

# 인도네시아 아체도로 현장의 방사선 밀도측정기를 이용한 현장다짐시험 적용사례

글 김기철 / 해외토목부 사원 / 전화 02-3433-7787 / E-mail kcms00@ssyenc.com

## 1. 서언



[그림 1] 인도네시아 아체도로 전경(STA.128km)

당 현장은 2004년 12월 26일 인도네시아 수마트라섬 부근 인도양에서 규모 9.0의 강진을 동반한 지진해일인 쓰나미에 의해 피해를 입었던 북서부 아체 주(州)의 도로 신설 및 복구공사로서, 총 연장 104km를 현지 업체인 후타마 까리아(Hutama Karya)와 J/V(Joint Venture)로 수주하였으며, 지난 9월 공사를 완료하였다.

본 공사는 미국 국제개발처(USAID, U.S. Agency for International Development)에 의해 입찰 및 계약이 진행되었으며, 당사는 주시공사로 약 41km의 연장을 도맡아 본 프로젝트의 중추적 임무를 수행하였다.

본고에서는 당 현장 공사 수행시 사용되었던 방사선 밀도측정기(Nuclear Densitometer)에 대하여 소개하고자 한다.

## 2. 공사 개요

- 1) 공사명 : Aceh Road/Bridge Reconstruction & Rehabilitation Project
- 2) 공사위치 : 인도네시아 수마트라섬 북서부 아체 주 (Banda Aceh ~ Calang)
- 3) 발주처 : 미국 국제개발처
- 4) 공사기간 : 2007년 6월 ~ 2011년 12월(54개월)
- 5) 공사금액 : 약 1,148억(당사 지분 63.8%, 약 730억)
- 6) 공사내용 : 총 연장 41.7km 아스팔트 포장도로(2차선), 토공 2,500천m<sup>3</sup>, 교량 9개소, 배수관·암거 82개소, 아스콘 86천m<sup>3</sup>

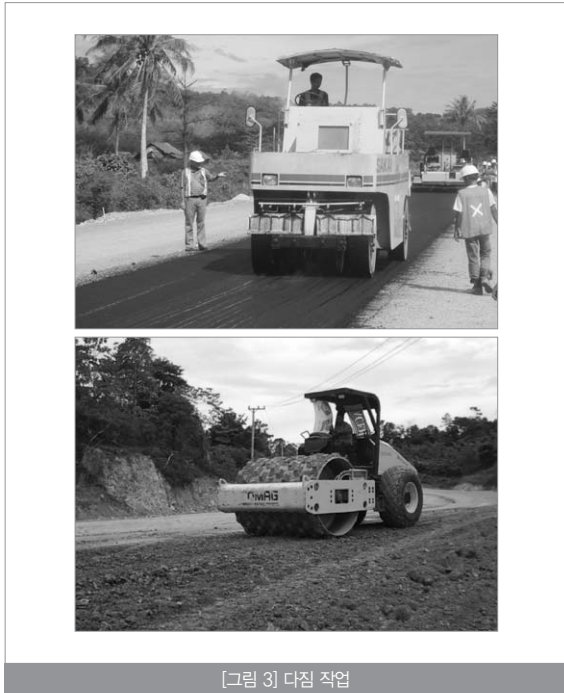


[그림 2] 인도네시아 아체도로 전경(STA.151km)

### 3. 개요

당 현장은 총 연장이 약 41.7km인 점을 고려, 신속한 측정과 공사수행 능력을 향상시킬 목적으로 현장 다짐시험 시 일반적으로 사용되는 모래치환법(Sand Cone Method) 대신 방사선 밀도측정기를 이용하였다.

#### 3-1. 다짐시험의 목적



흙의 다짐은 기술적으로 해당 지반의 밀도를 증가시키는 방법으로 정의된다. 건설현장에서 이러한 다짐은 공사수행에 있어 상당히 중요한 부분이며, 만약 다짐이 부적절하게 시행된다면, 침하로 인한 상부 구조물의 영향 등 막대한 피해를 초래하게 된다. 따라서 모든 건설현장에서는 다짐의 적정성 확인을 위한 여러 가지 다짐 방법을 이용한다.

