

• 특집 • AI 및 데이터 기반 적층제조 공정 최적화와 응용(AI and Data-driven Optimization and Applications in Additive Manufacturing Processes)

초음파 피로시험을 이용한 ABS와 DLP 3D 프린팅 레진의 피로 수명 및 파단 특성 비교

Comparative Study on Fatigue Life and Fracture Characteristics of ABS and DLP 3D Printing Resin Using Ultrasonic Fatigue Testing

박금정¹, 이문구¹, 전용호^{1,#}Geum-jeong Park¹, Moon Gu Lee¹, and Yongho Jeon^{1,#}¹ 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

Corresponding Author / E-mail: princaps@ajou.ac.kr, TEL: +82-31-219-3652

ORCID: 0000-0002-0183-8652

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Digital light processing (디지털 광처리 방식), Engineering plastic (엔지니어링 플라스틱), High-strength resin (고강도 레진), Ultrasonic fatigue test (초음파 피로 시험), Fatigue life (피로 수명)

This study investigated the ultrasonic fatigue behavior of ABS and of a high-strength photopolymer resin (Rigid Black) fabricated by digital light processing (DLP) additive manufacturing. The dynamic elastic modulus of both materials was measured so that specimens could be designed to satisfy the 20 kHz resonance condition. ABS specimens were CNC-machined, whereas Rigid Black specimens were DLP-printed and post-cured. Thermal effects were minimized by compressed-air cooling with a 0.3 s/3 s duty cycle. S-N curves showed that fatigue life increased as the stress amplitude decreased for both materials. ABS exhibited higher fatigue strength and a more consistent life distribution, which is attributed to its homogeneous microstructure. Rigid Black showed lower fatigue strength with greater scatter, reflecting the anisotropy and interfacial inhomogeneity introduced by layer-by-layer fabrication. Fractographic analysis revealed that ABS underwent mixed-mode ductile-fatigue fracture through crazing, whereas Rigid Black failed in a brittle manner, with directional crack propagation driven by process-induced defects. These results confirm the feasibility of ultrasonic fatigue evaluation for DLP-printed polymer components and provide a basis for assessing the durability of additively manufactured parts.

Manuscript received: May 11, 2026 / Revised: May 31, 2026 / Accepted: July 15, 2026

1. 서론

적층 제조 기술의 고도화에 따라 주로 시제품 제작에 활용되었던 단계를 지나, 최근 기능성 및 구조용 부품으로 적용이 확대되고 있다[1,2]. 특히 복잡한 형상의 구현, 공정 단순화 및 맞춤형 제작이 가능한 관점에서 다양한 산업 분야에 활용 가능성이 높게 평가되고 있다. 그러나 실제 부품으로의 지속적인 확대 적용을 위해서는 안정적인 기계적 물성의 확보는 물론 반복하중 및 응력 집중 환경에서의

내구성과 신뢰성에 대한 정량적 검증이 선행되어야 한다[1-3].

한편 엔지니어링 플라스틱은 경량화와 우수한 생산성 및 원가 절감의 관점에서 매우 효과적이다[1,3]. 최근에는 전자제품의 커버와 같은 형상 구조물 외에도 샤프트 지지부와 기어 등의 기능 부품 및 다양한 산업 부품에 활용되고 있다[3]. 이러한 부품들은 반복하중과 응력 집중이 동반되는 환경에서 주로 사용됨에 따라 제품의 수명 주기 동안 고장이 발생하지 않도록 피로수명에 대한 정량적 평가 기준의 수립이 매우 중요하다[3,4].

그러나, 이러한 피로수명 평가를 실제로 진행하는데 오랜 시간이 소요되며 비용 부담이 크다. 반면, 초음파 피로시험은 시편의 공진을 이용하여 20 kHz의 고주파 조건에서 시험을 수행하여 단시간 내에 고주기 피로특성을 평가할 수 있는 장점이 있다[3-6].

특히, 적층 제조 기반 고분자 재료의 경우 구조 부품으로의 적용 가능성이 확대되고 있다[1,2]. 그러나, 반복하중 하에서의 피로 거동 및 내구 신뢰성에 대한 정량적 데이터는 아직 충분히 확보되지 않고 있다[7-9]. 따라서 신규 공정 기반 재료의 구조적 적용 가능성을 평가하기 위해서는, 산업적으로 기계적 특성과 피로 성능이 검증된 기준 재료(Reference Material)와의 비교를 통한 상대적 성능 평가가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 관점에서 보편적으로 활용되는 엔지니어링 플라스틱인 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)를 기준 재료로 설정하였다. ABS는 다양한 산업 부품에 적용되며 기계적 물성과 피로 특성이 충분히 축적된 재료로서, 신규 공정 재료의 상대적 내구 성능을 평가하기 위한 기준으로 활용될 수 있다[3,7].

