

번역기사

마이크로웨이브를 이용한 콘크리트표면의 방사성 오염 물질 제거기법 I: 이론

Decontamination of Radionuclides from Concrete by Microwave Heating. I: Theory

Zdenek P. Bazant and Goangseup Zi

Journal of Engineering Mechanics, 129(7):777-784, 2003



지 광 습*



김 병 민**



전 기 우**

*정회원·고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수
**고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정

이 논문에서는 콘크리트 표면에 얇게 방사성물질로 오염된 부분을 고주파 마이크로웨이브를 이용하여 제거하는 기법을 해석하였다. 이 해석은 다음과 같은 두 부분으로 구성된다: (1)온도와 공극압의 변화를 계산하는 열 및 수분전파 해석과 (2) 응력과 변형, 그리고 파괴를 예측하는 파괴해석. 여기서, 콘크리트 내 온도와 공극압 분포는 콘크리트의 변형과는 별도로 계산 되었으며, 콘크리트의 변형계산에는 온도와 공극압 분포가 고려되었다. 이 기법을 적용할 때 발생하는 콘크리트 내의 온도와 공극압을 해석하기위해 Bazant와 Thonguthai의 모델을 개선하였다. 콘크리트 내부의 수분과 마이크로웨이브의 상호작용으로 인해 발생하는 열은 콘크리트 벽에 수직으로 투사되는 정상파를 이용해서 계산할 수 있다. 마이크로웨이브의 주기가 열이 전파되는 시간보다 훨씬 짧고, 마이크로웨이브의 파장 길이에 비교하여 콘크리트가 불균질하기 때문에 Ohm저항으로 콘크리트에 전달되는 열은 주기와 파장에 대한 평균치로 결정할 수 있다. 일반적으로 콘크리트 표면과 평행한 철근은 얇은 철근층으로 모델하였다. 개발된 모델의 구현은 본 논문과 짝을 이루는 Zi and Bazant(2003)에 수록되어 있다. (역자주: Zi and Bazant(2003)에는 본 모델의 상세한 고찰 및 적용예가 구체적으로 논의되어 있다)

서 론

다양한 토목시설물에 막대한 양의 콘크리트가 사용되고 있으며 핵시설물의 상당부분도 콘크리트로 구성되어 있다. 약 20년 이상 장기 운영의 결과로 스트론튬, 세슘, 코발트, 우라늄 등의 다양한 방사성 물질(Spalding 2000)이 주변 환경으로부터 콘크리트 표면층으로 점차 침착하게 된다. 오염층은 대체로 1~10mm의 두께[그림 1a](White *et al.* 1995) 정도이기 때문에 구조물 전체를 철거할 필요는 없다. 그렇지만 작업환경의 안정성을 보장하기 위해서 오염층은 제거되어야 하며 당연히 핵폐기물도 처리되어야 한다. 방사성 물질의 농도가 낮더라도 다년간의 방사선 노출은 작업자의 건강에 위험을 줄 수 있다. 현대 가용한 오염제거 기술로는 깔 등을 이용하는 기계적인 방법, 고압 제트류 이용기법, 열처리 기법 등이 있다. 이 중, 이 논문은 열처리 기법에 관한 것이며, 열처리 기법에는 다음과 같은 두 가지 유형, 즉, (1)표면을 직접 가열하는 열전도 처리와 (2)마이크로웨이브를 사용한 체적의 열처리이다.

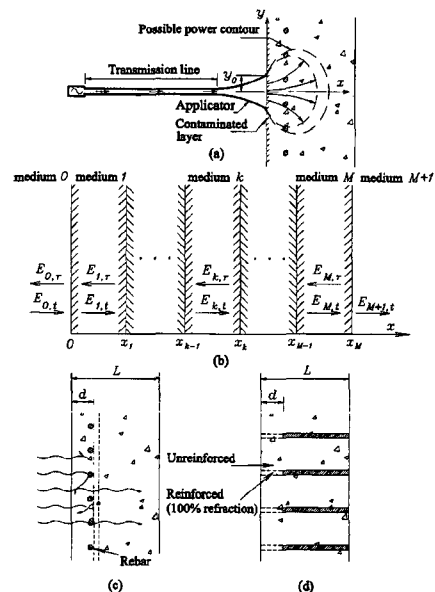


그림 1 (a) 마이크로웨이브를 이용한 오염제거 시스템 개념도, (b) 전자기적 특성이 서로 다른 층을 지나면서 전달되는 웨이브와 반사(r)되는 웨이브, (c) 철근 콘크리트에서 철근과 골재 때문에 반사 및 회절되는 전자기파, (d) 철근이 있는 부분과 없는 부분으로 분할된 콘크리트.

첫째 유형은 건물의 내화연구나 원자로 사고시 발생하는 결과를 예측하는 필요 때문에 오랜 기간 연구되어 왔다 (e.g., Bazant and Thongathai 1978, 1979; Ahmed and Hurst 1997; Gawin *et al.* 1999). 그래서 가열된 표면에서 부터 진행되는 열전도에 의한 온도와 공극압을 계산하기 위해 필요한 재료의 특성은 비교적 잘 알려져 있다 (Harmathy 1970; Harmathy and Allen 1973; Bazant and Kaplan 1996; Neville 1997; Vodak *et al.* 1997).

최근에는 오염된 층을 기존방법보다 훨씬 빠르게 제거 할 수 있게 하는 마이크로 웨이브이용기법이 개발되었다. 이 기법에서는 오염표면을 제거하기 위해서 단 10초정도가 소요된다. 강력한 전자기파 생성기에서 방출된 마이크로 웨이브가 콘크리트 내부에 발생시키는 열이 이 기법의 핵심역할을 한다.

마이크로웨이브는 이미 다양한 토목공학 문제들에 적용 되었다. 예를 들면 (1)재료의 비파괴적인 검사를 위한 마이크로웨이브 이용, (2)다공성 건설 재료를 건조시키는 마이크로웨이브 오븐(Wei *et al.* 1985), (3)콘크리트 초기강도 증진을 위한 수화 촉진 매체로서 마이크로 웨이브 이용, (4)저 진동수와 저 용량 마이크로웨이브를 이용한 콘크리트 시편의 균일 가열(Hertz 1981, 1983; 이 기법을 통해 압축강도에 미치는 온도영향을 온도구배 없이 연구가능), (5)적당한 고진동수의 마이크로웨이브는 사용한 파괴 및 절단기능(Watson 1968b; Wace *et al.* 1989; White *et al.* 1995)등을 들 수 있다.

마이크로웨이브를 이용한 콘크리트 오염물 제거에 대한 연구도 찾아 볼 수 있다. Li *et al.*은 선형 열 전달모델을 사용하여 발생하는 1차원 온도 분포를 분석하였다. Lagos *et al.* (1995)은 그 열 전달모델을 2차원으로 확장하였고, 균일한 콘크리트 벽에 수직으로 투사하는 정상파에 기초한 열 발생률을 계산하였다. 철근비에 따라 반사계수를 결정하였고 철근을 얇은 층으로 치환하였다. 오염제거 진행 중 콘크리트 두께에 대한 전자기 특성이 변하지 않는다고 가정하였다. 이들 모델에서는 수분전달과 열전달의 상호 간섭을 모델하지 않았기 때문에 공극압의 변화에 대해서 연구할 수 없었다. 그리고 콘크리트가 표면에 평행한 방향으로 완벽히 구속되었다고 가정하였기 때문에 주변의 변형이 전체적으로 고려되지 않은 점이 있다.

