

## 論文

## 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\*\*, Ae Kwon Yoo\*\*

## 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.

## 초 록

기존 굴착식 기술의 단점을 극복하기 위해 다양한 비굴착 보수-보강기술이 개발되고 시도되었으나, 이제까지 개발된 비굴착 기술들은 높은 공사비용과 시공의 불편함이라는 결점을 갖고 있다. 본 연구에서는 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)과 유리섬유 고분자 복합재료를 이용해 지하매설관을 보수-보강하는 연구를 수행하였다. 개발된 공법은 기존 기술보다 적은 비용과 공사 시간을 필요로 하며 사용되는 장비 또한 간단하다. 신뢰성 있는 공정을 위해 유연한 금형의 역할을 하는 보강재에 수지를 주입한 후, 가압과 진공을 가하는 방법이 시도되었으며, 상용 유전장치인 LACOMCURE를 사용하여 RTM 공정 중 수지의 함침과 경화 상태를 추적하였다. 연구결과를 통해, 적절한 공정 변수 및 온라인 경화 모니터링 기법을 적용한 본 공법이 기존 방법에 비해 많은 장점을 가짐을 알 수 있었다.

## 1. 서 론

우리나라의 기 시공된 대부분의 상-하수관, 가스관, 통신관, 전력공급관 등의 지하매설관은 매설 심도 및 상재 하

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*+ 한국과학기술원 기계공학과, 교신저자(E-mail:dglee@kaist.ac.kr)

\*\* (주) TBI

중 역학관계를 고려하지 않은 설계/제작과 유지관리의 미흡, 장기간의 사용과 토양의 산성화에 따른 매설관 재료의 빠른 노화 진행 때문에 매설관이 설계수명 이전에 노화되어 강도가 저하되고, 균열, 파손, 부식 등이 발생하고 있다 [1]. 이로 인하여 각종 오페수나 지하수가 유입되어 토양을 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 필요한 실정이다.

지금까지 이러한 문제가 발생했을 경우 불량 매설관 부근의 도로 전체를 굴착하여 노후, 파손된 매설관을 교체하는 굴착식 보수-보강공법을 주로 사용하였다. 그러나 이러한 방법은 온전한 도로의 파손과 장시간의 도로통제로 인한 사회간접비용의 손실, 도로점거에 따른 교통 체증의 유발과 사고위험, 굴착한 도로의 재포장으로 인한 비용과 시간의 낭비 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 약 80여종으로 매우 다양하며, 크게 신관삽입공법(slip lining), 보강튜브 경화공법(cured-in-place lining, CIPL), 변형관삽입공법(close-fit lining), 제관공법(spirally wound pipes lining)의 네 가지로 분류된다. 대표적으로 폴리에스터 등의 수지를 함침시킨 부직포 튜브를 수압으로 반전시켜 대상관 내에 삽입하는 반전삽입공법과 PVC(poly-vinyl-chloride)나 PE(polyethylene) 등의 열가소성 수지를 녹여 보강관을 성형하는 제관공법이 있다[2].

보강튜브경화공법의 일종인 반전삽입공법은 폴리에스터 수지를 부직포에 함침시킨 라이닝 튜브를 사용하는데, 수지가 시공 전에 경화되는 것을 방지하기 위해 튜브를 냉동 보관 해야 하고, 수지 함침 후 즉시 공사를 수행해야 하므로, 불편할 뿐만 아니라 추가 공사비용이 소요된다. 또한 열가소성 수지를 이용한 제관공법은 수지를 녹이기 위해 큰 열원이 필요하고, 점도가 높은 수지를 이송하기 위해 높은 동력이 필요하다. 이러한 비굴착 기술은 공사비가 높고 그 적용 대상이 원형 관로에 한정되어 있으며, 공정이 불편하며 비효율적이라는 문제점을 안고 있다. 기존 비굴착식 보수-보강공법의 문제점을 극복하고 교통이 혼잡한 도로 상황에 알맞은 신공법을 개발하기 위해, 복합재료 성형법의 일종인 RTM(resin transfer molding)을 통해 유리 섬유와 불포화 폴리에스터 수지로 지하매설관을 보수-보강하는 연구를 수행하였다.

RTM은 높은 강도를 갖는 섬유강화복합재료(fiber reinforced composite materials)를 이용하여 원하는 위치에 이방성 성질을 갖는 대형의 복잡한 3차원 구조물을 제조 가능하도록 하며[3], 대형의 복잡한 상업용 제품을 저렴하게 제조할 수 있다. 또한 성형할 수 있는 구조체의 크기 범위가 매우 다양하기 때문에, 그 크기가 큰 지하매설관의 보수-보강에 적용하기 쉽다[4]. 현재 전세계적으로 지하매설관의 비굴착식 보수-보강공법과 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다. Rogers[5] 등은 비굴착으로 관을 매설할 때의 토양의 변형을 정확하고 간단히 예측하기 위한 해를 정립하였고, George[6] 등은 적절한 관로 구획 선정을 통해 하수관로의 침투/유입수(Infiltration & Inflow, I/I)를 감소시키는 연구를 수행하였다. John[7]은 주름 잡힌 PVC관을 이용한 비굴착 갱생공법에 관한 연구를 수행하였으며, Chapman[8] 등은 수압팽창(hydraulic expansion)과 관로폭파(pipe-bursting) 공정시 야기되는 토양의 변형을 예측하기 위한 간단한 이론모델을 제안하고, 각기 다른 밀도를 갖는 모래를 이용한 실험을 통해 공정 중에 발생하는 모래의 침윤과 유동이 토양의 변형 패턴에 영향을 미침을 발견하였다. Pillai[9] 등은 RTM 공정 시 섬유 프리폼 내의 불포화 유동을 FEM(Finite Element Method)과 CV(Control Volume) 기법을 사용하여 수치적으로 시뮬레이션하였고, 주입압력과 포화도 등에 대한 연구를 수행하였다. Hossein[10] 등은 주입압력과 유체의 점도, 보강재의 종류를 달리하며 RTM 실험을 수행하고, 이를 유한요소해석 결과와 비교하였다. Skordos[11] 등은 개발한 유전센서를 사용하여 RTM 공정 중 수지 전진 상태를 측정하고 이를 육안으로 관찰한 결과와 비교하였으며, 개발된 유전센서로 얻은 경화 데이터와 기존의 상용 유전장치에서 얻은 결과가 유사하다고 밝혔다. 그러나, 복합재료 성형법인 RTM을 이용해 지하매설관을 보수-보강하는 방법에 관한 연구는 아직까지 시도되지 않았다.

