

## 공중합 아라미드의 굴곡피로성능 평가에 관한 연구

윤홍진\* · 오동기\* · 김창주\* · 이종대\*\*†

\*FITI시험연구원 기반활용센터  
07791 서울특별시 강서구 마곡중앙8로3길 79  
\*\*충북대학교 화학공학과  
28644 충청북도 청주시 서원구 충대로 1

(2024년 7월 5일 접수, 2024년 8월 22일 수정본 접수, 2024년 9월 11일 채택)

## A Study on the Flexural Fatigue Performance Evaluation of Copolymer Aramid Fiber

Hong Jin Yoon\*, Dong Ki Oh\*, Chang Ju Kim\* and Jong Dae Lee\*\*†

\*Research Infrastructure Utilization Center, FITI Testing & Research Institute, Seoul, 07791, Korea

\*\*Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdaero, Seowongu, Cheongju, Chungbuk, 28644, Korea  
(Received 5 July 2024; Received in revised from 22 August 2024; Accepted 11 September 2024)

### 요 약

공중합 아라미드는 기존의 파라계 아라미드의 단점인 낮은 신축성을 개선한 섬유로서 굴곡 성능이 우수한 특성을 갖고있지만 굴곡피로 성능을 평가할 수 있는 평가법은 부재한 실정이다. 현재 국내에서는 공중합 아라미드 개발을 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며 아라미드의 신뢰성을 세계적 수준까지 발전시키기 위해서는 굴곡성능을 평가할 수 있는 평가법 개발이 필요한 상황이다. 본 연구에서는 공중합 아라미드의 굴곡피로성능을 평가할 수 있는 평가장치와 평가법을 개발하고 아라미드의 굴곡피로성능을 분석하였다. 굴곡피로시험기의 굴곡부는 마찰을 최소화 하기 위해 롤러 재질을 세라믹 재질로 선정하였으며 롤러 형태는 회전형태로 제작하였다. 롤러의 직경은 최소허용곡률을 계산하여 10 mm로 선정하였다. 굴곡피로시험을 통해 B<sub>10</sub> 수명을 산출하였으며 파라계 아라미드는 125,770회, 공중합 아라미드 598,150회, ANF(Aramid Nano Fiber)로 표면처리한 공중합 아라미드는 589,073회로 나타내었다. S-N선도를 통해 하중 변화에 따른 피로 수명 관계를 파악하였으며 고하중 조건에서도 공중합 아라미드 가 파라계 아라미드 보다 우수한 굴곡피로 성능을 나타내고 ANF로 표면처리한 공중합 아라미드 또한 우수한 굴곡 피로 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

**Abstract** – Although copolymer aramid is a fiber with excellent flexural performance, there is no test method to evaluate flexural fatigue performance. Various studies are currently being conducted in Korea to develop copolymer aramid, and in order to develop the reliability of aramid fibers to a global level, it is necessary to develop a test method to evaluate the flexural fatigue performance of aramid fibers. In this study, we developed a test equipment and test method that can evaluate the flexural fatigue performance of copolymer aramid and analyzed the flexural fatigue performance of aramid fiber. Flexing rollers are made of ceramic materials and rotating shapes to minimize friction. The diameter of the roller was set to 10 mm by calculating the minimum allowable curvature. The B<sub>10</sub> life was calculated through a flexural fatigue test, and the para-aramid was 125,770 cycles, the copolymer aramid was 598,150 cycles, and the aramid nano fiber(ANF) coated copolymer aramid was 589,073 cycles. Through the S-N diagram, the fatigue life relationship according to the load change was confirmed. copolymer aramid fibers exhibit better flexural fatigue performance than para-aramid fibers at high loads. The ANF coated copolymer aramid also exhibits excellent flexural fatigue performance.

Key words: Copolymer aramid, Fiber, Flexural fatigue, Flexing roller, B<sub>10</sub> life, Weibull distribution

### 1. 서 론

아라미드는 직쇄상의 아미드기를 가지고 있는 유기섬유로 고강도, 고탄성률, 내열성을 보유하여 내구성이 우수하고 높은 탄성률을 요구하는 산업에서 다양하게 활용되고 있는 소재이다[1-3]. 주요 용도로는 방호소재와 타이어코드, 호스, mechanical rubber goods (MRG)

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jdlee@chungbuk.ac.kr

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.

등의 고무복합재료의 보강소재로 사용되고 있다[4-6]. 이러한 제품들은 소재의 유연성을 많이 요구하는 제품들로서 신축 특성이 낮은 경우 성능 저하와 수명 단축을 일으키는 원인이 된다[7]. 따라서 고무복합재료 산업에서는 고강도의 특성을 유지하면서도 고무복합소재와 같이 유연성을 갖는 아라미드 소재를 요구하고 있으며 이와 관련된 연구도 많이 진행되고 있다[8,9]. 국외에서는 1973년 일본의 테ijin사에서 테크노라(co-poly-(paraphenylene/3,4'-oxydiphenylene terephthalamide)라는 공중합 아라미드 상품을 개발에 성공하였다[10]. 테크노라는 미국 듀폰사의 케블라(poly-para-phenylene-terephthalamide) 등 기존의 파라계 아라미드보다 우수한 신도 특성을 갖고 있으며 분자쇄의 유연성을 반영해 내구성이 뛰어난 특성을 갖고 있어 고성능을 요구하는 복합재에 많이 사용되고 있다[11,12]. 현재 테크노라는 전세계에서 유일하게 유통되고 있는 공중합 아라미드로서 현재 국내에서는 전량 일본에서 수입하고 있는 실정이다. 또한 아라미드의 굴곡 성능과 수명을 평가하기 위해 해외제조사들은 각기 다른 방법으로 굴곡 피로 시험방법을 수립하여 신뢰성 데이터를 확보하고 있는 반면, 국내 기업들의 경우 표준화된 평가방법이 없어 개발 아라미드의 굴곡 피로 성능에 대한 정확하고 객관적인 평가가 어려운 실정이다[13,14]. 아라미드가 고무 보강재 등 복합재료의 보강재료로 사용될 경우 제품의 반복적인 굽힘 등에 의한 움직임으로 인해 주기적으로 굴곡 피로가 발생하게 되고 최종적으로 기계적 물성이 저하되어 제품의 파단 및 고장의 원인이 되기도 한다. 대표적인 예로는 아라미드가 고리 구조를 갖는 환편 직물 형태로 고무와 복합되어 고온 환경에 적용되는 자동차용 고무 호스에 사용되는 경우로 자동차의 엔진과 연결되어 있는 고무 호스는 엔진으로부터 발생하는 압력과 열로 인해 고온의 환경에서 인장과 압축을 동시에 받게 되고 주기적인 피로를 견디지 못하고 파단이 발생하는 경우가 있다[15]. 이에 아라미드의 신뢰성 평가법이 개발되고 이를 통해 국내 기업들이 개발한 아라미드의 신뢰성이 확보된다면 해외 시장에서 충분한 경쟁력을 갖게 될 것이다.

