

유리 섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 하수관거의 강도 및 뒤틀림 개선 방안 연구

홍석인·임지열*·길경익†

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

*고려대학교 건축사회환경공학과

Improvement of strength and prevention of twist strain in sewer pipe using glass fiber and twist prevention band

Seok In Hong·Jiyeol Im*·Kyungik Gil†

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

*School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

(Received : 15 May 2016, Revised: 09 August 2016, Accepted: 02 February 2017)

요약

노후화된 하수관거가 증가함에 따라 친환경적이며 효율적인 하수관거의 보수가 필요하다. 본 연구에서는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 하수관거의 강도 및 뒤틀림을 방지 할 수 있는 하수관거 보수 공법의 성능을 평가하였다. 기존의 하수관거 부분 보수 공법과 비교하여 인장 강도, 압축 강도 및 파괴하중이 증가하였다. 또한 기존에 고려되지 않던 뒤틀림 방지 효과도 확인하였으며, 경제성도 우수한 것으로 나타났다. 향후 본 연구를 통해 검증한 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 하수관거 보수 공법은 친환경적 및 효과적인 하수관거 보수 공법으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하수관, 하수관거 보수공법, 인장강도, 파괴하중, 뒤틀림 변위

Abstract

Maintenance of sewer pipe process sewer pipe repairing process is necessary for deterioration of sewer pipe. In this research, analysis on performance (strength and twist strain) of eco-friendly and even expanded liner process using glass fiber and twist prevention band. As a results, tensile strength, bending strength and failure load is increased after the sewer pipe repairing process than advanced research results. And sewer pipe after the this process obtained advantage of prevention of twist strain and economic. After the this research, sewer pipe repairing process using glass fiber and twist prevention band could be suggest the eco-friendly and effective sewer pipe repairing process.

Key words : Sewer pipe, Sewer pipe repair process, Tensile strength, Failure load, twist strain

1. 서론

2013년 기준의 서울시의 하수관로는 약 10,487 km로 합류관 9,112 km, 분류관 960 km, 차집관로 415 km가 매설되어 있다. 하수관거 부설년도를 기준으로 구분하면, 10년 미만 1,281 km (12.2%), 10~20년 1,460 km (13.9%), 20~30년 2,609 km (24.9%) 그리고 30년 이상 5,137 km (49.0%)이다. 이와 같은 서울시의 조사 자료에 의하면, 부설한지 20년 이상 경과된 하수관로가 약 4,069 km로 서울시 하수관로의 약 74%를 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

하수도 시설의 목표연도는 20년으로 설계에 반영하고 있는데, 이와 같은 자료는 서울시 하수관로의 약 74% 이상에서 하수관로의 교체 및 보수 작업이 필요하다는 것을 대변한다.

하수관로에서 발견되는 문제점 중 가장 큰 부분을 차지하는 것은 수밀성 및 통수능 미확보와 같은 기능성 문제로서 대표적으로 이음부 불량에 따른 불명수 및 누수 발생을 들 수 있다(Choi et al., 2007). 하수관로는 주로 도로 하부와 같은 지하에 매설되어있으며, 기존 지하매설물이 인접하게 위치하고 있다(Ehsani et al., 2015; Emilia and Maria., 2013, Lee et al., 2002). 이에 지반의 부동침하나 차량 통행에 따른 진동 등으로 인하여 이음부 또는 특정 부위에 이상이 생기는 경우가 있어서 이를 내면에서 보수해야 되는 상황이 발생하기도 한다(Allouche et al., 2014; Davies et al., 2001, Duell et al., 2008). 기존 하수관로 부분 보수 공

* To whom correspondence should be addressed.
Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail: kgil@seoultech.ac.kr

