

냉열 에너지의 동력 회수에 대한 엑서지 해석 방법에 관한 연구

Exergy analysis on the power recovery of LNG supply system

박 일 환*, 김 춘 성**

Il-Hwan Park*, Choon-Seong Kim**

요 약

국내 천연가스 공급계통에 있어서 냉열 에너지의 동력 회수에 관한 엑서지 해석 방법을 개발하므로, 에너지 시스템의 유효이용 방안 모색과 함께 엑서지 해석의 효용성을 증명한다. 현재 운영 중인 (1) 가열기에 의한 가열-PVC 감압 공급 시스템, (2) 감압과정에 팽창기를 도입하는 가열-팽창일-PVC 감압 공급 시스템, (3) 가열기 없이 팽창기를 도입한 팽창기-PVC 감압의 경우에 대해 엑서지 해석을 수행한다. 시뮬레이션은 NG 공급 시스템에 팽창기를 도입을 모델링하고, 유입 NG의 압력과 온도, 출구 NG의 압력과 온도에 대해 이루어 졌다. 팽창기로부터 얻을 수 있는 전력생산량은 팽창기 입출구의 NG 압력비가 클수록 많아진다. 그러나 압력비가 커면 온도의 하강이 심해져, 팽창기 입구에서의 가스 가열이 필요하며 이에 따른 연료소비량도 압력비 증가와 함께 상승한다.

엑서지 해석은 시스템 내 에너지 손실 위치와 양을 알 수 있다. 해석결과 가열-PVC 감압의 공급 시스템에서 PCV에 의해 소멸되는 엑서지가 가장 높았으며, 이 소멸 엑서지는 팽창기 설치를 통해 동력을 회수하므로 줄일 수 있다. 팽창기 입구에서 NG의 온도 증가는 엑서지 회수율을 향상시킬 수 있지만, NG의 열손실로 인해 팽창기의 기계 엑서지 효율은 감소한다. 이들 결과로부터 엑서지 해석의 효용성을 알 수 있다.

Key Words : Expander, Liquefied Natural Gas, Decompression, Power generation, Exergy analysis

ABSTRACT

The expansion work that is wasted through the irreversible expansion through the PC valve of decompression process of the natural gas governor station can be recovered by replacing the process by an isentropic expansion. The energy and exergy analyses for the two decompression process models of power producing and current decompression process model are presented. Analysis results showed that the exergy by gas supply is 56.29%, the exergy by producing power is 32.12 % in case of preheating system and 22.52% in case of non-preheating system. The dead exergy at the PCV is generated much more network. As these results, the usefulness of exergy analysis is verified.

* 한국기술교육대학교 기계정보공학과(hwan@kut.ac.kr)

** 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과(cskim@kut.ac.kr)

제1저자 (First Author) : 박일환

교신저자 : 박일환

접수일자 : 2011년 4월 29일

수정일자 : 2011년 6월 08일

확정일자 : 2011년 6월 20일

기 호 설 명

e : 엑서지 [kJ/kg]
 E : 에너지 [kJ]
 h : 엔탈피(Enthalpy) [kJ/kg]
 H : 발열량 [kcal/kg]
 m : 질량 [kg]
 P : 압력 [MPa]
 Q : Heat flux [kJ/s]
 s : Entropy [kJ/kg · K]
 T : 온도 [K]
 W : 일 [kJ/kg]
 η : 효율 [%]

상첨자

CH : 화학적(Chemical)
 PH : 물리적(Physical)
 n : 폴리트로픽 지수

하첨자

B : 가열기(Boiler)
 CV : 검사체적(Control volume)
 e : 엑서지
 exp : 팽창기(Expander)
 in : 입구(Input)
 L : 저위(Lower)
 out : 출구(Output)
 0 : 주위상태량(Property of surrounding)

I. 서 론

에너지의 개발, 수송, 소비 등의 각 부문에서 에너지 손실의 위치와 손실량을 찾는 것은 중요하다.

