

# 터널 화재로 인한 콘크리트 세그먼트의 손상특성 규명

## Fire-induced Damage to Shield TBM Concrete Segment

최 순 욱<sup>1</sup> Choi, Soon-Wook

장 수 호<sup>2</sup> Chang, Soo-Ho

이 규 필<sup>3</sup> Lee, Gyu-Phil

배 규 진<sup>4</sup> Bae, Gyu-Jin

### Abstract

Fire in underground space may induce severe structural damage as well as heavy casualties. To protect underground structure and passengers from fire, it is very essential to characterize fire-induced damage on construction materials of underground structures. In this study, the high-temperature furnace was manufactured to evaluate fire-induced damage on underground structure materials. Especially, this study aimed at the evaluation of fire-induced damage on the shield TBM concrete segment. In the fire tests, furnace temperature was set to reach 1,200 degrees at five minutes after ignition. The temperature of 1,200 degrees was kept during one hour, and the fire was extinguished after two hours elapsed. From the temperature measurement by thermocouples embedded in test specimens, the spalling was estimated to reach approximately 20 cm from the surface exposed to fire. After the fire tests, the alteration of physico-mechanical properties and microstructures of concrete segment was investigated from core specimens. The results showed that apart from spalling, the deterioration depth of the remaining concrete material amounted to approximately 10 cm from the spalling surface.

### 요 지

지하공간에서의 화재는 인명 및 재산피해 뿐만 아니라 지하구조물에 심각한 손상을 발생시킨다. 이러한 화재로부터 구조물을 보호하기 위해서 화재에 의한 지하구조물 시공재료의 손상을 파악하는 것은 매우 중요한 사항이다. 본 연구에서는 화재에 의한 지하구조물의 손상을 파악하기 위하여 지하공간 화재모의시험 가열로를 제작하였고, 실드 TBM 콘크리트 세그먼트시편에 대하여 모의 화재실험을 수행하였다. 수행된 실험은 5분에 1,200°C에 도달하여 1시간동안 유지한 후 2시간에 걸쳐 소화되는 RABT곡선을 모사하였다. 시험체내에 설치된 온도센서로 확인한 결과, 화재면으로부터 약 20cm까지 폭발이 발생하였다. 또한 시험이 완료된 블럭시편으로부터 채취된 코어시편에 수행된 물리·화학적 실험을 통하여 폭발면으로부터 약 10cm까지 시공재료의 특성이 저하되었음을 확인하였다.

**Keywords :** Fire, Horizontal furnace, Material damage, Spalling, Underground structures

### 1. 서 론

지하공간내의 화재는 인명, 차량 및 시설 등의 피해를 야기할 뿐만 아니라 지하공간의 밀폐성으로 인해 화재 발생 후 수 분 이내에 온도가 1,000°C 이상에 도달하여

지하구조물에 심각한 손상을 야기할 수 있다(Haack, 2004). 특히 급격한 온도 상승과 1,000°C 이상의 고온이 장시간 지속되는 지하공간의 화재 특성상 지하구조물의 주된 시공재료인 콘크리트의 손상과 폭발(spalling)이 발생하게 된다.

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT, soonugi@kict.re.kr)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

4 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 연구위원 (Member, Senior Research Fellow, Geotechnical Engr. Research Dept., KICT)

이러한 폭발 현상을 규명하고 지하공간내 화재에 대응하기 위한 지하구조물 시공재료의 내화대책을 평가하기 위하여 유럽에서는 각국의 실정에 맞는 다양한 지하공간 화재온도곡선을 제시하고 있다(그림 1). 특히 지하공간내 화재는 급격한 온도상승과 장시간의 고온유지 상태가 동반되므로 건축 부재의 내화시험을 위해 2시간에 약 1,030°C의 온도 상승을 모사하는 기존 ISO 화재온도곡선(ISO 834곡선)을 지하공간내 화재를 모사하는데 적용할 수 없다(박해균 등, 2003a). 현재 전세계적으로 지하공간내 화재에 대해 대표적으로 사용되고 있는 온도곡선은 RABT곡선(그림 1①)과 RWS곡선(그림 1③)을 들 수 있다. RABT곡선은 독일 교통성 도로건설부가 규정하는 화재온도곡선으로서 최고 온도가 1,200°C이며, RWS곡선은 네덜란드 운수공공사업성 치수본국이 규정하는 화재온도곡선으로 최고 온도가 1,350°C이다. 두 곡선 모두 가열 개시후 약 5분에 1,200°C까지 온도가 급격히 상승하게 된다.

