

신소재 복합재료를 이용한 비굴착 지하매설관 보수-보강공법

진우석* · 권재욱* · 이대길* · 유애권**

Trenchless Repairing-Reinforcing Process of Underground Pipes with Advanced Composite Materials

Woo Seok Chin, Jae Wook Kwon, Dai Gil Lee, and Ae Kwon Yoo

KEY WORDS : Trenchless, Underground, RTM, Rehabilitation, Void Removal, Dielectrometry

ABSTRACT

To overcome the disadvantages of conventional excavation technology, various trenchless (or excavation free, or no-dig) repair-reinforcement technologies have been developed and tried. But trenchless technologies so far developed have some drawbacks such as high cost and inconvenience of operation. In this study, a repairing-reinforcing process for underground pipes with glass fiber fabric polymer composites using VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) has been developed. The developed process requires shorter operation time and lower cost with smaller and simpler operating equipments than those of the conventional trenchless technologies. For the reliable operation of the developed method, a simple method to apply pressure and vacuum to the reinforcement was devised and flexible mold technology was tried. Also, resin filling and cure status during RTM process were monitored with a commercial dielectrometry cure monitoring system, LACOMCURE. From the investigation, it has been found that the developed repairing-reinforcing technology with appropriate process variables and on-line cure monitoring has many advantages over conventional methods.

1. 서론

우리나라의 기 시공된 대부분의 상-하수관, 가스관, 통신관, 전력공급관 등의 지하매설관은 매설심도 및 상재 하중 역학관계를 고려하지 않은 설

계/제작과 유지관리의 미흡, 장기간의 사용과 토양 산성화에 따른 매설관 재료의 빠른 노화 진행 때문에 매설관이 설계수명 이전에 노화되어 강도가 저하되고, 균열, 파손, 부식 등이 발생하고 있다. 이로 인하여 각종 오폐수와 지하수가 유입되어 토

* 한국과학기술원 기계공학과

** (주) TBI

양을 오염시키고 지반의 침하를 야기하고 있으며, 가스누출로 인한 폭발위험, 지하수 유입으로 인한 통신 두절 등 많은 문제를 초래할 위험이 있다. 또한 이러한 문제들은 커다란 인명과 재산피해로 직결될 수 있으므로 대대적인 지하매설관의 보수-보강 및 교체 작업이 시급한 실정이다.

지금까지 이러한 문제가 발생했을 경우 불량 매설관 부근의 도로 전체를 굴착하여 노후, 파손된 매설관을 교체하는 굴착식 보수-보강공법을 주로 사용하였다. 이러한 방법은 온전한 도로의 파손과 장시간의 도로통제 등 많은 문제점을 안고 있기 때문에 최근에는 굴착식 보수-보강공법의 불합리한 점을 보완하여, 내구연한이 길고 유지관리가 간편하며 안전한 비굴착식 보수-보강공법이 도입되었다.

현재까지 개발된 비굴착식 보수-보강공법은 대표적으로는 폴리에스터 등의 수지를 함침시킨 부직포 튜브를 수압을 이용해 반전시켜 삽입하는 반전삽입공법과 열가소성 수지를 이용한 제관공법이 있다 [1]. 그러나 이러한 비굴착식 보수-보강공법들은 공사비가 높고, 공정이 불편하여 비효율적이라는 문제점을 안고 있다. 기존 비굴착식 보수-보강공법의 문제점을 극복하고 우리나라의 상황에 적합한 공법을 개발하기 위해 복합재료 성형법의 일종인 RTM (Resin Transfer Molding)과 값이 저렴한 유리섬유/불포화 폴리에스터 수지를 이용하는 지하매설관 보수-보강공법의 개발을 수행하였다.