LNG(Liquefied Natural Gas)는 대기압보다 약 1.5 배 높은 압력의 액화상태로 저장탱크에 저장된다. 저장시설에서 수요처까지 이송하기 위해, 승압펌프로 최고 7MPa의 압력까지 승압시킨다. 그리고 LNG를 NG(Natural Gas)로 상변화(기화)시킨 후 전국의 각 공급관리소로 송출된다. 각 공급관리소에서는 NG를 수요처의 요구압력으로 감압하여 최종 수요처로 공급하는 시스템을 가지고 있다. 공급온도는 매설배관 주변의 동결 피해방지를 위해 최종 공급온도를 273 K이상 유지시켜야한다. 이 공급과정에서 승압을 위한 에너지 투입과, 감압에 의한 에너지 손실이 있다.

본 연구는 국내 천연가스 공급계통 운영의 에너지 효율 증대방안을 모색하기 위해 공급관리소에서 냉

열의 유효이용을 위한 동력생산용 팽창기 도입 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석 프로그램을 개발하고 회수 가능한 엑서지를 해석하였으며, 이 해석 프로그램을 일반적인 에너지 시스템의 해석 교육에 활용 가능하도록 하는데 그 목적이 있다.

II. 해석 모델링

본 연구에서는 LNG 성분이 CH₄가 대부분이며, 그 외의 성분비율이 일정하지 않은 다양한 미소 성분들이 포함되어 있으나 그 영향이 크지 않으므로 LNG를 CH₄ 단일성분으로 가정하여 물성치를 계산한다.

시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석을 위한 프로그램은 Microsoft의 visual Basic Application의 Excel 2007을 이용 작성하였다. Methane의 열역학적 물성치는 NIST Refprop 8.0을 사용한다.

LNG 인수기지 저장탱크의 안정적 운영을 위해 공급관리소 유입 NG 압력이 4.5~7.0 MPa임을 감안하여 본 연구에서는 유입가스압력이 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5, 그리고 7.0 MPa에 대해 해석하였다.

그림 1은 현재의 동력회수가 없는 공급관리소 시스템을 나타내며, 그림 2는 NG를 가열기에서 예열한 후 팽창시키는 경우로, 팽창 후 공급가스온도가 273K 이상이 되도록 팽창기 입구온도를 계산하였다. 또 그림 3은 예열 없이 가스를 팽창시키는 경우로, 공급관리소 인입NG 온도를 288K로 설정하고, 팽창기 출구온도를 계산하였다.



그림 1. 현재 천연가스 공급관리소 시스템
 Fig. 1. Current NG flow in governor station.

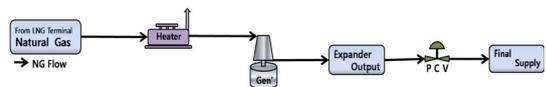


그림 2. 예열이 있는 동력생산 팽창기 도입 시스템
 Fig. 2. Installed expander NG flow in Governor station.

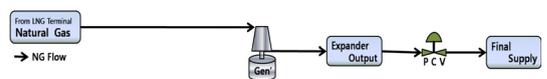


그림 3. 예열 없는 동력생산 팽창기 도입 시스템
 Fig. 3. Installed expander, non heating, NG flow in Governor station.

III. 해석 기초 방정식

1. 에너지방정식과 가열기 연료소비량

공급관리소에서 에너지 회수를 위해 팽창기를 설치하는 경우, 팽창기를 검사체적으로 보면, 검사체적에 대한 에너지 식에서 팽창기의 검사체적 입출구에서 운동에너지와 위치에너지의 차이가 크지 않다고 보고 무시하면 식(1)과 같다.

$$E_{CV} = m (h_{in} - h_{out}) \quad (1)$$

KOGAS가 고시한 가열기 납품기준은 열전달 효율 85% 이상이다. 이에 따라 가열기의 열전달 효율을 85%로 하면, 가열기의 연료소비량은 식(2)에 따른다.

$$Fuel(Nm^3/Ton) = \frac{(h_{B,out} - h_{B,in})}{0.85 \times H_L} \quad (2)$$

2. 엑서지 식

에너지의 질적 가치를 평가할 수 있는 물리적 엑서지 e^{PH} 는 식(3)과 같이 표현된다.[1]~[3]

