

# 화재피해 통신구의 안전진단

## A Safety Evaluation of Cable Tunnel Exposed to Fire

김 지상<sup>1)</sup>, 김 형우<sup>2)</sup>, 김 효환<sup>2)</sup>

Kim, Jee Sang, Kim, Hyung Woo, Kim, Hyo Hwan

### ABSTRACT

A safety evaluation of cable tunnel, which is a concrete box structure with telecommunication facilities in it, exposed to fire is given. The immediate field observation was performed to find out any sign of sudden structural failure. In some region, where the fire intensity was heavy, the spalling of concrete cover in upper slab occurred. Next, more careful investigation was done with proper non-destructive testing methods and structural analysis taking into account the changes in material properties due to fire. It seems that there is no severe damage on concrete, reinforcements and over all structural system.

### 1. 서론

1994년 3월 10일 오후 4시경 서울 지하철 1호선 병행 지하통신구(중로 5가역과 동대문역 사이 약 250m 구간)에 발생한 화재는 약 2시간 가량 진행되었으며, 이로 인한 통신케이블의 손상에 따라 주요 통신망 및 각종 전용회선의 소통에 장애가 유발되어 극심한 혼란을 초래하였다. 그러나, 다행히 국가 기간통신망 및 주요 시외선로등은 단시간 내에 복구되었으며, 일반 가입자 선로 또한 빠른 시일 내에 원상으로 회복되어 통신 장애로 인한 피해를 최소화할 수 있었다.

본 논문은 화재로 인한 통신구 구조물의 손상 여부를 파악하기 위하여 한국통신 선로기술연구소에 의하여 수행된 구조물의 안전진단에 관한 내용을 정리한 것이다. 화재발생 직후 구조물의 안전 여부를 조속히 파악하기 위하여 육안조사를 중심으로 1차 안전진단을 하였다. 그 결과를 토대로 손상이 극심한 부분을 중심으로 콘크리트 코어 및 철근을 현장에서 채취하여 화열에 의한 재료의 특성변화여부를 조사하고, 각 재료의 강도시험과 콘크리트의 중성화시험을 수행하

였다. 또한, 화재 발생시 콘크리트 단면 내의 온도분포를 고려한 구조해석을 수행하여 화재 발생시의 구조물 안전여부를 검토하였으며, 재료의 강도시험결과를 이용한 구조해석을 통하여 추후 구조물을 보수 또는 보강하는데 필요한 기초자료를 제시하였다.

### 2. 한국통신의 통신구 현황 및 사고 개요

한국통신이 건설 운영하고 있는 통신구는 정보화 사회로 발전됨에 따라 그 중요성이 더해가는 통신케이블을 보다 안정된 환경하에 수용하고 케이블의 유지보수를 원활히 할 수 있게 지하에 건설된 콘크리트 구조물로서 상하수도, 전력구 등과 함께 중요한 국가시설물이다. 통신구의 규격은 수용되는 케이블의 수효에 따라 32조형(높이 x 폭 ; 2m x 1.5m)에서 160조형(2.3m x 3.6m)까지의 내부치수를 가지고 있는 구형 또는 원형의 콘크리트 지하구조물이다<sup>(1)</sup>. 이 중 서울 및 부산의 지하철과 함께 건설된 지하철병행 통신구는 지하철 역사의 위치에 따라 지하철의 상하 또는 좌우에 위치하며, 지하철의 시공방법에 따라 개착식 박스형 구조물 또는 터널형 구조물로 건설되는데 그림 1은 통신구의 개략적인

1. 한국통신 선로기술연구소 토목구조연구팀 선임 연구원  
2. 한국통신 선로기술연구소 토목구조연구팀 전임 연구원

형태를 보여주고 있다

이번에 화재가 발생한 통신구는 1974년에 지하철 1호선과 함께 건설된 박스형 철근 콘크리트 구조물로서 이 통신구의 규격은 160조형이다. 사고 지점은 지표면 약 3m깊이에 건설된 통신구 아래로 지하철 1호선이 지나고 있으며, 그 아래로 지하철4호선 및 4호선 병행통신구가 직교하며 지나가는 교차점으로 2개의 통신구는 원통형의 구조물인 수직구로 연결되어 있는데, 그림 2는 이 수직구를 중심으로 사고 지점의 현황을 개략적으로 도시한 것이다. 화재는 통신구를 연결하는 수직구에 설치된 분전반에서 발생한 것으로 추정되고 있는데 불은 수용된 케이블의 외피를 따라 1호선 병행 통신구에 피해를 입혔다.

