

강성 측정을 이용한 철도 토공 노반의 품질관리 예비연구

Preliminary Investigation for Quality Control of Railroad Compaction Fills Using Stiffness Measurements

박철수* 박인범** 김학성** 최찬용*** 목영진†

Park, Chul-Soo Park, In-Beom Kim, Hak-Sung Choi, Chan-Yong Mok, Young-Jin

ABSTRACT

The quality control of compacted fills has been carried out by evaluating relative densities and coefficients of soil reaction. These measures have several limitations regarding repeatability and reliability of field measurements, and difficulties to use in the fills including large grain size as gravels and boulders. Also, the density is not directly related to the design parameter such as resilient modulus. A preliminary investigation for the usage of the stiffness as a control measure has been carried out. In the laboratory, the stiffness (P-wave velocity) was measured during compaction tests. The stiffness at the optimal moisture content was proposed to use a target control parameter likewise maximum dry density. A field method to match the target stiffness was also proposed by considering easiness of the method and availability of equipment. The most phenomenal feature of the method is that the control parameter (stiffness) is closely related to resilient modulus and can be consistently used from the design stage to the field control during construction.

1. 서 론

국내 지형 상 철도의 운행 환경은 교량, 터널, 토공 구간이 다양하게 조합되어 있다. 대표적인 궤도 하부 구조인 토공노반은 노반의 연약화와 과도한 침하, 그로인한 궤도 틀림 등이 열차 주행의 안정성과 지속적인 보수로 인한 경제성 등에 영향을 미친다. 따라서 이와 같은 문제를 최소화하기 위해 기존의 경험적인 방법을 탈피하고 최초 설계단계부터 시공, 품질관리까지 역학적 개념의 접근의 필요성이 제기 되었고, 이와 관련한 다양한 연구가 수행 중에 있다.

본 연구에서는 토공노반의 품질관리와 관련하여 탄성과 속도를 이용한 역학적 개념의 새로운 다짐관리 기법을 제시하였다. 다짐은 토체 간극의 공기를 배출시키고 건조단위중량(밀도)을 증가시켜 최종적으로 다짐 정도 지반의 공학적 성질을 개선하기 위함이다. 일반적으로 성토 노반에 대한 품질관리는 역학적 물성이 아닌 다짐도(relative compaction)나 지지력(soil reaction)을 기준으로 관리하고 있다. 품질관리의 기준치를 설정하기 위한 실내 시험의 결과인 최대 건조밀도는 탄성계수와 무관한 인자로서 설계 단계에서 입력 물성으로 사용할 수 없다. 특히, 다짐도 평가를 위한 현장의 건조밀도는 들밀도 시험으로 결정되지만 오차를 포함하는 경우가 많아 결과의 신뢰성이 현저히 떨어지며 암버력과 같이 입경이 큰 재료에 대해서는 측정이 불가능하다. 탄성과 속도는 성토 노반의 품질관리뿐만 아니라 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.

* 경희대학교 토목공학과, 박사과정, 정회원

** 경희대학교 토목공학과, 석사과정, 비회원

*** 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원

† 교신저자 : 경희대학교 토목건축대학, 교수, 정회원

E-mail : yjmok@khu.ac.kr

TEL : (031)201-2927 FAX : (031)202-8854

2. 기존 품질관리에 대한 고찰

2.1 철도노반의 현행 품질관리 기준

국내 철도노반의 경우 일반철도는 평판재하시험의 지지력계수 k_{30} 을 품질관리 기준으로 사용하여 상·하부 노반에 적용하고 있으며, 하부노반에 비해 상부노반의 기준이 엄격히 관리되고 있다(철도설계 기준 노반편, 2004). 고속철도공사 전문시방서 노반편(2006)에서는 고속철도의 경우 일반철도 기준보다 엄격하게 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 반복 평판재하시험으로 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 밀도 관리를 병행하고 있다.

2.2 일반적인 품질관리 기법

다짐 관련 품질관리 기법에는 흙의 다짐시험(KS F 2312), 현장의 모래치환법에 의한 들밀도 시험(KS F 2311), 방사선 들밀도 시험(RI, radioisotope), 평판재하시험(KS F 2310), 반복평판재하시험(DIN 18 134), 프루프 롤링(proof rolling) 시험 방법, 벤켈만 빔(benkelman beam)에 의한 변형량 시험 방법, 그리고 노상토 지지력비(CBR) 시험 등이 있다. 이중 프루프 롤링 시험과 벤켈만 빔 시험 기법은 도로의 노상토를 포함한 포장체에 주로 사용되는 방법이다.

가장 일반적인 다짐 성토 노반의 품질관리 기법은 다짐에 의한 성토체의 밀도 또는 다짐도를 관리하는 것이다. 다짐도에 의한 관리는 실내 다짐시험에서 획득한 최대 건조밀도의 일정 비율을 현장의 다짐도 관리 기준으로 결정하고, 현장에서 시공중에 획득한 성토체의 건조 밀도와 비교하여 품질을 관리하는 기법이다. 이러한 방법은 근본적으로 설계 입력 변수인 탄성계수와 전혀 무관한 지표를 사용하는 것이므로 역학적 개념의 일관성 있는 설계, 시공, 품질관리가 이루어 질 수 없다. 뿐만 아니라 현장의 건조 밀도를 결정하기 위한 들밀도 시험의 결과는 정확도 측면에서 신뢰성이 매우 떨어지고 암버력과 같이 입경이 큰 재료에 대해서는 시험이 불가능 하다. 이 때문에 방사선 들밀도 시험(RI)의 활용이 검토된 바 있지만 방사성 동위원소의 취급에 대한 국내의 까다로운 규제에 의해 실용성이 떨어진다. 또한 두 시험 모두 다짐 검측시 다짐이 완료된 노상의 일부를 손상시켜야 하는 단점도 있다.

