



비파괴 기법을 이용한 유동성 채움재의 초기경화특성 평가

Evaluation of Early-age Properties of Controlled Low Strength Material Using Non-destructive Testing

김동주^a · 김상철^b · 한우진^c · 이종섭^d · 변용훈^{e,†}

Dong-Ju Kim · Sang-Cheol Kim · Woojin Han · Jong-Sub Lee · Yong-Hoon Byun

ABSTRACT

Controlled Low Strength Material (CLSM) has high fluidity and self-compaction characteristics. CLSM is mainly used for backfilling the excavated road. Early-age properties of CLSM should be characterized for fast restoration of the road. In this study, shear wave monitoring and Vicat needle test are performed to investigate the early-age properties of CLSM depending on the setting time. CLSM consists of CSA cement, fly ash, silt and sand, accelerator, and water. Five fly ashes with different chemical properties are used for CLSM samples. The penetration of CLSM along setting time is obtained through the Vicat needle test. A pair of bender elements are placed in a mold for shear wave measurement, and the change in shear waves with the setting time is monitored. The experimental results show that, regardless of the type of fly ash, the penetration depth decreases and the shear wave velocity increases with the setting time. Depending on the type of fly ash, initial and final times and shear wave velocity change. After testing, the correlation between penetration and shear wave velocity is obtained with high coefficient of determination. The shear wave measurement technique using the bender element can be used to identify early-age properties.

Keywords: CLSM; early-age property; penetration; shear wave

1. 서론

도심지 내의 상하수도관, 전력케이블, 도시가스관 등 각종 라이프 라인은 도시의 발달로 인해 지중에 매설되었으며, 지중 매설물의 유지보수를 위해서는 굴착 및 되메움 작업이 실시되어 왔다 (Ryu et al., 2015). 공간적 제약이 있는 현장에서 되메움 작업 시 사질토를 사용할 경우, 다짐효율 저하로 인한 다짐불량이 발생될 수 있으며, 이는 추후 침하와 누수 및 지반 함몰 등의 문제로 이어질 수 있다 (Ryu et al., 2015; Lee et al., 2015). 사질토를 활용한 방법을 대체하기 위하여, 유동성

채움재 (Controlled Low Strength Material, CLSM)에 관한 연구가 수행되어 왔다 (Won et al., 2001; Park et al., 2004; Cheon et al., 2006). CLSM은 기본적으로 시멘트, 물, 비회, 골재로 구성되어 있으며, 높은 유동성을 띄어 협소한 공간에서도 뒷채움재로 적용이 가능하며, 자기 다짐성으로 인해 별도의 다짐작업 없이 타설이 가능하다 (Han et al., 2015; Han et al., 2016). 타설 후, 양생 시간이 경과한 후에는 일정 강도가 발현되어 안정성을 기대할 수 있으며, 콘크리트에 비해 저장도를 띄기 때문에, 추후 뒷채움재의 재굴착도 가능하다는 장점이 있다 (Cheon et al., 2006; Ryu et al., 2015).

도심지의 지중매설물 상부에는 대부분 도로가 존재하며, 이에 따라 지중매설물의 굴착 및 되메움 작업 시에는 통제에 의한 교통혼잡이 야기될 수 있다. 이를 신속하게 해소하기 위해서는 CLSM의 초기강도가 적절히 발현되어야 하며, 이에 따라 CLSM의 초기 경화특성을 모니터링하는 방법이 필요한 실정이다. 기존에는 비카트칩에 의한 응결시간 시험법 (ASTM C 191)에서 일정 시간동안 주기적인 관입도의 측정으로부터 수경성 시멘트의 초결 및 종결시간이 결정되어 왔다. 그러나 비카트칩 시험법은 시료표면의 국부적인 소성변형을 유발시키므로 응결상태의 연속적 모니터링에는 부적합하며, 시멘트계 재료의 모니터링을 위하여 비파괴 기법의 일종인 탄성파를 이용한 연구가 수행되어 왔다 (Reinhardt et al., 2003).

^a Graduate Student, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

^b Ph.D. Candidate, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University

^c Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

^d Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

^e Assistant Professor, School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Institute of Agricultural Science & Technology, Kyungpook National University

