

상온에서 1100°C 까지 온도변화에 따른 콘크리트의 열물성 측정치

신기열* · 정 모** · 김상백*** · 김종철****

(1997년 9월 12일 접수)

Measured Data of Thermophysical Properties of Concrete for a Temperature Range of 20°C to 1100°C

Ki Yeol Shin, Mo Chung, Sang Baik Kim and Jong Chul Kim

Key Words: Thermophysical Properties of Concrete(콘크리트의 열물성치), Hot-Wire Method(열선법), Density(밀도), Thermal Conductivity(열전도율), Thermal Diffusivity(열확산율), Specific Heat(비열), Chemical Composition of Concrete(콘크리트의 화학성분), Compressive Strength(압축강도)

Abstract

Thermophysical properties and the compressive strength of concrete used in nuclear power plants in Korea were measured. The chemical composition of the concrete was also analyzed. The measured thermophysical properties include the density, the thermal conductivity, the thermal diffusivity and the specific heat for a wide temperature range of 20°C to 1100°C. The chemical composition of Korean concrete is similar to that of US basaltic concrete and the thermophysical properties are strongly temperature dependent. The density, the conductivity and the diffusivity decrease with an increase in temperature, and particularly the conductivity and the diffusivity are a 50-percent decrease at 900°C as compared with these values at room temperature. The specific heat increases until 500°C, decreases from 700°C to 900°C, and then increases again when temperature is above 900°C. The measurement beyond 1100°C is not acceptably accurate because the concrete decomposes to a liquid phase from a solid phase at that temperature. The results of this study can be applied, for example, to an analysis of the molten core-concrete interaction (MCCI) phenomenon of severe nuclear accidents. Various engineering calculations for the thermal behavior of concrete structures at high temperature will also require those property data, especially for high temperature ranges.

기 호 설 명

c_p : 비열, J/kgK

*회원, 영남대학교 대학원 기계공학과

**회원, 영남대학교 기계공학부

***회원, 한국원자력연구소 신행동력로개발단

****회원, 한국표준과학연구원 양자연구부

V : 열선에 공급전압, Volt

I : 열선에 공급전류, Ampere

l : 열선 양단의 길이, m

Q : 단위시간당 열선의 발열량, W

r : 열선과 열전대사이의 거리, m

T : 온도, °C

t : 시간, sec

그리스문자

α : 열확산율, m^2/s

x : 열전도율, W/mK

ρ : 밀도, kg/m^3

Φ : 단위시간당 단위길이당 열선의 발열량, W/m

$\Delta\theta$: 시간에 따른 온도차, K

1. 서 론

원자력 발전소는 방사성 물질을 다루고 있는 특수한 구조물이므로 건설하고자 할 때 여러가지 특수성을 고려하여 설계하고 공사하여야 한다. 또한 원전의 구조는 원자로의 압력용기, 냉각계통, 증기발생기 등 주요기기들이 설치되어 있는 원자로 건물과 이를 둘러싼 격납건물 및 보조건물들로 이루어져 있다. 이러한 원자로에서 중대사고가 발생하게 되면 손상된 핵연료 중 상당량이 용융되어 원자로 용기 하부에 모여 용융 풀(pool)을 형성하게 된다. 이때 원자로의 용기하부가 파손될 경우 노심용융물이 원자로 공동(cavity)에 떨어지게 되어 원자로 건물의 콘크리트 바닥면(basemat)과 장시간 반응한다고 가상된다. 이 현상을 노심용융물과 콘크리트간의 반응(Molten Core-Concrete Interaction : MCCI)이라 한다. 이때 고온의 용융물은 콘크리트 바닥면을 침식(erosion)시킬 뿐만 아니라 가연성 기체, 비응축성 기체 및 핵분열 생성물을 발생시킨다. 노심용융물에 의한 원자로 공동 콘크리트의 침식에 의한 구조물의 파손과 여러종류의 기체 방출에 의한 격납용기 내부압력의 상승은 결과적으로 격납건물의 건전성을 악화시키고 인체에 해로운 방사성 물질을 외부로 방출하게 되는 요인이 된다.

MCCI 현상에 대한 기초연구로 콘크리트의 물성치는 대단히 중요하다. 1980년대 중반 이후로 미국과 독일 등 세계각국에서는 자국의 발전소 건설에 사용된 콘크리트를 대상으로 콘크리트의 침식율, 발생가스의 종류 및 상대적 양, 반응시 용융물 상, 하부로의 열유속 및 냉각수에 의한 용융물의 냉각 효과에 대한 많은 연구를 통해 자료를 축적하였다.⁽¹⁾ 또한 실험결과들을 바탕으로 CORCON,⁽²⁾ WECHSL⁽³⁾ 등의 해석코드의 개발도 병행하였다. MCCI 현상에 대한 연구와 함께 콘크리트의 열물성에 대한 연구는 열적 거동의 해석에 매우 중요한

자료이며 이전의 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔다. 특히 Harmathy^(4,5)는 콘크리트와 같은 비균질(non-homogeneous)물질에서 열물성을 측정하는데 적합한 두 가지의 비정상상태 측정방법을 제안하였으며 기존의 실험적 측정치들에 대한 이론적 해석도 시도하였다. 한편 Brewer⁽⁶⁾는 수분을 포함하고 있는 콘크리트에 대한 열전도율의 측정시 온도구배에 따른 수분함량의 변화로 인해 정확한 측정이 어려운 점을 고려하여 열선법(hot-wire method)과 같은 비정상상태 측정방법을 사용하여야 한다고 주장하였다. Thompson⁽⁷⁾은 정상 및 비정상상태 측정방법을 통한 콘크리트의 열전도율 측정시 발생하는 여러가지 난점들에 관해서 언급하였다. 이론적 해석과 더불어 콘크리트의 열물성 측정에 대한 실험적 연구는 Moore⁽⁸⁾와 Harada⁽⁹⁾ 등 다수의 연구자들에 의해 수행되었으며, Rhodes⁽¹⁰⁾와 Neville⁽¹¹⁾ 등은 이러한 여러가지 콘크리트의 열물성에 대한 특성과 측정방법들을 정리하여 발표하였다. 최근에 Roche⁽¹²⁾ 등은 콘크리트의 상변화 특성을 해석하기 위한 연구로 여러가지 콘크리트의 고화온도 및 액화온도를 측정하였다. 그러나 많은 실험과 해석적 연구에도 불구하고 콘크리트의 분해과정에서 발생하는 여러가지 물리적인 현상의 모사가 어렵고 복합적으로 일어남으로 인해 아직까지 해석에는 많은 불확실성을 가지고 있는 실정이다.

