

초음파 및 유전성을 이용한 모르타르(Mortar) 수화(Hydration) 과정의 정밀측정

한응교* 이명호** 김세영**

Precision Measurement of the Hydration of Mortar by Ultrasonic and Dielectric Method

E. K. Han, M. H. Lee and S. Y. Kim

Abstract Recently, there are many fields have been required for the precision measurements, as an advanced example of which, a precise change of inner structure during the hydration process of mortar was observed by ultrasonic and dielectric measurements. The results show that it is possible to determine the safety of mortar and mixing ratio, and strength growth and shrinkage rate by heat evolution.

1. 서 론

수화(hydration)란 시멘트(cement)와 물과의 모든 반응을 의미하는 것으로, 여기에 모래(sand)를 첨가한 혼합물을 모르타르(mortar)라 부른다. 물과 시멘트가 혼합하면 서로의 화학적 작용에 의해 반응을 일으켜 열을 방출하며 그와 동시에 내부의 조직변화가 일어나게 되는데, 비파괴검사법에 많이 이용되는 초음파 펄스(Ultrasonic pulse)를 측정해 봄으로써 모르타르 내부조직의 변화, 즉 ion 상태 변화, solid% 변화, water% 변화 등의 관측에 대한 파라메타(parameter)의 하나로 활용할 수가 있다.

또한 모르타르 자체를 하나의 유전체(dielectric)로 볼 때 수화에 따른 모르타르의 정전용량 변화 등을 측정함으로써 이것들을 또 하나의 관측 파라메타로 활용할 수 있다.

그동안 시멘트내의 각 phase의 분석을 위해 정량적 x-ray회절 분석이 사용되었고⁽¹⁾, 수화동안 내부형태발전을 관찰하기 위하여 전자현미경이 사용되었다.⁽²⁾ 초음파적 방법으로는 Lawrence가 시멘트 paste 실린더에서 초음파 펄스의 속도를 이용하여 C₃S 수화시 첨가제의 영향을 연구하였다.⁽³⁾ 또한 1975년 G. D. Hass 등은 시멘트 paste와 모르타르의 수화시 수축율(shrinkage ratio)과 초음파속도등을 관찰했다.⁽⁴⁾ 1977년 Van

* 한양대학교 정밀기계공학과 교수

** 한양대학교 대학원

접수: 1989년 3월 14일

wallendael은 시멘트 paste를 투과하는 초음파의 에너지를 측정하여 수화를 연구했으며⁽⁵⁾, 1981년에 Janes stegisnik는 반사된 에너지를 이용하여 수화동안 시멘트 paste의 shear modulus를 측정했다.⁽⁶⁾ 1984년 Double과 Wilding은 초음파속도를 이용하여 다양한 첨가제 하에서 수화를 연구했다.⁽⁷⁾ 전기적성질(전기용량, 전기저항)을 이용한 수화과정의 연구는 1983년과 1984년에 Mccarter와 Afshar에 의해 행해졌고^(8,9), 경화된 시편에 대한 유전손율[dissipation factor ($\tan \delta$)]과 relative permittivity의 측정이 1986년 M. Perez-pena 등에 의해 행해졌다.⁽¹⁰⁾ 또 이와는 달리 1987년 KAIST(한국과학기술원)의 Yoon Suk-soo는 특별히 dielectric relaxation process에 관점을 두고 시멘트 paste의 수화 과정을 처음으로 연구하였다.⁽¹¹⁾

본 논문에서는 유전성 방법과 초음파 방법을 병행하여, 시멘트 paste에 모래를 첨가시킨 모르타르에 대한 수화과정을 연구하였다. 특히 재료내부의 변화자체보다는 조직변화에 따른 초음파 속도, 감쇠와 교류전기장에서의 유전상수와 dissipation factor 측정에 중점을 두었다.

모르타르 수화과정을 monitoring해 봄으로서, 앞으로 특수 시멘트나 모래를 사용한 콘크리트(concrete), 모르타르의 수화과정을 이와같은 방법으로 연구하면 수화기간 단축이나, 수화기간에 따른 강도증가 평가 등에 활용할 수 있을 것으로 보며, 또한 이미 경화된 건축물의 콘크리트, 모르타르배합비 검사 등에 응용 될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 시편 배합과 몰드(mould)

Table 1. Specification of moulds

	mould 1	mould 2
재 질	Aluminium	Acryl
크 기	3x20x20(cm)	4x4x1.7(cm)
용 도	초음파속도, 감쇠, 온도 측정	유전성 측정



Photo. 1. Moulds

모르타르배합에 사용된 시멘트는 상업적으로 널리 쓰이고 있는 것이며(orion cement), 모래는 시중에서 구입하여 전기로에서 1시간동안 100°C로 가열 시켰으며 물은 증류수를 사용했다.

배합은 6가지 종류로 다음과 같이 A set와 B set로 나누었다.

보기 : Cement : Sand : Water	
A set	B set
1 : 1 : 0.4	1 : 1 : 0.6
1 : 1 : 0.5	1 : 2 : 0.6
1 : 1 : 0.6	1 : 3 : 0.6

A set는 S/C를 1로 고정시키고 W/C만의 변화를 시킨 것이며, B set는 W/C를 0.6으로 고정시키고 S/C의 변화를 시킨 것이다.

수화가 진행되는 mould는 두 종류를 사용했다. 그 제원은 Table 1과 같고 photo:1은 그 외관을 나타낸다. 왼쪽이 초음파 측정용이고 오른쪽이 유전성 측정용이다.

2-2. 실험장치

실험장치의 블록선도는 Fig. 1에 표시하였다.

2-3. 초음파 속도와 감쇠측정

초음파 속도와 감쇠는 PUNDIT와 MATEC를 이용하여 측정하였는데, PUNDIT는 초음파펄스를 54KHz의

공진주파수를 갖는 transducer를 통하여 발진시키고 매질을 지나온 초음파 펄스를 수신 transducer로 받아서 매질을 지나는데 걸린 transit time을 digital로

실험에서 $d=3\text{cm}$ 이고 속도를 3000m/sec 라 하면, $\Delta t_0=2d/V=20\mu\text{sec}$ 이다. 이 값은 펄스의 한 주기 $18.5\mu\text{sec}$ 보다 크므로, 수신펄스(received pulse)의 처음 한 주기내의 부분은 반사파들에 의한 간섭이 포함되지 않는다.(Fig.2 참조)

MATEC Attenuation Recorder는 수신펄스의 첫 부분 peak값을 peak detector로 측정하여 8 volt에 대한 dB값에 비례하는 d. c. 전압의 출력으로 준다.

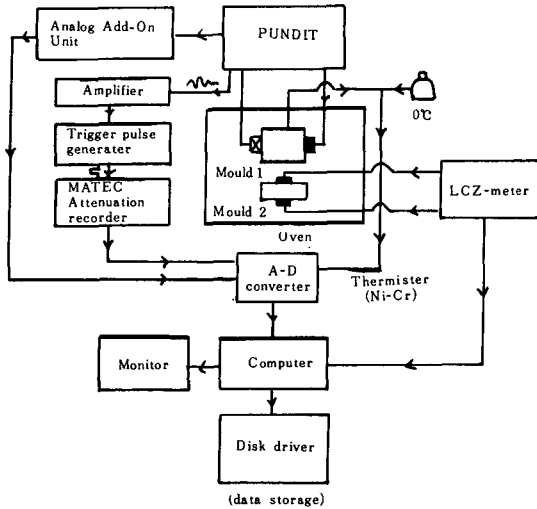


Fig. 1. Block-diagram for experimental apparatus.

