

도시철도 개착식 터널의 내진성능보강시스템 개발에 대한 연구

A study of open cut box curvert tunnel strengthening systems in domestic underground railway

김기홍†
Ki-Hong Kim

권민호*
Min-Ho Kwon

김진호**
Jin-Ho Kim

허진호***
Jin-Ho Hur

ABSTRACT

There are execute of new laws about prevent of earthquake diaster in nation because of some increments of big earthquake occurence frequency. Now develop new composit plate by ductile fiber with strong mechanic materials, which compose of strengthening systems for the underground structures subject to forced displacements. This study is to focus to develop the retrofiting system for the cut and cuver tunnels built without earthquake type load scenario, so that it can provide the safety of existing urban subway system against earthquakes.

1. 서론

최근 발생빈도가 증가하고 있는 국내외 각종 대형 지진으로 인하여 국내에서도 새로운 지진재해대책법이 제정되어 시행되고 있다. 기존 구조물에 대한 내진성능평가를 통하여 충분한 내력을 보유할 수 있도록 구조물을 개선해야 하는 새로운 법안의 시행으로 도시철도 구조물에 대한 내진성능평가 및 내진성능보강에 대한 기본적인 정책이 수립되어 추진 중이지만 내진성능을 충분히 확보할 수 있는, 도시철도 구조물에 사용될 수 있는 적절한 내진성능 보강시스템이 개발되어 있지 않는 상태이다.

내진설계가 되어 있지 않거나, 또는 내진설계가 수행되었더라도 내진설계 규정의 강화등으로 내진성능이 부족한 기존의 도시철도 구조물에 대하여 충분한 내진성능을 발휘할 수 있는 내진성능 보강시스템을 개발하는 연구는 필수적이다. 이러한 연구 목표에 대한 세부연구로서 지중구조물인 도시철도 개착식 터널의 내진성능을 향상시킬 수 있는, 지반거동에 의해 발생하는 구조물의 강제 변위를 허용할 수 있는 연성보강시스템을 개발하고자 한다. 이러한 연성보강시스템의 개발을 위하여 먼저 구조부재의 연성보강을 할 수 있는 연성보강 소재에 대한 연구를 수행하였다.

2. 내진성능보강용 복합재료판 개발

지하 구조물의 연성보강을 할 수 있는 소재로는 기존의 강성재에 연성을 확보할 수 있는 연성재를 접착제로 일체화하여 제작한 적층판 형식의 복합재료판에 대한 연구를 수행 하였으며 개발된 복합재료판을 사용하여 도시철도 지하구조물의 보강시공에 필요한 여러가지 제약조건들을 만족시킬 수 있는 내진성능보강시스템을 개발하고자 한다. 내진보강성능시스템을 구성하는 강성재와 연성재로 구성된 복합체의 특성을 분석하여 내진성능보강여부를 확인하기 위하여 복합재료판에 대한 인장 및 휨 특성에 대한 시편실험을 1차와 2차에 걸쳐서 수행하였다.

2.1 기준시편실험

† 정회원, (주)다산건설컨트, 기술연구소, 수석연구원
E-mail : khkim@dasan93.co.kr
TEL : (02)2222-4454 FAX : (02)2222-4449

* 정회원, 경상대학교, 토목공학과, 교수

** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 연구원

2.1.1 인장 시험

새로운 내진보강성능시스템을 구성할 수 있는 강성재와 연성재의 복합체의 휨 및 거동 인장 특성을 분석하여 추후 보, 기둥 등의 설계적용 및 해석을 위한 새로운 보강재료의 기초 자료를 제공하고자 본 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 복합체는 구조용 일반섬유와 강성재를 레이어 적층 혼합을 통하여 제작되었다. 시험변수는 E-Glass의 함유량과 강성재의 함유량, 강성재의 종류(Sus와 Aluminum)에 따른 인장특성 거동으로 구성하였다. 각 실험변수는 동일한 조건의 제작으로 각각 2개로 총 6개의 복합체 시편으로 구성하였다. 다음 표 1은 각 인장 시험체의 제원 및 재료 구성을 나타낸 것이다.

