콘크리트 교량의 화재 피해사례 및 손상분석

Fire Damage Case and Condition Analysis about Concrete Bridges

이정배* *Jeong-Bae Lee*　　김일곤** *Il-Kon Kim*　　차철준*** *Cheol-Jun Cha*

1. 서론

교량의 화재는 교량하부에 주차된 차량 또는 적치된 발화물질의 연소, 주행차량의 충돌, 전복사고 및 교량상부에 매달린 가스관에서 누출된 가스 폭발 등 여러 가지 원인에 의해 발생된다. 교량에 인접해서 화재가 발생하면 구조물이 손상되고 심할 경우 교량이 붕괴되어 막대한 경제적손실로 이어진다.

2007년 4월 미국 캘리포니아에서는 교량에서 유조차 전복사고로 화재가 발생하여 교량이 붕괴되는 사고가 발생하였다. 이로 인해 일평균 28만명이 이용하는 도로가 폐쇄되어 출퇴근 시 교통체증과 함께 물류, 운송업계에 막대한 피해를 초래하는 등 심각한 사회적 손실을 야기시켰다[1)]<사진 1>.

국내에서도 최근 외곽순환고속도로상에 있는 부천고가교의 하부에서 발생한 유조차에 의한 화재로 강박스거더에 심한 균열과 변형이 발생되어 상부구조를 철거하게 되었다. 현재 가설이 완료되어 개통·운행되고 있지만 일일교통량이 20여만 대에 이르는 부천고가교의 공사기간동안 우리는 극심한 교통체증을 경험하였고, 이로 인한 경제적 손실 또한 만만치 않았으리라 짐작된다<사진 2>. 또 다른 교량화재에 의한 피해사례를 조사해 보면 교량상부에 매단 가스관에서 누출된 가스가 폭발하여 파손된 교량을 철거·재가설한 해외 사례가 눈에 띄며, 원고를 쓰고 있는 오늘도 도심지의 교량화재 소식을 접하면서 여전히 크고 작은 교량화재사고가 끊이지 않을 것 같다는 생각이 든다.

교량하부의 공간 활용 문제 등 화재 발생 원인제거와 화재가 발생할 때 피해를 최소화하는 방안은 다른 차원에서 별도의 논의가 있어야겠지만 교량에 화재가 발생했을 때 화재손상을 받는 교량의 상태를 평가하고 그에 따른 후속처방도 매우 중요한 문제다. 따라서 본 고에서는 교량에 화재가 발생했을 때 구성 재료인 콘크리트와 강재에 미치는 영향, 화재 손상도 조사 및 분석방법, 구조안전성 평가방법에 대해 고찰하고 국내외 교량 화재 사례와 피해정도를 소개함으로써 교량유지관리를 담당하는 엔지니어와 관련분야 종사자들의 이해를 돕고자 한다.

* 정회원, 대진대학교 건설시스템공학과 공학박사
dlwjdqo@lycos.co.kr
** (주)삼림엔지니어링 대표이사
*** 한국시설안전공단 고속도로팀 팀장

2. 화재에 의한 손상분석 및 교량의 피해사례

2.1 콘크리트 교량의 화재 손상조사 및 분석

화재로 인한 교량의 피해정도를 평가하고, 손상범위를 파악하기 위해서 현장조사와 실내시험을 실시한다.

사진 1. 캘리포니아 교량화재

사진 2. 부천고가교 화재

현장조사는 외관조사, 내구성조사, 재하시험 등을 실시하여 화재로 인한 피해범위와 부재의 강성저하 정도를 판단하고 실내시험을 통해 재료의 물성변화와 화재당시 부재가 받은 온도를 추정한다.

<표 1, 2>는 화재손상구간에 대한 조사방법과 적용성을 나타낸 것으로 화재에 의한 피해 범위와 적용목적에 따라 조사방법을 선택할 수 있다.