### 3. 안전진단

화재 발생 통신구의 안전진단은 사고 발생 2일 후인 3월 12일에 육안조사와 슈미트해머를 이용한 반발도법에 의한 강도추정을 하였으며, 3월 24일 코어를 채취하고 압축강도 및 화열 심도를 조사하는 방법으로 이루어졌다. 이 조사는 화재발생시에 통신구 내부의 급격한 온도상승에 따라 발생할 수 있는 구조물의 손상정도를 파악하여 구조물의 안전도를 검토하고 향후 보수 및 보강의 기초자료를 제공하기 위하여 수행되었다.

#### 3.1 외관조사

외관조사는 구조물의 외관을 관찰하는 것과 표면상태 변화를 조사하는 것으로 진행된다. 구조물의 외관관찰은 주철근의 노출상태 및 좌굴여부, 균열의 발생여부 그리고 처짐의 정도를 정성적으로 평가하는 것이다. 콘크리트의 표면상태 변화는 부재 마감재등의 벗겨짐, 표면 요철상태, 박리 등을 조사하고 변색상태를 판정한다. 콘크리트의 표면은 열에 의하여 변색되면 약 300°C 정도의 온도에서는 분홍색을, 600°C 정도의 온도에서는 회색 또는 담황색을 띠게되며, 이는 콘크리트 강도의 손실을 의미하게 되므로 중요한 의미를 갖는다. 철근은 주변의 콘크리트 변색 정도에 따라 가열정도를 판단하게 되는데 450°C 내외의 온도를 받는 경우 다시 냉각되면 항복강도의 손실은 크지 않은 것으로 보고되어 있다<sup>(2)(3)</sup>.

화재발생 통신구는 전체 피해구간 약250m중 150여m 구간에서 콘크리트 표면의 박리 현상이 0.5 - 3cm정도의 두께로 일어났다. 피복콘크리트의 박리는 상부슬래브와 측벽의 윗부분에서 주로 발생하였으며, 일부 피해가 심한 구간에서는 상부 슬래브의 철근이 노출되었다. 이는 화재의 전달매체가 된 통신케이블이 그림 1에 보인 것처럼 주로 측벽의 상단에 위치하여 상부 슬래브에 많은 피해가 일어난 것으로 판단되는데, 사진 1은 피복콘크리트가 박리되어 노출된 철근의 형상을 보여주고 있다.

콘크리트의 표면은 붉은색 또는 담황색으로 변화한 구간이 눈에 띠어 화재온도가 600°C 이상이 되었음을 알 수 있었고, 질은 갈색으로 변한 구간도 있었는데 이는 통신케이블의 연소시 케이블의 외피에 포함된 화학물질에 의한 현상으로 보인다. 그리고 콘크리트의 박리가 일어나지 않은 구간도 일부는 거북등 무늬의 균열이 발생한 것을 관찰할 수 있었는데 사진 2는 그 모습을 촬영한 것으로 화재시 그늘음이 붙어 균열의 형상이 확연히 드러나 있다.

