한국지반공학회논문집 제25권 9호 2009년 9월 pp. 45 ~ 55

압축파 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안 : I. 예비연구

A Methodology for Quality Control of Railroad Trackbed Fills Using Compressional Wave Velocities : I. Preliminary Investigation

박 철 수[1] Park, Chul-Soo　　목 영 진[2] Mok, Young-Jin
최 찬 용[3] Choi, Chan-Yong　　이 태 희[4] Lee, Tai-Hee

Abstract

The quality of railroad trackbed fills has been controlled by field measurements of density and bearing resistance 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. To overcome the defect, the compressional wave velocity was adopted as a control measure, in parallel with the advent of the new design procedure, and its measurement technique was proposed in the preliminary investigation. The key concept of the quality control procedure is that the target value for field compaction control is the compressional wave velocity determined at optimum moisture content using modified compaction test, and direct-arrival method is used for the field measurements during construction, which is simple and reliable enough for practice engineers to access. This direct-arrival method is well-suited for such a shallow and homogeneous fill lift in terms of applicability and cost effectiveness. The sensitivity of direct-arrival test results according to the compaction quality was demonstrated at a test site, and it was concluded that compressional wave velocity can be effectively used as quality control measure. The experimental background for the companion study (Park et al., 2009) was established through field and laboratory measurements of the compressional wave velocity.

요 지

철도 토공노반의 품질은 현장 밀도나 평판재하시험을 통해 관리되어 왔다. 현재 지반반력계수(k_{30})의 경우 일반철도와 고속철도의 설계기준으로도 사용되기 때문에 설계와 품질관리에서 일관성을 갖는다. 그럼에도 불구하고 지반반력계수(k_{30}), 또는 반복평판재하시험의 결과인 변형계수(E_{v2})와 변형계수의 비(E_{v2}/E_{v1}) 같은 설계인자에 대해 간편한 실내기준 설정 방법이 없어 설계과정의 치명적인 결함으로 남는다. 본 예비연구에서는 이러한 단점을 극복하고자 최근 개발된 철도 토공노반의 역학적-경험적 설계 방법에도 합당한 새로운 품질관리 기준으로 압축파 속도를 도입하였고 계측 기법을 제안하였다. 품질관리 방안의 핵심은 다짐시험과 병행하여 획득한 최적함수비에서의 압축파 속도를 현장의 품질관리 기준으로 설정하고 현장에서는 시공 중에 직접도달파 기법으로 품질을 확인하는 것이다. 직접도달파 기법은 현장의 기술자가 지표면 얕은 깊이의 균질한 층에서 간편하게 적용할 수 있고 저렴하며 결과의 신뢰성이 높다. 시험 부지에서 직접도달파 시험으로부터 계측한 압축파 속도가 다짐도에 따라 식별 가능한지 확인하였고, 품질관리 지표로서 압축파 속도를 효과적으로 적용할 수 있음을 입증하였다. 본 논문의 현장 및 실내 압축파 계측을 통해 동반논문(박철수 등, 2009)에서 수행할 실험적 토대를 마련하였다.

Keywords : Compressional wave velocity, Direct-arrival method, Modified compaction test, Railroad trackbed fills, Quality control

1 정회원, 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 박사후 연구원 (Member, Post-Doctoral Researcher, Vehicle and Track Research Dept., Korea Railroad Research Institute)
2 정회원, 경희대학교 토목건축대학 교수 (Member, Prof., Collage of Architecture and Civil Engrg., Kyunghee Univ.)
3 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Railroad Structure Research Dept., Korea Railroad Research Institute)
4 정회원, 경희대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Civil Engrg., Kyunghee Univ., suninhand@khu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

국내 지형 상 철도의 운행 환경은 교량, 터널, 토공 구간이 다양하게 조합되어 있다. 특히 토공노반은 지반공학적 측면에서 대단히 중요한 철도 궤도하부구조이며, 노반의 연약화와 과도한 침하, 그로 인한 궤도 틀림 등은 열차 주행의 안정성뿐만 아니라 지속적인 보수로 인한 경제성 등에 영향을 미친다. 근본적으로 수반될 수밖에 없는 이와 같은 문제들을 최소화하기 위해 기존의 경험적인 방법을 탈피하고 최초 설계단계부터 시공, 품질관리까지 역학적 개념을 도입한 접근 방법이 철도 분야에서 최근 활발하게 연구되고 있다(철도연, 2008). 도로 분야에서도 한국형 포장 설계법에 관한 연구가 수년간 지속적으로 수행되고 있는 실정이다(건기연, 2007).

최근, 간편하고 신뢰성 있게 회복탄성계수를 결정할 수 있다는 전제 하에 다층탄성모델을 이용한 역학적-경험적인 새로운 철도 토공노반 설계기법을 개발하였다. 실무자가 쉽게 회복탄성계수를 결정할 수 있는 대체기법은 동적물성치를 이용한다(박철수 등, 2008). 탄성파 속도 또는 탄성계수는 대표적인 동적물성치이며, 따라서 탄성파 속도를 철도 토공노반의 품질관리 기준으로 사용하는 것이 합리적이다. 본 논문과 적용성 검증에 관한 동반논문(박철수 등, 2009)은 역학적 개념의 설계법에 관한 연구의 일환으로, 다짐에 의한 토공노반의 품질을 보다 합리적인 방법으로 관리하여 설계와 일관성을 갖도록 하는데 목적이 있다. 본 예비연구를 통해 철도노반의 현행 품질관리 기준과 기존의 일반적인 품질관리 기법을 고찰하였고 역학적 개념 및 실용성 측면에서 간편하고 적용성이 뛰어난 새로운 품질관리 시험 기법을 제안하였다. 토공노반의 품질관리와 관련하여 핵심이 되는 인자는 탄성파 속도이며, 적용한 시험 기법으로는 현장의 품질관리 기준을 마련하기 위한 실내 탄성파 시험과 현장의 품질을 확인하기 위한 직접도달파 기법(direct-arrival method)이다.

2. 기존 품질관리에 대한 고찰

2.1 철도노반의 현행 품질관리 기준

국내 철도 토공노반에 대한 품질관리는 현장 밀도나 평판재하시험의 결과를 기준으로 관리하고 있다. 일반철도는 평판재하시험(KS F 2310)의 지반반력계수, k_{30}을 품질관리 기준으로 사용하여 상·하부 노반에 적용하고 있으며, 이와 더불어 다짐도가 최소 90-100% 이상되도록 다짐시험(KS F 2312), 들밀도 시험(KS F 2311)을 통해 밀도 관리를 병행하고 있다(철도설계기준(노반편), 2004). 한편 고속철도 노반의 품질관리에는 현장 밀도, 유럽 등에서 많이 사용하고 있는 반복평판재하시험(DIN 18 134)으로 획득한 변형계수(deformation modulus, E_{v2}) 및 하중재하횟수를 달리한 변형계수의 비(modulus ratio, E_{v2}/E_{v1})를 기준으로 적용하고 있다(고속철도공사 전문시방서(노반편), 2006). 지반반력계수 k_{30}의 경우에는 일반철도와 고속철도의 설계기준으로도 사용되기 때문에 설계와 품질관리에서 지표의 일관성은 가지고 있다.