과거에는 축소 모형터널이나 폐갱 등을 활용하여 실제 터널 실물화재실험을 실시하였으나(日本コンクリト工學協會, 2003), 실험에 많은 비용과 시간이 소요되며 다양한 조건하에서 지하구조물 시공재료의 화재손상 및 폭발 특성을 파악하기 어렵다는 문제점을 가지고 있다. 이로 인하여 최근에는 지하공간 화재온도곡선을 모사할 수 있는 가열로가 활발히 적용되고 있다. 가열로는 실제 지하구조물 시공재료에 작용하는 외력을 유압램(hydraulic ram)을 이용하여 재하하는 동안 화재실험을 수행하는 방식과 지하구조물 시공재료에 작용하는 잔류수압 및 지반하중의 작용을 고려하여 축력을 시험편에 도입하는 방식으로 구분할 수 있다(박해균, 2003b, c; Haack 2004; Yasuda et al., 2004). 두 방식 모두 각각 장, 단점을 가지고 있으나, 본 연구에서는 지하구조물 시공법에 따른 다양한 시공재료에 대한 화재실험을 수

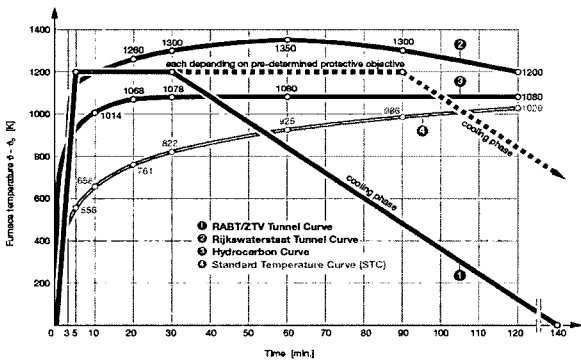


그림 1. 국외의 지하공간 화재시나리오

행하고자 실험이 용이하며 비교적 가열로 제작에 큰 비용이 소요되지 않는 두 번째 가열로 형식을 채택하였다.

국내에서도 실드터널 세그먼트 재료에 대한 화재모의 시험을 실시한 바 있으나(박해균 등, 2003b, c) 국내에 지하공간 화재온도곡선을 모사할 수 있는 가열로가 없는 관계로 일본의 가열로를 사용하여 연구가 수행되었다.

따라서 본 연구에서는 RABT와 RWS 화재온도곡선을 모사할 수 있는 국산 수평 가열로를 제작하여 지하구조물 시공재료의 화재 손상특성을 규명하고 관련 연구의 활성화를 도모하고자 하였다.

## 2. 지하공간 화재 모의시험용 가열로 및 시험편제작

본 연구에서는 RABT 및 RWS 화재온도곡선을 모사하기 위해, 버너의 최대용량이 580,000kcal/hr이고, 가로 1,100mm, 세로 700mm, 높이 600mm인 수평 고온가열로를 제작하였다. 제작된 가열로는 그림 2와 같으며, 우측의 제어판에서 가열로내의 온도를 조절할 수 있다. 시험 도중에 가열로 내부를 관찰하기 위하여 그림 3과 같이 각도가 다른 3개의 관찰창을 구성하였으며, 가열로 내부의 온도를 제어하기 위해 R-type 열전대를 사용하였다. 가열로 내부는 고온에 의해 손상을 방지하고 열효