MCCI 현상은 고온용융물이 바닥에 떨어지는 초기 접촉과정, 콘크리트 상부에서 용융풀을 형성하여 바닥과 측면을 침식하는 과정과 용융물이 고화되어 냉각되는 후기 냉각과정 등의 세 단계로 나눌 수 있다. 특히 용융물과 초기 접촉과정 및 후기 냉각과정에서 콘크리트에서의 비정상 열전도과정에 대한 해석모델은 현재 코드에 포함되지 않고 있다.⁽²⁾ 국내에서는 이러한 MCCI 현상을 해석하기 위한 기초 자료인 콘크리트의 특성 및 열물성에 대한 자료가 희귀하고, 특히 고온영역에서의 실무적 자료는 전무한 상태이다. 본 연구에서는 국내 원전에서의 MCCI 현상을 분석하고 기존의 해석모델을 개선하기 위하여 원자로 건물에 이용된 콘크리트의 특성을 규명하였다. 연구대상은 국내 영광 원전 3, 4호기(YGN 3&4)로서 원자로 공동구조물의 설계 자료를 토대로 콘크리트시편을 제작하여 기계적 강도평가와 화학적 구성에 대한 성분분석 및 밀도, 열전도율, 열확산율, 비열 등의 열물성을 측정하였다. 또한 이들 측정된 자료들은 기존의 선행 연구

결과에서 나타난 값들과 비교함으로써 국내 원전용 콘크리트의 특성에 대한 정보를 제공하고자 한다. 이러한 연구결과는 현재 운전 중인 국내 여러 원전의 사고해석과 차세대 원전에서 중대사고 완화를 위한 연구에 기초자료로 활용될 것이다. 또한 원자력 발전소와 별도로 고온영역에서 운전되는 각종 콘크리트 구조물에 대한 기계적, 열적 해석에 꼭 필요한 물성자료를 실제 측정하여 제공함으로써 온도에 따른 물성치 변화로 인한 해석에서의 오차를 줄이는데 크게 기여할 수 있다.

2. 물성치의 측정

콘크리트는 그 무게의 80%를 차지하고 있는 자갈의 성분에 따라 그 종류가 구분되며 특히 원전에서 사용되는 콘크리트는 그 지역의 특성에 따라 성질도 다르게 나타난다. 원전용 콘크리트는 주로 basaltic(BAS), limestone(LS) 및 limestone common sand(LCS) 콘크리트 등의 세 종류로 나누어진다. Basaltic 콘크리트는 사장석(SiO_2), limestone 콘크리트의 경우는 석회암(CaCO_3)이 주성분이다. 콘크리트의 물성치는 이들의 화학적 조성뿐만 아니라 수분함량과 밀도 및 온도 등의 세 가지 조건에 의해 크게 지배를 받으며, 그 밖에 배합비, 시멘트의 종류, 공기함량, 물/시멘트의 비율 및 양생시기에 따라서도 다르게 나타난다. 특히 수분함량에 따른 밀도, 열전도율, 열확산율 및 비열의 값은 큰 차이가 날 뿐만 아니라 콘크리트 내부에 포함된 수분농도의 불균일과 온도구배에 의한 수분의 이동 및 방출 등도 이들 열물성의 정확한 측정에 많은 어려움을 초래하게 된다.⁽⁷⁾ 콘크리트의 열물성을 측정하기 위한 방법들은 Rhodes⁽¹⁰⁾에 의해 잘 정리되어 있으며 다음은 각 물성치들의 특성과 측정방법들을 설명한 것이다.

콘크리트의 열물성, 특히 열전도율이나 열확산율을 측정하기 위한 방법으로 Hot Plate Method [ASTM C 177], Hot Box Method [ASTM C 236] 처럼 정상상태 측정방법(steady state method)과 열선법(Hot-Wire Method) 처럼 비정상상태 측정방법(transient method)으로 나눌 수 있다. 정상상태 측정방법에서는 수분이 완전히 건조된 콘크리트(oven-dry concrete)를 사용하여 측정함으로써 수분을 포함하고 있는 콘크리트에서의 열전도율보다 낮은 값을 측정하게 된다. 이는 측정시 온도구배에

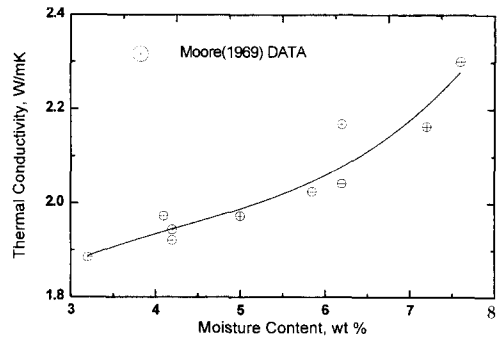


Fig. 1 Thermal conductivity of limestone concrete as a function of moisture content.

의한 수분의 이동으로 인한 것이며 Moore⁽⁸⁾는 limestone 콘크리트의 열전도율과 열확산율을 측정하면서 밀도와 수분함량에 따른 물성치의 변화를 실험적으로 확인하였다. Fig. 1은 limestone 콘크리트의 수분함량에 따른 열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 열전도율과 열확산율은 수분함량, 밀도 및 온도 등에 따라 크게 영향을 받으며, 특히 수분함량과 밀도에 비례하고 온도에는 반비례하는 경향을 가진다.

열확산율의 측정은 직접측정 방법(direct method)과 열전도율, 밀도, 비열의 값으로부터 산출해 내는 간접측정 방법(indirect method)이 있다. U. S. Army Corps of Engineers에서 개발한 CRD-C 36, CRD-C 37 등과 같은 직접측정 방법은 수분이 충분한 상태의 콘크리트를 사용함으로써 측정온도가 10~65°C의 범위로 한정된 방법이다. 이에 비해 열선법은 측정온도의 범위가 넓고 열전도율의 측정과 함께 열확산율의 측정도 동시에 가능한 장점이 있다.