또한 아라미드는 표면이 매끄럽고 화학적 불활성인 특성으로 인해 낮은 접착력 및 섬유간의 우수한 응집력으로 인한 매트릭스 내 낮은 분산성을 나타낸다[16-18]. 이러한 단점은 굴곡성능에 의한 고장발생과 같이 굴곡성능을 저하시키는데 이것은 고무복합재료의 주요 고장원인중 하나이다. 이를 해결하기 위해 아라미드 표면 거칠기를 증가시키는 다양한 표면개질 방법이 연구되고 있다. 대표적인 표면처리 방법으로는 산-염기 처리[19], 전기화학적 산화 처리[20], 플라즈마 처리[21], 오존 처리[22] 등이 있다. 최근에는 LEE[23] 등 공중합 아라미드의 표면처리를 통해 고무와의 접착성능이 우수하다는 연구결과가 보고된 바 있다. 이처럼 주요 고장원인 중 하나인 매트릭스와의 접착성능을 향상시키기 위해 아라미드의 표면처리를 통한 섬유-고무 계면의 화학적 결합 및 기계적 성능을 향상시키는 연구가 많이 보고되고 있다.

본 연구에서는 공중합 아라미드의 굴곡피로성능을 평가할 수 있는 평가장치와 평가법을 개발하고 개발된 평가법을 적용하여 파라계 아라미드, 공중합 아라미드 및 접착성능 향상을 위해 표면개질한 공중합 아라미드의 굴곡피로성능을 분석하였다. 이를 통해 파라계 아라미드와 공중합 아라미드의 신뢰성을 확인하고 공중합 아라미드의 표면개질 공정이 피로성능에 영향을 미치는지 확인하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험편

본 실험에서는 파라계 아라미드로 헤라크론(Kolon, Korea, 1000 Denier)을 사용하였으며 공중합 아라미드는 테크노라(Teijin, Japan, 1000 Denier)를 사용하였다. 접착성능이 향상된 공중합 아라미드는 LEE[23] 등이 연구한 방법에 따라 제조하였으며 공중합 아라미드의 표면 개질을 위해 수산화칼륨(Sigma Aldrich, USA, ≥85%)와 Dimethyl Sulfoxide(DMSO, Sigma Aldrich, USA, ≥99.9%)를 사용하였다.

### 2-2. 실험방법

#### 2-2-1. 공중합 아라미드 표면 개질

공중합 아라미드의 표면 개질 공정은 Fig. 1에 나타내었다. 공중합 아라미드는 테크노라를 사용하였으며 표면 개질 과정에서 발생할 수 있는 오염물질을 제거하기 위하여 에탄올로 6시간 이상 초음파 세척한 후 60 °C에서 6시간 동안 건조시켰다. 1 g의 테크노라와 KOH 1.5 g을 DMSO 500 ml에 첨가한 후 300 rpm으로 7일간 교반시켜 나노크기의 공중합 아라미드가 녹아있는 ANF(Aramid Nano Fiber) 용액을 제조하였다. 제조된 ANF 용액 500 ml에 1 g의 테크노라를 10분간 침지시켜 표면을 개질하였다.

#### 2-2-2. 굴곡피로시험기

Miraftab의 조사에 따르면 섬유의 굴곡피로를 평가하는 연구장비는 다양한 형태로 개발되어 지고 있으며 각각의 장단점이 있다고 보고하였다. Franz가 개발한 연구장비는 섬유의 한쪽 끝은 클램프에 연결하고 다른 쪽 끝은 추를 걸어서 굴곡 피로를 적용하는 장비로 해당 방법은 섬유를 180° 이상 굴곡을 가할 수 있다는 특징이 있으나 클램프의 모형이 섬유의 굴곡피로 성능에 많은 영향이 미칠 수 있는 단점이 있다. Wong이 개발한 굴곡피로장비는 섬유를 핀에 360°로 감아준 후 수직 방향으로 하중으로 가하는 방식으로 핀이 앞뒤로 회전하면서 일정하게 굴곡을 가하는 연구장비이다. Wong의 기술은 굴곡피로시 마찰을 최소화 시키는 장점이 있지만 테스트 결과 섬유 종류별로 수명 차이를 보이지 않아 변별력이 낮은 단점이 있어 섬유에 굴곡피로 성능을 평가하기 위해서는 연구장비의 보완이 필요하다. Goswami가 개발한 연구장비는 섬유의 한쪽 끝에서는 진동을 일으키고 다른 쪽 끝은 수직으로 추를 통해 일정 하중을 가하며 회전하는 핀 위로 섬유가 이동하도록 만든 연구장비로서 섬유에 굴곡 피로를 가한 후 표면 분석한 결과 섬유의 굴곡 피로시 발생하는 파단의 형태와 유사한 형태로 섬유가 파단되는 현상을 확인할 수 있었다. Goswami의 기술은 핀의 회전유무와 크기 등 핀의 형태에 따라 결과가 달라지며 평가하고자 하는 섬유의 특징에 맞춰서 핀의

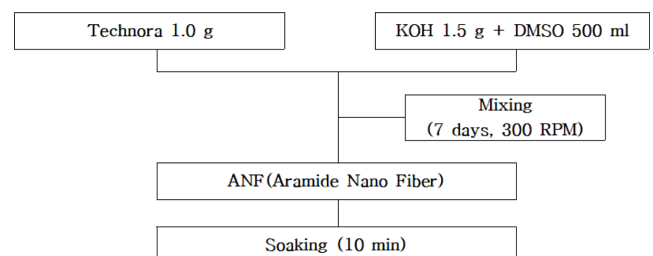


Fig. 1. Synthesis process of ANF.



Fig. 2. Test equipment for flexural fatigue.

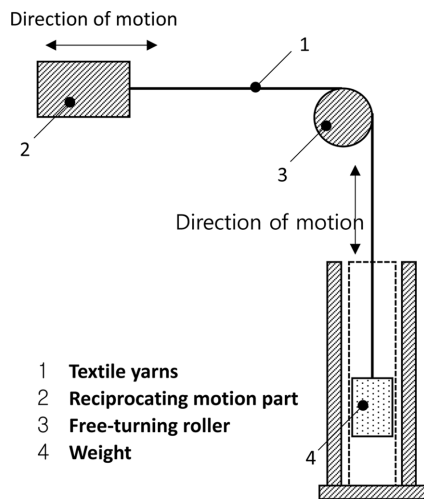


Fig. 3. Schematic diagram of the flexural fatigue test.

형태를 결정하는게 중요하다[24]. 본 연구에서 제작한 굴곡피로시험기는 Goswami의 연구장비의 원리를 적용하여 제작하였다.