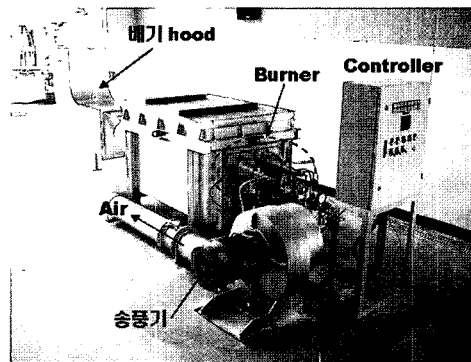


그림 3. 지하공간 화재 모의시험용 가열로 전경

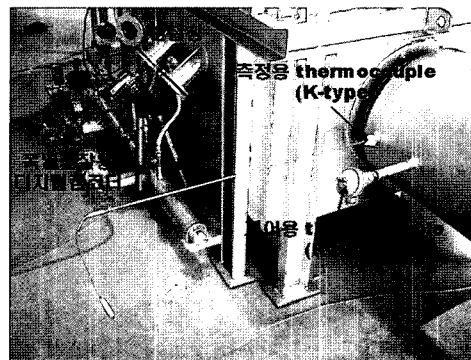


그림 3. 가열로 후면부 구성

율을 높이기 위해 단열재로 마감하였다.

본 연구에서 사용한 시험편은 표 1과 같이 쉘드터널의 콘크리트 세그먼트와 동일한 배합으로 제작하였고 설계강도는 420kgf/cm<sup>2</sup>이다. 실제 세그먼트의 경우는 철근이 시공이 되지만 본 연구에서는 화재시험후 코어채취를 위하여 무근으로 시험편을 제작하였다.

화재시험시 콘크리트 가열면으로부터 깊이에 따른 온도분포를 측정하고자 스테인리스 재질(SUS316)로 만들어진 지름 6.4mm의 시즈 열전대(sheathed thermocouple)를 시험편 몰드에 장착한 뒤 콘크리트를 타설하였다. 열전대는 철사를 사용하여 열전대의 온도측정부분이 시험편의 중앙에 위치하도록 고정시켰으며, 시험편 내 열전대의 위치는 표 2와 같다. 열전대의 커넥터 부분에 대한 열의 영향을 최소화하고자 커넥터 부분과 시험편 표면 사이의 거리가 50cm가 유지되도록 하였다. 시험편은 쉘드터널용 콘크리트 세그먼트 전문생산업체에서 제작하였고 콘크리트의 품질향상에 효과가 좋으며

세그먼트 제작시에 일반적으로 수행되고 있는 증기양생을 실시하였다.

### 3. 화재시험 결과 및 분석

본 시험에서는 가열 개시후 5분후에 1,200℃에 도달하고 60분간 1,200℃가 유지된 후 170분후에 냉각이 완료되는 RABT 곡선을 모사하였다. 가열로 상부와 시험편 사이의 열손실을 막기 위해 약 1,400℃까지 사용이 가능한 세라믹섬유(세라크울)를 사용하였으며, 그림 4와 같이 시험편을 거치하였다. 또한 각 열전대에서 나온 신호는 80ms/channel의 속도로 외부의 자료획득장치에 저장하였으며, 폭발 현상을 관찰하고자 가열로 후면의 관찰창에 디지털 캠코더를 설치한 뒤 시험 완료시까지 촬영하였다.

제어용 열전대에서 측정된 온도이력곡선은 그림 5와 같이 RABT 곡선과 거의 동일한 경향을 보였으며, 특히

표 1. 화재시험에 사용된 콘크리트 세그먼트 시험편의 배합설계

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	S/a	슬럼프 (cm)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )				
				물 (W)	시멘트 (C)	세골재 (S)	조골재 (a)	고성능 AE 감수제
20	34.7	39.9	5	131	378	748	1153	4.91

