

## 고밀도 폴리에틸렌 섬유를 이용한 무어링 로프 개발

김경수<sup>1†</sup> · 김남훈<sup>2</sup> · 서무경<sup>3</sup> · 박은정<sup>4</sup> · 김도균<sup>5</sup> · 신현기<sup>6</sup>

(Received March 26, 2018 ; Revised April 23, 2018 ; Accepted May 17, 2018)

### Development of mooring rope using high density polyethylene

Kyeong-Soo Kim<sup>1†</sup> · Nam-Hun Kim<sup>2</sup> · Mu-Kyung Seo<sup>3</sup> · Eun-Jeong Park<sup>4</sup> · Do-Kyoun Kim<sup>5</sup> · Hyeon-Ki Shin<sup>6</sup>

**요약:** 본 논문에서는 사업화가 제한적인 슈퍼섬유 로프보다 일반적으로 많이 사용되는 폴리프로필렌 로프와 유사한 기계적 물성을 가지면서, 국내 로프 제조사의 합성섬유 로프 시장을 확대할 수 있는 고밀도 모노 필라멘트 폴리에틸렌 섬유를 이용한 무어링 로프를 개발하고자 한다. 국내 합성섬유 로프 관련 기술은 이미 상용화된 폴리프로필렌 원사를 이용한 로프 생산 위주의 기술에 머물러 있다. 따라서, 우수한 기계적 강도와 내구성을 확보하여 폴리프로필렌 소재를 대체할 수 있는 고밀도 폴리에틸렌 로프를 개발하고자 한다. 이러한 고밀도 폴리에틸렌 로프 개발을 위해 적용대상 선박을 고려한 로프 사양 개발, 고밀도 폴리에틸렌 방사를 통한 원사 개발, 개발 원사를 이용한 로프의 제조와 검증 과정을 수행하였다. 이와 같은 연구과정을 통해 원사는 10 g/D의 강도와 내약품성에 대한 잔존 강도율 90%를 달성하였으며, 로프는 약 300 kN의 강도를 가짐으로써 고밀도 폴리에틸렌 섬유를 이용한 무어링 로프 개발을 완료하였다.

**주제어:** 무어링, 로프, 폴리에틸렌, 합성섬유, 원사

**Abstract:** Polypropylene fibers are used for general purpose mooring ropes, and now mooring ropes are being developed using polyethylene fibers. Mooring ropes made with super high-strength fibers have several advantages, such as very high strength, low weight, and excellent wear resistance and creep resistance. However, they have not been used for many purposes because of their high cost. When it comes to synthetic fiber mooring rope-related technology, Domestic company has remained to produce just ropes already developed filament materials. Therefore, a study on the development of mooring rope specifications and mooring rope fabrication through high modulus polyethylene fiber spinning was conducted. Through such a research process, polyethylene fibers with a strength of 10 g/D and chemical resistance above 90% were achieved. Furthermore, the mooring rope showed a breaking strength of 300 kN.

**Keywords:** Mooring, Rope, Polyethylene, Synthetic fibers, Filament

## 1. 서론

무어링 로프는 항구나 고정된 물체에 선박을 계류하기 위한 로프를 말하며, 일반적으로 합성섬유 로프가 많이 사용되고 있다. 선박 및 해양 구조물의 계류 조건에 따라 체인과 섬유로프가 같이 사용되는 경우도 있으며, 계류삭의 길이 증가로 인해 자중이 커지는 문제가 있어 높은 강도와 경량성을 가지는 로프의 수요가 증가되고 있다[1].

유럽 등 해양 선진국에서는 합성섬유 중 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE), 아라미드(Aramid fiber), 벡트론(Vectran) 등 고강도 슈퍼섬유를 이용한 고성능 해양용 무어링 로프를 개발하

여 시장에 공급하고 있다. 이와 같은 고강도 슈퍼섬유를 이용한 무어링 로프는 매우 높은 강도와 경량성을 가지며, 내마모성과 내크리프성이 우수한 특징을 갖지만 높은 가격 때문에 현재 일부 용도에서만 사용되고 있고 있다. 고강도 슈퍼섬유 중 초고분자량 폴리에틸렌 원사는 비중이 0.9로 경량이고, 용점이 150℃로 강도와 경량성이 우수하여 차세대 무어링 로프 소재로 각광 받고 있으나 높은 원사 가격으로 사용이 제한되고 있는 실정이다. 따라서 경량의 고강도 무어링 로프보다 범용으로 사용될 수 있는 무어링 로프를 개발하여 국내의 시장을 확대하는 것이 현실적으로는 타당할 것으로 판단된다[2]-[6].