법 활용 시 보수길이는 400mm 정도로 극히 짧으며, 보수재의 단부 측면에 유지관리를 위한 고압 세정 압력이나 홍수 시 돌이나 자갈 등으로 인해 파손될 가능성이 있다. 하수관거 비굴착 부분 보수 공법에서는 통수성, 시공성 및 경제성 등의 이유로 FRP 재료가 주로 활용되고 있다. 하지만, 시공 시 유리섬유의 비산, 보수재 파손 및 악취와 같은 문제가 발생하게 된다. 특히 기존의 하수관거 부분 보수 장치의 외면에 둘러 감긴 부분보수재를 관로 이음부의 내면에 확장시켜 부착시키는 과정을 거치게 된다. 이 단계에서 부분 보수 장치 중의 고무튜브는 중간부는 가장자리에 비해 더 많이 팽창 되고 가장자리 간에도 서로 다른 불규칙한 형태로 팽창되는 경향을 보인다. 이에 부분 보수 장치의 중심축도 관로의 중심축과 일치하지 않고 관로의 바닥에 더 가깝게 무게중심이 낮춰져 있어서 공기압 주입 팽창 시 하부측 부분 보수재가 먼저 관로의 바닥에 접촉되기 쉽다. 부분 보수재의 외면 하단부가 거친 관로 내면벽에 부분 보수 장치의 중량으로 눌러진 상태로 확장되면서, 외면 밀폐재를 포함한 부분 보수재의 단부다 뒤틀러지거나 밀폐재가 찢어지는 등의 문제점을 해결할 방법의 제시가 필요한 시기이다.

본 연구에서는 기존의 FPR 공법의 장점인 통수성, 시공성 및 경제성을 유지하며, 환경 유해 물질 미 발생 및 구조적 특성에 장점을 지닐 수 있는 하수관로 부분 보수 공법을 연구하였다. 특히 뒤틀림 방지 대책을 하수관로 부분 보수 공법에 적용시켜 기존 하수관로 보수에서 문제가 되는 뒤틀림 방지 방안에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

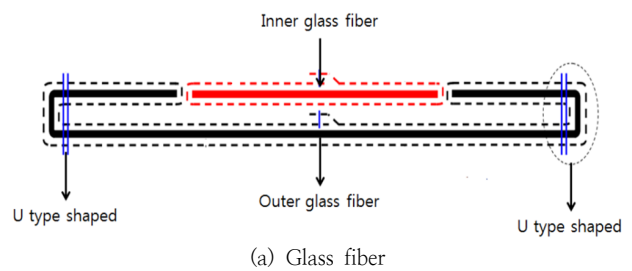
2. 연구방법

2.1 유리 섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 하수관거 보수 방법

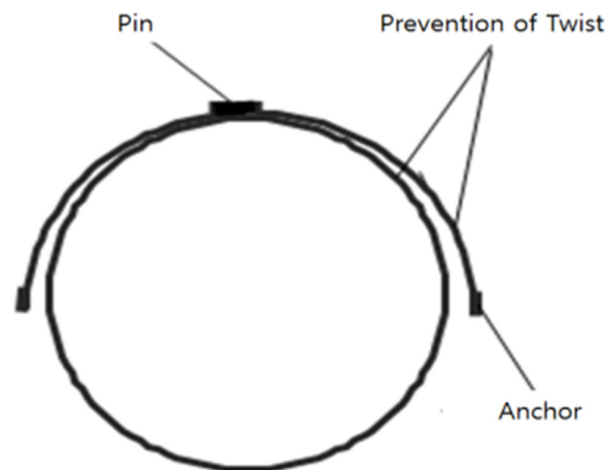
기존의 하수관거 부분 보수 공법의 문제점 개선을 위해 본 연구에서 제안한 방법은 하수관 유지보수를 위한 공법으로 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 방법이다. 먼저, 유리섬유는 하수관거 보호 보수재로 활용하며, 단부형태를 U형으로 하여 단부 보호에 유리하다. 또한 유리섬유를 사용함으로써 시공 시 미세먼지와 같은 부산물이 발생하지 않아 시공으로 인한 2차오염 예방 및 시공시 분진 등의 문제를 예방 할 수 있어 친환경적인 하수관거 비굴착 보수 공법이라 할 수 있다. 그리고 뒤틀림 방지 밴드를 이용하여, 보호 보수재의 팽창시 보호 보수재의 불균형 팽창을 예방할 수 있다. 기존 방법의 경우, 부분보수장치에 공기압을 주입하여 보호 보수재를 관로의 내벽에 부착시키는 과정에서 보호 보수재가 부분보수장치의 중량으로 인해 뒤틀러지거나 찢어지는 등의 변형된 상태로 관로의 내벽에 부착되어 보수 품질이 저하되는 문제점이 발생하기도 하였다. 하지만, 본 방법은 부분보수장치에 체결된 뒤틀림방지구를 통형 폴립조절핀 내에서 적절하게 압착시킨 상태로 뒤틀림을 방지하며 뽁뽁하게 폴리도록 확장시키면서 공기압을 주입시키도록 구성되어있어 보수 품질 및 시공성을 향상시킬