최근 학회(Bazant and Zi 2001)에서 요약된 이 연구의 목적은 다음과 같이 두 가지이다. 즉, (1)마이크로 웨이브 열처리와 콘크리트 파쇄모델을 수학적 분석을 기초로 제시하고 (2)이들 열 변형과 표면층의 구속 뿐만 아니라 수분전달, 공극압, 구조물의 전체적인 변형까지 종합적이고

조직적인 오염제거과정에 적용하는 것이다. 이 논문에서는 이론부분을 기술하고, 후속논문(Zi and Bazant 2003)에 구체적 적용기법과 수치적 적용 예를 제시하였다. 본 논문에서 사용한 구성 방정식, 파괴, 열, 발산 모델들은 일부 알려진 것들이지만 상호관련도가 약한 모델들인데다가 이번 연구에서 수정 및 개발되었기 때문에 부록 I, II에 간단히 요약하였다.

전자기파에 의해 발생하는 열

진동수가 300MHz~30GHz정도의 전자기파를 마이크로웨이브라고 한다. 임의의 평면 S를 통과하는 전자기파가 전달하는 에너지는 다음과 같은 식으로 표현 된다 (e.g., Cheng 1983).

$$\begin{aligned}
 -\int_S \mathcal{P} \cdot d\mathbf{S} &= -\int_S \mathbf{E} \times \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \\
 &= \frac{\partial}{\partial t} \int_V (w_e + w_m) dV + \int_V \rho_\sigma dV.
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, \mathcal{P} =전자기파의 세기 밀도를 나타내는 포인팅 벡터; \mathbf{E} =전기장 강도 벡터; \mathbf{H} =자기장 강도 벡터; $d\mathbf{S}=\mathbf{n}dS$, 여기서, $d\mathbf{S}$ =면요소 이고, \mathbf{n} =단위법선벡터; V =체적; $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ = 전기 유전율; $\mu = \mu' - i\mu''$ = 자기 유전율; $\sigma = \omega\epsilon''$ = 전기 전도율; $\omega = 2\pi f$ = 각속도; f =진동수; $w_e = E^2/2$ =전기에너지 밀도; $w_m = \mu H^2/2$ =자기에너지 밀도; $P_\sigma = \sigma E^2$ =옴 저항을 인한 감쇄 에너지; t =시간이다.

열전도율은 전기장세기의 함수이기 때문에 열 발생률을 얻기 위해서 전기장 강도 벡터 E 를 풀어야 한다. 마이크로 웨이브가 생성에서 방출되는 순간은 단순하고 간단하지만, 웨이브가 진행해 감에 따라 점점 복잡해진다(그림 1a). 이 전자기장의 변화는 복잡한 맥스웰 방정식을 이용하여 풀어 낼 수 있다. 하지만 본 논문에서 정상상태 전자기파의 해를 이용하여 오염제거 대상 콘크리트 내부의 전자기장을 근사적으로 계산하였다. 이를 통해 얻어진 열 발생률은 에너지의 분산을 고려하여 적절히 수정도 가능하다.

정상 전자기파의 전기장 강도

전자기파의 전파는 전기장 강도와 자기장 강도가 쌍으로 맥스웰 방정식에 의해 지배 된다. 일반 콘크리트의 강자성 물질 함유량은 무시할 만한 수준이므로 콘크리트 내부에서 발생할 수 있는 전자기파는 무시하였다. 이 때 맥스웰 방정식은 다음과 같은 두 식으로 분리된다.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2b)$$

여기서, 전자기파는 병렬(이러한 전자기파를 횡 전자기 파라고 일반적으로 칭한다.)이고 콘크리트 표면에 수직으로 작용한다고 간주한다. 이 경우 전자기장은 시간 t 와 표면에 수직인 x 축만의 함수이다(그림 1b). 위 식(2a), 식 2(b)의 해는 다음과 같다.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t - \gamma x} \quad (3a)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{i\omega t - \gamma x} \quad (3b)$$

전자기적 성질이 다른 구 매체의 경계에서 전자기파의 일부는 반사되고 일부는 굴절되어 전송된다. 굴절파의 크기는 Fresnel의 식으로부터 주어지고 반사각과 굴절각은 Snell의 법칙으로부터 구할 수 있다(e.g., von Hippel 1954). 만약 파가 수직방향으로 두 절연체의 경계에서 일어난다면 그 파는 정상상태 웨이브를 형성한다. 단지 수직방향의 진행만 고려하기 때문에, 경계에서 변화하는 전자기파는 손쉽게 계산할 수 있다(e.g., Cheng 1983; Wait 1985).

그림 1b처럼 콘크리트의 벽을 그 배근여부와 상관없이 표면과 수직하게 나눈다고 가정한다. 매체 0은 공기를 나타내고 $K=1 \sim M$ 은 각기 수분함량이 다른 콘크리트 층을 나타낸다. 매체 $M+1$ 은 철근이 없는 경우는 공기를 나타내고, 철근이 그림 1d와 같이 있는 경우는 철근을 나타낸다. 전기회로에서 전압과 전류를 계산하는데, 사용되는 방법인 전달선 이론(transmission line theory)을 이용하여 정상상태 전자기파의 해를 구할 수가 있으며, 이는 다음과 같다.

$$E(x) = C_k (e^{-\gamma_k x} + R_k e^{\gamma_k x})$$

$$H(k) = (C_k / \eta_k) (e^{-\gamma_k x} - R_k e^{\gamma_k x}) \quad \text{for } 0 < x < l \quad (4)$$

여기서 C_k =전도계수; R_k =반사계수; η_k =매체 k 의 고유 임피던스이다. 여기서 $\eta_k = \gamma_k / i\omega \epsilon_k = \sqrt{\mu_k / \epsilon_k}$ 이다. 공기의 전도계수는 초기 전기장 강도 E_0 로 주어지고, 공기와 첫 번째 콘크리트층 사이의 반사계수는 R_0 로 표현된다.

$$R_0 = (Z_1 - \eta_0) / (Z_1 + \eta_0) \quad (5)$$

여기서 Z_1 =매체1의 임피던스 전도이다. 매체 k 의 임피던스는 다음과 같은 전달선 이론에서 얻어진다.

$$Z_k = \eta_k (Z_{k+1} + \eta_k \tanh \gamma_k l_k) / (\eta_k + Z_{k+1} \tanh \gamma_k l_k) \quad (6)$$

$$Z_{M+1} = \eta_k (\eta_{M+1} + \eta_M \tanh \gamma_M l_M) / (\eta_M + \eta_{M+1} \tanh \gamma_M l_M) \quad (7)$$

