



CFRP 소재의 선박용 축계 적용을 위한 비틀림강도 특성

김민규^{1,2}·신익기¹·김선진²·박대겸³·서정관^{2,3,†}
(주)신금하¹
부산대학교 조선해양공학과²
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원³

Torsional Strength of CFRP Material for Application of Ship Shaft System

Min-kyu Kim^{1,2}·Ick-gy Shin¹·Seon Jin Kim²·Dae Kyeom Park³·Jung Kwan Seo^{2,3,†}
Shinkumha Inc.¹
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University²
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University³

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 Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) material is recently widely used in the composite industry with excellent rigidity and lightweight properties. A ship shaft system requires high standards of safety on torsional strength capacity. The purpose of this study is to verify the applicability of a CFRP shaft system to take the place of metal shaft systems for ships from a viewpoint of torsional strength. Selection of materials and manufacturing method are executed then two geometrically scaled CFRP shaft system models were designed and manufactured with three-layer patterns. The models were used for a series of torsion tests under single and repeated torsional loading conditions. Detailed design and manufacturing methods for a CFRP ship shaft system are documented and the torsion test results are listed in this paper. The results of this study could be useful guidelines on the development of CFRP ship shaft systems and a test method.

Keywords : CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), Composite material(복합재료), Ship(선박), Shaft system(축계), Torsional strength(비틀림 강도)

1. 서론

최근 조선해양산업 분야는 IMO(International Maritime Organization)의 환경규제 강화에 따른 선박의 운항효율 향상 및 해양환경 보호를 위하여 고강도, 경량화, 내식성 부품 등에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

섬유강화 복합재료는 기존의 금속재료에 비해 일반적으로 높은 강도(strength)와 강성(stiffness) 및 우수한 피로(fatigue) 특성 등의 우수한 기계적 성질을 가지고 있으므로 조선해양산업 분야뿐 아니라 경량화가 요구되고 있는 항공기, 자동차 등의 다양한 분야에서의 강도 부재로서의 적용이 확대되고 있다(Kim, 2003). 특히 섬유강화 복합재료 중에서 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)은 탄소강, 알루미늄, 유리섬유강화플라

스틱(GFRP: Glass Fiber Reinforced Plastic)에 비해 고강도, 경량 특성을 갖음으로써 수송 분야에서 경량화를 통한 연료절감, 적재량 확대 및 이산화탄소 배출 저감의 환경개선 효과를 기대할 수 있는 친환경 소재이다. 하지만 이러한 복합재료 제조 및 응용기술은 일부 선진국에서 독점으로 개발, 생산 및 공급하고 있어 국내 개발기술의 자립화가 절실한 실정이다.

선박용 축계는 엔진동력 전달 장치로 선박의 안전한 운항을 위해 고도의 안정성이 필요한 핵심부품으로써 비틀림강도 및 피로강도 등에 대한 높은 신뢰성이 요구된다. 따라서, CFRP 소재의 선박용 축계의 적용성을 확인을 위하여 축계 강도 특성에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

CFRP의 선박용 축계 적용성 검토를 위한 피로강도와 비틀림강도에 대한 선행연구로는 충격손상을 받는 CFRP 적층재의 굽힘 피로강도 저하현상에 관한 연구(Yang and Yang, 2015;

Park et al., 2017), 피로누적손상 예측기법 (Jang et al., 2015) 및 유한요소해석 및 관련 재료적 모델링 관한 연구 (Kim et al., 2012) 등의 연구가 최근 수행되었다. 아울러, 다양한 형상비를 가지는 사각 CFRP 튜브의 굽힘 및 비틀림강성 (Lee & Cheong, 2014), 소방차용 붐(Boom)부재에 CFRP 적용을 위한 강도 연구 (Kim et al., 2020) 등이 수행되었다. 선행연구들은 대체로 CFRP 적용 대상이 소형장비 및 자동차 강재 부품에 대한 대체 적용을 위한 연구가 활발히 이루어졌으며, 선박용과 같은 대형 축계에 적용을 위한 피로강도 및 비틀림강도에 관한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선박에 탑재되는 대형 CFRP 축계 개발을 위한 축계의 비틀림강도 특성 확보를 위하여 선박용 CFRP 축계의 설계, 제조 및 축소 모형에 대한 비틀림강도 성능 시험을 수행하였다. 성능시험은 두가지 축소 규모 및 세 종류의 강화재 적층 패턴이 고려되었으며, 축계의 접합부가 함께 고려되었다. 본 연구의 결과인 선박용 CFRP 축계 비틀림강도 특성은 향후 선박용 CFRP 축계 개발에 기초기술 및 성능시험 방법으로 활용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 선박용 CFRP 축계의 설계

2.1 기계적 특성을 고려한 재료 선정

섬유강화 복합재료는 구성재료인 강화재와 모재의 종류 및 등급에 따라 많은 종류의 제품이 있으며, 재료의 종류 및 제조 방법 등의 변경을 통한 신규 개발이 가능하다.

CFRP의 강화재인 탄소섬유에는 성능, 형태, 제조 방법 및 원료 물질에 따라 다양한 제품이 있다. 탄소섬유는 탄소원소의 질량 함유율이 90% 이상으로 구성된 섬유상의 탄소 재료로 전구체 (Precursor) 물질의 종류에 따라 크게 PAN(Polyacrylonitrile)계, 피치(Pitch)계 및 레이온(Rayon)계 탄소섬유로 구분된다 (Seo and Park, 2010). CFRP는 비강도(Specific strength) vs 비강성 (Specific Strength) 특성이 기타 선박용 강도부재용 재료와 비교하여 우수한 특성을 가지고 있다(Fig. 1).