그러나 설계단계에서 설계기준(k_{30}, 또는 E_{v2}와 E_{v2}/E_{v1})에 대해 간편한 실내기준 설정 방법이 없어 설계과정의 치명적인 결함이 된다. 실제로 일반철도와 고속철도의 설계기준이 되는 k_{30}은 시공 현장에서 평판재하시험을 통해 평가하거나 또는, 미리 가정하고 현장에서 확인하고 있다. 이런 단점은 실내 다짐시험의 건조밀도-함수비 관계와 현장 밀도 측정으로 보완하고 있다. 현재 성토노반의 품질관리에 적용하고 있는 평판재하시험은 주로 직경 30cm의 평판을 사용하여 지반반력계수 k_{30}, 또는 E_{v2}와 E_{v2}/E_{v1}을 평가한다. 평판의 크기가 너무 작기 때문에 암버럭-토사 노반과 같이 고속철도 노반에 주로 사용되는 입경 30cm의 재료에 대해서 신뢰성 있게 평가하기 어렵다. 또한 소요시간이 오래 걸리고 높은 시험 숙련도를 필요로 하여 현장에서 다짐관리 기법으로 적용하기에 까다로운 점이 많다.

2.2 일반적인 품질관리 기법

일반적인 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.

밀도에 의한 관리는 실내 다짐시험에서 획득한 최대

건조밀도의 일정 비율을 현장의 관리 기준으로 결정하고, 현장에서 시공 중에 획득한 성토체의 건조밀도와 비교하여 품질을 관리하는 기법이다. 건조밀도와 직접적인 관계가 있는 간극비는 설계 입력 변수인 탄성계수에 영향을 미치는 인자이지만 현장의 건조밀도를 결정하기 위한 들밀도 시험의 결과가 정확도 측면에서 신뢰성이 다소 떨어지고 암버럭과 같이 입경이 큰 재료에 대해서는 시험이 불가능하다. 이 때문에 방사선 들밀도 시험(RI)의 활용이 검토된 바 있지만 방사성 동위원소의 취급에 대한 국내의 까다로운 규제로 인해 실용성이 떨어진다. 또한 두 시험 모두 다짐 검측 시 다짐이 완료된 노상의 일부를 손상시켜야 하는 단점도 있다.

현재 철도 토공노반의 품질관리에 적용하고 있는 평판재하시험은 다짐이 완료된 노상토 층의 일부에 손상을 가하거나, 시험자와 사용장비에 따른 결과의 일관성이 떨어지고, 고속철도노반에 주로 사용되는 암버럭-토사 혼합 재료에 대해서 적용이 불가능하다. 현장에서 반복 평판재하시험을 통해 탄성계수(E_{v2})를 추정할 수 도 있지만 소요시간이 오래 걸리고 정확도가 떨어지며 높은 시험 숙련도를 필요로 하여 현장에서 품질관리 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.

LFWD(light falling weight deflectometer)는 자유낙하시킨 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 진행 중이며 현재 철도 토공노반과 도로 노상토 등에서 탄성계수를 획득하는데 일부 사용되고 있다. 그러나 탄성파 시험과 같은 동적 시험으로 획득한 저변형률 영역의 탄성계수에 비해 일반적으로 1/2-1/3의 크기를 보인다(Taljaard, 2006; Steyn et al., 2007). 따라서 LFWD로부터 획득한 탄성계수의 변형률 수준, 하중주파수 등에 관한 연구를 보완하고, 이를 바탕으로 다짐 현장의 품질을 평가하기 위한 실내 시험 방안을 정립해야 다짐관리에 적용가능 할 것으로 판단된다.

최근에는 지오게이지(geogauge)라는 탄성계수 측정 장비를 이용하여 다짐 두께 효과, 다짐횟수 및 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화에 대한 연구가 현재 지속적으로 수행되고 있고 만족할만한 민감도를 나타낸 것으로 보고되었다(김주형 등, 2008). 그러나 시험 결과의 대상이 아직은 제한적이고, 시험에서 측정되는 변형 저항강도로부터 계산된 탄성계수에 대하여 변형률 수준, 지반의 응력 조건 등 여러 요인들의 영향에 관한 연구가 미흡한 실정이다.

노반 하부구조의 지지력을 신속하게 평가하는 방법으로 동적콘관입시험(DCPT, dynamic cone penetration test)이 적용되었고 계측 결과인 관입속도(mm/blows)는 CBR값(Peshkin, 1994) 또는 평판재하시험으로 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 탄성계수 평가 시스템을 개발하였고, 약 30여 도로 다짐 현장에 적용하여 적용성을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 시공성을 고려하여 신속하고 효율적인, 그리고 역학적 개념의 토공노반 품질관리를 위해 탄성파 속도를 품질관리 지표로 활용하고자 하였다. 탄성파 속도는 탄성계수와 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라, 탄성파 속도를 계측하기 위해 본 연구에서 제안할 시험기법은 계측이 간편하고 시험자의 숙련도에 관계없이 일관된 결과를 보여 신뢰성이 높다.

3. 실내 품질관리 기준 설정을 위한 탄성파 계측 기법

3.1 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 계측

탄성파 속도를 품질관리 지표로 도입하기 위해 벤더 엘리먼트(bender element)를 이용한 실내 예비연구를 수행하였다. 예비연구 단계에서 다짐 공시체에 벤더 엘리먼트를 설치하고 함수비에 따른 전단파 속도의 변화를 측정하였다. 본 연구의 초기 단계에는 지반공학적 관점에서 중요시되는 전단파 속도를 품질관리 지표로 사용하기 위한 시도를 하였다.