현재 성토 노반의 품질관리에 적용하고 있는 평판재하시험은 다짐이 완료된 노상토 층의 일부에 손상을 가하거나, 시험자와 사용장비에 따른 결과의 일관성이 떨어지고, 암버력-토사노반과 같이 고속철도 노반에 주로 사용되는 재료에 대해서 적용이 불가능 하다. 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. 또한 시험 결과와 현장 노체 및 노상토의 다짐 효과 사이의 경험적 상관관계에 의존하여 국내의 광범위한 노반 재료에 대하여 일률적으로 적용하는데 문제점이 많다. 따라서 시공성을 고려하여 신속하고 효율적인, 그리고 노반의 역학적 거동에 합당한 평가 방법을 도입하여 다짐 성토 노반의 품질관리에 적용할 수 있는 새로운 품질관리 기법 및 방안이 절실히 필요하다.

LFWD(light falling weight deflectometer)는 자유낙하 시킨 추의 충격력을 하중판을 통해 지표면에 가하여 하중판 중앙에 위치한 속도계(geophone)로부터 처짐량과 탄성계수를 구하는 시험 장치이다(Abu-Farsakh et al., 2004). LFWD에 대한 연구는 계속 진행중이며 현재 철도 토공노반과 도로 노상토 등에서 탄성계수를 획득하는데 일부 사용되고 있다. 그러나 탄성과 시험과 같은 동적 시험으로 획득한 탄성계수에 비해 일반적으로 1/2-1/3의 크기를 보인다. 따라서 LFWD로부터 획득한 탄성계수의 변형률 크기, 하중주파수 등에 대한 연구를 보완하여 실내 다짐 기준을 정립해야 다짐관리에 적용가능

할 것으로 판단된다.

최근에는 지오게이지(geogauge)라는 지반 강성 측정 장비를 이용한 다짐 두께 효과 및 다짐횟수, 함수비 변화에 따른 강성 변화에 연구가 수행된 바 있고 만족할만한 민감도를 나타낸 것으로 보고되었다(김주형 등, 2008). 그러나 시험 결과의 대상이 아직은 제한적이고, 시험에서 측정되는 변형 저항 강도에 대하여 역학적 거동 특성을 좌우하는 변형률 크기, 지반의 응력 조건 등의 여러 요인들의 영향에 관한 연구가 미흡하다. 실제 현장의 다짐관리에 적용 가능하도록 지속적으로 연구가 수행되고 있는 실정이다.

노반 하부구조의 지지력을 신속하게 평가하는 방법으로 동적콘관입시험(dynamic cone penetration test)이 적용되었고 측정 결과인 관입속도(mm/blows)는 CBR값(Peshkin, 1994) 또는 평판재하시험로 유도한 탄성계수 등과의 상관관계(Kornard and Lachance, 2000)가 제시된 바 있다. 그러나 사용범위가 노반의 최대입경에 따라 제한적이고 근본적으로 탄성범위의 탄성계수를 직접 결정할 수 없는 단점이 있다.

조성호 등(2005)은 SASW 실험에 대하여 발전된 하드웨어 시스템과 가속화된 해석기법을 제안하여 간편하고 신뢰성을 갖는 현장 다짐지반의 강성평가 시스템을 개발하였고, 약 30여 도로 다짐 현장에 적용하여 적용성을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 현장 및 실내에서 수행된 역학적 시험결과를 토대로 탄성계수 개념의 품질관리 방안을 제안하고자 한다. 품질관리에 직접적으로 활용하고자 하는 지표는 탄성계수와 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라, 측정이 간편하고 결과의 신뢰성이 높은 P-파 속도(구속 압축파)를 이용한다.

3. 역학적 개념의 실내 다짐 기준 설정을 위한 강성 측정 기법

3.1 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 측정

탄성계수 개념을 도입하여 철도노반을 설계하면 시공 중에도 동일한 잣대인 탄성계수를 이용하여 품질관리가 이루어져야 타당하다. 따라서 본 연구에서는 탄성계수와 밀접한 관계가 있는 탄성파 속도를 도입하였고, 예비연구 단계에서는 실험실에서 벤더 엘리먼트(bender element)를 이용하여 함수비에 따른 전단파 속도의 변화를 측정하였다. 전단파 속도는 지반의 포화도와 무관하나 압축파 속도는 지하수위 아래에서 포화도에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 이러한 이유는 물은 전단변형을 유발할 수 없고 압축변형만을 유발하기 때문이다. 즉 전단파는 토립자를 통해서만 전파 되지만 압축파는 토립자 뿐만 아니라 토체내 공극수를 통해서도 전파될 수 있기 때문이다. 지반공학적인 관점에서는 지반의 포화도에 무관한 전단파가 압축파보다 중요시 된다. 본 연구의 초기 단계에는 이러한 측면을 고려하여 전단파 속도를 품질관리 지표로 사용하고자 하는 시도를 하였다.

충남 아산에 위치한 일반철도 노반에서 현장 탄성파시험을 수행하며 실내 다짐시험 및 전단파 측정에 필요한 시료를 채취해왔다. 수정 D다짐 방법(KS F 2312)으로 구한 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 19.44kN/m^3 이었고 최적함수비(OMC)는 9.76%였다.

