

Joule Thomson Valve

Oil & Gas



Refinery



본인이 SEVERN GLOCON(Control Valve) 한국 지사장 역임 시절, 해외 유수 석유/가스 사업주 및 국내 주요 EPC 엔지니어를 대상으로 2009년부터 2011년까지 세미나 했던 내용으로 플랜트에 종사하는 많은 엔지니어에게 도움을 주고자 정리한 것이다.

박시우대표(Stanley Park)

기계기술사 (President, P.E.)

S&T International Co.

Mobile : +82(0)10-3840-0721

Tel/ Fax : +82(0)2-400-8039

E-mail : stanley.park@daum.net

History

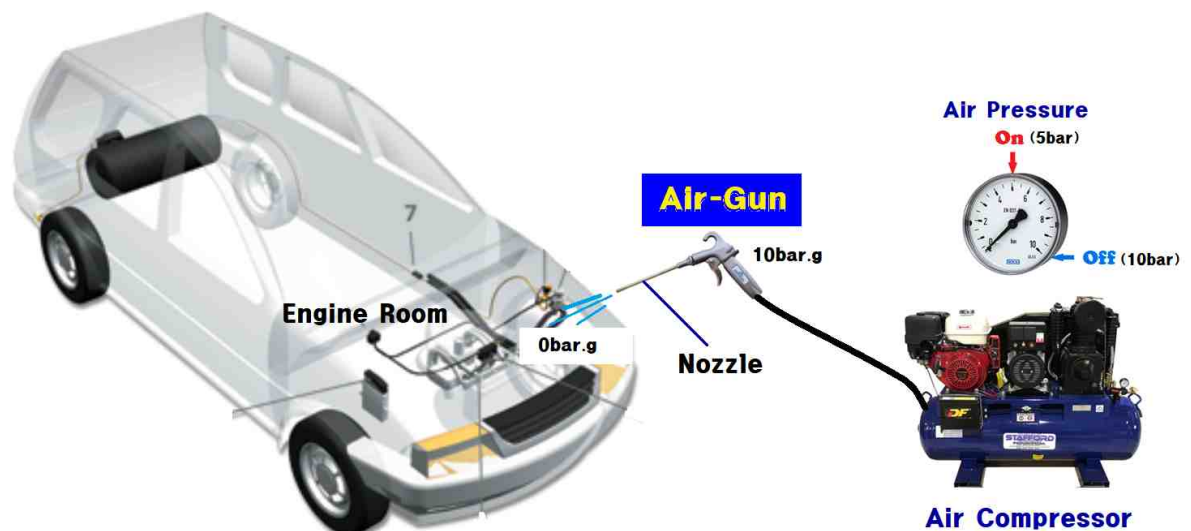
- ◆ Involves temperature change in a pressurized gas system by rapid expanding its volume or creating a sudden drop in pressure
- ◆ The effect discovered in 1852 by James Prescott Joule and William Thomson

Joule Thomson Valve는 기체의 성질을 이용한 밸브이기 때문에 기본적으로 물리(열역학)의 열역학 제 1법칙과 PH 선도를 이해할 수 있어야 한다. Joule-Thomson 효과라고 하는 것은 1852년 Joule과 Thomson이 발견한 물리적 현상으로 기체가 노즐 형태의 좁은 관로를 통과할 때 기체가 팽창(혹은 압력은 강하) 함으로써 온도가 떨어지는 현상을 말한다. 압력 강하가 클수록 기체내의 액체 증발(Flashing)이 빨라져 주위의 열을 흡수해 온도가 떨어진다. 모든 기체는 온도와 압력에 따라 미량의 액체를 함유하고 있다.

그 대표적인 예가 우리가 흔히 접하는 카 센터에서 볼 수 있다. 압축 공기가 Air Gun의 좁은 노즐을 지나는 속도가 10Bar의 압력차로 상당히 빨라져 노즐 출구의 공기 온도는 상당히 낮아진다.