수 있다. 보수장치의 불균등 팽창 등으로 인해 보수장치의 외면에 장착된 보수재의 파손을 방지하여, 뒤틀림 변이 감소 및 구조상의 안정성을 확보할 수 있다. Fig. 1 (a)는 본 연구에서 유리섬유 이용하여 보수한 하수관거의 모식도를 보여주고 있다. 또한 Fig. 1 (b)에서는 본 연구에서 활용한 뒤틀림 방지 밴드의 구조도 및 사진을 확인 할 수 있다.

본 연구 결과와 비교를 실시한 기존 하수관거 보수공법 (Advanced research A와 Advanced research B)의 기술적 특징은 다음과 같다. Advanced research A는 2겹의 유리섬유를 얇은 부직포 커버로 밀폐시켜 사용하고, 보호 보수재 단부가 분리된 상태로 적층되는 구조며, 또한 보호 보수재를 철선으로 감싸는 형태이다. Advanced research B는 2겹의 유리섬유만을



(a) Glass fiber



(b) Schematic diagram of twist prevention band



(c) Picture of twist prevention band

Fig. 1. Schematic diagram and picture of glass fiber and twist prevention band

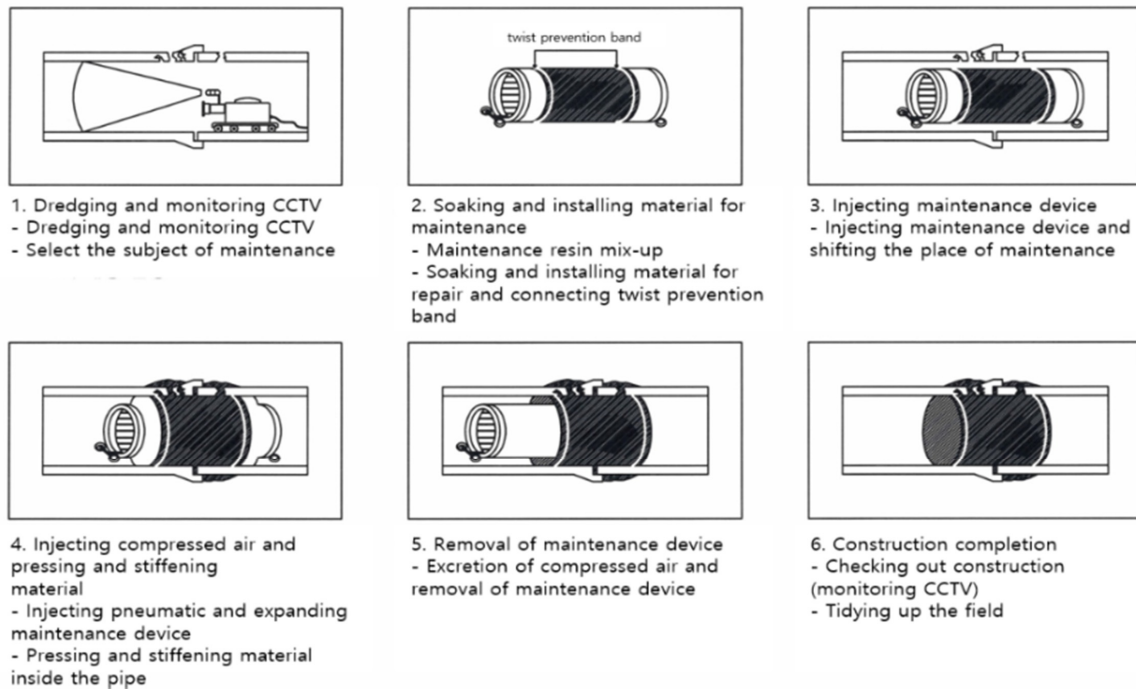


Fig. 2. Schematic diagram of construction process

사용하고, Advanced research A와 유사하게 보호 보수재를 철선으로 감싸는 형태이다. Advanced research A, Advanced research B 그리고 본 하수관거 보수 공법은 보호 보수재 부착 방법 및 뒤틀림 방지 밴드 체결 유무에서 차이를 보인다.

2.2 시공 순서

유리 섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 하수관거 보수 공법은 기존의 하수관거 보수 작업과는 다르게 유리섬유와 뒤틀림을 방지하기 위한 방안이 적용되었기 때문에 시공상에서 기존의 하수관거 보수 공법과는 차이를 보인다. 본 공법의 순서는 보수 대상 관거를 상·하부용으로 구분하여 상단부 이음부 내에 이음부 상단부용 호형채움재를 제작하고 Ⅱ형으로 끼워 설치한다. 이 후 단부 보호 보수재에 수지를 함침시킨 후 부분 보수 장치 외면에 뒤틀림 방지구를 체결한다. 부분 보수 장치에 둘러 감긴 단부 보호 보수재를 하수관로의 중심축에 맞춰 보수 위치로 이동시키고, 중심축을 맞춘 상태에서 단부 보호 보수재의 외면에 체결된 뒤틀림 방지구를 확정시키면서 공기압 주입 및 보수재를 부착한다. 이 후 부분 보수장치에서 공기압을 제거시킨 후 부분 보수 장치를 철거시켜 보수한다. 본 공법의 시공순서도는 아래의 Fig. 2를 통해 확인할 수 있다.

