난형도에 따른 해양자원이송용 강관거동에 관한 연구

Behaviors of Steel Pipes for Ocean Resource Extraction Considering Ovality

마호성* · 조광일**

Mha, Ho-Seong · Cho, Kwang Il

Abstract

The ovality arising from production or installation can affect the responses of the steel pipes for ocean resource extractions. Ultimate strengths and the stresses occurring during installation are examined to see the effect of the ovality with various values upon the responses by using the detailed FEM analysis using shell elements. From results, the ultimate strength for bending moment decreases from 1% to 3% as the ovality increases from 0% to 6%, while the ultimate strength for the pressure decreases from 43% to 55%. The influence from the locating positions of steel pipes are also evaluated, showing that the stresses increase as the ovality increases. At the vessel, where the members are mainly under tensile forces, the stress varies at 0.01%. At the sagbend and seabed, the pressure exceeds the ultimate strength in the case of the ovality over 4%. It can be concluded that the ovality affects the pipe more highly under pressure than under bending moments or tensions. From results, steel pipes with the ovality over a standard criteria can create serious safety or stability problems. More rigorous attentions on ovality are desired to produce and install the steel pipes in the ocean.

Key words : Steel Pipe, Ovality, Ultimate strength, stress, behavior

요 지

강관의 제작 및 가설 시 발생할 수 있는 난형도가 해양자원이송용 강관거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 난형도를 가지는 강관의 극한강도와 가설 시 발생하는 응력을 상세유한요소 해석을 통해 분석하였다. 난형도가 0%에서 6%로 증가할 때 휨 모멘트에 대한 극한강도는 약 1~3% 감소한 반면 외압에 대한 극한강도는 약 43%~55% 감소하였다. 가설위치에 따라 난형도의 영향을 분석한 결과, 전체적으로 난형도가 증가함에 따라 강관에서 발생하는 응력이 증가하는 경향을 보였다. 주로 인장력이 작용하는 vessel 구간에서는 난형도 변화에 따른 응력 변화가 약 0.01%로 나타난 반면, 높은 외압이 작용하는 sagbend와 seabed 구간에서는 난형도가 4% 이상이 될 경우, 작용하는 외압이 강관의 극한강도를 초과하였다. 따라서 강관의 난형도는 인장력 또는 휨 모멘트 보다 외압에 의한 강관의 거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되며, 난형도가 기준을 초과할 경우 심각한 안전상 문제가 발생할 것으로 예상되므로 강관 제작 및 가설 시 철저한 난형도의 관리가 요구된다.

핵심용어 : 강관, 난형도, 극한강도, 응력, 거동

1. 서 론

20세기 산업화와 도시화가 심각해지면서, 도시의 인구 밀집 현상으로 인한 주거 공간, 사회간 시설 확보를 위한 공간 자원의 고갈과 에너지 문제의 심각성이 대두되고 있다. 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 대안 중 하나는 해양의 이용과 개발이다. 심해에서는 경제적 이유로 해상 플랫폼의 숫자를 줄이는 대신 해저 생산 시스템과 해저강관의 건설을 통해 여러 광구에서 동시에 생산을 가능하도록 하기 위해 개발이 진

행되어왔다. 해저강관은 석유나 가스 이외에도 물과 같은 다른 유체를 수송하는 수단으로도 중요하게 사용되고 있다. 가스나 석유 등을 수송하기 위한 수단으로 선박이 이용되기도 하나 근거리 수송이나 열악한 환경 하에서 수송해야 할 경우에는 해저강관에 의한 수송이 훨씬 효율적이고 경제적이다. 우리나라와 같이 가스나 석유 전량을 수입하는 국가에서는 수입되는 가스나 석유를 효율적으로 수송하는 수단을 강구하는 것도 중요하다.

