

## 해양플랜트 파이프라인 가열방식에 따른 유동 안정성 실험 연구

손상호\* · 박재범\* · 이정호\*,\*\*†

\* 한국기계연구원 극한기계연구본부, \*\* 과학기술연합대학원대학교 플랜트기계공학과

### Experimental Investigation of Flow Assurance due to Heating Method in Offshore Pipeline

Sangho Sohn\*, Jaebum Park\* and Jungho Lee\*\*,\*\*†

\* Extreme Mechanical Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM)

\*\* Dept. of Plant System and Machinery, Univ. of Science and Technology (UST)

(Received October 7, 2014 ; Revised November 13, 2014 ; Accepted November 20, 2014)

**Key Words:** Flow Assurance(유동안정성), Offshore Pipeline(해양 파이프라인), Internal-Swirled Heater(내부 스월형 히터), External-Traced Heater(외부 가열형 히터)

**초록:** 해양플랜트에서 생산된 석유 또는 가스를 파이프라인을 통해 운반하는 경우, 가스 하이드레이트나 왁스와 같은 고형물이 쉽게 발생하고 이를 방지하기 위한 유동 안정성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 해양플랜트 파이프라인에서 생성된 가스 하이드레이트 또는 왁스를 제거 또는 방지하기 위해 최근 파이프라인 외벽에 히터를 감아 전기적으로 가열하는 방법이 채택되고 있다. 본 연구에서는 파이프라인을 가열하는 기존의 외부 가열형 방식에 비해, 새로운 형식의 내부 스월형 히터를 고안, 설계 및 제작하여 파이프라인 내에 설치하여 유동 안정성을 실험적으로 평가하였다. 고안된 내부 스월형 히터와 기존의 외부 가열형 히터의 파이프라인 출구 단면에서의 온도 분포와 열적 혼합 등의 열 및 유동 성능 평가 결과, 내부 스월형 히터가 외부 가열형 히터에 비해 열적 성능이 보다 우수한 것으로 확인되었다.

**Abstract:** The fact that gas hydrate and/or paraffin wax is frequently plugged in offshore pipeline has become very significant for offshore pipeline flow assurance. An active electrical heating along pipeline has adapted in resolving flow assurance problem like as gas hydrate and wax plugging. This study represents a novel internal-swirled heater which was designed and fabricated for more effective heating and thermal mixing through pipeline. The internal-swirled heater suggested in this study shows higher thermal mixing performances than the conventional external-traced heater.

## 1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 에너지 수요가 증가하고 있고 석유 에너지 가격이 변동함에 따라, 육상 자원을 대신하여 심해자원 개발을 위한 해양플랜트 개발에 관심이 고조되고 있다. 이에 따라 해양플랜트 시장은 2010년 1,400억불에서 2040년 5,000억불로 성장할 것으로 전망하고 있다<sup>(1)</sup>. 해양플랜트는 바다로부터 석유나 가스 등의 자원을 발굴하고 시추하는 장비를 건조 또는 설치 공급하는 고부가가치의 유망한 기술집약적 산업이다. 해양의 석유와 가스를 생산하기 위해서는 수면위의 해양플랜트와 해저의 유정 사이에 심해저 시스템 (Subsea system)이 필요하며, 다양한 기자재가 결합되는 종합 플랜트 기술이다. 특히 채굴된 석유나 가스를 운반하기 위해 해저에 설치된 파이프라인에서는 다상 혼합물 유체를 이송시키

† Corresponding Author, E-mail: jungho@kimm.re.kr, TEL: 042-868-7986

기 위한 높은 수준의 유동안정성을 확보할 수 있는 기술력이 요구된다.<sup>(2)</sup> 오일-가스 산업에서 유동안정성(flow assurance)이란 자원 물질이 채굴되고, 부존지로부터 소비지까지 이송되는 파이프 배관 내 유동의 온도, 유량 및 압력 제어를 통하여 안정적이고 경제적으로 운송할 수 있는 모든 기술을 의미한다. 해양 플랜트의 파이프라인의 유동 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 가스 하이드레이트(hydrate)나 왁스(wax)와 같은 고형물질로 인한 파이프라인의 막힘 현상, 다상유동의 슬러깅 현상으로 인한 배관 기자재의 파손, 파이프라인 내의 큰 압력강하로 인한 유속의 변화, 점도 변화, 열 손실 등이 있다. 따라서, 최근 오일-가스 산업계는 유동안정성이 확보된 해저 파이프라인 설비의 설계와 기술 개발에 매년 수 십억 달러 수준의 투자와 더불어 다상유동 유동안정성에 다양한 연구개발을 진행해 오고 있다.<sup>(3-8)</sup> 최근 2012년 미국 텍사스주 휴스턴에서 개최된 OTC2012에서 파이프라인의 외벽을 전기히터로 둘러싸서 감고 전기적으로 가열하는 방법을 세계에서 처음으로 심해플랜트에 적용하기도 했다.<sup>(6)</sup> 하지만, 외벽을 단순히 전기히터로 감아서 가열하는 기존의 외부 가열형 히터는 파이프라인의 두께 방향으로 균일하게 가열하기 어렵고 파이프라인 벽면과 중심부의 온도 차가 발생하는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 외부 가열형 히터의 문제점을 극복할 수 있도록 내부 스월형 인라인히터 기술<sup>(9)</sup>을 개발하였고, 동일한 배관 크기에서 기존의 외부 가열형 히터와 내부 스월형 히터가 동일한 열용량이 공급되는 경우에 각 히터 방식이 열 및 유동 안정성 특성에 관한 연구를 실험적으로 수행하였다.

