

Fall cone과 수화열을 이용한 흙-시멘트 혼합물의 상 변화 연구

Phase Changes of Soil-Cement Mixture Using Fall Cone and Heat of Hydration

김 재 형¹ Kim, Jae-Hyung

원 정 윤² Won, Jeong-Yun

김 성 필³ Kim, Sung-Pil

장 병 옥⁴ Chang, Pyoung-Wuck

Abstract

Some amount of cements can be added into the soil with high water content to improve the engineering properties. In such a case, it is difficult to predict and figure out the phase changes of the soil-cement mixture which is closely associated with workability of the soil-cement mixture. Changes in heat of hydration and hardness of the cement pastes are known to provide the useful information about the phase changes of the soil-cement mixtures. In this study, heat of hydration and cone penetration depth were measured from the specimens of cement paste and 3 soil-cement mixtures. From the experimental results, it was found that the phase changes of the soil-cement mixtures are the same as those of cement paste, and that shear strength of the mixtures abruptly increases when the heat of hydration is minimum. Initial setting time of the mixtures coincides with the state when fall cone penetration depth was 1.0 mm and it is defined as plastic limit of the mixtures. Initial setting time of the mixtures is retarded as soil/cement ratio is increased. Measurements of heat of hydration and fall cone apparatus could be the useful tools to predict the phase changes of the soil-cement mixtures.

요 지

고함수비 상태의 흙에 시멘트를 첨가하게 되면 흙의 공학적 성질을 개량할 수 있다. 이렇게 고함수비 흙에 시멘트를 혼합하는 경우 흙-시멘트 혼합물의 워커빌리티와 밀접한 관련이 있는 상 변화를 예측하고 구분하는 것은 매우 힘들다. 시간에 따른 시멘트 paste의 수화열 변화와 경도의 변화는 흙-시멘트 혼합물의 상 변화에 대한 유용한 정보를 제공해 준다. 본 연구에서는 시멘트 paste와 흙/시멘트 비를 달리 한 3 종류의 혼합물에 대해 수화열과 콘 관입량을 측정하여 흙-시멘트 혼합물의 상 변화를 관찰하였다. 실험결과, 흙-시멘트 혼합물의 상 변화는 시멘트 paste와 동일한 형태를 보이며 수화열이 최소가 되는 시점에서 혼합물의 전단강도가 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 흙-시멘트 혼합물의 초결시점은 fall cone 관입량이 1.0mm, 즉 혼합물이 소성상태에 도달하는 시점과 일치하며 흙/시멘트 비가 증가할수록 초결시간은 지연되었다. 흙-시멘트 혼합물에 대한 수화열 측정과 fall cone 관입량 측정은 흙-시멘트 혼합물의 상 변화를 예측하는 유용한 수단으로 사용할 수 있다.

Keywords : Fall cone, Hydration heat, Phase change, Soil-cement, Workability

1 대림산업, 건설사업본부, 사원 (Engineer, Daelim Industrial Co., Ltd.)

2 정희원, 서울대학교 생물자원공학부, 공학박사 (Member, Ph.D., School of Bio. Res. & Mat. Eng., Seoul Nat'l Univ., jy9007@empal.com)

3 정희원, 서울대학교 생물자원공학부, 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, School of Bio. Res. & Mat. Eng., Seoul Nat'l Univ.)

4 정희원, 서울대학교 생물자원공학부, 교수 (Member, Prof., School of Bio. Res. & Mat. Eng., Seoul Nat'l Univ.)

1. 서론

슬러리 상태의 고함수비 흙은 저수지 퇴적물, 도시 상하수도, 농어촌 소하천의 퇴적저지, 항만 준설 장소 등에 분포하며 고함수비로 인해 처리시 많은 공학적 문제점이 발생한다. 고함수비 흙의 처리를 위해 탈수 후 시멘트, 생석회 또는 시멘트-생석회를 흙과 섞은 후 적정 처리상태에서 다져 고화(solidification)하거나 해로운 오염물질을 화학적 변환과정을 통해 무해한 물질로 안정화(stabilization)시키는 공법으로 흙-시멘트(soil-cement) 고형화 방법이 광범위하게 사용되고 있다(ACI, 1990; Adaska et al., 1998; Glasser, 1997). 고함수비 상태의 흙에 시멘트를 첨가한 혼합물은 일반적인 흙-시멘트 혼합물과는 다른 거동을 보이며 액상 흙-시멘트(fluid soil-cement) 또는 CLSM(controlled low-strength material)로 별도 구분하기도 한다(ACI, 1999; Gabr & Bowders, 2000). 고함수비 흙에 시멘트를 첨가한 혼합물은 고함수비로 인해 워커빌리티(workability) 특성 중 유동성은 확보되지만 강도와 다짐성이 불량하여 흡수와 수화반응에 의한 강도 발현까지 일정한 방치시간(hardening time, time after mixing)을 필요로 한다(ACI, 1999). 이러한 방치기간 중 수화반응으로 인해 혼합물의 상 변화가 일어나며, 적정 시간이 지나면 일반적인 흙과 같은 반소성 또는 소성 상태가 되어 처리 가능한 상태로 변하게 된다.

