

## 시멘트 콘크리트 포장의 화재 손상



한 승 환 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원

홍 승 호 | 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원

### 1. 서론

국내 고속도로망은 최근 들어 급격히 증가하여 선진국 수준으로의 도약을 이루고 있으며, 통행량 측면에서도 국가 물류의 가장 중요한 부분을 담당하고 있다. 이러한 양적인 도로의 팽창은 다양한 형태의 교통조건을 경험하게 하고, 아울러서 예기치 않은 유지관리 상의 문제점을 노출시키기도 한다. 그 중의 하나가 도로에서의 화재로 인한 도로 시설물 및 도로 포장의 손상이라 할 수 있다.

최근 방송매체에 보도된 바 있는 도로 터널에서의

차량 폭발로 인한 시멘트 콘크리트 포장의 손상에 대한 역학조사(forensic investigation)의 내용을 간단히 기술하여, 그 과정을 소개하고자 한다. 여러 가지 포장 조사 및 대책 수립과 관련한 업무를 수행하면서 경험한 도로 포장의 화재손상은 최근 들어 그 횟수가 상당히 증가하고 있는 실정이다. 특히 이러한 역학조사는 원인제공자와의 비용문제로 인해 항상 분쟁의 소지를 안고 있어서, 조사를 통한 결과의 도출에 공정해야 하며, 경험이 풍부한 조사자가 요구되는 작업이다.<sup>1)</sup>

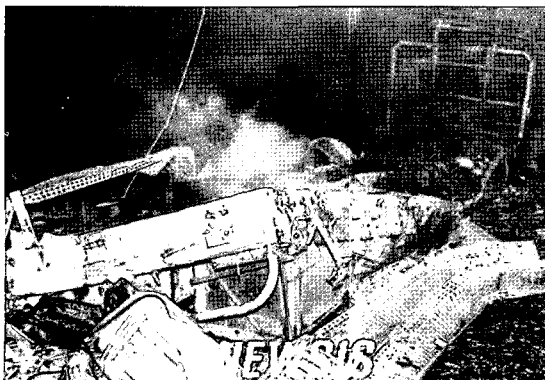


사진 1. 화재에 의해 전소된 차량 전경(경향신문)



사진 2. 화재에 의한 터널내부 전경(연합포토)

## 2. 도로 화재의 유형

도로와 같은 토목 시설물에서의 화재는 도로를 주행하는 차량의 화재에 의해 발생하는 것이 대부분이며, 이러한 차량의 화재는 차량의 외부적인 요인에 의한 화재와 차량의 내부적인 요인에 의한 화재로 나눌 수 있다. 보통의 차량화재는 단순히 차량의 엔진 과열 등과 같은 차량 내부적 원인에 의해 차량이 전소되는 것으로 화재의 범위가 매우 제한적이며, 도로 시설물에 대한 손상 또한 크지 않다.

그러나 차량의 화물이 유류 등의 인화성 물질이거나 2차적인 폭발 등이 수반되는 경우에는 도로 포장 등과 같은 시설물에 영향을 미치는 면적이 크고 손상 정도 또한 심각할 수가 있다. 최근에 몇 건의 사례는 유류 및 유사 휘발유로 인한 2차 화재, 그리고 균용 무기류 등에 의한 폭발로 인하여 별도의 역학조사가 수반될 필요가 있는 것이었다.