여기서, $l_k = x_k - x_{k-1}$ =각 층의 두께이다. 철근이 없는 때에는 $\eta_{M+1} = \eta_0$ 이고, 철근이 있는 때에는 $\eta_{M+1} = 0$ 이다. 즉, 철근에 의해서 거의 100%전자기파가 반사됨을 의미한다. 각 접촉면의 연속 조건으로부터 R_k 와 C_k 는 다음과 같이 구해진다.

$$R_k = e^{-2\gamma_k x_{k-1}} [E_{k-1}(x_{k-1}) - H_{k-1}(x_{k-1}) \eta_k] / [E_{k-1}(x_{k-1}) + H_{k-1}(x_{k-1}) \eta_k] \quad (8)$$

$$C_k = [E_{k-1}(x_{k-1})] / [e^{-\gamma_k x_{k-1}} + R_k e^{\gamma_k x_{k-1}}] \quad (9)$$

전술한 바와 같이, 층 k 의 전기장 강도 E_k (그림 1b, 식 (4))의 해는 복소함수이다. E_k 의 실수부는 그 해의 실근에 해당한다. 횡 전자기파에 의한 열 발생 용적률은 식 (1)로부터 얻을 수 있다. 주기 $T=1/f$ 가 전자기파의 한 파장으로 표면을 가열하는 시간보다 훨씬 짧기 때문에, 주기 T 동안의 평균 열 발생률은 중요한 의미가 있다.

$$I_{(h)}^{ave} = \frac{1}{T} \int_0^{T=2\pi/\omega} \sigma [\text{Re}(E)]^2 dt \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} \sigma \|C\|^2 \{e^{-2\alpha x} + \|R\|^2 e^{2\alpha x} + [R' \cos 2\beta x - R'' \sin 2\beta x]\} \quad (11)$$

여기서 $C=C' + iC''$ =전도계수; $R=R' + iR''$ =반사계수; β =위상계수; α =감쇠계수 ($1/\alpha$ 는 장의 강도가 $1/e=0.368$ 로 감소되는 깊이를 나타낸다.); 그리고 $\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\epsilon\omega)} = \alpha + i\beta$ = 전달계수 이다.

전형적인 철근 콘크리트 벽은 그림 1c와 같이 도시된다. 골재와 철근에 의해 전자기파는 콘크리트 내부에서 반사되거나 산란된다. 결국 콘크리트 벽의 불균질성 때문에, 우리는 파동의 주기 $2\pi/\beta$ 이상으로 식 (11)의 공간적 평균을 취해야 한다. 결과적으로 평균 열 발생률은 다음과 같이 주어진다. 여기서 비록 철근의 배열이 3차원적이지만, 이 모델에서 거의 1차원처럼 다루어지기 때문에, 철근의 위치는 표면으로부터의 거리 d 에 의해서 표현된다(그림 1).

$$I_{(h)} = \frac{1}{2} \sigma \|C\|^2 (e^{-2\alpha x} + \|R\|^2 e^{2\alpha x}) \quad (12)$$

철근 때문에 반사되는 효과를 표현한 두 번째 항을 무시하면, 식 (12)는 Lambert's law로 알려진 식으로 된다.

$$I_{\text{Lambert}} = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (13)$$

여기서, I_0 = 표면에서의 열 발생률이다. 저온의 식품공학(Metaxas and Meredith 1983; Taoukis *et al.* 1987; Meredith 1998)에서 널리 사용되는 Lambert's law의 장점은 단순하고 쉽게 이해할 수 있다는 것이다.

철근이 마이크로웨이브 침투에 미치는 효과

침차 U 와 R 을 이용하여 철근콘크리트를 철근을 포함하지 않는 부분 U 와 철근을 포함하는 부분 R 로 근사적으로 나타낼 수 있다(그림 1d). 철근콘크리트벽체 내부의 평균 열 발생률은 각 부분에서 발생하는 열 발생률의 평균으로 얻을 수 있다.

$$I_{(h)} = \begin{cases} (1-p)I_U + pI_R & \text{for } x < d \\ (1-p)I_U & \text{for } x \geq d \end{cases} \quad (14)$$

여기서, p = 콘크리트 표면에 수평한 면 대비 철근이 차지하는 면적비이고; I_U, I_R = 각각, U 부분과 R 부분의 열 발생률이다. I_U 와 I_R 는 모두 식 (13)에서 얻어지는데, 각 경계조건이 다르기 때문에, 마지막 전기장강도 E_U 는 벽면과 접하는 공기로 전도된다고 가정하고, E_R 은 깊이에 위치한 철근에서 완전히 반사된다고 가정한다.

문제를 간단히 하기 위해 철근으로 인한 전자기장의 3차원적 분산과 회절에 대한 고려는 무시한다. 콘크리트 표면에 비스듬히 작용하는 전자기장은 급격히 감소하기 때문에 반사에 비해서 덜 중요하다(Zi and Bazant 2003).

콘크리트의 전자기적 특성

일반적으로 전자기적 재료의 특성은 수분함량과 온도변화에 민감하다(Metaxas and Meredith). 콘크리트의 상대적인 유전율 $k' = \epsilon' / \epsilon_0$ 와 상대적인 유전손실 $k'' = \epsilon'' / \epsilon_0$ 는 함수비 v_w 의 함수로써 2차 다항식으로 증가한다 (Hasted and Shah 1964; Shah *et al.* 1965) (ϵ_0 = 공기의 유전율 = 8.86×10^{-12} F/m). 유전 상수 k' 와 k'' 는 v_w 가 20%를 초과하면 급격히 달라진다. 만약 v_w 가 20%미만이면, 그 변화는 대략 일차함수의 형태를 따른다(그림 2). 일반적으로 오염제거가 필요한 콘크리트는 약 20년 가까이 공용된 실내 콘크리트로서 함수비가 대략 7%정도의 오래된 콘크리트이다. 수분함량은 구성방정식, 식 (17)과 같이 공극압과 온도의 함

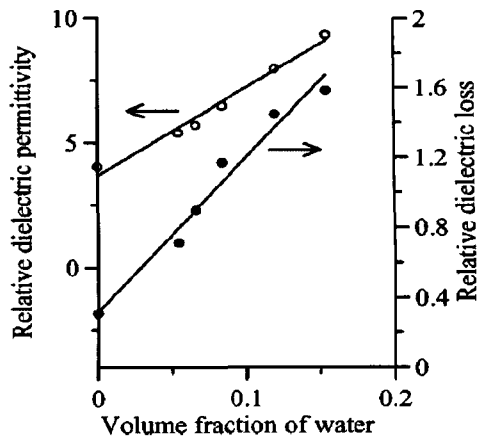


그림 2 수분에 따른 콘크리트의 상대(공기와 비교할 때) 전자기적 특성 (Hasted and Shah 1964).

수이기 때문에 콘크리트의 전자기적 특성은 수분함량 뿐만 아니라, 간접적으로 온도에도 의존하게 된다. 콘크리트의 전자기적 특성에 대한 온도의 직접 효과는 아직까지 이용 가능한 자료가 없으므로 본 연구에는 포함되지 않았다.