† Corresponding author

Tel.: +82-53-950-5732, E-mail: yhbyun@knu.ac.kr

Received: October 29, 2019

Revised: February 21, 2020

Accepted: February 21, 2020

시멘트계 재료의 응결과정 모니터링에 관한 초기 선행연구에서는, 주로 탄성파의 일종인 압축파를 이용하여 시멘트계 재료에서의 압축파 신호와 응결상태의 상관성을 조사하였다 (Sayers & Dahlin 1993; Lee et al., 2004; Gu et al., 2006; Song et al., 2007; Dumoulin et al., 2012). 그러나 압축파는 시멘트계 재료에 포함된 기포의 영향에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다으며, 압축파 속도와 응결상태의 상관성을 결정하는데 어려움이 있는 것으로 보고되었다 (Zhu et al., 2011). 반면, 전단파는 시멘트계 재료에 포함된 기포의 영향에 민감하지 않으며, 응결상태에 따라 전단파 신호의 특성이 변화하는 것으로 나타났다 (Byun et al., 2016). 탄성파를 이용한 초기 연구에서는 초음파 트랜스듀서를 이용하여 전단파를 측정하였으나, 초음파 트랜스듀서를 이용할 경우 시멘트계 재료의 양생 초기에 높은 감쇠효과로 인해 전단파 측정이 어려운 것으로 보고되었으며, 감쇠효과를 줄일 수 있는 벤더 엘리먼트를 이용한 방법이 제안된 바 있다 (Han et al., 2015). 그러나, 아직까지 CLSM의 초기경화특성을 파악하기 위한 비카트칩 관입도와 전단파 속도의 상관관계에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 응결과정에 따른 CLSM의 초기경화특성을 파악하기 위하여, 전단파 모니터링과 비카트칩 시험을 수행하였다. 먼저 CLSM 재료의 구성성분과 비회 종류별 화학특성에 대해 분석하였고, 비카트칩 시험법과 전단파 모니터링 기법에 관해 기술하였다. 응결상태에 따른 비카트칩 관입도와 측정된 전단파 속도를 분석한 후, 그 상관관계에 대해 규명하였다. 본 연구에서 제안된 전단파 모니터링 기법을 활용한다면, 뒷채움재로 활용된 CLSM에 손상없이 초기경화특성을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

II. 재료 및 시료특성

1. 재료구성

본 연구에서 조성된 유동성 채움재인 CLSM은 CSA 팽창재, 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 급결제, 물로 구성되었으며, CLSM의 중량배합비는 Table 1에 정리하여 나타내었다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 급결제는 알칼리프리카이며, 실트와 모래의 입도분포는 Fig. 1과 같다. CLSM 시료의 배합순서는 시멘트, 비회, 실트 그리고 모래를 건배합한 후, 물을 넣어 시료를 혼합하였으며, 약 100 초가 경과한 후에는 급결제를 넣어 배합을 완료하였다. 경화시간을 단축할 수 있는 급결제는 ACI committee 229 (1999)에서 제안하는 조속한 교통개방 시 교통하중을 지지할 수 있도록 수시간내 경화완료의 조건을 만족시키기 위하여 사용되었다.

급결제 첨가 후 CLSM은 급속의 응결 반응을 보이므로, CLSM의 총 배합시간은 180 초가 초과되지 않도록 하였다.

Table 1. Mix design of CLSM [unit : kg/m³]

Water	Cement	Silt	Sand	Fly ash	CSA	Accelerator
596.7	171.8	214.8	501.2	83.5	43	35.8

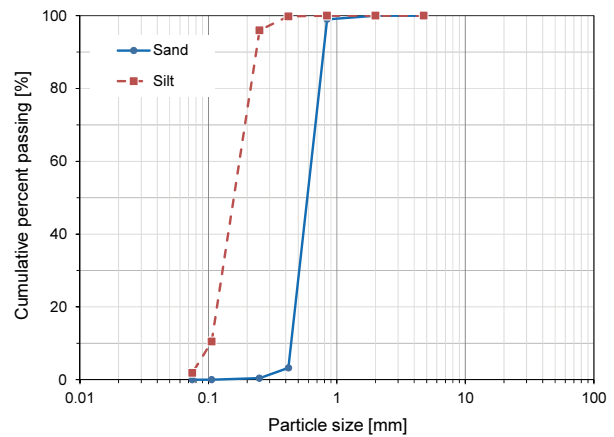


Fig. 1 Grain-size distribution curves

2. 비회의 화학적 특성

본 연구에서는 CLSM 시료의 배합을 위해 사용된 비회는 공급처에 따라 총 5종류로 구분되며, 비회의 화학적 특성은 Table 2에 정리하여 나타내었다. ASTM C 618에 따라 비회는 물리적 화학적 특성에 기초하여 F급, N급, C급으로 구분할 수 있다. 제시된 기준 중 실리카 (SiO₂) 및 알루미늄 (Al₂O₃), 그리고 산화제2철 (Fe₂O₃)의 함유량이 클수록 CLSM의 경화 촉진 및 압축강도를 증가시키며, 강열감량 및 산화칼슘 (CaO) 그리고 산화마그네슘 (MgO)의 함유량이 큰 경우, 경화시간의 지연 및 CLSM의 내구성을 저해한다. 따라서, SiO₂ 및 Al₂O₃, Fe₂O₃는 함유량이 클수록, 강열감량 및 CaO 그리고 MgO는

Table 2. Chemical components and loss on ignition of fly ashes used in this study [unit : %]

Specimen	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	V ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	L.O.I
No.1	0	17.8	66.5	0	0.5	3.5	2.1	6.3	3.3
No.2	0	17.7	68.9	0	0.8	4.3	2.0	3.1	3.2
No.3	7.5	2.8	25.8	4.7	0	40.0	2.1	13.7	3.4
No.4	0	8.1	48.5	4.9	0.7	30.9	2.1	2.5	2.3
No.5	5.8	9.0	34.8	4.8	0.1	27.8	2.1	11.3	4.3

함유량이 적을수록 비회의 품질이 양호한 것으로 알려져 있다.