RTM은 높은 강도를 갖는 섬유강화복합재료 (Fiber Reinforced Composite Materials)를 이용하여 원하는 위치에 이방성 성질을 갖는 대형의 복잡한 3차원 구조물을 제조 가능하도록 하며 [2], 대형의 복잡한 상업용 제품을 저렴하게 제조할 수 있다. 또한 성형할 수 있는 구조체의 크기의 범위가 매우 다양하기 때문에, 그 크기가 큰 지하매설관의 보수-보강에 적용하기 쉽다. 지하매설관의 비굴착식 보수-보강공법과 관련하여 많은 연구가 진행되

고 있으나 복합재료 성형법인 RTM을 적용한 사례는 없으며, 지하매설관과 같이 그 크기가 거대한 구조물을 RTM으로 성형하는 방법에 대한 연구 또한 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 섬유강화복합재료를 이용하여 노후, 파손된 지하매설관 내부를 보수-보강하는 공법을 개발하였다. 우수한 보강강도를 갖는 보강관을 빠른 시간 안에 간단한 공정으로 매설관 내에 성형하기 위해 복합재료 성형법의 일종인 RTM을 적용하였고, 실험을 통해 제안된 공법을 검증하였다. 공기 포집 영역 형성 문제를 해결하기 위하여 통기관을 이용하였다. 또한 지하에서 수행되는 본 공정에 가시성을 제공하고 공정을 온라인 모니터링 하기 위해 유전센서와 유전회로를 이용하여, 유리섬유 내부에 주입된 수지의 함침과 경화 정도를 측정하는 연구를 수행하였다.

2. RTM을 이용한 지하매설관 보수공정

2.1 공정개발

보편적인 RTM의 기본적인 공정은 다음과 같다. 우선, 원하는 형상과 비슷하게 재단된 강화용 프리폼 (Preform)을 금형 내부에 안착하고, 금형을 닫은 후 체결 (Clamping)한다. 그리고 금형의 수지 주입구 (Resin Inlet)를 통해 수지를 주입하고, 주입된 수지가 금형의 공기 배출구 (Air Vent)로부터 흘러나오기 시작할 때, 수지의 유동이 정지되고 수지 경화가 시작된다. 수지 경화 후 성형된 구조물을 금형에서 분리함으로써 전체 공정을 끝마친다 [3].

이와 같은 RTM의 기본 공정을 적용한 노후 지하매설관 보수 공정은 다음의 Fig.1과 같으며, 크게 4단계로 구성된다.