## 2. 내부 스월형 히터

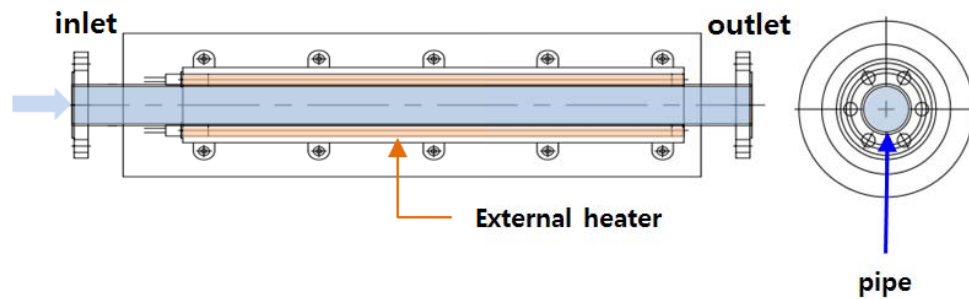
최근 해저 파이프라인에서 유동안정성을 확보하기 위한 가열방식은 배관 외부를 히터로 감아서 가열하는 형태에 집중되어왔다. 하지만, 파이프라인 외벽에 단순히 히터를 설치하여 외벽과 파이프라인의 중심선과의 온도 편차가 발생하여 파이프라인의 반경 방향으로의 열적 혼합 특성이 떨어지는 단점을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 기존의 문제점을 해결하기 위하여 파이프라인의 반경 방향 위치에 상관없이 거의 일정한 온도로 균일하게 가열할 수 있는 내부 스월형 인라인 히터를 Fig. 1과 같이 개발하였다<sup>(6)</sup>. 내부 스월형 히터는 파이프라인으로 흐르는 작동유체가 나선형의 스월을 따라 흐르면서 가열되기 때문에, 파이프라인의 반경 방향의 열전달 효율과 온도 균일성이 향상될 수 있다.

기존 해양플랜트에서 사용하는 방식인 외부 가열형 히터와 본 연구에서 개발된 내부 스월형 히터의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 히터방식에 따른 상호간의 열성능 비교검토를 위하여 두 가지 히터를 모두 제작하였다. 외부 가열형 히터는 Fig. 1의 (a)와 같이 2인치 직경크기의 파이프 외부를 히터로 감싸서 가열하는 방식이며, 외부 열손실을 최소화하기 위하여 최종적으로 히터를 절연재로 둘러싸는 형태이다. 이에 반하여, 내부 스월형 히터는 Fig. 1의 (b)와 같이 파이프 중앙의 위치에 카트리지 형식의 인라인 히터로 설치되었고, 유동방향으로 유동 회전효과를 주기위하여 스월날개가 나선과 유사하게 일정한 피치 간격으로 일체형으로 제작되었다. 내부 스월형 히터의 구조는 스월 넘버(Swirl number)로 구분될 수 있으며, 다음과 같이 파이프 내/외경비와 회전각의 수식으로 정의된다.

$$S = \frac{2}{3} \left( \frac{1-\alpha^3}{1-\alpha^2} \right) \tan \theta$$

여기서,  $\alpha$ 는 파이프 내/외경비  $d/D$ 에 의해 0.59로 계산되고,  $\theta$ 는 파이프 중심으로부터 스월 날개 사이의 각도로  $28.3^\circ$ 이다. 본 연구에서는 스월 날개가 파이프를 따라 한바퀴 회전하는 구조의 내부 스월형 히터를 제작하였고, 이 경우의 스월 넘버는 0.44이다.

