

해저 파이프라인 열좌굴 해석방법에 관한 연구

양승호^{†*}, 정종진*, 이우섭*, 도창호*

현대중공업 해양산업연구실*

Research on the Analysis Method of Thermal Buckling of Subsea Pipeline Structures

Seung-Ho Yang^{†*}, Jong-Jin Jung*, Woo-Sub Lee* and Chang-Ho Do*

Ocean Industry Research Department, Hyundai Heavy Industries. Co. Ltd*

Abstract

The requirement of design of High-Pressure/High-Temperature(HP/HT) pipelines on an seabed increases in recent years. The need of research on the analysis method to improve the design capacity is increasing. The purpose of this study is the development of the analysis method of thermal buckling of subsea pipeline structures. The analysis method of thermal buckling was established by using the commercial FEM code(ABAQUS) which shows the outstanding performance in non-linear static FE analysis. The developed method has been applied to the installation of subsea pipeline on the offshore project. For a validation, the comparative study has been carried out. This application to offshore project demonstrates the superiority of the analysis method of thermal buckling of subsea pipeline structures and testifies the application to detail design.

※Keywords: Subsea pipeline(해저 파이프라인), High-Pressure/High-Temperature(고온/고압), Non-linear static FE analysis(비선형 정적 유한요소 해석)

1. 서론

해저에는 유정개발 및 채굴된 원유 및 가스를 운송하기 위해 수많은 파이프라인들이 부설되어

운영되고 있다. 이러한 파이프라인들의 상당수가 고온/고압 하에서 작동되고 있다.

해저에 부설된 파이프라인이 고온/고압 하에서 과도한 압축하중을 받게 될 경우, 파이프라인에 좌굴이 발생하게 된다. 특히, 해저면과 파이프라인 사이의 마찰이 아주 크지 않을 경우에는 축방향으로 좌굴(lateral buckling)이 발생하게 되며 이러한

접수일: 2009년 6월 4일, 승인일: 2010년 2월 5일

†교신저자: shyang@hhi.co.kr, 052-203-9975

현상을 축방향열좌굴이라 한다. 좌굴이 발생하게 되면 파이프라인에 치명적인 손상을 입히게 되고 결국 파이프라인의 운전수명을 단축하게 된다.

지금까지 해저 파이프라인의 열좌굴 현상을 모사하기 위하여 단순화를 위한 기술적 가정 및 선형화된 공식(Hobbs 1984)들을 많이 적용하여 왔으나, 근래에 들어서는 해저 파이프라인의 고온/고압 열좌굴 현상에 대하여 상세한 설계 검토 필요성이 늘어나고 있다. 이에 따라, 해저 파이프라인 설계능력 향상을 위한 해석방법에 대한 연구 필요성도 증가되고 있다.

최근에 고온/고압 해저 파이프라인에 대한 설계 지침을 제시하고 관련된 물리현상들을 좀더 깊이 있게 이해하기 위해 다양한 국제공동연구(HOTPIPE, SAFEBUCK)가 활발히 이루어지고 있다. 그 결과로, Frank Klaebo et al.(2008)은 DEEPLINE 국제공동연구(2003~2006)를 통해 비선형 유한요소해석법을 이용하여 3 차원 해저 파이프라인 열좌굴 해석도구(SIMLA/MARINTEK)를 개발하였다. 개발된 도구를 Ormen Lange 해양공사에 적용하여 파이프라인의 열좌굴 거동을 평가하였다.

국내에서는 아직까지 고온/고압 해저 파이프라인 설계 분야에 대한 연구가 전무한 실정이다. 급격히 증가하고 있는 해저 파이프라인 설계 및 설치 수요에 능동적으로 대처하기 위해 고온/고압 해저 파이프라인에 대한 해석방법 개발 요구가 어느 때 보다 절실하다.

