

지중 매설 GFRP 관로 및 플랜지의 거동 분석

한택희¹ · 김효산² · 장영두³ · 박윤호⁴ · 강영종⁵

서울메트로 기술연구소 전문위원¹, 서울메트로 기술연구소 차장²
서울메트로 기술연구소 차장³, 서울메트로 기술연구소 부장⁴
고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 교수⁵

Behavior Analysis of Buried GFRP Pipes and Flanges

Han, Taek Hee¹ · Kim, Hyo-San² · Jang, Young-Doo³ · Park, Yoon-Ho⁴ · Kang, Young-Jong⁵

¹Research Fellow, R&D Center, Seoul Metro

²Deputy General Manager, R&D Center, Seoul Metro

³Deputy General Manager, R&D Center, Seoul Metro

⁴General Manager, R&D Center, Seoul Metro

⁵Professor, Department of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University

Abstract: Static analyses and buckling analyses were carried out for buried GFRP pipes by using finite element method. Vehicle loads, vertical and lateral soil pressures were considered as external loads, and supplying water pressure was considered as an internal load. Nine types of the factory-manufactured GFRP pipes were analyzed. Their maximum stresses and displacements were compared with the limit displacements and ultimate stress. Additionally, stress analysis on an enhanced flange, which was designed to reduce stress concentration, was performed. A cantilever analysis was carried out to know the maximum stress on the neck of the flange, which is the critical part. And a static analysis was carried for the buried flange. The test results showed that GFRP pipes were safe and stable against the external loads. And they showed that the enhanced flange decreased about 35% of the stress concentration.

Key Words: GFRP Pipe, Buckling, Buried Pipe, Flange

1. 서론

우리나라에서는 하수관거 계획 시, 약 20년을 계획 년도로 설정하고 있으며, 설계수명이 약 30년인 관로(흙관)를 매설하고(환경부, 1998), 다양한 하수관거 보수보강법을 이용한 적절한 유지관리를 통해 관거의 수명을 연장하고 있다. 그러나 부실한 설계 및 시공을 포함한 복잡한 원인 등으로 인해 수리적·구조적 문제가 발생하여 실제수명은 설계수명의 절반도 못 미치는 것으로 보고되고 있다(환경부, 1995). 지중 매설된 콘크리트 흙관의 사용수명은 일반적으로 물리적, 화학적 부식과 같은 둘 이상의 성능저하 요인들

간의 상호작용에 의해 많은 영향을 받으며, 최근 노후화된 하수관의 성능을 개선하기 위한 방법으로 경제적인 보강구조를 만들어 내는데 효과적인 해결방안으로 비굴착 공법에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러나 아직까지 국내의 하수관 비굴착 공법은 정착 초기단계에 있으며 이를 해결하기 위한 방안으로 복합소재인 유리섬유복합재료(GFRP; Glass Fiber Reinforced Plastic)를 이용한 관로가 개발되었으며, 시공이 이루어지고 있는 상태이다.

또한, 유리섬유 복합관은 반영구적이며, 부식되지 않기 때문에, 기존 금속 재질의 관 및 콘크리트 재질의 관이 가지고 있는 원천적 문제점인 부식으로 인하여 상수도관에 외부 유해물질이 유입되는 문제와 하

주요어: 유리섬유복합관, 좌술, 지중 관로, 플랜지

Corresponding author: Kang, Young-Jong

Department of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Korea University, Seoul 156-701, Republic of Korea
Tel: +82-2-3290-3317, Fax: +82-2-921-5166, E-mail: yjkang@korea.ac.kr

투고일: 2010년 1월 31일 / 수정일: 2010년 2월 25일 / 게재확정일: 2010년 3월 2일

수도관 내부의 하수가 주위 토양으로 방출되어 발생하는 토양오염 등을 미연에 방지할 수 있으며, 기존 18%를 상회하는 엄청난 누수율을 최소화하여, 신설 관로 사업과 부식된 관의 교체사업을 최소화 할 수 있다. 이를 바탕으로 현재 난관에 봉착해 있는 여러 상수도 및 환경 문제의 해결방안으로 기여할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 이는 현재 중요시 되고 있는 공급수의 청결문제와도 직접 관련이 있으며, GFRP의 경우 다른 종류의 관에 비해 생물막 형성이 적어 공급수의 청결을 지속적으로 유지시켜 상수의 품질을 높일 수 있으며, Fig. 1은 이를 나타내고 있다. (환경부 2002).