## 3. 화재에 의한 콘크리트의 손상

본 절에서는 연구논문과 보고서 등의 문헌에 나타난 화재의 손상을 간단히 기술하기로 한다. 문헌에 나타난 바에 따르면 화재로 인한 고온에 의한 손상에 대한 평가는 크게 두 가지로 구분되어질 수 있는데, 첫째가 상승온도에 의해서 발생하는 온도하중의 역학적 거동에 의한 손상을 재료손상과 더불어 고려하는 것이고, 두 번째는 단순히 재료적 손상만을 고려하는 것이다. 재하하중과 내외부의 구속조건이 지배적인 경우에는 전자의 방법에 의해 화재손상을 평가하여야 하지만, 본 사례의 대상과 같이 단일 슬래브들로 구성된 도로 포장의 특성상 구조적 경계조건이 지배적인 요소가 아닌 경우에는 후자의 방법으로 평가하는 것이 타당한 방법이라고 판단된다. 따라서 본 절에서는 화재로 인한 고온으로 발생하는 시멘트 콘크리트의 재료적 손상에 중점을 두어 기술한다.

화재로 인한 고온으로 야기되는 콘크리트의 손상은

스폴링(spalling, 콘크리트의 탈락), 화학적 결합수의 손실(loss of chemically bonded water), 강도 손실(loss of strength), 기타 손상 등으로 구분되어 진다.

### 3.1 스포링(spalling)

스폴링은 콘크리트의 일부가 떨어져 나가는 현상을 말하며, 화재로 인한 고온에 의해서 발생하며, 일반적으로 다음의 두 가지 원인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>2)</sup>

- 내부 증기압 상승에 의한 원인
- 골재의 온도 팽창에 의한 원인

급작스러운 고온조건이 콘크리트 내의 수분의 확산속도에 비해 빠르게 증가하면서 시멘트 간극 내에 흡수되어 존재하는 자유수의 증기압이 빠르게 상승하게 된다. 이러한 증기압의 상승이 시멘트 구조체의 강도보다 증가하는 경우에 콘크리트의 탈락을 발생시킨다. 이러한 스포링을 폭발성 스포링(explosive spalling)이라 하며, 내부 증기압 상승으로 인한 스포링의 발생 기구를 규명하는데 사용되는 이론에 근거를 두고 있다.

콘크리트는 일반적으로 70%의 부피가 골재로 이루어져 있으며, 나머지 30% 정도가 시멘트 결합체로 이루어져 있다. 화재에 의한 고온은 골재의 부피를 팽창시키고, 시멘트 결합체를 파괴시킨다는 것이 골재의 온도 팽창에 의한 스포링의 원인이다. 내부 증기압을 주요한 원인으로 주장하는 의견에서도 골재의 이러한 팽창을 부가적으로 손상을 확대시키는 원인으로 고려하고 있다.<sup>3)</sup>

### 3.2 화학적 결합수의 손실(loss of chemically bonded water)

수화반응(hydration)에 의한 시멘트 경화체는 주로 Crystalline Calcium Hydroxide(CH)와

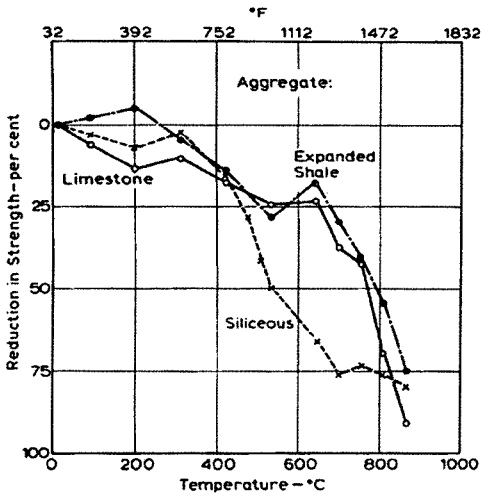
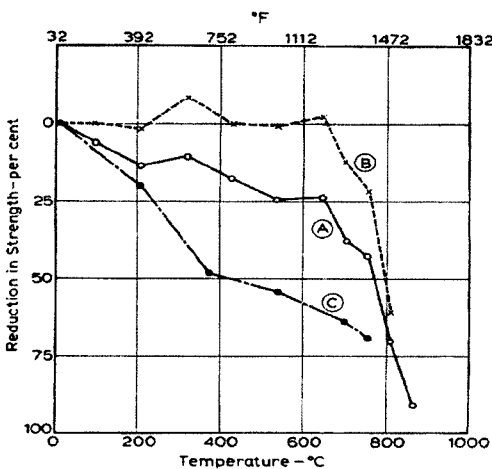