나타내어준다. 수화가 진행되는 mould의 양편에 transducer를 접촉시킨 후, PUNDIT로 초음파 펄스를 계속 발진시키며 transit time을 연속적으로 측정하므로 수화과정동안의 초음파 펄스의 속도변화를 얻었다. PUNDIT의 transit time을 Analog-Add-On Unit에 의해 비례하는 전압으로 변화시킨 후 A-D converter를 거쳐 computer로 읽어 디스켓에 기록했다.

초음파 감쇠는 수화과정동안 전파되어온 초음파 펄스의 peak 전압을 측정하여 얻었다. 감쇠는 경계면에서 반사되어온 펄스들과 매질을 통하여 도달한 펄스의 간섭(interference)에 영향을 받기 때문에 도달한 여러개의 펄스들 중 간섭이 포함되지 않은 첫번째 peak 전압을 읽어야 한다. 실험에 사용된 mould에서 가장 먼저 도달하는 반사파는 side가 아닌 직접 반사되어 되돌아온 것이 된다. 사용한 transducer의 공진주파수가 54KHz 이므로 주기 $T=18.5\mu\text{sec}$ 이다. 어느순간 속도가 V 이고 d 가 transducer 사이의 간격이면, 반사파의 time delay는 $2d/V$ 가 된다.

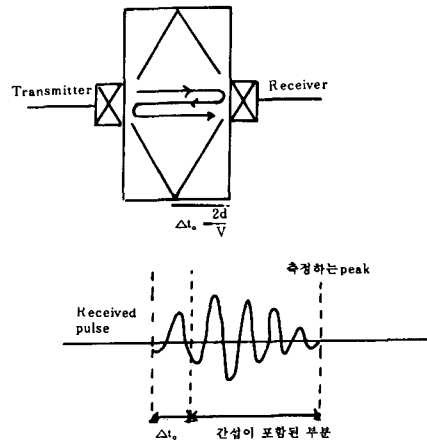


Fig. 2. Interference by reflection.

수화과정동안 이 d. c. 출력전압(output voltage)을 A-D converter를 거쳐서 computer로 읽어 (30분 마다) diskette에 기록하여 감쇠를 측정하고, 이 값에서 V_{out} 즉, 전파된 초음파 펄스의 peak 값을 얻었다.

2-4. 유전성 측정

유전성 측정에는 LCZ meter를 사용했다. 이것은 시편의 양단에 설치된 전극에 선택된 진동수에서 교류전압을 가해 유도되는 전류로부터 그 시편의 등가적 capacitance, conductance, 유전손을 등을 측정하며, 발생가능한 교류 주파수는 $10\text{KHz} \sim 1\text{MHz}$ 까지이다. 수화가 진행되는 동안 여러 진동수에서 등가적 capacitance, conductance, dissipation factor를 측정했으며 IEEE-488 Interface card를 이용하여 8-bit computer와 LCZ meter를 연결하였다. Program을 통해 LCZ

meter에 명령을 내려 주파수를 변화 시켜가면서 측정값을 읽게하고 그 값을 computer에서 모아 diskette에 저장하였다. 전극과 시편간의 직접적인 전류가 흐르지 못하고 단지 capacitive current만 유도되게 하기 위해 전극과 시편 사이를 스키티테이프로 절연시켰다. (Fig. 3참조)

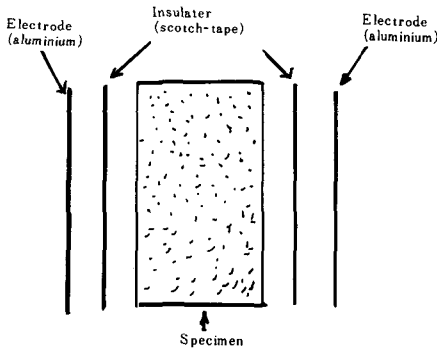


Fig. 3. Design of capacitor for dielectric measurement.

2-5. 열방출 측정

주위의 온도를 일정하게 유지하도록 시편을 oven (26.5°C유지)에 넣어서, 시편속에 thermo couple(Ni-Cr)을 꽂아 온도변화에 비례하는 전압을 A-D converter를 거쳐 computer로 읽어 diskette에 기록했다. 여기서 주위온도와 모르타르 내부 온도차로 부터 열방출에 비례하는 양을 얻었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1 초음파 속도 결과

3-1-1. 시간 의존성

수화과정 동안 시멘트 paste는 setting과 hardening이 일어난다. 따라서 수화동안 탄성적성질(elastic property)들의 변화가 있으며 이로 인해 초음파의 속도변화가 일어난다. 초음파의 속도는 그 순간 마다의 각 phase들(고체, 물, 공기)의 concentration에 의존한다. 각 phase의 concentration은 W/C ratio와 S/C ratio, 그리고 수화정도(h)에 관계된다. Fig. 4는 1 : 1 : 0.4에 대한 48시간동안의 속도변화를 보여준다.

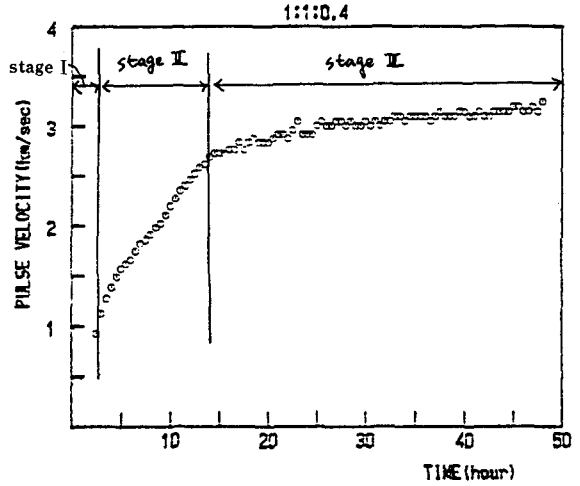


Fig. 4. General variatin of pulse velocity during hydration process in 1 : 1 : 0.4 specimen.

수화가 진행되는 시간에 따른 변화를 보면 W/C ratio나 S/C ratio에 관계없이 다음의 3단계로 나눌 수 있다.

- Stage I : 물과 시멘트를 섞은 뒤 처음 얼마동안 속도가 거의 변하지 않는 단계
- Stage I : 속도가 시간에 대해 거의 선형적으로 증가하는 단계
- Stage III : 속도의 증가율이 서서히 감소하면서 일정한 값으로 접근하는 단계

처음의 속도가 변하지 않는 단계는 반응율이 낮은 induction stage로 반응이 거의 일어나지 않으므로 elastic 성질의 변화가 없음을 알 수 있다. 선형적인 속도 증가 단계인 Stage II는 반응율의 가속 단계에 해당하며, Stage III는 반응율의 감속단계에 해당된다.

