한국지반공학회논문집 제25권 9호 2009년 9월 pp. 57 ~ 66

압축파 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안 : II. 적용성 검증

A Methodology for Quality Control of Railroad Trackbed Fills Using Compressional Wave Velocities : II. Verification of Applicability

박 철 수[1] Park, Chul-Soo　　목 영 진[2] Mok, Young-Jin
황 선 근[3] Hwang, Seon-Keun　　박 인 범[4] Park, In-Beom

Abstract

In the preliminary investigation (Park et al., 2009), the use of compressional wave velocity and its measurement techniques were proposed as a new quality control measure for trackbed fills. The methodology follows exactly the same procedure as the density control, except the density being replaced by the compressional wave velocity involving consistently with resilient modulus of design stage. The specifications for the control also include field compaction water content of optimum moisture content ±2% as well as the compressional wave velocity. In this sequel paper, crosshole and resonant column tests were performed as well direct-arrival method and laboratory compressional wave measurements to verify the practical applicability of a methodology for the new quality control procedure based upon compressional wave velocity. The stress-modified crosshole results reasonably well agree with the direct-arrival values, and the resonant column test results also agree well with the field crosshole results. The compressional wave velocity turned out to be an excellent control measure for trackbed fills both in the theoretical and practical point of view.

요 지

예비연구(박철수 등, 2009)를 통해 철도 토공노반에 대한 새로운 품질관리 지표로서 압축파 속도와 계측 기법을 제안하였다. 제안하고자 하는 새로운 품질관리 방안은 밀도를 이용한 품질관리 과정을 동일하게 따랐으며, 다만 밀도를 설계단계의 회복탄성계수와 관련 있는 압축파 속도로 대신하였다. 이와 더불어 현장 함수비가 최적함수비의 ±2%를 만족하도록 보완하였다. 본 연구에서는 직접도달파 기법 및 실내 압축파 계측 외에 크로스홀 시험과 공진주시험을 추가로 수행하여, 압축파 속도에 근거한 새로운 품질관리 방안의 적용성을 검증하였다. 응력이 보정된 크로스홀 시험 결과는 직접도달파 시험의 결과와 잘 일치 하였고, 공진주시험 결과 또한 크로스홀 시험의 결과와 잘 일치 하였다. 압축파 속도는 이론적으로나 실무적 관점에서 철도 토공노반의 우수한 품질관리 기준임이 밝혀졌다.

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 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Vehicle and Track Research Dept., Korea Railroad Research Institute)
4 정회원, 경희대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Civil Engrg., Kyunghee Univ., drtime@naver.com, 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

동반논문(박철수 등, 2009)에서 예비시험을 통해 계측이 간편하고 결과의 신뢰성이 높은 압축파 속도를 품질관리 인자로 제안하였다. 압축파 속도를 이용한 품질관리 방안의 주요 개념은 실내에서 다짐시험을 통해 최적함수비(OMC)에서의 압축파 속도를 현장의 품질관리 기준으로 설정하고, 시공 중에 현장에서 계측한 압축파 속도가 실내 기준을 만족하도록 하는 것이다. 이 방안은 밀도를 이용한 품질관리 과정을 동일하게 따랐으며, 다만 밀도를 압축파 속도로 대신하였다. 제안하는 기법의 핵심 특징 중 하나는 기존 실내 다짐시험을 최소한으로 수정하여 압축파 속도 계측이 가능하고, 계측 결과가 설계단계의 회복탄성계수 결정과 시공단계의 품질관리 기준에 모두 사용될 수 있다는 점이다. 본 연구에서는 한국철도기술연구원에 조성된 다짐 시험성토 부지에서 다양한 시험을 통해 평가된 결과를 토대로 제안된 품질관리 기법을 검증하고자 한다.

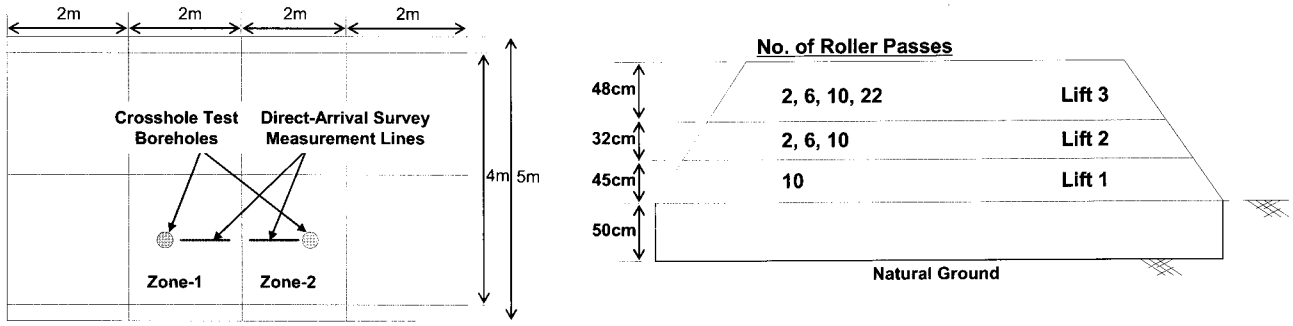
2. 다짐 시험성토 및 시험 계획

2.1 다짐 시험성토 개요

철도기술연구원의 다짐 시험성토를 그림 1과 같이 총 3개의 층으로 조성하였으며, 상부 마지막 층의 길이는 8m, 폭 5m이었고 최종 높이는 1.25m이었다. 원지반이 추운 날씨의 영향으로 얼어 있었기 때문에 성토 전에 원지반을 대략 0.5m 깎아내고 다시 조밀하게 다져 첫 번째 성토층(Lift 1)과 그 아래 원지반의 이질성이 본 연구에서 수행할 직접도달파 시험 결과에 미치는 영향을 최소화 하였다. 각 층은 대략 0.3m의 두께가 되도록 12.5ton의 진동 롤러를 사용하여 다졌고, 성토 완료 후에 수준측량을 수행하여 확인한 결과 Lift 1에서 Lift 3까지의 두께는 각각 0.45m, 0.32m, 0.38m이었다. 성토 단계별로 완료된 각 층의 표면은 총 8개의 위치(Zone)로 구분하였고, 그림 1(a)에 표시한 Zone-1과 Zone-2에서 들밀도 시험과 직접도달파 시험을 모두 수행하였다.