마이크로플랜 구성방정식 M4

마이크로웨이브로 대상 콘크리트를 제거가능한지 결정하고 그 제거 깊이를 예측하기 위해 콘크리트의 응력과 변형률에 대한 적절한 구성 방정식이 필요하다. Li *at al.*(1993)은 횡방향으로 구속된 일차원 탄성체를 고려하였고, 그 응력을 간단히 $\sigma = -E\alpha\Delta T$ 로 계산하였다. 그러나 이 간단한 모델은 제거 시 발생하는 변형의 비 선형성과 마이크로웨이브로 가열되어 온도가 증가한 주변의 상호작용을 무시한 단점이 있다.

이러한 이유로 마이크로플랜 모델 M4(Zi and Bazant 2003, 부록III에 간단히 설명됨)가 채택되었다(Bazant *et al.* 2000b; Caner and Bazant 2000). 마이크로플랜 모델은 비선형 삼차원거동의 넓은 범위에 적용 되어 가장 정확한 데이터를 산출하는 가장 강력한 모델로서 콘크리트의 손상과 인장 균열을 효과적으로 모델하고 있다(Bazant *et al.* 2000b; Caner and Bazant 2000). 손상이나 균열의 발전은 M4를 사용한 균열밴드(crack band model)모델로 기술하였다.

마이크로플랜 모델에서는 구성법칙이 텐서보다는 벡터의 형태로 표현되기 때문에 소성에 기초한 고전적 텐서 모델과는 크게 구별된다. 여기서 벡터는 재료 내 가능한 모든 방향의 평면에서의 응력과 변형률 벡터이다. 마이크로플랜 모델에서는 가능한 모든 방향을 고려하기 때문에, 자연히 텐서 불변조건을 만족시킨다. 극소평면에서 변형률

벡터는 연속체 변형을 텐서를 해당 면으로 투영한 것이며, 응력텐서는 가상일의 원리에 의해서 해당 면의 응력벡터와 연결된다. 마이크로 플랜 모델의 자세한 설명과 개발정은 Bazant *et al.* (2000b)을 보면 되고, 관련 자료는 Brocca and Bazant (2000)에서 찾을 수 있다.

온도증가에 따른 콘크리트의 열화

콘크리트 거동 모델시 삼축거동 및 변형열화 외에도, 온도변화 따른 열화, 순간 크리프 등을 고려해야 한다. 압축강도 f_c 와 탄성계수 E 는 온도증가에 따라 감소한다. 이 감소량은 여러 가지 온도조건에 일정 시간동안(대표적으로 12h, (Felicetti and Gamvarova 1998)) 노출된 콘크리트의 잔류 역학적 특성들을 평가함으로써 결정된다. 이번 연구의 Part II (Zi and Bazant 2003)에서, 제거과정에 필요한 10초 내에 표면온도는 400°C 이하인 것으로 계산되었다. 만약 이 온도가 여러 시간동안 지속된다면 콘크리트의 압축강도는 본래 값의 약 85%정도로 떨어지게 되는데 (Bazant and Chern 1987), 이 온도가 10초 동안만 지속된다면 어떻게 되겠는지가 의문시된다.

온도 상승에 의한 열화는 시멘트 수화물인 C-S-H의 반수화(dehydration)작용에 의해서 일어난다. 고온에서 반수화작용의 화학 반응이 즉시 발생하지 못하며, 반응시간이 필요하기 때문에 제거과정에 필요한 10초 내에 생기는 열화는 무시하였다.

400°C 근처에서의 온도증가로 인해 콘크리트의 탄성계수가 낮아지고 크리프가 증가한다. 이것은 마이크로 플랜 모델에 Maxwell 또는 Kelvin회로에 근거한 크리프 모델을 사용하여 모델할 수 있다(Zi and Bazant 2001). 유한요소 해석에 따르면, 파쇄되기 직전 콘크리트 표면 주변에 발생하는 최대 변형속도는 약 $\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-4} s^{-1}$ 이다. 약 $5 \times 10^{-6} s^{-1}$ 정도의 정지 상태에 준하는 실험의 전형적인 하중 변위선도와 비교하면, 콘크리트가 동적으로 재하되는 경우 외관상탄성계수를 정적 재하 대비의 120%정도 (Bazant *et al.* 2000a)로 증가시키는 것을 알 수 있다. 하지만 이것은 단지 최대 변형속도가 작용하는 지점에서만 발생할 뿐, 다른 부분에서는 무시할 정도이다. 그러므로 본 연구의 유한요소 계산에서는 이를 무시하였다. 이 재하의 효과는 열로 인한 열화 효과와 서로 상쇄될 것으로 보인다. 열로 인한 콘크리트의 열화는 10초 정도의 짧은 시간에서는 무시할 수 있는 매우 느린 과정(Ulm *et al.* 1999)이다.

건조수축 및 열 팽창

공극 내부 습도가 온도에 민감하기 때문에 시멘트 모르타르의 열팽창계수 α_T 는 온도변화에 따라 주목할 만하게 변한다. 하지만 콘크리트는 온도에 따른 α_T 의 변화는 미미하며, 이것은 화학적으로 안정적인 콘크리트 골재에 의한 효과 때문이다(Harmathy 1970; Bazant and Kaplan 1996; Neville 1997). 결국 제거과정의 온도범위에서 콘크리트 열팽창계수 α_T 는 고정된 값($\approx \alpha_T = 10.0 \times 10^{-6} K^{-1}$)으로 단순화할 수 있다. 그래서 열팽창 변형률 $\dot{\epsilon}_T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_T = \alpha_T \dot{T}$$

건조 수축을 고려할 때는 다음 두 가지를 구별해야 한다. (1)구성재료의 특성이라기보다는 단면 전체의 특성이라 할 수 있는 콘크리트 부재 단면의 평균수축은 복잡한 수학식으로 표현될 수밖에 없다(Hansen and Almudaiheem 1987; ACI 1994; Bazant and Baweja 1995; Bazant and Baweja 2000). 그리고 (2)콘크리트와 같은 연속체 한 점에서의 수축은 재료의 특징이다. 하지만 후자는 직접 측정이 불가능하다(직접 측정은 습도가 3%/h의 선형적인 감소로 설정된 상대습도에서 벽의 습도를 동일하게 유지시키는데 필요한 최대두께인 0.75mm 두께의 시멘트 내에서만 이루어질 수 있다(Bazant and Najjar 1972).

