

고온에 노출된 실드터널 라이닝의 손상평가

Evaluation of Fire-induced Damage for Shield Tunnel Linings Subjected to High Temperatures

이 창 수¹⁾ 김 용 혁^{2)*} 김 영 옥³⁾
Lee, Chang Soo Kim, Yong Hyok Kim, Young Ook

Abstract

The aim of this study is to evaluate fire-induced damage for shield tunnel linings. Full-scale fire test was conducted to evaluate fire-induced damage. Residual compressive strength was measured on the core samples of shield tunnel lining subjected to high temperatures. Heating temperature was predicted by XRD and TG analysis. As a result, Strength degradation of concrete with temperatures can be evaluated by residual compressive strength of core samples. In addition, residual compressive strength can be estimated by previous studies if heating temperature is exactly predicted. It is possible that heating temperature is predicted by XRD and TG analysis at 450°C. For more accurate prediction of heating temperature it should be performed both instrumental analysis and analytical methods with temperatures ranging from 400~600°C.

Keywords : Full-scale fire test, Heating temperature, Residual compressive strength, Shield tunnel lining

1. 서론

국내 도로터널의 경우 터널 개소가 지난 10년간 약 3.5 배 증가하였고, 장대터널의 증가와 함께 터널연장도 약 4 배가 길어졌다(국토해양부, 2011). 이로 인해 터널 내의 교통량이 많아져서 사고에 의한 화재발생 가능성도 높아지고 있다.

터널 내에서 화재가 발생할 경우, 폐쇄된 공간 특성상 터널 내부 온도는 단시간에 높은 온도로 상승하기 때문에 화재진압 및 대피가 어려워 인명피해 및 터널 내의 시설에도 심각한 손상을 줄 수 있다. 또한 화재 후 복구기간동안 차단되는 교통편의 등의 손실까지 고려한다면 경제적 손실은 상당히 클 것이다. 특히 2차 라이닝을 생략한 실드터널의 경우에는 그 보수에 막대한 비용과 시간이 소요되게 된다(안태송, 2007; Haack, 1998).

일반적으로 터널에 적용되는 내화공법 중 단열성이 있는 내화보드나 스프레이계 외장재를 사용하는 경우는 우수한 내화성과 화재 후 재시공이 가능하다는 장점이 있

지만, 많은 비용 및 추가적인 설치공간이 요구되고 필요시 라이닝에 대한 외관조사가 불가능하다는 단점이 지적된다. 이에 신설되는 터널에는 섬유를 혼입한 콘크리트를 적용하는 것이 내화성능 확보에 유리하다(박해균 등, 2005; 이찬영 등, 2008; Kaundinya, 2007). 또한 구조체 역할을 하는 실드터널 라이닝의 경우에는 강섬유와 폴리프로필렌 섬유를 동시에 첨가한 하이브리드 섬유보강 콘크리트를 사용하면 구조성능 및 내화성능을 동시에 확보할 수 있다(원종필 등, 2007; Shuttleworth, 2001).

한편 화재로 인해 피해를 입은 터널 구조물을 신속하고 정확하게 복구하기 위해서는 화재에 의한 손상정도 및 범위를 정량적으로 평가하여 이에 따른 적절한 내화대책을 수립하는 것이 중요하다. 터널 화재사고 후 콘크리트 구조물의 손상평가는 주로 슈미트해머와 초음파속도법에 의한 콘크리트의 비파괴시험, 코어 채취를 통한 압축강도 시험 및 재하시험 등을 수행하여 부재의 잔존내력을 예측할 수 있다. 또한 콘크리트의 수열온도는 육안에 의한 콘크리트의 변색 조사와 샘플을 채취한 후 증성화 시험, 시

1) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수
2) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사수로, 교신저자
3) 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사수로

* Corresponding author : anjelmo@uos.ac.kr 02-2210-2271
• 본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

차열 분석(DTA, Differential Thermal Analysis), 열중량 분석(TGA, Thermogravimetric Analysis), X선 회절분석(XRD, X-ray Diffraction), 탄산가스 및 유리석회량 분석 등을 이용하여 추정할 수 있다(김인수, 2002; 장수호 등, 2006; Chew, 1993).

본 연구에서는 쉴드터널 라이닝의 실물모형 화재실험을 수행한 기존의 연구결과(이창수, 2011)를 기초로 일반 쉴드터널 라이닝과 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝에 대해 손상평가를 수행하였다. 먼저 고온에 노출된 쉴드터널 라이닝의 압축강도 특성을 평가하였으며, X선 회절분석 및 열중량 분석 결과를 통해 수열온도를 예측하였다. 또한 손상평가 결과를 통해 손상평가 기법에 대한 적용성과 한계점을 고찰하고자 한다.

2. 실물모형 화재실험에 대한 기존 연구

이창수(2011)는 실물모형 화재실험을 통해 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝의 내화성능을 일반 쉴드터널 라이닝과 비교·평가하였다. 이창수의 연구결과에 대해 간략히 정리하면 다음과 같다.