2.2 화재손상을 받은 교량의 안전성검토

2.2.1 안전성 검토방법

경화된 콘크리트는 일반적으로 열에 대해서 내화성이 뛰어난 재료로 인식되어 왔기 때문에 수화열 이외의 열영향에 대한 상세해석을 수행하지 않았으나 최근 교량 및 터널에서 화재사고가 빈번히 발생되면서 고열에 대한 구조물의 영향 평가가 중요한 문제로 대두되고 있다[2]. 교량에 화재가 발생하여 손상을 입었을 경우 피해정도에 따라 안전성을 검토해야 하며 그 결과에 따라 보수·보강 등의 조치가 필요하다.

화재발생으로 손상을 입은 교량에 대한 안전성을 검토하는 방법은 크게 2가지로 분류 할 수 있다[3]. 첫 번째는 2.1절에서 제시된 방법을 이용하여 화재로 인한 구조물의 온도분포를 조사하고 그 온도에 따른 콘크리트 및 강재의 강도저하곡선을 활용하여 감소된 강도를 추정한다. 그 다음에 감소된 콘크리트와 강재의 강도를 적용하여 계산된 부재의 저항력과 설계단면력을 비교하여 안전성여부를 검토한다. 이 경우 현장에서 콘크리트 코어와 강재의 시료를 채취하여 실내시험을 통해 감소된 강도를 직접 확인하는 것도 좋은 방법이라 할 수 있다.

감소된 강재와 콘크리트의 강도를 적용한 부재의 저항력
≥ 설계단면력

두 번째 방법은 콘크리트 구조물에 적용되는 방법으로 열전달해석에 의해 구조물 내부의 온도분포를 추정하고, 열응력 해석을 수행하여 구조물의 응력상태를 검토하는 것이다. 열응력 해석은 구조물에 열경계조건(온도경계조건 또는 대류경계조건), 탄성계수, 열전도율, 비열, 열팽창계수, 화재시뮬레이션 등의 해석조건을 입력하여 해석을 수행한다. 해석방법은 모델전체의 온도분포를 초기화하고 열전달방정식에 의해 각 절점의 온도를 산정하고 시간단계에 따라 열전달경계조건을 결정한다. 이와 같은 과정을 각 시간단계에 반복하여 해석을 수행하게 된다.

열응력해석을 수행하면 화재시간의 경과에 따른 깊이별 온도분포, 콘크리트의 탈락깊이, 내부의 응력 등을 알 수 있는데 부재내부의 온도분포는 현장 및 실내시험을 통해 추정한 온도와 비교할 수 있으며, 탈락깊이와 내부의 응력분포상태를 통해 부

표 1. 화재손상구간의 조사 및 분석내용

구분	조사 및 분석내용
1. 콘크리트 내구성 조사	비파괴 조사와 코어채취에 의한 조사를 실시
- 비파괴 조사	측정장비를 사용하여 콘크리트 강도 및 품질, 균열 깊이 및 중성화 상태, 철근배근조사 등을 실시
- 코어채취조사	채취된 코어는 실내시험을 실시하여 콘크리트 강도, 염화물 함유량시험 등 콘크리트 품질에 관한 시험을 실시
2. 화재손상조사	화재 손상 조사를 위하여 콘크리트 코어 및 시편을 채취하여 실내 시험을 실시
- 시차열 분석	화상으로 인한 시차열 분석은 건전한 부위와 화상부위의 시차열에 따른 결과를 상호 비교하여 수열온도를 분석
- X-ray 회절분석	XRD를 통하여 화상으로 인한 콘크리트 재료의 성분변화를 조사하여 수열온도를 분석
- SEM	주사현미경을 통하여 화상으로 인한 콘크리트 세부 조직변화를 조사
3. 강재인장시험	강재시편을 채취하여 실내에서 인장시험 실시
4. 재하시험	부재의 내력 및 강성저하 정도를 판단하기 위해 재하시험 실시

