공학석사 학위논문

비굴착공법에 사용되는 콘크리트관의 피로성능에 관한 실험적 연구

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2005년 8월

부경대학교 산업대학원

토 목 공 학 과

김 덕 린

김덕린의 공학석사 학위논문을 인준함

2005년 6월 17일

주 심 공학박사 이 동 욱

위 원 공학박사 정 두 희

위 원 공학박사 장 희 석

목 차

그림목차 iii

표 목차 v

Abstract vi

제 1 장 서 론 1

1.1 연구배경 1

1.2 연구범위 2

제 2 장 CIPP공법의 개요 4

2.1 하수관거 굴착 보수공법 4

2.2 하수관거 비굴착 보수공법 4

2.3 CIPP 공법의 종류 7

2.4 CIPP 공법의 공정 7

제 3 장 신관과 라이닝관의 정적시험 13

3.1 라이너의 휨강도 및 탄성계수시험 13

3.1.1 시험편 13

3.1.2 시험결과 14

3.2 라이너의 인장강도시험 15

3.2.1 시험편 15

3.2.2 시험결과 16

3.3 신관과 라이닝관의 파괴하중시험 17

3.3.1 시험편 17

3.3.2 시험결과 18

제 4 장 신관과 라이닝관의 피로시험 ·····21

4.1 신관, 라이닝관 및 피로시험장치 ····· 21

4.1.1 신관 ····· 21

4.1.2 라이닝관 ····· 21

4.1.3 피로시험장치 ····· 24

4.2 신관의 정적시험 ····· 26

4.3 신관의 피로시험 ····· 27

4.4 라이닝관의 피로시험 ····· 36

4.5 피로시험 결과 및 분석 ····· 38

제 5 장 결론 ·····41

참고문헌 ·····43

그 림 목 차

그림 2.1 CIPP 공법을 이용한 보수시공 공정 ····· 8
그림 2.2 반전장치로부터 수압반전중인 모습 ····· 12
그림 3.1 탄성계수 시험에 쓰인 시험체 ····· 14
그림 3.2 KS M 3006에 제시된 1호형 시험편 ····· 16
그림 3.3 파괴하중 시험장면 ····· 17
그림 3.4 신관에 대한 관경별 균열하중 및 파괴 하중 ····· 19
그림 3.5 라이닝관에 대한 관경별 균열하중 및 파괴 하중 ····· 19
그림 4.1 신관에 초기균열을 발생시키기 위한 거치상황 ····· 22
그림 4.2 초기균열을 발생시키기 위한 가력중 상황 ····· 22
그림 4.3 초기균열 발생후 라이닝 보수 대기중 상황 ····· 23
그림 4.4 초기균열 발생된 관에 대하여 관 내부의
라이닝으로 보수 처리하는 과정 ····· 23
그림 4.5 보수 처리된 라이닝관의 내부 모습 ····· 24
그림 4.6 시험장치 전경 (1) ····· 25
그림 4.7 시험장치 전경 (2) ····· 25
그림 4.8 시험장치 및 계측 모니터 ····· 26
그림 4.9 신관의 정적시험으로부터 얻어진 하중-처짐 곡선 ····· 27
그림 4.10 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 정적하중
재하에 따른 신관의 하중 처짐 곡선 ····· 28
그림 4.11 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관의 파괴 형상 ····· 28
그림 4.12 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관의 내부 하단균열 ····· 29
그림 4.13 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관의 내부 상단균열 ····· 29

그림 4.14 피로하중(Pmax=80kN)을 받은 신관의 파괴 형상 ····· 30
그림 4.15 피로하중(Pmax=80kN)을 받은 신관의 내부균열 ····· 31
그림 4.16 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-1의 파괴 형상 ····· 32
그림 4.17 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-1의 상하, 측면 균열 형상 ····· 32
그림 4.18 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-2의 파괴 형상 (1) ····· 33
그림 4.19 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-2의 파괴 형상 (2) ····· 34
그림 4.20 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-3의 파괴형상 ····· 34
그림 4.21 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
신관-3의 내부 균열 형상 ····· 35
그림 4.22 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 정적하중 재하에 따른
신관의 하중-처짐 곡선 ····· 35
그림 4.23 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
라이닝관-1의 파괴 형상 ····· 36
그림 4.24 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
라이닝관-2의 파괴 형상 ····· 37
그림 4.25 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은
라이닝관-2의 관내부 및 측면 균열 형상 ····· 37
그림 4.26 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 정적하중 재하에 따른
라이닝관의 하중-처짐 곡선 ····· 38

표 목 차

표 2.1 굴착공법과 비굴착 공법의 비교 ····· 5
표 3.1 휨강도 및 탄성계수 시험을 위한 시험편 규격 및 수량 ····· 13
표 3.2 시험편의 휨강도 및 탄성계수 측정장비 ····· 15
표 3.3 시험편에 대한 휨강도 및 탄성계수 측정결과 ····· 15
표 3.4 인장강도 시험체의 규격 ····· 15
표 3.5 시험편에 대한 인장강도 측정결과 ····· 16
표 3.6 파괴하중 시험을 위한 규격 및 수량 ····· 18
표 3.7 관경별 평균 파괴하중 측정결과 ····· 20
표 4.1 1,000,000회 피로하중 가력 후 정적 시험에서 얻어진
신관과 라이닝관의 시험 결과치 비교 ····· 40

An Experimental Study for the Fatigue Performance of Concrete tube used in the Trenchless Technology

Dug - Rin Kim

Department of Civil Engineering, Graduate School.
Pukyong National University

Abstract

Recently, people mainly use the way to change the old one into new one in order to maintain a various pipes. However, the construction in this way causes the increase of social indirect expenses economically uncountable including generation of dust, noise and industrial waste, damage risk of theunderground substances, increase of inconvenience of residents following traffic barriers and long-term construction time.

Accordingly, the trenchless technology has taken public attention, where pipes can be installed regardless of diameter and type ensuring water-tight property without any loss of draining ability at the junction part and pipe coupler, which especially has simultaneous effects to stop leakage of and reinforce the pipe effecting more strength than a new pipe by only one-time maintenance work.

Out of trenchless technologies, CIPP technology is one that is systematically well organized, has abundant performance records worldwide, taking its place as a representative trenchless technology at present. However, it is the real situation that detailed suggestions were lack on the study of behaviors of concrete pipe applying CIPP technology domestically. Namely, research was insufficient on the fatigue

performance of concrete pipe applying CIPP technology, and this motivated the present researcher to start this study.

In this study, the fatigue performances were tested against two (2) states of pipe, comprising concrete Hume pipe for drainage (pipe in general use, B-600 type; Hereinafter to be called "new pipe"), and this new pipe that was initially cracked by the load effect, where maintenance was treated in newly developed method, as a kind of CIPP technology (Hereafter to be called lining pipe). Those fatigue data were aimed for the analysis by mutual comparison, and the usage as the necessary basic data when the lining pipe to be used in trenchless maintenance technology later.

In addition, in this study, tests were conducted on the static performance and the fatigue performance of the concrete pipe applying the CIPP technology, a kind of trenchless technology of drainage pipe, and the conclusions obtained from the comparative analysis are as follows.

1) In the static test, lining pipe showed 9.4% destruction load increasing rate higher than that of new pipe in D400, while 11.5% and 13.9% in D600 and D1000 respectively, representing 11.6% of load increasing rate on average.

2) When comparing the features of new pipe and lining pipe after destruction, which finished the static tests after fatigue tests, new pipe showed thick gaps in small numbers, while lining pipe was spread by thin gaps in large numbers. This phenomenon means the strength of lining pipe increased, which is attributed by the reinforcement effect by lining work.

3) After fatigue tests of repeated 1,000,000 times of load were added to the three new pipes, the average maximum load obtained from static tests was 158.6kN. Meanwhile, it showed 188.8kN in case of two lining pipes, lining pipe showed 19% of maximum load increasing rate compared to that of new pipe. Furthermore, in the sag when the maximum load to be added, lining pipe showed 14% higher than new pipe, which resulted in the increase of elastic deformation energy compared to new pipe.

Generally analyzing the test results as above, it is judged that lining pipe is relatively superior in the static and fatigue performances, compared to new pip

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현재 우리나라의 하수도 정책은 이제까지의 하수처리장 건설 위주에서 생활하수를 가정에서부터 하수처리장까지 이송하는 하수관거 정비 위주로 전환될 예정이다. 이에 따라 정부는 2002년을 "하수관거 특별 정비원년"으로 삼아 우리나라 하수처리 효율을 획기적으로 개선하기 위한 노력을 하고 있다. [3), 5)]

하수관거시설(sewerage network system)은 지하에 매설되어 있어 평소 그 존재의 가치를 느끼지 못하지만 단 하루도 사용하지 않는 날이 없는 매우 소중한 국가기반시설이다. 그러나 하수관거는 항상 지하의 습기와 급격한 온도변화에 노출되어 있을 뿐만 아니라 토압, 수압, 활하중 등의 상재하중이 가해지는 상태로 있기 때문에 지상의 다른 시설물보다 노화의 진행정도가 빠르다.

하수관거는 지하 매설물이라는 특성 때문에 도시가 완전히 형성된 후에 건물들 사이로 새로운 하수시설을 매설한다는 것은 매우 번거로운 일이다. 따라서 도시가 형성되기 이전에 수 백 년을 전망하는 장기적인 안목으로 완벽한 설계를 하는 것이 중요하지만, 수 백 년 후의 인구와 사용량을 추정하여 이에 상응하는 용량의 하수관거를 설계한다는 것은 힘든 일이다. 따라서 초기에 설치된 시설의 유지관리를 철저히 하여 시설의 수명을 연장시키고, 부족한 용량은 새로운 설계를 통해 점차적으로 증설하는 방법이 현실적이다. [8), 15)]

현재 각종 관거의 보수방법으로 굴착 후 신관으로 교체하는 방법이 주로 사용되고 있으나 이러한 방법에 의한 공사는 분진, 소음, 산업폐기물의 발생과 지하매설물에 대한 파괴위험, 교통장애 및 장기간 공사기간을 요함에 따른 주민 불편의 증가 등 경제적으로 환산이 불가능한 사회간접비용의 증

가를 유발시키고 있다.[11), 13), 16), 17)] 이에 따라 굴착없이 각종 관경 및 관종에 시공이 가능하며, 유하능력을 손실시키지 않고 연결관 및 접합부에서 수밀성을 갖고 보수 후 신관 이상의 강도를 발휘할 수 있는 1회 시공으로 지수와 보강효과를 동시에 발휘할 수 있는 비굴착공법이 주목되어 왔다.

기존하수관거를 비굴착 보수공법으로 정비하는 방법은 CEN(유럽 표준화 기구)의 규정에 따르면 기술 군에 따라 continuous pipes 공법, close fit pipes 공법, CIPP 공법, discrete pipes 공법, inserted hoses 공법, spirally wound pipes 공법 등으로 세분된다.[1)]

위의 방법 중에서 CIPP공법은 그 체계가 잘 이루어져 있고, 전 세계적으로 시공실적이 가장 많으며, 현재 비굴착공법의 대표적 공법으로 자리매김됨에 따라 우리나라에서도 최초로 도입한 공법이다. CIPP란 Cured In Place Pipe(or Plastic)의 약어로 현장에서 경화되는 관(혹은 플라스틱)이라는 뜻이며, 소위 "보강튜브 현장 경화관 라이닝공법", " 현장 경화관 공법" 등으로 불린다.[12)]

위에서 설명한 CIPP 공법은 널리 사용되어 오고 있으나, 국내에서 CIPP 공법을 적용한 콘크리트관의 역학적 거동에 대해서는 아직까지 구체적으로 제시된 것이 부족한 실정이다. 즉, CIPP 공법을 적용한 콘크리트 관에 대하여 피로성능에 대한 검토가 부족한 실정이어서 본 연구에서는 이에 대한 조사를 행하게 되었다.

