

碩士學位論文

FRP 긴장재로 외부 보강된  
철근콘크리트 보의 피로거동



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

洪 性 龍

2008年 2月

# FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로거동

指導教授 朴 相 烈

洪 性 龍

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2008年 2月

洪性龍의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2008年 2月

Fatigue Behavior of Externally Strengthened  
Reinforced Concrete Beams with FRP Tendon

Seong-Yong Hong

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for  
the degree of Master of Engineering

2008. 2

This thesis has been examined and approved

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Jung-Man Nam, Prof. of Civil Engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil Engineering

February, 2008

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

목차 .....	i
List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Summary .....	vi
<b>I. 서 론</b> .....	<b>1</b>
1. 연구 배경 및 목적 .....	1
2. 연구 방법 .....	4
<b>II. 철근 콘크리트 보의 피로 해석방법 및 파괴형태</b> .....	<b>5</b>
1. 피로 해석방법 .....	5
1.1. 통계학적 방법 .....	5
1.2. 손상역학적 방법 .....	7
1.3. 파괴역학적 방법 .....	10
2. 피로 파괴형태 .....	12
2.1. 사인장 파괴 .....	12
2.2. 콘크리트 압축파괴 .....	13
2.3. 부착파괴 .....	13
2.4. 인장철근 취성파괴 .....	14
<b>III. 실험 준비</b> .....	<b>15</b>
1. 시험체 제원 .....	15
2. 실험 변수 .....	16

3. 시험체 제작 .....	17
4. 사용 재료 .....	19
4.1. 콘크리트 .....	19
4.2. 철근 .....	20
4.3. FRP와 Steel 긴장재 .....	20
5. 정착과 긴장 .....	22
6. 실험 및 데이터 수집 .....	23
6.1. 재하장치 및 방법 .....	23
6.2. Data 측정방법 .....	24
<b>IV. 실험결과 및 분석</b> .....	<b>26</b>
1. 정적실험 결과 및 분석 .....	26
2. 피로실험 결과 및 분석 .....	28
2.1. 시험체 별 피로실험 결과 분석 .....	29
2.1.1. 무보강 시험체 (RU70 시험체) .....	29
2.1.2. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체(RF70, RF75, RF80, RF85) .....	31
2.1.3. Steel 긴장재로 외부 보강된 시험체(RS70 시험체) .....	43
2.2. 반복 횟수에 대한 균열성장과 파괴형태 .....	46
2.3. 피로강도와 S-N 선도 .....	50
2.4. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 확률해석 .....	54
2.4.1. 개요 .....	54
2.4.2. Weibull 분포 .....	54
2.4.3. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 확률 해석 결과 .....	56
<b>V. 결론</b> .....	<b>58</b>
<b>VI. 참고문헌</b> .....	<b>59</b>

## List of Tables

Table 3.1 Experimental parameters .....	16
Table 3.2 Concrete specifications .....	19
Table 3.3 Test results of compressive strength .....	19
Table 3.4 Test results of tensile strength of reinforcement .....	20
Table 3.5 FRP Tendon specification .....	20
Table 3.6 Steel Tendon specification .....	21
Table 3.7 Strain gage specification .....	24
Table 4.1 Test results of static experiment .....	27
Table 4.2 Summary of fatigue test results .....	28
Table 4.3 Result of regression analysis and the experiment by stress level ...	56
Table 4.4 Characteristic value and average life by stress level .....	57

## List of Figures

Fig. 1.1 Expected failure modes by repeated load .....	3
Fig. 2.1 Fatigue life distribution for different stress levels .....	6
Fig. 2.2 Dispersibility of form factor for stress levels .....	7
Fig. 2.3 Relation of strain intensity for the number of cycles .....	8
Fig. 2.4 Behavior of cracked element by repeated load .....	8
Fig. 2.5 Effective modulus of elasticity and changed stress concentration factor for the number of repeated loads(N) .....	9
Fig. 2.6 Crack growth( $da/dN$ ) for changed stress concentration factor .....	11
Fig. 2.7 Stress element under flexure and shear force .....	12
Fig. 2.8 Type of inclined crack .....	13
Fig. 3.1 Dimensions and loading layout of specimen .....	15
Fig. 3.2 Manufacturing process of specimens .....	18
Fig. 3.3 Anchorage system .....	21
Fig. 3.4 Anchor plate .....	22
Fig. 3.5 Hydraulic jack for tension .....	22
Fig. 3.6 Jacking of FRP tendon .....	22
Fig. 3.7 Jacking of steel tendon .....	22
Fig. 3.8 Repeated load .....	23
Fig. 3.9 Real view of test set-up .....	25
Fig. 3.10 Arrangement for data acquisition .....	25
Fig. 4.1 Load-Deflection curves .....	26
Fig. 4.2 Real view of static test(RU, RF, RS) .....	27
Fig. 4.3 Real view of RU70 specimens .....	29
Fig. 4.4 Load-deflection curves with the number of cycles(RU70) .....	30
Fig. 4.5 Load-deflection curves of RF and RF70-2 specimens .....	32
Fig. 4.6 Real view of RF70 specimens .....	33

Fig. 4.7 Real view of RF75 specimens .....	34
Fig. 4.8 Real view of RF80 specimens .....	35
Fig. 4.9 Real view of RF85 specimens .....	36
Fig. 4.10 Load-deflection curves with the number of cycles(RF70-1) .....	37
Fig. 4.11 Load-deflection curves with the number of cycles(RF70-2) .....	38
Fig. 4.12 Load-deflection curves with the number of cycles(RF75) .....	38
Fig. 4.13 Load-deflection curves with the number of cycles(RF80) .....	39
Fig. 4.14 Load-deflection curves with the number of cycles(RF85) .....	39
Fig. 4.15 Relationship of strain and the number of cycles(RF70-1) .....	40
Fig. 4.16 Relationship of strain and the number of cycles(RF70-2) .....	41
Fig. 4.17 Relationship of strain and the number of cycles(RF75) .....	41
Fig. 4.18 Relationship of strain and the number of cycles(RF80) .....	42
Fig. 4.19 Relationship of strain and the number of cycles(RF85) .....	42
Fig. 4.20 Load-deflection curves of RS and RS70 specimens .....	43
Fig. 4.21 Real view of RS70 specimens .....	44
Fig. 4.22 Load-deflection curves with the number of cycles(RS70) .....	44
Fig. 4.23 Relationship of strain and the number of cycles(RS70) .....	45
Fig. 4.24 Crack development pattern with the number of cycles(RU70) .....	46
Fig. 4.25 Crack development pattern with the number of cycles(RF70-1) .....	47
Fig. 4.26 Crack development pattern with the number of cycles(RF70-2) .....	47
Fig. 4.27 Crack development pattern with the number of cycles(RF75) .....	48
Fig. 4.28 Crack development pattern with the number of cycles(RF80) .....	48
Fig. 4.29 Crack development pattern with the number of cycles(RF85) .....	49
Fig. 4.30 Crack development pattern with the number of cycles(RS70) .....	49
Fig. 4.31 Repeated stress .....	50
Fig. 4.32 Concrete beam's fatigue strength .....	51
Fig. 4.33 Concrete fatigue strength of tension and compression and flexural strength .....	52
Fig. 4.34 S-N curve of beams strengthened with external FRP tendon .....	53
Fig. 4.35 S-N-P curves .....	57

## Summary

Of the reinforcing methods of structures which are used at the present, the external prestressing method which has the excellent internal force and hardness improvement effect comparing to other engineering methods is being much frequently used. The recent study trend brings the study to forecast the ultimate capability of the structures reinforced by the external prestressing method into many focuses. But, it is the practical state that regarding to the structure reinforced by the external prestressing, the evaluation about fatigue performance by the repeated loads is poor and the studies on that are very poor. Accordingly this study wanted to evaluate the stability and the appropriateness of external prestressing method as analyzing the characteristic of fatigue movement according to the repeated loads of ferroconcrete beam externally reinforced with FRP tendon.

The expected shape of destruction about the repeated loads of ferroconcrete beam externally reinforced with FRP tendon can be forecasted as adhesion fatigue destruction of anchorage, bending tensility fatigue destruction of tendon at the front part of anchorage, pressure fatigue destruction of concrete, fatigue destruction of tensile iron bar and adhesion fatigue destruction of iron bar and concrete.

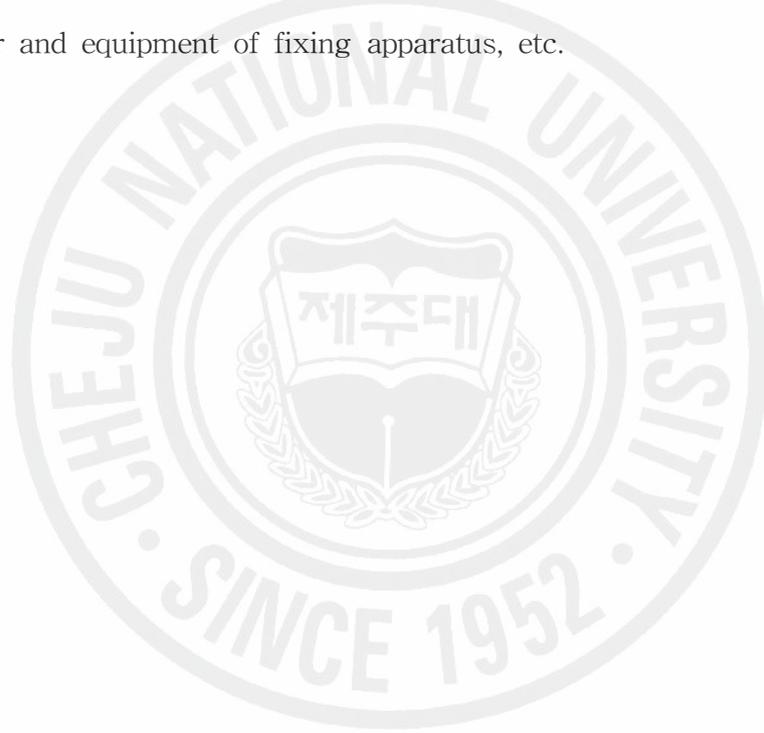
This experiment study performed the experiments while selecting the kinds of external tendons(non-reinforcing, FRP tendon and Steel tendon) and the level of load(the level of stress) as the comparative variable.

The load was experimented with the cycle of 3 Hz as using sine wave in the 4 points loading method as changing Max. load into 70~85% while regarding Min. load as 50% based on iron bar-surrender load of FRP-reinforced experimenting body.

As the result of experiment, fatigue destruction shape of ferroconcrete beam

externally reinforced with FRP tendon showed not fatigue destruction related to FRP tendon but fatigue destruction of internal tensile iron bar or fatigue destruction of the adhesion of iron bar and concrete. This is judged to be more safe because external FRP tendon is not adhered and the stress is standardized over the whole length of tension member. Fatigue strength over 2 million times from S-N curve was appeared as about 74%.

Accordingly, from the fatigue experiment about ferroconcrete beam externally reinforced with FRP tendon, FRP external prestressing method was confirmed to have the safety about the fatigue at FRP tendon, bending part of deviator and equipment of fixing apparatus, etc.



# I. 서론

## 1. 연구 배경 및 목적

철근 콘크리트 구조물은 경제성과 내구성이 우수하며, 또한 내화성이 좋고 구조물의 형상과 크기에 크게 제약을 받지 않아 현재까지도 가장 많이 사용되어지고 있다. 그러나 시공 중의 설계변경 및 시공불량, 구조물의 완공 후의 용도변경에 따른 외력의 증가, 구조물 주위의 환경변화, 시간의 경과에 따른 재료의 물성변화 등 계획, 설계 및 시공 중에 예측하지 못한 여러 가지 요인에 의해 손상을 입게 된다. 따라서 철근 콘크리트 구조물은 계획 단계에서부터 완공까지 철저한 품질 및 공정관리가 필요할 뿐만 아니라 완성 후에도 정기적인 점검을 실시하여 구조물의 노화현상, 즉 성능저하 정도를 파악하고 적절한 시기에 유지관리가 절대적으로 필요하다.

구조물의 보강공법에는 강관 접착공법, 보강섬유접착공법, 외부 프리스트레싱 공법, 단면증설공법, 부재교체공법 등이 있다. 이 중 현재 사용 중인 구조물에 대한 보강 공법의 대표적인 방법인 외부 프리스트레싱공법은 프리스트레싱 긴장재를 부재단면 밖에 보강하는 방법으로 근래에는 기존 교량의 보강뿐만 아니라 추후 보강의 필요성을 대비하기 위하여 신설교량에도 사용되고 있다. 이 공법의 장점은 시공의 단순성으로 긴장재의 설치가 매우 용이하며, 프리스트레싱 긴장재가 외부에 노출되어 보강재의 상태를 점검하기 쉬워 부식이나 기타 이유로 긴장재의 하자가 발생할 경우 대체가 용이하고, 다른 공법에 비해 보강효과가 매우 크고 보강 정도를 조정하기 쉬운 점들이다. 하지만 긴장재가 열악한 환경에 그대로 노출되어 있어 부식을 피할 수 없고 이것은 구조물의 내구성을 저하시켜 보수·보강 비용의 증가라는 새로운 문제를 유발시킨다. 특히 긴장재의 부식은 구조물의 내력에 심각한 손실을 가져오기 때문에 부식에 저항성이 큰 재료를 긴장재로 사용하려는 연구가 진행되고 있으며 이에 가장 합리적인 대체 재료로 주목 받고

있는 것이 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 긴장재이다. FRP 긴장재의 경우 비부식성의 장점을 살릴 수 있고 외부 긴장재의 극한 응력이 단면 종속(section dependent)이 아닌 부재 종속(member dependent)으로 응력증가량이 적기 때문에 탄성재료라는 단점을 극복 할 수 있다. 또한 경량성으로 현장 시공성이 좋다는 장점도 가지고 있다.

보강 공법은 기존 구조물에 내력을 증진시키고 사용성을 증대시키는 공법으로 극한 상태의 하중보다 사용하중상태의 영향을 더 많이 받게 된다. 즉 반복하중에 의해 강도가 저하 되어 극한 상태가 아닌 사용하중 상태에서 파괴가 일어날 수 있다. 그러나 지금까지 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 연구는 휨에 대한 정적실험을 통한 극한응력을 예측하는 것과 전단에 대한 것들이 대부분이다. 이와 함께 FRP Sheet나 강판 등으로 보강된 철근콘크리트 보의 피로에 대한 연구도 진행 되고 있다. 그러나 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로에 대한 연구는 현재까지 거의 이뤄지고 있지 않다. 보강 공법은 반복하중에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있는데 대부분의 연구가 휨이나 전단에 중점을 두고 이루어지고 있어 반복하중에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트보가 반복하중의 하중비에 따른 피로거동의 특성을 분석함으로써 외부 긴장공법의 안전성 및 적정성을 평가하고자 하였다. Fig. 1.1은 반복하중에 의한 예상 피로 파괴 형태를 나타낸 것으로 정착부(anchorage)의 부착 피로파괴, 정착부(anchorage)의 전면 긴장재의 휨 인장 피로파괴, 콘크리트 압축 피로파괴, 인장 철근의 피로파괴와 철근과 콘크리트의 부착피로파괴로 예상할 수가 있다.

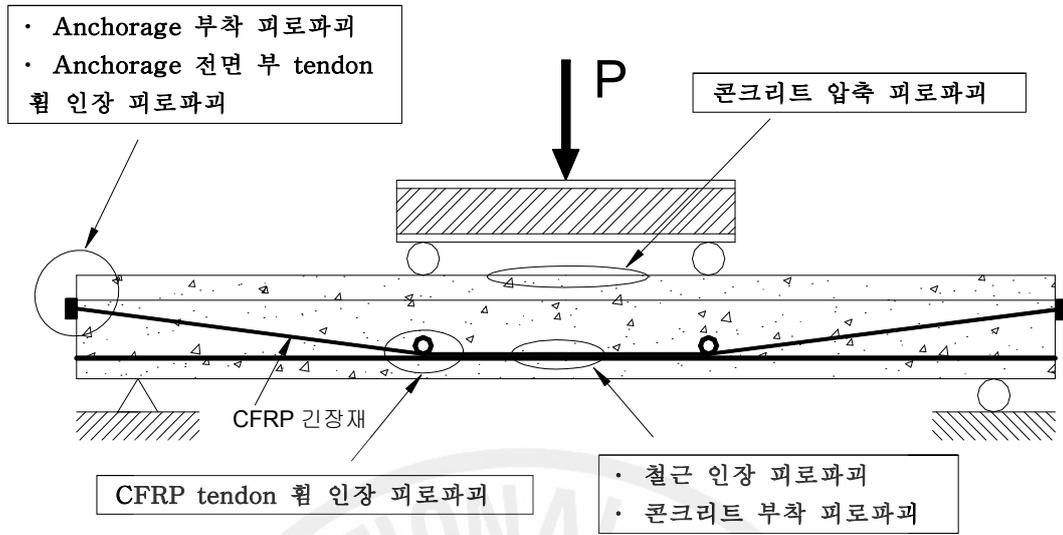
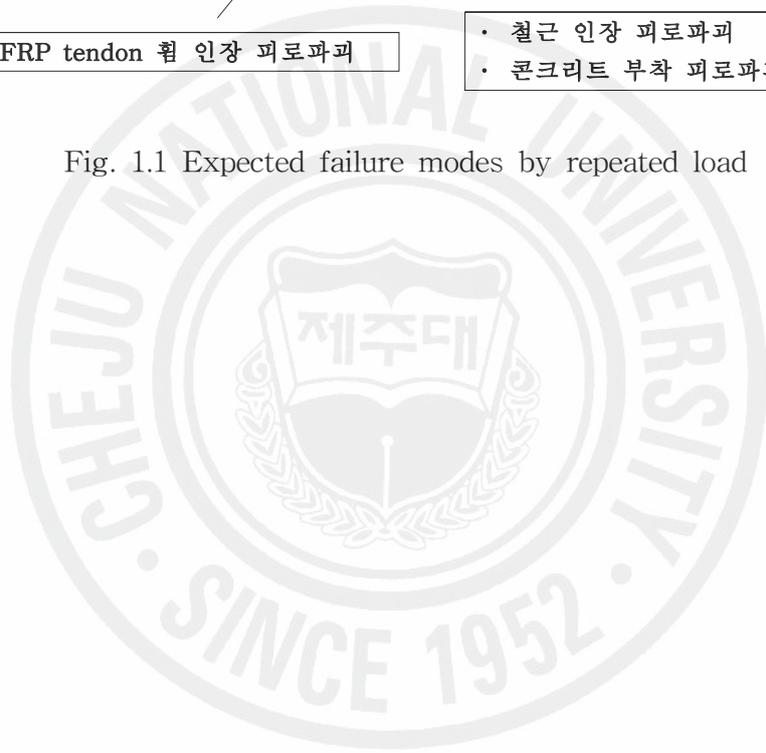


Fig. 1.1 Expected failure modes by repeated load



## 2. 연구 방법

본 실험연구는 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 반복하중의 하중 비에 따른 피로거동의 특성을 분석함으로써 외부 긴장공법의 안전성 및 적정성을 평가하고자 다음과 같은 방법으로 진행하였다.

