

화재를 입은 콘크리트구조물의 손상평가방법 및 보수보강 대책

(Evaluation and Repair Methods of Fire-Damaged Concrete Structures)



이 성 민
삼안건설기술공사 철도사업본부장
공학박사 · 구조기술사
smlee@samaneng.com

1. 서론

철도시설물은 토공구간을 제외하고 고가교량, 지하 박스 구조물, 지하 터널, 정거장 구조물 등 대부분 콘크리트구조물로 이루어져 있다. 일반적으로 콘크리트구조물은 강재에 비하여 내화성능이 우수하다고 할 수 있으나, 대구지하철 화재와 같은 지속시간이 긴 화재에 대해서는 콘크리트구조물도 손상을 입을 수밖에 없으며, 때로는 구조물의 붕괴와 같은 심각한 재난을 당할 수도 있다.

철도와 같은 공공시설물에서 화재 발생에 따른 구조물의 손상은 발생 빈도가 매우 낮아 이에 대한 국내에서의 체계적인 연구문헌이나 자료가 부족하여 효율적인 대처가 부족한 현실이다.

따라서 본 강좌에서는 화재 발생에 따른 콘크리트구조물의 손상 메커니즘을 이론적으로 파악하여보고, 실제로 구조물의 기능저하 및 손상정도를 정확히 파악할 수 있는 체계적인 손상평가방법과 이에 따른 보수보강 대책 수립방안을 수록하여 만약의 사태에 대비한 참고가 되고자 한다.

2. 화재손상 평가를 위한 진단방법

화재에 의한 손상을 입은 콘크리트구조물의 안전진단 흐름도는 그림 1과 같다.

