

천연가스 고체화 수송을 위한 가스 하이드레이트 생성촉진에 대한 실험적 연구

김남진*

Experimental Investigation on the Enhancement of Gas Hydrate Formation for the Solid Transportation of Natural Gas

Namjin Kim

Abstract 1m³ solid hydrate contains up to 200m³ of natural gas, depending on pressure and temperature. Such large volume of natural gas hydrate can be utilized to store and transport large quantity of natural gas in a stable condition. So, in the present investigation, experiments carried out for the formation of natural gas hydrate governed by pressure, temperature, and gas compositions, etc.. The results show that the equilibrium pressure of structure II (natural gas hydrate) is approximately 65% lower and the solubility is approximately three times higher than structure I (methane hydrate). Also, the subcooling conditions of the structure I and II must be above 9K and 11K in order to form hydrate rapidly regardless of gas components, but the pressure increase is more advantageous than the temperature decrease in order to increase the gas consumption. And utilizing nozzles for spraying water in the form of droplets into the natural gas dramatically reduces the hydrate formation time and increases its solubility at the same time.

Key words Natural gas(천연가스), Solid transportation(고체수송), Subcooling(과냉도), Nucleation(핵생성), Induction time(유도시간), Water injection(물분사)

* 제주대학교 에너지공학과

□E-mail : jnkim@cheju.ac.kr

□Tel : (064)754-3643

□Fax : (064)757-9276

1. 서론

전 세계 에너지 수요의 87%를 차지하고 있는 화석연료의 경우 이들이 연소할 때 발생하는 온실가스가 지구온난화현상을 유발시키고 이로 인하여 지구 전역에 걸쳐 발생하는 이상기온 현상의 주원인으로 밝혀지면서 1997년 12월 교토에서 선진 38 개국이 이산화탄소, 메탄 등과 같은 온실가스의 배출량을 2008년부터 5년동안 90년 대비 평균 5.2% 감축하기로 하였

다. 특히 우리나라의 경우 1996년 이산화탄소 배출량이 1억 1,130만 톤으로 세계 10위권에 진입한 이후 꾸준히 증가하여 2001-2010년까지 약 3.3%, 2011-2020년 동안 약 2.3%의 연평균 증가율을 전망하고 있기 때문에 대기 중 이산화탄소의 농도를 낮추기 위한 대책이 필요하다. 따라서 에너지의 생산량을 감소시키지 않고 이산화탄소의 배출을 억제할 수 있는 가장 유력한 방법은 천연가스의 사용을 확대하는 것이다. 왜냐하면 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석연료를 연소시켰을 때 얻을 수

