

건축물의 화재피해 진단 및 보수

(사)일본건축학회 방화위원회 화재진단보수 소위원회

1. 서론

화재가 발생한 건물에서는 화재피해(이하, 화재[火害])의 정도에 따라 대규모 보수 및 보강을 해야 하는 경우가 생긴다. 특히 최근에는 내화피복과 방화구획이 불완전하게 건설 중인 건물에서 화재가 증가하여 피해가 커지는 경향이 있다. 또한, 출화원인의 1위를 점유하고 있는 방화는 화재규모가 작은 경우에서 전소되는 경우까지 그 피해의 폭이 넓다. 피해의 정도가 작다면 소규모 보수로 끝나지만, 건물소유주와 사용자로서는 화재의 사후처리 규모에 따라 막대한 비용지출에 곤란을 겪는 경우도 발생한다. 화재가 발생한 건물에서는 재사용 여부를 묻는 조사·진단을 실시한 후, 최적의 보수·보강 등을 수행할 필요가 있다. 그러기 위해서는 보수의 실시 여부를 파악하는 것이 가장 중요하며, 보수실시 여부를 진단하는 기술개발이 요구되고 있다.

또한 손해보험업계로서는 보험금 지급이 지나치게 증가하면 건전한 운영에 중대한 영향을 미치기 때문에 적절한 화재조사기술의 발전이 요망되고 있다. 이러한 배경에서 (사)일본건축학회에서는 방화위원회 산하에 화재[火害]진단보수 소위원회를 2001년에 설치하고, 「건축물의 화재[火害]진단 및 보수·보강방법」으로 그 성과를 정리한 바 있다. 본 고에서는 그 개요에 대해 서술한다.

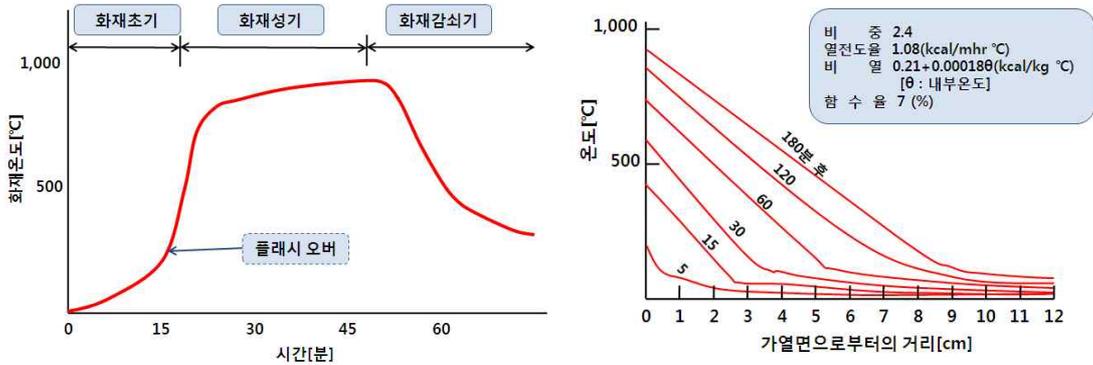
2. 건축물 구조구체의 화재피해

2.1 화재피해

철근콘크리트조와 내화피복철골조 등의 내화건축물에서의 화재는 대개의 경우 화재에 노출되어도 구조체 그 자체는 연소되지 않으며, 열에 의한 변형도 적다. 그러기 때문에 화재발생 후 표면적으로는 벽과 천정의 콘크리트가 그을리거나 변색되는 정도이며, 구조적으로는 국부적인 손상에 머무르고 건물 자체는 화재 전의 상태로 잔존한다. 따라서 화재 후의 내화건축물은 대부분 비교적 간편한 보수에 의해서 재사용을 도모하는 예가 있다. 드물게는 화재의 규모에 의해서 구조체도 큰 화재[火害]를 받는 경우도 있고, 화재의 규모, 화재[火害]의 상황 등에 따라 적절한 보수 또는 보강대책을 강구하는 것이 요구된다.

본 장에서는 내화건축물에서의 화재성상에 대한 개략과 화재피해의 실태를 서술한다.