본 연구에서는 섬유강화복합재료(fiber reinforced composite materials)를 이용하여 노후, 파손된 지하매설관 내부를 보수-보강하는 방법을 연구하고, 신뢰성 있는 지하매설관 보수-보강공법을 개발하였다. 우수한 보강강도의 보강관을 간단하고 빠르게 매설관 내에 성형하기 위해 복합재료 성형법의 일종인 RTM을 적용하였다. 성형된 복합재료 내부에 공기 포집 영역(air-entrapped area)이 형성되는 것을 막기 위해 다공성 통기관을 이용한 기포 제거 방법이 고안되었으며, 실험을 통해 그 효과가 검증되었다. 또한, 유리섬유 내부로 주입된 수지의 함침과 경화 정도를 유전기법을 이용하여 온라인으로 추적하는 연구를 수행하였다. 개발된 방법을 통해 보수-보강실험을 수행하고, 공정변수에 의거하

여 정립된 공정의 효율을 평가하였으며 복합재료 보강재의 압축실험을 수행하였다.

## 2. RTM을 이용한 비굴착 지하매설관 보수·보강공법

### 2.1 공정 개발

보편적인 RTM의 기본적인 공정은 다음과 같다. 우선, 원하는 형상과 비슷하게 재단이 된 강화용 프리폼(preform)을 금형 내부에 안착하고, 금형을 닫은 후 체결(clamping)한다. 그리고 금형의 수지 주입구(resin inlet)를 통해 수지를 주입하고, 주입 된 수지가 금형의 공기 배출구(air vent)로부터 흘러나오기 시작할 때, 수지의 유동이 정지되고 수지 경화가 시작된다. 수지 경화 후 성형 된 구조물을 금형에서 분리함으로써 전체 공정을 끝마친다[12].

이와 같은 RTM의 기본 공정을 적용한 노후 지하매설관의 보수·보강공정은 다음의 Fig.1과 같으며, 크게 4단계로 구성된다.

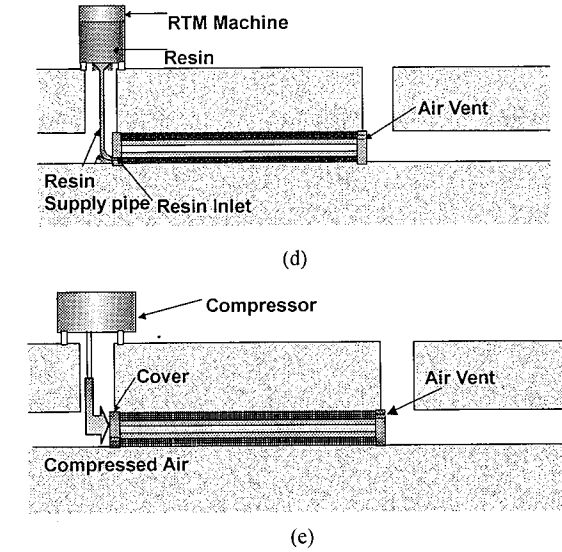
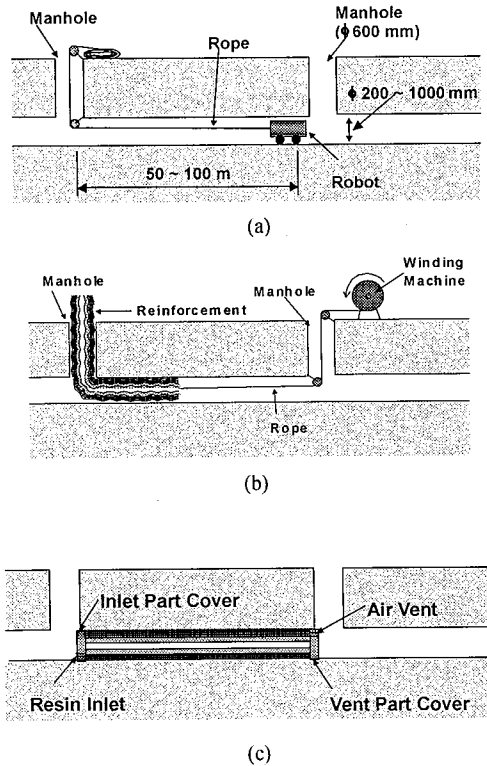


Fig. 1 Repairing-reinforcing processes of underground pipes with RTM: (a) removing deposits and protrusions in the pipe; (b) the reinforcement is connected to a rope and pulled; (c) closing two covers at the both ends of reinforcement; (d) resin injection; (e) resin wetting and curing.

#### <1단계>

Fig. 1(a)와 같이 관을 따라 이동할 수 있는 로봇을 이용하여 보수, 보강이 필요한 지하매설관의 내부청소를 하고, 퇴적물과 돌출부위를 제거한다. 그리고 로봇에 줄을 매달아 관을 따라 이동시켜 맨홀과 맨홀 사이에 줄을 위치시킨다. 유리섬유 프리폼을 2장의 플라스틱 필름으로 둘러싸 제작한 보강재의 한 쪽 끝에 Fig. 1(b)와 같이 줄을 연결한 후, 반대쪽에서 이를 잡아당겨 보강재를 매설관 안에 위치시킨다. 보강재의 형상과 제작방법은 Fig. 2와 같다. 보강재의 내·외곽 필름은 보강재를 매설관 내에 안착할 때, 유리섬유 프리폼이 매설관 내벽의 지장물 등에 긁혀서 손상을 입는 것을 막아주고, 보강재 내로 충전되는 수지가 새는 것을 방지한다. 또한 매설관에 남아 있던 지하수나 오·폐수 등에 섬유가 젖어 수지 함침에 악영향을 미치지 않도록 하는 보호막의 역할을 하게 된다. 보강재의 외곽 필름에 점도 조절이 가능한 접착제를 가하여 이동시 마찰을 줄이는 윤활제의 역할을 하게 하고, 보강재와 매설관의 접착력을 향상시킨다.

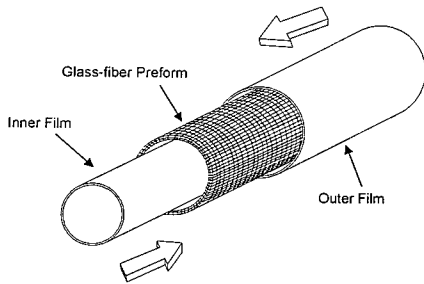


Fig. 2 Preparation of the reinforcement.

