건축방재

화재에 노출된 콘크리트 세그먼트 온도거동 특성에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Temperature Behavior Characteristics of the Concrete Segment

조범연* · 김흥열** · 김형준*** · 권인규**** · 원종필*****

Cho, Bum-Yean*, Kim, Heung-Youl**, Kim, Hyung-jun***, Kwon, In-Kyu****, Won, Jong-Pil*****

Abstract

As the plan to subsea tunnels was announced in Korea, how to secure fire-resistance of the concrete linings in shield tunnels has been emerging as an important issue. Reinforced concrete segment used inside of shield tunnels is structural member which resists loads such as earth pressure or hydraulic pressure. Since high-strength concrete having compressive strength of over 40 MPa is used, significant damage to the segment is foreseeable upon a fire unless elaborate measures are taken against a fire. Therefore, in this study to find how to improve safety of concrete structure in shield tunnels, damage range observed from full-scale fire resistance test was compared with that observed from fire resistance test provided by the EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems) and the behaviors of concrete linings in the fire tests were evaluated.

Key words : Tunnel fire, Structural fire resistance, Spalling, Fire damage range

요 지

최근 한국에서는 해저터널 시공계획이 발표되면서 쉴드터널의 콘크리트 라이닝 내화성능 확보방안에 관한 중요성이 제기되고 있다. 쉴드터널 내부에 시공되는 철근콘크리트 세그먼트는 토압이나 수압 등 하중을 지지하는 구조부재로 압축강도가 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트를 사용하고 있어 특별한 내화대책이 없을 경우에는 화재로 인해 세그먼트에 상당한 피해가 예상되며 아울러 폭발에 의한 단면손실 및 철근 강도의 손실로 터널 붕괴로까지 이어질 가능성이 높다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 쉴드터널 콘크리트 구조물의 화재안전성 향상에 기여할 수 있도록 실대형 터널 세그먼트 내화실험의 화재손상범위와 EFNARC(European Federation of Producer and Applicators of Specialist Product for Structures)에서 제시하고 있는 터널 콘크리트 세그먼트의 내화성능평가 실험방법에 따른 내화실험 화재손상범위를 비교하여 실험방법에 따른 콘크리트 세그먼트의 화재거동 특성을 평가하였다.

핵심용어 : 터널화재, 구조체 내화성능, 폭발, 화재손상범위

1. 서 론

현재까지 국내 대부분의 터널은 NATM(New Austrian Tunneling Method) 공법으로 대표되는 발파에 의한 재래식공법으로 시공되고 있지만 최근 전 세계적으로 기계화·자동화 기술의 발달로 인해 터널의 시공법은 굴착 및 발파(Drill and Blast) 공법에 의한 시공에서 TBM(Tunnel Boring Machine)

공법으로 대표되는 기계화 시공으로 전화되고 있는 추세이다. 또한 현재 국내에서 활발히 구상 또는 검토되고 있는 한-일 해저터널, 한-중 해저터널 시공 계획 역시 TBM 공법을 염두 해두고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행중이다.

발파로 인한 시공법인 NATM 공법이 주를 이루는 국내 터널의 경우, 시공된 콘크리트 라이닝은 구조체 역할보다는 미관 및 유지관리를 위한 내장재 및 마감재로써의 역할을 수립

*정회원. 서울시립대학교 건축공학과 박사과정(E-mail: choby277@kict.re.kr)

Member. Ph.D Candidate, Department of Architecture Engineering, University of Seoul

**교신저자. 정회원 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구위원(Tel: +82-31-369-0507, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: hykim@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

***서울시립대학교 건축공학과 박사과정 Ph.D Candidate, Department of Architecture Engineering, University of Seoul

****강원대학교 소방방재공학과 교수 Professor, Department of Fire and Protection Engineering, Kangwon National University

*****건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 Professor, Department of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk University

한다는 인식이 높았다. 때문에 국내터널의 화재안전 관련 기준 및 연구는 환기 및 방재시스템(소화설비, 경보설비, 피난 및 대피시설 설비)의 경우 활발히 진행되고 있지만, 콘크리트 라이닝에 대한 내화기준은 전무한 상황이며 라이닝 관련 내화 연구 또한 폭렬방지에 대한 연구가 단편적으로 수행되었던 실정이다.