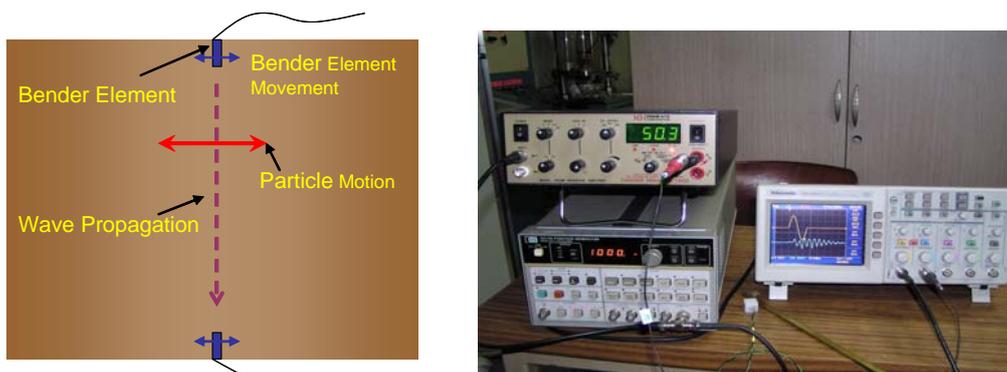
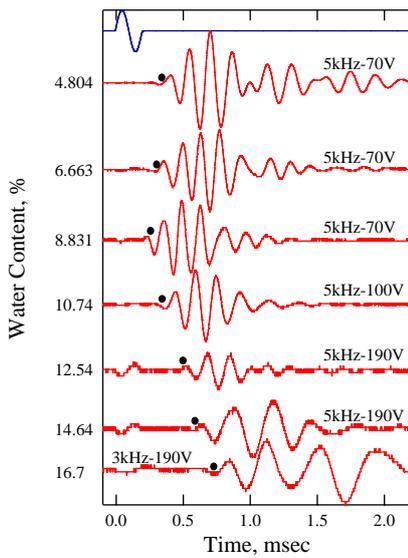
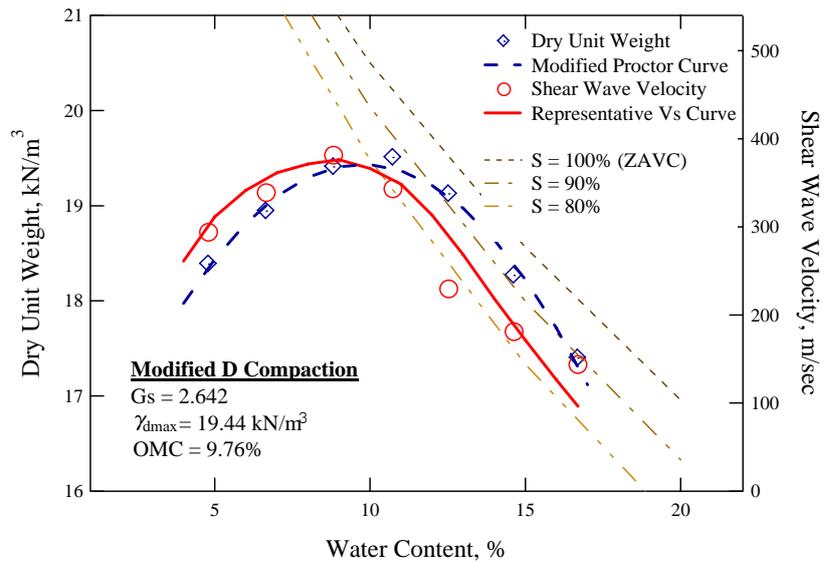


그림 1. 벤더 엘리먼트를 이용한 다짐 공시체의 전단파측정 개념도 및 전경



(a) 계측된 전단파 신호



(b) 건조단위중량 및 전단파 속도

그림 2. 함수비에 따른 다짐 공시체의 전단파 계측과 건조밀도 및 전단파 속도 (수정 D 다짐)

다짐시험과 동시에 다짐몰드에서 추출한 공시체의 양단에 그림 1과 같이 전단파를 발생시키고 발생된 전단파를 감지할 수 있도록 방향을 잘 맞추어 벤더 엘리먼트를 부착한다. 전단파 계측에 사용한 벤더 엘리먼트는 가로/세로 10mm의 정사각형 모양이다. 하나의 다짐 공시체에 전압과 주파수를 바꿔가며 전단파 신호를 측정하였다. 가진 주파수는 근접장 영향(near field effect)을 받지 않도록 충분히 크게 가하였으며 벤더 엘리먼트에 가하는 가진 주파수의 영향이 거의 없이 일정한 전단파 도달 시간을 보여주었다. 전단파의 도달 시점을 일관성 있게 결정하였을 때 주파수에 따른 전단파 속도는 5%이내의 차이만을 보였다. 다른 모든 공시체도 이와 동일하게 측정하여 발전자용 벤더 엘리먼트에 가한 전압과 주파수에 상관없이 전단파 도달시간이 일정함을 확인하였고, 그 중 판독하기 좋은 신호를 선별하여 그림 2(a)에 나타내었다. 벤더 엘리먼트를 이용하여 계측된 함수비에 따른 다짐 공시체의 전단파 속도는 그림 2(b)에 다짐곡선과 함께 나타내었다.

건조측에서는 함수비가 증가할수록 전단파 속도가 점차로 증가하며 최적함수비를 지나 다짐 공시체가 습윤측이 되면 전단파 속도가 급격히 작아졌다. 매우 흥미로운 사실은 전단파 속도와 함수비의 관계가 건조단위중량과 함수비의 관계와 유사한 변화 양상을 보인다는 것이며, 건조단위중량이 최대가 되는 최적함수비 이전에 전단파 속도가 제일 컸다. 예비시험 결과 전단파 속도가 함수비에 따라 민감하게 변화함을 확인하였고, 따라서 전단파 속도 또는 탄성과 속도가 다짐도를 평가할 수 있는 지표로서 활용될 수 있음이 입증되었다(박철수 등, 2006).

3.2 충격해머(Impulse Force Hammer)를 이용한 P-파 계측

앞서 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 속도가 함수비에 민감하게 변화하였고 다짐곡선 즉, 함수비에 따른 건조단위중량의 변화와 유사함을 확인하였다. 그러나 전단파 속도는 상대적으로 P-파 속도에 비해 계측이 어렵기 때문에 P-파 속도를 활용한 품질관리 방안을 모색하였다. P-파 속도 계측은 현장 및 실내 계측에 있어서 상대적으로 시험자 숙련도의 영향이 적고 계측이 간편하다.