## &lt;2단계&gt;

Fig. 1(c)와 같이 매설판 안에 안착된 보강재의 양끝을 강철 환(steel ring)과 아크릴 원판(acryl disk)으로 이루어지는 덮개를 이용하여 막는다. 덮개의 세부 설계도와 조립방법은 Fig. 3에 나타나 있다. 이 때 밴드형 겹자(band clamp)를 이용하여 덮개와 보강재를 체결하고 고정한다. 밴드형 겹자는 강철환의 원주면을 따라 가공된 홈에 단단히 죄어지게 된다. 강철환에 가공된 홈은 체결 후 하중 지지대의 역할을 하게 되고 보강재 내의 기밀 유지를 돕는다. 공정 중 보강재의 압착상태 등은 덮개의 투명 아크릴 원판을 통해 확인할 수 있다. 덮개의 장착이 완료된 후, 주입쪽 덮개의 공기 주입구를 통해 압축공기를 불어넣어 보강재의 내부필름을 팽창시킨다. 이를 통해 유리섬유 프리폼이 매설판 외벽에 밀착되게 되고, 보강재 삼입시 발생하는 주름과 보강재의 비틀림이 제거된다. 그 후 공기압을 제거하여 수지가 쉽게 주입되도록 한다.

## &lt;3단계&gt;

압력을 제거한 후, Fig. 1(d)와 같이 주입쪽 덮개의 수지 주입구에 수지 공급관을 연결하고 RTM 장비를 이용하여 불포화 폴리에스터 수지를 주입한다. 사용되는 불포화 폴리에스터 수지는 단량체(monomer)로 구성 되어 점도가 낮

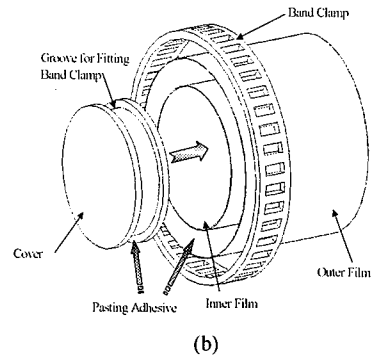


Fig. 3 Cover design and assembling method: (a) detailed design of the cover (steel ring + acryl disk) and its assembling method; (b) clamping method of covers and positions for pasting adhesive.

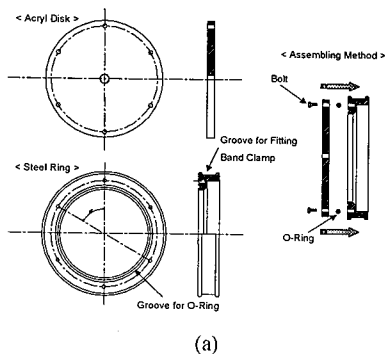
다[13]. 따라서 주입 후 이송이 용이하여, 수지 주입에 큰 동력이 소모되지 않는다. 일반적인 RTM공정은 높은 압력으로 체결된 금형 안으로 수지를 강제 주입하는 방식이나, 여기선 가압 없이 수지를 주입하므로 원활한 수지 유동이 발생하여 수지 주입시간이 단축되므로 생산성을 향상시킬 수 있다.

## &lt;4단계&gt;

계산된 양의 수지를 주입한 후 RTM 장비를 수지 주입구에서 분리한다. 주입쪽 덮개의 공기 주입구를 통해 공기를 주입하여 가압하면, Fig. 1(e)와 같이 보강재가 매설판에 밀착되면서 주입 수지가 섬유 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 수지의 선정

복합재료의 기지는 압축응력을 받는 경우에 섬유의 좌굴(fiber buckling)이 일어나는 것을 억제하며, 복합재료의 압축강도(compressive strength)의 향상에 기여한다[14]. 지하매설관의 경우와 같이 압축하중을 받는 구조물에 있어 기지가 보강관의 보강강도에 미치는 영향은 매우 크므로, 적합한 기지의 선택은 매우 중요하다. 지하매설관의 보수-보강 공정은 RTM공정을 통해 이루어지므로, 점성유체(viscous fluid)인 열경화성(thermosetting) 고분자(polymer) 수지를 기지로 사용해야 하며, 이 때 사용되는 수지는 금형을 완전히 채울 수가 있어야 하고, 강화제인 섬유 프리폼을 완전



히 함침시켜야 한다[15].

본 연구와 같은 보수-보강 공정의 경우 생산성과 재료비는 중요한 요건으로 사용 수지는 이를 충족시켜야 한다. 생산비용과 생산시간 절감을 통해 생산성을 향상시키기 위해서는 작은 동력으로 빠르게 수지를 이송하여야 하므로 수지의 점도가 낮아야 하며, 가격이 저렴해야 한다. 현재 생산되어 사용되고 있는 RTM용 수지는 에폭시(epoxy)와 폴리에스터(polyester) 수지가 주를 이루고 있으며, 점도 등의 물성 선택폭이 매우 넓다. 이 중 에폭시 수지는 그 물성이 우수하여 항공 우주 분야에 주로 사용되나, 가격이 비싸기 때문에 에폭시에 비해 가격이 5배 정도 저렴한 저점도의 불포화 폴리에스터 수지를 사용하여 연구를 수행하였다. 사용된 수지는 에경화학의 PC670 RTM용 불포화 폴리에스터 수지로 orthophthalic type의 적자색, 반투명, 저점도(0.2 Pa×sec) 수지이다. 충전재(filler)의 첨가가 가능하여 가격을 절감할 수 있으며 내균열성을 향상시킬 수 있다. 주요 물성은 다음의 Table 1과 같다.

### 2.3 필름의 재료 물성

보강재의 내-외곽 필름은 보강재를 매설관 내에 삽입하는 공정 중에 유리 섬유 프리폼이 매설관 내벽에 손상을 입거나, 잔류 지하수나 오폐수에 오염되지 않도록 하는 보호막 기능과, 공정 중 가해지는 공기 압력을 지지하는 역할 및 보강된 매설관의 내부 코팅막의 역할을 하게 된다. 이러한 용도로 사용되기 위해선 충분한 인장강도와 내마모성과 더불어 RTM 시 사용되는 불포화 폴리에스터 수지와 화학적 안정성이 요구되는데, 이는 불포화 폴리에스터 수지의 구성물인 반응성 중합성 단량체인 SM(Styrene Monomer)이 고분자 재료와 접촉하여 화학적 반응을 일으켜 물성변화를 야기하기 때문이다.