충남 아산에 위치한 일반철도노반에서 현장 탄성파 시험을 수행하며 실내 다짐시험(표준 B 다짐, 수정 C 다짐, 수정 D다짐) 및 전단파 계측에 필요한 시료를 채

취해왔다. 다짐시험 후 몰드가 전단파 계측에 미치는 영향을 피하기 위해 함수비에 따라 제작한 각각의 공시체를 다짐몰드에서 추출하였고, 그림 1의 계측 전경과 같이 공시체의 양단에 벤더 엘리먼트를 부착하여 전단파 속도를 계측하였다. 전단파 계측에 사용한 벤더 엘리먼트의 크기는 10mm×10mm의 정사각형 모양이다. 하나의 다짐 공시체에 전압과 주파수를 바꿔가며 전단파 신호를 측정하였고, 그림 2(a)와 같이 벤더 엘리먼트에 가하는 가진 주파수에 관계없이 일정한 전단파 도달시간을 보여주었다. 전단파의 도달 시점을 일관성 있게 결정하였을 때 주파수에 따른 전단파 속도는 5%이내의 차이만을 보였고, 그 중 판독하기 좋은 신호를 선별하였다. 벤더 엘리멘트를 이용하여 계측된 대표적인 다짐 공시체의 함수비에 따른 전단파신호는 그림 2(b)와 같다. 계측된 전단파 신호로부터 계산된 함수비에 따른 전단파 속도는 그림 3에 다짐곡선과 함께 도시하였다. 두드러진 경향은 다짐 방법에 관계없이 모든 경우에서 최적함수비 이전의 건조측에서 전단파 속도가 가장 큰 값을 보이고 최적함수비를 지나 다짐 공시체가 습윤측이 되면 전단파 속도가 급격히 작아진다는 점이다. 또한 습윤측에서 계측된 전단파 신호의 주파수 성분은 저주파수가 지배적으로 나타났다. 이처럼 건조측과 습윤측의 결과가 다른 원인은 재료의 취성(brittle)과 포화도에 따른 모관흡수력(matric suction)의 영향 때문인 것으로 추측된다. 한편 다짐에너지가 같은 수정 C다짐과 수정 D다짐은 거의 비슷한 전단파 속도 변화를 보여주고 있으며, 다짐에너지가 작은 표준 B다짐의 전단파속도는 상대적으로 작은 전단파속도를 보이고 있다. 실내 전단파 계측으로부터 확인된 의미 있는 사실은 전단파 속도와 함수비의 관계가 건조밀도와 함수비의 관계와 유사한 변화 양상을 보인다는 것이다. 예비시험 결과 전단파 속도가 함수비에 따라 민감하게 변화함을 확인하였고, 따라서 전단파 속도, 나아가 탄성파 속도가 토공노반의 품질관리 지표로서 활용될 가능성을 입증하였다.

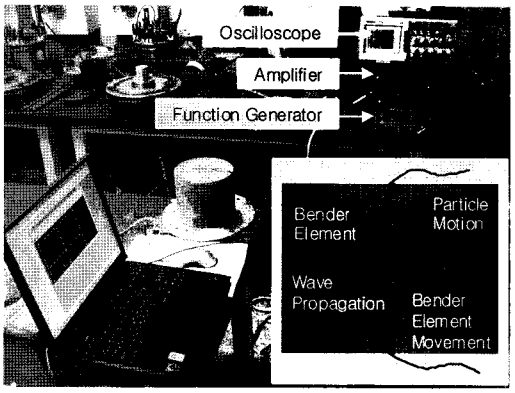
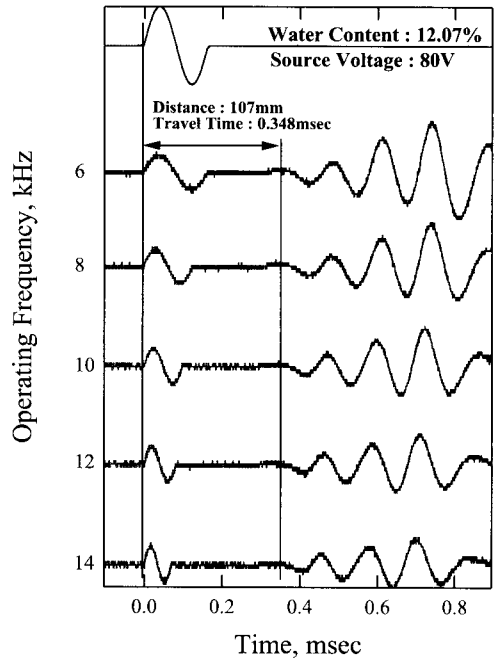
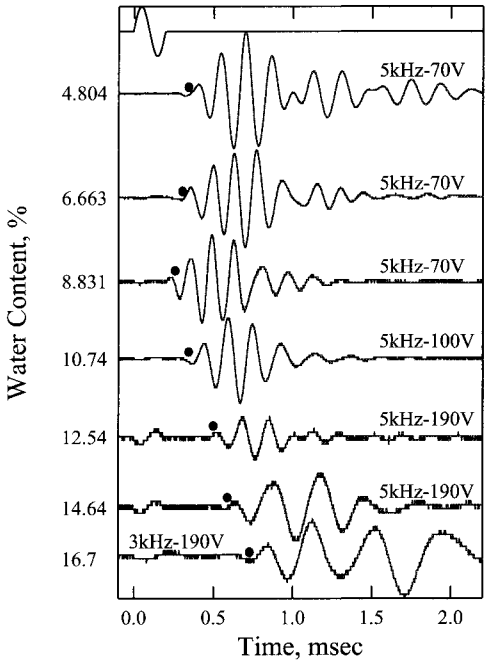


그림 1. 벤더 엘리먼트를 이용한 다짐 공시체의 전단파계측 전경

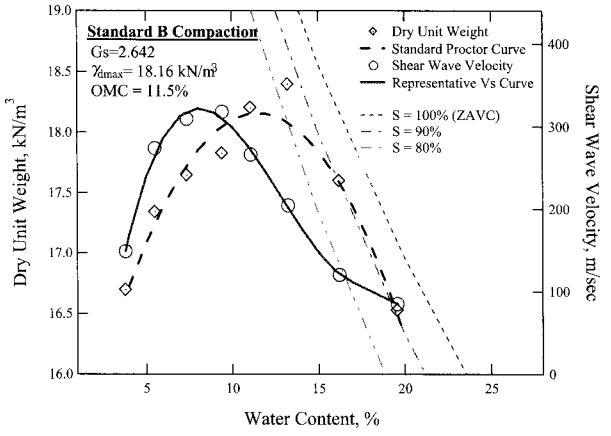


(a) 가진주파수에 따른 전단파 신호(수정 C 다짐)

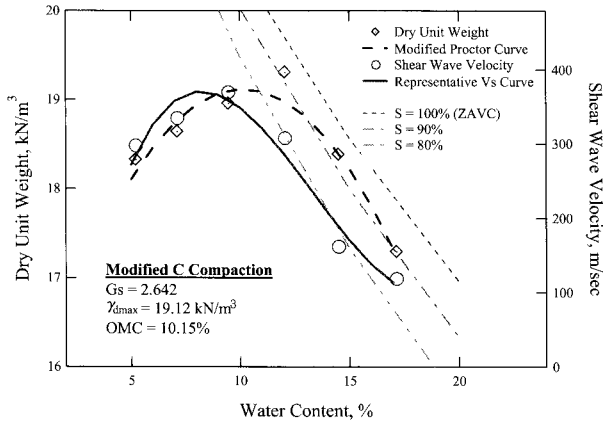


(b) 함수비에 따른 전단파 신호(수정 D 다짐)