그림 1. 화재온도에 따른 골재 종류별 강도 감소

Calcium Silicate Hydrate(C-S-H)로 이루어져 있다. 스펀링 발생 온도 보다 더 높은 온도 상승에서 C-S-H 사이에 존재하는 화학적 결합수가 분리되어 결합구조가 파괴되는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

### 3.3 강도 손실(loss of strength)

고온에 노출되는 시멘트 경화체의 구조가 파괴되고 간극수 및 결합수의 분리로 인해 콘크리트의 수축



(A) 고온작용후 고온에서 실험, (B) 하중작용시(응력/강도비 0.4) 고온작용후 고온에서 실험, (C) 고온작용후 6일후 상온실험)

그림 2. 화재온도에 따른 실험방법별 강도감소 효과

이 발생한다. 이러한 수축은 천이구간에 미세 균열을 유발하게 되고, 이러한 미세균열은 콘크리트의 탄성 계수를 감소시키고, 강도를 저하시킨다.<sup>5)</sup> 화재온도 손상에 의한 강도손실은 그림 1, 그림2와 같이 골재 종류별로 그리고 하중재하 및 강도실험 온도조건에 따라 다르게 나타난다.<sup>6)</sup>

### 3.4 기타 손상

앞서 기술한 손상 이외에도 표면의 불규칙한 균열 (surface crazing), 종방향 미세 균열, 그리고 400°C 이상에서 철근 주위의 균열 등이 추가적으로 발생한다.

## 4. 파손 상태 조사

포장 슬래브의 파손 조사는 파손의 범위를 파악하기 위한 현장 육안조사와 파손 정도 및 깊이를 알아내기 위한 코어 분석으로 구분하여 수행할 수 있다.

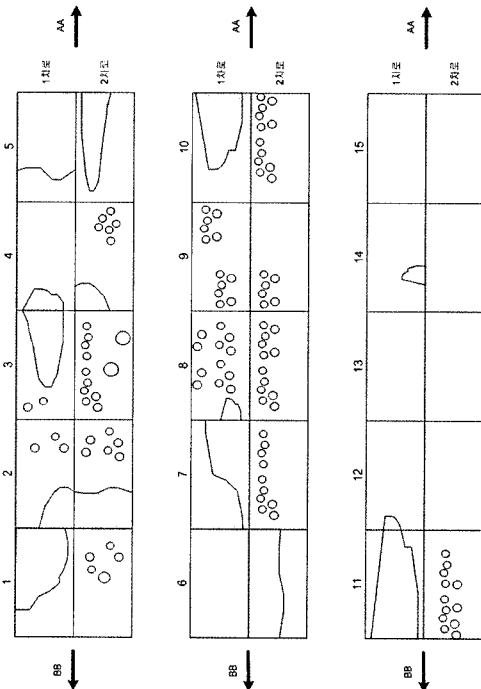


그림 3. 화재손상에 의한 포장 파손 조사 개요도 사례

#### 4.1 손상 구간의 현장 조사<sup>7)</sup>

현장 조사에서는 화재손상구간의 전체적인 현황과 파손의 형태에 대한 검토를 수행한다. 일반적으로 검토 구간의 손상은 발생 원인이 명확하므로, 손상의 범위 및 정도와 일반 현황을 파악하는 정도에서 이루어졌다.

