

## 상온스웨이징 나사 철근 이음한 철근콘크리트 인장부재의 피로거동

### Fatigue Behavior of Tensile RC Members Jointed by the Mechanical Coupler

정 영 화\*      박 용 석\*\*  
Jung, Yeong-Hwa      Park, Yong-Suk

#### Abstract

As material needs have been increasing with recent economic growth, it is a current tendency that the magnitude of load applied to structure has been rising. With improved technique of product materials, steel and concrete have been stranger than ever so the danger of fatigue damage increases as permanent action of repeated loads.

In case of deformed steel bars widely used in reinforced concrete structure, when they are product in factory, there will exist same parts connecting the steels. Such connections are easy to be weakened by permanent action of repeated loads. It is a real condition in Korea that there is lack of research of it.

As a result of estimating fatigue characteristic of Pressure Welded Joints with the steels that are oftenly used and produced in domestic it is showed that there are no remarkable difference in fatigue strength.

Because there is no detail which is refered in Civil Specification, this paper will be the basic data being added in later Specification.

키워드 : 피로거동, 기계적 이음, 철근콘크리트인장부재  
Keywords : *fatigue behavior, mechanical coupler, tensile RC member*

#### 1. 서론

철근콘크리트보에 대한 휨피로 실험자료는 많다. 보진재로서 압축부 및 인장부에 대한 피로거동을 밝히는 연구들은 많은 것이다.

일부에서 발표된 실험자료에 의하면, 허용응력이론을 적용한 경우 과대철근보인 경우에는 최대응력수준이 50%이상, 균형철근보인 경우에는 최대응력수준이 80%이상에서는 콘크리트의 압축피로파

괴에 의하여 보의 파괴가 지배되었다고 한다[1]. 이때는 단면의 휨압축영역내에서 응력의 재분배가 발생하기 때문에 중심축압축을 받는 무근콘크리트 시편의 피로실험자료를 철근콘크리트보에 그대로 적용하면 매우 안전측으로 피로수명을 평가할 수 있게 된다. 위에 언급한 이하의 응력에서는 철근의 인장피로에 의하여 일어나는 파괴가 매우 중요하다고 볼 수 있다.

철근콘크리트보의 피로거동은 휨에 의하여 피로 파괴가 발생하는 경우와 전단에 의하여 파괴가 발생하는 경우로 나눌 수 있다. 휨에 의해 파괴가 일어나는 경우는 철근비에 따라 그 파괴양상이 다르게 나타나며, 전단에 의하여 피로파괴가 발생하는

\* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

경우는 전단지간(a)과 유효길이(d)의 비(a/d)에 따라 그 파괴양상이 다르게 나타난다.

철근콘크리트보에 반복하중이 작용하는 경우 휨관열전단에서부터 중립축에 이르는 콘크리트의 인장부가 존재하기 때문에 초기 몇 cycle에서는 실제 철근의 응력, 변형률이 관열단면으로 계산한 이론적인 응력, 변형률보다 다소 적은 값을 나타내지만 반복하중의 재하횟수가 증가함에 따라서 인장부의 관열이 점차 증가하므로 피로하중에 의하여 발생하는 철근의 응력, 변형률은 관열단면으로 계산한 이론치에 접근하게 된다. 단면형상에 따라 초기에는 철근에 발생하는 응력이 상당한 차이를 보이지만 반복횟수가 증가함에 따라 철근의 피로응력은 점차 증가하여 일정한 값을 갖게 된다. 이러한 현상은 하중반복 횟수가 증가하여 중립축까지 관열이 발생하면 철근이 인장력을 모두 부담하게 되어 결국은 철근의 피로파괴에 의하여 과소철근콘크리트보의 파괴가 결정된다는 것을 나타낸다.