그림에서 보면 대략 15시간에서 hardening stage가 시작이 됨을 알 수 있었으며 그 이전까지의 속도는 선형 변화함을 알 수 있었다. Stage II는 C₃S의 활발한 반응으로 인해 그 수화산물들의 양이 증가하면서 모르타르가 setting을 일으키는 동안 탄성적성질의 변화로 인한 것이며, Stage III는 모르타르가 setting이 끝난 후 hardening이 일어나면서 탄성적성질이 변하는 것을 나타낸다고 생각된다.

이는 모래를 섞지않은 시멘트 paste경우의 수화에 있어서 나타나는 3단계와 일치함을 알 수 있었다. 즉 물과 시멘트의 반응에는 모래가 있어도 Stage I, II, III의 기본모양에는 변화를 주지않는다는 것을 알 수 있었다.

3-1-2. W/C ratio 의존성

S/C ratio를 1로 고정시키고 W/C를 0.4~0.6으로 변화시켜가면서 W/C ratio 의존성을 파악한 그림이 Fig. 5에 나타나 있다.

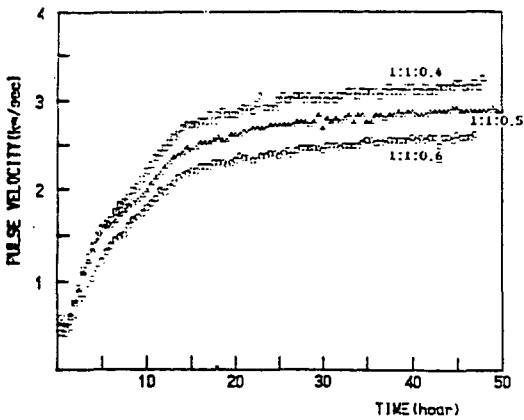


Fig. 5. W/C ratio dependence on the pulse velocity during hydration process

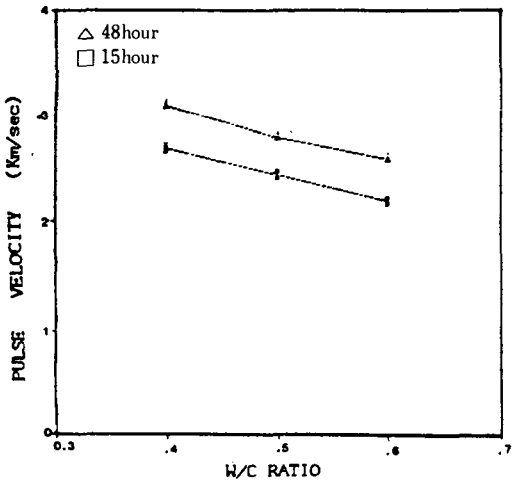


Fig. 6. Pulse velocity at 15 and 48 hour in the change of W/C ratio

W/C ratio가 작을수록 거의 모든시간에 대해 속도는 빠르게 나타난다. 모르타르를 간단히 고체와 물로 이루어진 two phase media로 보면 속도는 이들의 concentration의 함수가 되며 capillary water의 concentration이 적을수록 속도는 빠르게 나타난다.

시편 한 개 무게당 고체부분(cement, sand)이 차지하는 비율은 1:1:0.4, 1:1:0.5, 1:1:0.6의 시편이 각각 83.3%, 80%, 76.9%임을 볼 때 W/C=0.4일 때의 solid%가 가장크고, 그에 비례하여 Water%는 가장 작다. 따라서 W/C가 가장 작은 시편의 속도가 가장 큰 것으로 나타났다. Fig. 6은 15, 48시간일 때의 초음파속도를 각각 나타낸다.

3-1-3. S/C ratio 의존성

이번엔 W/C를 0.6으로 고정시키고 S/C를 1~3으로 변화시켜 S/C ratio 의존성을 파악한 그림이 Fig. 7에 나타나있다. 마찬가지로 시편 한 개 무게당 고체부분이 차지하는 비율은 1:1:0.6, 1:2:0.6, 1:3:0.6이 각각 76.9%, 80%, 87%로 S/C=3 일 때 solid%가 가장 큰 것으로 나타난다. 따라서 S/C=3 시편의 속도가 가장 크게 나타났다. 이는 초음파속도는 solid%의 다소에 따라 변화를 일으킴을 보여준다.

또한 Fig. 7에서 7시간동안 속도가 비슷하게 나타

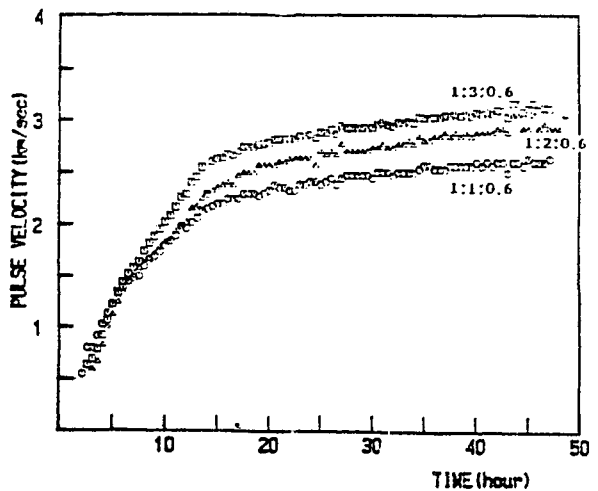


Fig. 7. S/C ratio dependence on the pulse velocity during hydration process

나는 것은 시멘트와 water의 비율이 일정하기 때문에 반응이 많이 일어나는 초기에는 3개의 시편 모두 수화율이 같기때문인 것으로 생각된다. 그 후 반응이 마무리 되어져 가면서 모래양이 많은 시편일수록 상대적인 capillary water concentration이 적어서 속도의 차이를 보이는 것으로 생각된다. 더불어 미세하나마 모래와 시멘트 paste간의 반응이 원인으로 포함될 수도 있을 것으로 본다. Fig. 8은 수화시간 15, 48시간에서의 초음파 속도를 각각 나타낸다.

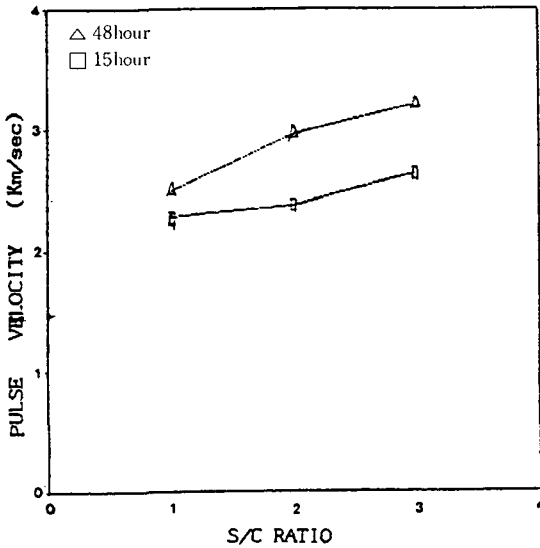


Fig. 8 Pulse velocity at 15 and 48 hour in the change of S/C ratio.