그림 3에서 보는 바와 같이 포장 파손의 현장조사 사례를 볼 수 있는데, 본 사례는 특정 위치의 파손 시점을 기준으로 추월 및 주행차로 각각 약 12개 슬래브가 화재에 의해 손상을 받은 것으로 조사된 것이다. 본 사례에서는 인화물질이 표면에서 타면서 발생한 것으로 판단되는 박리가 슬래브의 거의 전면에 걸쳐있으며, 더불어 부분적인 탈리들이 인화물질의 비산에 의해 발생한 것으로 판단되었다. 탈리된 콘크리트의 깊이는 약 5개소 정도를 측정하였는데,

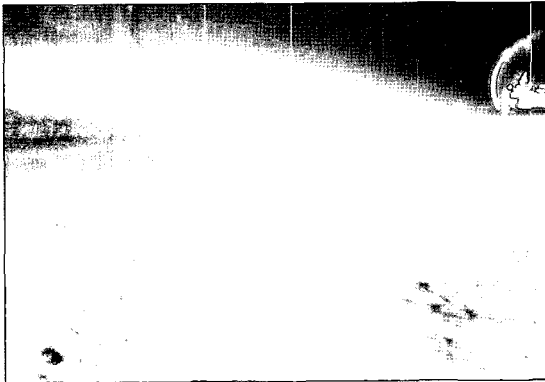


사진 3. 포장 슬래브 전면에 걸친 탈리 전경

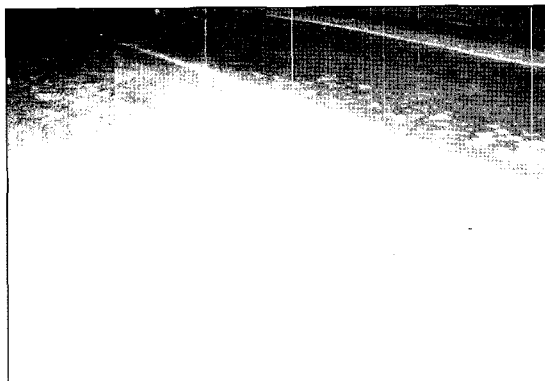


사진 5. 부분적인 탈리가 연속적으로 발생한 전경

0.8~20.9mm 정도를 나타내었고, 부분적으로 30mm 이상의 탈리된 부분도 관측되었다.

#### 4.2 코어 조사

손상깊이 및 정도를 분석하기 위해서 현장에서 채취된 코어는 다음의 사진 7, 사진 8과 같이 가공하여, 표면결함의 깊이조사를 수행하였다. 표면결함의 깊이는 탈리가 일어난 부분에서는 추가적인 손상 깊이를 알아보고, 탈리가 발생하지 않은 부분에서는 어느 정도 깊이까지 손상을 입었는지를 확인하기 위한 목적으로 수행되었다.