일반적으로 화재는 연소에 필요한 공기가 자유롭게 공급되는 모닥불과 같은 ‘연료지배형 화재’와 내화조 건축물처럼 구획된 공간의 한정된 개구부로부터 공기가 공급되는 ‘환기지배형 화재’로 크게 구분된다. 이 구획된 공간에서의 화재시간-온도곡선은 일반적으로 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 내화건축물 화재의 시간-온도곡선에 [그림 2] 화재 시의 콘크리트 내부온도

즉, 화재 초기에는 실내 상부에 형성된 고온 연기층의 복사열에 의해서 열분해가 촉진되고, 대량으로 발생한 가연성 가스에 착염되어 온도가 급속히 상승하여 플래시오버에 도달한다. 화재성기에서 화재온도는 시간과 함께 점증하고 실내 가연물이 연소되는 정점에서 최고온도를 나타낸다. 그 후 화재온도는 점점 낮아지고 화재감쇠기가 된다.

이처럼 구획된 공간의 화재에서는 구조체가 화재[火害]를 받게 된다. [그림 2]는 ISO 가열온도곡선에 따른 표준화재에 3시간 노출된 120mm의 보통 콘크리트판의 콘크리트 내부온도분포의 시뮬레이션 결과를, 시간을 파라미터로 하여 나타냈다. 콘크리트는 이 온도에 대응하여 역학적 특성이 열화한다. 구조체의 화재[火害]에 대해서는 화재시간-온도관계를 명확히 하여 부재단면의 내부온도(수열온도) 분포를 아는 것이 중요하다. 건축물의 구조구체 화재피해는 구조체의 종류별로 다르기 때문에 철근콘크리트조와 철골조로 나누어서 화재피해를 서술한다.

[사진1]은 화재 후의 마드리드 원저 빌딩(중앙부 철근콘크리트조, 외주부 철골조)의 형상이며, 이 건물은 스페인 마드리드의 상업중심가에 위치한 사무소건물이었다. 화재는 2005년 2월에 21층에서 발생하여 발화층의 상,하층이 연소되고 진화하는 데까지 거의 하룻밤이 걸렸다. 건물붕괴에 도달한 주요 원인은 층간 구획의 미흡과 구조체의 내화처리 부족이었다. 그 결과 건물은 붕괴되고 100억¥(건물재축, 해체비용 제외)의 손해가 발생했다.



[사진 1] 화재 후의 마드리드 원저빌딩

일본의 예로서는 1989년 8월에 발생한 초고층 집합주택(동경도 강동구, 철골철근콘크리트 구조)의 화재가 있다. 지상 28층인 이 건물의 화재는 24층의 1개 가구에서 발생하여 3시간 후에 진화되었다. 초고층 집합주택으로서는 일본 최초의 화재로 이 사고는 다양한 교훈을 남겼다. 화재로 인한 가열에 의해서 손상된 것은 출화원의 1개 가구였다. 그러나 화재로 인한 열기와 연기 및 소방활동 시의 방수에 의해 복구에 소요된 비용은 1억4천만푼이었다.

2.2 철근콘크리트조 건축물의 화재피해

[사진 2]는 화재실의 철근콘크리트조 건축물 내부 상황이며, [사진 3]은 철근콘크리트 보의 폭발상황을 나타낸다. 철근콘크리트 부재는 철골부재와는 다른 단면이 많다. [그림 2]에 나타난 것처럼 화재시의 콘크리트 부재는 부재 전체가 용이하게 고온이 되는 것은 아니기 때문에 화재의 가열을 받아도 폭발이 생기지 않는다면 갑자기 내력을 잃지는 않는다. 또한, 철골부재와 같이 열팽창에 의한 피해도 증가하지 않는다. 그러나 다른 부위와 일체를 이루고 있기 때문에 교체하는 것은 극히 어려우므로, 화재 시 가열을 받아서 열화한 부분을 제거하는 등의 부분적 보수가 일반적이다.