#### 3.2 슈미트 해머에 의한 압축강도 추정

화재로 인한 콘크리트의 강도변화를 정량적으로 파악하기 위하여 비파괴검사 중 간단한 방법인 슈미트 해머를 이용한 강도 추정방법을 적용하였는데 화재로 피해를 입은 경우 전술한 바와 같이 표면콘크리트의 열화 현상이 심하므로 주의를 기울여야한다. 즉, 콘크리트의 표면이나 마감재를 완전히 제거한 후에 균열이나 박리현상이 생긴 곳을 피하여 타격하여야하고, 이 시험의 결과를 과신하여서는 안되며 코어 채취실험을 병행하는 것이 좋다. 표 1은 통신구의 화재발생 구간에 대한 슈미트 해머시험의 결과를 정리하여 놓은 것인데, 표 1의 측정점은 그림 2에 표시되어 있다. 표 1에 나타난 측정번호 중 1번은 화재의 피해를 입지 않은 것으로 판단되는 지점에 대한 시험결과이며, 측정 2번부터 12번까지가 화재로 인하여 표면의 손상을 입은 지점에 대한 측정자료이다. 표 1에서 압축강도가 낮은 것으로 나타난 측정6 및 측정12는 외관조사에서도 표면의 열화가 심하고 철근이 다수 노출된 것으로 나타났다. 또, 반발도 시험법에 의하여 추정된 압축강도의 평균값은 237.0 kg/cm<sup>2</sup>로서 이 값은 설계기준강도(210.0 kg/cm<sup>2</sup>)를 상

회하고 있으나, 1993년도에 한국통신 선로기술 연구소에서 수행한 안전진단<sup>(4)</sup>의 결과에 따르는 추정압축강도 ( $264.1 \text{ kg/cm}^2$ )와 비교할 때 10% 정도의 강도감소가 화재로 인하여 일어났음을 알 수 있었다. 그러나, 비파괴 검사의 결과에 대한 신뢰성이 그리 높지 않은 점을 고려하면 별도의 코어 압축강도 실험을 수행하는 것이 필요한 것으로 판단되어 코어실험을 병행하기로 하였다.

표 1. 통신구의 비파괴검사 결과

측점	반발도( $R_o$ )	압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )	보정강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )
1	54.52(상부)	464.0	278.4
"	47.05(측벽)	400.0	240.0
2	58.35(상부)	529.0	317.4
6	43.65(측벽)	336.0	201.6
11	47.85(측벽)	400.0	240.0
12	41.25(측벽)	305.0	183.0
"	47.85(상부)	400.0	240.0

### 3.3 콘크리트 코어의 강도시험 및 중성화 시험

1차 안전진단 결과 통신구에 화재로 인한 손상이 발생하였음을 확인하고 이를 정량적으로 평가하기 위하여 비파괴 검사의 결과에서 손상을 입은 것으로 보이는 구간에 대하여 코어를 채취하여 강도시험과 중성화시험을 수행하였다.

슈미트해머 시험법과 외관 조사의 결과를 참고로 하여 측정 11번 및 12번 지점에서 코어를 채취하여 압축강도 시험 및 중성화시험을 하여 콘크리트의 강도저하 및 손상여부를 조사하였다. 코어는 통신구의 벽체에서 모두 15개를 채취하였는데 코어의 크기는 지름 75mm의 비트를 이용하여 길이가 20cm이상 되도록 하였다. 코어의 강도시험은 규정된 콘크리트 압축강도 시험방법(KS F 2405)에 따랐고, 화재발생으로 인한 표면부위의 열화를 고려하여 표면부터 5cm 정도를 절단하고 시편의 전체길이를 150mm로 조정한 후 켈핑을 실시하였다. 표 2는 코어의 압축강도 시험결과를 정리한 것으로 측정된 압축강도의 변동계수는 11.4%인데 이 값은 비교적 관리가 잘된 경우의 변동계수라 할 수 있으므로<sup>(5)</sup> 설계 강도보다 감소된 부분은 화재로 인한 피해로 볼 수 있을 것으로 판단된다.

화재를 입은 콘크리트에 대하여 중성화 깊이

또는 탄산가스 재흡수량 등을 측정하거나, X선 회절분석방법등을 이용하여 화재에 의한 피해정도를 정성적으로 추정할 수 있다. 중성화 깊이는 1% 페놀프탈레인 용액을 콘크리트 파단면에 분무하여 변색여부를 관찰하여 추정할 수 있는데 적색으로 변화하지 않은 부분은 적어도  $500^\circ\text{C}$  이하라고 할 수 있다<sup>(6)</sup>. 일반적으로 콘크리트의 중성화는 시간의 진행에 따라 계속해서 일어나므로 본 연구에서는 현장에서 채취한 코어에 대하여 바로 페놀프탈레인 용액을 분무하여 변색여부를 관찰하였다. 5개의 시편에 대하여 관찰한 결과 모든 시편이 표면에서부터 2-3cm정도 변색되지 않는 구간이 있었는데, '93년에 수행되었던 연구결과<sup>(4)</sup>와 비교하면 당시 동일 지역의 시험결과 중성화는 거의 일어나지 않았었으므로 이번 시험에 나타난 중성화의 진행은 대부분 화재로 인한 피해인 것으로 판단된다. 따라서, 향후 보수 또는 보강시 손상된 콘크리트를 제거하는 것이 필요할 경우 그 두께는 최소한 3cm 이상이 되어야할 것이다.