2.1 실물모형 화재실험 개요

이창수(2011)는 설계강도 42MPa의 길이 약 2.5m, 폭 1.2m 및 두께 0.25m인 쉴드터널 세그먼트 3개를 접합하여 Fig. 1과 같은 일반 및 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝을 각각 제작하여 실물모형 화재실험을 수행하였다. 시험체에 사용된 콘크리트의 배합은 Table 1과 같다. Fig. 2는 실물모형 화재실험 진행 사진이다.



Fig. 1 Test specimen

2.2 깊이별 최대온도 및 잔존압축강도

실물모형 화재실험에서 쉴드터널 라이닝의 가열면에서부터 깊이별 최대온도는 Table 2와 같다. 깊이 25mm에서 일반 쉴드터널 라이닝이 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝에 비해 약 110°C 이상의 높은 온도가 나타났다. 이는 폴리프로필렌 섬유에 의한 온도저감 효과와 더불어 하이브리드 섬유가 폭렬을 방지함으로써 폭렬에 의한 가열단면의 변화를 최소화시킨 결과이다.

실물모형 화재실험 후 코어 채취를 통해 측정된 압축강도는 Table 3과 같다. 28일 재령에서의 압축강도는 약

Table 1 Mix proportion

Type	W/C (%)	Unit weight (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Steel fiber	PP fiber
Normal	35.7	135	378	734	1170	-	-
Hybrid						20	0.9



Fig. 2 Full-scale fire test

Table 2 Maximum temperatures of shield tunnel linings

Depth (mm)	Max. temperature (°C)	
	Normal	Hybrid
25	483.0	370.3
50	280.3	255.5
75	239.5	223.2
100	156.1	169.0
250	86.2	70.9

Table 3 Compressive strength of core specimens

Specimen	Comp. strength (MPa)	Max. temperature (depth 25mm)
Normal	32.2	483.0
Hybrid	37.3	370.3

46.9MPa이다. 수열온도가 높은 일반 쉘터널 라이닝이 하이브리드 섬유보강 쉘터널 라이닝에 비해 잔존압축강도가 낮게 측정되었다.

3. 고온노출된 쉘터널 라이닝의 손상평가

3.1 고온노출된 쉘터널 라이닝의 손상평가 방법

3.1.1 잔존 압축강도

화재에 의해 피해를 입은 구조물의 보수·보강 대책을 결정하기 위해서는 수열온도에 의한 구조물의 강도저하 정도를 평가해야 한다. 실물모형 화재실험 후 쉘터널 라이닝의 수열온도에 따른 잔존압축강도는 기존의 온도에 따른 콘크리트의 역학적 특성변화에 관한 연구결과를 적용하여 예측하였으며, 이를 이창수(2011)의 연구결과와 비교하였다.

3.1.2 X선 회절분석

콘크리트 중의 시멘트 수화생성물 및 고온에 의해 열화된 물질들은 X선 회절분석을 통해 정성적인 평가가 가능하다. 그리고 X선 회절분석으로 추정된 물질들을 비교하면 콘크리트의 수열온도를 예측할 수 있다.

화재실험 후 시험체의 가열면에서 부터 깊이별로 시료를 채취하여 X선 회절분석을 실시하였다. 측정조건은 CuKα (Ni Filter) radiation, 3deg./min의 스캐닝 속도로 5~50° (2Theta)의 범위에서 측정하였다.

3.1.3 열중량 분석

열중량 분석은 시료를 일정한 승온속도로 가열하면서 시료의 중량변화를 측정하여 시료의 조성물질을 예측하는 분석기법이다.

열중량 분석을 위해 깊이별로 미분말 시료 50mg을 채취하여 20°C/min의 승온속도에서 최고 900°C까지 중량변화를 측정하였다.

3.2 온도에 따른 잔존압축강도 평가결과

화재에 의해 콘크리트의 온도가 상승하게 되면 콘크리트 내의 골재는 계속 팽창을 하지만 시멘트 수화물은 110°C 이상의 온도에서 수축하는 경향을 보인다. 이러한 현상에 의해 시멘트 페이스트 및 골재와 시멘트 페이스트의 계면

에 균열을 야기시켜 그 결과 콘크리트의 압축강도는 저하하게 된다(한국콘크리트학회, 2005).

온도에 따른 콘크리트의 압축강도 저하특성은 국내·외 여러 연구자들에 의해 수행되어 온도별 잔존압축강도율을 제시하고 있다. 이들의 연구 중 실물모형 화재실험에 사용된 쉘터널 라이닝과 유사한 배합에 대해 잔존압축강도율을 제시한 대표적인 연구결과를 Table 4 및 Fig. 3과 같다(김홍열 등, 2005; 신용석 등, 2010; Lie and Kodur, 1996; Eurocode2, 2004).