2.2 시험 계획

시험 계획은 표 1과 같이 실내 및 현장 시험으로 구성하였다. 실내에서는 다짐시험을 통해 압축파 속도를 계측하였고, 최적함수비로 제작된 공시체에 대해 공진주시험(resonant column test)을 수행하여 전단탄성계수 감소곡선과 압축파 속도에 대한 구속응력의 영향을 평가하였다. 현장에서는 직접도달파 기법(direct-arrival method)을 적용하여 각 층에서 롤러의 통과 횟수에 따른 압축파와



(a) 크로스홀 시험과 직접도달파 계측 위치

(b) 각 층의 롤러 통과 횟수와 두께

그림 1. 시험성토 단면과 계측 개요

표 1. 시험 계획 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 $\overline{\sigma_m}$ on V_p
Field	Direct-Arrival Method	V_p and V_s vs. No. of Roller Passes
	Crosshole Test	V_p, V_s, and ν Profiles
	Field Density	In-situ γ_d and w
	Level Surveying	Thicknesses of Each Lift

전단파 속도를 측정하였고, 실내 압축파 계측을 통해 결정된 품질관리 기준(OMC에서의 압축파 속도)과 비교하였다. 이때 성토체 각 층의 재료가 거의 균질하다고 보고 탄성파의 굴절/반사가 없다고 가정하였고, 계측 이격 거리가 충분히 짧아 탄성파를 감지하는 속도계에 직접도달파가 가장 먼저 도달할 것으로 기대하였다. 또한 모래 치환법으로 들밀도 시험을 수행하여 현장 밀도를 측정하였다. 각 층의 두께는 레벨측량으로 정밀하게 측정하였으며, 성토가 완료된 후 최종 압축파 및 전단파 속도 주상도는 크로스홀 시험(crosshole test)을 수행하여 결정하였다.

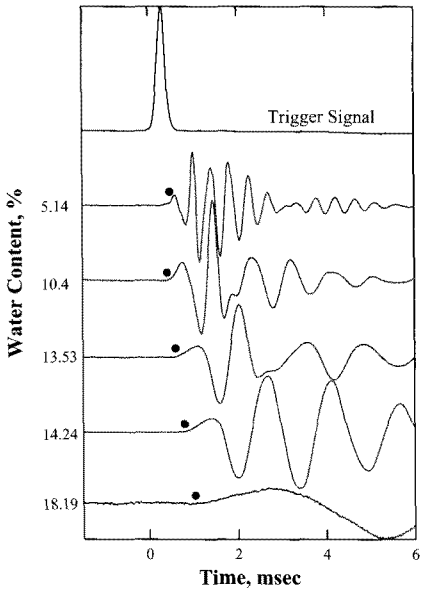
3. 실내 시험

3.1 수정 다짐시험과 품질기준 설정

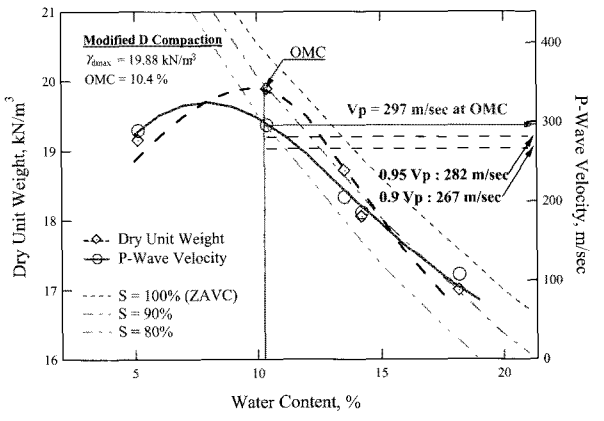
시험성토의 성토 재료에 대해 우선 실내시험을 통해 다짐 기준을 마련하고자 하였다. 현장에서 교란된 시료를 채취하여 다짐곡선 뿐만 아니라 함수비에 따른 압축파 속도를 계측하였다. 압축파 속도는 다짐 공시체의 아랫면에 가속도계(voltage type, PCB 353B11)를 부착하고 충격해머(impulse force hammer, PCB 086C80)로 공시체의 상부면에 충격을 가하여 계측하였다. 시험의 과정 및 계측에 사용한 장비는 동반논문에서 자세히 소개하였다.

다짐 몰드 안에서의 구속응력이 시공 중인 각 층의 표면 구속응력과 거의 동등하기 때문에 실내 압축파 속도 계측은 별도의 추가 구속응력을 가하지 않고 공기 중에서 바로 수행하였다(D'Appolonia et al., 1969). 그림 2(a)는 함수비 별로 제작된 다짐 공시체에서 각각 계측된 압축파 신호이고, 함수비에 따른 건조밀도와 압축파 속도의 관계는 그림 2(b)에 함께 도시하였다. 다짐시험 결과 최적함수비 10.4%, 최대건조밀도는 19.88kN/m^{3}이었다. 함수비에 따른 압축파 속도 곡선은 건조밀도의 변화에 비해 왼쪽으로 이동하여 최적함수비에서 비대칭인 것을 제외하고는 매우 유사한 경향을 보였다. 다짐곡선의 최적함수비를 기준으로 건조측에서 압축파 속도는 재료의 취성(brittle)과 모관흡수력(matric suction) 때문에 습윤측에 비해 더 컸다.

현장의 품질관리를 위한 실내 기준은 건조측의 취성과 모관흡수력을 참작하여 최대 압축파 속도보다는 다짐곡선의 최적함수비(10.4%)에 해당하는 압축파 속도(297m/sec)로 정하였다. 현장의 요구 수준 및 다짐목적에 따라 최적함수비에 해당하는 압축파 속도의 95%, 90%를 품질관리 기준으로 제시할 수도 있을 것이다. 다만 한 가지 우려할 점은 현장에서 다짐시공 시 건조측으로 다짐시공을 하면 최적함수비의 압축파 속도 규정은 준수하게 되지만 실제 건조밀도는 작아진다. 따라서 현장 다짐에 필요한 함수비 규정을 추가로 보완해야 한다. 본 연구에서는 NAVFAC(1982)의 설계 매뉴얼을 참고



(a) 압축파 신호



(b) 건조밀도 및 압축파 속도

그림 2. 함수비에 따른 다짐 공시체의 압축파 계측과 실내 다짐기준(수정 D 다짐)

하여 다짐 시 함수비 범위를 최적함수비의 ±2%로 설정하였다. 그러나 본 논문에서 언급한 ±2%의 규정은 일반적인 경우에 해당하므로 다짐목적에 따라 적절한 함수비 범위를 설정해서 적용해야 할 것이다.