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3429-8063>): Marine Simulation Research Team, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, 38-6, Noksansandan 232, Kangseo-gu, Busan 46757, Korea, E-mail: kskim@rims.re.kr, Tel: 051-974-5588

2 Marine Simulation Research Team, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, E-mail: nhkim@rims.re.kr, Tel: 051-974-5520

3 HAESUNG ENTERPRISE CO. LTD., E-mail: smk2109@hanmail.net, Tel: 051-831-1400

4 HAESUNG ENTERPRISE CO. LTD., E-mail: digh1216@naver.com, Tel: 051-831-1400

5 DSR CORP., E-mail: dkkim@dsr.com, Tel: 051-979-0500

6 DSR CORP., E-mail: hkshin@dsr.com, Tel: 051-979-0500

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.

현재까지 선박에 일반적으로 사용되는 합성섬유 무어링 로프는 합성섬유 소재 중 폴리프로필렌 섬유를 주로 적용하였으나, 최근 고밀도 모노 필라멘트 폴리에틸렌 섬유(HDPE)를 이용한 무어링 로프 개발이 시도되고 있다. 고밀도 폴리에틸렌 섬유는 슈퍼섬유에 비하여 가격이 저렴하면서 우수한 유연성 및 낮은 흡습율을 나타내어 습도 변화에 대한 강도 저하율이 작고 고강도화를 통해 무어링 로프, 코드 등의 용도에 적용이 가능하다. 이와 같이 폴리에틸렌 무어링 로프는 기존 폴리프로필렌 무어링 로프를 대체 할 수 있을 것으로 판단되나, 국내에는 아직 폴리에틸렌 원사를 이용한 무어링 로프 개발 사례가 없는 실정이다.

국내 무어링 로프 관련 기술은 이미 개발된 원사를 이용한 로프 생산 위주의 기술에 머물러 있다. 폴리프로필렌 무어링 로프는 원사에서 로프 제조까지 국내 기술로 개발되고 있으나, 그 외 원사의 경우 대부분 해외 제품을 수입에 의존하고 있는 상황이다. 따라서 국내 로프 제조사의 시장 확대를 위해 기존 폴리프로필렌 섬유 소재 외 범용으로 사용할 수 있는 고강도 폴리에틸렌 섬유를 이용한 무어링 로프 개발이 필요하며, 본 논문에서는 고강도 폴리에틸렌 섬유를 이용한 무어링 로프 개발을 위한 로프 사양개발 및 제작, 개발제품에 대한 검증 연구를 수행하였다.

## 2. HDPE 무어링 로프 시제품 제작

### 2.1 무어링 로프용 HDPE 원사 개발

HDPE 무어링 로프 제작에 사용되는 원사는 (주)LG화학의 메탈로센 촉매를 사용한 고밀도 폴리에틸렌(m-HDPE, LUCENE™ SP38) 수지를 사용하며, 소재의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

HDPE는 일반적으로 60-80% 정도의 높은 결정화도와 약 135℃의 녹는점을 가지고 있으며, 나일론사와 유사한 강도와 내마모성을 가지고 있어 가구용 직물과 같은 산업용 소재로 활용되고 있다. 그러나 HDPE 필라멘트사를 무어링 로프와 같은 고기능성 산업용 소재로 활용하기 위해서는 연신에 의한 배향 결정을 극대화하여 비결정 영역을 최소화하고, 탄성률과 강도를 증가시켜 우수한 기계적 강도를 갖도록 하는 것

Table 1: Characteristics of the HDPE pellet

Category		Value
MFI(g/10min)		0.56
Density(g/cm <sup>3</sup> )		0.951
DSC	T <sub>m</sub> (°C)	133.8
	T <sub>c</sub> (°C)	118.4
	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	188.8
GPC	M <sub>n</sub>	42,700
	M <sub>w</sub>	132,000
	PDI	3.09

Table 2: Specifications of the HDPE filament

Category	Value
Tensile strength(g/den)	10
Modulus(g/den)	125
Elongation(%)	10
Water absorption(%)	0.5
Sea-water fastness(grade)	4-5
Chemical resistance(%)	90

이 중요하다. 이와 같이 요구되는 인장강도, 탄성률 및 파단신도 등의 기계적 성질과 황산, 수산화나트륨 등의 내약품성 성질을 만족할 수 있는 방사 및 공정최적화 기술이 필요하다.

