

역구동 미니 체인 구조에 적용된 PA66/유리섬유 복합재의 유리섬유 함량 변화에 따른 응력·처짐·피로 수명 수치해석

김기찬* · 최규철* · 고윤호** · 정재호***†

Numerical Analysis of Stress, Deflection, and Fatigue Life of a PA66/ Glass-Fiber Composite Applied to a Mini-Chain under Reverse-Driving Conditions with Varying Glass-Fiber Content

Gi-Chan Kim*, Kyu-Cheol Choi*, Yun-Ho Ko**, Jaeho Jung***†

ABSTRACT: This numerical study evaluated the effect of glass-fiber (GF) content in PA66/GF composites (PA66, GF15, GF25, GF35, and GF50) on hotspot stress, deflection, and fatigue life of a mini-chain under reverse-driving conditions. A static finite element model with remote displacement and frictional contact ($\mu = 0.3$), combined with a stress-life assessment based on literature S-N curves (Basquin fit with Goodman correction, $R = 0$), revealed a trade-off: increasing GF reduced deflection but increased hotspot stress and maximum contact pressure (interpreted conservatively as a wear-propensity indicator). GF50 exhibited the lowest life (potentially $<10^6$ cycles), whereas GF25 provided the most balanced performance while meeting the 10^6 cycle durability criterion, with GF15 regarded as a conservative option showing lower stress/contact responses.

초 록: 본 연구는 역구동 조건의 미니 체인을 대상으로 PA66/유리섬유(GF) 복합재의 GF 함량(PA66, GF15, GF25, GF35, GF50)이 응력 집중, 처짐 및 피로 수명에 미치는 영향을 수치해석으로 평가하였다. 원격 변위(remote displacement)와 마찰 접촉($\mu = 0.3$)을 포함한 정적 유한요소해석과 문헌 기반 S-N 곡선(Basquin 피팅, Goodman 보정, $R = 0$)의 Stress-Life 평가 결과, GF 함량 증가는 처짐을 감소시키는 반면 핫스팟 응력과 최대 접촉압(마모 잠재지표)을 증가시키는 trade-off(상충관계)를 보였다. GF50은 가장 낮은 수명(10^6 cycles 미만 가능성)을 나타낸 반면, 내구 기준(10^6 cycles)을 만족하면서 처짐 저감 효과와 응력-접촉 지표 증가가 과도하지 않은 GF25를 가장 균형적인 후보로 정리하였다. 또한 GF15는 GF25 대비 처짐 저감 이득은 작지만 최대 등가응력과 최대 접촉압이 상대적으로 낮아 보수적 선택지로 고려될 수 있다.

Key Words: 역구동 조건(Reverse-driving conditions), 미니 체인(Mini-chain), PA66/유리섬유 복합재(PA66/Glass-fiber composite), 유한요소해석(Finite element analysis), 응력-수명 피로(Stress-life fatigue)

Received 10 January 2026, received in revised form 5 February 2026, accepted 11 February 2026

*Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

**Undergraduate Research Student, School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

***Professor, School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

†Corresponding author (E-mail: jhj@cbnu.ac.kr)

1. 서 론

반도체 생산장비의 이송 시스템은 공정 자동화 및 생산 효율 향상을 위해 필수적인 요소로, 장비 내부에서 케이블과 배선을 지지·안내하기 위해 케이블 이송 체인(이하 미니체인)이 널리 적용되고 있다. 미니체인은 반복 구동 환경에서도 안정적인 구조 거동을 유지해야 하며, 장비의 이동 및 이동 방향 전환 과정에서 다양한 하중 조건에 노출된다. 특히 반도체 공정은 고정밀 환경을 요구하므로, 이송 시스템의 구조적 신뢰성과 더불어 마찰·마모에 기인한 입자 방출(분진) 가능성은 장비 적용 가능성을 판단하는 중요한 기준으로 작용한다.

케이블 이송 체인의 소음 및 청정성 확보를 위한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. 예를 들어 Kim et al.[1]은 TRIZ 기반 설계 접근을 통해 체인 구조를 개선하고, 소음 저감과 함께 클린룸 적용 가능성을 제시하였다.

최근 케이블 체인 및 유연 케이블 시스템의 동적 거동에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다. Xie et al.[2]은 케이블 드래그 시스템(Cable drag system)의 동적 특성을 분석하여 구동 속도와 굽힘 반경이 체인 연결부의 인장력에 미치는 영향을 규명하였으며, Zhao et al.[3]은 반복 굽힘 조건에서 케이블의 기계적 특성 변화와 피로 수명을 예측하는 모델을 제시한 바 있다.

그러나 이들 선행 연구는 주로 고하중이 작용하는 채굴(Mining) 장비나 일반적인 정구동 조건을 전제로 하여 구조적 강건성(Robustness) 확보에 초점을 맞추고 있다. 반면, 고정밀도가 요구되는 반도체 이송 시스템의 역구동(Reverse-driving) 조건에서, 소재의 강성 변화가 처짐(Deflection) 제어와 마모 입자(Wear particle) 발생의 잠재 원인인 접촉압(Contact pressure) 간의 상충관계(Trade-off)에 미치는 영향을 정량적으로 분석한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

한편 체인 링크의 구조 성능 향상을 위해 형상 또는 재료를 변경하고 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)으로 성능을 검증하는 접근도 보고되어 왔다. Sutar et al.[4]은 체인 링크 설계에서 중량 및 재료 관점의 개선을 수행하고 FEA 기반 구조 평가를 통해 설계 대안의 유효성을 제시하였다. 다만 클린 이송 환경에서 사용되는 미니체인의 경우, 제한된 곡률 반경 내 반복 굽힘 거동과 다수 접촉쌍에서의 접촉역학이 동시에 작동하므로, 소재 물성 변화에 따른 구조 응력·처짐·피로 수명과 접촉 지표를 함께 비교할 필요가 있다.

또한 폴리아미드 66(Polyamide 66, 이하 PA66) 및 유리섬유(Glass Fiber, 이하 GF) 복합재는 높은 강성 확보에 유리하나, 접촉·슬라이딩 조건에서 섬유 박리 및 표면 손상과 같은 마찰·마모 메커니즘이 보고되어 접촉 조건이 내구성과 청정성에 영향을 줄 수 있다[5]. 따라서 클린 이송 시스템 관점에서는 구조적 안전성(응력/피로)뿐 아니라 접촉 상태

(예: 접촉압)와 연관된 마찰·마모 위험을 함께 고려하는 평가 체계가 요구된다. 다만 본 연구에서는 분진 발생을 직접 예측하기보다는, 접촉역학 관점의 대표 지표(예: 최대 접촉압)를 마모 잠재지표로 정의하여 상대 비교하는 접근을 채택한다.