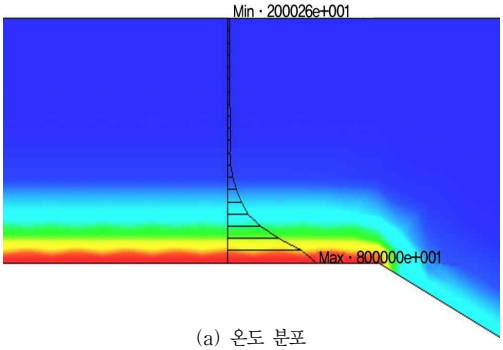
표 2. 조사·분석 기법의 적용성

구분	화재피해	콘크리트			강재특성	부재	
		압축강도	탄성계수	수열온도		내력	강성
육안(외관)조사	○	–	–	○	△	–	–
탄산화시험	–	–	–	◎	–	–	–
반발경도시험	–	◎	–	△	–	–	–
코어/샘플 채취에 의한 실내분석	–	◎	◎	◎	–	–	–
인장시험	–	–	–	–	◎	–	–
재하시험	–	–	–	–	–	◎	–
진동시험	–	–	–	–	–	–	◎

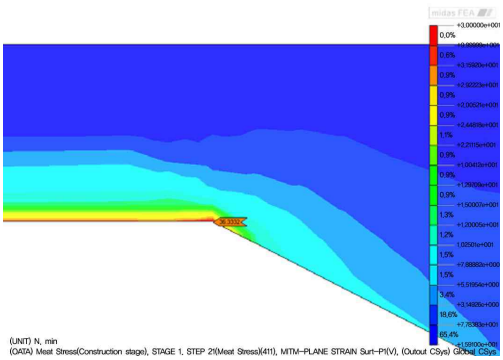
재의 안전성검토와 보수·보강범위를 결정하는 기초자료로 활용할 수 있다.

2.2.2 열응력해석시 유의사항

열응력해석시 초기입력조건으로 화재지속시간, 최고추정온도 및 온도상승·저하속도 등 화재시나리오를 결정해야 한다. 지하구조물 및 건축 구조물의 경우 폐쇄된 공간이라는 구조물의 특수성으로 인하여 단순화된 조건에서 화재실물실험 등을 통한 화재시뮬레이션이 연구되어 왔으며, 이를 적용하여 해석을 수행하고 있다[4]. 그러나 교량의 경우 단면의 기하학적 모양, 구조물 위치 및 방향, 주변 대기상태와 구조물 표면에서 발생하는 대류 등 고려해야 할 인자가 많아 열응력을 해석할 때 실제상황이 잘 반영될 수 있도록 화재시나리오를 결정하여야 한다<그림 1>. 또한 현재 사용되고 있는 대부분의 해석 툴(tool)의 경우 화재손상 모델링시 단면손실을 고려할 수 없기 때문에 실제 화재에 의해 발생하는 구조물내부의 온도분포와 상이한 결과를 얻을 수 있으며, 이로 인해 구조물의 손상을 과소평가할 수 있는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 화재피해를 입은 구조물 거동에 대한 수치해석을 수행할 경우 실제 현상에 더 가까운 결과를 얻으려면 콘크리트의 단면손실을 고려해 열-역학 연동해석을 수행하여야 하며 이에 대한 심층적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다.



(a) 온도 분포



(b) 응력 분포

그림 1. 열해석 결과

2.3 국내외 교량 화재사고 사례와 피해 정도

국내외 화재사고 사례와 피해정도를 분석해 보면 교량 화재로 인한 피해정도는 화재지속시간 및 최고도달온도에 따라 다르지만 일반적으로 내화성능이 뛰어난 콘크리트교량은 화재당시 열의 영향이 철근 또는 내부강선까지 도달하지 않거나 미치는 영향이 작기 때문에 화재에 의한 손상이 표면에 집중된다. 그러나 강교의 경우 화재발생시 부재변형과 심할 경우 교량붕괴로 이어질 수 있어 화재가 발생하면 신속하게 대처해야 한다는 것을 알 수 있다<표 3>.

3. 화재에 의해 손상된 콘크리트 교량의 조사 및 분석

3.1 현장조사

현장조사는 대상시설물의 열화 및 손상 상태를 육안 또는 간단한 기구를 사용하여 조사하는 정밀 안전진단 초기단계의 가장 기본적인 안전진단 과정이다. 정밀한 현장조사를 위하여 크레인 등의 접근 장비를 사용하여 화재구간에 대한 콘크리트의 탈락깊이의 조사, 콘크리트의 반발경도시험 및 중성화 시험을 현장에서 실시하며, 콘크리트의 코어를 채취하여 압축강도 및 탄성계수를 측정한다.