1.2 연구 범위

본 연구에서는 D건설산업에서 제작된 하수관거용 콘크리트 흄관(보통관, B형-600, 이하 신관)과, 이 관에 대하여 하중을 작용시켜 초기균열을 발생시킨 후 K주식회사에서 CIPP 공법의 일종으로 개발한 방법에 의하여 보수처리한 관(이하 라이닝관)의 피로성능을 상호 비교분석하여, 추후 라이닝관을 하수도관 비굴착 하수관로 보수공법에 사용시 필요한 기초 자료를 제

공하고자 한다. 라이닝관의 정적 거동에 대하여는 기존에 행해진 시험결과를 조사하여 인용하는 것으로 하였다.

제 2 장 CIPP(Cured-In-Place-Pipe)공법의 개요

2.1 하수관거 굴착 보수공법

불량관거가 매설된 도로 전체를 장시간 동안 광범위하게 통제하고, 많은 중장비와 인력을 동원해 도로를 인위적으로 굴착하여 노후관을 해체하고, 동종의 새로운 관을 매설한 후 굴착된 도로를 재 포장하는 방식으로 지금까지 사용되어온 공법이다.

그러나, 이 방법은 온전한 도로를 파손해야 하고, 굴착작업을 할 때 근처에 매설된 다른 지하시설물(상수관, 가스관, 통신시설 및 기타 부속시설 등)에 손상을 입힐 가능성이 높으며, 다량의 건설잔토와 폐기물을 발생 시키고, 장시간 도로통제에 따른 사회간접비용 손실을 증가시키며, 상당한 수준의 소음, 진동, 분진 등의 유해환경요소를 발생시켜 민원을 야기하고, 불필요한 도로 재포장 비용이 소비되며, 많은 장비와 인력을 소모하는 등의 문제점을 내포하고 있다. [9]

2.2 하수관거 비굴착 보수공법

재래식 공법의 불합리한 점이 대두됨에 따라 이를 보완하기 위해 직접/간접공사비가 저렴하며, 사회 간접비용 손실을 최소화하며, 건설 잔토/폐기물과 유해환경 요소를 배제하며, 공사기간이 단축되고, 도로 통제가 불필요하며, 내구연한이 길면서도 유지관리가 간편하며, 안전하고 쾌적한 공사 환경을 제공하는 등의 다양한 요구를 충족시키는 새로운 공법이다. 선진외국에서는 비굴착 기술이 약 30년 전부터 시작하여 현재는 하수관뿐만 아니라 상수도관, 가스관, 송유관등의 보수에 까지 폭 넓게 사용되고 있다.

표 2.1 에 굴착공법과 비굴착공법의 특징을 비교하여 나타내었다.

표 2.1 굴착공법과 비굴착 공법의 비교

구분	굴착 공법	비굴착 공법
개요	· 도로 굴착 후 관 교체	· 도로 굴착 없이 노후관을 신관 이상의 수준으로 갱생
교통 문제	· 시공 구간의 교통 전면차단 · 시공부터 완공까지 도로개통이 불가함으로 장시간 교통체증을 유발 · 건설 잔토, 노후관, 시공관의 노상 적재에 따른 도로점용 · 차량 통행이 많은 지역일 경우 야간작업 수행	· 최소구간 차단 (1개 차로) · 공사 중 인접차로 차량통행 가능, 교통체증 감소 · 튜브가 유연하여 롤에 감아놓거나 차량 내부에 접어서 적재할 수 있기 때문에 도로 점용면적이 거의 없음 · 단기간 통제로 상시 작업가능
공사 기간	· 15~30일	· 부분보수 : 1일 · 전체보수 : 1일~최장3일
환경 문제	· 관 파손 및 이음부 불량에 의한 하수 유출로 토양 및 지하수 오염 · 지하수 유입에 의한 하수처리 효율감소 · 다량의 건설 폐자재(적출관, 잔토) 발생	· 이음부 없이 시공되므로 오수 유출 및 지하수 유입 완전차단 · 침투/유입수 차단으로 하수처리 효율 증대 · 건설 폐자재 발생 억제 및 폐기물 재활용 가능
행정 문제	· 간헐적 보수공사로 인한 행정불신 초래 · 도로 굴착에 따른 법적규제 · 예측불허의 긴급보수로 장기적 행정계획의 차질초래	· 단 1회 시공으로 행정신뢰감 구축 · 계획적인 불량관거 정비 추진가능 · 도로굴착 허가를 얻을 필요가 없음
도심환경	· 도로굴착으로 인한 소음, 진동, 분진, 악취 등으로 인한 민원 야기 · 장기간 공사로 주민의 주거생활 환경영향	· 소음, 진동, 분진, 악취를 최소화한 환경친화적 공법으로 민원발생 최소화 · 단기간 공사로 안전하고 쾌적한 도심환경 창출
경제성	· 온전한 도로를 고의로 파손함 · 가시설 공사비 감안시 비경제적 · 많은 인력, 장비, 비용 소비 · 장시간 통제로 인한 사회간접비용 손실증가(직접공사비의 약400~500%)	· 맨홀을 통한 작업으로 도로를 전혀 훼손하지 않음 · 도로수명 단축, 교통장애, 환경오염 유발 등 사회간접 손실을 감안시 경제적 우수성 탁월 · 공정이 기계화, 자동화 되어

	· 불필요한 도로 재포장 비용 소요	최소의 인원 소요 · 도로 재포장 비용 필요 없음 · 사회간접비용 손실억제(굴착 공법의 1/10수준)
정비 효과	· 내화학성이 취약하여 부식, 파손으로 인한 노후도 진행 · 투자비용에 비해 정비효과가 미비 · 교체시에도 수명은 20년에 불과 · 기존관과 같은 재료로 시공하기 때문에 조도계수의 향상이 없음	· 내화학성 및 내구성이 강하여 50년 이상 반영구적 수명 보장 · 투자비용 대비 정비효과가 우수함 · 1회 시공으로 50년 수명 보장 · 플라스틱 재료와 표면 코팅처리로 조도계수 약 30% 향상 · 신관수준 이상으로 관 갱생 · 지하수 및 토양오염 방지
안전	· 굴착으로 인한 주변 침하현상 야기 · 굴착시 상수관, 가스관, 통신시설, 기타 부속시설 등 타 매설관의 저촉으로 인한 위험요소 상존 · 작업인원 및 주민의 안전사고 우려 · 부실시공에 따른 신설관의 손상 가능성이 있음	· 주변 침하현상과 무관 · 작업이 맨홀과 하수관거 내부에서만 이루어지므로 타 매설관 저촉 가능성 없음 · 안전을 최우선으로 하는 공법 · 국제규격 수준의 품질관리를 수행함으로써 불량률이 낮고 기존관을 손상시키지 않음

비굴착 기술은 전 세계적으로 약 70~80여 개의 공법이 개발되어 있으며, 이중 현장경화관 라이닝공법(Lining with Cured in-Place Pipes, CIPP) 이란 지하에 매설된 하수관거가 부실시공, 혹은 오랜시간 동안 부하된 응력 하중에 의해 균열, 단락, 단차, 누수, 벽체유실, 함몰, 이음부 이완, 연결부 파손, 연결관 돌출/이완, 맨홀부파손 등의 불량요소가 발생하여 구조적인 강도를 유지하지 못하고 파손된 부분을 통한 침투/유입수의 증가로 하수수송 역할을 제대로 수행하지 못할 경우, 최첨단 장비와 특수한 라이닝 재료 등으로 도로의 굴착 없이 단시간 내에 다양한 불량요인들을 보수하고, 신관 이상의 강도와 조도계수, 그리고 약 50년에 상당하는 내구연한의 특징을 유지할 수 있는 하수관거로 재생 시킬 수 있는 신 개념의 하수관거 정비기술을 일컫는다. [17]

2.3 CIPP 공법의 종류

보수·보강 공법은 불량관거의 보수 규모에 따라 전체보수와 부분보수로 세분화 된다. 불량률이 20% 이상으로 오수의 누출이 일어날 뿐 아니라 구조적인 강도의 보강이 요구되는 불량관거는 CIPP공법과 같은 전체보수를 하고, 불량률이 20% 미만의 불량관거는 부분보수를 원칙으로 한다. 여기서 불량률이란 맨홀간 불량개소수와 맨홀간 본관 본수의 비를 말한다.

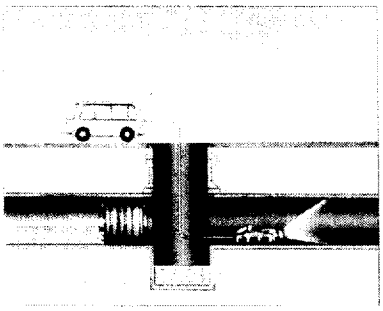
국내에서는 CIPP 공법을 반전방식과 경화방식에 따라 다음과 같이 구분하고 있다. [1]

1) 수압반전/온수열경화 방식 : 반전가대와 수두를 이용하여 수압으로 라이너를 반전 삽입한 후 보일러를 가동하여 온수를 순환시켜 열경화 시키는 방법
2) 견인삽입/증기열경화 방식 : 라이너를 윈치(winch)로 견인하여 관로에 투입하고 공기압으로 팽창시킨 다음 증기열을 이용하여 열경화 시키는 방법
3) 공기압반전/증기열경화 방식 : 공기압을 이용하여 라이너를 반전 삽입한 후 증기열을 이용하여 열경화 시키는 방법
4) 공기압반전/온수샤워링 방식 : 공기압을 이용하여 라이너를 반전 삽입한 후 온수를 노즐로 분사시켜서 열경화 시키는 방법

2.4 CIPP 공법의 공정

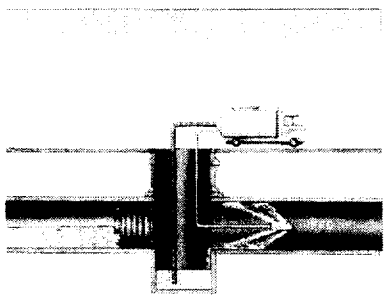
그림 2.1 에는 CIPP공법을 이용한 보수시공 공정을 나타내었으며, 보수공정은 조사, 세정, 반전, 경화, 천공, 검사단계의 과정을 거쳐 이루어진다.

① 조사단계



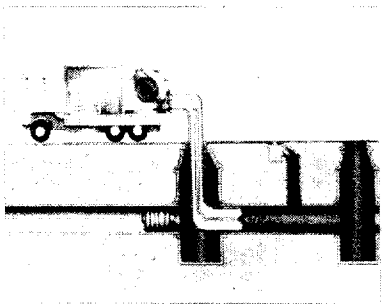
* CCTV를 이용해 관 내부를 조사

② 세정단계



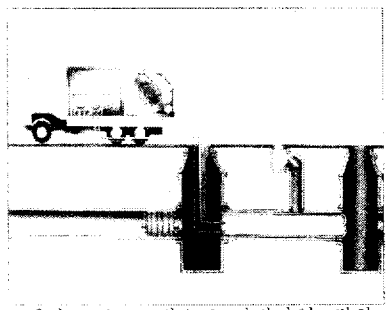
* JET Cleaning 공법으로 관 내부를 세정

③ 반전단계



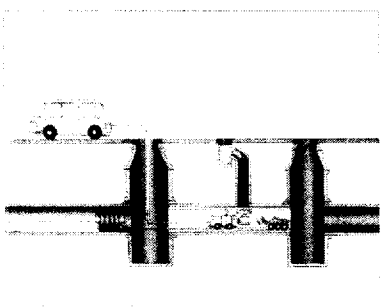
* 반전방식으로 라이너를 관내로 삽입

④ 경화단계



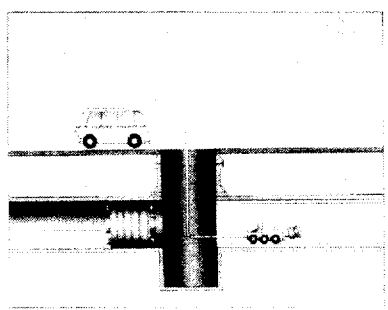
* 온수 또는 스팀으로 직접가열, 경화

⑤ 천공단계



* 로봇을 이용해 필요한 곳 천공

⑥ 검사단계



* KS, ASTM 규정에 따른 완벽한 품질검사

그림 2.1 CIPP공법을 이용한 보수시공 공정

(1) 조사단계

작업공간을 확보한 후, CCTV 카메라를 투입하여 관내의 상황을 조사한다.

