

양생시간에 따른 유동성 채움재의 전단파 특성

Characteristics of Shear Waves in Controlled Low Strength Material with Curing Time

한 우 진¹⁾ · 이 종 섭¹⁾ · 변 용 훈[†] · 조 삼 덕²⁾ · 김 주 형²⁾

Woojin Han · Jong-Sub Lee · Yong-Hoon Byun · Samdeok Cho · Juhyong Kim

Received: October 20th, 2015; Revised: October 27th, 2015; Accepted: February 3rd, 2016

ABSTRACT : The ultrasonic waves for monitoring concrete materials have been used to investigate the setting and hardening process of concrete. This paper presents the application of bender elements for monitoring the hardening properties of Controlled Low Strength Material (CLSM) and the characterization of shear waves in CLSM according to curing time. To ensure the early age properties and flow, the CLSM consists of CSA cement, sand, silt, water, fly ash, and accelerator. In addition, three different type specimens according to fine contents are mixed. A couple of bender elements are installed at the wall of measurement cell and the CLSM specimen are prepared at the measurement cell for 28 days. Experimental results show that the resonant frequency and shear wave velocities increase with an increase in the curing time, regardless of the fine contents. Up to ten hours, the amplitudes of shear waves also increase, and the resonant frequency and shear wave velocities at the same time increase as the fine contents increase. The shear wave measurement technique using the bender elements may be effectively used to evaluate the hardening properties of CLSM along the curing time.

Keywords : Bender elements, Curing time, Controlled Low Strength Material (CLSM), Shear waves

요 지 : 기존의 콘크리트 조기강도의 발현 및 응결특성을 파악하기 위하여 탄성과 기법을 이용한 콘크리트의 모니터링에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 본 연구에서는 저강도 콘크리트의 일종인 유동성 채움재(CLSM)에 대한 응결특성을 파악하기 위하여 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 활용하였으며, 양생시간에 따른 CLSM의 전단파 특성을 조사하였다. 조기강도 및 유동성을 확보하기 위하여 CLSM은 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 급결제, 물로 구성되었으며 세립분 함량에 따른 전단파 특성 변화를 보기 위해 3종류의 CLSM 시료를 배합하였다. 전단파 측정을 위한 셀은 셀 벽면에 한 쌍의 벤더 엘리먼트가 설치되었고, 배합된 CLSM 시료를 전단파 측정용 셀에 조성하여 양생시작부터 28일간 전단파 변화를 모니터링 하였다. 실험결과 CLSM의 세립분 함량에 상관없이 양생시간이 증가함에 따라 전단파의 공진주파수 및 속도는 증가하였다. 또한, 양생시작부터 약 10시간까지는 전단파의 진폭도 증가하였으며, 동일한 시각에서는 세립분 함량이 적을수록 공진주파수 및 속도가 크게 나타났다. 본 논문에서 제안된 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 측정기법은 양생시간에 따른 CLSM의 응결특성을 평가하는 데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 벤더 엘리먼트, 양생시간, 유동성 채움재, 전단파

1. 서 론

지중 매설물의 신설 및 보수 시 사질토를 이용한 기존의 되메움 작업은 충분한 안정성을 확보하기 위하여 다짐 작업이 필수적으로 수반되어 왔다. 이러한 다짐 작업 시 매설물의 기하학적 특성으로 인하여 발생하는 공간적 제약은 다짐 효율을 저하시키며, 결국 지반함몰과 같은 문제적 현상으로 이어지게 된다. 이에 따라 유동성 및 자기수평성, 그리고 자기다짐성의 특징을 갖는 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)를 뒤채움 재료로 활용한 현장 적

용사례가 증가하고 있다. 이러한 CLSM을 사용할 경우 다짐 작업 없이 슬러리 상태로 타설이 가능하고, 경화 반응에 따른 강도발현으로 인하여 기존 재료의 품질 및 시공기간에 대한 문제점을 개선할 수 있다. 또한, CLSM은 보통 콘크리트에 비해 저강도 특성을 나타내며, 이를 통해 추후 지중 매설물의 재굴착이 가능하도록 배합설계 되고 있다.