이에 따라 본 연구에서는 높은 출력 정밀도를 바탕으로 산업적 적용이 확대되고 있는 DLP 3D 프린터용 고강도 엔지니어링 광경화성 수지인 Carima의 Rigid Black (CUKR03B)을 비교 재료로 선정하고, ABS를 기준으로 고주기 피로특성을 평가하였다[7,10]. 본 연구의 목적은 두 재료를 단순히 비교하는 것이 아닌, ABS 대비 DLP 적층 제조 재료의 피로 수명 수준과 파괴 거동을 정량적으로 평가함으로써, 적층 제조 출력물의 구조적 적용 가능성과 내구 신뢰성을 검증하는데 있다.

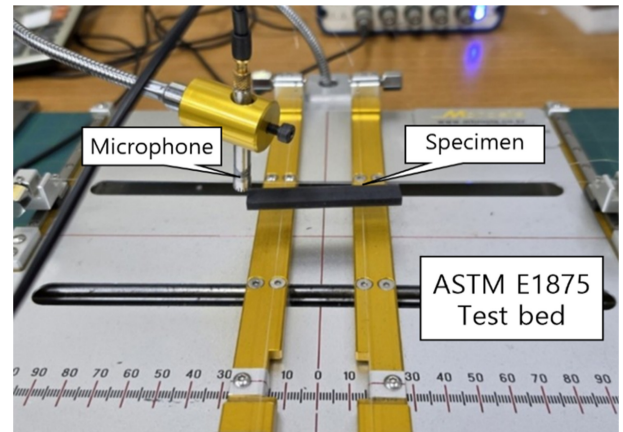


Fig. 1 Measurement system of dynamic Young's modulus

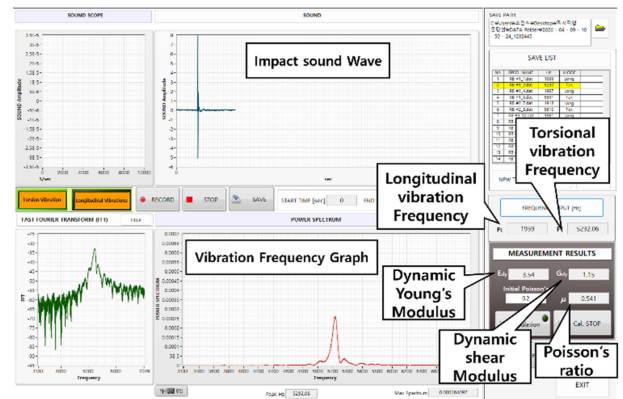


Fig. 2 Resonance frequency result

2. 초음파 피로시험

2.1 피로시험 시편 설계

초음파 피로시험은 시편의 공진 특성을 이용하여 고주기 반복하중을 부여하는 시험법으로, 시편은 목표 구동 주파수인 20 kHz에서 안정적으로 공진(f_r)할 수 있도록 설계되어야 한다[3]. 따라서 재료의 동탄성계수 (E_d)와 밀도(ρ) 등의 동적 물성치가 선행적으로 확보되어야 하고, 이러한 물성치는 시편 형상 설계와 응력 확산의 기초 입력 값으로 사용된다[3,5,6,8].

본 연구에서는 기준 재료인 ABS와 평가 대상인 DLP 재료의 피로 성능을 동일한 시험 조건에서 비교 평가하기 위해, 각 재료의 동탄성계수를 기반으로 20kHz 공진 조건을 만족하도록 시편을 설계하였다. 동탄성계수의 설정은 ASTM E 1875 규격에 따라 Fig. 1의 실험 장치를 통해 Fig. 2와 같이 측정하였다[6]. 측정된 공진 주파수는 식(1)을 따르며, 각 변수의 정의 및 계산 결과는 Table 1과 같이 계산하였다.

$$l = \frac{1}{2f_n} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

이후 시편은 Bathias와 Paris가 제안한 호형 시편(Hourglass Specimen) 설계식에 기반하여 설계를 진행하였다[11]. 시편의

Table 1 Physical properties of each material

Material	Length(l) [mm]	Density(ρ) [g/cm ³]	E_d [GPa]
ABS	61	1.042	1.645
Rigid black	61	1.233	3.52

형상 및 설계에 필요한 변수는 앞서 측정한 동탄성계수를 바탕으로 식(2)-식(4)에 따라 계산하였다.

$$\alpha = \frac{1}{2L_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right), \quad \beta = \sqrt{\alpha^2 - \kappa^2} \quad (2)$$

$$L_1 = \frac{1}{\kappa} \tan^{-1} \left[\frac{1}{\alpha} (\beta \coth(\beta L_2) - \alpha) \right] \quad (3)$$

$$y(x) = \begin{cases} R_2, & L_2 < |x| \leq L \\ R_1 \exp(2\alpha x), & |x| \leq L_2 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 α 는 형상 감쇠 계수, β 는 복합 파수(Composite Wave Number), κ 는 시편 재료의 파수(Wave Number), L_1 는 테이퍼부 길이, L_2 는 평행부 길이, R_1 는 최소 반경(파단부), R_2 는 최대 반경이며, $y(x)$ 는 위치 x 에서의 시편 반경을 나타낸다.