(2) 세정단계

진공흡입 준설차량을 이용하여 Jet Cleaning 공법으로 관 내부를 세정한 후 슬러지를 세정수와 함께 진공흡입 처리한다. 관내에 돌출되어 있는 가지관이나 기타 이물질들을 Cutter 장비를 이용하여 제거한 후 세정한다.

(3) 반전 준비단계

가. 라이너 재단 및 절단

① 폴리에스터 봉재사를 이용하여 라이너의 이음부 봉합을 연속적으로 실시하며, 필름과 동일한 수지를 이용하여 봉합부를 코팅하여 마감 처리한다.

② 재봉 및 접합작업을 거친 라이너를 보수대상 하수관로의 관경과 길이에 맞게 절단한다.

나. 수지함침

수지와 첨가제를 적정량 계량하여 혼합한 액상의 혼합수지를 소요길이만큼 절단된 진공상태의 라이너 내부에 주입하여 펠트에 수지가 균일하게 함침되도록 한다.

다. 반전장치내 라이너 장착

수지가 함침된 라이너를 반전장치에 장착하는 과정은 다음과 같다

① 경화호수와 로프를 반전장치 드럼에 감는다.

② 라이너 끝부분에 경화호스와 로프를 고정하여 반전장치 드럼에 라이너를 감는다.

③ 플랜지를 반전장치에 고정 후 라이너 끝부분을 플랜지에 고정시킨다.

라. 라이너 운반

함침이 종료된 라이너는 반전장치나 냉동탑차를 이용하여 운반한다.

① 반전장치에 감아서 운반할 경우 : 경화성 수지의 경화를 방지하기 위하여 반전장치 내부에 질소 가스를 주입하여 내부온도를 -5~5℃로 유지한다.

② 냉동탑차를 이용하여 운반할 경우 : 냉동탑차 내부온도를 0~5℃로 유지하면서 운반한다.

(4) 반전단계

가. 공기압축기 가동 및 반전장치 가압

발전기를 이용하여 공기압축기를 가동시킨 후 압축공기 또는 물을 반전장치 내부에 주입하여, 라이너의 반전에 필요한 적정 압력을 확보한다.

나. 라이너 반전

① 반전장치 내부의 압력이 적정 반전압력에 도달하면 수지가 함침된 라이너의 반전이 시작된다.

② 도달 맨홀 내 보수관 입구까지의 길이만큼 반전되면 반전을 중지하고 라이너 내부의 공기 또는 물을 배제한 다음 맨홀 내 보수관 입구에 설치된 가이드롤러를 거쳐 보수관 내부에 라이너를 삽입한다.

③ 라이너를 보수관 내부로 삽입한 후 다시 공기압 또는 수압을 가하여 관내부에서 라이너를 도달 맨홀까지 반전시킨다.

(5) 경화단계

가. 보일러 가동 및 반전수 순환

라이너의 반전이 완료된 후 보일러를 가동, 순환펌프를 이용하여 반전수를 순환시키면서 가온을 시작한다.

나. 라이너의 경화

① 온수온도가 60~65℃정도에 도달하면 잠시 보일러 가동을 멈추고 일정시간 동안 온수의 온도를 60~65℃로 유지한다.

② 일정시간 경화 후 보일러를 재가동하여 온수 온도가 80~85℃에 도달하면 보일러가 자동으로 소화되며, 이후 보일러의 소화/점화가 반복되어 온수는 온도가 80~85℃로 지속적으로 유지되면서 온수순환펌프에 의해 라이너 내부로 순환된다.

③ 80~85℃에서 일정시간 동안 온수 순환펌프로 온수를 지속적으로 순환시킨 후 보일러의 가동은 종료되며, 이후에는 온수에 냉각수를 혼합하여 순환시킴으로써 30~40℃까지 서서히 온수를 냉각시킨 후 경화상태를 점검한다.

(6) 마무리 단계

가. 라이너 내부 물 제거

라이너 내부 온도가 30~40℃가 되면 에어커터로 경화된 라이너의 일부분을 잘라내어 물을 완전히 제거한다.

나. 라이너 절단 및 그라인딩

물을 제거한 후 에어커터로 경화된 라이너를 절단한 다음 에어 그라인더를 이용하여 절단된 부위를 그라인딩 한다.

다. 마무리

그라인딩 후 백색 시멘트를 이용하여 마무리한다.

(7) 천공단계

가지관이 있는 경우, 로봇을 이용하여 필요한 관경크기로 천공한다.

(8) 검사단계

KS, ASTM 규정을 만족시키는 품질 기준에 따라서 완벽한 품질검사를 실시한다.

그림 2.2 반전장치로부터 수압 반전중인 모습

제 3 장 신관과 라이닝관의 정적시험

3.1 라이너의 휨강도 및 탄성계수시험

3.1.1 시험편

표 3.1 에는 휨강도 및 탄성계수 시험을 위한 시험편의 규격 및 수량을 나타내었고, 그림 3.1 은 탄성계수시험에 쓰인 시험편이다.

표 3.1 휨강도 및 탄성계수 시험을 위한 시험편 규격 및 수량

구 분	폭(mm)	길이(mm)	두께(mm)	수량(개)
1 차 시험편	19.13	180	12.25	1
	19.41	180	11.95	1
	19.69	180	11.58	1
	19.18	180	11.24	1
	18.30	180	10.98	1
2 차 시험편	15.0	100	5.0	1
	15.0	100	5.0	1
	15.0	100	5.0	1
	15.0	100	5.0	1
	15.0	100	5.0	1

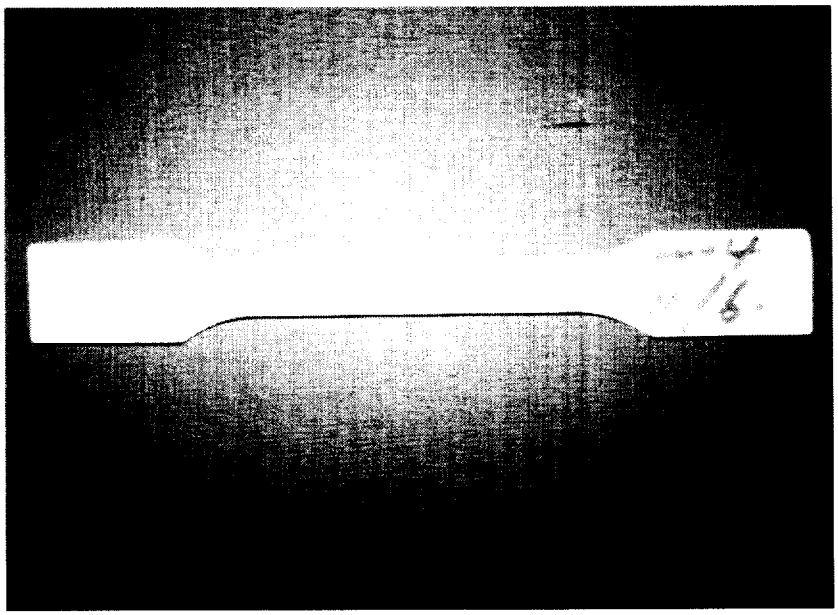


그림 3.1 탄성계수 시험에 쓰인 시험체

3.1.2 시험결과

표 3.2 는 측정에 이용된 장비를 나타내었으며, 표 3.3 에 평판몰드 제작으로 만든 시험편에 대한 휨강도 및 탄성계수 측정결과를 나타내었다. KS M 3008 또는 KS M ISO 178에 의한 시편 제작방법에 의하여 제작된 시편 총 10개를 표 3.2 에 제시한 측정 장비를 이용하여 휨강도를 시험하였으며, 그 평균치는 50.3MPa의 값을 나타내었다. 이 결과값은 "비굴착공법에 의한 하수관정비 품질관리 지침서"에서 제시한 최소값 32.0MPa를 상회하는 값이다. [11]

탄성계수의 10개 시편에 대한 평균값은 3,130MPa를 나타내었으며, 이 결과값 또한 지침서에서 제시한 1,760MPa를 매우 상회하는 값이다.

표 3.2 시험편의 휨강도 및 탄성계수 측정장비

장비명	제조사(제조국)	제품명	용량	정밀도
만능재료시험기 (UTM)	SHIMADZU (일본)	AG-10TG	10,000kgf	0.01kgf

표 3.3 시험편에 대한 휨강도 및 탄성계수 측정결과

구분	시료개수	휨강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	비고 (최소값)
1차 시험편	평균(5개)	49.2	3,120	· 휨강도 32.0 MPa · 탄성계수 1,760 MPa
2차 시험편	평균(5개)	51.3	3,140	
평균		50.3	3,130	

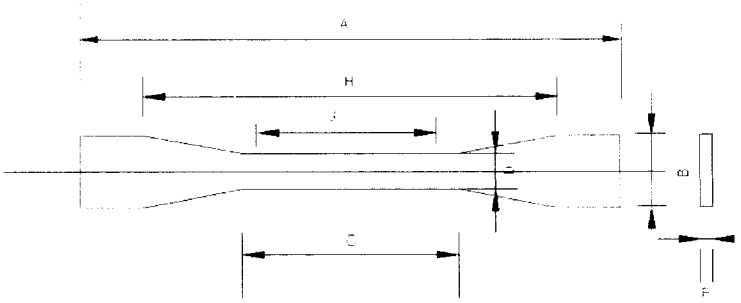
3.2 라이너의 인장강도시험

3.2.1 시험편

시험편은 KS M 3006에 제시된 방법에 따라 제작하였고 시험체 규격과 형상을 각각 표 3.4 와 그림 3.2 에 나타내었다.

표 3.4 인장강도 시험체의 규격

시험대상(시험체구성)	규격(mm)	수량(개)
1차 시험편	1호형 시험편 규격	5
2차 시험편		5



단위:mm

A : 전체길이	150	E : 어깨둥글기의 반지름(최소)	60
B : 양끝나비	20±0.5	F : 두께	1~10
C : 평행부분의 길이	60±0.5	G : 눈금간의 거리	50±0.5
D : 평행부분의 나비	10±0.5	H : 그림간의 거리	115±5

그림 3.2 KS M 3006에 제시된 1호형 시험편

3.2.2 시험결과

표 3.5 는 KS M 3006에 의한 시험편의 인장강도 시험결과를 나타내었다. 5개의 시편에 대한 시험결과 인장강도 평균값은 약 27.9 MPa의 값을 나타내었다. 이 결과는 21.0 MPa의 최소값을 제시한 "비굴착공법에 의한 하수관정비 품질관리지침서"의 값을 상회하는 수치이다. [11]

표 3.5 시험편에 대한 인장강도 측정결과

항목	시료개수	인장강도(MPa)	비고(최소값)
1차 시험편의 인장강도	평균 (5개)	29.5	21.0 MPa
2차 시험편의 인장강도	평균 (5개)	26.2	
평균		27.9	

3.3 신관과 라이닝관의 파괴하중시험

3.3.1 시험편

파괴 하중시험에 사용된 라이닝관은 길이 2.5m의 원심력 철근콘크리트관(B형 2종)으로 먼저 원심력철근콘크리트관(신관) 만의 파괴하중시험을 한 후, 초기균열을 발생시킨 원심력철근콘크리트관에 CIPP로 보강한 라이닝관의 파괴하중시험을 수행하여 비교하였다.

표 3.6 은 파괴하중시험을 위한 규격 및 수량을, 그림 3.3 은 파괴하중시험을 하고 있는 장면을 나타내었다.