CLSM의 경화 반응에 따른 강도발현에 소요되는 시간은 시공 시 중요한 요인이며, 기존 콘크리트에서도 조기강도의 발현은 거푸집의 탈형 시기와 관련되어 겨울철 공사, 공항의 활주로, 교량의 상판 연결부 및 고속도로의 보수공사에 중

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

† Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign (Corresponding Author : yhbyun@illinois.edu)

2) KOREA INSTITUTE of CIVIL ENGINEERING and BUILDING TECHNOLOGY

요시되어 왔다(Kim, 2002; Han et al., 2004; Ryu & Jeon, 2008). 조기강도의 발현 및 응결특성을 측정하는 방법으로는 비카트 침을 이용한 시험법(KS L5108, 2007)이 있다. 그러나 비카트 침 시험법은 응결특성을 연속적으로 모니터링하기에 부적합하다는 단점이 있어 탄성파를 이용하여 응결특성을 모니터링하려는 연구가 많이 수행되어 왔다(Sayers & Dahlin, 1993; Lee et al., 2004; Qin & Li, 2008). 이러한 시도로써 초기 연구들에서는 탄성파 중 주로 압축파를 이용하여 응결시간과 상관성을 조사하였으나, 압축파의 경우 콘크리트 시료에 포함되어 있는 기포의 영향에 민감하게 변화하므로 실무에 적용하기 어려운 것으로 나타났다. 이에 탄성파의 다른 한 종류인 전단파를 이용하여 콘크리트의 응결특성을 파악하려는 시도가 있었으며, 압축파보다 시료 내 공기량에 의한 영향이 적은 것으로 보고 되었다(Zhu et al., 2011a). 최근에는 기존의 초음파 트랜스듀서에 비하여 횡방향 변형을 크게 발생시킬 수 있는 벤더 엘리먼트를 이용하여 저주파수 전단파의 감쇠 효과를 줄일 수 있는 것으로 나타났다(Zhu et al., 2011b). 이러한 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 모니터링은 시멘트 페이스트 및 모르타르, 그리고 콘크리트에 적용되어 왔으나(Zhu et al., 2011b; Liu et al., 2014), 아직까지 유동성 채움재인 CLSM에 대한 적용은 보고된 바 없다.

본 논문에서는 저강도 유동성 채움재인 CLSM의 양생시간에 따른 응결특성을 파악하기 위하여, 전단파 신호의 특성변화를 모니터링하였다. 먼저 CLSM의 재료 구성 및 성분별 특성, 배합방법을 설명하고 전단파 측정을 위한 벤더 엘리먼트의 특성 및 측정시스템에 대하여 기술하였다. 양생시간에 따라 측정된 전단파 신호의 특성을 공진주파수, 진폭, 속도에 한정하여 분석한 후 그 결과에 대해 토의하였다.

2. 연구 배경

2.1 전단파 측정

동적하중 상태의 지반 및 구조물 설계 시 전단탄성계수는 전단파 속도로부터 계산할 수 있으며, 전단파 트랜스듀서로서 상당한 지향성과 커플링 효과를 보이는 벤더 엘리먼트

가 지반분야에 널리 이용되어 왔다. 벤더 엘리먼트는 금속판 양면에 피에조 세라믹판을 붙여서 만든 것으로서 실험장치에 고정되어 캔틸레버 보 형식으로 설치되며, 전기적 신호에 따라 앞면 방향으로 전단파를 발생시키게 된다(Lee & Lee, 2006). 본 연구에서는 길이 및 너비가 8mm 및 4mm인 한 쌍의 벤더 엘리먼트를 Fig. 1(a)와 같이 셀 벽면에 4mm를 넣고 고강도 에폭시로 고정시킴으로써 완벽한 앵커링이 될 수 있게 하였다. 벤더 엘리먼트는 연결방식에 따라 직렬형식과 병렬형식으로 나누어지며, 본 연구에서는 전기적 간섭에 영향이 적은 병렬형식을 적용하였고 추가적으로 전자기적 차폐 및 접지시켰으며 에폭시로 방수 처리하였다. 이러한 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도의 산정 시 전단파의 이동거리 및 이동시간이 필요하며, 본 연구에서는 전단파 이동거리를 마주 보고 있는 벤더 엘리먼트의 끝단간의 거리로 고려하였고 Fig. 1(a)와 같이 44mm로 유지하였다.

2.2 CLSM의 기본 특성

본 연구에서는 유동성 채움재인 CLSM의 재료성분으로 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 급결제, 물을 이용하였다. 적용된 성분 중 실트 및 모래, 그리고 CSA계 시멘트는 Han et al.(2015)이 이용한 것과 동일한 특성의 재료를 사용하였으며, 추가적으로 비회 및 CSA계 시멘트에 대한 성분 분석 결과를 Table 1에 정리하였다.