시멘트 paste의 초결, 종결시간 예측은 콘크리트 뿐만 아니라 흙-시멘트 혼합물의 워커빌리티에 중요한 영향을 미친다. 시멘트 paste의 상 변화를 측정하는 방법으로는 보통 응결시간에 따른 관입량이나 흔적을 측정하는 길모아와 비카침이 있다. 그러나 이러한 상 변화 측정법은 수화반응 단계별로 화학적이며 미세구조의 정보를 제공할 수 없다(Struble & Lei, 1995). 지반공학 분야에서 흙의 상 변화(Atterberg limits)를 측정하는 가장 일반적인 시험은 Casagrande 방법이 있는데 근래에는 이 방법의 많은 단점들을 극복하고자 fall cone 시험이 종종 사용되고 있다(Leroueil & Le Bihan, 1996; Stone & Phan, 1995; Koumoto & Houlsby, 2000; Wood, 1985). Fall cone 시험은 여러 점토에 대해 그 적용성이 검증되어 왔지만(Stone & Phan, 1995; Koumoto & Houlsby, 2000) 흙-시멘트와 같이 시간에 따라 상 변화가 발생하는 재료에 대해 fall cone 시험을 적용한 사례는 찾기 힘들다. Fall cone 시험 역시 수화반응시 일어나는 여러 반응단계에 대한 정보를 제공해주지 못한다는 한계를 가

지고 있지만, 시험방법이 간편하고 측정과정의 개인오차를 줄일 수 있으며 재료의 강도와 직접 관련된 시험방법이기 때문에 혼합물의 상 변화 측정방법으로 유용하게 사용될 수 있다. 슬러리 상태의 고함수비 흙을 재활용 또는 처리하기 위해 시멘트를 첨가한 혼합물의 상 변화는 워커빌리티와 함께 강도와 다짐성을 확보하기 위한 시간을 예측함에 있어 중요하며 이를 위하여 혼합물의 상 변화를 간편한 방법으로 측정할 수 있는 기법의 개발은 매우 중요하다.

본 연구에서는 고함수비 흙 재료와 시멘트의 혼합물에 대해 수화단계별 화학적인 정보와 수화생성물 발생 시점에 대한 정보를 제공해주는 수화열 변화를 측정하고 동시에 fall cone 관입량을 측정하여 유동성 있는 흙-시멘트 혼합물의 시간에 따른 상 변화를 측정하고 흙-시멘트 혼합물의 상 변화 특징과 fall cone 시험의 적용성을 분석, 검토하고자 한다.

2. 흙-시멘트의 상 변화

흙-시멘트 혼합물은 크게 2개의 재료로 구분할 수 있는데, 슬럼프가 없어 롤러다짐이 가능한 일반적인 형태의 흙-시멘트와 혼합물의 유동적인 특성을 이용하는 액상 흙-시멘트(fluid soil-cement, CLSM)로 나눌 수 있다(ACI, 1990). CLSM(controlled low strength material)은 일반적인 흙-시멘트와는 다른 특성을 가진 재료로 구분되며(ACI, 1999), 구조물 채움재, 도로 기층 등에 주로 사용되고 자가수평능력(self-leveling), 자가다짐(self-compaction), 유동성(flowability), 인위적 강도조절, 시공 후 재굴착이 용이하다는 특성을 가지고 있다(Naik et al., 1998).

액상 흙-시멘트 혼합물에서 상 변화의 원인은 시멘트의 수화반응으로 인해 일어나는 응결반응이다. 흙-시멘트는 흙 입자가 시멘트 paste에 의해 결합되는데 콘크리트와는 달리 각 흙 입자는 시멘트 paste에 의해 완벽하게 덮이지 않는다(ACI, 1990). 그러나 흙-시멘트의 응결과정은 시멘트 paste의 응결에 큰 영향을 받기 때문에 시멘트 paste에 대한 이해도 중요하다. 흙-시멘트 혼합물의 상 변화에 영향을 주는 인자에는 시멘트의 특성, 흙의 특성, 시멘트 첨가제, 양생온도 등이 있다. 흙의 특성 중 유기물함량과 함수비는 응결시간을 지연시키는 효과를 준다(Valls & Vazquez, 2000). 응결은 경험적인 변수이기 때문에 혼합물의 유변학적(reological) 변수인 항복응력을 측정하거나 수화열을 측정하여 판단하게