그러므로 재료자체의 건조 수축은 간접적으로 추론되어야 한다- 변형을 측정하기 위한 실험 표면의 유한요소 해를 수정하여 적정 적합도가 얻어질 때까지 건조 수축모델을 수정하여 연구할 수 있다(Bazant and Chern 1987; Bazant and Xi 1994; Bazant *et al.* 1997). 그 결과 재료의 건조 수축은 다음과 같이 가난히 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_h = \kappa_s \dot{h}$$

κ_s = 수축 계수 (B3 모델에 따라서 $\kappa_s = 0.5 \times 10^{-3}$)으로 얻어진다(Bazant and Baweja 2000)

결론

1. 이 논문에서는 고속 마이크로웨이브 열처리를 이용하여, 얇은 표면층에 존재하는 방사성 오염 물질을 콘크리트 벽에서 제거하는 기법을 수학적으로 접근하여 분석하였다. 이 모델은 (1)마이크로웨이브에 의한 전자기력 침투로 인해 콘크리트 내부에 발생하는 열을 계산하는 모듈, (2)이로 인한 열과 수분 전파를

계산하기 위한 모듈, (3)콘크리트의 삼차원 비선형 거동과 파괴를 위한 구성 모델과 (4)수치적 해법으로 구성되어 있다.

- 열과 수분전파는 Bazant와 Thonguthai에 의해 제안된 모델에 기초를 두고 있는 데 본 연구에서는 100°C가 넘는 상황에서 투수성이 증가하는 정도를 재분석하여 개선하였다.
- 마이크로웨이브로 인해 철근 콘크리트 내부에 발생하는 열 발생률에 대한 간단한 해석적 표현이 개발되었다. 이 열 전달률은 전자기파의 에너지 감쇄율을 파장과 주기에 대해 평균하여 계산 되었다. 철근 콘크리트 벽체는 마이크로웨이브가 100% 반사되는 철근 콘크리트 부분과 무근 콘크리트 부분으로 구별하여 전체 열 전달률을 계산하였다.
- 최근 개발된 마이크로 플랜 모델 M4를 사용하여 응력과 파괴 분석을 수행하였다. 습도 및 수분함량의 변화에 따른 수축과 팽창은 고려되었지만 크리프는 재하시간이 매우 짧기 때문에 무시되었다.

감사의 글

본 연구는 미국 DOE의 연구지원 DE-FG07-98ER45736의 지원을 받아 노스웨스턴 대학에서 수행하였습니다. 또한 ORNL의 Spalding박사의 조언에 감사드립니다. 번역은 고려대학교 교내 특별 연구비의 지원을 받았습니다.

Appendix: 콘크리트내의 열과 수분 전파

지배 방정식

질량 보존 방정식과 열 보존 방정식은 다음과 같은 두 식으로 표현 된다.

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = I_{(w)} \quad (15a)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho CT) + \nabla \cdot \mathbf{q} = I_{(h)} \quad (15b)$$

여기서, ∇ = 구배연산자; T = 온도; ρ = 콘크리트 밀도; C = 콘크리트 열용량; w = 함수량; C_w = 물의 열용량; \mathbf{J} = 수분 플럭스; \mathbf{q} = 열 플럭스; $I_{(h)}$ = 열 발생률; $I_{(w)}$ = 수분

발생률; 시멘트 내부에 화학적으로 잡혀있는 물이 해방되면서 생성됨(Bazant and Thonguthai 1978; Bazant and Kaplan 1996); 첨자 (w), (h)는 각각 수분과 열을 나타낸다.

오븐 건조된 콘크리트의 열용량을 C 로 사용할 수 있다. 이는 시멘트 풀 내 수화물의 분해시 생긴 열로 인한 잠재 열이 상대적으로 작고, 골재가 콘크리트 부피의 대부분을 차지함으로써 무시할 수 있기 때문이다(Harmathy and Allen 1973). 콘크리트의 열용량은 수분량에 의존하지만 콘크리트 내 물의 질량 비율이 낮기 때문에(포화되었을 때 콘크리트의 전체질량의 6%보다 작다.) 무시한다 (Bazant and Thonguthai 1978).

수분 플럭스 \mathbf{J} 와 열 플럭스 \mathbf{q} 는 각각 다음과 같이 함수량 w 와 온도 T 의 구배의 향으로 표현된다.

$$\mathbf{J} = -\frac{a}{g} \nabla P \quad (16a)$$

그리고

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (16b)$$

여기서 a = 투수계수; g = 중력가속도; P = 공극압; k = 열전도율이다.

열은 콘크리트 내부의 수분이 이동할 때 대류에 의해서도 전달되지만 공극수의 확산계수는 열의 확산계수에 비교하여 약 1/1000에 불과하므로 무시하였다.

공극수의 상대 방정식

물의 임계점(374.15°C)보다 높은 온도를 제외하고, 콘크리트 공극내의 증기와 액체상태의 물을 구별해야 한다. 이 두 가지 물의 상태는 열역학적인 평형 조건을 따른다고 가정할 수 있다. Bazant와 Thonguthai의 모델은 이 가정에 근거하여 실험 데이터를 적절히 계산하였다. 공극 체계의 복잡성, 특히 수화된 시멘트 풀의 작은 미소공극에 흡수된 물의 역할, 콘크리트의 수축 거동 등 때문에 공극안의 물 증기의 상대습도와 물의 함수율 w 의 곡선, $h = P/P_s(T)$ [여기서, $P_s(T)$ = 온도 T 일 때 포화 공극압]은 반 경험적으로 기술될 수 밖에 없다. 수분과 온도, 공극압은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{w}{c} = \left(\frac{w_1}{c} h \right)^{1/m(T)} \quad \text{for } h \leq 0.96 \quad (17a)$$

$$w = (1 + 3\varepsilon_V)n/v \quad \text{for } h \geq 1.04 \quad (17b)$$

여기서 T : 온도(°C), $T_0 = 25^\circ\text{C}$; c = 콘크리트 단위 부피

당 무수의 시멘트의 질량; $w_1 =$ 온도 T_0 일 때 포화 함수량; $m(T) = 1.04 - [T' / (22.34 + T')]$; $T' = (T + 10) / (T_0 + 10)^2$, $d\epsilon_v = d\sigma_v / (3K) + \alpha_T dT$, $\sigma_v = nP$, $\epsilon_v =$ 선형 한계 변형률; $K =$ 콘크리트의 체적계수; $n =$ 물이 접근가능한 공극율; $v = v(T, P) =$ 물의 체적; $\alpha_T =$ 콘크리트의 선형 열팽창계수이다.

무게의 손실을 이용해 계산할 수 있는 공극률 (물 분자가 접근 가능한 공극)은 $n = [n_0 + \rho_0^{-1} w(T) \psi(h)]$ ($h \geq 1.04$ 일 때)로 표현된다. $n_0 = 25^\circ\text{C}$ 에서의 공극율, $w_d(T) =$ 온도변화에 따른 무게 변화에서 얻은 무게손실 (Harmathy and Allen 1973), $\rho_0 =$ 물의 무게, $\psi(h) = 1 + 0.12(h - 1.04)$ 이다.

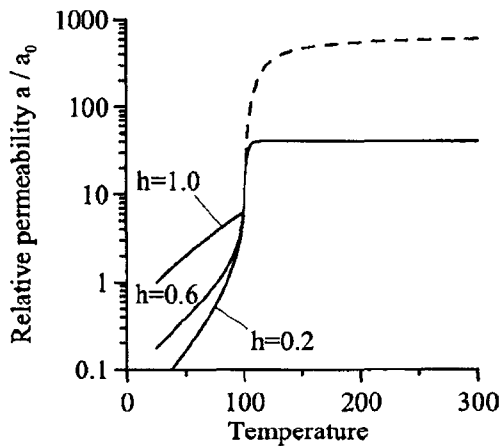


그림 3 상대습도와 온도에 따른 투수계수의 변화.

