

## 탄성파를 이용한 철도노반의 다짐관리 방안

# A Compaction Control Procedure of Railway Trackbed Fills Using Elastic Waves

박철수<sup>1)</sup>, Chul-Soo Park, 박인범<sup>2)</sup>, In-Beom Park, 오상훈<sup>2)</sup>, Sang-Hoon Oh, 김학성<sup>2)</sup>, Hak-Sung Kim, 목영진<sup>3)</sup>, Young-Jin Mok

1) 한국철도기술연구원 철도구조연구실 박사후 연구원, Post-Doctoral Researcher, Railroad Structure Research Department, Korea Railroad Research Institute

2) 경희대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyunghee University

3) 경희대학교 토목건축대학 교수, Professor, College of Architecture and Civil Engineering, Kyunghee University

**SYNOPSIS** : The quality of track-bed fills of railways has been controlled by field measurements of density ( $\gamma_d$ ) and the results of plate-load tests. The control measures are compatible with the design procedures whose design parameter is  $k_{30}$  for both ordinary-speed railways and high-speed railways. However, one of fatal flaws of the design procedures is that there are no simple laboratory measurement procedures for the design parameters ( $k_{30}$  or,  $E_{v2}$  and  $E_{v2}/E_{v1}$ ) in design stage. A new quality control procedure, in parallel with the advent of the new design procedure, is being proposed. This procedure is based upon P-wave velocity involving consistently the evaluation of design parameters in design stage and the field measurements during construction. The key concept of the procedure is that the target value for field compaction control is the P -wave velocity determined at OMC using modified compaction test, and direct-arrival method is used for the field measurements during construction. The procedure was verified at a test site and the p-wave velocity turned out to be an excellent control measure. The specifications for the control also include field compaction water content of  $OMC \pm 2\%$  as well as the p-wave velocity.

**Keywords** : railway track-bed, quality control, P-wave velocity, compaction test, direct-arrival method

## 1. 서론

일반적으로 성토 노반에 대한 품질관리는 다짐도(relative compaction)나 지반반력(soil reaction)을 기준으로 관리하고 있다. 국내 철도노반의 경우 일반철도는 평판재하시험(KS F 2310)의 지반반력계수  $k_{30}$ 을 품질관리 기준으로 사용하여 상·하부 노반에 적용하고 있으며, 하부노반에 비해 상부노반의 기준이 높다(철도설계기준 노반편, 2004). 고속철도공사 전문시방서 노반편(2006)에서는 일반철도 기준보다 엄격하게 고속철도 노반을 관리하고 있으며, 강화노반층의 입도에 따라 보조도상층과 입도조정층으로 구분하여 관리하고 있다. 상부노반의 최대입경 기준은 100mm로 일반철도 25mm보다 4배 이상이다. 또한 일반철도와 달리 하부노반의 최대입경을 300mm로 제한하여 하부노반부터 입경에 대한 품질관리를 시행하고 있다. 현재 고속철도의 노반 품질관리는 유럽 등에서 많이 사용하고 있는 반복평판재하시험(DIN 18 134)으로 획득한 변형계수  $E_{v2}$ 와  $E_{v2}/E_{v1}$ 을 기준으로 적용하고 있다. 일반철도에 비해

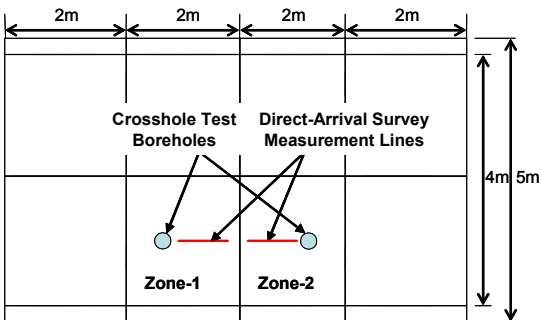
좀 더 합리적인 방법을 사용하고 있지만 시험시 재하시간을 충분히 줘야 하고 정확한 변위 등을 획득해야 하는 까다로움이 있다. 일반철도와 고속철도의 상·하부 노반은 평판재하시험의 결과와 더불어 다짐도가 최소 90-100% 이상 되도록 다짐시험(KS F 2312), 들밀도시험(KS F 2311)을 통해 밀도 관리를 병행하고 있다.

가장 일반적인 다짐 성토 노반의 품질관리 기법은 다짐에 의한 성토체의 밀도 또는 다짐도를 관리하는 것이다. 현장의 건조 밀도를 결정하기 위한 들밀도 시험의 결과는 정확도 측면에서 신뢰성이 매우 떨어지고 고속철도 노반의 암버력과 같이 입경이 큰 재료에 대해서는 시험이 불가능 하다. 현재 성토 노반의 품질관리에 적용하고 있는 평판재하시험은 암버력-토사노반과 같이 고속철도 노반에 주로 사용되는 재료에 대해서 적용이 불가능 하다. 또한 역학적 개념의 탄성계수가 아닌 노체의 강도 특성에 초점을 두어 노반의 공용하중 상태의 변형특성을 반영하는데 한계가 있다. 노반이 경험하는 하중 범위에서는 강도 특성보다 탄성계수와 직접적으로 관련이 있는 강성도 특성이 노반 전체의 거동에 매우 큰 영향을 끼친다. 현장에서 반복 평판재하시험을 통해 변형계수( $E_{v2}$ )를 추정할 수 도 있지만 소요시간이 오래 걸리고 정확도가 떨어지며 높은 시험 숙련도를 필요로 하여 현장에서 다짐관리 기법으로 적용하기 어렵다. 따라서 시공성을 고려하여 신속하고 효율적인, 그리고 노반의 역학적 거동에 합당한 평가방법을 도입하여 다짐 성토 노반의 품질관리에 적용할 수 있는 새로운 품질관리 기법 및 방안이 절실히 필요하였다.

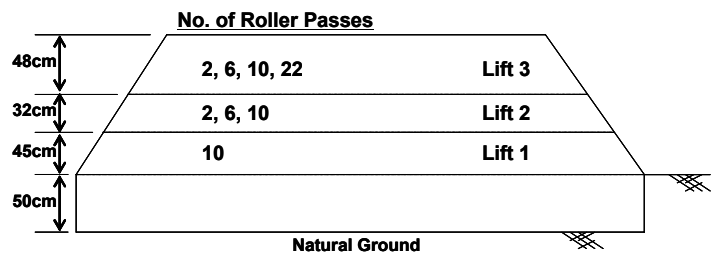
박철수 등(2008)은 예비시험을 통해 계측이 간편하고 결과의 신뢰성이 높은 P-파 속도를 품질관리 인자로 제안하였다. 탄성계수와 밀접한 관련이 있는 P-파 속도는 역학적 설계에 필요한 회복탄성계수를 결정하는데 사용된다. 따라서 제시된 품질관리 지표(P-파 속도)를 적용하여 설계로부터 품질관리까지 전 과정을 일관성 있는 잣대로 수행할 수 있다. 본 연구에서는 다짐 시험성토 부지를 조성하고, 현장 및 실내에서 동적 시험을 수행하여 평가된 시험결과를 토대로 다짐에 의한 노반의 역학적 특성을 규명하고 구체적인 품질관리 방안을 정립하고자 한다.