순수한 콘크리트만으로 제작된 부재에 인상을 가하면 최대 인장력에 도달한 후 콘크리트 부재는 관열영역이 확장되면서 인장저항력이 감소하게 되는데 이러한 감소현상을 인장연화(Tension Softening)거동 이라고 한다. 그러나 철근콘크리트나 PC부재에서는 관열이 발생될 때 관열과 관열사이 에 있는 손상되지 않은 콘크리트는 응력을 받지 않는 원상태로 되돌아가려고 하지만 철근에 의하여 억제되면서 콘크리트에는 인장지향 능력이 생기므로 복잡한 양상이 된다. 이와 같이 콘크리트와 철근사이의 상호작용으로 인하여 철근 콘크리트 부재에 생기는 강성의 증가현상을 인장강성 효과(Tension Stiffening Effect)라고 한다.

실제 콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 매우 작기 때문에, 철근 콘크리트 구조물의 강도해석 및 설계에 있어서 콘크리트의 인장영역은 보통 무시된다. 그러나 인장관열이 발생한 콘크리트도 구조 전체의 비선형 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 변형을 예측해야 되는 구조물에서는 인장강성 효과를 고려한 해석이 필요해 진다.

종래의 철근콘크리트부재의 설계와 해석방법은 콘크리트의 인장강도를 휘계산에서 무시하거나 인장응력의 전부를 인장철근이 부담하게 하는 방법이 주로 사용되어 왔다.(Ahn, 1995) 그러나, 철근 콘크리트부재의 실제거동을 고찰해보면 인장응력을 부담하는 요소는 철근과 콘크리트의 부착응력, 관열면 사이의 인장강성, 관열면내의 골재의 맞물림 효과, 철근의 다우웰 작용 등과 같은 재료적 비선형 특성이 복합적으로 작용함으로써 인장응력에 저항하게 되는 것을 알 수 있다.

이러한 재료적 비선형성과 하중이력에 대한 변형 및 거동 특성을 고려한 부재의 해석은 그 결과에 미치는 영향이 상당히 크며, 휨이나 인장응력을 주

로 부담하게 되는 교량이나, 휨부재의 정확한 변형과 거동을 중요시해야 하는 구조물에서는 인장강성을 고려한 해석의 중요성이 더욱 크다.

## 2. 실험

### 2.1 시험체

이 실험에 사용된 철근은 KS D 3504의 규정에 따른 철근 콘크리트용 봉강종 이형철근 SD30이며 항복강도 30~40kgf/mm<sup>2</sup>, 인장강도45~61kgf/mm<sup>2</sup>, 공칭지름19.1mm, 공칭단면적 2.865cm<sup>2</sup>, 공칭둘레 6.0cm, 단위부게 2.25kgf/m인 제원을 가지고 있는 호칭명 D19인 철근이다. 실험에 사용된 이음방법은 커플러를 이용한 기계적 철근이음방법 중 신기술 296호인 (주)부원BMS사의 상온 스웨이징 나사 이음을 이용한 철근이음공법을 사용하였다.



그림 1 시험체형상

콘크리트 내부에서 철근거동을 파악하기 위하여 그림2와 같은 철근콘크리트마를 제작하였다.



그림 2 철근콘크리트마의 형상

시험편제작에 사용한 콘크리트는 품질변동을 최소화하기 위해서 표준양생(20℃ ±3℃)을 실시하고 설계기준강도는 현재 콘크리트 구조물의 설계기준 강도로 많이 사용되고 있는 350kgf/cm<sup>2</sup>으로 하였으며, 배합설계는 표1과 같다.

표 1 콘크리트배합 설계표

설계기준 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	굵은골재 최대치수 (mm)	물-시멘트 비 (%)	잔골재율 (%)
350	13	44	50
단 위 량(kg/m <sup>3</sup> )			
물	시멘트	잔골재	굵은골재
180	400	728	1022

콘크리트 배합시 슬럼프 10cm, 공기량 2%가 측정되었고, 양생후 압축강도 358kgf/cm<sup>2</sup>, 휨강도 53.9kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

2.2 정착구

2.2.1 제작

철근직경 25mm까지 정착할 수 있도록 그림3과 같은 판형 및 원형 인장척을 제작하였다.