▶ 강좌

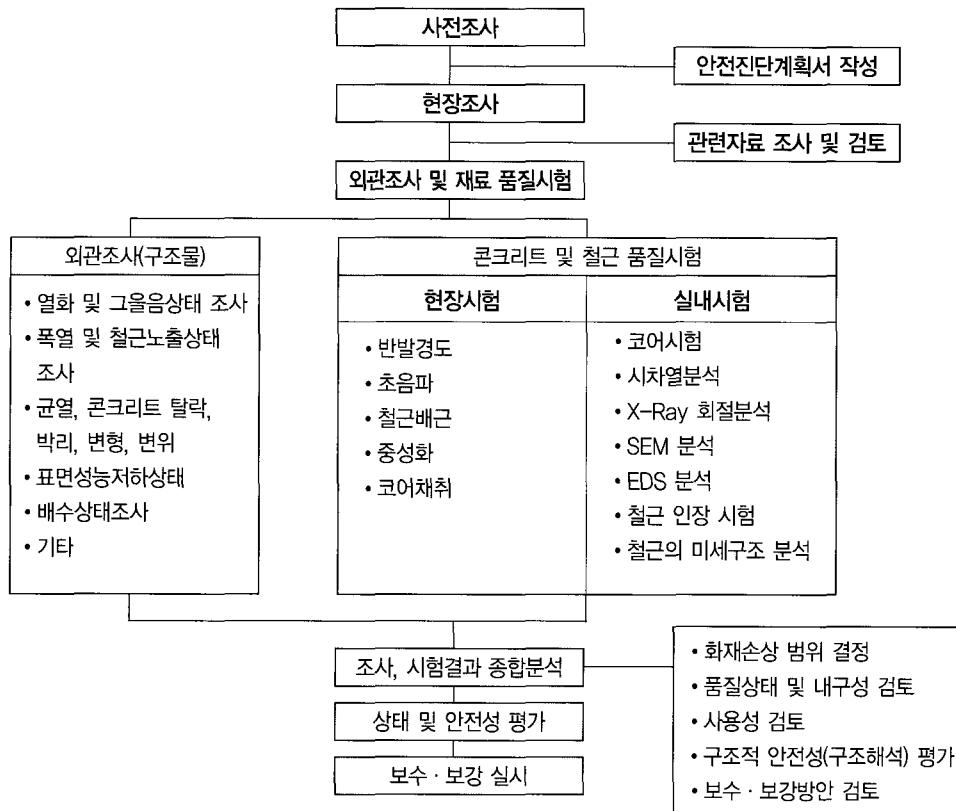


그림 1. 안전진단 흐름도

3. 화재에 의한 재료의 물성변화

3.1 콘크리트의 물성변화

콘크리트구조물이 화재를 당하게 되면 먼저 외관을 관찰하여 상태 파악을 하게 된다. 고온을 받은 콘크리트 표면은 300°C 이하일 때 보통의 콘크리트색, 300~600°C에서는 분홍색, 600~950°C에서는 밝은 회색, 950°C 이상에서는 담황색을 띤다. 시멘트 경화체가 열을 받게 되면 약 100°C 정도까지는 특별한 변화가 없지만, 250~350°C에서는 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 를 함유한 수화생성물이 탈수하고 수축하기 때문에 미세한 균열이 발생한다. 게다가 400~700°C가 되면 콘크리트는 물리적, 화학적으로 변화를 일으키며, 골재는 팽창하고 시멘트페이스트는 수축하여 내부응력이 발생되고, 골재의 종류에 따라서는 폭열하여 파괴되기도 한다.

또한 콘크리트가 고온에 노출되면 온도에 따라 물성치가 변하게 된다.

압축강도는 콘크리트의 온도가 500°C에 이르면 상온의 80% 정도로 떨어지며, 탄성계수도 같은 경향을 나타낸다.

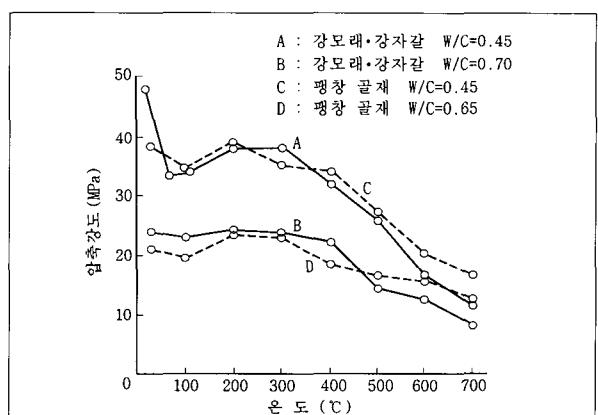


그림 2. 가열온도에 따른 콘크리트의 압축강도

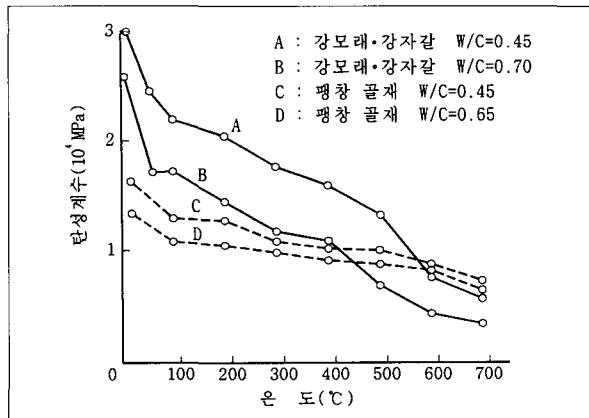


그림 3. 가열온도에 따른 콘크리트의 탄성계수

시멘트의 성질은 화학적으로 다음과 같으므로 콘크리트가 받은 온도를 추정하는데 사용될 수 있다.

- 500~580°C 일때, $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$
- 825°C 일때, $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$

다시 말하면 폐놀프타레인 시약에 적색반응을 보이지 않는 부분은 이미 500°C 이상으로 가열되어 중성화가 상당히 진행된 부위로 내구성에 문제가 생기게 된다.

3.2 철근의 물성변화

화재가 발생하여 철근이 고온에 노출되는 경우 주변 온도에 따라 강도 및 강성이 변하게 된다. 그림 4는 고온에서의 인장강도, 항복강도 및 강성의 변화를 나타낸 것이다. 약 130~200°C까지는 철근의 성질에 큰 변화가 일어나지 않지만 약 200°C를 초과하면 강재의 거동은 비선형적인 특성을 나타낸다. 온도가 증가함에 따라 강도와 강성이 저하되고 약 500°C 이상에서는 심한 변화가 시작된다.