표 1. 인장 시험체의 제원 및 구성

Specimen #	Thickness (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	섬유함유량 (%)	Mesh 함유량 (%)
T-G100-M00-01	3.10	24.81	76.911	100	30
T-G100-M00-02	3.10	24.95	77.345	100	30
T-G70-MA30-01	3.10	24.93	77.283	70	30
T-G70-MA30-02	3.10	24.93	77.283	70	30
T-G70-MS30-01	3.20	24.92	79.744	70	30
T-G70-MS30-02	3.20	24.92	79.744	70	30

* T : Tension, G : Glass, 100,70,30,00 : %, M : Mesh, 01,02 : Specimen #

시험방법은 KS M 3381 유리섬유 강화 플라스틱의 인장시험 방법에 의하여 수행되었다. 인장시험 시 시편을 위·아래 부분을 고정하는 그립의 압력을 적절히 하여 인장력을 가할 시 슬립의 방지를 최소화하여 실험을 수행하였으며 시편의 규격은 유리섬유 강화 플라스틱 인장시험 B형-II에 맞춰 제작되었다.

섬유의 함유량과 강성재의 함유량 및 종류에 따른 인장시험을 수행하기 위하여 계명대학교 첨단건설재료실험센터의 MTS 250kN 복합재료인장피로시험기와 TestWork4가 사용되었다. 변형량 측정은 MTS의 Extensometer계를 이용하여 변형량을 측정하였다. 하중가력은 2mm/min의 제어로 인장을 가하면서 시험기의 로드셀과 변위계에서 각각 적용하중과 변위값을 획득하였다.



그림 1. 복합체 인장시험 전경



그림 2. Extensometer 설치 전경

다음 그림 3은 각 시편에 따른 응력-변형률 관계를 나타낸 것이며 표 2는 각 시험체의 제원, 탄성계수, 인장강도, 최대변형률을 나타낸 것이다.

표 2. 인장실험 결과

Specimen #	Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Ultimate Strain (%)
T-G100-M00-01	33979.9	503.03313	1.698381492
T-G100-M00-02	33737.4	466.08586	1.572640477
T-G70-MA30-01	25220.6	364.69192	1.83529334
T-G70-MA30-02	25197.8	410.27119	1.907140195
T-G70-MS30-01	26205.0	354.53592	1.680777509
T-G70-MS30-02	26659.1	345.55646	1.802364032

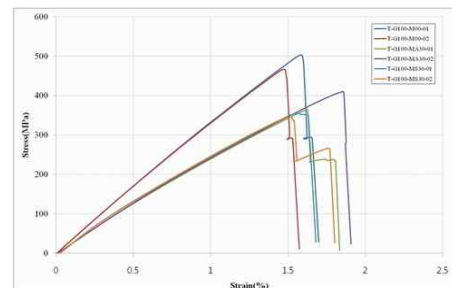


그림 3. 시험체의 하중-변위 곡선

표에서 보는 바와 같이 탄성계수는 강성재(Mesh)를 사용하지 않은 경우 평균 33858.7 MPa이고, 섬유

30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 26432.1 MPa, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 25209.2 MPa로 감소하였다. 연성능력을 평가할 수 있는 최대변형률은 강성재(Mesh)를 사용하지 않은 경우 평균 1.636(%) 이고, 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 1.742(%), 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 1.871(%)로 증가하였다. 하지만 강성재에 연성재를 결합한 시험체는 연성능력의 증가율에 비해 인장강도는 20.1%~27.8% 저하되어 보강성능이 저하됨에 따라 추후 사용재료, 적층방법, 함유량 등 새로운 형태의 연구가 필요하다고 판단된다. 다음 그림 4~그림 7은 각 시험편의 파괴양상을 나타낸 것이다.