하지만 TBM 공법에 적용되는 세그먼트 라이닝은 세그먼트 라이닝에 작용하는 하중을 산정해야 하는 구조체 역할을 하므로 화재 시 대응할 수 있는 적절한 내화성능의 검토가 필요하다. 특히 해저터널의 경우, 전체 터널의 안정성 및 품질을 결정하는 데 매우 중요한 성능으로 인식되고 있는 세그먼트의 방수성능은 내화성능과도 밀접한 관계가 있다. 해저터널에서 화재로 인해 세그먼트의 구조성능이 저하될 경우 세그먼트 라이닝을 구성하고 있는 볼트이음부, 세그먼트 조인트 등의 열화로 인해 세그먼트의 방수성능 또한 저하되기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 TBM 공법으로 시공된 터널에서의 화재시 세그먼트 라이닝의 화재거동 특성을 평가하기 위해 세그먼트 라이닝의 주요 구성재료인 콘크리트에 대한 내화성능을 선행하여 분석하고자 한다. 이를 위해 콘크리트의 강도 저하 온도범위를 분석하고 콘크리트를 기반으로 제작된 세그먼트 연속부재에 대한 내화실험을 통한 화재시 세그먼트 라이닝의 손상범위를 평가하였다.

2. 콘크리트 세그먼트 손상범위 분석

2.1 터널화재사고 사례를 통한 구조물 손상범위 분석

세계적으로 발생한 대표적인 터널화재사고는 몽블랑터널 화재사고와 유로터널 화재사고를 들 수 있다.

몽블랑 터널은 프랑스와 이탈리아를 연결하는 총 연장 11.6 km의 장대터널이다. 1999년 발생한 몽블랑 터널의 화재 사고는 마가린과 밀가루를 싣고 프랑스에서 이탈리아 방향으로 이동하던 벨기에의 냉동트럭에서 엔진과열로 추정되는 화재가 발생하였고, 이를 뒤따르던 차량으로 번지면서 승용차 9대와 트럭 25대가 소실되면서 39명이 사망하고 53시간동안 화재가 지속되었다. 이때 화재지점에서의 온도는 최대 1,000°C 이상으로 추정되고 있으며 도로구간 슬래브와 덕트 아래 부분은 내화처리를 한 구조로 이루어져 피해가 크지 않았으나, 내화처리가 되지 않은 천정부 세그먼트는 900 m 이상의 길이에서 심각한 폭열로 인한 구조체 손상을 입은 것으로 보고되었다.

유로터널은 영국과 프랑스를 연결하는 총 연장 50 km의 초장대 터널로써, 3차례의 화재피해 사례가 발생하였다. 1996년 첫 번째 발생한 유로터널화재는 터널 라이닝의 폭렬 등에 의한 구조물 보수피해비용만 약 2억 유로로 추정되며 이는 터널 전체의 구조적 내화처리 비용인 2천만 유로의 10배에 달하는 피해액이었다. 2006년 발생한 두 번째 유로터널화재의 경우

에는 화염원이 크지 않아 조속히 진화되어 큰 피해가 발생하지 않았으나 2008년 세 번째 유로터널화재로 인해 구조물 보수피해비용이 4천 6백만 유로 이상으로 추정되며, 이는 터널 전체의 구조적 내화처리 비용(2천만 유로)의 2.3배에 해당되는 비용이다(Park, 2011).

2.2 콘크리트 세그먼트의 구조손상 온도범위 분석

고온을 받은 콘크리트의 강도는 약 200°C까지는 상온하에서의 강도에 비해 크게 저하되지 않으며, 200°C 이상의 온도부터 선형적으로 저하하는 경향을 보이는 것으로 보고되고 있다(ITA, 2004).

또한 2001년부터 2006년까지 유럽의 유레카 프로젝트(EUREKA Project)를 통해 분석된 연구를 토대로 국제터널협회(International Tunneling Association)에서 작성된 보고서에는 고온영역에서의 콘크리트 압축변화를 Fig. 1과 같이 분석하여 라이닝의 구조적 특성이 현저히 저하되는 구조손상 범위를 분석하였다.

분석결과 콘크리트의 내부온도가 450°C에 도달할 때 59%의 잔존 압축강도를 나타내며 이 온도범위가 콘크리트가 구조적인 역할을 상실하는 온도로 규정하였다. 하지만 콘크리트는 축열로 인해 화재가 소화된 후에도 콘크리트내의 온도가 계속 상승한다는 점과 화재 후 콘크리트의 보수보강을 최소화 하기위한 안전율을 고려하여 콘크리트 라이닝 세그먼트의 구조손상 온도범위를 380°C로 규정하였으며(3), Fig. 1을 분석한 결과 이때의 콘크리트 잔존강도 70% 범위에 해당된다.

