

# 물리적 처리 방법을 통한 철도 도상골재의 재활용 방안

## Recycling strategies for railway ballast through physical process



김용준 Yong-Jun Kim  
스탄텍 대표  
E-mail : kyj821020@hanmail.net

### 1. 서론

철도 도상골재의 재활용은 환경 보호와 자원의 효율적인 활용 측면에서 중요하다. 철도 산업에서 발생하는 도상골재는 재활용 골재로서 도로 및 다른 건설 프로젝트에서 사용될 수 있으며, 경축재나 경량 골재로 활용되어 구조물의 경량화를 도모할 수 있다. 또한, 이러한 골재는 조경자재로도 활용 가능하며, 환경 개선 및 미관 향상에 기여할 수 있다. 지속 가능한 환경을 위해, 철도 도상골재의 효율적인 수집, 분류, 품질 관리와 함께 지속적인 기술 개발 및 연구가 필요하며, 다양한 분야와 협력하여 이를 실현할 수 있는 방안을 모색해야 한다. 한편, 국내에서는 고속철도의 수요가 증가하면서 기존 자갈궤도를 콘크리트 궤도로 개량하는 필요가 증가하고 있다. 하지만, 기존 자갈궤도를 제거한 후 콘크리트 궤도 시공을 하는 것은 시간적 및 경제적으로 어려우며 이를 해결하는 방안으로 급속경화궤도 기술을 도입할 수 있다. 급속경화궤도 기술의 요약은 <그림 1>과 같다.

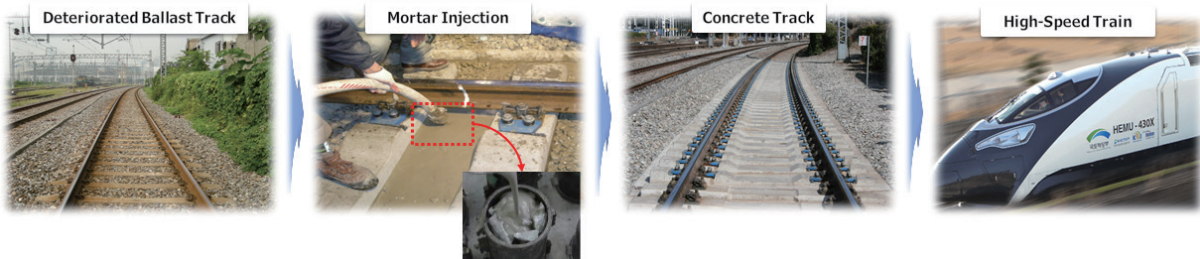


그림 1. 급속경화궤도 기술의 개요

급속경화궤도 기술은 도상골재에 충전 모르타르를 주입하여 골재입자 사이의 공극을 메워 기존의 자갈도상궤도를 콘크리트궤도로 개발하는 기술로서, 시공 2시간 후에 열차의 정상 운행이 가능하다. 하지만 도상골재와 충전 모르타르의 부착성능 저하로 인한 전이역(ITZ) 파괴 현상이 발생할 수 있다. 이러한 ITZ 파괴를 방지하기 위해서는 도상골재와 모르타르의 우수한 부착성능 확보가 필수적이다. 따라서, 모르타르를 주입하는 단계 전에 도상골재를 세척하는 공정이 필요하다. 도상골재의 세척 수준이 높을수록 콘크리트의 우수한 강도와 동결융해저항성을 포함한 내구성 향상이 가능한 것으로 보고 되었으며 현장용 도상골재 세척장비를 개발하기 전에 도상골재의 세척정도가 모르타르와 도상골재의 부착성능에 미치는 영향을 실험을 통해 간접적으로 확인하였다. 이 특집에서는 블라스팅 장비를 사용하여 자갈 궤도에서 회수한 폐 도상골재의 블라스팅 세기와 시간을 조절하여 다양한 세척 정도의 도상골재를 확보하였다. 이러한 도상골재의 세척정도에 따른 부착성능에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 평가 방법 및 기초 실험 결과

도상골재의 세척정도가 모르타르와 도상골재의 부착성능에 미치는 영향을 분석하였다. 기존 자갈궤도의 도상골재의 세척 정도에 따른 모르타르와 골재 계면의 부착성능을 확인하기 위해서 골재의 형상을 원형의 실린더로 제작하여, 형상에 영향을 배제한 골재와 충전모르타르의 부착성능을 분석하였다. 사용되는 충전모르타르와 도상골재의 압축강도, 탄성계수, 그리고 푸아송 비를 획득하기 위한 재료실험을 수행하고, 골재에 모르타르를 충전한 시험체에 압축 혹은 인장 하중을 가하여 골재와 충전모르타르의 부착성능을 비교하였다.