지반은 다져서 공학적 특성을 개량할 수 있으며, 지반의 다짐은 정적이나 동적인 방법으로 흙 속의 공기량을 감소시키고 흙 입자 간의 간격을 근접시켜서 흙의 건조단위 중량을 증가시키는 작업을 말한다. 다짐작업으로 인해 강도의 증가, 압축특성의 개선(과도한 침하방지 및 침하감소), 지반의 지지력 증가, 투수성의 저하(입자의 간격이 작아짐), 지반의 부피변화 억제(이미 최적화가 됨), 동상 방지 등의 효과를 기대할 수 있다. 다짐은 다짐 에너지와 지반

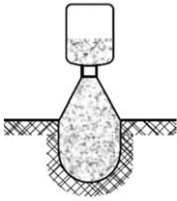
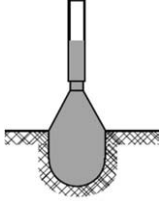
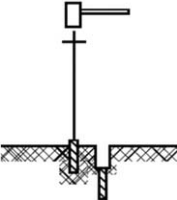
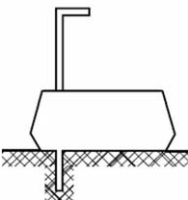
의 입도 분포 및 함수비의 영향을 받는다. 또한, 다짐의 효과는 건조단위중량( $\gamma_d$ )으로 확인한다. 다짐시험은 에너지를 가하여 최대 건조단위중량과 이때의 최적 함수비를 구하는 시험이다.



#### 3-2. 현장 다짐시험의 종류 및 특징

현장 다짐시험이란 도로의 노상, 노반 또는 흙, 구조물 등의 다짐 정도를 나타내는 단위중량을 현장에서 직접 측정하기 위한 시험이다. 흙의 단위중량은 흙의 단위 체적당 중량을 말하며, 흙 입자에 포함되어 있는 물과의 양자를 고려한 경우를 습윤단위중량, 흙 입자만을 고려한 경우를 건조단위중량이라 한다. 현장 다짐시험의 대표적인 시험방법으로는 모래치환법, 고무막법(물치환법, 기름치환법) 및 방사선 밀도측정기에 의한 방법 등이 있다.

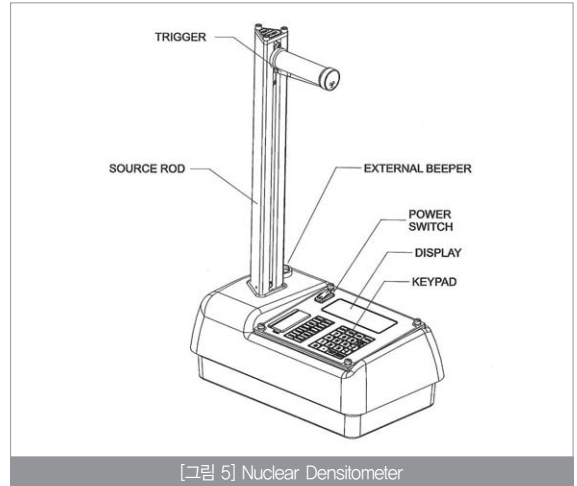
표 1 현장 다짐시험 비교

	Sand Cone	Balloon Densimeter
형상		
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다량 샘플채취 가능</li> <li>• 정확성</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다량 샘플채취 가능</li> <li>• 측정값 직시 가능</li> <li>• 개립도 재로</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 많은 시험절차</li> <li>• 측정 시간 소요</li> <li>• 측정관의 오류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 측정 시간 소요</li> <li>• 고무막의 손상</li> <li>• 취급의 어려움</li> </ul>
오류 요인	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 모래 팽윤 현상</li> <li>• 흙의 체적 변화</li> <li>• 공극 및 다짐 모래</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 재료의 체적 변화</li> <li>• 공극</li> </ul>
비용	• 낮음	• 보통
	Shelby Tube	Nuclear Densitometer
형상		
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 빠른 측정 시간</li> <li>• 심도부 측정 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 빠른 측정 시간</li> <li>• 재측정 용이</li> <li>• 통계상 신뢰도</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 소량의 샘플 채취</li> <li>• 굵은 골재 채취 불가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방사능</li> <li>• 샘플 없음</li> </ul>
오류 요인	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하부지반 암석</li> <li>• 소성토양</li> <li>• 초과 천공</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibration</li> <li>• 하부지반 암석</li> <li>• 후방산란</li> </ul>
비용	• 보통	• 높음