시편의 형상이 결정되면, 시편 중앙 파단부에 부여되는 응력 진폭을 산출하여야 한다. 본 연구에서는 Choi et al. [6] 및 Bathias & Paris [11]의 방법에 따라 식(5)를 통해 응력으로 환산하였다.

$$\sigma = E_d A_0 \frac{\cos(kL_1)e^{\alpha L_2}}{\sinh(\beta L_2)} \times [\beta \cosh(\beta) - \alpha \sinh(\alpha)] e^{-\alpha L_2} \quad (5)$$

이 식에서 σ 는 시편 중앙 파단부의 최대 응력 진폭[MPa], E_d 는 동탄성계수[GPa], A_0 는 시편 파단 위치의 단면적[mm²]이며, $\alpha, \beta, \kappa, L_1, L_2$ 는 앞에서 정의한 시편 형상 설계 변수이며, 본 식은 선형 탄성 가정하에 성립한다. 본 연구에서 적용한 5–20 MPa의 응력 범위에서는 두 재료 모두 탄성 거동이 지배적인 것으로 판단하여 해당 가정을 적용하였다. 단, Rigid Black과 같은 광경화 수지는 점탄성 특성을 가질 수 있어, 본 연구의 응력 범위 내에서 선형 탄성 가정의 적용 타당성을 추가적으로 검토할 필요가 있으며, 이는 향후 연구 과제로 남긴다. Fig. 3과 Table 2에는 도출된 형상 설계 변수를 정리하였다.

2.2 시편 제작

ABS와 Rigid Black 시편은 각 재료의 특성에 적합한 가공 방법으로 제작하였다. ABS 시편은 Haas Automation사의 머시닝센터인 VF-2를 이용한 엔드밀링으로 제작하였으며, 치수 정밀도는 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이내에서 관리하였다. 절삭가공 시에는 절삭력에 의한 가공 변형 및 국부 손상을 최소화하고자, 엔드밀의 최대 절입 깊이를 $100 \mu\text{m}$ 이하로 설정하여 가공을 수행하였다.

Rigid Black 시편은 Carima사의 IMD-C DLP 3D 프린터를 사용하여 적층 제조하였으며, 상세한 적층 공정도는 Fig. 4와 같다. 그림에서 화살표로 표시된 ‘Build Orientation’은 광경화가 진행되는 적층 경로를 나타내며, 시편의 두께 방향을 따라 순차적으로 적층 하였다. 특히, 층별 경화 경로는 45° 해칭 패턴(Hatch Pattern)으로 설정하였다. 시편의 적층 방향은 피로 하중 방향에 수직이 되도록 설정하였고, 이는 실제 DLP 출력물의 대표적 사용 조건을 반영한 것이다. 모든 시편은 동일한 적층 조건 하에 제작되어 실험 결과의 일관성을 확보하고, 출력 후 세척 및 후경화 공정을 거쳐 각 주요 치수를 실측하였다. 후경화 공정은 Nova 3D사의 FastCure2 SE UV경화기를 사용하였다. 후경화 조건은 간, 광강도, 파장 조건에 따라 광경화 수지의 가교도, 탄성계수, 강도, 취성 및 피로수명에 영향을 줄 수 있으므로 본 연구의 재현성 확보를 위해 제조사 권장사항 405 nm 파장, 300 mW/cm² 강도 조건에서 10분간 진행하였다.

적층 제조 시에는 후경화 수축 및 형상 재현성에 따른 치수 편차를 고려하여 목표 시편 수량보다 여유 있게 출력하였으며, 목표 형상과 공차 범위를 만족하는 시편만을 선별하여 시험에 사용하였다. 초음파 피로시험기에 시편을 고정하기 위한 나사부 또한 DLP 적층 공정을 통해 제작하였다.

초음파 피로시험은 공진 기반의 시험법이므로 시험 시편은

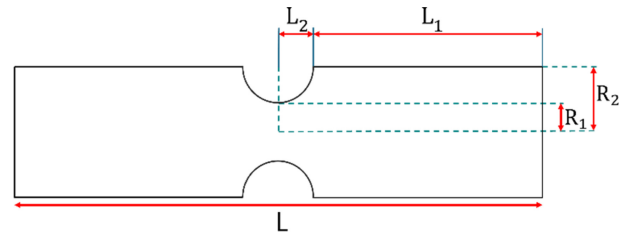


Fig. 3 Design parameters of specimen

Table 2 Design Parameter of resonance

Material	R ₁ [mm]	R ₂ [mm]	L ₁ [mm]	L ₂ [mm]
ABS	2	6	7.530	5
Rigid black	2	6	12.663	5