하중이 가해질 때 충전모르타르와 골재의 계면에 상태를 확인하기 위해 실험 진행 시 Charge Coupled Device(CCD) 카메라를 사용하여 영상을 촬영하고 Digital Image Correlation(DIC) 분석을 수행하였다. DIC 분석을 통해 시편 전체에 발생한 변형률 분포도를 통해 실험 시 발생하는 모르타르와 골재 계면

의 부착상태를 확인하였다.

충전모르타르와 골재의 부착 특성에 골재 표면의 오염도가 미치는 영향을 조사하기 위해서 골재의 형상을 직경 32 mm에 높이 50mm의 실린더 형상으로 제작하여 하나의 시편에 9개의 골재를 넣어 압축실험을 수행하였다. 먼저 오염도의 영향을 고려하기 이전에 모르타르의 양생 시간을 168시간으로 설정하여 실험을 수행하였다. 선행 연구 결과에 따르면 모르타르의 양생 시간이 증가할수록 골재의 하중 집중도가 감소하여 모든 골재에서 탈착이 발생하게 됨을 알 수 있었다.

골재의 무게비를 기준으로 표면 오염도를 유도하였고, 각각 무게비는 0%, 0.2%, 0.4% 그리고 0.6%까지 각각 0, 1, 2, 그리고 3 Lv 순이다. 골재의 오염도가 증가하게 되면 압축강도는 오염도가 골재 무게비의 0.4%일 때 급격하게 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 모르타르와 골재의 부착면에 오염도가 증가하게 되었을 때, 부착면에서 발생하는 변형률이 증가하였고 특히 3 Lv([표 1] 참고)에서 시험체가 최대하중에 노출될 때 골재의 탈착과 모르타르의 균열이 심각하게 발생하였다. 그뿐만 아니라, 골재의 오염도가 증가할 경우, 인장강도는 오염도가 골재의 무게비 0.6%일 때, 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. 0, 0.2, 0.4%의 오염도에서 균열의 진전은 시험체의 측면에서 균열이 발생하여 골재의 면을 따라 진전되었으나, 0.6%의 균열진전은 균열의 진전이 측면뿐 아니라 부착면에서도 발생하여 강도가 현저히 감소되었다.

그러므로 골재의 오염도가 있는 상황에서 충전모르타르를 바로 주입하게 될 경우, 강도의 감소뿐만 아니라, 동일 하중 하에서 부등침하 혹은 계면의 파괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.

## 3. 주요 실험 결과

[표 1]은 골재의 표면 오염도에 따른 압축실험의 결과를 보여준다. 모든 시리즈는 6개의 시험체가 제작되어 실험되었고 그 중 최대하중 이전에 표면의 불균일 형상의 손상을 입은 시험체를 제외하고 최소 5개 이상의 실험 결과를 통해 평균을

[표 1] 표면오염도별 압축시험 결과

오염도	시험체	압축강도(MPa)	최대변형률
0 Lv	SP2	46.62	0.005557
	SP3	47.79	0.006052
	SP4	45.17	0.005910
	SP5	46.38	0.006974
	SP6	45.20	0.006760
	<b>Average</b>	<b>46.24</b>	<b>0.006250</b>
1 Lv	SP1	47.56	0.006716
	SP2	46.03	0.006700
	SP3	45.75	0.005946
	SP4	46.62	0.006461
	SP5	43.42	0.005554
	SP6	43.91	0.006346
<b>Average</b>	<b>45.17</b>	<b>0.006201</b>	
2 Lv	SP2	37.98	0.005462
	SP3	37.32	0.005166
	SP4	39.24	0.005997
	SP5	40.42	0.007001
	SP6	39.79	0.006718
	<b>Average</b>	<b>38.95</b>	<b>0.006069</b>
3 Lv	SP2	34.30	0.007008
	SP3	39.00	0.005144
	SP4	39.32	0.008945
	SP5	37.87	0.008231
	SP6	40.10	0.008532
	<b>Average</b>	<b>38.12</b>	<b>0.007572</b>