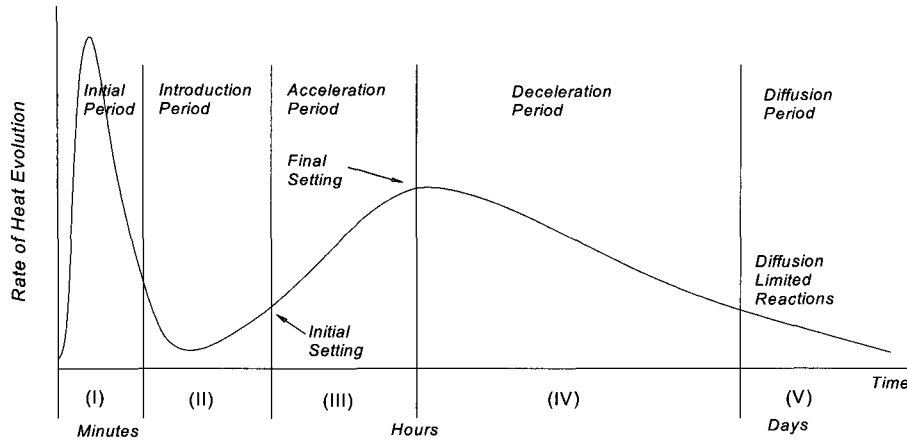


그림 1. 시멘트의 수화반응 단계(after Nelson, 1990)

된다. 수화열은 시멘트의 수화와 함께 방출되는데 이는 수화하는 동안 화학적인 결합의 구성과 깨짐으로 인해 발생하는 현상이다.

그림 1은 Nelson(1990)이 제시한 시멘트 paste의 시간에 따른 수화열 변화를 나타내고 있다. 그림에서 단계 I은 칼슘이온의 감소로 온도증가가 급격하게 증가하다가 감소하는 initial period(pre-induction)로 열이 빠르게 발산하면서 CH가 용해되고 C₃S가 가장 먼저 가수분해되는 단계이다. 단계 II는 유도기간(induction period)이라 하며 열방출 없이 수화열이 일정하게 유지되는 구간이다. 이 기간에서 시멘트 paste는 쉽게 이동되며, 큰 어려움 없이 움직여지는 소성상태에 있어 워커빌리티가 가장 양호한 기간이다. 단계 III은 acceleration period(post-induction)이며 C₃S결정과 calcium hydroxide 결정이 생성된다. 동시에, 무수입자(anhydrous particles)들이 추가적으로 비표면적을 증가시키면서 C-S-H 젤의 변형이 일어난다. 단계 IV는 감속기간(deceleration period)으로 이 단계에서부터 경화가 시작된다. 단계 V는 확산기간(diffusion period)으로 보통 36시간 후에 도달하며 수화생성물이 느리게 형성되는 시기이다. 액상 흙시멘트 혼합물(fluid soil-cement)은 방치시간 동안 상 변화가 일어나면서 처리 가능한 상태로 변하게 된다.

3. 재료 및 실험

3.1 재료

실험에 사용한 흙 시료는 경기도 수원시 소재 반정천 하류 저지에 퇴적된 무기질 세립토로 통일분류 결과 MH로 분류된다. 채취 당시 함수비의 범위는 100~160%이

었으며, 시멘트와의 배합시 현장 함수비 상태에 물을 첨가하여 함수비를 조절하였다. 흙 속에 포함된 중금속의 함량은 흙과 시멘트의 수화반응과정에 영향을 미칠 수 있으므로 중금속 함량을 확인하였다. 실험에 사용한 시료의 액·소성 한계는 Casagrande 방법으로 결정하였다. 실험에 사용한 흙 시료의 물성시험 결과와 중금속 측정 결과를 표 1과 그림 2에 나타내었다. 시멘트의 입도는 수화기작에 큰 영향을 주므로 lump를 제거한 보통

표 1. 흙 시료 물리적 특성

Cu (mg/kg)	1.51
Cd (mg/kg)	N.D.
Pb (mg/kg)	1.33
Hg (mg/kg)	0.06
Zn (mg/kg)	16.90
Gs	2.676
Liquid limit (%)	53.2
Plasticity index (%)	7.8
Organic content (%)	6.2
Clay fraction (%)	9.0
USCS	MH

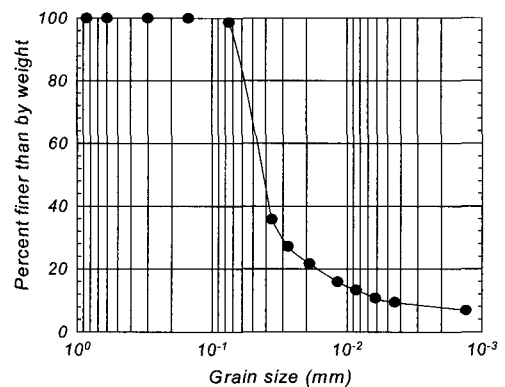


그림 2. 흙 시료 입도분포 곡선

포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

3.2 실험방법

흙-시멘트 혼합물의 상 변화와 흙의 상대적인 함량에 따른 수화기작의 변화를 밝히기 위하여 다음 표 2와 같은 건조중량 기준의 배합비를 선정하여 실험을 수행하였다. 표 2에 제시된 배합비에 따라 시료를 섞은 뒤 주걱으로 10분 이상 충분히 교반하였다. 교반 후 수분증발을 막기 위하여 흙-시멘트 혼합물을 밀봉한 뒤 항온실에 보관하며 실험을 수행하였다.