또한 유기화합물인 연료의 엑서지를 계산하기 위하여 “Styrylska and Szargut”가 제안한 방법을 사용하였다.[4] 유기화합물의 대표적 구성물질인 ‘C’, ‘H’, ‘O’, ‘N’, ‘S’의 구성원소비를 이용하며, 화학적 엑서지의 비(β : Ratio of chemical exergy)로 나타내며, 본 연구에서 사용한 NG에 대한 엑서지 식은 식(4)와 같다.[5],[6]

$$e^{PH} = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (3)$$

$$NG(High CH_4) : e^{CH} = 1.04 \times H_L \quad (4)$$

한편 팽창기 엑서지 효율은 팽창기에서 회수되는 일의 양과 팽창기 입출구에서 NG의 엑서지 변화량으로 정의한다. 또한 가열기 엑서지 효율은 가열기에서 NG에 전달되어진 엑서지와 가열기에서 연료연소에 의해 생성된 엑서지의 비로 계산 하였다.[7]

$$\eta_{exp,e} = \left(\frac{W_{exp}}{e_{exp,in} - e_{exp,out}} \right) \quad (5)$$

$$\eta_{B,e} = \left(\frac{e_{B,out} - e_{B,in}}{e_B} \right) = \left(\frac{e_{B,out} - e_{B,in}}{1.04 \times H_L} \right) \quad (6)$$

그리고 시스템의 내부에서 외부로 열전달이 발생될 때, 열전도율 기본식 으로부터 열전달 과정의 엑서지는 식(7)으로 얻을 수 있다.

$$de_1 - de_0 = dQ \times \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right) \quad (7)$$

그림 4는 개발한 시뮬레이션 프로그램의 순서도를 나타내었다. 이 순서도에 따라 개발된 프로그램은 엑셀 sheet에서 데이터를 입력하므로 모든 물성치가 계산되고 시스템의 에너지 및 엑서지 해석이 수행되도록 하였다. 일반적인 에너지 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석을 하는 경우 프로그램 중에서 시스템 구성 부분의 프로그램만 수정하면 시뮬레이션이 가능하도록 구성하였다.

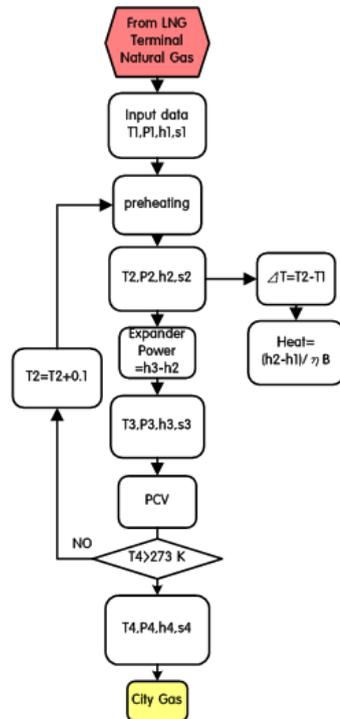


그림 4. 시뮬레이션 순서도
Fig. 4. Simulation flow chart

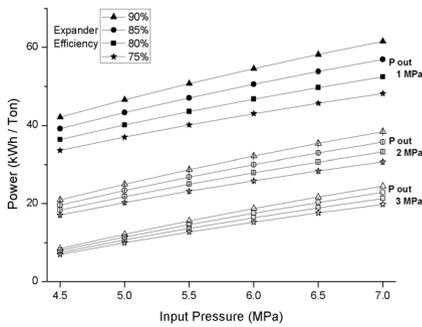


그림 5. 팽창기 효율과 압축비 변화에 대한 출력 변동
Fig. 5. Power of expander as pressure ratio and efficiency.

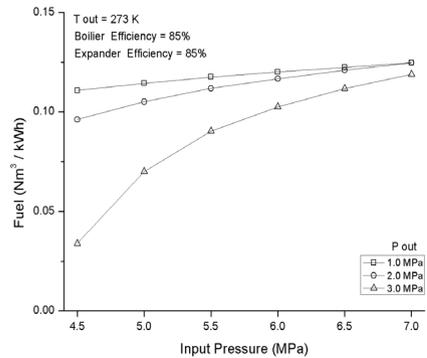


그림 6. 단위 출력당 연료소비량
Fig. 6. Fuel Consumption per Power(kWh)

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

1. 에너지 해석

그림 5는 단위질량유량(Ton/hr)에 대하여, 팽창기 입출구 압력의 변화와 팽창기의 효율에 따른 팽창기의 출력 변화를 나타내었다.