3-2. 초음파 감쇠 결과

3-2-1. 시간 의존성

Fig. 9는 배합비 1 : 1 : 0.4 시편의 수화가 진행되는 중 시편을 지나 수신 transducer에 잡힌 초음파 펄스의 전압값의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. Fig. 9를 보면 처음 몇시간 동안(약 4시간) resonance가 잡히지 않고 있음을 알 수가 있다. 그리고 시간에 대한 변화는 속도경우와 같이 처음의 빠른 증가 단계와 일정한 값으로 느리게 접근하는 단계로 나눌 수 있다. 속도의 경우와 같이 수화 중인 모르타르를 고체와 물(capillary porosity)로 구성되어 있다고 보면 시편에 의한 초음파

감쇠는 이 porosity들의 산란(scattering)에 가장 크게 영향을 받는다. 처음의 얼마동안 resonance가 잡히지 않는 것은 감쇠계수 α 는 주파수의 4제곱에 비례하므로, 높은 주파수일 수록 감쇠의 양이 크며 또한 transducer의 공진주파수의 진폭이 측정범위보다 낮기 때문이다. 실험중 초기의 signal 모양을 보면 처음에 도달하는 펄스는 공진주파수(resonance frequency)보다 낮은 것이며, 수화가 진행되면서 점점 공진주파수로 접근하는 것을 알 수 있었다. Fig. 9에서 resonance가 잡히기 시작해서 부터 몇 시간(15시간)이내에 peak 전압값이 빠르게 증가하는 것은 이시간에 많은 반응으로 인해 capillary water의 빠른 감소와 또 그 평균 크기의 빠른 감소로 인한것이며 C(전체에 대한 porosity의 concentration)와 P(porosity의 평균체적)가 감소하면 감쇠는 줄어든다. 즉, peak 전압은 증가한다는 얘기이다. Saturation의 위치는 속도때와 일치하는 것을 볼 수 있다.(15시간 부근)

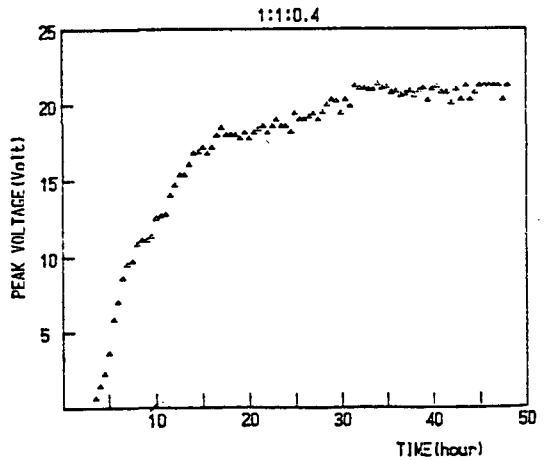


Fig. 9. General variation of peak voltage during hydration process in 1 : 1 : 0.4 specimen.

3-2-2. W/C ratio 의존성

Fig. 10은 수화시간에 따른 초음파 펄스의 peak 전압값의 변화에 대한 W/C ratio의 영향을 나타낸 것이다. W/C ratio가 작을수록 peak 전압값은 더 크게 나타남을 알 수 있다. 속도때와 같이 W/C=0.4일 때 solid%가 83.3%로 solid part가 가장 많다.

Solid part가 많다는 것은 상대적으로 capillary porosity가 적다는 이야기이므로 산란이 그만큼 적게 일어난다. 그렇기 때문에 solid%가 가장 많은 즉, 물의 concentration이 가장 작은 1:1:0.4시편의 감쇠가 제일 적고, 따라서 peak 전압값은 가장 크게 나타나는 것이다.

또한 Fig. 11은 15시간과 48시간 수화했을 때의 peak 전압값을 각각의 W/C ratio에 대해 비교한 것이다.

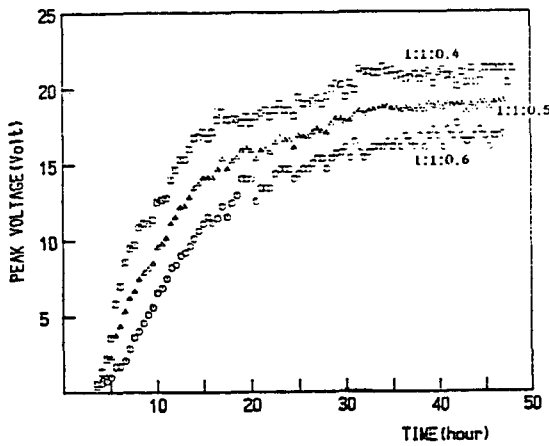


Fig. 10. W/C ratio dependence on the peak voltage during hydration process.

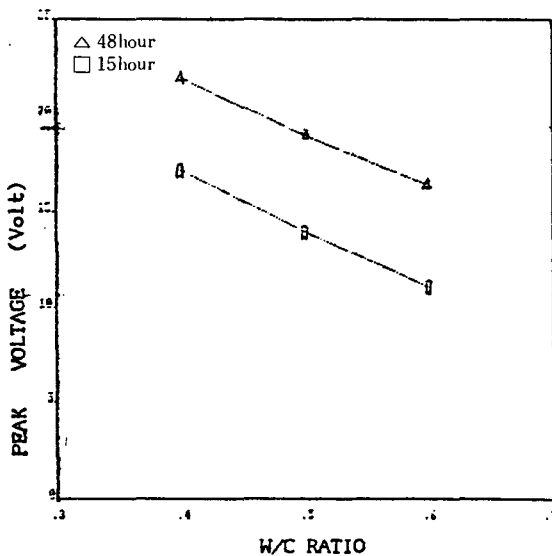


Fig. 11. Peak voltage at 15 and 48 hour in the change of W/C ratio.

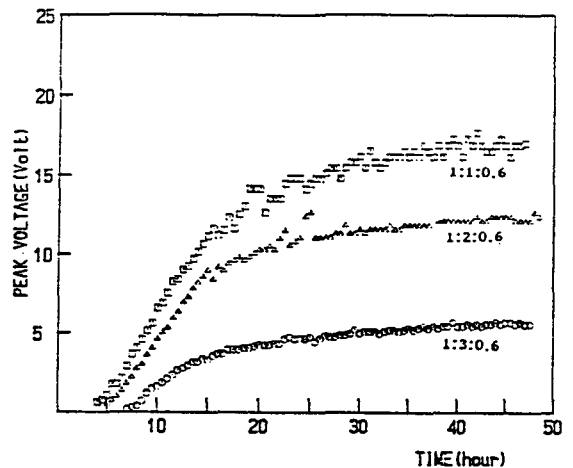
3-2-3. S/C ratio 의존

Fig. 12는 수화시간에 따른 peak 전압값의 변화에 대한 S/C ratio의 영향을 나타낸 것이다. 속도 때의 Fig. 7과 비교하면 재미있는 결과를 발견하게 된다. 속도 때처럼 단순히 solid%의 양만을 가지고 비교하면 1:3:0.6 시편의 solid%가 87%로 가장 많으므로 감쇠가 가장 작고 따라서 peak 전압값이 가장 클 것으로 생각되나 결과는 그렇지 못하다. 이유는 W/C는 0.6으로 fixed 되어있기 때문에 water의 절대량은 일정하다. 그런데 일정한 water에 대해 모래의 양은 증가하기 때문에, 증가한 모래의 양이 그만큼의 capillary water가 차지하는 공간에 들어설지를 못하고 또다른 porosity를 만들기 때문인 것으로 추정이 된다. 실제로 혼합과정에서도 1:1:0.6보다 1:3:0.6 시편의 혼합이 기포가 많이 포함될 수 밖에 없는 상태였다.