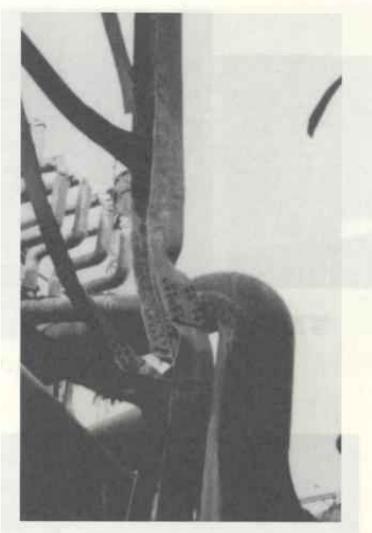


[사진 2] 화재실의 상황



[사진 3] 철근콘크리트 보의 폭발

2.3 철골조 건축물의 화재피해



[사진 4] 화재에 의한 철골 기둥의 좌굴



[사진 5] 화재에 의한 철골 보의 좌굴

[사진 4]와 [사진 5]는 화재를 받았던 철골부재의 변형상태를 나타낸다. 철골조 부재는 목재 및 콘크리트와는 다르며, 화재 시 가열을 받아도 단면적의 감소와 재질의 변화가 발생되기 어려우므로 수열온도가 그다지 높지 않다면 그 재료성능은 이전 상태로 회복된다. 이러한 점에서 재사용이 충분히 가능한 재료라고 말할 수 있다. 그러나 철골부재는 비교적 얇고 열용량이 작기 때문에 온도상승이 쉽고 화재시는 물론 화재 후에도 변형이 남기 쉬운 구조이다. 내화피복을 한 철골부재는 화재 후에도 큰 변형이 생기지 않지만, 내화피복을 하지 않은 부재의 경우는 큰 변형이 남는 경우가 많으므로 건물붕괴에 도달하는 경우도 드물지 않다. 철골조의 경우는 철근콘크리트구조물과는 다르므로 피해를 입은 부재를 교체하는 것이 비교적 용이하다는 특징도 있다.

3. 화재(火害) 조사

3.1 화재[火害]조사의 개요

화해[火害]진단은 피해건물의 화재에 의한 피해의 정도를 조사하고 그 건물의 재사용이 가능한지, 어느 정도의 처치를 해야 재사용이 가능한지에 대해 진단하는 행위이다. 이 화재[火害]진단은 다음의 절차에 의한다.

진단하는 건물의 구조상·방화상의 특징과 발생한 화재의 정도를 사전에 파악하는 「예비조사」, 다음에 이러한 정보를 바탕으로 현지에서 행하는 화재의 규모 및 건물의 피해개요를 육안에 의해서 파악하는 「1차 조사」, 1차 조사에서 판단하기 어려운 부재의 강도 저하 등을 시험·분석에 의해 확인하는 「2차 조사」를 실시한다. 이러한 조사결과를 토대로 건물 및 부재의

화해[火害]피해 정도를 추정하고 건물 및 부재의 재사용이 가능한 지를 진단한다. 이 진단결과를 바탕으로 최적의 보수·보강계획을 세우게 된다. 예비조사는 건물의 구조종류에 관계없이 실시되지만, 1차 조사 이후는 건물의 구조종류에 따라 다르다.

3.2 예비조사

예비조사는 화재현장에서의 현지조사에 앞서 실시하고 건물 개요와 화재상황을 파악하기 위한 정보수집이며, 주요한 항목은 건물개요, 설계도서, 관련 법규 및 화재상황 등이다.

3.3 1차 조사(육안 조사)

1차 조사는 외관조사로 주로 육안에 의해 수행하며, 예비조사에서 얻어진 사실과 구조부재의 그을음의 부착상태 등 부재에 남아있는 화재의 흔적으로부터 화재의 발달상황을 파악하고 조사범위를 상세히 한정하는 것에서부터 시작한다.

화해[火害]진단을 보다 정확하게 실시하기 위해서는 발생한 화재의 발달상황을 파악하는 것이 중요하다. 화해[火害]는 건물의 실별, 부재별 및 동일 부재의 부분별로 상이하다. 따라서 효율적이고 정확하게 조사하기 위해서는 화재 자체의 거동을 파악하는 것이 중요하다. 화재 거동이 파악되면 조사범위를 한정하는 것이 가능해지고, 나머지 조사를 생략함으로써 효율적인 조사가 가능해지게 된다. 이런 이유로 당사자와 소방으로부터의 정보 또는 화재현장에서 화재가 남긴 흔적 등을 토대로 화재의 발달상황을 추정한다.

상세히 조사하는 부분이 결정되면, 그 부분의 부재의 수열온도와 수열시간을 추정한다.

(1) 철근콘크리트조

철근콘크리트조의 조사는 화재가열에 의한 부재의 열화 깊이를 판단하기 위해 실시한다. 철근콘크리트부재의 1차 조사는 그을음의 부착상태와 주변 부재의 변색·변형 상태 및 다음 항목을 확인하고 열화 깊이를 추정한다. [표 1]은 열을 받은 콘크리트 부재의 수열온도추정에 대한 근거이다.

