Systems", 3rd ed., McGraw-Hill, (1989)  
 [10] KISTI Global Trend Briefing "Wate Pressure to Electricity", (2007-06-10)  
 [11] Clifford R. Howard, "Hybrid Turbo Expander and Fuel Cell System for Power Recovery at Natural Gas Pressure Reduction Stations", (2009), Master's Degree Theis, Queen's Univ., Canada  
 [12] Randall F. Barron, "Cryogenic Systems", 2nd ed. Oxford University Press, (1985)