##### 4.2.1 중성화 깊이 조사

대상구간의 콘크리트 포장 슬래브의 내구성 측면

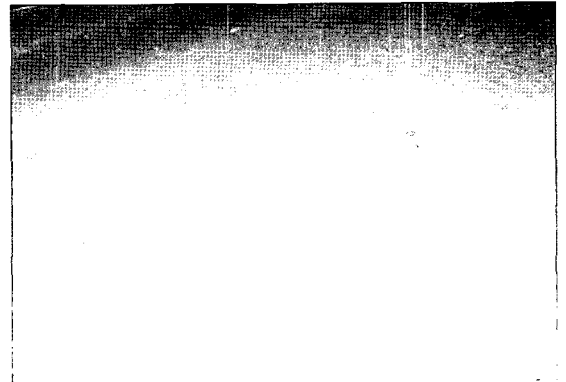


사진 4. 포장슬래브 전면의 탈리와 표면 잔유물 전경

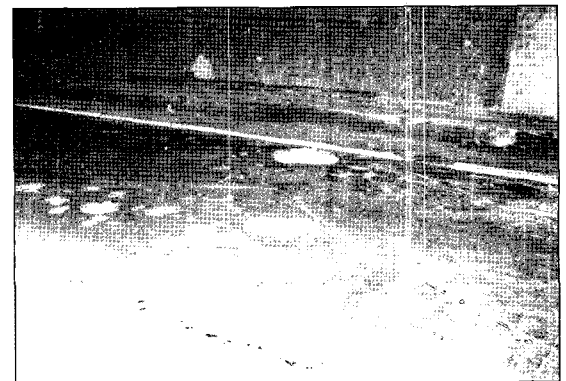


사진 6. 깊이가 깊은 부분적인 탈리 발생 전경

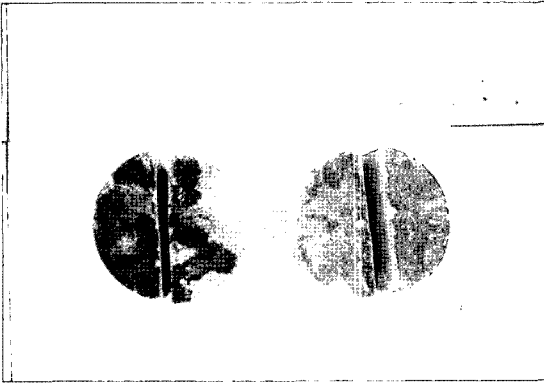


사진 7. 현장채취 코어 사진

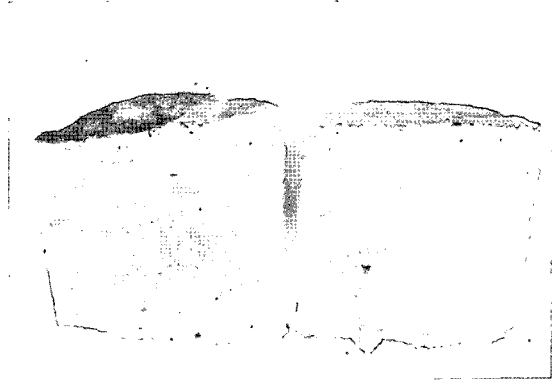


사진 8. 실험실 분석을 위해 가공된 코어

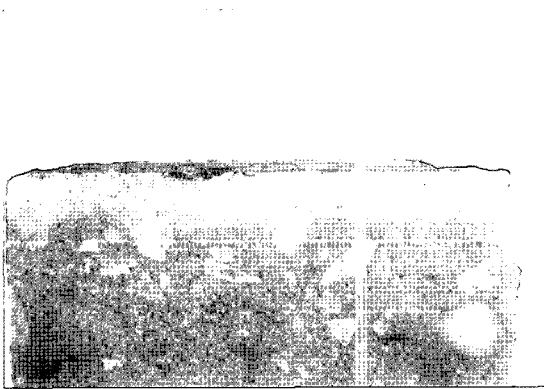


사진 9. 페놀프탈레인 시약 처리된 코어 단면

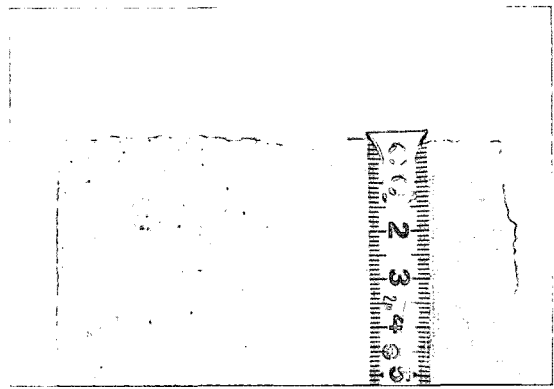


사진 10. 중성화 깊이 조사를 통한 열화깊이 측정

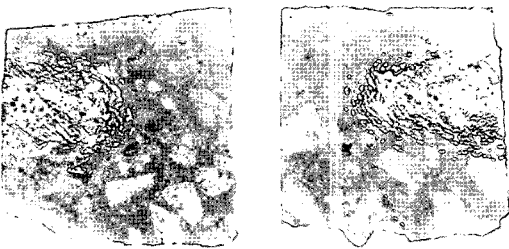
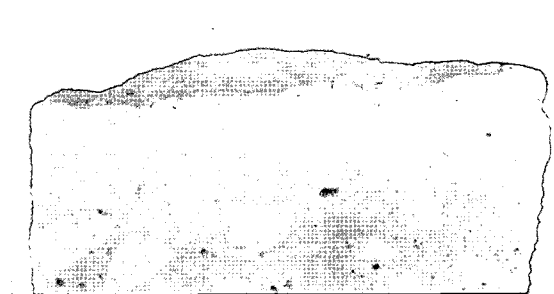


사진 11. 탈리가 발생한 구간의 중성화 깊이 조사



에 대한 검토와 화재손상 깊이 검토를 수행할 목적으로 중성화 깊이에 대한 조사를 실시하였다. 중성화 깊이는 지시약인 페놀프탈레인 용액에 의해 수행하였다. 일반적으로 시멘트 페이스트는 약 알칼리성을 띠게 되는데, 표면이 공기 중이나 수분 내의 이산화

탄소와 결합하여 중성화 된다. 이러한 중성화 깊이는 표면 콘크리트의 밀실한 정도에 대한 평가를 위한 목적으로 수행되며, 내구성 평가를 위한 지표로 사용되는 경우가 많다. 본 내용과 같이 화재손상의 검토에서는 화재에 의한 손상 깊이를 추정하기 위한 방법의