CLSM의 배합순서는 먼저 시멘트, 비회, 실트, 그리고 모

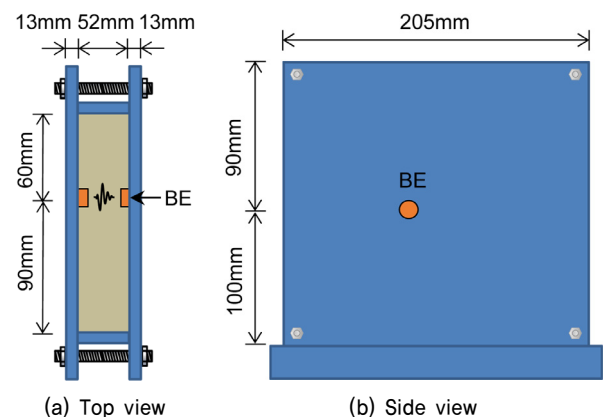


Fig. 1. Schematic drawing of a cell for the measurement of shear waves

Table 1. Chemical components and properties for fly ash and CSA cement

Specimen	SiO ₂	FeO ₃	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Lg.loss	pH
Fly ash	20.4	9.16	40.8	7.02	11.4	1.04	0.82	0.42	0.40	8.89	11.9
CSA cement	18.9	4.34	61.1	2.77	5.62	1.00	0.13	0.15	0.25	3.66	11.8

래를 건배합한 후, 물과 조기강도의 발현을 위한 알칼리프리게 급결제를 차례로 넣어 혼합하였다. 혼합 시 충분히 배합되도록 하였으며, 배합시간은 3분을 넘지 않도록 하였다. 골재 중 세립분에 해당하는 실트의 포함 정도(30%, 50%, 70%)에 따라 Table 2와 같이 각 성분들의 중량비율로 3종류의 시료를 배합하였다. 시료의 유동성을 확인하기 위하여 플로우 실험(ASTM D 6103, 2004)을 수행한 결과, 배합된 CLSM 시료의 플로우 값은 실트의 함량에 따라 30%, 50%, 70%인 경우 각각 220mm, 208mm, 210mm로 나타나 ACI Committee 229(1999)에서 규정하고 있는 고유동성의 조건인 플로우 값 200mm 이상을 만족하였다. 또한, 양생 28일 경과 후 일축압축강도는 1.3~2.2MPa로 분포하였으며, 이를 통해 ACI Committee 229(1999)에서 규정하고 있는 CLSM의 강도기준인 8.3MPa 이하를 만족하는 시료임을 보여주었다.

3. 실험방법

배합 직후 액체상태의 CLSM 시료로부터 경화 과정 동안 전단파 특성을 모니터링하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 옆면의 판 중앙부에 벤더 엘리먼트가 설치된 전단파 측정용 셀을 제작하였다. 직육면체 형태의 셀은 두께 12mm의 MC 나일론 판으로 조립되었으며, 판과 판이 만나는 부분에는 1mm 정도 간격을 둔 후 실리콘으로 채워 셀을 통한 직접파에 의한 영향을 최소화시켰다. 적용된 전단파 측정용 셀의 형상은 Fig. 1을 보면 알 수 있듯이 벤더 엘리먼트가 설치된 옆면의 판은 넓은 반면, 옆면 사이의 거리는 좁게 설계하여 벤더 엘리먼트의 측면 방향으로 발생하는 압축파가 벽면에 반사되어 돌아오는 영향으로 인하여 앞면 방향으로 전달된 전단파와 중첩되는 현상을 최소화하고자 하였다.

전단파의 발생 및 측정을 위하여 신호 발생기 및 필터-증폭기, 그리고 오실로스코프가 이용되었으며 그 구성은 Han et al.(2015)이 적용한 것과 동일하다. 20Hz의 구형파 신호를 입력파로서 적용하여 송신 벤더 엘리먼트로 전달되었으며, 시료를 거쳐 반대편 벤더 엘리먼트에서 수신된 신호를 100kHz로 로우패스 필터링하였다.

Table 2. Mixed ratios for CLSM

Fine content in Sand-silt mixture	Fly ash	CSA cement	Sand	Silt	Water
70%	1	0.3	2.1	4.9	2.9
50%	1	0.3	3.5	3.5	2.45
30%	1	0.3	4.9	2.1	2.1