## 2. 다짐 시험성토 부지 개요 및 시험 계획

예비시험의 결과를 바탕으로 본 연구에서는 실제 시험성토를 하여 현장에서 직접도달파 기법을 통해 P-파를 계측하였고, 그 결과를 성토 재료에 대한 실내 P-파 계측을 통해 결정된 품질관리 기준(OMC에서의 P-파 속도)과 비교해 보았다. 또한 성토 깊이에 대한 구속응력의 영향과 현장 다짐에너지에 의한 성토체의 깊이별 다짐효과와 직접도달파 탐사의 영향 깊이를 분석하기 위해 현장의 크로스홀 시험과 실내 공진주시험을 추가로 수행하였다. 이때 직접도달파 시험은 이격거리가 짧아 굴절/반사가 없다고 가정한다.



(a) 크로스홀 시험과 직접도달파 계측 위치



(b) 각 층의 로울러 통과 횟수와 두께

그림 1. 시험성토 단면과 계측위치

표 1. 시험성토에서 수행한 시험기법 및 목적

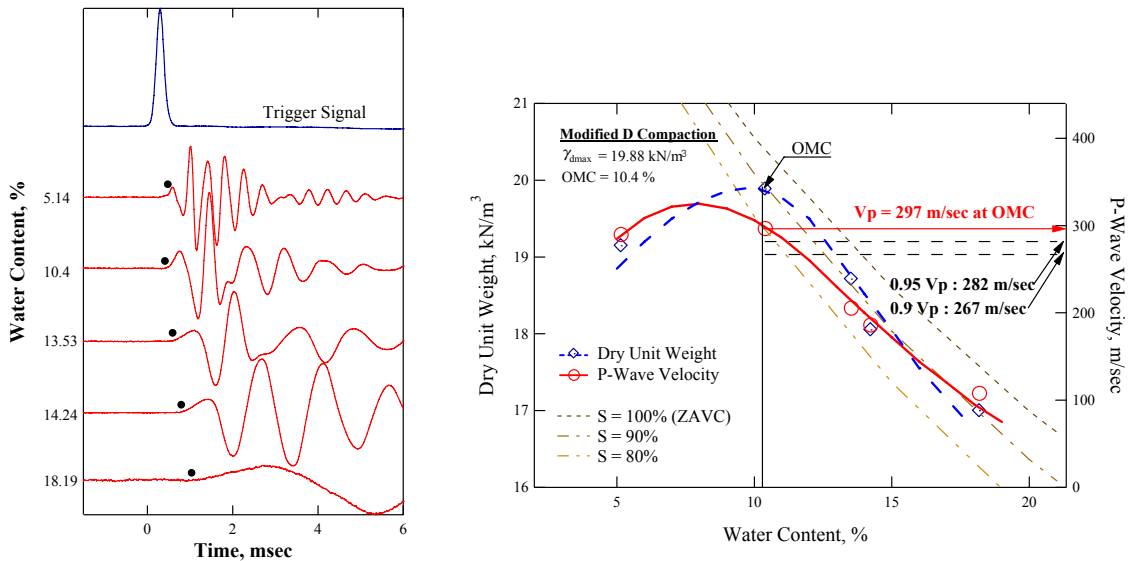
	Testing Method	Measurement
Laboratory	Modified Compaction Test	$V_p$ & $\gamma_d-w$ Relationship, $V_p$ at OMC
	Resonant Column Test	E- $\epsilon$ Relationship, Effect of $\bar{\sigma}_m$ on $V_p$
Field	Direct-Arrival Method	$V_p$ and $V_s$ vs. No. of Roller Passes
	Crosshole Test	$V_p$ , $V_s$ , and $\nu$ Profiles
	Field Density	In-situ $\gamma_d$ and $w$
	Level Surveying	Thicknesses of Each Lift

철도기술연구원 신축부지의 시험성토는 총 3개의 층으로 다짐성토 하였다. 성토 전에 원지반을 대략 50cm 깎아내고 다시 다져 첫 번째 성토층(lift 1)과 성토층 아래 지반의 이질성이 직접도달과 탐사 결과에 미치는 영향을 최소화 하였다. 원지반이 추운 날씨의 영향으로 얼어 있었기 때문이다. 다짐에 사용된 장비는 12.5ton의 진동 로울러이고 그림 1은 최종 완료된 시험성토의 횡단면도와 평면도이다. 성토 단계별로 완료된 각 층의 표면은 8개의 섹터로 구분하였고 본 연구진은 그림 1(a)에 표시한 zone-1과 zone-2에서 들밀도시험과 직접도달과 시험을 수행하였다. 각 층의 두께는 성토 단계별로 레벨측량(그림 1(b))을 통해 확인하였다.

### 3. 다양한 동적 시험을 이용한 다짐 시험성토 노반의 역학적 특성

#### 3.1 함수비에 따른 다짐 공시체의 P-파 속도 계측과 실내 품질기준 설정

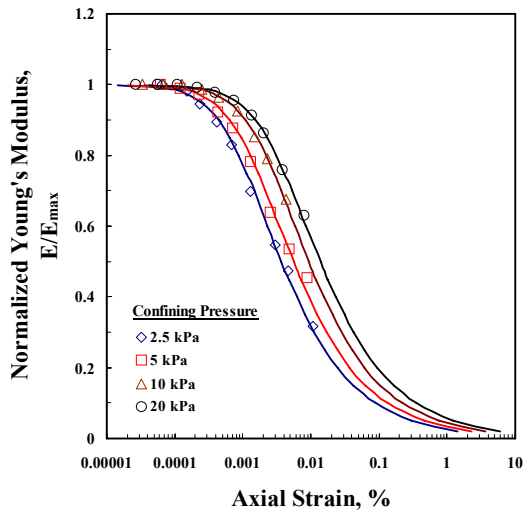
시험성토의 성토 재료에 대해 우선 실내시험을 통해 다짐 기준을 마련하고자 하였다. 성토부지는 철도기술연구원의 건물 신축부지였고 현장에서 채취해온 시료를 수정 D다짐을 통해 함수비별로 다짐공시체를 제작하였다. 제작된 공시체의 아랫면에 PCB社의 가속도계를 부착하고 인스트루먼트 충격해머(impulse force hammer, PCB 086C80)를 이용해 다짐 공시체의 상부면에 타격을 가해 P-파 속도를 계측하였다. 시험의 과정 및 계측에 사용된 장비는 예비시험의 다짐공시체 P-파 계측과 같다(박철수 등, 2008).