흙과 시멘트를 섞은 혼합물에 대해 방치시간에 따른 상 변화를 콘 관입량으로 확인하기 위하여 그림 3(a)와 같이 스웨덴식 fall cone 시험장치(콘 선단각도 60°, 낙하 콘 무게 60g)를 사용하였다. Fall cone 관입량은 각 측정시간마다 5회 관입량에 대한 평균값을 사용하였다.

Fall cone 관입량 측정용 시료를 제작할 때 흙-시멘트 혼합물의 온도변화를 측정하기 위한 시료를 동시에 준비하였다. 흙-시멘트 혼합물을 그림 3(b)와 같은 플라스틱 용기에 넣고, 방치기간 중 외부 온도의 영향을 방지하기 위하여 온도 20℃, 습도 80%를 유지하는 항온 chamber 내에 보관하면서 혼합물의 온도 변화를 chamber 외부에

서 연속적으로 측정하였다. 데이터 기록장치에 연결된 열 전대를 시료 속에 삽입시켜 혼합물의 온도 변화를 측정하였으며 혼합물 내부에서의 시간에 따른 온도변화를 데이터 기록장치와 컴퓨터를 통해 자동 기록하였다.

4. 결과 및 분석

시멘트 paste(CP)의 경우와 흙-시멘트 혼합물에 대해 경과시간에 따른 수화열 변화와 fall cone 관입량 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 시멘트 paste의 경우(CP) 측정된 수화열은 그림 1에 제시된 것과 같이 전형적인 수화열 변화 형태를 보이고 있다.

흙(함수비 160%)의 양을 달리하여 혼합한 혼합물의 경우에도 경과시간에 따른 수화열 변화는 시멘트 paste와 동일한 형태를 보이고 있다. 이로부터 고함수비 흙에 시멘트를 섞은 혼합물에서도 시멘트 paste의 수화반응과 동일한 응결과정이 진행됨을 알 수 있으며 배합비에 따라 수화 또는 응결 시간이 변화함을 알 수 있다. 또한 그림 4로부터 흙-시멘트 혼합물에서도 수화열을 측정함으로써 흙-시멘트 혼합물의 상 변화를 판단할 수 있음을 알 수 있다. 그림 4(b)의 경우 단계 I의 수화열은 측정과정의 오차에 의해 첨부값을 측정하지 못하였으나 그 이

표 2. 흙과 시멘트의 배합조건

Symbol	Soil / Cement	Cement (g)	Wet Soil (g)	Water Content	W / B = Water / (Soil+Cement)
CP	0.0	1,000	0	-	0.68
CS1	0.3	1,000	300	160%	0.68
CS2	0.6	1,000	600	160%	0.68
CS3	1.0	1,000	1000	160%	0.68