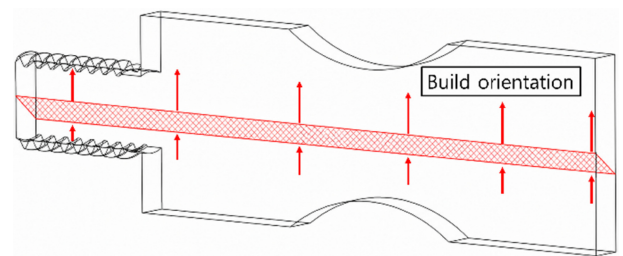


Fig. 4 Build orientation of rigid black

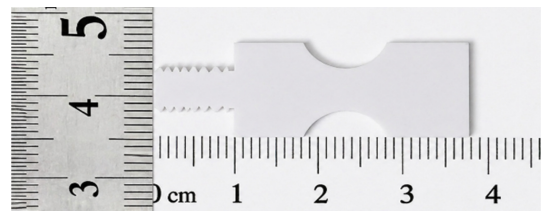


Fig. 5 Shape of ABS specimen

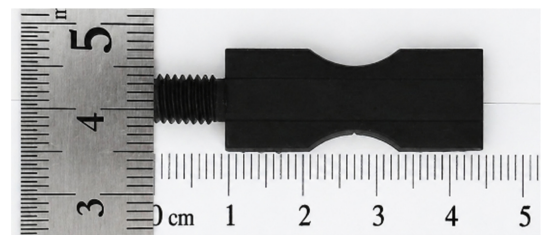


Fig. 6 Shape of rigid black specimen

시험장비에 안정적이고 확고히 결합되어야 한다. 이에 따라 가공 과정에서 시편 나사부의 공차 관리 및 가공 방법은 공진 안정성과 시험 신뢰성 확보를 위해 주요 설계 및 제작 인자로 고려하였다. ABS 시편의 나사부는 300 μm 2F Ball End Mill, 주문형 60° Thread Mill을 이용한 가공을 진행했다. 이를 통해 시험 중 시편의 목 부러짐과 같은 비정상적인 시편 파손을 방지할 수 있었다. Rigid Black 시편은 50 μm 층 두께로 출력하여

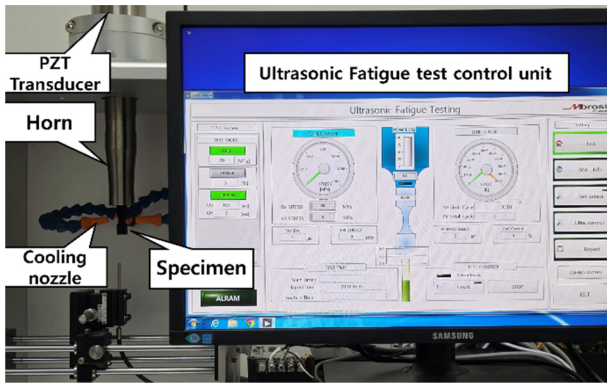


Fig. 7 Ultrasonic fatigue test system

나사부를 일체형으로 제작하였다. DLP 공정은 높은 형상 정밀도를 가져 후처리 가공 없이 장비와의 확고한 결합을 구현할 수 있었다. 최종 제작된 시편의 형상은 Figs. 5와 6과 같으며, 시편이 장착된 초음파 피로 시험 장치는 Fig. 7과 같다.

2.3 초음파 피로시험

초음파 피로시험은 ASM HANDBOOK Vol. 8에 정리된 시험법으로, 압전 세라믹(PZT)에서 발생한 20 kHz의 탄성 진동과에 의한 공진을 이용한 변위제어 피로시험법이다[3,5,6]. 시험기의 작동 원리는 다음과 같다. Transducer에서 발생한 진동이 공진 주파수에 맞춰 설계된 Horn을 통해 증폭되어, 시편까지 전달된다. 시편의 중앙에서 최대 응력과 최소 변위가 발생한다. 이에 따라 시편 중앙 파단부에는 $R = -1$ 의 응력비 조건에서 최대 반복 응력이 부가된다. 본 연구에서는 각 재료에 대해 4개의 응력 수준(5, 10, 15, 20 MPa)에서 응력 수준당 4개씩 총 16개의 시편을 시험하였다.

초음파 피로시험 중에는 시편 중심부에 최대 반복 응력이 집중되며 이에 따른 발열이 발생한다. 특히 유리전이온도(T_g)가 낮고 손실계수가 큰 고분자 재료에서는 자기 발열이 피로수명 평가에 중요한 변수로 작용한다[4]. 따라서 발열에 따른 물성 변화 관리를 위한 냉각이 중요하다.

본 연구에서는 열 영향의 최소화를 위해 공기 냉각 노즐을 적용하였고, 초음파 가진에 휴지기를 부여하여 시간 조절을 통해 시험 중 온도 상승을 제어하였다. 발열 제어를 위한 시간 조절은 진동기 0.3 s, 휴지기 3 s로 설정하여 충분한 냉각 시간을 통해 파단면에서 발생 가능한 발열에 의한 변형을 최소화하고자 하였다. 이를 확인하기 위해 열화상카메라를 활용하여 진동기와 휴지기의 시편 온도를 각각 측정하였고, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 열화상카메라의 방사율은 재료와 표면 조건에 따라 달라지지만 ABS와 Rigid Black 재료 모두 0.95 수준의 방사율을 가지므로 0.95로 고정하여 측정하였다. ABS와 Rigid Black 시편에서 진동기와 휴지기 두 구간 간 온도차는 각각 1.4와 1.1°C로 측정되어 공기 냉각이 효과적으로 작용했음을 확인할 수 있다.