표 3.6 파괴하중시험을 위한 규격 및 수량

관종	내경(mm)	보강라이너 두께(mm)	길이(m)	수량(개)
원심력철근콘크리트관 (B형2종) -신 관-	400	-	2.5	1
	600	-		1
	1,000	-		1
라이닝관 (콘크리트관<B형2종> +CIPP)	400	6		1
	600	7.5		1
	1,000	12		1

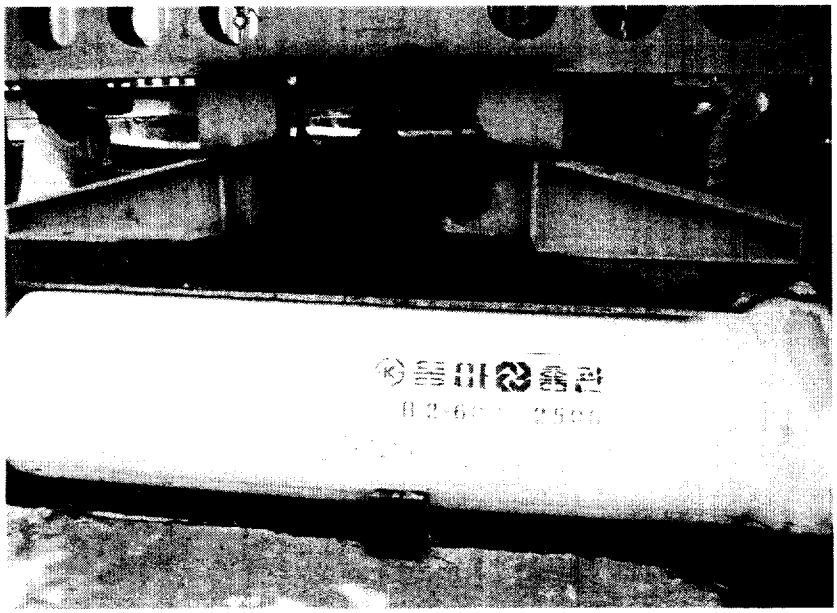


그림 3.3 파괴하중 시험장면

3.3.2 시험결과

KS F 4403에 규정되어 있는 관종별 외압강도는 D400mm, D600mm, D1,000mm 의 경우 균열하중이 각각 21.6, 29.5, 41.3kN/m, 파괴하중은 각각 32.4, 44.2, 61.9 kN/m 이며, 시험에 이용된 원심력 철근콘크리트관(B형2종)의 경우, 표 3.7 와 같이 규정값을 모두 만족하였다.

외압강도 시험결과, 균열하중시험을 행한 신관을 라이닝 처리한 경우의 파괴하중은 D400mm, D600mm, D1000mm 에 대해 각각 39.7, 52.4, 75.9kN/m로 나타나 신관과 비교시 각각 9.4, 11.5, 13.9%의 증가율을 나타내었다.

그림 3.4와 그림 3.5 그리고 표 3.7은 신관 및 라이닝관에 대한 관경별 균열하중 및 파괴하중 시험결과를 나타내었다.

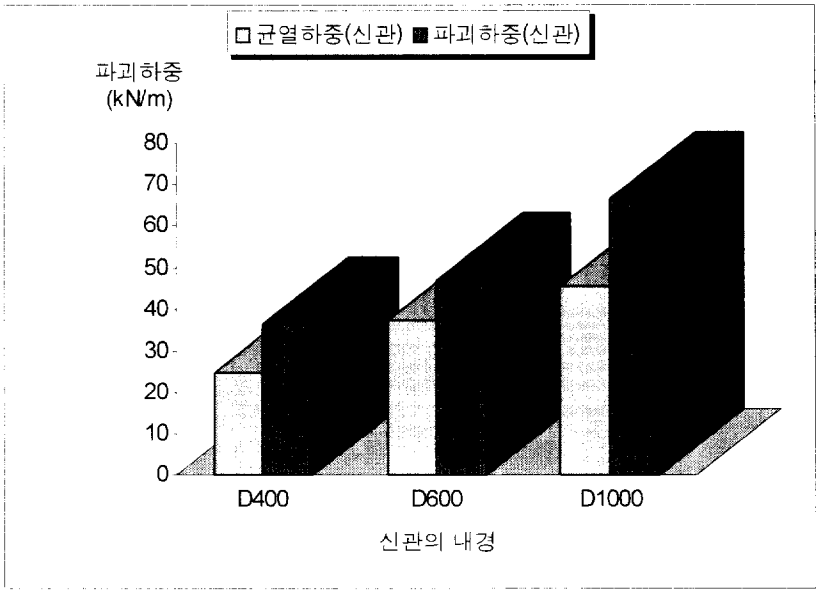


그림 3.4 신관에 대한 관경별 균열하중 및 파괴하중

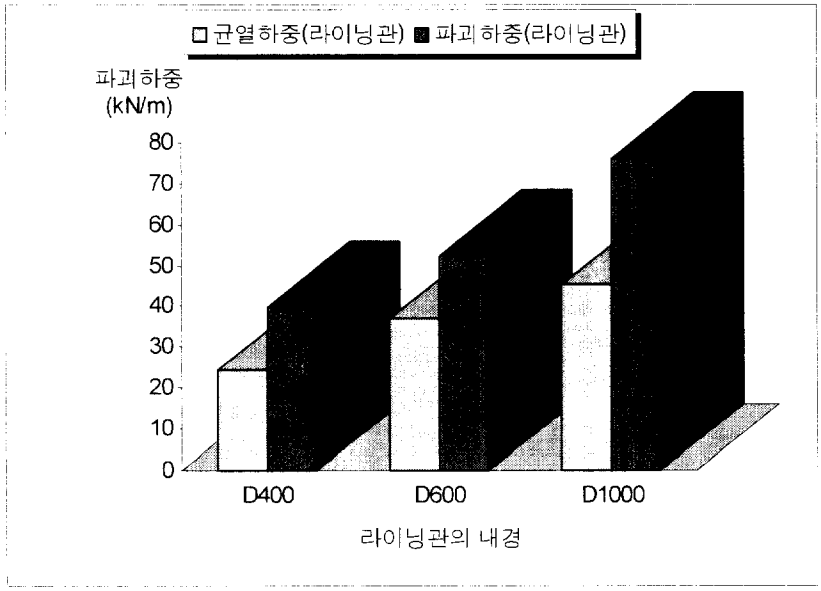


그림 3.5 라이닝관에 대한 관경별 균열하중 및 파괴하중

표 3.7 관경별 평균 파괴하중 측정결과 (단위 kN/m)

관경 (mm)	신관		라이닝관		파괴하중 증가율(%)
	균열하중	파괴하중	균열하중	파괴하중	
D400	24.5	36.3	24.5	39.7	9.4
D600	37.2	47.0	37.2	52.4	11.5
D1,000	45.4	66.7	45.4	75.9	13.9

제 4 장 신관과 라이닝관의 피로시험

4.1 신관, 라이닝관 및 피로시험장치

4.1.1 신관

신관으로서 D건설산업에서 제작된 하수관거용 콘크리트 흄관(보통관, B형-600, 관 내경: 600mm, 관두께: 50mm, 유효길이: 2500mm)을 사용하였다. 신관 1본은 정적 성능을 파악하기 위하여 사용하였으며, 피로시험용으로 3본을 사용하였다.

4.1.2 라이닝관

D건설산업의 하수도관 성능 시험장에서 신관 거치 후 하중을 가하여 초기균열을 발생시킨 관에 대하여(그림 4.1 및 그림 4.2), K주식회사에서 개발한 방법에 의하여 보수 처리하여 라이닝관을 제작하였다(그림 4.3~그림 4.5). 본 연구에서는 이 라이닝관 2본에 대하여 피로시험을 실시하였다