4. 실험결과

4.1 전단파 신호

전단파 측정용 셀에 세립분 함량에 따라 조성된 CLSM 시료에서 측정된 전단파 신호의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 y축은 경화 반응이 진행된 시간을 나타내며, 양생시작부터 양생 후 28일(672시간)까지 측정된 결과를 보여준다. Fig. 2에 나타낸 신호들은 각 시료마다 전체적인 경화 과정에서 보여진 가장 큰 진폭으로 모든 신호들의 진폭을 정규화시킨 결과이다. 일반적인 입상재에서 전단파 신호는 압축파 신호보다 상대적으로 큰 진폭 및 저주파수 특성을 나타내는 반면, 본 연구에서 측정된 3가지 시료에서 모두 경화 초기인 양생시작부터 1시간이 되기 전까지는 전단파의 모습보다 압축파가 더 뚜렷하게 나타났다. 이는 압축파의 경우 고체뿐 아니라 액체상태의 매질을 통하여도 전달이 되는 반면 전단파는 고체 입자만을 통하여 전달되는 특성을 보이기 때문이다. 특히 세립분 함량이 70%인 경우, 다른 두 시료보다 조립질 모래의 양이 적기 때문에 양생 후 1시간 전까지는 전단파 신호형상이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 3종류의 시료에서 전단파의 진폭은 경화가 진행됨에 따라 점차 증가하였다가 양생시작 후 약 6~24시간이 경과한 뒤에 다시 계속 감소하거나 감소 후 증가하는 등 일정하지 않은 경향을 보여주었다. 여기서 세립분 함량이 50%인 경우에서 7일째 전단파 신호는 실험환경에 의한 잡음발생으로 인해 측정되지 못하였다. 한편 전단파의 주파수는 경화 과정이 진행됨에 따라 점차 증가하는 경향을 보이며, 양생 후 3일경과 시에는 압축파와 유사한 주파수를 보여주었다. 또한, 전단파의 초기 도달시간도 경화 과정이 진행됨에 따라 점차 감소하였으며, 세립분을 더 많이 포함한 경우 전반적으로 초기 도달시간이 더 큰 것을 알 수 있다.

양생초기에 측정된 전단파가 불분명한 신호에서 전단파 신호의 존재를 뚜렷하게 보이기 위하여 Fig. 3에 양생시작부터 1시간 전까지 획득한 결과를 나타내었다. Fig. 3에서는 각 신호마다 산정된 최대값으로 정규화시켜 획득된 신호의 확대된 결과를 보여주며, 전단파가 양생초기에는 압축파와 진폭이 유사할 정도로 작음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4에서는 양생시작 후 1일 이상이 경과한 양생후기의 결과를 보여주며 이때 측정된 신호는 압축파와 전단파가 중첩되어 전단파 자체의 주파수가 높아져서 구분하기 어렵게 되었다. Fig. 4는 x축 최대범위를 0.5ms로 변경하여 신호형상을 확대한 것이며, 양생시간이 3일 지났음에도 불구하고 경화 과정이 진행됨에 따라 초기 도달시간은 계속적으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