3.1.1 외관 및 콘크리트의 탈락깊이 조사

콘크리트가 고온을 받아 열화된 부위에서는 탈락이 쉽게 발생되고 미세한 균열을 발견할 수 있다. 현장 외관조사를 통해 화재로 인해 탈락되거나 철근이 노출되어 부식되어 있는 경우 콘크리트의 탈락깊이를 측정한다.

3.1.2 반발경도에 의한 강도조사

대상교량의 화재구간에 대한 콘크리트의 표면강도저하를 평가하기 위하여 비파괴시험방법인 반발경도에 의하여 강도를 추정하여 화재에 의한 콘크리트 열화정도의 분포를 평가한다.

반발경도법에 의하여 강도를 추정하면 부위에 따라 강도의 차이가 크게 나타난다. 이는 화재에 의하여 콘크리트가 연화된 부위에서는 반발경도가 적게 나타나기 때문으로 화재손상를 받지 않은 부위에 비해 많게는 50% 정도의 강도저하가 발생되어 설계기준강도를 만족하지 못하는 경우도 있다.

3.1.3 중성화 시험

화재구간에 대한 중성화 진행정도를 평가를 위해서 현장에서 중성화 깊이를 측정한다. 일반적으로 화재가 심한 부위와 표면이 탈락된 부위에서 중성화가 많이 진행되는데, 이는 콘크리트

표 3. 국내외 교량 화재사고 및 피해사례

교량명	구조형식	화재원인	화재에 의한 피해정도
노량대교	PSC BOX Girder	유조차전복(1996)	• 화재지속시간 및 최고추정온도 - 30분, 600 ~ 700℃ • 피해정도 - 켄틸레버 슬래브 하면 박리(h = 2.3 cm, A = 90 m^2) • 구조안전성 검토결과 - PC 박스 PC강선에 열영향이 적어 구조안전성에 문제없음
원효대교 접속교	PSC Beam	교량하부화재(1997)	• 화재지속시간 및 최고추정온도 - 30분, 600 ~ 700℃ • 피해정도 - PSC 빔하면 콘크리트탈락, 철근노출 - 외부보강강선 이완 및 절단 - 일부받침 손상 (※내부강선까지 열영향 없음)
우회고가교	Steel Box Girder	교량하부화재(1999)	• 화재지속시간 및 최고추정온도 - 60분, 약1,000℃ • 피해정도 - 받침장치 3개소 소실, 교체 필요 - 주형 복부판 및 보강재변형(25 ~ 37 mm) - 바닥판 콘크리트 하면 약 30 mm 박리 • 구조검토결과 안전성에 문제없음 - 수직보강재 및 세로보를 증설하고 콘크리트 단면복구 필요
양산고가교	PSC Beam	교량하부화재(2010)	• 화재지속시간 및 최고추정온도 - 약 50분, 약 1000℃ • 피해정도 - 콘크리트 거더 및 바닥판 박리 40 ~ 60 mm, 약 700 m^2 • 구조안전성 검토 결과 안전에 문제없음 - 내부PC강선에 화재 열영향 미미 (실제 인장력 90%적용)
하색가로교	Rahmen	교각에 유조차 충돌 화재	• 화재지속시간 및 최고추정온도 - 약 40분, 약 600℃ • 피해정도 - 바닥판 콘크리트 박리, 철근노출
동림육교	PSC Beam	교량하부 화재	• 피해정도 - 거더 하면 및 측면 콘크리트 박리(최대 70 mm), 철근노출
San Francisco- Oakland Bay Bridge	Steel Box	유조차 전복화재(2007)	• 화재지속시간 및 최고측정온도 - 약 3시간, 1,500℃ • 피해정도 - 교량붕괴
외곽순환고속도로 부천고가교	Steel Box	교량하부 유조차화재(2011)	• 피해정도 - 교량부분철거 · 재가설
○○대교(외국)	Steel Box	교량상부에 매달린 가스관에서 가스누출, 폭발	• 피해정도 - 주형복부판, 강상판 변형 - 수직, 수평보강재 변형 - 상부철거, 재가설

가 고온의 영향을 받으면 콘크리트의 알칼리성을 지배하고 있는 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)이 소실되어 콘크리트가 알칼리성을 상실하기 때문으로 사료된다. 따라서 콘크리트가 화재의 손상을 받지 않은 부위는 공용년수를 고려한 중성화 진행정도보다 적게 중성화가 진행되지만 화재의 손상을 받은 부위는 공용년수를 고려한 중성화 진행정도 보다도 많이 중성화가 진행된다.