(a) External-traced heater



(b) Internal-swirled heater

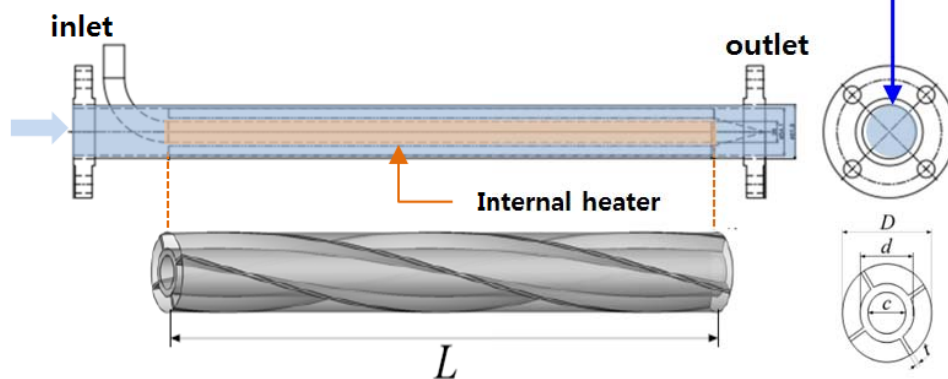


Fig. 1 Schematics of (a) External-traced heater and (b) Internal-swirledheater

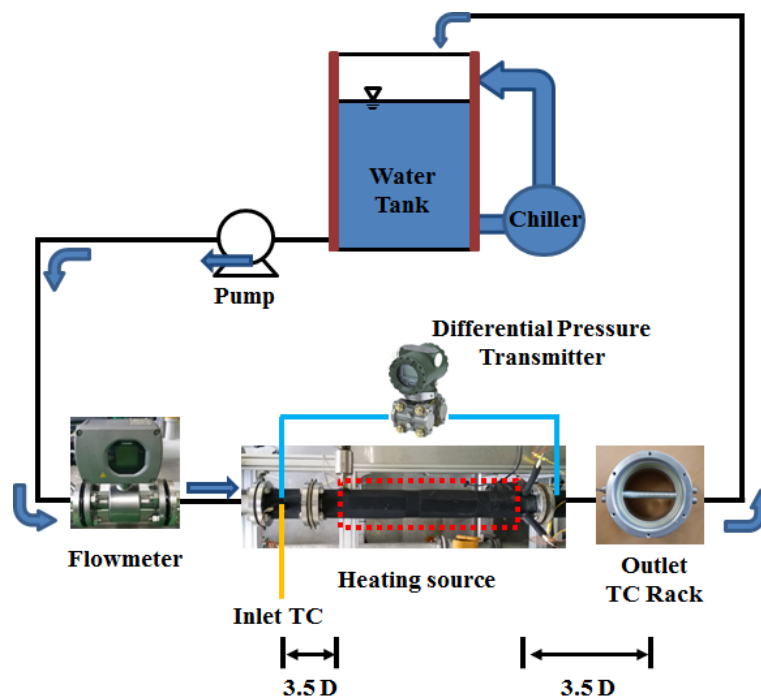


Fig. 2 Schematics of multiphase flow loop



Fig. 3 Schematic of thermocouple rack with airfoil structure (11 thermocouples)

### 3. 실험 방법

다상유동 시험설비는 Fig. 2와 같이 물탱크, 펌프, 유량계, 발열부(Heating source), 온도측정용 열전대, 차압계, 다점 온도센서(Thermocouple Rack)으로 구성되며, 특히 인라인 히터(in-line heater) 후단에 다점 온도센서를 통하여 배관 반경 방향으로의 온도 정보를 측정하였다. 다상유동 시험설비의 전체 크기는 가로, 세로, 높이가 약 2m, 4m, 3m이며, 주 파이프의 직경은 2인치이고, 펌프의 유량범위는  $0\sim 2m^3/h$ 이다.

발열부는 기존 방식의 외부 가열형 히터(External-traced heater)와 새로운 방식의 내부 스월형 히터(Internal-swirled heater)를 각각 설치하여 유동실험을 하였으며, 히터의 길이는 0.631m이다. 칠러를 이용하여 인라인 히터에 들어가는 작동유체인 물의 온도를  $15\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지하였고, 이를 확인하기 위하여 인라인 히터가 설치된 지점으로부터 파이프라인 직경 3.5배 ( $3.5D$ ) 전단에 열전대를 설치하였다. 인라인 히터의 하류부에는 조금 더 자세한 온도 분포를 확인하기 위하여 인라인 히터가 끝나는 지점으로부터  $3.5D$  후단에 다점 온도센서(Thermocouple Rack)를 설치하였다. Fig. 3은 본 연구에서는 사용된 다점 온도센서(Thermocouple Rack)로 파이프라인 단면의 수직 방향으로의 온도분포를 측정할 수 있도록 고안되었다. 파이프라인 가운데에 압력 강하를 최소화 하기 위해 날개의 전단(leading edge)에 11개의 열전대를 5 mm 간격으로 설치하였다. 본 다점 온도센서는 360도로 회전이 가능하여 파이프라인의 방위각 변화에 따른 온도분포를 측정할 수 있는 장점이 있다.

인라인 히터에 전단 및 후단 사이의 압력 강하(pressure drop)를 측정하기 위하여 차압계를 설치하여 하였다.