압력비 증가에 따른 출력량 증가는 출구압력에서 동일한 결과를 보였다. 동일한 팽창기 효율에서 입구 압력 움직임에 따라 발전량은 평행선과 유사하게 나타나고 있지만, 동일한 출구압력에서 각각의 효율에 대한 출력량은 큰 편차로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 이는 팽창기의 입출구 압력에 따라 P-h 선도의 엔탈피 구배 편차로부터 발생된 차이로 해석 할 수 있다. 3 MPa~2 MPa에서 출력량의 편차와 2 MPa~1 MPa에서 출력량의 편차는 차이가 있다. 이는 각 압력비마다 팽창기를 지나는 NG의 비체적의 변화가 다르고, 일은 비체적 변화의 차로 표현되기 때문이다. 팽창기의 효율, 압력비, 비체적변화에 따라 출력은 크게 영향을 미친다. 압력비가 크고 효율이 높을수록 팽창기의 출구 온도는 더욱 낮은 온도까지 떨어진다. 따라서 팽창기 출구온도 273 K 이상을 유지하기 위해 많은 예열을 필요로 한다.

2. 경제적 효과

전력거래소와 KOGAS 자료에 따라 2006년 1월부터 2009년 12월까지 4년간 평균 전력거래 가격은 96.77원/kWh, 산업용 도시가스 평균 도매요금은 526.85원 이었다.

그림 6은 단위 출력량(kWh)당 요구되는 연료량을 나타내고 있다. 출구압력이 1 MPa의 조건에서, 출력 1 kWh 생산 할 때 연료의 증가량은 완만한 반면에, 출구압력이 3 MPa의 조건에서는 입구압력에 따라서 3배 이상의 소요량을 보여주고 있다. 즉 압력비가 증가할수록 연료 소비량은 증가하는 것을 볼 수 있다. 팽창기 출구온도는 273K이상으로 유지해야 하므로, 각 압력비에 따라서 입구의 온도를 다르게 결정해야 한다. 팽창기 입구온도는 식(8)으로 구할 수 있다. 출구온도 T_{out} 은 273K로 일정하게 하였다.

$$T_{in} \propto \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (8)$$

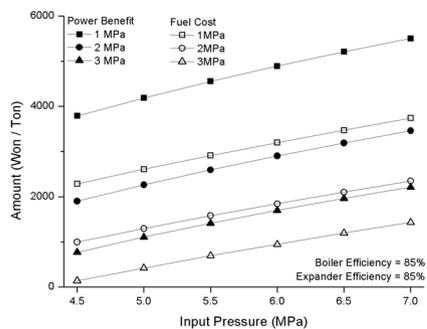


그림 7. 전력생산 판매 액과 연료 비용
Fig. 7. Benefit of power and fuel cost

그림 7은 전력 생산 판매액과 연료비용을 비교하여 대략 계산에 의해 나타낸 것이다. 순이익은 "Power Benefit"과 "Fuel Cost"의 차이이다. 그림에 따르면, NG 1Ton을 공급할 때, 최저 629원 최대 1766원의 순이익을 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 그림 6에서 설명한 단위출력(kWh)에 대한 연료 소비량에서 출구압력 3 MPa, 입구압력 4.5 MPa에서 가장 경제적이었다. 압력비가 증가 할수록 연료비용은 증가하는데 이 연료비용은 전력 에너지를 얻기 위한 투자비용이라 할 수 있다.

순이익률은 전력 생산판매액과 연료비용의 비로 나타낼 때 순이익률은 압력비가 증가 할수록 투자비용인 연료비용도 비례적으로 증가하여 순이익률이 감소되고 있다.