No.1 비회의 화학적 성분 중 SiO₂ 및 Al₂O₃, 그리고 Fe₂O₃의 함유량이 총 90.7%로 나타났으며, 강열감량은 3.3%로써 나타나 ASTM C 618 규격에 따라 No.1 비회는 F급으로 분류되었다. No.2 비회는 SiO₂ 및 Al₂O₃, Fe₂O₃의 총 함유량이 89.7%이며, 강열감량은 3.2%로써 F급으로 분류되었다. No.3 비회는 SiO₂와 Al₂O₃, 그리고 Fe₂O₃의 총 함유량이 42.4%이며, 강열감량은 3.4%로써 ASTM C 618 기준에 부합하는 비회로 분류될 수 없었다. No.4 비회의 SiO₂와 Al₂O₃, 그리고 Fe₂O₃의 총 함유량이 59.1%이며, 강열감량은 2.3%로써 C급으로 분류되었다. No.5 비회는 SiO₂와 Al₂O₃, 그리고 Fe₂O₃의 총 함유량이 55.1%이며, 강열감량은 4.3%로써 C급으로 분류되었다.

3. CLSM의 기본 물성

ACI Committee 229에서 규정하고 있는 유동성 채움재의 기준은 플로우값 200 mm 이상을 만족하며, 양생 28일 경과 후 일축압축강도는 8.3 MPa 이하로 규정하고 있다. 배합된 CLSM 시료의 플로우값을 확인하기 위하여 ASTM D 6103에서 제시하고 있는 플로우 시험을 수행하였다. 플로우 시험 결과는 Fig. 2와 같은 형태로 나타났다. No.2 와 No.4 비회의 플로우값은 288 mm와 280 mm로 높은 유동성을 가졌으며, No.1 과 No.3 비회는 260 mm와 250 mm로 확인되었다. No.5 비회에서는 228 mm로 유동성이 가장 작게 나타났다. 전체적으로 본 연구에서 배합된 CLSM 시료는 고유동성의 기준치 200 mm 이상을 모두 만족하였다. 양생 28일의 일축압축강도는 No.5 비회를 제외한 No.1~No.4 비회에서 1.4 MPa로 나타났으며, No.5 비회의 일축압축강도는 1.0 MPa로 확인되었다. 이는 CLSM의 일축압축강도 기준인 8.3 MPa이하이며, 향후 보수작업을 위한 재굴착이 가능한 강도인 0.7~2.1 MPa를 만족하는 것으로 확인되었다.

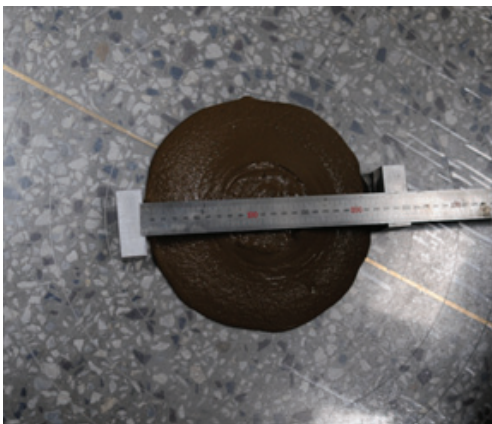


Fig. 2 Picture of CLSM in flow test

III. 실험방법

1. 비카트침 시험

본 연구에서는 ASTM C 191에서 제시하고 있는 기준에 의거하여 비카트침 시험을 수행하였다. 먼저, 룯드 선단부에 고정된 침의 끝을 시료표면에 접촉시키고 멈춤나사로 룯드를 고정시켜 눈금자의 초기위치를 기록한 후, 멈춤나사를 풀어 룯드를 낙하시켜 침을 시료에 관입시켰다. 관입된 깊이를 눈금자로 측정 후, 관입된 위치와 초기위치의 차이로부터 관입 깊이를 산정하였다. 시료양생 후 15분 간격으로 관입시험을 실시하며, 시험위치로부터 6 mm 이내에서는 관입시험을 수행하지 않았다. 관입된 침의 깊이가 25 mm 인 시점을 초결시간으로 결정하고, 침의 관입이 더이상 발생하지 않는 시점을 종결시간으로 결정하였다.

2. 전단파 모니터링

벤더 엘리먼트는 황동판의 양면에 압전소자 (Piezo-electric materials)가 덮여져 있으며, 전기적 흐름을 통해 벤더 엘리먼트는 전면으로 전단파를 발생시키게 된다. 벤더 엘리먼트는 배선방식에 따라 직렬형식과 병렬형식으로 분류되며, 직렬형식은 제작이 간단하여 건조된 지반 재료에서 많이 적용되었다 (Gu et al., 2015). 그러나 전해질 용액에서 실험을 실시할 경우, 전기적 간섭현상으로 인해 전단파 해석이 어려워지므로, 본 연구에서는 병렬형식의 벤더 엘리먼트를 채택하였다. 병렬형식을 적용할 경우, 양생초기의 액체상태인 CLSM에서도 전기적 간섭의 영향을 줄일 수 있으므로, 별도의 전자기적 차폐와 접지 및 에폭시 방수를 실시할 경우 전기적 간섭의 영향을 최소화하여 전단파 모니터링이 가능하다 (Lee et al., 2006).

