

심해저 파이프라인과 굽힘 제한 장치의 다중물체 접촉 해석을 통한 구조 최적설계

노정민·하윤도[†]
군산대학교 조선해양공학과

Multi-Body Contact Analysis and Structural Design Optimization of Bend Restrictors for Subsea Pipelines

Jungmin Noh·Youn Doh Ha[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The offshore subsea platforms are connected to subsea pipelines to transport gas/oil from wells. The pipe is a multilayered structure of polymer and steel for compensating both flexibility and strength. The pipe also requires reinforcement structures to endure the extreme environmental conditions. A vertebrae structure of bend restrictors is one of the reinforcement structures installed to protect the subsea pipe from excessive bending deformations. In this study, structural behaviors of the subsea pipeline with bend restrictors are investigated by the multi-body contact analysis in Abaqus 6.14-2. Contact forces of each bend restrictor extracted from the multi-body contact analysis can be boundary conditions for topology design optimization in Altair Hyperworks 13.0 Hypermesh-Optistruct. Multiple design constraints are considered to obtain a manufacturable design with efficient material usage. Through the multi-body contact analysis with optimized bend restrictors, it is confirmed that the bending performance of the optimized design is enhanced.

Keywords : Bend restrictor(굽힘 제한 장치), Contact force(접촉력), Multi-body contact(다중 물체 접촉), Pipe reinforcement structure(파이프 보강 구조물), Topology design optimization(위상 최적 설계)

1. 서론

화석 에너지 의존도가 증가함에 따라 인근 해의 화석에너지가 고갈되어 심해에서의 화석 에너지 채굴이 증가하는 추세이다(LUKOIL, 2013). 따라서 심해저에 있는 화석 에너지 생산에 대한 관심이 증가하였고, 최근에는 미국 및 유럽의 극소수 업체뿐만 아니라 국내에서도 관련 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 심해저 생산 시스템은 해저 석유 자원 생산을 위해 해저 면에 설치되는 석유/가스 생산시설로 생산부터 수송, 제어시스템으로 이루어져 있다(Ha, 2015). 심해저 시스템은 해상 시스템과 비교하여 공간 확보와 생산성 및 경제성이 높다. 심해저 시스템 중 생산한 원유/가스를 수송하는 파이프라인은 내부에는 뜨거운 원유가 흐르며 심해저에 설치되기 때문에 고온 및 고압에 견딜 수 있는 재료가 사용되어야 한다. 파이프라인은 고온, 고압뿐만 아니라 해저 환경에 의해 굽힘, 진동이 발생할 수 있으며 파이프라인

의 설치 시 발생하는 장력이 발생할 수 있다. 이에 의해 파이프라인에 피로가 쌓여 파괴까지 이를 수 있으며 한번 파손되면 보수 및 교체에 큰 비용이 들어간다. 파이프라인의 과도한 굽힘을 방지하기 위해 굽힘 제한 장치(bend restrictor), 굽힘 보강재(bend stiffener)와 같은 파이프 보강구조물이 사용된다. 파이프 보강구조물은 파이프라인의 파이프가 받는 응력과 굽힘을 완화하고 안정성을 강화하여 파이프라인의 파손을 방지한다(Bai & Bai, 2005). 파이프 보강구조물은 해수에 설치되므로 내 부식과 내마모성이 강한 재료가 사용되어야 하며 구조물의 복원성을 고려하였을 때 탄성이 좋은 재료가 사용되어야 한다(Ha, 2015).

본 연구에서는 파이프 보강 구조물 중 굽힘 제한 장치의 위상 최적화를 진행하였다. 굽힘 제한 장치는 일반적으로 여러 개의 굽힘 제한 장치가 서로 체결되며 말단에 접속 구(end fitting)가 부착된 상태로 파이프라인에 적용된다. 다수의 굽힘 제한 장치들과 파이프라인이 서로 접촉하여 상호 작동하는 상황을 다중 물체

접촉(multi body contact) 조건을 고려한 동적 구조해석을 통해 검토하였다. 이때 다중 물체 구조 해석을 통해 얻은 접촉력을 위상 최적 설계의 해석 조건으로 사용하였다. 더욱 적은 재료로 구조 변형이 최소화되도록 문제를 구성하고, 제작성을 고려한 제약 조건을 추가하여 안정성, 경제성, 제작성을 갖춘 굽힘 제한 장치 설계안을 도출하였다. 최적화된 굽힘 제한 장치를 통해 다중 물체 접촉 동적 구조해석을 진행하고 파이프라인의 최종 굽힘 반경(bending radius)을 비교하여 최적화된 굽힘 제한 장치 모델을 검증한다.

본 연구에서 굽힘 제한 장치 및 파이프 모델링과 해석 결과 검증을 위한 전/후처리 과정(pre/post-processes)은 Altair hyperworks 13.0 hypermesh와 hyperview를 사용하였다. 다중 물체 접촉 동적 구조 해석을 위해서 Abaqus 6.14-2 explicit을 사용하였으며, 도출된 접촉 조건을 통한 굽힘 제한 장치의 위상 최적 설계를 위해 Altair hyperworks 13.0 hypermesh - Optistruct를 사용하였다. 또한 Altair hyperworks 13.0 hypermesh - Ossmooth를 사용해 최적 설계안을 반영한 해석 모델을 제작하여 Abaqus를 통한 동적 구조해석을 다시 수행한다(Fig. 1).