그림 4. T-G100-M00-01의 인장시험 결과



그림 5. T-G100-M00-02의 인장시험 결과

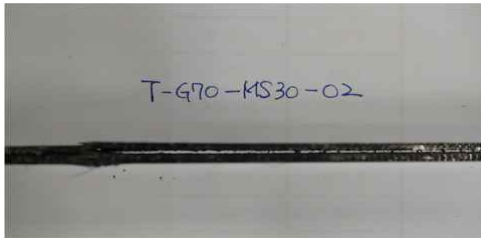


그림 6. T-G70-MS30-02의 인장시험 결과(측면)

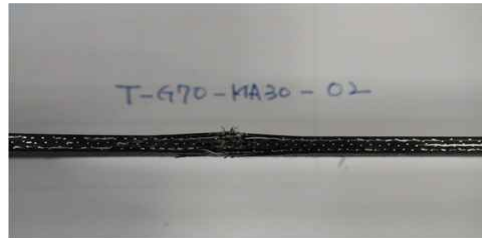


그림 7. T-G70-MA30-02의 인장시험 결과(측면)

2.1.2 휨 시험

본 실험에서는 FRP 복합체의 휨 거동 특성을 실험적 해석을 하기 위하여 수행하였다. 본 실험에 사용된 복합체는 인장시험에 사용한 것과 동일한 재료로 구조용 일반섬유와 강성재를 레이어 적층 혼합을 통하여 제작되었다. 또한 시험변수도 동일하다. 각 실험변수는 동일한 조건의 제작으로 각각 2개로 총 6개의 복합체 시편으로 구성하였다. 다음 표 3은 각 휨 시험체의 제원 및 재료 구성을 나타낸 것이다.

표 3. 휨 시험체의 제원 및 구성

Specimen #	Thickness (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	Mesh 함유량 (%)
F-G100-M00-01	3.41	15.30	100	30
F-G100-M00-02	3.41	15.30	100	30
F-G70-MA30-01	3.41	15.30	70	30
F-G70-MA30-02	3.41	15.30	70	30
F-G70-MS30-01	3.41	15.30	70	30
F-G70-MS30-02	3.41	15.30	70	30

* T : Flexural, G : Glass, 100 · 70 · 30 · 00 : %, M : Mesh, 01 · 02 : Specimen #

시험방법은 KS M 3382 유리섬유 강화 플라스틱의 휨시험 방법에 의하여 수행되었다. 휨시험 시 시편의 아랫부분은 롤러 지지 지그를 이용하였으며 하중 가력장치 또한 롤러형태의 압자를 이용하여 재하하였다. 그리고 시편의 규격은 유리섬유 강화 플라스틱 휨시험 4점 B형 시편에 맞춰 제작하였다.

섬유의 함유량과 강성재의 함유량 및 종류에 따른 휨시험을 수행하기 위하여 계명대학교 첨단건설재료실험센터의 MTS 500kN 인장 및 휨 피로시험기와 Basic Test Works가 사용되었다. 하중가력은 5mm/min의 제어로 압축력을 가하면서 시험기의 로드셀과 변위계에서 각각 적용하중과 변위값을 획득하였다.



그림 8. 복합체 휨시험 전경



그림 9. 복합체 휨시험 상세 전경

강성재 종류 및 섬유·Mesh 함유량별 총 6개의 시험편이 휨 실험에 수행되었다. 그림 10은 각 시험편에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이며 표 4는 시험체의 최대하중과 최대변위를 나타낸 것이다.

표 4. 인장실험 결과

Specimen #	Peak Load (kN)	Peak Displacement (mm)
F-G100-M00-01	0.6058	27.468
F-G100-M00-02	0.6148	27.914
F-G70-MS30-01	0.4011	31.922
F-G70-MS30-02	0.4297	42.573
F-G70-MA30-01	0.5618	34.723
F-G70-MA30-02	0.5333	36.358

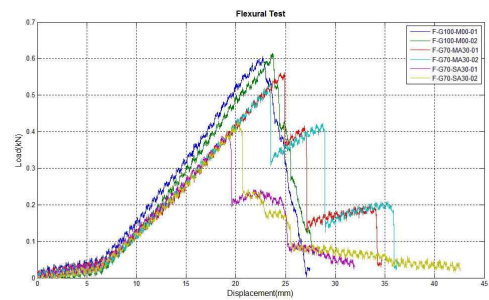


그림 10. 휨 시험편의 하중-변위 곡선

그림과 같이 최대하중이 강성재(Mesh)를 사용하지 않은 경우 평균 610.3N이고, 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 415.4N, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 547.6N으로 각각 32%, 10% 감소하였다. 최대변위는 파괴시 강성재(Mesh)를 사용하지 않은 경우 평균 27.691mm 이고, 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 37.248mm, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 35.540mm로 증가하였다. 그림 11~12는 각 시험편의 휨 파괴양상을 나타낸 것이다.