Engine Room Air Gun

공기에는 온도와 상대 습도에 따라 2wt% ~ 3.5wt%의 수분을 함유하고 있으며, 이 공기는 노즐을 통과하는 유속이 빨라져(압력 저하) 수분의 급속한 증발이 이루어져 공기의 온도가 떨어진다.



Joule-Thomson Effect?

$$\Delta U = mC_v \Delta T = Q + \text{Emfd} - \int p dV$$

ΔU : Variation of internal energy in a system
(내부 에너지 변화 량)

m , : Mass of expanding gas(팽창 가스의 질량)

C_v : Specific thermal capacity at constant volume(정적 비열)

Q : Heat transfer(외부에서의 열 전달 량)

Emfd : Mechanical energy with friction loss(외부의 기계 에너지)

$\int p dV$: Work done for a system(시스템 에 제공한 일)

밀폐 계에서의 내부 에너지의 변화는 체적 변화가 없으므로, 온도 변화에 따라 정해 진다. 따라서 내부 기체의 질량에 정적 비열을 곱한 값에 온도 변화 량을 곱한 값과 같다:

$$C_v = (\partial u / \partial T)_v \rightarrow du = C_v \Delta T \rightarrow \Delta U = mC_v dT$$

이를 실제 냉동 시스템에 적용해서 실내에 있는 에어컨으로 생각해 보면,

Q : 냉매 코일에서 실내에 열을 전달해 준 에너지

Emfd : Fan이 회전하는 데 여기서는 기계 마찰 손실이 발생한다

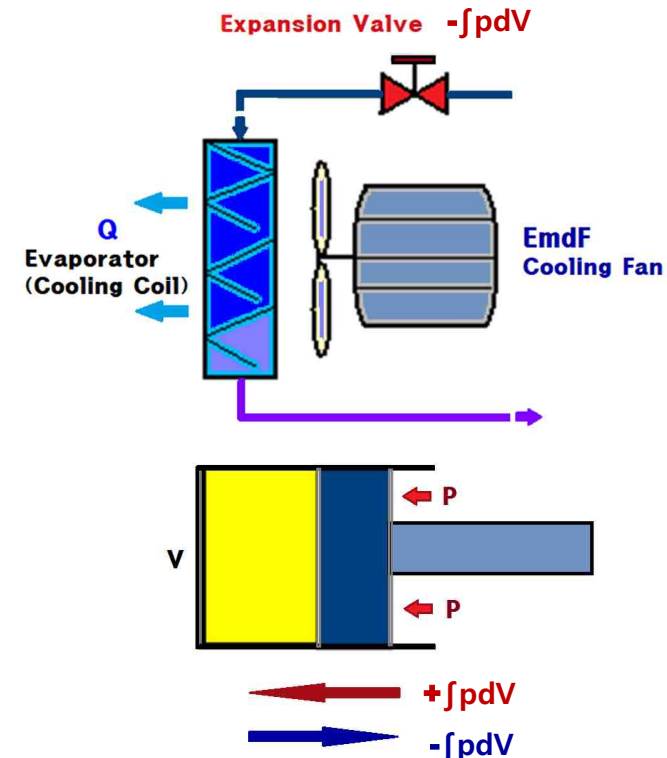
$-\int p dV$: 팽창 밸브가 한 일로 일이라고 하는 것은

$$W = F \times L = P \times A \times L = P \times V \text{가 된다}$$

피스톤이 압축할 경우의 일은 아래 그림과 같이 $+\int p dV$ 값이 되지만, 팽창을 할 경우에는 $-\int p dV$ 값이 된다.

$$\Delta U = mC_v \Delta T = Q + \text{Emfd} - \int p dV$$

$\text{Emfd} \geq 0$ in any process in an adiabatic process is known, hence the initial temperature of a system can be lowered (achieving $\Delta T < 0$) by forcing an expansion in a compressible fluid ($dV > 0$)