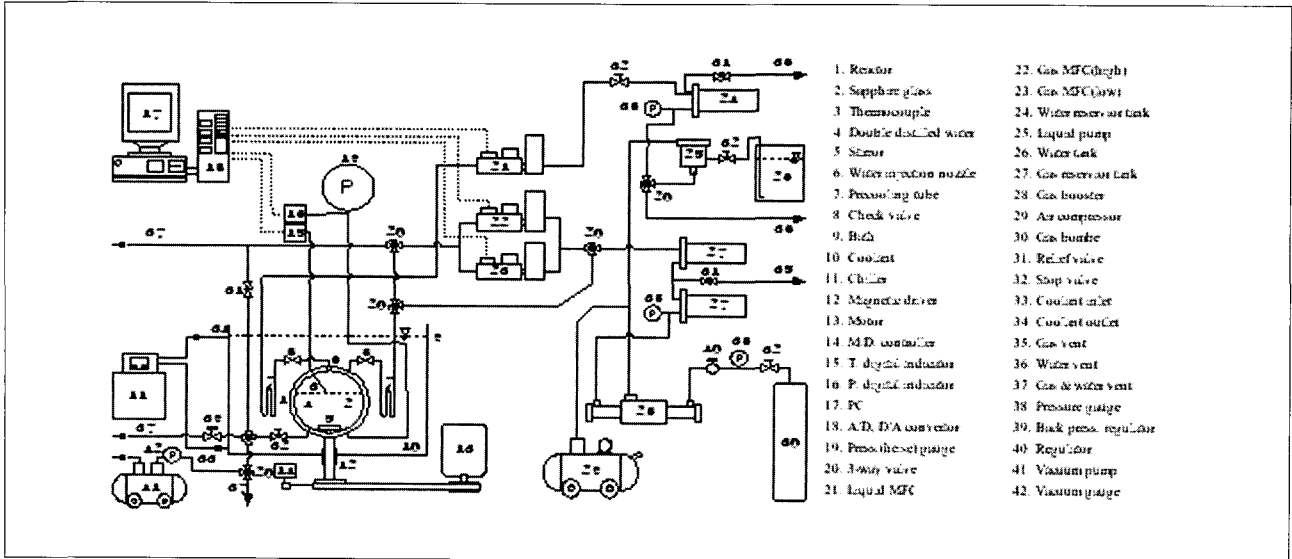


Fig. 2 Schematic diagram of the apparatus

있는 단위 열량(1kcal)당 탄소 방출량은 각각 0.09, 0.086, 0.056g으로, 연소시 가장 적은 양의 이산화탄소를 방출하여 지구환경 변화에 적합한 청정에너지원으로 평가를 받고 있기 때문이다. 따라서 석유와 석탄 대신 천연가스를 사용할 경우 에너지 효율이 일정하다고 가정하면 탄소 방출량을 각각 66%, 57%까지 저감시킬 수 있다. 이와 같은 이유로 해서 국내 천연가스의 수급은 2000년도 13,806천 톤, 2005년도 18,300천 톤, 2010년도에는 20,970천 톤으로 계속 증가시킬 계획이다²⁾. 그러나 BP 보고서에 따르면 석유와 천연가스의 가채년수는 40.6년과 65.1년으로 확인되어 21세기 중반까지 밖에 사용될 수 없기 때문에, 석유와 천연가스를 대체할 수 있는 새로운 에너지원에 대한 관심이 높다고 하겠다³⁾.

천연가스를 대체하며 21세기 신 에너지원으로 기대되고 있는 천연가스 하이드레이트가 주목을 받게 된 것은 1930년대 시베리아의 화학 플랜트에서 고압의 천연가스 수송용 파이프라인이 막히는 사고가 빈번하게 발생하여 그 원인을 조사한 결과, 파이프 내에서 가스와 물이 결합하여 하이드레이트를 형성하고, 그것이 파이프의 내벽에 부착되어 파이프를 막는 것으로 밝혀지면서 주목을 받게 되었다. 천연가스 하이드레이트는 95% 이상이 메탄으로 구성되어 있는 가장 일반적인 가스 하이드레이트의 일종이다. 가스 하이드레이트란 특정한 온도와 압력조건하에서 물분자로 이루어진 공동내로 가스가 들어가 물분자와 서로 물리적인 결합으로 형성된 Fig. 1과 같이 외관상 얼음과 비슷한 고체 포유물이다.

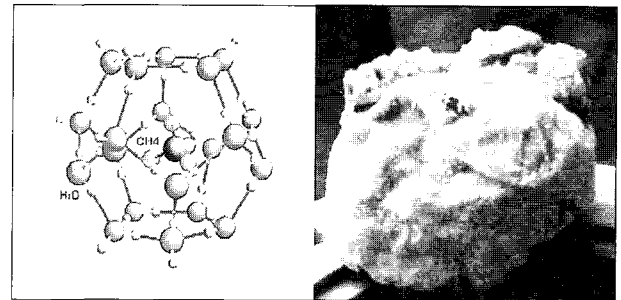


Fig. 1 Natural gas hydrate

가스 하이드레이트의 일종인 천연가스 하이드레이트는 태평양과 대서양의 대륙사면 및 대륙붕, 남극대륙의 주변해역 등지에서 자연적으로 발생한 천연가스 하이드레이트의 분포가 확인되었으며, 그 매장량은 1조 탄소톤 이상으로, 화석연료의 매장량이 5천억 탄소톤, 대기중의 메탄가스가 3억 6천만 탄소톤임을 고려할 때 화석연료의 2배에 이르는 막대한 양으로, 기존의 화석에너지를 대체할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한, 순수 메탄 하이드레이트의 경우 46개의 물분자에 8개의 메탄가스 분자가 포획된 구조로, 그 분자식은 $CH_4 \cdot 5.75H_2O$ 이다. 따라서 메탄가스와 물의 이론적 용량비가 216:1로써, 표준 상태에서 $1m^3$ 의 메탄 하이드레이트는 $172m^3$ 의 메탄가스와 $0.8m^3$ 의 물로 분해된다. 만약 이와 같은 특징을 역으로 이용할 경우 Fig. 1와 같이 천연가스를 인공적으로 하이드레이트를 제조할 수 있기 때문에 천연가스 수송 및 저장의 수단으로써 그 중요성이 커지고 있으며, 하이드레이트로 만들어 고체화 수송을 할 경우 액화수송보다 24%의 비용절감이 이루어진다고 보

고하였다⁴⁾.

따라서 천연가스 하이드레이트의 상업적인 생산을 개시할 때 고체상태로 존재하는 하이드레이트를 분해시켜 발생하는 천연가스와 기존의 천연가스를 액화방법대신에 경제적으로 유리한 하이드레이트를 이용하여 천연가스를 수송하고 저장하는 기술을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다. 그러나 천연가스 하이드레이트를 인공적으로 만들 경우 물과 가스의 반응율이 낮아 하이드레이트 생성시간이 길고, 가스 충전율도 낮다. 그래서 하이드레이트를 빨리 만들며 가스 충전율도 증가시킬 수 있는 방법으로 가스에 물을 분무하거나, 교반기를 이용하여 가스와 물의 접촉면적을 높여주는 방법이 제시되고 있지만⁵⁾, 아직 그 효과를 입증하지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 자체 제작한 고압용 분사노즐을 이용하여 천연가스의 주성분인 메탄가스와 물이 반응할 때 그 효과를 입증하고, 하이드레이트를 빨리 생성시킬 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 실험장치