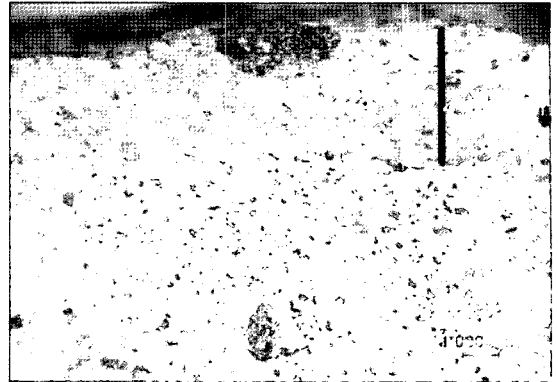


사진 12. 콘크리트 표면의 색상 변화

하나로 사용하였다.

사진 9는 현장 코어 시편을 깊이방향으로 절단하여, 페놀프탈레인 용액에 의한 중성화 깊이를 조사한 사례의 하나로서 거의 대부분의 단면이 알칼리성에 의해 진보라빛을 띠고 있으나, 표면의 약 10mm의 깊이가 중성화 되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 중성화 깊이는 콘크리트의 스폴링이 발생되어 떨어져 나간 부분은 상대적으로 작게 나타났는데, 그 깊이는 약 1mm 내외 정도였다. 스폴링 발생 부분에서는 사진 11에서 보는 바와 같이 중성화된 부분의 대부분이 이미 화재손상으로 떨어져 나가서 작게 나온 것으로 판단된다. 이러한 현상은 지속적인 열의 가해짐에 의한 콘크리트의 물성변화를 주된 이유로 표면이 탈리된 것이 아니라 순간적인 고열에 의한 온도구배 및 간극수의 기화로 인한 팽압이 콘크리트 탈리의 주된 이유였던 것으로 판단된다. 따라서 열에 의한 손상의 깊이가 상대적으로 깊지는 않은 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 색상변화에 의한 손상 깊이 조사

콘크리트가 화재에 의해 높은 열을 받는 경우에 시멘트 페이스트 색상의 변화가 발생한다는 것이 보고되고 있다. 따라서 간단히 높은 고온의 열을 받은 손상 깊이를 추정하는데, 이러한 색상의 변화를 사용할 수 있다. 콘크리트 내에 포함된 석회석이나 철 성분