고온/고압 하의 해저 파이프라인의 열좌굴해석은 일반적인 좌굴해석과는 달리 고온/고압으로 인한 파이프라인의 비선형 거동이 해석에 포함되고, 파이프라인과 해저면과의 상호작용이 포함되어 훨씬 복잡한 해석모델이 요구된다.

본 연구의 목적은 해저 파이프라인의 고온/고압 열좌굴 현상에 대한 비선형 유한요소해석방법을 개발하고 해양공사에 적용하여 개발된 해석법의 우수성을 입증하는 데 있다.

2. 유한요소해석(FEM Analysis)

고온/고압 하의 해저 파이프라인의 거동은 주로 전체좌굴(global buckling)을 겪는 것으로 특징 지을 수 있다. 파이프라인이 해저면에 완전히 노출되어 있는 경우에는 축방향좌굴이, 트랜치(trench)되거나 혹은 사석, 방호 매트리스 등으로 덮여있는 경우에는 수직방향 좌굴이 발생하는 경향이 있다(Yong 2005). 파이프라인의 안정성 측면에서는 트랜칭 방법이 유리하지만 추가 설치비용이 많이 들기 때문에 최근에는 비용측면에서 유리한 좌굴 트리거/슬리퍼(buckle trigger/sleeper)를 이용하여 좌굴을 제어하는 방법을 쓰는 경향이 있다(Kien et al. 2005).

고온/고압 하의 해저 파이프라인 설계의 주요 관심은 파이프라인이 받게 되는 압축하중이 임계 축하중을 넘어서게 될 경우 전체좌굴을 제어하는 것이다. 전체좌굴에 의한 수평 또는 수직방향 좌굴크기는 허용치를 초과하는 응력과 변형률을 야기할 수 있다.

해저 파이프라인의 전체거동을 분석할 때는 유한요소 해석모델을 이용한다.

3 차원 상세 유한요소해석을 위해 도구로써 ABAQUS 프로그램을 채택하였다. 유한요소 모델은 해저면의 3 차원 형상을 고려하였고 기존에 부설되어 운영중인 파이프라인과의 교차 지점에서 콘크리트 슬리퍼를 고려하였다.

해석을 위해 다음의 사항들을 가정한다.

- 파이프라인은 설치될 파이프라인 루트에 정확히 설치된다.
- 파랑과 조류에 의한 환경하중의 변화에 대해 파이프라인은 해저면과 콘크리트 슬리퍼 위에서 축방향으로 안정된 상태를 유지한다.

파이프라인은 3 차원 파이프요소로 모델링한다. 파이프요소는 각 절점에서 파이프 축과 단면 사이에 횡방향변형과 전단변형을 고려할 수 있는 6 자유도를 가진다.

Fig. 1~Fig. 2 는 유한요소해석에서 사용된 파이프요소와 단면 형상을 보여준다.

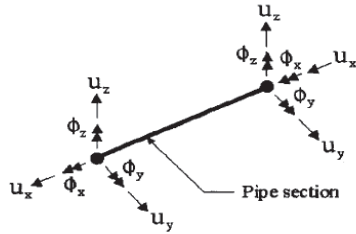


Fig. 1 Two node twelve degrees of freedom 3-D finite pipe element

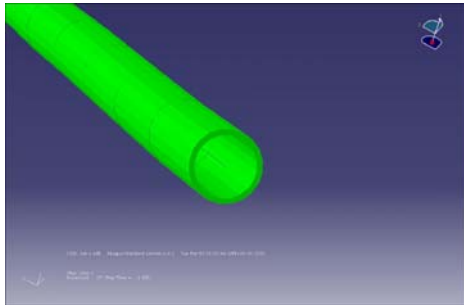


Fig. 2 3-Dimensional pipe element in ABAQUS

파이프라인과 해저면 사이의 상호작용 모델로는 쿨롱마찰모델(Coulomb friction model)이 적용되었다. 적용된 모델은 두 접촉면 사이의 전단응력이 최대허용마찰응력보다 작으면 정지해 있게 되고, 최대허용마찰응력보다 크게 되면 두 물체는 접촉면에서 상대미끄럼운동을 시작하게 된다(Fig. 3).