유동안정성 평가 실험 시 인라인 히터부에 인가된 발열 에너지는  $8.1\pm 0.2\text{ kW}$  이며, 작동유체의 유량 범위는  $1.37\sim 4.77m^3/h$  이다. 이 때의 유량 범위는 실제 해양플랜트에서 피깅(pigging) 시에 2인치 배관에 추천되는 유량인  $4.54m^3/h$ 를 고려한 범위에 해당된다.<sup>(10)</sup> 배관 내 유량은 Re수가 5000이상으로 난류상태이며, 히터부 전단에 30D의 배관입구길이 통하여 난류완전발달(Fully developed) 영역에 도달하는 유동이다.<sup>(11)</sup>

### 4. 실험 결과 및 분석

#### 4.1 출구 온도분포 및 열 혼합 성능

파이프라인에 외부 가열형 히터(External-traced heater)와 내부 스월형 히터(Internal-swirled heater)를 Fig. 1에 나타나 있는 다상유동 시험설비에 설치하고 가열에 따른 유동 실험을 수행하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 외부 가열형 히터와 내부 스월형 히터를 통과한 파이프라인 반경 방향으로의 온도분포를 보여준다. 외부 가열형 히터가 설치된 파이프라인의 유동에서는 벽에서부터 가열되어 온도가 상대적으로 높고, 벽을 통하여 유체로 전도 및 대류 열전달이 이루어져 파이프 중심으로 갈수록 온도가 포