결과적으로 순이익률은 압력비의 영향을 받고 있으며, 압력비가 낮을수록 순이익률은 높아지고, 압력비가 높을수록 순이익률이 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 전력거래가격은 매년 동절기 시작과 함께 증가추세를 보이고 있고, 국내 천연가스 소비량은 동절기에 많은 비중을 차지하므로, 팽창기의 경제적 효과는 더욱 증대 될 것으로 예상된다.

NG에 대한 예열 없는 경우 팽창기 입구온도를 288K로 가정하면 각 압력에서의 팽창기 출구온도는 최고 269.5K 최저196.5K까지 하락한다. 특히 출구압력 1 MPa에서는 출구온도가 최고 221.4K 최저 196.5K이므로, 충분한 냉열 에너지를 보유하고 있다.

3. 엑서지 해석

그림 8은 팽창기의 엑서지 효율을 NG의 예열조건과 예열을 하지 않은 조건을 비교하여 나타내었다. 팽창기에서 발생하는 W_{exp} 는 팽창기의 효율을 85%로 가정하고 계산되어진 출력이다. 팽창기의 기계효율 85%는 제작사가 보장하는 효율로, 기계적 마찰 및 유체유동에 의한 팽창기 날개충격 손실, 팽창기 비가역성 등으로 발생하는 팽창기 효율감소율을 포함하고 있다.

예열하면 팽창기의 엑서지 효율변화가 각각의 압력비에 따라 변화하고 있다. 하지만, 예열을 하지 않은 경우의(288K) 팽창기 엑서지 효율은 압력비와 무관하게 약 85%를 유지하고 있다. 288K는 Reference value와 동일하다. 압력비는 엑서지 효율에 영향을 주지 않지만, 팽창기의 입구온도는 엑서지 효율에 영향을 주고 있다.

열전달 속도는 온도차에 따라 다르다. 이는 열전달 과정의 엑서지 식(7)에 의하여 설명 할 수 있다. 식

(7)에 따라 팽창기 입구의 온도는 시스템 외부로 전달되는 열량과 관계가 있고 외부로 전달되어진 열량, 즉 손실 열량은 엑서지 손실효율로 나타나고 있다.

그림 9, 그림 10 및 그림 11은 그림 1, 그림 2, 및 그림 3의 경우에 대한 엑서지를 Flow Diagram으로 나타낸 것이다.

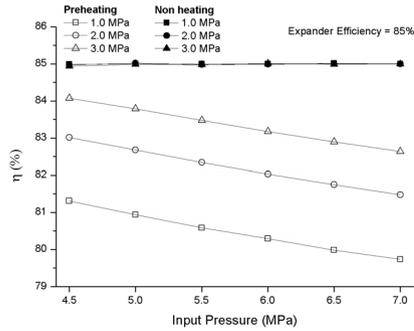


그림 8. 팽창기의 엑서지 효율
Fig. 8. exergy efficiency of expander

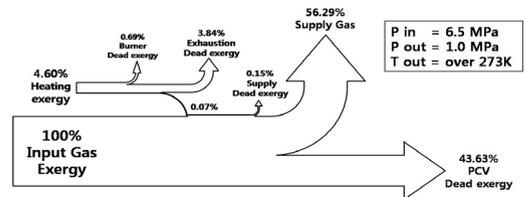


그림 9. 현행 공급 시스템의 엑서지 흐름도
Fig. 9. exergy flow diagram in current governor station.

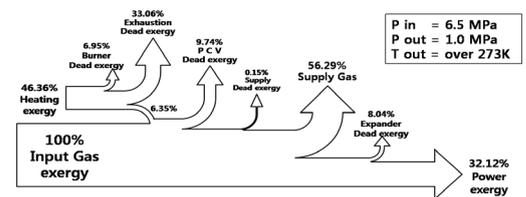


그림 10. 팽창기 도입 시스템의 엑서지 흐름도
Fig. 10. exergy flow diagram by installed expander.

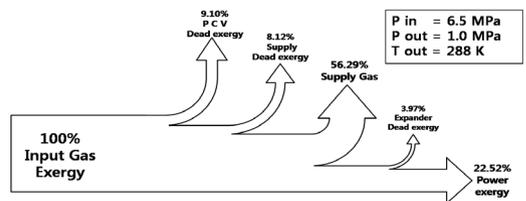


그림 11. 예열 없는 팽창기 도입 시스템의 엑서지 흐름도
Fig. 11. exergy flow diagram by installed expander which is non heating.