표 2. 콘크리트 시험편 가열면으로부터의 열전대 깊이

가열면부터의 깊이 (cm)	시즈 열전대	일반열전대
5	○	○
10	○	○
15	○	○
20	○	×
25	○	×
30	○	×
40	○	×

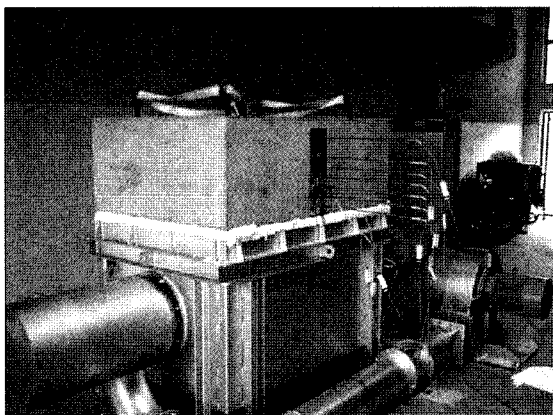


그림 4. 화재시험 준비완료후 장면

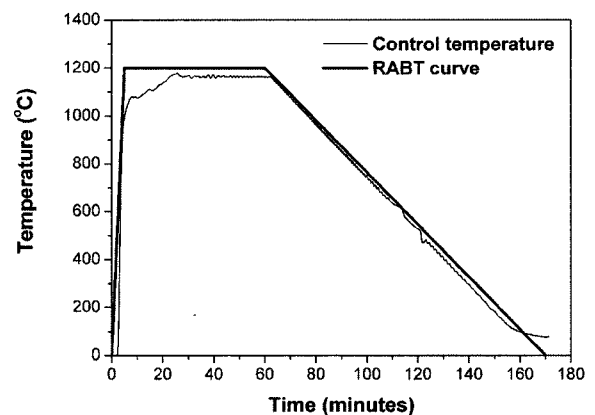


그림 5. 제어용 열전대에서 측정된 온도이력곡선

초기의 온도상승 및 60분경과 이후의 온도 하강 구배가 설정된 곡선에 잘 부합하였다. 다만 초기 가열구간에서 약간의 편차를 보이는데 이는 콘크리트의 열량 흡수 영향으로 인한 것으로 판단된다. 또한 기존 외국의 측정결과를 살펴봐도 역시 초기 가열 단계에서 이와 같은 현상이 대체로 같이 나타났다(Dorgarten et al., 2004; Yasuda et al., 2004).

그림 6은 제어용 열전대 및 가열면으로부터의 깊이에 따라 측정된 온도이력곡선이며, 표 3은 가열면으로부터의 깊이에 따른 주요 온도 측정 결과를 나타낸 것이다. 가열로내의 온도는 가열 개시후 1.73분에 급격한 온도 상승이 이루어지는 것으로 나타났으며, 5cm 깊이에서는 가열 후 8.90분에 급격히 온도가 상승하였다. 그 이후로 25cm 깊이까지 온도 상승 시점은 각 5cm 간격별로 대략 7.5분에서 9분 사이로 일정한 간격을 보이는데 이는 콘크리트의 열전도 특성 및 온도상승구배와 관련

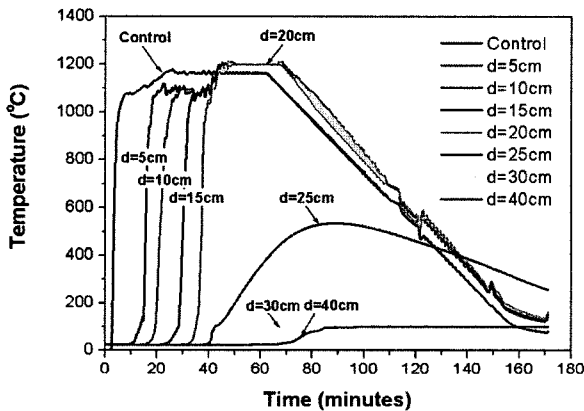


그림 6. 가열면으로부터 깊이에 따른 온도이력곡선

표 3. 가열면으로부터의 깊이에 따른 주요 온도 측정 결과

가열면부터의 깊이 (cm)	최대온도 (°C)	최소온도 (°C)	온도급상승시간 (분)	온도하강시간 (분)
제어용	1,200.0	상온	1.73	60.83
5	1,210.1	24.5	8.90	68.17
10	1,209.8	24.4	14.33	68.11
15	1,209.8	23.6	21.87	67.70
20	1,209.8	23.6	31.13	67.70
25	534.9	22.4	38.65	90.00
30	107.5	22.6	42.85	온도계속유지
40	101.5	22.3	62.63	온도계속유지

표 4. 각종 부재의 표준 사용한계온도

부재명	콘크리트	강재	고무
사용한계온도 (°C)	250~380	250~350	70~100

이 있을 것으로 고려된다.