아라미드의 굴곡피로성능을 측정할 수 있는 시험장치의 구성요

소는 롤러가 장착되어있는 굴곡부와 하중부 및 왕복운동장치로 구성되어 있으며 제작한 굴곡피로시험기는 Fig. 2에 나타내었고 굴곡피로시험의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 굴곡부의 롤러는 왕복운동장치와 하중의 위치를 고려하여 시료가 각각 수평, 수직을 이루도록 고정하였으며 하중이 가해진 시료의 앞·뒤 움직임에 따라 자유롭게 회전이 될 수 있도록 제작하였다. 또한 롤러의 재질은 아라미드와 롤러 간 마찰에 의한 손실을 최소화시킬 수 있도록 세라믹 재질로 선정하였다. 굴곡부의 롤러는 Fig. 4에 나타내었다. 하중부는 하중에 의한 외부 충격이 시험편에 발생하지 않도록 하중추 위·아래에 테프론 가이드 및 좌·우에는 가이드 바를 설치하였다. 하중부는 Fig. 5에 나타내었다. 왕복운동장치는 일정한 주파수와 길이로 지정횟수만큼 왕복 운동할 수 있는 장치로서 전·후 이동방향과 하중에 의해 속도의 차이가 발생하지 않도록 제작하였다.

### 2-2-3. 굴곡부의 조건 및 재질 선정

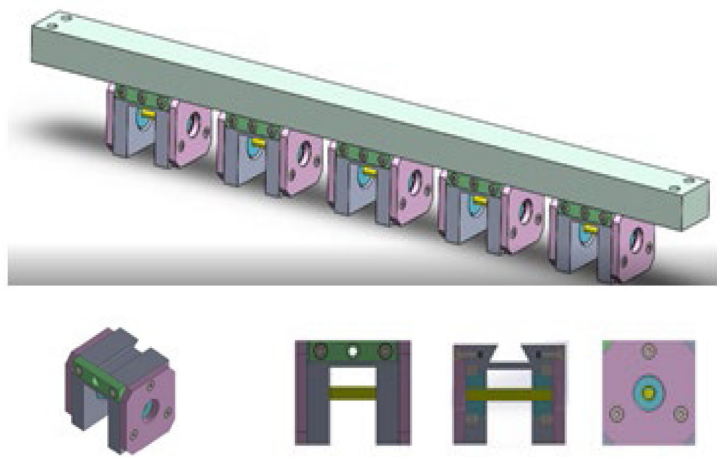
아라미드에 가해지는 굴곡에 의한 피로특성을 평가하기 위해서는 아라미드에 직접적으로 굴곡이 가해지는 굴곡부의 조건 선정이 매우 중요하다. 롤러의 직경에 따라 원사의 굴곡정도가 달라지며 직경이 작아질수록 아라미드에는 심한 굴곡이 가해지게 된다. 또한, 롤러의 곡률반경이 너무 작으면 인장면에서 원사의 신율을 초과할



Fig. 5. Image of loading system.

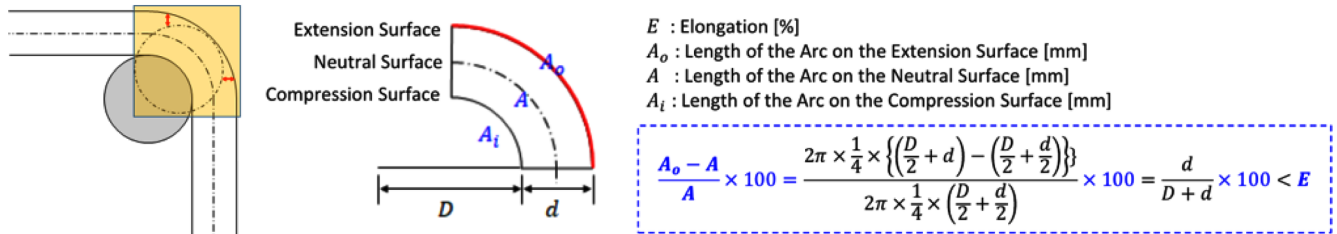


Fig. 4. Image of flexing roller.



**Table 1** Physical property of aramid fiber (Copolymer aramid and Para aramid)

	Denier	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elongation (%)	Diameter (mm)
Copolymer aramid	1 000	1.39	3.9	0.139
Para aramid	1 000	1.44	3.1	0.314

**Fig. 6.** Radius of curvature.

수 있는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 굴곡에 의한 원사의 신뢰성을 평가하기 위해서는 최소허용곡률을 계산하여 적절한 롤러의 크기를 설정할 필요가 있다. 본 연구에서는 1000 Denier의 원사형태의 아라미드를 사용하였으며 물성은 Table 1에 나타내었다. 최소허용곡률은 Fig. 6의 식을 사용하여 계산하였으며 최종적으로 굴곡부 롤러의 직경은 10 mm로 선정하였다.

굴곡부의 재질 또한 굴곡에 의한 피로특성을 평가하는데 매우 중요한 부분이다. 반복적인 굴곡을 가했을 때 롤러 표면과 아라미드 간 마찰이 발생할 수 있으며 마찰 현상을 최소화하기 위해 표면 거칠기가 낮은 재질의 롤러를 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 굴곡부의 회전 유무 및 세라믹 재질의 롤러와 SUS 재질의 롤러를 적용하여 최적의 굴곡부 구조 설계 및 굴곡피로특성 분석에 적합한 롤러 재질을 선정하였다.

#### 2-2-4. 굴곡피로시험

굴곡피로시험은 Fig. 2와 같이 제작한 피로시험기를 이용하였다. 시험은 Table 2와 같은 조건으로 온도( $20 \pm 2$  °C, 상대습도( $65 \pm 4$ ) %에서 진행하였다. 피로 수명 산출을 위해 시험편은 300 mm 이상으로 하여 클램프 파지간격 사이에 충분히 물릴 수 있도록 하였다. 시험횟수는 S-N 선도를 작도할 수 있도록 3회 이상을 진행하였다. 또한 시험편은 KS K ISO 139에 따라 시험실 표준상태의 조건인 온도( $20 \pm 2$  °C, 상대습도( $65 \pm 4$ ) %에서 24 시간 방치시킨 후 시험을 진행하였다.

#### 2-2-5. 물성분석

굴곡부 롤러의 표면 거칠기를 확인하기 위해 표면조도 측정기 (Accretech, Surfcom 1400G, Korea)를 이용하여 확인하였다. 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope, Carl Zeiss, Crossbeam 550L, Germany)을 통해 굴곡피로시험으로 파단

**Table 2.** Flexural fatigue test conditions

Temperature	( $20 \pm 2$ ) °C
Load	200 g
Roller material	Ceramic (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99%)
Amplitude	$\pm 10$ mm
Pulse	Sine wave
Frequency	3 Hz

된 시험편의 형태 및 표면을 확인하였으며 공중합 아라미드의 표면 개질에 따른 표면 변화를 분석하였다. 일정 횟수 굴곡 후 아라미드의 강도 변화율을 확인하기 위해 인장강도를 KS K 0412 표준에 맞춰 만능재료시험기(Instron, 5965)를 사용하여 측정하였다.