이 이러한 색상의 변화를 일으키는 것으로 알려져 있는데, 약 232℃(250℃라는 주장도 있음)에서 분홍빛 계열의 색상변화가 관찰되고, 250~300℃에서 이러한 변화는 잘 나타난다.<sup>8)</sup> 그리고 300℃ 이상의 온도에서는 붉은 벽돌색으로 변화하고, 600~900℃ 사이에서는 회색으로 변화한다.<sup>9)</sup>

사진 12에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면의 붉은 색 변화가 일부 층을 이루며 관찰되었는데, 이는 약 250℃ 이상의 온도가 일정 깊이까지 전달된 것을 알 수 있는 결과로 추정할 수 있다. 사진 9에서는 연약한 부위를 타고 최대 약 12mm 깊이까지 250℃ 이상의 열이 전달된 것을 알 수 있다. 이러한 250℃ 이상의 온도는 앞서의 그림 2에서 보는 바와 같이 약 30% 이상의 강도 저하가 발생할 수 있으므로 제거하는 등의 대책이 마련되어야 한다. 표면의 콘크리트가 탈리된 부분에는 별다른 색상변화 깊이가 관측이 안 된 것으로 미루어 손상을 받은 부분이 거의 대부분 탈리가 발생한 것으로 판단되었다.

## 5. 결론

앞서 기술한 바와 같이 시멘트 콘크리트 포장에서의 화재 손상에 대한 역학조사가 수행될 수 있으며, 이를 토대로 합리적인 보수방안의 수립이 가능할 것으로 판단된다. 때로는 당사자들간의 이해가 상충되

는 문제에서 전문기술자의 역학조사는 공정한 기술적 판단에 근거해야 할 것이다. 이러한 기술적 판단이 필요한 사례는 이해 당사자들의 요구가 확대되는 현실 상황에서 계속 증가할 것으로 판단되며, 아울러서 많은 연구자와 전문기술자들의 역할이 절실히 필요할 것으로 판단된다.

**참고문헌**

- 1) Crampton, D., Zhang, Z., Fowler, D. W., and Hudson, W. R., "Development of a formal forensic investigation procedure for Pavements", Center for Transportation Research, University of Texas, 2001.
- 2) Harmathy, T. Z., Fire safety design and concrete, New York, NY : John Wiley and Sons, 1993.
- 3) Canfield, D. V., "Causes of spalling concrete at elevated temperatures," The Fire and Arson Investigator, 34(4) :22-23, 1984.
- 4) Metha, P. K., and Monteiro, P. J. M., Concrete : Structure, properties, and materials, 2nd Ed., Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1993.
- 5) Lin, W. M., Lin, T. D., and Power-Couche, L. J., "Microstructures of fire damaged concrete," ACI Materials Journal, 93(May-June) : 199-205, 1996.
- 6) Abrams, M. S., "Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F," Temperature and Concrete, ACI SP-25 : 33-58, Detroit, Michigan, 1971.
- 7) 한승환, "○○터널 화재 손상 검토 보고서", 도로교통기술원 자문보고서, 한국도로공사, 2005. 11.
- 8) Power-Couch, L., "Fire-damaged concrete-up close." Concrete Repair Digest, 241-242, 1993.
- 9) 한승환, 홍승호, 유태석, "○○고속도로 콘크리트 포장의 화재손상 검토 보고서", 도로교통기술원 자문보고서, 한국도로공사, 2005. 5.

**학회지 광고접수 안내**

본 학회지에 게재할 광고를 모집합니다. 우리 학회지는 계간으로 매회 1,800부를 발간하여 회원과 건설관련 기관에 배포하고 있습니다. 회사 영업신장과 이미지 제고를 원하시는 업체는 우리 학회지를 이용하시기 바랍니다.

광고료 : 표 2, 표 4(300만원)

표 3, 간지(200만원)

※ 상기금액은 연간(4회)광고료임.

사단법인 **한국도로학회**

전화 (02) 3272-1992 전송 (02)3272-1994