(1) 먼저, 외부 긴장재로 보강된 철근콘크리트 보의 반복하중에 대한 예상되는 피로 파괴 형태를 결정하였다.

(2) 시험체의 피로 파괴형태를 분석하고 외부 긴장 공법의 안전성을 평가하기 위한 시험체를 제작하고, 피로 실험을 하기 위해 정적실험을 선행하여 하중 범위를 결정하였다.

(3) 결정된 하중을 ACI 215 규정에 따라 200만회 기준으로 3Hz의 주기로 sine 파를 이용하여 4점 재하방식으로 실험을 실시하였다.

(4) 피로실험 시 각 시험체 마다 반복횟수에 대한 처짐, 잔류 변위량, 인장철근과 콘크리트의 변형률을 측정하기 위해 반복횟수  $10^0$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $2 \times 10^6$ 에서 정적테스트를 실시하였다.

(5) 각 시험체에 대해 반복횟수에 대한 보의 처짐, 변형률, 균열 양상 및 파괴 형태를 분석하였다.

(6) FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 결과로부터 S-N선도를 작도하고 피로 강도를 추정하였으며, Weibull분포에 적용하여 확률해석에 따른 피로 강도를 추정하였다.

## II. 철근 콘크리트 보의 피로 해석방법 및 파괴형태

### 1. 피로 해석방법

반복하중을 받는 철근 콘크리트 부재에 대한 피로수명 및 거동에 대한 연구는 지속적으로 수행되어져 왔다. 점진적이고 비가역적인 손상을 유발하는 피로의 과정은 철근 콘크리트 부재에 과도한 처짐과 균열, 철근의 분리 및 파괴, 그리고 결과적으로 전체 구조요소의 파괴를 일으킨다.

반복하중에 대한 콘크리트 구조물의 손상 해석방법은 크게 세 가지로 분류될 수 있는데, 그 중 첫 번째가 통계적인 접근방법으로 철근 콘크리트의 피로수명을 확률론적으로 접근하여 손상 및 수명을 구하는 것이다. 그리고 두 번째 방법으로는 손상역학에 의한 해석방법이고, 세 번째 방법이 파괴역학이론을 적용하는 것이다.

각각의 방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되어 왔으나, 많은 연구가 철근이 배근되지 않은 콘크리트 부재나 시편에 적용된 것이 많고, 내부의 철근과 콘크리트의 상호작용 및 기여효과에 대한 연구가 앞으로 필요한 부분이기도 하다.

#### 1.1. 통계학적 방법

콘크리트의 피로 수명에 대한 예측은 전통적으로 실험결과에 근거한 Wöhler의 S-N 곡선에 기초를 두고 있다. 이 곡선은 각각의 다른 응력수준에서 평균적인 콘크리트 부재의 피로수명의 궤적을 표시한 것으로 손쉽게 사용할 수 있다. 응력범위, 하중 사이클 등 다른 영향인장에 서로 다른 궤적이 그려질 수 있다.

이에 대한 일반적인 경우가 다음의 Fig. 2.1에 나타난 바와 같고, 응력수준에 대한 신뢰구간의 결정은 Weibull 확률밀도함수에 근거하고, 이의 누적분포함수는

다음과 같다.

$$F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{u}\right)^\alpha\right], \quad n \geq 0$$

$\ln N$ 에 대한  $\ln\left\{\ln\left(\frac{1}{1-F_\alpha}\right)\right\}$ 를 표시할 때, 일정한  $\alpha$ ,  $u$ 값(극치 특성값)을 사용하면 연속적인 단일 곡선을 얻을 수 있다. 이 때  $\alpha$ 는 형상계수로서 표준편차  $a$ 와 분산에 관계있는 값으로,  $\alpha$ 가 무한대로 커질 때  $a$ 는 0으로 접근하는 값이다.

작용하는 응력범위에 따른  $\alpha$ 의 분산성은 오병환(1991)에 의해 연구된 다음의 Fig. 2.2에서와 같이 세 가지 응력범위에서  $f_r^{\max}/f_r'$ (반복하중에서의 최대응력/정적응력)의 비교를 나타낼 수 있다. Fig. 2.2에서 알 수 있는 바와 같이 피로수명이 증가할수록 형상계수의 분산성의 증가하므로, 피로수명은 최대응력 뿐만 아니라 응력범위의 함수이다. 통계학적 해석방법은 철근 콘크리트 부재의 피로수명을 분석하는데 있어 가장 유용한 방법으로, 본 연구에 대한 해석은 IV장 2.4절에서 자세히 설명하고 있다.

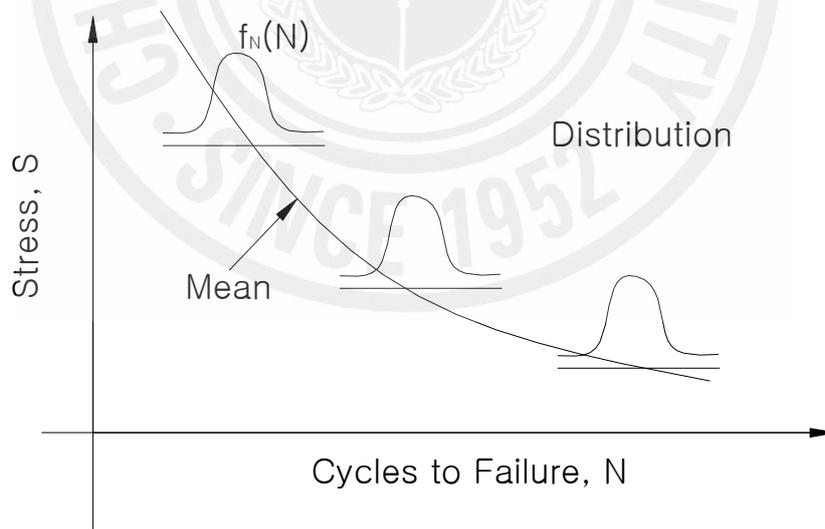


Fig. 2.1 Fatigue life distribution for different stress levels

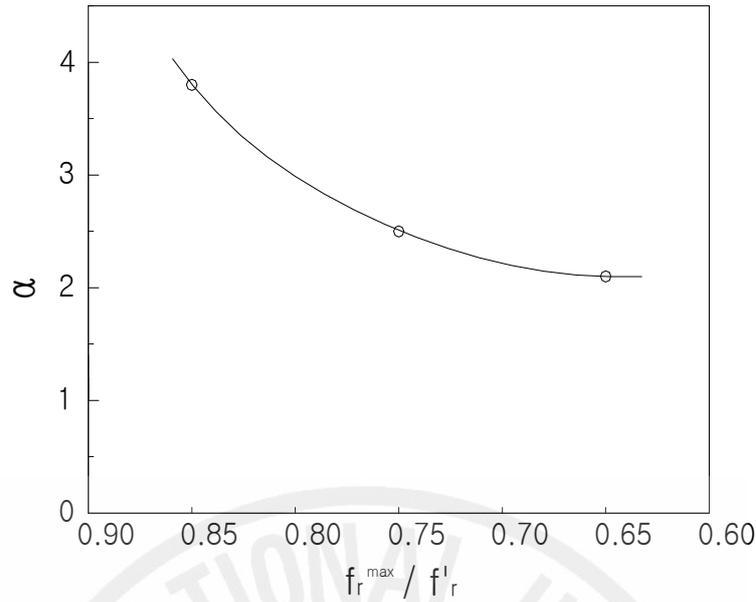


Fig. 2.2 Dispersibility of form factor for stress levels

## 1.2. 손상역학적 방법

손상역학적 방법의 이용은 재하 횟수에 따른 구조적 성질이 감소함수를 설명하기 위한 손상지수를 구하는 것을 의미한다. 전형적인 손상지수의 적용의 예는 아래의 식과 같다.(Swartz, S. E., 1991)

$$\psi = \psi_{ref}(1 - D)$$

윗 식에서  $\psi$ 는 특성시점의 강성함수(손상을 입은 상태)를 의미하고,  $\psi_{ref}$ 는 초기의 강성함수(손상을 입지 않은 상태)를 의미한다. 여기서  $D$ 는 특성 시점에서의 손상지수를 의미한다. Alliche와 Francois(1989)가 언급한 바와 같이 손상을 표현하기 위한 방법으로서 손상지수를 사용하는 방법이 분산성이 적어 변형된 손상과의 연관성이 좋은 것으로 나타났다. 다음의 Fig. 2.3에서와 같이 세 가지 단계의 손상단계를 제시하였는데, 2단계와 3단계를 사용하여  $dD/dN$ 을 변형도와 응력비( $R=P_{\min}/P_{\max}$ )의 스칼라 함수로 가정하였다.

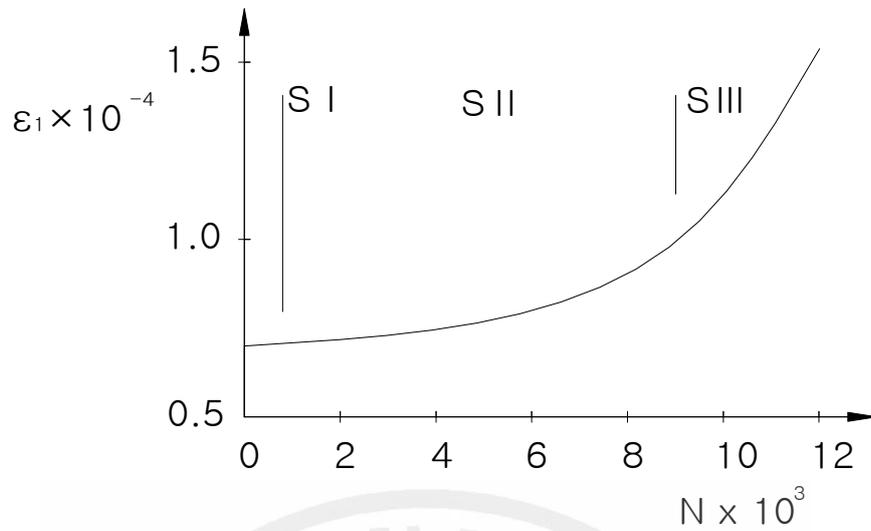


Fig. 2.3 Relation of strain intensity for the number of cycles

최근에 Hordijk과 Reinhaedt(1990)에 의해서 적용된 손상모델은 다음의 Fig. 2.4에서와 같이 일축압축 상태에서의 균열이 발생한 요소의 반복하중하의 거동으로부터 얻어진 손상모델을 사용한 것이다.

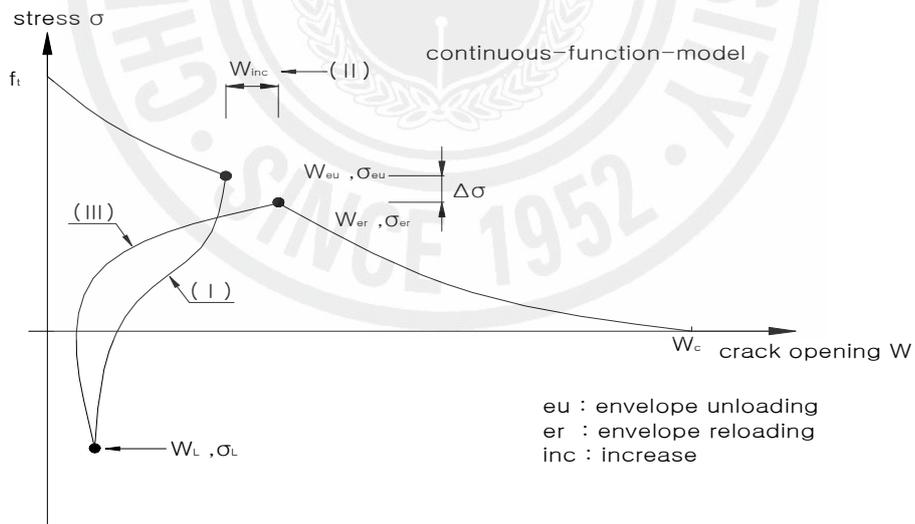


Fig. 2.4 Behavior of cracked element by repeated load

$f_t, W_c, W_{cu}, \sigma_{cu}, W_L, \sigma_L$ 의 함수로서  $\sigma$ - $w$ 의 연화 관계를 특성화하기 위해 경험식을 사용하였다. 이 방법은 또한 가상균열이론에 근거한 비선형 파괴역학적 접

근방법에서도 사용될 수 있다. 이 방법의 기본개념은  $F_{upper} < F_{max}$  일 때, 반복횟수에 따라 손상이 누적된다는 것으로,  $F_{upper}$ 이 일정 반복횟수에서  $F$ - $\delta$ 곡선의 변형 연화곡선부에 다다를 때까지 손상이 진행된다. 이 부분에서 균열이 전파가 불안정적이 되고 파괴가 일어나게 된다.

손상지수  $D$ 에 대한 표현은 반복하중을 받는 콘크리트 보에 대해서 Zhang에 의해서 제안되었다.(Fig. 2.5) 여기서 탄성계수  $E_d$ 가 일정하게 되는 임계점에서 Mode-1의 응력집중계수를 임계지수로 활용하여 파괴역학의 개념을 이용한 것이다.  $\Delta K > \Delta K_{th}$ 인 경우 탄성계수는 선형적으로 감소하고, 이후부터는 비선형적으로 감소한다는 접근방식이다. ( $\bar{E}_d = E_d/E_{d0}$ )

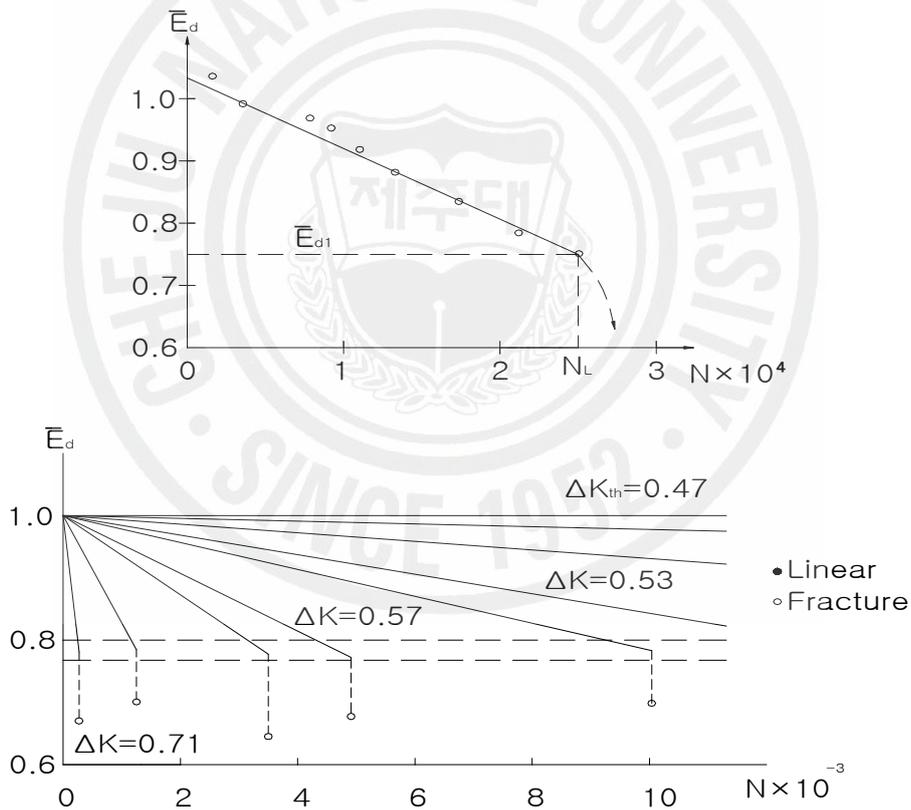


Fig. 2.5 Effective modulus of elasticity( $\bar{E}_d$ ) and changed stress concentration factor ( $\Delta K$ ) for the number of repeated loads(N)

### 1.3. 파괴역학적 방법

앞 절의 손상역학적 해석방법에서도 손상함수를 선형, 비선형의 파괴역학 개념을 이용한 예를 기술하였다. 반복하중을 받는 금속재료에서 균열의 진전을 조사하는 방법으로 아래 수식으로 표현하는 할 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m$$

여기서, C와 m은 재료상수이며  $\Delta K$ 가 기지인 시험체의 피로균열성장률의 측정치로부터 결정된다.

위 식의 Paris의 균열전파법칙이다. ASTM 규격의 강재에 대해(Barsom :1971), 균열성장률  $da/dN$ 의 단위를 mm/cycle, 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 의 단위를  $MPa\sqrt{m}$ 로 하였을 경우의  $C=48\times 10^{-10}$ ,  $m=3$ 이 제안되어 있다.

Paris의 식을 로그 식으로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log(da/dN) = \log C + m \log(\Delta K)$$

이 방법을 통한 해석은 위의 식에서와 같이 균열의 길이를 단계별로 알아내야 하고, 균열 진전에 따른 응력집중계수의 변화를 알아야 한다는 난점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 Baluch등이 균열이 발생한 시편에 대한 표면관찰을 통하여 균열의 진전을 측정하는 Compliance Calibration Technique을 제시하기도 하였다. Fig. 2.6은 균열성장률( $da/dN$ )과 응력확대계수  $\Delta K$ 의 관계를 R의 값에 따라 표현한 예이다.