3.1.4 콘크리트의 코어강도 및 탄성계수

대상 구조물의 화재발생정도, 외관조사결과 및 작업조건 등을 감안하여 코어채취의 위치를 선정하여 코어를 채취한 후 코어공시체에 의하여 강도를 측정한다. 코어공시체에 의하여 강도를 측정하면 외관조사시 화재손상을 심하게 받은 부위가 외관상 화재의 손상을 적게 받은 부위에 비해 강도가 작게 나타난다. 또한 콘크리트의 탄성계수를 평가하면 화상에 의해 탈락이 심한 부위

의 경우 이론적인 탄성계수에 비해 낮은 값을 나타낸다. 그러나 화재손상을 비교적 적게 받은 부위는 탄성계수의 저하가 적게 나타난다.

3.2 콘크리트의 화재손상에 대한 분석

대상교량의 화재구간에 대한 콘크리트의 손상정도를 분석하기 위하여 콘크리트의 코어공시체 및 콘크리트 시료를 채취하여 시차열분석에 의한 화재온도 분석, 전자현미경에 의한 미세구조 분석 및 X-ray에 의한 반응생성물 분석 등을 통하여 종합적인 화재손상 정도를 평가한다[5].

3.2.1 시차열분석에 의한 화재온도 분석

<그림 2>는 대상교량의 화재부위의 시료를 채취하여 열분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 450℃ 부근의 중량이 감소하고, 600℃ 부근에서 흡열반응이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 600℃ 이하의 온도를 받았음을 추정할 수 있다.

3.2.2 전자현미경에 의한 화재손상 분석

<사진 3, 4>은 화재손상을 받지 않은 건전부위와 화재손상을 받은 열화부위를 전자현미경을 이용하여 촬영한 사진이다. 콘크리트가 고온의 영향을 받은 경우에는 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정에서 경화체에 수축과 팽창이 발생하여 균열을 발생시킨다. 또한 열변화 등을 일으키기 때문에 콘크리트의 표면색이 변화되어 여러 가지의 색상을 띄게 되는데 이것을 상대비교함으로써 콘크리트가 받은 온도를 추정할 수 있으며, 열화상태도 평가할 수 있다. 즉, 200℃까지는 콘크리트의 조직이 크게 변화되지도 않고 가열하지 않은 시료의 조직과 표면색이 거의 같으나 400℃ 이상 가열한 시료부터는 균열과 표면조직의 변화를 뚜렷이 관찰할 수가 있다.

