

시간영역반사법을 이용한 유동성 채움재의 특성 연구

Study on Characteristics of Controlled Low Strength Material Using Time Domain Reflectometry

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: February 11th, 2016; Revised: February 18th, 2016; Accepted: March 21st, 2016

ABSTRACT : The hydration process of Controlled Low Strength Material (CLSM) used for backfill is the primary factor to determine the construction period. The objective of this study is to monitor the hydration process of CLSM using the Time Domain Reflectometry (TDR) and to establish the relationship between dielectric constant and compressive strength. The CLSM specimen is composed of cement, flyash, silt, sand, accelerator, and water. The material characteristics of the CLSM including flow, unit weight, compressive strength are investigated. To measure the dielectric constant of the CLSM during the curing time, TDR probe incorporated with a mold and a reflectometer are used. Experimental results show that the dielectric constant remains constant at early stage, and then decreases as the curing time increases. In addition, the dielectric constant is related to the compressive strength in inverse power function. This paper suggests that the TDR technique may be used as a non-destructive testing method in order to estimate the compressive strength of the CLSM mixture under construction.

Keywords : Curing time, Controlled low strength material, Dielectric constant, Uniaxial compressive strength

요 지 : 기존 뒤채움재의 대체방안으로 고려되는 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)의 경화 특성 및 강도발현은 시공기간을 결정하는 주요 요소이다. 본 연구에서는 시간영역반사법(Time Domain Reflectometry, TDR)을 이용하여 유전상수를 도출함으로써 CSLM의 경화 특성을 모니터링하고, 산정된 유전상수와 일축압축강도간의 관계를 분석해보고자 하였다. CLSM 시료는 시멘트, 비회, 실트, 모래, 급결제 및 물로 배합되었으며 배합된 시료의 플로우, 단위중량, 일축압축강도와 같은 재료 특성을 조사하였다. 양생 기간 동안 CLSM의 유전율 특성을 모니터링하기 위하여 TDR 프로브가 설치된 몰드 및 Reflectometer를 이용하여 측정시스템을 구성하였다. 실험결과 유전상수는 양생 초기에 일정한 값을 유지하다, 시간이 진행됨에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 일축압축강도와 유전상수를 회귀분석한 결과 두 물성 사이에는 반비례적인 거듭제곱함수의 관계가 있음을 보여주었다. 본 연구에서 제안한 시간영역반사법을 이용한 CLSM의 특성 모니터링은 일축압축강도를 추정할 수 있는 현장 비파괴시험기법으로 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 양생 시간, 유동성 채움재, 유전율, 일축압축강도

1. 서 론

높은 유동성 및 자기수평성을 띠는 유동성 채움재(Controlled Low Strength Material, CLSM)는 다짐작업이 요구되지 않고, 신속한 강도발현이 가능하기에 지중 매설물의 뒤채움 재료로서 중요하게 고려되어 왔다. 특히 시간에 따른 CLSM의 경화 특성 변화는 콘크리트 구조물 및 도로와 관련된 공사의 시공기간을 결정하는 주된 요인이 된다(Kim, 2002; Han et al., 2004; Ryu & Jeon, 2008). 이러한 시멘트계열 재료의 응결 시간을 측정하는 기존의 방법으로는 Vicat Needle(ASTM C191, 2013)과 Penetration Needle(ASTM C403, 2008)을

이용한 시험법이 있다. 또한, 이들 시험법의 한계를 해결하고자 탄성파를 이용하여 시멘트의 응결변화를 연속적으로 모니터링하기 위한 연구들이 수행되었다(Sayers & Dahlin, 1993; Lee et al., 2004; Qin & Li, 2008). 탄성파 중 압축파를 이용한 경우, 재료 내의 기포함량에 시험결과가 영향받는 것으로 알려졌으며 이에 진단파를 적용한 연구들도 수행되어 왔다(Zhu et al., 2011a; Zhu et al., 2011b). 한편, 전자기파 특성 중 하나인 전기전도도를 이용하여 시멘트 페이스트의 경화 과정을 모니터링한 연구도 수행된 바 있다(Li et al., 2003).