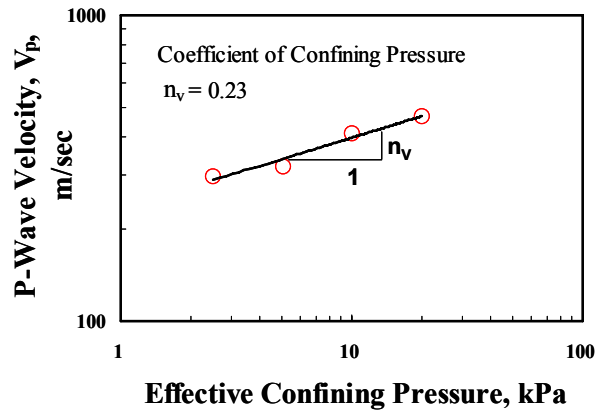
(a) 계측된 P-파 신호

(b) 건조단위중량 및 P-파 속도

그림 2. 함수비에 따른 다짐 공시체의 P-파 계측과 실내 다짐기준 (수정 D 다짐)



(a) 축변형률에 따른 영 탄성계수



(b) P-속도에 대한 구속압 무차원 영향계수

그림 3. 비선형 영 탄성계수 감소곡선과 유효 구속압 증가에 따른 P-파 속도의 변화

철도노반을 성토할 때 다짐 층의 두께는 30cm 내외로 두껍지 않고 여러 층으로 성토다짐을 한다. 시공단계에서 다짐관리의 대상이 되는 성토노반의 최상부 한 층, 즉 시공중인 층은 다짐 에너지에 의해 횡방향의 구속효과(정지토압계수)가 상재하중에 의한 구속응력의 영향에 버금갈 만큼 크다(D'Appolonia et al., 1969). 따라서 다짐 공시체에 대한 실내 P-파 속도는 구속압을 가하지 않고 공기중에서 바로 계측되었다. 그림 2(a)는 함수비 별로 반복 계측된 P-파 신호이고, 다짐시험과 다짐 공시체 P-파 계측으로부터 획득한 함수비에 따른 건조단위중량과 P-파 속도의 관계는 그림 2(b)에 나타내었다. 의심의 여지없이 예비시험 결과와 동일한 경향을 보이면서 최적함수비 10.4%, 최대건조밀도는 19.88kN/m<sup>3</sup>이었다. 다짐곡선의 OMC를 기준으로 건조측에서 재료의 취성 특성으로 습윤측에 비해 P-파 속도가 더 컸다.

현장의 품질관리를 위한 실내 기준은 다짐곡선의 최적함수비(OMC)에 해당하는 P-파 속도로 정하였다. 현장의 요구 수준에 따라 OMC에서 P-파 속도의 95%, 90%를 품질관리 기준으로 제시할 수도 있을 것이다. 다만 한 가지 우려가 되는 점은 현장에서 다짐시공 시 건조측으로 다짐시공을 하면 OMC에서의 P-파 속도 규정은 준수하게 되지만 실제 건조밀도는 작아지게 된다. 이를 보완하기 위해 대개 OMC±2%의 함수비 규정의 기준 방법을 따르기로 하였다.

### 3.2 공진주시험을 이용한 변형률 및 구속응력에 따른 변형계수 평가

채취된 현장의 시료는 실내에서 다짐시험 뿐만 아니라 공진주시험을 수행하는 데에도 사용되었다. 공진주시험의 가장 큰 목적은 설계단계에서 노반의 입력물성으로 사용하게 될 회복탄성계수의 결정에 있다. 즉, 역학적 개념의 설계와 품질관리를 일관성 있게 수행하기 위함이다. 시험시 적용된 구속압의 크기는 성토 높이가 크지 않음을 고려하여 2.5, 5, 10, 그리고 20kPa이었다. 공진주시험으로 획득한 비선형 전단변형률(G)은 대략 전단변형률( $\gamma$ ) 크기 0.01% 까지 측정되었고, 뒤에 언급할 현장의 크로스홀 시험으로 결정된 포아슨비 0.3을 이용하여 축변형률( $\epsilon$ )에 따른 영 탄성계수 감소곡선(E)으로 변환하였다. 회복탄성계수는 임의의 축변형률에서 영 탄성계수이기 때문이다. 그림 3(a)는 포아슨비를 이용하여 변환된 구속압에 따른 정규화된 영 탄성계수 감소곡선이다. 시험에 사용된 재료는 정규화 곡선이 구속압이 증가함에 따라 오른쪽으로 증가하는 경향을 보였다.

일반적으로 동적물성치는 구속압에 의해 큰 영향을 받는다. 본 연구에서 공진주시험으로 결정된 구속압에 따른 저변형률의 최대 전단변형률계수는 구속압이 증가함에 따라 0.46의 기울기로 증가하는 경향

을 보였다. 따라서 포아슨비를 적용하여 결정하는 저변형률 영역의 영 탄성계수 또한 구속압 증가에 따라 0.46의 기울기로 증가하게 된다. 대수좌표에서 구속압과 탄성계수의 기울기를 탄성계수에 대한 구속압 무차원 영향계수(coefficient of confining pressure)라 한다. 그림 3(b)는 탄성계수가 아닌 P-파 속도에 대해 구속압의 영향을 나타낸 것이다. 탄성계수는 탄성과 속도의 제곱에 비례하므로 탄성과 속도에 대한 구속압 영향계수는 탄성계수에 대한 계수의 절반이 된다. 따라서 시험성토에 사용된 재료의 P-파 속도에 대한 구속압 영향계수는 0.23으로 결정되었다. 결정된 구속압 영향계수는 시험성토 부지에서 수행된 다양한 탄성과 시험 및 실내 시험의 결과를 비교하는데 중요한 인자로 사용될 것이다.

### 3.3 직접도달파 기법을 이용한 시험성토의 P-파 계측

직접도달파 기법(direct-arrival method)은 계측이 간편할 뿐만 아니라 지표면 얕은 깊이의 지반 물성치를 측정하기 위해 현장에서 일상적으로 사용하는 지반조사 기법 중 하나이다(Richert et al., 1970). 직접도달파 기법은 지표면 상부의 강성이 일정한 층에서 지표면의 일직선상에 거리별로 여러 개의 속도계를 설치하고 동일 선상에 충격하중을 가한다. 성토 다짐 층은 두껍지 않고 거의 균질한 성토재료를 사용하며 지하수위 위에 시공되기 때문에 다짐 성토 노반의 현장 품질확인 기법으로 적절하다.

P-파와 S-파는 파의 전파 특성이 다르므로 이에 사용되는 발진방향과 감지방향에 따른 감지기의 설치 조건에 맞게 설정하는 것은 양질의 신호를 획득하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 사용한 발진 장치는 그림 4와 같이 무게가 무거운 쇧덩이(대형 해머의 두부)를 지표에 밀착시켜 작은 망치를 이용해 P-파를 발생시킬 때는 수평방향으로, S-파를 발생시킬 때는 수직방향으로 쇧덩이를 타격하였다. P-파를 계측할 때는 수평방향으로 민감한 속도계를 사용하였고 S-파를 계측할 때는 수직으로 민감한 속도계를 사용하였다. 본 연구에서는 계측하고자 하는 신호에 따라 각각 별도의 감지기 세 개씩 제작하였는데, 사용된 모든 감지기에는 스파이크를 부착하여 성토 지반 표면에 완전히 밀착되도록 하였다.

