

극지 해양 파이프라인 내부 유체의 온도별 영향 및 내부 충돌침식 분석

조철희¹ · 이준호² · 장춘만³ · 황수진[†]

(Received September 30, 2014 ; Revised December 17, 2014 ; Accepted February 4, 2015)

Numerical Study for the Influence of Environment Temperature on Offshore Arctic Pipeline and Impingement Erosion Analysis by using Thermal Flow Simulation

Chul Hee Jo¹ · Jun-Ho Lee¹ · Choon-Man Jang² · Su-Jin Heang[†]

요약: 극지와 해양에서 파이프라인은 최저 약 -40°C 의 매우 낮은 극한 온도에 노출된다. 이 경우 내부 유체는 상온에서와는 다른 유동특성을 나타내며, 3차원 유동해석을 통해 극한온도에 의한 내부유체의 압력, 온도, 속도, 액적분포 등의 특성 변화를 분석해야 한다. 또한 영하의 온도로 인해 내부 유체의 액적이 응결되며, 이로 인해 곡관부에서 충돌침식이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 충돌침식은 장기간 운용되는 자원 이송망 등의 파이프라인의 안정성에 영향을 준다. 본 논문에서는 다성분 다상 유동 해석을 통해 극한 온도조건의 극지 및 해양 파이프라인에서 내부유체의 유동특성 및 충돌침식에 대한 분석을 수행하였다.

주제어: 파이프라인, 전산유체역학, 극한환경, 충돌침식

Abstract: This paper describes thermal flow characteristic in various pipelines: straight pipeline and curved pipeline. In the Arctic and ocean area, pipelines are exposed to a extremely low temperature ($0 \sim -40^{\circ}\text{C}$). In this situation, three-dimensional flow analysis should be analyzed to investigate thermal effects such as pressure drop, temperature change, velocity deficit and distribution change of liquid droplet of internal fluid. Also, due to freezing of water droplet, impingement erosion is expected in the curved pipeline. The stability of the pipelines can be influenced by impingement erosion. In this paper, multi-phase and multi-species analysis was introduced to analyze the flow characteristics and impingement erosion of Arctic and ocean pipelines.

Keywords: Pipeline, Computational fluid dynamics, Extreme environment, Impingement erosion

1. 서론

세계적으로 지구 온난화 방지를 위해 온실가스 배출 규제가 시작되었고, 환경규제 또한 강화되고 있다. 그러나 세계 각국의 기간산업은 화석연료에 기반하고 있기 때문에 천연가스를 비롯한 화석연료의 의존도는 매우 높고 그 중요성 또한 크게 증가하고 있는 실정이다. 화석연료 자원 확보를 위해 강대국 간의 경쟁이 치열해지고 있으며, 지속적이고 안정적인 에너지 확보를 위해 육상에서 극지 및 해양으로 그 영역을 확장시키고 있다. 그러나 극지에 위치한 생산지에서 소비지까지 생산한 석유 및 천연가스를 운송해야 하는 어려움이 발생한다. 지역적, 계절적으로 제한이 많은 선박이나 철도에 비하여 파이프라인에 의한 운송이 경제성이 뛰어나기 때문에 빙해역과 극지대를 통과

는 파이프라인의 건설이 지속적으로 추진되고 있다. 한국, 일본을 비롯한 동아시아 지역의 경제성장과 함께 극동지역에서의 극지용 파이프라인의 부설도 활발히 추진되고 있다.

천연가스 이송용 파이프라인을 극한지에 설치하는 방법은 크게 지하에 매설하는 지중매립식과 지상의 가설대위에 설치하는 고상식으로 나뉜다. 극지용 해양 파이프라인은 극저온, 해빙, 적설 등과 같은 독특한 극지환경에 노출되어 있기 때문에 극지에 파이프라인을 건설하고 가동하는 데는 이러한 특수한 조건들이 고려되어야 한다. 극지에서는 연간 기온변화가 매우 심하여 겨울철 기온은 보통 영하 40°C 까지도 내려가며, 반면 여름철에는 기온이 영상으로 올라간다. 고상식 파이프라인의 경우 극한의 온도조건($-40^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$)에 노출되게 된다. 따라서 파이프라인의