- 콘크리트의 변색 : [표 1] 참조
- 균열의 유무, 폭, 길이, 부유 및 박리의 유무
- 보, 바닥 부재 등의 휨과 변형
- 폭렬과 탈락의 유무, 크기 및 깊이
- 철근의 노출상황

[표 1] 콘크리트 부재의 수열온도 추정근거

변색 상황	추정온도범위 (°C)
그을음의 부착	300 미만
핑크색	300 ~ 600
회백색	600 ~ 950
담황색	950 ~ 1200
용융	1200 이상

피재부의 최고 수열온도는 보통 주위 마감재 등의 변색·변형 상태로부터 추정하고 추정된 수열온도의 최대치를 화재 최고온도의 기준으로 하는 경우가 많다.

(2) 철골조

철골조 건축물의 조사는 부재의 재료성능 저하·부재의 변형 상태에 의해 설계조건의 변화를 주안으로 하여 실시한다. 철골부재의 1차 조사는 그을음 부착상태와 주위부재의 변색·변형상태를 확인하고 도료의 변색상태에 의한 수열온도를 추정한 후 부재의 변형상태를 확인한다. [표 2]는 열을 받은 철골부재의 수열온도에 대한 추정근거이다.

[표 2] 철골 부재의 수열온도 추정근거

철골 부재의 표면상황	추정온도범위 (°C)
그을음의 부착	300 미만
방청도료의 변색	150 ~ 450
방청도료의 백아화	350 ~ 450 이상
그을음의 연소소실	500 이상

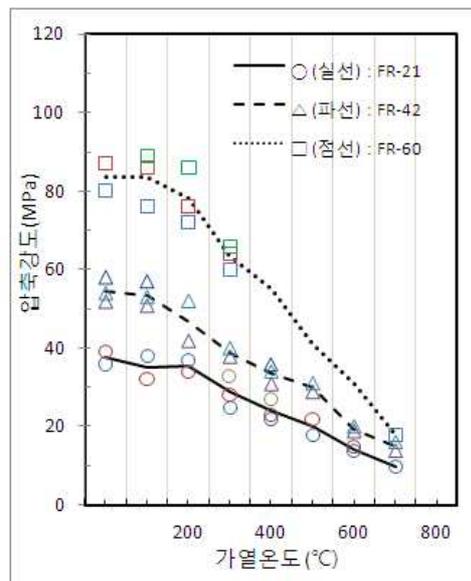
3.4 2차 조사

2차 조사는 1차 조사만으로는 손상의 정도를 판단할 수 없는 경우, 판단근거가 되는 데이터를 얻기 위해 현장 측정과 구조체를 구성하는 재료의 절단강도시험 등을 수반하여 조사한다. 보통은 1차 조사에 의해 2차 조사의 항목과 조사범위, 측정방법을 결정한 후 측정한다.

(1) 철근콘크리트조

철근콘크리트조의 2차 조사는 주로 콘크리트 강도저하·중성화 깊이를 주안으로 간단한 방

법과 상세한 방법에 의해 실시한다. [그림 3]은 가열냉각 후의 콘크리트의 강도를 나타낸다.



[그림 3] 가열냉각 후의 콘크리트 강도

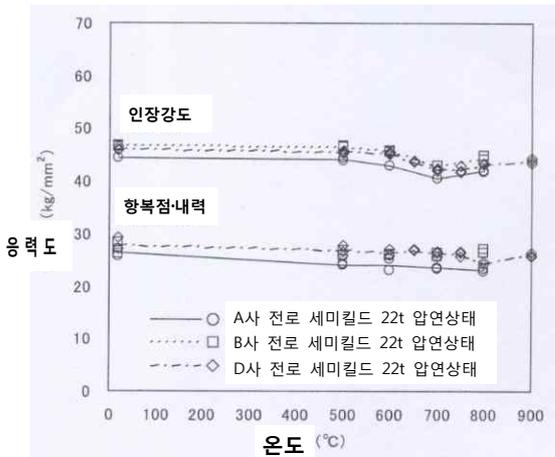
간이 조사에는 강도저하와 관련하여 화재[火害]를 입은 부분과 건전(정상상태)부분과의 반발경도를 비교하여 화재[火害]에 의한 손상상황을 파악하는 리바운드 해머에 의한 반발경도 시험, 중성화 깊이 측정에서는 콘크리트 표면을 페놀프탈레인에 의한 착색에 의해서 판단하는 것이 있다.