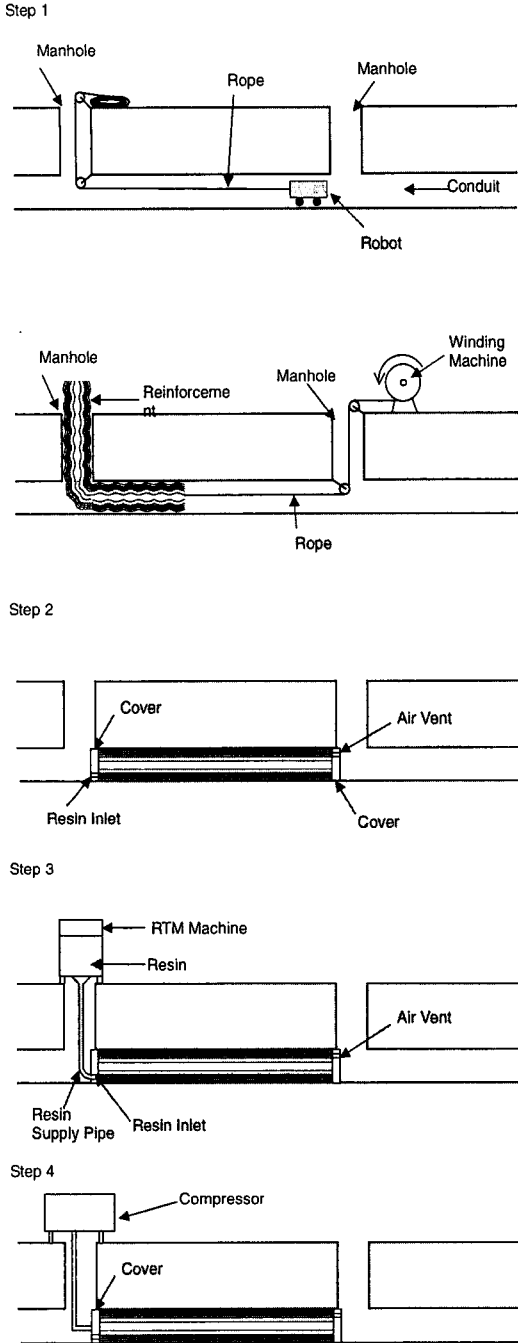


Fig. 1 Repairing-Reinforcing Process of Underground Pipes with RTM Process

<1단계>

관을 따라 이동할 수 있는 로봇을 이용하여 보수, 보강이 필요한 지하매설관의 내부청소를 하고 퇴적물과 돌출부위를 제거한다. 관을 따라 맨홀과 맨홀 사이에 줄을 위치시킨 후 Fig. 2와 같이 섬유 프리폼을 2장의 플라스틱 필름으로 둘러싸 제작한 보강재를 매설관 안에 위치시킨다.

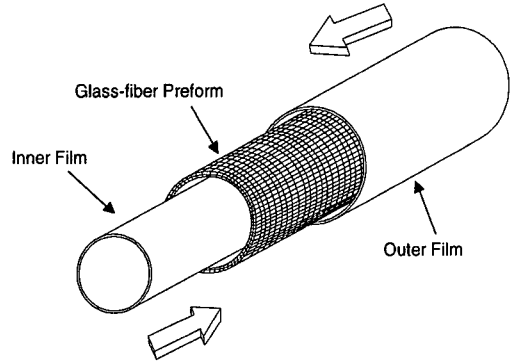


Fig. 2 Manufacturing Method of the Reinforcement

보강재의 외곽 필름은 매설관 내의 돌출부나 매설관에 남아 있던 지하수나 오폐수로부터 유리 섬유 프리폼을 보호하는 역할을 하게 된다. 보강재의 외곽 필름에 점도 조절이 가능한 접착제를 가하여 이동 시 마찰을 줄이는 윤활제의 역할을 하게 하고, 보강재와 매설관의 접착력을 향상시킨다.

<2단계>

매설관 안에 안착 된 보강재의 양끝을 강철 환(Steel Ring)과 아크릴 원판(Acrylic Disk)으로 이루어지는 덮개를 이용하여 막고, 한쪽 덮개의 공기 주입구(Air Inlet)에 압축공기를 불어넣어 보강재를 팽창시켜 유리섬유 프리폼이 매설관 외벽에 밀착되게 하여, 보강재 삽입 시 발생하는 주름과 보강재의 비틀림을 제거한 후 압력을 제거한다.

<3단계>

가압하지 않은 상태에서 덮개의 수지 주입구에 RTM 장비를 연결하고 불포화 폴리에스터 수지를 주입한다. 사용되는 수지는 단량체(Monomer)로 구성되어 점도가 낮다. 따라서 주입 후 이송이 용

이하, 수지 주입에 큰 동력이 소모되지 않는다. 일반적인 RTM 공정은 높은 압력으로 체결된 금형 안으로 수지를 강제 주입하는 방식이나, 여기선 가압 없이 수지를 주입하므로 원활한 수지 유동이 발생하여 수지 주입시간이 단축되고 생산성이 향상된다.

<4단계>

계산된 양의 수지를 주입한 후 수지 공급관을 덮개에서 분리하고, 압축공기를 주입하여 가압하면, 보강재가 매설관에 밀착되면서 주입된 수지가 프리폼에 함침되어 보강재 내부가 매워지게 된다. 이 때 배출쪽 덮개의 공기 배출구에 진공 펌프를 연결하여 진공을 가함으로써 섬유 프리폼 내부의 공기가 빠져나가게 된다. 수지 주입 후 경화가 완료되면 보강재 양 끝의 덮개를 제거하여 공정을 마친다.