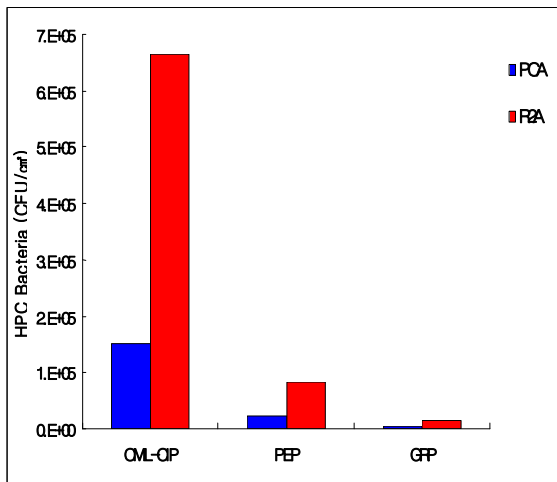


Fig. 2 HPC Bacteria by Pipe Types

Fig. 2~Fig. 5는 기존의 흙관 및 콘크리트 관의 부실 시공 및 사용 중의 파손 사례를 보여주며, GFRP 관로의 사용은 이와 같은 관로의 파손을 최소화할 수 있기 때문에 많은 활용성이 예상되지만, 지중매설 GFRP의 거동과 안정성에 대해서는 많은 연구가 이루어지지 않은 상태이다. 따라서 본 연구에서는 지중 매설된 GFRP 관로의 거동과 좌굴안정성에 대해 분석하고, 연결부 플랜지의 응력집중을 저감하기 위하여, 플랜지의 형상을 변화하여, 이에 따른 응력 저감 정도를 확인한다. 유한요소 해석을 통하여 국내에서 생산되는 GFRP 관에 대하여 내압 및 외압 작용 할 때의 안정성에 대하여 검토하였으며, 관로의 연결부인 플랜지 부분에 대하여 응력 집중 현상을 검토하여 안정성을 확인하였다. GFRP 관에 작용하는 외압으로서 토압과 노면 하중을 적용하며, 내압으로서는 관로내의 수압을 고려하여 해석을 수행한다. 연결부 플랜지의 안정성 검토로서는 정적하중에 의한 안정성 검토를 수행하였다.



Fig. 3 Protrusion of Connection Pipe



Fig. 4 Penetration

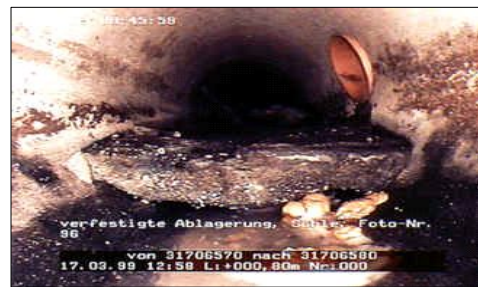


Fig. 5 Accumulation of Soil



Fig. 6 Bad Connection and Leakage

2. 관로 해석 모델

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 LUSAS (Ver. 13.4)를 이용하여 해석을 실시하였으며, 유한요소해석에 사용한 요소는 semiloop curved thin shell(QSL8) 8절점 요소를 사용하였다. 8절점 요소는 curved shell의 분석과 이방성재료, 복합재료 분석에 효과적이다. 또한 membrane과 flexural deformation 또

한 쉽게 계산할 수 있어 4절점 직선 요소에 비해서 8절점 곡선요소가 섬유강화 복합관을 좀 더 자세히 묘사하기 때문이다.

2.1 해석 모델 제원

GFRP 관로의 내외압에 대한 안정성 검토를 하기 위해 다음과 같이 모델링을 하였다. 관로의 제원은 국내에서 생산되는 제품의 직경과 두께를 사용하였으며, 직경이 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 그리고 1200mm인 GFRP 관로에 한하여 모델링을 실시하였다. GFRP 관로의 해석은 그 재료 특성상 직교 이방성으로 해석하여야 하나, 길이방향에 대한 탄성계수 값에 대한 정보가 불충분하여 각각의 플랜지의 대한 탄성계수는 제조사에서 실시한 실험값을 바탕으로 등방성 재료로 해석을 수행하였으며, 응력검토는 기존의 실험연구(한택희 등, 2004)에 의한 극한강도값을 적용하였다. 관로의 직경별 제원은 Fig. 6 및 Table 1과 같다.