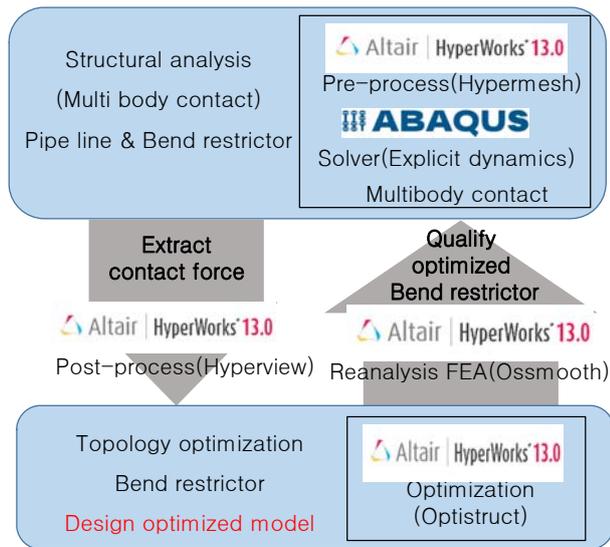


Fig. 1 Analysis process

2. 심해저 시스템

2.1 가변형 파이프라인 (flexible pipeline)

심해저에 설치되는 가변형 파이프라인(Fig. 2)은 규정된 상용 제품이 아닌 구매자의 의견에 따라 매우 다른 종류의 파이프라인이 제작될 수 있다. 파이프라인은 여러 개의 층으로 구성되어 있으며 층의 종류와 수는 가변형 파이프라인의 종류에 따라 다르지만 구조는 상대적으로 유사하며 이를 표준화하기 위해 API RP 17B (API, 2018)에서는 크게 3가지의 파이프라인 종류를 정의한다(Table 1).



Fig. 2 Flexible pipe line

Table 1 Classification of standard, unbonded flexible pipes (Braestrup et al., 2007)

Main structural layer	Product family I	Product family II	Product family III
Internal carcass		×	×
Inner liner	×	×	×
Pressure armour	×		×
Intermediate sheath	×*		
Tensile armour	×	×†	×
Outer sheath	×	×	×

* The use of an intermediate sheath is optional

† The cross-wound tensile armour may be applied with a lay angle close to 55° to balance radial and axial loads

본 연구에서는 Table 1의 family III를 고려하였다. family III 가변형 파이프라인의 경우 Fig. 3과 같이 5개의 층으로 구성되어 있다. 이너 라이너(inner liner)는 가변형 파이프라인의 가장 내부에 존재하는 층으로 내부에 흐르는 석유의 누설 방지 장벽 역할을 한다. 카카스(carcass)는 외부 압력에 의해 파이프가 압축되어 파괴되는 것을 방지하며 이너 라이너를 보호하는 역할을 한다. 압력 아머(pressure armour) 층은 가변형 파이프라인의 좌굴이 심해져 카카스가 파괴될 경우 파이프라인이 붕괴할 가능성이 증가하기 때문에 카카스 층을 지지하는 역할을 하며 파이프의 외압과 내압을 견디도록 제작된다. 인장 아머(tensile armour)는 파이프 중량과 외부 인장하중을 견딜 수 있도록 제작된다. 외부 피복(outer sheath)는 폴리머 소재로 구성되며 외부환경에 의한 부식이나 해수 침투를 방지한다 (Braestrup et al., 2007).

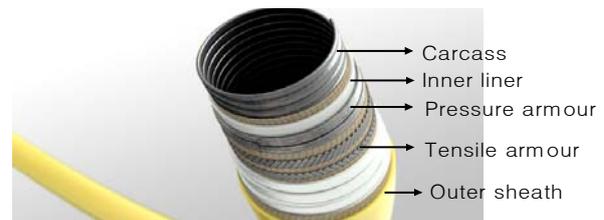


Fig. 3 The basic layers in flexible pipe line

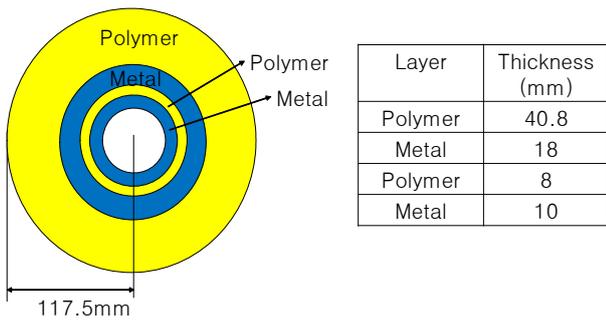


Fig. 4 Section and thickness of flexible pipe line

본 연구에서는 파이프라인은 심해저에서 사용되는 가변형 파이프라인 (Autar, 2007)을 참고하였다. 다만 실제 파이프라인에는 매우 얇은 층이 다수 존재하여 해석 요소 구성 시 매우 많은 요소가 요구되어 비효율적이며 얇은 층의 미세 요소를 고려한 부정확한 해석이 수반될 수 있다. 따라서 고전 적층판 이론을 통해 기존의 파이프라인 구조 특성은 유지하되 Fig. 4와 같이 비교적 단순화한 파이프라인을 찾아서 구성하였다 (Noh & Ha, 2016). Fig. 4는 단순화한 가변형 파이프라인의 단면 및 각 층의 두께를 나타낸다. 파이프라인을 구성하는 각각의 층은 강철(steel) 또는 폴리아미드(polyamide) 소재로 구성된다. Polyamide 11은 가변형 파이프라인에서 가장 많이 사용되는 폴리머 소재이며 우수한 내열성을 가진다. 또한 Polyamide 11은 파이프 내의 원유와 파이프 외부의 해수 누출에 좋은 저항성을 가지도록 개발됐다 (Johansen et al., 2015). 이처럼 여러 층으로 구성하여 폴리머와 나선형으로 감긴 강철 층을 조합하여 복잡한 파이프 벽을 설계함으로써 낮은 굽힘 강성과 높은 축 방향 인장 강성을 가지는 파이프라인을 제작한다. 파이프라인을 구성하는 강철은 AISI 304, AISI 316(Table 2)이며 물성치는 NOV flexible 사에서 제공한 물성치를 사용한다 (Johansen & Sørensen, 2015). 본 연구에서 파이프라인은 탄성 영역 내에서 변형하므로 탄성계수 (E-modulus), 포아송비(Poisson's ratio), 밀도(density)를 고려한다. AISI 304, AISI 316두 재료의 탄성계수, 포아송비, 밀도가 동일하므로 AISI 304, AISI 316을 하나의 Steel 재료로 사용하였다 (Table 3).