인장강도는 100~300°C 사이에서 변형도 노화현상 (Strain Aging)에 의해서 일시적으로 소폭 증가하는 특이한 현상을 보이나 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하며 약 600°C 정도에서 인장강도와 항복강도는 상온에서의 강도에 절반정도로 감소된다. 강성의 변화는 철근의 변형과 직접적인 관계가 있으므로 매우 중요하다. 600°C 정도에

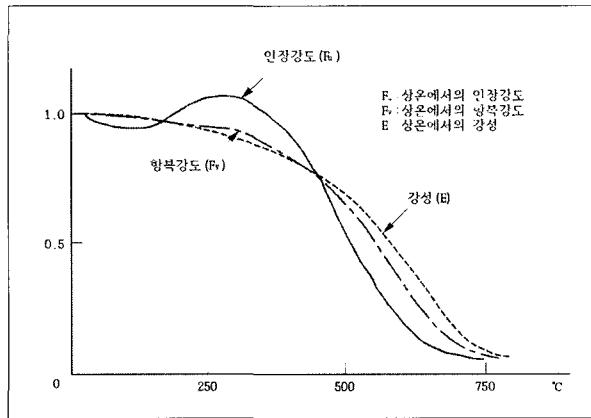


그림 4. 가열온도에 따른 철근의 강도 및 강성

서의 강성은 상온에서의 60% 정도로 감소된다. 또한 온도가 250~300°C의 온도에서는 철근의 크리프(Creep) 현상도 증가된다.

4. 콘크리트 및 철근의 품질시험

화재의 손상을 입은 콘크리트구조물의 안정성 평가와 보수·보강을 위한 재료의 품질시험 중 일반적으로 널리 알려진 시험항목은 생략하고, 콘크리트 및 철근의 화재영향 평가시 반드시 필요한 시험항목에 대하여 소개하고자 한다.

4.1 시차열 분석

콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의해 많은 수화생성물을 함유하고 있으며 이들 수화생성물은 온도의 변화에 따라 결정구조가 변화되며 변화할 때에 에너지를 흡수 또는 방출한다. 또한 수화물의 결합수와 흡착수 등이 이탈하는 과정에서도 열변화 등을 일으키기 때문에 미리 열변화를 일으킨 시료를 열분석 할 경우 그 온도에서는 특별한 에너지의 흡수나 방출은 발생하지 않는다. 따라서 열변화를 일으키지 않은 시료와 열변화를 일으킨 시료를 각기 열분석 하여 비교 분석함으로서 콘크리트의 화재온도를 추정할 수 있다.