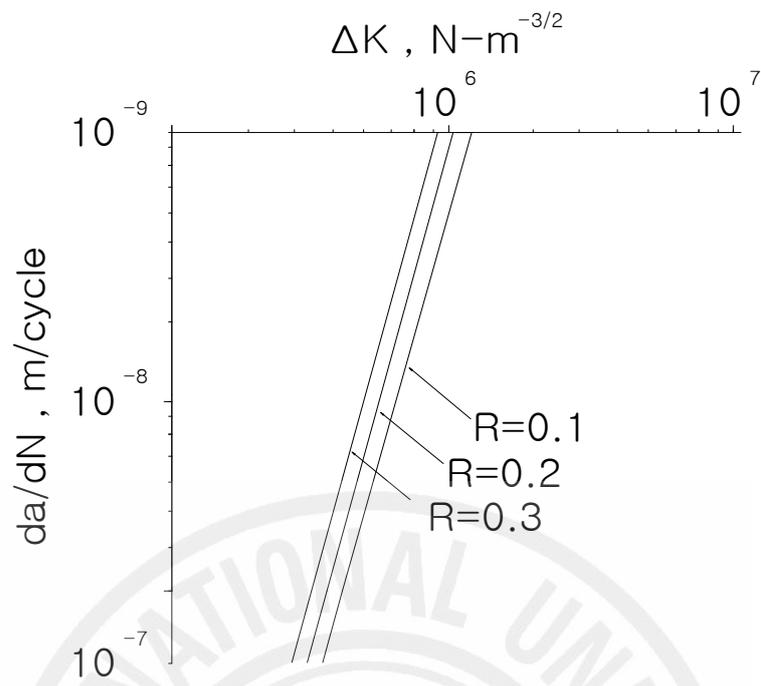


Fig. 2.6 Crack growth( $da/dN$ ) for changed stress concentration factor( $\Delta K$ )

## 2. 피로 파괴형태

### 2.1. 사인장 파괴

초기 하중에서 작은 휨 균열이 발생하고, 하중이 커짐에 따라 휨과 전단력에 의한 이차적인 사인장 균열이 복부로부터, 또는 휨 균열의 진전으로 발생한다. 즉 휨에 의한 인장응력과 전단력에 의한 전단응력이 조합으로 경사진 인장 주응력을 갖게 되고, 이로부터 사인장 균열이 발생하고 반복하중에 의해 이러한 사인장 균열의 폭이 커지게 된다.

전단철근이 없는 보의 경우 콘크리트 보의 하중 작용부와 지점 부를 연결하는 이차적인 사인장 균열이 급작스럽게 발생하여 진전되며, 이의 진전으로 콘크리트의 압축부가 파괴되는 양상을 나타내기도 한다. 이러한 사인장 균열은 부재 전체의 파괴를 일으키며, 따라서 전단철근이 없는 경우의 콘크리트 보의 전단강도는 사인장 균열 강도와 같은 값이 된다.

전단철근이 있는 경우는 사인장 균열이 발생하고 반복되는 하중에 의해 사인장 균열을 통과하는 전단철근이 항복하고, 아울러 인장철근이나 콘크리트 압축부가 파괴되어 최종적으로 부재의 파괴를 일으키게 된다. 또한 때로는 주인장 철근과 콘크리트 부착면의 절리가 일어나 부재의 파괴를 일으키기도 한다. Fig. 2.7은 휨과 전단을 받는 부재요소의 응력도를 나타낸 것이고 Fig. 2.8은 경사균열의 형상을 나타낸 것이다.

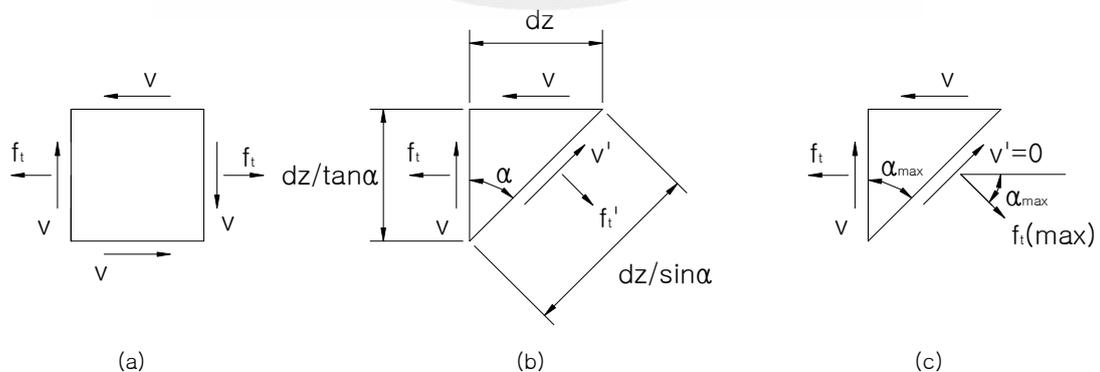


Fig. 2.7 Stress element under flexure and shear force

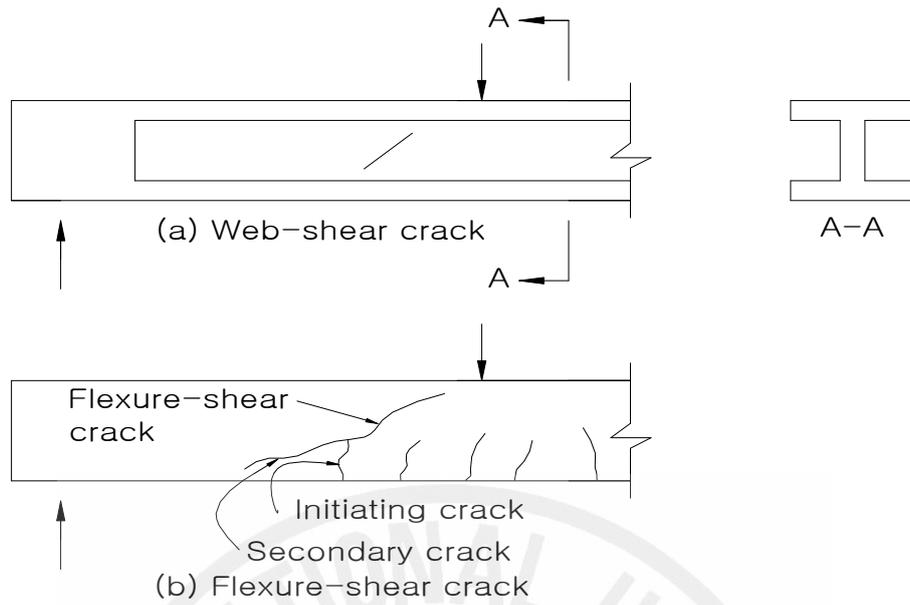


Fig. 2.8 Type of inclined crack

## 2.2. 콘크리트 압축파괴

콘크리트 압축파괴는 보의 상단 부 압축응력을 받는 콘크리트가 반복하중에 의해 취성적인 파괴 양상을 나타내는 것을 의미한다. 콘크리트의 압축파괴 양상은 앞서 기술된 사인장 균열의 진전에 의한 파괴와 같은 양상으로 사인장 균열과 휨 균열의 진전에 의해 콘크리트 압축부의 영역이 줄어들어 콘크리트의 압축응력을 상대적으로 크게 증가시켜 부재의 파괴를 유발한다.

휨이나 사인장 균열의 진전 이후 압축부 콘크리트가 바깥쪽 면으로부터 떨어져 나가기 시작한다. 이런 현상은 상당수의 반복하중의 작용한 후에 상당시간 동안 균일하고 점진적으로 진행된다.

일정하고 지속적인 압축 부 콘크리트의 탈락이 발생한 후 갑작스럽게 부재 전체의 파괴가 발생한다.

## 2.3. 부착파괴

콘크리트와 주인장 철근의 부착파괴는 파괴시점에서 하중을 저항할 수 없게

되고, 급작스런 변형을 일으키는 특징을 갖는다.

하중작용 초기에 보의 길이를 따라 여러 개의 휨 인장 균열이 발생하고, 이 균열이 지점부근에서 넓어지기 시작하여 하중이 반복됨에 따라 점점 더 넓어진다. 그리고 파괴가 진전됨에 따라 넓은 폭의 균열 수가 증가하게 된다.

하중 작용점과 지점사이에 약  $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$  정도의 경사각을 갖는 사인장 균열과는 달리, 콘크리트와 철근의 부착파괴에 의한 균열은 주인장 철근을 따라 수평적으로 발생한다. 그리고 주인장 철근 아래의 콘크리트가 탈락되며, 철근을 노출시킨다.

#### 2.4. 인장철근 취성파괴

인장철근의 취성파괴는 철근 콘크리트 보의 인장철근에 비교적 큰 범위에 응력이 반복해서 작용하는 경우 철근의 피로파괴로부터 유발된다. 이러한 파괴는 여러 응력 범위에서 발생될 수 있으며 순간적으로 전체 요소의 파괴를 일으킨다. 일반적으로 구조요소에서 가장 큰 응력이 발생하는 지점에서 발생하게 된다.

### III. 실험 준비

#### 1. 시험체 제원

시험체는 Fig. 3.1과 같이 T-형 단면을 가진 길이 2.4m인 철근콘크리트 보로 제작하였다. 인장부에 D22 이형철근 2개와 압축 부에 D13 이형철근 4개를 사용하였고 스트립은 D10 이형철근을 사용하여 배근하였다.

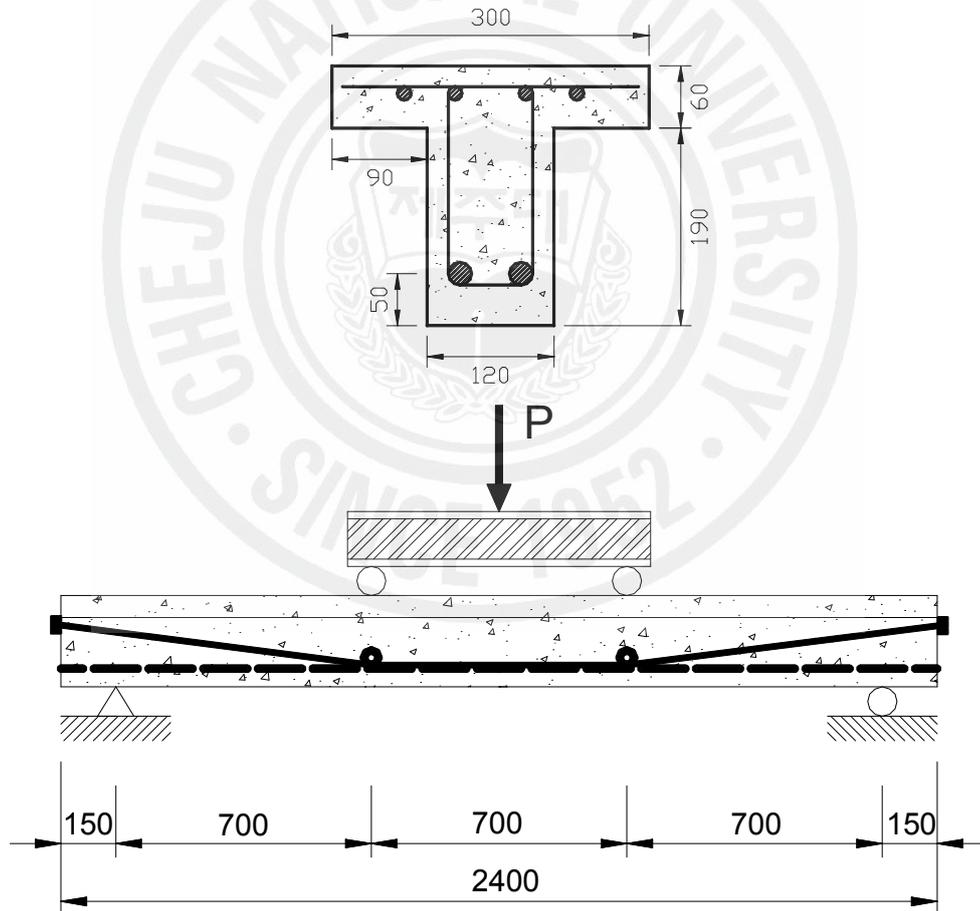


Fig. 3.1 Dimensions and loading layout of specimen

## 2. 실험 변수

실험을 행한 시험체는 총 10개로 변수별 정적실험체 3개와 피로 실험체 7개를 실시하였고 실험변수는 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Experimental parameters

시험변수	시험체명	내부 철근비	외부 긴장재비	긴장력( $F_j$ )	하중범위
무보강	RU70*		-	-	50%~70%
하중비	RF70*				50%~70%
	RF75*	2H22, $A_s=774\text{mm}^2$ $\rho_{used}=0.61\rho_{max}$	$2 \times \phi 12.5\text{FRP}$ $A_{ps} = 152\text{mm}^2$	$F_j=0.4F_{pu}$	50%~75%
	RF80*				50%~80%
	RF85*				50%~85%
Steel	RS70*				$2 \times \phi 9.5\text{Steel}$ $A_{ps} = 110.2\text{mm}^2$

\* 각 시험체는 FRP 긴장재로 외부 보강된 보의 철근 항복하중을 기준으로 하여 하중범위를 정하였다. 철근 항복하중의 50%를 최소하중으로 하고 최하중을 70%~ 85%로 하여 실험을 진행하였다.

- 무보강 시험체(RU)
- FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체(RF)
- Steel 긴장재로 외부 보강된 시험체(RS)

### 3. 시험체 제작

거푸집은 단면의 크기와 형상에 맞게 코팅 합판과 각재를 사용하여 제작하였다. Fig. 3.2에 시험체의 제작 과정을 나타내었다. Fig. 3.2(a)는 반복하중에 대한 내부 철근의 변형률을 측정하기 위한 strain gage를 부착한 모습이다. strain gage는 철근 중앙에 부착하였으며, 그라인더와 사포를 사용하여 철근 표면을 매끄럽게 한 후 C-N 본드로 부착하였다. 부착한 gage는 타설시 물이 들어가는 것을 방지하기 위해 방수 코팅제(N-1본드)를 이용하여 바르고 충분한 시간을 두어 말린 다음 절연 테이프로 배근 및 콘크리트 타설시 strain gage를 보호하였다. Fig. 3.2(b)는 D10 이형철근을 사용하여 60mm간격으로 스트립을 배근한 모습이다. Fig. 3.2(c)는 콘크리트 타설 전 철근망을 거푸집 안에 거치시킨 모습이다. 철근 밑면과 옆면에 스페이서를 두어 피복두께를 유지하고 콘크리트 타설시 철근이 흔들리지 않고 고정 될 수 있도록 하였다. Fig. 3.2(d)는 콘크리트 타설 완료 후 모습이다. 콘크리트는 레미콘(ready-mixed concrete)을 사용하였으며 다짐을 위하여 9,000-14,000 Hz/min. 의 진동수와 진폭 1.6mm를 갖는 지름 32mm의 다짐봉을 사용하였으며 과도한 진동으로 골재분리가 일어나지 않도록 조심하였고 인장 철근에 부착되어 있는 strain gage의 손상이 없도록 주의를 기울여서 작업을 진행하였다. 거푸집 중간에 배분립 현상을 방지하기 위하여 2~3 곳을 고정하였으며 콘크리트 타설 후 양생은 시험체 위에 비닐과 천을 덮어두어 수분증발과 온도변화를 방지 하였고 거푸집은 4주 후에 해체하였다. 콘크리트의 압축강도를 파악하기 위하여 공시체를 제작하였으며 시험체와 같은 조건에서 양생을 하였다.



(a) Strain gages on reinforcing bars



(b) Arrangement for stirrups



(c) Reinforcing cages in form



(d) Casting of concrete

Fig. 3.2 Manufacturing process of specimens

## 4. 사용 재료

### 4.1. 콘크리트

시험체의 콘크리트는 설계 강도가 24MPa로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트는 굵은 골재의 최대치수가 25mm, 슬럼프 값은 10cm이고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 시험시편의 제작을 위한 레미콘 제품사양은 Table 3.2와 같고 콘크리트의 압축강도 시험결과는 Table 3.3과 같다. 압축시험결과 평균 압축강도는 25.97MPa이었다.

Table 3.2 Concrete specifications

구분	1종 보통 포틀랜드 시멘트
호칭 강도(MPa)	24
슬럼프(cm)	10
굵은 골재 종류 및 최대 치수(mm)	25
시멘트 종류	1종 보통 포틀랜드 시멘트
공기량	4.5±1.5%
염화물량	0.30kg/m <sup>3</sup> 이하

Table 3.3 Test results of compressive strength

공시체	파괴하중(N)	압축강도(MPa)
1	201,215	25.62
2	199,984	25.46
3	202,799	25.82
4	208,356	26.53
5	207,490	26.42
평균	203,957	25.97

#### 4.2. 철근

철근은 SD400 등급인 이형철근으로 인장철근은 D22를 사용하였고, 압축철근은 D13, 스트립은 D10을 사용하였다. 철근의 인장 시험 결과는 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 Test results of tensile strength of reinforcement

종류	직경 (mm)	극한 하중 (MPa)	항복 하중 (MPa)	연신율 (%)	탄성계수 (GPa)
철근 (SD40)	H10	634.0	526.89	20.03	197.34
	H13	600.98	493.14	18.41	195.85
	H22	611.34	489.24	17.91	190.50

#### 4.3. FRP와 Steel 긴장재

FRP 긴장재는 일본 T사에서 제작한 CFCC(Carbon Fiber Composite Cable)를 사용하였으며 정착 시스템은 슬리브 형식을 하고 있다. Table 3.5에 FRP의 세부 성질을 나타내었고 Fig. 3.3는 정착 시스템을 보여주고 있다.