비열의 측정은 대부분 열량계(Calorimeter)를 이용한 것으로 CRD-C 124, CRD-C 242 및 ASTM D 2766 등에 의한 방법이 있다. 콘크리트의 비열은 자갈 등의 광물학적인 성질에는 거의 영향을 받지 않으며 주로 수분 및 공기함량과 온도에 민감하게 변화한다. 특히 콘크리트내의 수분은 시멘트 결합물(hydrated cement paste)에 비해 비열이 큰 값을 가지므로 온도상승에 따른 화학적 탈수반응(chemical dehydration reaction)에 의한 잠열로 인해 비열의 많은 변화를 볼 수 있다.⁽⁹⁾ 일반적으로 온도상승에 따라 100°C에서 자유수(free water)의 증발이 일어나게 되고 150~350°C 범위

에서는 결합수(bound water)의 분해가 일어나며 특히 500°C 부근에서는 많은 양의 결합수가 분해되어 콘크리트의 비열이 급상승하는 경향을 나타낸다. 600°C 부근에서는 MgCO₃가 분해되기 시작하여 CO₂가 방출되고 900°C 부근에서는 CaCO₃가 분해된다. 1250°C 이상의 온도에서는 콘크리트의 상변화가 두드러지게 나타나 고상에서 액상으로 변화하게 된다.⁽¹³⁾

이러한 콘크리트의 온도변화에 따른 열물성의 변화를 실험적으로 측정하기 위해서는 적합한 측정방법의 선정과 함께 많은 실험재료들에 대한 측정이 필요하다. 본 연구에서는 수분을 포함하고 있는 상온으로부터 고온영역인 1100°C까지의 온도변화에 따른 콘크리트의 열물성을 측정하기 위하여 비정상상태 측정방법인 열선법을 사용하였다. 열선법에 의한 콘크리트의 열물성 측정은 다른 측정방법에 비해 측정온도범위가 넓고 열전도율과 열확산율을 동시에 측정 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 각 측정온도에서의 밀도 값을 이용하여 비열을 간접적으로 측정할 수 있는 장점도 가지고 있다. 다음은 열선법에 의한 각 열물성치의 측정이론과 실험용 콘크리트 시편의 제작 및 실험방법들을 설명한 것이다.

2.1 측정이론

콘크리트와 같은 비균질 및 복합물질에 대한 정확한 열물성치의 측정은 매우 어렵다. 특히 온도상승에 따른 열물성의 변화를 측정할 경우 콘크리트 내부의 온도구배와 수분함량의 변화로 인해 정상상태에서의 열물성의 측정은 거의 불가능하다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 이러한 단점을 고려하여 비정상 측정방법인 열선법을 이용하여 콘크리트의 열물성치를 측정하였다. 열선법에 의한 열전도율의 측정은 국제규격 ISO 8894-2⁽¹⁴⁾에 명시되어 있으며 측정이론은 Carslaw와 Jaeger⁽¹⁵⁾에 의해 구한 해를 이용했다. 초기온도 T=T₀인 무한매질내에 가느다란 열선이 있을 때, 시간 t=0에서 열선으로부터 일정한 열이 발생될 경우 시간에 따른 매질의 온도특성은 다음과 같이 알려져 있다.

$$T(r, t) = T_0 + \frac{\Phi}{4\pi\alpha} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (1)$$

여기서 α 는 열전도율, Φ 는 단위시간 및 단위길이당 열선에서의 발열량이며 α 는 열확산율을 나타

낸다. 우변의 적분항은 적분변수 u 에 대한 무한적분의 형태로 지수적분함수(exponential integral function)를 이용하여 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$T(r, t) = T_0 + \frac{Q}{4\pi\alpha l} \times -Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

여기서 $-Ei(-x)$ 는 $\int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$ 의 지수적분을 나타내며, Q 는 길이 l 인 열선에서 단위시간당 발생하는 열량으로 열선에 공급되는 전압과 전류의 곱으로 나타낼 수 있다. 국제규격 ISO 8894-2에 명시되어 있는 열전도율 식은 다음과 같다.

$$z = \frac{VI}{4\pi l} \times \frac{-Ei\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right)}{\Delta\theta(t)} \quad (3)$$

여기서 V 와 I 는 열선에 공급되는 전압과 전류를 나타내며, l 은 전압을 측정하는 열선 양단의 길이, $\Delta\theta$ 는 시간 t 동안의 열선과 열전대 간의 온도차, t 는 열선에 전류가 공급되는 시간, r 은 열선과 열전대 사이의 거리를 나타낸다. 여기서 $-Ei(-r^2/4\alpha t)$ 는 무한 적분을 지수적분함수의 형태로 나타낸 것으로서 Grosskopf와 Kilian⁽¹⁶⁾에 의해 그 특성이 Fig. 2와 같이 알려져 있다.

여기서 열선에 전류를 공급하여 시간에 따라 측정된 열선의 온도변화로부터 $\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$ 의 값을 구할 수 있고, 그 값에 해당하는 각각의 $-Ei(-r^2/4\alpha t)$ 의 값은 Fig. 2의 관계로부터 구할 수 있다. 이들 값으로부터 열선과 열전대사이의 거리와 측정시간을 대입하여 열확산율을 얻을 수 있다. 또한 열선에 공급되는 열량과 열선 양단의 길이를

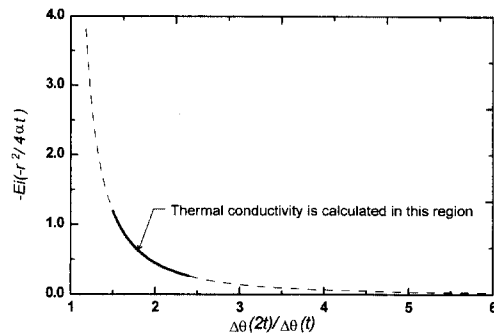


Fig. 2 Characteristics of $-Ei(-r^2/4\alpha t)$ values with respect to $\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$.