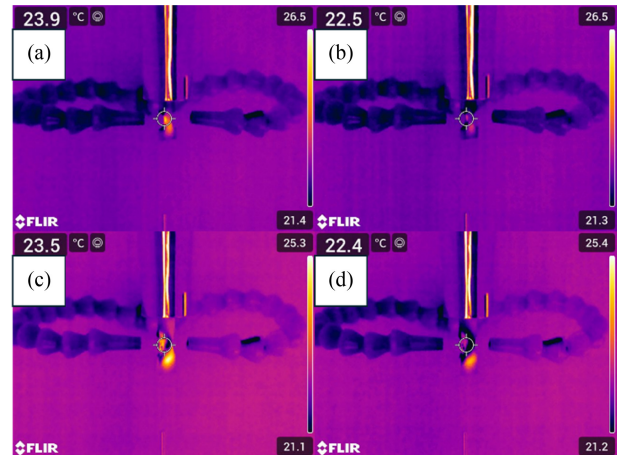


Fig. 8 Infrared thermal camera images during vibration and rest periods (a) ABS vibration, (b) ABS rest, (c) Rigid black vibration, and (d) Rigid black rest

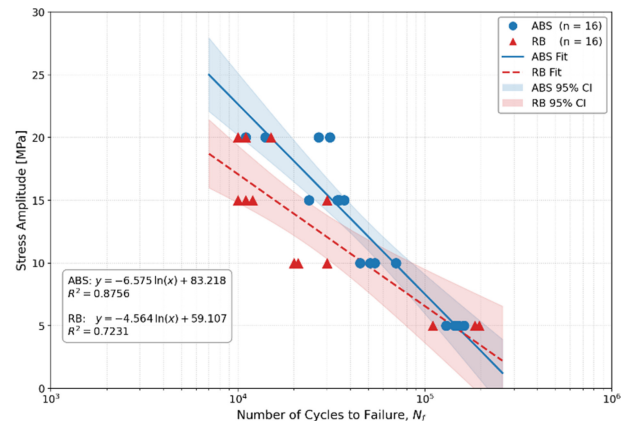


Fig. 9 Ultrasonic fatigue test results

3. 실험 결과 및 분석

3.1 재료별 초음파 피로수명 특성

Fig. 9는 ABS와 Rigid Black 시편의 초음파 피로시험 결과를 나타낸 S-N 선도이다. 두 재료 모두 응력 진폭이 감소함에 따라 피로수명이 증가하는 전형적인 피로 거동을 나타내었으며, 로그 수명 영역에서 응력 진폭과 피로수명 사이에 명확한 상관관계가 존재함을 확인하였다. 회귀분석 결과, ABS는 $y = -6.575 \ln(x) + 83.218$ ($R^2 = 0.8756$), Rigid Black은 $y = -4.564 \ln(x) + 59.107$ ($R^2 = 0.7231$)의 관계를 나타내었다. 두 재료 모두 로그 함수 형태의 회귀식이 S-N 데이터를 유의하게 기술하였으며, 이는 고분자 계열 재료에서 일반적으로 관찰되는 피로 거동 특성과 부합한다[3,6]. 두 회귀선의 기울기 및 절편 차이에 대한 통계적 유의성의 검정은 향후 시편 수 확대를 통해 적용할 예정이다. 또한, Fig. 9에 표시된 95% 신뢰구간(CI)을 통해, ABS는 좁은 신뢰구간으로 안정적인 피로 거동을 나타내는 반면, Rigid Black은 상대적으로 넓은 신뢰구간을 가지며 데이터 산포가 큼을 확인할 수 있다.

전반적인 경향을 살펴보면, ABS의 추세선이 Rigid Black보다 전 수명 구간에 걸쳐 상부에 위치함을 확인할 수 있었다. 이는 동일 피로수명 조건에서 ABS가 Rigid Black보다 더 높은 응력 진폭을 견딜 수 있음을 의미하며, ABS의 우수한 피로저항성을 정량적으로 뒷받침한다. 특히 10^4 – 10^5 cycle 영역에서 ABS는 15–20 MPa 수준의 응력 진폭에서 비교적 안정적인 수명 분포를 나타내었다.

두 재료의 회귀식 기울기 관점에서 분석하면, ABS(기울기: -6.575)가 Rigid Black(기울기: -4.564)에 비해 응력 진폭 변화에 더 민감하게 반응하는 경향을 보인다. 즉, 응력 진폭이 감소하는 경우 ABS의 피로수명 증가 폭이 Rigid Black보다 크게 나타나며, 이는 저응력 영역에서 ABS의 피로 내구성 이점이 더욱 부각될 수 있음을 나타낸다. 반면 Rigid Black은 상대적으로 완만한 기울기로 인해 응력 수준에 따른 수명 변화가 작으며, 넓은 응력 범위에서 비교적 일정한 피로수명 특성을 보이는 것으로 해석할 수 있다.