최근, 급속하게 증가하는 원유와 가스의 소비에 따라 공급

*정회원, 호서대학교 토목공학과 교수(E-mail: mhah@hoseo.edu)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University

**교신저자, 정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원(Tel: +82-32-200-2462, Fax: +82-32-200-2479, E-mail: kicho@rist.re.kr)

Corresponding Author: Member, Senior Researcher, Research Institute of Industrial Science & Technology Steel Structure Research Division

이 부족하게 되고 소비지로부터 원거리의 자원개발이 증가하고 있다. 이에 부응하여 이러한 것들의 운송을 위한 수백~수천 길이의 강관이 세계 곳곳에서 건설 되고 있다(Sanderson *et al.*, 1999). 해저강관은 기본적으로 육상의 강관과 같은 방법으로 설계·시공되지만 육상의 강관에 비해 파력·조류력과 같은 열악한 해양환경에 노출되므로 가설 및 가동 시 손상을 입을 가능성이 있다. 특히, 석유이송 강관의 경우에는 사고가 발생하면 그 피해 규모가 크고, 환경오염, 어민피해 이외에도 해양환경에 미치는 악영향은 매우 크다(Hur *et al.*, 2007).

따라서 이상과 같은 이유로 해양용 강관의 경제성을 확보함과 동시에 구조적 신뢰도를 높이기 위한 해석적, 실험적 연구가 다각적으로 진행되고 있다. 본 연구에서는 다양한 환경조건에서 강관의 보다 실용적인 활용을 위해 해저의 수심에 따라 각각 다른 하중상태가 작용할 때 제원이 다른 두 종류의 강관을 난형도의 변화에 따라 강관에 발생하는 응력과 극한강도를 비교 분석하여 강관의 거동 분석을 하고자 한다.

2. 강관의 난형도(Ovality)

난형도는 강관 단면에 굽힘 등 외부로부터 힘을 받을 때 단면의 형상이 원형에서 타원형으로 변하는 현상을 말하며 노르웨이 선급 협회(DNV-OS-F101)에서는 해저강관 난형도의 최대허용범위를 3%로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 선급 협회(DNV-OS-F101) 기준보다 악조건의 난형도에 대해 검토하기 위하여 난형도는 선급 협회(DNV-OS-F101)에서 제시한 3%보다 2배 높은 6%의 난형도까지 고려하였다. 해석 모형의 난형도는 0%부터 2%씩 증가시켜 0%, 2%, 4%, 6%를 적용하였다. Fig. 1은 난형도에 따른 단면 형상을 나타낸 것이다.

Fig. 1. Ovality of Pipes

3. 대상구조물의 모형화 및 하중조건 선정

3.1 대상 구조물의 제원

본 연구에서는 노르웨이 선급 협회(DNV-OS-F101)의 규정인 $15 < D/t < 45$ 의 범위에 속하는 강관에 대해 영종도, 평택만 그리고 마산만 지역에서 실제 매설되어 사용되는

Table 1. Pipe Specification

	Pipe 1	Pipe 2	Unit
Diameter (D)	50.8	76.2	cm
Thickness (t)	1.9	1.75	cm
Modulus of Elasticity (E)	210000	207000	MPa
Poisson's ratio	0.3		-
Length	203.2	304.8	cm
Yield Strength	450	464	
D/t	26.74	43.54	-

두 종류의 강관(API 5L X65와 POSCO의 X70 Sour재)을 선정하여 해석모델에 적용 사용하였다. 각각의 강관에 대한 제원은 Table 1(Cho *et al.*, 2011)과 같다.

3.2 대상구조물의 모형화

유한요소해석 수행 시 구조물의 기하학적 형태, 지지조건, 하중재하의 적절한 방법과 요소의 크기 등은 해석의 결과에 영향을 미칠 수 있다. 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 Thick shell element인 S4R 요소를 사용하였다. 다양한 하중을 고려하여 pipe 1에 대해 다양한 난형도에 따른 응력 변화를 분석하였고, pipe 1과 pipe 2에 대해 난형도의 변화를 매개변수로 하여 극한강도를 비교 분석하였다. Fig. 2는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.11을 이용하여 두께가 얇은 원통형 구조물을 모형화 한 형상이다(ABAQUS User's manual 6.4).