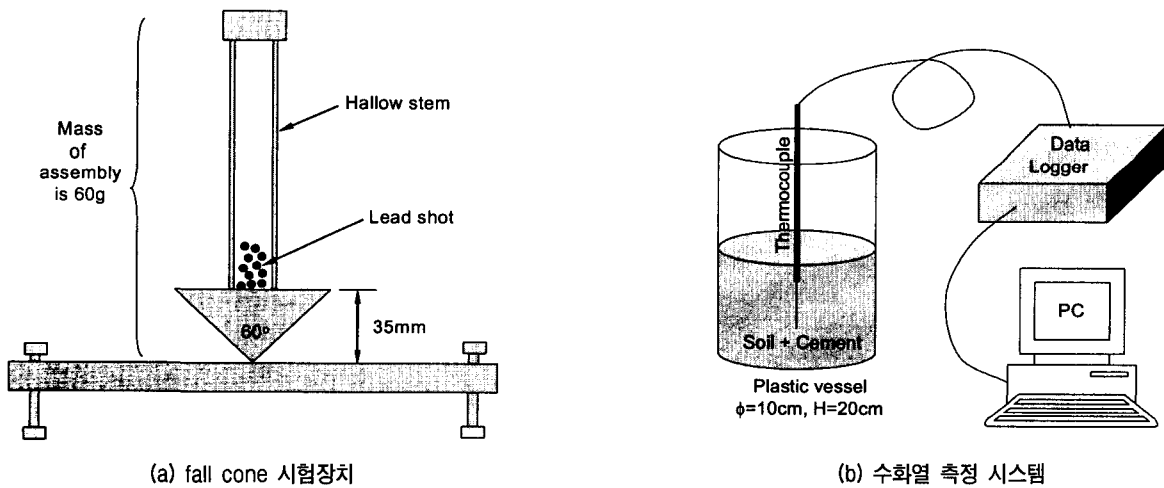


그림 3. 시험장치 모식도

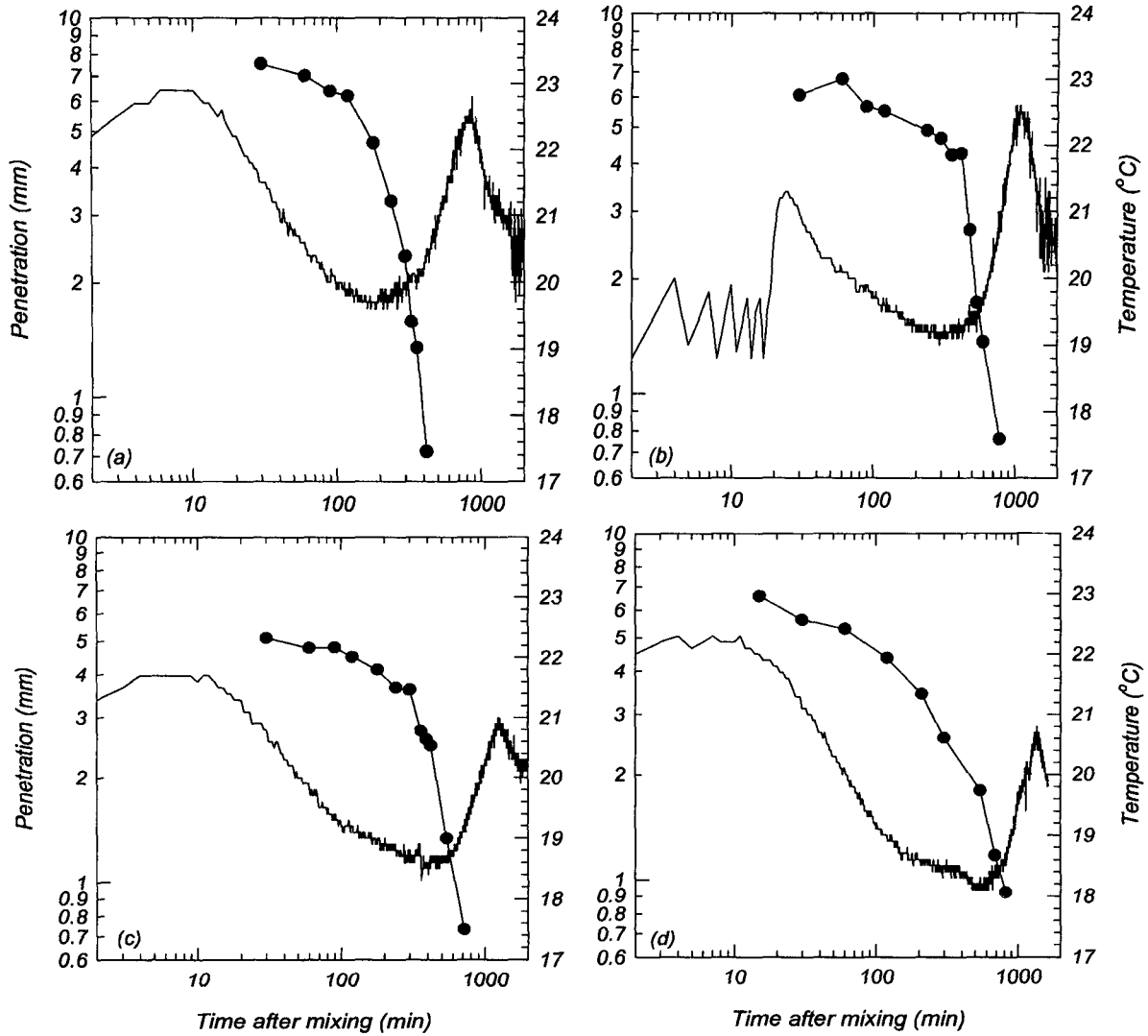


그림 4. 흙-시멘트의 수화열과 풀콘 관입량: (a) CP, (b) CS-1, (c) CS-2, (d) CS-3 혼합조건

후 단계의 온도변화 형태는 동일하게 나타나고 있다. Fall cone 관입량 측정결과 관입량은 시멘트 또는 혼합물의 상 변화 단계에 따라 급격한 감소를 보이고 있으며 혼합된 흙의 양이 증가할수록 변화 경향이 완만해지고 있다. 혼합물에서 흙의 양이 증가할수록 종결과정의 수화열은 CP는 22.6°C, CS1은 22.5°C, CS2는 20.8°C, CS3은 20.6°C로 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있다.