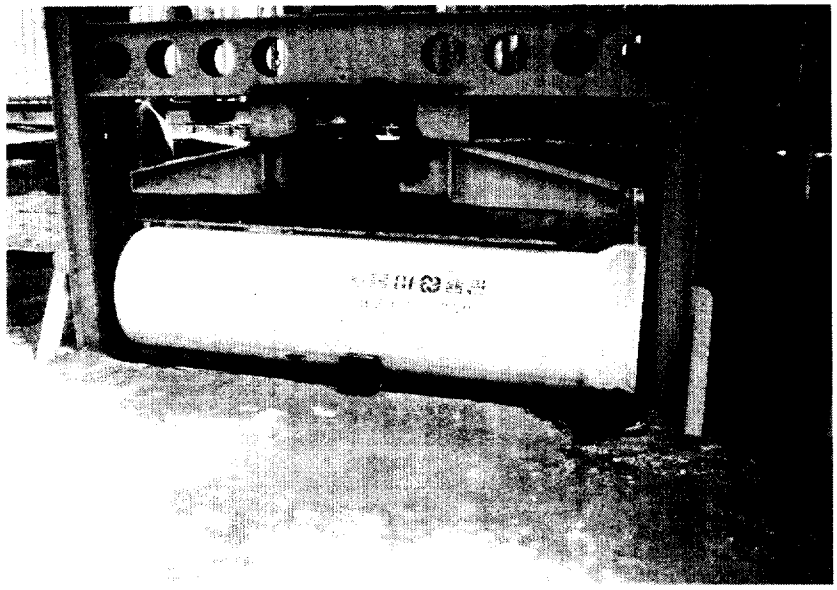


그림 4.1 신관에 초기균열을 발생시키기 위한 거치상황

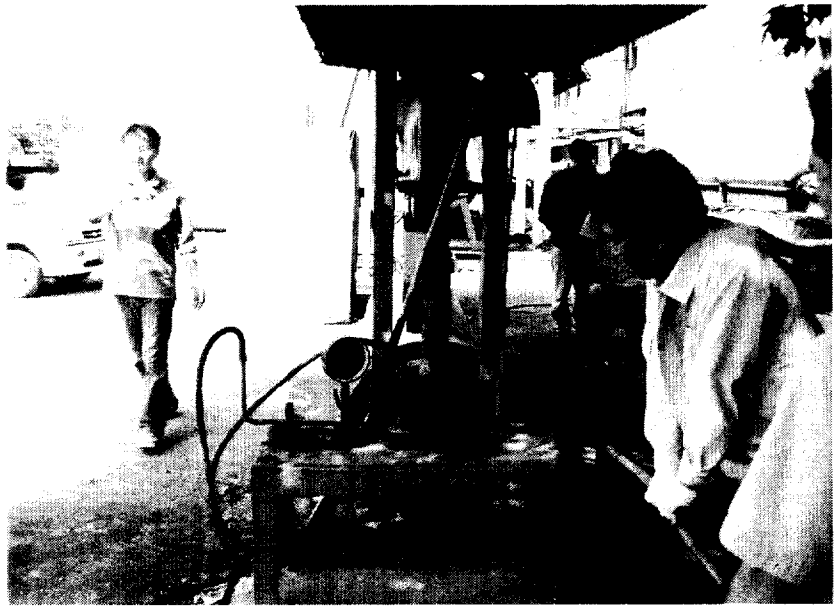


그림 4.2 초기균열을 발생시키기 위한 가력중 상황

그림 4.3 초기균열 발생 후 라이닝 보수 대기중 상황

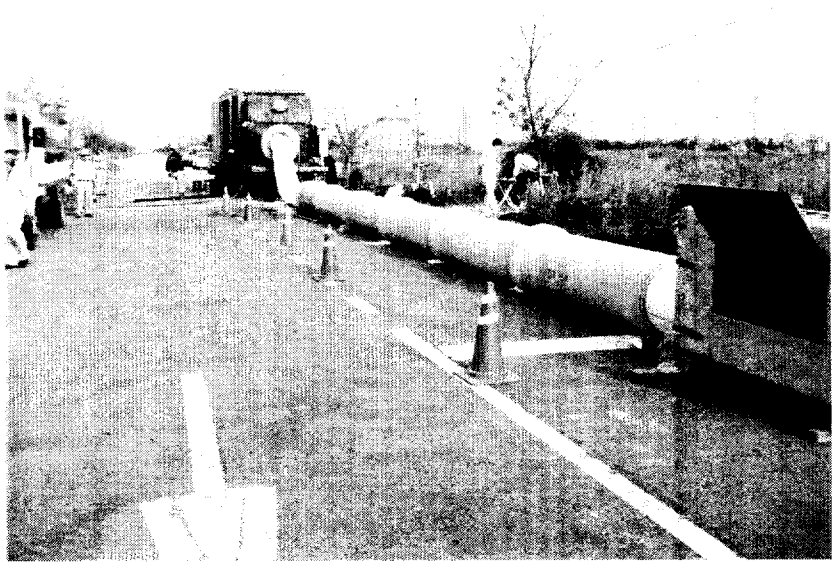


그림 4.4 초기균열 발생된 관에 대하여 관 내부의
라이닝으로 보수 처리하는 과정

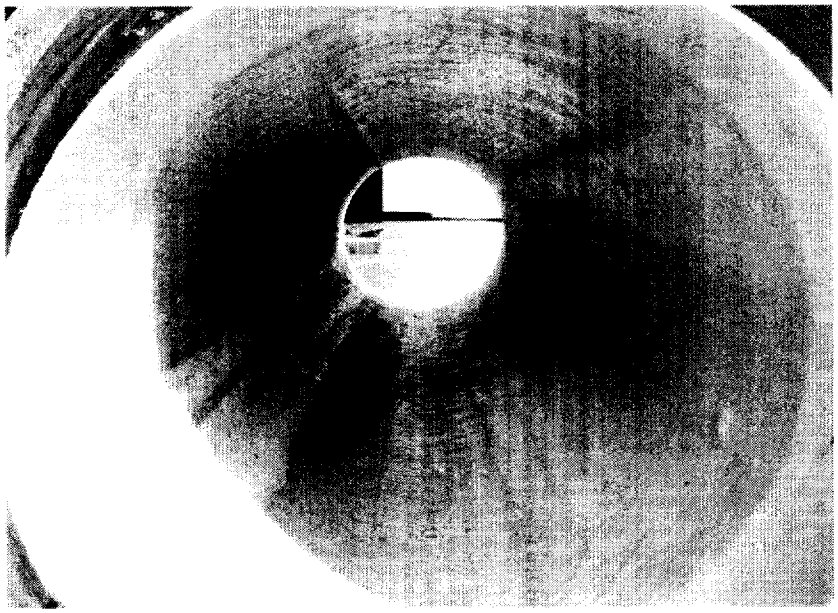


그림 4.5 보수 처리된 라이닝관의 내부 모습

4.1.3 피로시험장치

MTS사의 250kN Actuator를 철골 프레임에 연결시켜, 본 연구에 필요한 정적 및 피로시험을 실시하였다.

시험장치 전경은 그림 4.6~그림 4.8과 같다. KS F 4403의 시험방법에 따라 하수도관의 상·하부에 두께 20mm인 고무판과 150×150mm인 각재를 대었으며, 이들을 자체 제작한 지그에 부착하여 정적 및 피로시험을 실시하였다.

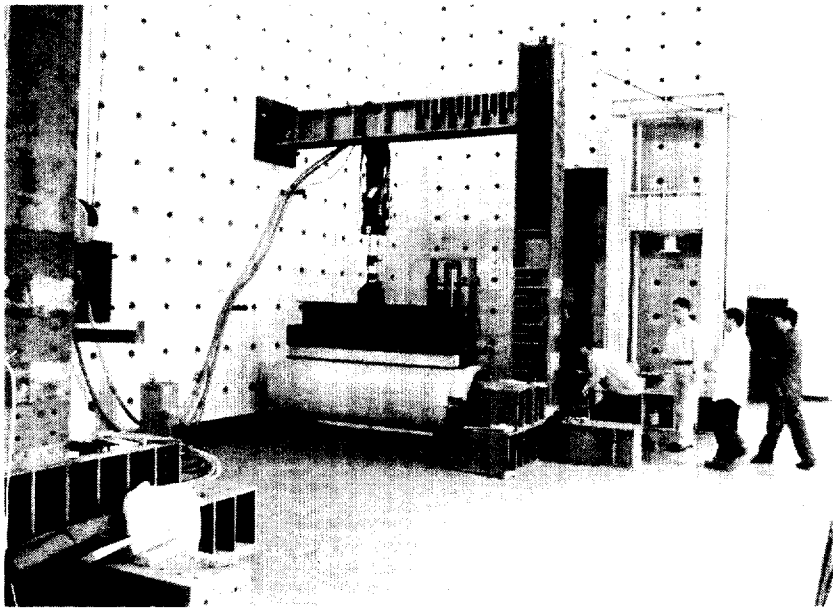


그림 4.6 시험장치 전경 (1)

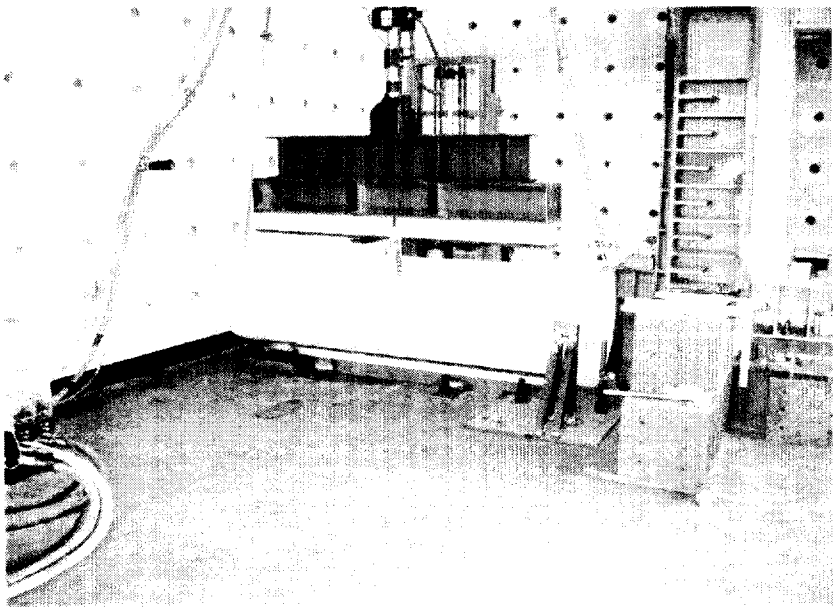


그림 4.7 시험장치 전경 (2)

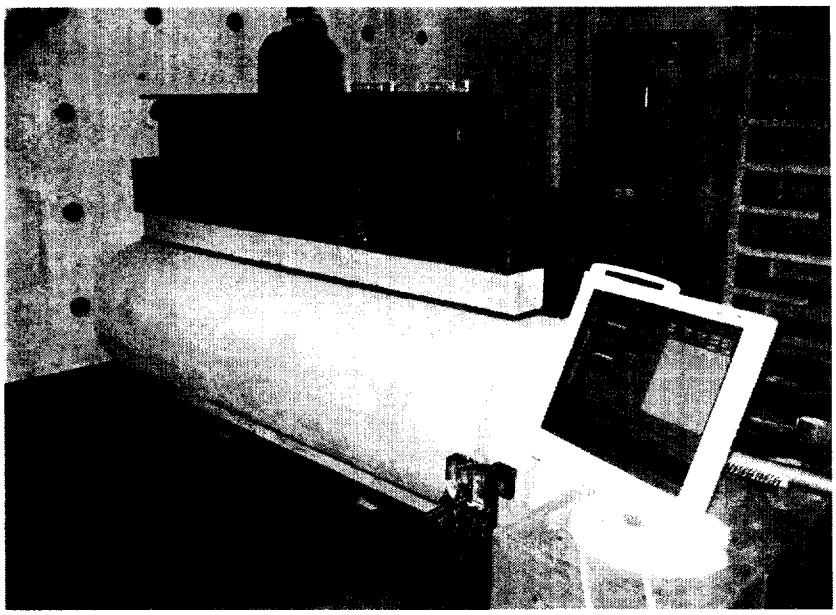


그림 4.8 시험장치 및 계측 모니터

4.2 신관의 정적시험

신관의 정적 성능을 파악하고 또한 피로시험에 필요한 자료를 얻기 위하여 신관 1본에 대하여 파괴하중에 도달할 때까지 3mm/min 속도의 변위제어로 정적시험을 실시하였다. 시험결과 하중-처짐 곡선은 그림 4.9와 같고, 최대하중으로서 156.9kN을 얻었다.

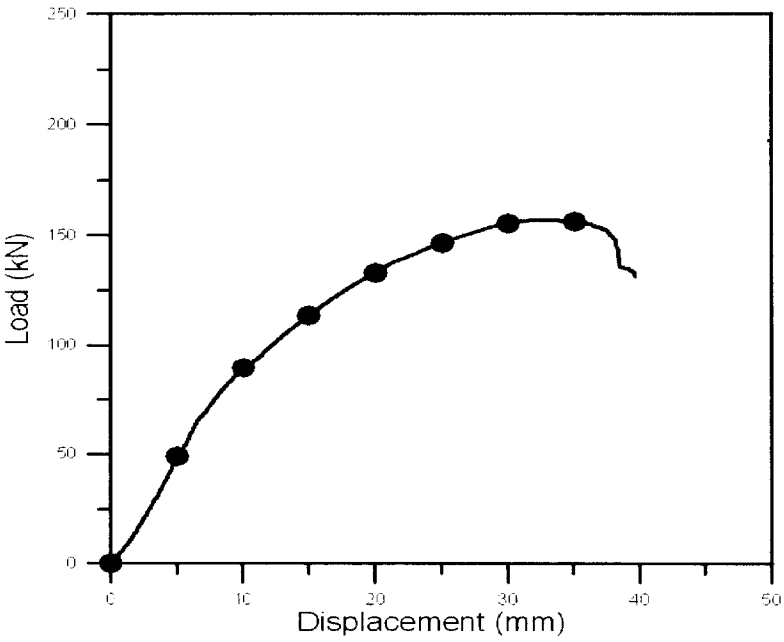


그림 4.9 신관의 정적시험으로부터 얻어진 하중-처짐 곡선

4.3 신관의 피로시험

신관에 대하여 신관 정적시험에서 얻어진 하중 처짐 곡선의 변곡점에 해당하는 하중의 50%인 40kN을 최대하중으로 하고, 이 값의 10%인 4kN을 최소하중으로 하여 3Hz의 속도로 1,000,000번 반복가력한 후 정적시험을 행하여 최대하중 163kN을 얻었다. (그림 4.10~그림 4.13).

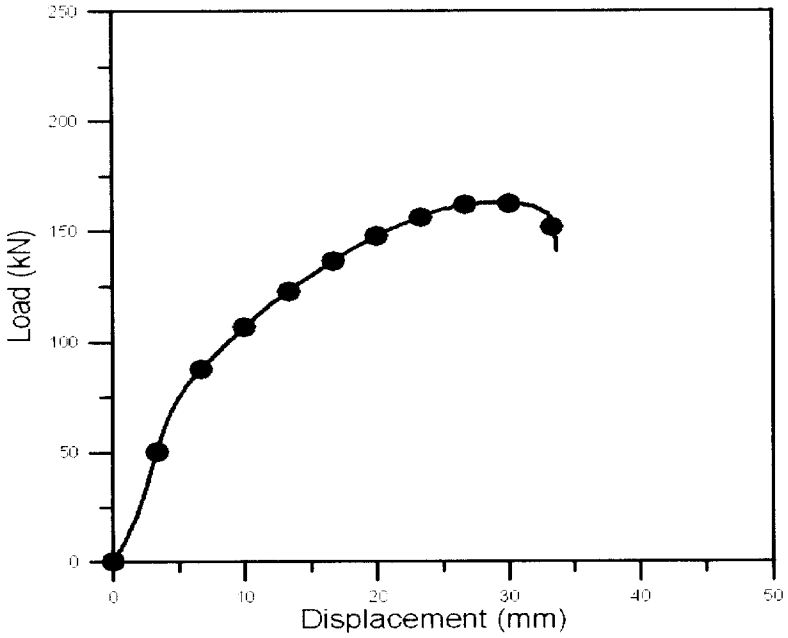


그림 4.10 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 정적하중 재하에 따른 신관의 하중 처짐 곡선