Table 1 Material Properties of the Cured Unsaturated Polyester (AEKYUNG PC670)

Molded Plate		Layered Plate	
Property		Property	
Bending Strength (MPa)	104	Bending Strength (MPa)	167
Bending Stiffness (GPa)	3.9	Bending Stiffness (GPa)	7.8
Tensile Strength (MPa)	54	Tensile Strength (MPa)	89
Tensile Modulus (GPa)	4.1	Tensile Modulus (GPa)	9.7
Tensile Strain (%)	1.5	Glass Fiber Content(%)	31.3

<Curing Conditions>

Catalyst: 55 % MEKPO 1 % + 6 % Co-Naph 0.1 %

Cure: Room Temp./24Hours + 60℃/5Hours

보강재의 내-외곽 필름 재료를 선정하기 위해 PVC (poly-vinyl-chloride) 필름, PE(polyethylene) 필름, PU (polyurethane) 필름, 폴리에스터 직물(fabric)에 PVC 수지를 함침시켜 만든 타포린(tarpaulin) 필름을 사용하여 각 재료에 대한 정적 인장실험 및 불포화 폴리에스터 수지와 화학적 안정성 실험을 수행하였다. 타포린 필름으로는 LG 화학의 프로탑(pro-top), 프로솔(pro-sol), 아쿠아텍스(aqua-tex)의 세 종류의 필름을 사용하였다. LG화학에서 생산하는 타포린 산업용재의 특성 및 종류, 사용분야는 Table 2와 같다.

이상 6종의 재료를 불포화 폴리에스터 수지(PC670)에 12시간 담근 시편과 담그지 않은 시편으로 나누어 준비한 후 INSTRON 4206을 이용하여 ASTM D882에 따라 정적 인장 실험을 수행하였으며, 시편의 폭은 20mm, 표점길이(gauge length)는 50mm였다[16]. 인장 시험 결과는 Table 3과 같다. 보강재의 내-외곽 필름은 공정 중 가해지는 최대 100kPa의 공기압력을 지지해야 하며, 내경 1000mm의 지하매설관을 보강하는데 사용될 수 있어야 하므로, 약 50kN/m의 강도를 가져야 한다[17]. 내부 공기압은 내-외곽 필름 2장에 의해 지지 되므로, 이를 고려한 필름들의 필요 두께는 Table 3에 함께 명시되어 있다. 폴리에스터 수지에 12시간 담근 시편 중 PVC, PU의 경우, 폴리에스터 수지 내의 스타이렌(styrene)이 흡수되어 두께와 폭이 증가하였으며 재료 자체가 연화되어 변형율이 증가하고 인장 강도가 감소하는 등의 인장 특성 저하가 일어났다. 그러나 두 재료의 경우 필요한 두께의 필름이 상업적으로 생산되지 않는다.

Table 2 Specifications of Tarpaulin Materials

Product Name	Aqua-TEX	Pro-Top	Pro-Sol
Composition	Polyester Fabric + PVC Resin		
Thickness (mm)	0.45 ~ 1.0	0.35 ~ 0.60	0.55 ~ 1.0
Price (won/m <sup>2</sup> )	9,000	2,500	6,000
Specifications	No Pin-Hole No Air-Leakage Multi-Layered Acryl Coating		High Durability & Wear Resistance User-Defined Strength
Used for	Boat, Pool, etc	Tent Sign Board	Air Channel Air Dome Connection Part of a Train

Table 3 Tensile Properties of Various Film Materials

Material		PVC	PU	PE	Aqua- Tex	Pro- Top	Pro- Sol
Strength (MPa)	A	12.0	28.4	12.4	78.8	38.4	94.5
	B	7.2	12.2	12.4	63.2	36.4	80.3
Failure Strain	A	2.7	3.1	4.8	0.33	0.29	0.30
	B	3.3	6.1	4.8	0.30	0.28	0.35
Required Thickness (mm)	A	2.1	0.9	2.0	0.32	0.65	0.26
	B	3.5	2.0	2.0	0.4	0.69	0.31
Available Thickness (mm)	A	0.1	0.1	0.1	0.45	0.35	0.55
	B	~ 1.0	~ 0.5	~ 0.2	~ 1.0	~ 0.6	~ 1.0

A : Without Soaking

B : Soaking in Unsaturated Polyester Resin(PC-670) for 12 Hours

PE의 경우는 강도와 변형율의 변화가 없었으나, 마찬가지로 상업적으로 사용 가능한 필름이 없다. 타포린 필름의 경우 재료를 구성하는 PVC 수지가 스타이렌을 흡수하여 치수의 변화를 일으켰고, 약간의 물성 저하를 일으켰다. 그러나 대부분의 하중을 지지하는 부분은 폴리에스터 직물이고 ( $\sigma_{polyester\ fiber} = 935\text{MPa}$ ,  $\sigma_{PVC} = 12\text{MPa}$ ), 이는 스타이렌에 의해 영향을 받지 않으므로 인장 특성의 저하 정도가 심하지 않았다. 타포린 필름 중 프로폴은 Table 3에서와 같이 다른 재료를 보다 우수한 인장 특성과 스타이렌과의 화학적 안정성을 지니므로 보강재의 내·외곽 필름으로 선정되었다.

## 2.4 유리섬유 매트 선정

RTM 공정의 중요 단계는 크게 프리폼 제조(preforming) 단계, 수지 함침(resin wetting) 단계, 경화(cure) 단계로 나눌 수 있다. 이 중 수지 함침단계는 프리폼을 금형 내에 넣고 프리폼 내부의 기공들 사이로 수지를 함침시키는 공정을 말하며, 수지 함침정도에 의해 성형품질이 좌우되므로 RTM 공정의 핵심 단계라 할 수 있다[18]. 수지함침은 다공성 매질(porous media) 보강재에서의 수지유동에 관련되며, 수지의 평균유동속도  $\bar{U}$ 는 수지유동에 관한 운동량 방정식인 Darcy의 식으로 정의되고 다음과 같다[19].

$$\bar{U} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

여기서  $K$ 는 섬유 프리폼의 투과율(Permeability)이며,  $\mu$ 는 수지의 점도(viscosity),  $\nabla P$ 는 압력구배(pressure gradient)이다.