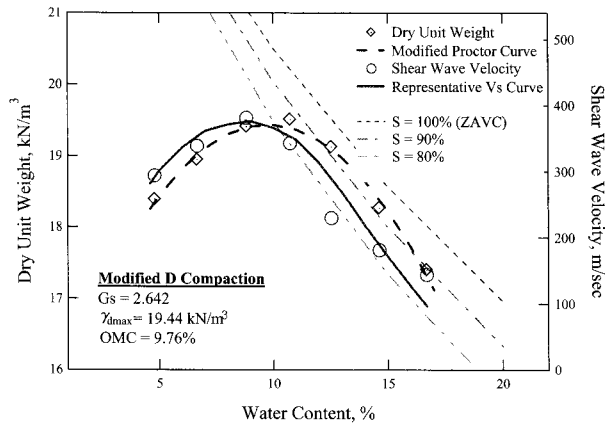
그림 2. 벤더 엘리먼트를 통해 획득한 대표적인 전단파 신호



(a) 표준 B 다짐



(b) 수정 C 다짐



(c) 수정 D 다짐

그림 3. 함수비에 따른 다짐 공시체의 건조밀도 및 전단파 속도

3.2 충격해머(Impulse Force Hammer)를 이용한 압축파 계측

앞서 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 속도가 함수비에 민감하게 변화하였고 다짐곡선 즉, 함수비에 따른 건조밀도의 변화와 유사함을 확인하였다. 그러나 전단파 속도는 상대적으로 압축파 속도에 비해 계측이 까다롭기

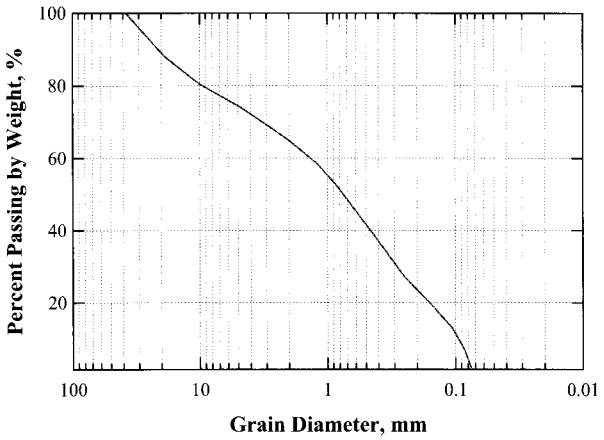


그림 4. 서천 일반철도 토공노반 재료의 입도분포곡선

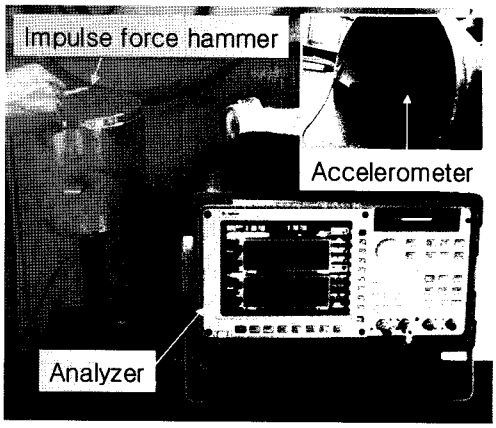
때문에 압축파 속도를 활용한 품질관리 방안을 모색하였다. 품질관리 지표로서 압축파 속도의 활용이 가능한 근거는 현장의 다짐 토공노반이 지하수위 위에 시공된다는 점이다. 따라서 토공노반에서 계측되는 압축파는 지하수위의 영향을 받지 않고 토립자만의 역학적 특성을 반영할 수 있다. 이처럼 현장에서 수월하게 압축파를 계측할 수 있다면 실내 품질기준으로도 상대적으로 계측이 까다로운 전단파 속도에 비해 압축파 속도가 더 유리하다.

본 연구에서는 현장의 품질을 확인하기 위해 일반적으로 지반조사에 활용하는 물리탐사 기법중 하나인 직접도달파 기법을 도입하였고, 이를 이용해 현장의 압축파 속도를 계측하고자 한다. 직접도달파 기법의 적용성 및 다짐도에 따른 민감도 확인은 이어질 4장에서 설명할 것이다. 본 절에서는 다짐 공시체에 대한 압축파 계측을 통해 현장의 품질확인 지표에 상응하는 실내 품질기준 결정에 관하여 연구하였다.

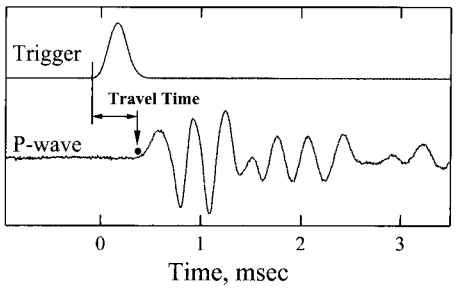
실내 압축파 계측은 앞서 소개한 전단파 계측과 달리 다짐 몰드 안에 공시체를 둔 상태로 수행하여, 다짐 몰드에 의해 현장의 얕은 지반의 횡방향 구속을 실내에서도 유사하게 보장하고자 하였다. 이는 실제 현업에서 적용할 때 계측을 보다 간편하게 수행할 수 있도록 하기 위함이다. 또한 다짐 공시체에 대한 압축파 계측(V_P)에서 압축파의 전파 방향 및 입자 운동을 감안하면 몰드가 계측 결과에 미치는 영향이 미미 할 것이라고 판단하였다. 이와 같은 목적에 부합하도록 무게가 작고 해머 끝이 날카로워 고주파수의 응력파를 발생시킬 수 있는 상용화된 충격해머(impulse force hammer, PCB 086C80)를 가진 장치로 사용하였고, 1Hz-30kHz의 주파수 대역을 가진 가속도계(PCB 353B11)를 감지 센서로 사용하였다. 다짐 공시체의 압축파 계측 시 사용된 기록장치는

동적신호분석기(Agilent 35670A)였으며, 충격해머와 가속도계의 구체적인 사양은 다음과 같다.