그림 5에서는 Leroueil & Le Bihan(1996)이 제시한 식 (1)을 이용하여 흙-시멘트 혼합물의 전단강도를 계산하고 수화열의 변화와 함께 나타내었다.

$$S_u = 9.8 \frac{k \cdot W}{p^2} \quad (1)$$

여기서, S_u : 비배수 전단강도(kPa)

k : 상수(선단각 60° cone은 0.27, 30° cone은 0.8)

W : 콘의 무게(본 연구에서는 60g)

p : 관입량(mm)

혼합물의 전단강도는 초결 이전에는 거의 변화가 없다가 초결 이후, 즉 상 변화 II단계 이후 급격하게 증가함을 알 수 있다. 그림 4와 그림 5로부터 혼합물의 전단강도가 급격하게 변화하기 시작하는 시점은 수화열이 가장 낮게 측정되는 시점과 일치하며, fall cone 관입량이 1.0mm보다 작게 측정되기 시작하는 시점은 혼합물의 초결 시점과 일치함을 알 수 있다. 즉, 흙-시멘트 혼합물의 상 변화가 액상에서 소성상태로 변화하는 경계는 흙-시멘트 혼합물의 초결이 시작되는 시점이며, Koumoto & Houlby (2000)이 제안한 바와 같이 fall cone 관입량 1.0mm를 소성한계로 정의한다면 흙-시멘트 혼합물의 초결은 혼합물의 소성한계 상태와 동일한 상태임을 알 수 있다.

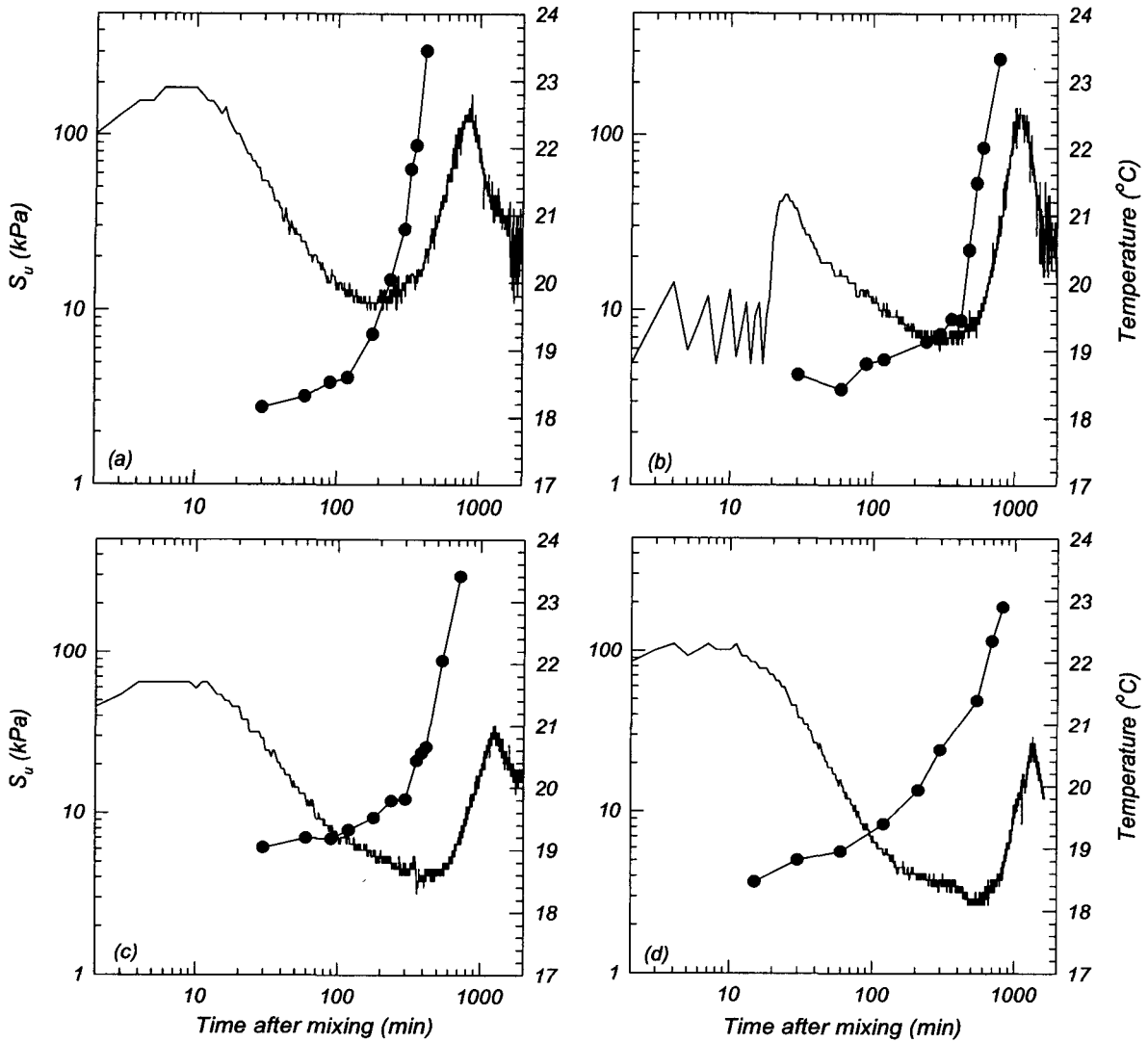


그림 5. 흙-시멘트의 수화열과 전단강도: (a) CP, (b) CS-1, (c) CS-2, (d) CS-3 혼합조건

표 3. 흙-시멘트 혼합물의 초기온도 및 초결시간

Symbol	Soil/Cement ratio	Initial temp. (°C)	Initial setting		Final setting	
			Time (min)	Temp. (°C)	Time (min)	Temp. (°C)
CP	0.0	21.3	200	19.7	850	22.6
CS1	0.3	19.5	400	19.2	1100	22.5
CS2	0.6	20.7	600	18.7	1200	20.8
CS3	1.0	21.8	700	18.4	1340	20.6