Fig. 2는 본 연구를 위해서 제작된 실험장치의 개략도이다. 600 ml의 반응기(1)와 1.5l 의 보조탱크 3개(24, 27)는 SUS316을 사용하여 30MPa의 고압과 부식 등에 대비할 수 있도록 제작되었다. 또한 반응기가 고압에서 작동하는 점을 고려하여 유입되는 가스와 물의 역류를 방지하기 위해서 반응기에 연결된 튜브의 후단에 체크밸브(8)를 설치하였으며, 가시화를 위해서 반응기의 전·후면에 직경 80mm의 사파이어 글라스(2)를 부착하였다. 그리고 반응기 내로 들어오는 메탄가스와 물은 열전달이 충분히 이루어지도록 튜브(7)의 길이를 2m이상 확보하였다. MFC (Bronk-horst Hi-tech Co.)의 경우, 가스 고유량용(22, 0-60l /min)과 저유량용(23, 0-1500ml/ min), 액체용(21, 0-1000g/hr)으로 설치하였으며, 실험압력의 97-98%까지는 가스 고유량용 MFC (22)로 나머지 2-3%는 가스 저유량용 MFC(23)를 작동시킴으로써 고유량이 유입되어 발생될 수 있는 초과압력을 줄여 실험의 정밀도를 높일 수 있도록 설계되었다. 압력측정의 경우 오차범위 0.25% 미만의 Heise 압력계(19, 0-350kgf/cm², Heise Co.)와 디지털 지시계(16, Sensys Co., M/N: SC100)를 사용하였고, 온도측정의 경우 1/32 인치 T-타입 열전대(3, OMEGA Co.)와 디지털 지시계(15, Yokogawa Co., M/N:UM330E)를 사용하였다. 또한 반응물질로

는 이차 증류수와 99.99 %의 메탄가스(30, Quadren Cryogenic Co., 47l)를 사용하였다. 그리고 매 10초단위로 압력, 온도, 유량 등의 데이터를 읽어 PC(17)에 저장하도록 하였다. 그리고 반응물 질로는 이차증류수와 99.99 % 메탄가스(Quadren Cryogenic Co., 47L) 그리고 국내로 가장 많은 양이 수입되는 인도네시아산 천연가스(Rigas Co., 47L)를 사용하였으며 그 조성은 Table 1과 같다.

Table 1 Compositions of natural gas

	Certified concentration	Uncertainty
	(mol/mol)	
Methane	90.8784%	
Ethane	5.63%	± 2%
Propane	2.52%	± 2%
iso-Butane	0.493%	± 2%
n-Butane	0.447%	± 2%
iso-Pentane	102PPM	± 3%
Nitrogen	214PPM	± 3%

3. 실험방법 및 결과

모든 실험의 일관성을 위해서 같은 시간동안 진공펌프(4)를 이용하여 반응기 내의 잔류가스를 제거하였다. 또한, 증류수는 액상 펌프(25)를 이용하여 보조탱크(24)에 19MPa로 가압시켜 실험종류에 따라서 300-500ml를 넣어준 후 반응기의 온도가 실험온도에 도달할 때까지 방치하였다.

3.1 하이드레이트 구조 결정

천연가스는 혼합가스이기 때문에 하이드레이트로 만들 경우 그 조성에 따라 구조가 달라진다. 따라서 본 연구에서 Colorado School of mines에서 제공하는 프로그램인 CSMHYD[®]를 사용하여 천연가스 하이드레이트의 구조를 조사하여 Table 2에 정리하였다.

천연가스 내에 에탄이 10% 이상일 경우 구조 I 을 형성하지만 구조 II의 성질을 지니고, 노말부탄은 0.108% 이상이면 구조 II를 형성하지만 구조 I의 특성을 가지고 있다. 또한 프로판과 이소부탄은 각각 0.0146%, 0.01% 이상이면 구조 II, 이소펜탄은 0.866% 이상이면 구조 H를 형성한다. 그외에 노말펜탄은 어떠한

Table 2 Hydrate crystal structure according to composition ratios based on methane gas

Compositions	Ratios(%)	Structure
Ethane	≥10	I (II*)
Propane	≥0.0146	II
iso-Butane	≥0.01	II
n-Butane	≥0.108	II (I*)
iso-Pentane	≥0.866	H
n-Pentane	>0	No formation
Nitrogen	>0	I or II
Carbon dioxide	>0	I

*Apparent character

조건에서도 하이드레이트가 형성되지 않기 때문에 구조에는 영향을 미치지 못하고, 질소는 형성조건에 따라 구조 I 과 II 를 형성하지만, 이산화탄소는 조성비에 관계없이 구조 I 만을 형성한다. 그러나 혼합가스로 하이드레이트를 만들 경우 분자량이 큰 가스의 구조에 지배를 받는다. 따라서 본 연구에서 사용하는 반응물질인 메탄가스는 구조 I, 국내로 수입되는 천연가스는 이소펜탄의 분자량이 가장 크지만 0.05% 이하이기 때문에 구조 II 에 해당한다.