주어진 식 (3)에 대입하여 열전도율을 구할 수 있다. 열선법과 같은 비정상 측정방법에서의 측정시간은 정확한 물성치의 측정에 매우 중요한 요소이며 국제규격 ISO 8894-2에서는 $\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$ 의 값이 1.5와 2.4사이에 있는 동안을 측정시간으로 규정하고 있다. 또한 각 값들의 표준편차(standard deviation)가 5%이내가 될 때 그 평균치를 측정값으로 규정하고 있다. 비열의 측정은 열전도율과 열확산율의 측정값으로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$c_p = \frac{\kappa}{\rho\alpha} \quad (4)$$

여기서 ρ 는 밀도를 나타내며 각 온도에서의 비열은 동일한 온도조건에서의 밀도를 알고 있을 때 정확한 값을 구할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 각 온도에서의 밀도를 별도로 측정하여 식 (4)의 계산에 사용하였다.

2.2 시편의 제작 및 강도평가

원자력발전소는 방사성 물질을 다루고 있는 특수한 구조이며, 특히 원자로를 포함하고 있는 내부구조물은 여러가지 특수성을 고려하여 설계하고 시공할 필요가 있다. 원전의 격납건물은 ASME의 설계기준에 따라 시공되며, 특히 콘크리트 구조물의 배합기준은 CC-2230⁽¹⁷⁾에 명시되어 있다. 본 연구에서는 국내 영광 원전 3, 4호기의 건설에 사용된 콘크리트의 배합설계자료를 토대로 현장에서 사용된 시멘트, 모래, 자갈 및 혼화제 등의 재료를 이용하여 시편을 제작하였다. Table 1은 영광 원전 3, 4호기(YGN 3&4)의 원자로 공동 구조물의 건설에 사용된 콘크리트의 배합비를 나타낸 것이다. 시편의 제작과 강도시험은 쌍용중앙연구소의 협조로 콘크리트 연구실에서 수행하였다. 원전 건설현장의 콘크리트와 동일한 성질을 얻기 위하여 측정 시편과 함께 설계기준강도 평가를 위한 강도시험용 공시체를 KS F 2403에 따라 제작하였다. 콘크리트의 압축강도 시험은 KS F 2405에 따라 수행하였으며 콘크리트의 강도가 설계기준강도를 만족하는 것을 확인한 후 제작한 측정시편을 이용하여 콘크리트의 밀도, 열전도율, 열확산율, 비열 등의 열물성을 측정하였다.

콘크리트 시편 제작을 위해 먼저 원전 공사현장의 기초굴착공사에서 나온 골재를 이용하여 얻은

Table 1 Engineering compositions of concrete at Yonggwang nuclear power plant unit 3 and 4(YGN 3&4).

Item	YGN 3&4	wt%
Compressive Strength	5500 psi (387 kg/cm ²)	
Water/Cement(W/C)	42%	-
Sand/Aggregate(S/G)	46%	-
Water(W)	169.1 kg/m ³	7.6
Cement(C)	402.2 kg/m ³	18.1
Sand(S)	756.3 kg/m ³	34.1
Aggregate(G)	893.0 kg/m ³	40.2
Water Reducion Agent	1207 ml	-
Air Entraining Agent	21 ml	-
Slump	12.5 cm	-
Air Containing	5.2%	-
Date	'97.3.21	-

19 mm 자갈을 표면에 이 물질을 제거하고 포화할 수상태를 유지하기 위하여 물로 씻어낸 후 바닥에 펼쳐 다음날 타설할 때까지 대기 중에서 건조하였다. 콘크리트의 배합설계기준이 표면건조상태의 자갈을 기준으로 한 것이기 때문에 사용되는 자갈을 반드시 표면건조상태로 사용되어야 하며 함수율이 기준에 벗어날 경우에는 배합비에서 물의 양을 조절하여 배합 설계기준에 만족하도록 제작하여야 한다. 모래는 섬진강유역인 남원군 호방리에서 채취한 것으로서 표면이 축축한 상태에서 타설에 사용하였다. 먼저 배합기준에 따라 모래와 자갈을 믹서에 넣어 섞은 후 시멘트를 넣어 섞는다. 이후 충분한 혼합상태에서 물과 감수제 및 공기연행제를 넣어 콘크리트를 만들었다. 충분히 혼합한 후 미리 준비한 공시체 제작용 몰드(지름 100 mm, 높이 200 mm)에 타설하였다. 타설시 다짐을 위해 내부진동기를 사용하였으며 이때 KS F2403에 제시한 방법에 따라 몰드 높이의 2/3가량을 1회 채운 다음 진동기로 다진 후 나머지를 채우고 윗면을 흙칼로 처리하였다. 몰드에 콘크리트를 채운 후 망치로 옆면을 가볍게 두드려 공기구멍을 최소화하도록 하였다. 콘크리트의 타설 후 온도 20°C, 습도 50% 이상의 건조실에서 24시간 동안 양생하여 경화시킨

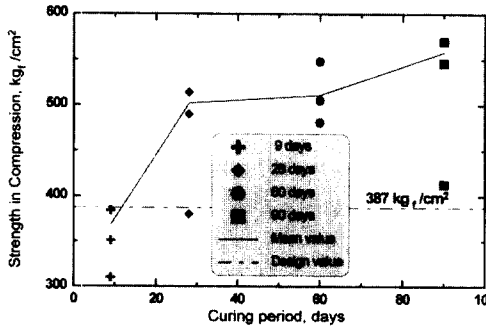


Fig. 3 Compressive strength of YGN 3&4 concrete related to curing period.

다음 공시체의 물더를 분해하고 양생실에서 양생을 시작하였다.

영광 원전 3, 4호기(YGN 3&4)의 원자로공동에 사용된 콘크리트 배합현황에 따른 설계강도는 5500 psi (386 kgf/cm²)로 나타나 있다. 따라서 콘크리트에 대한 강도는 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 공시체를 대상으로 압축강도를 9일, 28일, 60일, 90일의 양생기간별로 나누어 평가함으로써 이를 확인하였다. 시험기는 Instron사의 만능시험기(Universal Testing Machine, model 8509)를 사용하였으며, 각 날짜별로 3개의 공시체에 대한 압축강도를 시험하였다. Fig. 3은 각 양생기간별 콘크리트의 강도변화를 나타낸 것이다. 28일간의 양생 후 설계강도를 만족하는 것을 알 수 있으며 28일 이후부터는 강도향상이 둔화됨을 알 수 있다. 따라서 측정시편의 양생은 90일 정도로 하고 이후에 물성측정을 수행하였다.