다시 말하면 S/C가 클수록 peak 전압값은 작아졌다. 즉, S/C ratio가 클수록 산란이 커지며 따라서 감쇠는 크게 나타났다.

이때까지 본 바와 같이 초음파속도와 감쇠는 모르타르의 각 phase들의 concentration의 함수이며 W/C ratio의 의존은 이들의 concentration에 대한 영향으로 나타나지만 S/C ratio의 의존은 이와는 반대의 결과를 나타냈다.

그러므로 W/C를 고정하고 모래의 양만을 늘리는



것은 그만큼 기포를 늘리는 결과를 초래하므로 적정량의 모래함유가 필요하며, 배합비 적부관정에 이 방법이 유용할 것으로 판단된다.

Fig. 13에는 15시간과 48시간 수화시의 peak 전압 값을 각각의 S/C ratio에 대해 비교한 것이다.

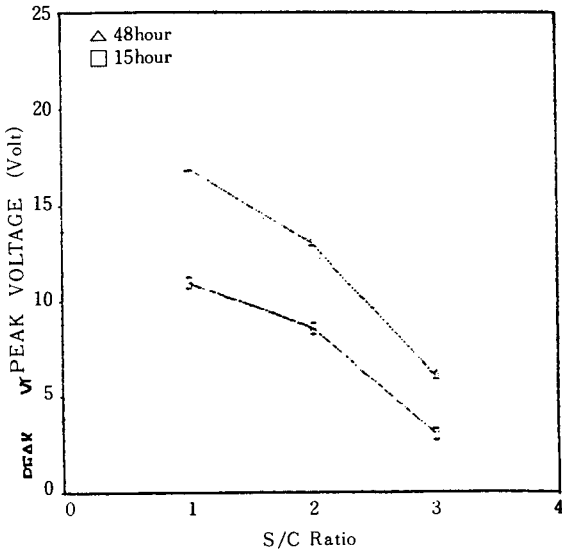


Fig. 13. Peak voltage at 15 and 48 hour in the change of S/C ratio

3-3. 열방출률 (Heat evolution rate) 측정

수화시 열방출률의 시간에 대한 변화가 Fig. 14에 나타나있다. Y축 크기는 열방출률에 바로 비례한다.

모든 시편이 이와 비슷한 양태의 그림을 나타냈다. 즉, 처음 열방출률이 일어나지않는 시간대, 열방출률이 증가하는 시간대, 열방출률이 감소하는 시간대 이렇게 3단계로 구분이 된다.

이를 초음파 속도, 감쇠와 비교하면 Stage, I, II, III과 비슷한 것을 알 수 있다. 즉, 열방출률과 초음파 속도는 물과 시멘트의 반응에 기인하여 나타남을 알 수 있다.

3-4. Real permittivity(ε')와 유전손률(D)

3-4-1. 시간 의존성

수화중인 모르타르에 교류전장을 가하면 여기에 반응해서 여러 process가 일어난다. 본 실험에서 사용한 교류 주파수범위(10⁴ - 10⁸ Hz)에서는 공간전하의 relaxation으로 인한 영향만 고려하면 된다. 수화중인

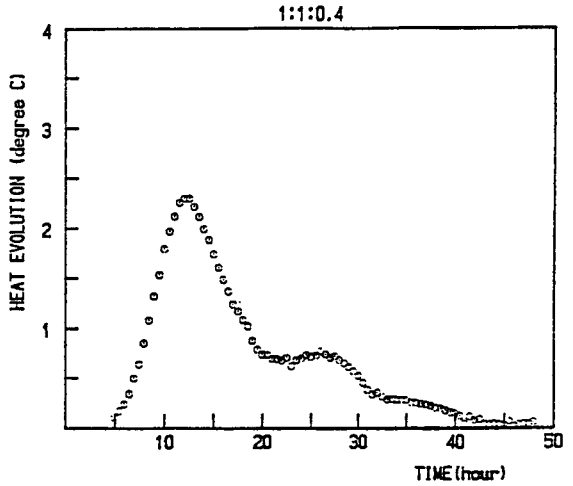


Fig. 14. General form of heat evolution rate during hydration.

모르타르내에 자유이온(free ion)이 존재하므로 이들의 relaxation time τ는 이론에 근거하면 다음과 같다.

$$\tau_{ion} \propto \frac{1}{\eta \mu} \dots\dots\dots (1)$$

자유이온의 relaxation time은 ion 수(n)와 mobility (μ)에 관계된다.⁽²²⁾

Fig. 15, 16은 1 : 1 : 0.4 시편의 수화에 따른 유전상수 (dielectric constant)의 실수부인 ε'과 유전손율 (tan δ)D의 변화를 나타내고 있다. a. c. 주파수 10KHz, 100 KHz, 500KHz, 1MHz에 대해 각각 측정한 것인데 10~500KHz 때의 graph는 수화시간에 대해 거의 변화가 없이 일정한 모양이나 1MHz일 때의 곡선은 처음 12 시간 정도까지 일정하다가 12시간 이후 많은 양의 감소를 보이고 있다. Dissipation factor는 초기 얼마동안(1 MHz 경우) 거의 일정하다가 서서히 증가하기 시작하여 12시간부터 많은 증가를 보이고 있다. 이 경향은 수화동안 전기전도도 σ의 변화로 인한 공간전하 relaxation time τ의 변화를 보여주는 것이다.

모르타르가 수화하면서 초기에는 ion 등이 많이 dissolution되고 반응산물이 적어서 mobility는 커지며 반응이 활발해지면 ion의 수도 줄고, 반응산물들의 생성으로 mobility도 감소하게 되므로 conductivity는 감소하며 식에서 알 수 있듯이 τ는 증가하게 된다. 즉, ω = 1

MHz로 볼 때 $\omega\tau$ 의 값은 시간이 가면서 커지고 따라서 식에 의해 ϵ' 은 감소하게 되며 $\tan \delta$ 는 증가하게 된다.

Fig. 17, 18은 1 : 1 : 0.4 시편의 a. c. 주파수변화($10^4 \sim 10^6$ Hz)에 따른 ϵ' 와 D의 변화를 나타내고 있다. 이는 Debye model과 일치하며 공히 48시간일 때 가장 큰 변화를 보인다. 이는 수화가 끝나갈수록 Debye model의 그림이 앞으로 shift 되는 것을 의미하며 이것은 수화동안 τ 의 증가에 따른 공진주파수 W_0 ($\tan \delta$ 가 최대일때의 주파수, $W_0 = 1/\tau$)의 감소때문이며, 결국 ϵ' 값은 더욱 높은 주파수에서 감소하게 된다. $\tan \delta$ 의 경우도 마찬가지로 해석할 수 있다.

정리하면, 수화시간에 대한 ϵ' 과 D를 관측하여 최종적으로 모르타르의 conductivity의 변화를 알아낼 수 있었으며 수화가 진행되면서 모르타르의 conductivity는 감소하였다.

초음파 속도나 감쇠와는 달리 후기(12시간 이후)에 많은 변화를 보이고 있으므로 ϵ' 이나 D를 parameter로 하면 모르타르의 후기수화 관측에 많은 이점이 있으리라 생각된다.