Joule Thomson Coefficient

- ◆ Another common formula to describe Joule-Thomson Effect is Joule-Thomson Coefficient

$$\mu_{JT} = (\partial T / \partial P)_H$$

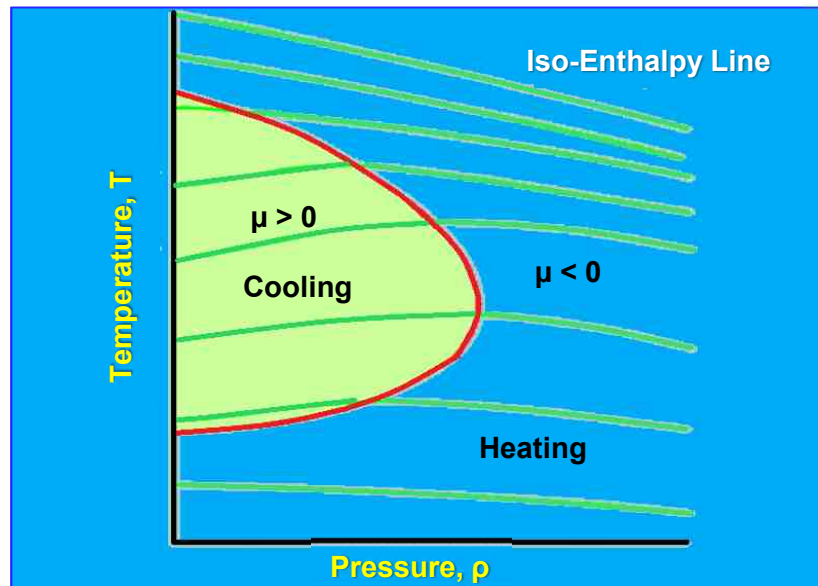
- ◆ In case fluid expansion occurs ($\partial P < 0$) when $\mu_{JT} > 0$, the final temperature is lower than the initial ($\partial T < 0$)
- ◆ $\mu_{JT} = 0$ for ideal gas
- ◆ The Coefficient is generally positive at low T & P

- ◆ Joule Thomson 효과를 다른 공식으로 나타낸 것이 Joule Thomson 계수라고 하는 방정식이다.
- ◆ 유체가 한 system에서 다른 system으로 이동을 한다고 해도 열 역학 제 1법칙에 의거, 초기 system에서의 유체 엔탈피와 이동한 후의 유체 엔탈피는 동일하다. 그래서 이 과정은 등 엔탈피 과정인 것이다. 따라서 이 계수는 등 엔탈피 하에서 온도와 압력의 함수에 의해 결정이 된다.
압력이 떨어지면 온도도 떨어지는 것을 공식화했다고 볼 수 있다.
- ◆ 이상 기체에 있어서 보일의 법칙에 의하면 온도가 일정한 경우, 압력은 체적에 반비례한다.
즉, 다음과 같은 공식이 성립이 된다.

$$P_1 V_1 = P_2 V_2, PV = \text{일정}$$

- ◆ 역으로 말하면 이상 기체는 압력이나 체적이 변해도 온도가 일정하므로 $\mu_{JT} = (\partial T / \partial P)_H$ 에서 $\partial T = 0$ 이라는 결론이다.
따라서 $\mu_{JT} = 0$ 이 된다.

역전 곡선(Inversion Line)