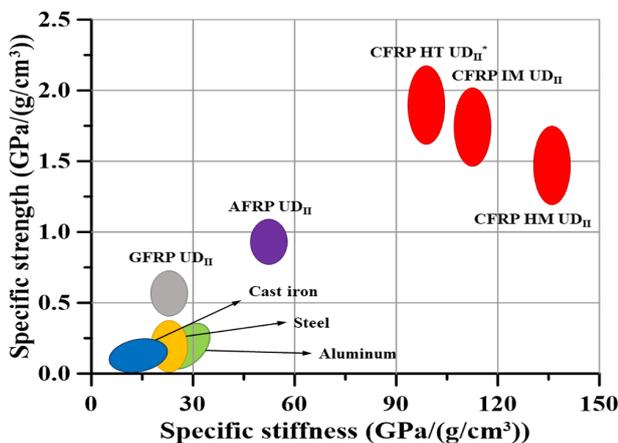


Fig. 1 Comparison of mechanical properties of structural materials(Möhning et al., 2015)

일반적인 범용 탄소섬유는 저 탄성률 탄소섬유를 말하며 탄성률(Elastic modulus) 200 GPa 이하, 인장 강도 3,500 MPa 이하의 기계적 특성을 가지며 비용면에서 효율적이다. 반면 고성능 탄소섬유는 중탄성률(IM: Intermediate Modulus), 고탄성률(HM: High Modulus) 및 고강도(HT: High Tensile)의 기계적 성능 범주에 포함되는 섬유를 지칭하며, 대체로 항공기에 많이 쓰이고 있다 (Lee, 2011). 본 연구에서는 기계적인 성능이 우수한 HT Grade 탄소섬유인 Toray사의 T700 24 K를 CFRP 축계의 강화재(탄소섬유)로 선정했다.

모재는 일반적으로 폴리에스터(Polyester)계, 비닐에스터(Vinylester)계, 에폭시(Epoxy)계가 널리 사용되고 있으며, 본 연구에서는 타 모재에 비해 기계적 성능이 우수한 에폭시(Epoxy) 수지(Resin)를 모재로 선정했다(Fig. 2).

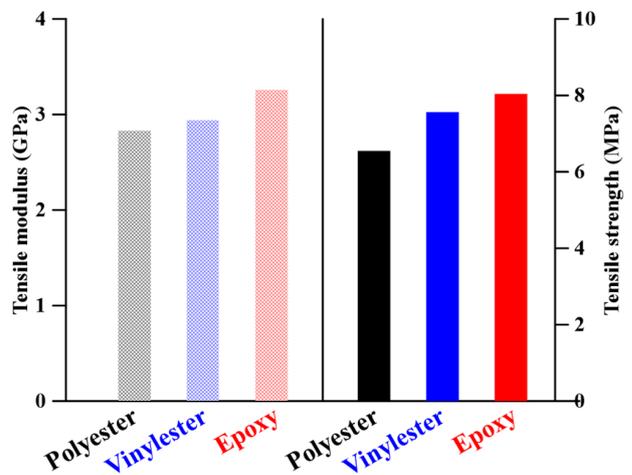


Fig. 2 Comparative Tensile strength and Modulus (RachTR Chemicals, 2016)

선정된 강화재와 모재의 기계적인 물성치는 Table 1과 같다. 복합재료의 경우 금속과는 달리 등방성 재질이 아니므로 방향에 따른 물성치가 중요하며 이를 반영한 설계가 필요하다.

Table 1 The mechanical properties of T700 carbon/epoxy composite (Toray Carbon TDS)

| Description | Units | Initial value |
|---|--------------------|---------------|
| Manufacturer carbon fiber properties | | |
| Density | kg/mm ³ | 1.78E-6 |
| Longitudinal Young's modulus | GPa | 230 |
| Manufacturer matrix properties | | |
| Density | kg/mm ³ | 1.10E-6 |
| Young's modulus | GPa | 2.890 |
| Unidirectional test tape ply properties | | |
| Longitudinal Young's modulus | GPa | 121 |
| Transverse Young's modulus | GPa | 8.521 |
| Poisson's ratio XY | - | 0.322 |
| Poisson's ratio YZ | - | 0.560 |

2.2 시험체 설계

본 연구에서 고려한 선박의 적용 엔진인 S30ME-B9.5 엔진은 대형엔진 중 가장 낮은 비틀림강도가 축계에 요구되며, 이는 축계의 비틀림강도 성능시험의 계측용량에 문제가 되지 않는 수준에서 최대 비틀림강도의 기준으로 결정했다. 선정된 선박 엔진 사양은 S70ME-C9.5 엔진규격 (MAN B&W ME-B Engines, 2012) 중 동력 12,500 kW, 엔진 회전수 72 rpm으로 적용하여 식(1)을 통해 최대 비틀림강도(Maximum torsional strength)를 1,800 kNm으로 선정했다.

$$T = 9,549 \frac{W}{N} \quad (1)$$

여기서, T는 최대 비틀림강도(N·m), W는 동력(W), N은 엔진 회전수(rpm)를 의미한다.

그리고, DNVGL-CP-0093 (DNV-GL, 2015)은 복합재료 축계에 5.0 이상의 안전율(Dafety factor)을 요구함에 따라 최종 설계 비틀림 강도(Design torsional strength)는 9,000kNm (1,800kNm x 5.0)으로 선정했다.

선정된 선박 엔진의 요구성능에 따른 축계 주요치수는 길이 (Length) 13 m, 외경(Outer diameter) 0.9 m이며 목표 비틀림 강도에 따른 두께를 0.05 m로 적용하여 내경(Inner diameter)을 0.8 m로 선정했다.

결정된 실 규모 축계의 주요치수를 기준으로 모형시험체는 기하학적 상사법칙을 이용하여 각각 실 규모 대비 길이치수(축계의 길이, 외경 및 내경)는 β, 비틀림강도는 β³ 규모로 선정했으며, 이때 β는 규모수치다. 시험체별 주요치수는 Table 2와 같다.

Table 2 Dimensions of CFRP shafts with scaling method

| Scale (β) | Length (m) | Outer diameter (m) | Inner diameter (m) | Design Torsional Strength (kNm) |
|-------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Full (1) | 13 | 0.9 | 0.8 | 9,000 |
| 1/5 (0.2) | 2.60 | 0.18 | 0.16 | 72 |
| 1/20 (0.05) | 0.65 | 0.045 | 0.04 | 1.125 |

2.3 시험체 제작

2.3.1 성형

복합재 제품을 성형하는 방법은 강화재 및 모재의 선택에 따라 다양한 제조공법이 존재한다. 본 연구에서는 선박용 대형 급속 축계를 대체하는 CFRP 축계 제작을 고려해서 대표적인 복합재 성형공법 4가지(Fig. 3)에 대하여 제작 시의 품질, 생산성 및 생산비용을 비교·분석하여 CFRP 축계 시험체 성형공법을 선정했다(Fig. 4).