Table 2는 무어링 로프 제조에 필요한 HDPE 필라멘트사의 기계적 및 화학적 사양 특성을 나타낸 것이다. 기존 HDPE는 일반적으로 겔방사법을 이용하여 방사를 시행하나, Table 2의 기계 및 화학적 특성을 만족하기 위해 용융방사를 통해 필라멘트를 제작하였다.

기존의 HDPE 방사 방법은 방사시 건식 연신조를 거쳐 1단 연신을 통해 성형가공을 하는 것이 일반적이거나, 본 연구에서는 용융방사와 다단연신을 통해 시제품 필라멘트사의 기계적 물성을 증가시켰으며, HDPE 필라멘트 방사과정은 Figure 1에 나타내었다.

용융방사 과정 중 폴리머에는 강한 전단력과 열이 동시에 가해지기 때문에 방사온도 설정은 아주 중요한 요소이며, 일반적인 고분자의 경우 용융방사 온도는 고분자의 용점보다 30~40℃ 정도 높은 온도로 설정한다. 그러나 시제품 제작에 사용하는 HDPE는 용융 온도(T<sub>m</sub>)가 133.8℃이며, 용융흐름지수(MFI)가 0.56으로 아주 낮아 방사온도를 220 ~260℃까지 상승시켜 방사를 진행하였다. 그리고 HDPE 원료의 냉각/연신 방식별 시험에는 필라멘트 연신비를 최대 15배까지 1배씩 증가시켜 관찰하였으며, 이와 같은 방사온도와 연신비를 조절하여 무어링 로프용 필라멘트에 적합한 최적의 방사조건을 확립하였다.

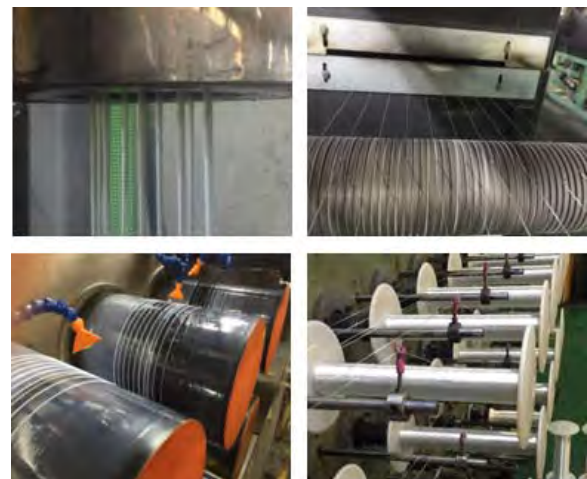


Figure 1: HDPE filament manufacture process

연신공정을 마친 필라멘트는 열처리를 통해 완화처리를 하며, 열처리로를 통과한 필라멘트에 유제 표면코팅을 하여 표면마찰을 최소화하고, 완성된 필라멘트를 보빈에 권취하여 로프로 제작할 수 있도록 준비하였다.

### 2.2 HDPE 무어링 로프 제작

무어링 로프는 여러가닥의 실을 꼬아놓은 단순한 구조로 판단하기 쉬우나 로프 구성재료의 특성, 꼬임의 종류 및 정도의 변화로 로프 완제품의 현저한 물성 차이를 나타낼 수 있다.

로프는 제조방식에 따라 원사-합사-스트랜드-로프의 순서로 구성되며 각각의 단계에서 꼬임의 종류와 정도의 차이로 최종 로프의 강도 및 마모저항성에 큰 영향을 끼친다. HDPE 로프 제작을 위해서는 원사 합사별 강도비교를 통해 최적 효율을 갖는 합사 구조설계가 필요하다.