Table 4에서 보면 하이브리드 섬유 또는 강섬유를 혼합한 콘크리트가 일반 콘크리트에 비해 고온에서의 잔존압축강도율이 크게 나타나고 있다. 이는 강섬유가 콘크리트 매트릭스 내에서 가교역할을 함으로써 급격한 온도구배에 따른 콘크리트의 체적변화를 제어하여, 고온에서 발생하는 미세균열의 확장을 완화시키기 때문이다. 추가적으로 하이브리드 섬유의 경우에는 고온에서 폴리프로필렌 섬유가 용융되면서 수증기압을 이완시킬 수 있는 미세경로(microchannel)를 만들어 폭렬 저감 및 열전도를 지

Table 4 Residual compressive strength ratio with concrete types

Temp.	Kim (2005)	Shin (2010)		Lie (1996)	EC2 (2004)
20	1	1	1	1	1
100	0.62	-	-	1.06	1
200	0.82	0.92	0.92	1.1	0.95
300	0.79	-	-	1.1	0.85
400	0.74	0.85	0.91	1.1	0.75
600	0.29	0.49	0.56	0.64	0.45
800	0.08	0.24	0.35	0.41	0.15
Design Strength (MPa)	49	40	40	35	-
Fiber	-	-	hybrid	steel	-

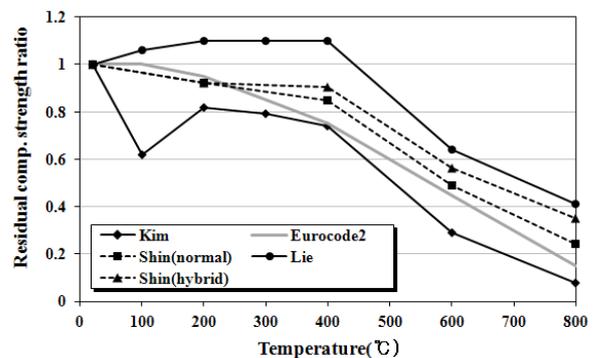


Fig. 3 Residual compressive strength ratio of concrete subjected to different temperatures

연시킴으로써 낮은 수열온도를 받아 일반 콘크리트에 비해 상대적으로 높은 잔존압축강도율을 보인다(Chen and Liu, 2004).

Fig. 3을 보면 상온에서 300°C까지는 압축강도의 저하가 크지 않거나 상온 압축강도보다 상회한다. 하지만 400°C 이상에서는 급격한 강도저하가 나타나고 600°C에서는 상온 압축강도의 약 50% 수준으로 감소된다. 따라서 고온에 의한 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도를 평가하기 위해서는 400~600°C의 온도범위에 대한 정확한 수열온도 예측이 중요한 사항이다.

압축강도 측정을 위해 채취한 코어는 화재에 의해 손상된 부위뿐만 아니라 가열면에서 떨어진 깊이방향의 건전부를 함께 포함하고 있다. 그러므로 코어를 통해 압축강도를 측정하게 되면 건전부보다 고온에 의해 손상된 가열면 부위가 먼저 파괴되어, 측정된 강도결과는 주로 손상된 부위의 강도특성이 반영된 것으로 볼 수 있다. 따라서 실물 모형 화재실험을 통해 측정된 가열면 부근(깊이 25mm)에서의 최대 수열온도를 기존의 연구에서 제시한 온도별 잔존압축강도율에 적용하여 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도를 Table 5와 같이 산출하였다.

Fig. 4는 일반 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도 측정결과와 섬유 무혼입 콘크리트에 대한 잔존압축강도 산출값

Table 5 Results of estimated residual compressive strength

Researcher	Comp. strength (MPa)		Residual comp. strength ratio	
	Normal	Hybrid	Normal	Hybrid
Kim(2005)	25.9	-	0.62	-
Shin(2010)	32.7	42.5	0.70	0.91
EC2(2004)	30.4	-	0.65	-
Lie(1996)	-	51.5 ¹⁾	-	1.1

¹⁾ Steel fiber reinforced concrete

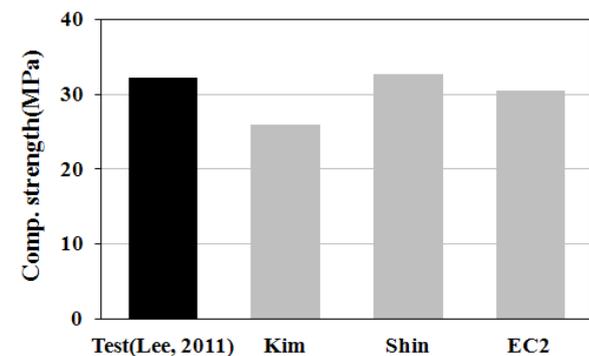


Fig. 4 Comp. strength of normal concrete at 483.0°C

(Table 5)을 비교한 것이다. 실물모형 화재실험에서의 쉘드터널 라이닝 설계강도는 42MPa로 신용석 등(2010)의 연구에서 사용된 콘크리트 배합과 매우 유사한데, Fig. 4의 결과를 보면 약 2%의 오차로 잔존압축강도가 상당히 일치하고 있다. 일반콘크리트에 대한 잔존압축강도율을 제시하고 있는 Eurocode2와는 약 6%의 잔존압축강도 차이가 나타났다. 반면, 김홍열 등(2005)의 연구결과는 약 20% 정도 낮은 잔존압축강도가 산출되었다. 콘크리트의 강도가 고강도일수록 일반강도에 비해 약 450°C 미만의 온도에서 강도저하가 크게 나타나는 데 49MPa의 고강도 콘크리트를 사용한 김홍열 등의 연구결과도 이러한 경향이 반영되어 코어채취를 통해 측정된 잔존압축강도보다 낮게 예측되었다(대한건축학회, 2008).