대표적인 복합재 성형공법 4가지 중, 첫 번째는 Fig. 3(a)과

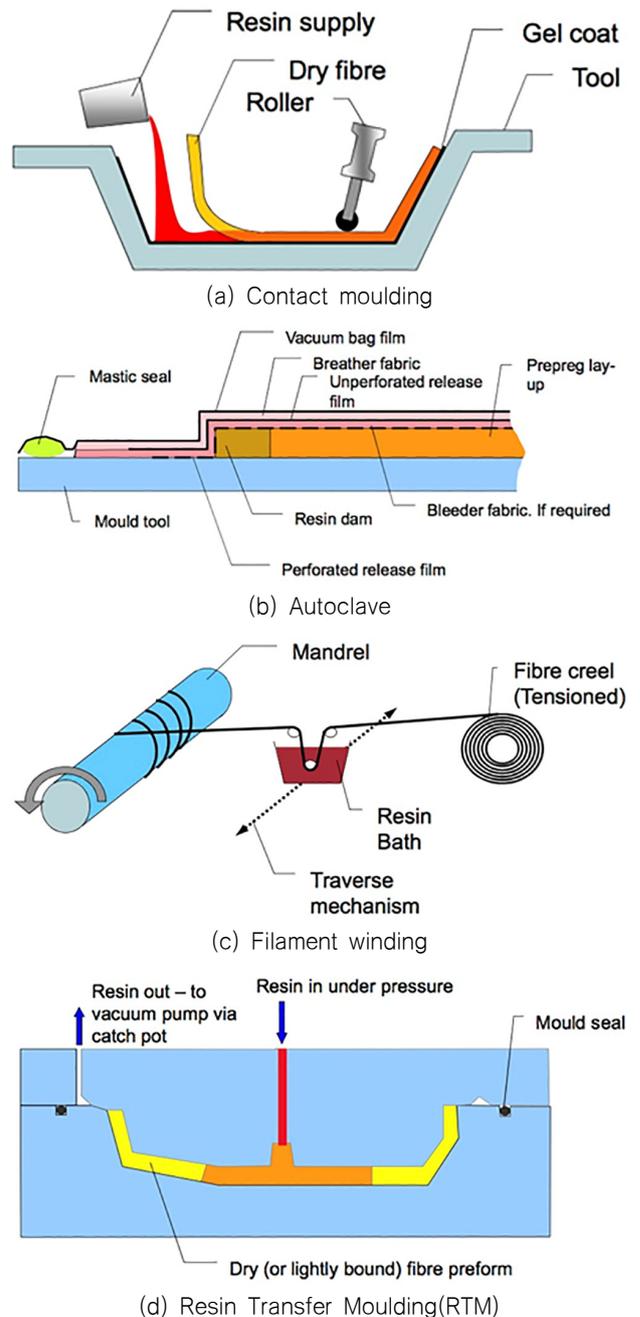


Fig. 3 Schematics of composite manufacturing methods (Aerospace engineering, 2012)

같이 몰드(mould)에 강화재와 모재를 직접 함침시키는 공법이고, 두 번째는 함침 또는 함침시킨 소재를 Vacuum bag을 이용하여 진공상태로 만든 후 Autoclave 설비 내에서 압력을 가하는 성형기법(Fig. 3(b))이다. 세 번째로 Fig. 3(c)는 몰드의 회전을 통해 강화재가 모재에 함침되어 성형하는 공법이고, 마지막으로 모재를 강한 압력으로 몰드 안에 밀어 넣어 강화재에 함침시켜 성형하는 기술(Fig. 3(d))이다 (KIMS, 2011).

본 연구에서는 시험체의 제작설비, 생산성, 품질 및 비용을 선형연구 (Potter, K., 1996)의 결과를 반영하여 Fig. 3(c)의 Filament winding 공법을 적용했다.

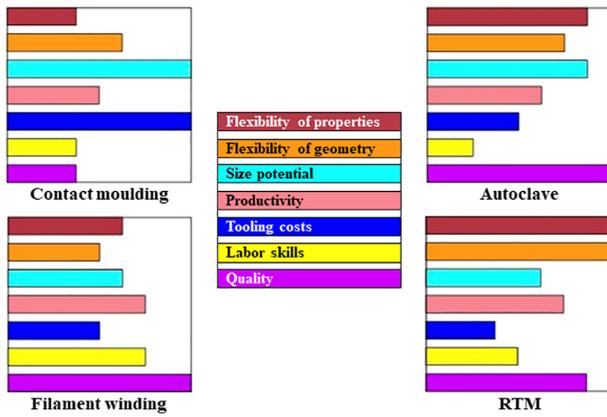
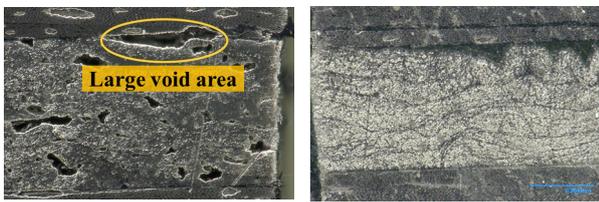


Fig. 4 Comparison of composite manufacturing techniques



(a) Laminate using wet winding with voids (b) Void-free laminate created with towpreg

Fig. 5 Voids and void-free laminates with wet and dry winding methods

선정된 Filament winding 공법은 습식(wet), 건식(dry) Winding 공법으로 구분되며, 그 중 습식 Winding 공법은 액상형 수지를 통과하는 과정에서 수지가 강화재에 함침되어 맨드렐에 감기는 방식이다. 그러나 습식 Winding의 경우 공법의 특성상 수지의 불균일한 함침량의 단점으로 인해 Fig. 5(a)와 같이 성형품 내 다수의 공동(void)이 산재하게 된다. 이는 복합재의 중대 결함 요소로 작용하게 되므로 높은 신뢰성이 필요한 주요 구조재인 축계에는 탄소섬유에 에폭시 수지를 미리 함침시킨 형태의 Towpreg를 사용하여 수지 함량의 균일화 및 공동의 최소화를 통해 균일한 물성을 확보가 가능한 건식 Winding 공법 (Compositeworld, 2020)을 적용하였다.

