



가스터빈용 기화 시스템의 계절별 운전 방안



최 현 규
kwanjul@korea.com

강릉대학교 공업화학 학사
한양대학교 플랜트엔지니어링 석사
(주) 가스로드 대리

1. 서론

가스터빈은 연료인 LNG를 공급받기 위하여 연료 공급설비가 필요하다. 연료 공급설비는 저장장치, 가압장치 그리고 기화 시스템으로 구성된다. 연료 공급유량이 일정하게 운전되는 기화 시스템에서 기화된 LNG의 온도는 계절마다 다르다. 기화 시스템으로 공급되는 가스터빈의 연료인 LNG의 온도가 계절마다 다르기 때문이다. 특히, 하절기와 중간기는 가스터빈 입구에서 LNG 온도가 필요이상으로 상승되어 기화 시스템의 운전효율이 저하된다. 따라서, 계절에 따른 가스터빈용 기화 시스템의 최소 연료 공급유량을 예측하여 운전하는 방안이 필요하다.

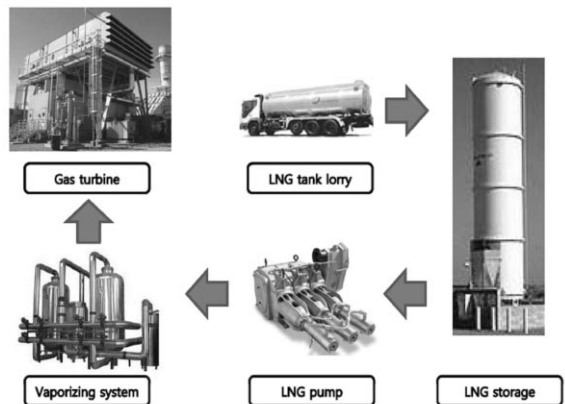
가스터빈 연료 공급설비의 기화 시스템은 기화기에 온수를 공급하는 온수순환 방식이다. LNG와 열 교환을 마친 온수는 재 가열되어 기화기에 재공급된다. 온수의 가열은 도시가스를 연료로 하는 보일러를 사용하며 보일러의 출력량은 공급연료의 유량제어를 통하여 조절할 수 있다.

본 고에서는 계절에 따라 기화 시스템으로 공급되는 LNG 온도에 따른 계절별 최소 도시가스 공급유량에 대해 기술하고자 한다.

2. 가스터빈 연료 공급설비

2.1 연료 공급설비의 개요

가스터빈의 연료인 LNG를 가스터빈에 공급하기 위한 설비를 연료 공급설비라 한다. 연료 공급설비의 LNG의 흐름을 그림 1에 나타내었다. LNG 이송차량에 의해 이송된 LNG는 저장장치에 저장되고 LNG 펌프에 의하여 가압 및 이송된다. 가압된 LNG는 기화 시스템으로 공급되어 기화 및 승온 후 가스터빈에 연료로 사용된다. 연료 공급설비는 저장장치, 가압장치 그리고 기화 시스템



[그림 1] Schematic diagram of fuel supply facility



템으로 크게 3가지로 나누어 진다. 저장장치는 진공단열로 LNG를 약 -162°C 로 저장한다. 하지만 진공단열이라 할지라도 100% 단열이 되지 않기 때문에 열 침입이 된다. 열 침입에 의해 LNG 일부가 기화되고 저장장치내 압력상승으로 인한 압력폭발을 유도할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 안전밸브등의 안전장치를 설치한다. 그리고 저장장치에 저장된 LNG를 LNG펌프를 이용하여 송출하였을 경우 내부압력이 낮아져 음압이 생긴다. 그러므로 사용한 유량만큼 보상해 줄 수 있는 저장탱크용 압력상승 기화기를 설치한다. 가압장치는 LNG를 가스터빈 사용압력과 유량에 만족하도록 가압 및 이송을 할 수 있는 장치이다. 본 연료 공급설비에 사용된 LNG 펌프는 왕복동식이며 3개의 실린더로 구성되어 있다. 그리고 LNG 펌프는 가연성 가스를 가압하는 장치이므로 점화원 등에 의한 폭발을 방지하기 위하여 사용되는 모터 및 전기 장치는 폭발방지 등급의 제품을 사용한다. 기화 시스템은 가압 및 이송된 LNG를 가스터빈의 사용온도에 만족하게 기화 및 승온 시키는 장치이다. 기화 시스템은 LNG와 열매체인 온수의 열교환으로 LNG를 기화시킨다. 기화기는 LNG의 사용압력에 적합하도록 설계압력이 정해진다. 그리고 토출온도 설계에 따라 공급온수의 온도와 열 교환 면적 등이 결정된다.