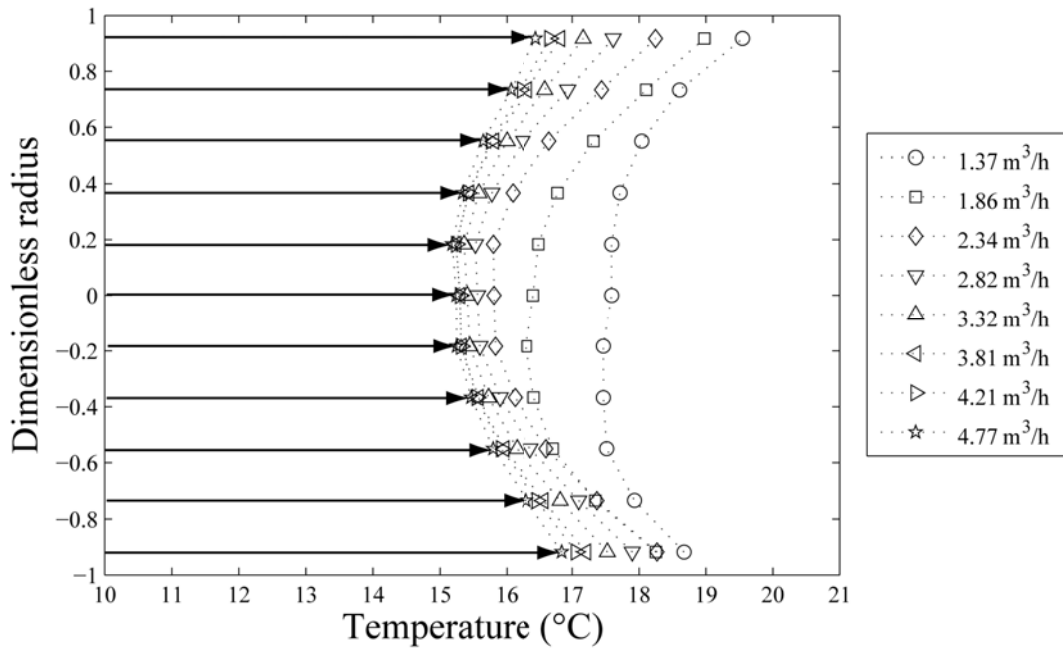


Fig. 4 Temperature profile at 3.5D downstream of external-traced heater

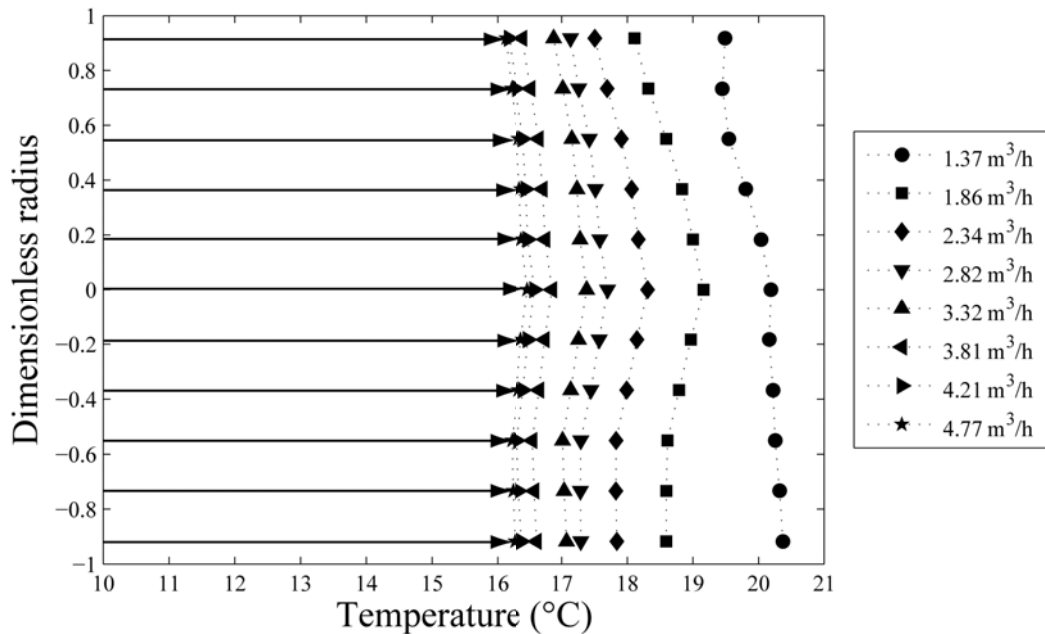


Fig. 5 Temperature profile at 3.5D downstream of internal-swirled heater

물선 형태로 감소하는 분포를 보인다. 파이프라인을 통과하는 작동유체의 유량이  $1.37m^3/h$ 에서  $4.77m^3/h$ 으로 증가함에 따라 파이프 벽 온도가 약  $19\text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $17\text{ }^\circ\text{C}$ 로 감소하는 것을 알 수 있고, 벽과 중앙의 온도차이는 대략  $1.5\text{ }^\circ\text{C}$  정도 차이를 보여준다. 반면에 내부 스윙형 히터의 경우에는 파이프라인 중앙에 히터가 설치되어 있지만 반경 방향으로 고른 분포를 나타내며, 이것은 스윙러(swirler)의 영향으로 인해 유동 혼합(flow mixing)과 함께 열 혼합(thermal mixing)이 촉진되었던 결과이다. 유량이  $1.37m^3/h$ 에서  $4.77m^3/h$ 으로 증가하면, 파이프 벽 온도가 약  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 에서  $16.5\text{ }^\circ\text{C}$ 로 거의 균일한 온도 분포로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

외부 가열형과 내부 스월형 히터에 의한 온도분포를 함께 비교하면, Fig. 6과 같이 내부 스월형 히터에서 비교적 균일한 온도분포를 보여주며 열 혼합 성능이 기존의 외부 가열형 히터에 비해 우수함을 확인할 수 있다. 이것은 두 가지 히터에 관한 열 혼합 성능을 보여주는 Fig. 7에서 다시 확인할 수 있다. 본 연구에서 열 혼합 성능(thermal mixing performance)은 파이프 라인의 반경 방향으로 측정된 온도의 표준편차(standard deviation)로 정의할 수 있다. 따라서 측정된 반경 방향의 온도 분포의 표준 편차가 작을수록 열 혼합 성능이 우수하다는 것을 의미한다.

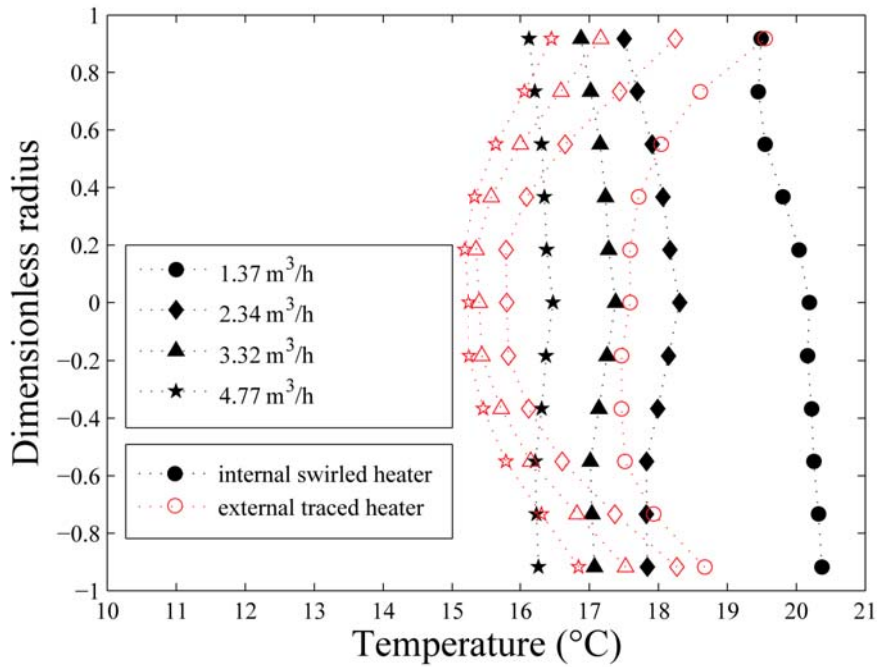


Fig. 6 Temperature distributions of internal-swirled heater and external-traced heater