상세 조사에는 재료와 부재의 역학적 특성을 재료시험에 의해 조사하는 것과 화재시에 수열온도와 잔존강도를 재료분석에 의해 추정하는 방법의 2가지가 있다. 전자의 조사에는 콘크리트 코어 및 철근의 발취시험, 진동시험, 재하시험 등이 있고 후자의 수열온도와 잔존강도의 추정에는 UV스펙트럼법 등의 분석장치를 이용한 방법이 있다.

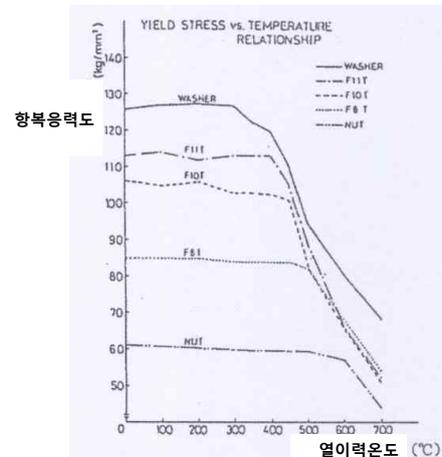
(2) 철골조

철골조의 2차 조사는 주로 부재의 강도저하와 부재 및 가구¹⁾의 변형을 주안으로 시행한다. [그림 4]는 SS400의 가열이력 후의 강도, [그림 5]는 가열이력 후의 고력볼트재의 항복점을 나타낸다. 일반 강재는 수열온도 700°C 전후의 변태점을 초과하지 않으면 제성능이 가열 전의 상태로 복귀한다. 그러나 고장력강과 고력볼트는 보다 낮은 열이력에 의해서 성능이 저하되며, 고력볼트의 경우는 350°C를 초과하면 초기 성능을 만족할 수 없게 된다. 가구와 부재의 변형과 관련된 설계조건의 만족여부는 구조설계상의 판단에 따른다.

역주 1) 건축물에 작용하는 여러 가지 외력을 안전하게 지지할 목적으로 부재에 접합시킨 골조로서 라멘, 트러스, 아치 등이 있다.



[그림 4] SS400의 가열이력 후의 강도



[그림 5] 가열이력 후의 고력볼트의 항복점

3.5 화재[火害]진단

화해[火害]진단은 예비조사, 1차 조사 및 필요에 따라 시행한 2차 조사의 결과를 토대로 부재와 가구의 화재에 의한 손상 정도를 추정하여 재사용에 대한 판단을 한다. 판단기준으로는 건물의 손상도에 의한 A~C의 피재도(표 3)와 부재의 손상도에 의한 I~V의 화재[火害] 등급을 설정하고 있다(표 4).

[표 3] 건축물의 피재도

A	구조체(가구)에 화재의 영향이 없는 경우
B	구조체(가구)에 화재의 영향을 받고 보수·보강에 의해 재사용이 가능한 경우
C	구조체(가구)에 도괴의 위험성이 있고 명확히 재사용이 불가능한 경우

[표 4] RC조 화재[火害]등급과 보수·보강방법

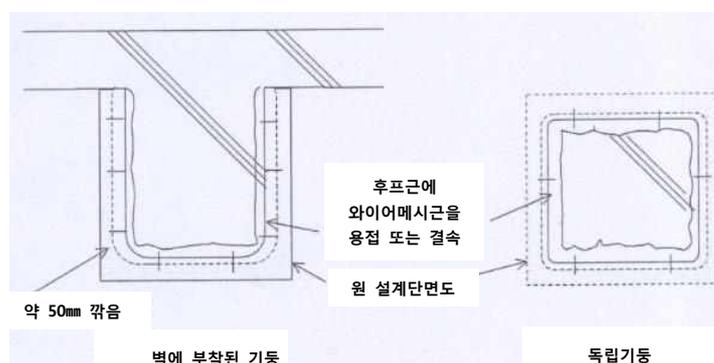
화해 등급	화해상황	보수보강의 기본	보수·보강방법의 예
I급	마감재가 잔존하고 피해가 없는 경우	보수 없음	보수 없음
II급	마감재 부분에 육안 피해가 있는 상태 예를 들어 그을음과 유연의 부착이 있고 박리와 탈락이 없는 경우	마감재만 보수	① 콘크리트 표면의 세정 ② 각종 마감재료의 교환
III급	손상이 철근 위치에 도달하지 않은 경우 예를 들어 균열이 미세	강도내구성이 저하한 경우, 콘크리트 표면에서 철근까지 콘크리트를 제거하고 현장 타설	① 열이력 500°C 이상의 콘크리트를 깎아내고 재생한다. ② 재생한 부분이 큰 경우 박리방지