3.2 평형점 측정실험

하이드레이트는 일반적으로 고압·저온의 조건에서 안정한 상태를 유지하며, 이러한 안정영역을 벗어나게 되면 쉽게 물과 가스로 분해되는 특징이 있다. 따라서 하이드레이트 형성과 분

해를 시각적으로 확인할 수 있기 때문에 제작된 실험장치의 특성을 고려하여 상평형 실험을 수행하게 되는데, 대표적인 방법으로는 Fig.3과 같이 등온실험과 등압실험을 들 수 있다. 즉, 임의의 온도 B(T_{equ})에서 하이드레이트가 형성될 수 있는 압력 D(P_{equ})보다 높은 압력 A(P_{exp})로 하이드레이트를 형성시킨 후 과정 A→B와 같이 온도를 일정하게 유지하면서 압력을 서서히 감소시키는 등온실험과 과정 A→C와 같이 압력을 일정하게 유지하면서 온도를 서서히 상승시키는 등압실험이 있다.⁽⁷⁾ 본 실험에서는 압력을 일정하게 유지시켜 주는 방법이 용이했으며 또한 하이드레이트가 분해되는 모습을 시각적으로 명확히 관찰할 수 있었기 때문에 등압실험을 수행하였다.

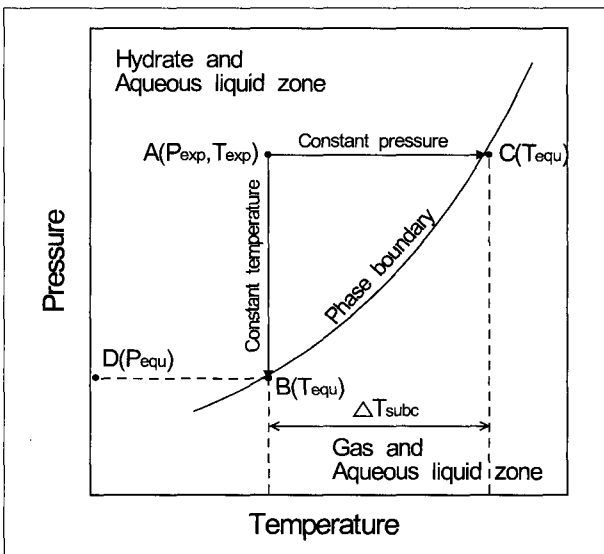
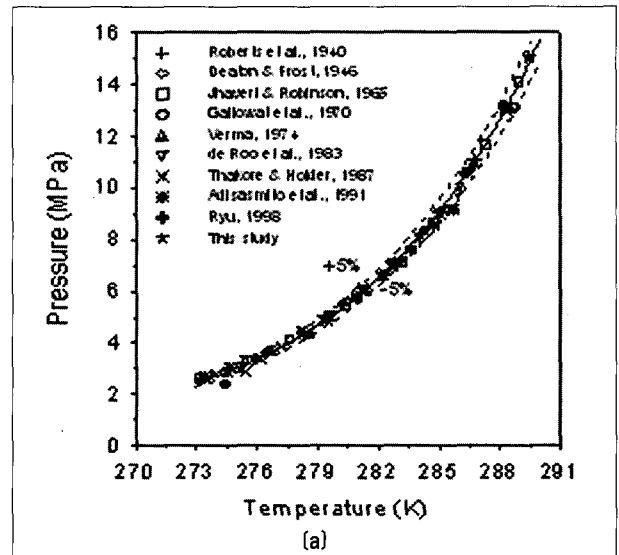


Fig. 3 Experimental method

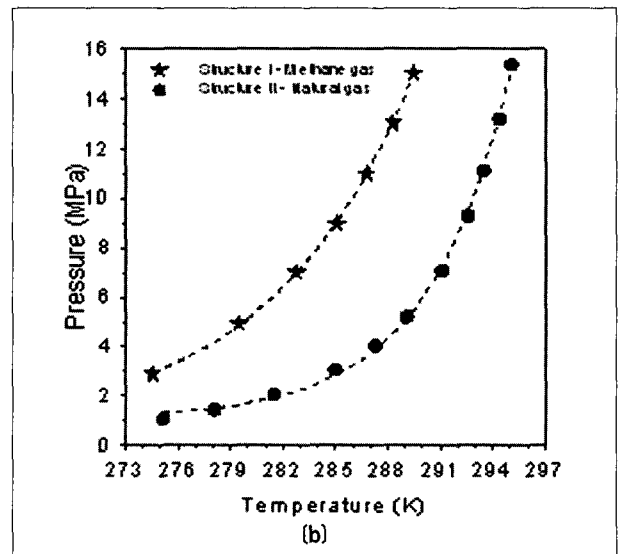


Fig. 4 Equilibrium points of structure I and structure II

액상펌프를 이용하여 반응기 내로 300mL의 증류수를 주입하고, 274.15K까지 냉각시킨 후 보조탱크에서 19MPa의 고압 상태로 준비된 실험용 가스를 1-15MPa까지 실험종류별로 각각 주입하여 일정시간 동안 하이드레이트가 충분히 성장하도록 실험조건(A)을 유지하였다. 하이드레이트가 충분히 성장한 후 항온수조를 이용하여 2시간당 0.1K의 온도상승률로 반응기의 온도를 상승시켰다(과정 A→C). 이때 하이드레이트 분해로 인한 압력상승은 3방향 밸브(20)의 조작과 MFC를 통하여 반응기 내의 가스를 배출(37)시킴으로써 정압을 유지하였다. 이와 같은 방법으로 하이드레이트의 용해가 일어나는 온도까지 실험을 수행한 후 그 온도를 측정하여 Fig.4에 표시하였다.