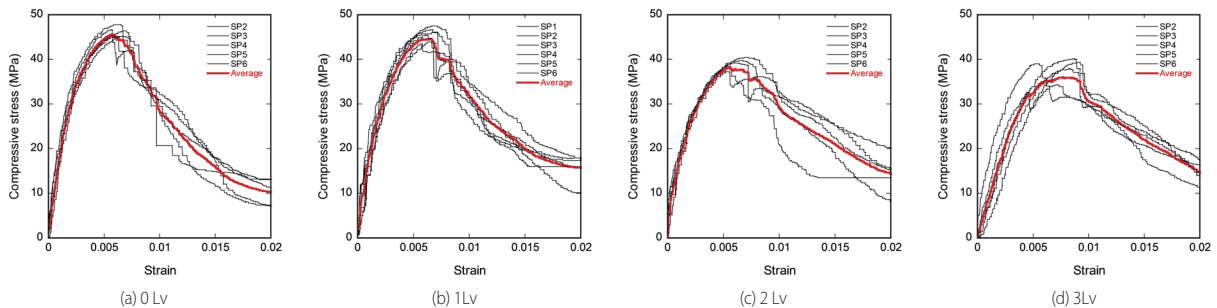


그림 2. 골재 표면오염도별 콘크리트 압축 응력-변형률 곡선

산출하였다. 모르타르의 양생일은 모두 168시간(7일)에 실험이 수행되었다.

〈그림 2〉에 골재표면 오염도별 응력-변형률 곡선을 시리즈

별로 정리하였다. 각 시험체의 응력-변형률 곡선에서 일정 변형률에서 발생한 응력 값을 평균하여 평균 선도를 산출할 수 있었다. 〈그림 3〉은 평균 압축강도와 평균 최대변형률을 골재

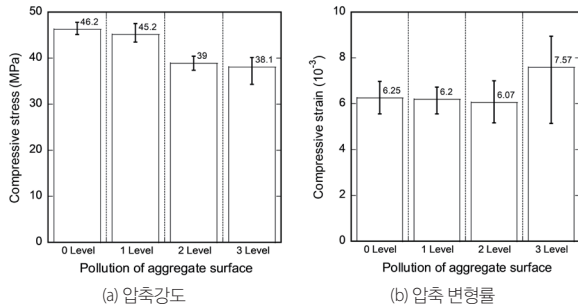


그림 3. 골재 표면 오염도에 따른 콘크리트 압축강도 및 변형률

오염도별로 보여준다. <그림 3(a)>를 보면, 골재표면의 오염도 변화가 압축강도에 미치는 영향을 알 수 있다. 골재의 오염도가 1Lv (무게비 0.2%)에서는 2%의 감소율을 보여주지만, 2Lv (무게비 0.4%)이 되면서 압축강도는 약 15% 감소했다. 반면에 <그림 3(b)>를 보면, 압축강도 하에서의 변형률인 최대 변형률은 0~2Lv까지 큰 변화를 보여주지 않았으나, 3Lv에 도달하면서 변형률이 0Lv에 비해 0.00132만큼 증가하였다.

<그림 4~7>은 골재표면 오염도별로 각각의 시험체에 최

고 하중이 가해질 때의 횡방향 변형률 분포도를 나타낸다. 양생 시간에 대한 실험과 동일하게 주요 파괴는 모르타르와 골재의 부착면에서 발생하였다. 골재의 표면 오염도가 증가하더라도 일부 시험체를 제외하고 골재의 탈착은 일부 구역에서 집중되기보단 균형적으로 모든 골재의 탈착이 발생함을 볼 수 있었다. 하지만, 모르타르와 골재의 부착면에 오염도가 증가하게 되었을 때, 부착면에서 발생하는 변형률이 증가한 것을 볼 수 있었다. 특히 3Lv에서 시험체가 최대하중을 경험할 때 골재의 탈착과 모르타르의 균열이 심각하게 발생한 것을 볼 수 있었다. 이는 골재표면에 묻은 오염도로 인해 모르타르와 골재의 부착이 감소했을 뿐만 아니라 골재표면의 오염도가 모르타르의 공극을 유발하여 응력집중을 발생시켜 낮은 강도에서 균열 발생시켰기 때문이다.