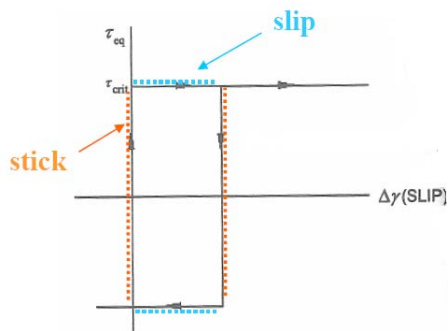


Fig. 3 Coulomb friction model

파이프라인에 적용된 하중과 경계조건은 다음과 같다.

파이프라인 요소에 대해서 각종 코팅(콘크리트 코팅, 부식 코팅), 해양부착동식물, 그리고 파이프라인 자체 부력을 고려한 파이프라인 무게를 고려하여 균일분포하중을 적용하였다(Fig. 4).

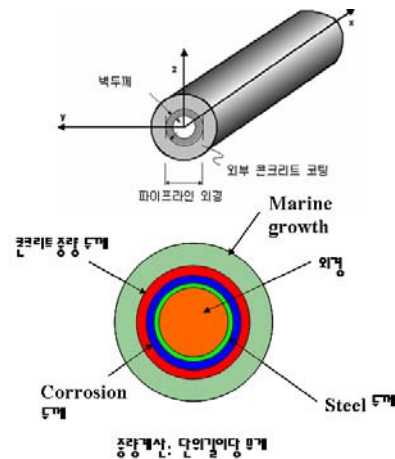


Fig. 4 Pipeline section

고온/고압 조건 아래 스푼(spool)은 파이프라인의 구속조건에 거의 영향을 미치지 않기 때문에 양끝단은 자유단으로 가정하였다.

고온/고압의 해저 파이프라인의 열좌굴 해석은 다음의 단계로 모델링 된다.

- 1 step: 파이프라인을 설치 경로의 해저면에 가라앉히는 단계
 - 파이프라인의 한쪽 끝단을 고정된 채, 다른 쪽 끝단을 가라앉히는 단계
 - 고정된 끝단을 자유단으로 풀어주는 단계
 - 2 step: 파이프라인에 고온/고압을 가하는 단계
 - 양끝단을 자유단으로 한 채, 고온/고압을 가하는 단계
- 해석을 위해 적용된 수치해석방법은 다음과 같다.

파이프라인과 해저면의 상호작용 모델의 접촉 해석을 수행하기 위해 접촉면에서의 마찰조건에 대해 패널티 방법(penalty method)을 적용하였다. 패널티 방법은 접촉모델 해석 시, 접촉면에서 패널티 강성(penalty stiffness)를 정의하여 임계전단 응력 이전에 미소 미끄러짐을 허용하여 해의 수렴 안정성을 높이는 방법이다. 비선형 해석방법으로는 뉴턴반복법(Newton iterative method)을 적용하였다.

파이프라인 좌굴에 관한 설계 허용기준은 일반적으로 DNV-OS-F101(DNV 2000)을 기준으로 검토되며 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Allowable strain

Parameter	Allowable Limit(%)
Equivalent Plastic Strain	0.3

3. 해양공사 적용해석

개발된 해석법을 비교 검증하기 위해 해양공사의 가스인젝션(Gas Injection)용 파이프라인을 선택하였다(Fig. 5). 선택된 파이프라인은 열좌굴이 발생하지만 변형이 허용 소성변형 이내에 있는 파이프라인이다. 좌굴이 발생하지 않도록 개선방안에 대한 검토 및 개선조치가 필요하다.