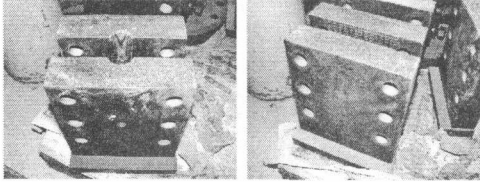


그림 3 인장척(Grip)

2.2.2 정착구보강

철근을 직접 정착해서 실험한 결과 시편이 인장척 부분에서 파단되는 현상이 일어났다. 이는 인장척에 의한 단면결손이 초기 결합부를 제공하는 것으로 판단되어진다. 피로시험시 피로강도를 평가하는데 있어 바람직한 파괴위치가 시편 중간부분임을 고려해 볼 때 직접정착에 의한 실험이 무의미하다고 판단되어 정착구 보강을 실시하게 되었다.

피로실험을 위한 철근시편은 정적실험에 대한 KS B 0802의 규정과 ASTM E466의 규정을 적용하여 시편중앙에서 피로파괴가 발생할 수 있도록 인장척부분의 응력집중을 최소화시키고 피로강도를 엄밀히 평가하기 위하여 철근시편에 정착구를 부착하여 실험시편을 제작하였다. 철근시편에 정착구를 설치하는 방법으로서 그림4와 같이 직접정착방법, 압접 및 용접에 의한 방법, 철판보강에 의한 방법, 금형에 의한 방법 및 에폭시정착구에 의한 방법을 적용하여 실험하였다.

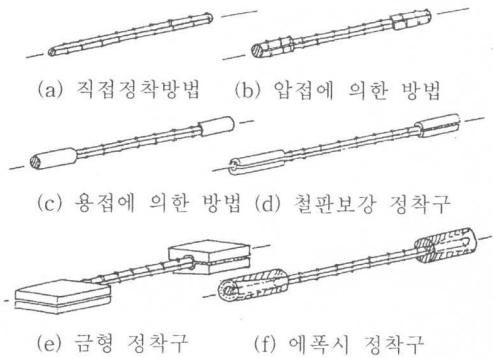
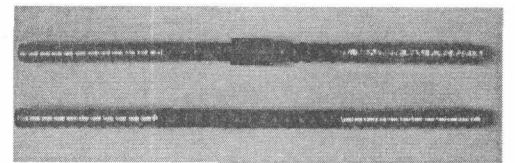
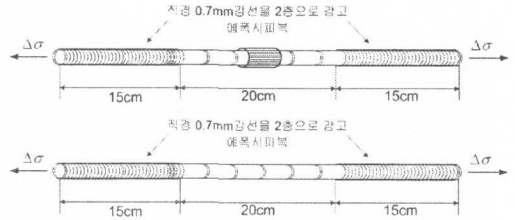


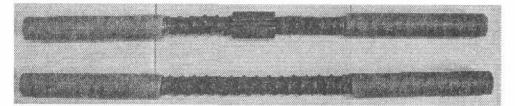
그림 4 정착구의 시험도

정착구의 형태별 철근시편의 파괴형태 및 피로수명을 분석하기 위하여 수행된 기초피로실험 결과 시편양단 인장척부분을 에폭시로 도포한 에폭시정착구에 의한 실험방법만이 철근시편의 중간부가

피로파괴 되었고, 나머지 방법들은 모두 인장척부위가 응력집중을 받아 파단되었다. 가장 바람직한 피로파괴의 위치가 철근시편의 중간부임을 고려해 볼 때, 에폭시도포 처리보강방법으로 제작된 실험시편을 사용하는 것이 가장 바람직한 실험방법인 것으로 평가되어 본 실험에서도 에폭시도포 처리보강방법을 채택하였다.