가열 초기 20분후에 5cm 깊이에서 폭발 및 박락이 발생되기 시작하며 10cm에서도 온도가 약 200°C까지 상승하였다. 그러나 15cm 이상에서는 상온이 유지되었다. 30분 경과후에는 10cm까지 1,100°C에 도달하며 15cm 깊이에서의 온도는 500°C 이상으로 상승하였다. 40분 경과시에는 20cm 깊이까지의 온도가 대략 1,100°C으로서 60분 경과시의 결과와 유사한 경향을 보여 가열 개시후 40분 정도에 20cm 깊이까지 폭발 및 박락이 진행되었다는 것을 알 수 있다. 반면 25cm 이상 깊이에서는 60분 경과후에 온도가 상승하기 시작하였다.

일본콘크리트공학협회(2003)에서는 표 4와 같이 콘크리트의 표준 사용한계온도를 250~380°C로 규정하고 있다. 온도에 따른 콘크리트의 변화에 대해서 30~300°C까지는 경화 시멘트 페이스트 탈수의 1단계로 구분하여 gel이 붕괴하며, 120~600°C에서는 화학흡착수가 방출되고, 570°C에서는 주요 규암질 골재에 포함된 석영 결정이 변상되는 것으로 보고하였다(日本콘크리트工學協會, 2003). 본 시험에서는 깊이 20cm까지 약 1,200°C까지 온도가 도달하여 폭발 및 박락이 발생하였으며, 25cm 깊이에서도 534.9°C까지 온도가 상승한 것으로 나타나 일본콘크리트공학협회에서 보고한 바와 같이 상당한 손상이 발생했을 것으로 유추할 수 있다. 그림 7은 화재시험후의 가열면 표면으로서 화재시험후 시험편 표면에서 골재가 변상된 것으로 보이는 흑갈색의 원형 덩어리들을 관찰할 수 있었다.

화재 시험완료후에 폭발이 발생하지 않은 부분의 손상여부를 판단하고자 각종 역학적 시험, 중성화 시험,

XRD 및 SEM 측정을 위한 코어를 시험편에서 회수하였다. 시험편의 총 높이가 50cm이었으므로 시험편의 총 높이에서 회수된 코어의 길이를 뺀 길이를 폭렬 심도로 추정하고자 하였다. 그 결과, 회수된 코어의 평균 길이는 29cm로서 추정되는 폭렬 심도는 21cm로 나타나 온도 측정결과에서 추론된 20cm의 폭렬 심도와 거의 일치하였다. 코어의 길이가  $\pm 4.58\text{cm}$  정도의 편차를 보이는 것은 시험편 중앙부분을 중심으로 아치형에 가까운 폭렬 및 박락이 일어났기 때문인 것으로 보인다(그림 7 참조). 그러나 코어길이가 긴 경우에도 코어 표면에 균열이 발생하였거나 코어링 과정에서 일부 코어가 분리되는 것으로 나타나 화재로 인해 상당한 재료 손상이 발생한 것을 알 수 있었다.

화재시험 전, 후의 코어 상태를 비교하기 위하여 화재 시험전에 콘크리트 공시체를 제작하였다. 공시체의 지름은 100mm이고 압축시험과 P파속도 측정을 각 3회씩 실시하였다. 평균 압축강도는  $467.82\text{kg/cm}^2 (\pm 8.29\text{kg/cm}^2)$  였으며, 평균 P파속도는  $4,795\text{m/sec} (\pm 19.9\text{m/sec})$ 로 얻어졌다.