배합 직후의 CLSM은 고유동성의 액체상태이므로 양생시간동안 전단파 신호의 특성변화를 측정하기 위하여, 직경과 높이가 각각 60 mm 및 120 mm이며 두께 4.5 mm의 플라스틱 몰드를 제작하였다. 몰드 내부에는 양생한 CLSM의 전단파 모니터링을 위해 한 쌍의 벤더 엘리먼트를 사각형태의 구리 중공관에 설치하였으며, 에폭시와 실리콘으로 고정하여 캔틸레버 보 형태로 거동될 수 있도록 하였다.

전단파 모니터링을 위해 캔틸레버 보 형식으로 설치된 벤더 엘리먼트를 Fig. 3과 같이 양쪽 끝단에 마주보도록 위치시켜 각각 발진기와 수신기의 역할을 수행하도록 실험을 설계하였다. 측정 시스템은 신호 발생기 (Keysight, 33500b), 필터-증폭기 (Krohn, model 3364), 오실로스코프 (Keysight, DSOX 2004a)로 구성되었다. 신호 발생기를 통해 10 V의 진폭과 20 Hz의 주파수의 구형파를 입력신호로 설정하였으며, 벤더 엘

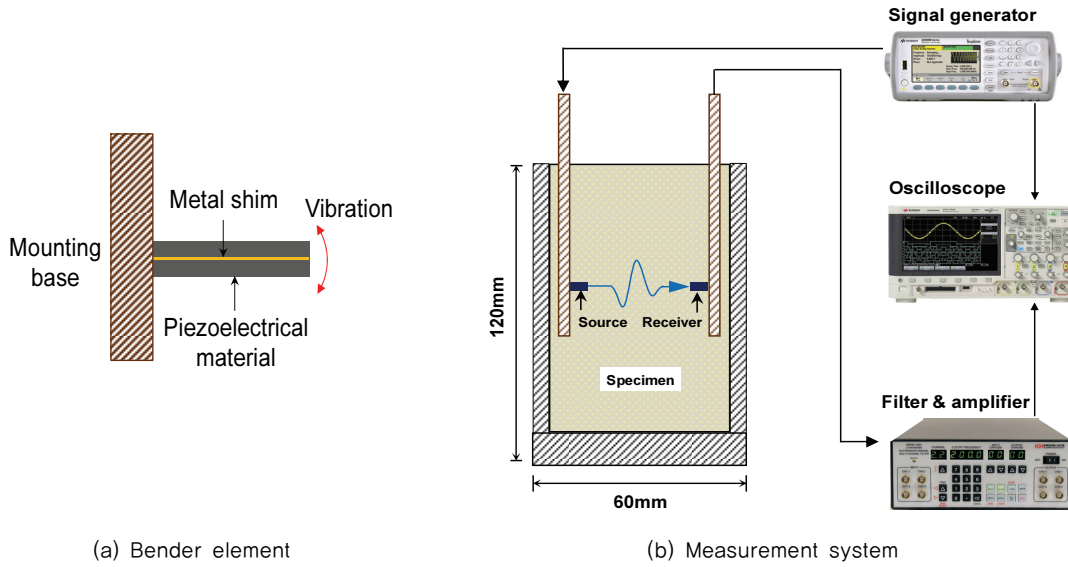


Fig. 3 Schematic drawing of test set up for the measurement of shear waves

리먼트를 통해 전단파가 CLSM 시료를 통하여 전달되도록 하였다. 반대편 벤더 엘리먼트에 수신된 신호는 필터-증폭기에서 500 Hz~100 kHz 대역 사이의 신호만 통과되도록 필터링되었으며, 최종적으로 출력신호는 오실로스코프에 기록되었다.

IV. 결과 및 고찰

1. 관입도

5종류의 CLSM 시료에 대하여 일정한 시간 간격을 두고 비카트칩 시험을 수행한 결과, Fig. 4와 같이 양생시간에 따른 관입결과를 획득하였다. Fig. 4에서 x축은 양생이 진행된 시간을 나타내며, y축은 비카트칩의 관입깊이를 보여준다. 5종류의 CLSM 중 No.1 및 No.2 비회의 초결시간은 154분과 224분으로 나타났으며, No.3~No.5 비회에서의 초결시간이 각각 1234분, 1382분, 1484분으로 나타났다. No.1 및 No.2 비회의 초결시간이 No.3~No.5 비회의 초결시간보다 빠르게 나타났다. 최종적인 응결을 나타내는 종결시간은 초결시간이 빠른 No.1과 No.2 비회에서 1174분 및 1334분으로 나타났으며, 초결시간과 종결시간의 큰 차이를 보였다. 반면에, 초결시간이 느린 No.3~No.5 비회의 종결시간은 1864분, 1647분, 1889분으로 측정되어, 초결시간과 종결시간의 차이가 상대적으로 작게 도출되었다. 응결특성에 따라 시료를 분류할 경우, No.1과 No.2 비회가 유사하며, No.3~No.5 비회가 유사한 것으로 나타났다. 이는 5종류의 CLSM 시료에서 배합재료와 방법이 동일하게 유지되었고, 비회의 종류만 변화되었으므로 비회의

화학적 특성에 의한 결과로 판단된다.