2.3.2 적층 패턴

적층 CFRP의 경우 이방성(Anisotropy) 재료로 Fig. 6과 같이 적층 각도에 따른 적층 패턴이 강도 특성에 영향을 미친다 (Honda, 2003). 따라서 적층 각도의 특성을 고려하여 요구하는 굽힘 또는 비틀림강도를 만족하는 적층 패턴의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 1/20, 1/5 scale의 2종류의 축소모형에 대하여 적층 각도가 비틀림강도 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 적층 각도 조건은 Table 3과 같이 선행연구결과를 반영하여, 총 세 가지의 적층 각도(Type I, II 및 III)를 각 축소모형에 적용하였다.

복합재료 축계의 비틀림강도 특성을 파악하고자 Type I의 경우 가장 높은 비틀림강도 특성을 갖는 45° 배치로 패턴을 구성

하였으며, Type II, III의 경우 45° 배치와 30°, 60°, 85° 배치 패턴을 추가하여 적층 각도에 따른 비틀림강도 특성을 평가하였다. 적층 각도는 축계의 길이 방향을 기준(0°)으로 한다.

또한, 적층된 제품의 성형은 Fig. 7과 같이 에폭시 수지 적용 제품 (Guilherme et al., 2017)에서 주로 적용되는 경화 사이클로 Dwell area는 수지의 최적 Flow가 발생하는 지점으로 충분한 함침 및 소재의 Spreading이 일어나도록 유도하며, Curing area에서 경화 작업이 일어나 요구 물성치가 최대한 발현되도록 선정했다.

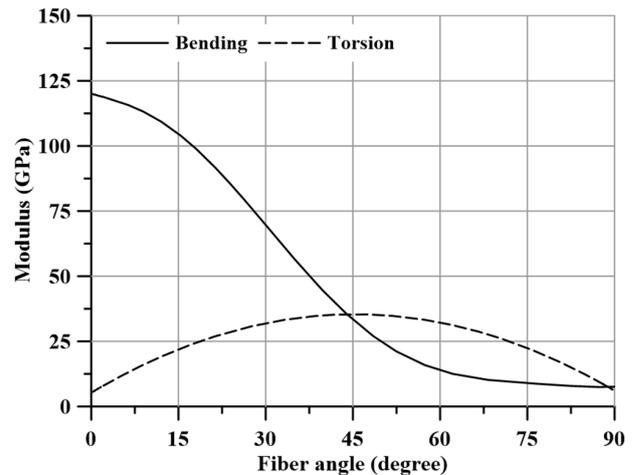


Fig. 6 Fiber alignment angle effects on torsional and bending modulus

Table 3 CFRP Shaft layer pattern

| Scale | Type | Layer pattern |
|-------|------|--|
| 1/5 | I | $[85^\circ, \pm 45]_8$ |
| | II | $[\pm 85^\circ, \pm 60^\circ, \pm 45^\circ, \pm 45^\circ, \pm 45^\circ, \pm 30^\circ]_{s_2}$ |
| 1/20 | I | $[85^\circ, \pm 45]_3$ |
| | III | $[85^\circ, \pm 60^\circ, \pm 45^\circ, \pm 45^\circ, \pm 30^\circ]$ |

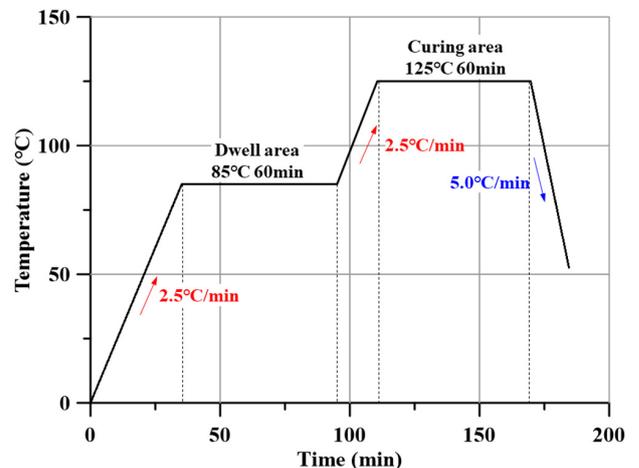


Fig. 7 CFRP shaft curing cycle

2.4 시험체 접합부 설계

선박용 CFRP 축계는 엔진 축계 및 프로펠러 등의 연결 부재와의 연결을 위한 금속 플랜지와 연결부가 구조적으로 가장 취약한 부분으로써, CFRP와 금속의 이종 소재 간 접합력 강화에 관련한 연구가 일부 진행되고 있다 (Kwon et al., 2017).

접착제에 의한 접합은 기계적인 접합 방법보다 넓은 영역에 걸쳐 하중을 분포하며, 구조물에 구멍(hole)을 낼 필요가 없으므로(취약부가 발생하지 않으므로) 복합재료의 안전성에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 그러나, 접착제에 의한 접합은 추가공정으로 인한 공기가 길고, 추후 유지보수를 위한 분해가 힘들며, 온도나 습도 등에 의한 접합강도 저하가 우려된다. 또한, 경화되기 전의 접착제는 액상 형태로 형태를 유지할 수 없고, 경화된 후에는 박리 응력에 취약하고 연신율이 낮아 접착부 파손에 취약한 단점이 있다. 따라서, 축계에서 CFRP와 금속 플랜지 간 접합부 설계에 접합법에 따른 위험의 최소화를 위한 노력이 필요하다.

본 연구는 선박용 CFRP 축계의 비틀림강도 특성에 관한 연구로서, 플랜지 접합법에 따른 영향을 최소화하기 위해 전체 시험체에 대하여 Bolt 체결 방식을 적용하였다. Bolt 체결 방식은 접합공정이 단순하고 경제적이며 파단 전조증상을 확인할 수 있는 장점이 있다.