Table 3.5 FRP Tendon specification

직경 (mm)	구성	공칭단면적 (mm <sup>2</sup> )	파괴하중 (kN)	인장강도 (GPa)	파괴 시 연신율(%)	인장 탄성계수(GPa)
φ12.7	1×7	76.0	177	2.30	1.6	144

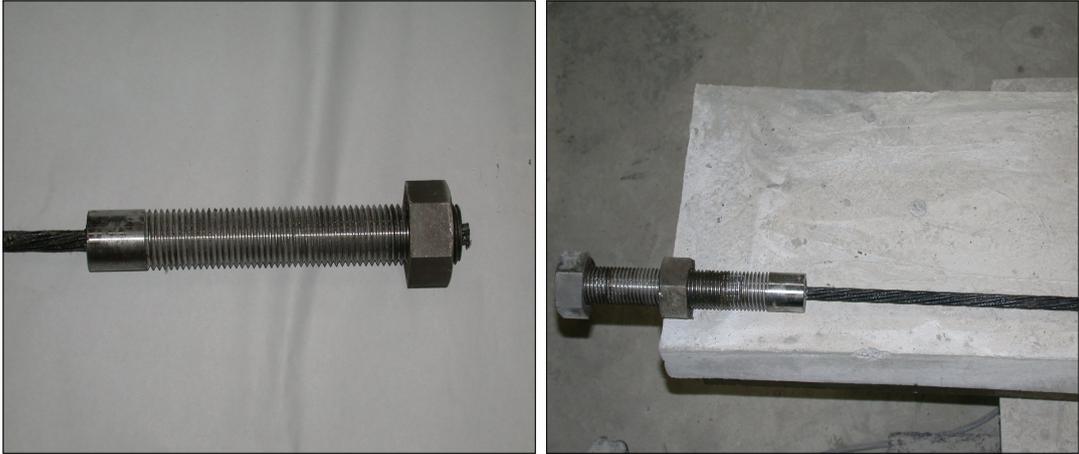


Fig. 3.3 Anchorage system

Steel 긴장재는 국내 D 철강에서 제작한 프리스트레싱용 강연선으로 SWPC 7B 등급의 직경9.5mm를 사용하였다. Table 3.6은 steel 긴장재의 세부성질을 나타낸 것이다.

Table 3.6 Steel Tendon specification

직경 (mm)	구성	공칭단면적 (mm <sup>2</sup> )	인장응력 (MPa)	항복응력 (MPa)	연신율 (%)	탄성계수 (GPa)
φ9.5	1×7	55.1	1938.29	1735.03	7.00	210.84

## 5. 정착과 긴장

정착판은 Fig. 3.4와 같이 반원 형태의 봉을 추가한 형태로 제작하여 긴장재의 꺾임에 따라 회전이 가능하도록 하였다. 긴장은 E사의 펌프와 실린더를 사용하여 긴장하였다.(Fig. 3.5) FRP 긴장재의 경우 직접 Jack으로 긴장작업을 수행하기 어려우므로 Fig. 3.6과 같이 Sleeve와 Tension rod를 Coupler로 연결시킨 후에 Tension rod를 긴장하여 힘을 도입시키는 방법을 사용하였다. Steel 긴장재의 경우는 Fig. 3.7과 같이 Jack을 이용하여 긴장을 하였다.



Fig. 3.4 Anchor plate



Fig. 3.5 Hydraulic jack for tension



Fig. 3.6 Jacking of FRP tendon



Fig. 3.7 Jacking of steel tendon

## 6. 실험 및 데이터 수집

### 6.1. 재하장치 및 방법

재하 장치는 유압 서보 피로 시험기(Hydraulic Servo Fatigue Test Machine)로 최대용량은  $\pm 50$  tonf이며 반복횟수 범위, 재하과형, 최대/최소 하중 범위 등을 컴퓨터에 입력시켜 작동한다. 하중은 4점 재하법으로 지간의 1/3 지점 두 곳에 하중이 작용될 수 있도록 강재보를 설치하고 가력 프레임에서 유압하중기를 사용하여 재하하였고, 가력프레임과 유압하중기 사이에 Load cell을 설치하여 하중값을 확인하였다. 하중은 정적실험 시에는 변위제어 방식으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하하였으며, 재하하중 약 20kN마다 균열을 표시하였다. 피로 실험 시에는 하중제어 방식으로 이루어졌으며 Fig. 3.8와 같이 정현파(Sine) 형태로 자동제어 되도록 하였으며 첫 하중은 반복 하중범위의 중간 값까지 선형으로 증가시킨 후 반복하중이 재하되는 방식을 사용하였다. 반복하중의 재하속도는 피로 한계에 영향을 미치지 않는 3Hz로 하여 실험을 실시하였고 하중은 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 정적실험을 통해 얻은 철근 항복하중 240kN을 기준으로 최소하중은 50%(120kN)로 일정하게 유지하고 최하중은 70%(168kN) ~ 85%(204kN)로 하였다.

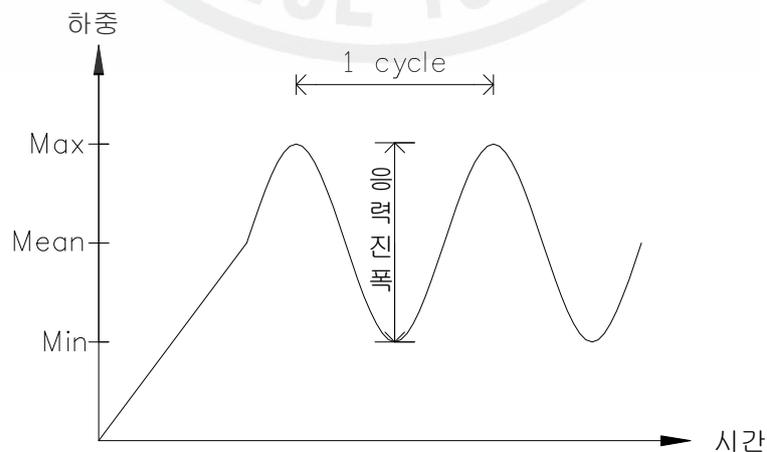


Fig. 3.8 Repeated load

## 6.2. Data 측정방법

측정횟수 1회,  $10^3$ 회,  $10^4$ 회,  $10^5$ 회,  $10^6$ 회,  $2 \times 10^6$ 회에서 반복하중을 멈추고 정적 실험을 실시하였으며 이때 반복횟수에 따른 균열 성장과정, 철근과 콘크리트 그리고 외부 긴장재의 변형율의 관계, 보 중앙부의 처짐과 잔류 변위의 관계를 관찰하였으며 최대 하중 시 반복하중에 의해 발생한 추가 균열을 표시하고 가장 균열 폭이 큰 부분을 균열 측정기를 이용하여 균열 폭을 측정하였다. 시험체의 변위를 측정하기 위하여 보의 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하였고 횟수에 따른 보의 잔류 변위량을 측정하기 위하여 변위계 옆에 Dial gage를 설치하고 정적 테스트 전에 그 값을 측정하였다. 데이터의 수집은 동적변형률 측정기(MDS-2000)를 이용하여 하중 및 처짐과 콘크리트의 변형률, 내부철근 및 외부 긴장재의 변형률을 측정하였다. 실험에 사용한 Strain gage의 세부항목은 Table 3.7과 같다. Fig. 3.9는 실험 전 시험체의 모습이고, Fig. 3.10은 시험체에 대한 gage와 변위계 등의 배치 모습을 나타내고 있다.

Table 3.7 Strain gage specification

Type	Steel	Concrete
Gage Type	FLA-5-11	PL-60-11
Gage Factor	2.11±1%	2.09±1%
Adhesive	P-2	
Coefficient of Thermal Expansion	11.8×10 <sup>-6</sup> /°C	
Temperature Coefficient of G.F	+0.1±0.05%/10°C	+0.12±0.05%/10°C
Other	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.	



Fig. 3.9 Real view of test set-up

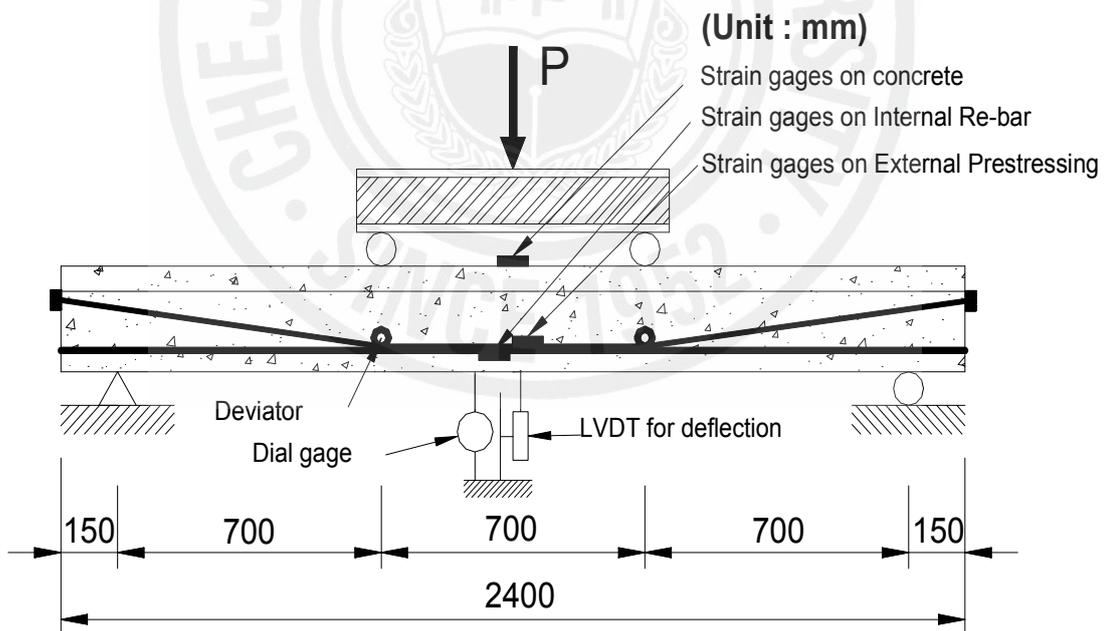


Fig. 3.10 Arrangement for data acquisition

## IV. 실험결과 및 분석

### 1. 정적실험 결과 및 분석

피로실험 전 하중 범위를 선정하기 위하여 무보강 시험체(RU), FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체(RF), steel 긴장재로 외부 보강된 시험체(RS)에 대해 각각 정적 실험을 실시하였다. Fig. 4.1은 정적 실험에 대한 하중-처짐도를 나타낸 것이고, Table 4.1은 정적 실험결과를 나타낸 것이다. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 경우 FRP 재료의 선형 탄성 특성에 의해 철근 항복 후 선형거동을 하였다. 모든 시험체는 철근 항복 후 최종적으로 콘크리트 압축 파괴가 일어났다. 정적 시험 결과 FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 철근 항복하중 240kN을 기준으로 50~70%, 50~75%, 50~80%, 50~85%의 반복하중을 가하여 피로 실험을 실시하였다. Fig. 4.2는 실험모습을 나타낸 것으로 (a) RU 시험체의 실험 전 모습, (b) RF 시험체의 균열 모습, (c) RS 시험체의 최종압축파괴 모습이다.

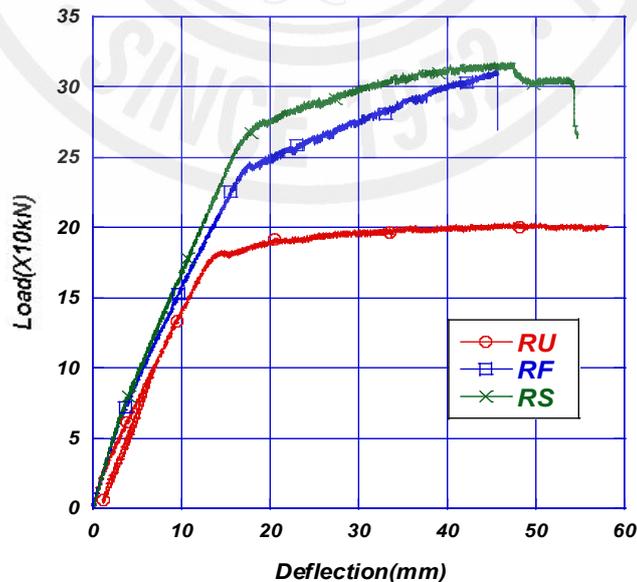


Fig. 4.1 Load-Deflection curves

Table 4.1 Test results of static experiment

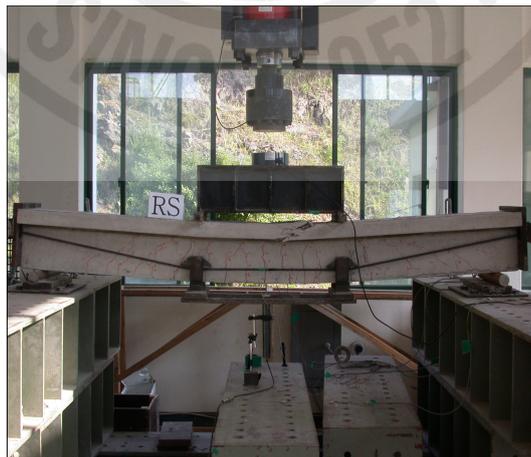
시험체명	항복 시		극한 시	
	하중(kN)	처짐(mm)	하중(kN)	처짐(mm)
RU	180.5	14.37	202.9	47.49
RF	242.6	18.21	310.9	45.46
RS	273.5	19.52	317.2	47.49



(a) Test set-up(RU)



(b) Crack patterns (RF)



(c) Final compression failure(RS)

Fig. 4.2 Real view of static test(RU, RF, RS)

## 2. 피로실험 결과 및 분석

Table 4.2는 피로 실험결과를 요약한 표이다.

Table 4.2 Summary of fatigue test results

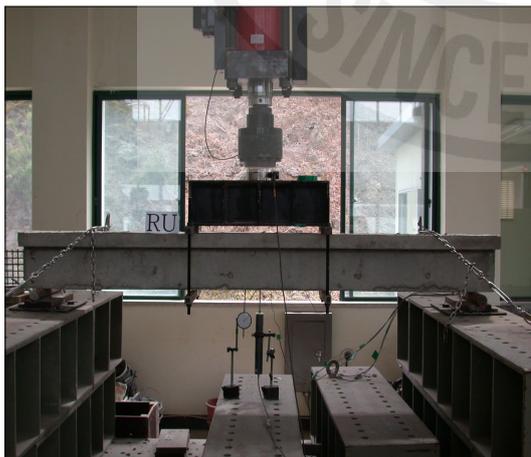
시험체명	주기	P <sub>min</sub> (kN)	P <sub>max</sub> (kN)	Number	잔류변위량(mm)	파괴형태
RU70	3Hz	120 (50%)	168 (70%)	10 <sup>0</sup>	2.30	콘크리트 압축파괴
				10 <sup>3</sup>	5.25	
				10 <sup>4</sup>	7.57	
				10 <sup>5</sup>	9.08	
				1.3×10 <sup>5</sup>	12.47	
RF70-1	3Hz	120 (50%)	168 (70%)	10 <sup>0</sup>	0.90	콘크리트 부착 피로파괴
				10 <sup>3</sup>	1.22	
				10 <sup>4</sup>	1.75	
				10 <sup>5</sup>	2.10	
				10 <sup>6</sup>	2.74	
1.257×10 <sup>6</sup>	7.48					
RF70-2	3Hz	120 (50%)	168 (70%)	10 <sup>0</sup>	1.06	2×10 <sup>6</sup> 회까지 피로파괴 없음
				10 <sup>3</sup>	1.31	
				10 <sup>4</sup>	1.38	
				10 <sup>5</sup>	1.47	
				10 <sup>6</sup>	1.76	
2×10 <sup>6</sup>	2.40					
RF75	3Hz	120 (50%)	180 (75%)	10 <sup>0</sup>	1.37	인장철근 피로파괴
				10 <sup>3</sup>	1.46	
				10 <sup>4</sup>	1.57	
				10 <sup>5</sup>	1.81	
				10 <sup>6</sup>	2.25	
1.816×10 <sup>6</sup>	7.94					
RF80	3Hz	120 (50%)	192 (80%)	10 <sup>0</sup>	1.18	인장철근 피로파괴
				10 <sup>3</sup>	1.27	
				10 <sup>4</sup>	1.83	
				10 <sup>5</sup>	2.36	
				3.83×10 <sup>5</sup>	8.42	
RF85	3Hz	120 (50%)	204 (85%)	10 <sup>0</sup>	1.24	인장철근 피로파괴
				10 <sup>3</sup>	1.53	
				10 <sup>4</sup>	1.97	
				10 <sup>5</sup>	2.48	
				3.04×10 <sup>5</sup>	8.20	
RS70	3Hz	120 (50%)	168 (70%)	10 <sup>0</sup>	1.43	2×10 <sup>6</sup> 회까지 피로파괴 없음
				10 <sup>3</sup>	1.48	
				10 <sup>4</sup>	1.76	
				10 <sup>5</sup>	1.80	
				10 <sup>6</sup>	2.12	
2×10 <sup>6</sup>	2.92					

## 2.1. 시험체 별 피로실험 결과 분석

### 2.1.1. 무보강 시험체 (RU70 시험체)

무보강 시험체인 RU 시험체는 하중 범위를 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 철근 항복하중을 기준으로 하였다. 그 범위는 50~70%로 120kN ~ 168kN사이 이며 실험은 Sine파로 3Hz의 주기로 실시하였다. 피로 시험 중에 반복횟수가  $10^0$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ 일 때 반복 하중을 멈추고 정적테스트를 실시하여 반복횟수에 대한 처짐과 잔류 변위량 및 gage의 변형률을 측정하였다.

무보강 시험체는 FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 철근 항복하중을 기준으로 하중을 설정하였기 때문에 무보강 시험체의 극한 응력에 가까운 매우 높은 응력 수준으로 반복하중에 의한 변형이 계속적으로 증가되었다. 초기 정적하중에 의해 생긴 균열이 반복하중을 받는 동안 점점 진전되어 약 13만회에서 균열이 압축 부까지 진행되어 결국 콘크리트 압축 파괴를 일으켰다. Fig. 4.3은 RU70 시험체의 실험 모습을 사진으로 나타낸 것으로 (a) 실험 전 모습, (b) 균열양상, (c) 콘크리트 압축 파괴 후 모습, (d) 파괴 후 균열 모습을 나타내고 있다.