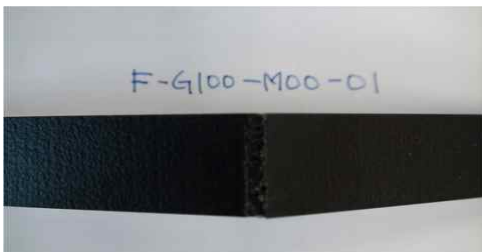


그림 11. F-G100-M00-01의 휨시험 결과

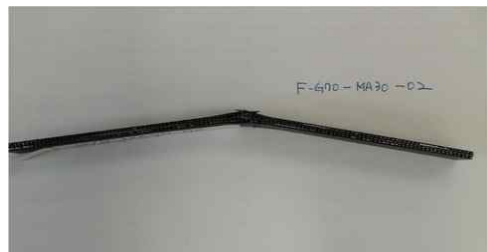


그림 12. F-G70-MA30-02의 휨시험 결과

2.2 보완시험

2.2.1 인장 시험

본 실험에서는 기준시험과 같은 제원의 시험편으로 FRP 복합체의 인장 거동 특성을 실험적 해석을 하기 위하여 수행하였다. 본 실험에 사용된 복합체는 1차 시험과 마찬가지로 구조용 일반섬유와 강성재

를 레이어 적층 혼합을 통하여 제작되었다. 시험변수는 E-Glass의 함유량과 강성재의 함유량, 강성재의 종류(Sus와 Aluminum)에 따른 인장특성 거동으로 구성하였다. 각 실험변수는 동일한 조건의 제작으로 각각 2개로 총 4개의 복합체 시편으로 구성하였다. 다음 표 5는 각 인장 시험체의 제원 및 재료 구성을 나타낸 것이다.

표 5. 2차 인장시험 시편의 제원 및 구성

Specimen #	Thickness (mm)	Width (mm)	Area (mm ²)	섬유함유량 (%)	Mesh 함유량 (%)
T-G70-MA30-1-1	3.44	25.35	87.204	70	30
T-G70-MA30-1-2	3.41	25.15	85.762	70	30
T-G70-MS30-1-1	3.43	24.93	85.510	70	30
T-G70-MS30-1-2	3.43	25.03	85.853	70	30

* T : Tension, G : Glass, 100 · 70 · 30 · 00 : %, M : Mesh, 01 · 02 : Specimen #

시험방법은 1차 시험과 같이 KS M 3381 유리섬유 강화 플라스틱의 인장시험 방법에 의하여 수행되었다. 각각의 강성재 종류 및 섬유·Mesh 함유량별 총 4개의 시험편이 본 실험에 수행되었다. 다음 그림 13은 각 시편에 따른 응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 표 6은 각 시험체의 제원, 탄성계수, 인장강도, 최대변형률을 나타낸 것이다.

표 6. 인장실험 결과

Specimen #	Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Ultimate Strain (%)
T-G70-MS30-1-1	27945.0	330.56737	1.545404807
T-G70-MS30-1-2	27035.6	307.92144	1.429794500
T-G70-MA30-1-1	23512.4	314.29629	1.557687914
T-G70-MA30-1-2	28320.5	345.59392	1.580017556

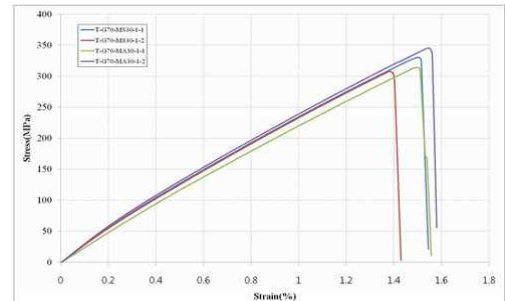


그림 13. 시험체의 하중-변위 곡선

표 6과 같이 탄성계수는 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 27490.3 MPa, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 25916.5 MPa로 감소하였다. 각 시편의 최대 인장강도는 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 319.2 MPa, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 329.9 MPa로 Sus Mesh 보다 알루미늄 Mesh가 10.7 MPa 증가하였다. 인장강도 및 최대변형률이 가장 우수한 시편은 섬유와 알루미늄 Mesh로 적층된 T-G70-MA30 시편으로 나타났다. 다음 그림 14~15는 각 시험편의 파괴양상을 나타낸 것이다.