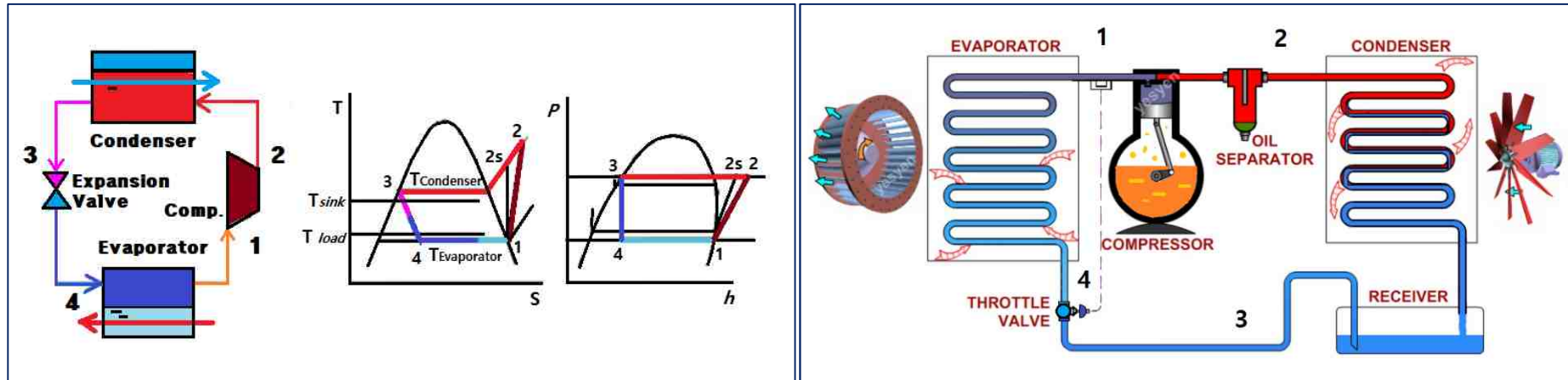
여러 기체의 최대 역전 온도

기 체	최대 역전 온도(K)
Helium(He)	45
Hydrogen(H ₂)	205
Neon	250
Nitrogen(N ₂)	621
Oxygen(O ₂)	761
Air	603
Carbon dioxide	939
Methane	1,500
Ammonia	1,994

- 아래 그림에서 보는 것과 같이 곡선의 기울기(μ_{JT} : J-T 계수)가 역전이 되는 지점이 있다. 이 지점을 역전 교점(Inversion point)이라고 하고 이점에서의 온도를 역전 온도(inversion temperature)라고 하며, 이 점들을 연결한 곡선을 역전 곡선(Inversion Line)이라고 한다. 결국 역전 곡선 왼쪽에서만 압력 강하에 따라 온도가 떨어지는 냉각 효과가(Cooling effect) 일어난다. 역전 온도 이상에서는 Joule Thomson 계수가 (+)가 되는 영역이 존재하지 않으므로 냉각 효과를 얻을 수가 없다. 다시 말해서 냉각 효과는 온도와 압력이 어느 정도 낮은 지역에서만 일어난다는 것이다

Applications

Simplified Schematic for Refrigeration System



Joule Thomson 효과는 냉동 사이클에서 3-4의 단열 팽창 과정에서 일어난다. 따라서 Joule Thomson 밸브(팽창 밸브)는 이 과정에 교축 (Throttling) 작용에 의한 냉각 효과를 일으키는 밸브로 사용된다.

여기서,

1-2 과정 : 압축기에서의 등 엔트로피로 단열 압축 과정이다.

2-3 과정 : 응축기에서의 등온 (정압) 냉각 응축 과정이다.

3-4 과정 : 팽창 밸브에서의 등 엔탈피 팽창 과정이다.

4-1 과정 : 증발기에서의 등온 (정압) 증발 과정이다.

