

3D 프린터를 활용한 협소 터널의 효율적 버럭 적재 방안 연구

전영진*, 박병수**

*강원도립대학교 스마트건설토목과 연구원

**강원도립대학교 스마트건설토목과 교수(교신저자)

e-mail:claynsand@hanmail.net

A Study on Efficient Muck Loading Methods in Narrow Tunnels Using 3D Printing

Young-Jin Jeon*, Byung-Soo Park*

*Dept. of Civil Eng., Gangwon State Univ. Researcher

**Dept. of Civil Eng., Gangwon State Univ. Professor

요약

본 연구는 단선 철도 터널과 같이 협소한 단면 조건에서 발생하는 버럭 반출의 비효율성을 개선하기 위해 3D 프린팅 기술을 적용한 신개념 로더 장비를 제안하였다. 기존 휠로더는 최소 회전 반경 확보가 불가능하여 별도의 방향전환소 설치가 요구되었고 이는 공정 복잡성, 시공 비용 증가 및 안전사고 위험을 유발하였다. 본 연구에서는 로더 본체의 방향 전환 없이도 버켓(bucket)이 전·후 방향으로 작동할 수 있는 구조를 설계하였으며, 3D 프린터를 활용하여 현장 조건에 최적화된 맞춤형 부품 제작이 가능하도록 하였다. 분석 결과 개발 장비는 기존 방식 대비 버럭 운반 사이클 타임을 약 15~20% 단축할 수 있는 것으로 나타났으며, 이를 통해 초기 지보공 설치 지연을 최소화하고 터널 안정성 및 시공 생산성 향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

1. 서론

기존의 터널 시공은 굴착(발파 또는 기계굴착) → 버럭 운반(휠로더+덤프트럭) → 지보공(숏크리트, 록볼트 등) → 굴착의 순으로 반복되는 공정으로 진행된다. 이 중 버럭 운반은 전체 1 사이클(Cycle Time)의 약 22~48%를 차지하는 핵심 공정이다. 일반적으로 굴진면에서 발생한 버럭은 휠로더(3.5)가 적재 및 회전을 통해 덤프트럭(15ton)에 싣고, 이후 덤프트럭이 이를 터널 외부의 가적장으로 운반하여 적치한다. NATM 공법에서는 굴착 직후 연성 숏크리트와 같은 초기 지보를 신속히 설치하는 것이 터널 안정성을 높이는 데 유리하다. 그러나 실제 현장에서는 버럭 반출에 많은 시간이 소요되어 지보 설치가 지연되는 경우가 빈번하다. 복선 철도 터널은 폭이 12.0m 이상으로 확보되어 있어 휠로더의 회전에 큰 제약이 없으나, 단선 철도 터널은 폭이 약 6~6.5m에 불과하여 휠로더의 회전이 사실상 어렵다. 그동안 단선 터널 설계에서는 폭 2.55m, 최소 회전 반경 4.949m의 소형 휠로더(1.72)를 적용해 왔으나, 실제로는 내부에서 방향 전환이 불가능하다. 단선 철도 터널 내부에서 휠로더의 회전 가능 여부를 검토한 결과 기존 상용 장비를 이용한 버럭 적재가 불가능한 것으로 나타났다(한국철도시설공단, 2012).

단선 철도 터널의 버럭 반출을 위해 정지 상태에서 회전이 가능한 장비들이 제안된 바 있다. 예를 들어, 굴삭기와 컨베이어 벨트 기능을 결합한 헤글로더나, 전·후 구분이 필요 없고 탱크처럼 제자리 회전이 가능한 무한궤도 덤프트럭이 대표적이다(한국철도시

설공단, 2014). 그러나 이들 장비는 해외 장비 의존도와 도입 과정에서 수급 문제 등으로 인해 실제 현장 적용에는 이르지 못하였다(김상철 외 7인, 2015).

단선 철도 터널의 경우 협소한 단면으로 인해 소형 휠로더조차 내부에서 방향 전환이 불가능하다. 기존 방식대로라면 장비가 후진으로 갱외까지 이동하여 버럭을 반출해야 하므로 작업 효율성이 저하되고 사고 위험이 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 3D 프린터를 활용하여 로더 버켓(bucket)이 전·후 방향으로 자유롭게 작동할 수 있는 신개념 로더 장비 설계 방안을 제안하였다. 해당 장비는 본체의 방향 전환 없이 버켓이 앞뒤로 전환·작동할 수 있도록 제작되며, 3D 프린팅 기술을 통해 버켓의 구조를 맞춤형으로 설계하고, 실제 현장 조건(터널 단면, 장비 치수, 적재 용량 등)에 최적화된 부품을 생산할 수 있다. 이 방식은 기존 휠로더의 회전 반경 한계를 극복하고, 협소 터널 내에서 버럭 반출 효율을 극대화할 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 3D 프린터를 통한 모듈화 설계는 장비 유지보수의 편의성을 높이고, 다양한 터널 단면 조건에 즉시 대응할 수 있는 유연성을 제공한다.