2.3 실험장치 및 물성치 측정방법

콘크리트의 열전도율, 열확산율, 비열의 측정은 직경 100 mm, 높이 200 mm인 원통형 시편을 이용하여 측정면이 가로 100 mm, 세로 200 mm가 되도록 중앙을 절단하여 측정에 사용하였다. 열전도율의 측정은 국제규격인 ISO 8894-2⁽¹⁴⁾에 의한 열선법(Hot-wire method -parallel)을 이용하였다. 열선법에 의한 열전도율의 측정장치는 열선에 열을 공급하기 위한 정전력장치, 열선의 온도와 전류, 전압을 측정하는 측정장치 및 데이터를 수집 분석하는 컴퓨터 그리고 시편의 분위기 온도를 제어할 수 있는 온도조절장치 및 전기로 등으로 구성되어 있다. Fig. 4는 열선법에 의한 열전도율 측정

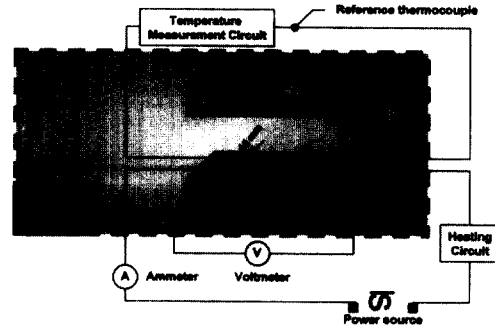


Fig. 4 Schematic of measurement apparatus with hot-wire method (parallel).

장치의 개략도를 나타낸 것이다.

열선에 공급되는 전력공급장치로서 일반적으로 교류나 직류의 정전력장치를 사용하는데 열선의 온도에 따른 저항의 변화를 반드시 고려해 주어야 한다. 정전력장치의 출력을 직류로 사용할 경우는 전기적인 잡음에 대한 영향을 배제할 수 있지만 열전대의 기전력을 읽기 위한 전압계의 오프셋(offset) 때문에 전류의 방향을 순방향과 역방향으로 바꾸어 주면서 측정하여 평균을 취해야 한다. 이러한 번거로움 때문에 교류 정전력장치를 많이 사용하지만 이때에는 교류출력 파형이 왜곡 없이 정현파이어야 하며 초기 출력 시 댐핑(damping) 현상이 없어야 한다. 따라서 실험장치에서는 전력공급장치로서 1 kHz의 교류 정전류원을 사용하였는데 전압은 0~35 V, 전류는 최대 6 A로서 가변형이다. 측정기는 열선에 가해지는 전압과 열전대의 기전력 측정을 위하여 두 대의 전압계를 사용하였는데 열선의 전압측정은 100 nV의 분해능을 가진 HP3478A를 사용하였고, 열전대의 기전력 측정은 10 nV의 분해능을 가진 HP3458A를 사용하였다. 그리고 전기로의 온도측정을 위하여 전기적으로 작동되는 영점(Ice point reference)장치 등이 이들 전압계와 함께 컴퓨터와 GPIB를 통해 연결하여 신호를 처리하였다. 시편의 온도변화를 감지하기 위하여 사용된 열전대는 직경이 0.3 mm인 R형(Platinum-13%Rhodium/Platinum)이며, 열선은 직경이 0.3 mm, 20°C에서 비저항이 2.66 Ω/m인 백금선(Pt-13%Rh)을 사용하였다. 전기로의 내부 크기는 370×270×215 mm로서 상단에서 시편을 장착하며 시편의 형태에 따라 접촉을 좋게 하기 위하여 외부에서 1~10kg의 무게를 사용할 수 있게 되어 있다.

전기로의 분위기 온도 측정과 조절을 위하여 직경이 0.5 mm인 R형 열전대를 사용하였고, 발열체는 silicon carbide로 한 면에 4개씩 양면으로 8개를 사용하였으며, 최고 사용온도는 1400°C 이며 PID로 제어된다.

열선법에 의한 열전도율의 측정에서는 전기로 내부에 하부시편을 놓고 시편 위에 열선과 열전대를 15±1 mm간격을 두고 평행하게 한 후 같은 종류의 다른 하나의 시편으로 누른 상태에서 열선과 시편의 접촉상태가 좋아지도록 적절한 무게로 누른다. 열선과 열전대의 설치가 끝나면 열선에 교류 정전류를 흘리면서 동시에 열선에 걸리는 전압과 흐르는 전류 그리고 열전대의 기전력을 전압계와 함께 GPIB로 연결된 컴퓨터를 이용하여 시간 스케일과 함께 읽는다. 일단 취해진 열전대의 기전력 자료는 컴퓨터에 의해 온도로 환산된다. 여기서 전기로 내부에서 설정하고자 하는 측정온도가 안정하여야 하며 만약 전기로의 분위기 온도가 증가할 때 측정하면 열전도도가 낮아지며 반대로 감소할 때 측정하면 열전도도가 높게 측정되어진다. 따라서 전기로의 온도안정도가 0.5°C/15 min이내로 되었을 때 3회 측정하여 평균값을 구한다. 이러한 조건과 같이 하여 전기로의 온도상승을 1.67°C/min이내로 하여 변화시키면서 다음 조건에서의 측정을 수행한다.

3. 결과 및 검토

3.1 콘크리트의 화학적 특성

본 연구에서는 국내 원전에 사용되고 있는 콘크리트의 특성을 규명하기 위하여 화학적 조성에 대한 성분분석도 병행하였다. 화학성분의 분석은 우선 콘크리트시편의 강도가 설계기준을 만족한 후 수행하였으며, 사용장비는 Philips사의 형광 X선 분석장치(X-Ray Fluorescence, model PW 1400)와 원자흡광분석기(Atomic Absorption Spectrometer, model 251)를 이용하였다. 성분분석은 KS 5120 및 ASTM C 114에 제시한 '습식화학분석방법'에 따라 수행하였다.