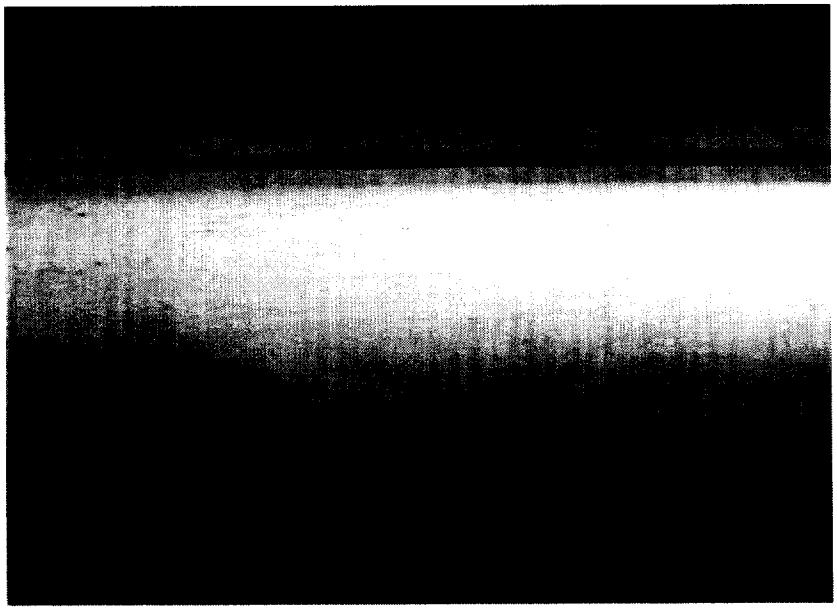


그림 4.11 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관의 파괴 형상

그림 4.12 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관의 내부 하단 균열

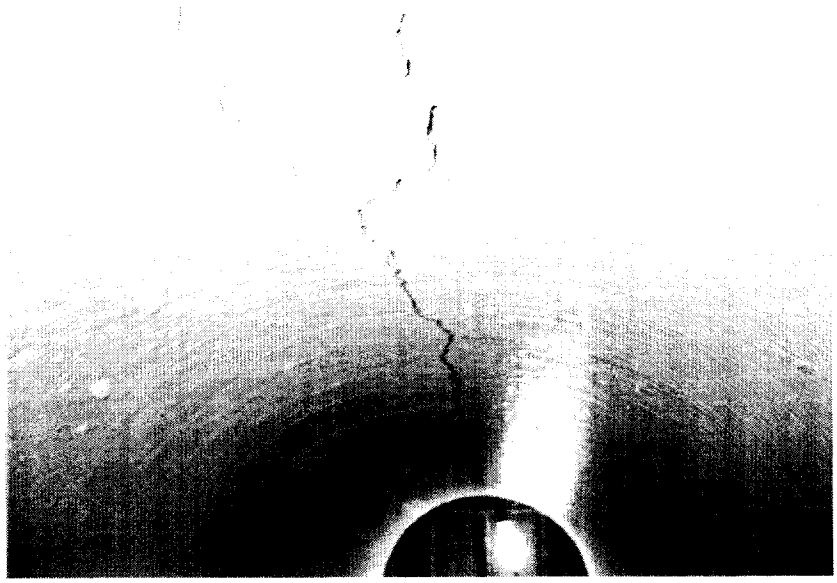


그림 4.13 피로하중(Pmax=40kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관의 내부 상단 균열

그러나 상기의 피로하중 가력동안 관 내부의 표면에만 미세한 균열이 생겼으며, 그 외에는 균열을 발견하지 못하여 피로하중으로서 크기가 부적절하다고 판단되었다.

이에 따라 일반적인 토목 구조물의 피로한계인 최대하중의 50%에 해당되는 80kN을 최대하중으로 하여(최소하중: 8kN) 피로하중을 가력하였으나 피로하중 반복횟수 20,000번 부근에서 관의 파괴가 생겼다(그림 4.14 및 그림 4.15).

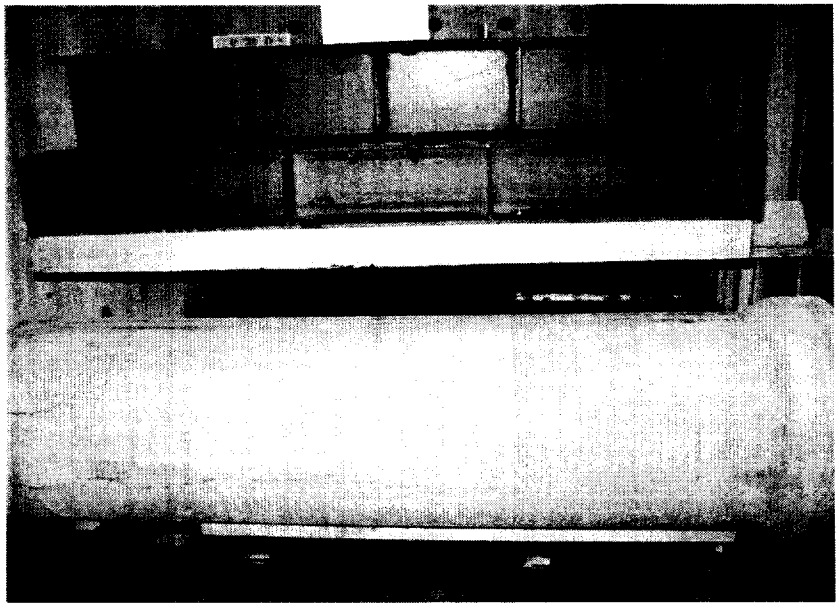


그림 4.14 피로하중(Pmax=80kN)을 받은 신관의 파괴 형상

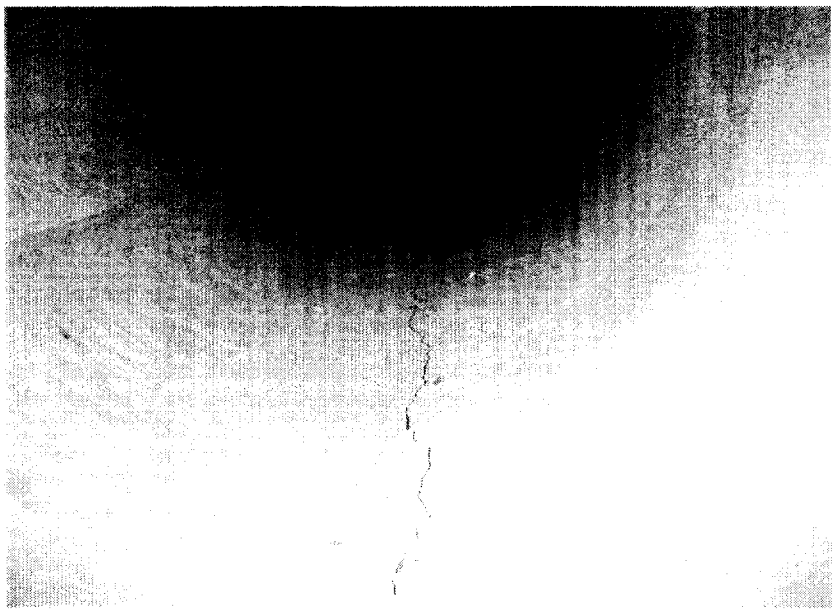


그림 4.15 피로하중(Pmax=80kN)을 받은 신관의 내부 균열

따라서 피로하중으로서 80kN은 과대하다고 판단되어 최대값으로 50kN (최소하중: 5kN)을 택하고 1,000,000번 반복 가력 하였다. 피로하중 가력동안 관의 내부와 외부에 균열이 일부 발생되어 작용된 피로하중은 적정하다고 판단되었으며, 피로시험 종료 후 정적시험을 통하여 최대하중 149kN을 얻었다(그림 4.16, 그림 4.17, 그림 4.22).

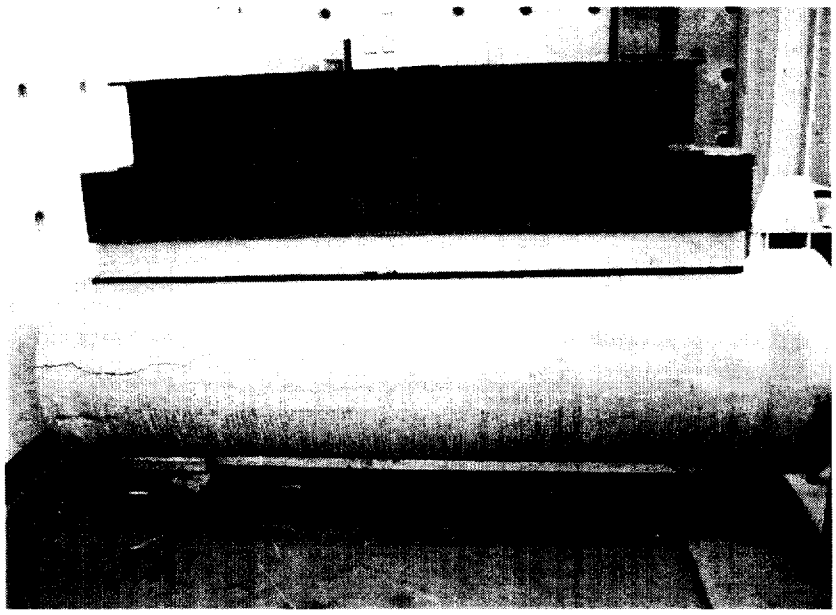


그림 4.16 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관-1의 파괴 형상

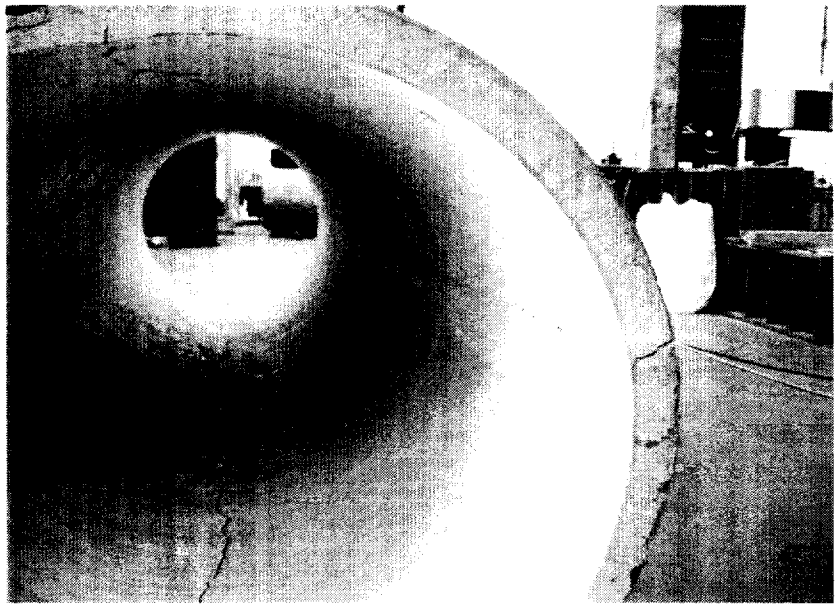


그림 4.17 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관-1의 상하, 측면균열 형상

이후 2번째의 신관에 대하여 피로하중 최대값으로 50kN(최소하중: 5kN)을 사용하여 1,000,000회 반복하중을 가한 후, 정적시험을 통하여 최대하중 164kN을 얻었다(그림 4.18 및 그림 4.19, 그림 4.22). 그러나 피로하중 가력동안 첫번째의 신관과는 달리 관의 내부와 외부에 균열을 발견할 수 없어서 추가 시험의 필요성을 갖게 하였다.

3번째의 신관에 대하여 피로하중 최대값으로 50kN(최소하중: 5kN)을 사용하여 1,000,000회 반복하중을 가한 후, 정적시험을 통하여 최대하중166kN을 얻었다(그림 4.20, 그림 4.21, 그림 4.22). 이 경우에는 피로하중 가력동안 관의 내부와 외부에 균열이 일부 발생하였다. 2번째 신관의 경우와 3번째 신관의 경우에 피로하중 가력동안 관의 내부와 외부에 균열발생 유무의 차이는 있었으나, 피로하중 가력 후 정적시험으로부터 얻어진 최대하중의 크기는 서로 유사함을 보여, 신관의 경우는 신관 3본에서 얻어진 값들을 평균하여 라이닝관과의 피로성능분석에 사용하기로 하였다.