시간영역반사법(Time Domain Reflectometry, TDR)은 실

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

험체에 접촉된 TDR 프로브를 따라 발신된 전자기적 펄스가 프로브의 끝단까지 도달한 후 반사되어 기록된 반응을 이용하는 기법으로서, 반사된 펄스의 속도는 TDR 프로브에 접촉된 재료의 유전율에 영향을 받는다. 물의 유전상수가 건조된 흙 및 공기의 유전상수보다 상대적으로 차이가 큰 점을 이용하여, 주로 지반재료의 함수비 산정에 많이 활용되어 왔다(Topp et al., 1980; Benson & Bosscher, 1999; O'Connor & Dowding, 1999). 또한, TDR 프로브를 이용하여 특정 비율로 배합된 콘크리트 및 모르타르의 체적함수비-유전율 관계를 도출하기 위한 연구가 수행된 바 있다(Janoo et al., 1999). 그러나 TDR 프로브를 이용해 획득된 유전율과 CLSM의 역학적 특성 간의 관계를 파악하기 위한 연구는 아직 미진한 실정이다.

본 논문에서는 시간영역반사법을 이용하여 시간변화에 따른 CLSM의 응결특성을 파악하고, 일축압축강도와외의 상관성을 조사하였다. CLSM의 재료 성분 및 역학적 특성을 기술하고 유전율 측정을 위한 TDR 프로브 및 측정시스템에 대하여 설명하였다. 경화 반응이 진행됨에 따라 측정된 TDR 신호로부터 유전율을 산정한 후, 일축압축강도 결과와 상관성을 분석하여 토의하였다.

2. CLSM의 재료 특성

본 연구에서 사용된 CLSM은 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 알칼리프리계 급결제, 그리고 물로 구성된다. CLSM 시료를 조성하기 위한 각 재료의 성분별 비율은 무게를 기준으로 하여 Table 1과 같이 배합되었다. 시료의 조성순서는 미리 건조된 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래를 혼합한 후에 물과 급결제를 첨가하는 방식으로 수행되었다. 배합된 CLSM 시료의 유동성은 ASTM D 6103(2004)에서 지정된 절차에 따라 플로우 실험을 수행하여 플로우 208mm로 측정되었으며, 이는 ACI Committee 229(1999)에서 규정된 플로우 200mm 이상의 유동성 기준을 만족하였다.

배합된 CLSM 시료의 재령 후 1, 3, 7, 28일 시점에서 측정된 단위중량을 Table 2에 정리하였다. 양생 후 1일 경과

Table 1. Mixed ratio of CLSM by weight

Fly ash	CSA cement	Sand	Silt	Water	Accelerator	Total
1	0.3	3.5	3.5	2.45	0.018	10.77

Table 2. Unit weight of CLSM measured at each curing time

Time [day]	1	3	7	28
Unit weight [kN/m ³]	18.3	17.0	17.1	16.9

된 시점에서 측정된 단위중량은 18.3kN/m³로 시작하여, 양생 후 28일에는 16.9kN/m³까지 감소하였다. 동일한 기간 동안 양생된 공시체를 이용하여 일축압축시험을 수행함으로써 CLSM의 강도특성을 조사하였다. Fig. 1은 재령 후 1, 3, 7, 28일의 각 시점에서 2개의 공시체를 이용하여 측정된 응력-변형률 그래프를 보여준다. 전체적으로 2개의 공시체로부터 획득된 응력-변형률 그래프는 최대 응력이 나타나기 전까지 서로 유사하였다. 최대 응력에 도달하는 변형률은 양생 후 1일에 5.6~6%에서 28일의 0.9~1.1%까지 감소하였다. 반면 양생기간이 증가함에 따라 최대압축응력의 크기는 증가함으로써 탄성계수가 증가하는 것을 알 수 있다. 양생 기간별 산정된 압축강도를 Fig. 2에 도시하였다. 양생 후 28일의 평균 일축압축강도는 2.2MPa로써, ACI Committee 229(1999)에서 정의한 CLSM의 일축압축강도 8.3MPa 이하의 조건을 만족하며, 재굴착을 고려할 경우 제시된 2.1MPa보다는 다소 높게 나타났다.