2.2 연료 공급설비의 설계조건

연료 공급설비의 설계조건은 가스터빈 제작사의 연료 공급조건에 의해 결정된다. 본 고의 분석대상 가스터빈은 General electric company의 LM2500 모델이다. 표 1은 연료 공급설비의 설계조건을 표로 나타낸 것이다. 설계조건의 항목은 공급유량, 압력, 온도 그리고 운전방법으로 구성된다. LNG 사용압력은 $36 \pm 1 \text{ bar,g}$ 이고 사용온도는 5°C 이다. 즉, 액체상태가 아닌 기체상태로 공급이 된다. 유량은 질량유량 기준으로 $6,270 \text{ kg/h}$ 이다. LNG의 밀도가 0.454 kg/m^3 이므로 체

적유량은 약 $14,801 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다. 가스터빈은 발전용으로 사용되기 때문에 하루 24시간 연속운전이 될 수 있도록 설계 되었다. 저장장치의 용량은 LNG를 충전하는 중에도 가스터빈이 운전될 수 있도록 설계되어야 한다. 표 2는 연료 공급설비의 각 장치용량을 표로 나타낸 것이다. 저장탱크의 저장량은 물 기준 150m^3 , 가압펌프의 이송량은 물 기준 360 liter/min 그리고 기화 시스템의 기화용량은 LNG기준 $11,500 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다.

3. 기화 시스템

3.1 기화 시스템의 개요

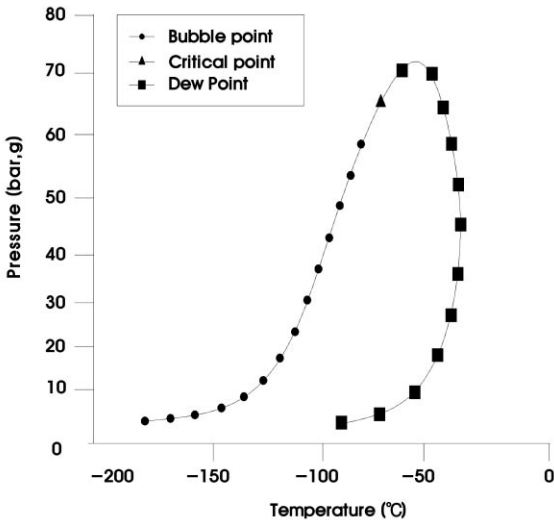
가스터빈에 연료인 LNG를 공급하는 유량은 질량기준 $6,270 \text{ kg/h}$ 이며, 공급온도는 5°C 이다. 그림 2는 LNG 상경계도를 나타내고 있다. 임계점은 -80°C 에 65 bar,g 이고 LNG는 대기압에서 약 -162°C 가 끓는점이다. 즉, 가스터빈의 연료 공급조건인 5°C 로 연료를 공급하기 위해서는 LNG를 기화 및 승온할 수 있는 장치가 필요하다. LNG 기화를 위해서는 LNG의 잠열만큼 열량이 필요하고 승온을 위해서는 LNG의 현열과 승온량을 곱한 값만큼의 열량이 필요하다. 기화 시스템