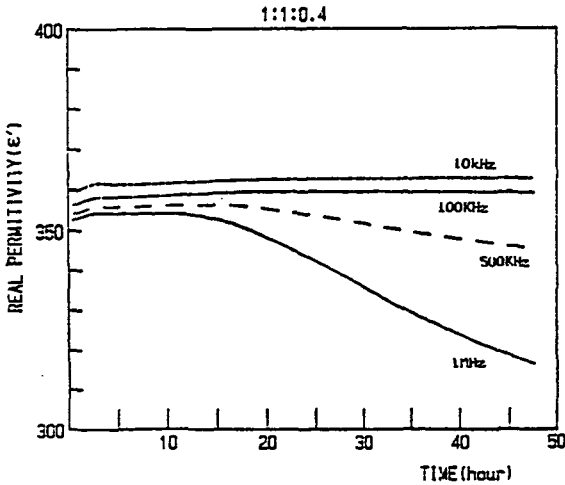


Fig. 15. Variation of real permittivity with many frequencies in 1 : 1 : 0.4 specimen during hydration process :

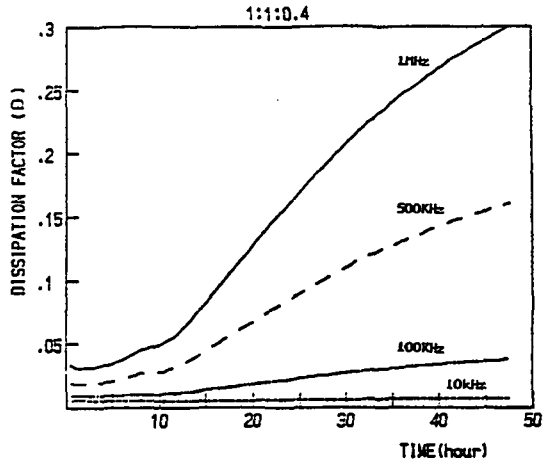


Fig. 16. Variation of dissipation factor with many frequencies in 1 : 1 : 0.4 specimen during hydration process.

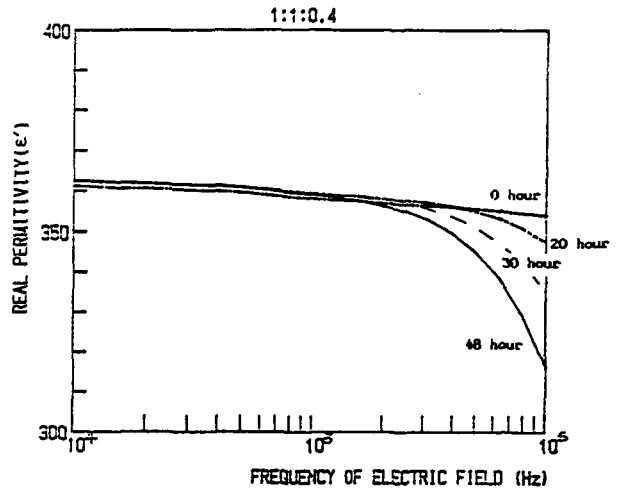


Fig. 17. Variation of real permittivity at each time by the change of frequency of electric field.

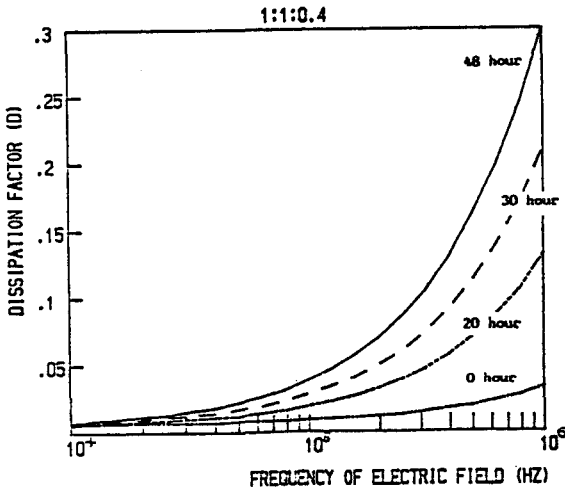


Fig. 18. Variation of dissipation factor at each time by the change of frequency of electric field.

3-4-2. W/C ratio 의존성

앞에서 살펴본 바와같이 시간에 따라 ϵ' , D값에 가장 많은 변화를 보이는 1MHz에서의 ϵ' 와 D의 수화 시간에 따른 변화에 대한 W/C ratio의 의존성을 나타내는 그림이 Fig. 19, 20이다.

Fig. 19에서 보듯이 W/C = 0.6 경우 48시간 동안 아주 적은 양이 감소하며, 대략 15시간 부터 W/C = 0.5 경우엔 0.6 경우보다 좀더 큰 감소를 보이거나 W/C = 0.4 경우엔 13시간부터 많은 감소를 나타내고 있다. 즉, W/C가 증가할수록 더욱 급격한 변화를 보이고 있는데, relaxation time τ 는 W/C가 작을수록 커지는 것을 나타낸다.

D의 경우, W/C = 0.4, 0.5, 0.6 시편 모두 5시간 정도까지 일정하다가 그 후 부터 W/C = 0.4~0.6 순으로 차이를 보이며 증가하고 있다.

W/C ratio의 영향은 앞에서 언급한 mobility가 W/C ratio와 반응된 정도에 의존하기 때문에 나타난 것이라 생각된다. 같이 반응된 정도에 대해 W/C ratio가 클수록 mobility는 작을 것이다. W/C가 0.4인 경우 ϵ' 값이 빨리 떨어지는 것은 이 경우 mobility 증가율이 두 경우보다 크기 때문이다. W/C = 0.4인 경우 반응 ratio도 두 경우보다 크고(Fig.19) W/C ratio도 적으므로 mobi-

lity가 클것은 충분히 예상된다. 세 경우 모두 초기에 약간의 차이는 있으나 비슷하게 값이 나타나는 것은 ϵ_s (초기값)가 W/C ratio에 무관하기 때문이다. D도 마찬가지로의 결과를 보이고 있다. 다시 말하면 W/C ratio의 의존성은 τ 가 W/C ratio에 대해 이와같이 다른 값으로 증가해서 나타난 것이다.

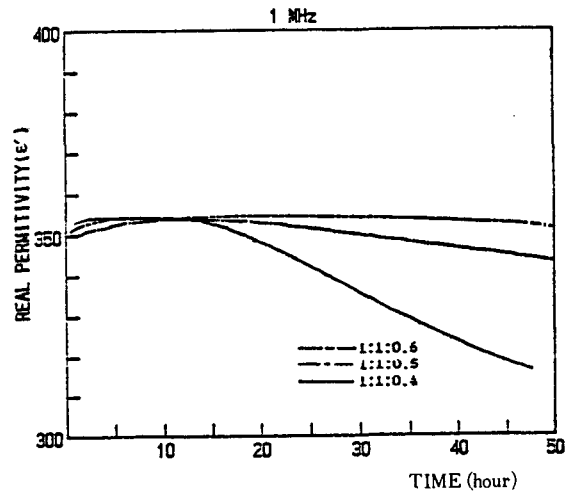


Fig. 19. W/C ratio dependence on the real permittivity during hydration process.