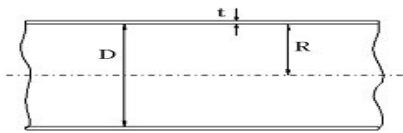


Fig. 7 Dimension of GFRP Pipe

Table 1. Material and Geometric Properties of Pipes

직경 (D, mm)	관두께 (t, mm)	탄성계수 (MPa)
150	8	5560.3
200	8	9689.5
250	8	11871.5
300	8.5	12870.4
350	9	12967.9
400	9	16461.2
450	9.5	16434.3
500	10	18018.3
1200	24	18101.8

2.2 관로의 경계조건

해석 모델의 경계조건은 PIPE의 길이가 무한히 길다고 가정하고 길이방향의 변위가 생기지 않게 하기 위해 Fig. 7과 같이 길이방향인 Z 방향 변위를 한쪽 끝단에 대해 구속하였다.

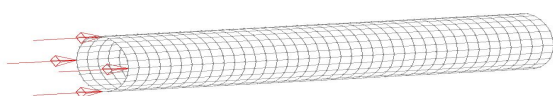


Fig. 8 Boundary Condition in Longitudinal Direction

관로를 지중에 매설 시 관로 거동 해석을 위해 Winkler의 탄성스프링 모델을 이용하여 지반을 탄성스프링으로 묘사하였으나, 지반의 특성상 압축력에만 저항하는 일방향 스프링으로 작용하므로, 하중 조건에 따른 관로의 변형 형상을 검토하여 경계조건을 조정함으로써 비선형 스프링을 묘사하였다. 스프링의 강성값으로 사용되는 지반반력계수는 Howard(1977)의 연구결과에 의한 지반탄성계수값을 적용하였다. 스프링상수 혹은 지반반력계수(k_n)는 지반탄성계수(E')을 강관의 반경(R)으로 나눈 값으로 나타내며, 지반탄성계수는 지반과 강관의 접촉면에서의 강성을 나타내고, 접촉면에서의 압력(p)을 지반의 변형률(ϵ)로 나눈 값으로 정의할 수 있다.

$$E' = \frac{p}{\epsilon} \tag{1}$$

본 해석에서는 지반탄성계수값으로 Howard(1977)에 의해 제시된 값 중, AASHTO(1996)에서 규정하는 다짐도 85%를 만족하는 범위에 해당하는 13.8 MPa를 사용하였으며, 일방향 스프링을 묘사하기 위한 경계조건의 결정 방법은 Fig. 8과 같다.

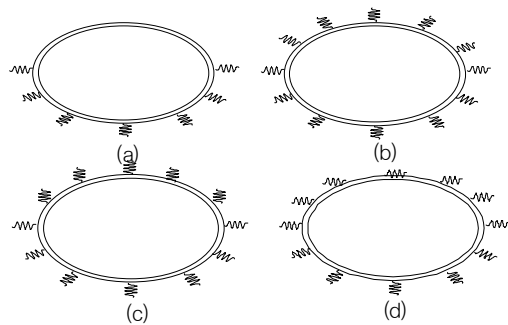


Fig. 10 Definition of Boundary Connection

관로에 작용하는 연직도압과 횡도압의 크기에 따라 관의 변형형상이 결정되며, Fig. 8의 (a) 및 (b)와 같은 해석모델에서 변형형상이 Fig. 9의 (a) 및 (b)와 같이 나타났을 때, 각각 Fig. 8의 (c) 및 (d)와 같은 경계조건을 적용함으로써, 비선형 스프링을 묘사하였다. 본 해석모델에서는 Fig. 8의 (d)와 같은 경계조건이 적용되었다.