#### 2-2-6. 수명평가

아라미드의 굴곡피로에 대한 수명산출은 Minitab 17 (Minitab, USA)을 사용하여 산출하였다. 굴곡피로시험의 시험하중 조건에서 반복수는 와이블 분포를 가정하여 이에 따른 신뢰성 척도를 계산하였으며 정의된 고장(피로 파괴)에 따라 시험하중 조건에서 3개의 시험편에 대하여 굴곡 피로 시험을 수행하여 신뢰수준 90%에서 B<sub>10</sub> 수명을 산출하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 공중합 아라미드 표면개질에 따른 표면 분석

공중합 아라미드 표면 개질 전·후의 SEM 이미지를 Fig. 7에 나타내었다. 표면 개질 전에는 관찰되지 않았던 코팅층이 개질 후에는 형성된 것을 볼 수 있다. LEE[23] 등이 연구한 결과에서는 침지 시간이 증가할수록 코팅층이 점점 두꺼워지지만 일정시간 이상 침지하게 되면 반응하지 않는 KOH가 가수분해를 유도하고 공중합 아라미드는 분해 및 피브릴화되어 물성이 저하 될 수 있다고 보고하고 있으며 본 연구에서는 침지시간을 10분으로 설정하고 표면 개질을 진행하였다.

#### 3-2. 굴곡부의 조건 및 재질 영향

굴곡부 롤러의 회전 유무가 아라미드의 피로 수명에 영향을 미치는지 확인하고 마찰의 영향을 최소화 하기 위한 구조 설계를 위해 세라믹 재질 및 SUS 재질과 회전이 되는 롤러와 회전이 되지 않는 롤러 4종을 제작하여 굴곡 후 강도유지율을 분석하였으며 측정 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 굴곡 후 강도유지율 시험은 공중합 아라미드인 테크노라(Teijin, Japan)를 사용하였으며 KS K 0412에 따라 인장강도 측정 후 강도유지율을 계산하였다. 세라믹 재질의 롤러를 회전시켰을 때 2,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 99%, 10,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 95%, SUS 재질의 롤러를 회전시켰을 때 2,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 96%, 10,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 94%로 세라믹 재질과 SUS 재질의 강도유지율 차



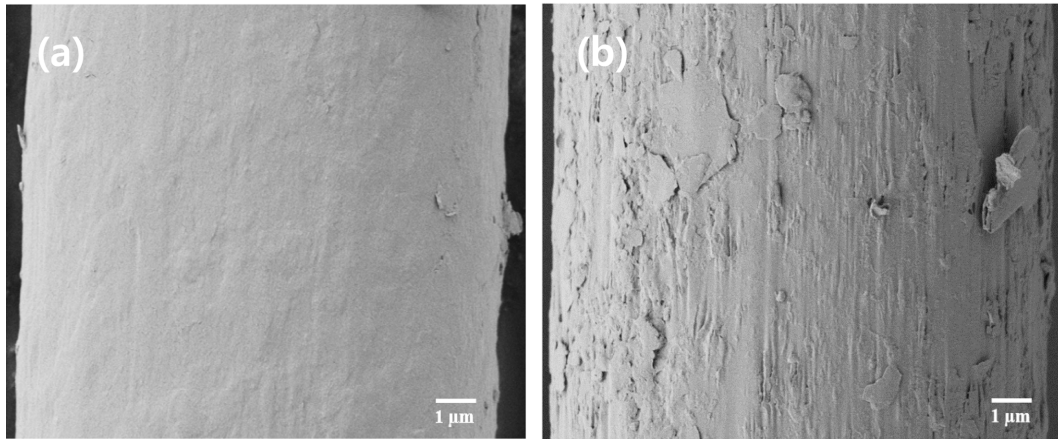


Fig. 7. Scanning electron microscopy of ANF coated aramid fiber surface (a) 0 min, (b) 10 min.

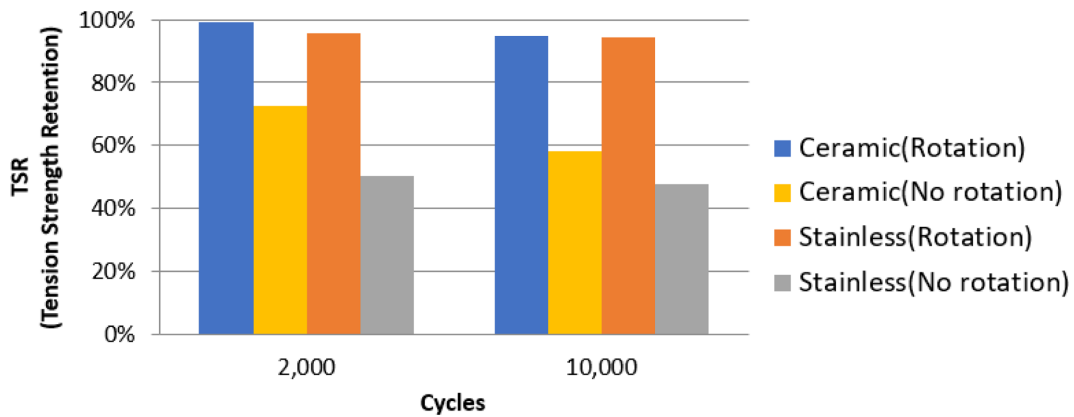


Fig. 8. The retention ration of tensile strength.

이는 크지 않았다. 이에 비해 세라믹 재질의 고정된 롤러를 사용하였을 때 2,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 73%, 10,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 58%, SUS 재질의 고정된 롤러를 사용하였을 때 2,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 50%, 10,000 사이클 굴곡 후 강도유지율은 48%로 세라믹 재질과 SUS 재질 모두 인장강도 유지율 차이가 상대적으로 높았다. 롤러의 회전 유무에 따른 굴곡 피로시 공중합 아라미드 표면이 어떻게 변하는지 확인하게 위해 SEM 이미지를 분석하였으며 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 롤러가 고정된 상태에서 굴곡피로를 가했을 때 2,000 사이클 굴곡 후 표면이 마모가 되었음을 확인할 수 있었다. 10,000 사이클 후에는 표면의 마모상태가 증가함을 확인할 수 있었고 최종적으로 파단 되었을 때는 파단면이 뜯어진 듯한 형태가 나타났다. 이에 반해 회전이 되는 롤러를 사용하여 굴곡피로를 가했을 때는 2,000 사이클 굴곡 후에는 일부 표면에서의 마모가 발생함을 확인하였으며 10,000 사이클 굴곡 후에는 측면부가 갈라지는 현상을 확인하였다. 최종적으로 파단 되었을 때는 길이 방향으로 갈라지며 고정된 롤러를 사용하였을 때보다 깨끗하게 파단 된 것을 확인할 수 있었다. 이는 Jariwala[25]의 연구결과를 통해서도 확인할 수 있다. Jariwala는 피로시험시 롤러를 고정시킨 후 테스트하게 되면 롤러와 섬유 사이에 열이 발생하여 피로 수명을 단축시킨다고 보고하였으며 롤러가 회전되는 형태에서 테스트를 하게 되면 굴곡 파괴의 형태는 처음에는 섬유가 갈라지듯이 균열이 발생하고 최종적으로 뾰족한 형태의 모