투수계수와 열전도계수

콘크리트의 투수성은 매우 복잡하다. 양질의 콘크리트는 그 내부의 모세관이 연속적이지 못하기 때문에 물 분자는 경화된 시멘트 내부의 미소공극을 통해 지나가야 한다. 그러한 공극의 넓이가 증기의 평균 자유 경로 보다 작기 때문에 물 분자는 증기 상태로 공극 사이를 지나가지 못하고, 공극 벽으로 흡수되어 흡수층을 따라 이동하게 된다. 그래서 미소공극 때문에 보통온도에서 콘크리트의 투수성은 매우 낮게 된다. 그러나 이것은 고온에서는 적용되지 않으며, 온도가 100°C 이상으로 증가 할 때 투수성은 급격히 증가한다(Bazant and Thongguthai 1978). 이는 작은 공극 구조가 열로 인해 변하는 것으로 설명할 수 있다. 특히 시멘트 내부의 물 분자가 통과하는 나노미터 차원의 작은 통로가 확대되는 것으로 설명할 수 있다. 데이터 회귀 분석에 의해 투수성은 약 200배로 증가하는 것으로 추정되었으나, 본 연구에서 수행한 회귀분석 결과에서는 100°C

이상에서 약 6.5배 정도의 상승이 있는 것으로 확인되었다. 100°C 를 넘는 온도에서 투수성을 나타내는 함수 $f_s(T)$ 의 초기경향은 Bazant와 Thonguthai가 제안한 것과 같다. 그러나 그 증가폭은 아래 함수에 나타난 것처럼 그 크기를 조절할 필요가 있다.

$$a = a_0 f_1(h) f_2(T) \text{ for } T \leq 100^\circ\text{C} \quad (18a)$$

$$a = a_0 f_2(100) f_3(T) \text{ for } T > 100 \quad (18b)$$

여기서, $a_0 = 25^\circ\text{C}$ 에서 투수계수이다. 함수 $f_1(h)$ 는 흡수된 물층을 따라서 이동하는 수분 운반에 대한 투수성을 의미한다. Arrhenius-type 방정식 $f_2(h)$ 은 100°C 이하에서 투수성의 온도에 대한 의존을 나타낸다.

$$f_1(h) = \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + \left(\frac{1 - h}{1 - h_c}\right)^4},$$

$$\text{for } h \leq 1; f_1(h) = 1, \text{ for } h \geq 1 \quad (19)$$

$$f_2(T) = \exp\left[\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{\bar{T}_0} - \frac{1}{\bar{T}}\right)\right] \quad (20)$$

여기서, $\alpha = 1 / [1 + 0.253(100 - m(T, 100^\circ\text{C}))]$; $h_c = 0.75$; $\bar{T} =$ 절대온도; $Q =$ 물 이동을 위한 활성화에너지; $R =$ 가스 상수이다. 회귀분석에 기초해서 $Q/R = 2700 \text{ K}$ 를 사용하였다(Bazant 와 Nazarr 1972). 100°C 근처에서 투수성의 갑작스러운 투수성의 증가를 묘사하는 함수 $f_3(T)$ 는 Bazant와 Thonguthai(1878), England와 Loss(1970), Zhuko와 Schenchenko(1974)에 의해 사용된 데이터를 본 연구에서 재분석하여 다음과 같이 수정하였다(그림 4).

$$f_3(T) = 5.5 \left\{ \frac{2}{1 + \exp[-0.455(T - 100)]} - 1 \right\} + 1 \quad (21)$$

시멘트의 열 전도성 역시 온도와 수분함량의 변화에 의존한다. 열전도계수 k 는 투수계수 a 와는 달리 온도와 수분 함량에 덜 민감한데, 이는 콘크리트 체적의 대부분을 차지하는 골재가 화학적으로 안정적이며, 동시에 투수성을 보유하기 때문이다. 일반적으로 열 전도성은 골재가 차지하는 부피의 비율과 골재의 유형에 의존한다(Bazant and Kaplan 1996; Neville 1997).

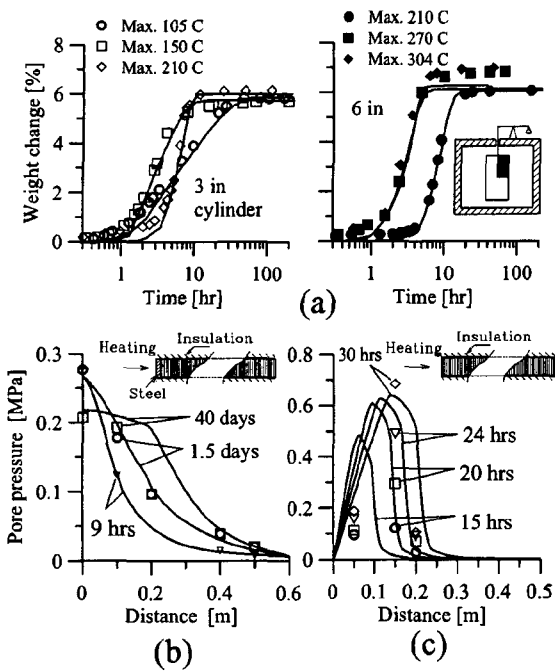


그림 4 본 연구에서 개발된 모델을 이용한 데이터 회귀분석; (a) Bazant and Thonguthai (1978), (b) England and Ross (1970), (c) Zhukov and Schenchenko (1974). 여기서 실선은 모델 계산치이고, 심볼들은 계측치이다.

수분과 열의 발생률

콘크리트에 열이 가해지면 화학적으로 구속된 물이 자유로워지고 공극으로 방출된다. 이것은 식 (15)에서 질량 보존 조건의 소스 항인 $I(w)$ 에 반영되어있다. 탈수된 물의 양은 질량 손실을 측정함으로써 실험적으로 $w_d(T) = w_h^{105} f_d(T)$ 로 얻어진다. 여기서 w_h^{105} 는 105°C에서의 수화된 물의 양이다. f_d 는 Harmathy and Allen의 실험 데이터 값을 사용함으로써 얻을 수 있다. 100°C 아래 온도에서는 시멘트가 수화되기 때문에 그 현상은 반대가 되어야 하며 w_h 의 증가는 $w_h(t_e) \approx 0.21c [t_e / (\tau_e + t_e)]^{1/3}$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서 t_e 는 등가의 수화기간이며, τ_e 는 23일을 사용한다. 그리고 수분발생률은 $I_w = \dot{w}_d - \dot{w}_h$ 이다.

식 (15b)의 열 발생률은 콘크리트가 표면으로부터의 전도로 인하여 가열될 때는 고려하지 않는다. 그러나 콘크리트가 마이크로웨이브에 의해 가열될 때는, 식 (13)과 (14)에서 콘크리트 체적 내에서 ohm저항에 의해 발생하는 열 발생률은 매우 중요하다.