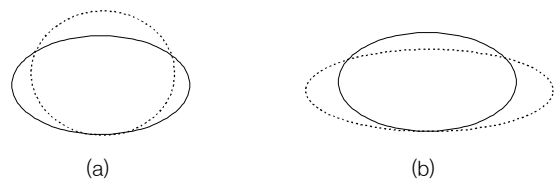


Fig. 11 Deformed Shapes of Pipe

2.3 하중조건

관로에 작용하는 하중조건은 토압 및 노면하중에 의한 외압과 관로 내부에 흐르는 유량에 의한 내압과 외압이 함께 작용하는 경우, 두 가지가 있다. 외압으로는 연직토압 및 횡토압이 작용하는데 연직 및 횡토압이 동시에 작용하는 경우보다 연직토압만 작용하는 경우가 관로에 불리하게 작용하기 때문에 본 연구에서는 외압만이 작용하는 경우의 해석에서는 연직토압만을 고려하였으며, 외압과 내압이 동시에 작용하는 경우에 대해서는 연직토압과 횡토압, 수압을 고려하였다.

연직토압은 매설깊이 4.0m, 차량하중 DB24(건설교통부,1999), 정수압 11.2K, 수격압 2.7K, 기초지지각 90도, 흙의 반력계수 70, 자연터파기 상태에서 계산된 토피에 의한 토압 54.347 kPa과 노면 하중에 의한 토압 4.414kPa를 재하하였으며, 횡토압은 관로 상부에는 매설깊이 4m의 횡토압을 적용하고, 관로하부까지 관로 깊이만큼 증가하도록 적용하였다. 사용된 흙의 단위 질량은 1,800kg/m³이다. 내압은 Naday식에 의해 내파열 수압, 보증수압(내파열수압의 70%)을 구하고 보증수압에 대해 2.5의 안전율을 고려한 허용사용수압을 내압으로 재하하였다. 관로의 직경에 따라 수압과 관로 중심까지의 매설깊이가 다르므로, 관로 직경별로 작용하는 내압과 외압을 계산하여 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Internal Pressure and Horizontal Soil Pressure

지름 (mm)	두께 (mm)	내파열 수압 (kPa)	보증 수압 (kPa)	허용사용 수압 (kPa)	적용 횡토압 (kPa)	
					관로 상단	관로 하단
150	8.0	15,689.7	10,982.8	4,393.1	35.3	36.6
200	8.0	11,767.3	8,237.1	3,294.8	35.3	37.1
250	8.0	9,413.8	6,589.7	2,635.9	35.3	37.5
300	8.5	8,335.2	5,834.6	2,333.8	35.3	38.0
350	9.0	7,564.7	5,295.3	2,118.1	35.3	38.4
400	9.0	6,619.1	4,633.4	1,853.3	35.3	38.8
450	9.5	6,210.5	4,347.4	1,738.9	35.3	39.3
500	10.0	5,883.6	4,118.6	1,647.4	35.3	39.7
1200	24.0	5,883.6	4,118.6	1,647.4	35.3	45.9

3. 관로 연결부 플랜지 해석

3.1 연결부 플랜지의 제원

GFRP 관로 연결부 플랜지에 대한 안정성 검토를 하기 위해 다음과 같이 두 상황을 가정하여 모델링을 하였다. 플랜지에서 가장 취약한 부위인 목 부위의 응력집중을 보기 위해 플랜지를 캔틸레버로 모델링, 해석을 실시하였으며, 또한 매립시 관로와 마찬가지로

토압을 고려, 모델링 및 해석을 실시하였다.

플랜지의 제원은 국내제조업체에서 제공한 직경과 두께를 사용하였으며, 직경이 300mm의 기존 플랜지와 직경이 각각 300, 350, 1200mm인 개선된 플랜지에 대하여 해석을 실시하였다. 플랜지의 재료특성 값은 관로와 동일하게 적용하였다. 플랜지의 제원은 Fig. 11 및 Table 3과 같다.