표 2. 코어 압축강도 시험 결과

시료번호	파괴하중 (kg)	압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )
11-1	7848.0	216.1
11-2	5696.0	156.8
11-3	7493.0	206.3
11-4	5729.0	157.8
11-5	7051.0	194.2
11-6	7759.0	213.6
12-1	7365.0	202.8
12-2	6752.0	185.9
12-3	7936.0	218.5
12-4	6465.0	178.0
12-5	6031.0	166.1
12-6	7240.0	199.4
12-7	5729.0	157.8
12-8	7258.0	199.9
평균		189.5

## 4. 구조해석

안전진단시 행해지는 구조해석은 대부분 시공 당시의 구조계산서를 중심으로 진단 시점의 재료성질 변화 및 단면 형상의 변화 그리고 하중조건의 변화 등을 고려하여 수행하게 되며 그

결과에 따라 보수 혹은 보강 여부를 결정하기 위한 목적으로 이루어진다. 본 연구에서는 대상 구조물인 통신구에 화재 발생 당시 고온이 작용하였을 때 구조물의 단면력 손상 정도를 파악하고, 향후 보수 보강의 기초자료로 활용할 수 있도록 추정된 재료특성의 변화를 고려한 구조해석을 수행하여 구조물 저항능력의 감소를 조사하였다. 그림 3은 구조물에 작용하는 하중 및 구조물의 모델을 도시한 것이다.

#### 4.1 화재 발생시 통신구 구조물의 내하력 검토

연속구조물 또는 부정정구조물은 화재시 온도 기울기와 고온에 의한 부재물성의 변화에 의한 응력의 재분배가 진행된다. 화재부위가 매우 작거나 양단이 구속되어 있으면 화재노출면부위가 팽창하려는 힘을 억제하는 압축력(thrust)이 작용한다<sup>(7)</sup>. 특히 통신구와 같이 부재의 두께가 큰 구조물에서는 압축력이 커서 화재도중 파괴 가능성이 매우 희박하다. 이러한 열팽창 구속효과는 외부 프리스트레싱효과와 비슷하며, 모멘트의 재분배를 유발하여 정모멘트는 감소시키는 반면 부모멘트는 증가하게 한다. 화재진행중 부재근의 온도는 정철근보다 상대적으로 낮아 강도손실이 적으며 따라서 이러한 부모멘트의 증가는 일반적으로 수용될 수 있다. 통신구는 지하매설구조물 특성상 변위가 구속되어 있으며 또한 사방으로 토압을 받고 있으므로 화재시 안전성을 점검하는 데 있어 슬랩과 벽체를 연속구조물의 보와 같이 취급할 수 있다.

본 연구에서는 통신구 구조물이 화염에 노출된 시간을 120-180분으로 추정하고, 화재지속시간에 따른 콘크리트 내부온도분포<sup>(7)</sup>를 근거로 온도에 따른 철근과 콘크리트의 강도손실을 반영하여 모멘트 저항능력(강도 설계 개념)을 계산하고 그 결과를 표 3에 정리하였다. 콘크리트 구성재료중 골재가 미치는 영향은 매우 큰데, 특히 석영계 골재의 열팽창계수가 석회암계 골재의 열팽창계수 보다 크기 때문에 석영계 골재를 사용한 콘크리트의 경우로 저항능력을 계산하였다.

표 3에서 알 수 있듯이 구조물의 저항능력은 화재로 인하여 50% 정도 감소되었을 수 있으므로, 허용응력법으로 설계된 사고통신구는 소요의 안전율(safety margin)을 확보할 수 있게 보강이 필요한 것으로 판단된다.