(1)강선 처리후



(2)에폭시 도포후

그림 5 철근의 정착구 보강형상

에폭시도포 처리보강방법은 그림5와 같이 인장척에 정착되는 시험편 양끝부분을 직경 0.7mm 강선을 2겹으로 감고 그 주위를 에폭시로 피복하는 방법이다. 정착구부분의 직경이 증가함에 따라 몰릴 수 있는 철근직경이 감소하여 19mm이하만 가능하게 되었다.

철근콘크리트 인장부재 역시 동일한 방법으로 정착구보강을 실시하였다.

2.3 Gauge 부착위치

그림6과 같이 파단이 예상되는 부위에 5cm간격으로 Strain gauge를 부착하였다.

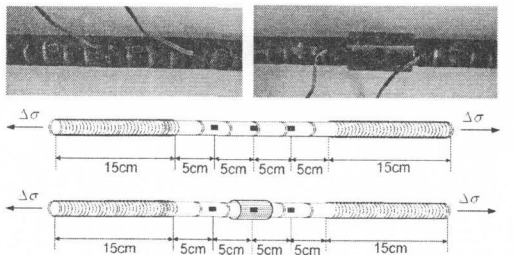


그림 6 gauge부착위치

2.4 실험

인장실험은 그림7에서 보는 바와 같이 시편에 Strain gauge를 부착하여 인장하중에 따른 변형률의 변화를 측정했다. 이때 실험기는 200ton용량의 만능시험기(UTM)를 사용하였다. 정적실험을 실시하여 정적강도( $F_u$ )를 구한 후, 이 값을 바탕으로 피로실험에 필요한 최대응력( $F_{max}$ )과 최소응력( $F_{min}$ )을 계산하였다.

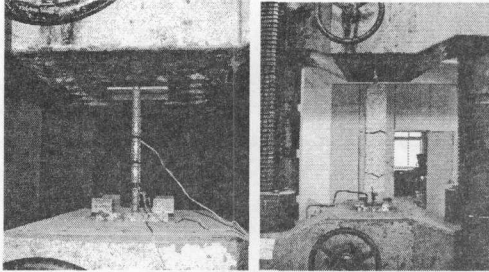


그림 7 정적인장실험

인장피로실험은 인장실험을 통하여 구한 정적강도를 이용하여 그림8과 같이  $\pm 25\text{ton}$  용량의 Simadzu사의 전기유압식 피로시험기를 사용하여 실험하였다.

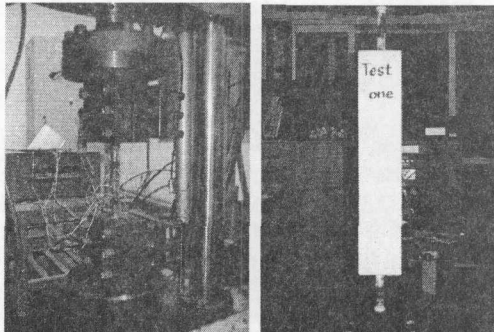


그림 8 철근 직접인장피로시험

인장피로실험시에 사용된 파형은 그림9와 같은 일정진폭의 맥동정현파로 철근의 정적항복강도의 95%, 90%, 85%, 75%, 70%, 60%, 55%의 응력수준으로 응력비 0.1의 맥동정현파를 5~10Hz범위로 가하였다.

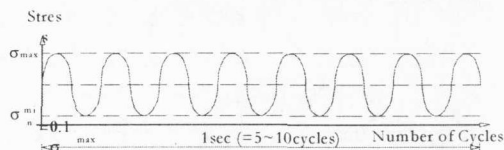


그림 9 피로시험시 하중재하 파형

2.5 Histogram recorder접속

그림10과 같은 접속형식을 이용하여 Strain gauge와 Histogram recorder를 연결하여 실험하였다.