<표 1> Inlet conditions of gas turbine

Conditions	Value
Supply pressure	$36 \pm 1 \text{ bar,g}$
Minimum supply temperature	5°C
LNG flow rate	$6,270 \text{ kg/h}$
Operating time	24 h/day

<표 2> Capacity of fuel supply facility

Component	Capacity
LNG storage	150 m^3
LNG pump	360 liter/min
Vaporizing system	$11,500 \text{ Nm}^3/\text{h}$



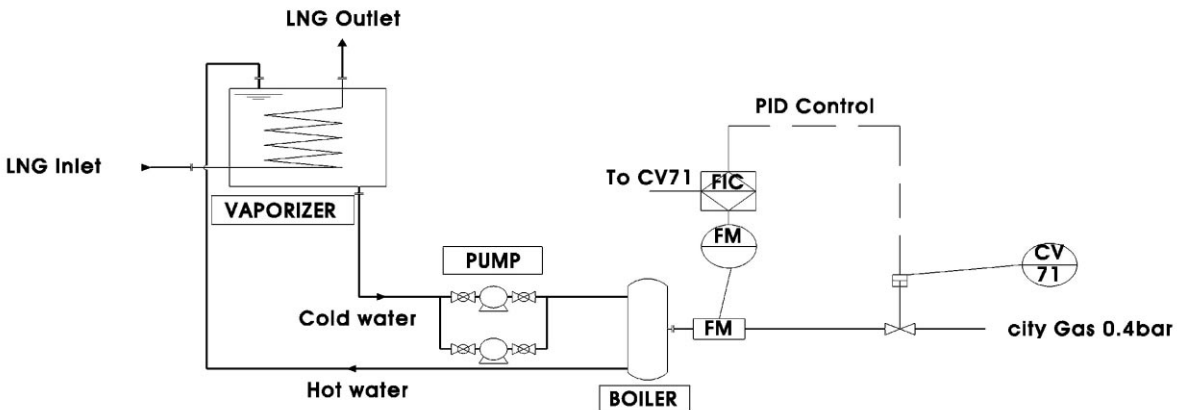
[그림 2] Phase envelope of LNG

의 계통도를 그림 3에 나타내었다. 기화 시스템은 기화기, 보일러 그리고 순환펌프로 이루어진다. 온수와 LNG가 기화기에 공급되고 온수는 순환펌프에 의해 보일러로 회수된다. 보일러의 연료는 도시가스이고 공급압력은 0.4 bar.g이다. 도시가스는 유량계와 유량조절 밸브가 연동되어 공급된다. 기화기는 온수와 LNG의 열교환을 통하여 LNG를 기화 및 승온시킨다. 기화 시스템의 열매

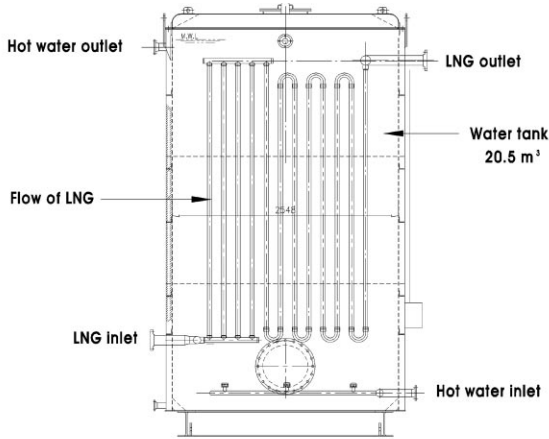
체인 온수의 온도는 약 80°C이다. LNG와 열 교환을 마치고 온도가 낮아진 온수는 보일러로 회수된다. 그리고 약 80°C로 다시 승온되어 기화기로 공급이 되는 폐회로로 구성된다. 기화기의 내부를 그림 4에 나타내었다. 기화기는 내부배관과 외조로 구성되어 있다. 기화기 내부의 배관으로 LNG가 이동하고 배관 외부의 탱크로는 온수가 공급되어 열 교환이 된다. LNG가 기화하기 위한 잠열과 승온하기 위한 현열을 온수가 공급하고 다시 보일러로 회수된다. 보일러의 출력량은 최대 2 Gcal/h, 순환펌프는 유량은 20 ton/h 그리고 기화기의 물 저장능력은 20.5 m³이다. 즉, 1시간 마다 기화기 내부의 물이 전량 순환된다. 보일러는 도시가스를 공급받아 연소시켜 온수를 가열하며, 진공온수식이다. 진공온수식이란 공급된 급수를 포화온도보다 약간 낮은 온도의 온도 즉 80°C까지 가열하는 보일러를 의미한다.