그림 4는 충남 서천에 위치한 일반철도 토공노반 재료의 입도분포곡선이며, 현장에서 채취된 성토재료(양입도의 사질토)로부터 실내 시험을 통해 기본물성을 획득하였다(표 1). 수정 D 다짐으로 실내 다짐시험을 수행하면서 함수비에 따라 각각 제작된 다짐 공시체에서 압축파 속도 계측을 병행하였다. 그림 5는 다짐 공시체에

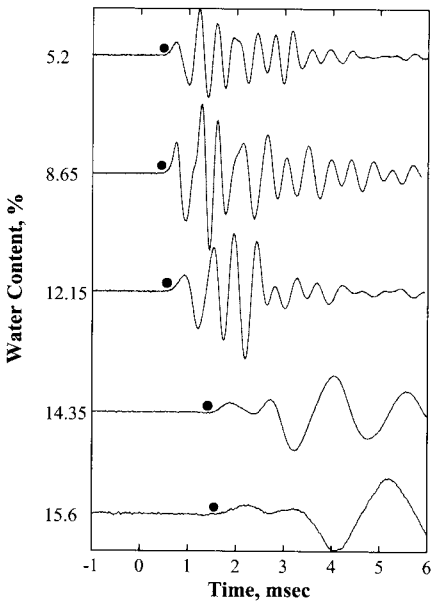


(a) 충격해머를 이용한 압축파 계측 전경

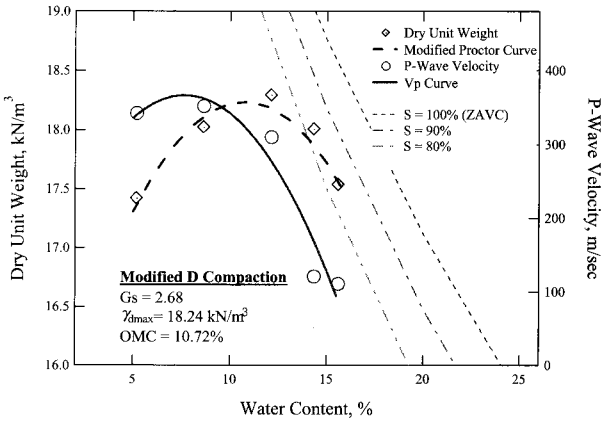


(b) 대표적인 압축파 신호

그림 5. 다짐 공시체에서 압축파 계측



(a) 계측된 압축파 신호



(b) 건조단위중량 및 압축파 속도

그림 6. 함수비에 따른 다짐 공시체의 압축파 계측과 건조밀도 및 압축파 속도(수정 D 다짐)

표 1. 충격햄머와 가속도계 주요 사양

Impulse Force Hammer		Accelerometer	
Freq. Range	15kHz	Sensitivity	5mV/g
Sensitivity	22.5mV/N	Freq. Range	1Hz-30kHz
Resonant Freq.	100kHz	Resonant Freq.	95kHz
Hammer Mass	1.25g	Sensing Element	quartz
Head Dia.	0.63cm	Size	7.9mmϕ×10.9mm
Tip Dia.	0.25cm	Weight	2.0g
Length	96.5cm		

서 압축파 속도를 계측하는 전경과 계측된 대표적인 압축파 신호를 보여준다.

그림 6(a)는 각각의 공시체에서 측정한 함수비에 따른 압축파 신호이고, 그림 6(b)는 다짐곡선과 함수비에 따른 압축파 속도를 함께 도시한 것이다. 압축파의 도달시점은 계측된 신호의 진폭이 커지기 시작하는 점이다. 함수비 6.65%까지의 다짐 공시체에서는 압축파 속도가 증가하다가 이후 함수비가 증가 할수록 압축파 속도는 감소하기 시작했다. 특히 건조측 또는 최적함수비 근처의 다짐 공시체에서 계측한 압축파 신호는 취성을 보이며 고주파수가 지배적으로 나타났지만 최적함수비보다 큰 함수비 14.35%의 다짐 공시체부터는 계측된 압축파 신호의 파장이 커지면서 지배주파수가 현저히 작아지는 특성을 보였다. 함수비와 압축파 속도의 관계는 다짐곡선과 유사한 형태를 보였고 가장 큰 압축파 속도가 건조측에 위치하였다. 이와 같은 경향은 다짐 공시체에 대한 전단파 계측의 결과와 유사한 것이다. 표 2에는 각 공시체의 건조밀도와 압축파 속도, 구속탄성계수(M, constrained modulus) 그리고 영탄성계수(E, Young's modulus)를 정리하였다.

철도 토공노반의 다짐 층 두께는 30cm 내외로 두껍지 않고 여러 층으로 성토 한다. 시공단계에서 다짐 중에 있는 층의 횡방향 응력은 다짐 에너지에 의한 수직응력과 같거나 크다. D'Appolonia 등(1969)은 진동 다짐롤러의 통과 횟수에 따른 정지토압계수(K_0)의 변화를 제시한 바 있고, 롤러 진행방향의 직각 방향 정지토압계수가 크게는 2 까지도 변하였음을 보였다. 즉, 다짐 층 두께에 해당하는 얕은 깊이의 잘 다져진 지반을 실내에서 모사할 때, 다짐 공시체에 별도의 구속압을 가하지 않고도 다짐 에너지와 몰드에 의한 횡방향 구속효과 및 공시체 내의 잔존 응력만으로도 현장의 조건을 유사하게 모사할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 다짐 몰드 안에서의 구속응력이 시공 중인 각 층의 표면 구속응력과 거의 동등하다고 가정하고, 공기 중에서 계측한 다짐 공시체의 실내 압축파 속도와 직접도달파 기법으로 평가된 현장의 압축파 속도를 직접 비교할 수 있다. 다만, 직접도달파 기법으로 계측한 현장의 압축파가 실내의 계측 결과와 직접 비교 될 만큼 해당 성토층을 충분히 대표하고 있는지는 동반논문에서 규명하도록 한다.

4. 직접도달파 기법을 이용한 현장 토공노반의 압축파 계측

앞서 실내 탄성파 계측을 통해 철도 토공노반의 품질관리에 필요한 실내 지침 기준으로 압축파 속도의 활용이 가능함을 확인하였다. 본 장에서는 현장의 품질관리 지표로 제안한 압축파 속도 계측에 직접도달파시험 적용 가능성을 검토하고자 한다. 이를 위해 충남 서천에 위치한 일반철도 토공노반 건설 현장에서 시험 부지를 조성하였고, 직접도달파 시험으로 계측한 압축파 속도가 다짐횟수에 따라 식별 가능한 차이를 보이는지 민감도를 확인해보았다.

4.1 현장 개요

토공노반의 다짐 횟수에 따른 압축파 속도의 민감도 분석을 위해 성토가 완료된 노반에서 굴착기를 이용하

표 2. 서천 일반철도 토공노반 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, %	Percent Passing #200, %		
SW	10.72	18.24	0.096	14.8	0.70	38.3	1.6	2.65	2.68

표 3. 다짐 공시체에서 계측한 압축파 속도(V_P)와 영계수

Water Content, %	Total Unit Weight, kN/m^3	Dry Unit Weight, kN/m^3	Comp. 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