표 3 화재시의 부재저항능력(단위:ton-m)

구분		상부슬래브 중양부	상부슬래브 단부
작용 단면력		9.05	7.69
설계저항능력		18.85	18.85
지속시간별 화재후 저항능력	2시간	15.27	18.60
	3시간	9.43	18.52

#### 4.2 화재 후 통신구 구조물의 내하력 검토

통신구는 화재 발생시의 고온에 구조물의 붕괴 없이 저항할 수 있었으나 본 논문의 3절에 서술하였듯이 콘크리트를 포함한 구성재료의 저항능력 감소가 일어났으므로 구조물의 현재 저항능력을 정확히 평가하여 이를 근거로 적절한 보강 공법을 수립하여야한다. 본 연구의 현장조사 및 코어 시험에 의하면 콘크리트의 압축강도는 설계강도보다 작은 190kg/cm<sup>2</sup>인 것으로 나타났고, 그 외 단면치수나 철근 성질의 변화는 특별히 보이지 않았으며, 설계시와 비교할 때 하중조건 변화 역시 없으므로 설계시의 자료와 저하된 콘크리트 강도에 대하여 구조해석을 수행하였는데, 표 4는 구조물의 현재 상태의 저항능력을 산정하여 저항/하중의 비를 비교하여 정리한 것이다. 여기서 당초 통신구의 설계가 허용응력법으로 이루어졌음을 고려하여 허용응력법과 강도설계법의 2가지 방법에 대하여 검토하였는데, 강도설계법은 현행 시방서에 의한 하중계수 및 강도계수를 적용하였다.

표 4 화재 전후의 부재 강도 변화  
(단위: ton-m)

구분		화재 전	화재 후
슬래브	강도설계법	1.43	1.42
	허용응력법	1.29	1.19
중양부	강도설계법	1.58	1.31
	허용응력법	1.52	1.06

## 5. 결론

본 논문은 화재 피해를 입은 통신구 구조물에 대하여 한국통신 선로기술연구소가 수행한 안전진단에 관한 내용을 정리한 것이다. 화재발생 직후 구조물의 안전 여부를 조속히 파악하기 위

하여 육안조사를 중심으로 1차 안전진단을 하였다. 그 결과를 토대로 손상이 극심한 부분을 중심으로 콘크리트 코어를 현장에서 채취하여 강도시험과 중성화시험을 수행하였으며, 구조해석을 수행하여 화재 발생시 구조물의 내하력과 화재 발생 후의 내하력을 검토하였다. 이 연구의 결과로부터 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 통신구내 화재로 인하여 콘크리트 표면의 박리현상이 발생하고 철근이 다수 노출되었다. 특히 표면의 박리는 벽체와 상부슬래브가 만나는 지점에서 주로 발생하였다.

2. 코어 실험을 통하여 구한 콘크리트 압축강도값( $190\text{kg/cm}^2$ )의 저하를 확인할 수 있었으며, 페놀프탈레인 용액 분무 시험을 통하여 관찰한 콘크리트 중성화 깊이는 화재의 피해가 심한 부분에서는 3cm 이상이 되었다.

3. 화재시 허용응력 설계법에 의하여 설계된 부재의 저항능력은 ACI의 규정을 따라 검토한 결과 설계시의 능력보다 1/2로 감소되었으나 작용중보다는 크지않아 구조물이 소요의 안전율을 갖고 있음을 알 수 있었다.

4. 콘크리트 및 철근은 화재의 영향때문에 그 성질이 변하여 구조물의 저항능력이 일부 상실되었으므로 설계시의 안전율을 확보할 수 할 수 있는 적절한 보강공법의 적용이 필요한 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. 한국통신, 통신토목 설계기준, 1993
2. A.K.Tovey, "Assessment and Repair of Fire-Damaged Concrete Structures - an Update," Repair and Rehabilitation of Concrete Structures, ACI Seminar Course Manual, pp.276-283, 1986
3. Richard A.Muenow and Melvin S.Abrams, "Nondestructive Testing Methods for Evaluating Damage and Repair of Concrete Exposed to Fire," Repair and Rehabilitation of Concrete Structures, ACI Seminar Course Manual, pp.284-295, 1986
4. 한국통신 선로기술연구소, 콘크리트 구조물의 안전진단 및 보강공법 연구(중간보고서), 1993