(a) Test set-up before experiment



(b) Crack propagation



(c) Cracks after concrete compression (d) Crack details after failure failure

Fig. 4.3 Real view of RU70 specimens

1) 반복 횟수에 대한 중앙부의 처짐의 관계

반복하중 작용 시 하중의 범위가 외부 보강된 보의 철근 항복하중을 기준으로 산정된 무 보강 시험체의 경우는 극한응력에 가까운 높은 응력수준으로 외부 보강된 보에 비해 처짐이 크게 증가하였다.(Fig. 4.4)

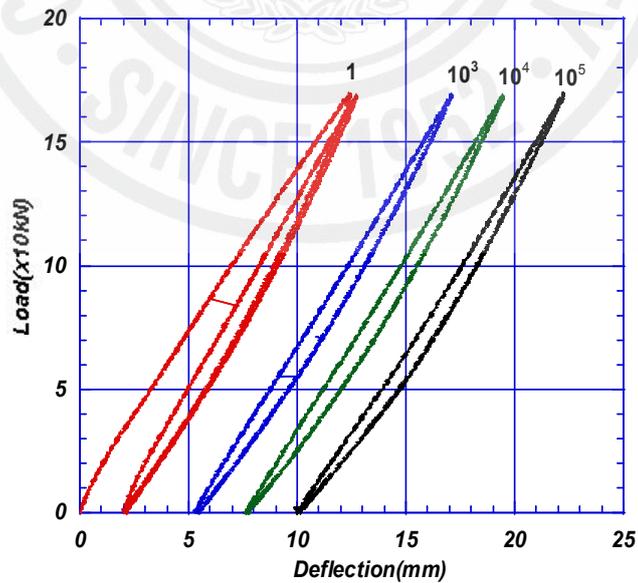


Fig. 4.4 Load-deflection curves with the number of cycles(RU70)

### 2.1.2. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체(RF70, RF75, RF80, RF85)

RF 시험체는 FRP 긴장재로 외부 보강된 보의 철근 항복 하중을 기준으로 최소하중을 50%(120kN)로 하고 최하중을 70~85%(168kN~204kN)사이를 sine파로 하여 3Hz의 주기로 실험을 실시하였다. 피로 시험 중에 반복횟수가  $10^0$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $2 \times 10^6$ 일 때 정적테스트를 실시하였고 반복 하중에 따른 처짐, 잔류 변위량, strain gage의 변형률을 측정하였다.

최하중이 70%인 RF70-1 시험체는 반복횟수의 증가에 따라 처짐의 거의 선형적으로 증가하다가 약 1,250,000회 정도 진행 되었을 때 인장철근과 콘크리트의 부착 피로파괴를 일으켰다. 이는 70만회정도에서 인장철근의 위치에서 발생하기로 방향의 미세한 균열이 반복하중을 받는 동안 피로가 누적되어 콘크리트와 철근사이의 부착이 피로에 의해 약해져 결국 파괴된 것이라 판단된다. 보가 파괴된 후 1.50mm정도의 휨 균열이 deviator 부분에서 발생하였다. RF70-2 시험체는 200만 번까지 피로 파괴를 보이지 않아 피로 실험 후 정적 실험을 실시하였다. Fig. 4.5에 보인 바와 같이 200만 번의 반복하중을 받은 시험체는 반복하중을 받지 않은 RF 시험체와 비교해 볼 때 항복 전 특히, 사용하중 상태에서 강성이 약화되어 처짐이 증가하였으나 철근 항복 후에는 두 시험체가 같은 거동을 보여 반복하중을 받은 후에도 FRP재료의 선형적인 특성이 변화되지 않았음을 알 수 있다. 이는 외부 긴장재로 사용한 FRP 긴장재가 피로에 대해 안전성을 가지고 있음을 보여주고 RF70-2 시험체가 피로에 의해 하중 지지능력을 상실하지 않았다고 해석 할 수 있다. 최대 하중의 범위가 75%, 80%, 85%인 RF75, RF80, RF85 시험체는 초기 하중에 의해 생긴 균열이 반복하중에 의해 점차 진전되었으며, 하중재하 점 하부 균열에서 응력 집중현상이 발생하여 결국 인장 철근이 취성 파괴되었다. 두 개의 인장철근 중 하나의 철근이 피로 파괴된 후 처짐은 급격하게 증가하였으며 하중을 제거한 후에도 파괴가 일어난 부분의 균열은 복원이 되지 않았고 이 부분의 균열을 측정된 결과 3~5mm정도였다. Fig. 4.6은 RF70 시험체의 실험 모습이며, (a) RF70-1 시험체의 보 중앙부분의 가로 균열모습, (b) RF70-1 시험체의 deviator 부분 균열모습, (c) RF70-2 시험체의 균열모습, (d) RF70-2 시험체의 압축파괴 모습을 나타낸 것이다. Fig. 4.7은 RF75 시험체의

실험 모습을 나타낸 것으로 (a) 압축플랜지의 균열, (b),(c) deviator부근에서의 콘크리트 균열, (d) 인장철근 파단을 보여주고 있다. Fig. 4.8은 RF80 시험체의 실험 모습으로. (a) 압축플랜지의 균열, (b) deviator부근에서의 콘크리트 균열, (c) 보 밑면의 콘크리트 균열, (d) 인장철근의 파단을 나타낸 것이다. Fig. 4.9은 RF85 시험체의 실험 모습으로 (a) 압축플랜지의 균열, (b),(c) deviator부근에서의 콘크리트 균열, (d) 인장철근의 파단을 나타내고 있다.

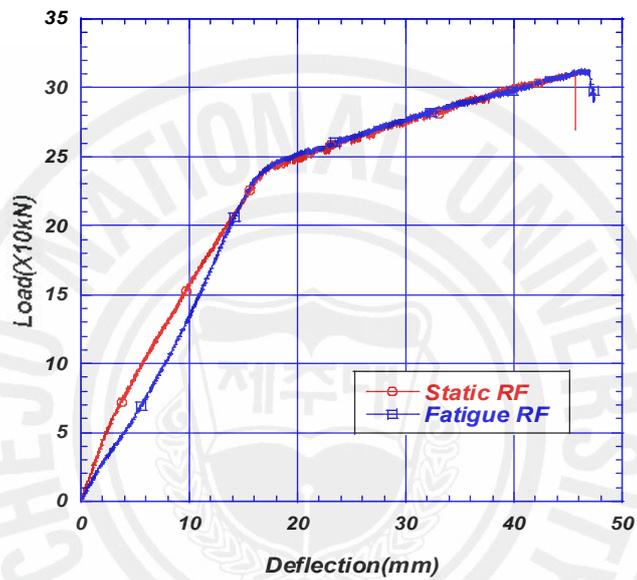
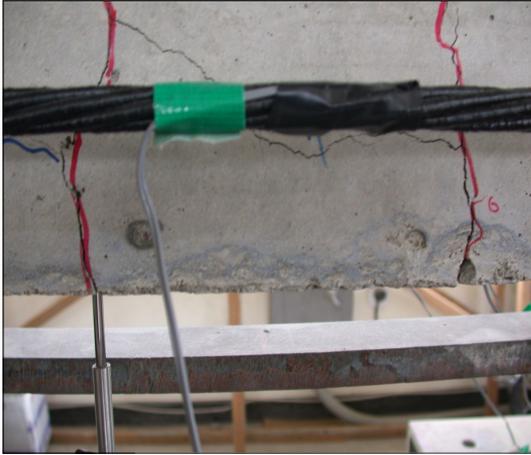
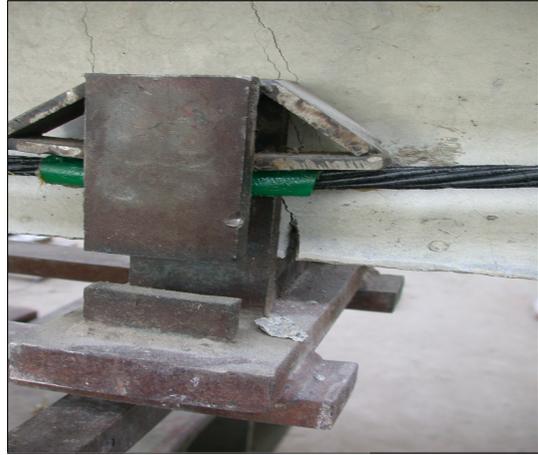


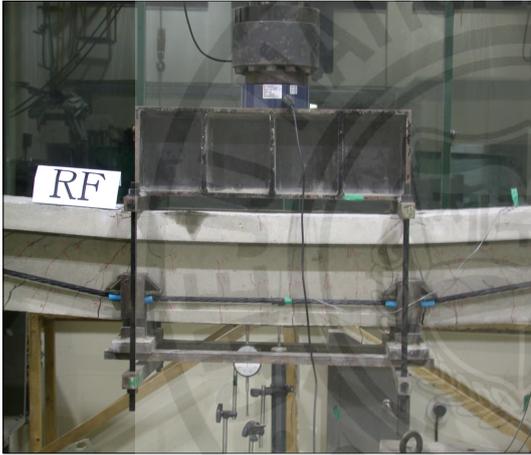
Fig. 4.5 Load-deflection curves of RF and RF70-2 specimens



(a) Horizontal crack at central part of beam(RF70-1)



(b) Crack around deviator(RF70-1)



(c) Crack development RF70-2

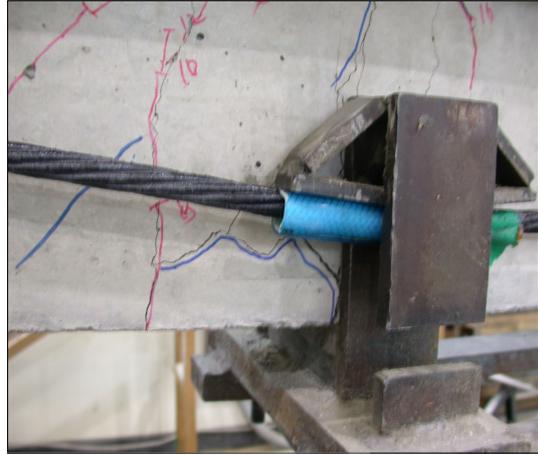


(d) Compression failure of top flange(RF70-2)

Fig. 4.6 Real view of RF70 specimens



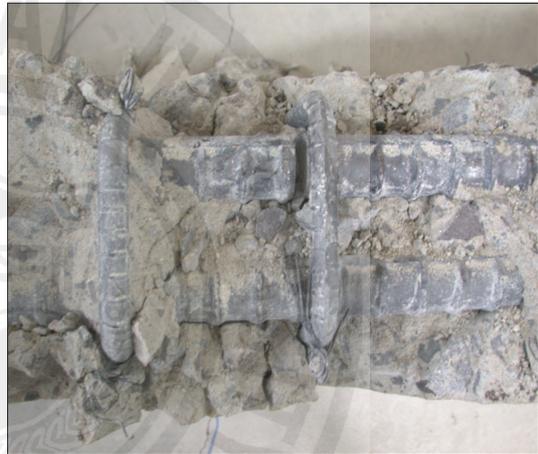
(a) Cracks at top flange



(b) Cracks around deviator



(c) Cracks around deviator

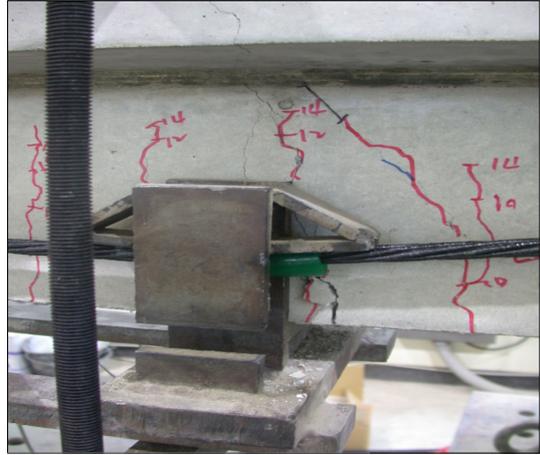


(d) Rupture of reinforcing bar

Fig. 4.7 Real view of RF75 specimens



(a) Cracks at top flange



(b) Cracks around deviator

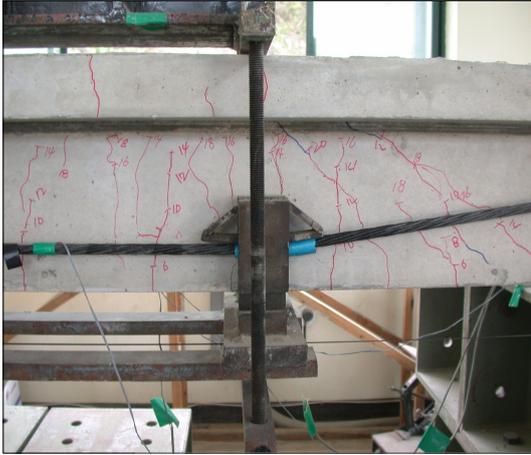


(c) Crack of bottom face



(d) Rupture of reinforcing bar

Fig. 4.8 Real view of RF80 specimens



(a) Cracks development



(b) Cracks at top flange



(c) Cracks around deviator



(d) Rupture of reinforcing bar

Fig. 4.9 Real view of RF85 specimens

1) 반복횟수에 대한 보 중앙부 처짐의 관계

Fig. 4.10~4.14는 FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 반복횟수와 중앙부의 처짐 관계를 나타낸 것이다. 반복횟수의 증가에 따라 처짐이 미세하게 증가하였으나 반복횟수가 1,000,000~2,000,000회 사이에서 다른 구간에 비해 많은 처짐을 보였다. 피로 실험에서의 처짐은 반복횟수의 영향보다는 작용하중의 범위나 응력 범위에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있었다. 모든 시험체에서 하중을 제거하였을 때 분명한 잔류 변위를 보였고 미세 균열은 거의 소멸되고 중앙 처짐은 약간의 잔류 변위를 보이거나 어느 정도는 회복 되었다.

반복하중 재하 시 하중 증가부의 곡선과 하중 감소부의 곡선 사이의 면적을 통해 전체 시스템에서 발생하는 에너지 손실을 알아 볼 수 있다. 단 본 실험에서는 10의 지수 승에 해당하는 재하 시에만 측정하였고 잔류 변위에 의한 손실까지 포함하였다. 특히 첫 번째 재하의 경우는 휨 균열 및 사인장 균열을 발생시키는 에너지 손실을 포함한 것으로 반복하중에 의한 에너지 손실은 아니다. 초기 에너지 손실이 가장 크게 나타났으며 반복횟수에 따라 에너지 손실도 조금씩 증가하였다.

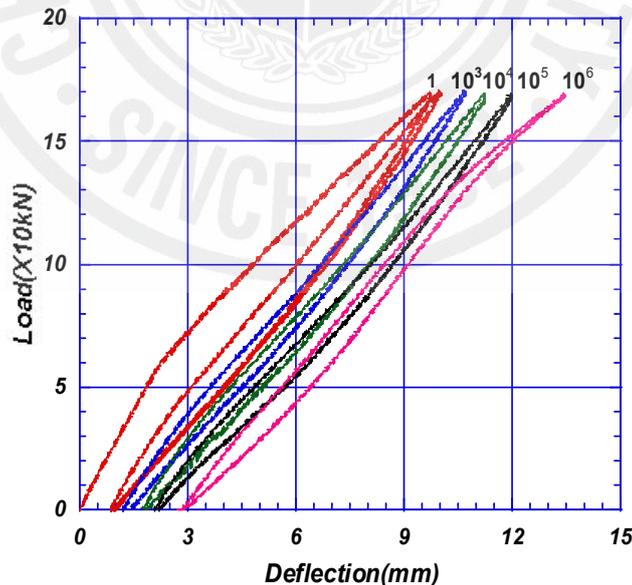


Fig. 4.10 Load-deflection curves with the number of cycles(RF70-1)

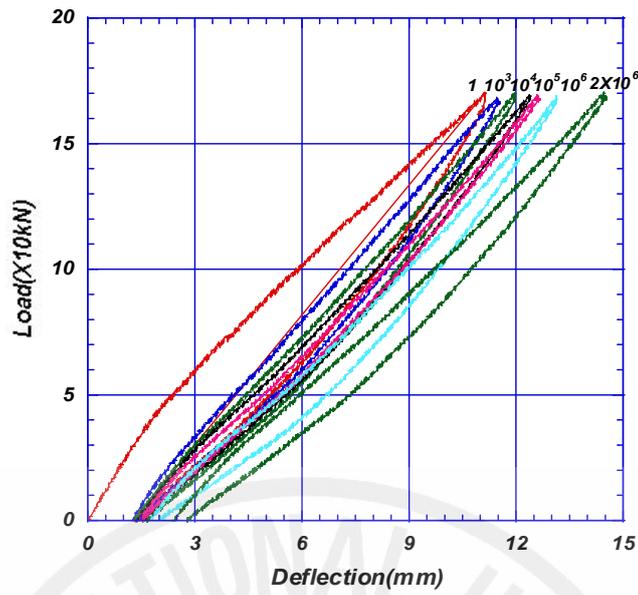


Fig. 4.11 Load-deflection curves with the number of cycles(RF70-2)

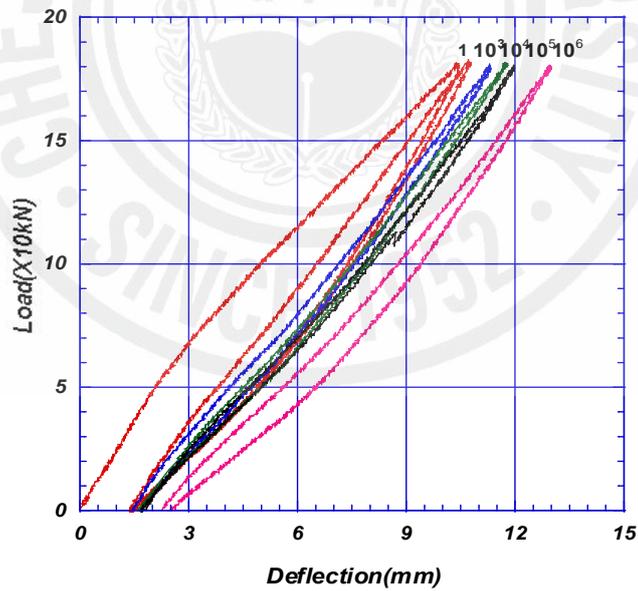


Fig. 4.12 Load-deflection curves with the number of cycles(RF75)