2.2 재료의 선정 및 물성 시험

복합재료의 기지는 압축응력을 받는 경우에 섬유의 좌굴 (Fiber Buckling)이 일어나는 것을 억제하며, 복합재료의 압축강도 (Compressive Strength) 향상에 기여한다 [4]. 특히 지하매설관과 같이 압축하중을 받는 구조물은 기지가 보강관의 강도에 미치는 영향이 매우 크기 때문에, 기지의 선택은 매우 중요하다. RTM에 적합한 열경화성 고분자 수지 중 생산성과 생산단가를 고려하여, 저가의 RTM용 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였다. 실험에 사용된 아경화학의 PC-670은 Orthophthalic Type의 불포화 폴리에스터 수지로 적자색의 반투명한 2액형 수지로서 점도가 낮고 Filler의 첨가가 가능하여 가격을 절감할 수 있으며 내균열성을 향상시킬 수 있다. 주요 물성은 Table 1과 같다.

Table 1 Material Properties of PC-670 (AEKYUNG)

Viscosity	0.2 Pa·sec
Gel Time	32 min
Tensile Strength	56 MPa
Young's Modulus	4.1 GPa

보강재의 내·외곽을 감싸기 위한 필름은 우수한 인장특성 및 내마모성과 더불어 RTM에 사용되는 불포화 폴리에스터 수지와 화학적 안정성이 요구된다. PVC, PE, PU, 타포린 필름 등의 재료에 대하여 정적 인장실험 및 불포화 폴리에스터 수지와 화학적 안정성 실험을 수행하였으며, 타포린 필름의 하나인 LG화학의 Pro-Sol 필름을 선정하였다. 실험을 통해 얻은 물성은 Table 2와 같다.

Table 2 Tensile Properties of Pro-Sol Film (LG)

Properties	Untreated	Soaked in Polyester
Strength (MPa)	94.5	80.3
Strain	0.30	0.35

RTM 공정 중 수지 함침단계는 RTM 공정의 핵심적인 단계로서 수지 함침 정도에 의해 성형품질이 좌우된다 [5]. 원활한 수지 함침과 생산단가를 고려하여 일반적으로 투과율이 좋고 가격이 저렴한 주자직 (Satin) 계열의 유리섬유 매트를 보강재의 재료로 사용하였다.

3. 수지 함침 모사실험

RTM에서 수지 함침은 성형품의 품질을 결정짓는 중요한 요소로 원활한 수지 함침이 불가능하다면 공정은 실현될 수 없다. 유리 섬유 프리폼 내의 공기 배출과 수지 함침을 확인하기 위해 수지 함침 모사실험을 수행하였다. 보강재는 투명한 PVC 필름과 주자직의 E-Glass 섬유 매트 제조하였고, 지하매설관의 대응품으로 투명한 아크릴판을 사용하여 수지의 유동을 직접 관찰할 수 있도록 하였다. 수지 함침 모사실험에는 불포화 폴리에스터 수지 대신 같은 점도를 갖는 실리콘 오일에 잉크를 첨가하여 사용하였다. 실험 결과 100 kPa (1atm) 이내의 작은 공기압으로 원활한 수지 함침을 이룰 수 있음을 확인하였으나 보강관 중간부분의 상단 영역에 Fig. 3과 같은 공기 포집 영역 (Air Trapped Area)이 형성되었다.