Table 2 Properties of AISI 304 and AISI 306

Properties	Unit	AISI 304	AISI 316
E-modulus at 23°C	MPa	193	193
Poisson's ratio	-	0.29	0.29
Density	kg/m ³	8,000	8,000
Yield strength at 23°C	MPa	215	193

2.2 굽힘 제한 장치(bend restrictor)

파이프 보강 구조물은 파이프라인의 굽힘을 완화하고 파손을 방지한다. 그중 굽힘 제한 장치는 파이프라인의 굽힘을 완벽하게

차단하기보다 과도한 굽힘을 방지하여 파이프라인이 일정 각도 이상으로 굽혀지지 않도록 하는 역할을 한다. Fig. 5와 같이 여러 개의 굽힘 제한 장치가 체결된 상태로 파이프에 설치되며 주로 정적 하중이 나타나는 곳에 적용된다 (Bai & Bai, 2005). 굽힘 제한 장치의 끝부분에는 다른 굽힘 제한 장치와의 체결을 위해 굽힘 제한 장치의 머리 모양으로 여백이 존재한다. 굽힘 제한 장치는 Fig. 5와 같이 대칭하는 두 구조물로 이루어져 있다. 실제 굽힘 제한 장치를 제작하는 기업(Telleborg)의 설계 도안 (Green, 2015)을 참고하여 설계했으며 치수는 Fig. 6과 같다. 굽힘 제한 장치의 중량은 파이프라인의 변형에 영향을 미치지 않아야 하므로 가벼운 재질이어야 하며 보수 및 교체 시 큰 비용과 시간이 필요하므로 내구성이 좋은 재료로 구성되어야 한다. 굽힘 제한 장치의 재료는 주로 열경화성 폴리우레탄(thermoplastic polyurethane)이 사용되며 그중 TPU S-60D 재료를 사용하였다. 물성치는 Table 3과 같다.

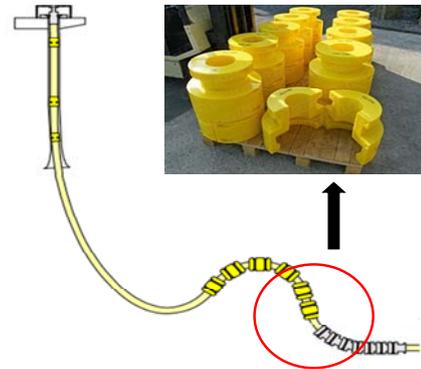


Fig. 5 Bend restrictor

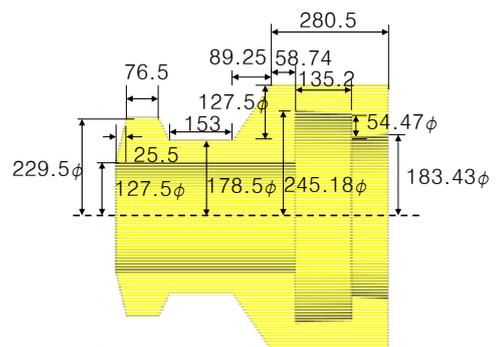


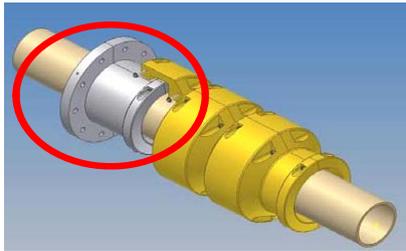
Fig. 6 Dimension of bend restrictor (mm)

Table 3 Material properties

Properties	Unit	Polyamide 11	Stainless Steel	TPU S-60D
E-modulus at 23°C	MPa	320	193	186
Poisson's ratio	-	0.4	0.29	0.4
Density	kg/m ³	1,050	8,000	1,250
Yield strength at 23°C	MPa	27	193	36

2.3 접속 구(end fitting)

접속 구(end fitting)는 파이프라인의 끝단에 위치하며 고정하는 역할 또는 굽힘 제한 장치와 해저 시설을 연결하는 역할을 한다 (Fig. 7). 굽힘 제한 장치 생산 기업의 설계 도안 (Green, 2015)을 참고하여 Fig. 8과 같이 설계하였으며, Table 3에 표기된 stainless steel 재료로 제작된다.