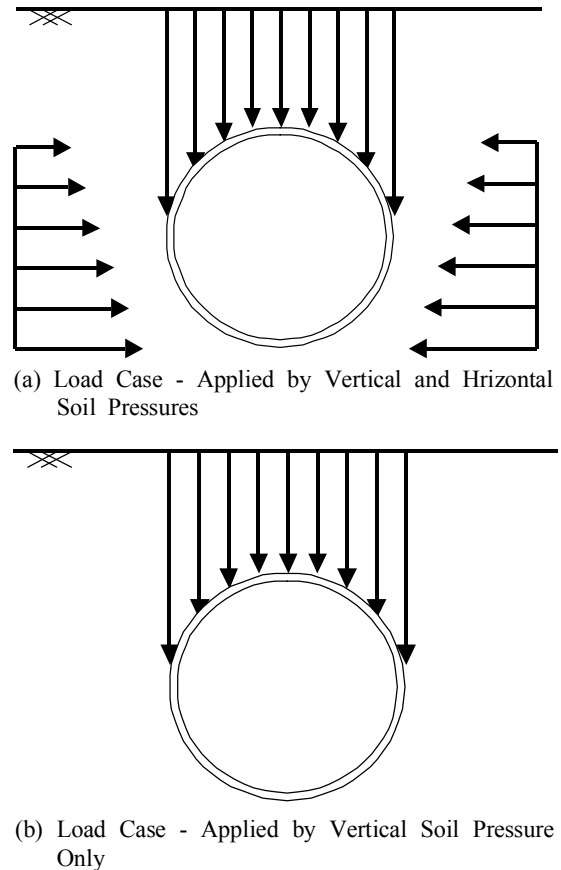


Fig. 12 External Pressures on Pipe

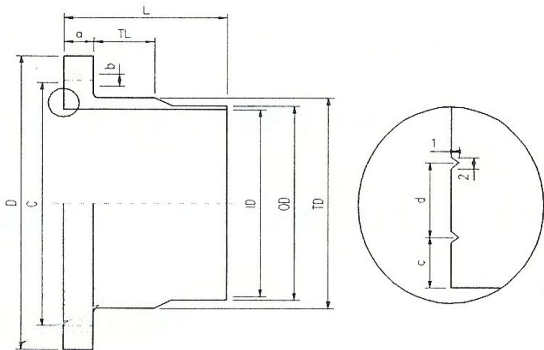


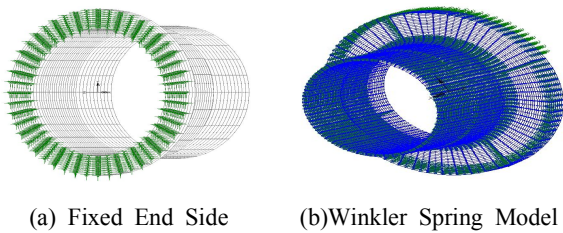
Fig. 13 Dimensions of Enhanced Flange

Table 3. Dimensions of Enhanced Flange (unit: mm)

호칭	300	350	1200
OD	317	368	1248
ID	300	350	1200
TD	327	380	1280
D	522	572	1564
C	400	460	1387
L	250	250	600
TL	99	112	256
a	37	39	66
c	12.5	12.5	15
d	12.5	12.5	15

3.2 연결부 플랜지의 경계조건

플랜지의 안정성 측면에서 가장 위험한 경우는 플랜지의 목 부위에 응력이 집중되는 경우이다. 목 부위의 최대로 걸리는 응력을 보기 위해 Fig. 12(a)와 같이, 연결부의 접합면을 fix로 고정하여 플랜지가 캔틸레버와 같이 거동하도록 하였다. 또한, 플랜지의 지중 매설 시를 검토하기 위하여 Fig. 12(b)에서와 같이, 관로의 길이방향 변위 구속과 함께 Winkler의 스프링 모델을 이용하였다.



(a) Fixed End Side (b)Winkler Spring Model

Fig. 14 Boundary Conditions of Connecting Flange

3.3 연결부 플랜지의 하중조건

플랜지 목 부위의 응력집중 현상을 관찰하기 위한 해석 모델에서는, 목 부위에 최대 응력이 발생하도록 플랜지를 제외한 상부 관로 부위에만 연직하중을 재하하였고, 매설 시는 플랜지를 포함한 관로 상부 부위에 관로 매설 시와 동일한 조건을 적용하여, 토피에 의한 토압 54.374 kPa과 노면 하중에 의한 토압 4.414 kPa을 재하하였다. Fig. 13과 Fig. 14는 각각 플랜지의 캔틸레버 해석 시와 매설시의 하중 조건을 나타낸다.