구조설계를 위해 원사의 꼬임에 따라 S연과 Z연을 고려하였고, 원사의 합수에 따라 2합~8합까지 로프를 설계 및 제작하여 강도를 평가하였다. Table 3에 원사 합수별 강도 시험 결과를 나타내었으며 2,3합 및 5,6합의 강도 유사성을 활용하여 3+5 구조의 HDPE 로프 설계를 도출하였다. Figure 2에 HDPE 원사의 합사 구조설계 단면과 로프의 꼬임의 형태를 나타내었으며, 도출된 로프 구조설계를 적용하여 시제품 무어링 로프를 제작하였다.

Table 3: Tensile strength test result of twisted thread

	twisted thread number				
	2	3	5	6	8
tensile strength (g/D)	9.5	9.47	8.74	8.74	8.55



Figure 2: Schematic diagram of rope design

Table 4: Test items of the synthetic fiber rope

Test item		Test method	Criterion
fiber rope (40 mm)	Tensile strength	ISO 2307	above 300kN
	Weathering test	KS F 2274	above 80%
fiber yarn	Tensile strength	KS K 0412 KS K 0475	above 6.5g/D
	Chemical resistance	tensile strength ratio for chemical treatment	above 90%
	Fatigue test	6 samples from at least 2 batches	10 <sup>5</sup> cycles at 50% load

### 3. HDPE 무어링 로프 사양 검증

HDPE 소재를 적용한 무어링 로프의 사업화를 위해 개발 무어링 로프에 대한 사양 검증을 수행하였다. 무어링 로프는 로프의 소재에 따라 사양 검증 방법의 차이를 가지며, 일반적으로 스틸 와이어 로프와 합성섬유 로프로 구분된다. HDPE 무어링 로프는 폴리에틸렌 섬유를 사용한 합성섬유 로프에 포함되므로 국내의 선급의 합성섬유 로프 및 원사에 대한 평가내용에 따라 사양 검증을 수행하였으며[7]-[9], 검증을 위해 수행한 시험 항목은 Table 4에 나타내었다.

#### 3.1 Fiber Rope 사양 검증

로프는 설계강도 대비 로프가 가지는 인장강도와 사용환경을 고려한 내후도 평가가 로프의 개발 측면에서 가장 중요한 평가요소이다.

##### 3.1.1 Tensile strength test

Figure 3은 시제품으로 제작된 직경 40mm의 무어링 로프에 대한 인장강도 시험환경을 나타낸 것이다. 로프 인장강도는 ISO 2307에 따라 목표 강도의 50% 인장하중을 3회 반복 후 인장강도를 평가한다. 이와 같은 시험조건에서 시험 결과 인장강도는 약 301.2 kN으로 목표강도 300 kN을 상회하는 결과를 얻었다. 로프 인장강도 테스트 결과는 Figure 4에 나타내었다.

##### 3.1.2 Weathering test

로프 내후도 시험은 KS F 2274에 따라 내후성 시험기에서 카본아크 등에 200시간 이상 노출시킨 후 로프의 잔존 강도를 평가한다. 시험편 수는 3개로하여 로프 내후도를 평가하였으며, 잔존 강도율은 Table 5에 나타낸 바와 같이 기준 80%를 상회하는 95%를 달성하였다.



Figure 3: Tensile strength test of HDPE rope

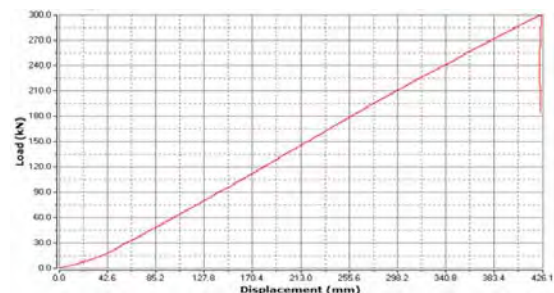


Figure 4: Tensile strength test result of HDPE rope

**Table 5:** Weathering test result of HDPE rope

	sample number			avg
	1	2	3	
Residual weathering strength ratio	95.8	95.3	94.6	95.5