하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도 측정결과와 신용석 등(2010) 및 Lie and Kodur(1996)의 결과를 이용해 산출된 잔존압축강도를 Fig. 5와 같이 비교하였다. 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도는 37.3MPa이다. 반면 신용석 등(2010) 및 Lie and Kodur(1996)의 결과에서는 모두 40MPa 이상의 비교적 높은 잔존압축강도 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 고온에서 콘크리트에 발생하는 미세균열을 강섬유가 제어하여 강도저하를 감소시키기 때문에 나타나는 결과이다. 실물모형 화재실험에서 사용한 하이브리드 섬유는 강섬유 혼입량이 20kg/m³인 반면 신용석 등(2010)과 Lie and Kodur(1996)는 약 40kg/m³의 강섬유를 사용하였다.

실물모형 화재실험 후 측정된 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도와 기존의 연구결과를 토대로 산출한 잔존압축강도를 비교한 결과, 일반 쉘드터널 라이닝의 경우에는

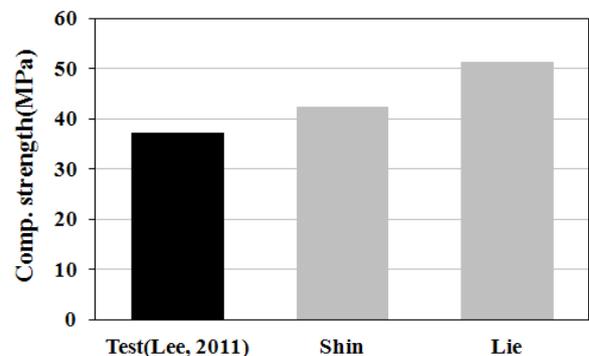


Fig. 5 Comp. strength of hybrid-fiber reinforced concrete at 370.3°C

기존의 연구결과와 약 10% 이내의 오차가 나타났다. 따라서 일반 쉘드터널 라이닝의 수열온도 예측이 가능하다면 이에 따른 콘크리트의 잔존압축강도 또한 충분히 추정 가능할 것으로 판단된다. 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 경우에는 기존의 연구결과가 다소 높은 잔존압축강도가 나오는 것으로 산출되었다. 이는 콘크리트의 기본 배합특성과 더불어 섬유 혼입량도 잔존압축강도에 영향을 주기 때문이며, 섬유보강 쉘드터널 라이닝에 대해서는 추후 섬유 혼입량에 따른 콘크리트의 잔존압축강도를 위한 실험적 연구가 추가적으로 이루어진다면 화재 후 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 잔존압축강도 추정도 가능할 것으로 사료된다.

화재 후 쉘드터널 라이닝의 코어를 채취한 후 압축강도를 측정할 결과, 고온에 의해 손상된 부위의 강도저하 정도를 판단할 수 있었다. 하지만 코어 채취에 의한 압축강도 측정은 고온에 의한 손상깊이를 평가하는 데는 한계가 있다(장수호 등, 2006). 한편 고온에 노출된 쉘드터널 라이닝의 수열온도를 예측할 수 있다면 기존의 연구결과를 활용하여 콘크리트의 잔존압축강도를 충분히 예상할 수 있다. 이와 더불어 고온에 의한 손상깊이도 판단가능하다. 즉, 화재 후 쉘드터널 라이닝의 정확한 손상평가를 위해서는 코어 채취를 통한 압축강도 측정과 함께 수열온도의 평가가 이루어져야 할 것이다.

3.3 깊이별 수열온도 평가결과

콘크리트는 시멘트 수화물과 흡착수, 수화물의 세공 내에 존재하는 모세관수, 겔수, 자유수 등으로 구성되어 있다. 이에 고온 하의 콘크리트는 물의 탈수와 탈수에 따른 공극 구조의 변화 및 화학적 변화를 동반한다. 콘크리트의 온도가 100°C를 초과하게 되면 콘크리트 내의 수분이 증발하여 수증기압을 발생시킨다. 이후 400°C의 온도에 이르면 수산화칼슘(Ca(OH)₂)은 탈수가 시작되고 약 450~550°C의 범위에서 분해되어 콘크리트의 강도를 급격히 저하시키는 원인으로 작용한다. 약 700°C 이상의 온도에 이르면 C-S-H 및 탄산칼슘(CaCO₃)이 분해되고 1200°C의 온도에서 콘크리트는 용해되게 된다(송훈 등, 2004; Fletcher et al., 2007).