본 논문에서 역구동(Reverse-driving)은 체인의 이동 방향 및 가이드 지지 위치가 정구동과 반대로 작동하여, 자중에 의해 형성되는 비지지 구간과 하중 전달 경로가 달라지는 운용 조건을 의미한다. 이때 실제 시스템은 트랙/가이드에 의해 궤적이 강제되는 특성이 있어, 특정 작동 상태에서는 하중이 힘(Force)보다 원격 변위(remote displacement) 조건으로 지배될 수 있다. 이러한 변위 지배 조건에서는 소재 강성 증가는 처짐을 감소시키는 동시에 국부 응력 및 접촉압을 증가시킬 수 있어 trade-off(상충관계)를 유발한다. 따라서 본 연구는 단순한 구조적 파손 방식을 넘어, 처짐 규제 만족과 파티클 발생 억제라는 상충되는 설계 목표를 동시에 달성하기 위한 최적의 소재 선정 가이드라인을 제시하는 것을 목표로 한다.

이에 본 연구에서는 역구동 조건의 미니체인을 대상으로 동일한 구조 형상 및 하중 조건 하에서 구조 해석을 수행하고, 도출된 응력 결과와 문헌 기반 S-N 곡선[6]을 이용하여 PA66 및 GF 함량(GF15/25/35/50) 변화에 따른 피로 수명을 수치적으로 평가한다. 또한 처짐 및 접촉 지표(접촉압 기반 마모 잠재지표)를 함께 비교하여, 반복 구동 환경에서 요구되는 내구 기준(10^6 cycles)을 만족하는 범위 내에서 적용 소재의 선택 근거를 제시하고자 한다.

2. 미니체인 모델링 및 해석 조건

2.1 연구 대상 시스템(역구동 미니체인) 개요

본 연구의 대상은 반도체 생산장비의 클린 이송 시스템에서 케이블 및 배선을 지지·안내하는 미니체인(mini-chain) 구조이다. 미니체인은 반복 구동 및 방향 전환 과정에서 링크의 굽힘 변형과 링크 간 접촉이 동시에 발생하며, 고정밀 환경에서는 구조적 신뢰성과 함께 마찰·마모에 의한 입자(분진) 발생 가능성이 주요 고려사항이 된다[1]. 본 연구에서는 실제 운용 시나리오 중 역구동(Reverse-driving) 조건을 대표 조건으로 설정하였다. 여기서 역구동은 체인의 이동 방향 및 가이드 지지 위치가 정구동과 반대로 작동하여, 자중에 의해 형성되는 비지지 구간과 하중 전달 경로가 변화함으로써 구조 거동이 달라질 수 있는 운용 상태를 의미한다.

해석은 동일한 구조 형상과 조건을 유지한 상태에서 소재(PA66 및 PA66-GF 복합재)의 변화가 구조 응력(응력 집중), 처짐 및 피로 수명에 미치는 영향을 비교·평가하는 것을 목적으로 한다. 또한 링크 간 상대운동에 의해 형성되는 접촉쌍의 접촉압 분포를 함께 산출하고, 최대 접촉압을 마모 잠재지표로 정의하여 재료 간 상대 비교에 활용하였다

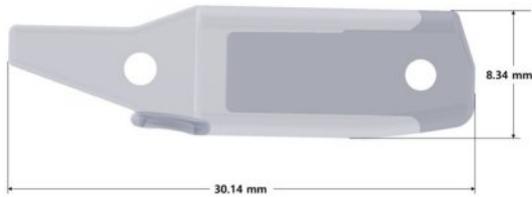


Fig. 1. Representative mini-chain geometry used in the analysis



Fig. 2. Finite element mesh of a single chain link

[5]. 해석에 사용한 대표 단일 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, 역구동 조건에서의 체인 조립 모델과 운용 조건 및 해석 경계조건은 2.2절과 2.3절, Fig. 2와 Fig. 3에 정리하였다.

2.2 유한요소 격자 구성

본 연구에서는 ANSYS Mechanical의 Meshing 기능을 이용하여 해석 모델의 유한요소 격자를 생성하였다. 링크 간의 복잡한 접촉 거동과 핀-홀 연결부에서 발생하는 국부 응력 집중을 정확하게 포착하기 위해, 전역적으로는 형상의 곡률 및 세부 형상 특징에 따라 요소 크기가 자동 조절되는 적응형 사이징(Adaptive Sizing)을 적용하였다. 또한 링크의 맞물림 면, 회전 관절부 및 스톱퍼 접촉면 등 응력 구배가 급격할 것으로 예상되는 주요 관심 영역에는 국부 세분화(Local Sizing) 전략을 적용하여 접촉/응력 집중 거동의 해상도를 확보하였다. 단일 링크의 격자 메시는 Fig. 2에 나타내었다.

메시는 SOLID187로 2차(Quadratic) 사면체 요소를 사용하였고, 단일 체인에 4,591개 노드와 2,389개 요소를 사용하였으며, 메시 품질은 ANSYS의 Element Quality를 기준으로 5×10^{-2} 이상이 되도록 관리하였다. 전체 조립된 체인(단일 체인 51개)에는 234,141개 노드와 121,839개 요소를 사용하였다. 각 소재 변화에 따라 재료 물성 변화의 영향만을 정량적으로 비교하기 위해, 동일한 메시를 모든 재료 케이스에 공통 적용하였다.

2.3 해석 경계조건

본 연구의 수치해석은 ANSYS Mechanical 기반 정적 구조 해석(Static Structural)으로 수행하였다. 역구동 조건의 운용

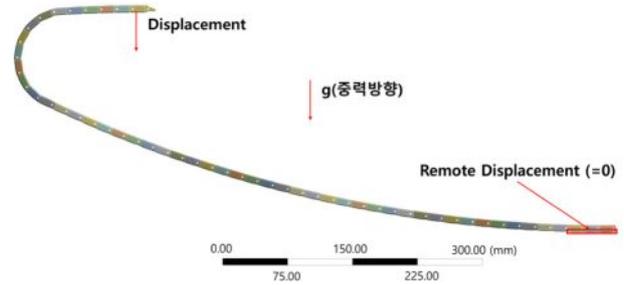


Fig. 3. Mini-chain assembly model and boundary conditions under reverse-driving conditions

상태를 대표하기 위해, 미니체인 조립 모델의 양단에 원격 변위(remote displacement)를 적용하여 변위 지배 조건을 모사하였다(Fig. 3). 하단부(기준단)는 원격 변위를 0으로 설정하여 기준 위치를 정의하였고, 상단부(구동단)에는 장비의 설계 레이아웃에 따른 높이 제한을 모사하기 위해 -101 mm의 수직 강제 변위(forced displacement)를 적용하였다. 이는 역구동 시 체인이 자연스럽게 형성하는 궤적이 설치 허용 공간을 벗어나는 현상을 구조적으로 구속하여, 실제 운용 환경과 유사한 압축 응력 상태를 유도하기 위함이다. 또한 미니체인과 케이블의 자중 처짐과 하중 분포를 반영하기 위해 케이블의 밀도를 미니체인의 밀도 물성치에 반영하여 중력(self-weight, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$)을 전체 모델에 적용하였다.

미니체인 간의 연결부는 리벳에 의한 회전 거동만이 허용되는 기구학적 특성을 갖는다. 이를 수치해석적으로 구현하기 위해, 각 체결 지점에 병진 자유도를 구속하고 회전 자유도(Rotational DOF)만을 부여하는 Revolute Joint 조건을 적용하여 인접 링크 간의 상대 회전을 모사하였다.