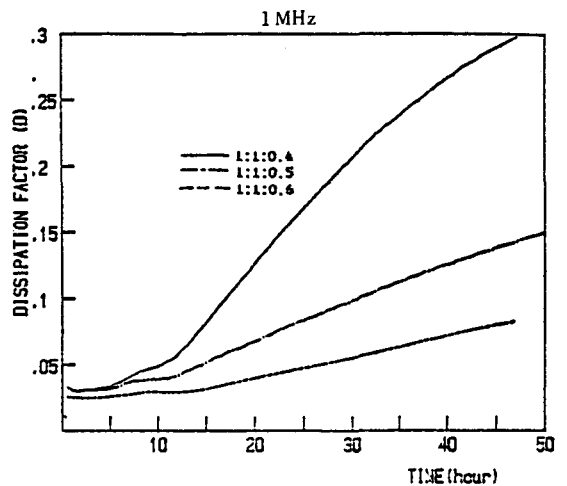


Fig. 20. W/C ratio dependence on the dissipation factor during hydration process.

이를 더 자세히 나타내주고 있는 그림이 Fig. 21, 22 로써, ϵ' , D의 a.c. 주파수변화에 따른 W/C ratio의 의존성을 나타낸 것이다. 이는 수화시간이 48시간 일 때의 측정 결과이다. ϵ' 의 경우 작은 W/C일 수록 변화가 심하며 작은 W/C일 수록 saturation이 앞당겨 진다. 또한 10Hz 부근까지는 ϵ' 값이 거의 같다. D의 경우는 작은 W/C ratio 일수록 큰 변화를 보인다.

ϵ' 에서 W/C가 작을 수록 급격한 변화를 보이는 것은 W/C = 0.4는 0.6 때보다 τ 가 증가한 때문이며 이는 앞서 설명한 conductivity가 다른 시편보다 작기 때문이다.

3-4-3. S/C ratio 의존성

Fig. 23, 24는 수화시간에 따른 ϵ' 와 D의 변화에 대한 S/C ratio의 영향을 나타낸 그림이다. 이것은 ϵ' 과 D의 가장 큰 변화를 보이는 a.c. 전압주파수 1MHz일 때의 그림으로 W/C 때와 마찬가지로 solid%가 가장 많은 S/C = 3(87%) 일 때 가장 많은 변화를 보이고 있다. 하지만 W/C 의존성보다는 크기가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 25, 26은 a.c. 주파수 변화에 따른 ϵ' , D의 변화에 대한 S/C의 영향을 나타낸 것이다. 제일 많은 변화를 보이는 48시간일 때의 그림으로 이것도 solid%가 많은 S/C = 3일 때 가장 많은 변화를 보이고 있다. 즉, S/C가

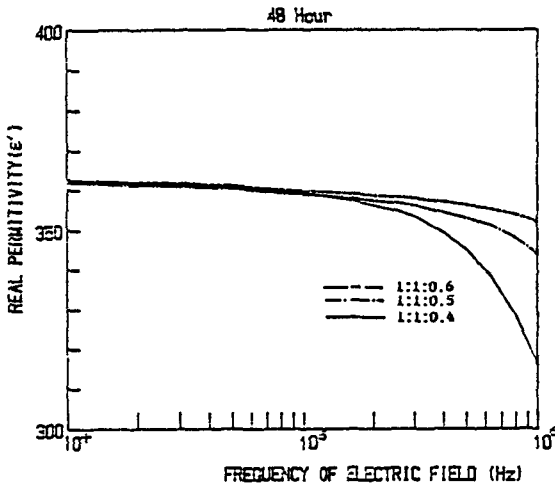


Fig. 21. W/C ratio dependence on the real permittivity by the change of frequency of electric field.

증가할수록 τ 는 증가하며 따라서 ϵ' 와 D는 많은 변화를 보인다.

이상에서 살펴본 바와 같이 solid%가 증가할수록 ϵ' 와 D는 많은 변화를 보이고 있고, 이는 water나 모래를 지나치게 다량 첨가한 모르타르, 콘크리트를 포함한 건축물이나 구조물의 안정성 평가에 활용이 가능할 것이다.

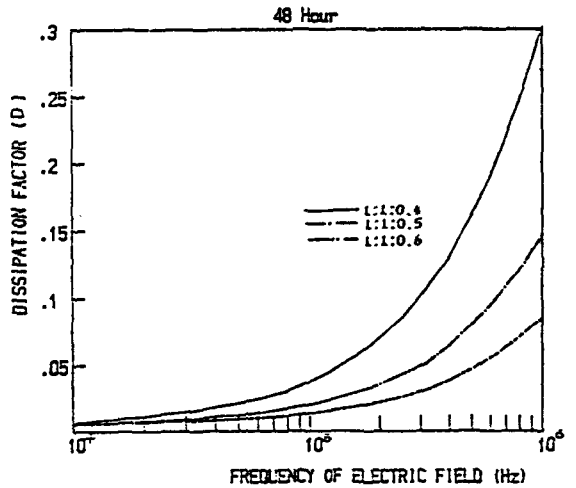


Fig. 22. W/C ratio dependence on the dissipation factor by the change of frequency of electric field.

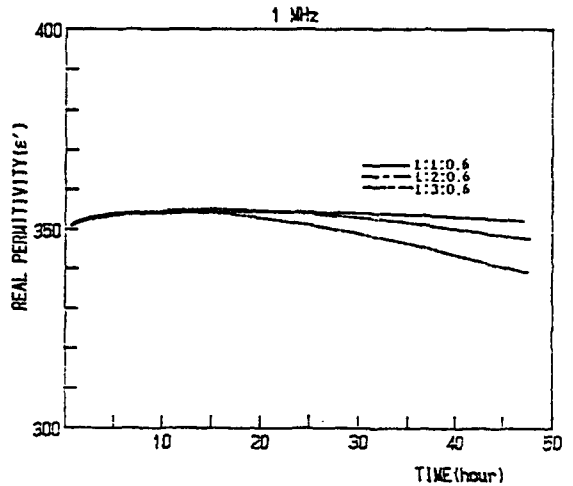


Fig. 23. S/C ratio dependence on the real permittivity during hydration process.

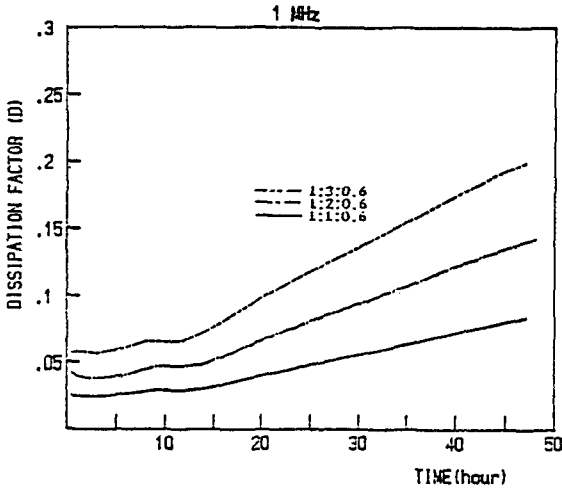


Fig. 24. S/C ratio dependence on the dissipation factor during hydration process.