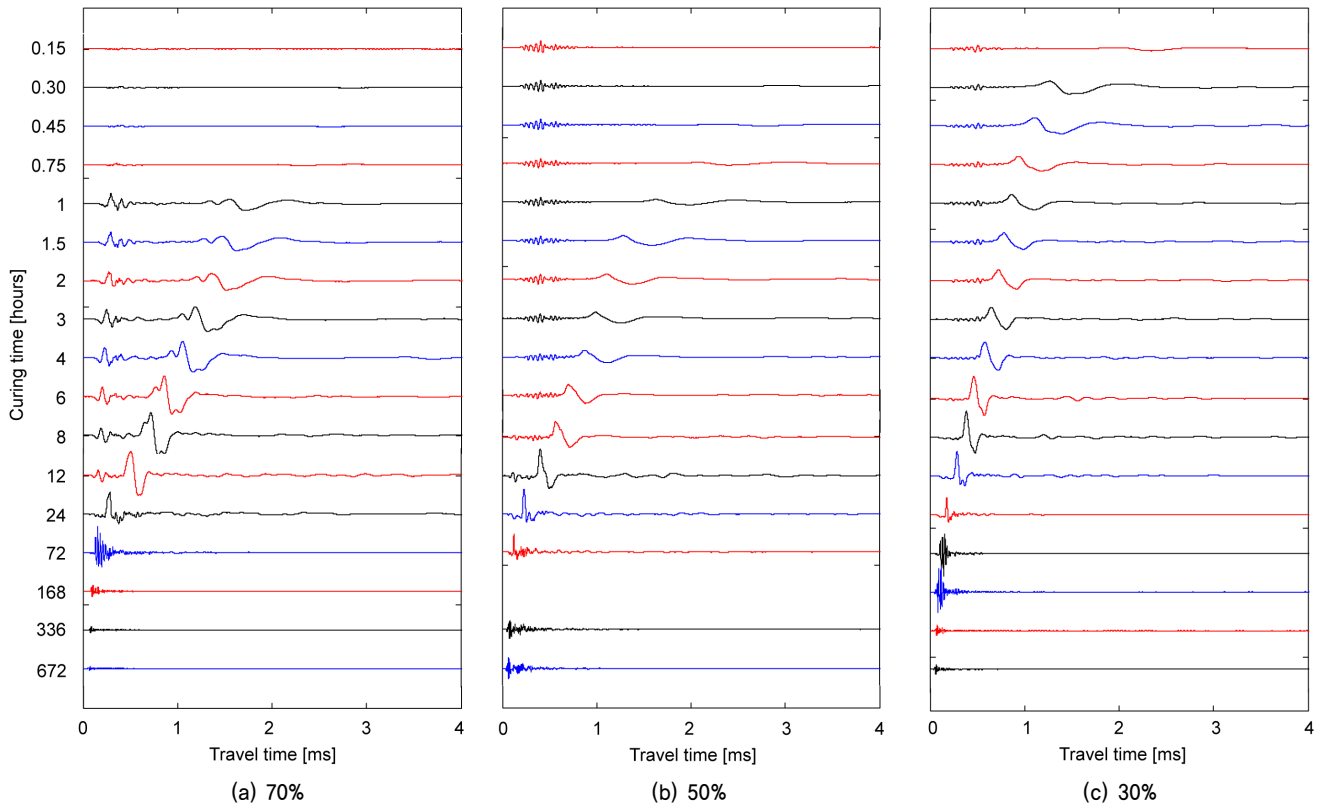


Fig. 2. Shear wave signals according to fine contents

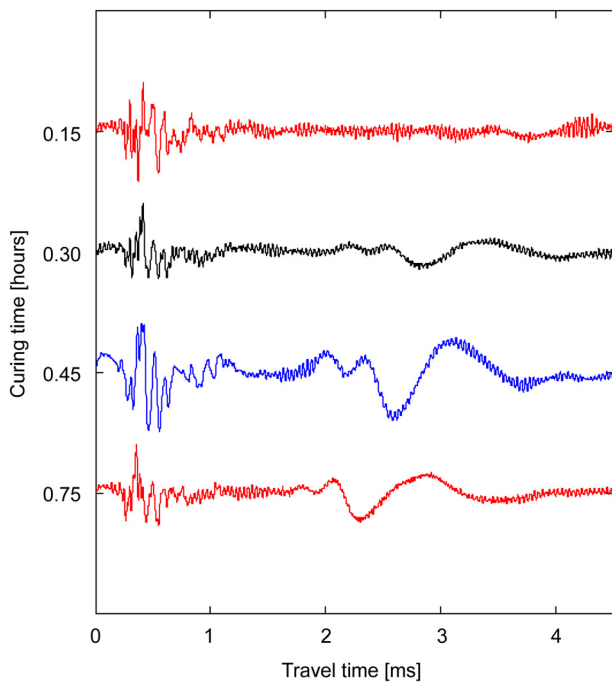


Fig. 3. Shear wave signals before 1 hour in case of fine contents of 70%

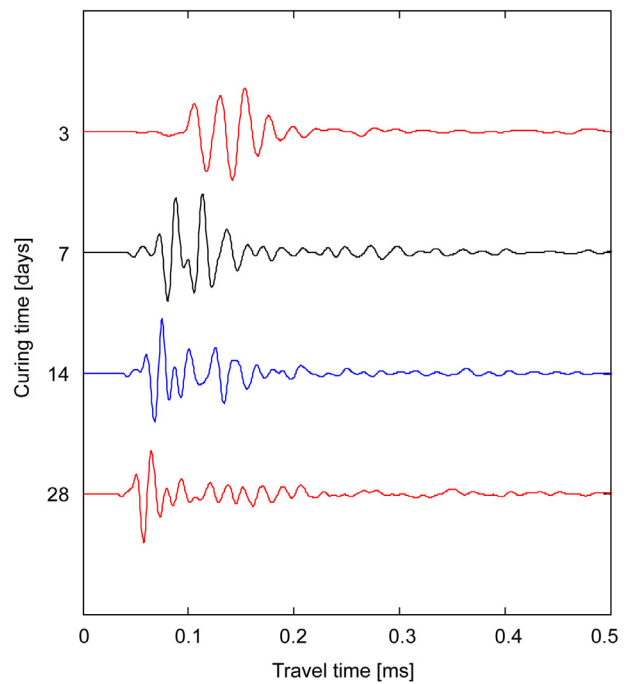


Fig. 4. Shear wave signals after 1 day in case of fine contents of 30%

4.2 공진주파수

가진된 파동의 주파수가 매질의 특정 주파수와 일치할 때 동적응답의 크기는 최대가 되며, 이때 특정 주파수를 공

진주파수로 정의한다. 양생시간에 따른 CLSM의 특성변화를 나타내기 위하여 Fig. 5와 같이 주파수 응답곡선을 도출하였다. Fig. 5에 나타난 주파수 응답곡선은 세립분 함량 30%인 결과로서, 양생기간 중 대표적인 5개의 시각(1시간,