(a)



(b)

Fig. 7 End fitting

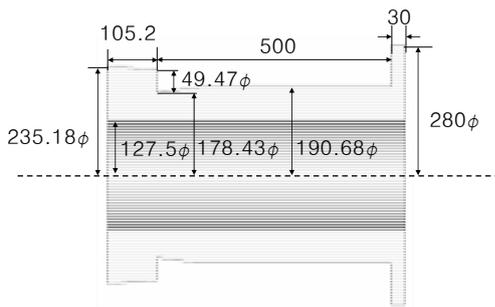


Fig. 8 Dimension of end fitting (mm)

3. 다중 물체 접촉 해석

3.1 해석 조건

본 연구에서는 가변형 파이프라인의 굽힘 변형이 나타나는 곳에 굽힘 제한 장치가 설치된 모델의 변형(Fig. 5)을 표현하기 위해 Fig. 9와 같이 해석 모델을 구성한다. 5 m의 가변형 파이프라인에 5개의 굽힘 제한 장치가 체결되어 있으며 Fig. 7-(a)와 같이 굽힘 제한 장치의 끝부분에 접속 구를 설치한다(Fig. 9). 해석

모델을 구성하는 요소는 3D 솔리드 연속체 요소이며 8개의 노드로 이루어진 정육면체 요소이다. 본 연구에서는 두 개의 상용 해석 프로그램인 Abaqus와 Hypermesh를 호환하여 사용하며 사용된 정육면체 요소는 Hypermesh에서는 HEX8, Abaqus에서는 C3D8R이며, 8절 점 감차 적분 솔리드 요소이다. 가변형 파이프라인의 요소는 40,000개이며 개별 굽힘 제한 장치의 요소는 324,960개, end fitting의 요소 개수는 247,200개이다.

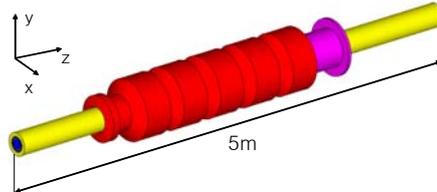


Fig. 9 Analysis model(flexible pipeline, bend restrictor, endfitting)

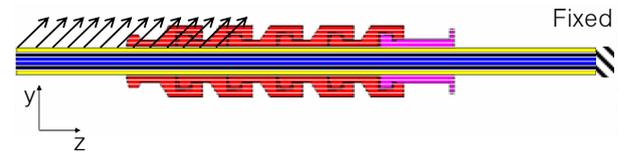


Fig. 10 Boundary condition and load condition of model

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 변형 현상을 모사하며 굽힘 제한 장치의 체결이 풀리지 않는 하중을 부여하기 위해 여러번의 해석 테스트를 거쳐 파이프라인의 길이 방향으로 단위 부피(m³) 당 80KN, 높이 방향으로 단위 부피(m³) 당 280KN 크기의 하중을 부여하였으며(Fig. 10) 하중은 해석이 종료되는 시점(50초)까지 선형 증가한다. 파이프라인의 길이 방향 중 접속 구가 부착되어 있는 끝단은 모든 자유도를 구속하고 반대편 끝단 부터 2 m에 해당하는 부분은 파이프의 안쪽에 하중을 가하였다. 심해저 파이프라인은 변형 시 굽힘 제한 장치, 가변형 파이프라인, 접속 구에서 연쇄적으로 다중 접촉이 발생한다. 따라서 Abaqus 다중 접촉 해석 시 접촉이 많은 부분에 발생할 경우 사용하는 접촉 조건인 일반 접촉 조건(general contact condition)을 적용하였다. 굽힘 제한 장치는 해양 환경에서 정적 하중이 나타나는 부분에 적용되기 때문에 굽힘 제한 장치와 가변형 파이프라인의 거동이 유체에 큰 영향을 미치지 않는다. 상용 굽힘 제한 장치 성능을 평가하는 시험(Fig. 11)도 해수 상태가 아닌 육상에서 천천히 굽힘 하중을 가하여 정적 하중 상태에서 수행된다 (Supergrip, 2018).

본 연구에서는 상용 굽힘 제한 장치 성능 평가 시험과 동일하게 건조한 상태에서 파이프라인과 접속 구를 고려한 해석을 진행한다. 또한, 하중에 따른 변위 또는 회전이 크게 발생하는 대변형이 나타나므로 기하학적 비선형을 고려한다. 모델의 크기에 비해 해석 시간이 상대적으로 짧고 대변형이 가능하며 일반 접촉 조건 조건을 정의할 수 있는 명시적 동역학(explicit dynamics) 해석을 진행하였다.



Fig. 11 Bend restrictor test (Supergrip, 2018)

파이프라인과 굽힘 제한 장치의 구조 해석 결과 Fig. 12와 같이 변형되었으며 이는 굽힘 제한 장치의 위상 최적 설계 후 검증 을 위한 기준이 된다. 굽힘 제한 장치의 접촉력은 후후 진행되는 위상 최적화의 경계조건 및 하중 조건으로 사용된다. 본 연구에 서는 다른 굽힘 제한 장치와 체결되지 않는 시작부와 접속 구와 연결되는 끝단부 그리고 시작부와 끝단부 사이에 존재하는 중앙 부로 나누어 세 부분의 최적화를 진행하기 위해 세 부분의 접촉 력을 추출한다. 시작부 및 끝단부는 실제 굽힘 제한 장치가 설치 된 시작부, 끝단부의 접촉력을 추출하였고 중앙부에서는 세 번째 에 설치된 굽힘 제한 장치에서 가장 큰 접촉력이 나타났기 때문 에 가장 큰 하중에서도 견딜 수 있는 구조물을 최적화하기 위해 세 번째에 설치된 굽힘 제한 장치의 접촉력을 중앙부의 대표 접 촉력으로 사용하였다(Fig. 13).