2.4.1 접합용 Bolt 설계

축계 접합에 적용된 Bolt의 경우 축계에 가해지는 비틀림 응력의 적절한 분포를 위해 Fig. 8의 Edge distance, Spacing of fastener를 최소규격 이상인 2.5d 이상으로 간격을 설계하였으며, 사용된 Bolt는 Eurocode 규격 (Jsapart and Klaus, 2016)을 적용하였다. 축계 단면 손실을 고려하여 Bolt 체결부를 최소화하기 위해 고장력 육각 렌치 Bolt(SCM435 12.9 Grade)를 적용했다. 적용된 Bolt의 최소 인장강도는 1,220 MPa으로, 허용 전단응력은 이의 58 %인 747 MPa이며, 식 (2)~(4)을 적용하여 설계했다.

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \tau_a \tag{2}$$

여기서, F 는 전단력, τ_a 는 Bolt의 허용 전단응력, d 는 Bolt의 지름이다.

$$A = \frac{\pi}{4} d^2 \times S.F. \tag{3}$$

여기서, A 는 Bolt의 단면적, $S.F.$ 는 안전율이다.

$$A \times \sigma_{T-min.} \geq F \tag{4}$$

여기서, $\sigma_{T-min.}$ 은 Bolt의 최소 인장강도이다.

이에 따른 Bolt체결의 설계치는 Table 4와 같다.

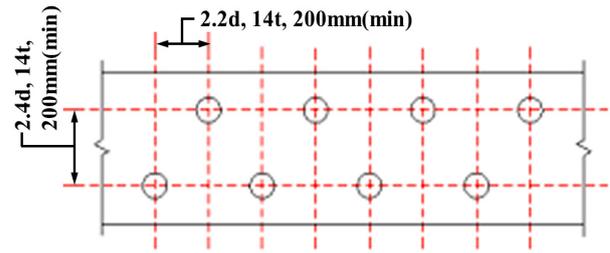


Fig. 8 End and edge distances and spacing of fasteners (Jsapart and Klaus, 2016)

Table 4 Bolt arrangement of shaft system

| Scale | Force (N) | Diameter (mm) | Area (mm ²) | Bolt type | Number of units (ea) |
|-------|-----------|---------------|-------------------------|-----------|----------------------|
| 1/20 | 28,125 | 6.92 | 188.25 | M5 | 10 |
| 1/5 | 450,000 | 27.69 | 3,012 | M20 | 10 |

2.4.2 복합재료 체결부

Bolt 체결을 위해서 복합재료에 Hole 가공 시 부재 손실이 발생하고, 이는 Fig. 9와 같이 강도 손실을 초래한다 (Mallick, 1988). 따라서, 본 연구에서의 대상 시험체에 적용된 축계의 w/d비는 0.4 수준으로 약 40 % 수준의 강도 저하가 발생하여 최소 40 % 이상의 복합소재 보강이 필요하다.

복합소재 축계의 경우 적층 각도에 따른 추가적인 강도 손실이 발생할 수 있으므로 추가적인 안전율을 반영하여 Bolt 체결부 복합소재 두께 치수를 100 % 강도 보강을 적용했다. 결과적으로, 1/20 Scale 시험체는 축부 두께 2.5 mm, 체결부 두께 5 mm로, 1/5 Scale 시험체는 축부 두께 10 mm, 체결부 두께 20 mm로 설계했다.

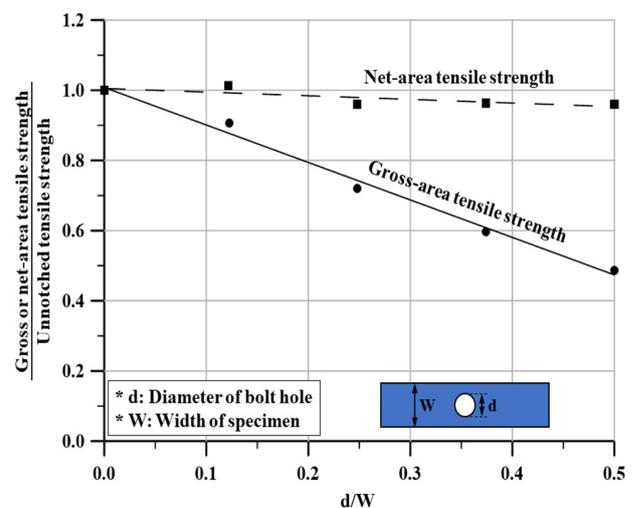


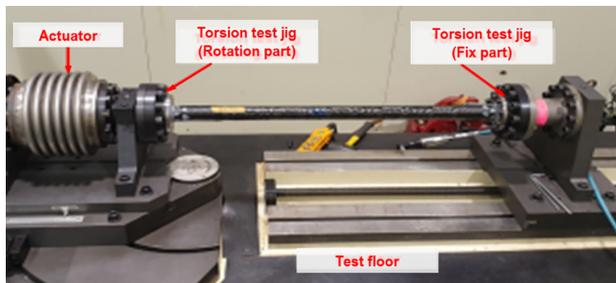
Fig. 9 Tensile strength variation in specimens with centered holes

3. CFRP 축계의 비틀림강도 성능평가

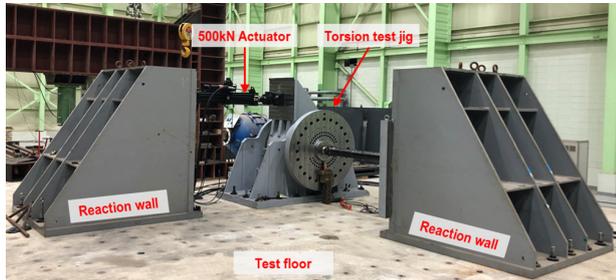
3.1 비틀림강도 성능시험

3.1.1 성능시험 지그

두가지 규모의 축소모형에 대한 비틀림강도 성능실험을 위해 두 종류의 성능시험 지그가 설계 및 구축되었다. 1/20 scale 시험체는 회전식 강력 장비를 사용한 일반적인 비틀림강도 성능 실험 시스템(Fig. 10(a))이 사용되었다. 1/5 scale 시험체는 1.2 m의 모멘트 팔(Moment arm)을 갖는 강체 지그에 선형 가력 시험장비를 이용하여 시험장비의 축하중을 시험체에 비틀림 하중으로 변환하여 가하는 형식의 비틀림강도 성능실험 시스템