또한 전단파 속도가 아닌 P-파 속도를 지표로 활용할 수 있는 중요한 이유는 현장의 다짐 성토 노반이 지하수위 위에 시공된다는 점이다. 따라서 다짐 성토 노반에서 계측되는 P-파는 지하수위의 영향을 받지 않고 토립자만의 역학적 특성치를 반영할 수 있다. 이처럼 현장에서 수월하게 P-파 계측이 수행될 수만 있다면 실내 지침을 설정하기 위한 탄성과 속도에는 P-파 속도가 더 유리하다. 실내에서는 철도노반 성토재료에 대한 다짐 공시체를 성형하여 P-파 속도를 계측하고, 현장에서 일반적으로 현업에서 지반조사에 활용하는 물리탐사 기법(seismic methods)중 하나인 직접도달파(direct-arrival) 기법을

적용한다면 손쉽게 역학적 인자를 이용한 품질관리가 가능할 것으로 예상하였다.

철도노반을 성토할 때 다짐 층의 두께는 30cm 내외로 두껍지 않고 여러 층으로 성토다짐을 한다. 시공단계에서 다짐관리의 대상이 되는 성토노반의 최상부층, 즉 시공중인 층은 다짐 에너지에 의해 횡방향의 구속응력은 수직 상재하중과 같거나 크다. D'Appolonia 등(1969)은 진동 다짐 로울러의 통과 횡수에 따른 정지토압계수(K_0)의 변화를 제시한 바 있고, 로울러 진행방향의 직각 방향 정지토압계수가 크게는 2 까지도 변화하였음을 보였다. 따라서 이와 같은 기존 연구(D'Appolonia et al., 1969)에 의한 역학적 근거를 바탕으로, 다짐 공시체에 대한 실내 P-파 계측시 별도의 구속압 시스템을 구비하지 않고도 직접 도달파 기법으로 평가된 현장의 P-파 속도 계측 결과와 직접비교가 가능할 것으로 판단된다. 다만 직접도달파 기법에서 계측된 P-파가 다짐 성토층의 어느 깊이까지를 반영하고 있는지를 규명하기 위한 추가 연구가 수행되어야 할 것이다. 추가 연구에 관련된 내용은 본 논문과 함께 나란히 발표된 논문을 참고하면 된다(Park et al., 2008).

실내 P-파 계측에 필요한 가진장치는 상용화된 충격해머(impulse force hammer, PCB 086C80)를 사용하였고 감지 센서는 1Hz-30kHz의 주파수 대역을 가진 가속도계(PCB 353B11)를 사용하여 몰드가 계측결과에 미치는 영향을 최소화 하였다. 충격해머와 가속도계의 자세한 제원은 암시편의 강성 계측에 대한 기 발표된 논문에 자세히 소개하였으므로 생략하도록 한다(목영진, 1999).

다짐도 평가의 잣대인 P-파 속도는 회복탄성계수 결정시 사용된 저변형률 영 탄성계수(E_{max} , small strain Young's modulus)와 밀접한 관계가 있다(박철수 등, 2008). 따라서 P-파 속도는 역학적으로 일관된 설계, 시공, 품질관리에 있어 매우 중요한 인자가 될 수 있다. 영 탄성계수는 비구속 압축파인 종파 속도(V_c , longitudinal wave velocity)로부터 결정되지만 P-파(구속 압축파) 속도와 포아송비를 이용하면 종파 속도 및 영 탄성계수의 결정이 가능하다.

그림 3은 충남 서천에 위치한 일반철도 다짐성토 노반 재료의 입도분포곡선이며, 현장에서 채취된 성토재료(양입도의 사질토)로부터 실내 시험을 통해 기본물성을 획득하였다(도표 1). 수정 D 다짐으로 실내 다짐시험을 수행하면서 함수비에 따라 각각 제작된 다짐 공시체에서 P-파 속도 계측을 병행하였다. 그림 4는 다짐 공시체에서 P-파 속도를 계측하는 전경과 계측된 대표적인 P-파 신호를 보여준다.

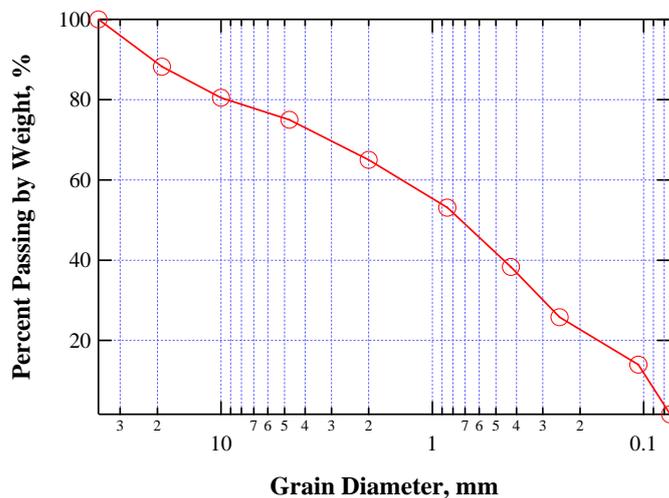


그림 3. 서천 일반철도 노반 성토 재료의 입도분포곡선

도표 1. 서천 일반철도 노반 성토 재료의 기본 물성치

USCS	Compaction Test		Sieve Analysis				PI, %	Specific Gravity
	OMC, %	γ_{dmax} , kN/m ³	D ₁₀ , mm	C _u	C _g	Percent Passing #40, %		
SW	10.72	18.24	0.096	14.8	0.70	38.3	1.6	2.68