2.3 터널화재 온도곡선 분석

Fig. 2는 각국에서 제시하고 있는 대표적인 터널화재 시나리오이다. Fig. 2(a)는 RWS 터널화재 시나리오이며 네덜란드 교통부인 Rijkswaterstaat에서 제안한 가장 극악한 조건의 화

Fig. 1. Compressive Strength of Concrete after Temperature Increase(ITA, 2004).

Fig. 2. Types of Tunnel Fire Curve.

재곡선이며, 최대 300 MW의 화재하중이 발생하는 터널내의 유류 운반차량의 사고로 인한 화재상황을 고려한 것이다. Fig. 2(b)는 프랑스 규정에서 제안하고 있는 MHC(Modified Hydrocarbon Curve) 화재 시나리오로써 석유화학공장의 위험물 저장지역, 분배지역 및 석유원료의 화재시 적용되는 화재곡선을 수정하여 제안한 것으로 최대 200 MW의 화재하중의 발생상황을 고려한 시나리오이다. Fig. 2(c) 및 (d)는 유레카 프로젝트의 실험결과를 이용하여 독일에서 개발한 화재시나리오이며 5분 이내에 1,200°C까지 온도가 급격히 상승한 후 철도화재의 경우 60분 이후부터(Fig. 2(c)), 차량화재의 경우 30분 이후부터(Fig. 2(d)) 소화활동으로 인해 화재가 진압되는 상황을 모사한 화재시나리오이다. 이와같이 터널화재 곡선의 온도 및 화재강도가 높은 이유는 초장대 터널에서 화재사고가 발생할 경우, 초동진압 실패시 폐쇄된 공간에서의 화재전파속도가 빨라 단시간 내에 화재의 확산과 함께 고온으로 상승하여 피해를 증대시키기 때문인 것으로 분석된다.

3. 콘크리트 세그먼트 손상범위 분석

주로 콘크리트를 기반으로 제작되는 콘크리트 세그먼트는

화재 발생 시 콘크리트의 폭열로 인해 파괴된 부위를 통한 온도전파로 2차 화재피해가 발생할 수 있기 때문에 실제 화재시 안전 뿐만 아니라 복구에도 많은 어려움이 발생할 수 있다. 콘크리트 세그먼트의 내화성능을 확보하기 위해서는 화재시 세그먼트의 내력을 확보할 수 있도록 화재시 온도상승을 허용범위 이내로 억제하는 대책이 필요하지만, 국내의 경우 터널 구조물의 내화관련 기준이 전무한 상황이기 때문에 세그먼트의 화재거동을 예측하기 힘든 실정이다. 이에 본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝에 대한 화재거동 실증실험을 통해 화재손상범위를 평가하기 위해 콘크리트 세그먼트의 연속 부재를 대상으로 하는 Large scale 시험체를 제작하였으며 폭열 및 콘크리트 내부온도 저감에 효과적인 것으로 알려져있는 합성섬유(강섬유+폴리프로필렌 섬유) 혼입 유·무에 따른 라이닝 구조체의 온도거동 평가를 수행하였다.

3.1 콘크리트 세그먼트 시험체 제작 및 실험조건

본 연구에서는 TBM 공법과 같은 기계화 시공에 실제 적용되는 조건을 반영하고자 현장에 적용되는 세그먼트를 생산하고 있는 국내 T사의 전력구 프리캐스트 세그먼트를 결합하여 Fig. 3과 같이 아치형태의 실험체를 제작하였으며 실험체 양쪽을 내화단열재로 마감하였다. 제작된 콘크리트 시험체는 폭이 4,300 mm, 높이가 1,200 mm이고 프리캐스트 콘크리트의 표준강도인 제령 28일 40 MPa를 목표로 하는 콘크리트 배합을 적용하였으며, 이는 Table 1과 같다.

국내에서는 터널 구조물의 실험방법이 전무한 실정이므로 유럽의 내화재협회인 EFNARC(European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures)에서 제안한 Large scale fire test의 요구조건인 콘크리트 터널라이닝 내화성능 평가시험방법을 위한 표준시험체 제작방법을 준용하여 Fig. 4와 같이 열전대를 설치하였다(EFNARC, 2002).