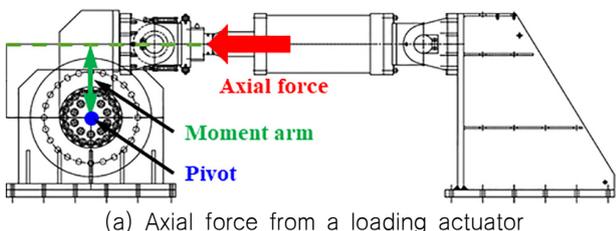


(a) Test jig for 1/20 scale model

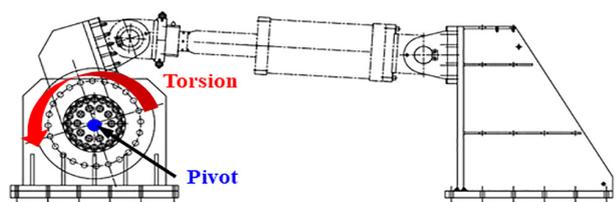


(b) Test jig for 1/5 scale model

Fig. 10 Torsion test set-up for 1/20 and 1/5 scale models



(a) Axial force from a loading actuator



(b) Torsional force by a load conversion test jig

Fig. 11 Schematics of load conversion from axial force to torsional force

(Fig. 10(b))이 사용되었다. 하중 방향 변환식 지그의 가력 장비는 고정부와 가력부가 스윙블 형태(Swivel base/rod end)로 구성되며, Fig. 11에 표현한 것과 같이 축하중을 회전운동에 의한 비틀림 하중으로의 변환할 수 있다.

3.1.2 성능시험 조건

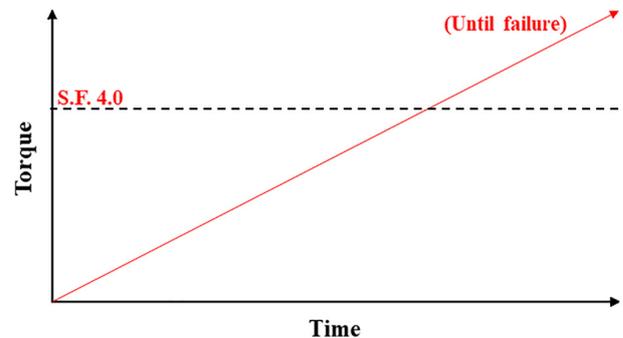
비틀림강도 성능시험은 Table 5와 같이 등각속도에 의한 성능시험이 수행되었다.

1/20 scale 축소모형은 최대 허용 비틀림하중 성능시험 (Permissible loading, T_u)을 수행하였으며, 1/5 scale 축소모형은 추가로 DNV-GL의 복합재료 축계 시험기준(DNVGL -CP-0093, 2015)에 따른 4 cycle loading 성능시험(Rep., Repeated loading)의 두가지 시험(Fig. 12(a) and (b))이 수행되었다.

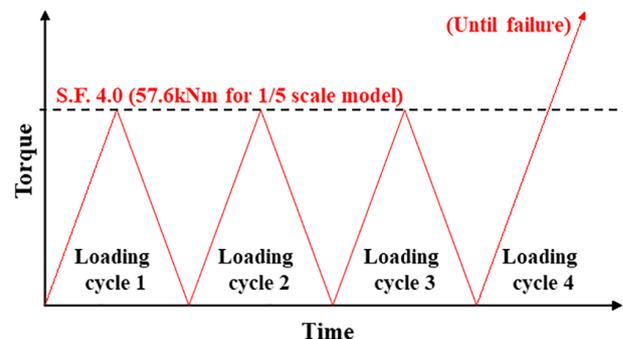
비틀림강도 성능시험을 통해 시험체의 비틀림강도, 회전각 및 시험체 파괴특성이 모니터링 및 계측되었다.

Table 5 Torsional test facility and test conditions

| Scale | Test facility model | Max. design torque (kNm) | Loading speed (deg/sec) |
|-------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 1/20 | Instron (PD4F) | 4 | 1.00 |
| 1/5 | MTS (244.41) | 600 | 0.05 |



(a) Permissible loading test(T_u)



(b) 4 cycle loading test(Rep.)

Fig. 12 Test loading cases

3.2 비틀림강도 성능시험결과

3.2.1 1/20 scale 비틀림강도 성능시험결과

1/20 scale CFRP 축계 비틀림강도 성능시험의 결과는 Table 6 및 Fig. 13에 나타나 있다. Table 6에서 최종 비틀림각도는 Type II가 Type I보다 평균 2.8 % 높게 계측되었으며, 최종 비틀림강도는 0.9 % 낮은 결과를 보였다. 즉, 적층 패턴의 차이는 1/20 scale 시험체의 최종 비틀림각도 및 비틀림강도에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 13은 비틀림 토크와 비틀림 각도의 관계 선도이며, 복합재료 축계의 비틀림강도 특성은 최대 비틀림 토크까지 선형적으로 거동하다가 최종 비틀림강도 이후 급격히 파괴되는 특성을 보였다.

또한, 파괴특성은 파괴 부재의 종류 및 위치로 구분하여 분석하였다. 모든 시험체는 고정부 금속 플랜지-축부 체결용 Bolt 파괴에 이어 고정부 축계 복합소재 파괴(Fig. 14)가 연속적으로 발생했다. 이로써, 전술한 것과 같이 CFRP 축계는 플랜지-축부 접합부가 강도적으로 가장 취약한 것을 확인할 수 있다.