3.2 공진주시험

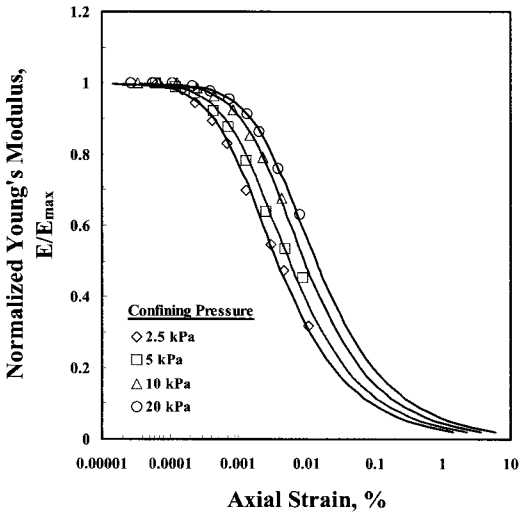
채취된 현장의 시료를 실내에서 최적함수비로 다져 공시체를 성형하였고 공진주시험을 수행하였다. 공진주시험의 결과는 설계단계에 필요한 철도노반의 회복탄성계수 결정과 저변형률 영역의 최대 전단탄성계수에 대한 구속응력의 영향을 평가하는데 사용한다. 공진주시험은 성토 높이가 크지 않음을 고려하여 2.5, 5, 10, 그리고 20kPa의 구속압을 적용하였고, 대략 0.01%의 전단변형률 까지 전단탄성계수를 측정하였다. 전단탄성계수(G)와 전단변형률(γ)의 관계는 본 논문의 뒤에서 언급할 현장의 크로스홀 시험으로 결정된 포아송비(ν) 0.3을 이용하여 축변형률(ε)에 따른 영탄성계수(E) 감소곡선으로 변환하였다(Pezo and Hudson, 1994; 오세붕 등, 2000). 그림 3(a)는 축변형률에 따른 정규화 영탄성계수 감소곡선이며, 정규화 곡선이 구속압이 증가함에 따라 오른쪽으로 증가하는 경향을 보였다.

본 연구에서 공진주시험으로 결정된 저변형률 영역의 최대 전단탄성계수는 구속압이 증가함에 따라 대수좌표에서 0.46의 기울기로 증가하는 경향을 보였다. 따라서 포아송비를 적용하여 결정한 저변형률 영역의 영탄성계수 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 압축파 속도에 대한 구속압의 영향을 나타낸 것이다. 탄성계수는 탄성파 속도의 제곱에 비례하므로 대수좌표에서 탄성파 속도에 대한 구속압 영향계수는 탄성계수에 대한 영향계수의 절반이 된다. 따라서 시험성토에 사용된 재료의 압축파 속도에 대한 구속압 영향계수(n_V)를 0.23으로 결정하였다. 결정된 구속압 영향계수는 시험성토 부지에서 수행한 다양한 탄성파 시험 및 실내시험의 결과를 비교하는데 중요한 인자이다.

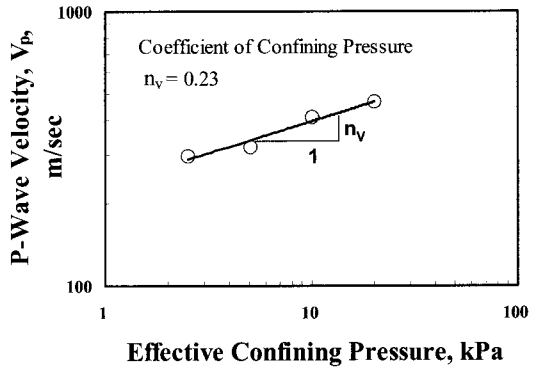
4. 현장 시험

4.1 직접도달파 기법을 이용한 성토체 탄성파 속도 계측

현장에서는 다짐 층의 품질확인 방법으로 예비연구에서 제안한 직접도달파 기법을 사용하였다. 적용성 검증을 위한 본 논문에서는 직접도달파 기법으로 압축파와 전단파를 함께 측정하였다. 압축파와 전단파는 파의 전파 특성이 다르므로 계측하고자 하는 파의 특성에 맞게 발진방향과 감지방향을 설정하는 것이 양질의 신호를 획득하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 그림 4와 같이 무게가 무거운 대형 쇠망치와 소형 망치를 사용하여 탄성파를 발생시키는 발진 장치로 활용하였다. 감지기는 공진주파수가 4.5Hz인 속도계(Mark product L-10B)를 사용하였고 스파이크를 부착하여 성



(a) 정규화 영탄성계수 감소곡선



(b) 압축파 속도에 대한 구속압 무차원 영향계수

그림 3. 정규화 영탄성계수 감소곡선과 유효구속압 증가에 따른 압축파 속도의 변화

토 지반 표면에 완전히 밀착되도록 하였다. 압축파를 계측할 때는 지표면에 밀착시킨 대형 쇠망치의 머리 부분을 작은 망치를 이용해 수평방향으로 타격하고 수평방향으로 민감한 속도계를 사용하였다. 전단파를 계측할 때는 수직방향으로 대형 쇠망치의 머리 부분을 타격하고 수직으로 민감한 속도계를 사용하였다.

그림 5(a)는 Lift 2의 Zone-1에서 진동 롤러가 10회 왕복하였을 때 직접도달파 시험을 통해 계측한 대표적인 압축파 신호(좌)와 이격 거리에 따른 도달시간(우)이다. 그림 5(b)는 Lift 1의 Zone-1에서 진동 롤러가 10회 왕복하였을 때 직접도달파 시험을 통해 계측한 대표적인 전단파 신호(좌)와 이격 거리에 따른 도달시간(우)이다. 그림 5(a)와 (b)에서 이격 거리에 따른 도달시간의 기울기 역수가 각각 압축파 또는 전단파 속도가 된다. 계측된 신호로부터 속도를 결정하기 위해 도달시간의 정확한 판별은 매우 중요하다. 본 연구에서 압축파 또는 전단파의 도달시간은 발진 장치의 영향을 배제하기 위해 발진 시 발생된 신호를 제외한 세 개의 감지기 신호만을 이용하여 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 사실을 통해 적용하고자 하는 압축파 속도를 이용한 품질관리의 타당성과 일관성이 잘 드러났다.