Fig.4(a)에서 볼 수 있듯이 기존의 실험결과⁶⁾와 본 연구에서 수행한 구조 I의 평형점과 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 실험장치와 실험방법이 타당함을 알 수 있었으며, 구조 II에 대한 평형점은 Fig.4(b)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일온도 조건에서 구조 II가 구조 I보다 하이드레이트 생성 압력이 약 65% 낮으며, 동일압력 조건 하에서도 상대적으로 높은 온도에서 하이드레이트가 생성된다. 따라서 구조 I 보다는 구조 II를 만드는 공정이 경제적으로 유리하다는 것을 알 수 있다. 본 실험의 결과로 얻어진 평형온도와 압력에 대한 관계는 식(1)과 같고, 그 계수는 Table 3에 표시하였다.

$$P_{equil} = a + b \times e^{cT_{equil}} \quad (1)$$

Table 3 Constants for pressure in MPa and temperature in K

	Structure I	Structure II
a	5.384E-01	1.111E-00
b	1.023E-14	3.303E-26
c	1.205E-01	2.078E-01

3.3 핵생성시간 측정실험

Fig.3에서 하이드레이트 생성시 실험온도 A (T_{exp})의 평형압력 $D(P_{equ})$ 보다 높은 압력 $A(P_{exp})$ 를 가해 주거나, 실험압력 $A(P_{exp})$ 의 평형온도 C (T_{equ})보다 낮은 온도 A(T_{exp})를 만들어 주면 그 생성이 가속화되는데 이때 온도 A(T_{exp})와 C(T_{equ})의 차를 과냉도(ΔT_{subc})라고 한다.

반응기에 증류수를 300mL 주입하고, 실험온도 A(T_{exp})로 냉각시킨 후 실험압력 A(P_{exp})까지 각각 실험용 가스를 주입하

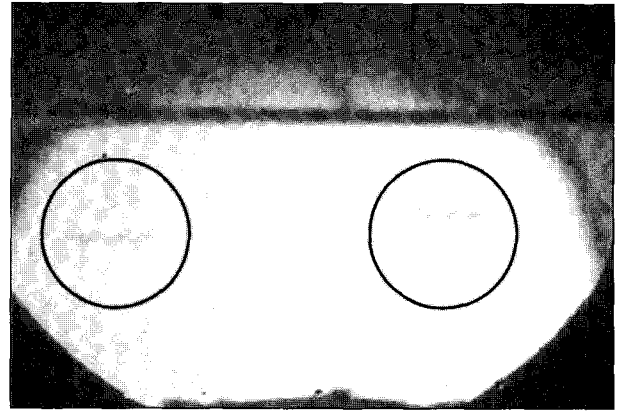


Fig. 4 Photograph of nucleation

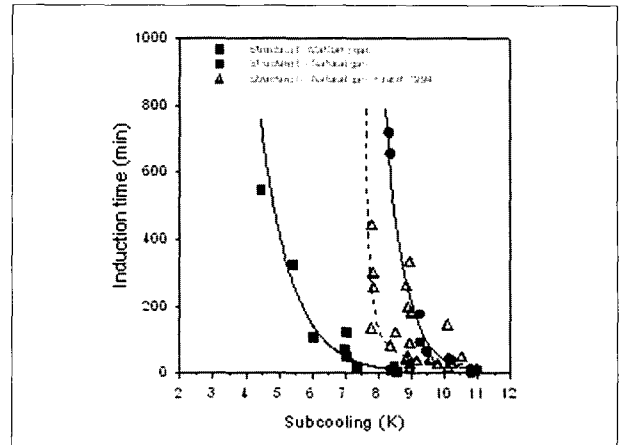


Fig. 5 Induction time of hydrate nucleation

였다. 실험압력 A(P_{exp})에 도달한 후 Fig.4의 원안에 표시한 것과 같은 하이드레이트 핵이 최초 생성되는 시간을 24시간 동안 관찰하여 Fig.5에 표시하였다.