이러한 온도에 따른 콘크리트의 화학적 변화를 분석하면 쉘드터널 라이닝의 깊이별 수열온도를 추정할 수 있다. 콘크리트의 화학적 변화를 분석하기 위해 사용되고

있는 대표적인 방법으로는 X선 회절분석, 시차열 분석 및 열중량 분석 등이 있다.

본 연구에서는 일반 쉘드터널 라이닝과 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝에 대해 실물모형 화재실험 후 깊이별로 시료를 채취하고, X선 회절분석과 열중량 분석을 수행하여 쉘드터널 라이닝의 수열온도를 예측하였다.

3.3.1 X선 회절분석 결과

Fig. 6은 쉘드터널 라이닝의 깊이별 X선 회절분석 결과를 나타낸다. Fig. 6(a)는 일반 쉘드터널 라이닝의 깊이별 X선 회절패턴이다. 깊이 25mm에서부터 250mm까지 콘크리트의 주요 수화물인 수산화칼슘 즉, Portlandite 결정피크가 검출되고 있다. 그 외에 콘크리트에 사용된 골재가 시료에 함유되어 Quartz 및 Feldspar의 피크가 나타났으며, 시료 채취 중 공기 중의 이산화탄소와 반응하여 생성된 탄산칼슘(CaCO₃)의 결정형태 중 하나인 Calcite의 피크도 존재하고 있다. Portlandite의 분해가 약 450~550°C의 범위에서 발생하는 것을 고려한다면, X선 회절분석 결과만으로는 25mm 위치에서 예상할 수 있는 수열온도는 대략 450°C 정도이다.

한편 Fig. 6(b)의 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 X선 회절패턴을 살펴보면, 깊이 25mm에서 일반 쉘드터널 라이닝과는 달리 약 42°(2Theta)에서 피크가 검출되었다. 이는 콘크리트 내에 존재하는 강섬유가 고온에 의해 산화되면서 생성된 산화철이 시료 채취 과정에 혼입되어 나타난 결과로 판단된다. 이러한 특징 외에는 일반 쉘드터널 라이닝의 X선 회절패턴과 유사하게 모든 깊이에서 Portlandite의 피크가 존재하였다. 따라서 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 경우에도 깊이 25mm 위치에서의 수열온도는 450°C 이하일 것으로 예상된다.

실물모형 화재실험의 결과에서는 일반 쉘드터널 라이닝과 하이브리드 섬유보강 쉘드터널 라이닝의 25mm 깊이에서 수열온도는 각각 483.0°C와 370.3°C로 약 110°C의 수열온도 차이가 발생하였다. 하지만 X선 회절분석 결과로는 두 시험체 모두 약 450°C 이하의 수열온도를 받은 것으로 추정이 가능할 뿐 X선 회절패턴의 차이가 명확하게 나타나지 않아 두 시험체의 수열온도 차이까지 판단하기에는 무리가 있었다.