결정계수(R^2) 측면에서도 두 재료 간 차이가 관찰되었다. ABS의 $R^2 = 0.8756$ 은 실험 데이터가 회귀식에 잘 부합함을 나타내는 반면, Rigid Black의 $R^2 = 0.7231$ 은 상대적으로 높은 데이터 산포를 포함하고 있다. 이러한 산포의 증가는 DLP 적층 공정에서 기인한 층간 계면 불균일성 및 내부 미세 결함의 분포 차이에 의한 것으로 판단되며, 두 재료의 95% 신뢰구간 폭에서도 시각적으로 확인된다.

기준 재료인 ABS는 균질한 벌크 재료 특성으로 인해 전 수명 구간에 걸쳐 높은 데이터 일관성과 우수한 피로저항성을 나타내었다. 반면 DLP 적층 공정으로 제작된 Rigid Black은 광경화 수지의 층별 적층 특성에서 비롯된 이방성 및 층간 계면 결합 불균일성으로 인해 상대적으로 낮은 피로강도와 넓은 수명 산포를 나타내었다[1,2]. 이러한 산포는 적층 방향, 후경화 조건 및 가공과 같은 미세 결함을 포함한 공정 변수의 영향에 기인한 것으로 판단된다[7,10].

더불어, 본 연구에서 적용된 초음파 피로시험은 20 kHz의 고주파 반복하중을 부가하는 시험 방식으로, 시험 중 미세 결함 주변에서의 국부 발열이 고분자 재료의 피로수명 평가에 추가적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 두 재료 간의 피로수명 차이는 단순한 응력 수준의 차이만으로 해석하기보다는, 재료 고유의 물성 차이 및 DLP 공정 특성에서 기인한 내부 미세구조 차이와 고주파 반복하중 조건에서의 열적·기계적 응답 특성을 종합적으로 고려하여 분석할 필요가 있다. 이를 보다 심층적으로 고찰하기 위해 이하에서 파단면 관찰을 병행하였다.

3.2 파단면 관찰 및 피로 파괴 거동 분석

Fig. 10은 초음파 피로시험 후 ABS와 Rigid Black 시편의 파단면을 관찰한 결과이다. 관찰은 광학현미경을 이용하여 수행하였으며, 크레이즈(Craze) 형성, 피로 비치마크(Fatigue Beach Mark) 등 마이크로 스케일 파괴 양상에 대한 보다 정밀한 분석은 향후 주사전자현미경(SEM) 관찰을 통해 보완할 예정이다.

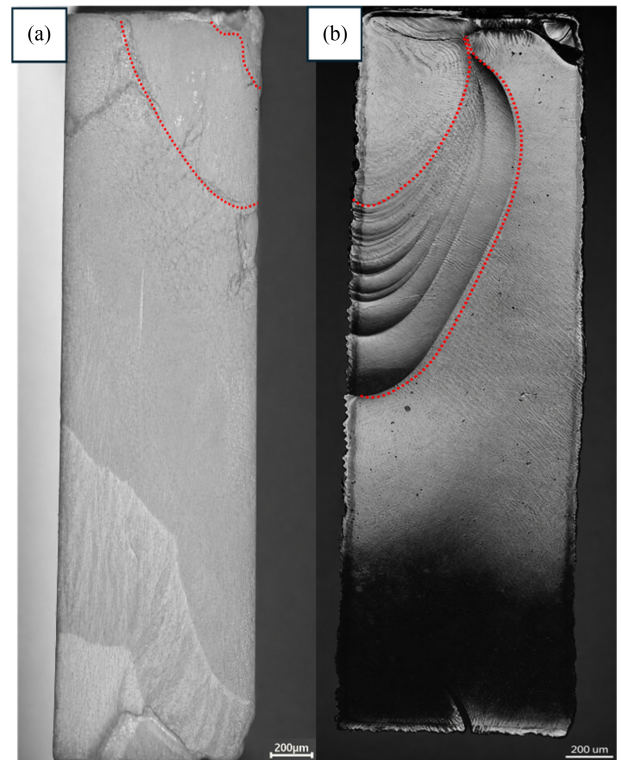


Fig. 10 The overall view of the fatigue fracture surface (a) ABS, 5 MPa, 130,000 cycles, (b) Rigid black, 5 MPa, 185,000 cycles

ABS 시편의 파단면은 전반적으로 거칠고 불규칙한 형상을 나타내었으며, 파단면 주변에서 재료의 국부적 변형을 동반한 파괴 흔적이 관찰되었다.