각 열전대는 콘크리트 표면(가열면)으로부터 25±2 mm의

Fig. 3. Shape of Specimen for Fire Test.

Table 1. Mix Proportion of Concrete

Strength (MPa)	W/C (%)	S/a	Unit Weight (Kg/m ³)						
			Cement	Sand	Gravel (19 mm)	Water	Air-Entraining agent	Polypropylene fiber	Steel fiber
40	39.4	39.2	405.7	676.5	1066.1	159.8	6.5	0.9	20

Fig. 4. Position of Thermo-couples.

거리(2,4,6,8)에 4개의 열전대를 배치하고 50 ± 2 mm의 위치(1,3,5,7)에 4개의 열전대, 75 ± 2 mm의 보강근 밀쪽에 5개의 열전대를 고정하였다. 또한 콘크리트 표면 앞쪽에서 100 ± 2 mm의 위치(3,7)에 2개의 열전대, 뒤쪽에 3개의 열전대(1,5,9)를 배치하여 내부온도를 측정하도록 하였으며. 세그먼트 라이닝의 깊이별 열특성을 측정하기 위해 시험체 내부에 삽입되는 열전대는 1.0 mm 두께의 k타입을 사용하였다.

3.2 터널화재 온도곡선

2.3절에서 나타난 터널화재 온도곡선 중에서 본 연구에서는 열의 분산을 할 수 없는 터널과 같이 환기 및 방재성능을 고려하여 화재 후 30분간 화재가 지속되어 $1,200^\circ\text{C}$ 의 고온에 노출되었다가 소방활동 및 환기·방재시설의 영향으로 인해 30분 후 화재가 진압되는 RABT 터널화재곡선이 가장 적절하다고 판단되어 Fig. 5와 같이 RABT-car 화재시나리오에 대한 콘크리트 세그먼트 라이닝 내부 온도거동 특성을 분석하여 내화성능을 평가하였다.

Fig. 5. Fire Scenario of Test(RABT Fire Curve).

Fig. 6. Heating Furnace of Fire Test.

3.3 콘크리트 라이닝 구조체의 손상범위 평가

실험 변수별 가열 곡선의 구현에 대한 신뢰성 확보를 위하여 실험에 적용되는 가열로는 Fig. 6과 같이 제작하여 실험을 실시하였다. 콘크리트 시험시편의 고온성상을 분석하기 위하여 가열로의 온도 오차범위를 KS(Korea standard) F 2257-1 및 EFNARC 기준에 적합하게 제작하여 가열성능의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 다양한 화재시나리오 구현을 위해 온도조정은 99포인트까지 가능하게 하여 가열비 및 화재강도조정이 가능하고, 최대 온도는 1350°C 이상 구현할 수 있게 내부에 내화재(Iso wool ceramic fiber 1260 board)로 피복하여 터널화재조건의 다양한 조건을 구현할 수 있게 제작하였다.

화재 시나리오에 따른 세그먼트 구조요소의 손상분석은 화염에 노출된 시험체의 깊이별 열전대의 측정온도를 통해 국제터널기구에서 규정한 콘크리트 손상 한계온도인 380°C 를 적용하여 실험체의 손상정도를 평가하였다.

4. 실험결과

4.1 섬유 무혼입 콘크리트 세그먼트 실험체

화재강도를 RABT 화재곡선을 적용하여 합성섬유를 혼입하지 않은 세그먼트 실험체를 120분 동안 가열하는 Large scale 화재시험을 수행하였으며, Fig. 7은 화재시험 후의 시험체 형상이다. 섬유를 혼입하지 않은 실험체의 경우 시험 시작 후 10분이 경과된 후부터 폭발현상으로 인한 콘크리트 박락 현상이 발생하였으며 2시간 내화시험 후 시험체 전체 측면에서 극심한 폭발현상이 발생하였다. 실험체의 폭발깊이는 50 mm 이상으로 측정되었다.

Fig. 7. Tunnel Segment after Fire Test(without fiber).

Fig. 8. Temperature Behavior of Specimen(without fiber).