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3716-1230>): Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Inha-Ro, Nam-Gu, Incheon, 402-751, Republic of Korea, E-mail: sjhwang@inha.edu, Tel: 032-860-7342

1 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, E-mail: chjo@inha.edu, Tel: 032-860-7342

2 Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, E-mail: ljunh330@inha.edu, Tel: 032-860-7342

3 Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, E-mail: jangcm@kict.re.kr, Tel: 031-910-0494

내부 유체의 온도, 압력, 속도, 액적 변화 등 열유동 측면에서의 분석이 수행되어야 한다. 그러나 극지용 해양 파이프라인의 외기온도 조건을 반영한 유동해석연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 극지에서 채굴된 천연가스의 이송을 위해 설치되는 해양 파이프라인, 고상식 파이프라인 주변의 외기온도 변화에 따른 다상-다성분 유동해석을 수행하였다. 그리고 극한온도에서의 3차원 수치시뮬레이션을 통해 관망 내부 액적 동결 시 예상되는 입자 충돌침식을 수행하여 극지 파이프라인의 관망 특성을 분석하였다.

2. 직관 CFD 해석

극한온도조건에서의 파이프라인 내부 유체의 3차원 열유동 특성을 분석하기 위해 직관과 곡관에 대한 CFD 해석을 수행하였다. 다상유동에 대해 정확도가 높다고 알려진 상용코드 ANSYS Fluent v.13이 사용되었으며 천연가스의 다양한 가스 조성과 액적에 의한 영향을 고려하기 위해 다성분-다상유동 해석이 수행되었다. 직관 CFD 해석에서 참고문헌과의 비교를 통해 다성분-다상유동 해석기법의 신뢰성을 확보하였으며 외부온도조건(공기, 해수온도)을 변화시키며 온도에 의한 내부 유체 영향을 관찰하였다.

2.1 모델링 및 격자 생성

유동 특성 상 짧은 관에 대해서는 외기온도에 대한 영향을 관찰하기 어려울 뿐만 아니라 관내 유동의 불완전한 발달로 인해 정확도가 낮아지기 때문에 파이프라인의 모델링 시 유동이 완전 발달될 수 있도록 충분한 길이를 확보해야 한다. 해석에 사용된 직관의 크기는 직경 0.68m, 길이는 1,500m이다. Figure 1은 직관에서 출구압력에 대한 격자 의존성 시험 결과이다. 유동이 단순하기 때문에 격자 의존성이 높지 않으나, 직관의 길이가 직경에 비해 매우 길기 때문에 약 3백만 개의 노드 수에서 격자 의존성이 사라진다고 판단하였다. 따라서 직관의 경우 약 3백만 개의 격자를 Figure 2과 같이 생성하였으며, 격자 정보는 Table 1과 같다.

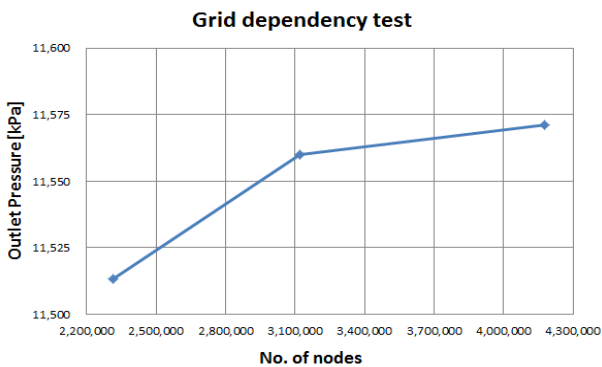


Figure 1: Grid dependency test (straight pipeline)

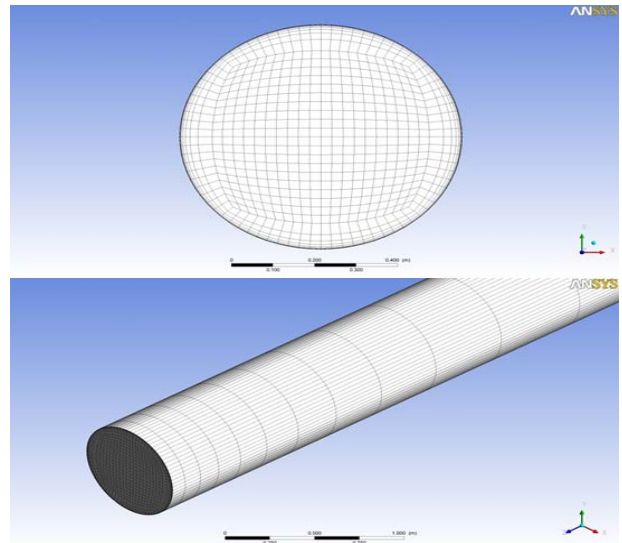


Figure 2: Mesh (straight pipeline)