	한 경우, 기둥의 폭렬이 없는 경우	콘크리트 또는 모르타르로 피복한다.	를 위해 핀을 박고 섬유메쉬와 이어메쉬 등을 배치한다. ③ 수열온도가 500°C이하에서 균열이 있는 경우, 에폭시수지를 주입하고 내구성을 확보한다.
IV급	주근의 부착성능에 지장이 있는 경우 예를 들어 표면에 수 mm 폭의 균열, 철근 일부 노출	부재 내력이 저하하므로 콘크리트 표면에서 철근까지의 콘크리트 부분을 깎아내어 탈락시키고, 주근을 완전하게 노출시켜서 콘크리트로 피복한다. 상황에 따라 보강도 한다.	① 철근까지의 콘크리트를 전부 깎아내고(주근을 완전히 노출시킨다), 소정의 두께까지 콘크리트를 재생한다. ② 철근까지의 콘크리트의 박리를 방지하기 위해 핀을 박고 섬유메쉬, 와이어메쉬 등을 배치한다. ③ 쇼트 콘크리트공법, 모르타르강
V급	치명적인 손상이 있는 경우 예를 들어 주근의 좌굴, 광범위한 폭렬이 있고, 철근의 노출이 크며, 휨 정도가 현저한 경우	보강, 교체, 증설	① 열화된 부재를 철거하고 동일한 사양으로 복원한다. ② 부재강도를 위해 새로운 부재를 설치한다.(철골부재 등으로 보강, RC벽의 증설) ③ 탄소섬유, 강판, 앵글, 평강 등으로 보강

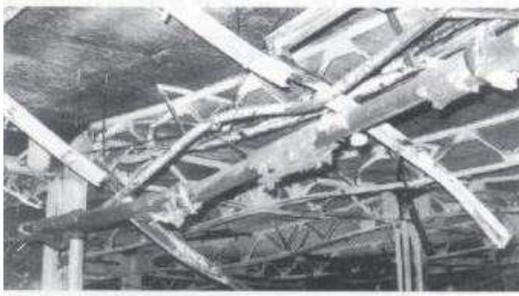
4. 보수

화재가 발생한 건물의 보수·보강은 보통 화재 전의 상태로 돌아가는 것을 목표성능으로 하며 보수방법은 구조의 종류마다 다르다.

[그림 6]은 철골콘크리트 부재의 보수 예이다. 철근콘크리트부재는 화재에 의해서 강도가 저하한 표면부분을 제거하고, 그 부분에 모르타르를 시공하여 시행하고 있다. 부재표면에서의 피재 깊이가 깊은 경우는 강재핀을 삽입하고 그 위에 금속강을 설치하여 모르타르를 시공한다. [사진 6]과 [사진 7]은 화재가 난 철골부재와 그 보수 예이다. 철골부재의 경우는 변형이 없는 부재는 재사용하고, 변형이 있는 부재는 교체하는 경우가 많다.



[그림 6] 철근콘크리트 부재의 보수 예



[사진 6] 화재실의 철골 슬라브재



[사진 7] 보수 후의 철골 트러스재

5. 맺음말

화재는 건물의 소유자·설계자·시공자가 빈번하게 경험하는 일은 아니기 때문에 재사용에 대한 판단은 어려우며, 화재가 발생한 건물의 손상정도를 파악하고 그 보수·보강방법에 대한 가이드라인으로서 현재 「건물의 화재[火害]진단 및 보수·보강방법」(일본건축학회)이 많이 사용되고 있다. 화재[火害]진단보수 소위원회(주사: 요시다 마사토모)에서는 현재 화재[火害]진단 및 보수·보강방법에 대한 검토를 우선적으로 추진하고 지침을 작성하고 있다.

참고문헌

(사)일본건축학회 : 건물의 화재진단 및 보수·보강방법, 丸善(마루젠), 2004

출처 : 火災 (Vol.58 No.5, 2008년 10월)

번역 : 업무지원팀 대리 여한승