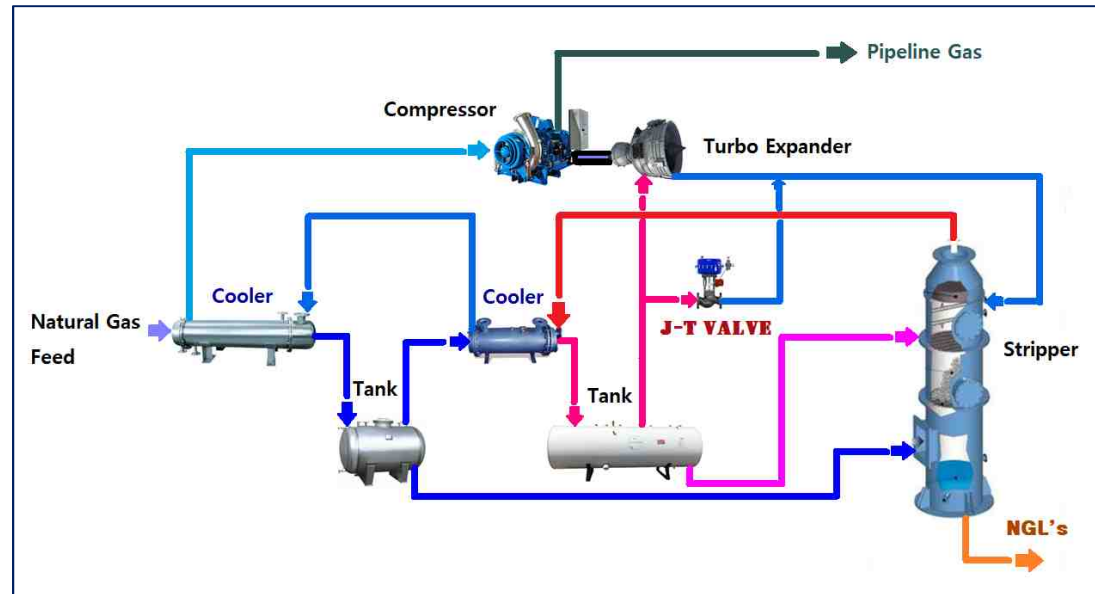
Improved System for Turbo Expander

Expansion brings 2 positive effects through expansion by 2 phase turbine

- ◆ Power production
- ◆ Temp. is lowered with same pressure drop due to less heat produced by friction

Joule Thompson Valve operates for

- ◆ Start up & shut down of the expander
- ◆ Turbo expander trip
- ◆ Flow rate exceeds the turbine capacity
- ◆ Propane refrigeration
- ◆ Ethylene/ Propylene/ LNG production
- ◆ Air separation
- ◆ Oxygen plant
- ◆ Gas liquefaction
- ◆ Mixed hydrocarbon refrigeration
- ◆ Ammonia plant
- ◆ Gas cleaning
- ◆ High density polyethylene production
- ◆ Urea plants



