

# 양생시간에 따른 CLSM의 압축강도 및 압축파 속도 상관성 연구

## Study on Correlation between Compressive Strength and Compressional Wave Velocity for CLSM According to Curing Time

한 우 진<sup>1)</sup> · 이 종 섭<sup>1)</sup> · 조 삼 덕<sup>2)</sup> · 김 진 환<sup>2)</sup> · 변 용 훈<sup>†</sup>

Woojin Han · Jongsub Lee · Samdeok Cho · Jinhwan Kim · Yonghoon Byun

Received: July 30<sup>th</sup>, 2015; Revised: August 10<sup>th</sup>, 2015; Accepted: September 26<sup>th</sup>, 2015

**ABSTRACT** : The development of Controlled Low Strength Material (CLSM), which is a highly flowable material, has been performed for the application of backfill. The objective of this study is to compare the compressive strength and compressive wave velocity of CLSM according to the curing time. To investigate the characteristics of the CLSM consisting of sand, silt, water, flyash, and CSA cement, uniaxial compression test and flow test were carried out. For the measurement of compressional waves, a cell and a couple of transducers were used. The test results show that the compressive strength increases with the curing time, while the increment of compressive strength decreases with the curing time. In addition, the compressive wave velocity increases with the curing time, and the correlation between the compressive wave velocity and compressive strength is similar to exponential function. This study suggests that the correlation between the compressive wave velocity and compressive strength may be effectively used for the estimation of compressive strength of the CLSM at early curing time.

**Keywords** : Controlled low strength material (CLSM), Compressive strength, Compressional waves, Curing time

**요 지** : 다짐이 어려운 지중매설물의 밀실한 충전을 위해 저강도 및 고유동성의 특성을 갖는 유동성 채움재(Controlled Low Strength Materials, CLSM)의 개발 및 현장적용에 대한 연구가 있어 왔다. 본 연구에서는 압축파 속도 및 일축압축강도를 측정하여 양생시간에 따른 CLSM의 강성 및 강도 특성을 비교하고자 하였다. CLSM의 재료는 모래와 실트, 플라이애쉬, CSA계 시멘트, 및 물을 혼합하여 충분한 유동성 및 낮은 강도를 나타내도록 구성하였으며, 플로우, 단위중량, 일축압축강도와 같은 CLSM의 물리적 특성을 분석하였다. 또한 경화되기 전부터 CLSM의 강성특성을 모니터링하기 위하여 압축파 측정용 셀을 제작한 후, 셀에 트랜스듀서를 접하여 압축파를 측정하였다. 실험결과, 일축압축강도는 양생초기에 크게 증가하였고, 시간이 길어질수록 증가량이 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 압축파 속도는 양생시간이 길어짐에 따라 증가하였으며, 일축압축강도와 압축파 속도 사이에는 지수함수 관계를 보여주었다. 본 논문에서 제안된 압축파 측정을 통하여 CLSM의 강성변화를 파악할 수 있으며, 경화가 미완료된 양생초기의 일축압축강도 평가에도 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

**주요어** : 유동성 채움재, 일축압축강도, 압축파, 양생시간

## 1. 서 론

도심지의 라이프라인을 구축하기 위하여 지중에는 다양한 종류의 상하수관 및 가스관, 그리고 통신구 등이 매설되어 있으며, 이러한 지중매설물의 신설 및 보수를 위해 굴착 및 되메움 작업이 이루어져 왔다. 되메움 작업 시 주로 사용된 기존의 뒤채움재는 양질의 사질토이며, 기준 강도 및 침하에 대한 안정성을 확보하기 위하여 다짐장비와 같은 기계적 다짐에너지를 이용한 다짐작업이 소요된다. 그러나 다짐작업 시 매설관 하부 및 측면의 협소한 공간으로 인해 다짐효율이 저하되어, 상재하중으로 인한 침하 및 누수에 의한 지

반함몰 등 문제점이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 기존 뒤채움재의 문제점을 줄이기 위한 방법으로써 저강도 콘크리트의 일종인 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)를 활용한 연구가 수행되어 왔다(Cheon et al., 2006; Lim & Seo, 2009; Chae et al., 2014).

CLSM은 주로 시멘트 물, 플라이애쉬, 골재로 구성된 혼합된 재료로써 높은 유동성, 자기수평성, 자기다짐성의 재료적 특징을 나타낸다. 이러한 CLSM은 초기에 높은 흐름특성으로 인해 슬러리 상태로 타설가능하고, 일정시간이 경과되면 소정의 강성 및 강도가 발현되며, CLSM을 뒤채움 재료로써 사용할 경우 기존의 사질토로 되메움 작업 시 다짐

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : asan1103@korea.ac.kr)

불량으로 인한 품질저하 및 시공 소요기간을 개선시킬 수 있다. CLSM의 현장적용은 도심지 매설관의 되메움 작업뿐만 아니라 옹벽배면, 구조물의 전면기초 및 도로 하부층 타설, 그리고 폐광의 충진 등에도 확대되고 있다.