2.3 실험방법

본 연구에서 인장강도, 압축강도 및 파괴하중은 공인인증 시험 기관을 통하여 실시하였다. 인장강도와 압축강도의 경우 열경화성 플라스틱 일반 시험 방법 (KS M 3015)에 의거하여 실시하였다. 두 항목의 시험 방법을 요약하면, 압축강도의 경우 시험편의 길이, 너비, 두께 및 높이를 정확하

게 측정 후 평형을 확인한 후 압축 시험 장치에 올려놓고 시험편과 시험 장치 중심선과 평형을 조절한다. 재료 시험기로 압축 시험 장치의 시험편에 하중을 가하고 시험편이 파괴되었을 때의 하중을 측정하였다. 인장강도는 시험편의 평행 부분의 나비 및 두께를 정확히 측정 후 고정 장치에 시험편을 붙여서 힘의 작용점이 시험편의 중심 축선과 일치하도록 한다. 그 시험편에 하중을 가하여 시험편의 거의 중앙 부분에서 부러졌을 때의 하중을 측정하였다. 파괴하중은 원시력 철근 콘크리트관 (KS F 4403)에 의거하여 실시하였다. 파괴 하중은 시험관체에 하중을 가하여 시험관체에 0.05 mm를 초과하는 균열이 발생하였을 때, 최대 하중을 구하고 유효길이를 나누어 산출하였다. 그 외 시험은 자체 시험을 실시하여 검증하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 인장강도와 압축강도

하수관거의 주요한 물리적 특성은 인장강도와 압축강도로 볼 수 있다. 인장강도는 하수관거의 파괴와 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이는 하수관거 보수 여부를 결정하는데 주요한 지표로 활용된다. 이에 Fig. 3에서는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법으로 보수한 하수관거의 인장강도 (KS M 3015)와 압축강도 (KS M 3015) 실험을 결과를 정리하여 보여주고 있다. 인장강도와 압축강도의 경우 각각 최대 247 MPa과 219 MPa 값을 보였으며, median 값 193.5 MPa, 156.5 MPa의 값을 보였다. 실험 결과 본 연구 개발 단계에서 하수관거의 안정적인 유지를 위해 목표포함 인장강도 150 MPa과 압축강도 120 MPa를 상회하는 값을 보이는 것으로 나타났다.