3.3.2 열중량 분석 결과

콘크리트의 수열온도를 추정하기 위해 열중량 분석을

● : portlandite, ◆ : quartz, □ : feldspar, △ : calcite, ○ : iron oxide

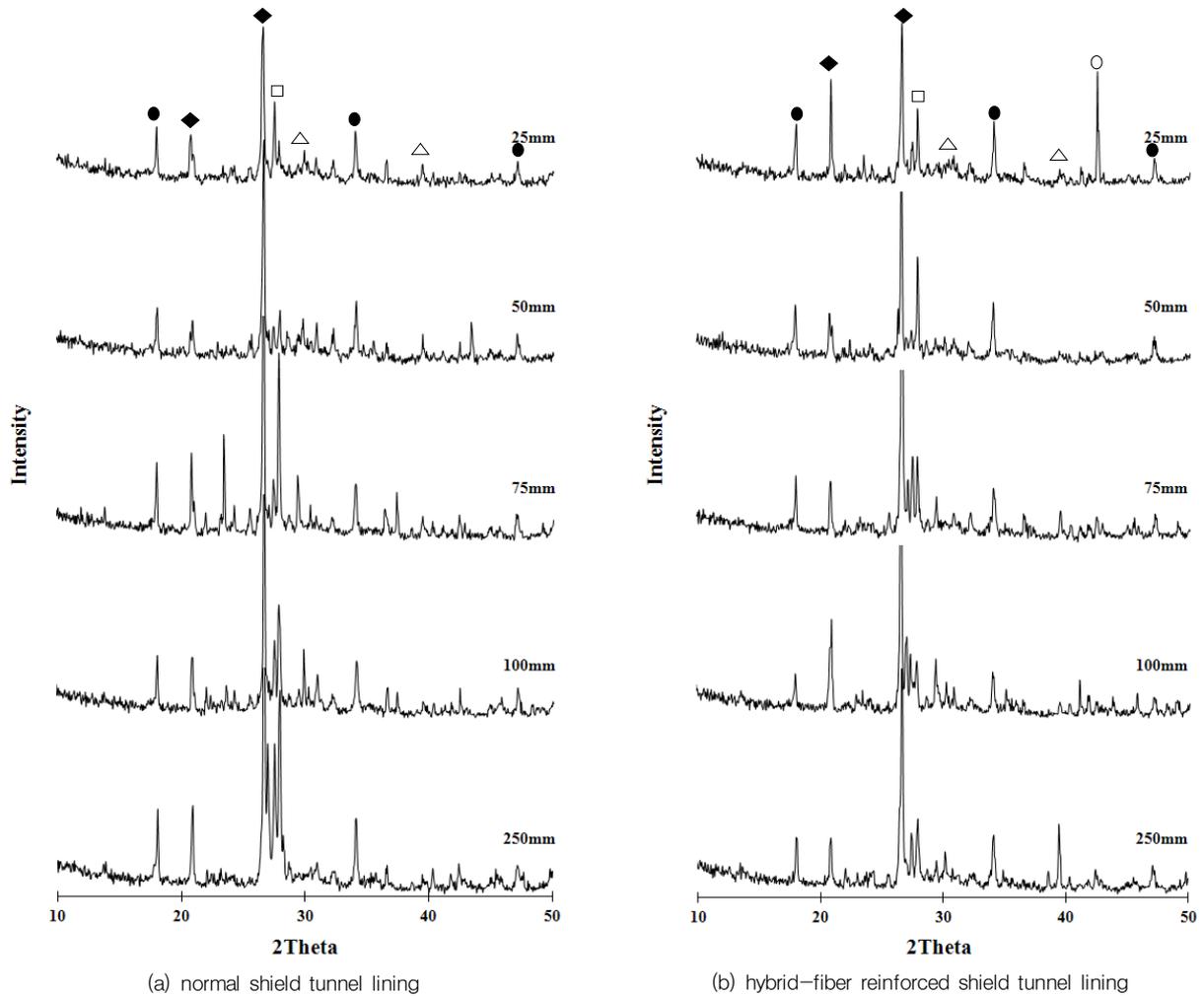


Fig. 6 XRD pattern of shield tunnel linings

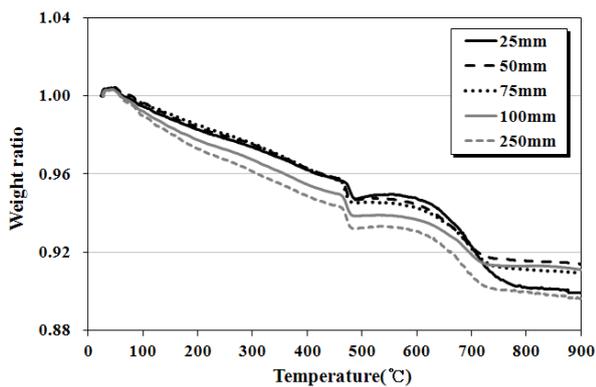


Fig. 7 TGA of normal shield tunnel lining

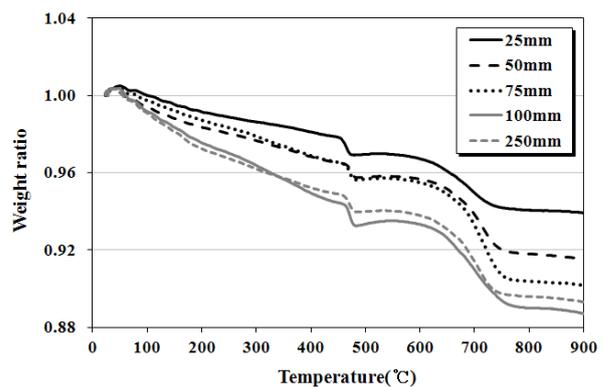


Fig. 8 TGA of hybrid-fiber reinforced shield tunnel lining

수행한 결과는 Figs. 7 및 8과 같다.

열중량 분석 결과를 보면 두 시험체 모두 450°C 부근에서 급격한 중량감소를 보이고 있다. 이러한 중량감소는 수

산화칼슘의 분해에 의한 영향으로 두 시험체 모두 수산화칼슘이 존재하고 있음을 의미한다. 한편 약 650°C 이후에 나타나는 중량변화는 시료 채취 과정에서 생성된 Calcite

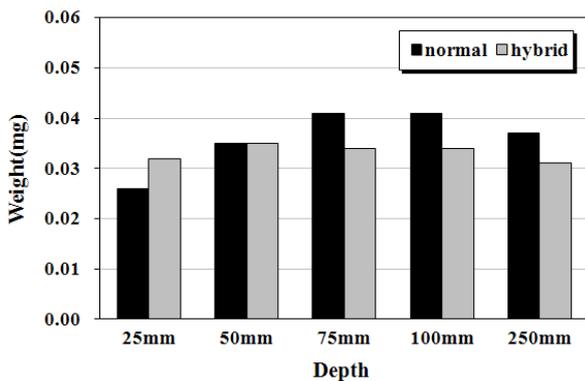


Fig. 9 Reduced weight of shield tunnel linings

의 분해에 의한 것으로 판단된다. 일반 쉴드터널 라이닝과 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝의 온도에 따른 중량변화를 비교분석한 결과, X선 회절분석 결과와 마찬가지로 수산화칼슘이 존재하고 있어 두 시험체 모두 수열온도가 최대 450°C 이하이다.