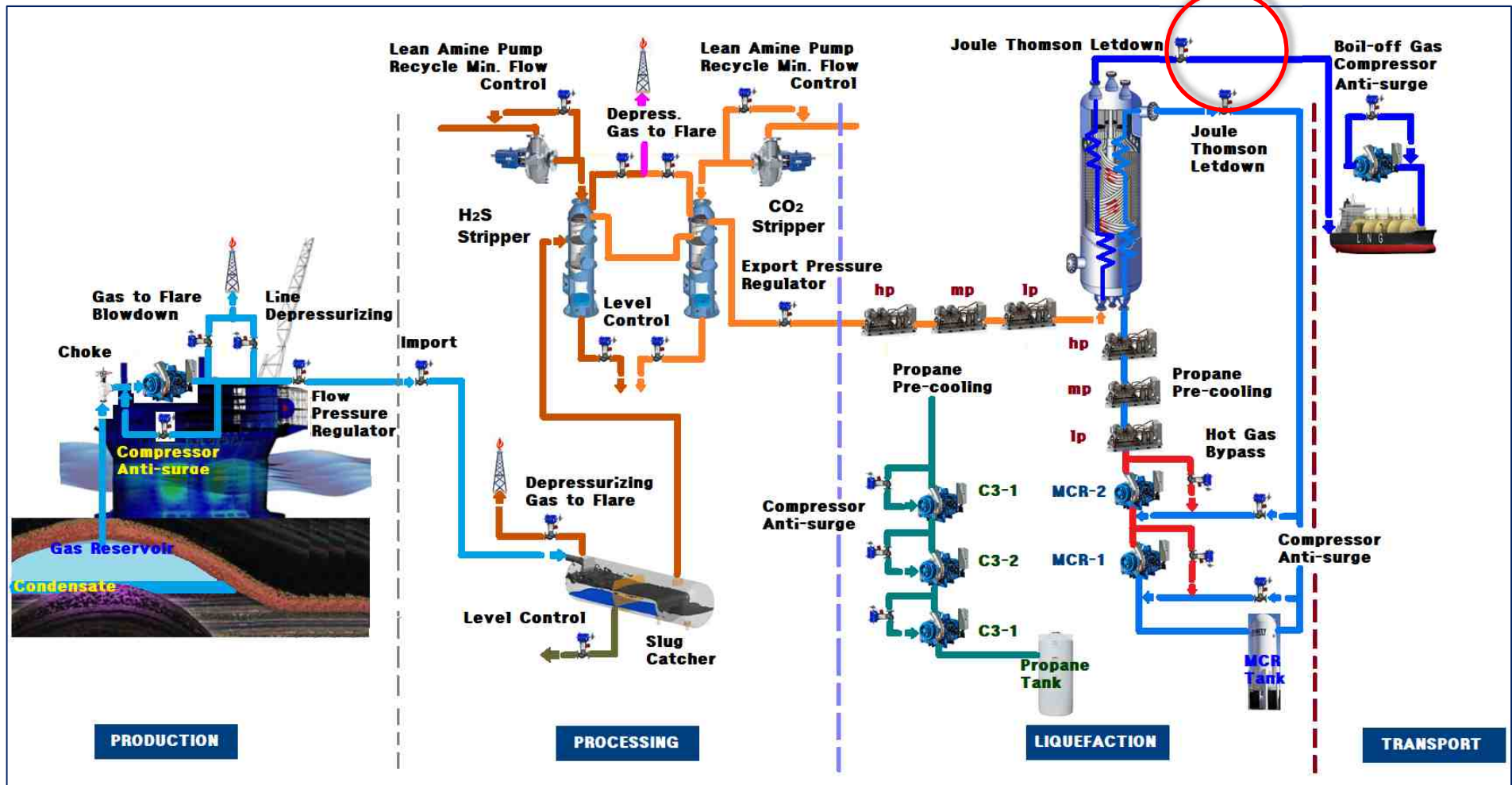
Turbo expander는 2상(狀)의 유체를 팽창시키며 2가지 효과를 본다.

Compressor를 구동시키는 역할과 가스를 냉각시키는 효과를 만들어 낸다.

여기서 J-T 밸브는 Turbo Expander의 초기 운전, shut-down, trip, 유량이 통과할 시, Turbo expander의 bypass 역할을 하며 이 경우에서의 밸브 사이징은 유량을 Turbo Expander 운전 유량의 50% capacity margin을 고려해서 정해야 한다.

LNG plant에서의 액화 과정에서는 필히 J-T 밸브를 적용해야 원하는 온도로 유체를 냉각시킬 수 있다.

J-T Valve applicable for?



J-T 밸브는 위에서 보는 것과 같이 초저온 system에 주로 많이 적용해서 유체의 초저온을 달성한다.

Typical Requirements

- ◆ Special material selection - Cryogenic temperature
- ◆ Short stroke speed (to open) – Protect the expander
- ◆ Tight shut off – Avoid leakage
- ◆ Valve – Same capacity as expander to guarantee seamless transition between expander and valve operation

Problems

- ◆ Noise
- ◆ Vibration
- ◆ Clogging due to hydrates formation
- ◆ Leakage through the packing due at cryogenic temperature
- ◆ Thermal binding

자주 발생하는 문제점은 압력 강하가 크기 때문에 그 운동 에너지로 인해 소음, 진동이 발생하고 그 기체에서의 hydrate line 온도 이하로 떨어질 경우 수분이 형성, 결빙으로 trim의 path가 막히게 된다.