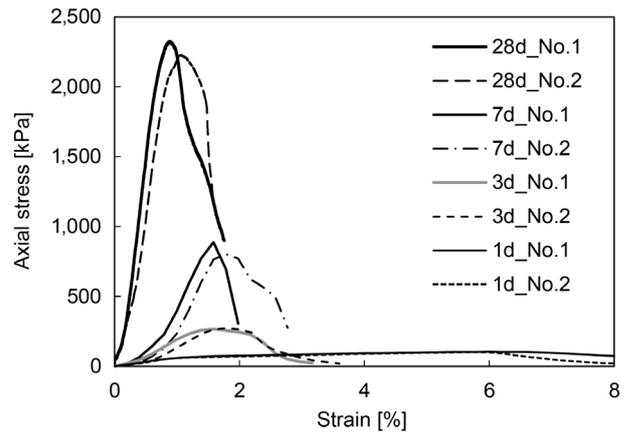


Fig. 1. Stress-strain behaviors according to curing time

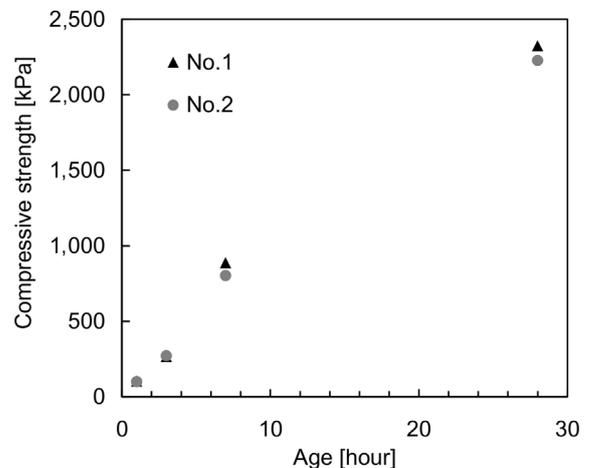


Fig. 2. Variation of unconfined compressive strength with the time

3. CLSM의 유전율 특성

3.1 유전율 측정시스템

본 연구에서는 CLSM 시료의 양생 기간에 따른 유전율 특성 변화를 모니터링하기 위하여, Fig. 3과 같이 TDR 프로브가 옆면에 설치된 직육면체 몰드를 제작하였다. 사용된 몰드의 재질은 TDR 프로브가 설치되는 몰드 벽면의 유전율에 의한 영향을 최소화하기 위해 MC 나일론으로 선정하였다. TDR 프로브는 3개의 전극으로 구성되며, 전극의 한쪽 끝단에 동축 케이블을 연결하여 회로를 구성하였다. 각 전극의 길이 및 두께는 100mm, 1mm이며, 전극 간 간격은 3mm로 고정하여 서로 평행하도록 설치하였다. TDR 프로브의 3개의 전극 중 동축 케이블 내부에 연결된 중심 전극을 통해 펄스는 발신되고, 동축 케이블 외부에 연결된 양쪽 전극을 통해 전기적 그라운드를 유지할 수 있다. TDR 프로브는 Fig. 3과 같이 동축케이블을 통하여 신호 발생기 및 오실로스코프 기능이 내장된 Reflectometer(Hyperlabs, HL1101)에 연결되었으며, TDR 프로브로부터 반사된 신호를 기록 및 저장하도록 시스템을 구성하였다. 이때 신호의 측정에 따라 발생할 수 있는 Noise를 최소화하기 위하여, 신호의 stacking 횟수를 256회로 설정하였다.