인접 링크 간 접촉 구조는 Fig. 4와 같이 운용 중 발생하는 상대 회전 방향에 따라 상부 맞물림(Upper Engagement)과 하부 맞물림(Lower Engagement)의 두 가지 거동으로 구분된다. 두 경우 모두 체인 헤드부가 전방 체인 내부로 삽입되어 이탈을 방지하는 면에는 No Separation 조건을 적용하였다. 반면, 회전 제한 및 하중 전달을 위해 물리적으로 맞닿으며 슬라이딩이 발생하는 각 맞물림 면(상부 및 하부 스톱퍼)에는 마찰 접촉(Frictional Contact)을 적용하였다. 마찰 접촉은 Coulomb 마찰 모델(상수 μ)로 근사하였으며, GF 함량 변화에 따른 상대 비교의 일관성을 확보하기 위해 모든 재료 케이스에서 동일한 마찰계수 $\mu = 0.3$ 을 적용하였다. 이는 PA66 및 폴리아미드 계열 재료의 건식(dry) 슬라이딩 접촉에서 마찰계수가 조건에 따라 0.3 수준(또는 그에 근접한 범위)으로 보고된 바 있어 이 값을 적용한 것이다 [7,8]. 또한 미니체인은 인접 링크 간 반복적인 상대운동과 다수의 접촉쌍이 동시에 발생하는 구조이므로, 링크 간 상호작용을 접촉(contact)으로 모델링하되 운용 중 분리 및 재접촉이 가능하도록 설정하여 접촉 상태 변화가 해석에 반

영되도록 하였다.

처짐이 동반되는 구조 특성을 고려하여 대변형 효과(Large Deflection)를 활성화하였다. 본 연구는 GF 함량 변화에 따른 상대 비교가 목적이므로, 형상, 경계조건, 하중 및 접촉 정의는 모든 재료 케이스에서 동일하게 유지하고 재료 물성만 변경하여 해석을 수행하였다.

2.4 설계 요건 및 평가 지표

본 연구에서는 역구동 조건의 미니체인 반복 구동 환경에서 요구되는 내구성을 만족하는 재료를 선별하기 위해 설계 요구조건을 평가 기준으로 설정하였다. 설계 내구 기준은 최소 $N \geq 10^6$ cycles를 확보하는 것으로 정의하였으며, 피로 수명 평가 결과가 해당 기준을 만족하는지 여부를 1차 판정 기준으로 사용하였다. 또한 실제 장비 운용 조건(이송 거리, 속도, 가속도, 정지시간)에 따라 사이클 누적 속도는 크게 달라질 수 있으므로, 기준을 만족하는 경우에도 충분한 수명 여유를 확보하는 보수적 관점에서 결과를 해석하였다. 예를 들어 이송거리 1 m, 최고속도 2 m/s, 가속도 2 g 조건에서 사다리꼴 속도 프로파일을 가정하면 왕복 1 cycle에 약 1.2 s(정지시간 제외)가 소요되어 연속 구동시 10^6 cycles는 약 1.2×10^6 s(약 334 h), 즉 약 14일 수준에 해당한다. 다만 사이클 정의 및 정지시간 포함 여부, 운용 패턴에 따라 실제 사용 기간은 달라질 수 있다.

피로해석 결과는 입력 S-N 데이터 범위 및 해석/후처리에서 설정되는 수명 평가 범위의 상한에 의해, 일부 재료에서 수명이 상한값으로 포화(saturation)되어 나타날 수 있다. 본 연구에서는 예측 수명이 10^7 cycles인 경우를 내구 기

준(10^6 cycles)을 충분히 초과하는 고수명 영역으로 간주하여 영구 수명($\geq 10^7$ cycles)으로 표기하였다. 이는 물리적으로 무한 수명을 단정하기 위한 표현이 아니라, 본 연구의 내구 기준 대비 충분한 수명 여유가 존재하는 구간을 구분하기 위한 분류 및 표기상의 정의이다. 따라서 재료 적용성 평가는 hotspot 인근의 최소 수명(minimum life)을 대표 지표로 사용하여 기준 만족 여부를 우선 판정하고, 기준을 만족하는 재료군 내에서는 응력, 처짐, 접촉 지표를 종합하여 상대 비교하였다.

평가 지표는 구조 응력, 처짐, 피로 수명, 접촉 지표로 구성하였다. 모든 평가는 2.3절에서 정의한 원격변위(remote displacement) 기반의 변위 지배 경계조건 및 접촉 조건을 동일하게 적용한 정적 구조해석 결과를 기반으로 수행하였다. 구조 응력은 동일한 응력 집중 영역(hotspot)에서의 최대 등가응력(von Mises)을 대표값으로 정의하여 재료별 응력 집중 수준을 비교하였다. 처짐은 기준단(하단 원격 변위 0)을 기준으로 선정한 대표 위치에서의 수직 방향 변위를 추출하여 변위 프로파일로 정의하였다. 피로 수명은 Stress-Life 기반 평가로 수명 분포를 산출하고, hotspot 인근의 최소 수명을 기준으로 내구 기준 만족 여부를 구분하였다. 접촉 지표는 동일 접촉쌍에서의 최대 접촉압을 사용하였으며, 최대 접촉압은 마찰·마모 위험과 연관될 수 있는 마모 및 분진 잠재지표로 정의하여 보수적으로 해석하였다.

3. 재료 물성 및 피로 입력 구성

3.1 선형 탄성 물성 및 등방성 근사

본 연구에서는 역구동 미니체인 구조의 정적 거동 및 피로 수명 변화를 수치적으로 비교하기 위해 재료 거동을 등방성 선형 탄성체로 근사하였다. 대상 재료는 PA66 및 유리섬유 강화 PA66 복합재(GF15, GF25, GF35, GF50)이며, ANSYS Mechanical Engineering Data에는 밀도(density), 탄성계수(Young's modulus), 푸아송비(Poisson's ratio)를 선형 탄성 물성으로 입력하였다. 밀도 및 탄성계수는 제조사 기술자료에 제시된 대표 물성치를 기반으로 설정하였고[9-13], GF 함량 변화에 따른 상대 비교를 목적으로 형상, 격자, 경계조건 및 접촉 조건은 동일하게 유지한 상태에서 재료 물성만 변경하여 적용하였다.

푸아송비는 폴리머 계열 소재의 특성상 흡습 상태, 온도, 시험 규격 및 배향(특히 유리섬유 강화재의 경우)에 따라 변동될 수 있으며, 일부 기술자료에는 해당 항목이 명시되지 않는 경우가 있다. 이에 본 연구에서는 입력 변수의 일관성을 확보하고 재료 간 비교에서 불필요한 불확실성을 줄이기 위해 모든 재료에 대해 푸아송비를 $\nu = 0.39$ 로 고정 적용하였다. 이는 선형 유한요소해석 연구에서 Nylon 66(PA66)의 탄성 물성으로 적용된 값을 참고하여 설정하였다[14]. 재료별 해석 입력 물성치는 Table 1에 정리하였다.