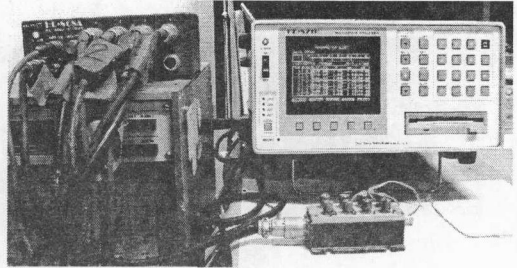


그림 10 Histogram Recorder 접속

3. 실험결과 및 분석

3.1 철근의 실험결과

정적인장실험의 결과로 얻어지는 파단강도를 기준으로 피로실험의 하중을 결정한다. 철근에 대한 정적인장실험에 대한 철근의 인장강도 측정결과를 다음 표2에 나타내었다. 그리고 대표적인 응력-변형률의 관계를 그림11에 나타내었다.

표 2 철근 정적인장실험 결과

구분	단면적 (cm <sup>2</sup> )	파단하중 (kgf)	평균파단하중 (kgf)	파단강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
무이음	2.865	15,500 15,420 15,210	15,376	5,366
기계적이음	2.865	15,560 15,610 15,440	15,536	5,422

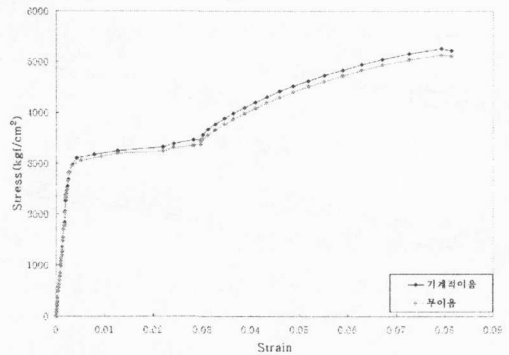


그림 11 철근의 응력-변형률관계

항복강도까지는 기계적이음의 경우와 이음이 없는 경우가 거의 유사하나 항복이후의 강도는 기계

적 이음의 경우가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

철근의 정적인장실험을 통하여 구한 최대인장하중을 이용하여 피로실험시의 재하하중을 결정하였다. 최대응력 수준은 정적파단강도의 95%, 90%, 85%, 75%, 70%, 60%, 55%로 변화시켰으며, 최소응력 수준은 10%로 고정하여 실험하였다. 철근의 직접인장 피로실험결과는 표3과 같다.

표 3 철근의 직접인장 피로실험결과

철근의 직경	응력수준	피로수명(N)	비 고
D19 (무이음)	Smax=95% Smin=10%	44,356 42,543 47,051	정적강도 15,376kgf
	Smax=90% Smin=10%	60,074 63,523 68,754	
	Smax=85% Smin=10%	80,620 79,020 83,535	
	Smax=75% Smin=10%	146,230 161,531 149,659	
	Smax=70% Smin=10%	194,720 225,649 216,489	
	Smax=60% Smin=10%	594,358 635,672 614,593	
	Smax=55% Smin=10%	1,832,405 1,751,632 1,800,547	
	D19 (기계적 이음)	Smax=95% Smin=10%	
Smax=90% Smin=10%		67,335 74,518 69,450	
Smax=85% Smin=10%		78,945 78,797 81,369	
Smax=75% Smin=10%		139,742 146,356 142,578	
Smax=70% Smin=10%		214,705 195,452 186,275	
Smax=60% Smin=10%		603,542 601,342 609,346	
Smax=55% Smin=10%		1,765,297 1,654,823 1,771,689	

철근의 피로실험을 통하여 응력수준과 피로수명

과의 관계를 그림12에 나타내었다. 그림12에서 처럼 기계적 이음한 시험편이 일반철근보다 전체적으로 파로수명이 다소 감소하는 경향을 알 수 있었는데, 이는 커플러체결부위의 나사식 가공에 의한 피로 강도저하인 결과로 사료된다.