도로의 포장하부구조 설계 시 탄성계수는 재료의 역학적 변형특성인 강성을 나타내는 중요 입력변수로써 설계뿐만 아니라 시공 및 유지관리 단계에서도 유용하게 사용된다. 도로 하부층의 탄성계수는 기존에 널리 사용되는 평판재하시험으로부터 산정될 수 있으나, 시험을 위해 반력으로 사용할 대형장비가 요구되고, 측정시간이 많이 소요되므로 시험 횟수에 제한적이라는 단점이 있다. 이에 따라 비파괴 탐사 기법 중 하나인 탄성파를 이용함으로써 노반 강성의 공간적 변화를 평가한 연구가 있었으며(Joh et al., 2011), 특히 압축파를 이용함으로써 토공노반의 품질관리에 활용하고자 하는 연구도 수행된 바 있다(Park et al., 2009a; 2009b). 이러한 압축파를 이용한 탄성계수 산정은 콘크리트 재료 및 구조분야에서도 널리 사용되어 왔으나(Han et al., 2001; Jung, 2010; Jung et al., 2010), 유동성 채움재인 CLSM의 경우 압축파를 이용한 강성평가는 아직까지 미미한 상태이다.

본 논문에서는 지중매설관의 뒤채움재로 CLSM을 적용하기 위하여, 양생시간에 따른 강성특성 변화를 모니터링하고, 압축강도와의 상관성을 파악하고자 하였다. 먼저 시멘트 물, 플라이애쉬, 골재로 구성되는 CLSM의 각 성분별 특성을 설명하고, 혼합시료의 역학적 특성에 대해 기술하였다. 또한 시간변화에 따른 압축파 특성을 평가하기 위한 압축파 측정 및 실험결과를 보여준 후, CLSM의 일축압축강도 및 압축파 속도의 관계에 대해 토의하였다.

## 2. CLSM의 재료 특성

### 2.1 재료 구성

본 연구에서 사용된 CLSM은 골재로 모래와 실트, 고회재로 CSA계 시멘트, 그리고 플라이애쉬 및 물로 구성하였다. 모래는 30번체와 60번체 사이에 잔류하는 주문진 표준사를 사용하였고, 실트는 0.035mm~0.084mm 입径의 세립사를 사용하였다. CSA계 시멘트는 A사의 보통 포틀랜드 시멘트와 B사의 CSA계 팽창재를 9:1의 비율로 혼합하여 사용하였으며, 이러한 CSA계 시멘트는 C<sub>4</sub>A<sub>3</sub>S 클링커를 포함하므로 양생초기에 다량의 에트린자이트를 생성시킴으로써 수

Table 1. Mixed ratio for CLSM

| Fly ash | CSA cement | Sand  | Silt  | Water |
|---------|------------|-------|-------|-------|
| 9.3%    | 2.8%       | 32.4% | 32.4% | 23.1% |

화반응을 촉진시키고, 수화반응 시에 발생하는 건조수축을 감소시키는 특성이 있다(Yoon & Rho, 2004). CLSM 시료를 만들기 위해 먼저 모래, 실트, CSA계 시멘트, 플라이애쉬를 건배합한 후, 물을 넣어 시료를 혼합하였다. 이때 중량 배합비는 Table 1과 같이 플라이애쉬의 양을 9.3%로 하고, CSA계 시멘트 2.8%, 모래 32.4%, 실트 32.4%, 물 23.1%로 설정하였다.

### 2.2 물리적 특성

배합된 CLSM 시료는 직경 50mm, 높이 100mm의 일축 압축강도 시험용 몰드와 압축파 측정용 셀에 조성되었으며, 시료의 유동성을 확인하기 위해 ASTM D 6103(2004)을 따라 플로우 실험을 수행하였다. 실험결과, 배합된 CLSM 시료의 플로우 값은 250mm로 나타났으며, 이로부터 배합된 CLSM 시료는 충분한 유동성이 확보되었음을 알 수 있다. 또한 CLSM의 현장시공 후 지중매설물의 부상 가능성을 확인하기 위하여 공시체의 단위중량은 양생시간 1일, 2일, 7일, 28일에 각각 측정하였다. 단위중량은 Fig. 1과 같이 양생 1일 후 19.0kN/m<sup>3</sup>에서 28일 후 15.6kN/m<sup>3</sup>로 양생시간에 따라 감소하였다.