주로 시멘트 화학에서 사용되는 방법으로서는 시차열분

» 강좌

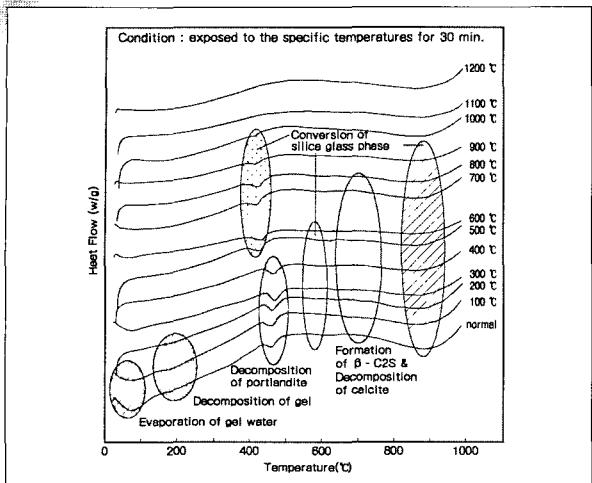


그림 5. 콘크리트 시료에 대한 DSC 분석 사례

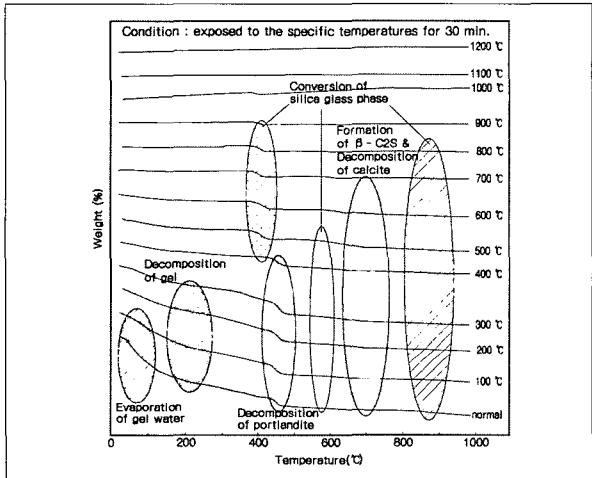


그림 6. 콘크리트 시료에 대한 TGA 분석 사례

석(DSC : Differential Scanning Calorimetry), 열중량 분석(TGA : Thermo Gravimetric Analysis)을 실시하여 콘크리트 중의 시멘트 수화물의 온도에 대한 반응정도를 확인할 때 신뢰성이 좋은 방법이나, 시험과 결과의 분석에 있어 전문적인 지식이 요구되는 시험으로 전문가의 판단이 매우 중요하다.

4.2 X-ray에 의한 반응생성물 분석

X-ray 회절분석은 모든 물질을 구성하고 있는 광물질들을 화학분석에 의하지 않고 쉽게 반응생성물질을 찾을

수 있는 분석방법으로 경화한 콘크리트의 구성물질을 찾기 위하여 시멘트의 수화생성물의 종류를 관찰하고 생성된 수화물의 양을 피크의 강도에 의하여 상대적으로 판단하여 콘크리트의 물성을 추정하고 콘크리트 물성의 이상 원인을 판별하기 위하여 실시한다. 화재에 의한 고온의 영향으로 콘크리트 중의 시멘트수화물의 변화를 정량적으로 측정하여 화재온도와 온도의 작용시간을 추정하기 위하여 각 부위별 표면에서부터 깊이별로 미분말을 채취하여 X-ray 회절분석을 실시한다.

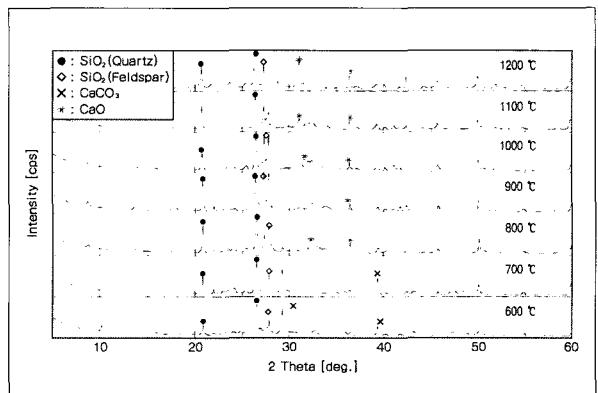


그림 7. X-ray 회절분석 사례

4.3 SEM 및 EDS에 의한 미세구조 분석

주사형 전자현미경(SEM : Scanning Electron Microscope)은 전자빔을 시료표면에 주사시켜 2차 전자를 발생시켜 시료의 입체감 있는 표면상을 얻게 하는 장치이다. SEM 분석과 동시에 에너지 분산형 분석 장치를 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)라 한다.

이것은 분석전자현미경이라고도 하며 SEM의 내부에 분석 장치를 조합하고 전자 현미경관찰을 하면서 미소영역의 원소분석을 하는 장치이다. 즉, 가속된 전자가 시료에 충돌하여 2차적으로 방사하는 특정 X선을 검출하고 그 시료의 원소성분을 정성적, 정량적으로 조사하는 방법이다. 시멘트 수화조직에 대한 원소 성분의 변화와 외부로부터 유입되어 콘크리트내부로 확산되는 물질 등을 검출함으로써 콘크리트 열화상태를 파악한다.