한편 일반 쉴드터널 라이닝과 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝의 약 450°C 온도영역에서 감소된 중량변화만을 깊이별로 비교한 결과는 Fig. 9와 같다. 일반 쉴드터널 라이닝의 경우 25mm 깊이에서의 감소된 중량이 깊이 50~250mm에서 감소된 중량보다 상대적으로 낮게 측정되었다. 반면 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝의 경우 감소된 중량이 모든 깊이에서 비슷하였다. 일반 쉴드터널 라이닝에서는 깊이 25mm 위치에서 수산화칼슘의 분해가 시작되었을 것으로 예상되며, 450°C 이상의 수열온도를 받았을 것으로 판단된다. 하이브리드 쉴드터널 라이닝의 경우에는 감소된 중량 차이가 크지 않아 모든 깊이에서 수산화칼슘의 분해가 발생하지 않은 것으로 판단되어 수열온도는 450°C 이하인 것으로 추정할 수 있다.

이상과 같이 쉴드터널 라이닝의 수열온도 예측을 위해 X선 회절분석과 열중량 분석을 수행한 결과, 일반 쉴드터널 라이닝은 450°C 이상, 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝은 450°C 이하의 수열온도를 받은 것으로 추정되었다. 하지만 위의 평가방법 모두 약 450°C의 온도에서 추정이 가능할 뿐 정확한 수열온도를 예측하는 것에는 한계가 있다.

ITA(International Tunneling Association)는 구조물을 화재로부터 보호하기 위해 화재에 의한 열방출 및 화재시간에 따른 도로터널 기준으로 한계허용온도를 380°C로 제안하고 있다(ITA, 2004). ITA에서 제시한 한계허용온도를 기준으로 실물모형 화재실험에서의 쉴드터널 라

이닝을 평가해 보면 일반 쉴드터널 라이닝의 경우에만 한계허용온도를 초과하여 이에 대한 복구방안이 결정되어야 한다. 하지만 현재의 손상평가 기법을 통해서 하이브리드 쉴드터널 라이닝도 한계허용온도를 초과한 것으로 평가되어질 수 있다. 또한 콘크리트는 400°C 이상의 온도에서 급격한 강도저하가 발생하기 때문에 화재 후 구조물의 적절한 복구방안을 결정하기 위해서는 400~600°C 범위의 수열온도에 대한 보다 정확한 예측이 이루어져야 할 것이다. 이를 위해서는 현재 적용하고 있는 손상평가 방법과 더불어 해석적 기법이 병행되어야 하며, 수열온도 예측기법에 대한 체계적인 연구가 진행되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 실물모형 화재실험 및 기존 연구결과를 토대로 고온에 노출된 쉴드터널 라이닝의 손상평가를 수행하였으며 이와 함께 손상평가 방법의 한계점을 분석하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 고온에 의한 부재의 강도저하 정도는 코어 채취를 통해 측정된 압축강도로 평가가 가능하며, 정확한 수열온도 예측이 이루어진다면 기존의 연구결과를 통해서도 충분히 부재의 잔존압축강도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) X선 회절분석을 통해 수열온도를 예측한 결과, 두 시험체 모두 약 450°C 이하의 수열온도를 받은 것으로 추정되었다. X선 회절분석으로는 450°C 이하의 수열온도를 받은 콘크리트에 대해 유사한 회절패턴을 나타내기 때문에 450°C의 온도범위에 대한 수열온도 평가에는 한계가 있다.
- (3) 열중량 분석 결과에서는 일반 쉴드터널 라이닝의 경우 450°C 이상의 수열온도, 하이브리드 섬유보강 쉴드터널 라이닝은 450°C 이하의 수열온도를 받은 것으로 평가되었다. 열중량 분석을 통해서 X선 회절분석에 비해 두 시험체의 수열온도 차이가 있는 것을 예측할 수 있었으나 열중량 분석 또한 정량적인 수열온도 예측은 힘들다.
- (4) 온도에 따른 콘크리트의 강도저하 특성 등을 고려할 때, 400~600°C의 수열온도범위에서는 기기분석에 의한 평가와 더불어 해석적 기법을 병행하여 수열온도를 보다 정확히 예측해야 한다. 이를 위해

서는 화재 상황을 정밀하게 모사하기 위한 열방출 특성과 정확한 수열온도 예측을 위한 콘크리트의 온도 의존적 열특성치에 대한 다양한 실험 및 이론적 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