Note: 1) Assumed the Poisson's ratio to be 0.3

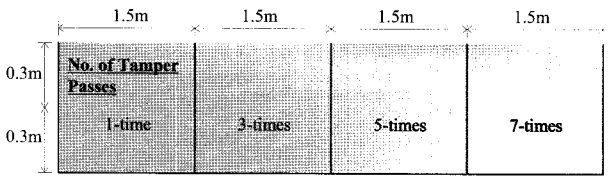


그림 7. 서천 일반철도 현장에 조성된 야외 시험 종단면 모식도

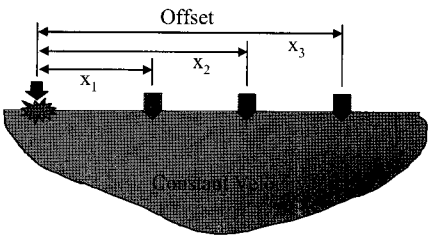
여 노반을 흩트려 놓은 후 재다짐을 실시하였다. 본 실험에서는 현장에 조성한 시험성토의 크기와 실험의 편의를 감안해 소형 진동 다짐기(HCP-90)를 사용하였고, 다짐기의 통과 횟수에 따라 세밀하게 노반 조성하고 압축파를 계측하였다. 완성된 단면은 그림 7과 같으며 크기는 폭 1.5m, 길이 6m, 깊이 0.6m이었다. 굴착된 노반을 다시 되메우기할 때는 현장 다짐도를 다르게 하기 위해 1.5m씩 길이 방향으로 4등분하여 소형 진동 다짐기의 통과 횟수가 다르도록 재다짐을 하였다. 다짐 횟수는 각각 1회, 3회, 5회, 7회였고 재다짐은 두께 0.3m씩 두 번 실시하였으나 직접도달파 시험을 두 번째 층의 다짐 횟수 1, 3, 5회에서만 실시하였다.

4.2 다짐횟수에 따른 압축파 계측 결과

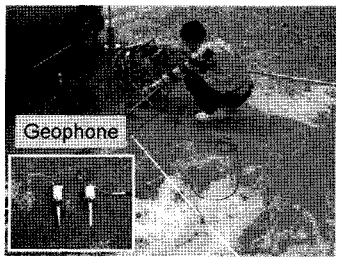
지표면 얕은 깊이의 지반 물성치를 측정하는 일상적인 지반조사 기법으로는 직접도달파 탐사(direct-arrival method), 반사파 탐사(reflection survey), 굴절파 탐사(refraction survey)가 있다(Richart et al., 1970). 특히 직접도달파 탐사는 지표면 상부의 탄성파 속도가 일정한 층(constant velocity)에서 지표면의 일직선상에 거리별로 속도계를 설치하고 같은 선상에서 충격하중을 가한다(그림 8). 다짐 층이 두껍지 않고 거의 균질한 성토재료를 사용하기 때문에 직접도달파 탐사 기법의 적용이 적절하다고 판단하였다. 또한, 계측이 간편하고 다수의 건설관련 회사에서 이미 지반조사 목적으로 계측 장비를 보유하고 있기 때문에 현장 수급이 원활하다는 장점이 있다.

직접도달파 시험으로 결정된 탄성파 신호는 압축파, 전단파, 표면파가 혼합되어 전파된다. 계측되는 탄성파 신호의 가장 첫 번째 도달한 시점을 압축파의 도달 시점으로 결정하고 현장의 품질확인 지표로 사용하였다. 이렇게 결정한 압축파 속도(V_P)는 지표면의 구속이 대기중에 노출된 자유조건이기 때문에 지중의 구속된 상태에서 전파되는 압축파 속도보다 조금 느릴 수도 있다. 그러나 이와 같은 조건에서 획득한 현장의 압축파 속도는 거의 동등한 구속 조건의 실내 기준 즉, 실내 다짐 공시체의 압축파 속도(V_P)와 비교하기 때문에 구속조건에 의한 압축파 속도의 미세한 차이는 무시해도 무방하다. 압축파 신호에 비해 상대적으로 늦게 도달하는 전단파 또는 표면파 신호는 먼저 도달하는 압축파 신호의 간섭으로 판별하기가 어려울 수도 있다. 가장 먼저 도달한 압축파 속도로부터 포아송비를 가정하여 전단파 및 표면파 속도의 결정이 가능하지만 본 연구에서는 압축파 속도만을 이용한다. 지표면에 설치된 각각의 속도계에서 계측된 초동 도달시간과 충격하중 위치로 부터의 이격 거리를 이용하면 압축파 속도를 계산할 수 있다.

탄성파를 발생시키는 가진 장치로는 소형 망치를 사용하여 지표면을 수직 방향으로 타격하였고, 감지기는 수직 방향으로 민감한 속도계(4.5Hz, Mark product L-10B)를 사용하였다. 감지기에는 스파이크를 부착하여 성토지반 표면에 완전히 밀착되도록 하였고, 감지기 설치 위치를 동일 측선에서 거리를 일정하게 증가시키면서 시험을 수행하였다. 그림 9는 소형 진동 다짐기로 1, 3, 5회 다짐 성토한 서천의 시험 부지에서 직접도달파 시험을 이용하여 계측한 이격 거리별 도달 탄성파 신호이다. 모든 계측 신호가 압축파의 도달 시점을 의미하는 미세한 초동 이후 진폭이 크게 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과는 가진 방향과 속도계의 감지 방향이 압축파에 비해 전단파에 더 민감하도록 설정되었기 때문이