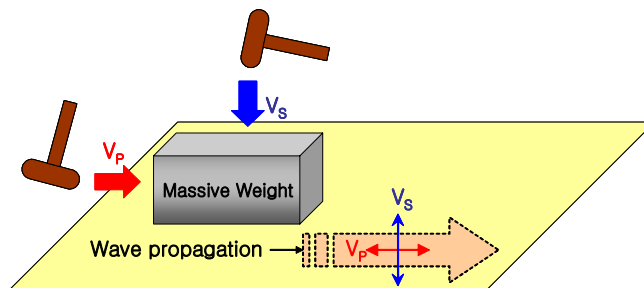
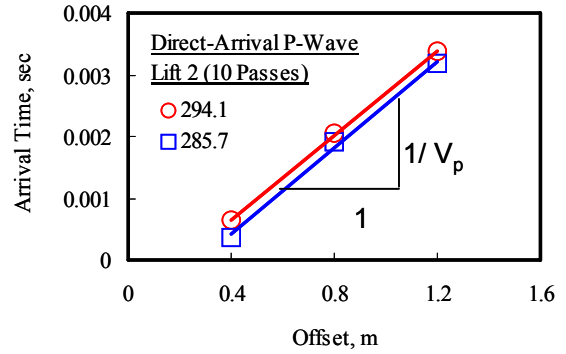
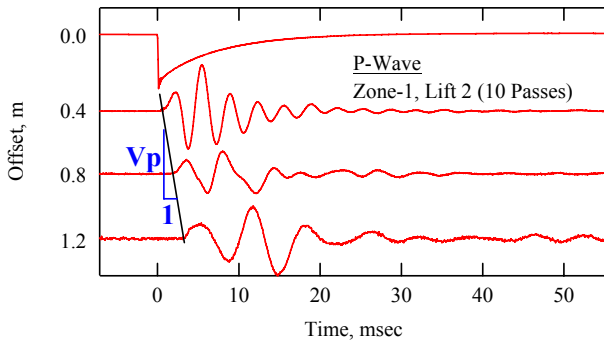


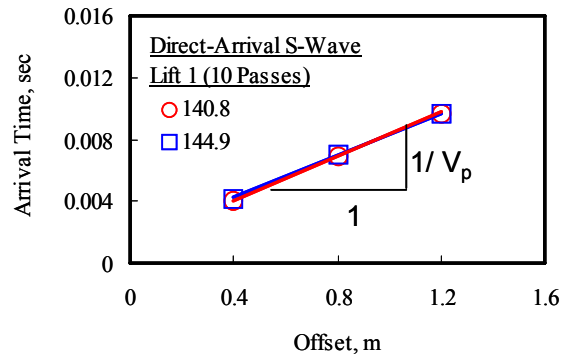
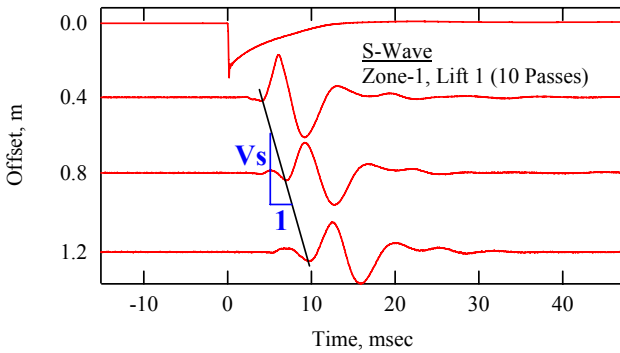
그림 4. 직접도달파 시험의 지표면 발진원

그림 5(a)는 lift 2의 zone-1에서 진동 로울러가 10회 왕복하였을 때 직접 도달파 시험을 통해 계측된 대표적인 P-파 신호(좌)와 이격거리별 도달 시간(우)이다. 이격거리에 따른 도달시간의 기울기 역수가 P-파 속도가 된다. 그림 5(b)는 lift 1의 zone-1에서 진동 로울러가 10회 왕복하였을 때 직접 도달파 시험을 통해 계측된 대표적인 S-파 신호(좌)와 이격거리별 도달 시간(우)이다. P-파와 S-파는 파의 전파 특성이 다르므로 이에 사용되는 발진방향과 감지방향에 따른 감지기의 설치 조건에 맞게 설정하는 것은 양질의 신호를 획득하는데 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서 사용한 발진 장치는 무게가 무거운 쇧덩이(대형 해머의 두부)를 지표에 밀착시켜 작은 망치를 이용해 P-파를 발생시킬 때는 수평방향으로, S-파를 발생시킬 때는 수직방향으로 쇧덩이를 타격하였다. P-파를 계측할 때는 수평방향으로 민감한 속도계를 사용하였고 S-파를 계측할 때는 수직으로 민감한 속도계를 사용하였다. 본 연구에서는 계측하고자 하는 신호에 따라 각각 별도의 감지기 세 개씩 제작하였는데, 사용된 모든 감지기에는 스파

이크를 부착하여 성토 노반 표면에 완전히 밀착되도록 하였다.

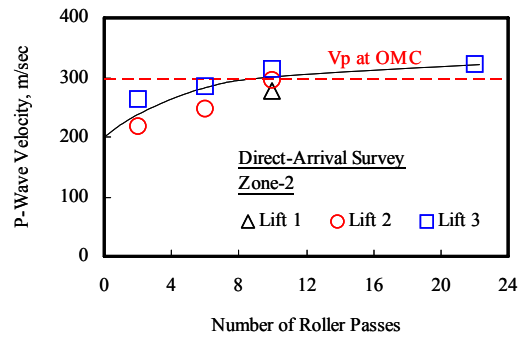
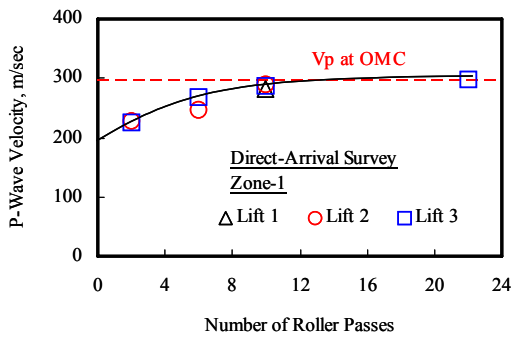