3.2 Fiber Yarn 사양 검증

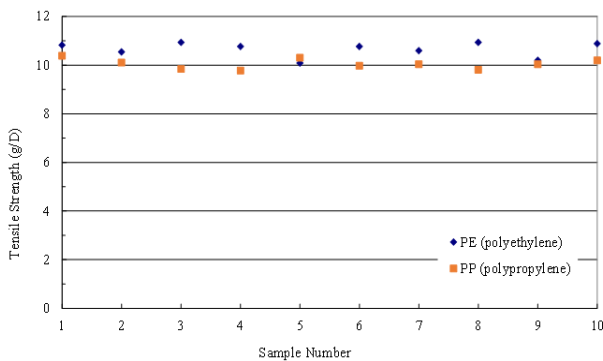
로프 원사는 원사의 인장강도, 내약품성에 대한 잔존 강도율, 반복하중을 받는 무어링 로프의 특성을 고려한 원사 피로 내구성을 평가하는 것이 중요한 요소이다.

3.2.1 Tensile strength test

HDPE 원사의 인장강도는 필라멘트사의 강도 시험방법인 KS K 0412에 따라 평가를 진행하였으며, 시험편의 수는 10개로 하고 그들의 인장강도 평균치를 구하였다. Figure 5에 HDPE 원사와 기존 폴리프로필렌 원사의 인장강도 시험 결과를 비교하여 나타내었으며, HDPE 원사는 폴리프로필렌 원사 평균치 10.04 g/D를 상회하는 10.40 g/D를 달성하였다. 이와 같은 수치는 목표 강도 10 g/D를 만족하는 결과이며, 강도 측면에서 HDPE 소재는 폴리프로필렌 소재 대비 동등 이상의 강도를 가지는 것을 확인하였다.

3.2.2 Chemical resistance test

HDPE 원사에 대한 내약품성 시험과정은 Figure 6에 나타내었으며, 내약품성 시험에 대한 결과는 Table 6에 나타내었다. 원사의 내약품성 시험은 10%의 알카리성과 산성용액에 침적 후 약품처리 전후의 잔존강도를 비교하는 것으로, 해수 및 다른 액체에 대해 침적 위험이 있는 로프 원사의 잔존강도를 평가하는 것이다. Table 6의 결과와 같이 개발된 HDPE 원사는 내약품성 잔존 강도율은 환경기준 조건인 90% 이상을 만족하는 것으로 나타났다.



**Figure 5:** Tensile strength test results of HDPE filament



**Figure 6:** Chemical resistance test of HDPE filament

3.2.3 Fatigue test

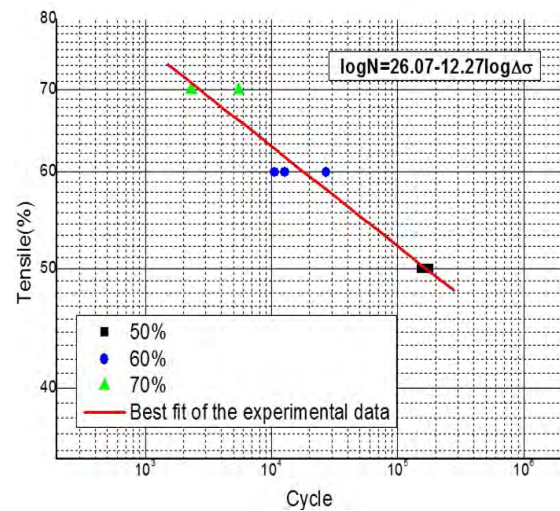
HDPE 원사 피로 내구성 시험의 목적은 원사 기준 하중 조건에 대한 반복횟수 결과를 도출하는 것이다. 원사 인장 하중의 50%, 60%, 70% 세 하중을 기준으로 피로 시험을 수행하고, 시험결과를 바탕으로 하중조건에 대한 반복횟수를 예측할 수 있는 근사식을 산정하였다. 피로 시험 조건의 진폭은 ±9%이며, 주기는 0.1Hz이다.

Figure 7에 피로 시험 결과인 HDPE 원사의 하중에 대한 반복횟수와 이를 바탕으로 산출된 근사식을 나타내었으며, Table 7에는 근사식으로 계산된 반복횟수를 도출하였다.