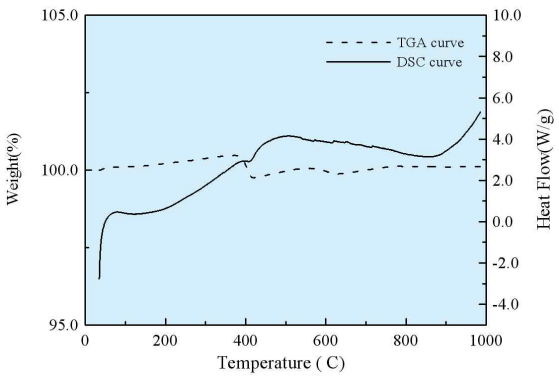


그림 2. 열화부위의 TGA-DSC 분석

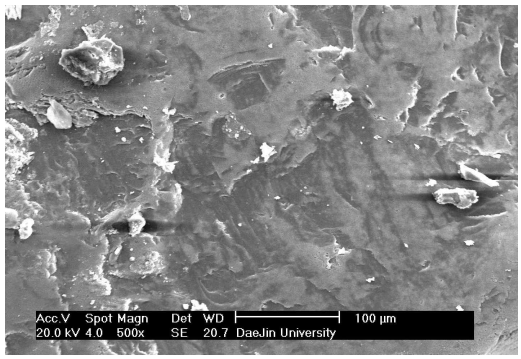


사진 3. 건전부위의 SEM사진

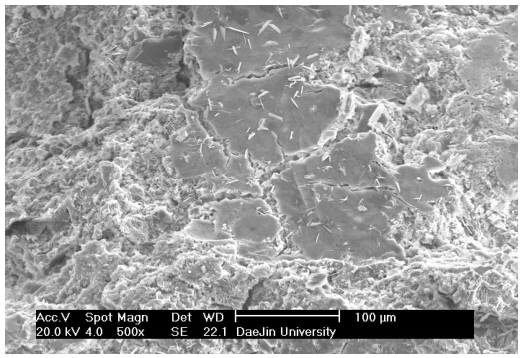


사진 4. 열화부위의 SEM사진

3.2.3 X-ray에 의한 반응생성물 분석

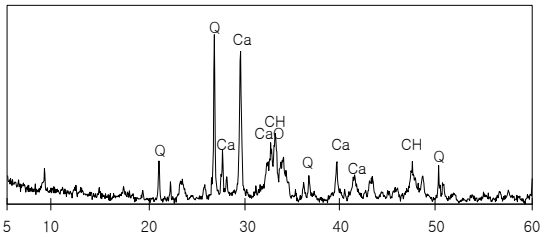
X-ray에 의한 반응생성물 분석은 콘크리트의 반응생성물을 정성적으로 분석하여 시멘트 수화물이 고온에 의해 변화된 것을 정량적인 분석을 통해 콘크리트 교량이 화재로 인해 받은 온도 및 가열된 시간을 추정하는 방법이다. <그림 3>은 화재를 받은 교량에서 채취한 시료를 X-ray회절 분석한 결과이다.

대상 교량의 경우 표면에서는 수산화칼슘이 완전히 분해되어 피크가 없어지고 대신 약한 탄산칼슘과 탄산칼슘이 분해되어 생성된 석회의 피크가 크게 형성됨을 알 수 있었으며, 깊이 30 mm에서는 500℃정도에서 분해되는 수산화칼슘의 피크가 남아 있음을 알 수 있으며, 깊이 60 mm에서는 약한 탄산칼슘 피크와 분해가 되지 않은 수산화칼슘 피크를 확인할 수 있다.

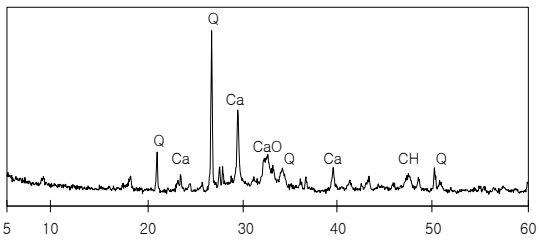
X-ray 회절분석 결과에 의한 화재온도 추정결과를 <표 4>에 나타내었다.

표 4. X-ray 회절분석결과 의한 화재온도 추정결과

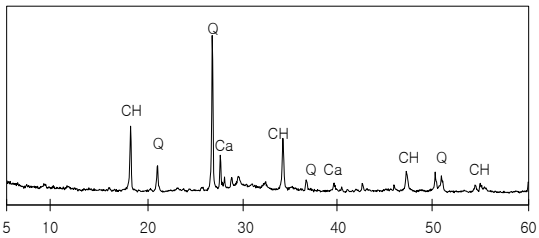
표면에서의 깊이(mm)	콘크리트 화재온도	화재손상정도
0	1000℃ 이상	Ⅳ등급
30	720℃	
60	350℃	



(a) 표면



(b) 표면에서 30 mm



(c) 표면에서 60 mm

그림 3. X-ray 회절분석 결과

3.3 조사 및 시험결과에 대한 종합평가

현장조사, 콘크리트와 철근의 내구성 조사 및 물성시험, 화재에 의한 콘크리트의 온도 분석결과를 종합적으로 고찰하여 콘크리트의 화상깊이, 화재당시의 콘크리트가 받은 온도 및 화재로 인한 콘크리트와 철근의 내구성 및 물성에 대한 영향 등을 종합적으로 평가한다.