화재시험후 회수된 코어의 깊이별 압축강도 및 P파속도 시험결과는 그림 8과 같다. 압축강도 측정에 사용된 시료 중심의 위치는 가열면으로부터 25.0cm, 33.5 및 42.5cm였으며, P파속도 측정에 사용된 시료 중심의 위치는 대략 3cm 간격으로 24.6cm, 25.9cm, 28.9cm, 32.0cm, 35.1cm 및 38.2cm이었다. P파속도는 최대 온도가 535°C 이었던 약 30cm 깊이까지 공시체 P파속도의 80%수준으로 나타나 약 20%정도 P파속도가 감소하였다. 또한 33.5cm 깊이의 압축강도는 공시체 강도의 74% 수준이었다. 42.5cm깊이의 코어 강도도 공시체 압축강도의 약 83% 수준으로 나타났으나 이는 코어강도와 공시체 강

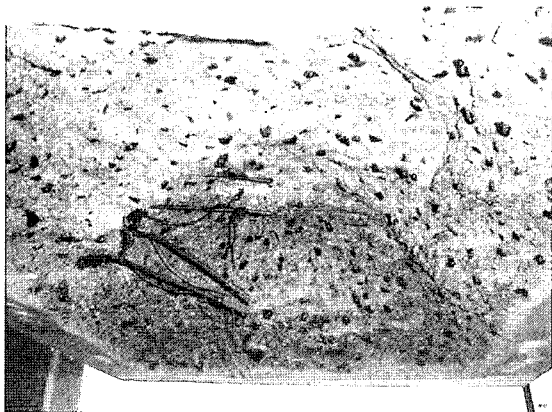


그림 7. 화재시험후의 가열면 표면

도가 약 80% 차이를 보인다는 일반적인 결과로 보인다. 따라서 본 연구에서 수행된 모의화재로 인해 가열면으로부터 최대 30~35cm까지, 즉 폭렬면으로부터 약 5~10cm까지 콘크리트 재료의 특성이 감소하는 것으로 나타났다.

또한 회수된 코어에 대해 중성화시험을 실시하였다. 중성화 시험결과 그림 9와 같이 폭렬면에서 약 5mm이내 부분을 제외하고는 적색을 나타내어 중성화가 거의 발생하지 않았음을 확인하였다. 그러나 5mm이내이긴 하지만 일부 부분이 중성화가 진행되었고 중성화 시험이 화재시험후 약 3일 이후에 수행되었다는 점을 고려하면 중성화 촉진시험을 통해 중성화 속도를 추정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

X선 회절분석(XRD) 및 주사전자현미경(SEM) 분석을 위하여 시험편에서 폭렬에 의해 탈락된 부위를 제외한 표면(15cm)에서부터 50cm까지 3cm간격으로 미분말을 채취하여 분석을 실시하였다.