3.2 기화 시스템의 운전방법

보일러의 연료는 도시가스이다. 보일러의 출력은 연료의 공급유량으로 조절이 된다. 보일러 연료 공급라인에는 유량계와 유량조절밸브가 설치되어 있다. 연료의 공급유량을 설정하면 유량조절 밸브와 유량계가 연동하여 설정유량으로 보일러



[그림 3] Process flow diagram of vaporizing system



[그림 4] Drawing of vaporizer inside

에 공급된다. 유량밸브의 조절은 PID제어를 통하여 이루어진다. PID제어는 제어 변수와 기준 입력 사이의 오차에 근거하여 계통의 출력이 기준 전압을 유지하도록 하는 피드백 제어의 일종으로, 비례제어와 비례 적분제어 그리고 비례 미분제어를 조합한 것이다. P제어는 기준 신호와 현재 신호 사이의 오차 신호에 적당한 비례 상수를 곱해서 제어 신호를 만든다. I 제어는 오차 신호를 적분하여 제어신호를 만들며, D제어는 오차신호를 미분하여 제어신호를 만든다. PID제어는 자동화 시스템의 반응을 측정할 뿐 아니라 반응을 제어할 때도 사용되는 제어 방법이며, 온도, 압력, 유량, 회전 그리고 속도 등을 제어하기 위해 쓰인다.

4. 기화 시스템의 연료 공급유량

대기압에서 LNG의 끓는점은 -162°C 이고, 이 온도는 계절을 고려하지 않는 일반운전에 사용되는 LNG 온도이다. 이 온도값을 이용하여 열평형 방정식에 의한 기화 시스템의 연료 공급유량을 산정할 수 있다.

4.1 연료 공급유량 산정방법

연료 공급유량의 산정은 열평형 방정식을 이용

<표 3> Composition of LNG components

Component	Composition (mol %)
CH ₄	91.332 %
C ₂ H ₆	5.363%
C ₃ H ₈	2.136%
i-C ₄ H ₁₀	0.459%
n-C ₄ H ₁₀	0.476%
i-C ₅ H ₁₂	0.015%
n-C ₅ H ₁₂	0.002%
N ₂	0.217%

한다. 기화기로의 투입열량, 열 교환에 필요한 열량 그리고 외부 출열량의 계산을 통하여 투입열량 대비 소모된 열량을 산정한다. LNG와 온수는 기화기 내에서 열 교환 한다. LNG는 끓는점까지 도달하여 100%기화가 되고 설계 온도만큼 승온된다. 온수는 LNG 승온에 필요한 열량과 LNG기화에 필요한 열량만큼 빼앗기게 된다. 열평형 방정식은 다음과 같다.

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \quad (1)$$

여기서, Q_{out} 은 LNG 승온에 필요한 열량, LNG 기화에 필요한 열량 그리고 열교환 후 온수의 현열량의 합이다. Q_{in} 은 인입 LNG 현열량과 공급 온수의 현열량의 합이다. LNG의 구성성분을 표 3에 나타내었다. 주성분은 메탄이 91.332%, 에탄이 5.363% 그리고 프로판이 2.136%이다. LNG는 99.783%가 연소가 가능한 탄화수소 계열이고 0.217%가 연소가 불가능한 질소로 구성되어 있다. LNG의 현열은 $0.78 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 이고 잠열은 $81.67 \text{ kcal}/\text{kg}$ 이다. 현열은 물질의 상태변화 없이 온도를 변화시키기 위해 필요한 열량으로 비열이라고도 한다. 잠열은 온도변화 없이 물질의 상변화 때 방출 또는 흡수하는 열량이다.