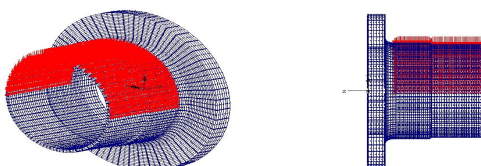


Fig. 15 Loading Condition of Cantilever Analysis

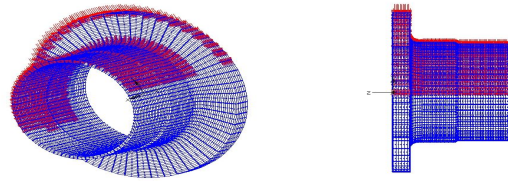


Fig. 16 Loading Condition under Burying Pipe

4. 해석 결과

4.1 관로 정적 해석 결과

각각의 GFRP 관로에 대하여 정적 해석을 실시하였다. 하중 조건으로 토압 및 노면하중에 의한 외압만 작용했을 경우와 외압과 내압이 함께 작용했을 경우의 최대 변형량과 원주 방향 및 길이 방향으로 발생하는 최대 응력값은 Table 4와 Table 5에 정리하였다.

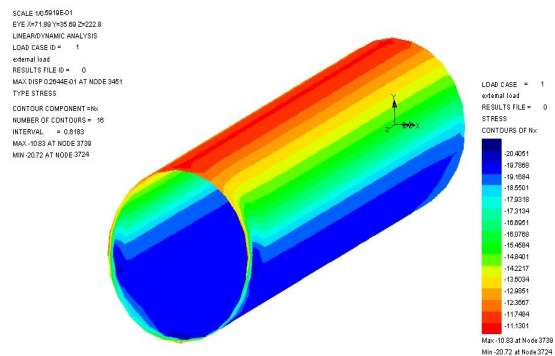


Fig. 17 Stress Contour in Circumferential Direction under External Pressures (D400)

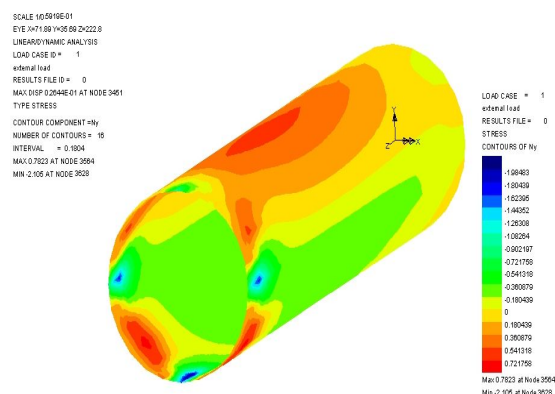


Fig. 18 Stress Contour in Longitudinal Direction under External Pressures (D400)

Table 4. Analysis Results by External Pressure

관로 종류	최대변형량 (mm)	최대변형율 (%)	최대응력 (원주방향) (MPa)	최대응력 (길이방향) (MPa)
D150	0.06433	0.043	0.373	0.024
D200	0.06513	0.033	0.511	0.032
D250	0.06574	0.026	0.653	0.045
D300	0.06595	0.022	0.790	0.055
D350	0.06604	0.019	0.925	0.063
D400	0.06612	0.017	1.062	0.077
D450	0.06612	0.015	1.198	0.083
D500	0.06614	0.013	1.333	0.093
D1200	0.06599	0.006	3.158	0.191

Table 5. Analysis Results by Internal and External Pressures

관로 종류	최대변형량 (mm)	최대변형율 (%)	최대응력 (원주방향) (MPa)	최대응력 (길이방향) (MPa)
D150	2.168	1.445	34.767	0.058
D200	1.629	0.815	33.325	0.134
D250	1.687	0.675	32.883	0.213
D300	1.898	0.633	34.737	0.247
D350	2.239	0.640	36.611	0.292
D400	2.007	0.502	36.346	0.294
D450	2.294	0.510	38.249	0.340
D500	2.333	0.467	40.152	0.372
D1200	5.923	0.494	96.530	1.278