Table 1: Mesh information

Node	Elements	Max. y+	Mesh Type	Tool
3,122,000	3,038,480	4.92 @wall	Structural	ICEM CFD mesh tool

2.2 경계조건

생성된 격자를 바탕으로 상용코드인 ANSYS Fluent v.13을 사용하여 경계조건을 설정하고 CFD 해석을 진행하였다. 여러 가지 성분의 천연가스 조성을 구현하기 위해 species transport model이 사용되었다. 천연가스와 액적의 다상유동 해석을 위해 multiphase-mixture model, 열유동 해석을 위해 energy model이 사용되었으며 난류모델은 단순한 유동에서 정확도가 높다고 알려진 k-e realizable model이 사용되었다[1].

외기온도 조건을 고려하기 위해 직관 내 벽면 온도 조건을 열교환이 없는 완전단열조건, +20℃, -20℃, -40℃의 4가지 온도조건을 설정하였다. 내부 유체 온도는 49℃이고 입구 압력은 11.620MPa, 출구 속도는 7.641m/s로 설정하였다. 초기 액적(물)을 5%로 설정하였고, species transport model을 이용한 천연가스 조성비를 Table 2에 나타내었다.

Table 2: Natural Gas Composition Ratio (straight line)

Component	Overall Composition
CO2	0.0032
N2	0.0101
C1	0.7557
C2	0.1122
C3	0.0778
i-C4	0.0078
n-C4	0.0171
i-C5	0.0028
n-C5	0.0031
n-C6	0.0041
C7+	0.0061

2.3 해석 검증

다성분-다상 유체의 천이유동 분석사례(Sung *et al.* [2])의 경계조건을 그대로 적용하여 동일한 출구 압력의 계산 여부를 확인하였고 이를 **Figure 3**에 나타내었다. 출구압력 차이가 0.16%로 거의 동일한 결과를 보이며, 상용코드인 Fluent를 이용한 해석방법에 대한 신뢰성을 확보하였다.

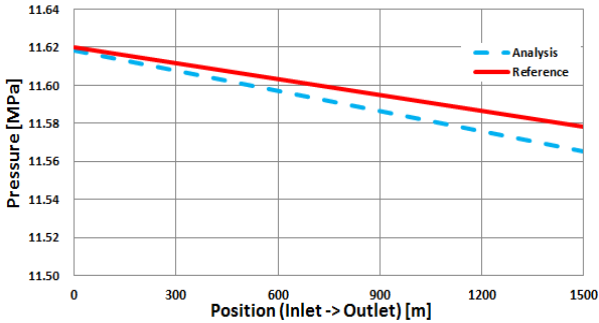


Figure 3: CFD validation

2.4 해석 결과

검증 결과를 바탕으로 온도조건을 변화시켜 해석을 진행하였다. 열교환이 없는 완전단열조건과 +20℃, -20℃, -40℃의 온도조건을 부여하였고, 온도조건 변화에 따른 직관 해석 결과를 **Figure 4**에 나타내었다.

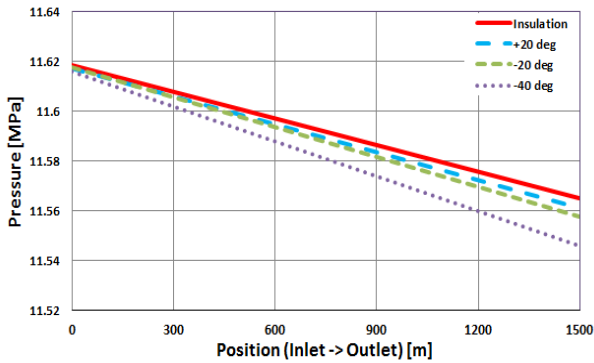


Figure 4: Pressure distribution (straight pipeline)

단열조건에 비해 온도조건을 부여했을 때 압력강하 값이 더 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 열 교환이 있는 경우를 단열조건으로 해석하는 경우 관 길이 방향의 압력강하를 잘 예측하지 못하는 것을 알 수 있다. 압력 강하 값은 온도조건이 낮아질수록 커지는 경향을 보이는데, 이는 낮은 온도조건으로 인한 천연가스 기체 분자의 운동이 둔화되면서 발생한 현상으로 예상된다.