### 2.3 일축압축강도

일반적으로 CLSM의 강도특성을 파악하기 위하여 일축 압축강도를 평가 지표로 사용하며, 미국 콘크리트 학회에 따르면 양생 28일의 일축압축강도가 8.3MPa보다 작은 재료로 정의된다(ACI Committee 229, 1999). 이러한 일축압축강도 기준은 매설관 관리의 용이성에 의한 재굴착 방법에 따라 세부적으로 나뉠 수 있으며, 인력굴착이 가능한 강도는 345kPa이고, 기계굴착이 가능한 강도는 1,380kPa로 제안되고 있다(ASTM D 4832, 2002).

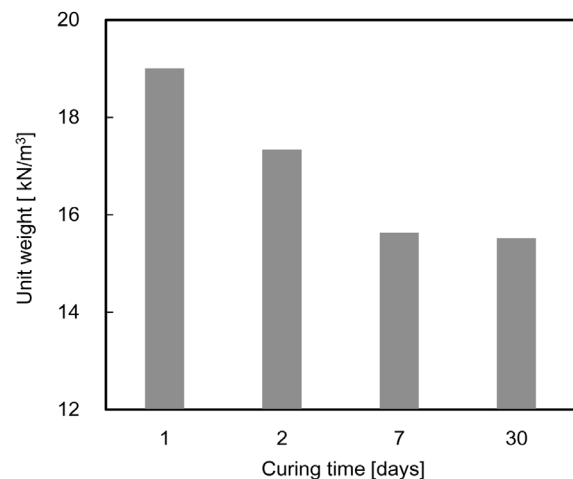


Fig. 1. Unit weight versus curing time

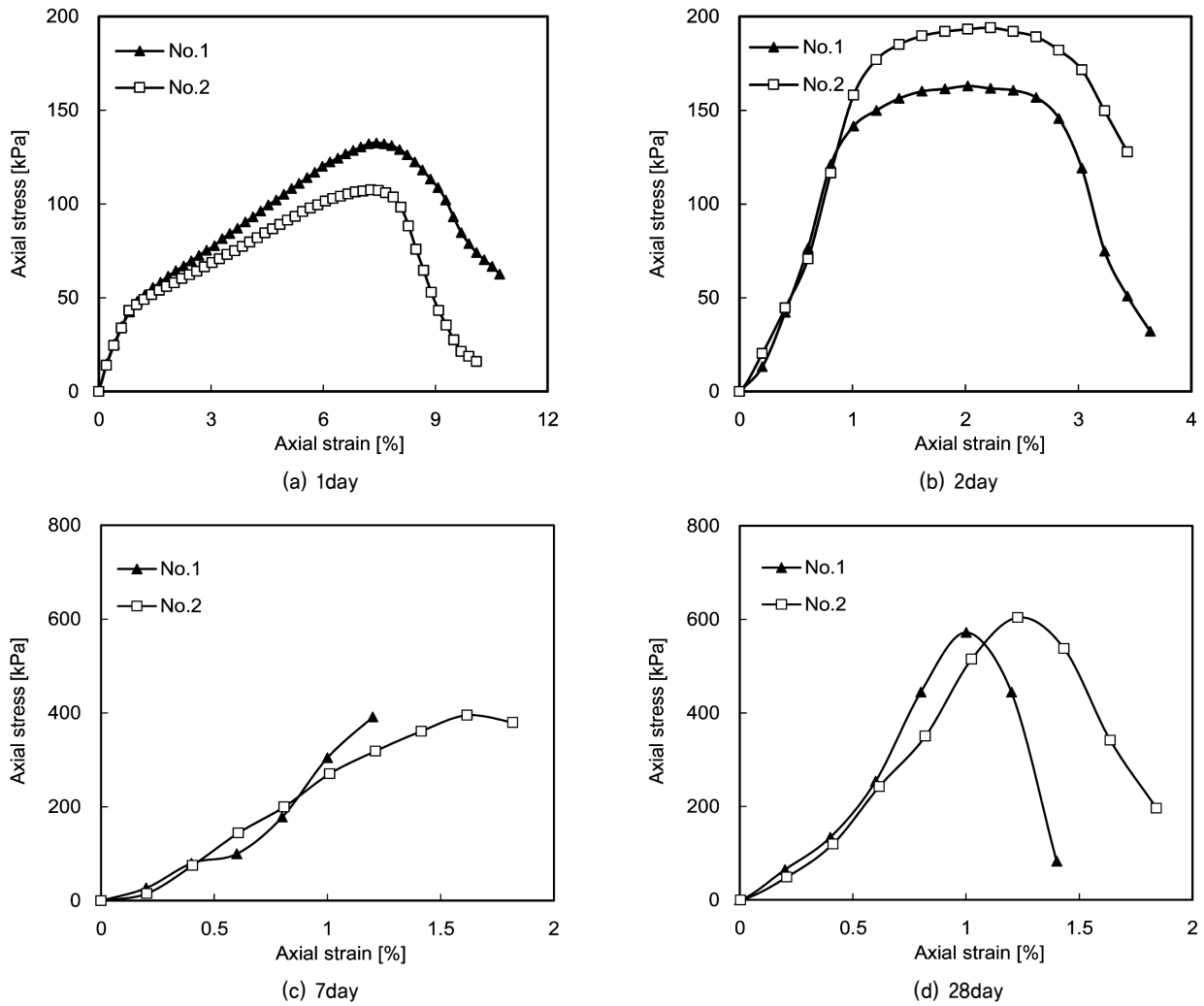


Fig. 2. Uniaxial compression behavior according to curing time

본 연구에서는 시간경과에 따른 강도특성의 변화를 파악하기 위해 양생시간 1일, 2일, 7일, 28일 경과 시 일축압축강도를 측정하였다. 일축압축시험 시 축 방향 변형속도는 분당 1mm로 유지하였으며, 하중을 축 방향 변위 0.2mm마다 한 번씩 기록하였다. 각 양생시간마다 2~3개의 공시체로 일축압축시험을 수행하여 CLSM 시료에 대한 실험결과의 반복성을 관찰하였다.