3.2 유전상수 산정

TDR 프로브가 설치된 몰드를 이용하여 CLSM 시료의 양생 시작 후 1시간부터 28일까지 측정된 파형은 Fig. 4에 도시되었다. Fig. 4(a)를 보면 양생 시작 후 6시간이 경과된 시점까지는 TDR 파형은 거의 동일하게 유지되었고, Fig. 4(b)의 그래프에서 알 수 있듯이 파형의 변화는 양생 후 8시간이 경과된 시점부터 뚜렷이 발생하는 것으로 나타났다. 반사된 신호의 이동시간은 시험체의 유전상수에 따라 변화하

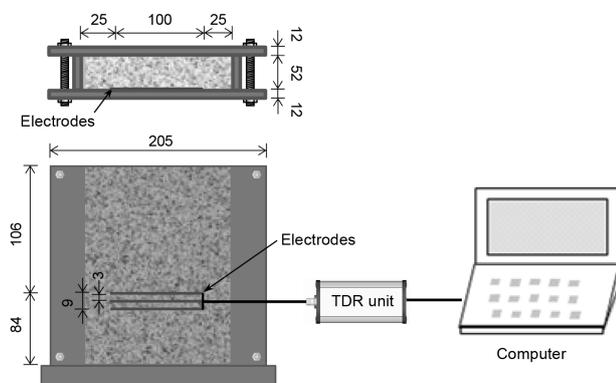


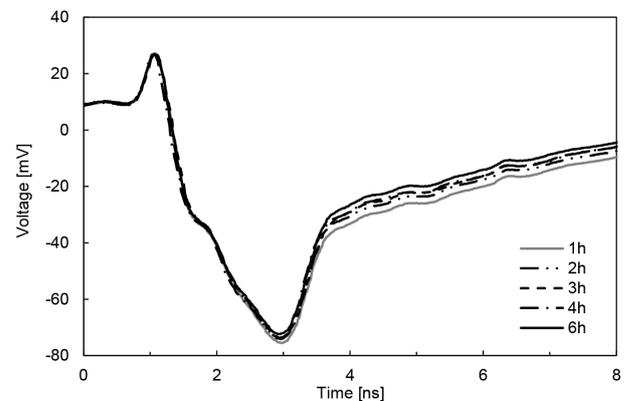
Fig. 3. Schematic drawing of TDR probe-installed mold for the measurement of dielectric constant. The unit of the number is millimeter

는 것으로 알려져 있으며, 양생 후 8시간 이상 경과된 파형에서 양생 기간이 증가함에 따라 이동시간이 감소하는 것을 보여준다.

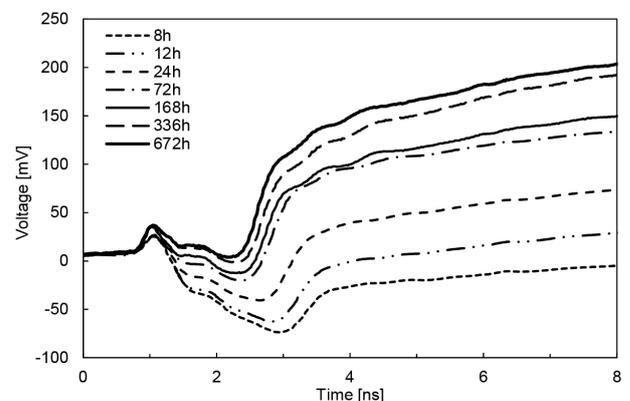
전극 사이의 매질의 전기용량 비를 의미하는 유전상수는 시간영역반사법에서 전자기파의 이동시간 및 전극의 길이로부터 산정될 수 있다. Fig. 4에서 측정된 반사 신호의 이동시간은 Eq. (1)을 통하여 유전상수(K_a)를 결정하는데 사용된다(Fellner-Feldegg, 1969).