위 식 (1)에서 보면, 수지의 유동속도는 보강재의 유동특성인 투과율과 수지의 유동특성인 점도, 성형조건인 압력구배에 영향을 받는다. 수지 함침성을 향상시키기 위해서는 다공성 매질 내로의 수지 유동속도를 증가시켜야 하며, 이는 생산성파도 밀접한 관련이 있다. 즉 보강재의 투과율이 높을수록 수지 함침이 원활하며 낮은 동력으로 보수-보강 공정을 수행할 수 있다. 낮은 압력으로 높은 수지 유동속도를 얻기 위해서는 점도가 낮은 수지와 높은 투과율을 갖는 보강재를 사용하여야 한다.

공정의 단가를 낮추기 위해서 비교적 그 값이 저렴한 유리 섬유를 사용하여 보강재를 제작하기로 하였으며, 일반적으로 투과율이 좋은 것으로 알려진 주자직(satin) 계열의 유리섬유 매트를 사용하였다. 사용한 유리섬유 매트는 현대화이바의 E-Glass 주자직(crowfoot satin woven) 유리섬유로 날실(warp)과 씨실(webt)의 섬유밀도는 각각 50yarn/inch, 26yarn/inch이며, 단위면적( $\text{m}^2$ )당 무게는 308g이다. 날실과 씨실의 선밀도는 각각 135tex (g/km), 33.7tex이다.

## 3. 수지 함침 모사실험

수지 함침과 유리 섬유 프리폼 내의 공기 배출의 원활함을 확인하여 공정의 가능성을 타진하기 위해 투명한 금형을 이용한 수지 함침 모사실험을 수행하였다. 지하매설관에 사용되는 관은 내경 150 ~ 3000mm의 콘크리트관, PVC관 등 그 크기와 재료가 매우 다양하며, 본 연구의 보수-보강공정을 적용하기 위한 매설관은 사람이 들어가서 보수-보강을 할 수 없는 내경 150 ~ 1000mm의 관로이다. 이 중 작은 관경에 대해 우선적으로 실험을 수행하였다. 수지 함침 모사실험을 위한 보강재는 투명한 PVC필름과 주자직의 E-Glass 섬유 매트로 제작하였고, 지하매설관의 대응품으로 내경 180mm, 두께 5mm, 길이 1m의 투명한 아크릴관을 사용하여 수지의 유동을 직접 관찰할 수 있게 하였다.

두께 1mm의 투명한 PVC필름을 아크릴관의 직경과 보강 두께 등을 고려하여 재단한 후, PVC필름 접착제로 접착하여 보강재의 내·외곽 튜브를 제작한다. PVC필름의 접착에는 동부정밀화학의 MAXBOND2220을 사용하였으며, 주요 사양은 다음의 Table 4와 같다.

Table 4 Specifications of the MAXBOND2220

Main Component	Polyurethane Resin
Appearance	Semitransparent, Clear Liquid
Non Volatile (%)	18 ± 1
Viscosity (at 25℃)	3.5 ± 0.5 Pa.sec
Specific Gravity (at 20℃)	0.8 ± 0.05
Drying Time (at 25℃, min)	1 ~ 2
Pot Life (hour)	About 4 hour
Main Solvent	Acetone, MEK
Amount of Cure Agent /Total Amount	0.75kg/15kg

제작된 PVC튜브와 유리섬유 매트를 이용하여 Fig. 2와 같은 방법으로 보강재를 만든다. 이때 보강재의 원주방향으로의 섬유 밀도가 50yarn/inch가 되도록 하는데, 이는 지하매설관이 압축을 받는 구조물이므로 길이방향보다 원주방향의 강도를 더욱 필요로 하기 때문이다. 이렇게 만들어진 보강재를 아크릴관 안에 안착하고 보강재의 양 끝을 덮개를 이용해 막는다. 덮개의 체결 시 Fig. 3(b)와 같이 강철 환의 원주방향 홈과 보강재의 내-외곽 필름 사이에 Table 5의 물성을 갖는 열경화성 접착제인 3M의 DP460을 가하고 밴드형 겹자(band clamp)를 이용하여 죄어준다. 덮개의 강철 환은 접착력 증가를 위해 80메쉬(mesh)의 사포로 표면처리 되었다[20].

수지 함침 모사실험에는 불포화 폴리에스터 수지(PC670)와 같은 점도를 갖는 실리콘 오일을 사용하였는데, 이는 PVC 필름이 불포화 폴리에스터 수지와 접촉하면 인장 특성이 저하되기 때문이다. 실리콘 오일은 투명하므로 유동을 효과적으로 관찰하기 위해 색이 있는 잉크를 첨가하였다.

Table 5 Material Properties of the Cured Epoxy Adhesive (3M DP460)

Properties	Value
CTE ( $10^{-6}/m/^\circ C$ )	59 (Below $T_g$ )
	159 (Above $T_g$ )
Poisson Ratio	0.4
Density ( $kg/m^3$ )	1100
Elastic Modulus (GPa)	2.7
Tensile Strength (MPa)	37

수지 함침 모사실험의 전체적인 공정은 앞에서와 같은 지하매설관 보수-보강 공정을 따랐으며, 실험 결과 100kPa (1atm) 이내의 작은 공기압으로 원활한 수지 함침을 이룰 수 있었다. 그러나 보강관 중간 상단 영역에 공기 포집 영역(air-entrapped area)이 형성되었는데 그 원인은 다음과 같다. 주입 된 실리콘 오일은 중력의 영향으로 보강재의 아래 부분을 우선적으로 채운 후 가해진 공기압에 의해 점차 위로 차 올라가게 되는데, 유리섬유 프리폼이 보강재의 튜브를 완벽히 채우지 못하므로 보강재의 양 끝에는 완전히 열려있는 유로가 형성된다. 이 유로의 투과율은 유리섬유 프리폼에 비해 훨씬 크기 때문에 수지가 흐르기 쉽고 함침 정도가 좋아 수지 전진면(resin front)이 더 높은 위치에 생성된다. 수지 전진면은 계속해서 이러한 모양으로 형성되고, 중간 부분의 수지 전진면과 끝 단의 수지 전진면의 높이차가 계속 유지되어, 최종적으로 가운데 부분의 공기가 밖으로 배출되지 못하여 Fig. 4와 같은 공기 포집 영역이 형성된다.