Fig. 2. FE Model (Mha *et al.*, 2013)

3.3 가설 시 하중 조건

J-lay방법을 통한 강관의 가설 시 선박에서부터 해저면에 닿을 때까지 수심에 따라 강관에 작용하는 하중상태가 달라진다. 이를 고려하여 강관의 가설 시 vessel, sagbend, seabed로 3구간으로 분류하였다. Vessel구간은 강관 간의 인장력이 작용하고 sagbend구간은 강관의 가설 시 굽힘 과정이 생기며 수심에 따른 수압이 작용하고 seabed구간은 강관이 가설된 상태로서 수압과 압력이 작용하는 상태이다. Fig. 3에 강관의 가설 시 수심에 따라 취약부인 vessel, sagbend, seabed 부분에서의 하중상태를 모사하였으며, 강관 내부는 내압이 없는 조건으로 가정하였다. 각 구간 별로 적용한 하중은 Table 2와 같다(Cho *et al.*, 2011).

Fig. 3. Load Conditions During Installation (DML da Silva *et al.*, 2009)

Table 2. Load Cases

Location	Case	Value	Unit
Vessel ($x=0$ m)	Tension	690	kN
Sagbend ($x=-2188$ m)	Tension	122	kN
	Moment	302	kN-m
	Pressure	21.9	MPa
Seabed ($x=-2200$)	Tension	120	kN
	Pressure	22.0	MPa

3.4 경계조건

본 연구의 해석에서 고려된 강관은 구간마다 각각 다른 하중상태와 지지조건에 놓인다. 양쪽 끝단에서 인장력만 작용할 경우와 외압과 압축력이 작용할 경우는 일단고정 타단자유인 캔틸레버보의 경계 조건을 가정하였다. 외압 인장력, 휨 모멘트가 작용할 경우에는 휨 모멘트와 축 방향(길이 방향) 운동에 대해서 자유롭게 표현하기 위해 단순지지의 지점 조건인 일단은 힌지, 타단을 롤러의 조건으로 적용하여 다양한 하중조건을 적용할 수 있도록 경계조건을 적용하였다. 또한 강체요소를 이용하여 강관단부의 변위를 구속하였으며 원의 중심에 절점을 생성하고 그 절점에 하중을 가하였다. Fig. 4에 캔틸레버보와 단순보의 경계 조건을 나타내었다.

4. 강관의 거동분석

4.1 거동분석을 위한 평가위치 선정

해석모델의 단순하중에서부터 복합하중까지의 결과를 나타내기 위해 최대 응력이 발생하는 지점인 강관의 중앙부를 평가지점으로 선정하여 결과를 도출하였다. Node 1은 강관의 상단 지점이며 node 17은 강관의 하단 지점이다. Fig. 5는 강관 단면에서 평가위치를 나타내었다.

난형도에 따른 해양자원이송용 강관거동에 관한 연구

Fig. 4. Boundary Conditions of FE Models

Fig. 5. Evaluation Position of Pipes

4.2 대상강관의 극한강도 분석

본 절에서는 난형도의 변화에 따른 pipe 1 및 pipe 2 (Table 1)의 극한강도 변화를 분석하였다. 원통 셸과 같은 셸 구조물은 하중-변위 곡선상의 평형경로를 통하여 구조물의 극한강도를 예견할 수 있으며, 하중-변위 곡선상의 평형경로를 추적함으로써 구조물의 정확한 거동을 파악할 수 있다. 구조물의 붕괴해석 시에는 초기에 하중이 증가하다가 최고 하중에 도달하게 되고 최고 하중 이후로는 하중이 감소하게 되는 형태의 붕괴 곡선을 구할 수 있다. 탄소성 증분해석으로 최고 하중 이전의 하중이 증가하는 구간에서의 거동은 일반적

(a) Pipe 1

(b) Pipe 2

Fig. 6. Load-Displacement Curve of Pipes Under Moment Load

인 수치기법을 통해서 용이하게 해석이 되나, 최고 하중 이후의 거동에 대하여 해석할 때에는 최고 하중 이후에 강성행렬이 용이하지 않기 때문에 riks method의 방법으로 해석하여 강관이 해저에 가설될 때 강관의 극한강도를 도출하였다.