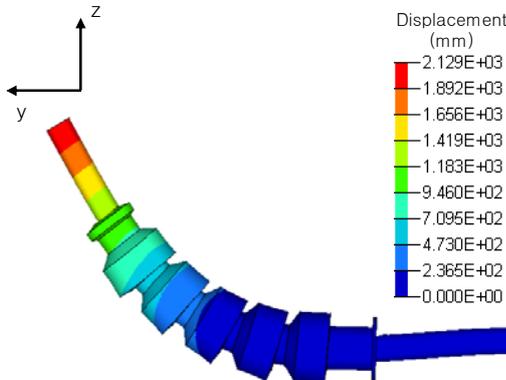


Fig. 12 Displacement contour

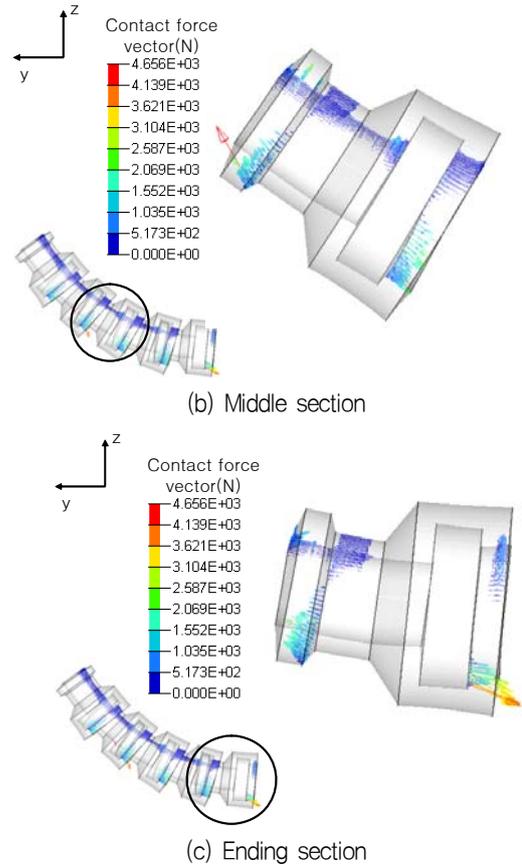
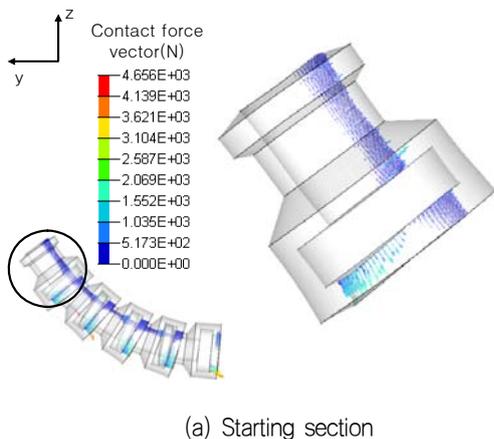


Fig. 13 Contact force contour of three part

4. 위상 최적 설계

4.1 위상 최적 설계 이론

최적 설계는 설계 변수(design variable), 제한 조건 (constraints), 목적 함수(objective function)를 통해 정식화되며 크게 치수(size) 최적화, 형상(shape) 최적화, 위상(topology) 최 적화로 구분된다. 이 중 위상 최적 설계는 구조물을 구성하는 다 공성의 물질 내부에 존재하는 재료의 밀도를 설계 변수로 하여 제한된 재료량에서 최고의 강성을 갖는 구조를 설계하여 최적의 재료 분포를 찾는 방법 (Bendsøe & Sigmund, 2003)으로 대표 적으로 균질화법(homogenization)과 밀도법(density method)으 로 구분된다. 균질화법은 구조물의 설계 영역을 유한개의 메쉬 (mesh)로 나누어 각 메쉬의 구멍의 크기와 방향이 설계 변수 (design variable)가 되며 메쉬가 다른 레이아웃을 가질 수 있다. 따라서 균질화법을 통해 단위 메쉬의 등가 물성치를 구한다 (Altair, 2015). 그러나 균질화법은 설계 변수의 정의가 어렵고 도출된 최적화 모델에 미세한 다공성이 발견될 수 있어 제조적인 측면에서 큰 비용이 소모된다 (Lee et al., 2007). 밀도법은 각 메쉬에서의 재료의 상대 밀도가 설계 변수로 사용되며 0에서 1 의 값을 갖는다. '0' 일 경우 재료가 존재하지 않는 빈 영역이며 '1' 일 경우 재료가 존재하는 영역이다. 중간 밀도(intermediate

density)는 허구의 재료(fictitious material)로 정의된다. 물질의 강성은 재료의 밀도에 대해 선형 관계식 (1) 같이 정의되며 식 (1)에서 p는 penalization factor를 나타낸다. 보통 2에서 5의 값을 갖는다. E_i 와 ρ_i 는 각각 중간 강성 계수(intermediate stiffness)와 중간 밀도를 나타낸다 (Altair, 2015). 본 연구에서 최적화 (optimization) 프로그램으로 Altair Hyperworks 13.0 Hypermesh - Optistruct를 사용하였으며 Optistruct에서는 밀도법을 통해 위상 최적화가 이루어진다.

$$\rho^p = \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right)^p = \frac{E_i}{E_0} \quad (1)$$