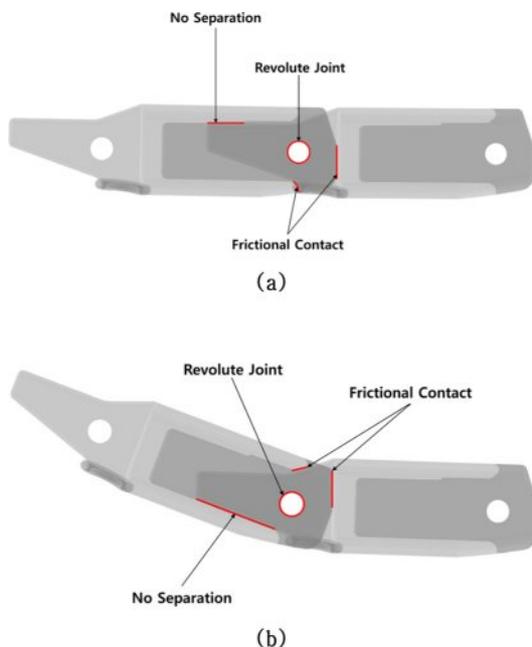


Fig. 4. Contact engagement mechanisms between adjacent links: (a) upper engagement and (b) lower engagement

Table 1. Linear elastic material properties (Engineering Data)

Material	Density [9-13] (kg/m ³)	Density (Engineering Data, kg/m ³)	Young's Modulus (MPa)
PA66	1130	6505	3000
PA66 GF15	1230	6605	6000
PA66 GF25	1320	6695	8600
PA66 GF35	1410	6785	11500
PA66 GF50	1560	6935	16800

여기서 ANSYS Engineering Data에 들어가는 밀도는 2.3절에 기술한 바와 같이 케이블의 하중을 고려하여 5375 kg/m³을 더한 값이다.

3.2 피로 물성(S-N) 출처 및 구성

피로 수명 평가는 문헌[6]에 제시된 PA66 및 PA66-GF 복합재(GF15, GF25, GF35, GF50)의 S-N 곡선을 기반으로 수행하였다. 문헌[6]의 피로시험은 force-controlled 조건으로 수행되었으며, 하중비가 R = 0인 인장-인장(tension-tension) 형태로 정의되어 있다. 또한 단섬유 강화재의 경우 GF 함량(15, 25, 35, 50%) 변화에 대한 S-N 데이터가 제공되며, 복합재 시험은 90° 섬유 배향 조건을 포함한 결과로 제시되어 본 연구의 함량 비교에 활용하였다.

문헌의 S-N 그래프는 응력 진폭(stress amplitude, σ_a)과 수명(N, cycles)의 관계로 제시되어 있으며, 본 연구에서는 재료별 S-N 곡선에서 좌표점을 디지털화하여 데이터를 추출하였다. 추출된 데이터는 Basquin 관계식을 이용해 로그-로그 영역에서 선형 회귀분석을 통해 재료별 S-N 곡선을 수식화하였다. 디지털화 점과 Basquin 피팅 결과는 Fig. 5에 제시하였고, 회귀로 도출된 Basquin 계수 및 결정계수는 Table 2에 정리하였다. 이러한 회귀분석 결과는 이후 3.3절에서 ANSYS Stress-Life 평가를 위한 alternating stress-cycles 형식의 S-N 입력 테이블을 구성하는 기초 데이터로 사용하였다.

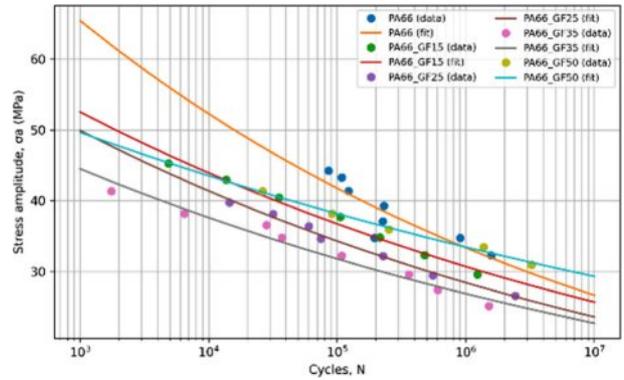
추출된 데이터는 로그-로그 영역에서 선형 회귀를 통해 Basquin 관계식으로 수식화하였다.

$$\log_{10}(\sigma_a) = a - b \log_{10} N \quad (1)$$

$$\sigma_a = 10^a N^{-b} \quad (2)$$

여기서 σ_a 는 응력 진폭(stress amplitude, MPa)이며 ANSYS Engineering Data의 alternating stress에 해당한다. N은 파단 수명(cycles), a와 b는 재료 상수이다. 하중비 R은 다음과 같이 정의된다.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$

**Fig. 5.** Digitized S-N data and Basquin fitted curves for PA66 and PA66-GF composites under R = 0 (based on Ref. [6])**Table 2.** Basquin fitting coefficients ($\log_{10}(\sigma_a) = a - b \log_{10} N$)

Material	a	b	R ²
PA66	2.1086	0.0976	0.771
PA66 GF15	1.9536	0.0777	0.983
PA66 GF25	1.9429	0.0815	0.992
PA66 GF35	1.8676	0.0731	0.969
PA66 GF50	1.8674	0.0572	0.989

3.3 ANSYS Stress-Life 피로해석 설정

본 연구의 피로 수명 평가는 3.2절에서 구성한 재료별 S-N 입력을 ANSYS Mechanical의 Fatigue Tool(Stress-Life)에 적용하여 수행하였다. 구조해석은 정적 구조해석 결과를 기반으로 하며, 역구동 운동을 모사한 원격 변위(remote displacement)가 0에서 최대값까지 반복된다고 가정하여 상수 진폭(constant-amplitude) 하중 조건으로 설정하였다. 또한 문헌[6]의 피로시험이 하중비 R=0 조건임을 반영하여, Fatigue Tool의 Loading type을 Zero-based로 설정하고 R=0 조건을 적용하였다. 한 사이클은 변위가 0에서 Max까지 증가한 뒤 다시 0으로 복귀하는 과정을 의미하며, 정적 해석으로 산출된 응력장을 최대 변위(최대 하중) 상태의 응력으로 간주하였다.

다축 응력 상태에 대한 피로 평가는 등가응력 기반 접근을 사용하였다. 피로 평가에 사용된 응력 값은 정적 구조해석 결과의 von Mises 등가응력을 기준으로 하여, 위치별 등가응력(진폭)을 S-N 곡선(응력 진폭-수명 관계)과 비교해 수명 분포를 산출하였다. 평균응력 효과는 Goodman 보정으로 반영하였으며, 보정에 필요한 인장강도 입력값은 재료별 제조사 기술자료[9-13]의 인장강도(UTS)를 사용하였다. 다만 인장강도 항목이 명확하지 않은 경우에는 보수적 평가를 위해 항복강도를 대체 입력값으로 적용하였고, 재료별 입력값은 Table 3에 정리하였다.

피로 수명 결과는 모델 전체의 Life contour로 산출하되,

Table 3. Ultimate tensile strength (UTS, σ_u) used for Goodman mean stress correction

Material	Tensile Ultimate Stress(MPa)
PA66	85
PA66 GF15	120
PA66 GF25	180
PA66 GF35	210
PA66 GF50	240

설계 적용성 판정은 역구동 조건에서 동일하게 관찰되는 hotspot 인근의 최소 수명(minimum life)을 대표 지표로 사용하였다. 또한 고수명 영역에서는 S-N 입력 범위 및 결과 표시 상한 설정의 영향으로 수명이 상한값으로 포화될 수 있으므로, 본 연구에서는 설계 내구 기준 만족 여부를 1차 기준으로 판단하고, 상한값으로 표시되는 구간은 상한 이상(영구 수명으로 분류)의 의미로 해석하여 절대 수명값을 단정하지 않도록 하였다.