Table 6 Torsion test results on 1/20 scaled CFRP shaft

| Test No. | Type | L.C. | Rotation (degree) | Torque (kNm) | Failure Mode* |
|----------|------|------|-------------------|--------------|---------------|
| #1 | I | Tu | 31.56 | 1.63 | BF → TF |
| #2 | | | 31.61 | 1.69 | BF → TF |
| Average | | | 32.09 (0.0%) | 1.66 (0.0%) | - |
| #3 | II | Tu | 32.69 | 1.63 | BF → TF |
| #4 | | | 33.30 | 1.66 | BF → TF |
| Average | | | 33.00 (+2.8%) | 1.65 (-0.9%) | - |

* Failure mode: Bolt failure on fix part (BF), tube failure on fix part (TF)

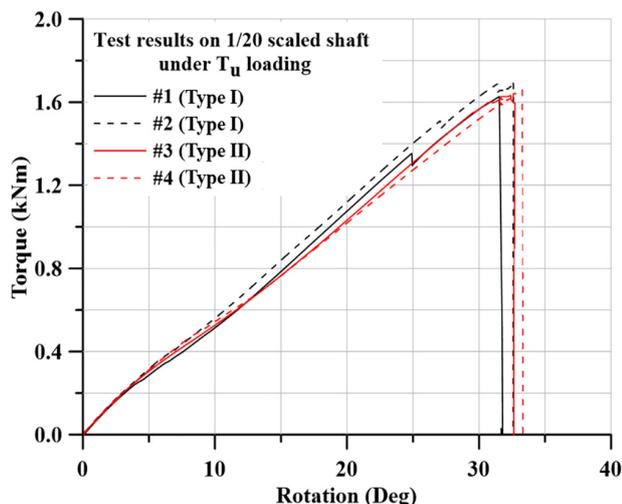


Fig. 13 Torque vs. rotation angle curves on 1/20 scaled CFRP shaft



Fig. 14 Tube failure of 1/20 scaled CFRP shaft

3.2.2 1/5 scale 비틀림 강도 성능시험결과

1/5 scale CFRP 축계 비틀림강도 성능시험의 결과는 Table 7과 같으며, Figs. 15(a), (b)은 1/5 scale 시험체에서의 적층 패턴별 비틀림 토크와 비틀림각도의 관계 선도이다.

T_u 시험에서 Type III 시험체는 Type I 대비 33.1 % 높은 비틀림각도 및 11.6 % 낮은 최종 비틀림강도를 보였다. 이는, Type I의 비틀림강성이 Type III에 비해 높다는 것을 의미하며, Fig. 15(a)에서 확인할 수 있다. Fig. 15(a)의 비틀림각도 $4^\circ \sim 6^\circ$ 구간에서의 비틀림강도의 부분적인 저하 현상은 축부 Bolt 체결부의 Bolt 구멍과 Bolt와의 유격이 없어짐에 따른 현상으로 평가된다. 아울러, 파괴특성은 Type I의 경우 1/20 scale 시험체와 같은 Fig. 16(a)의 금속 플랜지-축부 체결 Bolt의 전단파괴가, Type III의 경우 Fig. 16(b)의 축계 복합소재 파괴가 발생하였다.

Rep. 시험에서 Type III 시험체는 Type I 대비 2.2 % 낮은 비틀림각도 및 43.0 % 낮은 최종 비틀림강도를 보였다. T_u 시험에서 Type I의 높은 비틀림강성은 Rep. 시험에서도 같은 경향을 보였으며, Fig. 15(b)에 나타나 있다. 파괴특성도 T_u 시험과 같이 적층 패턴에 따른 차이를 보였다.

실험 결과로부터 Type I 적층 패턴의 시험체가 비틀림강성 및 강도가 Type III 대비 우수하며, 반복 비틀림 하중으로부터의 강도특성도 우수하다는 것을 확인했다. 이는 복합적인 적층

Table 7 Torsion test results on 1/5 scaled CFRP shaft

| Test No. | Type | L.C. | Rotation (degree) | Torque (kNm) | Failure Mode** |
|----------|------|------|-------------------|----------------|----------------|
| #5 | I | Tu | 14.55 (0.0%) | 80.67 (0.0%) | BF |
| #6 | III | | 19.37 (+33.1%) | 71.35 (-11.6%) | TF |
| #7 | I | Rep. | 16.43 (0.0%) | 96.96 (0.0%) | BR |
| #8 | III | | 16.07 (-2.2%) | 55.24 (-43.0%) | TR |

** Failure mode: Bolt failure on fix part (BF), bolt failure on rotating part (BR), tube failure on fix part (TF), tube failure on rotating part (TR)

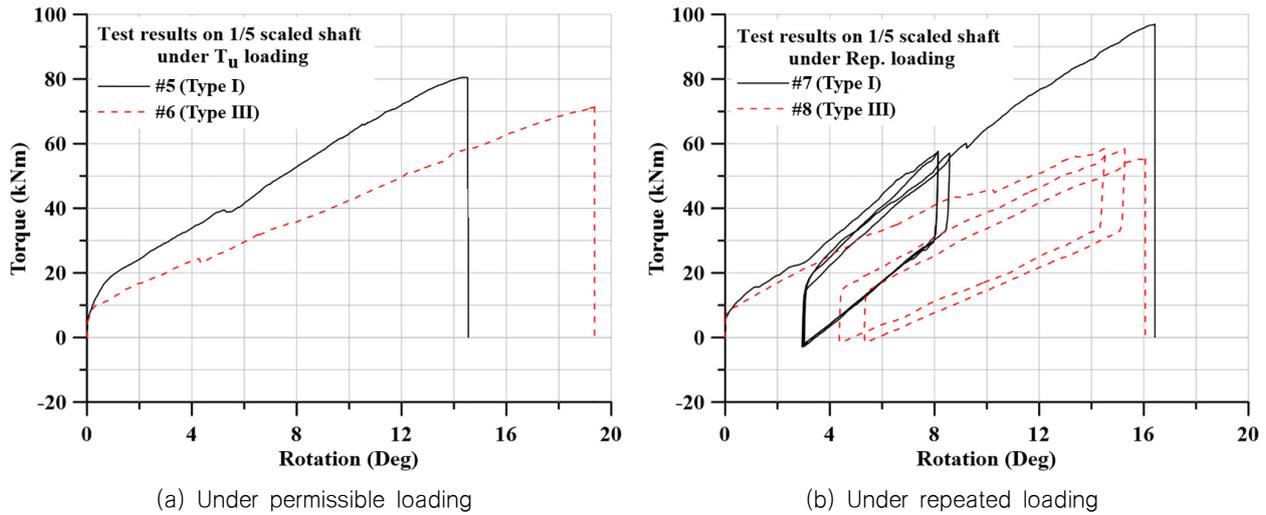


Fig. 15 Torque vs. rotation angle curves on 1/5 scaled CFRP shaft



(a) Bolt failure mode (#5) on Type I models
 (b) Tube failure mode (#6) on Type III models
 Fig. 16 Failure modes of CFRP shaft

각도의 배열보다 45°의 적층 각도에서 응력의 작용 방향이 발생하는 것이 원인으로 사료된다. 따라서, 복합소재 축계는 45°의 적층각도 설계가 높은 강도특성을 나타낼 것으로 기대된다. 또한, Type I의 파손특성은 축계의 복합소재 파손이 아닌 Bolt 부의 파손이 발생한 경향으로 보아 45°의 적층 각도의 축계는 시험값 보다 더 높은 강도 특성을 가지며, 금속 플랜지와 축계의 연결부 보완 시 강도특성의 향상 또는 요구성능을 만족하는 축계의 경량화를 기대할 수 있다.