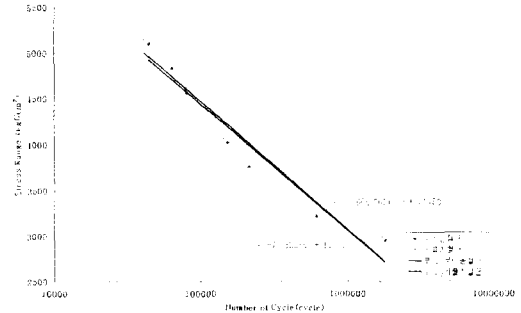


그림 12 철근의 S-N선도

### 3.2 철근콘크리트바의 실험결과

정적인장실험의 결과로 얻어지는 파단강도를 기준으로 피로실험의 하중을 결정한다. 철근콘크리트바에 대한 정적인장실험에 대한 철근의 인장강도 측정결과는 표4에 나타내었다. 대표적인 응력-변형률의 관계를 그림13에 나타내었다.

표 4 철근콘크리트바의 정적인장실험 결과

구분	단면적 (cm <sup>2</sup> )	파단하중 (kgf)	평균파단하중 (kgf)	파단강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
무이음	2,865	15,390 15,450 15,490	15,443	5,390
기계적 이음	2,865	15,420 15,480 15,500	15,466	5,398

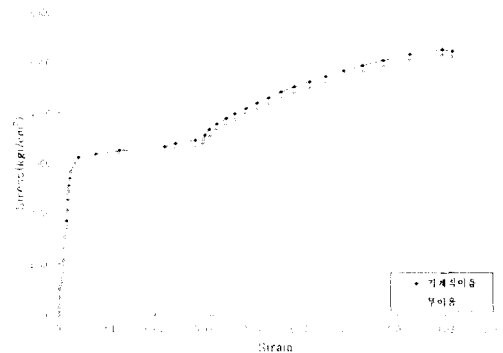


그림 13 철근콘크리트바의 응력-변형률관계

철근콘크리트 바에 대한 실험은 콘크리트강도가 너무 커서 순간적으로 파괴되어 버림으로서, 실험 결과에서도 알 수 있듯이 인장실험에서 콘크리트

가 부재의 강도에 미치는 영향이 미소하므로 철근 실험 결과와 유사한 경향을 확인하였다. 역시 항복강도까지는 기계적 이음의 경우와 이음이 없는 경우가 거의 유사하나 항복이후의 강도는 기계적 이음의 경우가 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 철근콘크리트바의 정적인장실험을 통하여 구한 최대인장하중을 이용하여 피로실험시의 재하하중을 결정하였다. 최대응력 수준은 정적파단강도의

95%, 90%, 85%, 75%, 70%, 60%, 55%로 변화시켰으며, 최소응력 수준은 10%로 고정하여 실험하였다. 철근의 직접인장 피로실험결과는 표5와 같다.

피로실험 결과로부터 각 응력범위에 대한 파단시의 반복횟수로부터 S-N선도를 작성하였다.

이음방법에 따른 피로수명은 이음을 하지 않은 철근콘크리트 인장부재의 피로강도가 컸으며, 이는 커플러체결부위철근의 나사가공으로 인한 피로강도저하와 나사부분의 응력집중 등이 원인으로 보인다.

표 5 철근콘크리트바의 직접인장피로실험결과

철근의 직경	응력수준	피로수명(N)	비고
D19 (무이음)	Smax=95% Smin=10%	43,651 46,520 44,856	정적강도 15,443kgf  95%=14,670kgf 90%=13,898kgf 85%=13,126kgf 75%=11,582kgf 70%=10,810kgf 60%=9,265kgf 55%=8,493kgf 10%=1,544kgf
	Smax=90% Smin=10%	58,596 60,249 58,210	
	Smax=85% Smin=10%	79,579 81,042 83,567	
	Smax=75% Smin=10%	149,356 150,376 152,659	
	Smax=70% Smin=10%	195,320 245,361 265,142	
	Smax=60% Smin=10%	575,692 593,423 591,104	
	Smax=55% Smin=10%	1,731,026 1,762,341 1,634,289	