섬유 프리폼 내에 남아있는 공기 포집 영역은 하중을 받을 때 결점으로 작용하게 되므로 지하매설관의 보수-보강 공정을 완성하기 위해서는 원활한 공기 배출을 통해 공기 포집 영역의 생성을 방지해야만 한다. 이를 위해 Fig. 5(a)와 같이 다공성의 통기관을 보강재 상단에 삽입하여, 대기압 보다 높은 압력을 갖는 수지 내 기포가 통기관을 통해 공기 배출구로 원활히 배출되도록 하였다. 외경 6mm, 두께 1mm의 폴리우레탄 튜브에 작은 구멍을 가공하여 만든 통기관을 유리 섬유 프리폼 위에 바느질로 고정하여 Fig. 5(b)와 같은 함침 모사실험용 보강재를 제작하였다.

통기관을 이용한 실험결과 이전 실험에서와 같은 공기 포집 영역이 형성되지 않음을 알 수 있었고, 공기 배출구에 진공을 가하여 줌으로써 그 제거효율을 증가시킬 수 있었다. 함침이 완료된 보강재는 Fig. 6과 같으며 삽입된 통기관은 기포 제거가 완료된 후 쉽게 제거할 수 있었다.

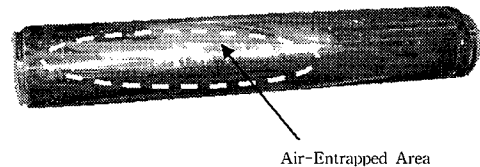


Fig. 4 Formation of the air-entrapped area.

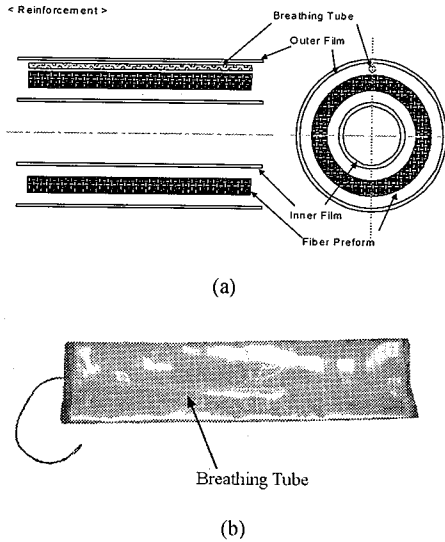


Fig. 5 Void removal method using the porous breathing tube: (a) schematic diagram; (b) photograph of the reinforcement applying this method.



Fig. 6 Figure of completely wetted reinforcement.

#### 4. 지하매설관 보수-보강실험

##### 4.1 유전기법을 이용한 RTM 공정 모니터링

실제 불포화 폴리에스터 수지(PC670)를 사용하여 함침 실험에서와 같은 환경의 아크릴관에 지하매설관 보수-보강 실험을 수행하였다. LG화학의 Pro-Sol 필름을 사용하여 보강재의 내-외곽 튜브를 제작하고, 투과율이 우수한 주자직의 E-Glass 유리섬유매트 5장을 내부튜브에 감은 후 외부 튜브로 감싸 보강재를 제작하였다. PVC필름과 달리 Pro-Sol필름은 불투명하므로 수지의 함침 상태를 육안으로 관찰할 수 없고, 도료를 굴착하지 않은 상태로 지하에서 행해지는 본 연구의 특성상 수지의 함침 상태를 공정 중에 파악하는 것은 매우 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하

기 위해 유전기법(dielectrometry)과 유전센서(dielectric sensor)를 사용하여 공정 중 수지 함침 정도와 경화도를 온라인으로 추적하는 방법을 사용하였다.

유전기법은 복합재료의 경화과정을 모니터링하는 방법들 중의 하나로 제품성형시의 수지경화를 모니터링할 수 있는 유망한 방법으로 알려져 있다[21]. 복합재료 속에 두개의 전극을 삽입한 후 Fig. 7(a)와 같이 교류 전기장을 가하면 유전물질(dielectric material)인 수지가 Fig. 7(b)와 같이 배열되어 축전기와 저항을 형성하고, 수지내의 쌍극자(dipole)들과 이온(ion)들이 교류 전기장에 응답하여 Fig. 7(c)와 같이 운동하기 시작한다. 이러한 쌍극자들의 회전 정도와 이온들의 이동 정도는 복합재료 내의 수지의 점도와 경화에 밀접한 관련이 있으며, 쌍극자들이 인가 전기장에 따라 정렬할 때 지닌 에너지에 대한 쌍극자들이나 이온들이 정렬하거나 이동하는데 소비되는 에너지의 비인 소산계수(dissipation factor)를 측정하여 경화의 상태를 추적하는 것이 유전기법의 원리이다[22].

유전센서가 유전체인 수지와 접촉하게 되면 소산계수의 값이 변하게 되므로 보수-보강공정 중 계속해서 소산계수를 측정하여 수지의 함침여부를 온라인으로 모니터링할 수 있다. 수지의 함침이 완료된 후에는 동일한 유전센서를 통

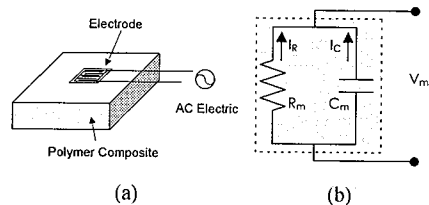


Fig. 7 Principle and measuring method of cure status of composite with dielectric sensor: (a) measuring method; (b) equivalent circuit of dielectric sensor and composite; (c) behavior of dipoles and ions w. r. t. the cure status of composite materials.

Cure state	Behavior of Dipoles & Ions	+ Dipoles -		+ Ions -	
Uncured	Fully oriented				
Curing	Partially oriented				
Fully cured	Random				

(c)



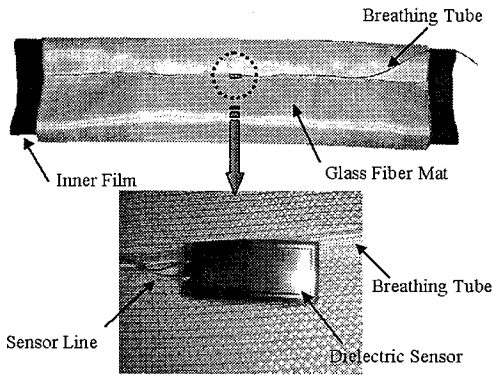


Fig. 8 Reinforcement with a breathing tube and a dielectric sensor whose dimension is 9 mm×250 mm×168μm.