그림 6(a)는 직접도달파 시험을 통해 각각 Zone-1과 2에서 다짐 층, 진동 롤러 통과 횟수별로 결정된 압축파 속도를 정리한 것이다. 그리고 실내 다짐 공시체의 압축파 계측을 통해 결정된 OMC에서의 압축파 속도 즉, 품질관리 기준을 함께 도시하였다. Zone-1과 2 모두 진동 롤러의 통과 횟수가 증가함에 따라 압축파 속도가 증가하다가 대략 10회부터 점차 압축파 속도가 일정해지면서 동시에 실내기준 압축파 속도를 만족하고 있다. Lift 3의 통과 횟수 22회에서는 진동 롤러에 의한 다짐효과가

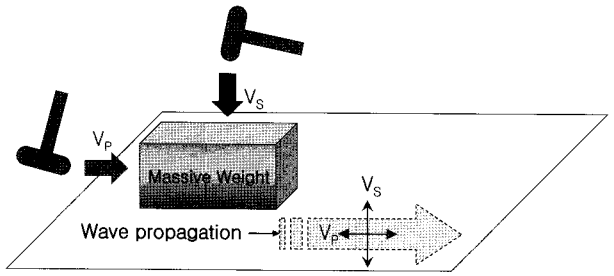
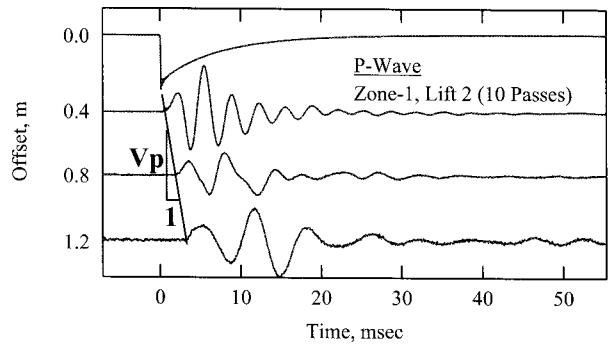
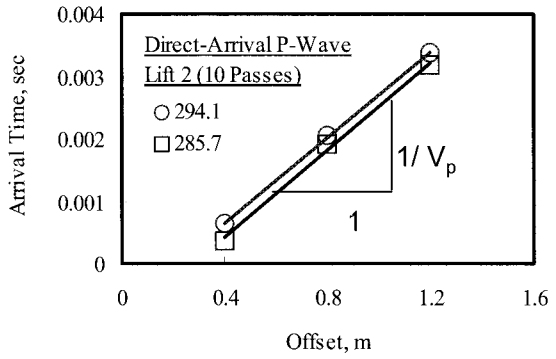
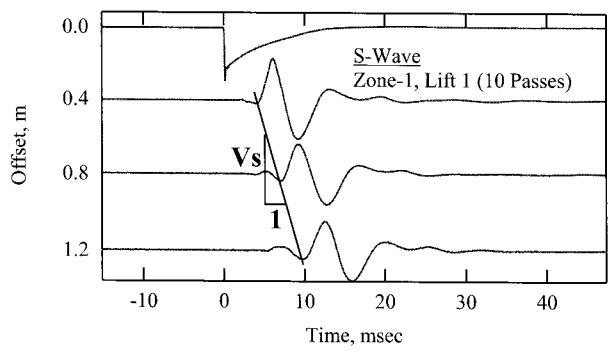