5. 박 승범, "콘크리트의 품질관리 및 품질검사," 시멘트 "콘크리트의 품질시험 및 품질관리", 한국콘크리트학회 제3회 기술강좌, 1994

6. 牟田紀一郎, "火害と補修" "補強," 콘크리트工學, vol.31, no.7, pp.83-86, 1993.7

7. ACI Committee 216, "Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements," ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE 1988 PART 3, 1988

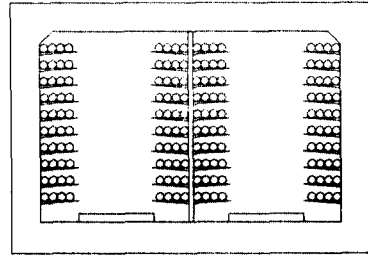


그림 1. 통신구의 개략적인 형태 (160조형)

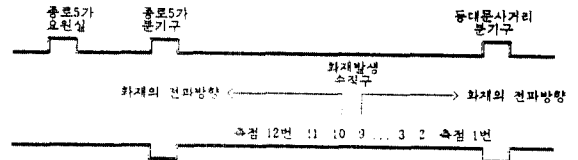


그림 2. 화재현장 개요도

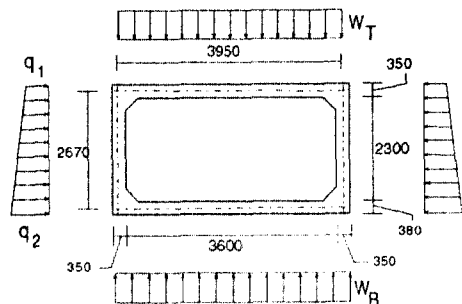


그림 3. 통신구에 작용하는 하중 및 구조물의 모델

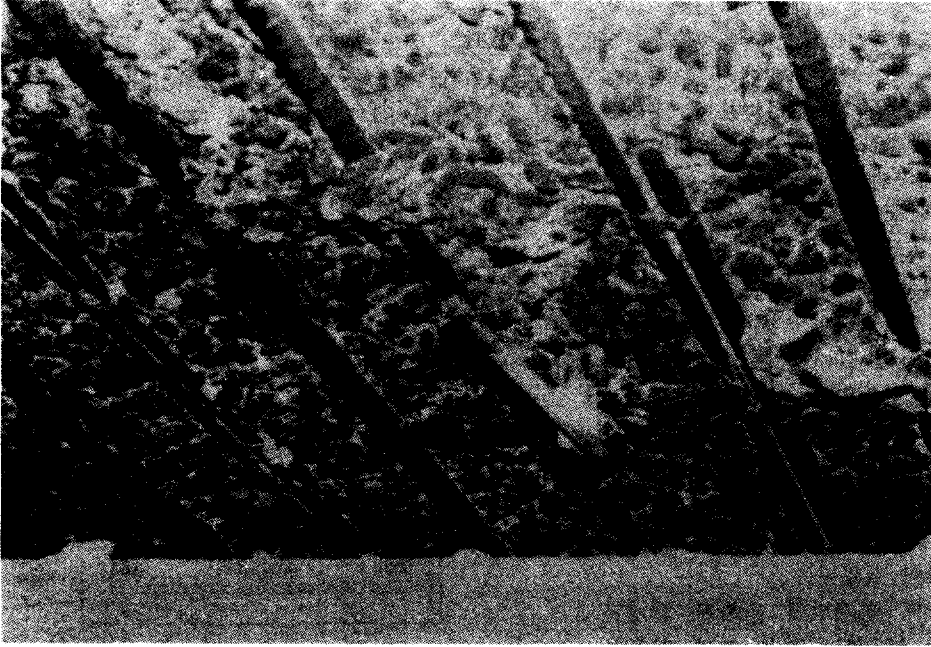


사진 1. 피복 콘크리트의 박리로 노출된 철근



사진 2. 콘크리트 표면의 균열 형상