해석대상 파이프라인

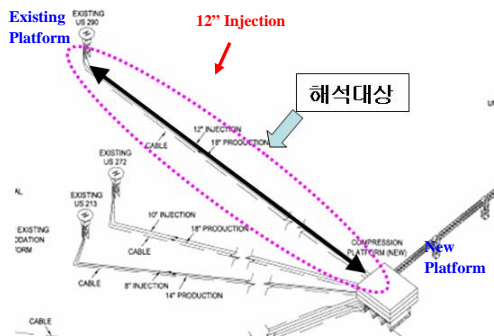


Fig. 5 Selected pipeline for analysis

파이프라인 열좌굴 해석에 사용될 해석 입력요소들을 Table 2 에 나타내었다.

Table 2 Data for gas injection pipeline

Property	Unit	Values
Details	-	Gas Injection Pipeline
Pipeline OD	mm	323.9
WT	mm	27.0
Material Grade	-	API 5L X-65 (NACE)
Pipeline Approx. Length	km	2.318
Concrete Weight Coating Thickness	mm	115
Concrete Weight Coating Density	kg/m ³	3040
Steel Density	kg/m ³	7850
Seawater Density	kg/m ³	1032
Operating Pressure	MPa	37.9
Maximum Operating Temperature	°C	90.6

파이프라인 크로싱, 콘크리트 슬리퍼, 마찰계수

가스인젝션 파이프라인에는 다수 개의 크로싱과 슬리퍼가 있다.

Fig. 6 은 콘크리트 슬리퍼 설계형상을 설명하기 위한 도식도 이다. Fig. 6 은 슬리퍼가 포함된 해저 지형의 한 예이며, 지지간격과 슬리퍼 높이, 슬리퍼 상면부 길이가 표시되어 있다.

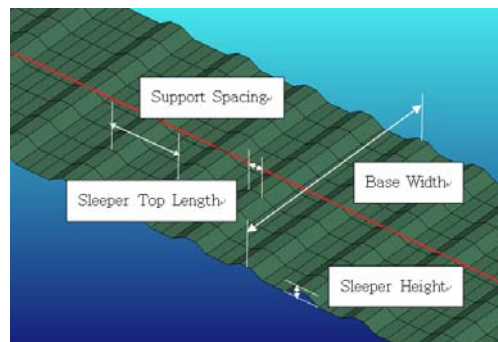


Fig. 6 Description of concrete sleeper

콘크리트 슬리퍼에 대한 세부사항을 Table 3 에 요약하였다.

Table 3 Summary of concrete sleepers

Pipeline Crossing	Support Sleeper Dimension(m)	
	Base Width × Length	Sleeper Height
Gas Injection Pipeline	1.6×12.0	0.90
	1.6×12.0	0.80
	1.6×12.0	0.75
	2.6×7.0	1.20
		1.08
		0.90
		0.80
		0.75
		0.65
	1.6×12.0	0.80
	1.6×12.0	0.75
	1.6×12.0	0.65
	1.6×12.0	0.45

파이프라인과 해저면 사이의 마찰계수를 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Friction coefficients

Design Action	Type	Local Friction Factor	Longitudinal Friction Factor
Pipeline on Seabed	Rock / Sand	0.60	0.60
Pipeline on Sleeper	Concrete	0.15	0.15

해저면은 3 차원 강체면으로 모델링 한다.

콘크리트 슬리퍼는 해당 높이를 가지는 해저면으로 모델링하였다. Fig. 7 은 콘크리트 슬리퍼를 고려한 해저면의 2 차원 수심도를 나타낸다. Fig. 8 은 3 차원 해저면 모델링을 나타낸다.