4. 결 과

4.1 GF 함량별 응력 집중 비교

역구동 조건에서 동일한 구조 형상과 경계조건을 적용한 상태에서, 재료별 최대 등가응력(von Mises)을 응력 집중 영역(hotspot) 기준으로 비교하였다. 모든 재료 케이스에서 응력 집중 위치는 동일한 hotspot 인근에서 발생하였으며, 응력 분포의 대표 예시는 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6는 응력 집중의 위치와 분포 경향을 확인하기 위한 정성적 자료로 제시한 것이며, 케이스별 컨투어 스케일이 동일하지 않을 수 있으므로 정량 비교는 Table 4의 최대값을 기준으로 수행하였다.

정량 비교 결과(Table 4), GF 함량이 증가할수록 최대 등가응력은 단조 증가하는 경향을 보였다(Hotspot 기준). PA66의 최대 등가응력은 18.418 MPa였고, GF15, GF25, GF35, GF50에서 각각 29.381 MPa, 38.831 MPa, 49.303 MPa, 68.442 MPa로 증가하였다. 특히 기존 적용 재료인 GF50은 PA66 대비 약 3.72배 높은 최대 응력을 나타냈다.

Table 4. Comparison of maximum von Mises stress at hotspots for different materials

Material	Max von Mises Stress(MPa)
PA66	18.418
PA66 GF15	29.381
PA66 GF25	38.831
PA66 GF35	49.303
PA66 GF50	68.442

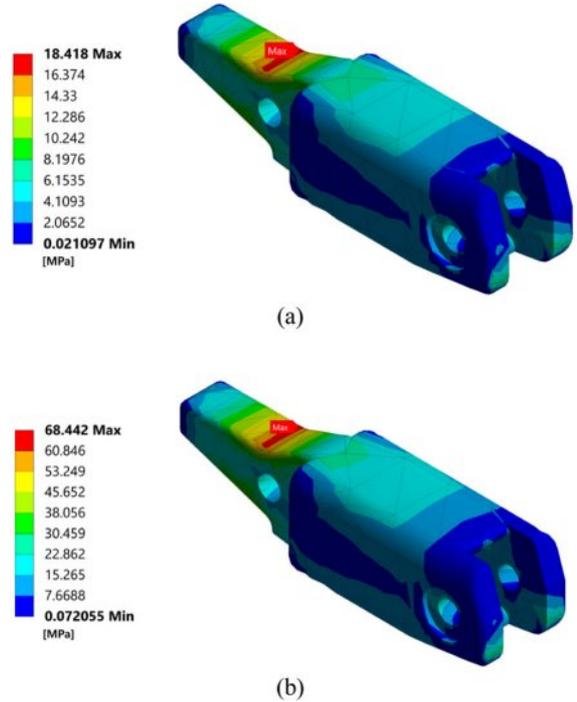


Fig. 6. Representative von Mises stress[MPa] contours showing hotspot location: (a) PA66 and (b) PA66-GF50

이는 변위 지배 조건에서 재료 강성 증가가 전역 변형을 억제하는 동시에 국부 하중 전달을 집중시켜 응력 집중을 증폭시킬 수 있음을 시사한다.

4.2 처짐(변위 프로파일) 비교

Fig. 7은 처짐의 정량 비교를 위해 체인에 동일 간격으로 위치 시킨 측정 위치(P0-P7)를 표시해 두었고, Fig. 8은 역구동 조건에서의 수직 방향 변위 분포(deflection contour)를 보여준다. 여기서 지지 구간(Fig. 7)은 트랙/가이드에 의해 체인의 궤적이 강제되어 상대적으로 변위가 제한되는 구간을 의미하며, 비지지 구간은 가이드 지지에서 벗어나 외부 지지 없이 자중으로 처짐이 발생하는 자유 스펠 구간을 의미한다.

해석 결과 Table 5와 같이, 재료가 달라져도 변위 분포의 공간적 패턴은 크게 변하지 않았고, 최대 하향 변위는 비지지 구간에서 집중적으로 나타났다. 반면 지지 구간에서는

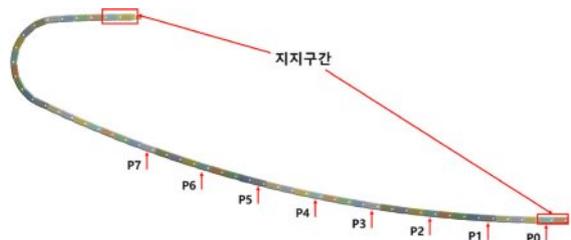


Fig. 7. Probe locations (P0-P7) for displacement-profile extraction

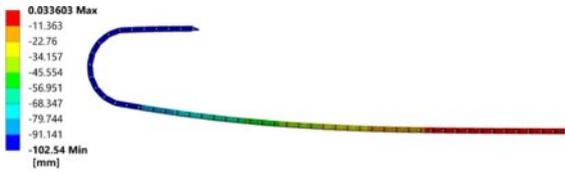


Fig. 8. Displacement (deflection) contour under reverse-driving conditions (PA66 GF50)

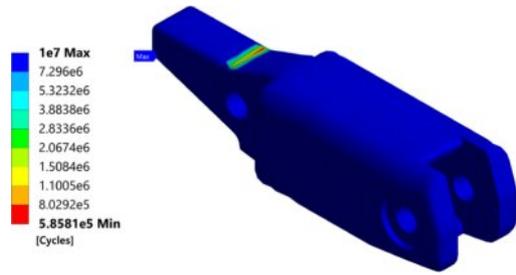


Fig. 9. Fatigue life contour for PA66-GF35 under zero-based loading (R = 0) with Goodman correction

Table 5. Directional displacement comparison (mm) at each point

Point	PA66	GF15	GF25	GF35	GF50
P0	0.028	0.021	0.020	0.019	0.018
P1	-2.763	-2.210	-2.043	-1.945	-1.853
P2	-10.088	-8.266	-7.719	-7.400	-7.101
P3	-20.531	-17.280	-16.311	-15.747	-15.219
P4	-32.896	-28.505	-27.205	-26.450	-25.743
P5	-46.276	-41.338	-39.884	-39.040	-38.252
P6	-60.031	-55.321	-53.935	-53.131	-52.381
P7	-73.819	-70.132	-69.042	-68.410	-67.819

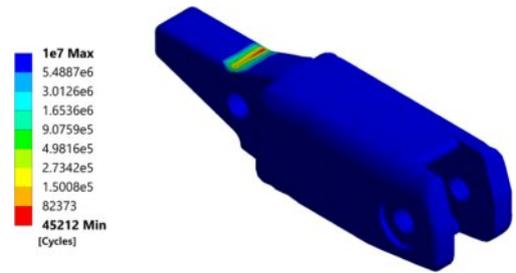


Fig. 10. Fatigue life contour for PA66-GF50 under zero-based loading (R = 0) with Goodman correction.