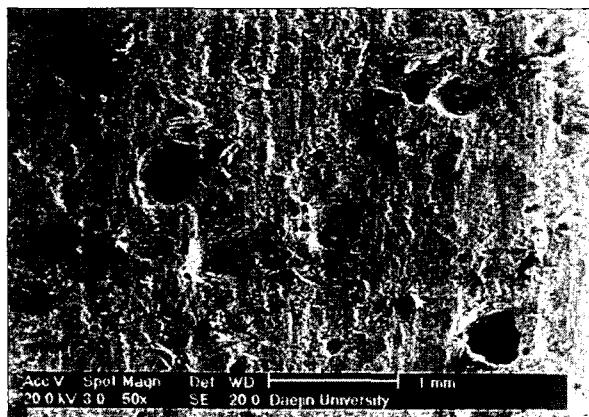


그림 8. 콘크리트 시료의 SEM 분석 사례

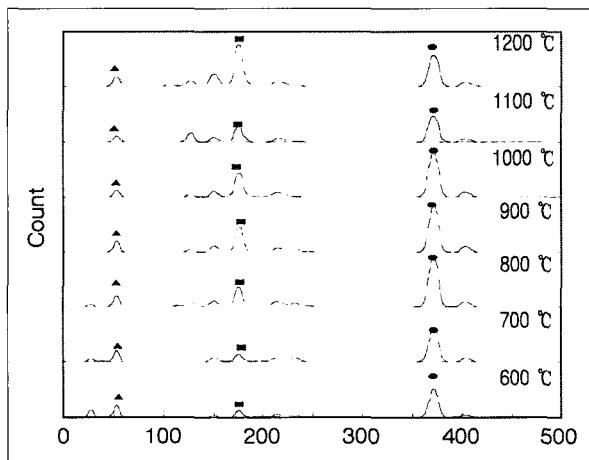


그림 9. 콘크리트 시료의 EDS 분석 사례

5. 화재손상 및 구조물 안전성 평가

5.1 화재손상 부위 평가

현장조사, 콘크리트와 철근의 물성시험 및 화재에 의한 콘크리트의 온도 분석결과를 종합적으로 고찰하여 화재 당시 콘크리트의 위치별, 깊이별로 화상상태를 파악한다.

화상상태 즉 콘크리트가 화재 당시 받은 온도를 추정하여 콘크리트 및 철근의 물성치 변화를 알아내어 구조물의 안전성 평가를 위한 구조계산시 자료로 활용함과 아울러 보수보강의 영역을 설정한다.

5.2 구조물의 안전성 평가

화재로 인한 구조물의 안전성을 검토하고 화재 후 손상 구조물의 보수 및 보강방안 수립을 위하여 구조계산 및 구조해석을 실시한다.