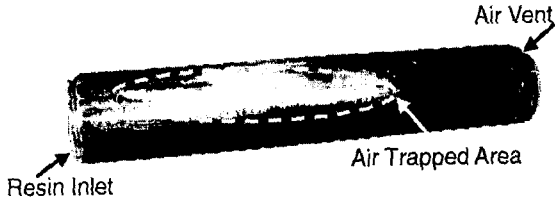


Fig. 3 Formation of the Air Trapped Area

이를 해결하기 위해 다공성의 통기관을 보강재 상단에 삽입하고 공기 배출구에 진공을 가하였다. 그 결과 포집된 공기가 통기관을 통해 외부로 원활히 배출되었고, 수지 함침을 완료할 수 있었다.

4. 지하매설관 보수-보강실험

4.1 유전기법을 이용한 공정 모니터링

본 연구의 지하매설관 보수-보강공정은 도로를 굴착하지 않은 상태로 지하에서 행해지기 때문에 수지의 함침여부를 공정 중에 파악하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하고 수지함침을 보수-보강공정 중에 모니터링 하기 위해 유전기법(Dielectrometry)과 유전센서(Dielectric Sensor)를 사용하였다. 유전기법은 복합재료의 경화과정을 모니터링하는 방법들 중의 하나로 복합재료 내의 유전물질인 수지의 소산계수(Dissipation Factor)를 측정하여 경화 상태를 추적한다 [6]. 유전장치는 소산계수를 측정하기 위한 회로로 이루어지며, 이 중 두개의 전극을 갖는 유전센서가 복합재료에 삽입되어 직접 측정을 하게 된다. 유전센서가 유전체인 수지와 접촉하게 되면, 소산계수의 값이 변화하게 되고 보수-보강공정 중 계속해서 소산계수를 측정하여 수지의 함침여부를 온라인으로 모니터링할 수 있다. 수지의 함침이 완료된 후에는 동일한 유전장치를 사용하여 수지경화를 측정한다. 이와 같은 원리를 이용하여 보수-보강공정 중에 수지함침과 수지경화를 모니터링하였다. 실험에 사용된 LACOMTECH의 유전장치와 유전센서는 Fig. 4와 같다.

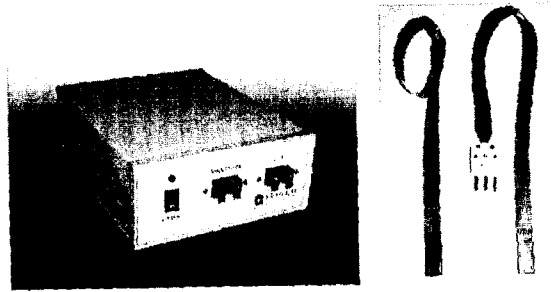


Fig. 4 Dielectric Circuit & Sensor of LACOMTECH

4.2 지하매설관 보수-보강실험

Pro-Sol 필름과 주자직의 E-Glass 섬유 매트로 보강재를 제작하고 보강재 상단 중앙부에 유전센서와 다공성 통기관을 삽입한 후 내경 180mm, 길이 1m의 아크릴관에 안착하고 양끝을 강철 환과 아크릴 원판으로 이루어지는 덮개를 이용해 막은 후 보수-보강실험을 수행하였다. 실험의 개략도는 Fig. 5와 같다.

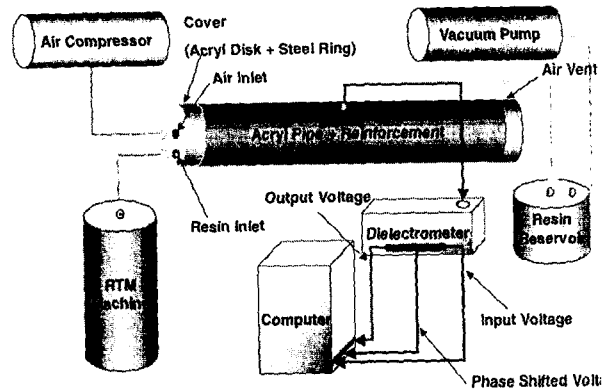


Fig. 5 Schematic Diagram of Repairing-Reinforcing Experiments

불포화 폴리에스터 수지와 경화제인 MEKPO의 부피비는 100 : 1 을 사용하였고, 40 ~ 70 kPa의 공기압을 가해 수지를 함침시켰다. 유전장치를 통해 수지 함침과 경화를 모니터링하였고, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 본 공정으로 제작된 보강관은 25 ~ 35%의 섬유부피분율을 가지며, 보강된 아크릴관의 단면은 Fig. 7과 같다.