6시간, 1일, 7일, 28일)에서 주파수 변화를 보여준다. 응답 크기가 최대인 공진주파수를 기준으로 보면 양생시작 후부터 1일 전까지는 약 1~5kHz 대역의 저주파수 특성이 우세하며, 1일을 기점으로 공진주파수가 10kHz 이상으로 증가하여 양생 28일 후에는 약 58kHz에 도달하는 것을 알 수 있다. 이러한 양생시간에 따른 공진주파수의 변화를 Fig. 6에 도시하였으며, 세립분 함량에 상관없이 양생시간이 증가함에 따라 공진주파수가 증가하는 것을 보여준다. 특히 양생시작 후부터 1일 전까지는 세립분 함량이 작을수록 상대적으로 공진주파수가 큰 것을 뚜렷이 볼 수 있다. 세립분 함량 70%에서 양생초기 2개의 공진주파수가 크게 산정된

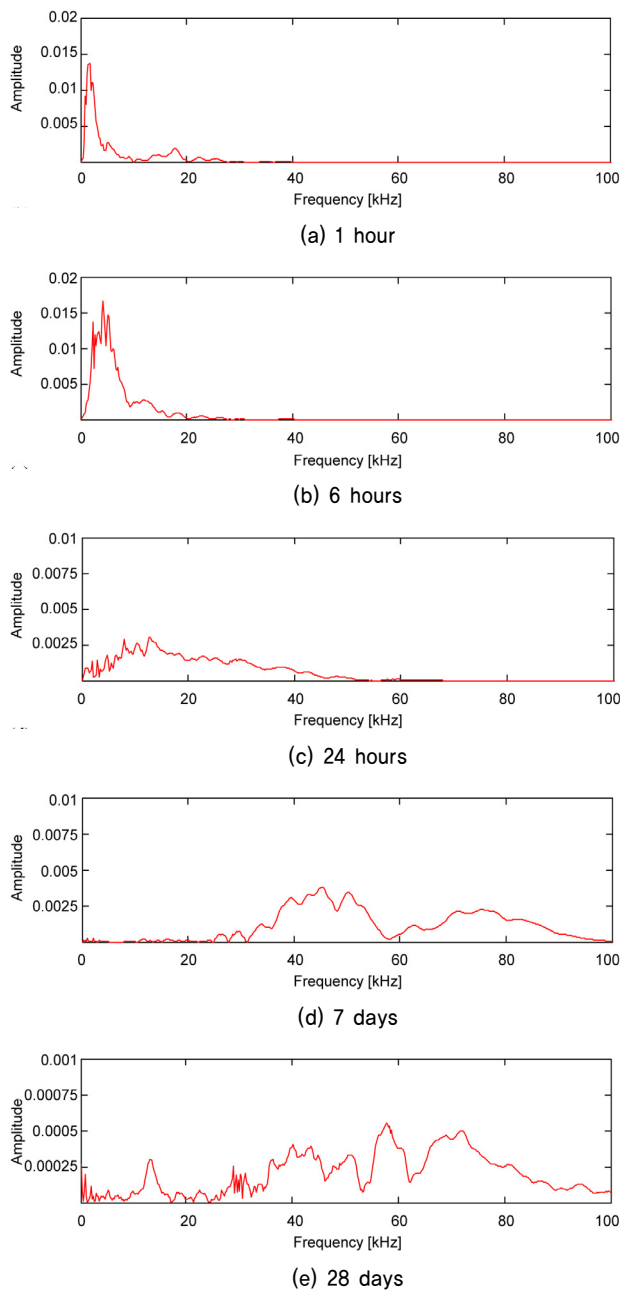


Fig. 5. Frequency response curves in case of fine contents of 30%

이유는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 양생 후 0.15 및 0.3시간에서 압축파의 진폭이 전단파의 진폭보다 크므로 압축파의 주파수가 최대 응답크기로 반영되었기 때문이다.

4.3 진폭

전단파의 진폭은 셀 벽면에 설치되어 있는 벤더 엘리먼트의 앵커링, 에폭시의 코팅 두께, 그리고 시료와의 커플링 등에 의한 영향을 받게 되므로 세립분 함량 변화에 따른 진폭의 절대값을 비교할 수 없다. 다만 각 CLSM 시료에서 측정된 전단파의 최대 진폭으로 해당 시료의 전체 신호 진폭을 정규화하여 Fig. 7과 같이 시간변화에 따른 진폭 변화를 나타낼 수 있다. 3종류의 CLSM 시료에서 양생시작부터 28일까지 측정된 전단파 신호의 진폭을 산정하여 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. Fig. 7을 보면 양생시작 후 약 10시간까지는 세립분 함량에 관계없이 진폭이 증가하였으며, 그 후 28일이 되기까지 진폭의 증감은 불규칙적으로 보이나 결국에는 양생시간 10시간이 경과되었을 때의 최대 진폭(1)보다 훨씬 작은 값(0.5 이하)을 나타내었다. 이러한 이유는 경화