대상 모델인 pipe 1과 pipe 2가 휨 모멘트 및 외압을 받을 때 가장 큰 응력이 작용하는 부분인 중앙지점에서의 변위를 분석하여 최대 휨 모멘트 및 외압을 확인하였다. Fig. 6과 7은 휨 모멘트와 외압이 작용할 때 다양한 난형도에 따른 pipe 1과 pipe 2의 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다.

재료와 기하학적 비선형 거동을 동시에 고려하여 하중-변위 곡선 상에서 하중 최고값을 그 부재의 극한강도로 간주하였다. Fig. 6은 휨 모멘트 작용 시 부재의 중앙 지점에서의 처짐과 하중과의 관계를 곡선으로 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 극한강도까지 거의 선형의 거동을 보이며 극한강도 이후 강관의 저항력이 떨어지는 양상을 보이고 있다. 휨 모멘트의 강도는 난형도가 0%에서 6%까지 단면형상이 변형됨에 따라 pipe 1은 2308 kN·m, 2288 kN·m, 2267 kN·m, 2247 kN·m, pipe 2는 4677 kN·m, 4670 kN·m, 4645 kN·m, 4608 kN·m로 원형에서 타원형으로 될수록 극한강도는 작아짐을 알 수 있다. 이것은 원형에 가까울수록 아치효과로 인한 저항력이 증대되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 하중이 증가함에 따라 중앙부의 처짐은 어느 정도 연성거동을 보이고 있으나, 최고 하중 이후에 급격하게 강도가 감소하는 것을 보이고 있다.

Fig. 7은 외압 작용 시 부재의 중앙 지점에서의 처짐과 하중과의 관계를 곡선으로 나타내고 있다. 그림에서 나타난바와 같이 외압 같은 경우는 최고 하중에 도달한 후 연성거동 없이 급격하게 붕괴가 발생하면서 강도가 감소하였다. 외압의

(a) Pipe 1

(b) Pipe 2

Fig. 7. Load-Displacement Curve of Pipes Under External Pressure

최고 하중은 난형도에 따라 pipe 1은 34.4 MPa, 26 MPa, 21.8 MPa, 18.9 MPa, pipe 2는 22 MPa, 14 MPa, 11 MPa, 10 MPa로 나타났으며 휨 모멘트 하중이 작용하였을 때와 마찬가지로 난형도가 커질수록 극한강도가 작아짐을 알 수 있다. 한편 pipe 1이 J-lay를 통해 가설될 경우 강관에 가해지는 휨 모멘트는 302 kN·m(Table 2 참조)인 반면, Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 pipe 1의 극한강도는 2000 kN·m를 상회하는 것으로 나타났다. 즉 pipe 1이 다소 과다한 난형도를 가지고 있다고 해도, 휨 모멘트에 의한 가설 시 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다. 그러나 pipe 1이 J-lay를 통해 가설될 경우 강관에 가해지는 외압은 약 22(Table 2 참조)인 반면, Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이 난형도가 4% 이상인 강관의 극한강도는 외압보다 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 J-lay를 통한 가설 시, 난형도의 변화는 외압에 의한 파이프의 collapse에 더 큰 영향을 끼칠 것으로 판단된다.

4.3 강관 가설 중 위치별 난형도의 변화에 따른 응력변화 분석

구간에 따라 적용할 해석 모델과 강관의 구간 별 분석위치 및 하중상태를 Table 3과 Fig. 8에 나타내었다. 본 절의 분석은 pipe 1만을 대상으로 하였다.