가이드 구속의 영향으로 변위가 상대적으로 작게 유지되었다. 또한 GF 함량 증가로 강성이 커질수록 전체 처짐의 절대 크기는 감소했으나, 그 차이가 크지 않았다.

GF 함량이 증가함에 따라 P4에서 PA66은 -32.896 mm였고, GF25는 -27.205 mm로 5.691 mm(약 17.3%) 감소했으며, GF50은 -25.743 mm로 7.153 mm(약 21.7%) 감소하였다. 가장 큰 처짐이 나타나는 P7에서도 PA66의 -73.819 mm 대비 GF25는 -69.042 mm(4.777 mm, 약 6.47% 감소), GF50은 -67.819 mm(6.000 mm, 약 8.13% 감소)로 감소하였다. 즉, GF 함량 증가가 처짐 저감에는 기여하지만, 그 효과가 미미하여 응력/접촉 지표의 변화와 함께 종합적으로 해석할 필요가 있다.

4.3 피로 수명 분포 비교

피로 수명은 3장에서 정의한 Stress-Life 평가 절차(재료별 S-N 입력 및 평균응력 보정 포함)를 동일하게 적용하여 산정하였다. 재료별 수명 분포는 Life contour로 확인하였

Table 6. Summary of minimum fatigue life for different materials

Material	Minimum Life (cycles)	Remarks
PA66	$\geq 10^7$	Exceeds the evaluation range
PA66 GF15	$\geq 10^7$	Exceeds the evaluation range
PA66 GF25	$\geq 10^7$	Exceeds the evaluation range
PA66 GF35	5.8581×10^5	Below the reference criterion
PA66 GF50	4.5212×10^4	Below the reference criterion

고, 재료 적용성 비교는 hotspot 인근에서의 최소 수명 (minimum life)을 대표 지표로 하였다. 최소 수명 요약은 Table 6에, 대표 Life contour는 Fig. 9과 Fig. 10에 제시하였다.

해석 결과, PA66, GF15, GF25는 최소 수명이 10^7 cycles(평균 상한 이상)로 표시되어 내구 기준 10^6 cycles 대비 충분한 여유가 존재하는 것으로 분류되었다. 반면 GF35와 GF50에서는 hotspot 주변에 유한 수명 영역이 형성되었고, 최소 수명은 각각 5.8581×10^5 cycles, 4.5212×10^4 cycles로 감소하여 내구 기준을 만족하지 못하였다.

이러한 결과는 변위 지배 조건에서 강성 증가가 처짐을 감소시키는 동시에 응력 집중을 증가시키고, 그 결과 피로 수명 저하로 연결될 수 있음을 보여준다. 특히 기존 적용 재료인 GF50은 본 운용 조건에서 피로 관점의 취약 가능성이 확인되었으며, 이후 절에서 접촉 지표와 함께 종합적으로 논의한다.

4.4 접촉압 기반 마모/입자 발생 잠재지표 비교

접촉 거동은 대표 접촉쌍에서의 contact pressure 결과를 기반으로 비교하였다. 대표 접촉쌍은 모델 내 접촉쌍 중 최대 접촉압이 발생하는 접촉쌍으로 정의하였으며, 모든 재료 케이스에서 최대 접촉압 발생 부위가 동일하게 유지됨을 확인하였다. 따라서 재료별 비교는 동일한 대표 접촉쌍을 대상으로 수행하였다.

Fig. 11은 재료별 접촉압 분포와 최대 접촉압의 변화를 나타낸다. 접촉압은 접촉 영역 내에서 국부적으로 집중되는 경향을 보였으며, 최대 접촉압은 접촉 영역의 경계 또는 곡

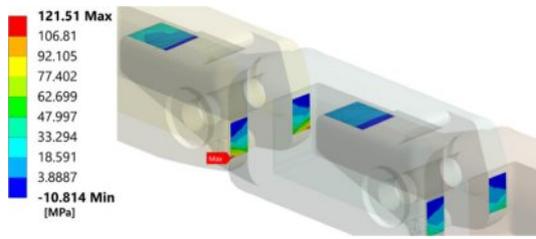


Fig. 11. Maximum contact pressure as a function of GF content

Table 7. Comparison of maximum contact pressure and contact area for different materials

Material	Max Contact Pressure (MPa)	Contacting Area (mm ²)
PA66	32.464	3.2020
PA66 GF15	52.047	3.8108
PA66 GF25	68.903	3.8109
PA66 GF35	87.511	3.8117
PA66 GF50	121.510	3.8115

를 변화가 큰 부근에서 나타났다. 변위 지배 조건에서는 재료 강성이 증가할수록 동일 변위를 만족시키기 위한 접촉 반력이 증가할 수 있으므로, GF 함량 증가에 따라 최대 접촉압이 증가하는 경향이 확인되었다. 한편, Fig. 11의 범례 (Legend) 최솟값에 나타난 음의 접촉압력은 접촉 영역의 경계부(contact fringe)에서 요소를 보간하는 과정 중에 발생하는 수치적 오차(numerical artifact)로, 물리적인 인장력을 의미하지 않는다.

재료별 최대 접촉압 및 접촉면적의 정량 비교 결과는 Table 7에 정리하였다. Table 7의 값은 대표 접촉쌍을 대상으로 정적 구조해석의 최대 원격 변위 단계에서 Contact Tool을 이용해 추출하였다. 접촉압은 마찰·마모로 인한 분진 발생량을 직접 예측하는 값은 아니지만, 마모는 PV(압력×속도), 상대운동거리, 표면거칠기 영향도 크므로 본 연구는 정성/상대 비교 지표로 사용했다.

정량 비교 결과(Table 7), GF 함량 증가에 따라 최대 접촉압은 32.464 MPa(PA66)에서 121.510 MPa(GF50)까지 단조 증가하였다. 반면 접촉면적은 PA66을 제외하면 약 3.81 mm² 수준에서 큰 변화가 없었으며, 이는 변위 지배 조건에서 강성 증가가 접촉 반력(하중 전달)을 증가시키면서도 접촉 패치의 기하학적 확장은 제한적인 상태로 유지되었음을 시사한다. 따라서 GF50은 최대 접촉압이 가장 높아 접촉 기반 마모/입자 발생 잠재지표 관점에서 가장 불리한 조건으로 해석된다.

4.5 결과 요약

4.1-4.4절의 정적 구조응답 및 피로 수명 결과를 종합하면, GF 함량 증가는 처짐 감소 측면에서 유리한 반면 응력

및 접촉압 증가로 인해 피로 수명과 접촉 안정성 측면에서 불리한 경향을 동반하는 상충관계가 확인된다. 변위 지배 조건에서는 강성 증가가 동일 변위를 만족시키기 위한 구조 반력과 국부 하중 전달을 증가시켜 응력 집중과 접촉 반력을 증폭시키는 방식으로 나타난다.