3개의 엑서지 Flow Diagram에서 입력 엑서지가 100%일 때, 56.29%는 NG를 수요처로 수송하기 위한 엑서지로 사용되고 있었다. 팽창기를 도입하는 경우 PCV 감압과정의 발생 손실 엑서지를 약 1/4로 줄일 수 있다. 팽창기로부터 발생된 Power 엑서지율은 가열 엑서지의 유무에 따라 차이가 있다. 그림 10의 Power 엑서지율은 그림 11의 Power 엑서지율과 공급 손실 엑서지의 합과 비슷하다.

V. 결론

본 연구를 통해 에너지 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석 프로그램을 개발하고, 국내 천연가스 공급계통에 대한 해석 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 엑셀 sheet에서 데이터의 입력으로 에너지 시스템에 대한 에너지 및 엑서지 해석이 가능한 프로그램을 개발하였다. 따라서 이 프로그램은 일반적인 에너지 시스템에 대한 해석 교육에 유효하게 활용될 것으로 기대된다.

2) 냉열 에너지의 동력회수 시스템에 대한 해석결과 회수 가능한 전력 에너지는 팽창기 입구온도, 압력비, 비체적 변수에 의한 영향을 받고 있다.

3) 가열기에서 발생하는 배기가스 열손실로 인해, 가열기 엑서지 효율은 10% 수준을 나타냈다. 엑서지 효율을 향상하기 위해서는 가열원의 변경을 필요로 함을 알 수 있었다.

4) 팽창기에서 회수하는 전력 에너지가 증가 할수록 순수익은 증가하였다. 전력거래가격은 동절기에 증가하며, 국내 천연가스 소비량도 동절기에 증가하고 있으므로 팽창기에서 생산되는 전력 에너지는 순수익에 긍정적인 효과를 가져다 줄 것으로 예상된다.

5) 열전달 엑서지는 팽창기와 가열기의 엑서지 효율에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

6) 현재 공급관리소 공정의 PCV 손실 엑서지는 팽창기를 도입하여 동력을 발생하면 약 75%의 엑서지를 회수 할 수 있을 것으로 나타났다.

7) 공급관리소에 팽창기 설치를 하여도 수요처의 요구에 대응 할 수 있는 안정적인 NG의 공급에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] H.Auracher, 1987, Application of Exergy to the Analysis and Optimization of Heat Transfer Processes, Air-conditioning and

refrigeration engineering, v.16 no.6 ,1987, pp.542-549

[2] Taniguchi, Mouri, Nakahara, Arai, 2005, Exergy analysis on combustion and energy conversion process, Elsevier energy 30, pp.111~117.

[3] Hoyeon Kim, Seongho Hong, Yangmi Choi, Seungmin Park, 2005, Availability and Economy Analysis on LNG Cold Power Generation, The korean institute of gas, pp.89-91.

[4] Jan Szargut, 2005, exergy method, WIT PRESS, New York pp.35-45.

[5] MICHAEL J. MORAN, HOWARD N. SHAPIRO, 2001, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., pp.299-335, pp.724-730.

[6] Richard E. Sonntag, Claus Borgnakke, Gordon J. Van Wylen, 2005, FUNDAMENTALS of Thermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., pp.273~274.

[7] J.M.Smith, H.C.VanNess, M.M.Abbott,, 2005, Intorduction to Chemical Engineering Thermodynamic, McGraw-Hill, pp.176-178, pp.159~164.

박 일 환 (Il-Hwan Park)

정희원



1997년 4월 : 일본 Hokkaido 대학 대학원 기계공학과(공학 박사)

1991년 3월~현재 : 한국기술교육대학교 기계정보공학부 <관심분야> 에너지변환공학, 신재생에너지, 에너지 시스템 경제성분석

김 춘 성 (Choon-Seong Kim)



2010년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 기계공학과(공학 석사)

2010년 8월~현재 : 한국가스공사 <관심분야> 도시가스 관리, 냉열 이용