(a) P-파 계측 신호와 도달시간으로부터 계산된 P-파 속도

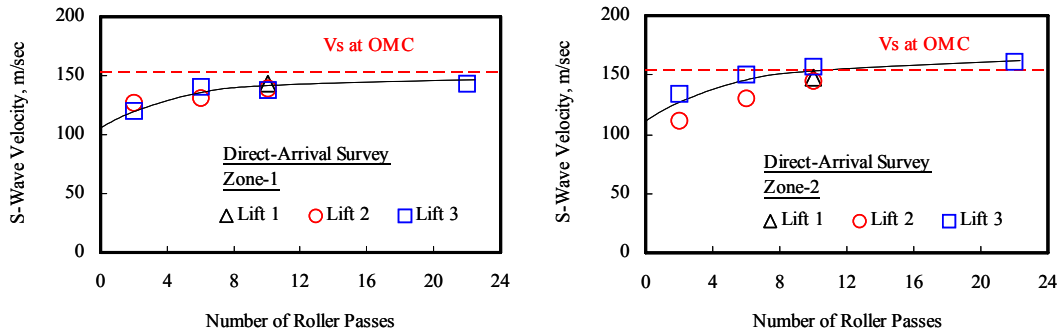


(b) S-파 계측 신호와 도달시간으로부터 계산된 S-파 속도

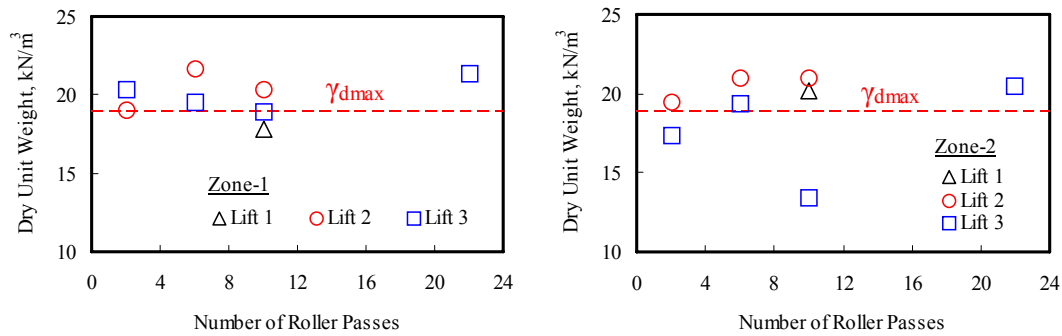
그림 5. 시험성토 부지의 직접도달파 시험



(a) P-파 속도와 실내 다짐기준 (zone-1, zone-2)



(b) S-파 속도 (zone-1, zone-2)



(c) 들밀도시험으로 구한 현장의 건조밀도 (zone-1, zone-2)

그림 6. 각 층의 진동 롤러 통과 횟수에 따른 P-파, S-파 속도와 건조밀도

계측된 신호로부터 속도를 결정하기 위해 도달시간의 정확한 판별은 매우 중요하다. 본 연구에서 P-파 또는 S-파의 도달시간은 발진 장치의 영향을 배제하기 위해 발진시 발생한 신호를 제외한 세 개의 감지기 신호만을 이용하여 간접법으로 결정하였다. 또한 모든 경우에 대해 두 번씩 계측하여 평균하였다. 그러나 그림 5에서 알 수 있듯이 반복 계측된 신호로부터 계산된 도달시간 및 속도는 거의 차이를 보이지 않고 일관성 있는 결과를 보였다. 이와 같은 사실은 적용하고자 하는 P-파 속도를 이용한 품질관리의 타당성과 일관성을 간접적으로 보여주는 것이다.

그림 6(a)는 직접도달과 시험을 통해 각각 zone-1과 2에서 다짐 층, 진동 롤러 통과 횟수별로 결정된 P-파 속도를 정리한 것이다. 그리고 실내 다짐 공시체의 P-파 계측을 통해 결정된 OMC에서의 P-파 속도를 함께 도시하였다. zone-1과 2 모두 진동 롤러의 통과 횟수가 증가함에 따라 P-파 속도가 증가하다가 대략 10회부터 점차 P-파 속도가 수렴하면서 동시에 실내기준 P-파 속도를 만족하고 있다. lift 3의 통과 횟수 22회에서는 진동 롤러에 의한 다짐효과가 더 이상 발생하지 않은 것으로 보인다. 인접한 zone-1과 2의 차이는 거의 없는 것으로 보이며, 다짐 층의 두께에 따른 뚜렷한 경향은 보이지 않았다. 그림 6(b)의 S-파 속도는 P-파 속도와 비슷한 경향을 보였고 두 결과로부터 계산된 포아슨비는 대략 0.3정도였다. 그러나 그림 6(c)의 들밀도 시험을 통해 결정된 건조밀도는 다짐 롤러의 통과 횟수에 따른 경향이 일정치 않았고, 일반적인 지반의 건조밀도 범위를 크게 벗어나는 결과도 나왔다. 또한 전반적으로 매우 큰 값을 보이며 실내시험으로 구한 최대 건조밀도를 상회하기도 하여 결과의 신뢰성에 의문이 갔다. 당초 계획은 최대한 정밀하고 신중하게 현장의 건조밀도를 획득하고 직접도달과 기법으로 획득한 P-파 속도와 비교를 통하여 P-파 속도를 이용한 품질관리 방안의 신뢰성을 확보할 예정이었으나, 본 연구에서 문제제기 했던 현장 건조밀도의 근본적인 부정확성으로 인해 사용을 지양해야할 당위성을 보여주는 근거 자료로만 활용되었다.

### 3.4 크로스홀 시험을 이용한 성토층의 직접도달파의 영향깊이와 깊이별 다짐효과 분석

성토가 세 번째 층까지 최종 완료된 뒤에 zone-1과 zone-2의 직접도달파 시험의 측선을 사이에 두고 두 개의 검측공을 추가로 설치하였다. 설치된 검측공은 케이싱을 하지 않아도 자립할 것으로 예상하여 나공(uncased borehole)으로 형성하였고 크로스홀 시험을 수행하였다. 크로스홀 시험의 목적은 시험 성토체의 깊이별 다짐효과와 직접도달파 시험의 영향 범위를 살펴보기 위함이다. 크로스홀 시험은 계측 간격을 10cm로 정밀하게 수행되었고 그 결과 깊이별 P-파 속도와 S-파 속도 주상도를 획득하였다. 그림 7은 크로스홀 시험으로 획득한 깊이별 P-파와 S-파 신호이고 그림 8은 속도주상도이다.

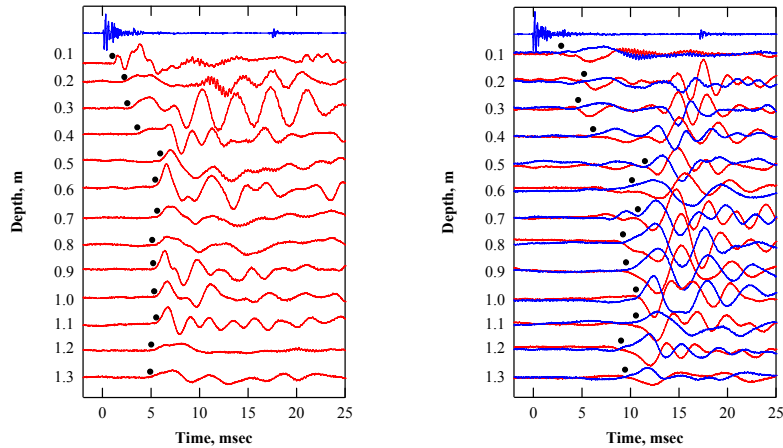


그림 7. 시험성토 완료 후 크로스홀 시험으로 획득한 깊이별 P-파(좌), S-파(우) 신호

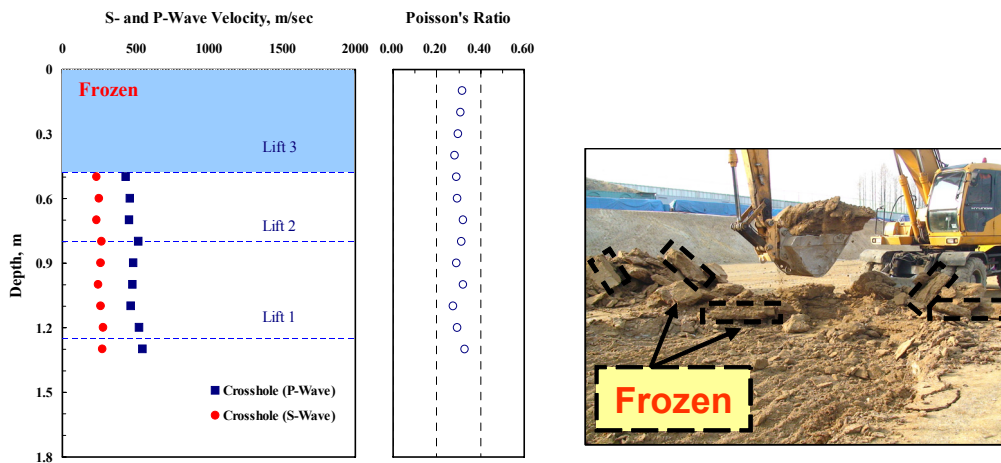


그림 8. 크로스홀 시험으로 획득한 시험성토의 깊이별 속도주상도(좌)와 성토 전 굴착 전경(우)