Fig.5에 나타냈듯이 과냉도가 작을수록, 즉 평형점과 가까울수록 하이드레이트가 생성되는 시간은 길어지며, 과냉도가 커질수록 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한 동일한 과냉도 조건에서는 구조 I이 구조 II보다 하이드레이트를 빨리 생성시킬 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 동일한 구조 II에서 Yousif⁶⁾의 결과와 차이를 보이고 있는데 이는 실험가스의 성분과 조성비의 차이 때문이다. 그러나 구조 II에서는 하이드레이트를 빨리 만들기 위해서 가스의 성분과 조성비에 관계없이 11K, 구조 I은 9K 이상의 과냉도 조건을 설정하면 실험압력까지 가압하는 도중에 하이드레이트가 생성되므로 하이드레이트를 빨리 생성시킬 수 있음을 알 수 있다. 본 결과로부터 얻은 핵생성시간을 예측할 수 있는 식은 다음과 같고, 그 계수는 Table 4에 표시하였다.

$$\ln(\text{time}) = a \times \Delta T_{\text{subc}} + b \quad (2)$$

Table 4 Constants for induction time in minute

	Structure I	Structure II
a	-1,046	-1,654
b	11,273	20,238

3.4 과냉도에 따른 가스소모량 측정

반응기에 증류수를 300mL 주입하고, 274.15K까지 냉각시킨 후 실험가스를 실험압력까지 주입하였다. 실험은 24시간 동안 수행되었으며, 실험 종결시까지 정온을 유지하여 주었다. 실험가스와 증류수가 반응하여 하이드레이트로 성장하면서 소모되는 가스는 가스용 MFC를 이용하여 보충해 줌으로써 정압을 유지하도록 하였다. 그리고 실험압력에 도달한 이후부터 실험이 종결될 때까지의 온도와 압력을 평균하여 하이드레이트 변환량과 함께 Fig.6에 나타내었다.

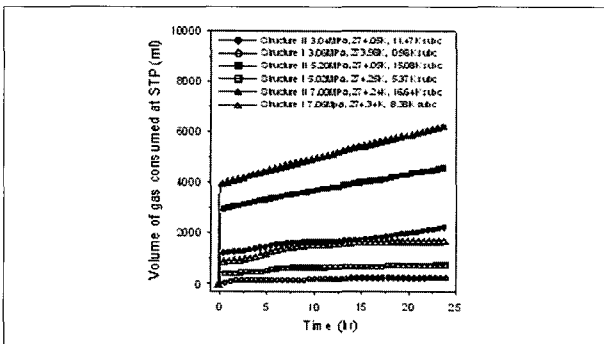


Fig. 6 Gas consumption volume for variable degrees of subcooling

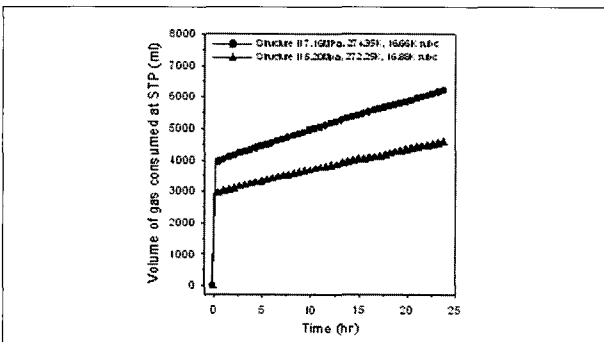


Fig. 7 Gas consumption volume at the same subcooling below the freezing point

3.3 전체 표면 유용성

Fig.6에 나타나듯이 동일한 온도에서 압력이 높아지면 과냉도가 커지기 때문에 하이드레이트 변환량이 증가하는 경향을 관찰할 수 있다. 또한 동일한 압력에서 구조 II가 구조 I보다 3배 이상의 가스 포집량을 보이고 있다. 이는 구조 II의 과냉도가 구조 I보다 크고, 공극수가 구조 I보다 구조 II가 많아 가스가 포집될 수 있는 공간이 넓기 때문이다. 또한 동일한 과냉도 조건에서 빙점 이상과 이하의 온도에서 하이드레이트 변환량을 측정된 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 빙점 이상의 온도에서 좀더 많은 하이드레이트 변환량이 측정되었다. 이는 메탄가스가 무극성 기체로 무극성 기체나 극성이 매우 작은 기체의 용해도는 압력에 비례하게 된다는 헨리의 법칙과도 일치한다. 따라서 하이드레이트 변환량을 증진시키기 위해서는 온도를 낮추는 것보다 압력을 높이는 방법이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

3.5 물분사에 따른 가스소모량 측정

3.4절의 실험은 반응기 내에 증류수를 주입한 후 가스를 분사하는 방법으로 이는 가스와 증류수의 접촉면적이 작다. 따라서 본 실험은 반응기 내에 먼저 실험용 가스를 주입한 후 증류수를 분사시켜 접촉면적을 넓게하여 하이드레이트 변환량을 증가시키고자 수행한 실험이다.