그러므로 콘크리트 궤도는 급속경화궤도의 주요 시스템인 데 도상골재와 충전모르타르 사이에서 표면 오염도가 높으면 기계적 특성의 감소뿐만 아니라 사용 중 궤도의 부동침하 혹은 콘크리트 ITZ의 파괴가 발생할 수 있다고 판단하였다.

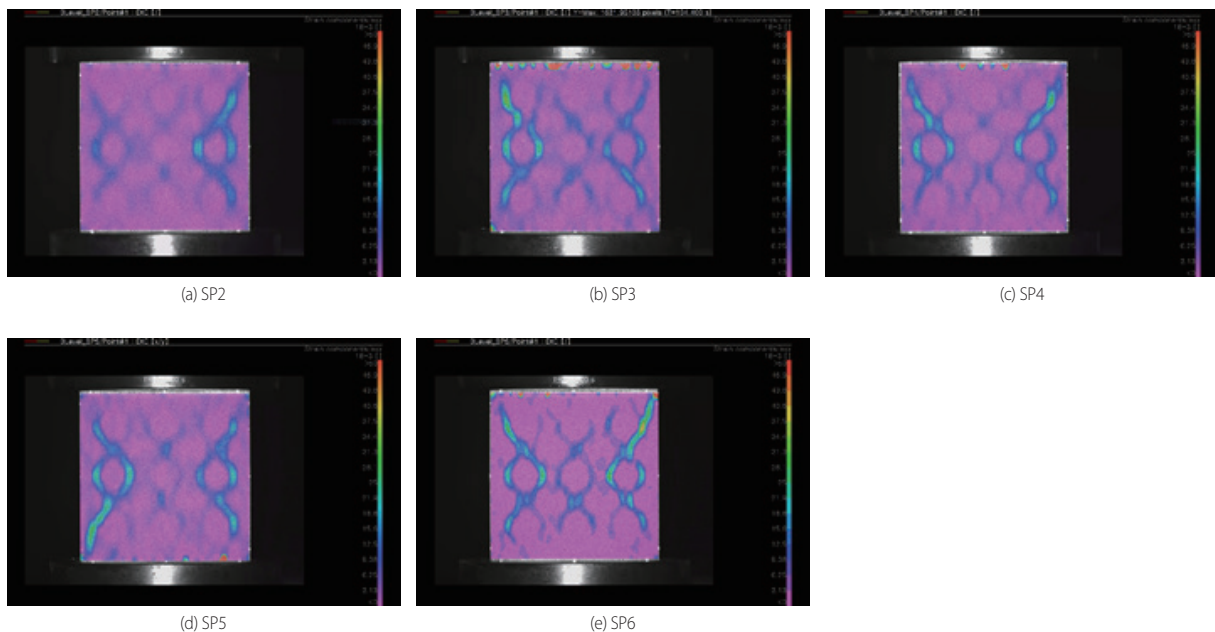


그림 4. 오염도 0Lv의 최고 하중 시 횡방향 변형률 분포도

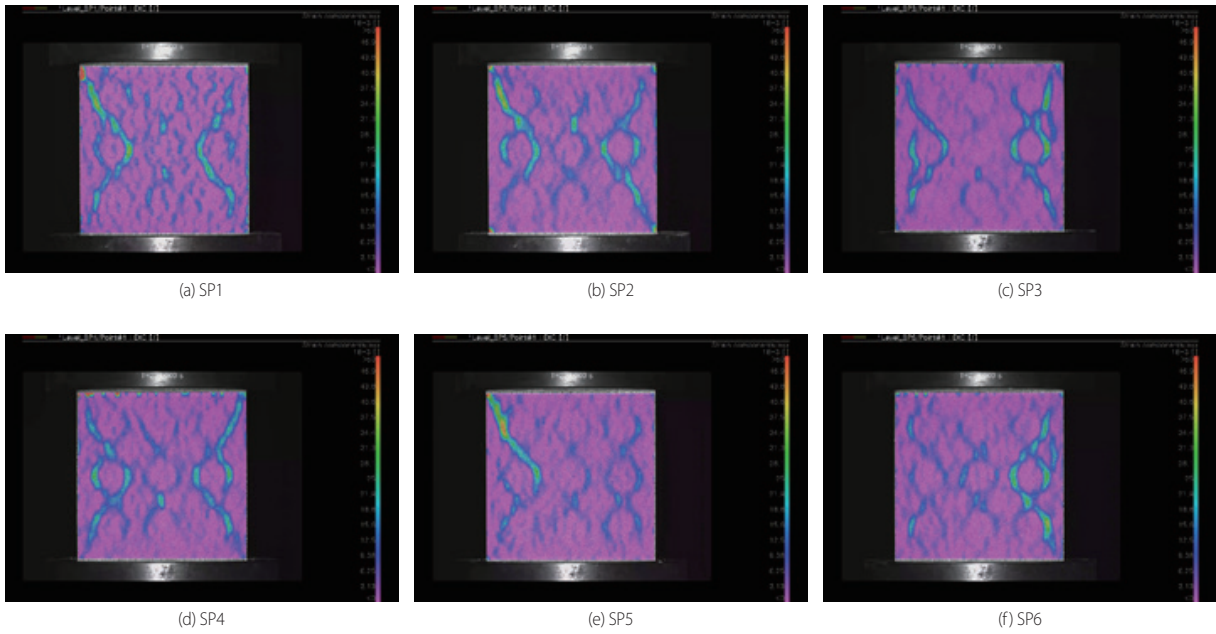


그림 5. 오염도 1Lv의 최고 하중 시 횡방향 변형률 분포도

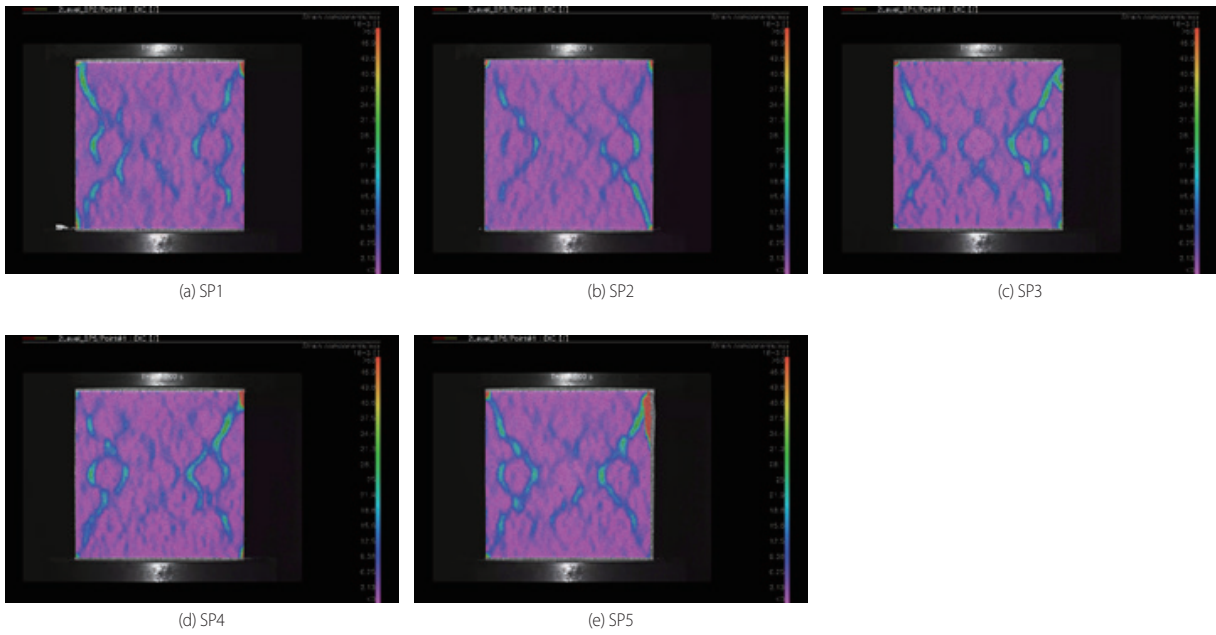


그림 6. 오염도 2Lv의 최고 하중 시 횡방향 변형률 분포도



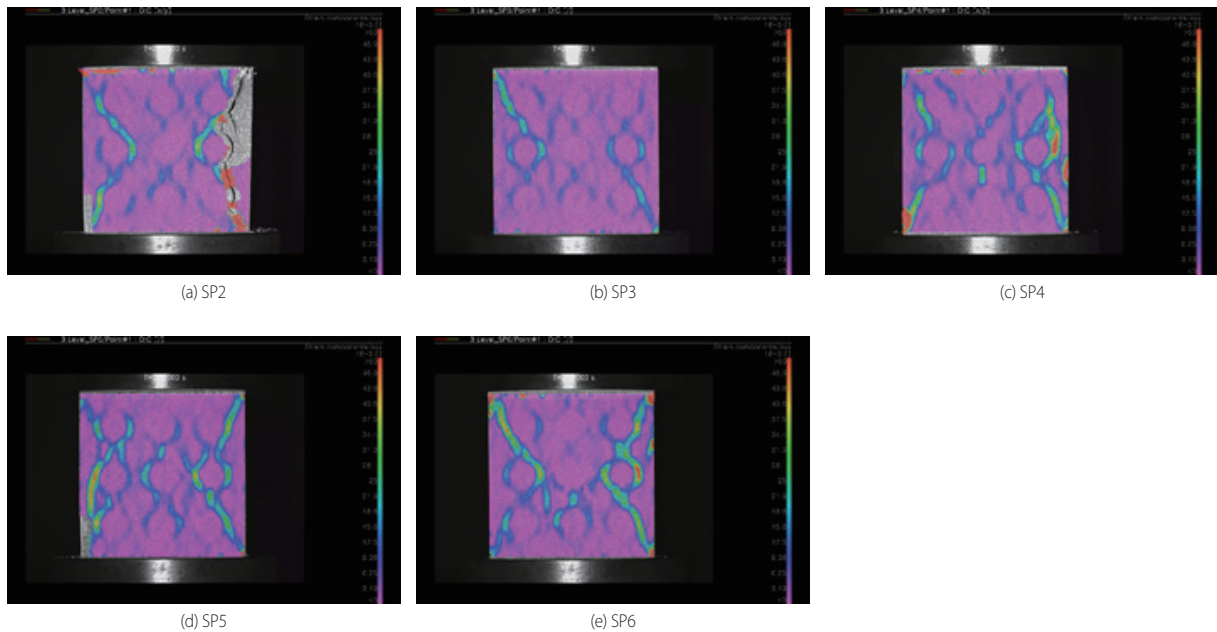