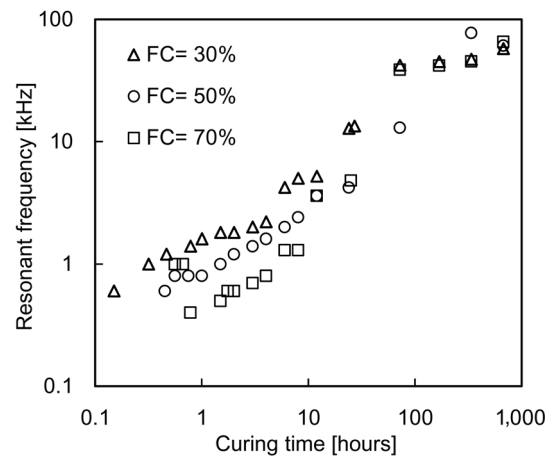


Fig. 6. Resonant frequency versus curing time

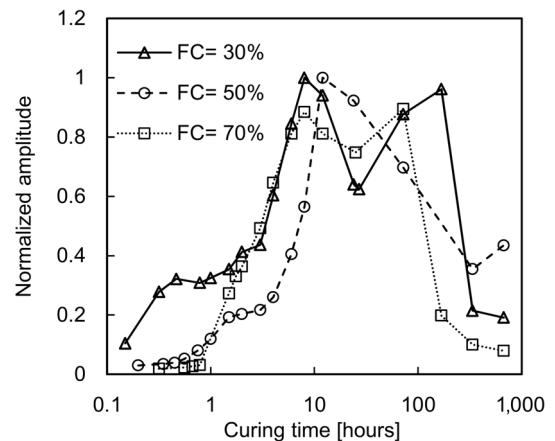


Fig. 7. Amplitude versus curing time

가 진행됨에 따라 벤더 엘리먼트가 접촉되어 있는 시료와 벤더 엘리먼트를 고정하고 있는 에폭시 사이의 상대적 강성차이로 인해 진폭이 변화되는 것으로 판단된다. 즉 CLSM 시료의 경화 반응이 진행됨에 따라 시료의 강성이 증가하여, 결과적으로 에폭시의 강성보다 더 커진 후 전단파 진폭의 감소로 이어진다. 그러나 양생 10시간 후부터는 3종류의 CLSM 시료에서 일관적인 경향을 보여주지 않으므로 추가적인 연구가 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.4 전단파 속도

전단파 신호로부터 초기도달시간을 산정하여 계산된 전단파 속도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 양생시간에 따른 전단파 속도의 변화를 보여주며, 양생시간이 증가함에 따라 3종류의 CLSM 시료에서 모두 전단파 속도가 증가함을 보여준다. 또한, 동일한 양생시간에서 세립분 함량이 적을수록 전단파 속도가 크게 나타났으며 이러한 경향은 양생 1시간 이후부터 24시간까지 뚜렷하게 나타났다. 이와 같이 세립분 함량이 적은 시료의 경우 양생초기 시료 내에 전단파를 통과하지 못하는 물의 비율이 상대적으로 적어 전단파 속도가 크게 나타나는 것으로 판단되며, 시간에 따른 전단파 속도의 증가량이 다른 것도 세립분의 함량이 경화 반응의 지연과 연관되기 때문인 것으로 판단된다. 양생시간 100시간 이후로는 세립분 함량에 따른 전단파 속도의 차이가 크지 않은 것을 알 수 있다.

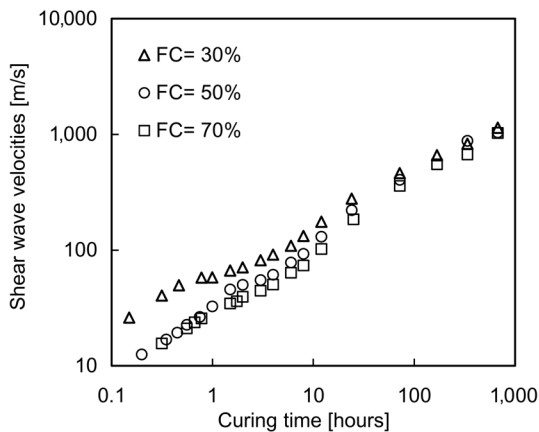


Fig. 8. Shear wave velocity versus curing time

5. 요약 및 결론

본 논문에서는 유동성 채움재(CLSM)의 양생시간에 따른 응결특성을 파악하기 위해 전단파 트랜스듀서로서 벤더 엘리먼트를 적용하고, 이를 통하여 측정된 전단파 신호의