본 연구에서는 초음파 진동으로 인한 열영향의 최소화를 위해 충분한 휴지 간격과 압축공기 냉각을 적용하였다. 동일 시험 조건에서 평가된 Rigid Black 시편의 파단면에서는 이와 같은 국부 변형 흔적이 관찰되지 않았으며, 이를 통해 냉각 조건이 시험 전반에 걸쳐 유효하게 작용하였음을 확인하였다. 따라서 ABS 파단면에서 관찰된 국부 변형 흔적은 시험 중 발열에 의한 외부적 영향으로 보기 어려우며, ABS 고유의 미세구조적 특성에 기인한 파괴 거동으로 분석할 수 있다. 단, 두 재료의 유리전이온도(T_g)와 열전도도가 상이하므로 동일 냉각 조건에서의 열응답을 직접 비교하기에는 한계가 있다. 그러나 본 시험에서 측정된 진동-휴지 구간 온도차(ABS 1.4°C, Rigid Black 1.1°C)는 두 재료 모두 시험 중 자기발열이 충분히 억제되었음을 보여주며, ABS 파단면의 국부 변형이 발열에 의한 인공 흔적이 아닐 가능성을 뒷받침한다.

ABS는 강성이 높은 SAN (Styrene-acrylonitrile) 매트릭스 내에 부타디엔(Butadiene) 고무상이 분산된 이상(二相) 구조를 가진다. 반복 하중이 가해지면 고무 입자 주변에서 응력 집중이 발생하고, 부타디엔 고무상이 이를 흡수하는 과정에서 분자쇄의 이동 및 재배열이 일어난다. 하중 반복 횟수가 증가함에 따라 SAN 매트릭스 내에서 분자쇄들이 탄성 한계를 초과하며

크레이즈를 형성하고, 이 크레이즈 내부에서 분자쇄 절단(Chain Scission) 및 고무상-매트릭스 계면 분리가 진행되어 최종적으로 균열 성장과 피로 파괴에 이르게 된다[12]. 파단면에서 관찰된 불규칙한 표면 형상과 국부 변형 흔적은 크레이징 메커니즘 및 고무상의 소성 에너지 흡수 거동이 복합적으로 작용한 결과로 사료된다. 즉, ABS의 파괴는 피로균열 전파와 균열 선단부의 국부적 소성변형이 동반된 연성-피로 혼합 파괴(Ductile-fatigue Mixed Mode Fracture) 거동을 따를 가능성이 높다. Rigid Black 시편 파단면 상단부에서는 균열 개시 영역으로 추정되는 뚜렷한 경계부와 내부로 전파된 동심원형 곡선 패턴이 확인되었다. 이는 전형적인 피로 비치마크 형상과 유사하나, 광학현미경 분석의 한계상 거시적 관찰만으로는 단정하기 어렵다. 또한, 파단면 일부에서 적층 방향에 따른 미세 층상 구조가 관찰되었으며, 이는 층간 계면 또는 내부 미세 결함이 균열 개시 및 전파 경로에 영향을 미쳤음을 시사한다[7,10]. 한편, 파단면 전반에서 유의미한 연신이나 재료 흐름의 흔적은 관찰되지 않아, Rigid Black은 상대적으로 취성적인 피로 파괴 거동을 보인 것으로 판단된다.

종합하면, ABS는 이상 구조에 기인한 크레이징 및 소성변형이 동반된 연성-피로 혼합 파괴 거동을 나타내었다[12]. 한편, Rigid Black은 DLP 적층 구조에서 기인한 미세 결함 및 층간 계면의 영향으로 방향성이 있는 균열 전파와 취성적 파괴 양상을 나타내었다. 이러한 파괴 양상의 차이는 각 재료의 고유 물성 차이와 DLP 공정 특성이 복합적으로 작용한 결과이며, S-N 선도에서 나타난 피로수명 분포 및 데이터 산포 특성과 상호 부합하는 결과로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 엔지니어링 플라스틱인 ABS를 기준 재료로 설정하고, DLP 3D 프린터용 고강도 레진인 Rigid Black의 고주기 피로 특성을 초음파 피로시험을 통해 비교하였다. 초음파 피로시험 시편 설계를 위한 각 소재의 동탄성계수는 ABS 1.645 GPa, Rigid Black 3.52 GPa로 측정되었고, 측정 결과에 기반하여 20 kHz의 공진 조건을 충족하는 시편을 설계하였다.

초음파 피로시험 결과 두 재료 모두 응력 진폭이 감소함에 따라 피로수명이 증가하는 일반적인 S-N 거동을 나타내었다. 기준 재료인 ABS는 균질한 벌크 물성에 기인하여 높은 피로 강도와 안정적인 수명 분포를 확인할 수 있었다. Rigid Black은 ABS에 비해 낮은 응력 진폭 영역에 분포하였으며, DLP 적층 공정 특성에서 기인한 이방성과 층간 계면 불균일성으로 인해 상대적으로 넓은 수명 산포를 보였으나, 명확한 피로 수명 경향을 파악할 수 있었다. 이를 통해 DLP 적층 제조 재료에 대해서도 초음파 피로시험을 이용한 고주기 피로 성능 검증이 가능함을 확인하였다.