따라서 본 연구는 로더 자체의 방향 전환 없이 버켓의 앞뒤 전환 기능을 구현한 3D 프린팅 기반 로더 장비 개발을 통해 협소 터널의 버럭 반출 공정을 획기적으로 개선하고, 시공 안전성과 생산성을 동시에 향상시키고자 한다.

2. 본론

2.1 3D 프린터 설계(기존 장비)

[그림 1]은 본 연구에서 분석 대상으로 설정한 기존 휠로더 장비의 형상을 제시한 것이다. 휠로더는 전면에 장착된 버킷(bucket)을 상·하로 조작하여 굴진면에서 발생한 굴착 잔토(버럭)를 적재하고, 이를 덤프트럭에 상차하는 기능을 수행한다. 그러나 단선 철도 터널과 같은 협소한 단면 조건에서는 구조적 제약을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 기존 장비의 기존 모델로 설정하고, 이에 내재된 구조적 제약을 분석하였다. 이러한 분석을 토대로 3D 프린터 기반의 새로운 로더 버킷 설계를 도입하여, 본체의 방향 전환 없이도 전·후 방향으로 자유롭게 적재 작업이 가능한 개선 방안을 제안하고자 한다.

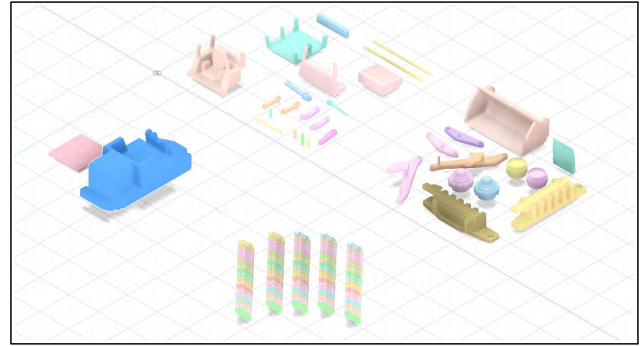


[그림 1] 3D 프린터로 제작된 기존 로더 장비

2.2 3D 프린터 설계 도면(개발 장비)

[그림 2]는 본 연구에서 제안한 개발 장비의 3D 프린터 설계 도면을 나타낸 것이다. 기존 휠로더 장비는 단선 철도 터널의 협소한 단면 조건으로 인해 차체 방향 전환이 불가능하며, 이에 따라 터널 내부에 별도의 방향전환소를 마련하여 장비의 전환 동작을 수행해야 했다. 그러나 이러한 방식은 추가적인 공간 확보와 구조물 설치가 요구되므로, 공정 복잡성 및 시공 비용을 증가시키는 원인이 된다.

기존 장비의 경우 단선 철도 터널 내에서 버럭 반출을 위해 별도의 방향전환소를 설치하고 이를 이용한 장비 전환 절차가 요구되었으며, 이 과정은 전체 사이클 타임의 약 10~15%를 추가적으로 소요하는 것으로 분석되었다. 반면, 본 연구에서 제안한 개발 장비는 버킷의 전·후 작동 기능을 통해 방향전환소 절차를 근본적으로 제거함으로써 전체 버럭 운반 사이클 타임을 약 15~20% 단축시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이는 결과적으로 초기 지보공 설치 지연을 최소화하고 터널 안정성 및 시공 생산성 향상에 기여할 수 있는 것으로 판단된다.



[그림 2] 개발 장비에 대한 3D 프린팅 설계 도면

3. 결론

본 연구에서는 협소 단면을 가진 단선 철도 터널의 버럭 반출 공정에서 발생하는 구조적 제약을 극복하기 위하여 3D 프린팅 기반 로더 장비를 개발하였다. 기존 휠로더 장비는 방향전환소 설치 절차에 의존해야 했으나, 제안된 개발 장비는 버킷의 전·후 작동 기능을 통해 이러한 절차를 근본적으로 제거하였다. 이에 따라 전체 버럭 운반 사이클 타임은 약 15~20% 단축되는 것으로 분석되었으며, 이는 지보공 설치 지연 최소화, 터널 안정성 확보, 작업 안전성 제고 및 시공 생산성 향상에 긍정적인 효과를 제공한다.

또한 3D 프린터를 활용한 모듈화·맞춤형 설계는 다양한 터널 단면 조건과 지반 특성에 신속히 대응할 수 있는 유연성을 제공하며, 장비 유지보수의 효율성을 높이는 장점이 있다. 따라서 본 연구의 결과는 향후 협소 터널 시공에서 효율적이고 안전한 버럭 반출 시스템 구축을 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 3D 프린팅 기반 건설 장비 설계의 적용 가능성을 실증적으로 제시한다는 점에서 의의가 있다.

감사의 글

이 성과는 강원도립대학교 신산업(스마트건설)사업단 산학공동기술개발과제의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- [1] 한국철도시설공단 (2012), 철도설계지침(노반편).
- [2] 한국철도시설공단 (2014), 동두천~연천 복선전철 건설공사 노반 실시설계보고서, pp. 1358~1422.
- [3] 김상철, 박주용, 박영준, 김동관, 정병률, 김준기, 김문수 및 강영석 (2015), 단선철도 터널의 합리적인 버럭처리방안 연구: 시공 중 터널재단 예방방안(1)