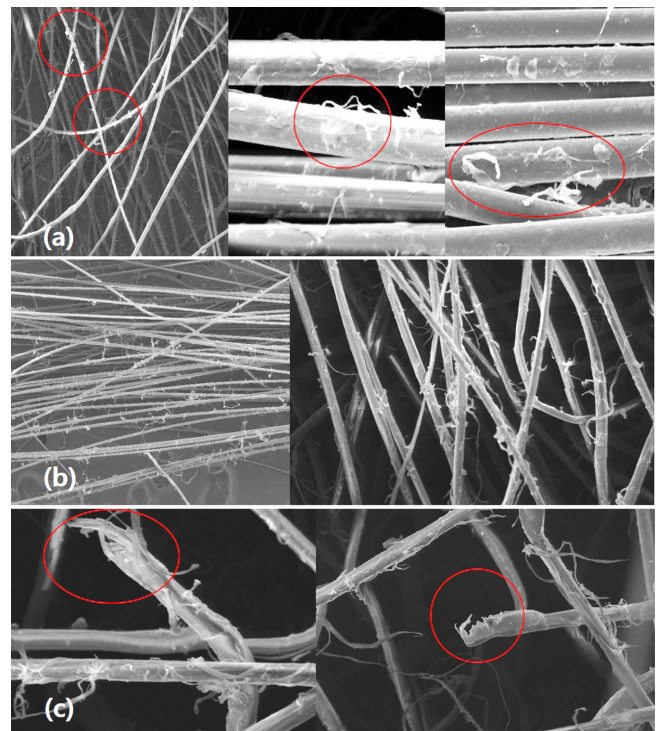


Fig. 9. Scanning electron microscopy of copolymer aramid fiber by friction (a) 2,000 cycles, (b) 10,000 cycles, (c) breakage.

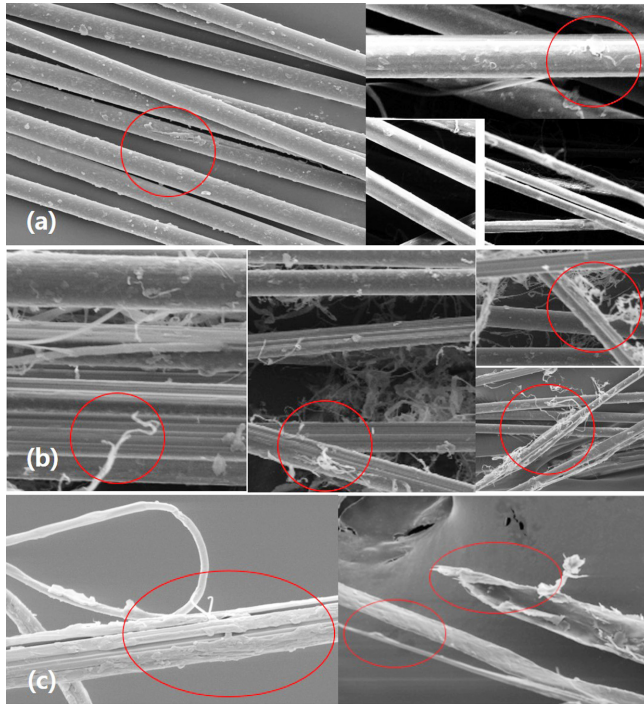


Fig. 10. Scanning electron microscopy of copolymer aramid fiber by flexural fatigue (a) 2,000 cycles, (b) 10,000 cycles, (c) breakage.

Table 3. Roughness measurement of rollers

	Ceramic roller	Stainless roller
$R_a$	0.303 $\mu\text{m}$	0.718 $\mu\text{m}$
$R_z$	3.207 $\mu\text{m}$	5.857 $\mu\text{m}$

형으로 섬유가 파단이 된다고 보고하였다. 이와 같은 연구결과를 Fig. 10의 SEM 이미지를 통해서도 확인하였다. 4종의 롤러 제작 및 굴곡피로시험을 통해 롤러가 회전될 경우 롤러 표면과 공중합 아라미드 접촉면이 마찰의 영향을 덜 받는 것을 알 수 있었으며 굴곡피로 시험시 굴곡부의 롤러 구조는 고정된 형태보다 회전형태가 적합함을 알 수 있었다.

Table 3은 세라믹 재질 및 SUS 재질로 각각 제작한 롤러의 표면조도 값을 나타내었다. 표면조도 측정은 JIS B 0601 표준에 맞춰 표면조도 측정기(Accrettech, Surfcom 1400G)를 사용하여 측정하였다. 측정 결과 SUS 재질 보다 세라믹 재질 롤러의 표면조도 값이 낮은 것을 확인할 수 있었으며 세라믹의 낮은 표면조도 특성은 굴곡 시험에서 마찰을 최소화 시킬 수 있다.

굴곡 후 인장강도의 상대표준편차를 계산한 값을 Fig. 11에 나타내었다. SUS 재질을 사용하였을 때 보다 세라믹 재질의 롤러를 사용하였을 때 상대표준편차 값이 2배 이상 낮았으며 이는 세라믹 재질의 롤러를 사용하였을 때 데이터의 유효성이 더 높다는 것을 알 수 있다. 또한 세라믹의 경도는 1,200  $\text{kg}/\text{m}^2$ 으로 경도가 200  $\text{kg}/\text{m}^2$ 인 SUS에 비해 높고 열팽창 계수가 낮아 고온 및 저마찰 시험에 적합하다. 공중합 아라미드는 고온의 환경에서 사용되는 복합재의 보강재로 많이 사용되며 위와 같이 표면조도 값과 강도유지율의 상대표준편차 등을 비교해보면 아라미드의 굴곡 피로 시험시 굴곡부의 롤러재질은 SUS 재질 보다는 세라믹 재질이 적합하다.