Figure 5에 관 길이방향에 따른 액적(물)의 volume fraction 분포 변화를 나타내었다. Phase 1인 천연가스가 저온으로 인해 수축하면서 천연가스의 volume fraction이 감소하고, 이에 따라 액적의 volume fraction이 증가한다. 증가된 volume fraction은 또다시 관 길이방향 압력저하에 기여

하게 된다.

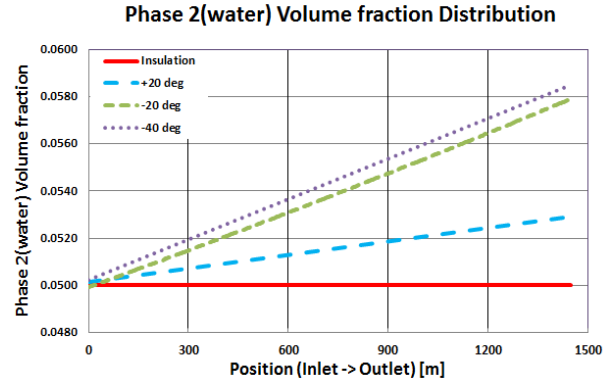


Figure 5: Phase 2 (water) volume fraction distribution

Figure 6에 관 길이방향에 따른 온도분포를 나타내었다. 초기에는 모든 케이스에서 천연가스의 유입 온도인 49℃ 근처에서 시작되지만 냉각된 관 내벽 온도 영향을 받아 점차 낮아지고 있음을 알 수 있다. -40℃ 온도조건인 경우 약 1,300 m 지점에서 내부 유체 온도가 영하로 떨어지기 시작한다. 이 지점부터 액적의 동결이 예상되므로 상변화 모델을 적용하거나 기존의 액체-기체 다상유동 해석이 아닌 고체-기체 다상유동 해석이 요구된다. 이는 곡관에서 치명적일 수 있는데, 곡관의 경우 얼음 입자가 곡관 벽에 충돌하여 침식을 발생시킬 여지가 있기 때문이다.

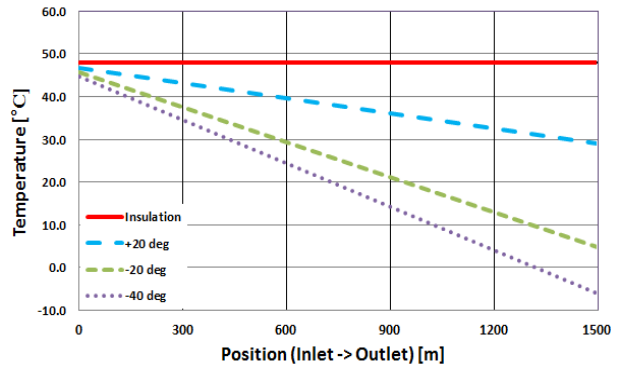


Figure 6: Temperature distribution

3. 곡관 CFD 해석

다성분-다상유동해석 사례와 직관 해석 기법을 바탕으로 곡관 해석을 수행하였다. 사용된 해석 모델과 온도조건은 직관과 동일하며, 곡관의 곡률을 3D, 5D, 7D로 변화시켜 가면서 유동해석을 진행, 동결된 얼음입자의 충돌침식을 계산하였다.

3.1 모델링 및 격자 생성

유동해석에 사용된 곡관의 직경은 1.219m (48inch)이고 배관 두께는 23.8mm (0.932inch)이다. **Figure 7**은 5D 곡관의 격자 의존성 테스트 결과이다. 그 결과 곡관 모델의 최적 격자수는 약 백만 개로 나타났으며 이를 3D와 7D 곡

관의 격자구성에도 적용하여 동일한 스케일의 격자구성을 사용하였다. Figure 8은 생성된 곡관 격자이며, Table 3은 해당 격자 정보이다. 입·출구방향으로 관 길이를 10D만큼 생성하였다.