특성을 조사하고자 하였다. CLSM의 재료성분으로 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 급결제, 물을 이용하였으며 실트와 모래의 상대적인 비율을 달리하여 3종류의 CLSM 시료를 배합하였다. 초음파 트랜스듀서에 비하여 횡 방향 변형을 크게 발생시키고, 저주파수 전단파의 감쇠 효과를 줄일 수 있는 벤더 엘리먼트를 전단파 트랜스듀서로 사용하여 전단파 측정용 셀에 설치하였다. 여기서 직육면체의 전단파 측정용 셀은 셀의 벽면에서 발생할 수 있는 반사파의 영향을 최소화하여 설계되었다. 3종류의 세립분 함량에 따라 배합된 CLSM 시료들은 전단파 측정용 셀의 벤더 엘리먼트를 이용하여 양생시작부터 28일간 전단파 신호를 모니터링하였다. 본 연구의 주요 실험결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 주파수 응답곡선을 분석하여 최대 응답크기의 주파수를 도출한 결과, 세립분 함량에 상관없이 양생시간이 증가함에 따라 공진주파수는 증가하였다. 또한, 양생시작부터 약 10시간까지는 동일한 양생시간에서 세립분 함량이 작을수록 공진주파수가 더 크게 나타났다.
- (2) 양생초기의 시간증가에 따라 세립분 함량에 관계없이 전단파의 진폭은 증가하였으며, 양생경과 약 10시간 이후 28일까지는 진폭이 불규칙적으로 감소 혹은 증가하였다. 양생시간에 따른 CLSM의 전단파 특성 및 세립분 함량에 의한 영향을 조사하기 위하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 양생시간이 경과됨에 따라 세립분 함량에 관계없이 전단파 속도가 증가하였으며, 양생초기의 전단파 속도는 세립분 함량이 적을수록 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 세립분과 조립질 입자의 상대적 비율에 따른 효과와 세립분에 의한 경화 반응을 지연효과가 반영된 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. ASTM D 6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low-strength material (CLSM). American Society for Testing and Materials, pp. 1~5.

2. ACI Committee 229 (1999), Controlled low-strength materials (CLSM), American Concrete Institute, 229R-99, pp. 1~15.
3. Han, C. G., Hwang, Y. S., Lee, S. H. and Kim, G. D. (2004), Properties of strength development of concrete at early age with water cement ratio and cement factor, architecture, Architectural Institute of Korea, Vol. 20, No. 4, pp. 77~84 (in Korean).
4. Han, W. J., Lee, J. S., Cho, S. D., Kim, J. and Byun, Y. H. (2015), Study on correlation between compressive strength and compressive wave velocity for CLSM according to curing time, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 16, No. 11 (accepted).
5. Kim, H. (2002), Enhanced performance of high early strength concrete with regulated set cement, master thesis, Konkuk University, pp. 5~16 (in Korean).
6. KS L5108 (2007), Testing method for setting time of hydraulic cement by vicat needle, Agency for Technology and Standards, pp. 1~11.
7. Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H. and Bae, D. B. (2004), Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete, Cem Concr Res, Vol. 34, pp. 631~40.
8. Lee, J. S. and Lee, C. (2006), Principles and considerations of bender element tests, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 22, No. 5, pp. 47~57 (in Korean).
9. Liu, S., Zhu, J., Seraj, S., Cano, R. and Juenger, M. (2014), Monitoring setting and hardening process of mortar and concrete using ultrasonic shear waves, Construction and Building Materials, Vol. 72, pp. 248~255.
10. Qin, L. and Li, Z. (2008), Monitoring of cement hydration using embedded piezoelectric transducers, Smart Mater Struct, Vol. 17, No. 5, pp. 1~6.
11. Ryu, J. H. and Jeon, H. K. (2008), A study on development method for early-strength concrete, Proceedings of the Korea Concrete Institute, Vol. 20, No. 1, pp. 681~684 (in Korean).
12. Sayers, C. M. and Dahlin, A. (1993), Propagation of ultrasound through hydrating cement pastes at early times, Adv Cem Based Mater, Vol. 1, pp. 12~21.
13. Zhu, J., Kee, S. H., Han, D. and Tsai, Y. T. (2011a), Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes, Cem Concr Res, Vol. 41, pp. 872~881.
14. Zhu, J., Tsai, Y. T. and Kee, S. H. (2011b), Monitoring early age property of cement and concrete using piezoceramic bender elements. Smart Mater Struct, Vol. 20, No. 11, pp. 1~6.