1) 대상구조물의 구조 설계도서 검토

- 하중 산정의 적정성
- 구조설계서와 도면의 일치성 검토
- 화재 발생 전 구조물의 안전성 검토

2) 화재 발생 후 구조물의 안전성 검토

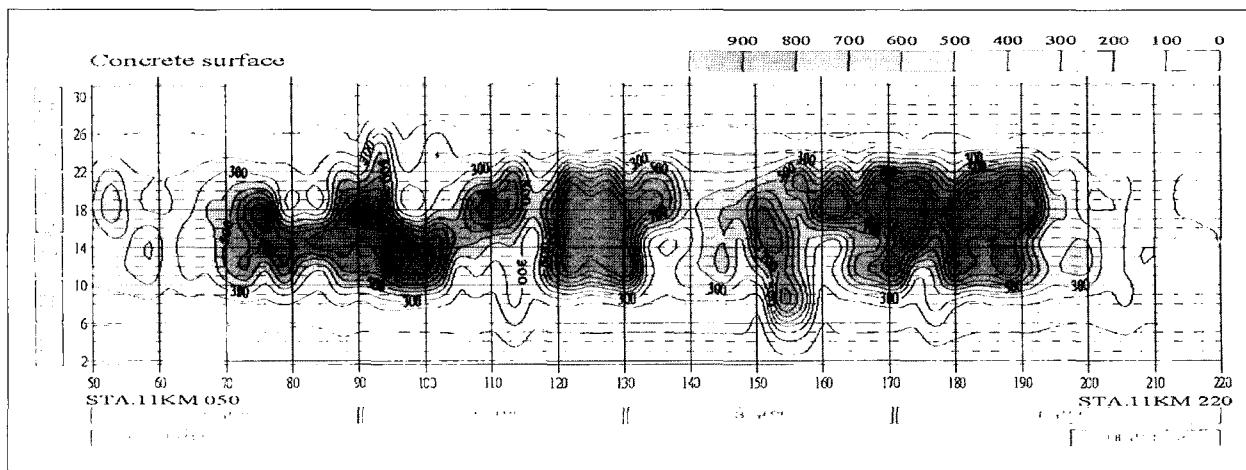


그림 10. 슬래브 표면에서의 화재온도 분포 사례

» 강좌

- 손상 고려 방안 고찰
 - 화재손상을 고려한 구조물의 안전성 검토
- 3) 보강 후 구조물의 안전성 검토
- 보강 필요시 보강 단면의 내하력 검토

록 한다.

6.1 손상부위 콘크리트 재타설

일반적으로 화재에 의해 손상된 콘크리트는 표면부분의 열화된 부위를 제거하면 나머지 부위는 건전한 상태로 남게된다. 이 제거한 콘크리트 대신에 새로운 콘크리트를 재타설하여 원상복구 시키는 방법으로, 주로 기둥 부재에 많이 사용된다.

슬래브나 거더의 경우 하면에서 거꾸로 쳐지기 때문에 브리딩에 의한 신·구 콘크리트의 일체성이 떨어질 수 있으므로 브리딩이 생기지 않도록 콘크리트의 배합 등에 세심한 주의를 기울여야 한다.

6. 보수·보강 대책

정밀안전진단 결과에 의하여 외관상태, 구조물의 화재시 받은 온도 분포 및 재료의 물성치 변화 등 피해 상황을 충분히 파악한 뒤, 현재 상태에서의 구조계산 및 정밀해석을 실시하여 보수·보강의 범위와 규모 등을 정하여야 한다.

보수·보강 공법은 기술성, 시공성, 경제성을 전반적으로 분석하여 내구성 및 유지관리에 유리한 방안을 선정토

표 1. 국내외 화재 피해 사례조사

화재 피해 사례	화재 원인 및 피해내용	보수·보강에 의한 복구방법
제2 다루마찌 고가교 (1975. 3.13)	<ul style="list-style-type: none">고가 밑에 쌓아둔 플라스틱 제품의 처리작업 중 실수로 인한 인화 발생고가교 슬래브 하면의 콘크리트 박리 및 철근 노출기둥과 거더에는 격자망 형태의 균열 다수 발생	<ul style="list-style-type: none">콘크리트가 탈락하고 철근이 노출되어 피해가 심각한 부위는 손상부 제거 및 콘크리트 재타설 실시그 외의 슬래브 및 거더는 몰탈 뿐만 붙임 시행
겐마찌 고가교 (1978. 3. 9)	<ul style="list-style-type: none">겐마찌역 서쪽 고가밑의 상점가 의류점에서 발화슬래브 하면 콘크리트의 박락이 심하고, 철근이 노출하여 열 때문에 늘어난 부분 발생거더는 피복 콘크리트 탈락 및 철근 노출기둥도 일부 콘크리트 탈락	<ul style="list-style-type: none">슬래브를 파이프받침으로 가받침하는 응급 조치 실시강판 압착공법에 의한 복구
무사시노선 니시우라와역 구내 (1980. 6.17)	<ul style="list-style-type: none">니시우라와역 상선 고가 밑 약 40만개의 헌타이어 적치장에서 발화약 50대의 소방차가 출동하여 소화작업을 하였으나, 쉽게 진화가 안되고 40시간 연소가 계속 됨슬래브 하면 콘크리트의 박락이 심하고, 철근은 겹이음 위치에서 떨어져 나와 슬래브 하면보다 밑으로 처져 있음기둥부는 콘크리트 박리 및 균열이 발생하였고, 철근은 부분적으로 노출	<ul style="list-style-type: none">피해가 큰 슬래브는 손상부위 제거 후 콘크리트 재타설피해가 가벼운 부위는 몰탈 뿐만 붙임 실시기둥 및 거더는 들떠있는 부분은 떨어내고, 외측으로 감싸는 철근 콘크리트 보강거더의 경우 콘크리트가 거꾸로 쳐지기 때문에 브리딩이 일어나지 않는 배합 실시
대구지하철 1호선 중앙로역 (2003. 2.28)	<ul style="list-style-type: none">승객이 전동차에 기름을 끼고 불을 지르는 방화로 화재 발생화재에 의한 손상은 지하 3층 승강장층에 집중적으로 발생슬래브는 콘크리트 박리·박락, 철근 노출에 의한 처짐 및 횡방향 균열발생중앙기둥 및 거더의 헌치부도 콘크리트 박리·박락 및 철근 노출	<ul style="list-style-type: none">심한 손상을 입은 중앙기둥 상층부 주보 및 슬래브 주위로 가받침 설치폴리머 몰탈을 혼합후 고압으로 보수 할 단면에 분사시키는 MDF(Macro Defect Free) 스프레이 공법 적용콘크리트 내구성 확보를 위하여 중성화방지제 도포