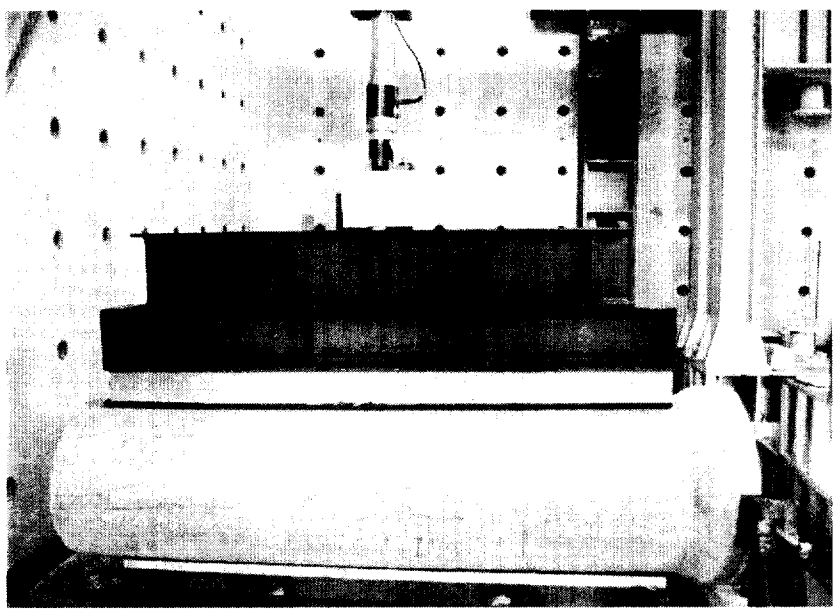


그림 4.18 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관 2의 파괴 형상 (1)

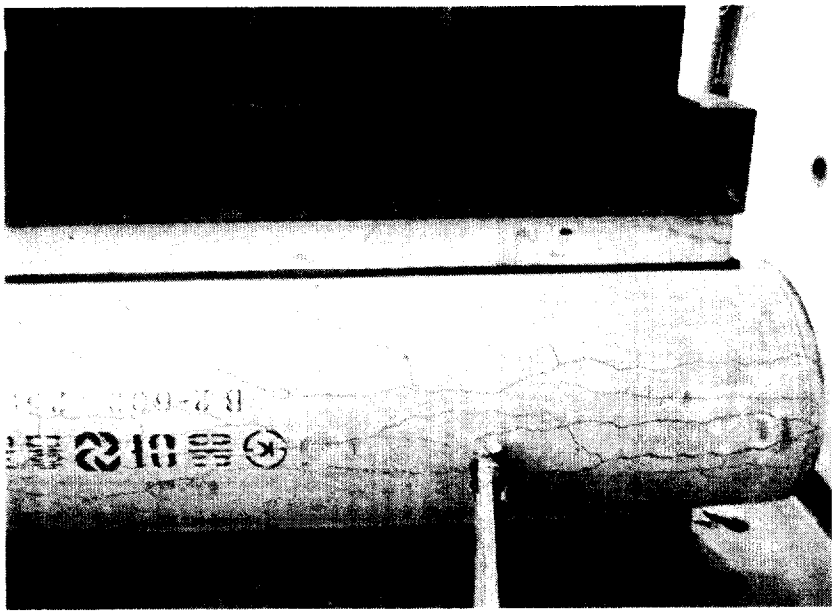


그림 4.19 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관-2의 파괴 형상 (2)

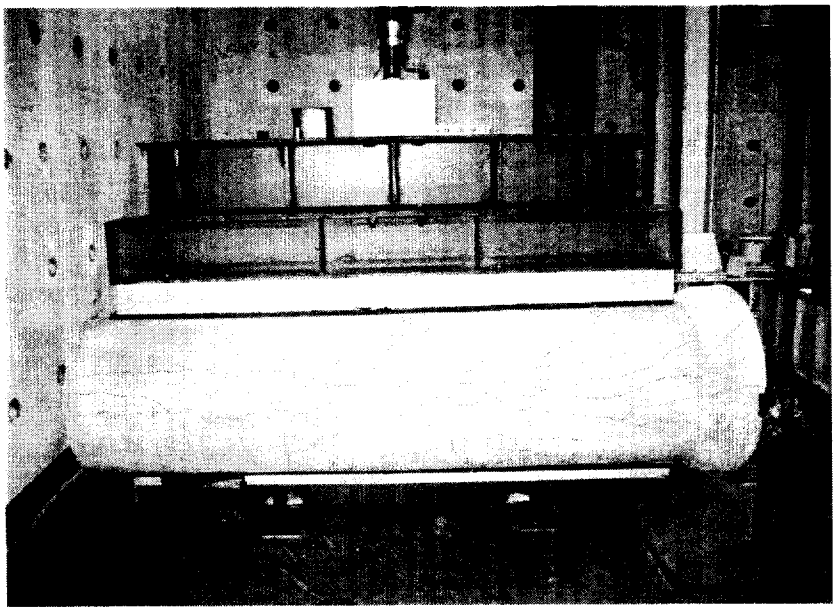


그림 4.20 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관-3의 파괴 형상

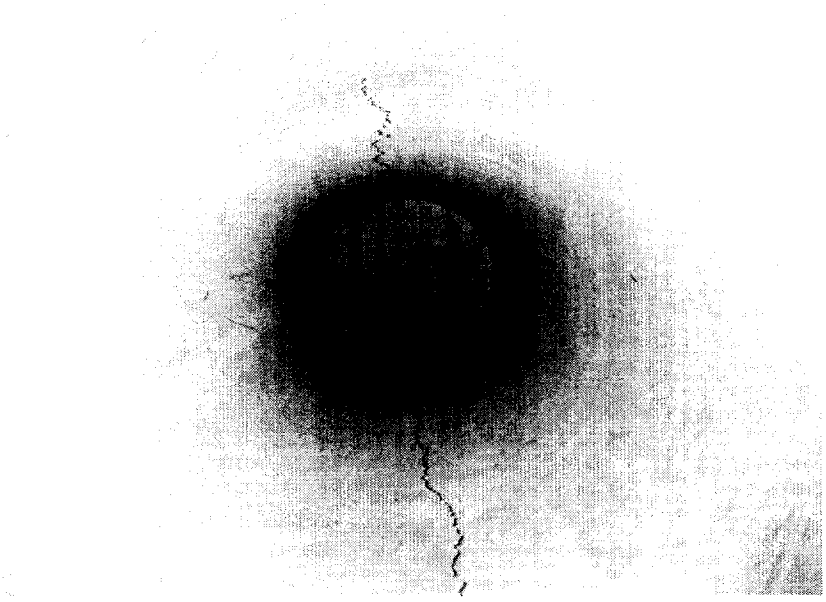


그림 4.21 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 신관-3의 내부 균열 형상

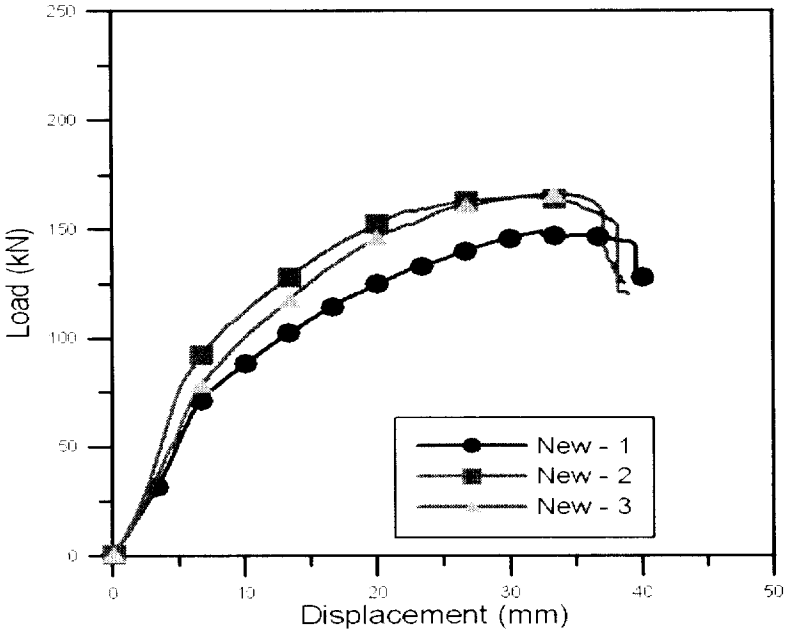


그림 4.22 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 정적하중 재하에 따른 신관의 하중-처짐 곡선

4.4 라이닝관의 피로시험

라이닝 관 2본에 대하여 신관과의 비교를 위하여 신관의 피로시험에 사용했던 것과 동일한 피로하중(최대하중: 50kN, 최소하중: 5kN)을 1,000,000번 반복가력한 후, 정적시험을 행하여 최대하중 201kN, 176kN을 얻었다.(그림 4.23 ~ 그림 4.26)

피로하중 가력동안 관 외부에 추가균열을 발견하지 못하였으며, 콘크리트관과 라이닝 부분 사이에 박리도 없었다. 또한 정적시험 후 관 내부를 관찰한 결과, 라이닝부분에 균열이 없었고 콘크리트관과 라이닝 부분 사이에 박리도 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

그림 4.23 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 라이닝관 1의 파괴 형상

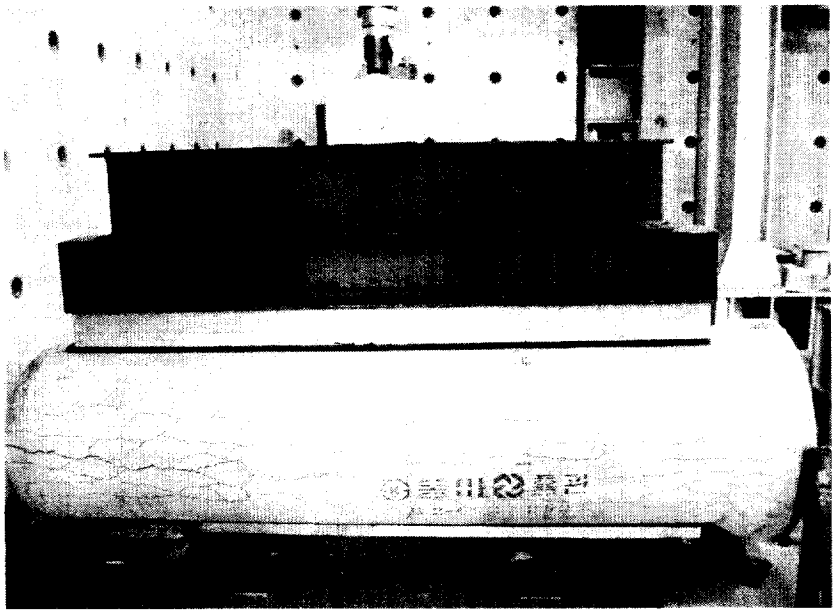


그림 4.24 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 라이닝관 2의 파괴 형상

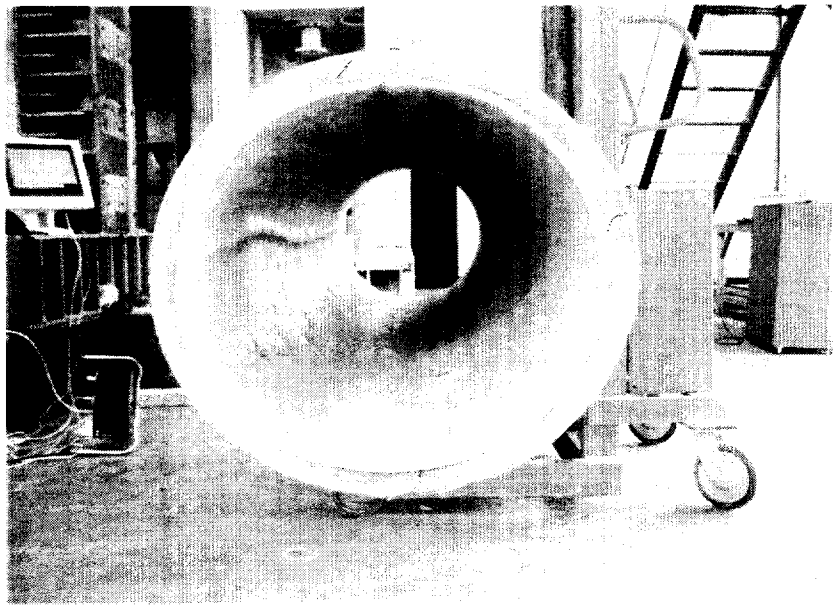


그림 4.25 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 최대하중을 받은 라이닝관 2의 관 내부 및 측면 균열 형상