파단면 관찰 결과, ABS와 Rigid Black은 서로 다른 피로 파괴

양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다. ABS 시편에서는 SAN 매트릭스 내 부타디엔 고무상의 이상(二相) 미세구조에 기인한 크레이징(Crazing) 및 국부 소성변형이 복합적으로 작용한 연성-피로 혼합 파괴 양상이 확인되었다. 반면 Rigid Black 시편에서는 DLP 적층 공정에서 형성된 내부 미세 결함 및 층간 계면의 영향에 따른 방향성 균열 전파와 취성적인 파괴 양상을 확인할 수 있었다. 이러한 파괴 거동의 차이는 각 재료의 고유 물성 및 DLP 공정 특성이 복합적으로 반영된 결과이며, 두 재료의 S-N 특성 및 파괴 거동의 차이는 상호 부합하는 결과로 판단된다.

본 연구에서 ABS를 기준 재료로 설정한 것은, 두 재료가 유사한 밀도(ABS 1.042 g/cm³, Rigid Black 1.233 g/cm³) 및 엔지니어링 플라스틱의 공통된 적용 영역을 가지며, ABS의 피로 물성이 산업적으로 충분히 검증되어 있다는 점에 근거한다. 이를 바탕으로 DLP 적층 제조물의 실용적 내구성 수준을 정량적으로 평가하였다는 점에 본 연구의 의의가 있다. 다만 본 연구는 몇 가지 방법론적 한계를 내포한다. 두 재료가 서로 다른 가공법으로 제작되어 피로 특성 차이를 재료 고유 특성과 공정 영향으로 완전히 분리하기 어려우며, 시편 수의 제한으로 통계적 해석에 한계가 있고, 파단면 해석은 SEM을 통한 정밀 검증이 추가로 요구된다.

향후 연구에서는 세 가지 방향으로 연구를 확장할 계획이다. 첫째, ABS를 적층 공정으로 제작한 시편과의 비교 시험을 통해 재료 고유 특성과 제작 공정의 영향을 분리 분석할 예정이다. 둘째, 시편 수 확대를 통한 통계적 신뢰성 제고, 셋째, SEM 파단면 분석을 통한 파괴 메커니즘 정밀 검증을 수행할 계획이다. 이를 통해 DLP 적층 제조물의 내구 신뢰성 평가 체계 확립에 기여하고자 한다.

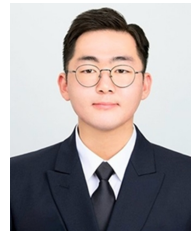
ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부)에서 지원하고 한국산업기술진흥원(KIAT)에서 주관하는 RS-2025-02304112 산업혁신 인력양성(HRD) 프로그램의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Jafferson, J., Chatterjee, D., (2021), A review on polymeric materials in additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 46, 1349-1365.
2. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D., (2018), Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.

3. Cho, I. S., Hwang, J. H., Oh, J. Y., Kim, H. C., Oh, S. H., Lee, C. S., Park, I. G., (2015), Durability assessment of polyoxymethylen using ultrasonic fatigue testing, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 39(8), 781-785.
4. Seo, H., Lee, O., (2011), A study on temperature dependent tensile and fatigue life characteristics for a polymer material, Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Fall Conference, 68-73.
5. Kim, Y., Kim, J., Cho, I., Lee, B., (2018), A study on the dissimilar metal joining of aluminum to steel using the arc heat source (IV)-fatigue behaviors using ultrasonic elastic resonance, Journal of Welding and Joining, 36(4), 36-46.
6. Park, J., Choi, S., Baek, S., Park, S., Huang, Y., Lee, J., (2023), An investigation of the properties of 3D printing materials according to additive manufacturing conditions using ultrasonic wave, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 24(6), 1041-1052.
7. Choi, Y., Kang, Y., Jung, C., Yeom, H., Park, C., Jeon, Y., (2022), Effect of the specimen fabrication process on the ultrasonic fatigue test for engineering plastics, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 31(6), 375-380.
8. Bojović, B., Golubović, Z., Milovanović, A., (2025), Aging effects on the bending performance of DLP and FDM printed PLA, Procedia Structural Integrity, 72, 491-498.
9. Kim, H., Lin, Y., Tseng, T. B., (2018), A review on quality control in additive manufacturing, Rapid Prototyping Journal, 24(3), 645-669.
10. Han, S., Kim, H., Lee, G., Jun, M. B., Choi, H., (2025), High-performance methacrylate-phenylenediamine-epoxy photothermal dual-curing resin for digital light processing, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 26(8), 1977-1989.
11. Bathias, C., Paris, P., (2004), Gigacycle fatigue in mechanical practice, Taylor & Francis.
12. Kambour, R., (1973), A review of crazing and fracture in thermoplastics, Journal of Polymer Science: Macromolecular Reviews, 7(1), 1-154.



Geum-Jeong Park

M.S. candidate in the Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include additive manufacturing and high cycle fatigue.

E-mail: gj2238@ajou.ac.kr



Moon Gu Lee

Professor in the Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include analysis, design, and control of high-precision positioning systems and bio-medical devices.

E-mail: moongulee@ajou.ac.kr



Yongho Jeon

Professor in the Dept. of Mechanical Engineering, Ajou University. His research interests include additive manufacturing, welding, fatigue analysis, the development of innovative manufacturing processes involving heat and vibration, and the influence of material properties on such processes.

E-mail: princaps@ajou.ac.kr