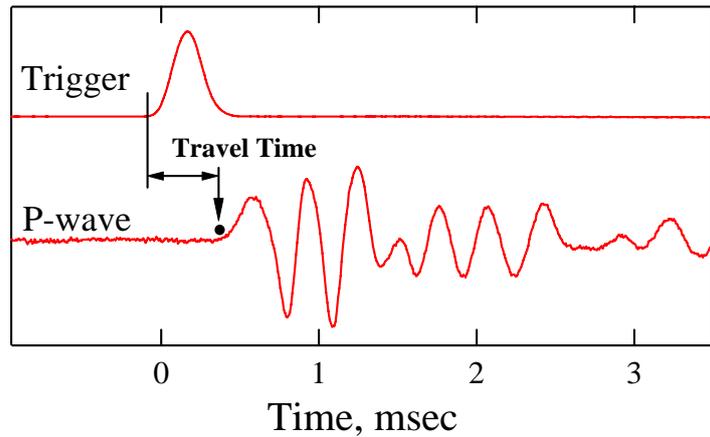
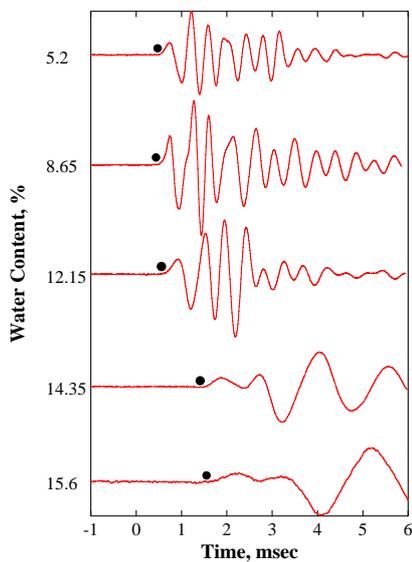
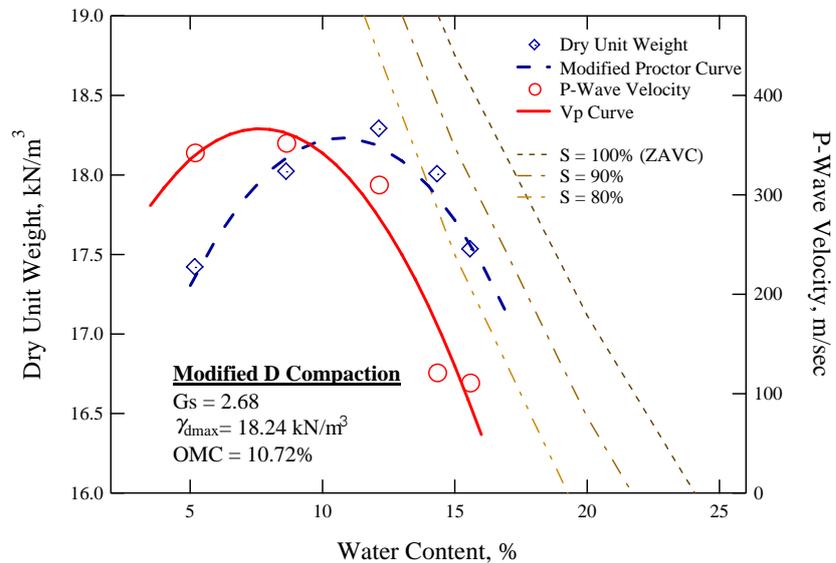


그림 4. 다짐 공시체에서 P-파 계측 전경과 계측된 대표적인 P-파 신호



(a) 계측된 P-파 신호



(b) 건조단위중량 및 P-파 속도

그림 5. 함수비에 따른 다짐 공시체의 P-파 계측과 건조밀도 및 P-파 속도 (수정 D 다짐)

그림 5(a)는 각각의 공시체에서 측정한 함수비에 따른 P-파 신호이다. P-파의 도달 시점은 계측된 신호의 진폭이 커지기 시작하는 시점이다. 함수비 8.65%까지의 다짐 공시체에서는 P-파 속도가 증가하다가 이후 함수비가 증가 할수록 P-파 속도는 감소하기 시작했다. 특히 함수비 14.35%의 다짐 공시체 이후 계측된 P-파 신호의 지배주파수(predominant frequency) 성분도 급격히 감소하였다.

그림 5(b)에서는 다짐곡선과 함수비에 따른 P-파 속도를 같이 도시하였다. 계측된 P-파 속도와 다짐 공시체의 밀도로부터 구속탄성계수(M, constrained modulus)를 획득하였고, 포아송비를 0.3으로 가정하여 영계수(E, Young's modulus)를 구하였다(도표 2). 측정된 영 탄성계수 및 P-파 속도는 다짐곡선의 건조축에서 가장 큰 값을 보였고 최적함수비 근처의 건조축에서부터 감소하기 시작했다. 즉, 함수비와 영계수의 관계는 다짐곡선과 유사한 형태를 보였고, 공시체의 강성(stiffness) 측면에서는 가장 큰 영계수가 건조축에 위치하였다. 이와 같은 경향은 다짐공시체에 대한 전단파 계측의 결과와 유사한 것이다. 도표 2에는 각 공시체의 건조단위중량과 P-파 속도, 구속탄성계수 그리고 영계수를 정리하였다. 본 연구의 실내 계측을 통해 시공중에 있는 철도노반의 품질관리에 필요한 실내 지침 잣대로 P-파 속도의 활용이 가능함을 확인하였다.

도표 2. 다짐 공시체에서 측정한 P-파 속도와 영계수

Water Content, %	Total Unit Weight, kN/m ³	Dry Unit Weight, kN/m ³	P-Wave Velocity, m/sec	Constrained Modulus, MPa	Young's Modulus ¹⁾ , MPa
5.2	18.3241	17.41864	342.1189	218.629	162.4101
8.65	19.57782	18.01901	351.7416	246.9122	183.4205
12.15	20.51075	18.28878	309.805	200.6732	149.0715
14.35	20.58727	18.00331	120.8156	30.632	22.7552
15.6	20.26648	17.53145	110.5966	25.26927	18.77145

1) 포아송비를 0.3으로 가정하여 계산된 값

4. 직접도달과 기법을 이용한 현장 다짐노반의 P-파 측정

본 연구에서는 충남 서천에 위치한 일반철도 건설 현장에서 다짐횟수에 따른 P-파 속도 측정 결과의 민감도를 분석하기 위한 시험성토를 수행하였다. 이 시험성토에서 직접도달과 시험으로부터 측정된 P-파 속도를 지표로 하여 현장의 품질관리에 적용이 가능한지 검토하였다.