흙-시멘트 혼합물에 대한 수화열 측정 결과와 fall cone 관입량 측정 결과를 바탕으로 초결과 종결시간을 결정하고 그 결과를 표 3에 정리하였다. 표 3에서 혼합물중 흙의 상대적인 함량이 증가할수록 초결과 종결시의 온도는 점차 감소하며 초결과 종결에 도달하는 시간은 증가함을 알 수 있다.

흙-시멘트 혼합물의 배합조건에 따른 반응시간 지연 효과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)에서는 각 배합조

건에서 측정된 수화열을 초기 온도에 대해 증감한 온도로 계산하여 나타내었다. 흙/시멘트 비가 0.3인 경우 (CS1) 시멘트 paste(CP)에 비해 초결과 종결시의 수화열 변화가 크게 나타나고 있다. 반면, 흙/시멘트 비가 0.6 (CS2), 1.0(CS3)인 경우 시멘트 paste에 비해 초결과 종결시의 수화열이 낮게 나오며 종결시 수화열은 초기 온도보다도 낮은 값을 보이고 있다. 그림 6(b)에서는 흙/시멘트 비율에 따른 초결, 종결시간의 변화를 나타내었다.

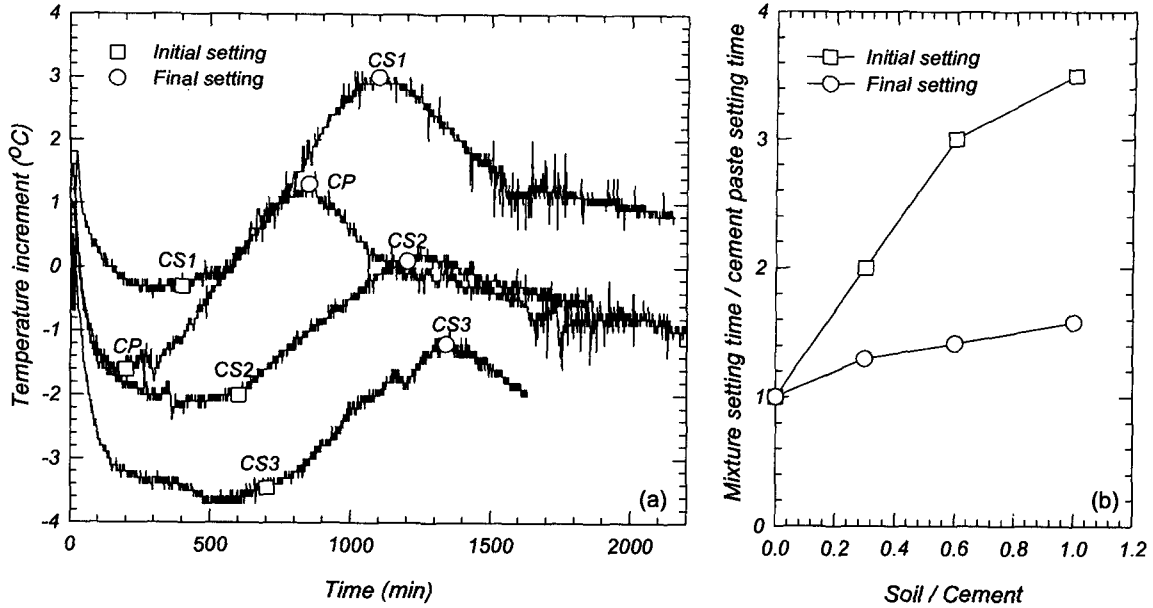


그림 6. 흙-시멘트 혼합물의 초결시간 지연: (a) 수화열변화, (b) 초결시간 지연

혼합물에서 흙의 함량이 증가할수록 초결에 도달하는 시간은 크게 증가하며 종결에 도달하는 시간은 약간 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 여기서, 혼합물의 초결에 도달하는 시간은 흙-시멘트 혼합물이 소성한계 상태 즉 워커빌리티가 확보되는 데 소요되는 시간을 의미하기 때문에 흙의 양이 증가할수록 혼합물의 워커빌리티를 얻는데 많은 시간이 소요된다는 것을 의미한다. 하지만 본 연구에서 수행한 실내시험 결과에서 흙-시멘트 혼합물의 초결에 도달하는 시간은 CS3의 경우 최대 700분(11.7시간) 이내로서 CS1과는 5시간, CP와는 약 9시간 정도의 차이를 보인다. 흙/시멘트 비율의 증가(흙 건조중량의 상대적인 증가)에 따른 초결시간 지연 효과는 현장 배합에서는 중요한 문제가 될 수 있으며 초결시간, 즉 흙-시멘트 혼합물이 액성에서 소성상태로 변화하는 시간을 단축시킬 수 있는 방안에 대한 연구도 필요하다.