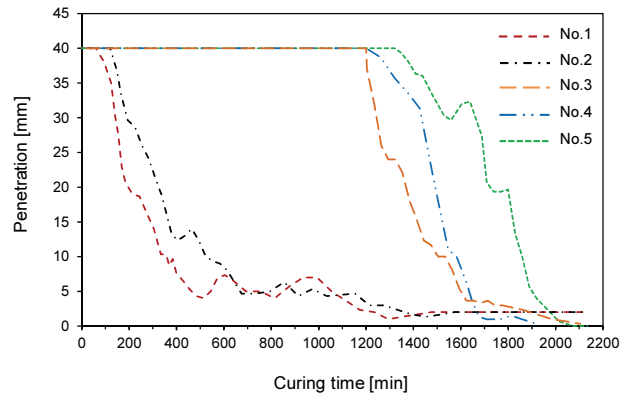


Fig. 4 Variation in penetration of needle along the curing time

2. 탄성파 신호

전단파 모니터링을 위한 측정시스템을 통하여 가진된 입력 신호와 획득된 출력신호의 예를 Fig. 5에 보여준다.

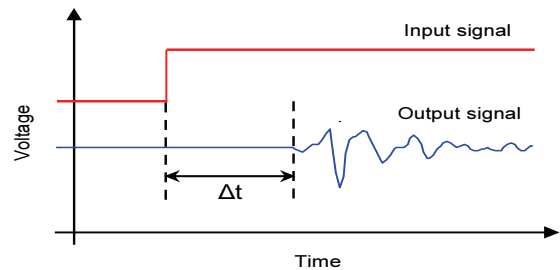


Fig. 5 Determination of first arrival time of shear waves

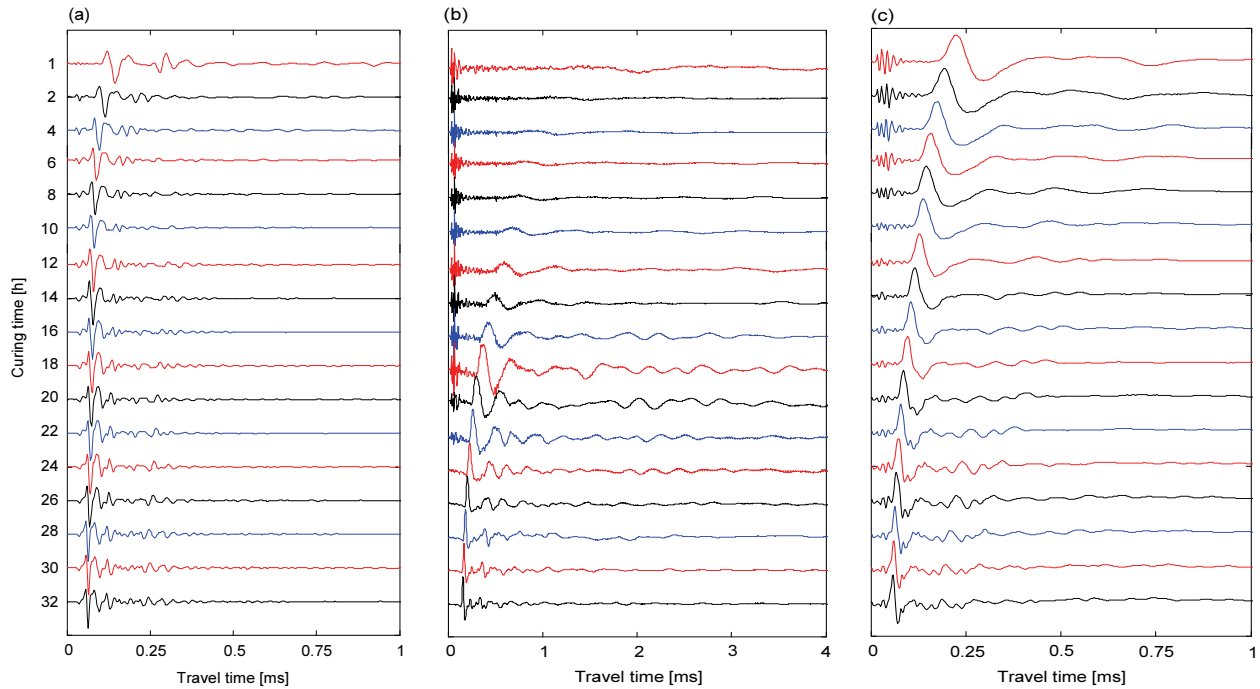


Fig. 6 Typical signals obtained from the specimens of (a) No.2; (b) No.3; (c) No.4