양생시간 1일, 2일, 7일, 28일 경과 시 축 방향 변형에 따른 압축응력의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2를 보면 양생기간이 증가함에 따라 실험 가능한 최종 축 방향 변형률이 감소하여, 1일에는 축 방향 변형률이 10%까지 진행 가능한 반면, 7일과 28일에는 축 방향 변형률이 약 1.2~1.8%까지만 진행되었다. 여기서 공시체 높이 100mm를 고려하면 축 방향 변형률 10%는 축 방향 변위 10mm에 해당된다. 또한 양생기간이 증가함에 따라 압축응력이 최대가 되는 축방향 변형률이 감소함으로써 각 시점에서 할선계수가 증가하는 것을 보여준다. 이로부터 양생기간이 증가함에 따라 경화가

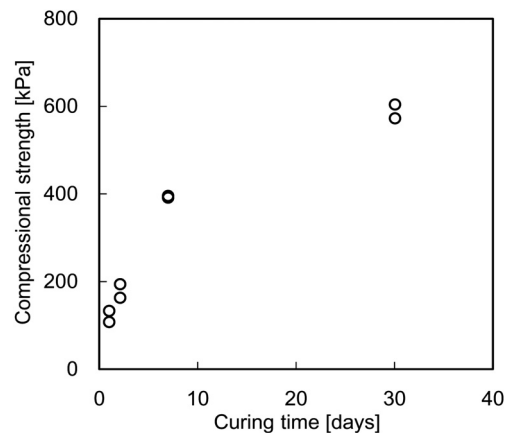


Fig. 3. Compressive strength versus curing time

진행되며, 시료의 강성이 증가하고 있는 것으로 판단된다.

일축압축시험 시 각 양생시간에 측정된 최대 압축응력은 해당 시료의 일축압축강도를 나타내며, 양생시간에 따라 산정된 일축압축강도를 Fig. 3에 도시하였다. 양생기간이 증가함에 따라 일축압축강도는 증가하였으며, 양생시간 7일 이

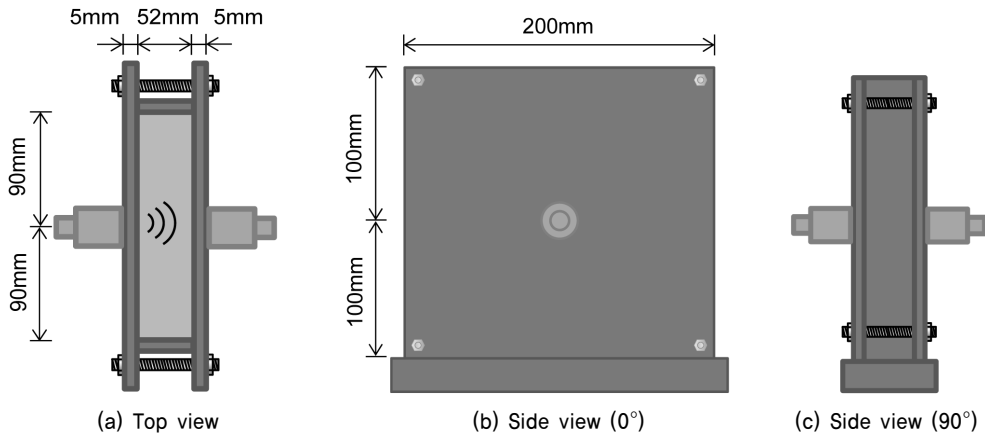


Fig. 4. Schematic drawing of cell for wave measurement

후로는 압축강도의 증가량이 감소하였다. 양생초기인 1일과 2일의 평균 일축압축강도는 117kPa 및 178kPa로 측정되었고 28일의 평균 일축압축강도는 약 588kPa로 측정되었으며, 이는 ASTM D 4832(2002)에서 제안된 기계굴착이 가능한 강도(1,380kPa)조건을 만족하는 것으로 나타났다.