Table 2는 원전에서 주로 사용되는 콘크리트의 성분과 함께 본 연구에서 측정한 영광 원전 3, 4호기(YGN 3&4)의 콘크리트에 대한 화학성분을 비교한 것이다. 콘크리트 성분은 CaCO₃나 Ca(OH)₂로 표현하거나 생성물인 CaO, CO₂, H₂O CHEM(화학적으로 bound water 임)로 표시된다. 미국 몇몇 발전소에서 쓰인 limestone(LS) 콘크리트는 미국 또는 해외 발전소에서 쓰인 basaltic(BAS) 콘크리트나 국내 콘크리트에 비해 CO₂ 함량이 매우 많다. Limestone(LS) 혹은 limestone common sand(LCS) 콘크리트에서의 많은 CO₂ 함량은 콘크리트의 가열로 인한 외부로의 가스방출이 많으며 이때 발생된 기체는 MCCI 현상이 진행되는 동안

Table 2 Chemical composition of concretes used in nuclear power plants.

Composition	YGN 3&4	BAS	LCS	LS
SiO ₂	55.70	54.84	35.80	3.60
CaO	15.80	8.82	31.30	45.40
Al ₂ O ₃	10.30	8.32	3.60	1.60
K ₂ O	2.86	5.39	1.22	0.68
Na ₂ O	2.04	1.80	0.082	0.078
MgO+MnO+TiO ₂	1.61	7.21	0.69	5.80
Fe ₂ O ₃	2.60	6.26	1.44	1.20
Cr ₂ O ₃	0.021	0.00	0.014	0.004
H ₂ O	7.23	5.86	4.70	5.94
CO ₂	2.78	1.50	21.154	35.698
Total	100.941	100	100	100

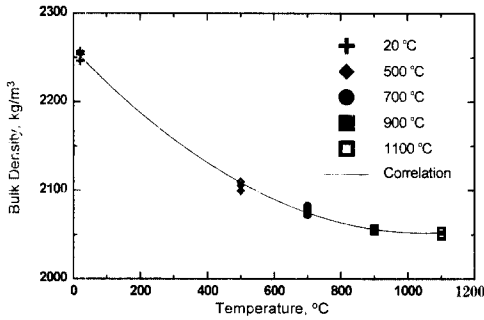


Fig. 5 Density variation of YGN 3&4 concrete as a function of temperature.

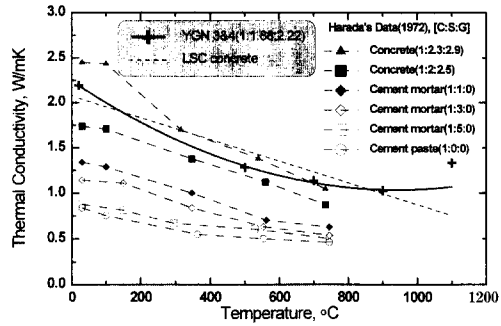


Fig. 6 Thermal conductivity variation of concrete as a function of temperature.

용융분을 잘 혼합시키고 상부표면의 냉각수로 열전달을 향상시키는 요인이 된다. Table 2에 나타난 여러 콘크리트의 주요 차이점은 SiO₂, CaO, CO₂ 및 수분의 함량이다. 국내 원전용 콘크리트는 SiO₂ 함량의 경우 BAS 콘크리트와 비슷하게 나타나며, LCS 보다는 약 1.5배 많게 나타났다. CaO와 CO₂의 함량의 경우는 BAS 콘크리트에 비해 2배 정도로 크게 나타났다. 각 콘크리트의 CaO와 SiO₂ 함량의 차이는 상변화와 같은 화학적 분해 과정에서 슬래그가 거동하는 형상을 다르게 할 것으로 기대된다. 따라서 국내 원전에서 MCCI 반응 시에는 이들 콘크리트의 화학적 분해과정은 BAS 콘크리트와 비슷한 경향을 가지지만 CO₂와 H₂O에 의한 가스의 생성량의 증가로 상부로의 열전달을 증가시켜 침식율이 감소할 것으로 예측된다.

3.2 콘크리트의 열물성

본 연구에서는 제작한 물성측정 시편을 이용하여 영광 원전용 콘크리트에 대한 밀도, 열전도율, 열확산율, 비열을 측정하였다. 콘크리트의 열물성은 앞에서 기술한 것처럼 온도의 변화에 민감한 변화를 가진다. 따라서 상온에서부터 측정이 가능한 범위까지 온도를 상승하면서 물성의 변화를 살펴보았다. 물성측정 온도의 선정은 콘크리트의 특성을 잘 반영하여 결정해야 하며, 특히 고온 노출 시에 발생하는 수분의 증발과 여러가지 화학성분들의 분해를 고려하여야 한다. 콘크리트의 구성성분 중 H₂O 성분은 자유수와 결합수의 두 가지 형태로 존재하며 이들은 100°C에서 500°C의 범위에서 증발과 분해가 이루어지며, 그 이상의 온도에서는 여러가지 콘크리트 화합물의 화학적 분해가 일어나는 것으로

알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 상온과 500°C, 700°C, 900°C, 1100°C로 온도를 변화하면서 여러 물성을 측정하였다. 다음은 각 물성에 대한 측정 결과를 나타낸 것이다.

먼저 온도변화에 따른 콘크리트의 밀도변화를 살펴보기 위하여 약 50 mm³(50×50×50 mm)의 크기인 3개의 밀도측정 시편을 가공하여 사용하였다. 측정밀도는 겉보기밀도(Bulk density)로서 상온에서 측정된 후 고온에서의 밀도는 전기로 내부의 온도상승을 1.67°C/min으로 하여 500°C, 700°C, 900°C, 1100°C에 도달한 후 상온으로 서서히 식혀서 상온에서 밀도를 측정하였다. Fig. 5는 온도변화에 따른 영광 원전 3, 4호기용콘크리트(YGN 3&4)의 밀도변화를 나타낸 것이며 측정치의 표준편차는 0.3% 미만이다. 온도가 증가함에 따라 자유수, 결합수, Ca(OH)₂, CO₂ 등의 화학성분의 분해로 중량감소가 일어나며 밀도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 1100°C 온도를 가한 후 시료에는 부분적으로 균열(crack)이 발생하였다.