그림 14. T-G70-MS30-1-1의 인장시험 결과



그림 15. T-G70-MS30-1-2의 인장시험 결과

2.2.2 휨 시험

본 실험에 사용된 복합재료 휨 시편은 2차 인장시험에 사용한 것과 동일한 재료로 구조용 일반섬유와 강성재를 레이어(Mesh) 적층 혼합을 통하여 제작되었다. 또한 시험변수도 2차 인장시험에 사용한 변수와 동일하다. 각 실험변수는 동일한 조건의 제작으로 각각 2개로 총 4개의 복합체 시편으로 구성하였다. 다음 표 7은 각 휨 시험체의 제원 및 재료 구성을 나타낸 것이다.

표 7. 휨 시험체의 제원 및 구성

Specimen #	Thickness (mm)	Width (mm)	Mesh 함유량 (%)
F-G70-MS30-1-1	3.41	15.30	30
F-G70-MS30-1-2	3.43	15.07	30
F-G70-MA30-1-1	3.43	15.08	30
F-G70-MA30-1-2	3.44	15.13	30
* T : Flexural, G : Glass, 100 · 70 · 30 · 00 : %, M : Mesh, 01 · 02 : Specimen #			

시험방법은 1차 휨 시험과 같은 방법인 KS M 3382 유리섬유 강화 플라스틱의 휨시험 방법에 의하여 수행되었다. 각각의 강성재 종류 및 섬유·Mesh 함유량별 총 4개의 시험편이 2차 휨 실험에 수행되었다. 다음 그림 16은 각 시험편에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 표 8은 각 시험체의 최대하중과 최대변위를 나타낸 것이다.

표 8. 2차 휨 시험결과

Specimen #	Modulus (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Strain at Break (%)
T-G70-MS30-1-1	30505.5	540.59	1.94104
T-G70-MS30-1-2	32954.5	525.75	1.72785
T-G70-MA30-1-1	37100.5	606.88	1.88637
T-G70-MA30-1-2	35058.0	613.06	2.00229

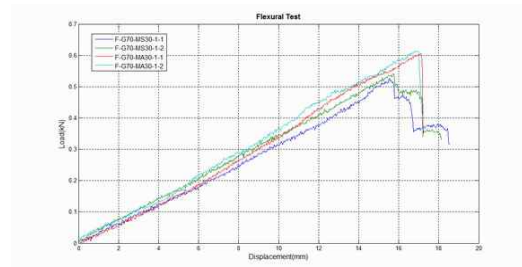


그림 16. 2차 휨 시험편의 하중-변위 곡선

표 8과 같이 휨강도는 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 533.17N, 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 609.97N으로 알루미늄 Mesh를 사용한 시험편이 약 14.4% 증가하였다. 파괴시의 최대 변형률은 섬유 30%와 Sus Mesh 70% 사용한 경우 평균 1.834(%), 섬유 30%와 알루미늄 Mesh 70% 사용한 경우 평균 1.944(%), 알루미늄 Mesh를 사용한 시험편이 약 6.0% 증가하였다. 다음 그림 17~18은 각 시험편의 휨 파괴양상을 나타낸 것이다.



그림 17. F-G70-MS30-1-1의 휨 시험 결과



그림 18. F-G70-MA30-1-2의 휨 시험 결과

3. 결론

강성재와 연성재로 구성된 다양한 복합재료 시험편의 실험을 분석한 결과, 내진성능보강시스템에서 필요한 연성보강성능을 보유할 수 있음을 알 수 있었으며 추후로 더 많은 실험 분석을 통하여 성능이 더욱 개선된 복합재료판의 제작이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화 2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.