### 3. CLSM의 탄성파 특성

#### 3.1 압축파 측정시스템

양생초기부터 CLSM의 탄성과 특성을 측정하기 위하여 압축파 측정용 셀을 Fig. 4와 같이 제작하였다. 압축파 측정용 셀은 MC 나일론 재질의 판을 직육면체 형태로 구성하였으며, 상부는 열린 상태로 설계하여 시료를 채울 수 있도록 하였다. 옆판의 두께와 높이는 각각 5mm 및 200mm이며, 옆판의 가로길이는 200mm와 50mm 두 종류로 이루어졌다. 홈이 패인 밑판에 옆판을 끼우고, 볼트와 너트로 체결하여 셀의 형태를 고정시켰다. 이때 압축파가 판을 통하여 전달되는 현상을 방지하기 위하여 200mm 옆판과 50mm 옆판 사이에는 간격이 1mm가 되도록 유지시켰다. 옆판과 밑판을 조립한 후, 연결부위에서 누수가 발생하지 않도록 실리콘을 도포하여 방수시켰다.

셀에 조성된 시료의 압축파 특성은 가로길이가 200mm인 한 쌍의 옆판에 송·수신용 압축파 트랜스듀서를 마주 보도록 접촉시킴으로써 측정되었다. 셀을 통한 직접 전달파(directly transmitted wave)의 영향을 최소화시키기 위하여 트랜스듀서는 옆면의 중앙에 위치시켰으며, 트랜스듀서와 셀 사이에는 전달되는 파의 에너지효율을 높이기 위하여 진공그리스를 사용하였다(Lee et al., 2007). 이와 같이 트랜스듀서를 셀에 적용함으로써, 양생초기부터 양생후기까지 변화하는 CLSM의 압축파 특성을 모니터링할 수 있도록 하였다. 트랜

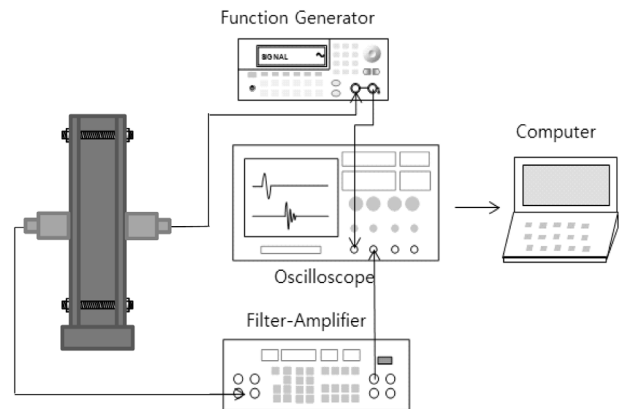


Fig. 5. Measurement system for compressional wave

스듀서에 연결된 탄성파 측정시스템은 Fig. 5와 같이 신호발생기(Function Generator), 필터-증폭기(Filter-Amplifier), 오실로스코프(Oscilloscope)로 구성되었다. 입력파로써 진폭 및 주파수가 각각 10V 및 20Hz로 설정된 구형파를 송신하여 셀과 시료를 통과시킨 후 수신된 신호를 감지하였으며, 필터-증폭기를 통하여 500Hz~1MHz 대역 사이의 신호만 획득되도록 필터링하였다.

#### 3.2 압축파 신호 및 속도

압축파 측정시스템을 이용하여 측정된 압축파 신호는 양생시작 후 15분, 30분, 1시간, 2시간, 4시간, 8시간, 12시간, 1일, 2일, 7일, 14일, 28일에 각각 기록되었으며 양생시간에 따른 압축파 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6을 보면 양생시간이 증가함에 따라 압축파의 초기도달시간이 증가하였으며, 주파수도 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 측정된 압축파 신호로부터 시료의 강성특성을 나타내는 압축파 속도를 산정하기 위하여 본 연구에서는 Eq. (1)과 같이 셀과 시료를 통과한 압축파의 초기도달시간( $t_m$ )을 보정해주었다.

$$t_s = t_m - t_c \quad (1)$$

여기서  $t_s$ 와  $t_c$ 는 각각 시료를 통과한 신호의 초기도달시간과 셀을 통과한 신호의 초기도달시간을 의미한다. 양생시작 전 셀을 통과하는 신호의 초기도달시간을 측정된 뒤, 시료를 조성하여 양생을 시작한 후에 측정된 초기도달시간에서 제하여 시료만을 통과한 신호의 초기도달시간을 산정하였다. 시료를 통과한 신호의 초기도달시간( $t_s$ ) 및 조성된 시료의 두께( $L_s$ )를 이용하여 양생시간별 CLSM의 압축파 속도는 Eq. (2)와 같이 계산되었다.