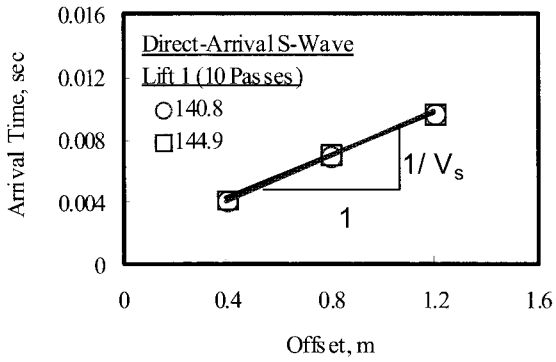
그림 4. 직접도달파 시험의 지표면 발진원





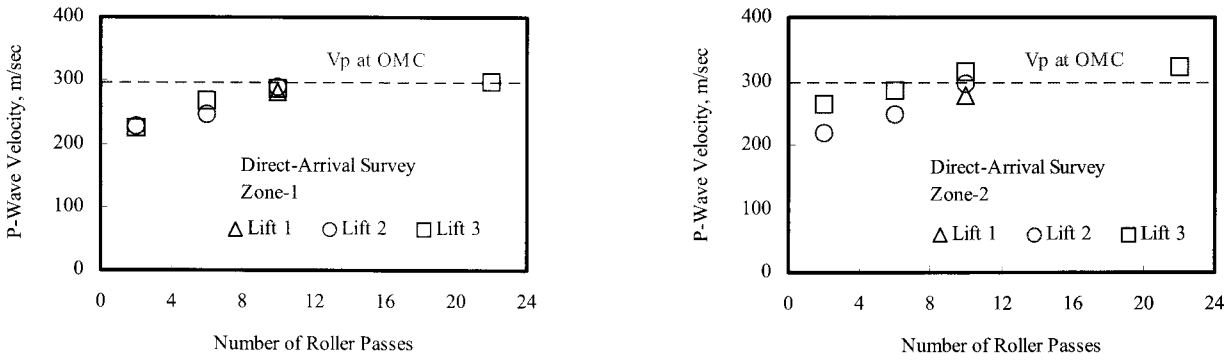
(a) 압축파 계측 신호와 도달시간으로부터 계산된 압축파 속도



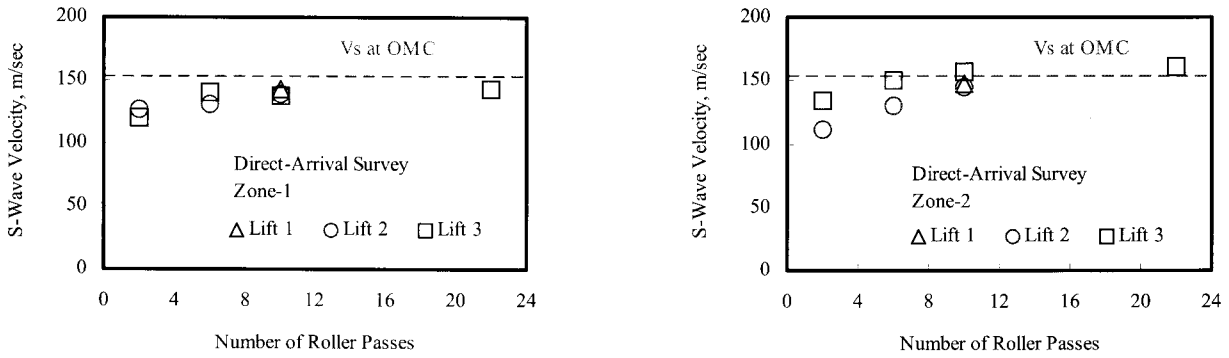


(b) 전단파 계측 신호와 도달시간으로부터 계산된 전단파 속도

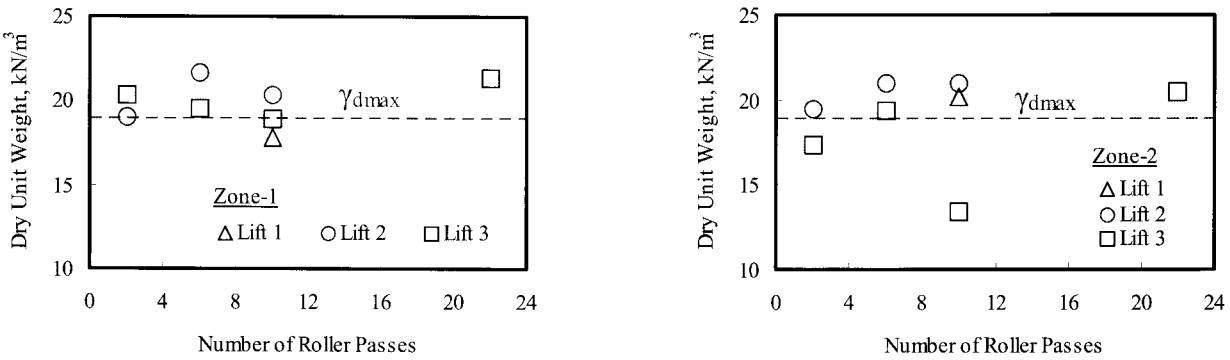
그림 5. 시험성토 부지의 직접도달파 시험



(a) 압축파 속도와 실내 다짐기준(Zone-1, Zone-2)



(b) 전단파 속도 실내 다짐기준(Zone-1, Zone-2)



(c) 들밀도 시험으로 구한 현장의 건조밀도(Zone-1, Zone-2)

그림 6. 진동 롤러 통과 횟수에 따른 압축파, 전단파 속도와 건조밀도

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 전단파 속도는 압축파 속도와 비슷한 경향을 보였고 두 결과로부터 계산된 포아송비는 대략 0.32 정도였다. 직접도달파 시험의 결과를 통해 압축파 속도가 다짐 토공노반의 품질관리에 유효한 지표임을 예비연구에 이어 다시 한 번 증명하였다.

4.2 들밀도 시험

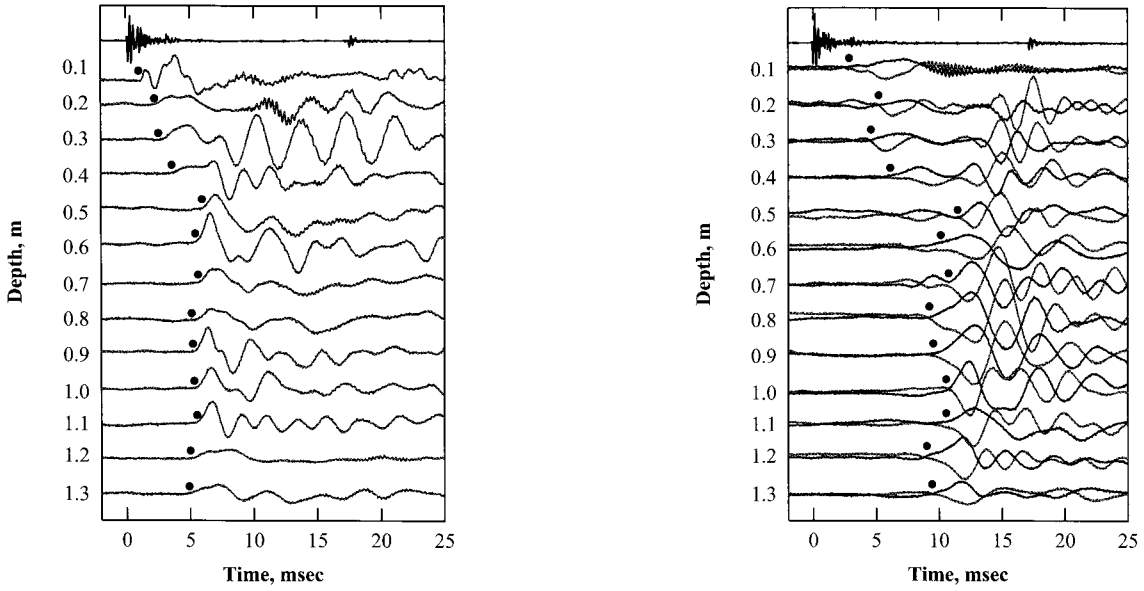
다짐 토공노반의 품질관리 지표로서 현장 밀도의 성능을 평가하기 위해 롤러 통과 횟수에 따라 모래치환법으로 현장 밀도를 측정하였다. 롤러 통과 횟수에 따른 현장의 건조밀도는 실내에서 측정된 성토 재료의 최대건조밀도와 함께 그림 6(c)에 나타내었다. 그러나 들밀도 시험을 통해 결정된 건조밀도는 다짐 롤러의 통과 횟수에 따라 의미 있는 경향을 찾기가 어려웠다. 심지어는 적은 통과횟수에도 불구하고 실내기준을 상회하는 결과를 보였다. 들밀도 시험은 현장에서 적용하기 간편하고 시험 결과가 신뢰성 있어 보이지만, 실상은 시험자의 숙련도와 험한 현장 여건에 따라 결과가 많이 좌우된다. 당초 계획은 최대한 정밀하고 신중하게 현장의 건조밀도를 획득하고 직접도달파 시험으로 획득한 압축파 속도와 비교하여

압축파 속도를 이용한 품질관리 방안의 신뢰성을 확보할 예정이었으나, 본 연구에서 문제제기 했던 현장 건조밀도의 근본적인 부정확성으로 인해 사용을 지양해야할 당위성을 보여주는 근거 자료로만 제시하였다.