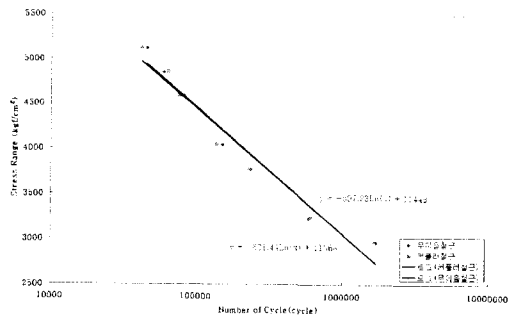
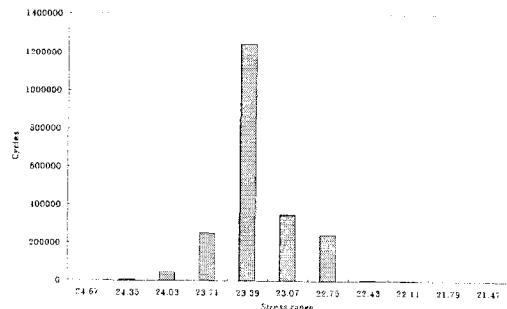


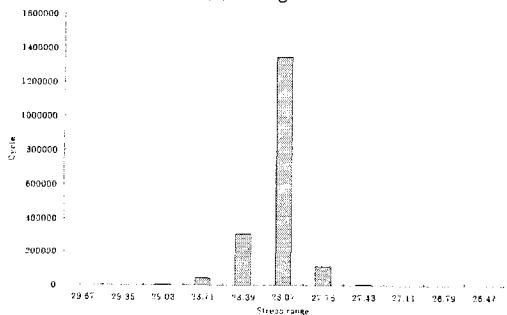
그림 14 철근콘크리트바의 S-N선도

3.3 피로수명 측정결과

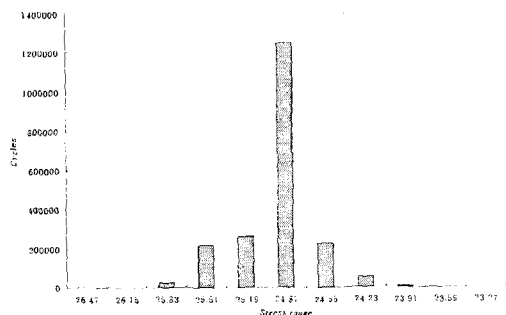
각 Gauge별 Histogram의 응력분포도는 다음과 같다.



(1) Gauge1



(2) Gauge2



(3) Gauge3

그림 15 Gauge별 응력 Histogram

#### 4. 결론

철근콘크리트보의 인장축으로부터 모델링한 철근 콘크리트 인장부재에 대한 정적인장 및 인장피로 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정적인장실험의 결과 항복까지는 기계적 이음의 경우와 이음이 없는 경우가 거의 유사한 응력 상태를 보이나 항복이후 강도는 기계적 이음의 경우가 이음이 없는 경우보다 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

2. 인장피로실험의 결과에서는 기계적 이음의 경우가 이음이 없는 경우보다 피로강도가 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 커플러체결부위철근의 나사가공으로 인한 피로강도저하와 나사부분의 응력집중 등이 원인으로 보인다.

3. 철근콘크리트 인장부재의 경우 실험의 시작과 거의 동시에 콘크리트 부분의 파단이 있었고, 이 때문에 콘크리트가 없는 철근시험편의 실험결과와 유사하였고 콘크리트 균열진전거동을 밝힐 수 없었다. 이는 콘크리트의 강도( $\sigma_{ck}=350\text{kgf/cm}^2$ )가 너무 컸기 때문이라 생각된다.