$$v_p = \frac{L_s}{t_s} \quad (2)$$

양생시간별로 Eq. (2)에 따라 산정된 압축파 속도의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7을 보면 양생시간이 증가할수록 압축파의 속도는 증가하였으며, 시간이 지날수록 증가량이 감소하는 경향을 보인다. 이때 양생 후 15분에 측정된 압축파 속도는 177m/s로써 일반적으로 건조된 사질토에서 나타나는 압축파 속도범위(120~170m/s)에 해당되는 반면, 28일 압축파 속도는 2,096m/s로써 일반적인 사암(Sandstone) 또는 셰일(Shale)에 근접함을 알 수 있다(Santamarina et al., 2001). 이는 양생초기의 수화반응으로 인해 CLSM 시료의 수분함량이 감소되고, 시간이 경과할수록 경화가 진행되어 최종적으로는 암석과 유사하게 고화되기 때문인 것으로 사료된다.

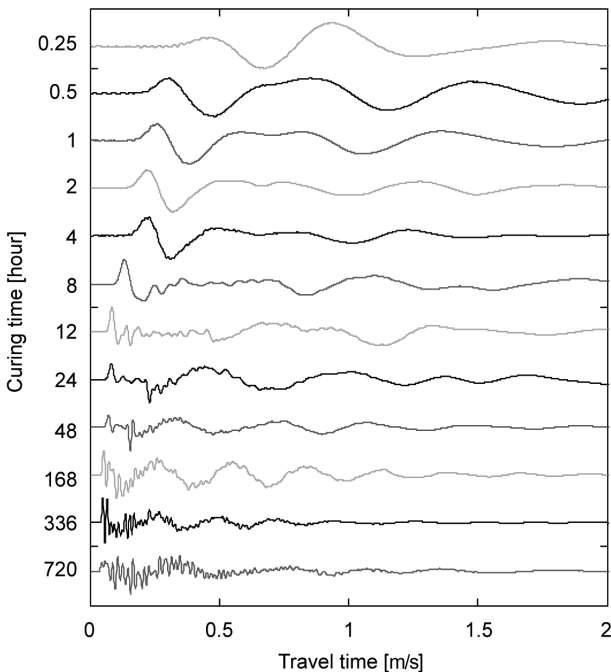


Fig. 6. Compressive wave signals according to curing time

#### 4. 압축파 속도 - 일축압축강도 관계

재료의 기본적인 특성을 얻기 위한 일축압축실험은 공시체의 크기 및 형상에 대해 영향을 받으며, 콘크리트의 경우 공시체의 탈형에 소요되는 시간이 요구되고, 실험자체의 소요시간이 상대적으로 길다는 단점이 있다. 이에 반해 탄성과 속도 측정실험은 실험법의 소요되는 시간이 상대적으로 짧고, 시료 내부의 구조적인 변화 없이 탄성계수를 추정할 수 있다는 장점이 있어 널리 이용되어 왔다(Baek et al., 2006; Choi & Baek, 2014). 이러한 이유로 탄성과 속도를 통해서 일축압축강도를 추정하기 위한 연구들도 수행된 바 있으며(Inoue & Ohomi, 1981; Kahraman, 2001; Sharma & Singh, 2008), 본 연구에서는 탄성과 속도를 이용하여 CLSM의 양생시간에 따른 일축압축강도의 변화를 추정하고자 하였다. 실험결과, 양생이 진행될수록 압축파의 속도 및 일축압축강도가 증가하였으며, 압축파 속도와 일축압축강도 사이의 관계는 Fig. 8에 도시하였다. 양생시간 1일, 2일, 7일, 28일에 측정된 결과를 이용하여 회귀분석을 수행한 후, 압축파 속도와 일축압축강도 사이의 관계는 Eq. (3)과 같이 비선형 관계식을 갖는 것으로 나타났다.

$$f_c = 21.72e^{0.0017v_p} \quad (3)$$

여기서  $f_c$ 는 공시체의 일축압축강도,  $v_p$ 는 시료의 압축파 속도를 나타낸다. Fig. 8에서 양생시간 1일부터 28일까지 측정된 결과로 회귀분석한 관계는 실선으로 표시하였으며, 압축파 속도의 증가에 따라 일축압축강도는 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 반면, 양생시작 후 15분부터 12시간까