4.3 크로스홀 시험

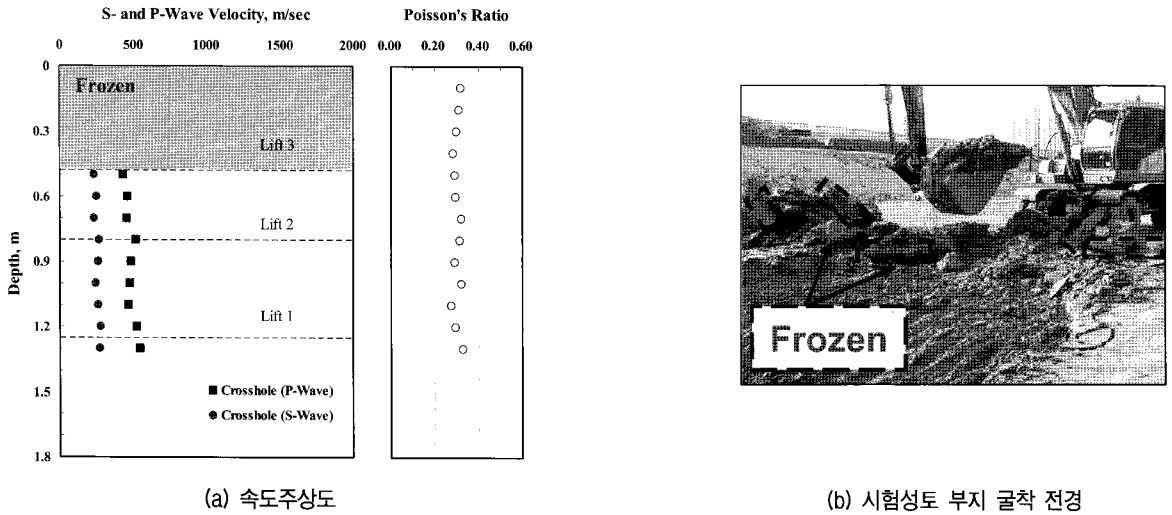
세 번째 층까지 성토를 최종 완료한 뒤, 크로스홀 시험을 수행하기 위해 Zone-1과 Zone-2의 직접도달파 시험의 측선을 사이에 두고 두 개의 검측공을 나공(uncased borehole)으로 설치하였다. 크로스홀 시험은 나공에서도 시험이 가능하도록 최근 개발된 전기-기계식 발진자(electro-mechanical source)를 사용하여 수행하였다(Park et al., 2008). 크로스홀 시험의 목적은 시험 성토체의 깊이별 다짐효과와 직접도달파 시험의 조사(scanning) 범위를 살펴보기 위함이다. 크로스홀 시험은 계측 간격을 10cm로 정밀하게 수행하였고 그 결과 압축파 속도, 전단파 속도 주상도와 깊이별 포아송비를 획득하였다. 그림 7은 크로스홀 시험으로 획득한 깊이별 압축파와 전단파 신호이고 그림 8(a)는 속도주상도이다.

상부 다짐 층 Lift 3의 깊이 0.4m 까지는 일반적으로 사질토 지반에서 예상할 수 있는 탄성파 속도보다 훨씬 빠른 값을 보였고, 이와 같은 결과는 크로스홀 시험이 성토가 종료된 후 다음날 아침에 수행된 점으로 미루어



(a) 압축파 신호 (b) 전단파 신호

그림 7. 크로스홀 시험 결과



(a) 속도주상도 (b) 시험성토 부지 굴착 전경

그림 8. 크로스홀 시험으로 획득한 시험성토의 속도주상도와 성토 전 굴착 전경

추운 영하의 기온 때문인 것으로 판단된다. 그림 8(b)의 점선 블록은 아침에 딱딱하게 얼어있는 현장의 지표이다. 따라서 본 논문에서 크로스홀 시험에 대한 데이터를 분석할 때 Lift 3의 결과는 제외하였다. Lift 2와 Lift 3의 압축파 속도는 430-550m/sec의 범위에서, 전단파 속도는 230-280m/sec의 범위에서 깊이별로 분포하였다.

5. 시험 결과 비교와 품질관리 방안 제안

5.1 현장 및 실내 시험 결과 비교

다짐 시험성토 부지를 대상으로 다양한 현장 및 실내 시험을 수행하였다. 특히 다짐 완료 후 현장에서 수행한 크로스홀 시험의 결과는 각 계측 깊이별로 토피하중에 의한 구속효과가 반영된 결과이다. 따라서 구속응력에 의한 효과를 제거하고 다짐에너지에 의한 다짐효과의 깊이별 분포를 살펴보기 위해 식 (1)을 이용하여 구속응력을 보정한 압축파 속도와 전단파 속도($V_{P,\mathrm{modified}}$)로 재산정 하였다(Tokimatsu and Uchida, 1990). 구속응력 보정을 위한 기준이 되는 구속응력($\bar{\sigma}_{m,lab.}$)은 지표면 얕은 깊이의 직접도달파 시험 결과와 실내 다짐 공시체에 대한 압축파 계측을 감안하여 수정 D 다짐으로 공시체의 높이 12.5cm에 해당하는 1.635kPa으로 결정하였다. 또한 공진주시험을 통해 결정한 탄성파 속도에 대한 구속응력의 영향(n_{V_P})은 0.23이었다.

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

여기서, $\bar{\sigma}_{m,field}$: 계측된 깊이의 현장 평균유효구속응력

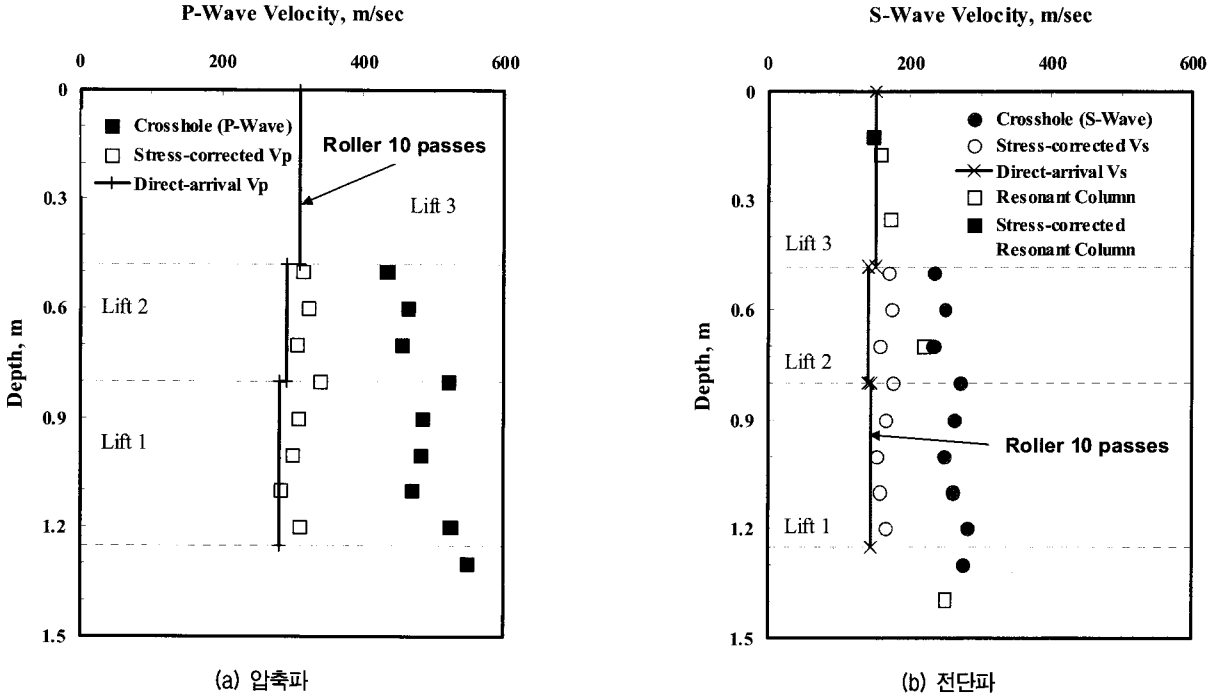
$\bar{\sigma}_{m,lab.}$: 다짐 공시체의 실내 평균유효구속응력