4.2 연료 공급유량 산정

연료 공급유량의 산정하기 위한 절차는 다음과



같다. 첫 번째는 LNG 기화에 필요한 열량, 두 번째는 LNG 승온에 필요한 열량, 세 번째는 인입 LNG 현열량, 네 번째는 공급 온수의 현열량 그리고 다섯 번째는 열교환 후 온수의 현열량이다. LNG 기화에 필요한 열량은 LNG가 온도변화 없이 100% 상변화에 필요한 열량이고 다음 식을 이용하여 산정한다.

$$Q = \dot{m} \times h \quad (2)$$

여기서, Q는 열량, \dot{m} 는 질량유량, h는 잠열을 나타낸다. 식(2)에 질량유량 6,720 kg/h, 잠열 81.67 kcal/kg을 대입하여 산정된 열량은 512,070.9 kcal/h이다.

LNG승온에 필요한 열량은 식(3)을 이용하여 산정한다.

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (3)$$

여기서, Q는 열량, \dot{m} 는 질량유량, C_p 는 정압비열 그리고 ΔT 는 온도차를 나타낸다. LNG를 -162°C 에서 5°C 까지의 승온 열량계산이다.

공급유량은 6,720 kg/h, 비열은 $0.78 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 그리고 온도차는 167°C 에 의해 계산되었다. 계산된 열량은 816,730.2 kcal/h이다. 인입 LNG의 현 -162°C 기준이며 기화 시스템의 열평형 방정식 계산때 입구 기준온도를 -162°C 로 하였기 때문에 0 kcal/h가 된다. 계절별 LNG공급온도의 차이로 발생하는 인입 LNG 현열량은 5장에서 다루기로 한다.

LNG를 기화 및 승온 시키기 위하여 기화기로 온수가 공급되어지는 공급온도는 80°C 이다. 공급 온수의 현열량은 식(3)을 이용하여 산정한다. 물의 기준 온도는 0°C 로 하였다. 필요열량을 계산하기 위한 값은 온수 공급유량 2,000 kg/h, 비열 $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 그리고 온도차는 80°C 이다. 계산된 값은 1,600,000 kcal/h이다.

식(1)을 이용하여 열 교환 후 온수의 현열량은 271,198.9 kcal/h인 것으로 산정되었다. 열 교환 후 온수의 온도는 식(3)을 이용하여 산정하였다. 온수의 온도를 계산하기 위한 운전조건은 공급유량 2,000 kg/h, 비열 $1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 그리고 현열량은 271,198.9 kcal/h이며, 운전조건하에서 산정된 열 교환 후 온수의 온도는 13.56°C 이다. 온수를 13.56°C 에서 80°C 로 승온시키는데 필요한 열량을 구한다음 그 값을 도시가스 발열량으로 환산하면 기화 시스템의 필요 연료량을 얻을 수 있다. 식(3)을 이용하여 산정한 결과 온수를 승온시키는데 필요한 열량은 1,328,801.1 kcal/h이다. LNG의 발열량은 $10,000 \text{ kcal/Nm}^3$ 이고 도시가스의 발열량은 $10,400 \text{ kcal/Nm}^3$ 이다. 이 두 값에 차이가 나는 이유는 LNG는 발열량 조절을 하지 않은 상태이고 도시가스는 발열량 조절을 하였기 때문이다. 도시가스는 LNG를 기화 시킨 후 부취제 등을 첨가하여 각 수요처로 공급되는데 이때 발열량을 조절하여 공급하게 된다. 따라서 도시가스 발열량인 $10,400 \text{ kcal/Nm}^3$ 으로 환산하면 기화 시스템의 연료 공급유량은 $27.76 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 의 값을 얻을 수 있다.