$$K_a = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, t 는 전자기파의 이동시간으로써, Reflectometer로부터 발생된 펄스가 전극에 도달한 후 끝단에서 반사되어 오기까지 경과된 시간을 의미한다. L 은 TDR 프로브의 전극 길이, c 는 진공에서의 전자기파 속도($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)를 나타낸다. Eq. (1)로부터 산정된 유전율을 양생 기간에 따라 Fig. 5와 같이 도시하였다. 양생 시작 후 1시간부터 6시간까지 유전상수는 12.5로 일정하게 유지되었으며, 이와 같은 유전상수 값은 TDR 프로브 주변을 둘러싼 MC 나일론, 흡입자 및 물의 영향을 받은 것으로 판단된다. 또한, 동일한 재질의 TDR 프로브



(a) Before 8 hours



(b) After 8 hours

Fig. 4. TDR waveform according to time

를 이용한 Hong et al.(2015)의 포화된 모래에서 측정된 유전상수 값과 상당히 유사함을 알 수 있다. 양생 시작 후 8시간부터 28일까지의 유전상수는 12.1부터 6.0까지 점차 감소하였다. 이는 양생이 진행함에 따라 함수량이 감소하며, 유전상수 결정 시 받았던 물의 영향이 줄어들었기 때문이다.

4. 유전상수-일축압축강도 상관성

일축압축강도와 유전상수의 상관성을 나타내기 위하여, 양생 시작 후 1, 3, 7, 28일 경과한 시점에서 산정된 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 일축압축강도와 유전상수의 결과를 바탕으로 회귀분석을 수행함으로써 두 변수의 관계를 Eq. (2)와 같이 도출하였다.

$$f_c = 10^8 K_a^{-6.309} \quad (2)$$

여기서 f_c 는 kPa 단위의 일축압축강도를 나타내고, K_a 는 유전상수를 의미한다. Eq. (2)로 도출된 일축압축강도와 유전상수의 관계는 거듭제곱의 형태로 반비례하며, 높은 상관