경계 조건

열과 질량은 표면에서 주변 환경으로 전달된다. 물리적

으로 표면 근처의 환경의 정확한 모델링은 비선형 유체동역학으로 해석될 수 있지만, 본 연구의 목적에는 불필요하다. 열전달을 계산하기 위해서는 Newton법칙을 사용하고 수분전달을 위해서도 유사한 법칙을 사용하는 것으로 충분하다. 그래서 경계조건은 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$n \cdot J = B_w (P_S - P_{am}), \quad (22a)$$

$$n \cdot q = B_T (T_S - T_{am}) \quad (22b)$$

여기서, B_w 는 수분 전달계수 B_T 는 열전달계수; n 은 경계 표면에서 외부로의 단위 수직 벡터 P_{am} 은 주변의 수증기 부분압, T_S 는 표면온도이다. 완벽하게 절연된 표면은 $B_w=0$, 완벽하게 수분 전달되는 경우는 B_w 가 무한대로 가도록 제한된 경우이다. 표면근처의 공기가 자유롭게 대류 현상을 일으키는 경우에 B_T 는 5~25범위에 있다.

표면에서의 열 방출은 진공상태의 열 손실 메커니즘이며 Stefan의 방출 법칙으로부터 얻을 수 있다.

$$n \cdot q_r = \gamma \sigma (T_S^4 - T_{am}^4) \quad (23)$$

여기서 q_r =방출되는 열 플럭스; σ =Stefan 상수= $5.67 \times 10^{-8} J/m^2sK^4$; γ =열 방사율(0-1사이에서 변환)이다. 완전히 검은 표면에서 $\gamma=1$, 벽돌에서는 $\gamma=0.9$ 고 사용되는데 자료가 빈약하고 정확한 값이 중시되는 것이 아니므로 벽돌과 같은 방사성 r 을 콘크리트에 사용하였다. 진공이 아닌 경우에는 표면 열전달 식 (22)와 방사 식 (23)에서 동시에 발생한다. 이것은 간단히 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$n \cdot q = B_{eq} (T_S - T_{am}) \quad (24)$$

여기서 B_{eq} =등가 열 전달계수= $B_T + \gamma \sigma (T_S^2 + T_{am}^2)$ ($T_S + T_{am}$)이다.

액체 가스 전달 모델의 비적합성

Maingury *et al.*(2001)의 최신 모델, 혹은 다른 다상 (multiphase) 전달모델을 본 연구에서 채택하지 않았다. 그런류의 모델은 수분이 가스 상태인 액체(모세관)물과 가스 상태인 증기로 구성되어 있다고 가정한다. 이 처음 가정으로부터 물 전달은 모세관 내의 물 흐름과, 기체-액체 사이에서 발생하는 상변화를 포함한다는 것을 이끌어 낼 수 있다. 그러나 이 가정은 만약 물-시멘트 비가 비정상적

으로 높지 않다면, 보통의 경화된 시멘트의 모세관이 연속적이지 않다는 사실과는 부합하지 않는다. 물 분자가 방출할 때, 물 분자는 약 1~3nm의 너비의 칼슘 규산염 수화물 내의 미소공극을 통과해야만 한다. 이 공극은 물 분자가 들어 갈 수도 없고 통과할 수도 없이 작다. 더욱이 증기 상태에서 물 분자의 평균 자유 통로가 약 80nm이기 때문에 구불구불한 미소간극을 통과 할 수 없다. 그래서 물 분자는 이 공극을 채우는 흡수층을 따라서 이동하는데, 이는 물의 점성에 영향을 받기 보다는 C-S-H 표면에서 지지되는 것에 더 영향을 받는다(Bazant 1972, 1975). 따라서 Mainguy(2001)의 이론이나 다른 다상(multiphase) 전달 이론은 이 문제에 적용될 수 없다. Mainguy *et al.*의 모델이 적용될 수 없지만 공기 전달을 분리하는 시도는 의미가 있다.

참 고 문 헌

- Ahmed, G. N., and Hurst, J. P. (1997). "Coupled heat and mass transport phenomena in siliceous aggregate concrete slabs subjected to fire." *Fire Mater.*, 21, 161-168.
- American Concrete Institute. (ACI). (1994). "Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures." *ACI manual of concrete practice Part 1: Materials and general properties of concrete, ACI 209R-92*, Detroit.
- Bazant, Z. P. (1972). "Thermodynamics of interacting continua with surfaces and creep analysis of concrete structures." *Nucl. Eng. Des.*, 20, 477-505.
- Bazant, Z. P. (1975). "Theory of creep and shrinkage in concrete structures: A precis of recent developments." *Mechanics today*, S. Nemat-Nasser, ed., Vol. 2, Pergamon, New York, 1-93.
- Bazant, Z. P., and Baweja, S. (1995). "Justification and refinement of Model B3 for concrete creep and shrinkage. 1. Statistics and sensitivity." *Materials and structures*, Vol. 28, RILEM, Paris, 415-430.
- Bazant, Z. P., and Baweja, S. (2000). "Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures: Model B3-short form." *Adam Neville Symposium: Creep and shrinkage-structural design effects*, ACI SP-194, A. Al-Manaseer, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 85-100.
- Bazant, Z. P., Caner, F. C., Adley, M. D., and Akers, S. A. (2000a). "Fracture rate effect and creep in microplane model for dynamics." *J. Eng. Mech.*, 126(9), 962-970.
- Bazant, Z. P., Caner, F. C., Carol, I., Adley, M. D., and Akers, S. A. (2000b). "Microplane model M4 for concrete I: Formulation with work-conjugate deviatoric stress." *J. Eng. Mech.*, 126~9!, 944-953.
- Bazant, Z. P., and Chern, J. (1987). "Stress-induced thermal and shrinkage strains in concrete." *J. Eng. Mech.*, 113(10), 1493-1511.
- Bazant, Z. P., Hauggaard, A. B., Baweja, S., and Ulm, F. (1997). "Microprestress-solidification theory for concrete creep. I: Aging and drying effects." *J. Eng. Mech.*, 123(11), 1188-1194.
- Bazant, Z. P., and Kaplan, M. F. (1996). *Concrete at high temperatures*, Longman, London.
- Bazant, Z. P., and Najjar, L. J. (1972). "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete." *Materials and Structures*, Vol. 5, RILEM, Paris, 3-20.
- Bazant, Z. P., and Thonguthai, W. (1978). "Pore pressure and drying of concrete at high temperature." *J. Eng. Mech. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, 104(5), 1059-1079.
- Bazant, Z. P., and Thonguthai, W. (1979). "Pore pressure in heated concrete walls: Theoretical prediction." *Mag. Concrete. Res.*, 31(107), 67-76.
- Bazant, Z. P., and Xi, Y. (1994). "Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms." *Mater. Struct.*, 27, 3-14.
- Bazant, Z. P., and Zi, G. (2001). "Spatial and temporal scaling of concrete response to extreme environments." *Proc., 3rd Int. Conf., Concrete Under Severe Conditions*, N. Banthia, K. Sakai, and O. E. Gjrv, eds., Univ. of British Columbia, Vancouver, BC, 3-10.
- Brocca, M., and Bazant, Z. P. (2000). "Microplane model and metal plasticity." *Appl. Mech. Rev.*, 53(10), 265-281.