3.3.1 화재온도 분석 및 온도 분포도

콘크리트의 화재온도를 추정하기 위하여 실시한 콘크리트의 시차열분석과 X-ray화상분석 등에 의해 화재온도를 추정하여 콘크리트표면으로 부터의 깊이별로 온도분포도를 나타낸 것이 <그림 4>이다.

3.3.2 화재에 의한 콘크리트 내구성 및 물성의 영향

대상 교량의 현장조사와 콘크리트의 물성 및 내구성 실험을 통하여 얻은 자료를 분석한 결과를 <그림 5～7>과 같이 나타낼 수 있다.

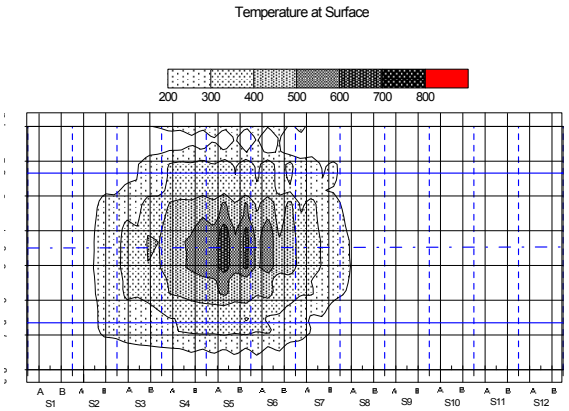


그림 4. 온도 분포도

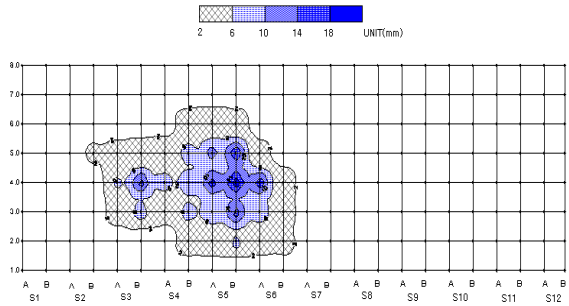


그림 5. 콘크리트 표면의 탈락깊이 분포도

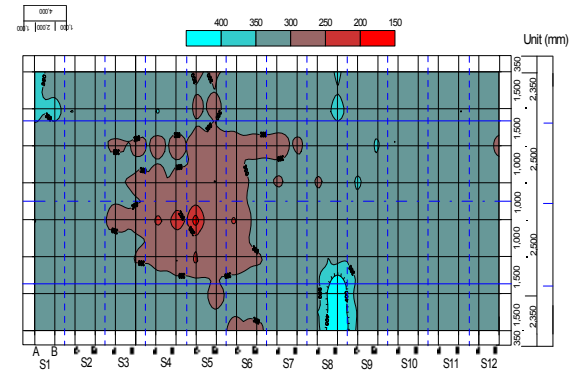


그림 6. 콘크리트의 반발경도에 의한 강도추정 분포도

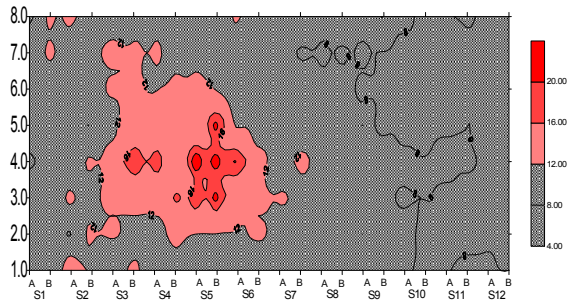


그림 7. 콘크리트의 중성화깊이 분포도

3.3.3 화재에 의한 철근 및 PSC 강재의 영향

화재온도에 따른 철근 및 PSC 강재의 물성변화는 일반적으로 온도가 증가함에 따라서 강재의 강도와 탄성계수가 감소하지만 온도가 약 200℃ 정도까지는 구조용 강재나 PSC 강재는 초기강도의 90% 이상을 보유하고 탄성계수는 그보다 약간 더 감소하는 경향이 있다. 따라서 철근이나 PSC 강재가 묻힌 깊이까지의 온도 분포가 어떠한 지를 조사하면 철근의 물성변화를 추정할 수가 있다<그림 8>.