4.1 현장 개요

성토 노반의 다짐 횟수에 따른 P-파 속도의 민감도 분석을 위해 성토가 완료된 노반에서 굴삭기를 이용하여 노반을 흩트려 놓은 후 소형 진동 다짐기(HCP-90)를 이용하여 재다짐을 실시하였다. 그림 1과 같이 폭 1.5m, 길이 6m, 깊이 0.6m로 굴착한 노반은 다시 되메우기를 하였고, 현장 다짐도를 다르게 하기 위해 1.5m 씩 길이 방향으로 4등분하여 소형 진동 다짐기의 통과 횟수가 다르도록 재다짐을 하였다. 다짐 횟수는 각각 1회, 3회, 5회, 7회 였고 재다짐은 두께 0.3m 씩 두 번 실시하였으나 직접도달과 시험을 두 번째 층의 다짐 횟수 1, 3, 5회 에서만 실시하였다.

본 실험에서는 현장에 조성한 시험성토의 크기와 실험의 편의를 위해 소형 진동 다짐기가 사용되었다. 다짐 에너지가 작은 소형 탬퍼(tamper)를 이용하여 다짐도에 따른 세밀한 노반 조성파 P-파 측정이 가능하도록 하였다.

4.2 다짐횟수에 따른 P-파 측정 결과

지표면 얇은 깊이의 지반 물성치를 측정하는 일상적인 지반조사 기법으로 직접 도달과 탐사(direct-arrival survey), 반사파 탐사(reflection survey), 굴절파 탐사(refraction survey)가 있다(Richart et al., 1970). 직접 도달과 탐사는 지표면 상부의 강성이 일정한 층(constant velocity)에서 지표면의 일직선상에 거리별로 속도계를 설치하고 같은 선상에서 충격하중을 가한다(그림 7). 성토 다짐 층이 두껍지 않고 거의 균질한 성토재료를 사용하기 때문에 직접 도달과 탐사 기법의 적용이 적절하다고 판단된다. 직접도달과 탐사 기법은 측정이 간편할 뿐만 아니라 현업에서 지반조사에 일상적으로 사용하는 탐사 기법이므로 역학적 다짐관리 방안의 현장 품질확인 기법으로 제시가 가능하다.

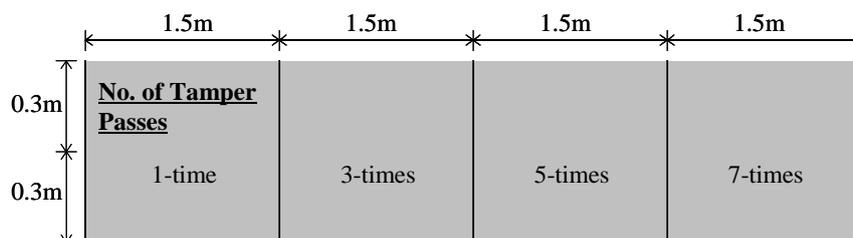


그림 6. 서천 일반철도 현장에 조성된 야외 토조 종단면 모식도

직접도달과 기법으로 결정된 탄성과 신호는 압축파(P-Wave), 전단파(S-Wave), 표면파(R-Wave, rayleigh wave)가 혼합되어 전파된다. 따라서 P-파 신호에 비해 상대적으로 늦게 도달하는 전단파 또는 표면파 신호는 먼저 도달하는 P-파 신호의 간섭으로 판별하기가 매우 어렵다. 가장 먼저 도달한 P-파 속도로부터 포아송비를 가정하여 전단파 및 표면파 속도의 결정이 가능하지만 본 연구에서는 P-파 속도만을 이용한다. 지표면에 설치된 각각의 속도계에서 측정된 초동 도달 시간과 충격하중 위치로부터의 이격거리(offset)를 이용하면 P-파 속도를 계산할 수 있다.

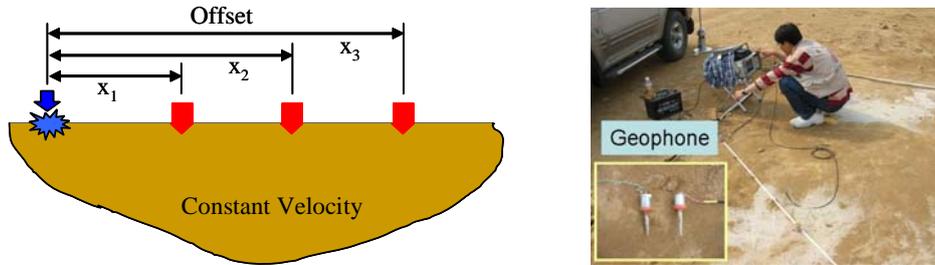


그림 7. 직접 도달과 기법 개념도(좌)와 다짐성토 노반의 P-파 측정 전경(우)