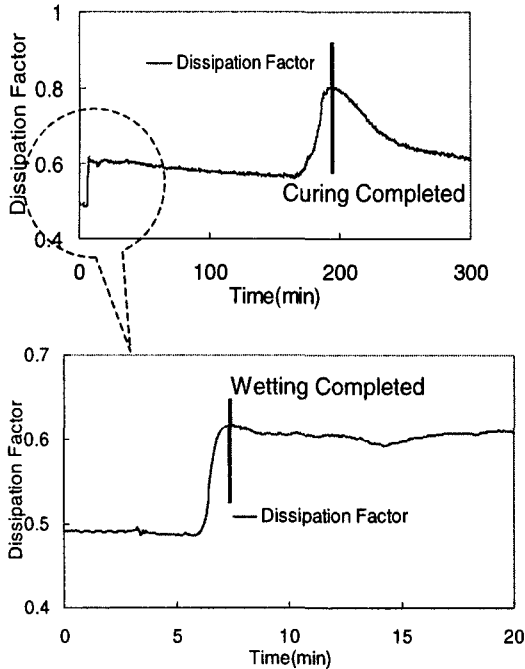


Fig. 6 Resin Wetting & Cure Monitoring Result



Fig. 7 Cross Section of Reinforced Acryl Pipe

4.3 보강관 강도실험

보수-보강실험을 통해 만들어진 각각의 보강관에서 길이 0.4m의 시편을 얻어 ASTM C497M에 의거하여 압축실험을 수행하였고, 실험결과는 다음의 Table 3과 같다.

Table 3 Result of the Compression Test

Displacement	Failure Load	Comparison (%)
-93 mm	12.0 kN/m	25.5

실험에 사용된 아크릴관과 같은 직경의 원심력 콘크리트관의 압축강도는 47.1kN/m이며, 제작된 보강관은 이에 대비하여 25.5%의 압축강도를 갖는다.

5. 결론

본 연구에서는 섬유강화복합재료를 이용하여 도로를 굴착하지 않고 노후, 파손된 지하매설관 내부를 보수-보강하는 공법을 개발하였다. 우수한 강도의 보강관을 빠르고 간편하게 매설관 내에 성형하기 위해 RTM공법을 이용한 신뢰성 있는 지하매설관 보수-보강공정을 제안하고, 실험을 통해 검증하였다. 공정 시 발생하는 공기 포집 영역을 제거하기 위해 다공성의 통기관을 보강재 상단에 삽입하는 방법을 적용하였고, 공정 중 수지의 함침여부와 경화정도를 온라인으로 모니터링하기 위해 유전기법을 이용하였다. 본 공정으로 제작된 보강관은 같은 관경의 콘크리트관의 압축강도와 비교하여 약 25%의 강도를 가짐을 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

- [1] Dec Downey, "Trenchless Methods for Sewer Renovation", *하수관 정비사업과 비굴착공법활성화를 위한 국제세미나*, 1999.
- [2] P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., 1988, pp. 3-4.
- [3] S. T. Peters, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, 1998, pp. 433 - 434.
- [4] 이대길, 정광섭, 최진호, *복합재료 역학 및 제조 기술*, 시그마프레스, 1998, p. 367.
- [5] Suresh G. Advani, *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, Elsevier, 1994, pp. 466 - 468.
- [6] J. S. Kim and D. G. Lee, "On-Line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 1993, Vol. 37, pp. 405-416.