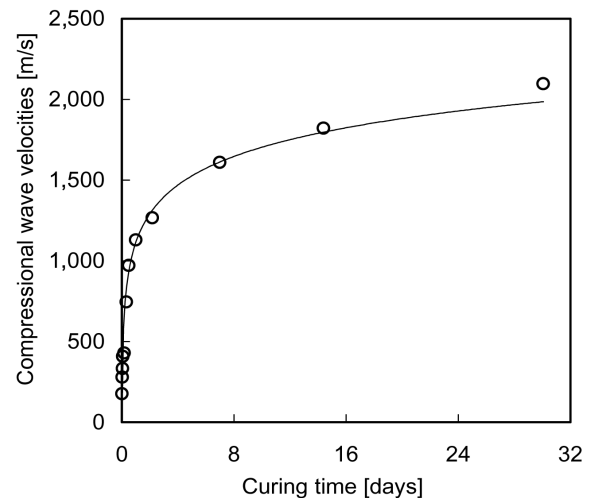


Fig. 7. Variation of compressional wave velocities according to curing time

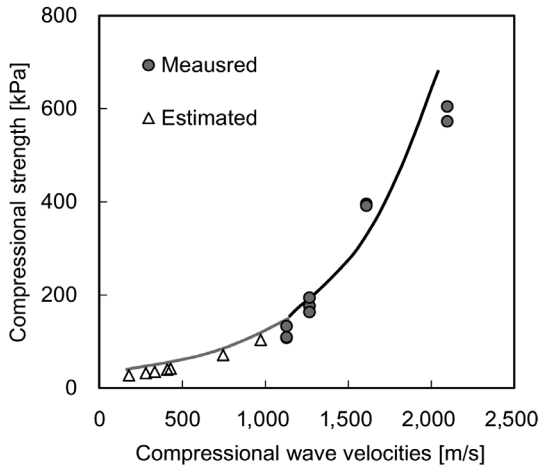


Fig. 8. Comparison between compressional wave velocities and compressive strength

지는 공시체의 불충분 경화로 인해 탈형이 불가능하였고, 이에 따라 일축압축시험을 수행할 수 없었기 때문에 각 양생 시간에서 획득된 압축파 속도와 Eq. (3)의 관계식을 이용하여 양생초기의 일축압축강도를 추정하였다. 이때 Eq. (3)을 사용하여 추정된 상관관계는 Fig. 8에 점선으로 나타내었으며, 양생시작 후 15분 및 12시간 경과 시 일축압축강도는 27kPa 과 103kPa로 추정된다. 이처럼 압축파 속도로부터 일축압축 강도를 추정하는 관계식은 지중매설관의 뒤채움재로 사용되는 CLSM과 같이 경화가 완전히 진행되지 않았으나, 양생 초기의 강도평가가 요구되는 경우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 지중매설관의 뒤채움재로 사용되는 CLSM의 양생시간에 따른 강도 및 강성 특성을 파악하기 위하여 일축압축강도와 압축파 속도의 관계를 조사하였다. 시험에 사용된 CLSM은 골재로 모래와 실트, 고화제로 CSA계 시멘트, 그리고 플라이애쉬 및 물로 구성되었으며, 각 재료의 중량비는 플라이애쉬 9.3%, CSA계 시멘트 2.8%, 모래 32.4%, 실트 32.4%, 물 23.1%로 선정하여 배합하였다. 시간경과에 따른 CLSM의 강도특성을 파악하기 위해 양생시간 1일, 2일, 7일, 28일이 경과한 공시체를 이용하여 일축압축시험을 수행하였다. 또한 CLSM의 압축파 특성을 모니터링하기 위해 트랜스듀서가 설치된 압축파 측정용 셀을 제작하였으며, 셀을 통하여 압축파가 직접 전달되는 현상을 방지하기 위하여 옆판사이의 간격을 설정해둔 후, 실리콘으로 방수처리 하였다. 신호 발생기, 필터-증폭기, 오실로스코프로 구성된 압축파 측정시스템을 한 쌍의 트랜스듀서와 연결한 후 셀의

옆면에 접하여 양생시작 후 4시간부터 28일까지 시료를 통과한 압축파의 변화를 모니터링하였다. 본 연구의 주요 실험결과는 다음과 같다.

- (1) 배합된 CLSM 시료의 물리적 특성을 평가하기 위하여 플로우시험 및 단위중량시험을 수행하였으며, 각각 200mm 이상과 15kN/m<sup>3</sup> 이상이 됨을 확인하였다.
- (2) 양생시간이 증가함에 따라 최대 압축응력에 해당하는 변형률은 감소하였으며, 시료의 최대 압축응력을 나타내는 일축압축강도는 증가하였다. 그 결과 양생시간이 증가함에 따라 경화진행에 의한 시료의 강성이 증가되고 있는 것으로 판단된다.
- (3) 양생시간이 증가함에 따라 압축파의 초기도달시간 및 주파수는 증가하였다. 셀과 시료를 통과한 압축파의 초기도달시간을 보정한 후 산정된 압축파 속도는 양생시간이 증가함에 따라 증가하였으며, 전반적인 압축파 속도는 일반적인 사질토에서부터 사암 및 셰일과 같은 암석을 포함하는 범위로 분포되었다.
- (4) 양생시간에 따른 CLSM의 일축압축강도-압축파 속도의 상관성을 파악하기 위하여 회귀분석을 수행하였으며, 압축파 속도와 일축압축강도 사이에는 지수함수의 비선형 관계가 있음을 보여주었다.