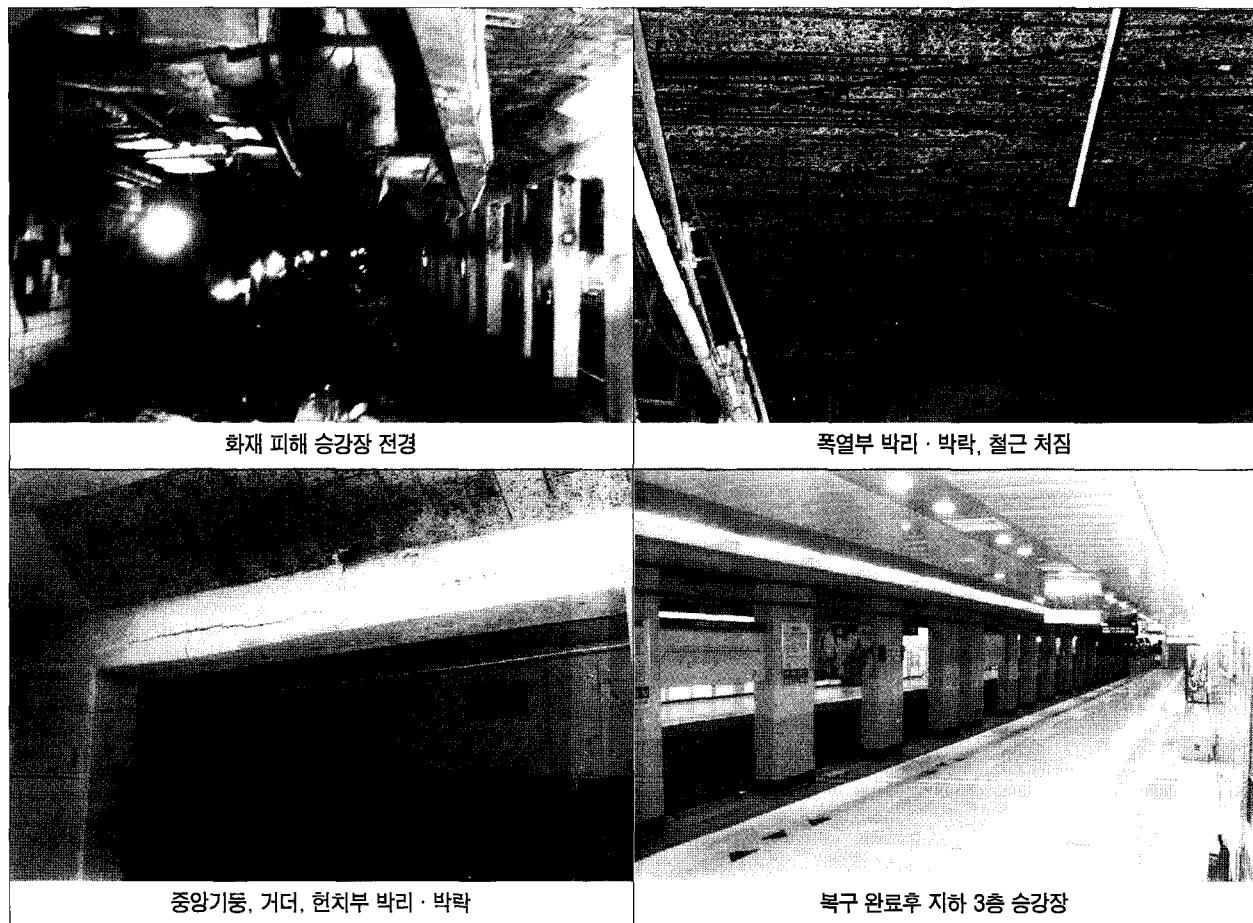


그림 11. 대구지하철 화재 피해 현황

6.2 몰탈 뽑어 붙임

철근이 온전하게 제자리에 위치하여 있고, 또한 철근의 강도 저하가 생기지 않는 정도의 화재 피해로 콘크리트의 피복두께 복구에 많이 사용되는 공법이다.

시공후 수십년이 지나도 건전한 상태인 것으로부터 보수·보강후 얼마 지나지 않아 뽑어 붙이기 몰탈이 떨어진 것도 있어 시공에 충분한 주의가 필요하다. 일본의 무사시노 니시우라와역 화재 피해시 비교적 가벼운 부분의 슬래브 및 거더의 복구에는 강섬유 몰탈의 뽑어 붙이기를 하였다. 이 경우 피복두께의 복구와 동시에 구조물의 강도도 어느 정도 기대할 수 있다.

6.3 강판 압착

손상을 입은 부위의 강도가 저하되어 강도 증진의 목적으로 이 공법을 사용한다.

강판과 구콘크리트 사이에는 일반적으로 에폭시수지를 주입하여 일체화를 도모한다. 에폭시수지의 사용은 공사비가 고가이며, 재차 화재발생시 열에 취약하다는 문제점이 있다.

6.4 구조물 전면 재시공

화재피해가 현저하여 철근 및 콘크리트의 강도 확보가 곤란하며 열차의 운행에 그다지 지장을 주지 않는 경우는

▶ 강좌

구조물을 깨내고 전면 재시공을 실시한다. 이 공법은 구조물의 신뢰성 확보가 가장 확실한 방법이나, 때로는 열차운행의 전면 중단이 필요하다.

7. 맷음말