본 연구의 설계 변수는 상대적 재료 밀도이며 컴플라이언스 최소화를 목적으로 한다. 이는 구조물의 변형 에너지를 최소화 되게 함으로써 구조물의 강성을 최대로 하는 최적화 모델을 도출하도록 한다. 기존 모델 재료량의 70%가 사용되도록 제한 조건을 설정하였다. 또한, 다중 접촉 해석 결과 추출된 접촉력을 위상 최적 설계를 위한 경계조건과 하중 조건으로 사용하였으며 실제로 제작이 가능한 최적화 모델을 도출하기 위해 요소의 크기를 제한하였다. 최적화 모델의 요소가 부드러운 형상을 가질 수 있도록 요소 크기의 최솟값과 최댓값을 제한하였으며 사이클링 패턴 그룹화(cycling pattern grouping) 조건을 부여하여 원주 방향으로 동일한 패턴이 반복되도록 하였다. 본 연구에서는 체결 장치는 따로 고려하지 않았으나 사이클링 패턴 그룹화 조건에 의해 어떤 방향에서도 체결 장치가 적용될 수 있도록 제작하였다. 이처럼 위상 최적 설계를 통해 안정성, 경제성, 제작성을 갖춘 굽힘 제한 장치의 위상 최적화 모델을 도출한다.

4.2 설계/비설계 영역 지정

굽힘 제한 장치의 위상 최적 설계를 위해 설계 변수인 재료 밀도의 변화가 있는 부분과 없는 부분을 정의한다. 설계 영역 (design area)은 위상 최적 설계 시 재료의 분포가 변하는 영역을 뜻하며 비설계 영역(non-design area)은 위상 최적 설계를 위한 구조 해석은 진행되나 위상 최적 설계 시 재료 분포가 변하지 않는 영역을 뜻한다. 시작 부의 상측 외부는 가변형 파이프라인의 굽힘 변형에 큰 영향을 미치지 않으며 다른 굽힘 제한 장치와 체결되지 않기 때문에 비설계 영역으로 정의된다. 시작 부의 상측 내부는 가변형 파이프라인과 접촉하며 하측 내부는 다른 굽힘 제한 장치와 접촉하므로 비설계 영역으로 정의된다 (Fig. 14).

중앙부와 끝단부는 시작부와 달리 상측 외부가 다른 굽힘 제한 장치와 체결한다. 따라서 재료가 분포하지 않게 될 경우 굽힘 제한 장치가 다른 굽힘 제한 장치와 체결하지 못하므로 상측을 비설계 영역으로 정의한다. 상측 내부는 가변형 파이프라인과 접촉하며 하측 내부는 굽힘 제한 장치 또는 접속 구와 접촉하므로 Fig. 14와 같이 비설계 영역을 정의한다.

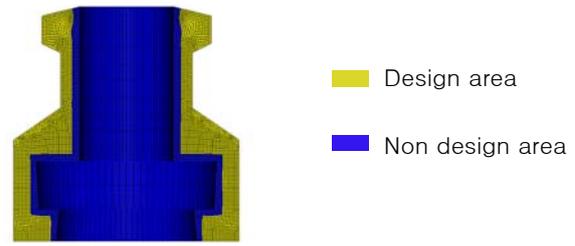


Fig. 14 Design area of starting section

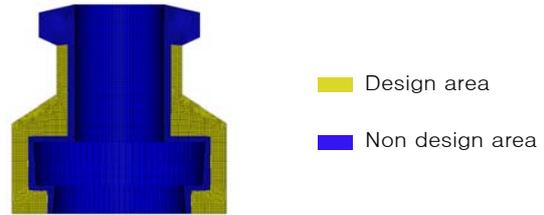


Fig. 15 Design area of middle and ending section

4.3 위상 최적 설계 결과

위상 최적 설계를 통하여 Figs. 14, 15의 기존 모델에 대해 Fig. 17과 같은 최적화 모델이 도출되었으며 세 가지 위상 최적화 모두 컴플라이언스가 최솟값으로 수렴하여 목적함수를 만족하였다(Fig. 18). 시작부, 중앙부, 끝단부 모두 비 설계 영역의 재료 분포는 변하지 않았으며 설계 영역의 재료량은 경계 조건 및 하중 조건으로 사용되었던 접촉력에 기반을 두어 가용 재료량 70%의 제한 조건을 만족하는 수준으로 감소하였다. 시작부는 기존 모델 대비 70.3%의 재료량을 가지며 상측 외부와 목 부분 외부에 접촉력이 존재하지 않아 재료가 분포하지 않는다. 또한 하측 외부의 재료량이 중앙부와 끝단부와 비교하면 분포되어 있는데, 이는 가용 재료량 70% 중 상측과 목 부분에 존재하는 재료량이 중앙부, 끝단부와 비교하면 상대적으로 적기 때문에 하측에 존재하는 재료량이 증가한 것이다. 중앙부와 끝단부는 다른 굽힘 제한 장치와의 체결을 위해 상측 외부를 비설계 영역으로 정의하여 재료의 분포가 변하지 않았으며 목 부분에 재료가 분포되어 있다. 중앙부와 끝단부는 각각 71.8%, 69.88%의 재료량을 가진다.