lift 3의 깊이 40cm 까지는 탄성과 속도는 일반적으로 사질토 지반에서 예상할 수 있는 속도보다 훨씬 빠른 값을 보여 시험 결과의 신뢰성이 다소 떨어져 보인다. 이와 같은 결과에 대해 가능한 한 가지 원인은 아주 추운 영하의 날씨 때문이 아닌가 판단된다. 그림 8 우측 그림의 점선 블록으로 표시한 부분과 같이 당시 현장 지반의 지표는 아침에 굴착시 딱딱하게 얼어 있는 것이 눈에 띌 정도였다. 크로스홀 시험이 성토가 종료된 후 다음날 아침 영하의 날씨에서 수행된 점으로 미루어 lift 3에 해당하는 깊이 40cm의 속도가 매우 빠르게 측정된 것으로 보이며, 그 아래 lift 2와 lift 3은 일반적인 사질토의 탄성과 속도를 보였다. lift 2와 lift 3의 P-파 속도는 430-550m/sec의 범위에서 깊이별로 분포하였고, S-파 속도는 230-280m/sec의 범위에서 분포하였다. 향후 본 논문에서 크로스홀 시험에 대한 데



이터를 분석할 때 lift 3은 제외하도록 한다.

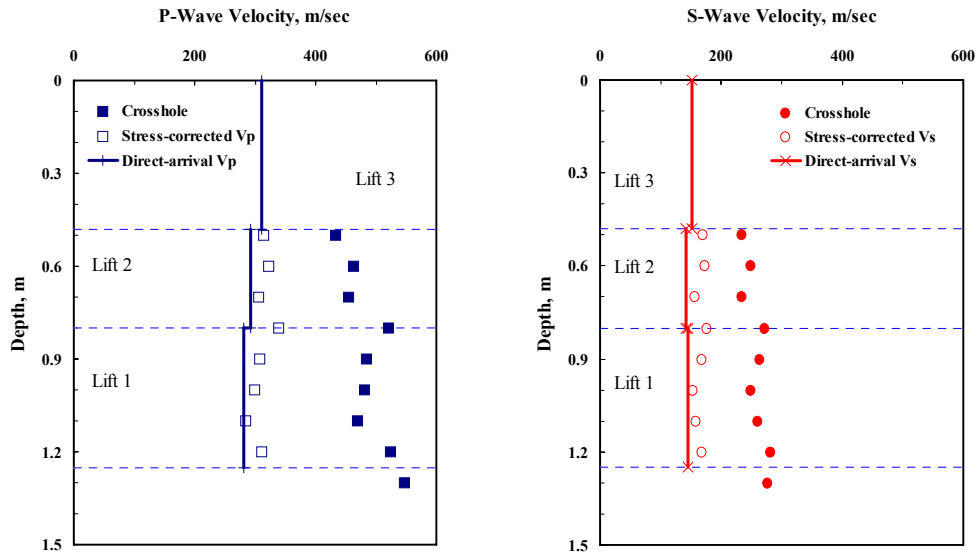
크로스홀 시험의 결과는 각 계측 깊이별로 상재하중에 의한 구속효과가 반영된 결과이다. 따라서 구속응력에 의한 효과를 제거하고 다짐에너지에 의한 다짐효과의 깊이별 분포를 살펴보기 위해 구속응력 보정을 통해 P-파 속도와 S-파 속도를 재산정 하였다. 구속응력에 대한 효과를 제거하기 위해 기준이 되는 구속응력을 선택하였다. 현장에서 계측된 탄성과 속도는 실내 다짐 공시체에 대한 탄성과 속도와 비교 되어야 하므로 기준이 되는 구속응력을 다짐 공시체의 높이에 해당하는 구속응력으로 정하였다. 실내에서 수정 D 다짐으로 공시체를 성형하고 P-파 계측을 수행했기 때문에 해당 높이와 구속응력은 0.125m, 1.635kPa 이었다. 따라서 크로스홀 시험의 결과는 식 1을 통해 응력을 보정하였다. lift 1, 2에서 보정하기 전(solid symbol)과 보정된 후(hollow symbol)의 P-파, S-파 속도 주상도는 그림 9에 나타내었다. 이때 적용된 탄성과 속도에 대한 구속응력 무차원 영향계수( $n_V$ )는 공진주시험에서 결정된 0.23이었다.

$$V_{modified} = V_{field} \left( \frac{\bar{\sigma}_{m,lab.}}{\bar{\sigma}_{m,field}} \right)^{n_V} \quad (1)$$

- 여기서,  $\bar{\sigma}_{m,field}$  : 계측된 깊이의 현장 평균유효구속응력
- $\bar{\sigma}_{m,lab.}$  : 다짐 공시체의 실내 평균유효구속응력
- $V_{field}$  : 구속응력  $\bar{\sigma}_{m,field}$ 에 해당하는 탄성과속도
- $V_{modified}$  : 구속응력  $\bar{\sigma}_{m,lab.}$ 으로 보정된 탄성과속도
- $n_V$  : 탄성과속도에 대한 구속응력 무차원 영향계수 (본 연구에서 0.23)

그림 9에는 응력 보정된 탄성과 속도뿐만 아니라 각 층에서 다짐이 최종 완료 되었을 때(lift 1: 10회, lift 2: 10회) 직접도달과 시험을 이용해 계측한 P-파, S-파 속도를 함께 도시하였다. 계측결과는 현장 다짐 층 두께인 30-45cm 범위에서 응력 보정된 크로스홀 시험의 결과와 비슷한 속도를 보였다. 다짐 공시체에 해당하는 응력으로 보정된 크로스홀 시험의 탄성과 속도가 직접도달과 시험으로 계측된 탄성과 속도와 거의 유사한 결과를 보이는 점을 통해 두 가지 사실을 예상 할 수 있다.