Table 7에 나타낸 결과와 같이 HDPE 원사는 파단강도 대비 인장하중이 증가함에 따라 피로 내구 반복횟수가 감소하며, 50% 인장하중에서 목표로한 10<sup>5</sup>의 반복횟수를 만족하는 것을 볼 수 있다. 로프 원사의 종류와 소재 특성에 따라 인장강도에 따른 반복횟수의 산출 근사식의 기울기는 차이가 있을 수 있고, HDPE 원사의 경우 무어링 로프 적용에 적합한 피로 내구 특성을 가진 것으로 판단된다.

**Table 6:** Chemical resistance test result

	Alkali resistance	Acid resistance
Average tensile strength ratio	90.5	91.2



**Figure 7:** Fatigue test result of HDPE filament

**Table 7:** Fatigue cycles of HDPE filament using the fitting formula

Load condition	Cycles
50%	167,355
60%	17,868
70%	3,695

#### 4. 결 론

본 연구는 기존 폴리프로필렌 합성섬유 로프를 대체할 수 있는 고밀도 폴리에틸렌 무어링 로프 개발이 목적이며, 이에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고밀도 폴리에틸렌 무어링 로프 시제품 제작을 위해 기계적 특성을 만족하는 필라멘트사의 제조공정을 확립하였으며, 꼬임과 합사의 로프 구조설계를 통해 목표강도를 만족하는 무어링 로프 시제품을 제작하였다.
- (2) 개발된 무어링 로프의 사양 검증을 위해 로프 수준에서 요구되는 개발 목표에 대한 파단강도와 내후성을 평가하였으며, 파단강도 301.2 kN과 내후도 잔존 강도를 95%를 달성하였다.
- (3) 개발 로프 원사의 사양 검증을 위해 원사의 인장강도 및 내약품성 시험, 피로시험을 수행하였으며, 10.40 g/D의 인장강도와 내약품성 잔존 강도를 90% 이상을 만족하여 해상환경에서 요구되는 무어링 로프의 강도와 내구성을 평가하였다.

본 연구에서 개발된 고밀도 폴리에틸렌 무어링 로프는 설계목표의 로프와 원사 특성을 달성하고, 개발사양 검증을 위한 로프와 원사의 시험 항목도 모두 만족하여 기존 폴리프로필렌 합성섬유 로프 시장을 대체하는 제품으로 시장 진입이 가능할 것으로 판단된다. 추가적으로 사업화 추진을 위해 실선 시운전 시험을 통한 개발 로프의 최종 사양 검증이 요구된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권육성사업(과제번호: R0003954)으로 수행된 연구결과입니다.

#### References

- [1] J. F. Flory, J. W. S. Hearle, and M. Goksoy, "Abrasion Resistance of Polymeric Fibres In Marine Conditions," JWS Hearle 2nd International Conference on Polymers in a Marine Environment, pp. 197-204, 1989.
- [2] Y. Shuto, Y. Tokunaga, T. Mriya, T. Kagoyama, S. Hara, and K. Yamakawa, "Abrasion degradation of wire rope and synthetic fiber rope," Oceans, 4, pp. 1918-1922, 2005.
- [3] D. Petruska, J. Geyer, R. Macon, M. Craig, A. Ran, and N. Schulz, "Polyester mooring for the mad dog spar design issues and other considerations," Ocean Engineering, 32, pp. 767-782, 2005.
- [4] N. E. Casey and S. J. Banfield, "Full-scale fiber deepwater mooring ropes: Advancing the knowledge

of spliced systems," Offshore Technology Conference, OTC 14243, 2002.

- [5] M. Vlasblom, J. Boesten, S. Leite, and P. Davies, "Development of HMPE fiber for permanent deep-water offshore mooring," Offshore Technology Conference, OTC 23333, 2012.
- [6] M. B. Bastos, "Improved high tenacity/high modulus polyester for stiffer mooring ropes," MTS/IEEE, OCEANS - Bergen, 2013.
- [7] KR, "2016 KR-Rules & Guidance," 2016.
- [8] ABS, "Polyester rope stiffness modeling, testing, and analysis," Joint industry project phase 1 report no. TR-2010-03, 2010.
- [9] ABS, "The application of fiber rope for offshore mooring," 2011.