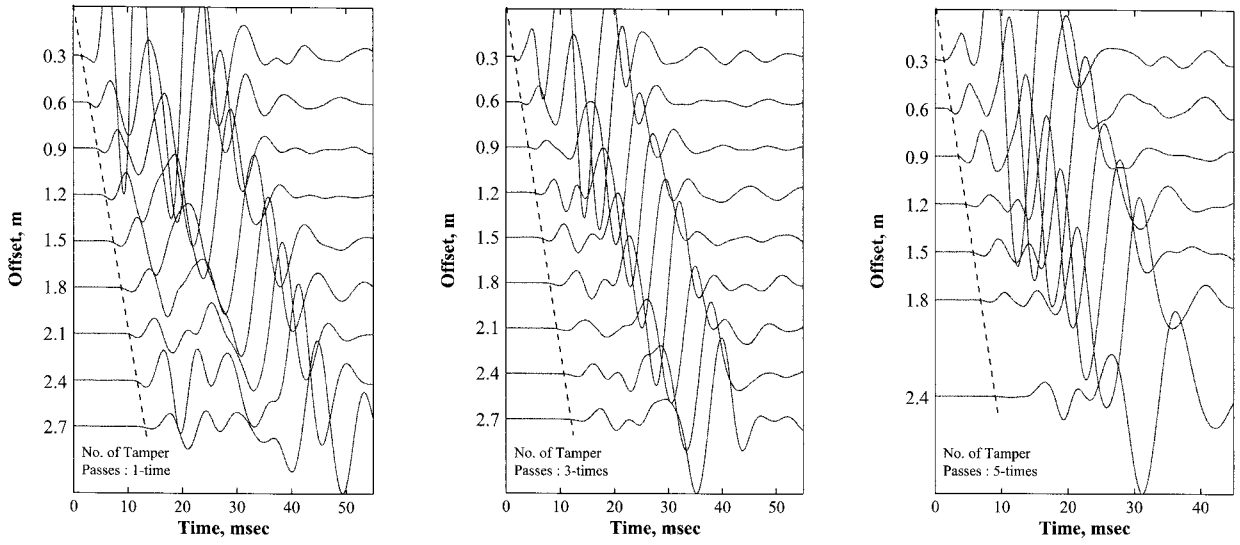


(a) 직접도달파 기법 개념도



(b) 압축파 계측 전경

그림 8. 직접도달파 기법 개념도와 다짐 토공노반의 압축파 계측 전경



(a) 1회 다짐 (b) 3회 다짐 (c) 5회 다짐

그림 9. 이격 거리별 도달 탄성파 신호

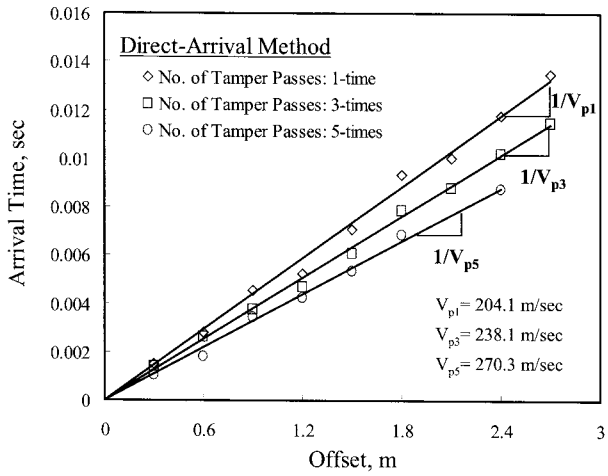


그림 10. 다짐 횟수에 따른 이격 거리별 압축파 도달시간과 압축파 속도

다. 본 논문의 예비연구를 검증하기 위한 동반논문(박철수 등, 2009)에서는 현장에서 압축파를 계측할 때 압축파의 발생과 계측이 원활하도록 수평방향 속도계를 사용하여 수평방향으로 타격하였다. 그림 9에서 점선으로 표시한 부분은 감지기의 이격 거리가 증감함에 따라 각 신호의 압축파 도달 시점이 증가하는 것을 나타낸 것이다. 또한 다짐 횟수 별로 비교해보면 다짐 횟수가 증가함에 따라 점선이 시계방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 즉, 압축파의 도달 시점이 빨라진 것이며 계측 결과를 이격 거리별 도달시간으로 정리하여 그림 10에 나타내었다. 압축파 속도는 그림 10의 표현과 같이 측정된 도달시간과 이격 거리의 기울기로부터 역수를 취하여 계산한다. 소형 다짐기의 다짐 횟수에 따라 획득한 압축파 속도가 식별 가능할 만큼 두드러진 차이를 보여 다짐 토공노반의 품질관리에 충분히 적용 가능한 것으로 확인되었다.

5. 토공노반의 품질관리 지표 및 설계인자로서 압축파 속도의 활용

본 논문에서는 토공노반의 품질관리 지표로서 압축파 속도를 사용하기 위해 현장 및 실내에서 상호 비교 가능한 압축파 속도 계측 기법을 실험을 통해 제안하였다. 실내에서는 기존의 다짐시험에 건조밀도를 압축파 속도로 대신한 방법을 제안하였고, 실험을 통해 적용 가능성을 확인하였다. 현장에서는 이에 대응하여 직접도달파 시험을 통해 압축파 속도를 계측하고자 하였다. 따라서 실내 기준으로 제안한 압축파 속도를 현장의 결과와 비교하기 위한 적절한 방법이 필요하다.

실내 다짐 공시체의 압축파 속도(또는 전단파 속도)는 다짐곡선의 건조측에서 최대값을 보여 최대건조밀도의 최적함수비와 최대 압축파속도의 함수비가 다르다. 그러나 건조측에 위치한 최대 압축파 속도를 품질관리 지표로 사용하기에는 함수비가 너무 작아 현장의 다짐관리가 소홀해질 우려가 있기 때문에 건조밀도가 최대인 최적함수비에서의 압축파 속도를 실내 품질관리 기준으로 설정하는 것이 바람직하다고 판단하였다(그림 11). 이에 본 예비연구에서는 함수비에 따른 압축파 속도의 관계에서 건조밀도가 최대인 최적함수비에 해

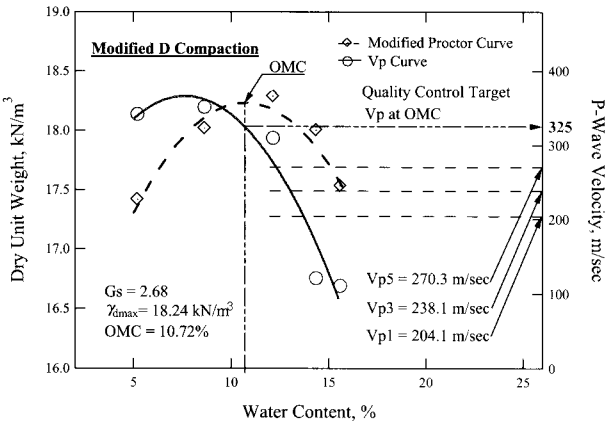


그림 11. 실내 품질관리 기준 설정과 현장의 압축파 속도 비교

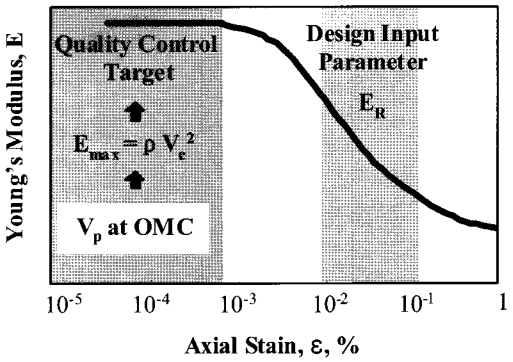


그림 12. 품질관리 기준과 설계인자에 일관성 있게 적용되는 압축파 속도

당하는 압축파 속도를 현장 다짐관리의 기준으로 결정하였다. 또한 다짐곡선의 건조측에 해당하는 적은 함수비에서 압축파 속도를 측정하여 품질관리 기준을 만족시키는 경우를 방지하기 위해 NAVFAC(1982)의 설계 매뉴얼을 참고하여 다짐 시 함수비 범위를 최적함수비의 ±2%로 설정하였다.