첫 번째는 직접도달과 시험에서 발생된 탄성과의 계측 영향 깊이가 다행스럽게도 일반적인 다짐층 두께(대략 30cm)와 비교적 잘 일치한다는 것이다. 본 연구의 직접도달과 시험은 대형 해머의 두부(머리 부분)와 이를 타격하기 위한 일반 망치가 발진 장치로 사용되었기 때문에 만약 무게와 크기가 많이 다른 발진 장치를 사용한다면 영향깊이에 다소 차이가 있을 지도 모른다. P-파 속도를 이용한 품질관리 방안을 정립하기 위해 직접도달과 시험의 발진 장치에 대한 다양한 조사가 필요할 것이다. 그러나 본 연구에 사용된 정도의 간편한 장비들이라면 충분히 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구결과를 통해 예상할 수 있는 두 번째 사실은 실내 다짐 공시체의 P-파 계측 결과와 현장의 직접도달과 시험으로 계측된 P-파 속도를 직접적으로 비교가 가능하다는 것이다. 직접도달과 시험의 P-파 속도는 다짐 공시체의 길이에 해당하는 구속응력으로 보정한 크로스홀 시험의 결과와 현장의 다짐층 두께에 걸쳐 전반적으로 거의 비슷한 결과를 보이기 때문이다. 이와 같은 두 사실을 바탕으로 제안하고자 하는 P-파 계측을 이용한 품질관리의 적용성이 검증되었다.



(a) P-파 (b) S-파  
 그림 9. 응력 보정 전후의 크로스홀 시험 결과와 직접도달파 시험의 탄성파 속도

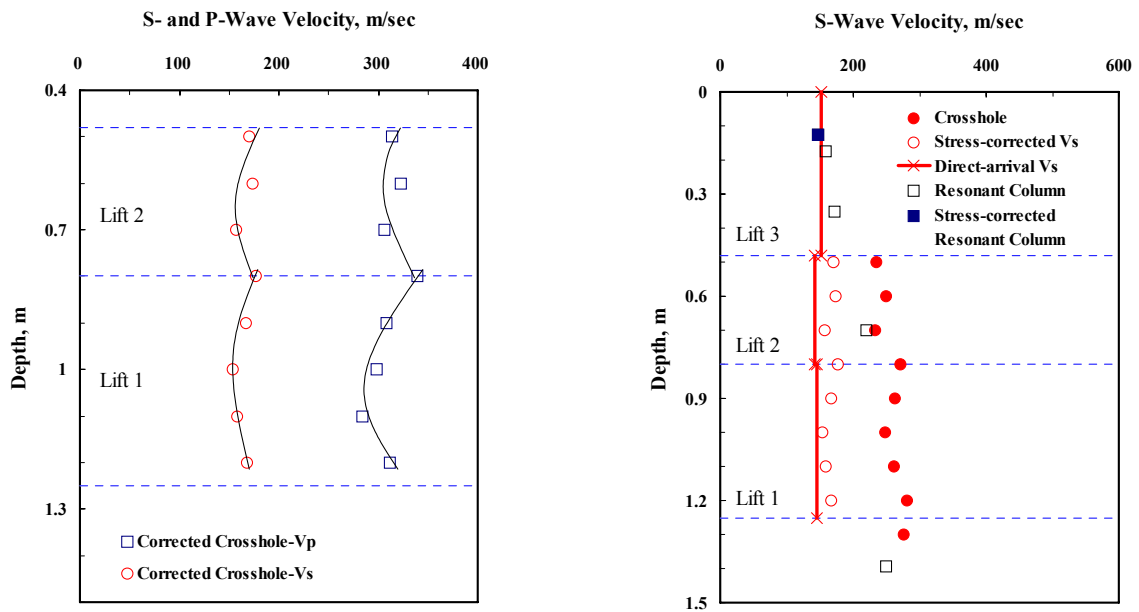


그림 10. 응력이 보정된 깊이별 속도분포를 통해 유추된 다짐효과 (Left)      그림 11. 크로스홀, 직접도달파, 그리고 공진주시험으로  
 다짐효과      계측된 S-파 속도 비교

그림 10은 응력이 보정된 크로스홀 시험의 P-파, S-파 속도 만을 도시해 보았다. 흥미로운 사실은 다짐층의 깊이별 탄성파 속도의 변화가 D'Appolonia 등(1969)의 연구 결과인 모래의 부설토층 깊이에 따른 건조밀도의 변화와 유사한 경향을 보인다는 것이다. 이와 같은 사실은 P-파 속도를 이용한 다짐 성토의 품질관리 적용 시 전체 성토체의 최소 P-파 속도를 확보하기 위한 다짐 부설토층의 시공 두께 산정 가능성을 보여준다. 더불어 성토 지반의 목적, 다짐장비와 그에 따라 결정된 로울러의 통과 횟수 등 다양한 조건 별로 구체적인 연구가 진행되어야 하겠다.

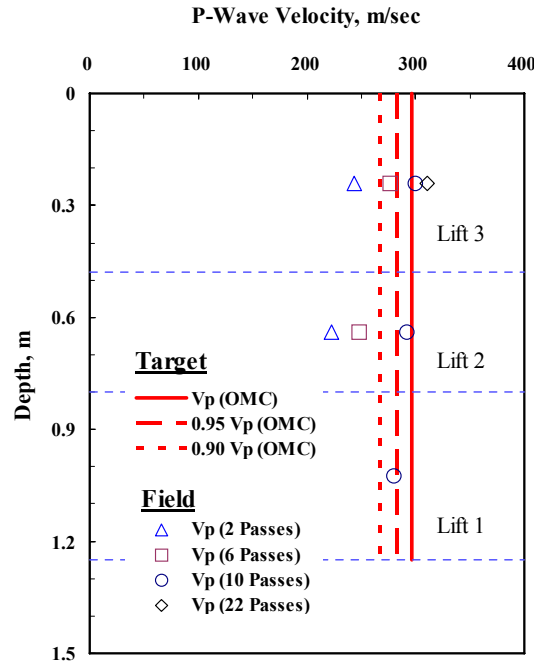


그림 12. 각 층의 로울러 통과 횟수에 따른 P-파 속도와 V<sub>p</sub>(at OMC), 0.95V<sub>p</sub>, 그리고 0.9V<sub>p</sub> 비교

#### 4. 시험성토 부지의 현장 및 실내 시험 결과 비교

철도기술연구원 내에 조성한 시험성토 부지에서 다양한 동적 시험이 수행되었다. 실내에서는 다짐 시험과 동시에 다짐 공시체에 대한 P-파 계측이 수행되었고, 동일한 재료에 대해 공진주시험이 수행되었다. 현장에서는 다짐 층과 다짐 횟수별로 직접도달과 시험이 수행되었고, 성토가 최종 완료되었을 때 크로스홀 시험을 수행하였다. 모든 시험의 최종 목적은 P-파 속도를 이용한 품질관리이며, 이와 동시에 설계에 반영될 회복탄성계수 결정에 근간이 되는 동적물성치 획득이었다. 각각의 시험 결과는 응력 조건을 동일하게 하여 비교할 수 있었다. 그림 11에서 원형 solid symbol로 표현된 데이터는 크로스홀 시험을 통해 계측된 깊이별 전단파속도이다. 응력보정을 하기 전의 실제 계측결과이며 상재하중에 의한 구속응력의 영향이 반영된 상태이다. 이 결과는 구속응력 증가에 따른 공진주시험의 깊이별 변화(그림 11의 정방형 hollow symbol)와 매우 유사한 양상을 보였다.