Fig. 7 2-Dimensional bathymetry considering concrete sleepers

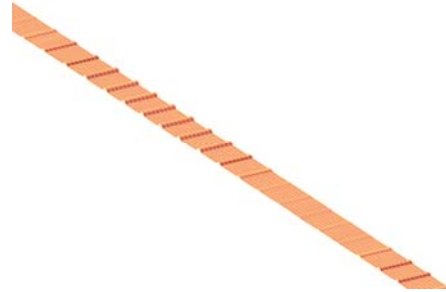


Fig. 8 Seabed modeling considering concrete sleepers at pipeline crossings

파이프라인 재료의 응력-변형을 관계는 Ramberg-Osgood 방정식에 기초한 API 5L X-65 를 이용한다(Fig. 9).

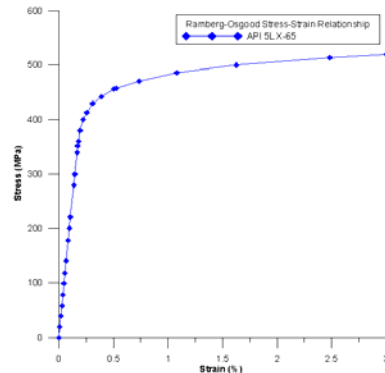


Fig. 9 Stress-strain relationship of API 5L X-65

해저면의 메시생성은 해양공사 현장의 해저면 실측 데이터를 기초로 Patran 프로그램을 이용하여 모델링 하였다.

파이프라인 길이방향 온도분포를 Fig. 10 에 나타내었다. 파이프라인 온도분포는 공사초기 제시된 작동 시나리오에 기초하여 파이프 내부의 다상 유동을 고려한 정상상태 해석을 통해 나온 결과이다.

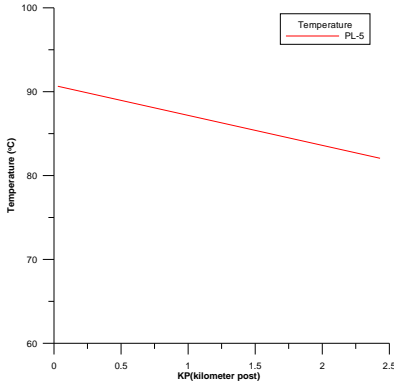


Fig. 10 Temperature along pipeline

4. 해석결과

파이프라인에 대한 해석결과를 Table 5 에 요약하였다. 최대응력(max. von-Mises stress), 등가소성변형률(equivalent plastic strain), 측방향좌굴크기(lateral buckling amplitude), 그리고 유효축하중(effective axial force)에 대한 해석결과를 나타내었다.

Table 5 Summary of results for pipeline under HP/HT operation conditions

Pipeline Details	Case	Buckling Location (KP)	Max. Amplitude (m)	Max. Mises Stress (MPa)	Max. Equivalent Plastic Strain(%)	Max. Effective Axial Force(kN)
12" Gas Injection	현대중공업	0.687	3.201	434.2	0.144	-1944
	WorleyParsons	0.694	2.265	439.2	0.175	-2498

타기관(WorleyParsons)의 선행연구 결과와 비교해 볼 때, 동등한 결과를 얻을 수 있었다. 미소한 해석결과값들의 차이는 슬리퍼를 포함한 해저면 모델링 방법에 의한 것으로 추정된다. Fig. 11 는 KP=0.687 부근에서의 측방향 이동된 파이프라인 형상을 보여준다. 이 지점은 해석에서 파이프라인 측방향 이동이 최대로 나타날 것으로 예상되는 지점이다.

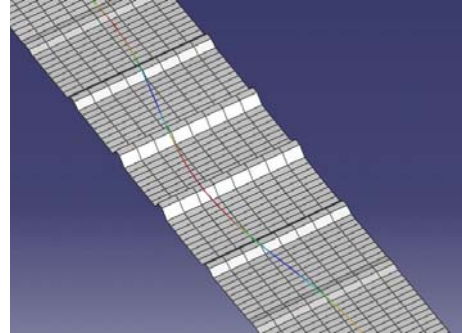


Fig. 11 Lateral amplitude at KP = 0.687

파이프라인의 von-Mises 응력을 Fig. 12 에 나타내었다. 최대응력이 발생하는 위치와 크기가 비교기관의 결과와 동등함을 알 수 있다. 최대값은 타기관의 결과와 비교하여 1.1%의 미소한 차이를 보인다. 최대응력의 발생 위치의 정도 높은 예측은 본 연구를 통해, 비선형 유한요소해석을 통해 열좌굴 해석기술을 적용하여 가능하였다.