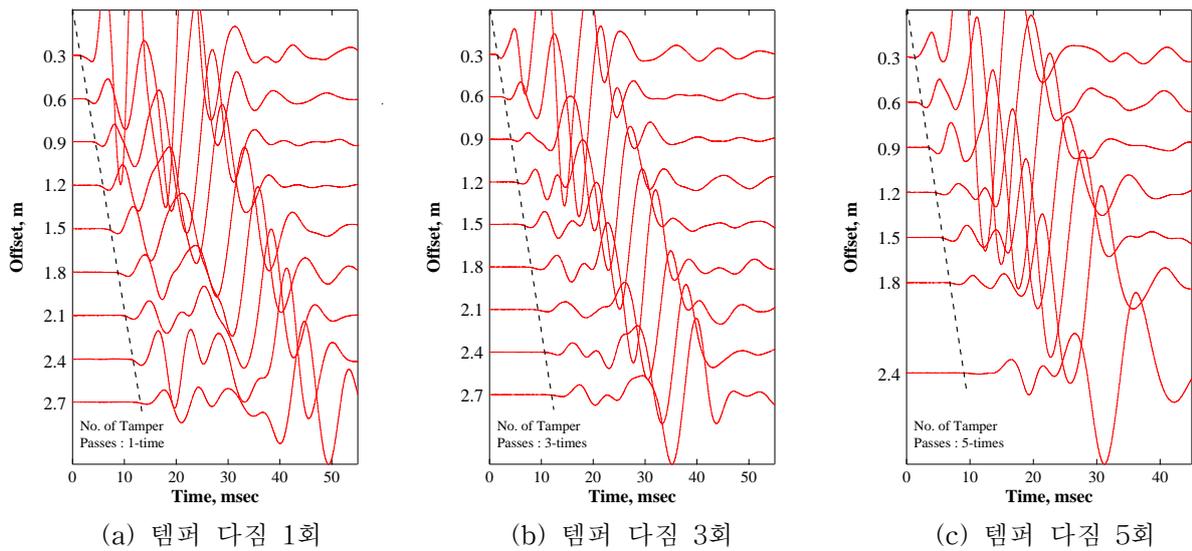


그림 8. 이격 거리별 도달 탄성과 신호

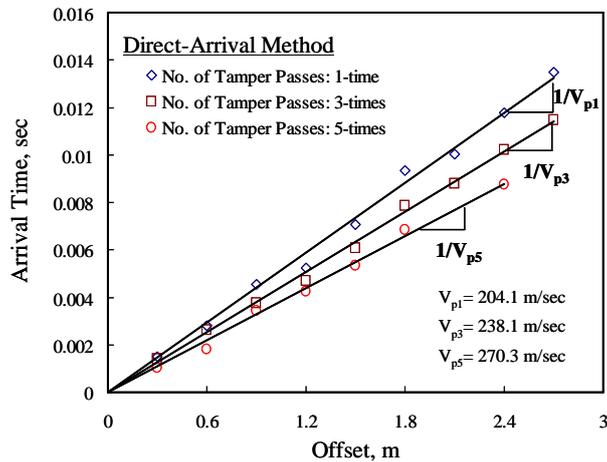


그림 9. 다짐 횟수에 따른 이격거리별 P-파 도달 시간과 P-파 속도

그림 8은 템퍼로 1, 3, 5회 다짐 성토한 서천의 시험 부지에서 직접 도달과 탐사를 이용하여 측정한 이격거리별 도달 P-파 신호이다. P-파 속도는 그림 9와 같이 측정된 도달 시간과 이격거리의 기울기로부터 역수를 취하여 계산한다. 다짐 횟수에 따라 계산된 P-파 속도의 크기가 각각 달라 다짐 성토 노반의 품질관리에 적용 가능한 것으로 확인되었다.

5. 현장 및 실내 강성 비교 및 품질관리 예비 방안

그림 10은 실내에서 측정한 함수비와 P-파 속도의 관계에 현장의 P-파 속도 측정 결과를 함께 도시한 것이다. 실내 다짐 공시체의 탄성과 속도(P-파 또는 S-파 속도)는 다짐곡선의 건조축에서 크게 측정되는 것이 확인되었다. 즉, 건조축에서 강성(stiffness)이 가장 컸다. 본 예비연구에서는 함수비에 따른 P-파 속도의 관계에서 다짐곡선의 최적함수비(OMC)에 해당하는 P-파 속도를 현장 다짐관리의 기준으로 결정하였다. 서천 시험 부지에서 채취한 시료는 수정 D다짐으로 다짐 성형 했을 때 최적함수비에 해당하는 P-파 속도가 325m/sec으로 평가되었다. 직접 도달과 탐사를 이용하여 현장에서 측정한 시험 부지의 P-파 속도는 모두 기준 속도를 만족하지 못했다. 시험 부지를 조성할 때 다짐기계로 사용된 템퍼가 실내 다짐시험의 다짐 에너지만큼을 크지 못했기 때문으로 판단된다. 현장과 실내의 P-파 속도를 비교함에 있어 다짐 시공시 적용되는 각종 다짐기계의 특성과 다짐에너지, 통과 횟수 등의 영향을 고려한 P-파 속도 다짐관리 기준이 지속적으로 연구되어야 하겠다.

현장 다짐관리의 기준으로 사용되는 P-파 속도는 그림 11에서 설명된바와 같이 설계단계의 입력변수인 회복탄성계수(E_R)를 결정하는데 필요한 물성치이다. 회복탄성계수의 결정에 필요한 영계수와 축변형률의 관계($E-\epsilon$)에서 저변형률 영역의 최대 영 탄성계수(E_{max})는 P-파 속도로부터 결정된 값이다. 또한 실내 다짐공시체에서 P-파 속도를 측정하여 현장 다짐관리의 기준으로 제시하고, 현장에서는 다짐성토의 P-파 속도를 측정하여 다짐관리를 하면 된다. 이와 같은 일련의 과정은 설계와 시공 및 관리에 있어 P-파 속도라는 하나의 잣대로 이루어진다. 실내 다짐 공시체와 현장 다짐 성토노반에 대하여 P-파 속도를 측정하고 이를 비교함으로써, 본 예비연구를 통해 제안된 다짐관리 방안의 가능성이 확인되었다.