한편, 공진주시험에서 적용된 평균 유효구속응력의 범위는 2.5-20kPa이었지만 수정 D 다짐 몰드의 높이(0.125m)에 해당하는 구속응력 1.635kPa으로 응력보정을 하여 결정된 S-파 속도(그림 11의 정방형 solid symbol)는 동일한 응력으로 보정된 크로스홀 시험의 S-파 속도(그림 11의 원형 hollow symbol), 직접도달과 시험으로 결정된 S-파 속도(그림 11의 x symbol을 포함한 직선)와 거의 같은 결과를 보였다. 결론적으로 동적시험을 통해 결정된 S-파 속도가 동일한 응력조건에서 거의 비슷한 결과를 보여 시험 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

그림 12에는 직접도달과 시험으로 결정된 로울러 통과 횟수에 따른 P-파 속도(zone-1과 2의 평균 값)와 실내시험 기준(V<sub>p</sub> at OMC)을 함께 도시한 것이다. 실내시험 기준은 OMC에서 P-파 속도의 95%, 90%를 함께 제시하였다. 진동 로울러 통과 횟수가 2회 일 때 lift 1과 lift 2에서 0.9V<sub>p</sub>에 전혀 미치지 못하였지만 10회 일 때는 0.95V<sub>p</sub>와 V<sub>p</sub>(OMC)의 사이에서 만족할만한 분포를 보였다. 향후 지속적인 연구를 통해 성토 구조물의 특성과 용도, 중요도에 따른 P-파 속도의 적절한 기준이 마련되어야 할 것이다.

## 5. P-파 계측을 이용한 역학적 개념의 품질관리 방안

본 연구에서는 설계와 더불어 시공단계의 품질관리 측면에서도 기존의 경험적 관리를 탈피하고 설계 단계와 개념적으로 일관성을 가질 수 있는 성토 노반의 다짐관리 방안을 제시하고자 한다. 품질관리의 지표로는 탄성과 시험으로부터 결정되는 P-파 속도를 이용한다. 현장에서는 일반적으로 현업에서 손쉽게 적용할 수 있는 직접 도달파(direct-arrival) 기법을 활용하여 P-파 속도를 계측하고, 실내에서도 다짐 공시체에 대하여 이에 상응하는 P-파 속도를 계측한다. P-파 속도의 계측은 전단파에 비하여 계측이 수월하고 시험자의 숙련도에 영향을 적게 받는다. 따라서 시험자에 상관없이 여러 번 계측하여도 일관성 있는 결과를 도출할 수 있다. 실내에서 계측된 함수비에 따른 다짐 공시체의 P-파 속도로부터 최적함수비(OMC)에 해당하는 P-파 속도를 품질관리 목표로 설정하고 현장에서 계측된 P-파 속도와 비교한다. 현장 및 실내의 두 P-파 계측 기법은 신속하며 매우 일관성 있는 결과를 보인다. 다만 건조 밀도가 작은 건조층에서 재료의 취성 특성으로 P-파 속도가 다소 크게 평가되는 단점이 있어 이를 보완하기 위해 일반적으로 적용되는  $OMC \pm 2\%$ 의 함수비 규정을 따르기로 한다. 제안하고자 하는 P-파 속도를 활용한 품질관리 방안의 흐름도는 그림 13과 같다.

## 6. 결론

P-파 속도를 이용한 품질관리 기법의 적용성을 검증하고자 시험성토 부지를 조성하고 현장 및 실내에서 다양한 동적 시험을 수행하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 현장에서 직접도달파 시험으로 계측된 P-파 속도를 실내에서 설정된 품질관리 지침과 비교한다. 품질관리 기준은 최적함수비  $\pm 2\%$ 의 현장 다짐 함수비 규정을 포함한다.

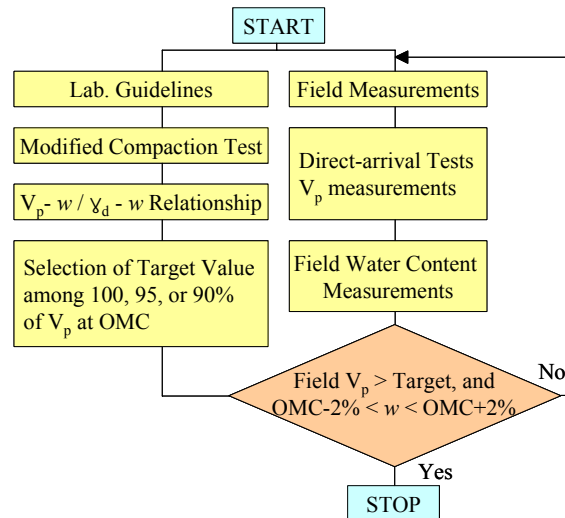


그림 13. P-파 속도를 이용한 성토노반의 품질관리 흐름도

- 2) 실내 다짐시험과 다짐 공시체 함수비 변화에 따른 P-파 속도를 계측하고 최적함수비에서의 P-파 속도를 성토 지반의 품질관리 지침으로 제시하였다. 또한 공진주 시험을 수행하여 성토 재료의 비선형 영탄성계수 감소곡선을 획득하였고, 평균유효 구속응력에 따른 저변형률의 P-파 속도의 기율기인 구속응력 무차원 영향계수를 결정하였다. 비선형 거동 특성은 설계단계에 필요한 회복탄성계수를 결정하는데 사용된다.
- 3) 현장의 P-파 속도는 현업에서 지반조사에 일반적으로 사용하는 물리 탐사 장비를 활용하여 직접도달파 기법으로 측정하였고, 반복 계측된 P-파 속도는 일관된 결과를 보여주었다. 진동 로울러의 통과 횟수가 증가함에 따라 P-파 속도가 증가하다가 대략 10회부터 점차 P-파 속도가 수렴하면서 동

시에 실내기준 P-파 속도를 만족하였다.

- 4) 다짐 공시체의 높이에 해당하는 구속응력으로 보정된 크로스홀 시험의 결과는 실내 P-파 계측, 공진 주 시험, 직접도달파 시험의 결과와 거의 유사하였다. 즉, 실내 다짐 공시체의 P-파 속도와 직접도달파 시험의 P-파 속도의 직접 비교가 가능함을 확인하였다. 특히 응력 보정된 크로스홀 시험 결과가 직접도달파 시험의 결과와 유사하다는 사실로부터 직접도달파 시험에서 발생된 탄성파의 계측 조사 범위(깊이)가 일반적인 다짐층 두께(대략 30cm)와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통R&D정책·인프라사업의 연구비지원(C105B1000008-07B010000612)에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 박철수, 박인범, 김학성, 최찬용, 목영진(2008), “강성 측정을 이용한 철도 토공 노반의 품질관리 예비 연구,” **2008 한국철도학회 춘계학술대회 논문집**, 한국철도학회, pp.158-167.
2. 한국고속철도건설공단(2006), 고속철도공사 전문시방서 노반편, 시방서.
3. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준 노반편, 시방서.
4. D'Appolonia, D. J., Whitman, R. V., and D'Appolonia, E. D.(1969), "Sand Compaction with Vibratory Roller," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.95, No. SM1, pp.263-284.
5. Richart, F. E., Jr., Hall, J. R., Jr., and Wood, R. D.(1970), *Vibration of Soils and Foundations*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall Inc.