## 4. Nuclear Densitometer

### 4-1. 특징

방사선 밀도측정기를 이용한 다짐시험은 보링공의 자연방사능 또는 인공방사선원에 의한 방사능을 측정함으로써 토질을 조사하는 방법이다. 이 방법은 측정시간이 빠르고, 정확한 다짐도와 함수율을 도출할 수 있으며, 측정방법으로는 방사성 동위원소인 Cesium-137(세슘(Cs)의 동위원소인 하나, 질량수 137)을 사용한 후방산란방식(Backscatter)과 직접전파방식(Direct

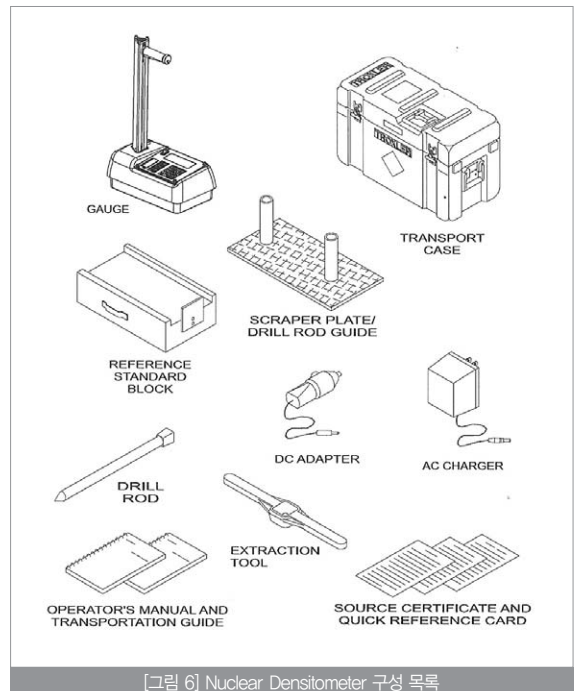


[그림 5] Nuclear Densitometer

Transmission)이 있다.

방사선 밀도측정기의 원리는 측정기에 내재되어 있는 방사성 동위원소의 일종인 감마선(Gamma Rays)이라고 불리는 광자(Photons)를 투사함으로써 해당 지반의 다짐도 및 함수율 등의 값을 획득하는 것이다. 이 때, 다짐이 양호한 지반은 다짐이 불충분한 지반에 비해 더 많은 방사능을 흡수하게 되며, 이 값을 기초로 해당 지반의 다짐도 및 함수율을 단 시간 내에 산출하게 된다.

### 4-2. 구성



[그림 6] Nuclear Densitometer 구성 목록

표 2 각 자재별 용도

자재명	설명
측정기(Gauge)	모든 전기적 모들을 포함하는 휴대용 장비로서 탐지기(Detector)와 방사성 동위 원소(Radionactive Sources)를 포함하고 있다.
표준시험블록	표준 측정 수치를 제공하며, 시험 전 측정기의 하부에 설치함으로써 장비의 교정에도 사용된다.
시추봉(Drill Rod)	직접전파법시 천공을 위해 사용된다.
스크레이퍼 플레이트	직접전파법시 천공을 위한 보조역할과 현장에서 시험 준비용으로 사용된다.
추출기(Extract.Tool)	지반에 삽입된 시추봉 제거시 사용된다.
충전기 및 아답터	배터리 충전기와 접속소켓으로 구성된다.
운송함(Trans. Case)	본 장비를 이동할 시에는 항상 운송함을 사용하여야 한다.

### 4-3. 시험 방법

- 1) 배터리를 확인한다.
- 2) 측정하기 약 10분 전에 전원을 가동시켜 탐지기(Detector) 및 조율장치를 안정화시킨다.
- 3) 시추봉을 사용하여 천공을 한다. 흠은 지반에서 약 30cm 정도



의 깊이까지 천공한다.