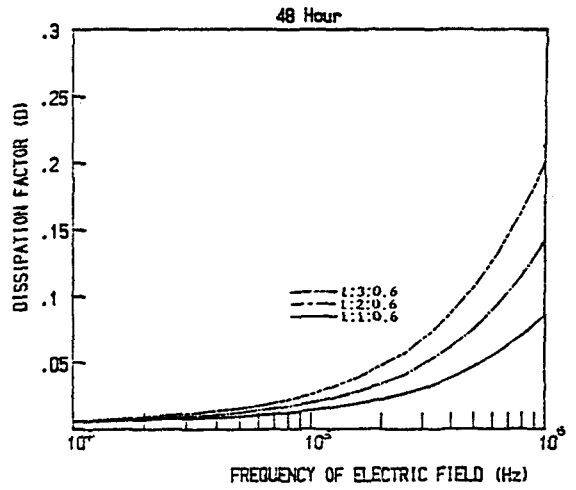


Fig. 26. S/C ratio dependence on the dissipation factor by the change of frequency of electric field.

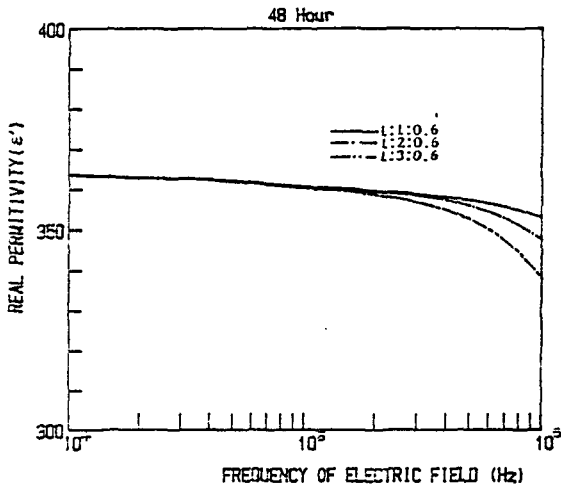


Fig. 25. S/C ratio dependence on the real permittivity by the change of frequency of electric field.

4. 결 론

모르타르에 대해 48시간 동안 초음파 속도, 감쇠 및 열방출률, 유전성 등을 측정된 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초음파 속도, 감쇠 및 열방출률

- i. 초음파 속도, 감쇠는 초기(15 시간 이내)에 많은 변화를 일으키며 후기에는 일정한 값으로 접근한다. 이것은 시멘트와 같이 3단계의 변화를 보이며, 모래와 시멘트 paste 간의 반응은 이러한 3단계의 변화형성에 아무런 영향을 끼치지 않는다.
- ii. W/C ratio에 대한 의존성에 대하여는, W/C가 작을수록 W/C가 큰 시편보다 속도와 peak 전압 값은 전체적으로 크게 나타났으며 이것은 solid part가 많기 때문이다.
- iii. S/C ratio에 대한 의존성에 대해서는, S/C가 클수록 속도는 커지고, 반대로 peak 전압 값은 더 작아진다.
- iv. 열방출은 초음파 속도, 감쇠와 같이 3단계로 구분되며, 크기의 차이는 있으나 모든 시편에서 모두 동일한 형태의 열방출 그림을 나타냈다.

2. 유전성 측정

- i. ϵ' 과 유전손실 D는 후기(약 7~10시간)에 많은 변화를 보였다. 수화가 진행됨에 따라 ϵ' 은 감소, D는 증가하며 이것은 mobility의 감소로 인한 relaxation time τ 의 증가를 반영하는 것이고

- 또한 conductivity의 감소를 나타내는 것이다. 특히, a.c. 주파수 1MHz에서 가장 큰 변화를 보였고, 주파수 의존성은 고주파 일수록 더 많은 ϵ' 의 감소와 D의 증가를 보였다.
- ii. W/C ratio의 의존성은 W/C가 작을수록 mobility, conductivity의 감소, relaxation time의 증가를 초래하여 ϵ' 의 감소, D의 증가를 보였다.
 - iii. S/C ratio의 의존성은 W/C 의존성 때와는 달리, S/C가 증가할수록 ϵ' 의 감소, D의 증가를 보였다.
3. 초기수화시는 초음파속도, 감쇠 측정률. 후기수화시는 유전성측정을 행하면 모르타르와 콘크리트의 수명평가나 배합비적부 관정에 의한 안정성평가 등에 이용가능함을 알았다.

References

1. W. A. Gutteridge, 1984, Proc. Brit. Ceram. Soc
2. H. M. Jennings, B. J. Dalgleish, and P. L. Pratt, 1981, J. Amer. Cem. Soc. 64, No. 10
3. F. V. Lawrence, 1974, Proc. 6th, International Congress On the Chemistry of cement, Moscow, vol 2. part 1.
4. G. D. de Hass, P. C. Kreijger, E. M. M. G. Niel, J. C. Slagter, H. N. Stein, 1975, Cement. Conc. Resea. vol. 5, pp.295-320, 1975
5. D. Ferenc, 1982, Cem. Con. Res., 12, pp.115-120.
6. J. Stepisnik, 1981, Ceram. Bull., 60, 4, pp.481-483.
7. C. R. Wilding, D. D. Double, Trans. British Ceram. Soc., 1984, pp.349-357
8. W. J. McCarter, A. B. Afshar, J. Master. Sci. Lett., 3, 1984, 1083
9. W. J. McCarter, A. B. Afshar, J. Master. Sci. Lett, 4, 1985, 851
10. M. Perez -Pena, D. M. Roy, Cem. Con. Res. Vol. 16, pp.951-965, 1986
11. 윤석수, 1987, Paper for degree of master, '초음파 및 유전성 측정에 의한 Ordinary Portland Cement의 수화에 관한 연구'
12. D. D. Double, A. Hellawell, S. J. Perry, Proc. R. Soc. Lond., A359, 453-451, 1978.
13. R. H. Bogue, W. Lerch, Industrial and Engineering Chemistry, 26, No. 8, 837-847, 1934.
14. H. H. Steinour, Proc. 3rd. Int. Symp. On the Chemistry of Cement, London, 1952, 261-268.
15. A. M. Neville, 'Properties ork, 2nd Ed., 1975.
16. J. D. Birchall, J. D. Howard, J. E. Bailey, Proc. R. Soc. Lond. A360, 445-453, 1978.
17. J. H. P. van Aardt, S. Visser, Cem. Con. Res., vol. 7, pp.643-648, 1977
18. R. Jones, Non-Destructive Testing, 9, 71, 1976
19. G. T. Kuster and M. N. Toksoz, Geophysics, 39, 1984, 587
20. T. Akashi, Proc. 3rd Int. Conf. on N. D. T., 1960
21. 이명호 용접구조물등의 열응력측정에 관한 연구' 한양대 대학원, 1980.
22. 이상와 역, "전자기학",
23. C. Rorand, 'Physics of Dielectrics for the Engineer', North-Ho land, 1979
24. G. Gudmundsson and H. Asgeirsson, Cem. Con. Res., Vol. 5, pp. 211-220, 1975.
25. N. J. Carino, H. S. Lew, ACI J., Vol 80, No. 3, 1983.
26. C. Tashiro, H. Takahashi, M. Kanaya, Cem. Con. Res., vol. 7, pp. 283-290, 1977.
27. D. A. Fanella, E. Naaman, ACI J., vol. 82, No. 4, 1985.
28. Von Hippel, 1966, "Dielectrics and Waves", New York, MIT, pp.96.