해석 결과 최대 변형량을 직경으로 나뉜 값인 변형률이 모든 해석 대상 관로에 대해 허용변형률인 5% 미만으로 발생하여, 변위에 대해서는 GFRP 관로가 모두 안전한 거동을 하는 것으로 나타났다. 한택희 등(2004)의 연구에 따르면, GFRP 관로의 원주방향 극한강도는 28.711 MPa, 길이방향 극한강도는 150.043 MPa 이므로, 외압만이 작용할 때는 원주방향과 길이방향에 대해 모두 응력에 대해 안전하나, 외압과 내압이 동시에 작용하는 경우, 원주방향에 대해서는 불안정한 경향을 보였다. 일반적으로 내압이 작용할 경우에는 외압을 상쇄하는 효과가 있어 더 안전한 결과가 도출되나, 본 해석에서는 관로 내부에 존재하는 물의 자중에 의한 하중에 크게 작용한 것으로 판단된다. 하지만, 응력에 대한 검토로서는 각 관종별로 허용강도와 극한강도가 다르므로, 관종별로 실험을 수행하여 정확한 허용강도와 극한강도를 산출하여 이에 대한 안전성 검토가 필요하다고 판단된다. Fig. 15와 Fig. 16은 각각 직경이 400mm인 GFRP 관로에서 내압과 외압이 작용할 때의 원주방향 응력분포와 길이방향 응력분포를 보여준다.

4.2 플랜지 해석 결과

플랜지의 목 부위에 최대 응력이 걸리도록 캔틸레버 해석과 매설 시 하중 작용 상태에서 안정성 해석을 위해 최대 변형량과 최대 응력을 분석하였다. 플랜지의 유한 요소 해석을 수행한 결과 직경 300mm의 기존 플랜지와 개선된 플랜지를 비교했을 때 개선된 플랜지의 최대 변형량과 최대 응력값이 현저히 감소하였음을 확인할 수 있다. 플랜지에 가장 취약한 부위인 목 부위의 응력값 (캔틸레버 해석 시) 비교 시 기존 플랜지와 개선된 플랜지 간의 34.37%의 감소를 볼 수 있다. 관경별 플랜지의 유한 요소 해석 결과값은 다음 Table 6과 같으며, Fig. 17과 Fig. 18은 각각 직경 350mm인 연결부 개선 플랜지에 대한 캔틸레버 해석 시와 매설시 해석에 대한 응력분포를 보여준다.

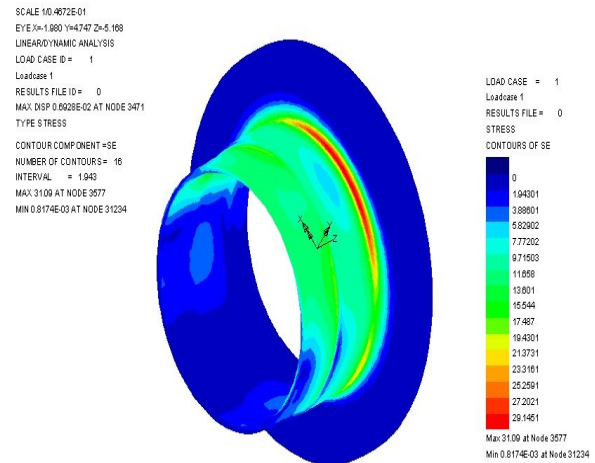


Fig. 19 Stress Contour by Cantilever Analysis (D350)

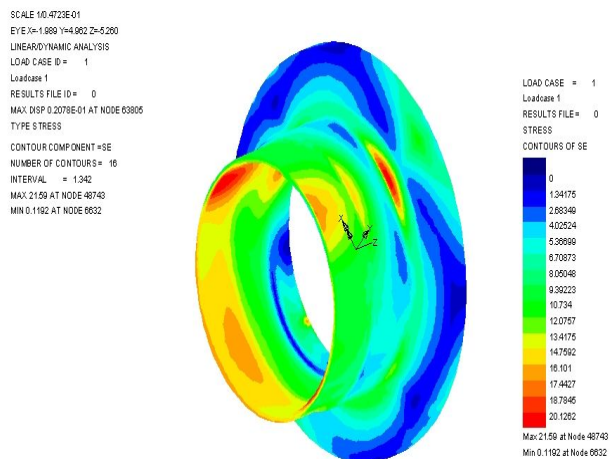


Fig. 20 Stress Contour of Burying Pipe (D350)