해 계속적으로 수지경화를 측정한다. 이와 같은 원리를 이용하여 보수-보강공정 중에 수지함침과 수지경화를 모니터링 하였으며, 실험에는 LACOMTECH의 유전장치인 CM102와 유전센서 DS201을 사용하였다.

기포제거에 사용되는 외경 6mm, 두께 1mm의 통기관에 유전센서라인을 삽입하고, Fig. 8과 같이 유전센서가 유리섬유 프리폼의 가운데에 위치하도록 통기관을 바느질로 고정 한 후, 외부 튜브 안으로 밀어넣어 보강재를 제작하였다.

## 4.2 보수-보강실험

유전센서와 통기관이 장착된 보강재를 이용한 보수-보강 실험의 개략도는 Fig. 9와 같다. 이때 Fig. 10과 같은 수지저장용기(resin reservoir)가 통기관과 진공펌프 사이에 위치하여 통기관과 진공펌프를 연결한다. 수지저장용기는 통기관을 통해 배출되는 수지가 직접 진공펌프로 들어가는 것을 막아주는 완충기(buffer)의 역할을 하고, 수지로부터 기포를 분리해 준다.

실험에 사용된 RTM장비(Glascraft Co., Indiana, U.S.A.)는 모든 작동이 공압에 의해 이루어지며, 한 Stroke당 약 0.21 kg의 수지를 사출할 수 있다. 통기관의 안쪽으로 삽입된 유전센서라인은 수지저장용기를 통해 외부로 나와 유전장치 CM102에 연결된다. 유전장치는 AD 변환기(converter)를 통해 컴퓨터에 연결되고, 이를 통해 온라인으로 소산계수를 측정한다. 유전장치는 입력전압, 출력전압, 위상이동전압의 3개 전압을 컴퓨터에 전송하고, 컴퓨터는 이 값을 이용해 소산계수를 계산해낸다.

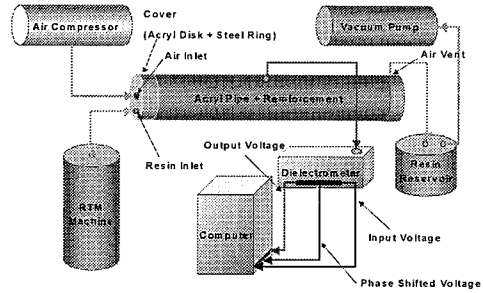


Fig. 9 Schematic diagram of the repairing-reinforcing experiment with glass fiber fabric and unsaturated polyester resin (PC-670) using RTM and dielectrometry.

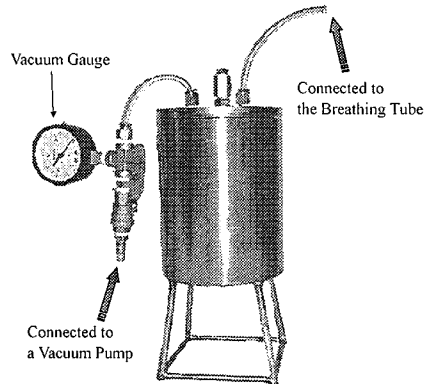


Fig. 10 Resin reservoir for separating voids from the resin.

수지주입 후 RTM장비를 분리하고, 40 ~ 70kPa의 공기압을 가해 보강재를 아크릴판 내벽에 밀착시켜, 주입된 수지가 유리섬유 프리폼에 함침되게 하였다. 이때 보강재의 내-외곽 필름은 일종의 유연한 금형의 역할을 하게 되며, 수지저장용기를 거쳐 공기 배출구에 진공을 가해 보강재 내의 기포를 제거하였다. 실험에 사용된 애경화학의 PC670 불포화 폴리에스터 수지는 경화촉진제의 비율에 따라 겔화 시간(gel time)과 경화시간이 결정된다. 지하매설관의 보수-보강실험에서는 MEKPO(methyl ethyl ketone peroxide)를 경화촉진제로 사용하였고, 수지와 경화촉진제의 비율은 부피비율로 100 : 1을 사용하였다. 통기관을 통해 기포가 섞인 수지가 흘러나오면서 보강재 내의 잉여수지가 외부로 배출되게 되고, 잉여수지가 모두 배출되면 통기관을 통한 수지의 유동이 정지하게 된다. 수지경화 후 주입된 수지량과 배출된 수지량을 통해 계산된 보강재의 섬유부피분율(fiber volume fraction)은 약 25 ~ 35%였으며, 절단면을 확인한

결과 불포화 폴리에스터 수지가 유리섬유 프리폼에 고르게 함침되었음을 알 수 있었다. 공정 중 수지가 유전센서에 접촉하게 되면 Fig. 11과 같이 소산계수 값이 증가함을 알 수 있다. 공정 모니터링 결과 수지함침에 약 7분이 소요되고, 50℃에서 경화까지 약 3시간이 소요되었다.

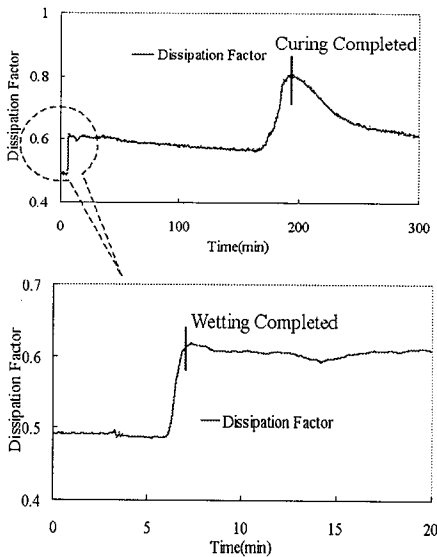
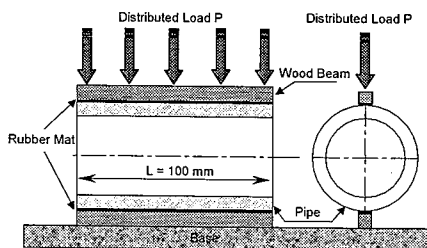


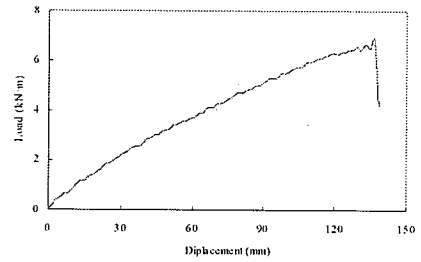
Fig. 11 Dissipation factor of unsaturated polyester during the cure process measured by dielectrometry.