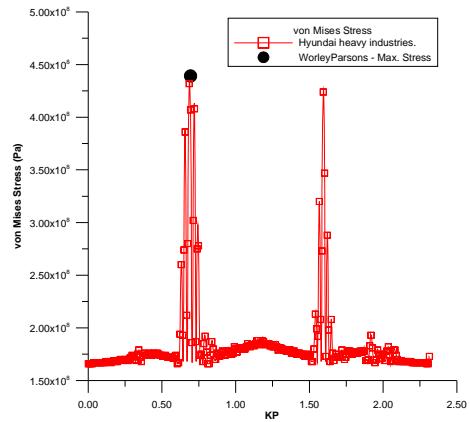


Fig. 12 von-Mises stresses along pipeline

파이프라인을 따른 등가소성변형률에 있어서도 최대 등가소성변형률의 발생 위치와 크기가 비교기관의 결과와 동등하게 나타났다(Fig. 13). 최대응력이 발생한 위치에서 최대변형률이 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이상의 해석결과들은 파이프라인의 열좌굴 안정성을 높이기 위한 개선조치의 핵심자료로 이용된다.

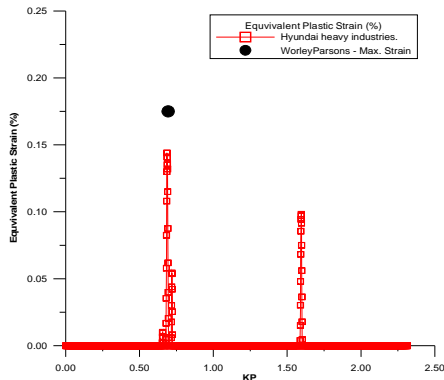


Fig. 13 Equivalent plastic strain along pipeline

5. 슬리퍼 마찰계수 변화를 통한 개선 방안 연구

전체 좌굴을 제어하기 위한 효과적인 방법으로 스네이크 레잉(snake-lay) 방법, 라인중양부 익스펜션 스푼(mid-line expansion spool) 방법, 그리고 좌굴 트리거/슬리퍼를 이용한 좌굴 제어방법 등이 개발되어 적용되고 있다(Kien et al. 2008). 각각의 방법이 장단점이 있으나, 고온/고압 하에서 작동되는 해저 파이프라인의 경우에는 비용측면에서 상대적으로 유리한 좌굴 트리거/슬리퍼 방법이 적용된다.

슬리퍼를 이용하여 전체 좌굴을 제어하는 방법은 다음과 같다.

- 파이프라인이 압축하중에 의해 전체적으로 뱀모양을 구성하며 축방향으로 움직일 수 있도록 슬리퍼를 설치한다.
- 축방향 이동으로 인해 파이프라인의 축방향 하중이 완화될 수 있도록 콘크리트 슬리퍼 상면에 마찰계수가 작은 재질을 부착한다.

적용된 파이프라인의 경우, 최대 등가소성변형률 0.144%이 허용한계(0.3%)에 다소 근접한다. 따라서, 설치 시의 불확실성을 고려하여 개선방안이 필요하다.

개선방안으로는 KP=0.687, KP=1.596 지점의 슬

리퍼 상면부에 마찰 계수가 작은 재질을 부착함으로써 축방향 하중을 완화시키는 방법을 택하였다.

개선조치 전후의 등가소성변형률을 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. 개선조치 후의 등가소성변형률이 0.05% 이하로 개선조치 전에 비해 크게 작아짐을 알 수 있다.