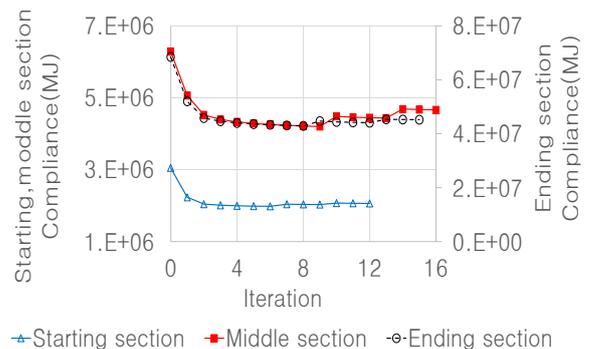


Fig. 16 Compliance convergence graph

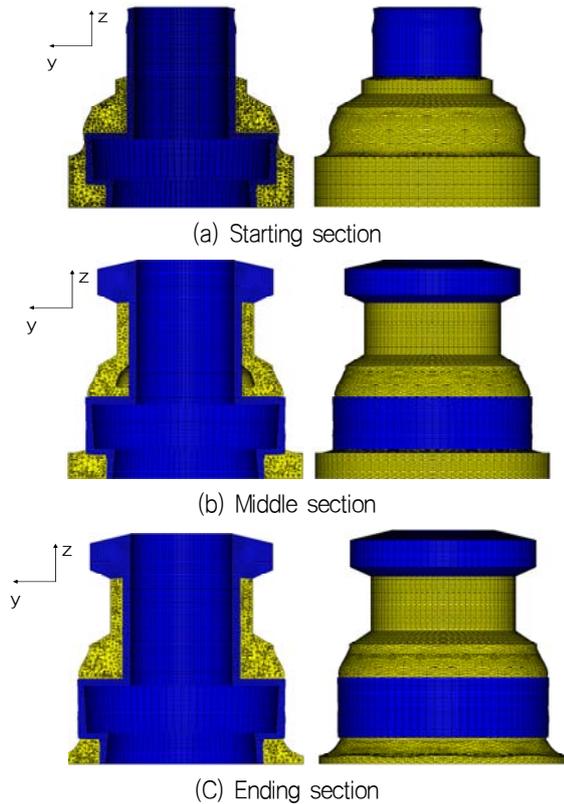


Fig. 17 Optimized design of Bend restrictor

4.4 최적화 모델 검증

위상 최적화 모델의 구조 성능을 검증하기 위해 최적화 모델을 적용하여 Fig. 10과 동일한 경계조건과 하중 조건을 통해 구조 해석을 진행하고 파이프라인의 굽힘 반경을 비교하였다(Fig. 17). Fig. 18의 표시된 점들의 좌표를 추출하여 각 해석 결과의 굽힘 반경을 비교한 결과 기존 굽힘 제한 장치 모델을 적용한 해석은 굽힘 반경이 0.768 m로 측정되었다(Table 5). 위상 최적 설계 모델을 적용한 해석은 0.847 m로 기존 모델보다 굽힘 반경이 약 10% 증가하였다. 본 연구에서는 기존 굽힘 제한 장치의 재료량을 30% 감소시키면서 굽힘 제한 장치의 변형이 최소화되도록 최적 설계하였다. 따라서 최적화된 굽힘 제한 장치에 의해 굽힘 반경이 증가하였으며 이는 파이프의 굽힘이 완화된 의미를 가진다. 다음으로 최적화 전후의 시작부, 중앙부, 끝단부 굽힘 제한 장치의 응력 분포 및 응력 값을 확인 및 비교하였다. Figs. 19, 20에서 최적화 전후의 응력의 컨투어 범위는 동일하다. 최적화 전후 모두 굽힘 제한 장치가 다른 굽힘 제한 장치와 체결되는 부분에서 최대 응력이 나타났으며 모든 굽힘 제한 장치에서 응력의 최댓값이 재료의 항복 응력을 넘지 않음을 확인하였다(최적화 전: 2.645 MPa, 최적화 후: 2.339 MPa). 최적화 후 끝단부의 목 부분 및 시작부의 목 부분의 국부적인 응력이 각각 24%, 15% 증가한 것을 확인하였다(Fig. 19). 이는 끝단부의 경우 중앙부 굽힘 제한 장치에서 체결되는 부분의 재료량이 감소하여 목 부분의 응력이 증가하였고 시작부의 경우 머리 부분이 존재하지 않기 때문에 응력이 증가하였다. 하지만 증가한 응력 역시 구조물의 항

복응력을 넘지 않으며 굽힘 제한 장치의 최적화 전후의 최대 응력을 비교하였을 때 최적화된 모델의 경우 최대 응력이 최적화 전 모델의 88%로 기존 모델보다 응력이 12% 감소한 것을 확인하였다.

Table 5 Points position in the flexible pipeline

point/position	y	z
A	898.3	375.6
B	58.02	27.52
C	795.6	306
D	32.23	21.74

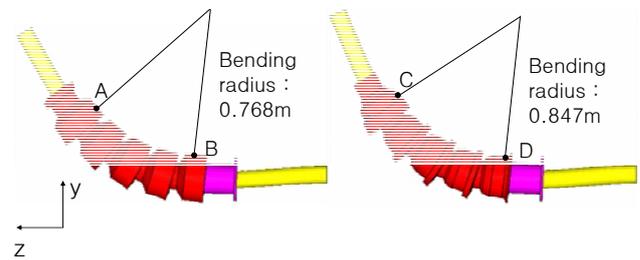


Fig. 18 Bending radius of reference model(100% material used) and optimized model(70% material used)