따라서 내구 기준(10⁶ cycles) 만족 여부를 1차 기준으로 적용할 경우, GF35와 GF50은 본 운용 조건에서 피로 수명 측면의 적용성이 제한될 수 있다. 기준을 만족하는 재료군 내에서는 처짐 저감 효과와 함께 응력 및 접촉압 증가 수준을 동시에 고려해야 하며, 처짐 감소 폭이 제한적인 반면 응력 및 접촉 지표가 과도하게 증가하는 조합은 지양하는 것이 바람직하다.

5. 결론

5.1 변위 지배 조건에서의 강성 증가 trade-off

본 연구는 역구동 조건의 미니체인에서 상단 원격 변위를 부여하는 방식으로 변위 지배 운용을 모사하고, 재료 물성 변화에 따른 구조 응답을 비교하였다. 변위 지배 조건에서는 외력의 크기가 직접 주어지기보다 목표 변위가 우선 충족되므로, 동일 변위를 만족하기 위한 구조 반력과 내부 하중 전달이 재료 강성과 접촉 조건에 따라 재분배된다. 이에 따라 강성이 증가하면 전역 변형은 억제되는 반면, 하중 전달이 국부적으로 집중되면서 응력 집중 및 접촉 지표의 악화가 동반될 수 있다.

해석 결과, GF 함량 증가에 따라 처짐은 감소하였으나 그 감소 폭은 제한적이었으며(예: P7에서 -73.819 mm → -67.819 mm, 약 8.1% 감소), 최대 등가응력과 최대 접촉압은 단조 증가하였다(18.418 → 68.442 MPa, 32.464 → 121.510 MPa). 즉, 강성 증가에 따른 처짐 억제 효과와 응력·접촉 지표 악화가 동시에 나타나는 trade-off가 확인되었다. 이러한 상충관계는 역구동 변위 지배 운용에서 강성 상향만을 기준으로 재료를 선정하는 접근이 항상 유리하지 않음을 시사하며, 이후 절에서 내구 기준과 접촉 지표를 함께 고려한 종합 평가의 필요성을 뒷받침한다.

5.2 설계 기준 기반 내구성 평가

재료 적용성 평가는 최소 10⁶ cycles의 내구 기준을 설계 요구조건으로 설정하고, hotspot 인근의 최소 피로 수명을 중심으로 판단하였다. 피로 수명 평가는 3.2절에서 구성한 S-N 입력과 3.3절의 피로해석 설정(Zero-based, R=0, Goodman 보정)을 동일하게 적용하여 수행하였으며, 수명 분포는 Life contour와 최소 수명 값을 함께 비교하였다.

해석 결과, PA66, GF15, GF25의 경우 수명 분포가 10⁷ cycles 이상으로 표시되어 본 연구의 수명 평가 범위 상한 이상으로 분류되었다. 이는 본 하중 조건에서 내구 기준 대비 충분한 수명 여유가 존재하는 경향을 의미한다. 다만 해

당 결과는 결과 표시 상한 및 S-N 입력 범위의 영향이 포함될 수 있으므로, 절대 수명값을 단정하기보다는 내구 기준 대비 충분한 여유가 존재하는 구간으로 해석하는 것이 타당하다.

반면 GF35는 hotspot 인근의 최소 수명이 5.8581×10^5 cycles로 나타나 내구 기준을 만족하지 못하였으며, GF50은 최소 수명이 4.5212×10^4 cycles로 나타나 내구 기준 미만의 저수명 영역이 뚜렷하게 확인되었다. 따라서 본 운용 조건에서 내구 기준 만족 여부를 1차 기준으로 적용할 때, PA66-GF15-GF25는 적용 가능 범주, GF35 및 GF50은 적용성이 낮은 범주로 정리된다.

따라서 본 운용 조건에서 내구 기준 만족 여부를 1차 필터링 기준으로 적용할 때, PA66, GF15, GF25만이 설계 적용 가능한 '안전 영역(Safe Zone)'에 포함된다.

5.3 접촉 지표를 포함한 종합 재료 선정

클린 이송 시스템에서는 구조적 파손 위험뿐 아니라 접촉 상태가 마찰·마모 거동 및 입자 발생 잠재성에 영향을 줄 수 있으므로, 본 연구는 최대 접촉압을 마모/입자 발생 잠재지표로 정의하여 종합 비교에 포함하였다. 접촉 지표는 대표 접촉쌍에서의 contact pressure 결과를 기반으로 비교하였으며, 모든 재료 케이스에서 최대 접촉압 발생 부위가 동일하게 유지됨을 확인한 후 동일 접촉쌍의 최대 접촉압을 비교하였다.

해석 결과 접촉면적은 약 3.81 mm^2 수준으로 재료에 따라 큰 변화가 없었으나, 최대 접촉압은 GF 함량 증가에 따라 32.464 MPa(PA66)에서 121.510 MPa(GF50)까지 크게 증가하였다. 이는 접촉 폭이나 접촉 영역이 확대되는 형태보다는 접촉 하중이 국부적으로 집중되는 방향으로 변화했음을 의미하며, GF 함량 증가에 따라 접촉 기반 잠재 위험이 증가할 수 있음을 시사한다.

이상의 내구 기준 기반 평가(5.2절)와 접촉 지표를 함께 고려하면, PA66-GF25는 최소 피로 수명이 $\geq 10^7$ cycles(평가 상한 이상)로 내구 기준 10^6 cycles를 만족하는 반면, GF35 및 GF50은 각각 5.8581×10^5 cycles, 4.5212×10^4 cycles로 기준 미만으로 평가되어 본 운용 조건에서 적용성이 낮다. 또한 GF35-GF50 구간은 최대 접촉압 증가가 뚜렷하여(예: GF35 87.511 MPa, GF50 121.510 MPa), 내구와 접촉 지표 관점에서 불리한 조합으로 정리된다. 따라서 본 조건에서는 PA66-GF25 범주를 적용 가능 후보군으로 설정하고, 후보군 내에서는 요구 처짐 저감 수준과 함께 응력·접촉압 증가를 최소화하는 방향으로 재료를 선정하는 것이 타당하다(예: 보수적 선택으로 GF15, 더 큰 처짐 저감 요구 시 GF25 고려).

종합하면, 이러한 분석 결과는 변위 지배 조건에서 피로 내구성이 허용하는 '강성의 임계점(Stiffness Threshold)'이 존재함을 시사한다. 따라서 본 연구는 내구 기준을 충족하면서도 가장 효과적인 처짐 제어 성능을 제공하는 GF25를

본 시스템의 최적의 타협점(Best compromise)으로 제안한다.

5.4 Trade-off 시각화 및 설계적 해석

재료별 상충관계는 Fig. 12에 제시한 산점도 기반 시각화로 요약하였다. Fig. 12(a)는 기존 적용 재료인 GF50을 기준으로 한 처짐 Penalty($\Delta|u_{P7}|$)와 최대 등가응력의 관계를 보여주며, GF 함량을 낮출수록 처짐은 증가하는 방향으로 이동하지만 최대 등가응력은 유의하게 감소하는 경향이 확인되었다. 또한 접촉 지표(최대 접촉압) 역시 GF 함량 감소에 따라 함께 완화되는 방향으로 이동하여, 처짐 증가라는 불이익과 응력·접촉 지표 개선 효과 간의 trade-off가 직관적으로 확인된다.