섬유를 혼입하지 않은 콘크리트 세그먼트는 Fig. 8의 콘크리트 내부 온도 그래프에서 나타난 것과 같이 내부온도가 상승하면서 가열면으로부터 25 mm 깊이에서는 약 470°C 이상 상승하여 고온에서 장시간 노출로 인해 내부 골재의 변형을 초래시키는 결과를 나타내었다. 이때, 콘크리트의 열적 특성에 의해 380°C 이상일 경우 응력은 상온의 50% 이하이므로 내화피복은 반드시 필요한 것으로 판단된다.

4.2 섬유 혼입 콘크리트 세그먼트 실험체

터널화재 시 콘크리트 라이닝 내화성능확보를 위해 사용되는 합성섬유는 폭발방지에 효과적인 것으로 알려져있는 폴리프로필렌 섬유와 강섬유를 하이브리드하여 사용하였다. 화재 시나리오는 RABT 화재곡선을 적용하였으며 120분 동안 1면 가열하는 시험을 수행하였다. Fig. 9는 시험 후의 시험체 형상이며, Fig. 10은 콘크리트의 가열표면으로부터 깊이별 내부 온도를 측정한 결과이다. 섬유를 혼입한 경우 터널 시험체 측면에서 국부적인 폭발현상이 발견되었으나 상부구조에서는 폭발현상이 발생하지 않았다. 세그먼트에 합성섬유를 혼입한 시험체의 내화성능 평가 결과 열전대 매입깊이가 가열면으로부터 25 mm인 지점의 온도가 최고 380°C 미만으로 나타나는 결과를 나타내었으며, 섬유혼입으로 인한 폭발저감 및 내부온도 저감효과로 인해 터널화재 시 콘크리트 라이닝의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9. Tunnel Segment after Fire Test(with fiber).

Fig. 10. Temperature Behavior of Specimen(with fiber).

5. 결 론

국내 터널이 점점 장대화되어 가고 해저터널 터널등의 건설이 증가될 수록 터널 화재의 대형화를 고려한 터널내화용 구조물의 내화성능은 터널 구조 설계에 중요한 요소이다. 본 실험에서는 화재발생시 짧은 시간에 1000°C 이상의 고온을 유발할 수 있는 폐쇄된 특수공간이라는 특성을 지닌 터널 구조물의 내화성능을 확보하기 위하여 ITA의 권장사항을 고려한 RABT 화재 시나리오 조건하에서 140분의 내화성능을 확보하기 위한 콘크리트의 내화성능에 대한 특성을 평가하였으며 섬유를 혼입하지 않은 콘크리트 세그먼트의 경우 화재에 발생한 후 20분이 지나지 않아 세그먼트의 구조체 역할의 상실 범위인 380°C를 초과하였다. 이는 폭발이 발생한 세그먼트 표면을 통해 세그먼트에 고열이 더욱 빨리 전달되어 구조체 역할의 손실 시간이 더욱 빨라진 것으로 판단된다. 반면 섬유 혼입을 통해 고온에서의 콘크리트 세그먼트의 폭발을 효과적으로 제어한 실험체의 경우 모든 깊이에서 세그먼트 구조체 한계온도 범위인 380°C를 초과하지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 화재 시 콘크리트 세그먼트의 내화성능을 확보하기 위해서는 무엇보다 콘크리트의 폭발 방지를 통한 세그먼트 내부의 급격한 온도상승을 방지하는 것이 무엇보다 중요하며, 세그먼트 구조체를 보호하기 위한 소방시설이나 내화피복 적용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원하에 수행된 국가 R&D사업인 “내화피복이 없는 충고절감형 7.5 m 보의 3시간 내화성능 확보 공법 개발(2차년도)” 과제와 관련한 연구에 의행 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- EFNARC (2002) Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnel Structures, Paris, Revision 1.
- ITA Working Group No.6 (2004) Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels, International Tunneling Association, ITA, pp. 36-41.
- Korean Ministry of Land, Transport & Maritime Affairs (2008) Final Report on the Development of Fire Resistance Design Technology for Tunnel Structures(Tear V), pp. 12-14.
- Park, K.H., Kim, H.Y., and Min, B.Y. (2011) An Experimental Study on the Fire Behavior of the Concrete segments in Tunnel Linings, *Journal of Applied Mechanics and Materials*, Vol. 82, pp. 527-532.
- Wilf Butcher (2009) Passive Fire Protection in tunnel - the costs of history repeating itself", *Industrial Fire Journal*, Fourth Quarter 2009, pp. 14-16.

Received ■ January 21, 2014

Revised ■ January 22, 2014

Accepted ■ January 27, 2014