그림 10과 그림 11은 가열면으로부터 각각 20cm와 25cm 떨어진 지점에서 회수된 시료에 대한 X선 회절

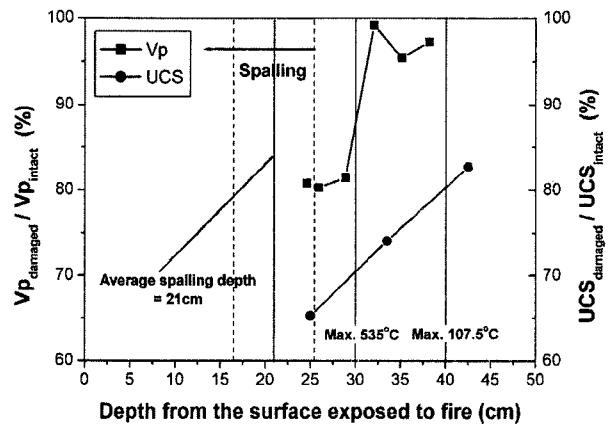


그림 8. 화재시험후 회수된 코어에 대한 압축강도 및 P파속도 측정결과

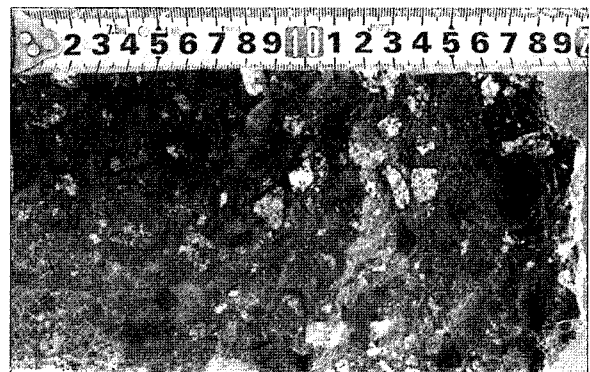


그림 9. 중성화 시험후의 코어시료 절단면 상태(코어 #2-9)

표 5. 수화생성물 및 반응생성물의 주요 피크 지표

기 호	광물명
Q	Silicon Oxide (Quartz)
P	Portlandite
F	Silicon Oxide (Feldspar)
C	Calcium Carbonate (Calcite)
E	Ettringite

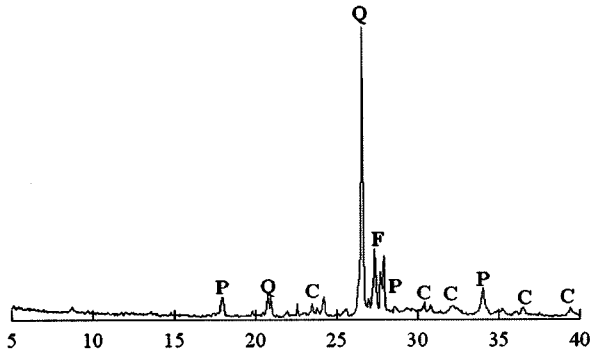


그림 10. X-ray 회절분석 결과(No 2)

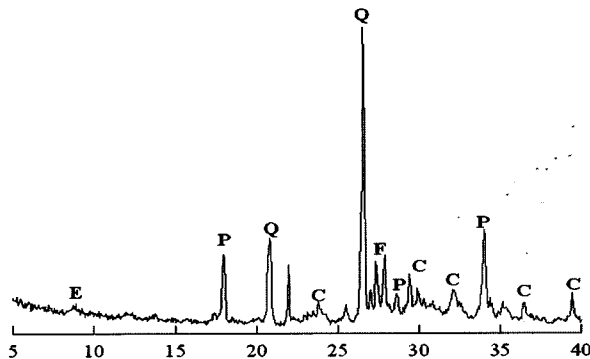


그림 11. X-ray 회절분석 결과(No 4)

분석결과이다. 이 때의 측정조건은 CuK(Ni Filter)는 30 KV와 20mA, Scanning Speed는 6/min, Full Scale은 250 cps 그리고 2θ는 540°로 하였으며, 표 5는 분석결과 그림에서 사용된 수화생성물 및 반응생성물의 주요 피크 지표를 나타낸 것이다.

그림 10에서는 시멘트 수화생성물 가운데 150°C 부근에서 소멸되는 에트링가이트(ettringite)의 피크(peak)를 확인할 수 없었다. 그러나 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)의 피크와 칼사이트(CaCO<sub>3</sub>)의 피크가 공존하고 있어 열변화에 의한 피해가 크지 않음을 알 수 있었다. 그림 11에서는 전형적인 시멘트의 수화작용에 의해서 생성되는 생성물이 확인되어 상대적으로 건전함을 알 수 있었으며, 칼사이트에 의한 피크가 크게 나타난 것은 X선 회절분석을 위해 샘플을 만들기 위해서 대기 중에 장기간 노출

된 원인으로 분석된다. 또한 모든 샘플에서 골재에 의한 Quartz 피크가 크게 나타남으로 인해 상대적으로 수화물에 의한 수화생성물과 반응생성물의 피크가 작게 나타남을 알 수 있었다.