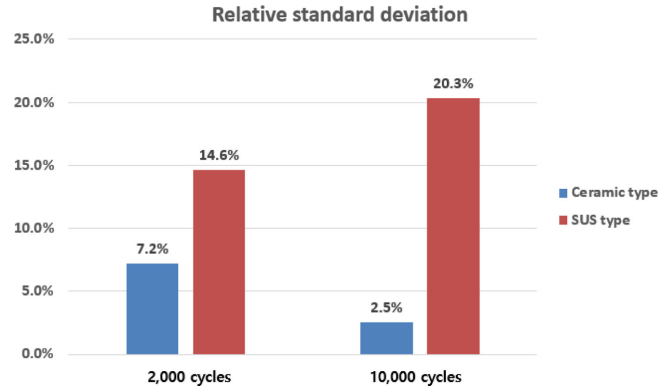


Fig. 11. Relative standard deviation of tensile strength after flexural fatigue test (Copolymer aramid, roller diameter : 10 mm).

Table 4.  $B_{10}$  life of the aramid fibers for flexural fatigue calculated from breaking numbers

	Para aramid	Copolymer aramid	ANF coated copolymer aramid
Number of cycles	140,495	620,643	631,501
	132,607	678,642	682,397
	161,998	771,046	725,302
$B_{10}$	125,770	598,150	589,073

### 3-3. 아라미드의 굴곡피로 특성 및 수명산출

아라미드에 가해지는 굴곡에 의한 피로 특성을 평가하기 위해 굴곡피로 시험을 수행하였으며 이를 통해 굴곡 피로 수명을 평가하였다. 굴곡 피로 수명은 원사 형태의 아라미드에 일정한 하중을 가한 상태에서 반복적인 굴곡을 주어 파단이 일어나게 되는 횟수를 의미한다. 굴곡피로시험은 파라계 아라미드로 헤라크론을 사용하였으며 공중합 아라미드는 테크노라와 표면처리된 공중합 아라미드 등 총 3종의 아라미드에 대하여 비교 시험하였다.

Table 4는 일정한 하중(200 g)에서의 굴곡피로 시험 결과 및  $B_{10}$  수명을 산출 한 값을 나타내었으며 Fig. 12는 피로 거동을 와이블 분포에 적용한 결과를 그래프로 나타내었다.  $B_{10}$  수명은 제품의 신뢰성을 평가하는 중요한 지표중 하나로서 모집단에서 10%의 부품이 고장나는 시점을 이야기 한다.  $B_{10}$  수명 산출 결과 파라계 아라미드는 125,770회, 공중합 아라미드는 598,150회, ANF로 표면처리한 공중합 아라미드는 589,073회로 나타내었다. 일반적인 아라미드는 신축성이 매우 낮은 특성이 있는 반면에 공중합 아라미드는 낮은 신축성을 보완한 섬유로서 굴곡피로시험 결과를 통해서 공중합 아라미드의 특성을 확인할 수 있었다. 또한 접착성을 향상시키기 위해 표면처리를 한 공중합 아라미드도 우수한 굴곡피로성능을 유지하는 것을 확인할 수 있었다. Kimura[14]의 문헌에서는 테크노라는 파라계 아라미드보다 방향성이 우수하고 결정성이 작아 굴곡피로 성능이 우수하다고 보고하고 있으며 이는 본 연구를 통해서도 확인할 수 있었다. 본 연구를 통해 공중합 아라미드의 우수한 신뢰성을 확인하였으며 자동차용 고무 타이밍 벨트의 보강 코드와 같은 고강도 및 고내구성이 요구되는 고무 보강재에 적합한 소재임을 확인하였다.

### 3-4. S-N 선도 추정

하중에 따른 굴곡피로수명 및 굴곡피로횟수에 따른 한계피로강

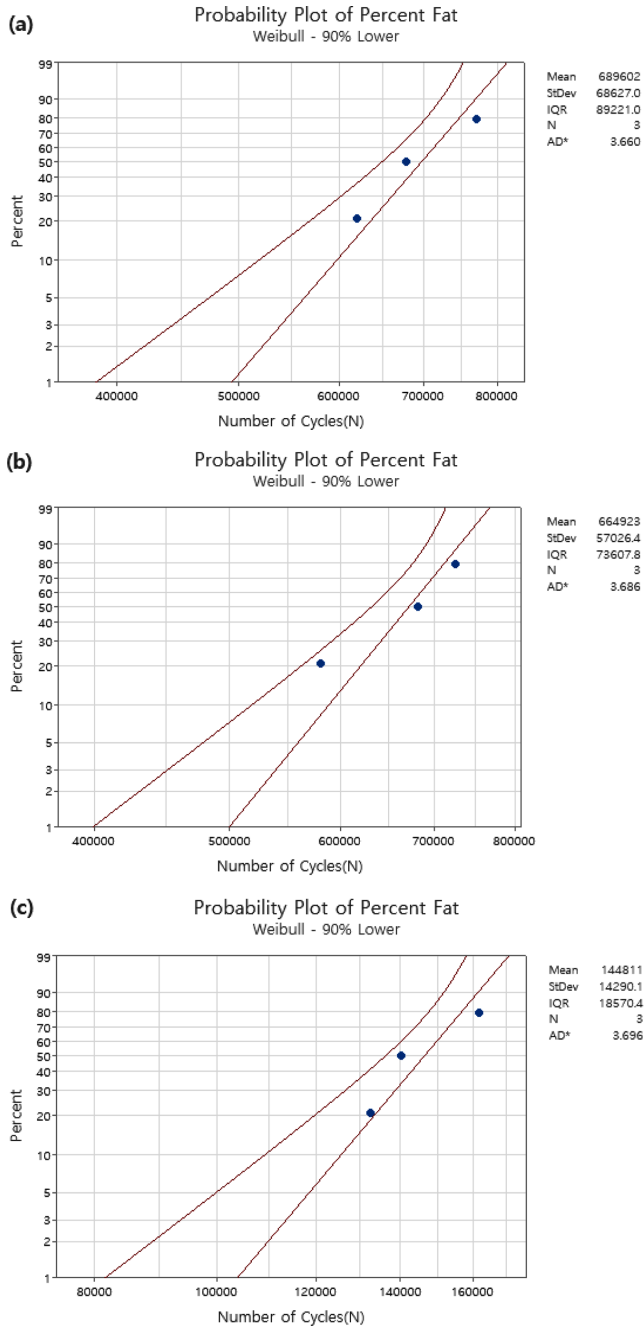


Fig. 12. Probability plot of percent fat (a) Para aramid, (b) Copolymer aramid, (c) ANF coated copolymer aramid.