$V_{P,field}$: 구속응력 $\bar{\sigma}_{m,field}$에 해당하는 탄성파속도

$V_{P,\mathrm{modified}}$: 구속응력 $\bar{\sigma}_{m,lab.}$으로 보정된 탄성파속도

n_{V_P} : 탄성파속도에 대한 구속응력 무차원 영향계수(본 연구에서 0.23)

크로스홀 시험을 통해 획득한 응력 보정 전후의 압축파, 전단파 속도를 실내 다짐 기준에 거의 근접한 롤러 통과 횟수 10회일 때의 직접도달파 시험 및 공진주시험 결과와 함께 그림 9에 도시하였다. 응력을 보정한 크로스홀 시험의 결과는 현장 다짐 층 두께인 30-45cm 범위에서 직접도달파 시험의 결과와 거의 비슷한 속도를 보였다. 그림 9(b)에서 크로스홀 시험으로 획득한 응력 보정 전의 전단파 속도는 구속응력 증가에 따른 공진주시



(a) 압축파 (b) 전단파

그림 9. 응력 보정된 크로스홀 시험 결과와 직접도달파 시험의 탄성파 속도 비교

험의 전단파 속도 변화와 매우 유사한 양상을 보였다. 한편, 공진주시험에서 적용된 평균유효구속응력의 범위는 2.5-20kPa이었지만 수정 D 다짐 몰드의 높이에 해당하는 구속응력으로 보정을 하여 결정된 전단파 속도는 동일한 응력으로 보정한 크로스홀 시험의 전단파 속도, 직접도달파 시험으로 결정한 전단파 속도와 거의 같은 결과를 보였다. 즉, 동적시험을 통해 결정된 전단파 속도가 동일한 응력조건에서 거의 비슷한 결과를 보여 시험 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

현장 및 실내 시험 결과의 비교를 통해 다음의 두 가지 사실을 확인 할 수 있다. 첫 번째는 직접도달파 시험에서 발생된 탄성파의 계측 영향 깊이가 다행스럽게도 일반적인 다짐 층 두께(대략 30cm)와 비교적 잘 일치한다는 것이다. 본 연구의 직접도달파 시험은 대형 쇠망치의 머리 부분과 이를 타격하기 위한 작은 망치가 발진 장치로 사용되었기 때문에 만약 크기와 무게가 다른 발진 장치를 사용한다면 영향깊이에 다소 차이가 있을 지도 모른다. 압축파 속도를 이용한 품질관리 방안을 정립하기 위해 직접도달파 시험의 발진 장치에 대한 다양한 조사가 필요할 것이다. 그러나 본 연구에 사용된 정도의 간편한 장비들이라면 충분히 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 두 번째는 실내 다짐 공시체의 압축파 계측 결과와 현장의 직접도달파 시험으로 계측된 압축파 속도를 직접적으로 비교가 가능하다는 것이다. 직접도달파 시험의 결과와 응력을 보정한 크로스홀 시험의 결과가 다짐 층에 걸쳐 전반적으로 거의 비슷한 결과를 보이기 때문이다. 이와 같은 두 사실을 바탕으로 제안하고자 하는 현장 품질관리 기법이 실무에 적용 가능함을 확인하였다.

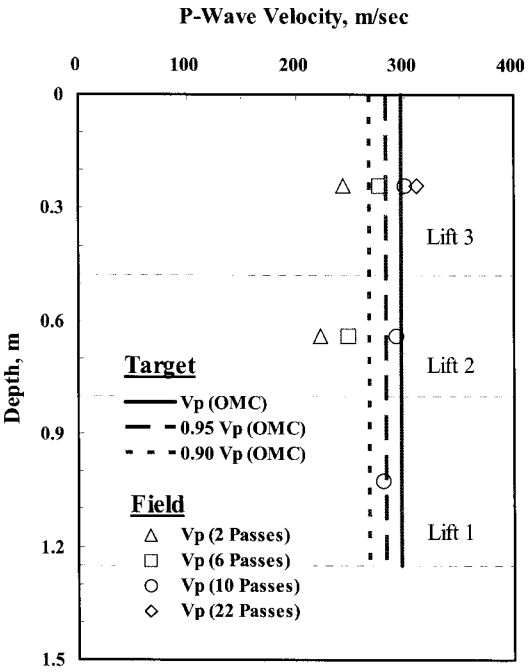


그림 10. 실내 품질관리 기준과 현장 압축파 속도 비교

그림 10에는 직접도달파 시험으로 결정된 롤러 통과 횟수에 따른 압축파 속도(Zone-1과 2의 평균값)와 실내 품질관리 기준(최적함수비에서의 V_p)을 함께 도시하였다. 또한, 실내 품질관리 기준으로 최적함수비에서 압축파 속도의 95%, 90%를 함께 제시하였다. 진동 롤러 통과 횟수가 2회 일 때 Lift 1과 Lift 2에서 $0.9V_p$(최적함수비)에 전혀 미치지 못하였지만 10회 일 때는 $0.95V_p$(최적함수비)와 V_p(최적함수비)의 사이에서 만족할만한 분포를 보였다. 향후 지속적인 연구를 통해 성토 구조물의 특성과 용도, 중요도에 따른 압축파 속도의 적절한 기준이 마련되어야 할 것이다.