그림 7. 오염도 3Lv의 최고 하중 시 횡방향 변형률 분포도

#### 4. 결론

본 시험을 통해 골재의 오염도가 증가하게 될 경우, 압축강도는 오염도가 골재 무게비의 0.4%일 때 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 모르타르와 골재의 부착면에 오염도가 증가하게 되었을 때, 부착면에서 발생하는 변형률이 증가하였고, 특히 3Lv에서 시험체가 최대하중을 경험할 때 골재의 탈락과 모르타르의 균열이 심각하게 발생하였다.

또한, 골재의 오염도가 증가할 경우, 인장강도는 오염도가 골재의 무게비 0.6%일 때, 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. 0, 0.2, 그리고 0.4%의 오염도에서 균열의 진전은 시험체의 측면에서 균열이 발생하여 골재의 면을 따라 진전되었으나, 0.6%의 균열진전은 균열의 진전이 측면뿐 아니라 부착면에서도 발생하여 강도가 현저히 감소했다. 그러므로 골재의 오염도가 있는 상황에서 충전모르타르를 바로 주입하면, 강도의 감소뿐만 아니라, 동일 하중 하에서 부동침하 혹은 계면의 파괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.

국내 자갈궤도를 콘크리트 궤도로 개량하는 수요가 증가할 것으로 판단된다. 따라서, 궤도 콘크리트의 장기적인 내구성 확보를 위해서는 물리적 표면 처리를 통해 도상골재의 세척정도를 일정 수준 확보하는 것이 매우 중요하다. 본 기초 실험 결과를 토대로 실제 궤도에서 사용되는 현장용 골재 세척 장비를 개발하였으며 향후 현장 시험 적용을 통해 장비의 성능을 검증하고 개선할 계획이다.

담당 편집위원 : 권성우(한경국립대학교)