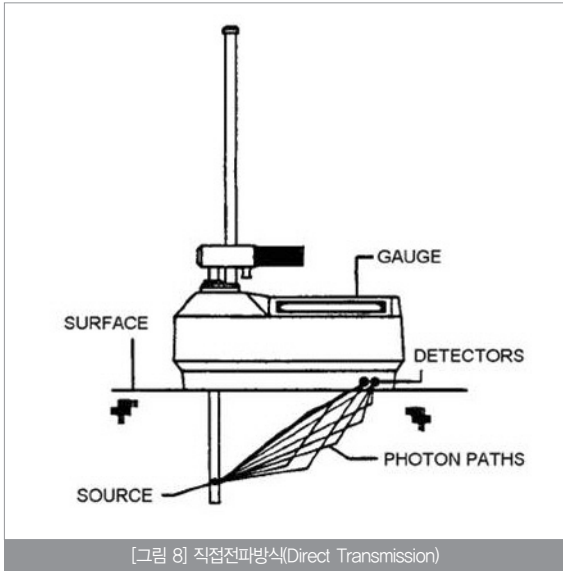
- 4) 측정기 하부를 깨끗이 하고, 사전에 천공한 평탄한 장소에 장치를 위치시킨다.
- 5) 계측봉(Source Rod)에 부착되어있는 손잡이를 가볍게 잡고, 잠금 장치가 걸릴 때까지 홀 속으로 천천히 밀어준다.
- 6) 'START' 버튼을 누르면, 측정기 내에 내재되어 있는 방사성 동위원소가 광자를 측정기 밑에 있는 탐지기(Detector)에 분출하면서 측정을 시작한다. 측정이 시작되면, 안전을 위하여 검사자는 장치에서 최소 3m 이상 떨어져 위치하여야 하며, 최소 10m 이내에는 다른 방사능 밀도측정기 사용을 금지시킨다.
- 7) 가동 후, 약 3~4분 뒤에 결과를 도출해낸다.
- 8) 전자 계기판을 확인하여 측정된 밀도값 및 함수율을 기입, 저장한다.

### 4-4. 측정 원리

#### 1) 밀도(Density)

방사능 밀도측정기는 직접전파방식과 후방산란방식의 두 가지 작동방식이 있다.

- ① 직접전파방식(Direct Transmission) : 계측봉(Source Rod)을 사전에 천공된 깊이만큼 관입시킨 다음 장치를 작동시키면 계측봉에 내재되어 있는 Cesium-137 광자(Photons)를 발산시켜 시험지반을 통과한다. 지반을 통과하는 동안 광자는 전자와 충돌하고 에너지를 잃게 되며, 지반의 밀도가 높으면 이러한 광자 충돌 확률이 증가한다. 이는 측정기 하부에 있는 탐지기에 도달하는 광자의 수를 감소시키며, 탐지기에 도달하는 광자의 수는 지반의 다짐도에 반비례하는 것을 알 수 있다(지반의 밀도가 높을수록 탐지기에 도달하는 광자의 수는 줄어듬). 결국 이렇게 얻어진 탐지기 수치는 탐지기의 소프트웨어에 의해 밀도값으로 전환된다.
- ② 후방산란방식(Backscatter) : 계측봉(Source Rod)을 Safe Position 밑에 있는 Backscatter Position에 위치시키면 계측봉(Source Rod) 하부는 지표면 위에 위치하게 되고, 계측봉 내 광자(Photons)는 탐지기와 동일한 높이에 위치하게 된다. 광자와 탐지기 사이의 보호장치(Shielding)는 광자로부터 직경로에 있는 탐지기에 도달하는 많은 광자를 감소시키므로, Cesium-137에서 발산된 광자는 반드시 시험지반을 지나서 통과되어야 하며, 탐지기에 도달할 때까지 적어도 한 번은 흠을 어지거나 반사되어야 한다. 마지막으로 탐지기는 이렇게 흠어진 광자를 측정하여 밀도값으로 전환한다.



측정기는 열중성자화된, 혹은 '느린' 중성자에 민감하게 반응하는 Helium-3 탐지기를 포함하고 있다. 결과적으로, 함수율은 지반 내 수소의 양에 직접적으로 관련되며, 측정기 소프트웨어는 Helium-3 탐지기 수치를 수분 수치로 전환시킨다(Helium-3 탐지기는 Am-241:Be와 같은 면에 있어야 함을 주의해야하므로 함수율 측정은 앞에서 언급된 후방산란 방식에서 시행되는 밀도 측정과 비슷함).

측정 깊이는 측정되는 지반의 표면 아래 최대 깊이로 정의되며, 측정기에 의해 측정된 중성자의 98%는 측정된 깊이보다 더 깊게 침투하지 않을 것이다. 측정 깊이는 함수율의 함수로 계산되며, 다음 방식은 개략적인 측정 깊이를 결정하는데 사용될 수 있다.