Fig. 12(b)는 최대 등가응력과 최대 접촉압의 관계를 나타내며, 마커 형상은 내구 기준(10^6 cycles) 만족 여부를 의미한다. 해당 도식에서 GF35 및 GF50은 높은 응력-높은 접촉압 영역에 위치하면서 내구 기준을 만족하지 못하는 군으

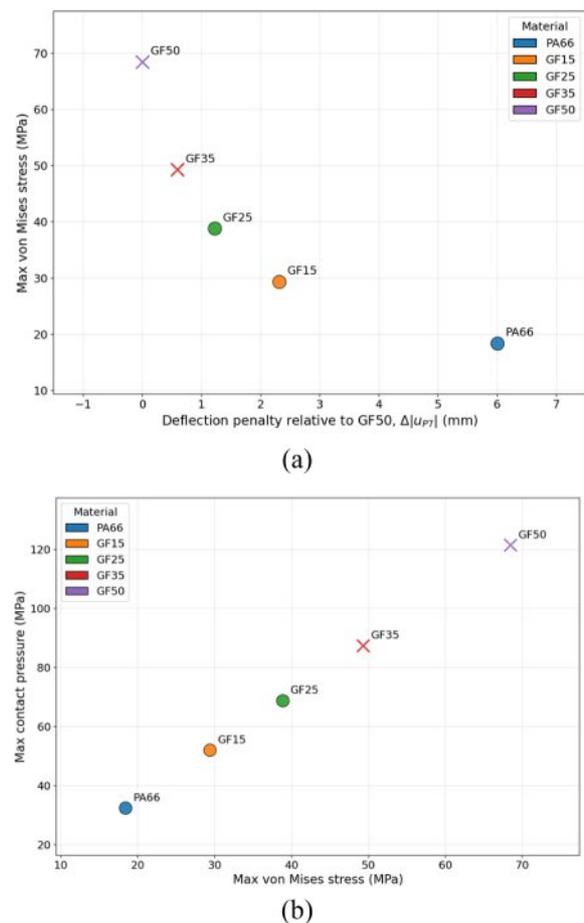


Fig. 12. Trade-off summary for PA66 and PA66/GF composites under reverse-driving conditions: (a) deflection penalty relative to GF50, $\Delta|u_{P7}|$, versus peak von Mises stress, and (b) peak von Mises stress versus maximum contact pressure. Marker shape indicates pass/fail against the 10^6 -cycle durability criterion

로 분류되어, 본 운용 조건에서 적용성이 낮다. 반면 PA66, GF15, GF25는 내구 기준을 만족하는 범주에 속하며, 그중 GF15-GF25는 처짐 저감과 응력·접촉 지표 간 균형이 비교적 양호한 후보군으로 해석된다. 따라서 본 조건에서는 내구 기준을 만족하는 후보군(PA66-GF25) 내에서 허용 처짐 범위를 고려해 GF15 또는 GF25를 선택하는 것이 합리적이다.

종합하면, 본 운용 조건에서는 GF 함량 증가에 따른 처짐 개선 이득은 제한적인 반면 최대 응력 및 최대 접촉압의 증가와 피로 수명 저하가 동반될 수 있으므로, 단순 강성 상향보다는 내구 기준과 접촉 지표를 동시에 고려한 재료 선정이 필요하다. 내구 기준을 만족하는 후보군(PA66-GF25) 중에서는 처짐 저감 효과와 응력·접촉압 증가 수준을 함께 고려할 때 GF25가 균형적인 선택지로 평가되며, GF15는 응력 및 접촉 지표가 더 낮게 유지되는 경향을 바탕으로 보수적 대안 후보로 정리된다.

종합하면, 본 시각화 결과는 역구동 미니체인 설계 시 피로 내구성이 허용하는 '강성의 임계점(Stiffness Threshold)'이 존재함을 명확히 보여준다. 따라서 본 연구는 단순 강성 상향이 아닌, '피로 내구 한계 내에서의 최대 강성 확보'를 핵심 설계 기준으로 제안하며, 이에 따라 GF25를 처짐 제어와 내구 신뢰성을 동시에 만족하는 최적의 타협점(Best compromise)으로 최종 선정한다.

후 기

본 연구는 2025년도 교육부 및 충청북도의 재원으로 충북RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원 체계(RISE)의 결과입니다.(2025-RISE-11-014-03)

REFERENCES

- Kim, D.J., Kim, Y.I., and Hyun, D.H., "TRIZ Application to Reduce Noise and Dusts of Cable Carrier Chain Systems," *Proceeding of the Society for CAD/CAM Engineers Conference*, Pyeongchang, Korea, Feb. 2010, pp. 493-498.
- Xie, B., Wang, F., Liu, J., Xu, Z., Gao, S., and Zhao, L., "The dynamic characteristics of the shearer cable drag system," *PLOS ONE*, Vol. 19, No. 12, 2024, e0316319.
- Zhao, L., Wang, D., Lin, G., Tian, S., Zhang, H., and Wang, Y., "Prediction of mechanical characteristics of shearer intelligent cables under bending conditions," *PLOS ONE*, Vol. 20, No. 2, 2025, e0318767.
- Sutar, A.B., Singh, P., Bhoite, T.D., and Shelar, D.S., "Improved Conveyor Chain Link Performance via Weight and Material Optimization," *Open Access Research Journal of Science and Technology*, Vol. 15, No. 2, 2025, pp. 44-62.
- Kunishima, T., Nagai, Y., Kurokawa, T., Bouvard, G., Abry, J.C., Fridrici, V., and Kapsa, P., "Tribological Behavior of Glass Fiber Reinforced-PA66 in Contact with Carbon Steel under High Contact Pressure, Sliding and Grease Lubricated Conditions," *Wear*, Vol. 456-457, 2020, 203383.
- Hessman, P.A., Welschinger, F., Hornberger, K., and Böhlke, T., "A Micromechanical Cyclic Damage Model for High Cycle Fatigue Failure of Short Fiber Reinforced Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 264, 2023, 110855.
- Lates, M.T., Velicu, R., and Gavrila, C.C., "Temperature, Pressure, and Velocity Influence on the Tribological Properties of PA66 and PA46 Polyamides," *Materials*, Vol. 12, 2019, 3452.
- Feyzullahoglu, E., and Saffak, Z., "The tribological behaviour of different engineering plastics under dry friction conditions," *Materials & Design*, Vol. 29, 2008, pp. 205-211.
- BASF, Ultramid A3K (PA66) Product Information, Ludwigshafen, Germany, Sep. 2025.
- BASF, Ultramid A3WG3 (PA66-GF15) Product Information, Ludwigshafen, Germany, Sep. 2025.
- BASF, Ultramid A3WG5 (PA66-GF25) Product Datasheet, Ludwigshafen, Germany, Sep. 2025.
- BASF, Ultramid A3WG7 (PA66-GF35) Product Information, Ludwigshafen, Germany, Sep. 2025.
- BASF, Ultramid A3WG10 (PA66-GF50) Product Information, Ludwigshafen, Germany, Sep. 2025.
- Mandal, N.K., "FEA to assess plastic deformation of railhead material damage of insulated rail joints with fibreglass and nylon endposts," *Wear*, Vol. 366-367, 2016, pp. 3-12.