5. 기화 시스템의 계절운전 및 운전비교

5.1 계절운전 최소 연료 공급유량

LNG는 계절에 따라 저장되는 온도가 다르며, 이는 외기의 열 침입이 주된 원인이다. LNG 저장 장치의 설계압력은 10 bar,g이다. 이론상 LNG는 저장장치에 -120°C 까지 액체로 존재할 수 있다. LNG는 고유의 임계점이 있으며 여기에는 임계온도, 임계압력이 존재한다. 임계온도는 기체상, 액체상 그리고 고체상의 상전이 현상에서 나타나는 특이점인 임계점의 온도를 말한다. 이 온도보다 낮은 상태의 기체는 적당한 압력을 가하면 액체로 상태변화가 일어나지만, 이 온도보다 높을 경우, 액화되지 않는다. 열역학적으로는 온도, 압력



그리고 부피 등을 변화시켜도 상태변화가 일어나지 않는 온도를 뜻한다. 임계압력은 액체와 기체 두 상태를 서로 분간할 수 없는 임계상태일 때의 증기압이다. 기체와 액체가 공존한다는 것은 임계 온도까지만 적용할 수 있으며, 증기압력곡선 또한 임계온도까지만 나타낼 수 있다.

공급되는 LNG의 계절별 온도를 표 4에 나타내었다. LNG의 공급온도는 동절기에는 $-150 \sim -155^{\circ}\text{C}$, 중간기에는 $-140 \sim -150^{\circ}\text{C}$ 그리고 하절기에는 $-130 \sim -140^{\circ}\text{C}$ 이다. 따라서 계절별 LNG의 온도를 표 4와 같이 적용하면 기화 시스템 최소 연료 사용유량을 예측할 수 있다.

동절기에 공급 되는 LNG의 온도는 $-150^{\circ}\text{C} \sim -155^{\circ}\text{C}$ 이며 열평형 방정식 계산 시에는 -155°C 를 적용하였다. 식(2)와 식(3)을 이용하여 산정한 LNG 인입 시 열량은 $34,234.2 \text{ kcal/h}$, 기화에 필요한 열량은 $512,070.9 \text{ kcal/h}$, LNG 승온에 필요한 열량은 $782,496 \text{ kcal/h}$ 그리고 인입온수의 현열량은 $1,600,000 \text{ kcal/h}$ 이다. 그리고 식(1)에 의해 열교환 후 온수의 현열은 $339,667.3 \text{ kcal/h}$ 이다. 식(2)에 의해 열교환후 온수의 온도는 16.98°C 이며 기화 시스템 연료인 도시가스로 환산시 약 $121.18 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다.

중간에 공급 되는 LNG의 온도는 $-140^{\circ}\text{C} \sim -150^{\circ}\text{C}$ 이며 열평형 방정식 계산 시 -150°C 를 적용하였다. 식(2)와 식(3)에 의해 계산된 LNG 인입 시 열량은 $58,687.2 \text{ kcal/h}$, 기화에 필요한 열량은 $512,070.9 \text{ kcal/h}$, LNG 승온에 필요한

열량은 $758,043 \text{ kcal/h}$ 그리고 인입온수의 현열량은 $1,600,000 \text{ kcal/h}$ 이다. 그리고 식(1)에 의해 열교환 후 온수의 현열은 $388,573.3 \text{ kcal/h}$ 이다. 식(2)에 의해 열교환후 온수의 온도는 19.42°C 이며 기화 시스템 연료인 도시가스로 환산시 약 $116.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다.