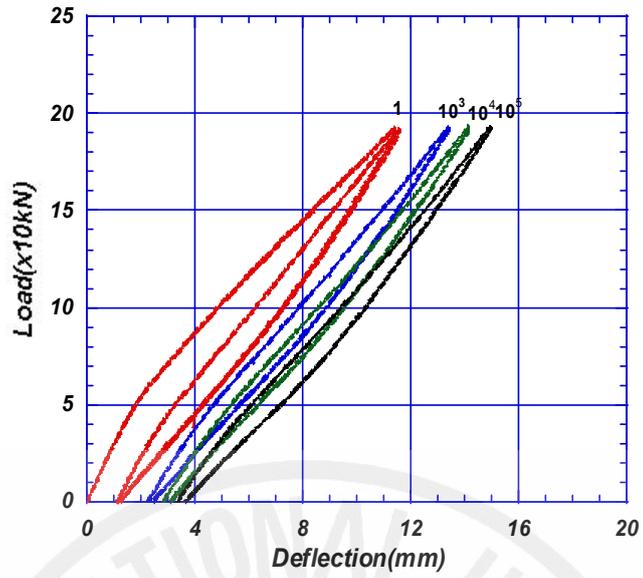


Fig. 4.13 Load-deflection curves with the number of cycles(RF80)

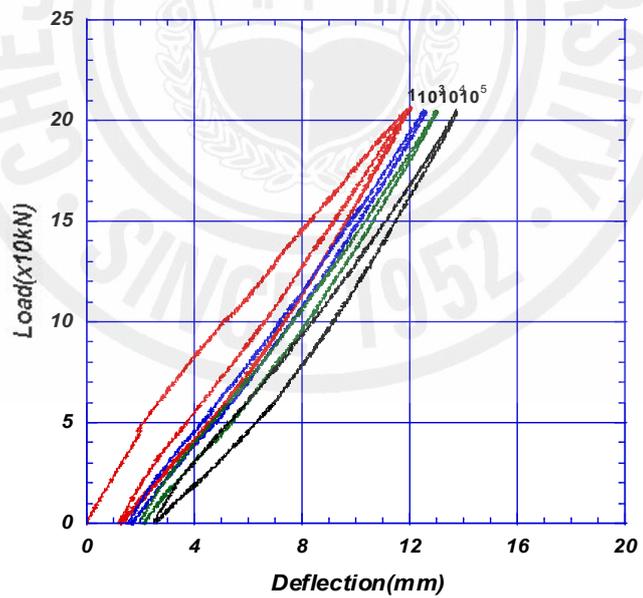


Fig. 4.14 Load-deflection curves with the number of cycles(RF85)

## 2) 반복횟수에 대한 변형률 관계

Fig. 4.15~4.19는 FRP 긴장재로 외부 보강된 보의 반복횟수와 변형률의 관계를 나타낸 것이다. FRP 긴장재는 반복횟수에 따라 최대 하중일 때 변형률이 미세하게 증가하였고 내부 철근과 콘크리트의 변형률은 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 반복횟수에 따라 잔류 변위량이 증가하여 최대하중일 때 변형률이 감소한 것이라 판단된다. 변형률은 항복까지 도달하지 않았으며 특히 FRP 긴장재의 경우 반복횟수에 대한 변형률 증가가 매우 작아 피로에 대해 안전하다고 판단된다. 다만 내부 인장 철근의 경우 변형률 변화가 거의 없으나 응력 집중현상이 생기는 부분에서 취성과파괴를 일으키는 것을 확인 할 수 있었다.

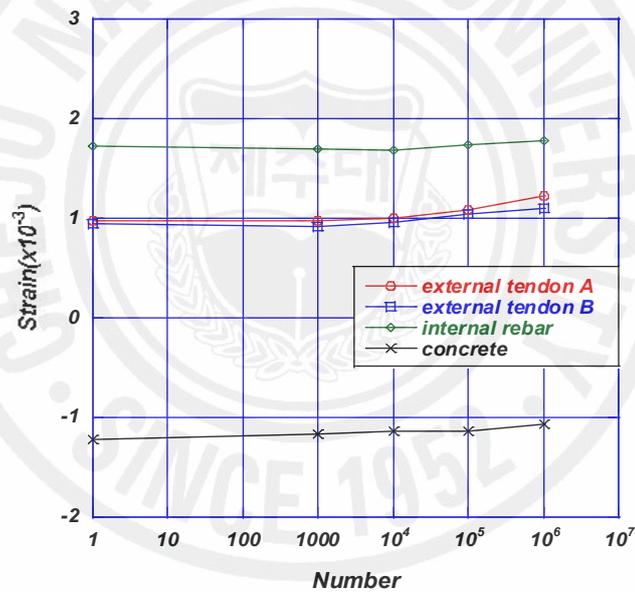


Fig. 4.15 Relationship of strain and the number of cycles(RF70-1)

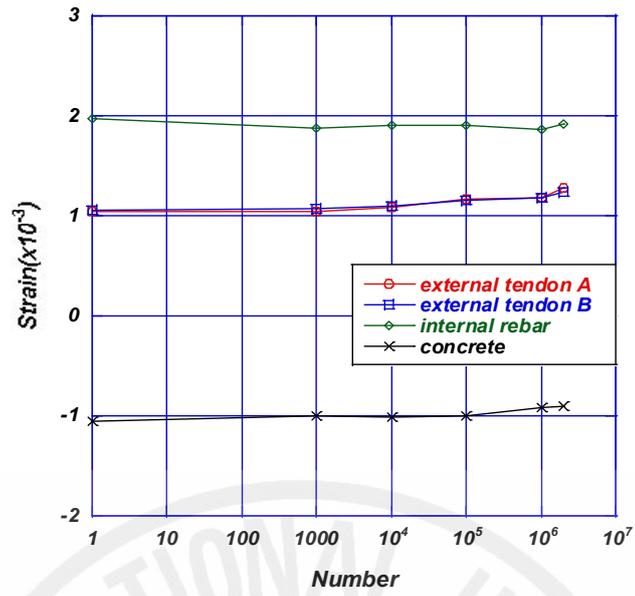


Fig. 4.16 Relationship of strain and the number of cycles(RF70-2)

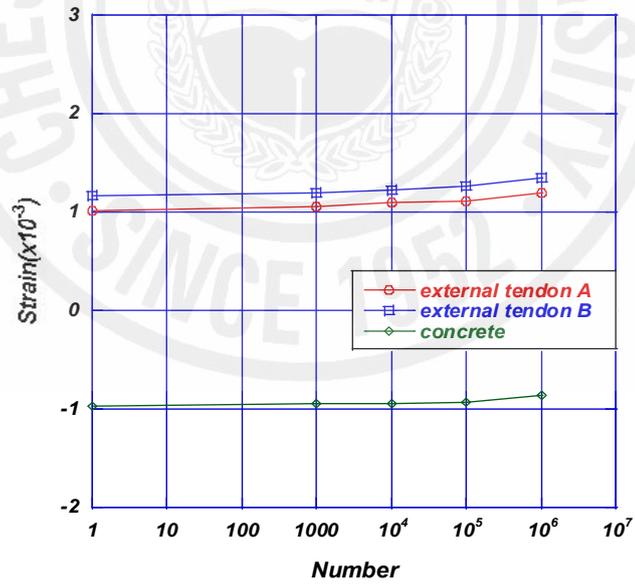


Fig. 4.17 Relationship of strain and the number of cycles(RF75)

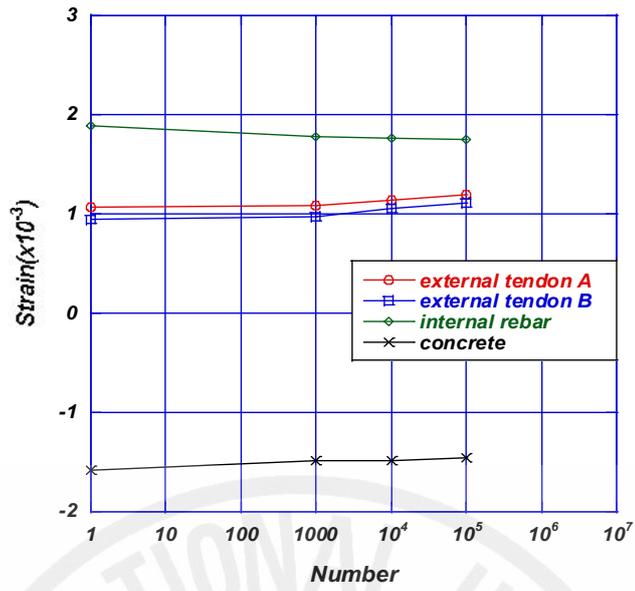


Fig. 4.18 Relationship of strain and the number of cycles(RF80)

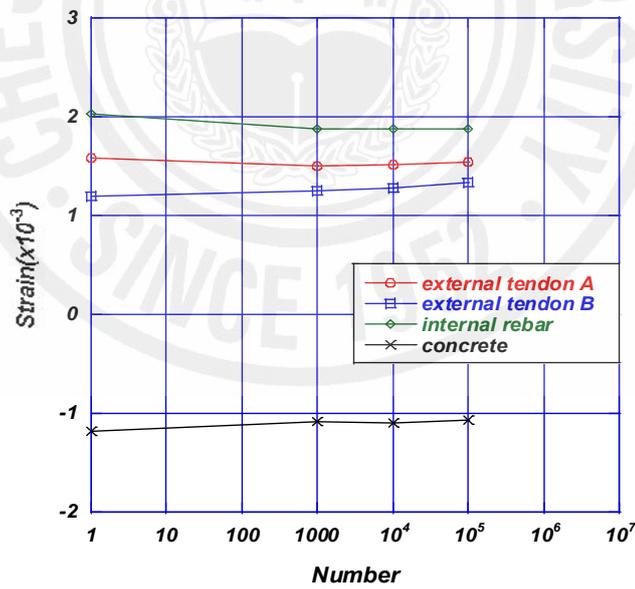


Fig. 4.19 Relationship of strain and the number of cycles(RF85)

### 2.1.3. Steel 긴장재로 외부 보강된 시험체(RS70 시험체)

최대하중이 70%인 RS70 시험체는 하중 범위를 FRP 긴장재로 외부 보강된 보의 철근 항복 하중의 50%~70%인 120kN ~ 168kN 사이를 sine파로 3Hz의 주기로 실시하였다.  $10^0$ ,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $2 \times 10^6$ 에서 반복 하중을 멈추고 정적테스트를 실시하여 처짐, 잔류 변위량, strain gage의 변형률을 각각 측정하였다.

같은 하중의 RF70 시험체보다 초기 처짐 속도가 빠르게 진행 되었으며 200만 번까지 피로 파괴를 보이지 않았으며 피로 실험 후 정적 실험을 실시하였다. Fig. 4.20은 200만번의 반복하중을 받은 RS70 시험체와 정적실험을 한 RS 시험체의 하중-처짐도를 비교한 그래프이다. 200만 번의 반복하중을 받은 시험체는 반복하중을 받지 않은 RS 시험체보다 균열로 인한 초기 강성에 차이를 보이며 극한 강도는 약간 감소하였으나 연성이 RS 시험체와 비슷한 거동을 보였다. Fig. 4.21은 RS70 시험체의 정적 실험 모습이며, (a) 균열 모습, (b) 정적실험에서 콘크리트 압축파괴 모습을 나타낸 것이다.

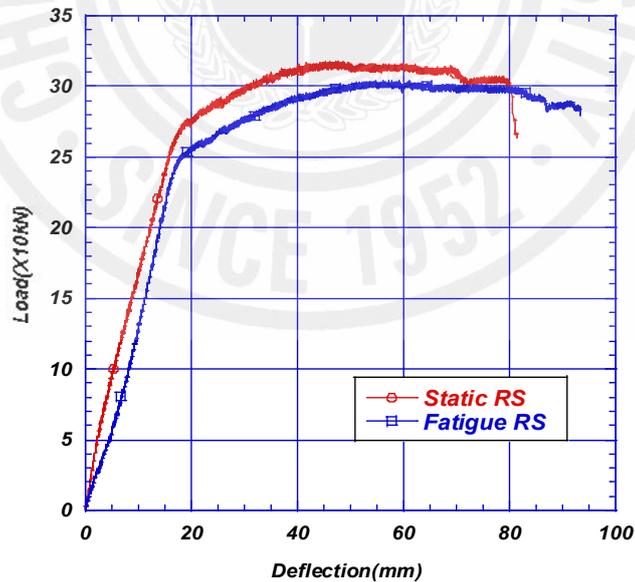
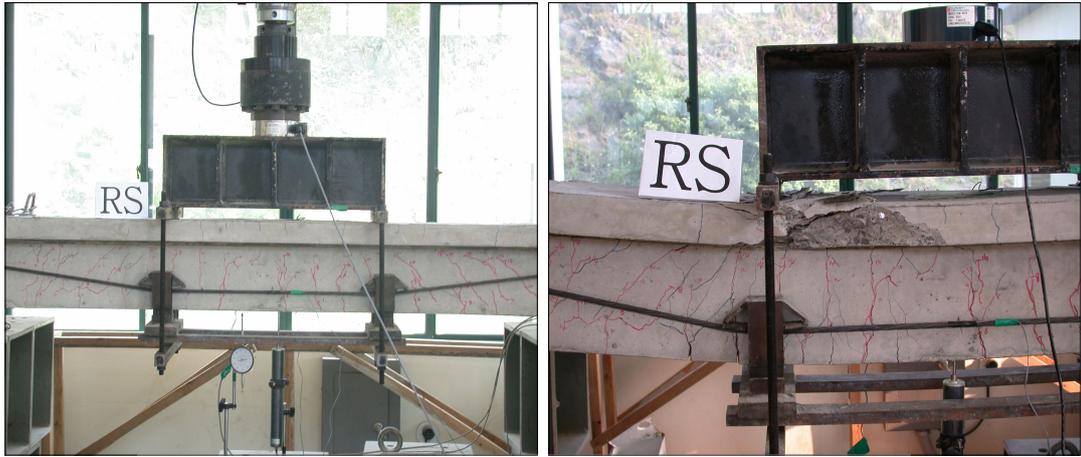


Fig. 4.20 Load-deflection curves of RS and RS70 specimens



(a) Crack development (b) Concrete compression failure in static test

Fig. 4.21 Real view of RS70 specimens

1) 반복횟수에 대한 보 중앙부의 처짐의 관계

Fig. 4.22는 반복횟수에 대한 보 중앙부 처짐의 관계를 나타낸 것이다. 반복횟수에 따라 잔류 변위량이 생겼으며 반복 횟수가 증가 할수록 잔류 변위량이 증가하였다. 에너지 손실 역시 반복횟수의 증가와 함께 증가하였다.

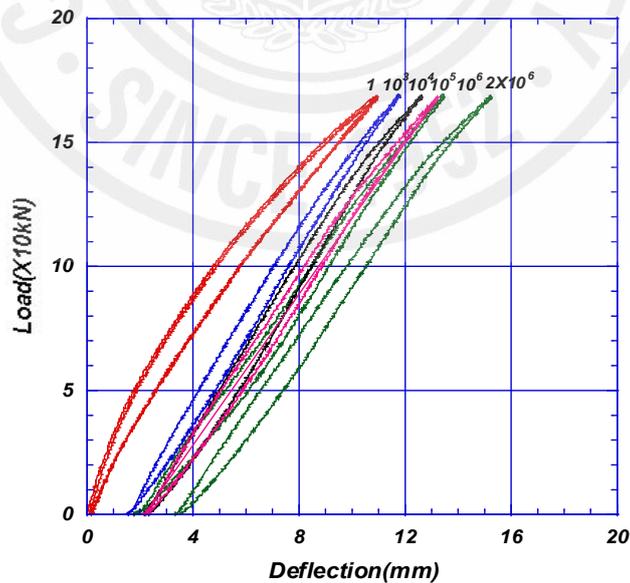


Fig. 4.22 Load-deflection curves with the number of cycles(RS70)

2) 반복횟수에 대한 변형률의 관계

Fig. 4.23은 반복횟수에 대한 변형률을 나타낸 것인데, 반복횟수에 따른 변형량 증가가 거의 없음을 알 수 있다.