1. 국토해양부, 2011 도로교량 및 터널 현황조사, 2011, 국토해양부.
2. 김인수, "국내외 콘크리트 구조물의 화재피해 사례분석", 콘크리트학회지, 제14권 2호, 2002, pp.10-16.
3. 김홍열, 서치호, 신현준, "고온 영역에서 강도영역별 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 구조계 21권 7호, 2005, pp.55-66.
4. 대한건축학회, 고강도콘크리트 구조내화설계, 기문당, 2008.
5. 박해균, 전상은, 이명섭, "터널 구조물의 내화 기술", 콘크리트학회지, 제17권 5호, 2005, pp.76-80.
6. 송훈, 문경주, 소양섭, "고온하의 시멘트 경화체의 물리적 특성 및 공극구조", 대한건축학회논문집, 구조계 20권 1호, 2004, pp.107-114.
7. 신용석, 이지민, 유명환, 조철희, 김정섭, "하이브리드 섬유 혼입 고강도 콘크리트의 내화 및 역학적 특성에 관한 연구", 한국건축시공학회지, 제10권 제6호, 2010, pp.67-75.
8. 안태송, "터널화재에 대한 내화의 필요성", 한국콘크리트학회지, 제19권 1호, 2007, pp.12-15.
9. 원종필, 박경훈, 박찬기, 이상우, "지하공간 콘크리트 구조물의 역학적 특성 및 내화성능 향상을 위한 하이브리드섬유보강 콘크리트의 성능 평가", 대한토목학회 논문집, 제27권 4A호, 2007, pp.627-633.
10. 원종필, 최민정, 이수진, 이상우, "도시철도 터널구조체의 내화안정성 평가를 위한 표준시간-온도곡선 적용", 구조물진단학회지, vol. 14, No. 3, 2010, pp.118-122.
11. 이찬영, 안태송, 김낙영, "터널 라이닝 콘크리트의 내화공법에 따른 VE/LCC 분석", 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2008, pp.4111-4114.
12. 이창수, "콘크리트 쉼터 터널 라이닝의 내화성능 평가", 한국방재학회논문집, 제11권 5호, 2011, pp.105-113.
13. 장수호, 윤태국, 최순욱, 배규진, "화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책", 한국지반공학회지, vol. 22, No. 3, 2006, pp.7-19.
14. 한국콘크리트학회, 철근콘크리트 구조물의 내화특성, 기문당, 2005.
15. Chen, B., Liu, J., "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures", Cement and Concrete Research 34, 2004, pp.1065-1069.
16. Chew, M. Y. L., "The Assessment of Fire Damaged Concrete", Building and Environment, vol. 28, No. 1, 1993, pp.97-102.
17. Eurocode 2, Design of concrete structures, Part 1-2: General rules-Structural fire design, BS EN 1992-1-2: 2004.
18. Fletcher, I. A., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., Usmani, A., "Behaviour of concrete structures in fire", Thermal science, vol. 11, No. 2, 2007, pp.37-52.
19. Hack, A., "Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the EUREKA Project", Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 13, No. 4, 1998, pp.377-381.
20. ITA, "Maintenance and Repair; Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels", ITA Working Group No. 6, 2004.
21. Kaundinya, I., "Protection of road tunnel linings in cases of fire", FEHRL/FERSI/ECTRI Young Researchers Seminar, BRNO, Czech Republic, 2007, pp.1-9.
22. Lie, T. T., Kodur, V. K. R., "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 23, 1996, pp.511-517.
23. Shuttleworth, P., "Fire Protection of Concrete Tunnel Linings", The 3rd International Conference on Tunnel Fire and Escape from Tunnels, 2001, pp.157-165.

(접수일자 : 2012년 3월 12일)

(수정일자 : 2012년 4월 16일)

(심사완료일자 : 2012년 4월 23일)

요 지

본 연구에서는 실물모형 화재시험 후 쉼터터널 라이닝의 손상평가를 수행하였다. 먼저 고온에 노출된 쉼터터널 라이닝의 코어 채취를 통해 잔존압축강도를 측정하고, X선 회절분석 및 열중량 분석으로 수열온도를 예측하였다. 코어 채취에 의해 측정된 잔존 압축강도를 통해 고온에 의한 부재의 강도저하를 평가할 수 있었다. 또한 정확한 수열온도 예측이 이루어진다면 기존의 연구결과를 통해 부재의 잔존압축강도를 추정할 수 있다. X선 회절분석 및 열중량 분석은 약 450℃의 온도를 기준으로 수열온도 예측이 가능하지만 정량적인 수열온도의 판단에는 한계가 있었다. 400~600℃의 수열온도범위에서는 기기분석에 의한 평가와 더불어 해석적 기법이 병행된다면 보다 정확한 수열온도 예측이 가능할 것이다.

핵심 용어 : 실물모형 화재시험, 쉼터터널 라이닝, 잔존압축강도, 수열온도