4. 기계적 이음, 압접이음, 용접이음, 겹침이음과 같은 여러 가지 경우에서도 이와 같은 S-N선도 및 피로수명 Data를 많이 축적하여 강부재와 같이 허용피로응력계산 및 피로설계를 할 수 있고 피로수명을 계산할 수 있는 기초가 마련되어져야 하겠다.

#### 참 고 문 헌

[1] 受付, “鋼橋の疲勞變狀調査”, 日本土木學會論文集, pp1-12, 1986년  
 [2] 고현승, “철근이음 방법에 따른 철근 콘크리트 보의 거동에 관한 연구”, 원광대학교 석사학위논문, 2001년  
 [3] 김준성, “고강도 콘크리트를 사용한 보에서 이형철근의 겹이음에 관한 연구”, 건국대학교 석

사학위논문, 1996년

[4] 변근주, 노병철, 송하원, “국산철근의 피로특성에 관한 실험적 연구”, 콘크리트학회 논문집 제9권 5호 pp.177-187, 1997년  
 [5] 유성원, 오병환, 이성로, “국산 철근의 직접인장피로 및 누적손상 특성”, 대한토목학회 논문집 제21권 제4-A호 pp.515-524, 2001년  
 [6] 이 관, “커플러를 사용한 R.C보의 거동에 관한 실험적 연구”, 성균관대학교 석사학위논문, 1997년  
 [7] 이재훈, “반복하중을 받는 철근콘크리트보의 사용성에 관한 실험적 연구”, 영남대학교 석사학위논문, 1999년  
 [8] 장세창, “과소 철근콘크리트 단순보의 피로거동”, 연세대학교 석사학위논문, 1991년  
 [9] 조병와, “국산철근의 피로특성에 관한 실험적 연구”, 건설부 국립건설연구소, 1994년  
 [10] 최희복, “Temperature철근의 마다·리브 나사식 기계적 이음법 개발에 관한 연구”, 고려대학교 석사학위논문, 2004년  
 [11] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 2004  
 [12] Almar-Ness, A., Fatigue Handbook, Tapor, pp.157-236, 1985  
 [13] ASTM, “Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials,”ASTM, pp.571-575, 1982  
 [14] Barone, M. R., Cannon, J. P., Munse, W. H. “Fatigue Behavior of Welded Reinforcement in Reinforced Concrete Beams” 1974  
 [15] Fisher, J.W., Viest, I.M., “Fatigue Tests of Bridge Materials of the AASHTO Road Test”, Special Report No.66, Highway Research Board, pp.132-147, 1961  
 [16] Hanson, J.M., Burton, K.T., Hognestad, E., “Fatigue Tests of Reinforcing bars - Effect of Deformation Pattern”, Journal of PCA Research and Development Laboratories, Vol.10, No.3, pp.2-13. Also, Development Department Bulletin No.D116, Portland Cement Association, 1968  
 [17] Hanson, J.M., Sones, N.F., Helgason, T., “Investigation of Design Factors Affecting Fatigue Strength of Reinforcing bars”, Abeles Symposium on Fatigue of Concrete, SP-41, American Concrete Institute, Detroit, pp.71-106, 1974  
 [18] Helgason, T., Hanson, J.M., “Investigation of Design Factors Affecting Fatigue Strength of Reinforcing bars - Statistical

- Analysis", *Abeles Symposium on Fatigue of Concrete, SP-41, American Concrete Institute, Detroit*, pp.301-316, 1974
- [19] Pfister, J.F., Hognestad, E., "High Strength bars as Concrete Reinforcement, Part 6, Fatigue Tests", *Journal of PCA Research and Development Bulletin No.D74, Portland Cement Association*, 1969
- [20] Rehm, Gallus, "Contributions to the Problem of the Fatigue Strength of Steel bars for Concrete Reinforcement", *Preliminary Publication, the 6th Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich*, pp.35-46, 1960