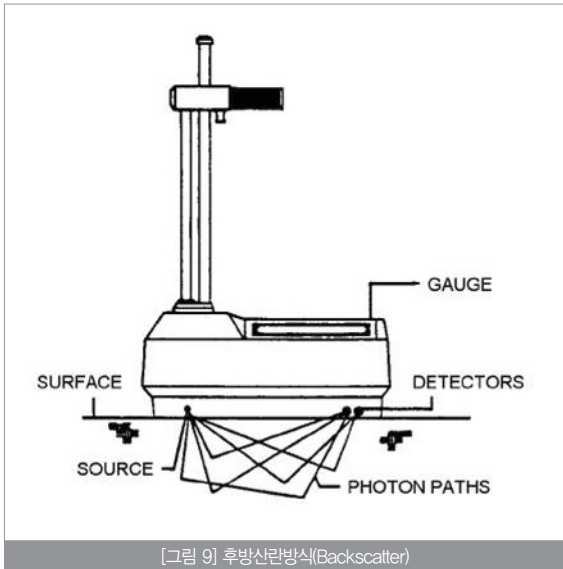
$$Depth(inches) = 11 - (0.17 \times M),$$

$$where : M = moisture in pcf$$

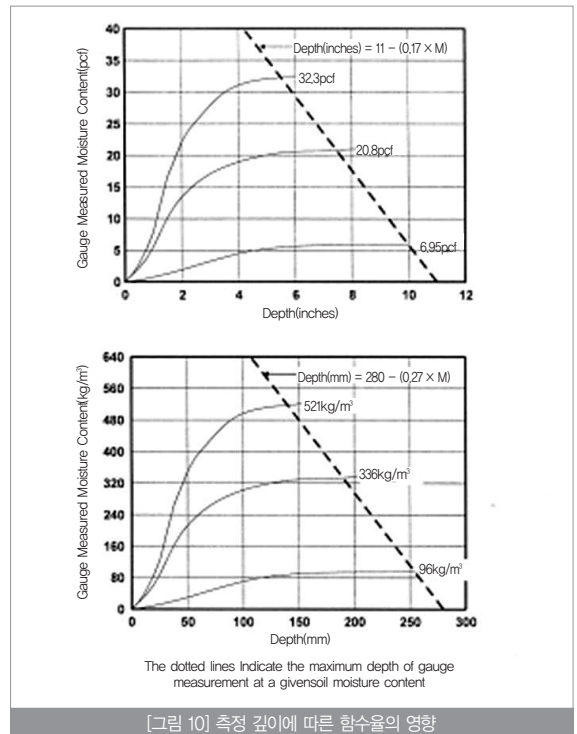
또는

$$Depth(mm) = 280 - (0.27 \times M),$$

$$where : M = moisture in kg/m^3$$



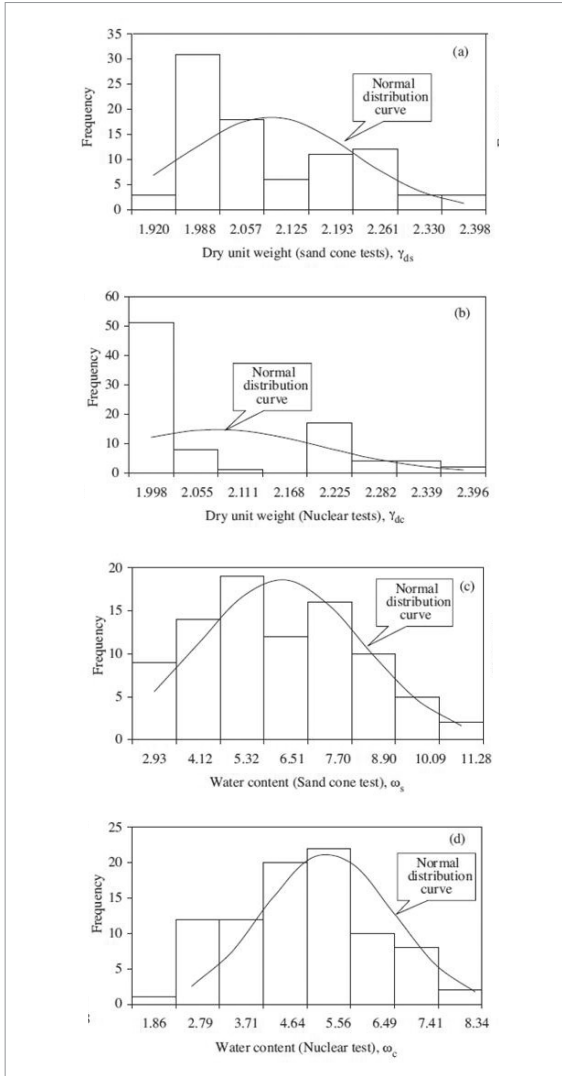
아래의 [그림 10]은 측정 깊이에 따른 함수율의 영향을 설명해주는 그래프이다.