도를 산출하기 위해 S-N선도를 작성하였으며 Fig. 13에 나타내었다. S-N 선도는 Y축은 시험하중, X축은 반복수로 설정하여 작성하였으며 반복수를 종속변수, 시험하중을 독립변수로 하는 회귀분석식을 통해 계산하였다. 이는 아라미드의 한계피로강도 및 피로수명 산출시 활용이 될 수 있다. 하중에 따른 굴곡피로횟수를 Table 5에 나타내었으며 1.2 kg의 고하중에서의 굴곡피로시험 결과 파라 아라미드는 30,624회, 공중합 아라미드는 132,336회, ANF로 표면처리한 공중합 아라미드는 121,587회로 나타내었다. 고하중 조건에서도 공중합 아라미드가 파라계 아라미드 보다 우수한 굴곡피로 성능을 나타내었으며 ANF로 표면처리한 공중합 아라미드 또한 우수한 굴곡 피로 성능을 나타내었다. 공중합 아라미드에 표면을 개질하는

Table 5. The calculated results of the fatigue life at each test load

Load (kg)	Number of cycles (N)		
	Para aramid	Copolymer aramid	ANF coated copolymer aramid
0.2	145,033	690,110	679,733
0.4	125,880	549,126	504,780
0.6	91,552	431,340	415,860
0.8	70,546	323,924	306,072
1.0	54,172	197,664	185,911
1.2	30,624	132,336	121,587

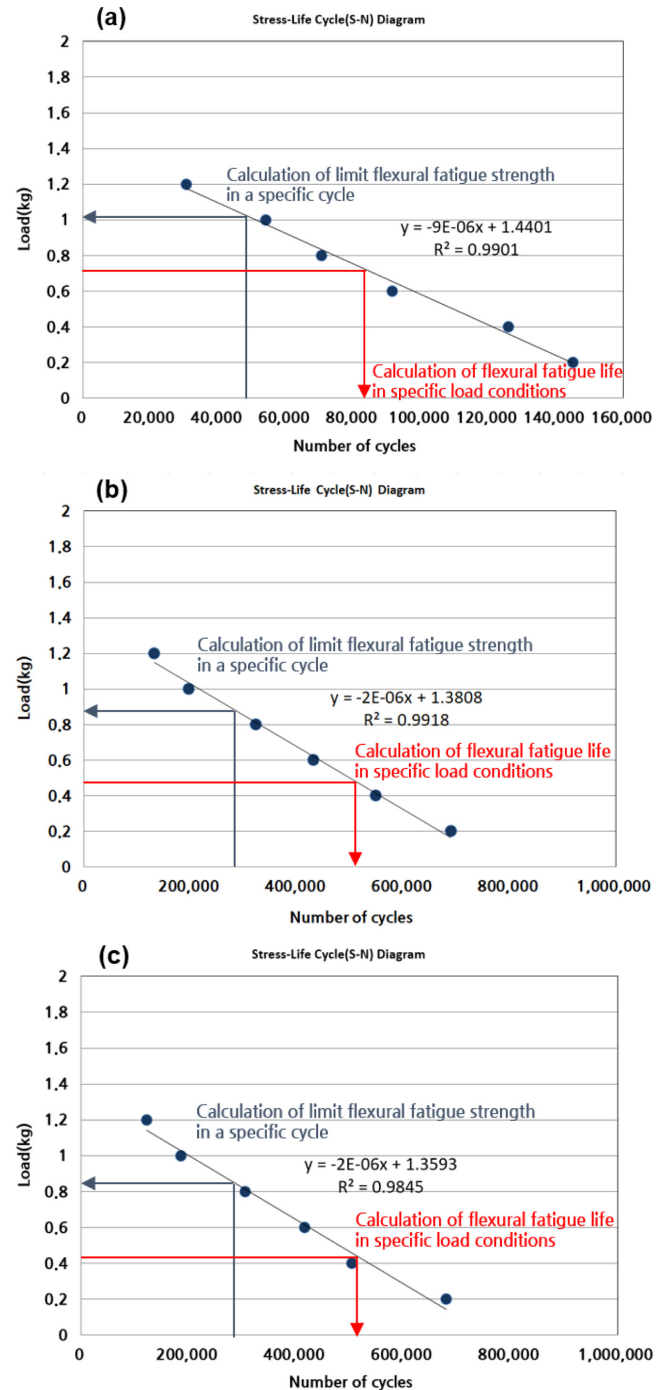


Fig. 13. Stress-life cycle(S-N) diagram (a) Para aramid, (b) Copolymer aramid, (c) ANF coated copolymer aramid.



주요 이유는 섬유 표면 거칠기를 증가시켜서 섬유와 매트릭스 계면 사이의 화학적 결합 및 기계적 특성을 우수하게 하는 것이 주 목적으로 표면 개질한 공중합 아라미드의 피로 성능 또한 우수함을 확인하였다. 이는 단시간 동안의 표면처리로 인해 공중합 아라미드의 분해 및 피브릴화 등 아라미드의 고유 특성에 손상을 받지 않은 상태에서 표면 개질이 잘 진행 된 것으로 보인다. 본 연구를 통해 표면 개질한 공중합 아라미드의 신뢰성이 확인되었으며 향후 고무보강재 뿐만 아니라 다양한 복합재료의 보강재료로도 사용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공중합 아라미드의 굴곡피로성능을 평가할 수 있는 평가장치와 평가법을 개발하고 파라게 아라미드, 공중합 아라미드 및 접착성능이 향상된 공중합 아라미드의 굴곡피로성능을 조사하였다. 아라미드에 가해지는 굴곡부 선정시 마찰을 최소화 하기 위해 세라믹 재질의 롤러를 선정하였으며 최소허용곡률을 계산하여 롤러 직경을 10 mm로 선정하였다.

굴곡피로시험을 통해 B<sub>10</sub> 수명을 산출하였으며 파라게 아라미드는 125,770회, 공중합 아라미드는 598,150회, ANF로 표면처리한 공중합 아라미드는 589,073회로 공중합 아라미드가 우수한 굴곡피로 성능을 보였다. 하중에 따른 굴곡피로수명 및 굴곡피로횟수에 따른 한계피로강도를 S-N선도로부터 산출하여 하중 변화에 따른 피로 수명 관계를 파악하였으며 고하중 조건에서도 공중합 아라미드가 파라게 아라미드 보다 우수한 굴곡피로 성능을 나타내고 ANF로 표면처리한 공중합 아라미드 또한 우수한 굴곡 피로 성능을 나타내었다.

본 연구에서 개발된 내피로 성능 평가법을 통해 아라미드의 굴곡 피로 성능을 객관적으로 평가 할 수 있게 되었으며 이는 향후 국내에서 생산되는 아라미드의 굴곡피로성능 확인 및 제품의 신뢰성을 세계적 수준까지 발전시키는데 많은 도움이 될 것이다.

#### 감 사

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KETI)연구비 지원에 의한 연구임(20015871).