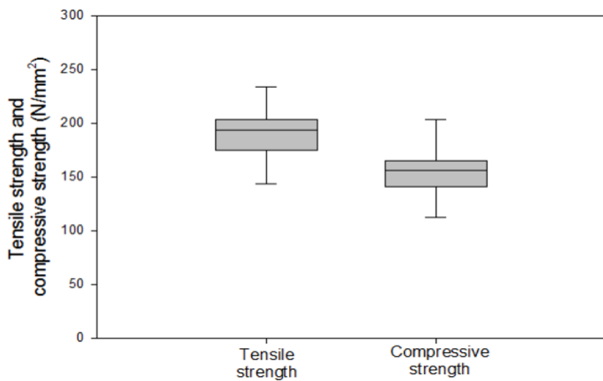


Fig. 3. Tensile strength and Compressive strength after sewer pipe repairing process using glass fiber and twist prevention band

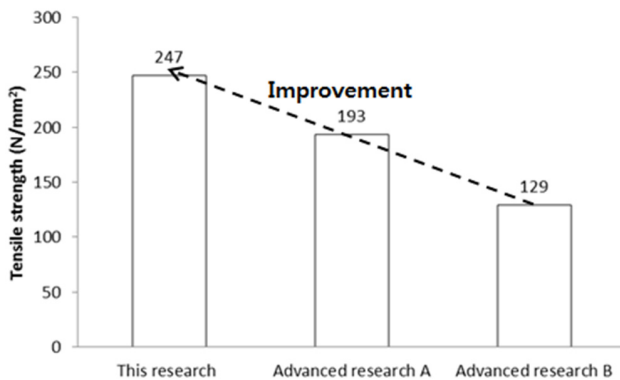
3.2 강도 개선 효과

Fig. 4에서는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법을 실시한 하수관거의 (a) 인장강도와 (b) 굽힘강도의 개선 정도 파악하기 위해 기존에 연구된 하수관거 부분 보수 공법의 인장강도와 굽힘강도를 비교하였다. Fig. 4 (a)에서 확인 할 수 있듯이 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법으로 보강한 하수관거의 인장강도는 기존에 연구된 결과들과 비교하여 상대적으로 높은 것으로 나타났다. Advanced research A 연구 결과와는 약 50 N/mm², Advanced research B 연구 결과와는 약 120 N/mm²로 22 ~ 48% 정도의 차이를 보였다. Fig. 4 (b)에서는 기존의 연구 결과와 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법의 굽힘강도 비교 결과를 보여주고 있다. 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법으로 보강한 하수관거의 굽힘강도가 기존에 연구된 하수관거의 굽힘강도와 비교하여 높은 것으로 나타났다. Advanced research A 연구 결과와는 28%(119 N/mm²), Advanced research B 연구 결과와 비교하여 굽힘강도는 54% (230 N/mm²) 정도의 차이를 보였다. 이와 같은 인장강도와 굽힘강도 개선의 원인은 유리 섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법의 특성에서 찾아 볼 수 있다. 먼저 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법과 Advanced research A 연구에서 활용한 공법의 인장 강도의 차이는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한

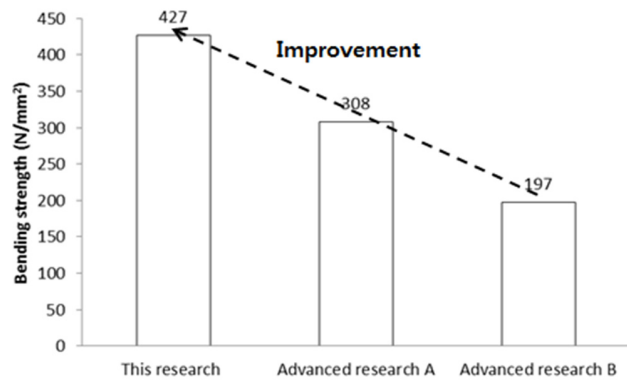
공법은 단부형태가 U 자형이지만, Advanced research A 연구에서 활용한 공법은 11자 형으로 단부 형태의 구조적인 차이로 인한 것이라 설명 할 수 있다. 또한 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법과 Advanced research B 연구에서 활용한 공법의 인장 강도 차이는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법의 보강재가 유리섬유로만 구성되어 있으며 중심부가 두껍기 때문이라 판단된다.