## 2) 함수율(Moisture Content)

측정기는 지반의 함수율을 산출하기 위해, 열중성자화(Neutron Thermalization)의 원리를 이용한다. 측정기 내에는 Americium-241:beryllium(Am-241:Be)이 있으며, Am-241:Be에 뿜어진 빠른 중성자는 시험지반을 통과하게 된다. 빠른 중성자들과 비슷한 크기의 덩어리(수소 원자핵과 같은)간의 많은 충돌은 수소나 다른 물질의 충돌이 중성자 에너지의 감소를 지속시키지 않는 지점까지 중성자를 느리게 하는 원인이 되는데, 이러한 중성자들은 열중성자화되었다고 한다.

## 5. 맺음말



[그림 11] 각 시험법 밀도값 및 함수율의 분포

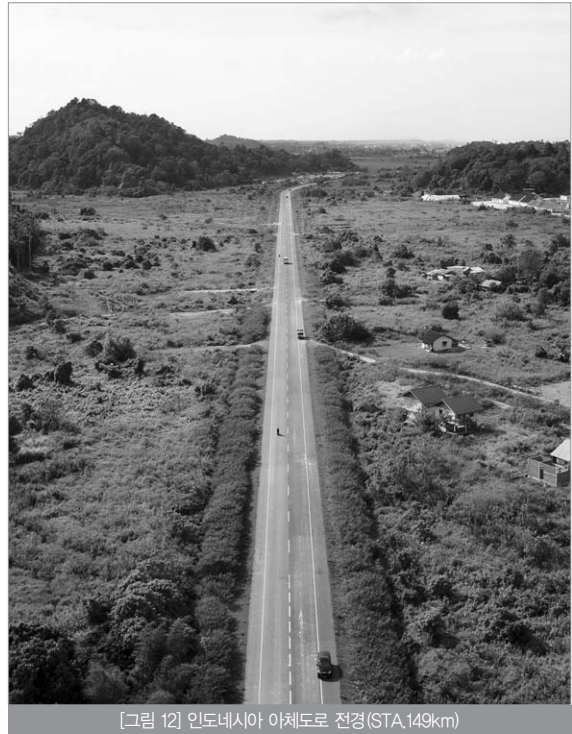
[그림 11]에서 나타난 그래프는 여러 현장다짐 방법들을 비교, 분석한 연구결과의 분석표이다. 이를 비롯하여 현장다짐 시험방법의 정밀도와 불확실성을 확인하고자 하는 연구는 수십 년 전부터 지속되어 왔다. 대부분의 연구 결과에서 방사선법은 일반적으로 모래치환법 등 다른 방법보다 정확성에서 떨어진다는 결론이 많이 나왔다. 하지만 각각의 방법들은 나름대로의 장점과 단점을 가지고 있기 때문에 한 가지 방법이 다른 방법보다 정확하다고 믿을 필요는 없다고 판단된다.

미국재료시험협회(ASTM, American Society for Testing and

Materials)에서는 '흙 및 토양입단의 밀도 측정시, 절대값을 제시해주는 시험방법은 없다', '정확성은 능숙한 검·조정의 실행과 시험 각 단계에서의 숙련성 및 시험되어지는 재료의 변동성 등에 대한 작용이다' 라고 밝힌 바 있다.

마지막으로 열악한 현지조건, 엄격한 품질관리 속에서 한정된 공사기간 내 약 2,500천 $m^3$ 의 성토량을 소화해내는 것은 결코 쉬운 일이 아니었다. 하지만 좀 더 효율적이고, 신속한 공사수행을 위해 전 직원이 뜻을 모아 헌신적으로 노력한 끝에 공사를 성공적으로 마칠 수 있었다.

본 공사를 통해 인도네시아에서 이미 11개의 토목 프로젝트를 성공적으로 수행해왔던 당사의 입지를 더욱 견고히 할 수 있었으며, 세계 속에 쌍용건설의 명성을 다시 한 번 알릴 수 있는 계기가 되었다고 자부하며, 본 원고를 마치고자 한다. **SS**



[그림 12] 인도네시아 아체도로 전경(STA,149km)