본 논문에서 제안된 압축파 속도와 일축압축강도 사이의 관계는 배합 비율 및 조건 등에 따라 변화될 것으로 예상되므로 일반적인 압축파 속도와 일축압축강도 사이의 관계를 도출하기 위해서는 추후 다양한 배합비로 조성된 CLSM을 이용한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이와 같은 CLSM의 압축파 속도 및 일축압축강도 관계는 경화가 미완료된 양생 초기의 강도 및 강성평가 시 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업 (14SCIP-C091084-01) “도심지 지반함몰 저감을 위한 지하매설물 설치 기술 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

1. ACI Committee 229 (1999), Controlled low-strength materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-99, pp. 1~15.
2. ASTM D 4832 (2002), Standard test method for preparation

- and testing of controlled low strength material (CLSM) Test Cylinders, American Society for Testing Materials, pp. 1~5.
3. ASTM D 6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low-strength material (CLSM), American Society for Testing and Materials, pp. 1~3.
  4. Baek, S. C., Kim, Y. T., Kim, H. T., Yoon, J. S. and Lee, Y. G. (2006), Evaluation of rock uniaxial compressive strength using ultrasonic velocity, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 7, No. 2, pp. 33~42 (in Korean).
  5. Chae, D. H., Kim, K. O., Shin, H. Y. and Cho W. J. (2014), Dynamic characteristics of liquidity filling materials mixed with reclaimed ash, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 4, pp. 5~11 (in Korean).
  6. Cheon, S. H., Jeong, S. S., Lee, D. S. and Kim D. H. (2006), Mechanical characteristics of accelerated plowable backfill materials using surplus soil for underground power utilities, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 26, No. 5, pp. 303~312 (in Korean).
  7. Choi, G. H. and Baek, S. C. (2014), Predicting the uniaxial compressive strength and young's modulus of rocks using ultrasonic velocity, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 2, pp. 53~58 (in Korean).
  8. Han, S. H., Kim, J. K., Park, W. S. and Kim, D. H. (2001), Effect of temperature and aging on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 13, No. 6, pp. 610~618 (in Korean).
  9. Inoue, M. and Ohomi, M. (1981), Relation between uniaxial compressive strength and elastic wave velocity of soft rock, In: Akai K., Mayashi M. Nishimatsu Y. Editors. Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo, pp. 9~13.
  10. Joh, S. H., Hwang, S. K. and Nayan, K. A. M. (2011), Real-time spatial profiling of subgrade stiffness for quality assurance of field compaction, The 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January, pp. 1~20.
  11. Jung, B. S. (2010), Prediction and application of the dynamic modulus of elasticity of concrete using the wavelet analysis, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 6, pp. 843~850 (in Korean).
  12. Jung, B. S., Lee, J. H. and Kweon, G. C. (2010), Application of impact resonance test to the determination of elastic modulus and damping ratio of concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 5, pp. 625~632 (in Korean).
  13. Kahraman, S. (2001), Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 38, No. 7, pp. 981~984.
  14. Lee, J. S., Kim, S. S., Kim, D. H., Kim, U. Y. and Lee, I. M. (2007), Ultrasonic reflection imaging for discontinuity detection of rock mass - laboratory study, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 23, No. 1, pp. 51~65 (in Korean).
  15. Lim, Y. and Seo, C. B. (2009), Evaluation of engineering properties of clsm using weathered granite soils, Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation, Vol. 9, No. 3, pp. 19~26 (in Korean).
  16. Park, C. S., Mok, Y. J., Choi, C. Y. and Lee, T. H. (2009a), A methodology for quality control of railroad trackbed fills using compressional wave velocities : I. Preliminary investigation, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 25, No. 9, pp. 45~55 (in Korean).
  17. Park, C. S., Mok, Y. J., Hwang, S. K. and Park, I. B. (2009b), A methodology for quality control of railroad trackbed fills using compressional wave velocities : II. Verification of applicability, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 25, No. 9, pp. 57~66 (in Korean).
  18. Santamarina, J. C., Klein, A. K. and Fam, M. A. (2001), Soils and waves, John Wiley & sons Ltd., England, pp. 250.
  19. Sharma, P. K. and Singh, T. N. (2008), A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Vol. 68, No. 1, pp. 17~22.
  20. Yoon, S. W. and Rho, J. S. (2004), Preparation and application of CSA expansive additives using industrial wastes, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 16, No. 3, pp. 369~374 (in Korean).