Fig. 6은 본 연구에서 측정된 영광 원전 3, 4호기 콘크리트(YGN 3&4)의 열전도율과 Harada⁽⁹⁾의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 콘크리트의 열전도율은 재료의 배합비에 따라 크게 차이가 나며 온도가 증가함에 따라 단조 감소함을 보여 주고 있다. 상온에서 500°C까지의 급격한 감소는 다량의 수분 방출로 인한 것으로 판단되며 900°C에서의 열전도율은 상온에서 그 값의 50%이하로 감소하며 이후에는 감소 폭이 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 7은 Brewer⁽⁶⁾가 발표한 수분함량과 밀도에 따른 열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서 측정된 값들(YGN 3&4)은 건조과정 동안

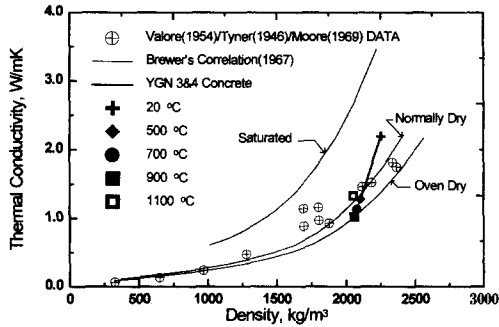


Fig. 7 Thermal conductivity of concrete as a function of density and moisture content.

수분의 감소에 따른 밀도와 열전도율의 변화를 잘 예측하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 1100°C의 고온에서 측정된 값은 수분을 포함하고 있는 영역에 존재함으로써 다른 측정값에 비해 신뢰성이 없는 값으로 볼 수 있다.

Fig. 8은 영광 원전 3, 4호기 콘크리트(YGN 3&4)의 열확산율을 Harada⁽⁹⁾의 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 콘크리트의 열확산율은 열전도율에서와 같이 온도가 증가함에 따라 감소하며 700°C에서의 열확산율은 상온에서 그 값의 50%이하의 값으로 측정되었다. 900°C를 지나 1100°C에서 열확산율이 증가한 것은 고체상태의 콘크리트가 고온에서 액화하여 액상으로 변화하기 때문으로 예측된다. 측정을 끝낸 시편을 살펴본 결과, 초기에 분리되어 있던 상, 하의 두 시편이 서로 붙어 있는 것으로 이를 확인할 수 있었다.

이상의 밀도, 열전도율, 열확산율의 측정치를 이용하면 콘크리트의 비열을 간접적으로 계산할 수 있으며, Fig. 9는 온도변화에 따른 영광 원전 3, 4호기 콘크리트(YGN 3&4)의 비열을 각 물성의 상관식으로 계산한 값과 측정치를 함께 나타낸 것이다. 콘크리트는 온도에 따라 수분의 방출 및 여러가지 화학반응으로 인해 비열의 변화가 심하게 나타나는 것으로 알려져 있다.^(5,13) 특히 400~600°C 부근에서는 수산화칼슘(calcium-hydroxide, Ca(OH)₂)의 분해에 의한 탈수반응(dehydration reactions) 등으로 큰 잠열이 소요됨으로 인해 비열이 급상승하는 경향이 있다. 본 연구에서 얻어진 콘크리트의 비열은 온도에 따라 많은 변화를 보이고 있으며 상온의 값에 비해 500°C와 700°C에서 약 20% 이상 큰 값을 가짐으로서 이를 확인할 수 있다. 1100°C

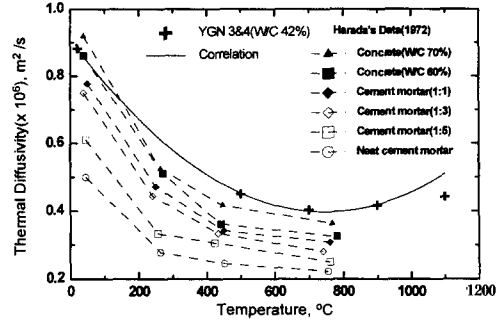


Fig. 8 Thermal diffusivity variation of concrete as a function of temperature.

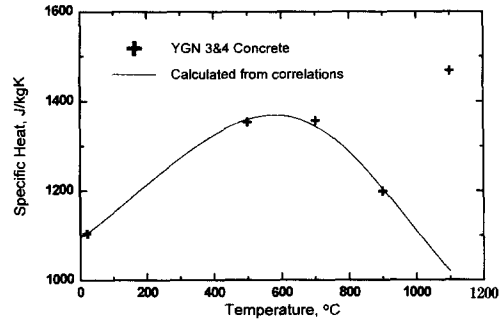


Fig. 9 Specific heat at elevated temperature of YGN 3&4 concrete.

에서 비열 값은 콘크리트의 상변화 중에 얻어진 값으로 신뢰성이 없는 자료이지만 참고를 위해 나타내었다.

3.3 실험결과의 오차분석 및 상관관계식

국제규격 ISO 8894-2⁽¹⁴⁾에서는 열선법을 이용한 열전도율 측정의 신뢰성을 보장하기 위하여 측정 표준편차(standard deviation)가 5% 이하가 되도록 규정하고 있다. 또한 ASME의 "Journal of Heat Transfer"에서는 실험결과의 신뢰도가 95% 이상이 될 것을 요구하고 있다. 열전도율의 측정에 사용한 열선법 측정장치에서 열선으로의 전원공급 안정도는 최대 2%이내의 편차범위를 가지고 있으며, 열선의 전류와 전압강하를 측정하기 위한 디지털 멀티메타의 정확도는 0.5%이내, 열전대의 정확도는 0.05°C이다. 각 측정치에 대한 불확실성(uncertainty)을 확인하기 위하여 Kline⁽¹⁸⁾ 등이 제안한 root-sum-square uncertainty 방법을 사용하

Table 3 Thermophysical properties of concrete as a function of temperature.