3.3 파괴하중

하수관거의 경우 지하에 매설됨에 따라 매설 후 상부의 토양, 차량의 이동 및 구조물 등으로 인한 하중을 받기에 일정 하중이상에서는 파괴되지 않는 것이 중요하다. Fig. 5에서는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법 보수 전후의 하수관거 파괴하중은 개선 효과, Fig. 6에서는 기존 연구 결과와 파괴하중 개선 비율을 비교하였다. Fig. 5를 살펴보면, 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법을 이용하여 하수관거를 보수함에 따라 파괴하중이 21.6 KN/m에서 49.9 KN/m 약 28 KN/m 정도 (약 230%) 증가하는 것으로 나타났다. 이는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법 보강은 기존 하수관거의 파괴하중을 약 2배 이상 증가시킬 수 있는 것으로 해석할 수 있다. 이처럼 파괴하중이 높은 이유는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드의 영향으로 설명될 수 있다. 하수관거 보강재에 유리섬유를 혼합함으로써 자체강도를 향상시키고, 뒤틀림 방지 밴드를 설치함으로써 균일한 팽창을 유도할 수 있기 때문이다. Fig. 6은 선행 연구 결과와 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법의 파괴하중 개선 효율을 비교하였다. Advanced research A 연구에서의 파괴하중 개선 효과가 가장 뛰어난 것으로 조사되었으나, 본 연구에서의 파괴하중 개선 효과 차이는 약 20% ~ 30% 정도로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 하지만 Advanced research B 연구 결과와는 약 2 배 정도의 큰 개선 효과 차이를 보이는 것으로 나타났다. 기존에 연구된 결과와 파괴 하중 개선 효과 분석 결과 본 연구에서 연구한 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법을 활용하여 하수관거를 보수 할 경우 상당한 파괴하중 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다. 지하 매설물인



(a) Tensile strength



(b) Bending strength

Fig. 4. Comparison on improvement of tensile strength and bending strength

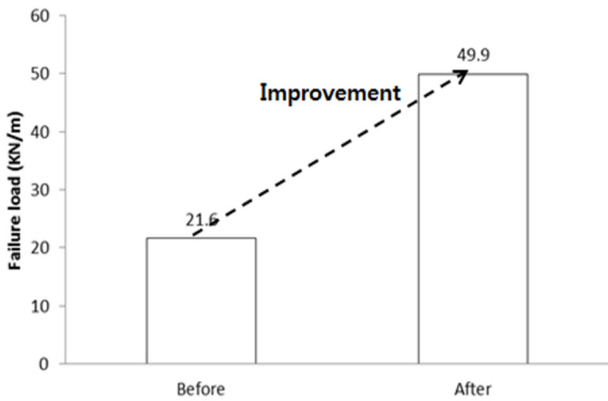


Fig. 5. improvement of failure load (sewer pipe diameter: 300 mm)

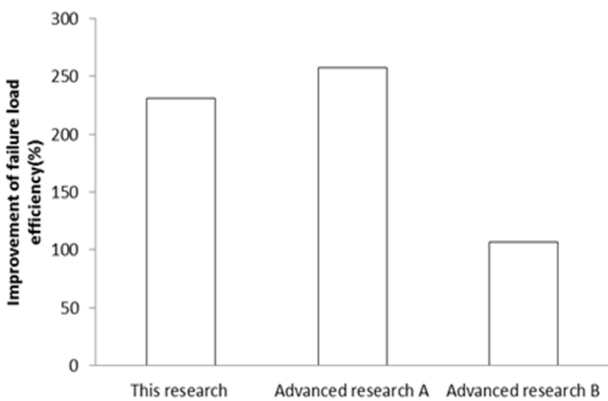


Fig. 6. Comparison on improvement of failure load

하수관거의 경우 항시 누수 및 하수관거 파괴와 같은 보수 사항의 가시적인 확인이 불가능하다. 따라서 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법을 통한 파괴하중 개선은 하수관거 수명 및 보수 주기를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 뒤틀림 변위 분석