Fig.8과 같이 과냉도변화에 따른 하이드레이트 변환량 측정 실험에서 24시간 동안 소모된 가스 총량을 진공상태인 반응기 내에 주입한 후(A-A'), 274.15K로 냉각하였다(A'-B). 이후 노

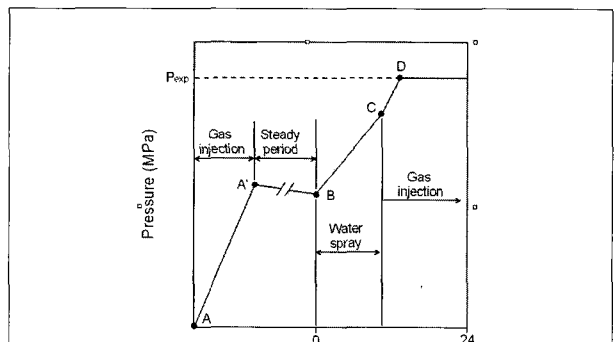


Fig. 8 Water spray test method

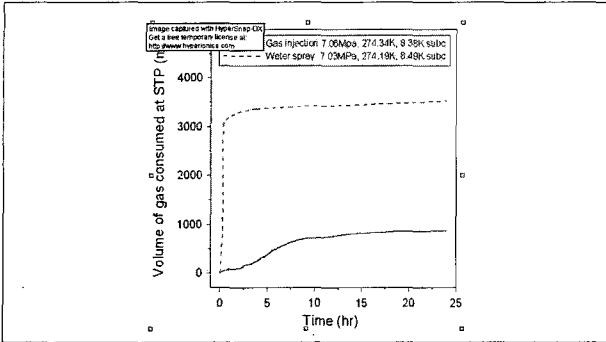


Fig. 9 Volume of methane gas consumed by water spray at 7.03MPa and 274.19K

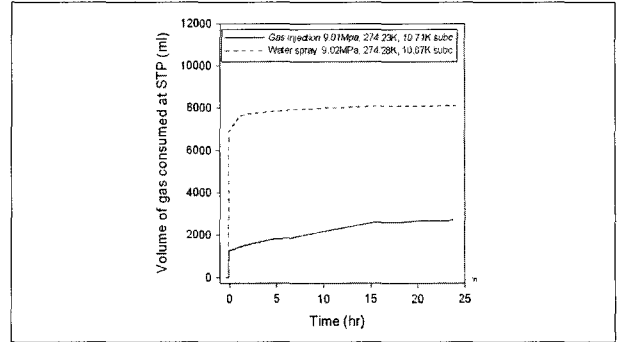


Fig. 11 Volume of methane gas consumed by water spray at 9.02MPa and 274.28K

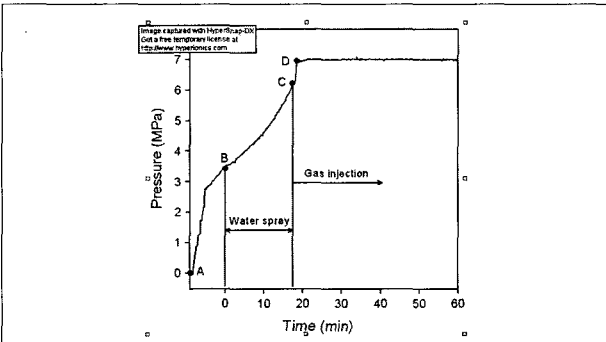


Fig. 10 Pressure change by water spray at 7.03MPa and 274.19K

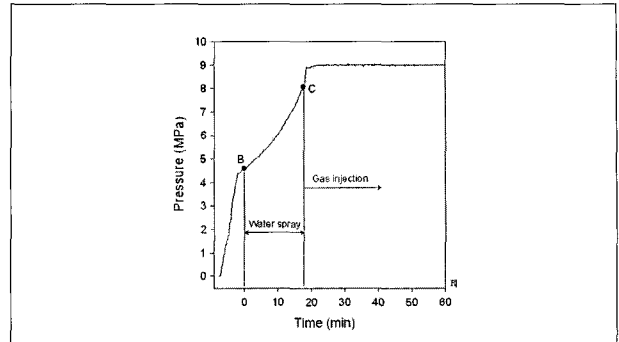


Fig. 12 Pressure change by water spray at 9.02MPa and 274.28K

즐을 이용하여 증류수를 시간당 1000mL로 약 17분 동안 300mL를 액적지름 약 5μ로 분사하였다(B-C). 증류수 분사가 끝나면 실험가스를 주입하여 정압을 유지하였으며(D), 하이드레이트로 성장하면서 소모되는 가스는 MFC를 이용하여 보충해 줌으로써 정압조건이 유지되도록 하였다. 결과적으로 24시간 동안 소모된 가스량을 Fig. 9에, 압력변화는 Fig.10에 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 노즐을 이용하여 증류수를 분사할 경우 메탄가스와 증류수간의 접촉면적을 크게 만들기 때문에 메탄 하이드레이트의 생성이 빨라지고 더불어 Fig. 9에 나타내었듯이 가스 소모량도 급격히 증가하여 과냉도에 따른 메탄가스 소모량보다 약 4배의 증가를 보였으며, 과냉도 실험에서 24시간 동안 소모된 동일한 가스량으로 하이드레이트를 만들 경우 증류수 분사방법을 이용하면 그 시간도 급격히 줄일 수 있고, Fig. 10에서 볼 수 있듯이 최고압력(C)도 약 10% 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 실험압력에 도달한 이후부터는 더 이상 메탄가스 소모량이 증가하지 않고 있는데, 이는 가스 와 증류수의 접촉면적이 작아 반응이 늦기 때문이다. 따라서 가스 소모량을 계속적으로 증가시키기 위해서는 하이드레이트