초저온에서 Packing 선정 또한 leak 문제가 제기된다.

LNG의 경우 초저온인 -160°C까지 온도를 낮추어야 한다. Process 조건에서 원하는 온도로 낮출 수 있어야 한다.

온도를 초저온으로 내리기 위해서 압력 강하가 많이 일어난다.

J-T 밸브의 전형적인 요구 사항은

1. 초저온에서의 재질 선정으로 통상 St. Steel(304, 316), Monel, Aluminum을 사용한다.
2. Expander trip을 방지하기 위해서 밸브 quick open이 요구된다.
3. 초저온 액화 가스가 leak되면 밸브 stem부위에 얼음이 형성되어 Positioner까지 그 영향을 미칠 수 있고, stem과 bonnet이 얼어붙어 밸브의 개폐 작동이 안될 수 있다.
4. J-T 밸브는 expander와 같은 용량으로 사이징을 해 원활한 작동이 되도록 해야 한다.

Typical Process Condition

- ◆ Inlet pressure : 48.3 – 103.4 bar
- ◆ Outlet pressure : 13.8 – 48.3 bar
- ◆ Cryogenic service : Temperature down to -160°C

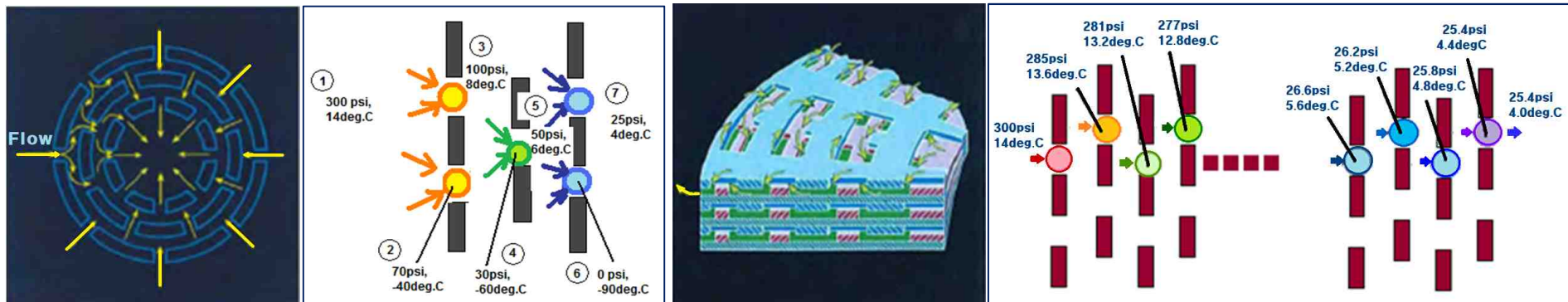
Key Factors for valve selection

The customized trim design is required based on specific requirements. Manufacturer shall provide a complete solution to :

- ◆ Noise
- ◆ Vibration
- ◆ Leakage
- ◆ Clogging

밸브 선정은 소음 및 진동, 누설, 막힘을 고려해서 trim을 맞춤 설계로 해야 한다.