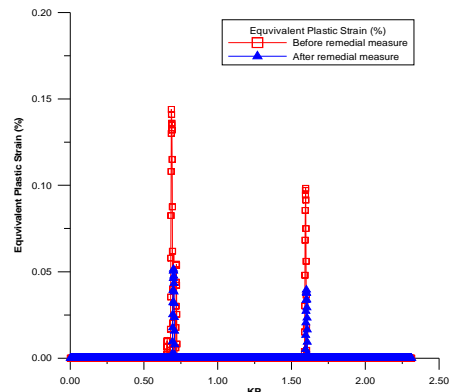


Fig. 14 Equivalent plastic strain along pipeline before and after remedial measure

파이프라인의 개선조치 전후의 유효축방향 하중을 Fig. 15에 비교하여 나타내었다. 개선조치 후의 파이프라인을 따른 축방향 하중의 크기가 개선조치 전에 비하여 최대값 기준으로 16% 정도 완화된 결과를 얻을 수 있다.

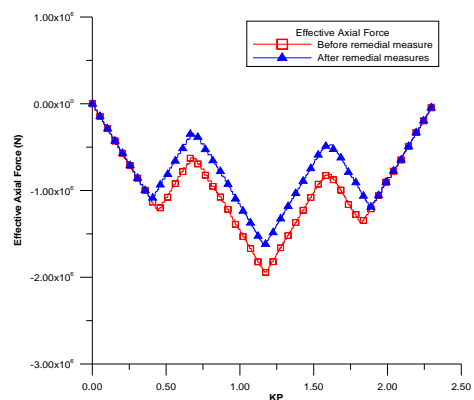


Fig. 15 Effective axial force along pipeline before and after remedial measure

6. 결론

3 차원 비선형 유한요소 해석법을 이용하여 고온/고압 하의 해저 파이프라인에 대한 열좌굴 해석방법을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ABAQUS 프로그램을 이용하여 해저 파이프라인의 고온/고압 열좌굴 현상을 모사할 수 있었다.

- 기술적으로는 열좌굴 해석 프로시저 정립 및 해석모델링 방법을 정립하였고, 해저 파이프라인의 응력·변형률을 평가하여 설계 개선에 적용하였다.

- 개발된 해석법을 파이프라인 해양설치공사에 적용하였고, 비교·검증 연구를 성공적으로 수행하였다.

- 해양공사 적용사례는 개발된 해석법의 우수성을 보여주었고 해저 파이프라인 열좌굴 해석 및 상세설계에 적용 가능함을 입증하였다.

참 고 문 헌

- Bai, Y. and Bai, Q., 2005, Subsea Pipelines and Risers, Elsevier.
- Bruton, D., Carr, M., Crawford, M. and Poiate, E., 2005, " The Safe Design of Hot On-bottom Pipelines with Lateral Buckling Using the Design Guideline Developed by the SAFEBUCK Joint Industry Project," SAFEBUCK JIP, Deep Offshore Technology.

- Collberg, L., Goplen, S. and Marley, M., 2005, " Design Guidences for HT/HP Pipelines," HOTPIPE JIP.
- DNV, 2000, Submarine Pipeline Systems, DNV-OS-F101.
- Klæbo, F., Giertsen, E. and Sævik, S., 2008, " Efficient Analysis of Offshore Pipeline Buckling on Uneven Seabeds," Proc. Of OMAE.
- Kien, L.K., Ming, L.S. and Maschner, E., 2008, " Design of High Temperature/High Pressure (HT/HP) Pipeline Against Lateral Buckling," Proc. Of Deep Offshore Technology.
- Hobbs, R.E., 1984, " In-Service Buckling of Heated Pipelines," Journal of Transportation Engineering, Vol. 110, No. 2, pp. 175-189.



< 양 승 호 >



< 정 종 진 >



< 이 우 섭 >



< 도 창 호 >