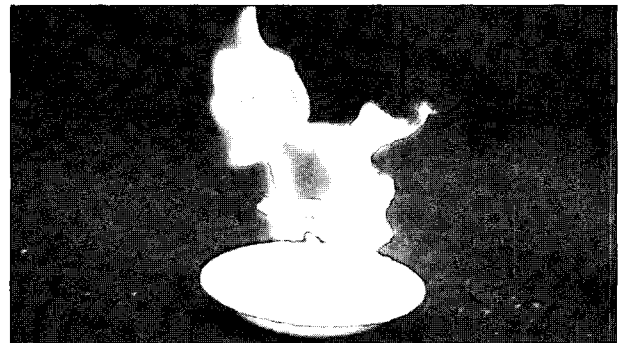


Fig. 13 Combustion of methane hydrate

로 생성되지 못한 반응기 내의 증류수를 추출하여 다시 분사할 수 있는 시스템이 필요하다고 하겠다. 또한 3.3절에서 언급했듯이 증류수 분사전 반응기의 과냉도가 9K 이상일 때 증류수를 분사할 경우 분사노즐 끝단에서 하이드레이트가 생성되어 노즐구멍이 막힐 수 있다는 것을 확인하였다. 따라서 메탄 하이드레이트를 생성시킬 경우 과냉도가 9K 이하에서 분사노즐을 사용해야 될 것으로 사료된다. 그리고 동일한 방법으로 압력 9MPa에서 수행하여 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었으며, 앞에서 설명한 7MPa과 유사한 결과를 얻었다.

3.6 하이드레이트 연소실험

메탄가스와 증류수를 11MPa, 274.15K로 충분히 반응시킨 후 생성된 하이드레이트를 반응기에서 채취하여 점화시킨 결과 Fig. 13와 같이 연소가 잘됨을 볼 수 있었다.

4. 결론

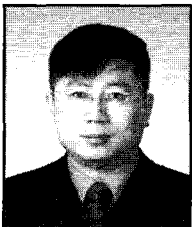
1. 자연상태로 존재하는 천연가스 하이드레이트의 경우 구조 I에 해당하며, 국내로 수입되는 천연가스를 하이드레이트로 만들 경우 구조 II에 해당함을 알았다.
2. 구조 I과 구조 II에 대한 평형점을 측정된 결과 구조 II가 구조 I보다 하이드레이트 생성압력이 약 65% 낮아짐을 알 수 있었다.
3. 동일한 과냉도에서 구조 I이 구조 II보다 하이드레이트가 빨리 형성되었으며, 하이드레이트를 빨리 만들기 위해서는 구조 I과 구조 II의 과냉도를 각각 9K, 11K 이상으로 만들어 줄 필요가 있음을 알았다.
4. 동일한 압력에서 구조 II는 구조 I보다 과냉도가 크고, 하이드레이트를 만드는 공극수도 많기 때문에 3배 이상의 하이드레이트 변환량을 보였다.
5. 천연가스의 주성분인 메탄가스가 무극성 기체로 천연하이드레이트 변환량을 증진시키기 위해서는 온도를 낮추는 것보다 압력을 높이는 방법이 유리하다는 것을 알 수 있었다.

6. 구조 I의 경우 노즐을 사용하여 물을 분사할 경우 과냉도에 의한 결과보다 약 4배의 하이드레이트 변환량을 보였다.

References

- (1) <http://www.kemco.or.kr>
- (2) Matsumoto, R., Aoki, Y., and Okuda, Y., 1994, Methane Hydrate, Nikkei science.
- (3) <http://www.bp.com>
- (4) Gudmundsson, J. S., Andersson, V., and Levik, O. I., 1997, "Gas storage and transport using hydrates," Offshore Mediterranean Conference.
- (5) Okui, T., 1997, Utilization of Methane Hydrate, JIE J., Vol. 76, No. 5, pp. 390-397.
- (6) Sloan, E.D., 1998, Clathrate hydrates of natural gases, Marcel Dekker, Inc., New York, pp.1-318.
- (7) Englezos, P., Kalogerakis, N., Dholabhai, P. D., and Bishnoi, P. R., 1987, Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrate, Chemical Engineering Science, Vol. 42, No. 11, pp. 2647-2658.
- (8) Yousef, M.H., 1994, The kinetics of hydrate formation, SPE 28479, pp.169-177.

김 남 진



1993년 인하대학교 기계공학과 공학사
1995년 인하대학교 기계공학과 공학석사
2003년 인하대학교 기계공학과 공학박사

현재 제주대학교 기계·에너지·시스템공학부 전임강사
(E-mail : jnkim@cheju.ac.kr)