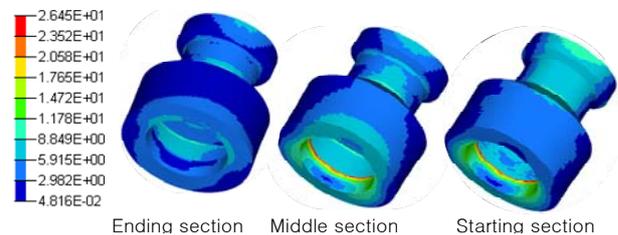


Fig. 19 Von-Mises stress of reference model

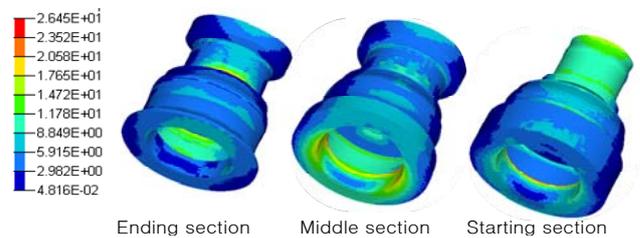


Fig. 20 Von-Mises stress of optimized model

5. 결론

본 연구에서는 심해저 수송 시스템인 파이프라인과 파이프라인의 굽힘을 제한하는 굽힘 제한 장치 그리고 해저 시설을 연결해주는 접속 구와의 다중 물체 접촉 해석을 통해 굽힘 제한 장치의 위상 최적 설계를 진행하였다. 건조한 상태에서 다중 물체 접촉 해석을 진행하였고 해석 결과 접촉력을 위상 최적 설계의 경계 조건으로 사용하였다. 컴플라이언스 최소화를 목적으로 하며 가

용 재료량 70%의 제한 조건과 재료 밀도를 설계 변수로 하는 위상 최적 설계를 통해 굽힘 제한 장치의 최적화 모델을 도출하였다. 기존 굽힘 제한 장치를 적용하였던 해석과 동일한 해석 조건 하에서 최적화 모델을 적용한 다중 물체 접촉 해석을 진행하여 굽힘 반경과 응력 분포 및 응력 값을 비교하였다. 비교 결과 기존 모델에 비해 파이프라인의 굽힘 반경이 10% 증가하여 파이프의 경사가 완만해졌으며 파이프 경사가 완만해진 것은 굽힘이 완만되어 파이프라인의 피로 파괴를 방지할 수 있다. 또한 최적화된 굽힘 제한 장치의 국부적 응력은 굽힘 제한 장치의 최대 응력이 나타나는 곳에서 응력 값이 약 12% 감소한 것을 확인되었다. 이는 재료 사용량을 70%로 감소시킨 것을 고려할 때, 매우 경제적인 효과를 거두었다고 볼 수 있다. 또한, 심해저 환경을 고려한 해석을 위해서는 온도에 따른 물성치와 해저 환경 하중의 고려가 필요하다.

후 기

본 연구는 2015년도 정부(교육부) 재원으로 한국 연구재단이 주관하는 기본연구지원사업(No.2015R1D1A1A01058649)과 한국에너지기술연구원(KETEP)이 주관하는 네트워크 기반 유체기 고효율화 고급트랙 인력양성 사업(No.20174010201350)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Altair, 2015. *Practical aspects of structural optimization a study guide*. [Online] (Updated June 2015) Available at: https://drive.google.com/file/d/0B4cr_bYDJYc7SEs2NkZuX3FIVFU/view [Accessed 12 February 2018].

API, 2018. *API recommended practice 17B* [Online] Available at: <http://www.bing.com/cr?IG=ABB0B88F51CB471FB23D7E294827F5C2&CID=1378C8A5B4526BE83143C368B5FD6ADF&rd=1&h=xbOvkt3T6Mni9YX-Cci1wDwQKsEwmOe4undO4wOEuH4&v=1&r=http%3a%2f%2fwww.americanpetroleuminstitute.com%2f%7e%2fmedia%2ffiles%2fpublications%2fwhats%2520new%2f17b%2520e5%2520pa.pdf&p=DevEx,5066.1> [Accessed 9 April 2018].

Autar, K. Kaw, 2007. *Mechanics of composite materials*. Taylor & Francis: Boca Raton, FL.

Bai, Y. & Bai Q., 2005. *Subsea pipelines and risers*. Elsevier: Amsterdam.

Bendsøe, M.P. & Sigmund, O., 2003. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer-Verlag: Berlin.

Braestrup, M.W. Andersen, J.B. & Andersen, L.W., Bryundum, M., Christensen, C.J. & Nielsen, N.J., 2007. *Design and installation of marine pipelines*. Knovel: Norwich, NY.

Green, I., 2015. *Bend protection of flexible pipe systems*. [Online] (Updated 02 June 2015) Available at: https://www.subseauk.com/documents/150528_jain_green.pdf [Accessed 7 February 2018].

Ha, Y.D., 2015. *Offshore structure design and deep sea system*. GS Intervision: Seoul.

Johansen, L.R. & Sørensen, P.T., 2015. *Design and development of a bend stiffener for flexible pipelines in offshore industries*. Master Thesis. Denmark, Aalborg university.

Lee, D.G., Shin, S.M. & Park, S.S., 2007. Material topology optimization design of structures using SIMP approach part I: Initial design domain with topology of partial holes. *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 25(01), pp.73-80.

LUKOIL, 2013. *Global trends in oil & gas markets to 2025* [Online] (Updated 2013) Available at: https://www.lukoil.be/pdf/Trends_Global_Oil_ENG.pdf [Accessed 7 February 2018].

Noh, J. & Ha, Y. D., 2016. Topology optimization and multi-body contact analysis for bend restrictors. *Computational Structural Engineering Institute of Korea Annual Conference*, Deajeon, 13-15 April 2016, pp.77.

Supergrip, 2018. *Supergrip deliver centraliser and Fast-Lok boltless bend restrictor assembly* [Online] Available at: <http://www.supergripuk.com/supergrip-deliver-centraliser-and-fast-lok-boltless-bend-restrictor-assembly/> [Accessed 10 April 2018].



노정민



하윤도