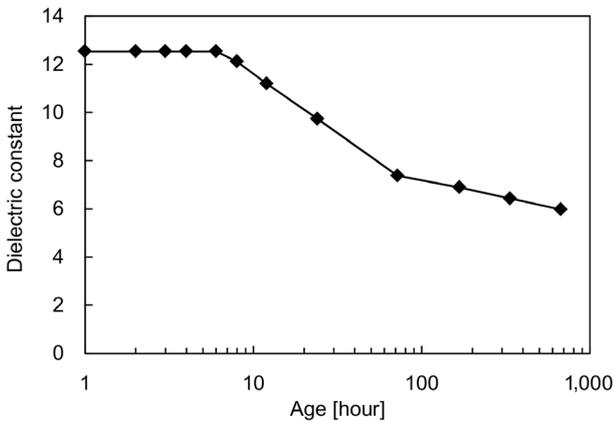


Fig. 5. Variation of dielectric constant with the time

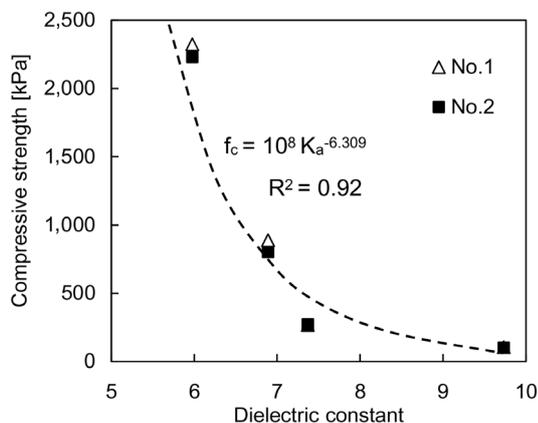


Fig. 6. Dielectric constant versus unconfined compressive strength

성($R^2=0.92$)이 있음을 보여주었다. 이는 양생 기간이 진행될수록 일축압축강도는 증가하고 유전상수는 감소하는 실험 결과를 잘 반영하고 있다. 또한, 유전상수에 큰 영향을 미치는 요소가 함수량인 것을 고려하면, 시간경과에 따른 함수량의 감소가 일축압축강도의 발현으로 연관되는 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출된 Eq. (2)는 공시체의 탈형 가능한 시점이었던 양생 시작 후 1일부터 28일에 한정되었으나, 이와 같이 시간영역반사법으로 도출된 추정식은 추후 시공된 CLSM의 현장 강도평가 시 하나의 대안으로 활용될 수 있을 것이다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 유동성 채움재인 CLSM의 시간에 따른 경화 특성의 변화를 시간영역반사법을 이용하여 모니터링하고, 그 결과로써 산정된 유전상수와 일축압축강도의 상관성을 조사하였다. CLSM의 재료는 CSA계 시멘트, 비회, 실트 및 모래, 알칼리프리계 급결제, 물로 구성되었으며, 배합된 시료의 플로우, 단위중량, 그리고 일축압축강도를 측정하였다. 양생 기간에 따른 CLSM의 유전율 특성을 모니터링하기 위하여 TDR 프로브가 설치된 MC 나일론 재질의 몰드를 이용하였다. 본 연구로부터 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 양생 경과 1시간부터 6시간까지 유전상수는 12.5로 일정하게 유지된 후, 8시간이 경과된 후부터 28일까지는 6.0까지 점차 감소하였다. 이를 통해 유전상수의 크기 결정에 가장 큰 영향을 주는 함수량이 감소함을 보여주었다.
- (2) 양생 기간 1일부터 28일 사이의 CLSM의 일축압축강도와 유전상수 간의 상관성을 분석한 결과, 반비례의 거듭제곱 함수관계가 있음을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안된 유동성 채움재의 특성화를 위한 시간영역반사법기는 추후 다양한 조건의 CLSM 시료에 대한 연구가 필요로 되며, 이러한 시간영역반사법기를 통하여 시간변화에 따른 CLSM의 강도특성을 보다 효율적으로 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

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 C191 (2013), Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by vicat needle, American Society for Testing and Materials.
3. ASTM C403 (2008), Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance, American Society for Testing and Materials.
4. ASTM D 6103 (2004), Standard test method for flow consistency of controlled low-strength material (CLSM), American Society for Testing and Materials.
5. Benson, C. and Bosscher, P. (1999), Time-domain reflectometry in geotechnics: a review, *Nondestructive and Automated Testing for Soil and Rock Properties*, STP 1350, ASTM, W. Marr and C. Fairhurst, Eds., pp. 113~136.
6. Fellner-Feldegg, H. (1969), The measurement of dielectrics in the time domain, *J. Phys. Chem.* Vol. 73, pp. 616~623.
7. 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).
8. Hong, W. T., Jung, Y. S., Lee, J. S. and Byun, Y. H. (2015), Development and application of TDR penetrometer for evaluation of soil water content of subsoil, *Journal of The Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 2, pp. 39~46.
9. Janoo, V., Korhonen, C. and Hovan, M. (1999), Measurement of water content in Portland cement concrete, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 125, No. 3, pp. 245~249.
10. Kim, H. (2002), Enhanced performance of high early strength concrete with regulated set cement, master thesis, Konkuk University, pp. 5~16 (in Korean).
11. 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.
12. Li, Z., Wei, X. and Li, W. (2003), Preliminary interpretation of Portland cement hydration process using resistivity measurements. *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 3, pp. 253~257.
13. O'Connor, K. M. and Dowding, C. H. (1999), Geomeasurements by pulsing TDR cables and probes, pp. 424.
14. Qin, L. and Li, Z. (2008), Monitoring of cement hydration using embedded piezoelectric transducers, *Smart Mater Struct*, Vol. 17, No. 5, pp. 1~6.
15. 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).
16. 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.
17. Topp, G. C., Davis, J. C. and Annan, A. P. (1980), Electromagnetic determination of soil water content : measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 574~582.
18. 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.
19. 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.