5. 결론

고함수비 흙과 시멘트를 섞은 혼합물의 시간에 따른 상 변화를 고찰하고 혼합물의 워커빌리티를 효과적으로 예측하기 위하여 하천저지에서 채취한 흙과 포틀랜드 시멘트를 혼합하여 실험하였다. 혼합물에 대해 시간에 따른 수화열 변화를 측정하고 fall cone 장치를 이용하여 관입량을 측정하였다. 흙-시멘트의 상 변화에 대한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시멘트 paste와 흙-시멘트 혼합물에 대한 수화열 측

정결과는 시멘트 paste와 흙-시멘트 혼합물의 상 변화에 따른 수화열 변화를 잘 표현하고 있으며, 흙-시멘트 혼합물의 상 변화에 따른 수화열 변화는 시멘트 paste와 동일한 형태를 보이고 있다.

- (2) 흙-시멘트 혼합물에 대한 수화열과 fall cone 관입량 측정결과는 혼합물의 상 변화 경계에서 전단강도가 뚜렷하게 변화함을 보여주고 있다.
- (3) 흙-시멘트 혼합물에 대한 수화열 측정과 fall cone 시험은 고함수비 흙-시멘트 혼합물의 상변화를 측정하는 유용한 수단임을 알 수 있다.
- (4) 흙-시멘트 혼합물의 전단강도가 급격하게 증가하는 시점은 수화반응 II단계 유도기간 중 수화열이 가장 낮은 시점과 일치하며, 흙-시멘트 혼합물의 초결시간은 혼합물이 소성한계(fall cone 관입량=1.0mm)에 도달하는 시점과 일치한다.
- (5) 흙-시멘트 혼합물의 초결시간은 혼합물이 액성에서 소성상태로 변화하는 시점과 일치하고 있으며 이는 혼합물의 워커빌리티, 강도, 다짐 등의 공학적 문제와 밀접한 관련이 있는 상 변화 시점이다.
- (6) 흙/시멘트 비율이 변화함에 따라 수화열과 초결, 종결시간이 변화하며 흙/시멘트 비율이 높아질수록 혼합물의 초결시간은 지연된다. 시멘트에 대한 흙의 상대적인 함량이 증가함에 따라 초결시간이 증가하는 현상을 방지하고 초결시간을 단축시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 229 (1999), *Controlled Low Strength Materials (CLSM)*, ACI 229R-99, 15p.
2. ACI Committee 230 (1990), *State-of-the-Art Report on Soil Cement*, ACI 230.1R-90, 23p.
3. Adaska, W. S., Tresouthick, S. W., and West, P. B. (1998), Solidification and Stabilization of Waste Using Portland Cement, *Portland Cement Association*.
4. Gabr, M. A. and Bowders, J. J. (2000), "Controlled Low-Strength Material Using Fly Ash and AMD Sludge", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.76, pp.251-263.
5. Glasser, F. P. (1997), "Fundamental Aspects of Cement Solidification and Stabilization", *Journal of Hazardous Materials*, Vol.52, pp.151-170.
6. Koumoto, T. and Houlsby, G. T. (2000), "Theory and Practice of the Fall Cone Test", *Geotechnique*, Vol.51, No.8, pp.701-712.
7. Leroueil, S. and Le Bihan, J. -P. (1996), "Liquid Limits and Fall Cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.793-798.
8. Naik, T. R., Kraus, R. N., Sturzl, R. F., and Ramme, B. W. (1998), "Design and Testing Controlled Low-Strength Materials (CLSM) Using Clean Coal Ash", The Design and Application of Controlled Low-Strength Materials (Flowable Fill), ASTM STP 1331, *American Society of Testing and Materials*, pp.27-42.
9. Nelson, E. B. (1990), *Well Cementing*, Schlumberger Educational Services, Houston, Texas.
10. Stone, K. J. L. and Phan, K. D. (1995), "Cone Penetration Test Near the Plastic Limit", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.155-158.
11. Struble, L. J. and Lei, W. G. (1995), "Rheological Changes Associated with Setting of Cement Paste", *Advanced Cement Based Materials*, Vol.2, pp.224-230.
12. Valls, S. and Vazques, E. (2000), "Stabilization and Solidification of Sewage Sludges with Portland Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No.10, pp.1671-1678.
13. Wood, D. M. (1985), "Some Fall Cone Tests", *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.64-68.

(접수일자 2004. 5. 20, 심사완료일 2004. 11. 17)