18. Caner, F. C., and Bazant, Z. P. (2000). "Microplane model M4 for concrete II: Algorithm and calibration." *J. Eng. Mech.*, 126(9), 954-961.
19. Chapman, A. J. (1987). *Fundamentals of heat transfer*, Macmillan, New York.
20. Cheng, D. K. (1983). *Field and wave electromagnetics*, Addison-Wesley, London.
21. England, G. L., and Ross, A. D. (1970). "Shrinkage, moisture and pore pressure in heated concrete." *Proc., American Concrete Institute Int. Seminar on Concrete for Nuclear Reactors*, West Berlin, Germany, Special Publication No. 34, 883-907.
22. Felicetti, R., and Gambarova, G. (1998). "Effects of high temperature on the residual compressive strength of high siliceous concretes." *ACI Mater. J.*, 95(4), 395-406.
23. Gawin, D., Majorana, C. E., and Schrefler, B. A. (1999). "Numerical analysis of hygrothermal behaviour and damage of concrete at high temperature." *Mech. Cohesive-Frict. Mater.*, 4, 37-74.
24. Hansen, W., and Almudaiheem, J. A. (1987). "Ultimate drying shrinkage of concrete-Influence of major parameters." *ACI Mater. J.*, 84(3), 217-223.
25. Harmathy, T. Z. (1970). "Thermal properties of concrete at elevated temperature." *J. Mater.*, 5(1), 47-75.
26. Harmathy, T. Z., and Allen, L. W. (1973). "Thermal properties of selected masonry unit concrete." *ACI J.*, 70(15), 132-142.
27. Hasted, J. B., and Shah, M. A. (1964). "Microwave absorption by water in building materials." *Br. J. Appl. Phys.*, 15, 825-836.
28. Hertz, K. (1981). "Microwave heating for fire material testing of concrete-A theoretical study," *Institute of Building Design Rep. No. 144*, Technical Univ. of Denmark, Lyngby, Denmark.
29. Hertz, K. (1983). "Microwave heating for fire material testing of concrete-an experimental study." *Institute of Building Design, Rep. No. 164*, Technical Univ. of Denmark, Denmark.
30. Jones, H. R. N. (2000). *Radiation heat transfer*, Oxford University Press, Oxford.
31. Lagos, L. E., Li, W., and Ebadian, M. A. (1995). "Heat transfer within a concrete slab with a finite microwave heating source." *Int. J. Heat Mass Transf.*, 38(5), 887-897.
32. Li, W., Ebadian, M. A., White, T. L., and Grubb, R. G. (1993). "Heat transfer within a concrete slab applying the microwave decontamination process." *J. Heat Transfer*, 115, 42-50.
33. Mainguy, M., Coussy, O., and Baroghel-Bouny, V. (2001). "Role of air pressure in drying of weakly permeable materials." *J. Eng. Mech.*, 127(6), 582-592.
34. Meredith, R. J. (1998). *Engineer's handbook of industrial microwave heating*, The Institution of Electrical Engineers, London.
35. Metaxas, R. C., and Meredith, R. J. (1983). *Industrial microwave heating*, IEEE Power Engineering Series 4, Peter Peregrinus Ltd., Exeter, England.
36. Moukwa, M., Brodwin, M., Christo, S., Chang, J., and Shah, S. P. (1991). "The influence of the hydration process upon microwave properties of cements." *Cem. Concr. Res.*, 21, 863-872.
37. Neville, A. M. (1997). *Properties of concrete*, 4th Ed, Wiley, New York.
38. Shah, M. A., Hasted, J. B., and Moore, L. (1965). "Microwave absorption by water in building materials: Aerated concrete." *Br. J. Appl. Phys.*, 16, 1747-1754.
39. Spalding, B. (2000). "Volatility and extractability of Strontium-85, Cesium-134, Cobalt-57, and Uranium after heating hardened portland cement paste." *Environ. Sci. Technol.*, 34, 5051-5058.
40. Taoukis, P., Davis, E. A., Davis, H. T., Gordon, J., and Talmon, Y. (1987). "Mathematical modeling of microwave thawing by the modified isotherm migration method." *J. Food Sci.*, 52(2), 455-463.
41. Thuery, J. (1992). *Microwaves: industrial, scientific, and medical applications*, Artech House, Boston, 104.
42. Ulm, F.-J., Coussy, O., and Bazant, Z. P. (1999). "The "chunnel" fire I: chemoplastic softening in rapidly heated concrete." *J. Eng. Mech.*, 125(3), 272-282.
43. Vodak, F., Cerny, R., Drchalova, J., Hoskova, S.,

- Kapickova, O., Michalko, O., Semerak, P., and Toman, J. (1997). "Thermophysical properties of concrete for nuclear-safety related structures." *Cem. Concr. Res.*, 27(3), 415-426.
44. von Hippel, A. R. (1954). *Dielectric materials and applications*, MIT Press, Cambridge, Mass.
45. Wacc, P. F., Harker, A. H., and Hills, D. L. (1989). "Removal of concrete layers from biological shield by microwaves." *Rep. No. EUR 12185*, Nuclear Science and Technology, Commission of the European Communities, Brussels, Belgium.
46. Wait, J. R. (1985). *Electromagnetic wave theory*, Harper & Row, New York.
47. atson, A. (1968a). "Curing of concrete." *Microwave power engineering*, E. C. Okress, ed., Vol. 2, Academic, New York.
48. Watson, A. (1968b). "Breaking of concrete." *Microwave power engineering*, E. C. Okress, ed., Vol. 2, Academic, New York.
49. Wei, C. K., Davis, H. T., Davis, E. A., and Gordon, J. (1985). "Heat and mass transfer in water-laden sandstone: microwave heating." *AIChE J.*, 31(5), 842-848.
50. White, T. L., Foster, D., Jr., Wilson, C. T., and Schaich, C. R. (1995). "Phase II microwave concrete decontamination results." *ORNL Rep. No. DE-AC05-84OR21400*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.
51. Zhukov, V. V., and Schenchenko, V. I. (1974). "Investigation of causes of possible spalling and failure of heat-resistant concretes at drying, first heating and cooling." *Zharostoikie betony (Heat-resistant concretes)*, K. D. Nekrasov, ed., Stroizdat, Moscow, 32-45.
52. Zi, G., and Bazant, Z. P. (2001). "Continuous relaxation spectrum for concrete creep and its incorporation into microplane model M4." *J. Eng. Mech.*, 128(12), 1331-1336.
53. Zi, G., and Bazant, Z. P. (2003). "Decontamination of radionuclides from concrete by microwave heating. II: Computations." *J. Eng. Mech.*, 129(7), 785-792. 