#### 4.3 보강관 강도실험

보수-보강실험을 통해 제작된 유리섬유/폴리에스터 보강재에서 길이 100mm, 두께 1.6mm의 시편 5개를 얻어 ASTM C497M [23]에 의거하여 Fig. 12(a)와 같은 방법으로 ISTRON 4260을 이용해 분당 3mm의 속도로 압축실험을 수행하였다. Fig. 12(b)는 변위에 대한 보강재의 압축 하중 전달능력을 나타내며, 최대 6.9kN/m의 압축하중 평균값을



(a)



(b)

Fig. 12 Test of the reinforcement made of glass fiber fabric and unsaturated polyester resin (PC-670): (a) compression test method of a concrete pipe (ASTM C497M); (b) compressive load-displacement curve of the reinforcement with 1.6 mm thickness.

얻었다. 이 때 표준편차는 0.23kN/m였다. 실험에 사용된 아크릴관과 같은 직경의 두께 27mm의 원심력 콘크리트관 (Reinforced Spun Concrete Pipe)의 압축강도가 25.6kN/m인 것을 고려하면, 보수에 의한 효과를 제외하고 약 27%의 압축강도 증가를 보였다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 RTM과 섬유강화복합재료를 이용하여 도로를 굴착하지 않고 노후, 파손된 지하매설관 내부를 보수-보강하는 공법의 개발을 수행하였다. 원하는 보강강도를 갖는 보강관을 빠르고 간편하게 매설관 내부에 성형하기 위해 항공기나 자동차 외판 등의 성형에 주로 사용되어 왔던 RTM공법을 채택하고, 신뢰성 있는 보수-보강공정을 위해 유리섬유 프리폼을 타포린 필름으로 감싸 만든 보강재를 사용하여 유연한 금형 및 보호막의 역할을 하게 하였다. 수지이송에 소요되는 동력과 시간을 줄이기 위해 적정량의 수지 주입 후 가압하는 방법을 사용하였고, 다공성 통기관을 사용하여 공정 시 발생하는 공기 포집 영역을 제거하였다. 또한 상용 유전장치를 이용하여 공정 중 수지의 함침과 경화를 추적하였다.

개발된 공법으로 제작된 보강재의 압축실험으로부터, 보수에 의한 효과를 제외하고 약 15%의 강도 증가를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1) S. G. Choi, W. G. Bae, "A Study on Rehabilitation

- Technology of Civil Sewage System," *Report for The Ministry of Environment, Republic of Korea*, 1997.
- 2) D. Downey, "Trenchless Methods for Sewer Renovation," *International Seminar for the Maintenance of Sewage System and the Activation of Trenchless Technologies*, 1999.
- 3) P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites*, Marcel Dekker, Inc., 1988, pp. 3-4.
- 4) T. G. Gutowski, *Advanced Composites Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 28-32.
- 5) C. D. F. Rogers, "Analytical Modeling of Ground Movements Associated with Trenchless Pipelaying Operations," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, Vol.131, No. 4, 1998, pp. 210-222.
- 6) G. E. Kurz, D. J. Anderson, and M. A. Burgett, "SSO and I/I Reduction Using Sewer Rehabilitation," *Proceedings of the Construction Congress V - Managing Engineered Construction in Expanding Global Markets*, Vol. 1. 1998,
- 7) J. S. Trent, "Rehabilitation of Existing Sewers and Conduits Using Folded/Formed Poly Vinyl Chloride (PVC) Pipe," *Proceedings of the Vinyl Technical Conference*, 1998, pp. 65-69.
- 8) C. DN, F. C, R. CDF, and S. D, "Experimental and Analytical Modelling of Pipebursting Ground Displacements," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.11, 1996, pp. 53-68.
- 9) K. M. Pillai, S. G. Advani, "Numerical Simulation of Unsaturated Flow in Woven Fiber Preform during the Resin Transfer Molding Process," *Polymer Composites*, Vol. 19, No.1, 1998, pp. 71-80.
- 10) H. Golestanian, A. S. El-Gizawy, "Physical and Numerical Modeling of Mold Filling in Resin Transfer Molding," *Polymer Composites*, Vol.19, No.4, 1998, pp. 395-407.
- 11) A. A Stordos, P. I Kaknans, and I. K Partridge, "A Dielectric Sensor for Measuring Flow in Resin Transfer Moulding", *Measurement Science & Technology*, Vol. 11, 2000, pp. 25-31.
- 12) S. T. Peters, *Handbook of Composites*, Chapman & Hall, 1998, pp. 433 - 434.
- 13) J. E. Mark, *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, 1999, pp. 460-465.
- 14) D. G. Lee, K. S. Jung, and J. H. Choi, *Mechanics and Manufacturing Technologies of Composite Materials*, Sigma Press, 1998, pp. 367.
- 15) T. G. Gutowski, *Advanced Composites Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc., 1997, pp. 399-400.
- 16) 1995 American Society for Testing and Materials D882-95a. Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheetting.
- 17) F. P. Beer, E. R. Johnston, and Jr., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, 1992, pp. 377-379.
- 18) S. G. Advani, *Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing*, Elsevier, 1994, pp. 466 - 468.
- 19) B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, PWS Publishing Company, 1993, pp. 132 -133.
- 20) J. W. Kwon, D. G. Lee, "The Effects of Surface Roughness and Bond Thickness on the Fatigue Life of Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints," *Journal of Adhesion Science & Technology*, Vol. 14, No. 8, 2000, pp. 1085-1102.
- 21) J. S. Kim, D. G. Lee, "Analysis of Dielectric Sensors for the Cure Monitoring of Resin Matrix Composite Materials," *Sensors and Actuators*, Vol. 30, 1996, pp. 159-164.
- 22) J. S. Kim, D. G. Lee, "On-Line Cure Monitoring and Viscosity Measurement of Carbon Fiber Epoxy Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, 1993, pp. 405-416.
- 23) 1996 American Society for Testing and Materials C497M-96. Standard Test Methods for Concrete Pipe, Manhole Sections, or Tile[Metric].