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)		Conductivity (W/mK)		Diffusivity (×10 ⁶) (m ² /s)		Specific Heat (J/kgK)	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
20	2252.43	5.49	2.194	0.032	0.8824	0.0243	1104	15
500	2104.97	5.16	1.283	0.018	0.4505	0.0099	1354	27
700	2077.71	4.67	1.136	0.031	0.4031	0.0185	1357	25
900	2057.44	3.30	1.027	0.026	0.4170	0.0241	1199	62
1100	2051.15	2.29	-	-	-	-	-	-
Correlation	$\rho = 0.000189575 T^2 - 0.39802 T + 2259.62$		$\kappa = 1.36469 E-6 T^2 - 0.00256908 T + 2.24266$		$\alpha = 9.16391 E-7 T^2 - 0.00136982 T + 0.909062$		$c_p = \frac{x}{\rho\alpha}$	

었다. 열선으로 공급되는 전압과 전류에 대한 불확실성은 2% 이내, 열전대의 불확실성은 1% 이내로서 열전도율의 불확실성은 3.5% 이내로 나타났다. 또한 온도상승에 따른 각 측정치의 표준편차는 밀도의 경우 0.1~0.25%의 범위로 온도가 증가함에 따라 감소하지만, 열전도율의 경우 1.4~2.8%, 열확산율의 경우 2.1~5.8%, 비열의 경우 1.3~5.2%의 범위에서 측정온도가 증가할수록 표준편차가 크게 나타남을 알 수 있다. Table 3은 본 연구에서 측정된 콘크리트의 물성치와 표준편차(standard deviation, S. D.)를 각 측정온도에 따라 정리한 것이다. 또한 측정치를 이용하여 온도변화에 따른 각 물성치의 상관관계식을 제시하였으며, 오차범위는 밀도의 경우 20~1100°C의 온도범위에서 ±0.4%, 열전도율과 열확산율의 경우 20~900°C의 온도범위에서 각각 ±2%와 ±1% 이내로 나타났다. 비열에 대한 상관식은 실험치를 이용하여 유도할 수도 있으나, 밀도, 열전도율, 열확산율의 값으로부터 간단히 계산될 수 있으므로 생략하였다. 또한 1100°C에서 열전도율, 열확산율의 측정치는 콘크리트의 상변화로 인해 신뢰성이 없는 것으로 상관식 개발에서 제외하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 영광 원전 3, 4호기의 원자로 공동 구조물에 사용된 콘크리트를 대상으로 구성성분에 대한 화학분석과 그 구성에 대한 특성을 살펴 보았고, 온도변화에 따른 밀도, 열전도율, 열

확산율, 비열 등의 열물성을 측정하였다. 국내 콘크리트의 화학적 조성은 SiO₂ 함량비에서 basaltic 콘크리트와 비슷하지만 CaO와 CO₂의 함량의 경우는 basaltic 콘크리트에 비해 2배 정도로 크게 나타났다. 열물성치의 경우 온도상승에 따라 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 온도가 증가할수록 밀도는 단조 감소하는 경향을 보이고 있으며 1100°C 이상의 온도에서는 부분적으로 균열이 발생하였다. 열전도율과 열확산율은 온도가 증가함에 따라 감소하다가 900°C에서의 값은 상온에서 그 값의 50% 이하로 측정되었다. 비열의 경우는 500~700°C 범위에서 20% 이상의 급격한 증가를 보였다. 1100°C에서의 측정치는 콘크리트의 상변화로 인하여 신뢰성이 없는 측정이 이루어졌으며 측정 후 반응시편의 용착으로 이를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 얻은 결과는 현재 운전 중인 국내 여러 원전에서의 MCCI 현상과 관련된 중대사고의 해석과 차세대 원전에서의 중대사고 완화를 위한 연구 및 고온영역에서 운전되는 각종 콘크리트 구조물의 열적 거동의 해석 등에 필요한 기초자료로 폭 넓게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소의 연구비지원으로 수행되었으며 연구수행에 협조해 주신 한국표준과학연구원과 쌍용중앙연구소의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Alsmeyer, H., et. al., 1995, "Nuclear Science and Technology: Molten Corium /Concrete Interaction and Corium Coolability-A State of the Art Report-," Final Report, EUR16649EN, European Commission.
- (2) Bradley, D. R. and Powers, D. A., 1993, "CORCON-MOD3 Models and Correlations," A Letter Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- (3) Alsmeyer, H., 1987, "BETA Experiments in Verification of the WECHSL Code: Experimental Results on the Melt-Concrete Interaction," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 103, pp. 115~125.
- (4) Harmathy, T. Z., 1964, "Variable-State Methods of Measuring the Thermal Properties of Solids," *Journal of Applied Physics*, Vol. 35, No. 4, pp. 1190~1200.
- (5) Harmathy, T. Z., 1970, "Thermal Properties of Concrete at Elevated Temperatures," *Journal of Materials*, Vol. 5, No. 1, pp. 47~74.
- (6) Brewer, H. W., 1967, "General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete," *Journal of Portland Cement Association*, Research and Development Laboratories, Vol. 9, No. 1, pp. 48~60.
- (7) Thompson, N. E., 1968, "A Note on Difficulties of Measuring the Thermal Conductivity of Concrete," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 20, No. 62, pp. 45~49.
- (8) Moore, J. P., et. al., 1969, "Some Thermal Transport Properties of a Limestone Concrete," ORNL-TM-2644, Oak Ridge National Laboratory.
- (9) Harada, T., et. al., 1972, "Strength, Elasticity and Thermal Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperatures," *International Seminar on Concrete for Nuclear Reactors*, American Concrete Institution, Special Publication, No. 34, pp. 377~406.
- (10) Rhodes, J. A., 1978, "Thermal Properties," *ASTM, Special Technical Publication*, No. 169B, pp. 242~261.
- (11) Neville, A. M., 1981, "*Properties of concrete*," 3rd ed., Pitman Press, London.
- (12) Roche, M. F., et. al., 1993, "Solidus and Liquidus Temperatures of Core-Concrete Mixtures," NUREG/CR-6032, ANL-93/9, Argon National Laboratory.
- (13) Troxell, G. E., et. al., 1968, "*Composition and Properties of Concrete*," 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- (14) ISO 8894-2, 1990, "Refractory materials -determination of thermal conductivity-Part 2: Hot-wire method (parallel)," *International Organization for Standardization*, Switzerland.
- (15) Carslaw, H. S and Jaeger, J. C., 1959, "*Conduction of Heat in Solids*," 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, pp. 25~27, p. 402.
- (16) Grosskopf, B. and Kilian, B., 1980, "*Table book with $Ei(-x)$ and $\Delta V(2t)/\Delta V(t)$ values*," Kubel-Druck, Wiesbaden, FRG.
- (17) ACI STANDARD 359-92, SECTION III, DIVISION 2, 1992, "*Code for Concrete Reactor Vessels and Containments*," CC-2230, pp. 154~157.
- (18) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.