본 연구에서 연구한 공법의 주요 특징 중 하나는 뒤틀림 방지 밴드를 적용함에 따라 뒤틀림에 대한 강한 저항을 들 수 있다. Fig. 7은 하수관거 직경 별 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법 적용 유무에 따른 환경 시 뒤틀림에 대한 변형을 보여주고 있다. 실험 조건 하수관거 직경은 소규경 하수관거 (300 mm), 중규경 하수관거 (600 mm) 그리고 대구경 하수관거 (900 mm)로 선정하였다. 실험 결과 모든 하수관거 직경 조건에서 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법을 적용한 경우 뒤틀림 변형이 감소한 것으로 나타났다. 모든 하수관거 조건에서 뒤틀림 변형 감소율은 평균 53%를 보였으며, 특히 중규경 하수관로에서 뒤틀림 변형 감소율이 최대값인 59%를 보였다. Fig. 7의 연구 결과는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법 적용을 통해 뒤틀림 변형을 감소시킬 수 있다는 것을 의미하며, 이와 같이 뒤틀림 변형 감소를 통해 하수관거 보수 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

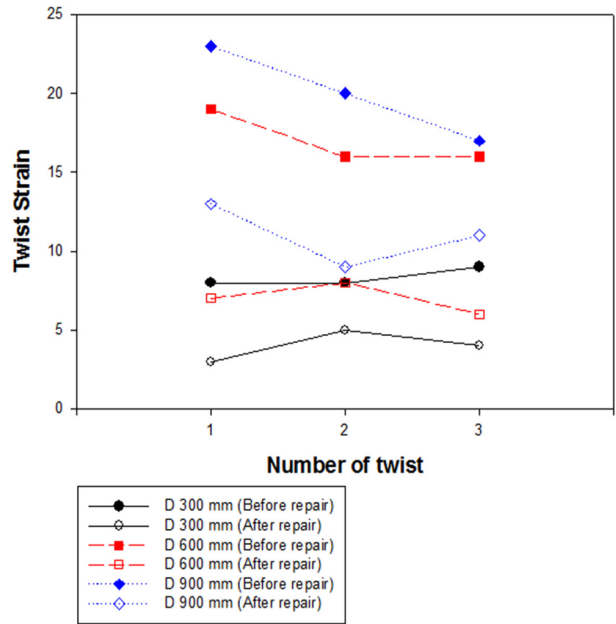


Fig. 7. improvement of twist strain according to sewer pipe diameter

3.5 경제성 분석

하수관거 부분 보수 공사는 전체 보수 공사와 비교하여 경제적인 측면에서 매우 큰 장점이 있다. 따라서 경제성은 하수관거 부분 보수 공사에서 빠질 수 없는 부분이다. Fig. 8은 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법과 선행연구에서의 시공 단가를 비교하였다. 시공 단가에는 실제 시공시 발생하는 노무비, 재료비 및 경비 등이 모두 포함된 금액으로 2015년 하반기 노임 및 해당 기술의 신기술 신청서를 참고하여 산정하였다. 산정 시공 단가는 본 연구에서 연구한 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 활용한 공법의 단가를 100%로 기준하여 하수관거 관경 별 단가 비를 나타내었다. 300mm인 소규경 하수관로 단가의 경우 A 공법보다 12% 그리고 B 공법보다 16% 높은 것으로 조사되었다. 하수관거의 직경이 증가할수록 점차 단가비가 증가하는 경향을 보였다. 특히 600 mm 하수관거 관경에서는 단가 차이가 25 ~ 30% 정도 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 연구 결과는 EEL 공법의 경제적인 장점 보여준다고 할 수 있다. 유지관리적인 측면에서도, 일반적으로 콘크리트 재료인 하수관로의 수명은 30년 정도인데 반해, 하수관로 비굴착 부분보수재인 FRP의 수명은 반영구적인 재료로서 널리 사용되고 있다. 추가적으로 본 방법에서는 앞서 언급한대로 보호 보수재 자체가 친환경적이면서도 가장자리의 단부가 U형으로 이루어져있다. 따라서 강도 보강 및 유지관리를 위한 고압세정 또는 홍수시 손상될 위험성이 기존 기술에 비해 낮아 유지관리비용이 절감될 수 있는 기술이다. 또한 뒤틀림방지밴드를 적용하여, 보호 보수재의 양쪽 단부의 뒤틀림방지 및 외면밀폐재의 찢어짐 등의 변형을 방지함으로써 기존 하수관로의 예상 수명인 30년 이상 반영구적으로 보수 품질을 유지할 수 있을 것으로 기대한다.