5종류의 CLSM 시료 중, No.2~No.4 비회에서 획득된 출력 신호를 Fig. 7에 정리하였다. Fig. 6은 CLSM 양생 후 1시간부터 32시간까지 경과된 시점에서 측정된 출력신호를 보여준다. 여기서, x축은 입력신호로부터 출력신호까지 경과된 시간을 보여주며, y축은 양생시간을 나타낸다. 출력신호의 변화양상을 비교하기 위하여, 각 양생시간에서 획득된 신호 중 최대 진폭으로 정규화하여 나타내었다. CLSM 양생초기에는 압축파가 전단파보다 뚜렷하게 나타났다. 이는, 압축파는 고체 및 액상의 매질을 통해 모두 전달되는 반면에, 전단파는 고체를 통해서만 전달되기 때문이다. 따라서, 양생초기의 CLSM은 액상에 가까운 상태임을 알 수 있다. No.2 비회의 경우, 양생 후 1시간부터 압축파보다 전단파가 뚜렷하게 나타나며, 전단파는 양생 후 1시간부터 32시간까지 초기도달시간이 감소하는 것으로 나타났다. No.3 비회는 양생초기에는 압축파에 비해 전단파의 폭이 작으나, 12시간부터 전단파가 뚜렷하게 측정되며, 24시간부터는 전단파만이 측정되었다. No.4 비회의 경우에도 압축파 뒤의 전단파가 시간이 지날수록 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 5와 같이 입력신호로 사용된 구형파의 상승시점으로부터 전단파가 시작하는시간의 차이를 전단파의 초기도달시간으로 결정하였다. No.2~No.4 비회에서의 양생시간에 따른 초기도달시간을 비교해 보았다. 양생 후 1시간에서의 초기도달시간의 경우, No.2~No.4 비회에서 초기도달시간이 각각

0.103 ms, 0.928 ms, 0.175 ms로 나타났다. No.3 비회의 경우 다른 비회들보다 전단파의 초기도달시간이 늦게 나타났으며, 이에 따라 No.3 비회의 x축은 4 ms까지 도시하였다. 양생 후 16시간에서 초기도달시간은 No.2 비회에서 0.053 ms로써 여전히 가장 짧았으며, No.3 비회에서는 0.155 ms로 가장 늦게 나타났다. 양생 후 32시간에서 No.2 비회와 No.4 비회의 초기도달시간이 각각 0.045 ms와 0.043 ms로 유사하며, No.4 비회의 초기도달시간이 No.2 비회에 비해 빠르게 감소하는 것을 확인하였다. No.3 비회의 초기도달시간은 0.1 ms로, 측정종료 시점에서도 가장 느린 것으로 나타났다.

3. 전단파 속도

전단파 속도는 이동거리에서 전단파의 초기도달시간을 나눈으로써 산정될 수 있으며, 본 연구에서는 이동거리로써 벤더 엘리먼트의 끝단 간의 거리를 이용하였다. 이와 같이, 산정된 전단파 속도는 시료의 밀도를 고려함으로써 최대 전단탄성계수 (G_{max})로 변환할 수 있으며, 최대 전단탄성계수는 동적 하중이 재하된 기초 설계 및 액상화 평가 등 다양한 동적 설계에 사용되는 중요한 토질정수 중 하나이다 (Kim et al., 2001).

시료별 전단파 속도를 산정한 후, 양생시간 증가에 따른 전단파 속도의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 양생 후 1시간에서 No.1과 No.2 비회의 전단파 속도는 약 200 m/s이며, 이후 양생시간이 증가할수록 전단파 속도는 증가하여 양생 후 32

시간의 No.1 및 No.2 비회에서 각각 353 m/s, 422 m/s의 속도를 보여주었다. 또한, No.1 및 No.2 비회에서 전단파 속도의 증가율은 양생시간이 증가할수록 감소하는 경향이 나타났다. No.3과 No.4 비회의 전단파 속도는 초기에 약 100 m/s의 속도가 측정되었으며, 양생 후 32시간에서 약 250 m/s의 속도가 측정되었다. No.5 비회는 양생 후 1시간에서 91 m/s의 속도가 측정되었으나, 양생 후 32시간에서는 390 m/s로 증가되어, 측정 시료 중 가장 큰 속도의 증가폭을 보여주었다. No.3~No.5 시료에서 전단파 속도의 증가율은 양생시간이 증가할수록 증가하는 경향이 나타났다.

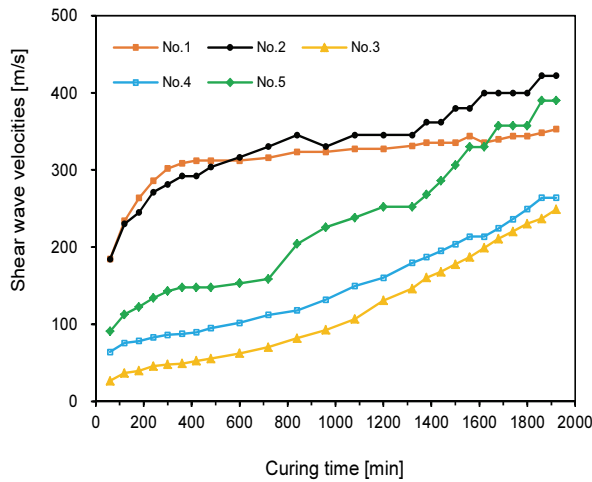


Fig. 7 Variation in shear wave velocity along the curing time

전단파 모니터링 결과, No.5의 측정 종료시점 부근의 전단파 속도가 급증한 것을 제외하면, No.1과 No.2의 초기 및 측정 종료 시의 전단파 속도가 모두 빠른 것으로 나타났다. 이는 비카트칩 시험 결과와 유사하게, 전단파 속도의 차이는 각 종류의 비회의 화학적 특성에 영향받은 것으로 판단된다.