파괴특성에 있어서, T_u 시험에서는 고정축, Rep. 시험에서는 회전축의 파괴가 발생했으며, 이는 축부 Bolt 체결부의 Bolt 구멍과 Bolt와의 유격 변화가 반복하중에 따라 회전부로 집중된 영향이라고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 선박의 경량화를 위한 노력 중 CFRP의 선박용 축계 적용을 위한 비틀림강도 특성을 분석하였다. 선정된 강

화재 및 모재로 Filament winding 공법을 이용하여 두가지 규모의 축소 시험편을 설계, 제작하여 비틀림강도 성능시험을 통해 비틀림강도 특성을 평가하였다. 아울러, 강화재의 적층각도가 미치는 영향을 확인하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 선박용 CFRP 축계 제작방법으로써 HT Grade 탄소섬유의 강화재와 에폭시 수지의 모재로 건식 Filament winding 공법 적용하며, Bolt 체결법을 선정함.
- 세가지 적층패턴을 고려한 두가지 규모의 축소 모형에 대하여 비틀림강도 성능시험을 통하여 선박용 CFRP 축계의 비틀림강도 특성 및 파괴특성을 평가함.
- 강화재의 적층각도가 축계의 비틀림강성 및 강도에 미치는 영향이 1/20 scale에서는 미비하지만, 1/5 scale에서는 확인되었으며, 적층각도가 복합적인 경우보다 45°인 경우 더 우수한 비틀림강도 특성이 확인되었고, 반복하중 하에서도 같은 현상이 나타남을 확인함.
- 선박용 CFRP 축계의 플랜지 체결부는 비틀림강도 저하에 영향을 미치며, 추가 연구가 필요함.

후 기

본 연구는 해양수산부 해양안전 및 해양교통시설기술개발사업의 '그린십 금속 의장 부품 대체 난연, 내압 및 고강도 복합소재개발' 사업으로 수행된 연구결과 중 일부이고, 산업통상자원부의 재원으로 추진 중인 '미래 해양플랜트 글로벌 전문인력양성사업(P0012646)'의 지원으로 수행된 연구결과이다.

References

Aerospace engineering, 2012. *Composites Manufacturing*, <https://www.aerospaceengineeringblog.com> (Accessed 09 July 2021).

Compositesworld, 2020, *Rediscovering the benefits of prepregs in composites manufacturing*, <http://www.compositesworld.com> (Accessed 09 July 2021).

Development trend of dissimilar material bonding technology, 2019. *KEIT PD Issue report*, 19(4), pp.59-66.

DNV-GL, 2015. *(DNVGL-CP-0093) Composite drive shafts and flexible couplings - Non-metallic materials*, DNV-GL.

Guilherme, F. et al., 2017. Evaluation of Out-of-Autoclave (OOA) epoxy system. *Polymers*, 27(4), pp.355.

Honda, S., 2003. *Total epoxy resin*, Epoxy Resin Technology Association.

Jang, J.W., Cho, J.H., Oh, D.J. & Kim, M.H., 2015. Fatigue life prediction of CFRP using fatigue progressive damage model. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.248-254.

Jspart, J.P. & Klaus, W., 2016. Design of joints in steel and composite structures. *ECCS Eurocode Design Manuals*, pp.77-78.

Kim, J.H., Kim, C.J., Cha, C.S. & Kim, J.H., 2012. Recalculation research of material properties for CFRP FEM Non-linear analysis. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21(4), pp.608-612.

Kim, S., Shin, H.C. & Ha, S.K., 2020. A study of carbon NCF prepreg manufacturing and stacking pattern optimal design using structure analysis. *Composites Research*, 33(1), pp.13-18.

Kwon, D.J., Park, S.M., Park, J.M. & Kwon, I.J., 2017. A study on bonding process for improvement of adhesion properties between CFRP-metal dual materials. *Composites research*, 30(6), pp.416-421.

Lee, T.H., 2011. Applications of carbon fiber to the aerospace. *Proceeding of 2011 KSPE Fall Conference*, pp.511-514.

Lee, Y. & Cheong, S.K., 2014. Bending and torsional characteristics of rectangular CFRP tubes with various aspect ratios. *Composites Research*, 27(2), pp.37-41.

Mallick, P.K., 1988. Effects of hole stress concentration and its mitigation on the tensile strength of sheet moulding compound (SMC-R50) composites. *Composites*, 19(4), pp.283-287.

MAN B&W ME-B Engines, 2012. *Marine-broschures*, pp.9.

Material Technology White Paper, 2011. *KIMS*, pp.891-897.

Möhring, H. et al., 2015. Materials in machine tool structures. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(2), pp.24.

Park, S.C. et al., 2017. A study on the fatigue bending strength of quasi-isotropic CFRP laminates subjected to impact damage. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 18(10), pp.688-695.

Potter, K., 1996. *An introduction to composite products: design, development and manufacture*. 5th Ed. Springer.

RachTR Chemicals, 2016. *The advantages of epoxy resin versus polyester in marbles & stones*, RachTR chemicals.

Seo, M.K. & Park, S.J., 2010. Carbon fiber manufacturing method and applications. *Polymer Science and Technology*, 21(2), pp.130-131.

Yang, Y.J. & Yang, I.Y., 2015. Influence of residual bending fatigue strength on impact damage of CFRP composites. *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(3), pp.7-12.



김민규



신익기



김선진



박대겸



서정관