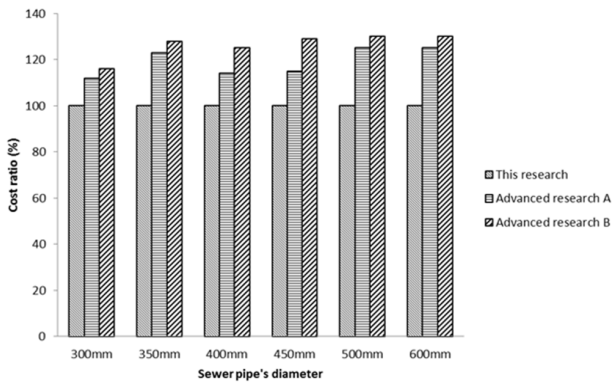


Fig. 8. Comparison of economic efficiency

4. 결 론

본 연구 결과 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 보수 공법 실시를 통해 인장강도, 압축강도 파괴하중 및 뒤틀림 변형이 개선됨을 확인하였다. 기존의 하수관거 부분 보수 공법과 비교하여 인장강도 22 ~ 48%, 굽힘강도 28 ~ 54% 및 파괴하중의 경우 약 230%의 높은 개선 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 뒤틀림 변형의 경우 본 공법의 뒤틀림 방지 밴드를 적용함에 따라 약 53% 정도의 개선 효과가 있음을 확인하였다. 이는 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 보수 공법을 통해 하수관거 수명 및 보수 주기를 증가시켜 보수 품질을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 마지막으로 기존 하수관거 보수 공법과의 시공 단가를 비교한 결과 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드를 이용한 보수 공법이 타 공법에 비해 경제성이 우수한 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 효율을 검증한 유리섬유와 뒤틀림 방지 밴드는 향후 효과적인 하수관거 부분 보수 공법으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

- Allouche, E., Alam, S., Simicevic, J., Sterling, R., Condit, W., Matthews, J. and Selvakumar, A (2014) A pilot study for retrospective evaluation of cured-in-place pipe (CIPP) rehabilitation of municipal gravity sewers, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 39, pp. 82-93
- Choi, SY., Jung, WK., Kim, KH., Kim, YG. and Yun, KK (2007) Mechanical Properties of High Performance Sprayed Mortar for Concrete Pipe Repair, *Korea Concrete Institute*, 2007(5), pp. 763-766 [Korean literature]
- Davies, J.P., Clarke, B.A., Whiter, J.T. and Cunningham, R.J (2001) Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes, *Urban Water*, 3(1-2), pp. 73-89
- Duell, J.M., Wilson, J.M. and Kessler, M.R. (2008) Analysis of a carbon composite overwrap pipeline repair system, *International J. of Pressure Vessels and Piping*, 85(11), pp. 782-788
- Ehsani, M (2015) Repair of corroded/damaged metallic pipelines using fiber-reinforced polymer composites, *Rehabilitation of Pipelines Using Fiber-reinforced Polymer (FRP) Composites*, 2015(3) pp. 39-59
- Emilia, k. and Maria, G (2013) Buckling failure numerical analysis of HDPE pipes used for the trenchless rehabilitation of a reinforced concrete sewer, *Engineering Failure Analysis*, 32, pp. 106-112
- Lee, DG., Chin, WS., Kwon, JW, and Yoo, AK (2002) Repair of underground buried pipes with resin transfer molding, *Composit Structures*, 57(1-4), pp. 67-77 [Korean literature]