6. 결 론

본 연구는 역학적 개념의 품질관리에 관한 예비연구로서, 기존의 비합리적인 다짐 성토 노반의 품질관리 방법을 탈피하고 탄성과 속도를 이용한 품질관리 방안을 제안하고자 한다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 실내 다짐시험에서 측정한 최적함수비(OMC)의 P-파 속도를 품질관리 기준으로 사용하여, 이 기준에 대한 현장 P-파 속도의 달성도로 품질관리 방안을 제시하였다.

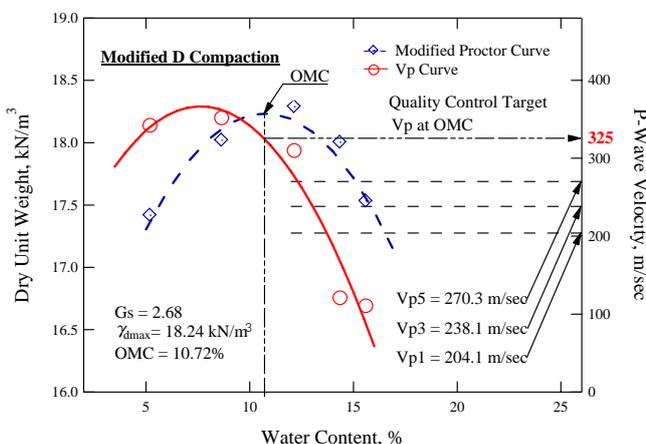


그림 10. 다짐 공시체와 현장에서 측정한 P-파 속도 비교

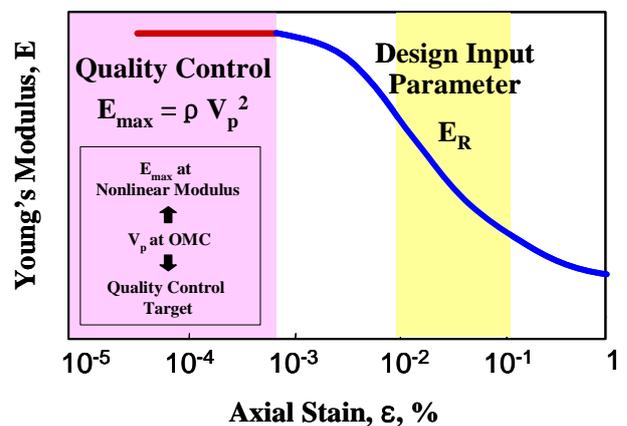


그림 11. E_R 결정과 다짐관리 기준에 일관성 있게 적용되는 P-파 속도

- 2) P-파는 전단파에 비해 측정이 수월하고 시험자의 숙련도에 영향이 작은 장점이 있다. 품질관리 기준 마련을 위한 실내 P-파는 가속도계가 부착된 인스트루먼트 충격해머를 사용하여 간편하고 일관성 있게 측정할 수 있다. 다짐시험과 동시에 제작된 다짐 공시체에 함수비 변화에 따른 P-파 속도를 측정하여 OMC에서의 P-파 속도를 품질관리 기준으로 설정한다.
- 3) 지하수위 아래에서는 공극수의 포화도에 따라 토립자만의 P-파 속도 측정이 어려울 수도 있다. 그러나 다짐성토 노반이 지하수위 위에 시공되기 때문에 현장의 품질관리 확인 지표로 P-파 속도를 사용하는데 문제가 없다. 현장의 P-파 속도 측정은 측정기법의 용이성과 사용장비의 적용성이 모두 고려되어야 한다. 따라서 현업에서 지반조사에 일반적으로 사용하는 물리 탐사 장비를 활용하여 직접도달파(direct-arrival) 기법을 통해 다짐 성토 노반의 P-파 속도를 측정하도록 제안한다.
- 4) 실내와 현장에서 측정된 탄성과 속도는 성토 노반의 품질관리뿐만 아니라 역학적 설계에 필요한 회복탄성계수를 결정하는데 사용되기 때문에 설계로부터 품질관리까지 전 과정이 탄성계수에 기반을 두고 일관성 있게 수행될 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김주형, 유완규, 김병일, 채광석(2008), "다양한 지반강성 평가장치를 이용한 현장 다짐도 예비 평가," 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.636-643.
2. 목영진(1999), "자유단 공진시험을 이용한 암석의 탄성계수 측정," 한국지진공학회 논문집, 제3권, 제4호, pp.95-100.
3. 박철수, 홍영표, 조성호, 목영진(2006), "암버력-토사 성토 노반의 다짐 관리 방안," 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.607-616.
4. 박철수, 최찬용, 최충락, 목영진(2008), "강화노반 및 케도하부노반 재료의 회복탄성계수," 한국철도학회 논문집, 제11권, 제1호, pp.54-60.
5. 조성호, 강태호, 권수안, 박병선, 이양로(2005), "현장 다짐지반의 강성평가를 위한 실용적인 SASW 시험 시스템의 개발," 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.3429-3432.
6. 한국고속철도건설공단(2006), "고속철도공사 전문시방서 노반편," 시방서.
7. 한국철도시설공단(2004), "철도설계기준 노반편," 시방서.
8. Abu-Farsakh, Y. M., Alshibli, K., Nazzal, D. M., and Seyman, E.(2004), "Assesment of In-Situ Test Technology for Construction Control of Base Courses and Embankments," Louisiana Transportation Research Center, pp.126.
9. 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.
10. Kornard, J. M., and Lachance, D.(2000), "Mechanical Properties of Unbound Aggregates from DCP and Plate Load Test," Proceedings of the Fifth International Conference on Unbound Aggregate in Roads, Nottingham, UK.
11. Park, C. S., Mok, Y. J.(2008), "A Methodology for Quality Control of Trackbed Fills Using Field and Laboratory P-Wave Measurements," Proceedings of the Spring Conference of KSR - International Session(CD-ROM).
12. Peshikin, D.(1994), "Pavement Analysis and Design Checks," National Highway Institute, U.S. Department of Transportation.
13. 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.