4. 맺음말

본 고에서는 교량 유지관리를 담당하는 엔지니어와 관련분야 종사자들의 이해를 돕고자 교량에 화재가 발생하였을 때 구조재료에 미치는 영향, 화재손상조사 및 분석방법, 구조안전성평가 방법 및 국내외 화재사고와 피해사례 등을 소개하였다.

교량에 발생된 화재로 인하여 구조물에 손상이 발생하였을 때 손상정도를 명확하게 규명하기 위해서는 상세한 외관조사와 시험분석을 통해 화재에 영향을 받은 재료의 화학적, 기계적 물성변화 및 메커니즘 분석과 실제 화재상황을 모사할 수 있는 열해석 방법 등 해결해야 할 문제들이 많다.

교량화재손상에 대한 평가 및 분석기법이 발전하기 위해서는 보다 정량화된 분석기법의 개발 및 도입이 필요할 것으로 판단되며, 향후 교량화재손상에 대한 평가 및 분석기법이 체계화될 수 있도록 관련 종사자들의 노력이 필요할 것으로 사료된다.

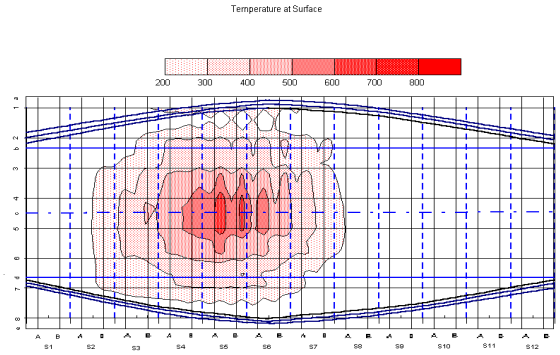


그림 8. PC강선의 위치와 화재온도의 분포도

참고문헌

1. 한국도로공사, '교량하부 화재발생원에 대한 내화방안 및 기준수립연구', 2009. 11.
2. 유상건, '철도터널 콘크리트 구조물의 내화성능 향상에 관한 연구', 2011. 2.
3. 한국시설안전공단, '경부선철도 양산고가교 화재구간 정밀안전진단보고서', 2010. 5.
4. 한국건설기술연구원, '지하구조물 화재손상 복구 가이드라인(안)', 2008. 10.
5. 김성수, 최창식, 김일곤, '유조차 전복에 의한 노량대교 화재구간 콘크리트 열화 및 내구성 조사', 한국구조물진단학회지, Vol. 2, No. 2, 1998. 4, pp. 75 ~ 86.

담당 편집위원 :
정해문(한국도로공사) *haimoon@ex.co.kr*

▶ 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서도 구매가 가능합니다.

콘크리트 양생

| 한국콘크리트학회 편 | 123쪽(B5변형) | ISBN 978-89-6225-335-1 |
| 비회원 12,000원, 회원 9,500원| 출판사 기문당 | 2010. 12. 30 발행 |

BOOK NOTICE

▣ 소 개

본 매뉴얼에는 양생과 관련된 관심사항들이 거의 망라되어 있으며, 내용상으로는 현재까지 발표된 국내외의 연구자료들을 의미가 최대한 정확하게 전달될 수 있도록 번역·발췌·편집하였다. 우선 양생의 필요성, 과정상의 특성, 사용재료 및 요구되는 환경조건 등 개괄적인 내용이 기술되어 있으며, 공법상으로는 외기환경에 따른 특성, 공사종류별 특성 및 부위별 특성에 의하여 각 공법을 분류하여 다루고 있다. 또한 양생과정에서 중간평가와 양생후의 효과를 측정하기 위한 방법들이 소개되어 양생과정이 올바르게 수행되고 있는지 또는 수행되었는지를 판단할 수 있는 지침을 제시하고 있다. 끝으로 현장에서 적용된 사례를 인용하여 실무 매뉴얼로서의 효용성을 높이고자 하였으며, 특히 이 부분은 향후 지속적으로 추가시킬 예정이다.