그리고 X선 회절분석 이외에 SEM측정도 병행하였다. 화재에 의한 콘크리트의 열화정도를 관찰하기 위하여 현미경분석을 실시한 결과, 가열면으로부터의 깊이가 최대 21cm인 시료(No. 1 및 No. 2)에서는 균열과 변색의 변화가 나타났으나, 나머지 샘플에서는 표면에서 하얗고 멍글멍글한 결정의 칼사이트의 상이 관찰되었으며, 육각관상의 수산화칼슘 상이 전체적으로 확인되었다. 이로 인하여 X선 회절분석 결과와 마찬가지로 3cm 이후부터는 열변화에 의한 재료변상이 미미하다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구는 화재에 의한 지하구조물 시공재료의 손상 특성을 파악하기 위하여 국제적으로 많이 사용되고 있는 독일의 RABT 화재온도곡선을 모사할 수 있는 장비를 제작하고, 쉴드터널의 콘크리트 세그먼트를 대상으로 예비 화재실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) RABT곡선에 따른 쉴드터널용 콘크리트 세그먼트에 대한 화재시험 결과, 가열면으로부터 15~20cm까지 폭렬 및 박락이 발생하였다. 따라서 터널설계시 내화재료 및 내화피복재를 사용하지 않은 터널의 경우 폭렬 및 박락에 의해 손실된 라이닝 두께에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.
- (2) 화재시험이 완료된 후 폭렬 및 박락이 발생하지 않고 남아 있는 시료에 대하여 압축강도시험 및 중성화시험, X선회절분석, SEM분석을 실시한 결과, 폭렬면으로부터 10cm까지 재료의 손상이 나타난 것으로 확인하였다. 따라서 폭렬뿐만 아니라 시공재료와 화재이력에 따른 재료 손상을 고려하여 화재후 지하구조물에 대한 보수·보강을 실시하여야 할 것이다.
- (3) 폭렬의 발생시작은 일반적으로 알려진 가열초기 20분 후부터 발생하였으며, 가열면으로부터 일정시간 간격으로 콘크리트 시편의 온도가 상승하였다. 또한 시간경과에 따른 폭렬 및 박락의 진행상황을 파악할 수 있었다. 이와 같은 화재이력과 재료 손상특성의

규명이 화재를 고려한 지하구조물의 최적 설계에 있어 필수적일 것으로 사료된다.

- (4) 초기 가열 단계에서 콘크리트의 열량 흡수 영향을 배제할 수 있도록 가열로 제어설정을 향후 보완하고 지하구조물 종류에 따른 시공재료별로 모의 화재실험을 통하여 재료의 손상특성을 규명하는 연구를 수행해야 한다. 또한 이에 따른 보수·보강방법의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2004년도 건설교통부 산학연 중점연구사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업-지하구조물 재해손상 대응기술 개발”의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

1. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권 (2003), “터널콘크리트 구조물의 내화설계 Approach 및 내화대책공법”, *한국터널공학회지*, 제5권, 제3호, pp.64-71.
2. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권 (2003), “터널 화재에서의 콘크리트 내화대책”, *한국도시방재학회지*, 제3권 제2호, pp.65-69.
3. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권 (2003), “샬드터널 콘크리트 세그먼트의 내화특성 연구”, *2003년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.4801-4804.
4. 日本コンクリート工學協會 (2003), *コンクリート構造物の火災安全性研究委員會 報告書*.
5. Dorgarten, H.W., Balthaus, H., Dahl, J. and Billig, B. (2004), “Fire-resistant Tunnel Construction: Results of Fire Behaviour Tests and Criteria of Application”, *Proc. of ITA-AITES 2004*, Paper No.B06.
6. Haack, A. (2004), “Latest Achievement and Perspective in Tunnel Safety”, *Proc. of ITA-AITES 2004*, Paper No.A01.
7. Yasuda, F., Ono, K. and Otsuka T. (2004), “Fire Protection for TBM Shield Tunnel Lining”, *Proc. of ITA-AITES 2004*, Paper No. B09.

(접수일자 2005. 5. 31, 심사완료일 2005. 7. 5)