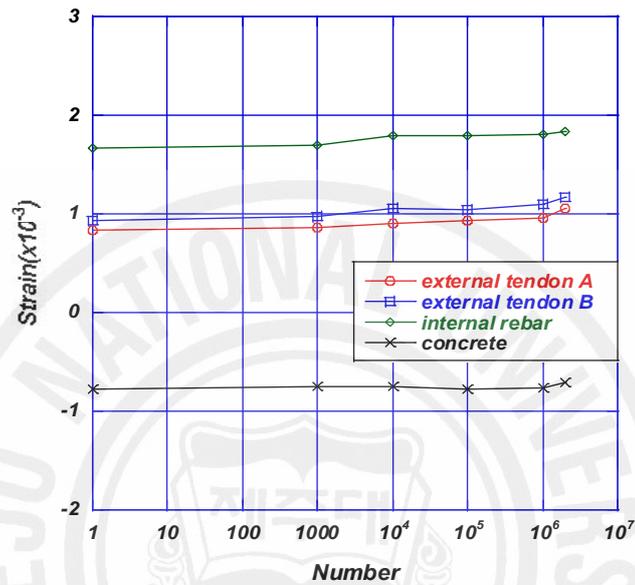


Fig. 4.23 Relationship of strain and the number of cycles(RS70)

## 2.2. 반복 횟수에 대한 균열성장과 파괴형태

Fig. 4.24~4.30은 시험체의 반복횟수 증가에 따른 균열성장과 파괴양상을 나타내었다. 모든 시험체의 균열 형태는 초기 정적하중으로 인하여 휨 균열이 발생하였고 외부 보강과 전단 보강 철근의 영향으로 사인장 균열은 발생하지 않았다. 모든 시험체에서 정적하중으로 인해 발생한 균열이 반복횟수가 증가함에 따라 점차 진전하여 피로파괴의 주요 인자인 주 균열로 성장하였으며 하중이 집중되는 deviator 부분에서 파괴가 주로 발생하였고 철근이 절단과 함께 갑작스럽게 파괴되었다. 파괴가 일어난 보의 균열은 플랜지 부분까지 진행된 것을 확인할 수 있었다. 균열이 발생형태나 진전과정은 정적하중을 받는 보의 경우와 비슷하였으며 피로 실험도중 하중을 제거하면 미세균열은 상당부분 복원이 되는 것을 볼 수 있었다. 보강 시험체의 경우는 반복하중으로 인하여 철근이 파단되더라도 시험체가 갑작스럽게 파괴되지 않아 구조체로서의 기능을 완전히 상실하지는 않았다. 파괴된 시험체를 살펴보면 파괴를 일으킨 보의 균열 폭은 1.5~5mm로 상당히 컸으며, RF70-1 시험체의 경우 인장 철근의 위치와 같은 곳에서 발생한 가로 방향의 균열에 의해 콘크리트와 철근의 부착 파괴로 이어졌고, RF75, RF80, RF85 시험체는 deviator 부분에서 인장철근이 파단되었다.

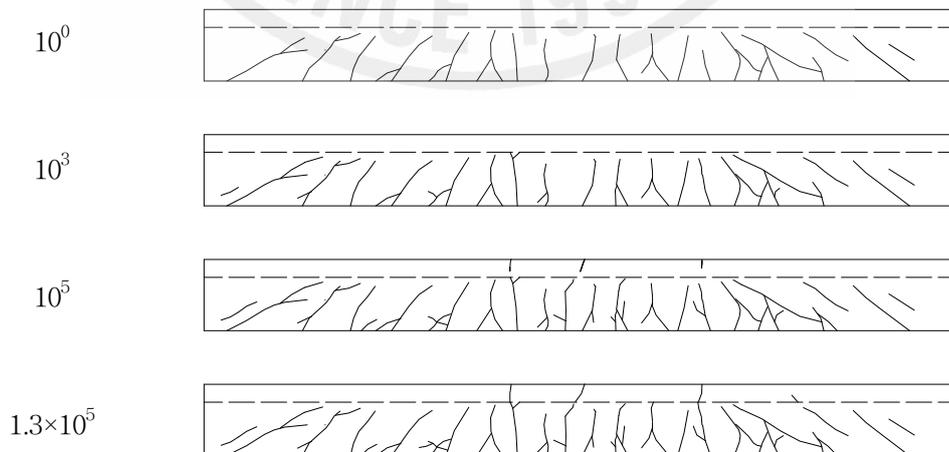


Fig. 4.24 Crack development pattern with the number of cycles(RU70)

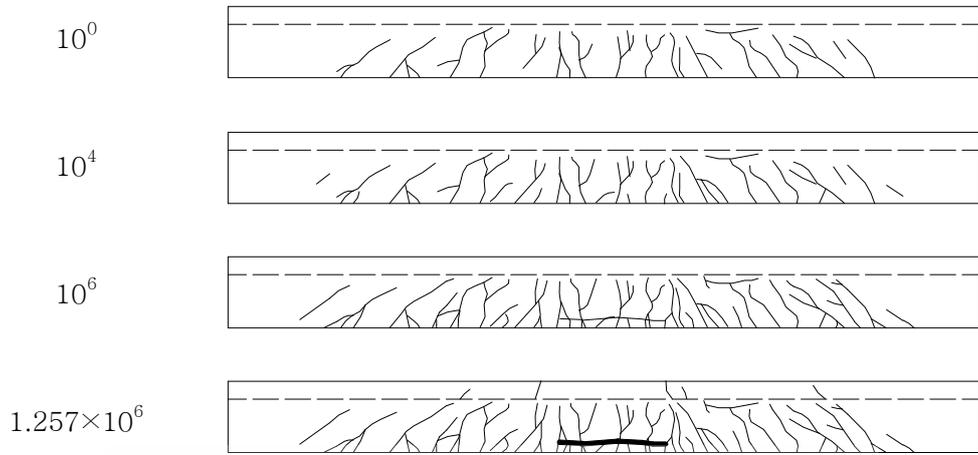


Fig. 4.25 Crack development pattern with the number of cycles(RF70-1)

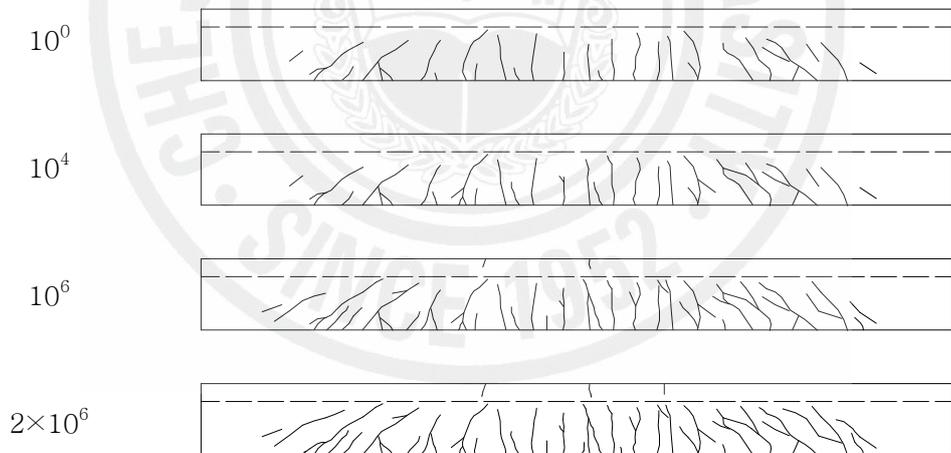


Fig. 4.26 Crack development pattern with the number of cycles(RF70-2)

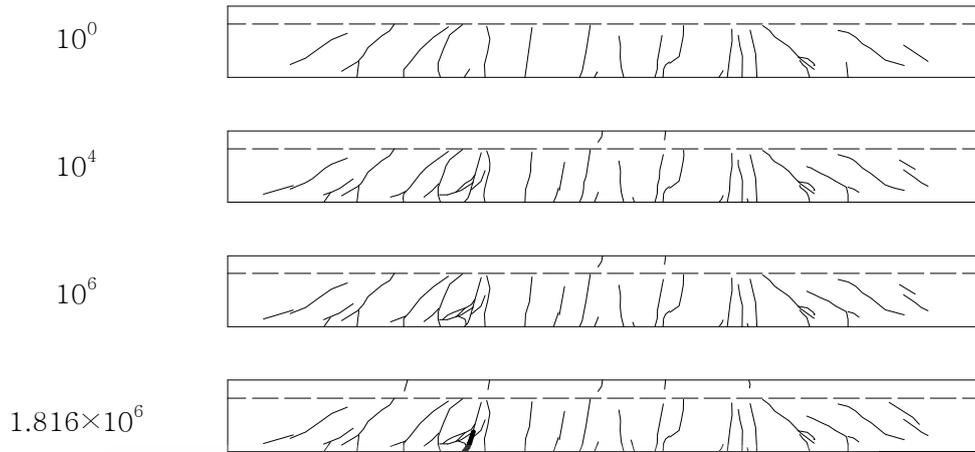


Fig. 4.27 Crack development pattern with the number of cycles(RF75)

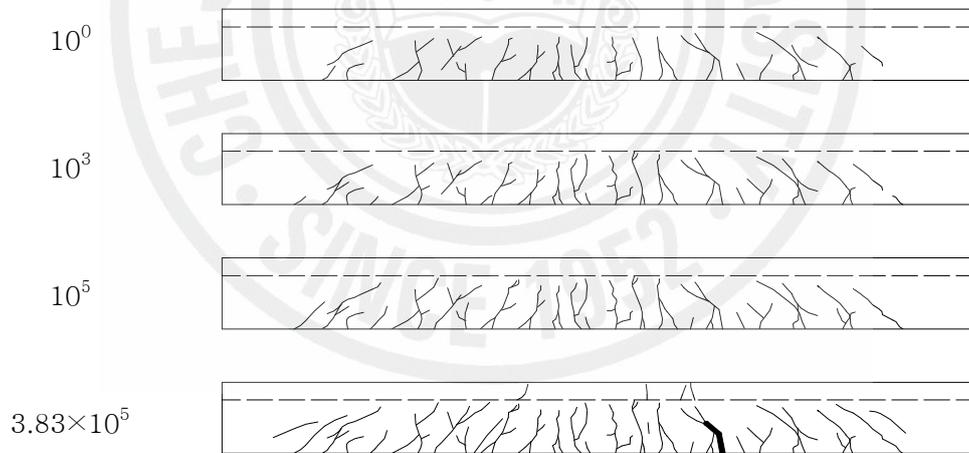


Fig. 4.28 Crack development pattern with the number of cycles(RF80)

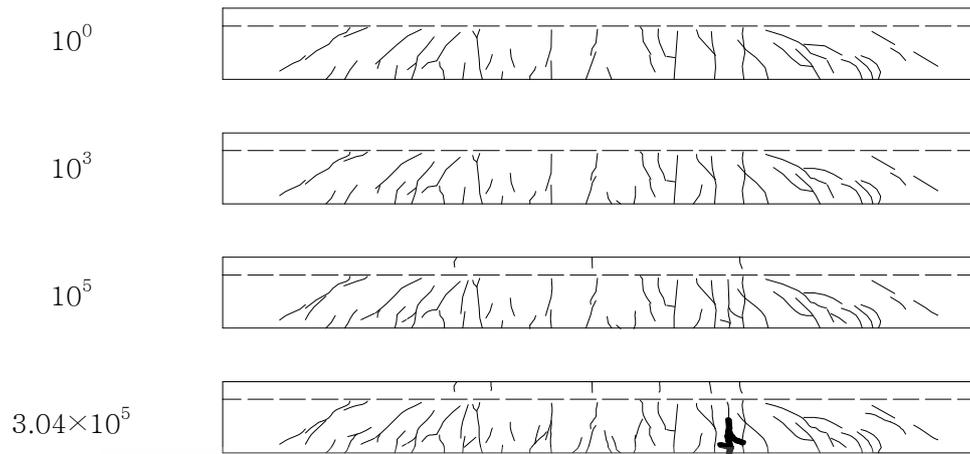


Fig. 4.29 Crack development pattern with the number of cycles(RF85)



Fig. 4.30 Crack development pattern with the number of cycles(RS70)

### 2.3. 피로강도와 S-N 선도

콘크리트 구조물의 구성 재료인 콘크리트와 강재는 정적강도 이하의 반복하중 하에서 파괴된다. 이것을 피로파괴라 하고 이와 같은 현상을 재료의 피로라고 부른다. 콘크리트와 강재의 피로과정은 미세균열의 발생과 균열성장 그리고 국부적인 미세균열의 발생 전과과정인 것을 알 수 있으나 발생 기구에 대해서는 아직 불명확한 점이 많고 실험적으로 피로강도를 검토하는 경우가 많다.

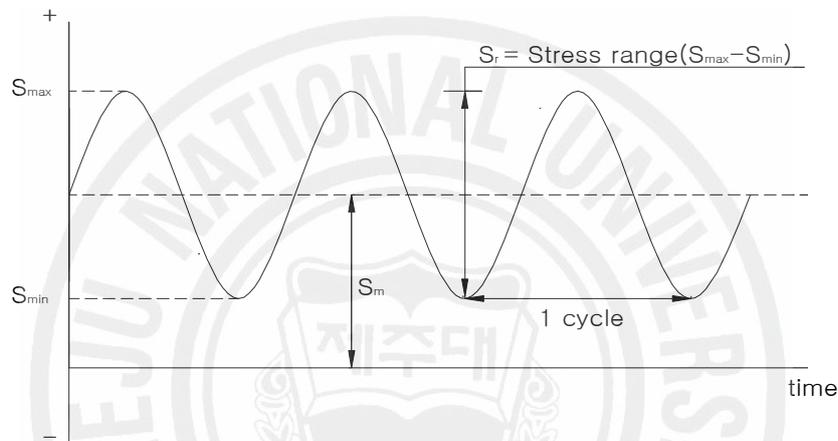


Fig. 4.31 Repeated stress

보통 재료의 피로실험은 Fig. 4.31과 같이 일정크기의 반복응력( $S$ )을 가 했을 때 재료가 피로파괴 될 때까지의 반복횟수( $N$ )를 측정하고 이와 같은 관계를 Fig. 4.32와 같이 나타낸다. 이것을 S-N곡선이라 부른다. 그림에서 a와 c는 반복횟수의 증가에 따른 콘크리트 피로강도의 감소를 보여주고 있다. 반복 횟수  $10^2 \sim 10^7$  사이에서 거의 선형적으로 나타나며 최대, 최소 응력이 범위가 클수록 기울기가 급해짐을 알 수 있다. c는 파괴 확률 50%를 나타내는 평균값이고 파괴 확률이 80%일 때가 b이며 5%일 때가 d 곡선을 나타내고 있다.

일정 반복응력의 크기는 최대응력( $S_{max}$ ), 최소응력( $S_{min}$ ), 평균응력( $S_m$ ), 응력진폭( $S_r$ )중에서 2가지를 정하면 좋다. S-N곡선에서 종축에 반복응력  $S$ 는 응력을 반복함에 따라 발생하는 피로현상이기 때문에 응력진폭( $S_r$ )의 크기를 얻는 것이 많다. S-N곡선에서 나타난 바와 같이 반복하중 진폭이 작으면 피로수명은 크게

된다. 금속재료는 피로강도를 가지지만 콘크리트는 피로강도를 가지지 않기 때문에 미리 반복횟수를 정하고 이에 대한 최대응력을 피로한도라 정하고 있다. 여기서 어느 특정의 반복 횟수에서 견딜 수 있는 최대응력을 피로 강도(Fatigue strength)라고 부르고 무한 횟수의 반복응력에 견딜 수 있는 한도를 피로한도 (Fatigue limit) 또는 내구한도(Endurance limit)라고 한다.

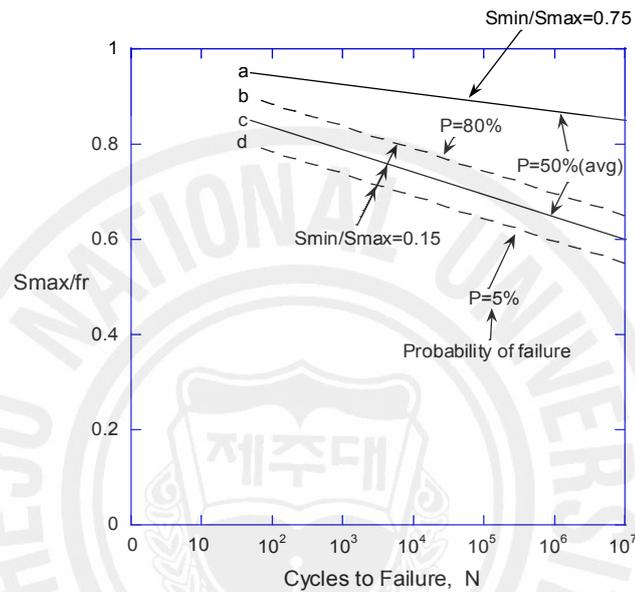


Fig. 4.32 Fatigue strength of plain concrete beams

피로한도는 응력집중이 없는 평활한 응력상태의 금속재료에서는 볼 수 있으나 콘크리트에서는 반복횟수가 1,000만회의 범위 내에서는 아직 피로한도가 확인되지 않고 있다. ACI committee 215에 따르면 반복횟수가 증가할수록 콘크리트의 피로강도는 감소한다고 되어있다. 위 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트의 S-N 곡선은 반복횟수가  $10^2 \sim 10^7$ 의 범위에서 거의 선형적임을 알 수 있다. Fig. 4.33에서 압축, 인장, 휨 강도에서 100만회에 대한 보통콘크리트의 피로강도는 최소응력이 정적극한강도의 15%라면 피로파괴를 일으키는 최대하중은 정적극한하중의 57%정도라고 한다.

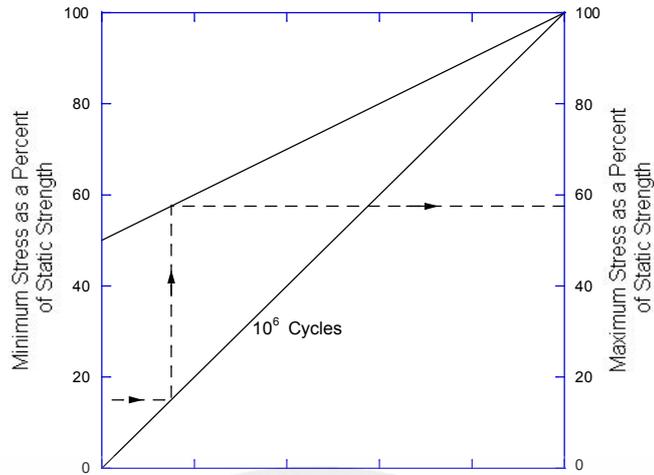


Fig. 4.33 Fatigue strength of concrete in tension, compression, and flexure

피로실험은 일반적으로 주어진 반복횟수에 저항할 수 있는 정적극한하중의 비율로 나타내고 반복응력과 반복횟수와 관계로서 나타낸다. 콘크리트의 피로 파괴에 있어서 응력의 수준은 응력-피로수명 곡선으로 나타내며 종축은 응력을, 횡축은 파괴 시까지의 반복횟수를 대수눈금으로 나타내게 된다.