4. 관입도-전단파 속도 관계

본 연구에서는 5종류 CLSM의 초기경화 특성을 파악하기 위하여 획득된 전단파 모니터링 결과와 비카트칩 시험결과를 비교하였다. 비회의 종류별 1개의 CLSM 시료에서 비카트칩 시험으로부터 측정된 관입도와 전단파 모니터링으로부터 산정된 전단파 속도와의 상관관계를 Fig. 8에 도시하였다. x축은 양생시간에 따른 각 시료의 초기 전단파 속도에 대한 양생시간에서 전단파 속도의 비를 나타내며, y축은 양생시간에 따른 비카트칩의 관입도이다. 5종류의 CLSM 시료에서 관입도가 감소함에 따라 초기 속도로 정규화된 전단파 속도는 증가하였다. Soliman et al. (2015)은 시멘트계 재료에서 응결시간에

따른 관입저항 시험 (ASTM C 403) 및 전단파 모니터링을 통하여 관입저항력 및 전단파 속도를 획득한 후, 관입저항력과 전단파 속도와의 상관관계를 제시한 바 있다. 제시된 상관관계에서는 관입저항력이 증가할수록 전단파 속도가 증가하였으며, 본 연구의 결과는 이러한 선행연구 결과와 유사한 것으로 확인되었다. 각 시료마다 관입도와 초기 속도로 정규화된 전단파 속도와의 상관관계는 시료별 다소 편차를 보였으나, 전체 시료에 대한 결정계수는 0.71로 나타났다. 상관관계의 분석에 이용된 관입도와 정규화된 전단파 속도의 표준편차는 각각 13.0 및 0.234로 나타났다. 시멘트계 재료에 따라 강도 발현과 탄성계수 발현에 대한 속도의 차이에 의해 분산된 결과가 도출된 것으로 추정된다 (Hong et al., 1996).

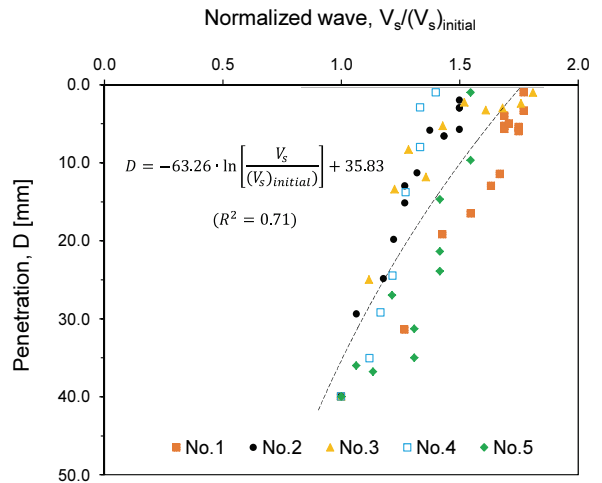


Fig. 8 Relationship between penetration and normalized wave velocity

벤더 엘리먼트의 매설을 통하여, 시료의 손상없이 양생시간에 따른 전단파 속도의 변화를 연속적으로 측정하였으며, 관입도와와의 상관관계를 통해 CLSM 응결에 따른 초기경화 특성을 파악할 수 있었다. 따라서, 전단파를 이용한 모니터링은 CLSM의 초기 경화특성을 파악할 수 있는 기법임을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 유동성 채움재 (CLSM)의 응결에 따른 초기경화 특성을 파악하기 위하여 비카트칩 시험을 통해 획득된 관입도와 벤더 엘리먼트를 이용하여 산정된 전단파 속도와의 상관관계를 조사하였다. CLSM은 CSA 팽창재, 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 물, 급결제로 구성되었으며, 화학적 특성이 다

른 5종류의 비회를 준비하여 CLSM시료를 조성하였다. 비카트칩 시험법은 일정한 시간간격을 두어 주기적인 관입시험을 실시하였고, 병렬형식의 벤더 엘리먼트를 채택하여 전단파 측정에 사용하였다. 전단파는 신호 발생기에서 발생시킨 구형파를 수신기를 통해 획득되며, 필터-증폭기를 거쳐 오실로스코프에 출력 신호가 모니터링되도록 구축하였다. 전단파 신호는 최대 진폭으로 정규화하여 도시하였으며, 전단파 속도를 분석하여 비카트칩 결과와 비교하였다.