셀요소의 응력은 곡면 특성상 전체 좌표계만으로 표현이 어려워 국부좌표계를 병행하여 해석하였다. Fig. 9는 셀요소에서의 좌표계로써 본 연구에서는 작용면인 셀의 1, 2방향을 사용하여 축 방향 응력, 원주 방향 응력 및 von mises 응력을 도출하였다.

Table 3. Analysis Cases Considering Various Ovality

Case	Area	Ovality (%)
Pipe 1	Vessel	0
		2
		4
		6
	Sagbend	0
		2
		4
		6
	Seabed	0
		2
		4
		6

Fig. 8. Load Conditions for Various Position of Pipe

Fig. 9. Local Axes of Shell Element

4.3.1 Vessel 구간의 응력변화

Fig. 10에서 알 수 있듯이 강관의 난형도가 증가함에 따라 응력 변화가 커지는 것으로 나타났다. 또한 강관의 형상이 타원형으로 단면형상이 변화될 때 단축 및 장축의 위치에서 각각 미세한 인장응력 및 압축응력이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 10(c)의 von mises 응력에서는 난형도가 0%일 때에는 균등한 응력(33.47 MPa)이 발생하나 난형도가 커질수록 응력도 커지는 것으로 나타났다. 단, 그 차이는 0.0002~0.0032 MPa 정도로 작은 값이다. 전체적인 결과를 확인해본 결과, 난형도가 축

난형도에 따른 해양자원이송용 강관거동에 관한 연구

(a) Circumferential Direction stress

(b) Axial Direction stress

(c) Von mises stress

Fig. 10. Stress on Pipes Section in Vessel Position

방향 인장력을 받는 강관에 미치는 영향은 극히 적은 것으로 판단된다.

4.3.2 Sagbend 구간의 응력변화

Sagbend 구간에서는 Fig. 11에서 알 수 있듯이 상부의 응력이 하부에 비해 높게 나타났다. Fig. 11(c)의 von mises 응력에서는 난형도가 0%에서 6%로 변화함에 따라 최대 551 MPa, 559.6 MPa, 585.8 MPa, 599.6 MPa의 국부 응력이 발생하고 난형도가 클수록 국부 응력도 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 앞서 4.2절에서 언급한 바와 같이 난형도가 4% 이상이 될 경우 외압이 강관에 극한강도를 초과하여 collapse가 발생하게 된다. 즉, 본 연구의 대상 강관의 경우 기준에 따라 난형도를 3%로 관리하지 못할 경우 난형도에 의해 안전상에 치명적 문제가 발생할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 분석에서는 모든 경우에 강관의 일부분에서 항복응력을 초과하게 되므로 최대응력의 비교는 큰 의미가 없는 것으로 판단되며 Fig. 11(c)와 같이 난형도가 증가할

(a) Circumferential Direction stress

(b) Axial Direction stress

(c) Von mises stress

Fig. 11. Stress on Pipes Section in Sagbend Position

경우 항복응력을 초과하게 되는 영역이 강관 상부에서 하부로 확장되는 것으로 나타나 향후 난형도의 변화에 따른 collapse의 메커니즘을 분석하여 이에 대한 대응책을 제안할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.3.3 Seabed 구간의 응력변화

Fig. 12에서 알 수 있듯이 난형도가 2%, 4%, 6%일 때는 비슷한 형상이 나타났으나 난형도가 0%일 때 다른 형상이 나타났다. 이는 타원형에서는 단축부분에 하중을 집중적으로 받는 형태이고 원형에서는 모든 방향에서 균등하게 하중을 받기 때문으로 판단된다. Fig. 12(c)의 von mises 응력에서는 난형도 0%에서 6%로 변화함에 따라 최대 576.6 MP, 499.8, 529.4, 579.5의 응력이 나타나 난형도가 6%일 때 가장 큰 응력을 보였다. Seabed 구간도 sagbend 구간과 같이 외압이 지배적인 하중이므로 그와 유사한 응력분포 및 변화를 나타내었다.