5.2 압축파 속도를 이용한 역학적 개념의 품질관리 방안

본 연구에서는 최근 새롭게 제안된 역학적-경험적 철도 토공노반 설계와 더불어 시공단계의 품질관리 측면에서도 기존의 경험적 관리를 탈피하고 설계단계와 역학적으로 일관성을 가질 수 있는 토공노반의 다짐관리 방안을 제시하고자 하였다. 품질관리의 지표로는 실내 다짐시험 및 탄성파 시험을 통해 결정된 최적함수비에서의 압축파 속도를 이용한다. 현장에서는 일반적으로 현업에서 손쉽게 적용할 수 있는 직접도달파 기법을 활용하여 압축파 속도를 계측하고, 실내에서 설정한 품질관리 기준을 만족하도록 하는 것이다. 이 방안은 밀도를 이용한 품질관리 과정을 동일하게 따랐으며, 다만 밀도를 압축파 속도로 대신하였다. 현장 및 실내의 압축파 계측 기법은 신속하며 매우 일관성 있는 결과를 보였다. 제안된 방안의 작은 결점은 다짐곡선의 최적함수비를 기준으로 건조측에서 압축파 속도가 습윤측에 비해 더 크다는 점이다. 따라서 현장 다짐에 필요한 함수비 규정을 보완하여 최적함수비 ±2%를 만족하도록 하였다. 압축파 속도를 활용한 품질관리 방안의 흐름은 아래와 같고 그림 11은 그 흐름도이다.

(1) 일반적인 다짐시험의 순서를 따르며, 각 다짐 공시체에서 함수비에 따른 압축파 속도 획득

(2) 최적함수비에서의 압축파 속도 또는 95%, 90%에 해당하는 압축파 속도를 실내 기준으로 결정하고 최적함수비±2%의 현장 다짐 함수비 설정

(3) 직접도달파 시험을 통해 다짐 롤러 통과 횟수에

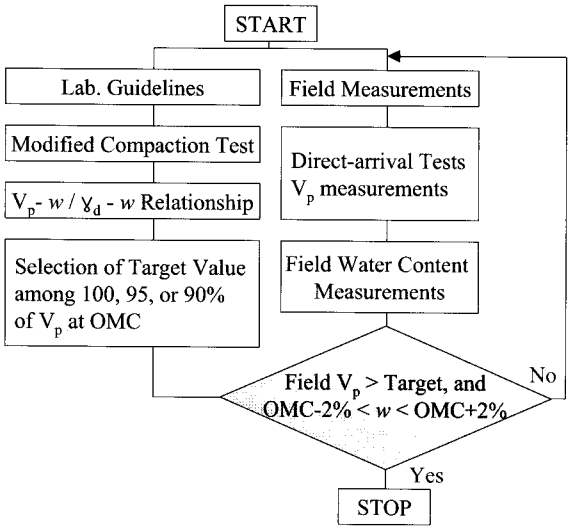


그림 11. 압축파 속도를 이용한 토공노반의 품질관리 흐름도

따른 현장 다짐 토공노반의 압축파 속도 계측과 현장 함수비 측정

(4) 실내 기준치와 현장 계측치를 비교

(5) 현장 계측결과가 품질관리 기준에 만족할 때 까지 (3), (4)과정 반복

6. 결 론

철도 토공노반의 새로운 품질관리 방안을 마련하고자 압축파 속도를 품질관리 기준으로 적용하였다. 이 방안은 밀도를 이용한 품질관리 과정을 동일하게 따랐으며 밀도를 압축파 속도로 대신하였다. 제안한 기법의 적용성은 시험성토 부지에서 현장 및 실내 동적 시험을 통해 검증하였고, 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 이론적으로나 실무적 관점에서 철도 토공노반의 품질관리에 매우 우수한 지표로 압축파 속도를 사용할 수 있다. 압축파 속도는 철도 토공노반의 역학적-경험적 설계에 중요한 인자로 사용되는 회복탄성계수와 밀접한 관련이 있을 뿐만 아니라, 기존의 품질관리 기준인 밀도에 비해 부정확한 현장 계측의 가능성이 매우 낮다.

(2) 현장의 품질관리 지표인 최적함수비에서의 압축파 속도는 기존의 실내 다짐시험을 그대로 따르면서 실내에서 쉽게 결정하였고, 다짐곡선의 건조측에서 압축파 속도가 습윤측에 비해 더 크다는 단점을 보완하기 위해 현장 다짐에 필요한 함수비가 최적함수비±2%를 만족하도록 하였다.

(3) 두께가 얕은 다짐 층의 압축파 속도를 계측하는데 있어 매우 간편하고 경제적인 직접도달파 시험을 이용하여 현장의 품질을 확인하였다. 직접도달파 시험을 통해 계측된 압축파 속도는 시험자의 숙련도나 계측 반복횟수에 관계없이 일관된 결과를 보여주었다.

(4) 얕은 지표 또는 실내 다짐 공시체의 구속응력으로 보정된 크로스홀 시험의 결과는 직접도달파 시험의 결과와 거의 유사하였다. 응력 수준을 감안한 공진주시험의 결과도 크로스홀 시험 및 직접도달파 시험의 결과와 잘 일치 하였다. 즉, 실내 기준 마련을 위한 실내 다짐 공시체의 압축파 계측과 직접도달파 시험 결과의 직접 비교가 가능하다. 특히 직접도달파 시험에서 발생된 탄성파의 계측 조사 범위(깊이)가 일반적인 다짐 층 두께(대략 30cm)를 충분히 만족하였다. 본 연구를 통해 제안하고자 하는 철도 토공노반의 품질관리 방안이 실무에 적용 가능함을 확인하였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 박철수, 목영진, 최찬용, 이태희 (2009), "압축파 속도를 이용한 철도 토공노반의 품질관리 방안 : I. 예비연구", *한국지반공학회 논문집*, 제25권, 제9호, pp.45-55.
2. 오세붕, 권기철, 정순용, 김동수 (2000), "미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델", *한국지반공학회 논문집*, 제16권, 제1호, pp.65-73.
3. 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.
4. NAVFAC (1982), *Soil Mechanics Design Manual 7.02*, Department of The Naval Facilities Engineering Command.
5. Park, C. S., Jung, J. W. and Mok, Y. J. (2008), "Development and Applications of In-Hole Seismic Method to Measure Shear Wave Velocity of Subsurface Materials", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, ASCE GSP No.181 (CD-ROM), Sacramento, CA.
6. Pezo, R. F. and Hudson, W. R. (1994), "Comparisons of Laboratory and Field Measurements of Resilient Modulus of Non-Granular Materials", *Dynamic Geotechnical Testing II*, ASTM STP 1213, ASTM, Philadelphia, pp. 234-245.
7. Tokimatsu, K. and Uchida, A. (1990), "Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity", *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol.30, No.2, pp.33-42.

(접수일자 2009. 4. 2, 심사완료일 2009. 9. 22)