실험결과, 5종류의 CLSM 시료에서 양생시간이 증가할수록 관입도는 감소하는 것으로 나타났으며, 비회의 화학적 특성에 따라 초결 및 종결시간의 변화는 크게 나타났다. 이와 마찬가지로, 전단파 모니터링에서도 비회의 화학적 특성에 따라 시료마다 차이가 발생하였으나, 전반적으로 초기에는 압축파가 우세하였으며, 일정시간이 지난 후에는 전단파가 뚜렷하게 나타났다. 산정된 전단파 속도는 응결시간이 경과할수록 증가하였으며, 비카트칩 시험의 관입도와 상관성을 보여주었다. 도출된 상관관계는 선행연구 결과와 유사한 경향을 보여주었다. 본 연구를 통하여, 전단파를 이용한 모니터링 기법은 비카트칩 시험을 대체하여 CLSM의 초기 경화특성을 평가하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2017R1C1B5077072)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. American Concrete Institute Committee 229 (ACI Committee), 1999. Controlled low-strength materials (CLSM).
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2006. Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle, C191.
3. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2016. Standard test methods for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance, C403.
4. American Society for Testing and Materials (ASTM), 1994. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, C618.
5. American Society for Testing and Materials (ASTM), 2017. Standard test methods for consistency of controlled low strength material (CLSM), D6103.
6. Byun, Y. H., W. J. Han, E. Tutumluer, and J. S. Lee, 2016. Elastic wave characterization of controlled low-strength material using embedded piezoelectric transducers. *Construction and Building Materials* 127(2016): 210-219. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.113.
7. Cheon, S. H., S. S. Jeong, D. S. Lee, and D. H. Kim, 2006. Mechanical characteristics of accelerated flowable backfill materials using surplus soil for underground power utilities. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers* 26(3): 303-312 (in Korean).
8. Dumoulin, C., G. Karaiskos, J. Carette, S. Staquet, and A. Deraemaeker, 2012. Monitoring of the ultrasonic P-wave velocity in early-age concrete with embedded piezoelectric transducers. *Smart Materials and Structures* 21(4): 047001. doi:10.1088/0964-1726/21/4/047001.
9. Gu, H., G. Song, H. Dhonde, Y. L. Mo, and Yan. S, 2006. Concrete early-age strength monitoring using embedded piezoelectric transducers. *Smart Materials and Structures* 15(6): 1837. doi:10.1088/0964-1726/15/6/038.
10. Gu, X., J. Yang, M. Huang, and G. Gao, 2015. Bender element tests in dry and saturated sand: Signal interpretation and result comparison. *Soils and Foundations* 55(5): 951-962. doi:10.1016/j.sandf.2015.09.002.
11. Han, W. J., J. S. Lee, S. D. Cho, J. H. Kim, and Y. H. Byun, 2015. Study on correlation between compressive strength and compressional wave velocity for CLSM according to curing time. *Journal of The Korean Geo-Environmental Society* 16(11): 5-11 (in Korean). doi:10.14481/jkges.2015.16.11.5.
12. Han, W. J., J. S. Lee, Y. H. Byun, S. D. Cho, and J. H. Kim, 2016. Characteristics of shear waves in controlled low strength material with curing time. *Journal of The Korean Geo-Environmental Society* 17(3): 13-19 (in Korean). doi: 10.14481/jkges.2016.17.3.13.
13. Hong, G. H., Y. S. Shin, and I. Y. Chung, 1996. A fundamental study on the development of compressive strength and E-modulus of concrete. *Journal of the Architectural Institute of Korea* 12(7): 229-235 (in Korean).
14. Kim, D. S., and Y. W. Choo, 2001. Dynamic deformation characteristics of cohesionless soils in Korea using resonant column tests. *Journal of Korea Geotechnical Society* 17(5): 115-128 (in Korean).
15. Lee, H. K., K. M. Lee, Y. H. Kim, H. Yim, and D. B. Bae, 2004. Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*

- 34(4): 631-640. doi:10.1016/j.cemconres.2003.10.012.
16. Lee, J. S., and C. Lee, 2006. Principles and considerations of bender element tests. *Journal of Korea Geotechnical Society* 17(5): 47-57 (in Korean).
17. Lee, D. Y., D. M. Kim, Y. S. Ryu, and J. G. Han, 2015. Development and application of backfill material for reducing ground subsidence. *Journal of Korean Geosynthetics Society* 14(4): 147-158 (in Korean). doi:10.12814/jkgss.2015.14.4.147.
18. Park, J. H., K. H. Lee, J. Y. Jo, and S. N. Kim, 2004. Deformation characteristics of underground pipe with in-situ soil CLSM. *Journal of Korea Geotechnical Society* 20(3): 129-139 (in Korean).
19. Reinhardt, H. W., and C. U. Grosse, 2003. Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. *Construction and Building Materials* 18(3): 145-154. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2003.10.002.
20. Ryu, Y. S., W. R. Chae, J. S. Koo, and D. Y. Lee, 2015. Development of rapid hardening backfill material for reducing ground subsidence. *Journal of Korean Geosynthetics Society* 14(3): 13-20 (in Korean). doi:10.12814/jkgss.2015.14.3.013.
21. Sayer, C. M., and A. Dahlin, 1993. Propagation of ultrasound through hydrating cement pastes at early times. *Advanced Cement Based Materials* 1(1): 12-21. doi:10.1016/1065-7355(93)90004-8.
22. Soliman, N. A., K. H. Khayat, M. Karray, and A. F. Omran, 2015. Piezoelectric ring actuator technique to monitor early-age properties of cement-based materials. *Cement and Concrete Composites* 63(2015): 84-95. doi:10.1016/j.cemconcomp.2015.09.001.
23. Song, G., H. Gu, Y. L. Mo, T. T. C. Hsu, and H. Dhonde, 2007. Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures* 16(4): 959. doi:10.1088/0964-1726/16/4/003.
24. Won, J. P., and Y. S. Lee, 2001. Compressive strength of CLSM containing bottom ash. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 142-146 (in Korean).
25. Zhu, J., S. H. Kee, D. Han, and Y. T. Tasi, 2011. Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. *Cement and Concrete Research* 41(8): 872-881. doi:10.1016/j.cemconres.2011.04.005.