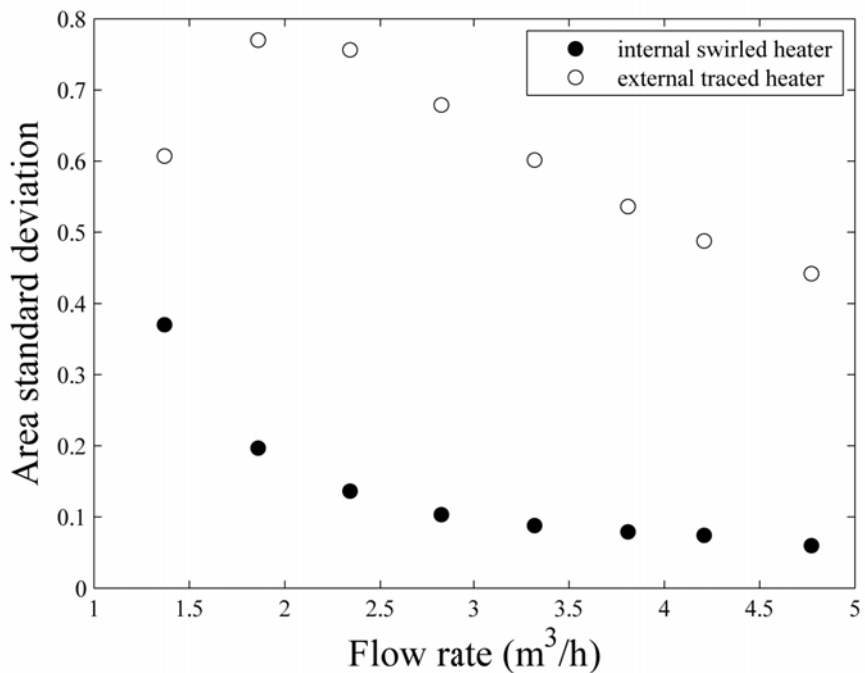


Fig. 7 Thermal mixing of internal-swirled heater and external-traced heater

두 가지 종류의 히터에 의한 실험 결과에서 모두 유량이 증가함에 따라서 온도 분포의 편차가 줄어들어 열 혼합이 향상되지만, 내부 스월형 히터에서의 열 혼합 성능이 외부 가열형 히터에 비해 4 ~ 5배 정도 높은 수준을 보여준다. 내부 스월형 히터의 경우 온도분포의 표준편차가 0.38℃에서 유량이 점차 증가함에 따라 감소하며, 유량이 3.0m<sup>3</sup>/h를 넘어서면서 표준편차가 0.1℃ 이하로 낮아져 파이프라인 단면상의 온도 균일도가 향상되고 따라서 열 혼합 성능이 매우 우수함을 알 수 있다. 또한, 열전달적 측면으로 보면 작동유체인 물 내부에서 열을 전달시키는 내부 스월형 히터가 파이프라인 외부에서 전도에 의해서 열을 전달시키는 외부 가열형 히터에 비해서 열 손실이 적고 효과적임을 의미한다.

4.2 유량에 따른 효율 및 압력강하

파이프라인에 설치된 히터의 열효율은 Fig. 8과 같으며, 인라인 히터부에 제공되는 열용량 대비 출구단의 열용량을 비교하여 효율(Effectiveness)을 표시하였다. 인라인히터의 가열에 따른 효율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{Q_{OUT}}{Q_{IN}}$$

여기서,  $Q_{IN}$ 는 히터에 공급되는 입력 전기에너지로 8.1±0.2kW이고,  $Q_{OUT}$ 는 입출 유체의 온도차이에 의한 열용량으로  $\dot{m}c_p\Delta T$ 으로 계산하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 내부 스월형 히터의 효율은 90% 이상의 수준을 보여주지만, 외부 가열형 히터에서는 약 70% 수준으로 인라인히터의 가열에 따른 효율이 낮음을 알 수 있다. 내부 스월형 방식은 파이프라인 중심에 설치되어 유동 방향으로 열전달이 이루어지는 반면, 외부 가열형 방식은 파이프라인 내외로 모두 열전달이 발생하게 되고 외부로 열손실이 보다 큼을 의미한다. 따라서, 내부 스월형 히터는 외부 가열형 히터에 비해 낮은 열손실로 효과적인 가열 방식이다. 또한, 파이프 내부에 설치되는 내부 스월형 히터의 헬릭스 형태의 스월러 구조물은 유동 및 열 혼합에는 유리하지만 유동 저항으로 작용하여 압력 강하 (pressure drop) 에서 다소 손실을 초래할 수도 있다.