Multi-stage, Multi-path Design



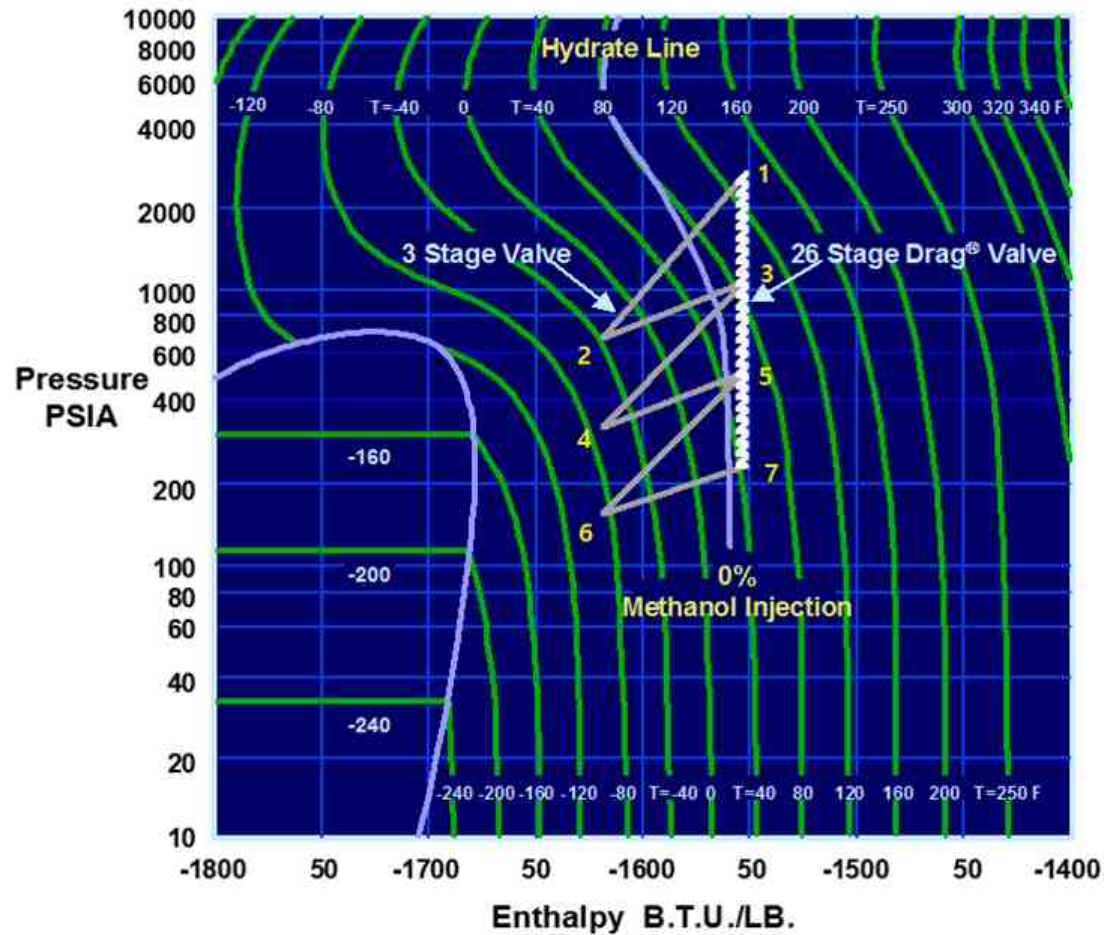
4 stages Cage Trim

26 stages MLT Trim

Severe Service 밸브 업체에서는 이러한 현상을 방지하기 위해 Multi-stage/Multi-path인 26 stage design으로 밸브를 설계해 압력을 아주 서서히 강하시켜 hydrate이 형성이 되지 않도록 한다.

즉, 유체의 속도를 control 해서 운동 에너지를 각 stage에서 흡수해 줌으로써 Noise, Vibration를 일으키지 않도록 해 준다.

Pressure-Enthalpy Diagram (Methane)



Multi-stage/Multi-path Trim Control Valve

유체가 한 system에서 다른 system으로 이동을 하기 위해서는 열 에너지를 운동 에너지로 전환을 해야 하는 데, 이때 Joule Thomson 효과로 엔탈피 및 온도가 떨어지고 다른 system에 도달했을 때는 열역학 제 1 법칙에 의해 등 엔탈피가 된다.

3 stage trim을 적용해서 온도를 떨어뜨릴 경우 각 stage 별로 압력 강하가 크기 때문에 유체 온도는 hydrate 곡선 아래까지 떨어지며 이때 hydrate이 형성이 되고 결빙 온도 이하에서 결빙되어 trim의 path를 막아 버리게 되는 현상이 일어난다 (Clogging).