Table 6. Deformation and Maximum Stress by Pipe Diameter

관종	변형량 (mm)	캔틸레버 해석		매설시	
		최대응력 (MPa)	변형량 (mm)	최대응력 (MPa)	변형량 (mm)
기준	D300	0.146	5.551	0.224	3.586
개선	D300	0.086	3.643	0.198	2.294
	D350	0.069	3.050	0.208	2.118
	D1200	0.130	3.195	0.399	2.873

4.3 GFRP 관로의 좌굴 해석

GFRP 관로 종류별로 좌굴 해석을 실시하였다. 하중 조건으로는 외압과 내압이 함께 작용하는 경우보다 토압 및 노면하중에 의한 외압만 작용했을 경우가 관로의 좌굴에 있어서 더 불리한 상태이므로 하중으로는 외압만 고려하였다. 관로에 작용하는 외압의 조건은 매설깊이 4.0m, 차량하중 DB24, 정수압 11.2K, 수직압 2.7K, 기초지지각 90도, 흙의 반력계수 70, 자연연타기 상태로 토피에 의한 토압 54.347 kPa과 노면 하중에 의한 토압 4.414 kPa이다. 관로의 좌굴 해석 결과, 좌굴강도는 관로 종류에 따라 Table 7과 같이 나타났으며, 모두 좌굴에 대해 안전하다. Fig. 19는 직경 450mm인 GFRP 관로의 좌굴형상을 보여준다.

Table 7. Buckling Strength by Pipe Types

관종	좌굴강도 (kPa)	관종	좌굴강도 (kPa)
D150	1,554.885	D400	903.403
D200	1,431.279	D450	845.328
D250	1,160.523	D500	846.897
D300	1,046.727	D1200	1,196.820
D350	1,568.619	-	-

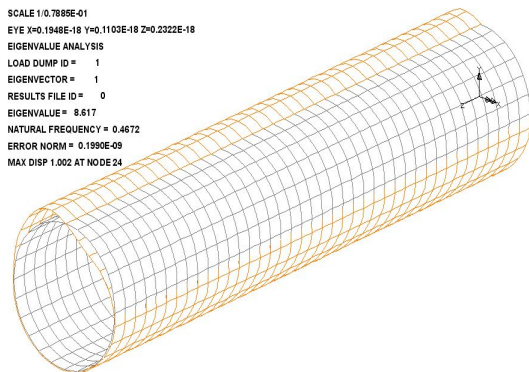


Fig. 21 Buckled Shape of GFRP Pipe (D450, Mode 1)

5. 결론

본 연구에서는 내부식성, 내화학성을 갖는 GFRP 관로의 거동을 분석하고, 응력 집중을 저감할 수 있는 관로 연결부 플랜지에 대한 해석을 수행하였다. 관로의 정적 해석결과, 모든 해석 대상 관로에 대해 허용변형률인 5% 미만으로 발생하여, 변위에 대해서는 GFRP 관로가 모두 안전한 거동을 하는 것으로 나타났다으며, 응력에 대해서는 외압만이 작용할 때는 원주방향과 길이방향에 대해 모두 응력에 대해 안전하나, 외압과 내압이 동시에 작용하는 경우, 원주방향에 대해서는 불안정한 경향을 보였다. 플랜지 해석 결과 개선된 플랜지의 최대 변형량과 최대 응력값이 현저히 감소(34.7%)하였음을 확인할 수 있었다. 관로의 좌굴해석 수행 결과, 모든 GFRP 관로가 좌굴에 대해서는 안전함을 확인하였다. 지중 매설된 GFRP 관로에 내압과 외압이 동시에 작용하는 경우에는 작용응력이 극한응력 값을 초과하는 결과를 보여, 향후, 관로에 리브 보강 또는 파형 관로를 적용하여, 안전성의 확보가 필요하다고 판단된다.

References

American Association of State Highway and Transportation Officials. (1996). Standard specification for highway bridge. 16th edition, AASHTO, Washington, D.C.

FEA Ltd. (2001). LUSAS Manual, FEA Ltd.

Howard, A. K. (1977). "Modulus of soil reaction values for buried flexible Pipe." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, No. GT1, pp. 33-43.

Han, T. K., Kim, S. N., Knag, Y. J., Yoon, K. Y. (2004). "An Experimental Study of Material Characteristics for GFRP Pipes." *Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 4, No. 2, pp. 35-45.