하절기에 공급 되는 LNG의 온도는 $-130^{\circ}\text{C} \sim -140^{\circ}\text{C}$ 이며 열평형 방정식 계산 시 -140°C 를 적용하였다. 식(2)와 식(3)에 의해 계산된 LNG 인입 시 열량은 $107,593.2 \text{ kcal/h}$, 기화에 필요한 열량은 $512,070.9 \text{ kcal/h}$, LNG 승온에 필요한 열량은 $709,137 \text{ kcal/h}$ 그리고 인입온수의 현열량은 $1,600,000 \text{ kcal/h}$ 이다. 그리고 식(1)에 의해 열교환 후 온수의 현열은 $486,385.3 \text{ kcal/h}$ 이다. 식(2)에 의해 열교환후 온수의 온도는 23.32°C 이며 기화 시스템 연료인 도시가스로 환산시 약 $107.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다.

5.2 계절운전과 일반운전

기화 시스템의 LNG 계절별 공급온도에 따라 열교환 후 온수의 현열과 기화시스템의 필요연료량을 비교 하였다. 현열량은 동절기 $339,667.3 \text{ kcal/h}$, 중간기 $388,573.3 \text{ kcal/h}$, 하절기 $486,385.3 \text{ kcal/h}$ 그리고 일반운전은 $271,198.9 \text{ kcal/h}$ 이다. 이 현열량으로 토출온도를 구할 수 있으며 토출온도를 기준으로 기화 시스템의 연료 사용유량을 확인할 수 있다. 표 5는 계절별 열교환 후 온수의 현열, 기화 시스템의 최소 연료 공급유량을 나타낸 표이다. 연료 공급유량은 동절기 $121.18 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 중간기 $116.48 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 하절기 $107.07 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 그리고 일반운전은 $127.76 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 이다. 상대적으로 연료 공급유량이 적은 하절기와 일반운전의 최소 연료 공급유량의 차이는 $20.69 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 로 이다. 표 6은 기화시스템의 계절별 최소 연료 공급유량운전과 일반운전의 에너지 연간 사용량을 나타내고 있다. 계절운전은 $898,789$

〈표 4〉 Seasonal supply temperature of LNG

Part	Supply temperature (°C)
Winter time (December, January, February)	$-150 \sim -155$
Center time (March, April, November)	$-140 \sim -150$
Summer time (May ~ October)	$-130 \sim -140$



<표 5> Comparison of seasonal fuel consumption

Part	Sensible heat of water (kcal/h)	City gas rate (Nm ³ /h)
Winter time (December, January, February)	339,667.3	121.18
Spring and autumn time (March, April, November)	388,573.3	116.48
Summer time (May ~ October)	486,385.3	107.07
None	271,198.9	127.76

Nm³/year 이고 일반운전은 1,103,933 Nm³/year이다. 그 결과 계절운전은 일반운전에 대비해 연간 약 10%정도의 절감효과를 얻을 수 있다. 그리고 에너지 기대 절감액은 산업용 가스요금 기준 (702.29원 Nm³/h) 으로 연간 8,000만원 정도로 분석되어 계절운전시 설비의 효율성이 증대함을 알 수 있다.

<표 6> Comparison of fuel consumption a year

Part	Fuel consumption (Nm ³ /year)
Seasonal operation	898,798
Normal operation	1,103,933

6. 결론

본 고에서는 열평형 방정식을 이용하여 기화 시스템에 공급되는 온수의 온도 및 연료 공급유량에 대해 이론적으로 분석을 하였다. 열교환 후 온수의 온도는 동절기 16.98℃, 중간기 19.42℃ 그리고 하절기는 23.32℃이며, 열교환 후 회수된 온수를 기화기 공급온도로 승온시키기 위한 최소 연료 공급유량은 동절기 121.18 Nm³/h, 중간기 116.48 Nm³/h 그리고 하절기는 107.07 Nm³/h이다. 이와 같은 결과를 토대로 기화 시스템의 연료 공급유량을 제어함으로 일반운전 대비하여 연간 10%의 에너지절감이 가능하며, 기대 절감액 (8,640시간/년 운전적용)은 연간 8,000만원 정도인 것으로 분석되었다. (KIPEC)