#### References

1. Afroughsabet, V., Biolzi, L. and Ozbakkaloglu, T., "High-performance Fiber-reinforced Concrete: A Review," *J. Mater. Sci.*, **51**(14), 6517-6551(2016).
2. Han, D., Ma, Q., Wang, J., Chen, H., Wang, C. and Han, W., "Effect of the Addition of Different Amounts of Aramid Fibers on Metal Friction and Wear during Mixing," *Polymers*, **14**(14), 2961-2979(2022).
3. Sreekumar, P. A., Thomas, S. P., Saiter, J. M., Joseph, K., Unnikrishnan, G. and Thomas, S., "Effect of Fiber Surface Modification on the Mechanical and Water Absorption Characteristics of Sisal/polyester Composites Fabricated by Resin Transfer Molding," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **40**(11), 1777-1784(2009).
4. Lee, S. T., Kim, B. S., Choi, H. N., Lee, K. Y. and Lee, S. G., "Interfacial Adhesion Properties of Plasma Treated Aramid Fiber with Chloroprene Rubber," *Text. Sci. Eng.*, **47**(3), 205-211(2010).
5. Matsuo, T., "Fiber Material for Advanced Technical Textiles," *Text. Prog.*, **40**(2), 87-121(2008).
6. Inagaki, N., Tasaka, S., Kawai, H. and Yamada, Y., "Surface Modification of Aromatic Polyamide Film by Remote Oxygen Plasma," *J. Polym. Sci.*, **64**(5), 831-840(1997).
7. Park, J. H., Lee, S. H., Jang, H. D., Kim, G. S. and Yang, J. S., "Prediction of Characteristics Life of the Rubber Gasket," *J. Appl. Rel.*, **10**(4), 213-235(2010).
8. Wang, L., Shi, Y., Chen, S., Wang, W., Tian, M. and Ning, N., "Highly Efficient Mussel-like Inspired Modification of Aramid Fibers by UV-accelerated Catechol/polyamine Deposition Followed Chemical Grafting for High-performance Polymer Composites," *Chem. Eng. J.*, **314**(15), 583-593(2017).
9. Nasser, J., Lin, J., Steinke, K. and Sodano, H., "Enhanced Interfacial Strength of Aramid Fiber Reinforced Composites Through Adsorbed Aramid Nanofiber Coatings," *Compos. Sci. Technol.*, **174**(12), 125-133(2019).
10. Park, G. R., Kim, H. R., Jeong, G. Y., Kim, D. H., Noh, S. C., Gwon, D. J., Choi, M. C. and Koo, J. S., "Investigation of Copoly-para-aramid Fiber Dispersion in Chloroprene Rubber Matrix and Improvement of Dispersibility Through Fiber Surface Modification," *Elastomers Compos.*, **57**(4), 175-180(2022).
11. Park, S. M., Kwon, I. J., Sim, J. H., Lee, J. H., Kim, S. S., Lee, M. C. and Lee, J. S., "Improving the Photo-stability of p-aramid Fiber by TiO<sub>2</sub> Nanosol," *J. Korean Soc. Dye. and Finish.*, **25**(2), 126-133(2013).
12. Epstein, M. E. and Rosenthal, A. J., "Spinning of Polyamides from Sulfuric Acid Solution : Polymer Solubility and Coagulation Mechanisms," *Text. Res. J.*, **36**(9), 813-821(1966).
13. Morton, W. and Hearle, W., "Physical Properties of Textile Fibres," Woodhead Publishing in Textiles, 4th, ed., England(2005).
14. Kimura, Y., Tsuchida, A. and Katsuraya, K., "High-Performance and Specialty Fibers," The Society of Fiber Science and Technology, Japan(2016).
15. Lee, J. H., Lee, J. D., Park, S. M. and Lee, J. W., "Adhesion Between Surfaces Treated with Aramid Fiber and Silicone/Fluorine Rubber," *Text. Sci. Eng.*, **55**(5), 349-355(2018).
16. Zhang, B., Lian, T., Shao, X., Tian, M., Ning, N., Zhang, L. and Wang, W., "Surface Coating of Aramid Fiber by a Graphene/Aramid Nanofiber Hybrid Material to Enhance Interfacial Adhesion with Rubber Matrix," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **60**(6), 2472-2480(2021).
17. Yeo, D. H., Lee, J. H., Lee, J. H., Yu, S. H., Park, Y. T., Sung, J. H. and Sim, J. H., "A Study on the Flow Analysis of Air-gap Wet Spinneret according to the Viscosity of Copolymerized Aramid Polymer," *J. Korean Soc. Dye. and Finish.*, **34**(1), 27-37(2022).
18. Shin, S. H., Jang, J. S., Kim, E. Y. and Kim, H. D., "Performance Improvement of Aramid / Epoxy Composite by Surface Treatment of Aramid Fiber," *Polym. Korea*, **20**(1), 134-142(1996).
19. Vickers, P. E., Watts, J. F., Perruchot, C. and Chehimi, M. M., "The Surface Chemistry and Acid-base Properties of a PAN-based Carbon Fibre," *Carbon*, **38**(5), 675-689(2000).
20. Fukunaga, A., Ueda, S. and Magumo, M., "Anodic Surface Oxidation Mechanisms of PAN-based and Pitch-based Carbon Fibres," *J. Mater. Sci.*, **34**(12), 2851-2854(1999).



21. Plawky, U., Lonschien, M. and Michaeli, W., "Surface Modification of An Aramid Fibre Treated in a Low-temperature Microwave Plasma," *J. Mater. Sci.*, **31**(22), 6043-6053(1996).
22. Kim, E. M. and Jang, J. H., "Surface Modification of Meta-aramid Films by UV/ozone Irradiation," *Fibers. Polym.*, **11**(5), 677-682(2010).
23. Yoon, H. J., Oh, D. K., Jo, J. H. and Lee, J. D., "Study on the Interfacial Stability of Rubber/copolymer Aramid by Surface Treatment of Copolymer Aramid Nano Fiber," *Polym. Korea*, **48**(2), 158-164(2024).
24. Mirafatab, M., "Flex Fatigue of Textile Fibres," Woodhead Publishing in Textiles, U.K.(2009).
25. Jariwala, B. C., "The Study of Kink Bands and Flex Failure in Nylon 6.6 and Polyester Fibres," Ph.D. Dissertation, U.M.I.S.T., Manchester(1974).

#### Authors

**Hong Jin Yoon:** Senior Researcher, Research Infrastructure Utilization Center, FITI Testing & Research Institute, Seoul 07791, Korea; yhj@fiti.re.kr

**Dong Ki Oh:** Director, Research Infrastructure Utilization Center, FITI Testing & Research Institute, Seoul 07791, Korea; dk@fiti.re.kr

**Chang Ju Kim:** Senior Researcher, Research Infrastructure Utilization Center, FITI Testing & Research Institute, Seoul 07791, Korea; cjkim@fiti.re.kr

**Jong Dae Lee:** Professor, Department of Chemical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea; jdlee@chungbuk.ac.kr