5. 결 론

강관의 극한강도 및 가설 시 응력을 비교분석하기 위해 난

(a) Circumferential Direction Stress

(b) Axial Direction Stress

(c) Von mises Stress

Fig. 12. Stress on Pipes Section in Seabed Position

형도를 매개변수로 한 상세유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 강관의 난형도 변화에 따른 극한강도의 변화를 검토한 결과, 난형도가 0%에서 6%로 증가함에 따라 휨 모멘트에 대한 극한강도는 약 1~3% 감소한 반면 외압에 대한 극한강도는 약 43~55% 감소하였다. 즉, 강관의 난형도는 외압에 의한 강관의 거동에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- 2) J-lay에 의한 강관 가설 시 각 위치에 따라 난형도의 영향을 분석한 결과, 전체적으로 난형도가 증가함에 따라 강관에 발생하는 응력이 증가하는 경향을 보였다.
- 3) 주로 인장력이 작용하는 vessel 구간에서는 난형도의 변화에 따른 응력의 변화가 약 0.01%로 나타나 그 영향이 미미한 것으로 판단된다. 반면, 높은 외압이 작용하는 sagbend와 seabed 구간에서는 난형도가 4% 이상일 경우, 작용하는 외압 22에 비해 강관의 극한강도가 더 작기 때문에 안전성 문제가 발생할 것으로 예상되어 강관 제작 및 가설 시 철저한 난형도의 관리가 요구된다.

본 연구에서는 강관의 다양한 단면형상이 강관에 미치는

영향을 검토하기 위해 유한해석 프로그램을 이용한 극한강도 및 응력을 비교분석하였다. 이를 통해 강관의 거동특성 분석을 위한 기초자료를 제공하고 향후 관련 연구에 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 향후 연구에서는 다양한 매개 변수에 대해서 해양강관의 거동을 분석하여 다양한 환경에서 강관의 활용도가 증대 될 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임 (2012-0274)

References

ABAQUS User's Manual 6.4.
 Andrew P, Martin T, Si H, Murray A and Stephen Booth (2006) Full-scale International Journal impact tests on pipelines, *Impact Engineering*, Vol. 32, pp.1267-1283.
 API (2007) Specification for Line Pipe, API specification 5L, 44th edition, October 1.

Cho, W.Y., Kim, K.-S., and Cho, K.I. (2011) Plastic Analysis and Evaluation of J-laying Capacity for Offshore Linepipe, *Journal of Rist*, Vol. 25, No. 4, pp. 141-149.
 Danilo Machado Lawinsky da Silva, Carl Horst Albrecht, Breno Pinheiro Jacob (2009), A computational system for subsea pipe-laying simulation, *International Journal of modeling and simulation for the petroleum industry*, Vol. 3, No 1.
 DET NORSKE VERITAS, DNV (2010) Offshore Standard OS-F101, Submarine Pipeline Systems.
 Hur, D.S., Kim, C.H., and Kim, D.S. (2007) Wave-Induced Soil Response around Submarine Pipeline, *Journal of The Korean Society of Ocean Engineers*, Vol 21, No. 1, pp. 31-39.
 Mha, H.-S., Cho, K.I. and Jang, H.S (2013) Effect of Steel Pipe Ovality upon the Structural Behaviors of at the Various Locating Positions in the ocean, *Proceedings of the 24th annual conference, Korean Society of Steel Construction*, Vol. 14, No. 1, pp. 87-88.
 Sanderson N., Ohm R., and Jacobs M. (1999) Study of X-100 line Pipe Costs Point to Potential Savings, *Journal of the Oil and Gas*.

-
- © Received September 16, 2013
 - © Revised September 17, 2013
 - © Accepted September 25, 2013