그림 11은 서천 시험 부지에서 채취한 시료에 대한 실내 시험 결과인 그림 6(b)에 현장의 압축파 속도 계측 결과를 함께 도시한 것이다. 수정 D 다짐시험과 압축파 계측 결과, 건조밀도가 최대인 최적함수비에서의 압축파 속도는 325m/sec이었다. 직접도달파 시험을 이용하여 다짐 횟수별로 계측한 시험 부지의 압축파 속도는 모두 기준 속도를 만족하지 못했다. 시험 부지를 조성할 때 사용된 소형 진동 다짐기의 에너지가 충분히 크지 않아 실내의 다짐 에너지만큼을 능가 하지 못 했거나 다짐 횟수가 부족했기 때문으로 판단된다. 당시 시험 부지에서 모래치환법으로 들밀도 시험을 수행했는데 현장의 건조밀도가 14kN/m^3 안팎의 너무 작은 값이 나왔다. 바람이 많이 부는 현장 여건으로 낙하한 모래가 조밀해져 밀도가 과소평가되는 오류를 감안하더라도, 작은 건조밀도로부터 다짐이 충분하지 않았다는 것을 알 수 있다. 결론적으로, 실내 압축파 속도 기준에 견주어 현장의 계측 결과를 비교해 볼 때 타당한 범위 내에서 계측 결과의 비교가 가능함을 확인하였다.

역학적-경험적 토공노반 설계를 위해 회복탄성계수(E_R)는 중요한 입력변수가 된다. 최근 개발된 철도 토공노반 설계기법에서 그림 12와 같은 영탄성계수 감소곡선을 회복탄성계수 결정에 핵심이 되는 물성치로 사용하였다(박철수 등, 2008). 한편, 설계 입력변수와 직접적으로 관련된 인자를 사용하여 시공 관리가 이루어지도록 하기 위해서는 현장의 품질관리 지표가 설계 입력변수인 회복탄성계수와 동일한 물성이어야 한다. 본 논문에서 제안한 품질관리 지표인 압축파 속도(V_P)는 포아송비를 이용하여 비구속 압축파 속도(V_C)로 변환되고, 그림 12에서 설명된 바와 같이 비구속 압축파 속도와 밀도로부터 영탄성계수 감소곡선의 최대영탄성계수(E_{max})를 결정할 수 있다. 이처럼 압축파 속도는 설계뿐만 아니라 현장의 품질관리에 있어 역학적으로 일관성을 유지할 수 있는 매우 중요한 지표가 된다.

본 예비연구에서는 실내 품질관리 기준과 현장의 품질확인을 위한 압축파 속도 계측 기법에 대하여 실험을 통해 그 가능성과 적용성을 확인하였다. 예비시험의 결과를 바탕으로 동반논문에서는 시험성토를 하여 실내 압축파 계측과 현장의 직접도달파 시험 이외에 공진주시험(resonant column test), 크로스홀 시험(crosshole test) 등을 추가로 수행하여 구속응력의 영향, 직접도달파 기법으로 계측된 탄성파 속도의 대상 다짐 층에 대한 조사(scanning) 깊이 등을 분석하고, 압축파 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안에 대해 적용성을 검증하였다.

6. 결 론

본 연구는 압축파 속도를 이용한 품질관리의 예비연구로서, 실내 및 현장에서 간편하게 적용할 수 있는 압축파 속도의 계측 기법을 소개하고 그 가능성을 타진하였다. 또한 품질관리 지표로 제안한 압축파 속도가 설계단계에 있어 갖는 의미를 확인하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 기존의 품질관리 확인을 위한 시험 기법들의 한계

점을 극복하고 설계와 일관된 품질관리를 위해 탄성파 속도 계측 기법을 도입하였다. 나아가, 전단파에 비해 계측이 수월한 압축파 속도를 품질관리의 기준으로 사용하기 위해 실내 및 현장에서 간편하게 적용할 수 있는 압축파 속도의 계측 기법을 제안하였다.

(2) 실내에서는 다짐시험과 병행하여 다짐 공시체에 대해 함수비에 따른 압축파 속도를 계측하고, 최적함수비에서의 압축파 속도를 품질관리 기준으로 설정하였다. 실내 압축파 계측은 가속도계가 부착된 충격해머를 사용하여 간편하고 일관성 있게 수행할 수 있다.

(3) 거의 모든 다짐 토공노반이 지하수위 위에 시공되기 때문에 현장의 품질관리 확인 지표로 압축파 속도를 사용하는데 문제가 없다. 현장의 압축파 계측은 방법의 용이성, 장비의 적용성, 그리고 얕은 계측 깊이 등이 모두 고려되어 직접도달파 기법으로 제안하였다. 이 기법의 현장 적용 가능성은 시험 부지를 조성하여 다짐 횟수에 따른 현장 압축파 속도의 탁월한 민감도를 통해 확인하였다.

(4) 실내 압축파 속도 기준에 견주어 현장의 계측 결과를 비교해 볼 때 타당한 범위 내에서 계측 결과의 비교가 가능함을 확인하였다. 또한 품질관리 지표로 사용된 압축파 속도는 설계인자인 회복탄성계수를 결정하는데 사용되기 때문에 설계에서 품질관리까지 역학적으로 일관성을 유지할 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김주형, 유완규, 김병일, 채광석 (2008), "다양한 지반강성 평가 장치를 이용한 현장 다짐도 예비 평가", *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp.636-643.
2. 박철수, 목영진, 황선근, 박인범 (2009), "압축파 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안 : II. 적용성 검증", *한국지반공학회 논문집*, 제25권, 제9호, pp.57-66.
3. 박철수, 황선근, 최찬용, 목영진 (2008), "탄성계수 감소곡선에 근거한 철도노반의 회복탄성계수 모델 개발 및 평가", *대한토목학회 논문집*, 제29권, 제2C호, pp.71-79.
4. 조성호, 강태호, 권수안, 박병선, 이양로 (2005), "현장 다짐지반의 강성평가를 위한 실용적인 SASW 시험 시스템의 개발", *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.3429-3432.
5. 한국건설기술연구원 (2007), *한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구*, Report No. KPRP-07, 2단계 3차년도 최종보고서, 건설교통부.
6. 한국고속철도건설공단 (2006), *고속철도공사 전문시방서(노반편)*, 780p.
7. 한국철도기술연구원 (2008), *토공노반 최적두께산정을 위한 설계표준 기술연구*, Report No. R&D/05제안-08, 건설교통R&D정책·인프라사업 최종보고서.
8. 한국철도시설공단 (2004), *철도설계기준(노반편)*, 설계기준.
9. 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, p.126.
10. 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.
11. 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.
12. NAVFAC (1982), *Soil Mechanics Design Manual 7.02*, Department of The Naval Facilities Engineering Command.
13. Peshikin, D. (1994), *Pavement Analysis and Design Checks*, National Highway Institute, U.S. Department of Transportation.
14. 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.
15. Steyn, W. J. M., Maina, J. and Fisher, C. (2007), *Technical Memorandum: PSPA Evaluation*, Report No. CSIR/BE/IE/EP/2007/006/ B, CSIR Built Environment, South Africa.
16. Taljaard, S. (2006), *Determining Pavement Stiffness Using Continuous Measurement of Surface Waves*, Project Report, University of Pretoria, South Africa.

(접수일자 2009. 4. 2, 심사완료일 2009. 9. 22)