콘크리트 구조물에서의 피로한계는 각국 기준에 따라 약 100만회~200만회 일 때 경우를 나타내고 있으며 일반적으로 철근 콘크리트의 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적강도의 약 50~60%인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 200만회를 피로한계로 가정하였다. Fig. 4.34는 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 S-N곡선을 나타낸 것으로 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보는 철근 항복강도의 75~85%에서 파괴되었고 S-N곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 철근 항복강도의 74%전후라고 판단된다. FRP 긴장재로 외부 보강하면 피로저항능력이 증가되어 피로한계와 피로수명을 실질적으로 증가시켜 주는 효과를 나타냈다.

피로실험결과 부재의 대한 피로강도 관계식은 지수형태의 함수로 나타낼 수 있으며 적용된 작용응력범위와 반복횟수의 관계식은 다음과 같다.

$$Y = B \times \log(X) + A$$

여기서 A와 B는 실험에 의하여 결정되는 상수이며, 위의 식과 같은 형태로 바꾸어 실험결과로부터 얻은 결과 값을 철근 항복하중에 대한 피로하중 백분율(Y)인 피로강도와 피로수명(X)의 관계를 회귀분석하면 다음과 같은 피로강도 추정식을 얻을 수 있다.

$$Y = 0.92874 - 0.10887 \log(X) \quad R = 0.9193$$

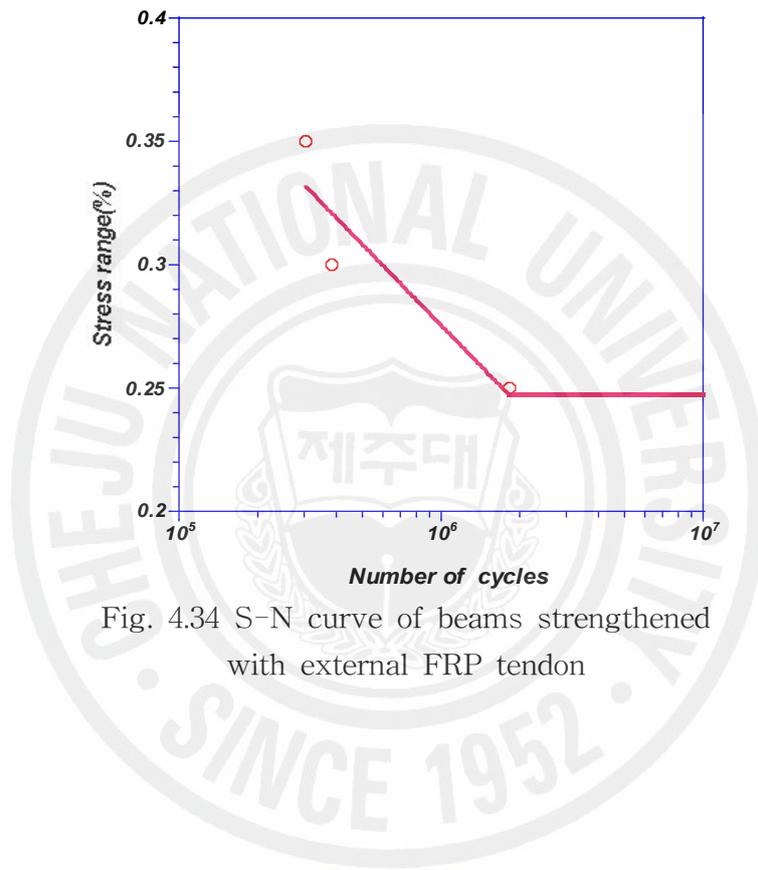


Fig. 4.34 S-N curve of beams strengthened with external FRP tendon

## 2.4. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 확률해석

### 2.4.1. 개요

본 연구에서는 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 하중비에 따른 영향을 알아보고 피로수명 예측과 피로 수명 분포 특성을 고찰하기 위해 피로 실험을 수행하였다. 실험결과를 피로해석에 적합한 것으로 알려진 Weibull 분포에 적용하여 실험과 확률해석에 의한 회귀분석식 및 피로강도를 알아보았다.

### 2.4.2. Weibull 분포

대수정상분포함수(lognormal distribution function)가 수학적 편의성 때문에 금속피로에 널리 사용되었지만, Weibull분포가 피로거동에 대한 물리적 현상을 잘 설명할 수 있기 때문에 피로해석에 적합하다고 알려졌다. Weibull분포를 콘크리트의 피로에 적용하는 연구 실적은 극히 적으나 피로거동예측에 적합한 것으로 알려져 있다.

Weibull분포의 확률밀도함수(PDF)  $f_N(n)$ 와 누적분포 함수(CDF)  $F_N(n)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{PDF} : f_N(n) = \frac{k}{u-u_0} \left(\frac{n-n_0}{u-u_0}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{n-n_0}{u-u_0}\right)^k\right] : n \geq n_0 \quad (1)$$

$$\text{CDF} : F_N(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n-n_0}{u-u_0}\right)^k\right] : n \geq n_0 \quad (2)$$

여기서,  $u$ = 파괴 확률 63.2%일 때 특성 수명(Characteristic life parameter)

$k$ = 형상 변수(Shape parameter)

$n_0$ = 최소 수명(minimum life)

$n$ = 시험체의 수명(specimen life)

Weibull 분포의 위험함수(hazard function)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_N(n) = k \left( \frac{n - n_0}{u - u_0} \right)^{k-1} : n \geq n_0 \quad (3)$$

Weibull 분포도의 일반적인 확률밀도함수에서 피로수명의 폭은 특성치  $u$ 에 의하여 결정되며 기울기는 형상계수  $k$ 에 의하여 결정된다. Weibull 분포에서 변수는  $u, k, n_0$ 이지만  $n_0=0$ 인 경우가 피로 거동예측에 더 적합하다고 알려져 있다. 매개변수  $k, u$ 는 여러 가지 방법으로 추정할 수 있지만, 본 연구에서는 피로 실험결과의 S-N선도를 근거로 추정하였다.

피로실험결과로부터 응력과 반복횟수에 대한 회귀분석식은  $N \times S^A = B$  와 같으며, 피로수명  $N$ 이 Weibull분포를 따를 때, 매개변수  $k, u$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k^2 = \frac{\pi^2}{6s^2}, \quad \ln u = \frac{0.5772}{k} + \ln(B \times S^{-A}) \quad (4)$$

여기서,  $s$ 는  $\ln N$ 의 추정에 대한 표준편차,  $A$ 와  $B$ 는 실험상수,  $S$ 는 하중 범위이다.

주어진 응력수준에 대한 평균피로수명은 식(4)로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[N] = u \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = B \times S^{-A} \times \exp\left[\frac{0.5772}{k}\right] \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5)$$

설계수명  $N_D$ 는 피로파괴가 일어날 확률을 최소화시킬 수 있도록 정해져야 하며, 파괴확률은  $p_f = P[N < N_D] = F_N(n)$ 이므로 누적분포함수와 동일하다. 따라서 파괴확률  $p_f$ 에 대응하는 설계수명  $N_D$ 는 식(2)로부터 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$N_D = u \left[ \ln \left( \frac{1}{1-p_f} \right) \right]^{1/k} \quad (6)$$

요구되는 평균피로 수명은 식(5) 및 식(6)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[N] \cong N_D \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) (p_f)^{-1/k}, \quad N_D = \frac{E[N]}{\phi} \quad (7)$$

여기서,  $\phi$ 는 설계수명에 대한 안전계수로 해석될 수 있다.

#### 2.4.3. FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 확률 해석 결과

실험결과 FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 S-N선도에 의한 회귀 분석식은 다음과 같다.

$$S = N^{-0.16238} \times 2.5753 \quad \text{또는} \quad N_f S^{6.158} = 338.749$$

Weibull분포의 계수를 구하기 위하여 회귀 분석에 의한 결과와 실험에 의한 결과는 Table 4.3과 같다

Table 4.3 Results of the regression analysis and the experiment

하중범위	회귀 분석 결과값	실험값
50%~75%(25%)	1,727,283	1,816,000
50%~80%(30%)	562,038	383,000
50%~85%(35%)	217,524	304,000

Table 4.3으로부터 FRP 긴장재로 외부 보강된 시험체의 응력범위 25%의 표준 편차  $s$ 는 0.035이고 형상변수  $k$ 는 36.21, 응력 범위 30%의 표준 편차  $s$ 는 0.271

이고 형상변수  $k$ 는 4.73, 응력범위 35%의 표준 편차  $s$ 는 0.237이고 형상변수  $k$ 는 5.42이다. 실험상수  $A=6.158$ ,  $B=338.749$ 이다.

Table 4.4는 각 응력수준별 특성치와 식(5)에 의한 평균수명을 나타내었다.

Table 4.4 Characteristic value and average life

$\Delta S$	0.35	0.30	0.25
$E(N)$	214,388	562,604	1,554,962
$u$	241,973	634,993	1,755,036

Fig. 4.35는 S-N-P 선도를 나타낸 것이다. 파괴확률이 5%, 50%, 90%일 때의 확률해석결과와 실험에 의한 결과를 나타내었다.

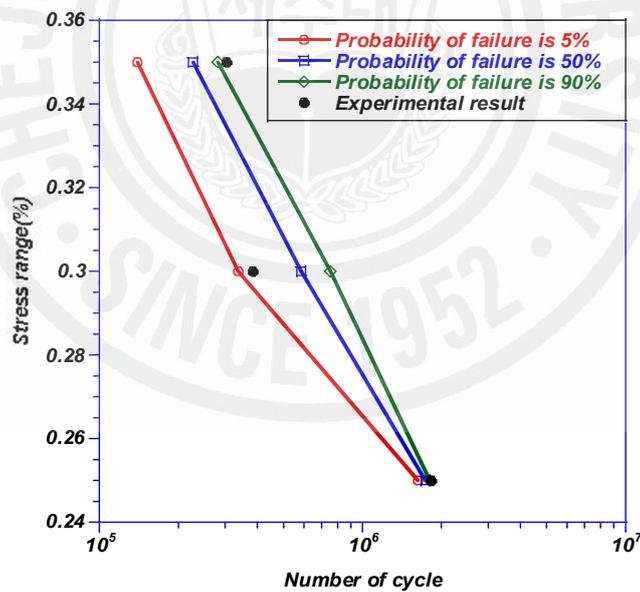


Fig. 4.35 S-N-P curves

## V. 결 론

본 연구에서는 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로거동분석을 통하여 반복하중에 대한 외부 긴장 공법의 안전성과 적정성을 파악하고자 하였다. 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보에 대한 피로 실험을 분석한 결과 FRP 외부 긴장 공법은 FRP 긴장재, deviator에서의 절곡부, 정착장치 등에서 피로에 대한 안전성을 가지고 있는 것으로 확인되었다.
2. FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보에 작용하는 반복하중은 FRP 긴장재보다 철근콘크리트 보 자체에 대한 피로의 영향이 구조부재의 피로 거동을 지배하였다.
3. FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로 파괴 형태는 FRP 긴장재에 관련된 피로 파괴가 아니라 내부 인장 철근의 인장 피로 파괴나 철근과 콘크리트의 부착 피로 파괴를 나타내었다. 이는 외부 FRP 긴장재가 비 부착되어 있어 반복 하중에 의한 응력 증가량이 적어 피로 파괴에 대해 보다 안전한 것으로 판단된다.
4. 피로 실험 결과 FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보는 내부 인장 철근 항복강도의 75%~85%에서 파괴되었으며 S-N곡선으로부터 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 인장철근 항복강도의 약 74%에 해당하였다.
5. FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 반복하중에 대한 처짐과 잔류 변위량은 반복 횟수의 증가에 따라 증가하였으며 최대하중이 높을수록 처짐과 잔류 변위량도 큰 값을 나타내었다.
6. FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보는 반복 하중에 대해서 오히려 내부 인장철근에 관련된 피로 파괴가능성이 높기 때문에 이에 관련하여 FRP를 내부 부착 긴장재로 사용할 경우 그 피로 특성에 대한 연구가 필요하다.

## VI. 참고문헌

- 강보순, 심형섭, 황성춘, “사용반복하중에 대한 철근콘크리트 부재의 피로거동”, 한국콘크리트학회 2001년도 가을 학술발표회 논문집, vol.13 No. 2, pp. 1161~1166.
- 김진근, 김윤용, “고강도콘크리트의 피로거동에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 논문집, Vol.5 No.4, 1993.12, pp. 179~187.
- 심중성, 배인환, 박성재, “손상된 철근콘크리트보의 보강 후 피로거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 16권 제 I-2호, 1996.3, pp. 135~142.
- 심중성, 배인환, 장상훈, “강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 철근콘크리트 보의 확률론적 피로해석,” 대한 토목학회 논문집, 제 18권 제 I-4호, 1998.7, pp. 437~445.
- 심중성, 황의승, 배인환, 장상훈, “강판 및 CFS로 보강된 R/C보의 피로거동 특성 비교 연구”, 한국콘크리트 학회 1997년도 봄 학술발표회 논문집, Vol.9, No.1, pp. 527~533.
- 오병환, “콘크리트의 피로강도 및 피로 신뢰성해석에 관한 이론 및 실험연구”, 대한 토목학회 논문집, 제 5권 제 4호, 1985.12, pp. 113~118.
- 장동일, 채원규, 손영현, “강섬유 보강콘크리트이 휨 피로거동에 관한 연구”, 콘크리트 학회 논문집, 제 4권, 1호, 1992.3, pp. 81~87
- 한국도로공사 도로 연구소, “ 콘크리트 빔 구조물의 수명예측과 피로 거동에 관한 연구(Ⅱ),” 연구보고서, 1997.12, pp. 16~22.
- ACI 440.3R-04, “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers(FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”, 2004, pp. 20~22
- ACI 215R-74, “Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading”, 1992. pp. 2~24

- ASTM STP 627, "Fast Fracture and Crack Arrest", American Society For Testing and Material, 1990, pp.294~300
- Alliche, A. and Francois, D., "Fatigue Damage of Concrete", Fracture of Concrete and Rock, eds. S. P. Shah and S. E. Swartz, Spring-Verlag, New York, 1989, pp.88~95
- Benjamin J.R. and Cornell C.A., "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers", McGraw Hill Book Co., Inc., 1970, pp. 273~285
- Chang T. S. and Kesler C. E., "Static and Fatigue Strength in Shear in Shear of Beams with Tensile Reinforcement", ACI Journal, Vol.29, No.12, June, 1958, pp. 1033~1057
- Collins J. A., "Failure of Materials in Mechanical Design", John Wiley and Sons, Inc., pp.180~184, pp. 319~359
- Hordijk, Dirk A. and Reinhardt, Hans W., "Growth of Discrete Cracks on Concrete Under Fatigue Loading", Proceedings Toughening Mechanisms in Quasi-Brittle Materials, ed. S. P. Shah, NATO Advanced Research Workshop, Evanston, IL, July, 16-20, 1990, pp. 553~568
- JSCE-E 535-1995, "Test Method for Tensile Fatigue of Continuous Fiber Reinforcing Materials", pp. 106~108
- JSCE-E 535-1995, " Commentary on the Test Method for Tensile Fatigue of Continuous Fiber Reinforcing Materials", pp. 143~148
- K. Iwamoto, Y. Uchita, N.Takagi, and T. Kojima, "Flexural Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams Using Aramid-Fiber Tendons", SP138-39, pp.509~523
- Oh, Byung Hwan, "Fatigue-Life Distribution of Concrete for Various Stress Levels", ACI Mat, Journal, Vol.88, No.2, Mar.-Apr.1991, pp.122~128
- Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transactions of ASCE, Journal of Basic Engineering, V.85, 1963, pp. 528~534

## 감사의 글

본 논문을 쓰기까지 지난 2년간 아낌없는 지도와 사랑으로 보살피 주신 박상렬 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 학부 때부터 대학원 생활을 하는 동안 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실에서 같이 생활을 하면서 많은 조언과 가르침을 주신 연구실 만형 김창훈 형에게 감사의 말씀을 드립니다. 그 동안 같이 생활하면서 실험준비부터 실험을 마칠 때까지 짜증한번 내지 않고 스스로 찾아와 도와준 연구실 후배이자 이제는 친구 같은 경남, 성협, 경태에게도 감사의 말을 전합니다. 연구실 생활에 열심히 적응중인 막내 용현이에게도 감사의 말을 전합니다.

대학원 생활을 같이 한 승현이 형, 도형이 형, 행식이 형, 우열, 상봉, 지원, 종완이 형, 웅규, 승호, 카오에게도 감사의 말을 전합니다. 대학원 동기이자 실험을 할 때부터 논문을 마칠 때까지 항상 옆에서 많은 용기와 힘을 실어 준 사랑하는 향혜에게도 고맙고 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 지난 2년 동안 고민을 들여주고 아낌없는 격려를 해준 조교 태혁이 형에게도 감사의 말씀을 드립니다.

대학 생활 동안 함께 한 길용이 형, 진호 형, 희민이 형에게도 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 우리 우당과 친구들에게도 감사의 말을 전합니다. 열심히 공부하고 있는 근혁이에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 대학원 생활도 바쁘는데 나의 부탁을 들어준 현정, 형석에게도 감사의 말을 전합니다.

지금까지도 함께 했지만 앞으로도 나와 영원히 함께 했으면 하는 나의 영원한 친구들인 99동기들에게도 감사의 말을 전합니다. 특히, 바쁜 와중에도 부탁을 들어준 미화에게 감사의 말을 전합니다. 이제는 3인방이 됐지만 항상 나를 격려해주고 용기를 준 우석, 기혁아 고맙고, 선영, 민경이도 고맙다. 한 동네 살면서 자주 만나지 못했지만 항상 응원해준 원혁, 용호, 순일, 순철, 현구야 고맙다.

대학원 생활하는 동안 큰 아들 노릇도 제대로 못했는데 끝까지 공부할 수 있게 응원해준 부모님께 감사의 말씀을 드립니다. 사랑스런 동생 성철, 성탁, 서영,

지희에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 항상 관심을 가져 준 할머니, 큰 아버지, 큰 어머니, 경숙이 누나, 매형, 명숙이 누나, 성철이 형, 형수님, 성민, 수아, 작은 아버지, 작은 어머니, 제은, 수학, 외할머니, 큰삼촌, 작은삼촌, 외숙모, 동생들, 이모들에게도 감사드립니다.

2008년 1월

철근 콘크리트 구조연구실에서