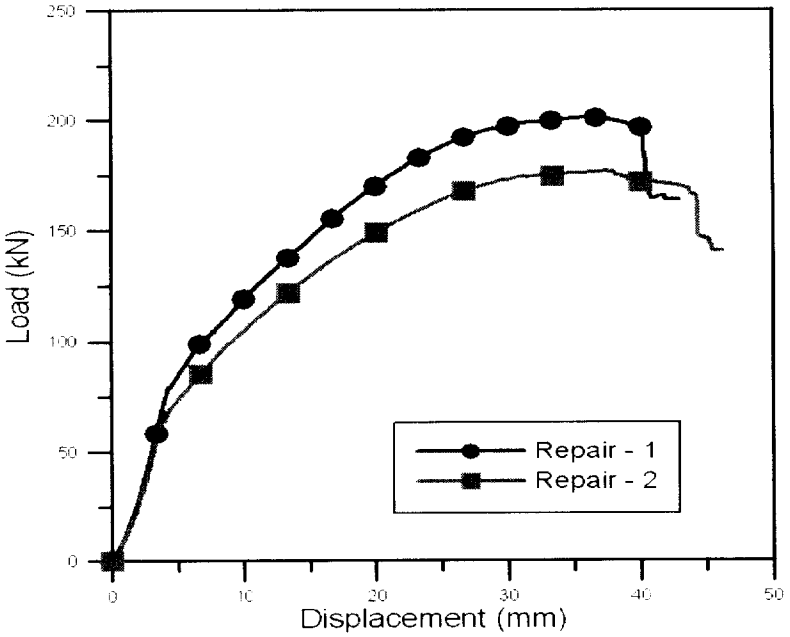


그림 4.26 피로하중(Pmax=50kN) 가력 후 정적하중 재하에 따른 라이닝관의 하중-처짐 곡선

4.5 피로시험 결과 및 분석

신관 3본과 라이닝관 2본에 대하여 각각 1,000,000회의 반복하중을 가하는 피로시험을 행하고 또한 정적시험을 통하여 얻어진 결과를 분석하면 아래와 같다.

1) 신관과 라이닝관에 대하여 피로시험과 정적시험을 종료한 후의 관의 파괴된 모습을 비교하여 보면(그림 4.16, 그림 4.18~그림 4.20, 그림 4.23, 그림 4.24), 신관의 경우는 적은 수의 굵은 균열들을 보이는 반면에 라이닝관의 경우는 상대적으로 많은 수의 가는 균열들이 산재되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 라이닝관의 경우에 라이닝에

의한 보강 효과에 기인한 것으로, 관 전체의 강성이 증가되었음을 나타낸다.

2) 앞의 그림 4.22 및 그림 4.26에 신관 및 라이닝관에 대하여 1,000,000회 피로하중 가력 후 정적시험에서 얻어진 하중-처짐 곡선을 비교하여 나타내었다. 그리고 표 4.1에 각각의 하중-처짐 곡선에서 얻어진 최대하중과 최대처짐을 정리하여 나타내었다.

이 표에서 알 수 있듯이 신관의 피로시험 후 정적시험으로부터 얻어진 최대하중의 평균치는 158.6kN이며, 라이닝관의 경우는 188.8kN으로서 라이닝관이 신관에 비하여 19%의 최대하중 증가를 보였다.

최대하중 값들의 평균치를 파괴하중(최대하중을 관의 유효길이 2.5m로 나눈 값)으로 나타내면 신관과 라이닝관의 경우에 각각 63.4kN/m 와 75.5kN/m가 된다.

또한 최대하중시의 처짐은 신관의 경우에 평균치가 32.14mm이며, 라이닝관의 경우는 36.57mm로서 신관에 비하여 14% 증가하였다. 라이닝관이 신관에 비하여 최대하중과 최대처짐에서 모두 증가를 보인 것은 탄성변형에너지(elastic strain energy)가 증가되었음을 의미하며, 이는 라이닝관이 신관에 비하여 보다 많은 에너지를 흡수할 수 있는 능력이 있음을 나타낸다.

3) 피로하중 가력동안 라이닝관의 외부에 추가균열을 발견하지 못하였으며, 콘크리트관과 라이닝 부분 사이에 박리도 없었다. 또한 정적시험 후 관 내부를 관찰한 결과, 라이닝 부분에 균열이 없었고 콘크리트관과 라이닝 부분 사이에 박리도 발생하지 않았음을 알 수 있었다.

표 4.1 1,000,000회 피로하중 가력 후 정적 시험에서 얻어진 신관과 라이닝관의 시험 결과치 비교

시험체 명	최대 하중 (kN)	평균치 (kN)	최대 하중시 처짐 (mm)	평균치 (mm)
신관 - 1	144.9	158.6	32.36	32.14
신관 - 2	164.7		31.27	
신관 - 3	166.1		32.80	
라이닝관 - 1	200.9	188.8	35.77	36.57
라이닝관 - 2	176.7		37.36	

제 5 장 결 론

본 연구에서는 하수관거의 비굴착 보수공법의 일종인 CIPP 공법에 사용된 콘크리트 관의 정적 및 피로성능 시험결과를 조사하였으며, 비교 분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 정적시험에서 신관에 비해 라이닝관의 파괴하중 증가율은 관경 D400에서는 9.4%, D600에서는 11.5%, D1000에서는 13.9%로서 평균 11.6%의 하중 증가률을 보였다.

2) 신관과 라이닝관에 대하여 피로시험 후 정적시험을 행한 관의 파괴된 모습을 비교한 결과, 신관의 경우는 적은 수의 굵은 균열들을 보이는 반면에 라이닝관의 경우는 상대적으로 많은 수의 가는 균열들이 산재되어 있음을 알 수 있었다. 이러한 현상은 라이닝에 의한 관의 보강 효과에 기인한 것으로 라이닝관의 강성이 증가되었음을 알 수 있다.

3) 신관 3본에 대하여 1,000,000회의 반복하중을 가하는 피로시험을 행한 후 정적시험으로부터 얻어진 최대하중의 평균치는 158.6kN이며, 라이닝관 2본의 경우에는 188.8kN으로 라이닝관이 신관에 비하여 19%의 최대하중 증가를 보였다. 또한 최대하중시의 처짐에 있어서도 라이닝관의 경우가 신관보다 14% 증가하여, 라이닝관의 탄성변형에너지가 신관에 비하여 증가하였다.

4) 신관의 경우에 피로하중 가력동안 관의 내부와 외부에 일부 균열이 발생하여 진전되었으나, 라이닝관의 경우는 피로하중 가력동안 관의 외부에 추가균열을 발견하지 못하였으며, 콘크리트관과 라이닝 부분 사이

에 박리도 발생하지 않았다. 또한 정적시험 후 관 내부를 관찰한 결과, 라이닝 부분에는 균열이 없었고 콘크리트관과 라이닝 부분 사이에 박리도 없음을 알 수 있었다.

5) 위의 내용들을 종합적으로 분석하면, 라이닝관이 신관에 비하여 정적 및 피로성능에 대하여 상대적으로 우수함을 나타내었다.

참고문헌

1) LG 건설(주), 한국라이텍(주), "회전가능한 수압 및 공기압 반전장치와 라이너를 이용한 하수관거 비굴착 전체보수공법", 2004.

2) 이현동 외, "비굴착식 세리믹모르터 라이닝공법의 라이닝 재료개발", 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집, pp. 1168~1175, 2003.

3) 황환국 외, "중점유지관리대상 하수관거의 비굴착 정비를 위한 하수관 단면변형공법 개발", 대한상수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집, pp. 1~4, 2002.

4) 정연규 외, "비가황 고무시이트와 폴리에스터 펠트를 이용한 지수/보강 일체형 하수관거 비굴착 부분보수기술", 대한상수도학회·한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집, pp. 21~25, 2002.

5) 환경부, "하수관거의 현대화를 위한 핵심정비공법 개발 1차년도 연차보고서", 한국건설기술연구원, 2002.

6) 서울시, "서울시 하수관거 조사 및 정비 기본설계 종합보고서", 서울시, 2001.

7) Kramer, S.R and Gray, G.A, "Comparison of Trenchless Versus Open Cut Construction Method for Replacement of a Leaking Water Distribution System", Proceeding of the ASCE National Conference on Environmental and Pipeline Engineering, Kansas City, Missouri, July 23-26, 2000.

8) 정철권, 박규홍, "하수관거 정비의 필요성 및 추진방법" 대한토목학회지, 제 47권 제 11호, pp. 5~55, 1999.

9) 정철권, "하수관거 종합정비사업의 배경과 비굴착공법의 필요성 및 현황", 1999.

10) 한국건설기술연구원, "하수관 정비사업과 비굴착 공법의 활성화를 위한 국제세미나" 1999.

11) 서울시, "비굴착 공법에 의한 하수관정비 품질관리지침서", 1999.

12) 황규대, 민병헌, "하수관거 보수·보강 공법" 대한토목학회논문집, 제 7권 제 11호, pp. 23, 1999.

13) 교통개발연구원, "도로점용공사로 인한 교통지체완화대책연구", 1998.

14) 환경부, "도심하수관 정비기법연구", 1997.

15) 염병대, "하수관의 비굴착 보수·보강공법소개" 대한토목학회지 제 44권 제 8호, pp. 61~71, 1996.

16) Raymond L., "Indirect Costs of Utility Placement and Repair Beneath streets", August 1994.

17) Thompson, J, The Pontential for the reduction of Social Cost using Trenchless Technology 11th International No Dig Copnhagen, 1994.

18) WEF. "Existing Sewer Evaluation & Rehabilitation", WEF Manual of Practice FD-6, ASCE Manual and Report on Engineering Practice No. 62, 1994.

감사의 글

대학원 입학 후 어느덧 2년 반의 시간이 지나 이제 졸업을 하게 되었습니다. 나도 할 수 있을까 반신반의하며 시작한 대학원 과정을 이제 이 논문을 통해 그동안 저에게 많은 가르침과 도움을 아끼지 않으신 모든 분들께 감사의 마음을 표하고자 합니다.

본 논문이 완성되기까지 많은 가르침과 정성을 다하여 지도해 주신 장희석 교수님께 가슴깊이 감사를 드리며 교수님의 마음과 같이 언제나 열심히 최선을 다하는 모습이 되도록 노력하겠으며 항상 건강하시기를 기원 드립니다.

또한, 본 논문을 위해 바쁘신 와중에도 불구하시고 좋은 논문이 될 수 있도록 세심하게 심사해주신 이동욱 교수님과 정두회 교수님께 감사를 드리며, 아울러 그동안 정성을 다하여 가르침을 주신 토목공학과 교수님들께도 이 글을 통해 다시 한번 감사를 드립니다.

학기 중이나 방학기간 중 세미나를 통해 항상 많은 도움을 주셨던 김희성 박사님, 콘크리트관의 피로성능 실험을 위해 언제나 함께 고생한 박현영, 윤형수님, FRP 및 콘크리트 구조연구실의 모든 연구원들과 본 논문 실험을 위하여 많은 협조를 다해주신 한국라이텍(주) 관계자들에게 감사의 뜻을 전합니다.

그리고 지금의 결실이 있기까지 학문연마의 전기를 마련해준 동의과학대학 김대현 교수님께도 가슴깊이 감사의 말씀을 드립니다.

직장생활을 하면서도 열심히 공부할 수 있도록 적극적으로 도와주시고 격려를 아끼지 않으신 부산광역시 건설본부 강창입 부장님과 원철섭 과장님을 비롯한 선후배님, 동료직원 여러분에게도 진심으로 감사의 인사를 전합니다.

마지막으로 주경야독에 전념할 수 있도록 뒷바라지를 마다않고 같이 해준 아내, 그리고 가족 모두와 본 논문을 함께 하고자 합니다.