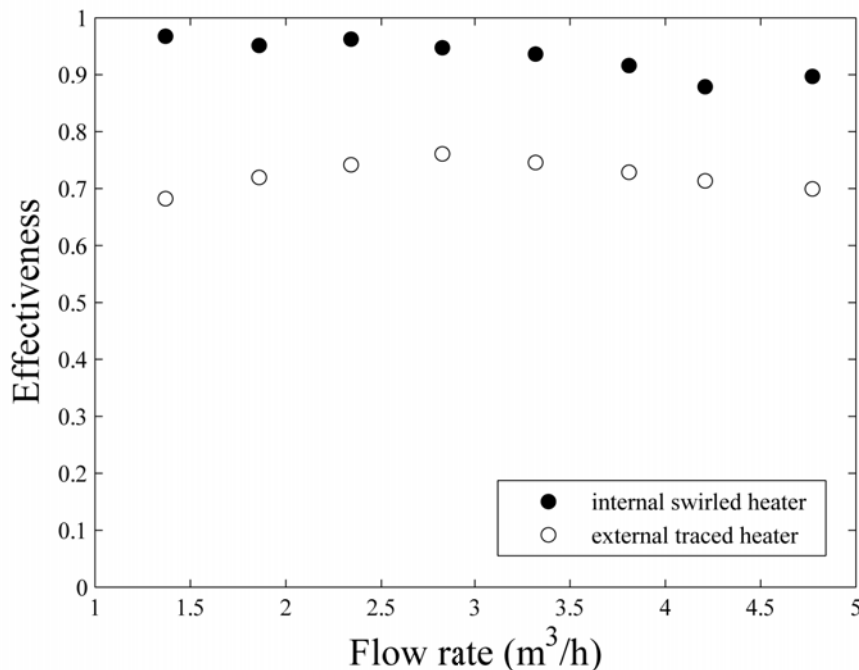


Fig. 8 Effectiveness profile with different flow rates

Fig. 9는 두 가지 형태의 인라인 히터 설치에 따른 압력 강하를 보여주고 있지만, 내부 스월형 히터의 압력 강하가 외부 가열형 히터에 비해 유량이 증가할수록 다소 크게 발생하지만, 압력 강하의 정도가 10mbar 이하로 단위길이당 15.8mbar/L 수준으로 매우 낮음을 알 수 있다. 이와 같은 압력손실에 따라 펌프에 요구되는 추가적인 동력은 Fig. 10과 같이 1W 이하이며, 이는 히터용량 8kW에 비해 무시할 수 있는 수준이다. 하지만, 해양 파이프라인의 길이가 100km이상인 경우에는 내부 스월형 히터로 인한 압력손실이 다소 증가할 수 있으므로, 파이프라인에서 가스 라이드레이트 또는 왁스가 집중적으로 발생하여 유동안정성에 크게 문제가 되는 부분에 집중적으로 설치 및 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