콘크리트구조물이 화재에 의한 손상을 입으면 먼저 정밀안전진단이 필요하다. 그러나 콘크리트가 화재를 당했을 때 어떠한 손상을 입을 수 있는지 모르면 안전진단의 접근 방향도 어려워지고 이에 따른 인력과 시간의 많은 손실을 초래할 수 있다.

따라서 본 강좌에서는 화재의 피해를 입으면 구조 내력의 근간을 이루는 콘크리트 및 철근의 물성치가 어떻게, 왜 저하되는지를 기술하였으며, 이렇게 저하된 상태를 어떠한 방법으로 측정하는지를 소개하였다. 물론 여기에 소개된 측정방법 외에도 다른 여러 가지가 있을 수 있지만, 최근의 대구지하철 화재 발생시 성공적으로 현장에 적용

된 측정법 위주로 소개하였다.

측정된 결과를 토대로 화재시 콘크리트가 부위별로 화상을 입은 온도를 도표로 표현하고, 측정된 콘크리트 및 철근의 물성치를 구조계산 및 정밀해석에 반영하여 현재의 취약부를 보강하여 내구성 및 안전성이 증대되는 구조물이 될 수 있도록 화재를 입은 구조물에 대한 대처방안을 수록하였다.

또한 화재 손상 규모 및 현장의 상황을 반영한 보수·보강 방법을 소개하여 구조물 복구시 도움이 되도록 하였으며, 국내외의 화재 사례를 수록하여 화재에 대한 경각심과 아울러 이 분야의 좀 더 심화된 연구의 필요성을 알리고자 하였다.

본 강좌가 효율적으로 활용되어 화재로 손상된 구조물이 신속하면서도 정확하게 안전진단 및 보수·보강이 이루어지므로써 안전성과 내구성이 우수한 구조물로 재탄생되는데 다소나마 도움이 되었으면 한다.