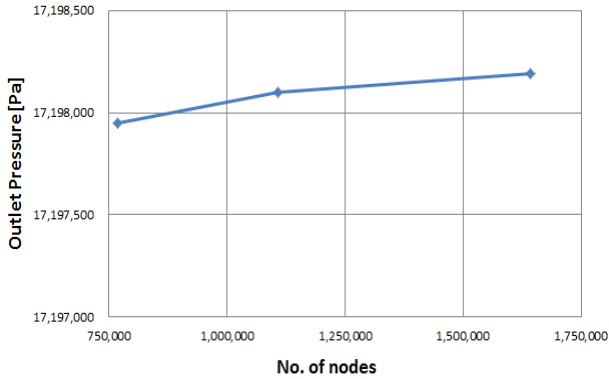


Figure 7: Mesh (curved pipeline)

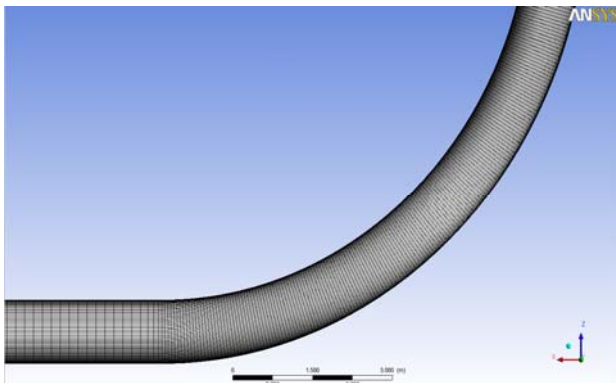


Figure 8: Mesh (curved pipeline)

Table 3: Mesh information

Radius	Node	Elements	Max. y+	Mesh Type
3D	939,640	918,809	5.00 @wall	Structural
5D	1,108,640	1,084,659		
7D	1,345,240	1,316,849		

경계조건 설정에는 Alaska pipeline project[3]를 참조하였고 천연가스가 직관을 거쳐 오면서 충분히 냉각되었다는 가정 하에 내부 유체 온도는 -1℃로 설정하였다. 외부 온도조건은 -40℃, 입구 압력은 17.2 MPa, 출구속도는 6 m/s로 입력하였다. 초기 액적은 직관과 동일한 5%이다. 입자 충돌침식 해석은 ANSYS사 Fluent v.13의 DPM(Discrete phase model)을 사용하였고 사용한 입자의 크기는 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm로 구분하여 해석을 진행하였다.

3.2 해석 결과

Figure 9, 10 and 11에 각 곡관의 입자 크기별 충돌침식 해석을 수행한 결과를 나타내었다. Fig. 9은 곡률반경이

3D인 곡관의 해석 결과를 나타내고 있는데, 입자 크기를 증가시키기에 따라 침식 면적이 증가할 뿐만 아니라 최대 침식을 또한 입자 지름이 0.1 mm일 때 1.63e-10 kg/m²-s에서, 1 mm일 때, 3.35e-10 kg/m²-s로 증가함을 알 수 있다. 입자의 크기가 증가할수록 곡관의 끝단 부분에서 곡물이 시작되는 유입부로 최대 침식을 발생지점이 이동한다. 이는 입자가 작을수록 내부 유체와 같이 흘러나가기 용이하기 때문이다.

곡률반경 5D 곡관의 해석 결과를 Figure 10에 나타내었다. 3D 곡관과 마찬가지로 입자 지름이 증가함에 따라 침식 면적이 증가하는 것을 확인할 수 있고 최대 침식률도 1.25e-10 kg/m²-s에서 1.92e-10 kg/m²-s까지 증가함을 알 수 있다. 또한 3D 곡관보다 5D 곡관에서의 침식 면적 및 침식률이 작은 경향을 보이는 것을 확인하였다.

Figure 11의 곡률반경 7D 곡관에서도 최대 침식률이 입자 지름에 따라 5.14e-11 kg/m²-s에서 9.87e-11 kg/m²-s까지 증가하는 동일한 경향을 보이고 있으며, 입자 크기가 0.1 mm인 경우를 제외하고는 가장 낮은 최대 침식률을 보이고 있다. 이는 앞서서도 언급한 바와 같이 입자 지름이 증가할수록 얼음 입자가 유체와 같이 흘러가지 못하고 곡관 유입부에 충돌할 확률이 크기 때문이다.

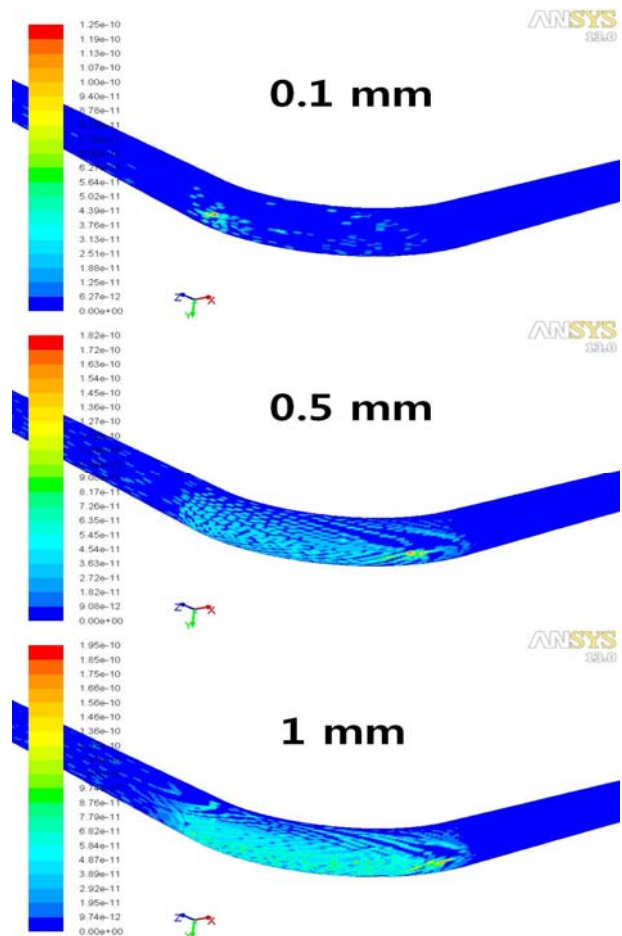


Figure 9: Erosion rate (3D)

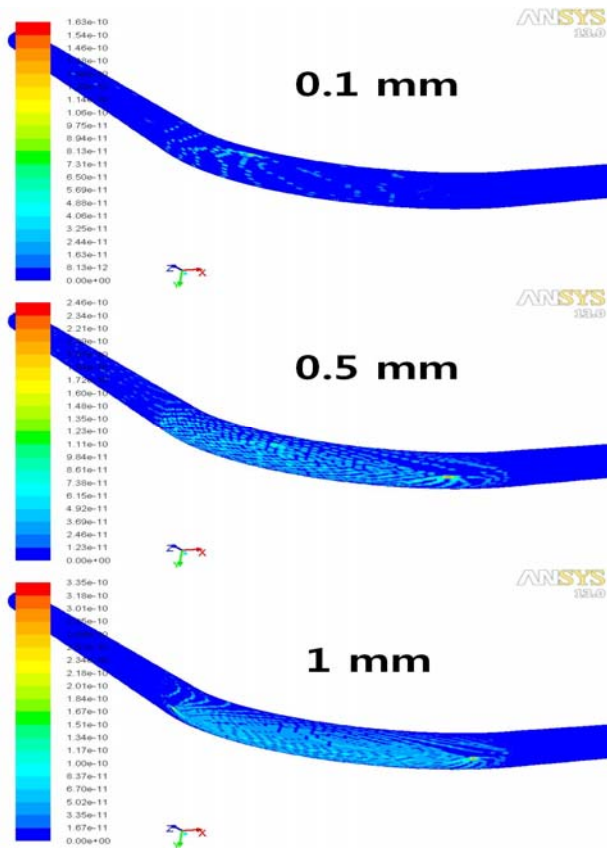


Figure 10: Erosion rate (5D)

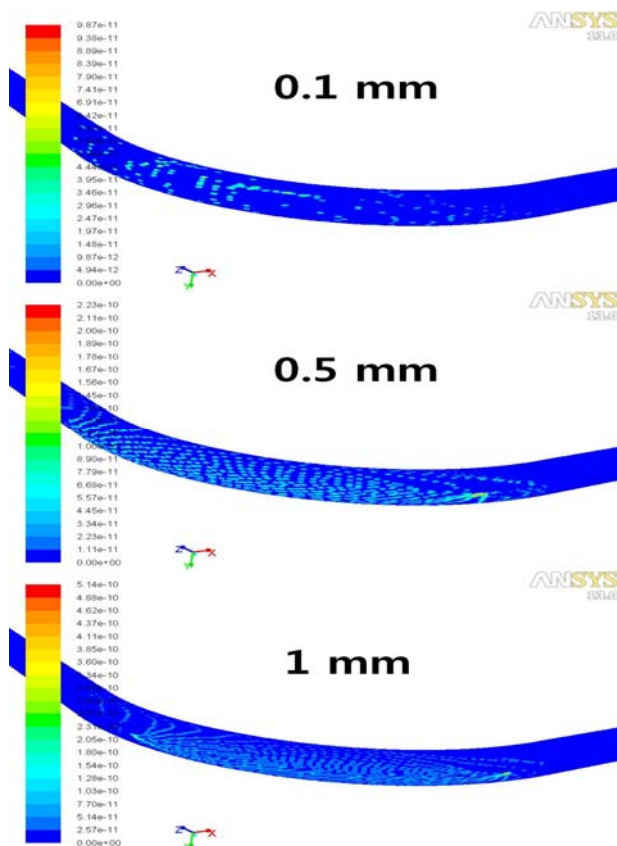


Figure 11: Erosion rate (7D)

4. 결 론

본 연구에서는 해양 파이프라인 및 극지 고상식 파이프라인에 적용할 수 있는 다성분-다상 유동해석을 수행하였다.

(1) 상용코드인 ANSYS Fluent v.13을 이용하여 온도조건을 고려한 다성분-다상유동 해석기법을 정립하였다.

(2) 극지 및 해양 파이프라인은 작동유체와 외부의 온도차이로 인해 파이프 내부와 외부의 열교환이 예상된다. 이러한 모델을 기존 파이프라인 내부 유동해석에 사용되는 단일조건으로 해석하는 경우 내부 유체의 압력저하를 잘 예측하지 못함을 확인하였다.

(3) 관 길이가 길어질 경우 내부 유동장 온도가 영하로 떨어져 유체 내부 액적의 동결이 예상되고 동결된 입자가 곡관 내부에 충돌침식을 일으킬 가능성을 확인하였다.

(4) DPM 모델을 이용한 곡관 내 충돌침식 해석이 수행되었으며 최대 입자 지름인 1 mm에서 $5.14 \times 10^{-10} \text{ kg/m}^2\text{-s}$ 의 침식률이 계산되었으며, 20~30년에 이르는 파이프라인의 설계수명에서는 문제가 발생할 여지가 있으므로 설계 시 고려해야 할 것으로 판단된다.

(5) 본 연구는 입자 크기 및 곡관의 곡률에 따른 침식 면적 및 침식률의 경향성을 파악하였다. 추후 실험이나 실제 사례와의 비교를 통해 해석 결과의 수치에 대한 신뢰성을 확보하고 다양한 모델에 대한 해석을 수행하여 입자 침식에 대한 최적 곡률을 판단할 수 있는 연구가 수행되어야 한다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Tsne, ANSYS CFD Fluent Basic, Tsne Co. Ltd., Seoul, 2012.
- [2] W. M. Seong, O. G. Gwon, Y. C. Park, and D. G. Heo, "Transition flow analysis of multiphase fluid - multi-component in the natural gas pipeline," Proceedings of '97 KIGAS Conference, pp. 266-273, 1997 (in Korean).
- [3] Trans Canada and Exxon Mobil, "Alaska Pipeline Project: Draft-Resource Report 1 - Rev0, General Project Description," 2011.
- [4] D. R. Kaushal, T. Thinglas, Y. Tomita, S. Kuchii, and H. Tsukamoto, "CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration," International Journal of Multiphase Flow, vol. 43, pp. 85-100, 2012.