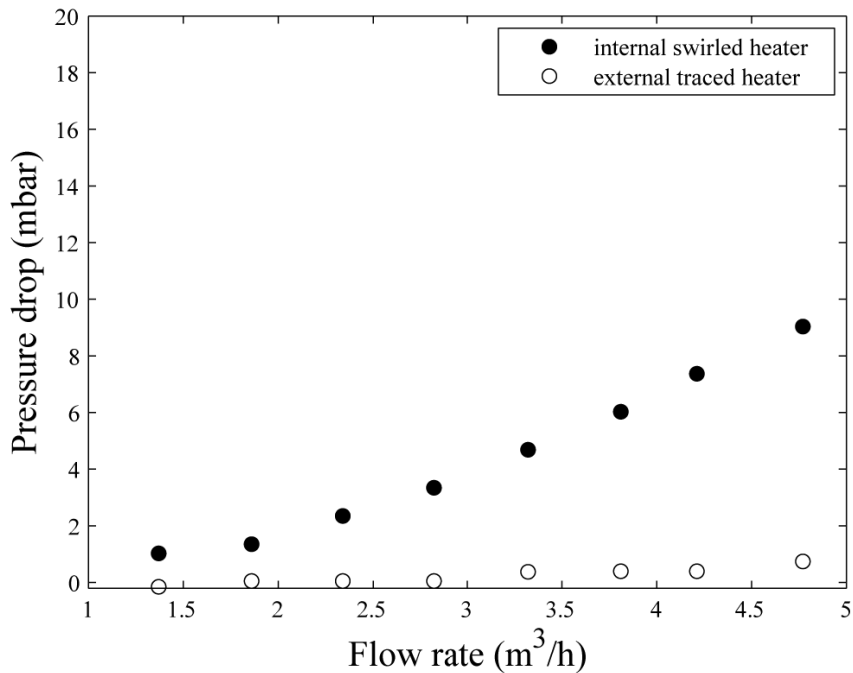


Fig. 9 Pressure drop of internal-swirled heater and external-traced heater

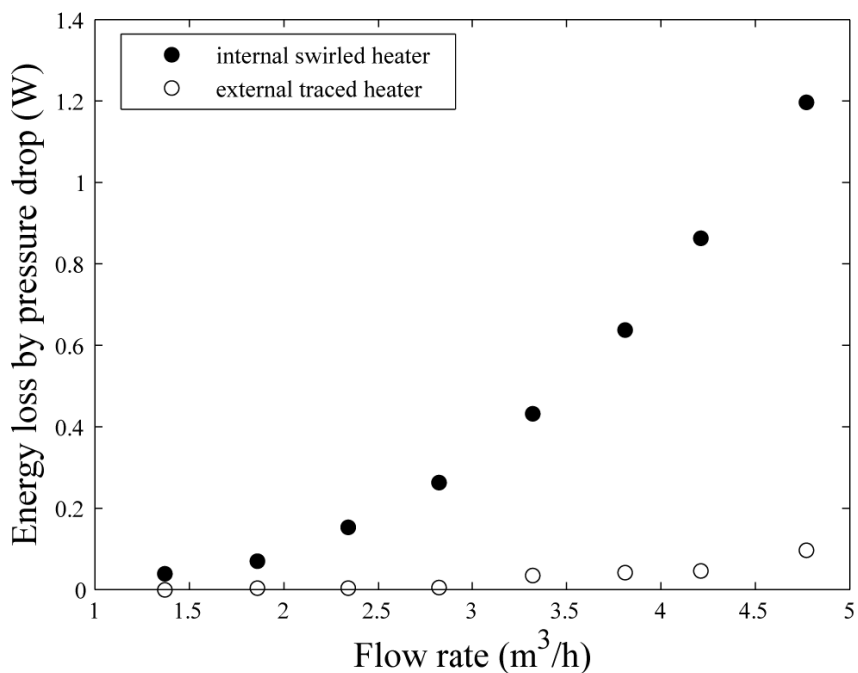


Fig. 10 Energy loss by Pressure drop of internal swirled heater and external traced heater



## 5. 결 론

본 연구에서는 해양플랜트 파이프라인의 가열방식에 따른 유동안정성을 실험적으로 비교 평가하였다. 가열방식은 기존의 외부 가열형 히터와 새로운 내부 스월형 히터로 구분되며, 다상유동 유동실험장치에 각각 설치하여 다양한 유량조건에서 유동실험을 수행하여 그 결과를 비교 검토하였다. 내부 스월형 히터가 설치된 파이프라인 내에서는 우수한 열 혼합 성능으로 온도분포가 거의 균일하게 형성되었고, 이것은 스월러 형상에 의해 유동 혼합 및 열 혼합이 촉진되어진 결과이다. 이에 반하여, 외부 가열형 히터에서는 벽에서 중앙으로 갈수록 온도가 낮아지는 포물선 형태의 온도분포를 보여줄 뿐만 아니라, 외부로의 열손실 또한 발생하였다. 또한, 열효율은 외부 가열형보다 내부 스월형이 우수한 경향을 보여주지만, 압력 강하는 내부 스월형에서 거의 무시할 수준의 낮은 값을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 내부 스월형 인라인 히터는 최근 해양플랜트 유동안정성에서 세계적으로 가장 이슈가 되는 가스 하이드레이트 또는 왁스의 막힘 현상에 대응하기 위한 기술로 확대 적용이 가능하리라 판단된다.

## 후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업기술거점기관지원사업의 일환인 “해양플랜트 기자재 R&D센터 기반구축사업”의 연구개발 사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Douglas Westwood, 2012, *The World Subsea Hardware Market Forecast 2012-2016*.
- (2) Kim, D.-J., 2013, "Offshore Plant Industry," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 12~16.
- (3) Bai, Y. and Bai, Q., 2012, *Subsea Engineering Handbook*, Gulf Professional Publishing
- (4) Brennen, C.E., 2005, *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press
- (5) Thorn, R., Johansen, G.A. and Hjertaker, B.T., 2013, "Three-phase flow measurement in the petroleum industry," *Measurement Science and Technology*, Vol. 24, No. 1.
- (6) Fisher, R.C., Hall, S., Cam, J-F. and Delaporte, D., 2012, "Field Deployment of the World's First Electrically Trace Heated Pipe in Pipe," *Proceedings of Offshore Technology Conference 2012*, OTC 23108, Houston, TX, USA.
- (7) Zakarian, E., Holbeach, J. and Morgan, J., 2012, "A Holistic Approach to Steady-State Heat Transfer from Partially and Fully Buried Pipelines," *Proceedings of Offshore Technology Conference 2012*, OTC 23033, Houston, TX, USA.
- (8) Heggdal, O., Pedersen, A., Lervik, J.K. and Bjerknæs, O.-J., 2012, "Electric Heating of Pipelines and Large Export Flowlines > 30" and More Than 100 km," *Proceedings of Offshore Technology Conference 2012*, OTC 23646, Houston, TX, USA.
- (9) Lee, J., Lee, K.H., Yoon, S.H. and Kim, Y., 2012, "Cartridge-type inline heater and system for controlling working fluid temperature using the same," Korean Patent NO. 10-11375328.
- (10) Guo, B., Song, S., Ghalambor, A. and Lin, T.R., 2005, *Offshore pipelines*, Elsevier, Burlington.
- (11) White, F. M., 1994, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill,