

국산철근의 피로특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Fatigue Characteristics of Domestic Reinforcing Bars



변근주*

Byun, Keun Joo



노병철**

Lho, Byeong Cheol



송하원***

Song, Ha Won

ABSTRACT

Flexural fatigue strength of reinforced concrete members depends on the fatigue characteristics of concrete and reinforcing bars because the reinforced concrete members are composite members composited with the concrete and the reinforcing bars. Since the fatigue characteristics of the reinforcing bars are different from static strength characteristics of those, it is necessary to obtain the fatigue characteristics of reinforcing bars directly from fatigue test. The fatigue characteristics like fatigue strength of reinforcing bars with different diameters and different yield strengths are obtained experimentally. For the experiment, most widely used reinforcing bars manufactured by two domestic companies are randomly selected and direct tension fatigue tests in air are performed. From the comparison with results obtained flexural fatigue tests on reinforced concrete flexural members, it is shown that fatigue characteristics of the flexural members can be obtained from direct fatigue test on the reinforcing bars. Then, fatigue stress range of the reinforcing bars are suggested for the fatigue examination of the reinforced concrete members.

* 연세대학교 사회환경 시스템 공학부 교수

** 상지대학교 시설관리 본부장

*** 연세대학교 사회환경 시스템 공학부 부교수

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

토목관련 구조물인 교량, 콘크리트포장, 해양구조물, 철도, 고속철도 구조물 및 공장 크레인 거더 등은 사용수명 동안 적어도 수백만회 정도의 반복하중을 받을 것으로 예상되며, 과재하중에 의한 파괴위험보다는 계속되는 반복하중에 의하여 재료에 손상이 누적됨에 따라 급격한 취성파괴 양상을 보이는 피로파괴 위험이 더욱 심각하다고 할 수 있다.

최근 들어 설계개념의 변화로 재료의 사용응력수준이 높아지고, 시공 및 경제상의 이유로 고강도 재료의 사용이 증가되고 있으며, 과거에 비하여 차량의 대형화, 대량화 및 고속화 등과 같이 구조물이 받는 하중조건이 더욱 열악해짐에 따라 구조물의 사용수명 동안의 피로에 대한 안전성 설계 및 잔존수명 평가의 필요성이 더욱 고조되고 있다. 따라서 구조물의 피로거동을 이해하고 이에 대한 안전성을 확보하기 위해서는, 먼저 구성재료 각각에 대한 피로특성의 구명이 선행되어야 하며, 더 나아가 이들 재료를 사용한 구조부재 및 구조시스템에 대한 피로특성이 구명되어야 한다. 이를 위하여, 많은 연구가들이 연구를 통하여 관련재료 및 구조물의 피로에 대한 이해를 넓혀가고 있으나, 토목관련 구조물에 가장 널리 사용되고 있는 철근콘크리트의 피로거동에 관해서는 그 구성이 합성재료로 이루어져 거동자체가 복잡할 뿐만 아니라, 실험비용 또한 대단히 크므로, 실제 사용하는 부재 및 구조물에 대한 연구가 미흡한 실정에 있다. 따라서, 철근콘크리트 부재 및 구조물의 피로거동에 관한 연구는 실험적 연구가 비교적 용이한 콘크리트 및 철근 등과 같은 사용재료에 대한 피로실험을 수행하고, 콘크리트 구조물에 대한 피로실험을 수행함으로써 철근콘크리트 구조물의 피로특성을 합리적으로 평가하고자 하는데 집중되고 있다.

외국의 경우 피로설계 개념이 이미 피로해석 설계 규준에 반영되고 있으며, 국내의 경우 도로교 표준시방서, 고속철도 콘크리트구조물 시방서 해설(안) 및 콘크리트 표준시방서에 피로규정에 대하여 일부 규정되어 있으나, 국내에서 생산되고 있는 콘크리트 및 철근의 피로특성에 대해서는 아직까지 연구가 미흡한 실정이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 철근의 강도 및 직경에 따른 피로특성

을 규명하므로써 향후 피로설계시 활용하고자 한다.

2. 철근 및 철근콘크리트 보의 피로파괴

철근의 피로균열 전파과정은 부재표면에 있어서 반복소성 미끄럼에 의하여 인장응력의 방향과 약 45° 방향의 미끄럼 면을 따라 형성된 균열이 그 방향으로 전파하는 제1단계, 이것에 이어지는 인장방향에 수직으로 전파하는 제2단계 및 최종적인 정적파괴의 3단계로 구분된다. 이 중에서 파면의 주요부분을 이루고 줄파단(striation)등과 같이 피로의 특징적 모양이 나타나는 것은 통상적으로 제2단계이다.

피로균열의 발생 및 전진기구에 관해서는 여러 모델이 제안되어 있으며, 가장 일반적인 피로균열 발생 기구 모형은 Wood 모형이다. 이는 하중의 작용으로 응력이 상승하는 동안 재료표면에서 국부적인 소성 미끄럼이 일어나며, 하중이 감소하는 동안에는 앞에서 미끄럼을 방해하므로 미끄럼은 평행한 다른 면에서 반대방향으로 일어난다. 이와 같은 작용의 반복으로 피로균열이 발생하게 된다. 이와 같은 현상으로 발생한 피로균열은 반복하중이 증가함에 따라 점차 증가하게 되며, 균열이 임계값 이상 발생하면 파괴에 이르게 된다.

철근콘크리트부재는 철근과 콘크리트의 복합재료로 구성되어 있으므로 부재의 휨피로강도는 콘크리트와 철근의 피로특성에 따라 변화될 수 있다. 철근 콘크리트 보의 파괴는 일차적으로 평형철근비를 기준으로 하며, 사용철근량이 평형철근비 이상일 때는 콘크리트 압축부에 취성파괴가 발생하여 콘크리트의 피로특성에 의한 피로파괴가 지배적인 요소가 되며, 평형철근비 이하의 과소철근보에서는 철근의 인장항복에 의한 연성파괴가 발생하여 철근의 피로특성에 의한 부재의 피로파괴가 발생하게 된다.

일반적으로 피로특성은 응력범위, 반복재하속도, 휴지시간, 재하파형, 편심재하 등의 외적인자와 재료의 성질 등과 같은 내적인자에 의하여 변화하며, 이들 영향인자중에서 본 연구와 관련이 있는 주요 영향인자에 대하여 기술하면 다음과 같다.

2.1 응력범위

구조물에 작용하는 응력의 크기는 피로수명을 결

정하는데 가장 중요한 외적 요인이며, 응력범위에 따른 피로수명은 크게 유한수명구간(finite life region)과 장수명구간(long life region)으로 구분된다. 휨가공을 하지 않은 철근콘크리트 보의 실험결과 Hanson²⁾은 100만회 반복재하에서 S-N곡선이 급격한 변화를 보임을 지적하였으며, 응력범위가 증가하면 피로수명은 감소하며, 응력범위가 감소하면 피로수명이 증가하나, 응력범위가 일정하게(피로한계) 이하가 되면 피로수명(200만회)에는 영향을 미치지 못하는 것을 밝힌 바 있다.

따라서 본 연구에서는 S-N곡선의 도출을 위하여 3개 이상의 응력범위에 대하여 피로실험을 실시하였으며, 하중반복수가 200만회에 다다랐을 경우에는 피로실험을 중단하였다.

2.2 최소응력수준

최소응력수준이 피로수명에 미치는 영향에 대해서는 연구자들 사이에서도 이견이 존재한다. Rehm³⁾과 Fisher⁴⁾는 그의 논문에서 최소응력은 피로강도에는 거의 영향을 미치지 않는다고 하였으나, Jhamb과 Macgregor⁵⁾는 이형철근의 피로

실험을 통하여 최소응력이 피로강도에 상당한 영향을 미친다고 주장하였다. Pfister와 Hognestad⁶⁾는 최소응력 수준을 항복강도의 10%, 30%로 실험하여 최소응력 수준이 증가하면 피로수명이 약간 감소함을 밝혔다. 그러나 Jhamb와 Macgregor는 최소응력수준을 항복강도의 10%와 40%로 피로실험을 수행한 결과, 유한수명구간에서 최소응력의 영향을 발견할 수 없었다고 주장하고 있다.

따라서 본 연구에서는 구조물의 사하중을 고려하여 최소응력수준을 10%로 취하여 피로실험을 실시하였다.

2.3 반복재하속도 및 재하파형

1985년 노병철의 실험⁷⁾에 의하면 최대응력수준이 80% 이하의 범위내에 있을 때에는 재하진동수가 250-800cpm 사이에 있을 때는 반복재하속도 변화가 피로강도에 큰 영향을 미치지 않으며, 30cpm의 저속도 재하의 경우 약간 피로강도가 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 재하파형에 따라서는 삼각파형, 정현파형 및 사각파형의 순으로 피로강도가 감소되

어 피로특성이 작용되는 에너지량의 대소에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

따라서 본 연구에서는 30~600cpm의 속도를 갖는 정현파로 피로실험을 실시하였다.

2.4 편심 및 휴지시간

Ople와 Hulsbos⁸⁾는 편심압축 피로실험을 통하여 편심이 증가할 수록 콘크리트의 피로강도는 증가하는 것을 확인한 바 있다. Hilsdorf와 Kesler⁹⁾는 피로강도가 휴지시간이 5분 이내일 경우 휴지시간에 따라 약 7.9%정도까지 증가하나, 5분을 초과할 경우 피로강도가 더 이상 증가하지 않음을 밝힌 바 있다.

2.5 철근의 피로강도에 미치는 영향인자

2.5.1 강도등급

Pfister와 Hognestad⁶⁾는 동일직경의 grade 60과 grade 70인 이형철근의 실험을 통하여 강도등급이 증가하면 피로수명도 증가한다는 것을 밝혔다.

2.5.2 철근의 직경

Kravshenko¹⁰⁾는 시편단면의 증가는 휨 또는 비틀림을 받는 경우에 피로균열의 발생확률을 높여준다고 주장하였으며, Tetelman과 McEvily¹¹⁾도 단면중 가장 높은 응력을 받는 부위에서 critical flow가 발생할 가능성과 관련하여 Kravshenko의 주장을 입증하였다. 2.6 철근콘크리트 보의 피로강도에 미치는 영향인자

2.6.1 철근비

철근콘크리트 보에 반복하중이 작용하는 경우, 휨균열 선단에서부터 중립축에 이르는 콘크리트 인장부가 존재하기 때문에 초기 및 cycle에서는 실제 철근의 응력 및 변형률이 균열단면으로 계산한 이론적인 응력 및 변형률보다 다소 적은 값을 나타내지만, 반복하중의 재하회수가 증가함에 따라서 인장부의 균열이 점차 증가하므로 피로하중에 의하여 발생하는 철근의 응력 및 변형률은 균열단면으로 계산한 이론값에 접근하게 된다. 이러한 현상은 하중반복 회수가 증가하여 중립축까지 균열이 발생하면 철근이 인장력을 모두 부담하게 되어 결국은 철근의 피로파괴에 의하여 과소 철근콘크리트 보의 파괴가 결정된다

는 것을 나타낸다.

한편, 일본의 岸谷孝¹²⁾는 허용응력 이론을 적용할 경우 과대철근보인 경우에는 최대응력수준 50% 이상, 평형철근보인 경우에는 최대응력수준이 80% 이상인 경우에 모두 콘크리트의 압축피로파괴에 의하여 보의 파괴가 지배된다고 발표하였다. 따라서 철근콘크리트 보의 피로거동은 철근비가 높아지거나, 최대응력 수준이 높아지는 경우에는 콘크리트의 압축 피로파괴가 발생한다고 할 수 있다.

철근콘크리트 보의 피로특성은 여러가지 영향인자에 따라 변화하는데 사용재료, 응력범위, 철근비 및 전단지간과 유효깊이의 비(a/d)의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히, 과소 철근콘크리트 보인 경우에는 일반적으로 철근의 피로파괴에 의하여 부재의 파괴가 발생하게 되므로, 철근의 피로특성에 미치는 영향인자는 철근콘크리트 보 피로특성에도 직접적인 영향을 미치게 되며, 철근비가 1.5% 이상이 되면 철근비에 따라 보의 피로특성도 달라진다고 보고한 바 있다. 한편, 西林, 井上¹³⁾는 허용응력설계법에 의한 평형철근비(2.8%)와 평형철근비의 약 2배(4.9%)를 갖는 보의 피로실험을 통하여 그 파괴양상이 철근비에 따라 달라짐을 밝혔다.

2.6.2 전단지간과 유효깊이의 비(a/d)

철근콘크리트 보의 전단피로에 관한 연구는 많지 않지만, 上田¹⁴⁾는 실험을 통하여 a/d가 전단피로강도에 영향을 미친다고 주장하였으며, 檜貝¹⁵⁾는 아치기구에 대한 최대하중의 비와 a/d와의 관계에 관한 연구에서 a/d가 5이상 되면 사인장파괴를 일으키며, 그 이하에서는 사인장균열 발생후 아치파괴를 일으킴을 밝혔다.

3. 피로실험

본 연구에서는 철근의 정적강도특성이 제영향인자에 따라 피로특성이 상이한 점에 착안하여 철근의 피로특성에 큰 영향을 주고 있는 직경, 항복강도 및 응력비를 변화시켜 이에 따른 응력수준-피로수명(S-logN) 곡선을 도출하기 위하여 직접인장 피로실험을 실시하고, 동일한 철근을 과소 철근콘크리트 보가 되도록 설계하여 피로실험을 수행하여 이들을 상호 비

교하므로써 피로설계시 사용할 수 있는 철근의 피로한계를 제안하고자 한다. 따라서 체계적 연구의 수행을 위하여 설정한 실험내용과 순서는 table 1과 같다.

Table 1 Steps for experiment

step	contents
1	development of grip for reinforcing bar
2	experiments for reinforcing bar
	· maker D SD30(D16, D22, D25)
	· maker I SD40(D16, D22, D25)
3	experiment for reinforced concrete beam
	· maker D (SD30, D16, $\rho=0.61\%$) · maker I (SD30, D16, $\rho=1.22\%$)

3.1 직접인장 피로실험용 철근시편의 제작 및 정착방법 개발

피로실험을 위한 철근시편은 정적실험에 대한 KS B0802의 규정과 ASTM E466의 규정을 적용하여 시편중앙에서 피로파괴가 발생할 수 있도록 시편을 제작하였다.

철근의 표점거리 변화에 따른 피로파괴 특성을 분석하기 위하여, 강도등급 SD30, 직경 D25의 철근시편을 50cm, 및 30cm의 길이로 변화시키면서 90% 응력수준으로 피로실험을 실시한 결과 모두 상부 grip 부분에서 큰 응력 집중을 받아 파단되었다. 이는 grip에 의한 단면결손이 초기 결함부를 제공하는 것으로 평가되며, 이로 인하여 피로수명의 정확한 평가가 불가능한 것으로 분석되었다. 따라서 grip부분의 응력집중을 최소화시키고 피로강도를 엄밀히 평가하기 위하여 철근시편에 정착구를 부착하여 실험시편을 제작하였다. 철근시편에 정착구를 설치하는 방법으로서는 직접정착방법, 압접 및 용접에 의한 방법, 철관 보강에 의한 방법, 금형에 의한 방법 및 아연 정착구에 의한 방법 등을 적용하여 실험하였다. 이들 방법에 의하여 설치된 철근시편의 정착구를 도시하면 Fig. 1과 같다. 본 연구에서는 정착구의 종류별 철근 시편의 파괴형태와 정착구의 형태가 철근의 피로수명에 미치는 영향을 분석함으로써 가장 엄밀한 피로수명을 평가할 수 있는 정착구의 형태를 선정하였다.

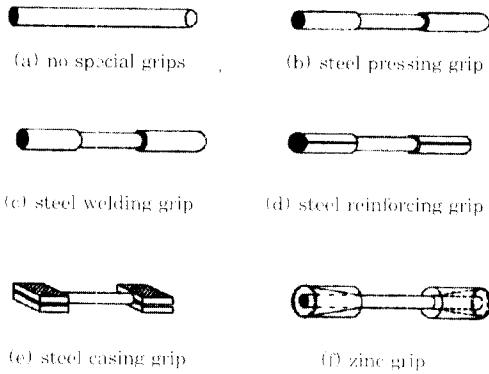


Fig. 1 Grips for rebar

한편, 정착구의 형태별 철근시편의 파괴형태 및 피로수명을 분석하기 위하여 수행된 기초피로실험 결과는 table 2와 같다.¹⁰⁾ Table 2와 같이 철양단 grip 부분을 아연으로 감싼 아연정착구에 의한 실험방법만이 철근시편의 중간부가 피로파괴되었고, 나머지 방법들은 모두 grip 부위가 응력집중을 grip 부위가 응력집중을 받아 파단되었음을 알 수 있다.

Table 2 Failure types of specimens according to grips

grip methods	diameter of rebars	stress level (%)	numbers of specimens	fatigue limit	fracture pattern	note
no special grips	D25 길이 50cm	90	3	22,070 39,910 30,110	fracture at ends	fig. 1(a)
	D25 길이 30cm	90	3	16,230 18,670 10,280		
steel pressing grip	D22	90	3	12,340 11,300 9,586	fracture at ends	fig. 1(b)
steel welding grip	D22	90	3	6,775 8,225 6,270	fracture at ends	fig. 1(c)
steel reinforcing grip	D16	90	1	7,024	fracture at grip	fig. 1(d)
		80	2	11,770 10,920		
		70	2	16,490 14,570		
steel casing grip	D16	90	3	3,534 4,850 7,903	fracture at grip	fig. 1(e)
		75	3	47,490 41,980 28,530 403,000 325,600 200,300		
zinc grip	D25	75	3			

그러므로 가장 바람직한 피로파괴의 위치가 철근 시편의 중간부임을 고려해 볼 때, 아연정착구에 의한 실험시편을 사용하는 것이 가장 정밀한 실험방법인 것으로 평가되며, 본 실험에서도 아연정착구에 의한 실험방법을 채택하였다. 한편, 아연정착구를 설치한 시편은 응력수준과 피로수명이 선형관계를 유지하고 있으나, 나머지 방법들은 응력수준에 따른 피로수명의 변동폭이 커 피로수명의 엄밀한 평가가 곤란함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 본 연구에서 개발된 아연정착구를 갖는 시편으로 제작하여 피로실험을 실시하였다. 즉, 아연정착구의 grip은 10cm길이를 제작하여 충분히 정착될 수 있도록 하였으며, 총길이는 $9D + 20\text{cm}$ 및 $4.5D + 20\text{cm}$ 로 철근직경에 따라 상이하게 제작하였다.

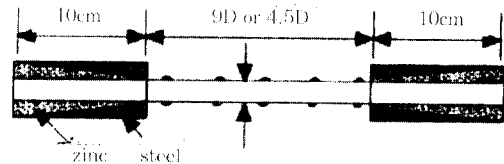


Fig. 2 Dimension of grip filled with zinc

3.2 단철근 직사각형 보의 피로실험

3.2.1 시편의 제작

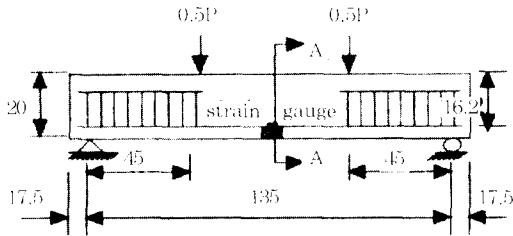
실험용 보의 제작에 사용된 시멘트는 비중 3.15의 보통 포틀랜드 시멘트와 임진강에서 채취된 골재를 사용하였으며, 골재번호는 #57으로 표준입도 안에 드는 골재이다. 사용된 골재의 물리적 특성은 table 3과 같으며, 보의 제작에 사용된 철근은 J사에서 생산된 SD30, D16의 이형철근이다.

Table 3 Mechanical properties of aggregates

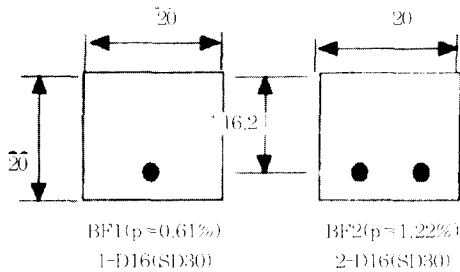
aggregates	specific gravity	fineness modulus	unit weight (kg/m ³)
coarse aggregate	2.62	6.56	1640
fine aggregate	2.60	3.07	1610

제작된 보의 세원은 Fig. 3 (a)와 같고, 철근은 Fig. 3 (b)와 같이 철근비(p) 0.61%와 1.22%인 과

소철근보로 배근하였다. 정적 및 피로실험시의 전단 시간내의 전단파괴를 방지하기 위하여 D10의 스티럽을 7cm의 등간격으로 보 중앙부를 제외한 양쪽 전단지간에 배근하였다.



(a) dimensions of RC beam



(b) section A-A

Fig. 3 Dimension of beam specimens (cm)

한편, 콘크리트를 거푸집에 타설하기전 정적실험용 보의 항복강도를 구하기 위해 매립형 게이지(KFW-5-CI-11L500)를 보 중앙부 주철근에 부착하여 하중변화에 따른 보의 응력-변형률 관계를 측정하였다.

품질에 따른 시험오차를 줄이기 위해 배치막서를 이용한 비법을 실시하여 시험편의 품질을 가능한 한 균질하게 하였으며, 콘크리트를 타설한 후에는 봉형 진동기를 이용하여 다짐을 실시하였다. 양생은 증기양생을 실시하고 실험기간동안에는 노천에서 습윤양생을 하였다. 콘크리트의 설계기준강도는 300kg/cm²이며, 배합은 table 4와 같다.

Table 4 Mix Proportion

σ_c (kg/cm ²)	Gmax (mm)	slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	unit weight (kg/m ³)			
					W	C	s	a
300	25	6+1	34.9	58.7	180	516	626	1066

한편, 시편의 수는 사용된 주철근(D16) 1가닥(p=0.61%), 2가닥(p=1.22%)에 대하여 정적강도 실험용으로 각각 3개, 피로실험용으로 각각 9개씩 제작하였고, 콘크리트의 압축강도를 측정하기 위하여 150mm×300mm의 표준 원주형공시체를 각각 3개씩 제작하였다.

3.2.2 실험방법 및 결과

구성재료의 항복강도를 구하기 위하여 만능시험기(UTM)를 사용하여 콘크리트 원주형공시체의 압축강도시험을 실시하였으며, 그 결과는 table 5에 나타내었다.

Table 5 Compressive strength of concrete

Specimen number	1	2	3	average
σ_c (kg/cm ²)	318	329	335	327

Table 6은 철근의 정착부위에 아연정착구를 설치한 후 정적실험을 실시한 경우에 대한 정적인장강도를 나타낸 것으로 등급으로 규정된 인장강도기준을 상회하는 것을 알 수 있다.

Table 6 Static tensile strength of rebars(kg/cm²)

rebar maker	rebar grade	diameter		
		D16	D22	D25
maker D	SD30	3272	3569	3684
	SD10	4140	4210	4240
maker I	SD30	3580	3674	3443
	SD10	4651	4464	4407

보의 정적하중 강도를 구하기 위한 하중재하 방법은 3등분점 하중법(four point bending)을 적용하였으며, 실험장비로는 Instron모델 1333을 사용하였다. 또한 3등분점 하중을 재하시키기 위하여 실험조건에 맞는 하중재하장치를 별도로 제작하여 사용하였다. 실험중 보 중앙부의 압축 및 인장변형률을 측정하기 위하여 단계별로 피로실험기내의 load cell과 strain indicator를 이용하여 하중에 따른 변형률을 측정하였다.

보에 대한 정적실험으로부터 측정된 보의 파괴하중은 table 7과 같다.

정적재하 실험을 통하여 얻어진 파괴하중을 이용하여 피로실험수행에 필요한 반복재하 하중을 구하고, 이 하중을 재하하여 피로실험을 수행하였다. 반

Table 7 Ultimate loads of tested beams

reinforcing ratio	ultimate load
0.61 %	4,595kg
1.22 %	9,653kg

복재하 하중의 크기는 파괴하중의 90%, 75%, 65%를 사용하였으며, 최소응력은 10%로 하였다. 재하장차 및 재하방법은 정적재하실험과 동일하며, 반복재하속도는 철근콘크리트 보의 탄성회복속도를 고려하여 계획된 하중이 완전히 작용할 수 있도록 60 ~ 250 cpm으로 조정하였다. 재하파형은 정현파(sine wave)를 사용하였으며, 수행된 피로실험 결과는 table 8과 같다.

Table 8 Fatigue test results of beams

beam specimens	Smax*(%)	fatigue limit (N)	Log N
BF11	90	613,610	5.7879
BF12	90	231,320	5.3642
BF13	90	515,330	5.7121
BF14	75	1,061,670	6.0260
BF15	75	869,940	5.9395
BF16	75	748,650	5.8743
BF17	65	1,391,610	6.1435
BF18	65	2,000,000	6.3010
BF19	65	2,000,000	6.3010
BF21	90	459,980	5.6627
BF22	90	125,070	5.1006
BF23	90	196,450	5.2933
BF24	75	679,300	5.8321
BF25	75	540,910	5.7331
BF26	75	711,270	5.8520
BF27	65	1,136,510	6.0555
BF28	65	2,000,000	6.3010
BF29	65	2,000,000	6.3010

* Smax = max.applied load/ultimate load

3.3 직접인장 피로실험에 의한 피로특성

국내 철근생산회사인 D사 및 I사에서 생산된 SD30 (D16, D22, D25) 및 SD40 (D16, D22, D25) 철근에 대하여 최소응력을 10%로 고정하고, 최대응력비를 각각 파괴응력의 90%, 75%, 65%를 사용하였으며, 재하속도가 600cpm인 정현파하중으로 피로실험을 실시하여 Table 9와 같은 생산회사별 철근피로특성과 직경 및 강도등급에 따른 피로실험 결과를 얻을 수 있었다.

Table 9 Fatigue limit (N) according to the manufactured company and bar diameters

diameter	Smax	maker D		maker I	
		SD30	SD40	SD30	SD40
D16	90%	81,050	113,500	268,700	145,200
		151,600	127,700	266,500	162,500
		65,730	112,300	242,600	137,900
		75,170		189,800	138,200
	75%	139,700		255,200	126,200
		403,000	194,300	692,300	290,600
		325,600	371,300	583,700	332,300
		289,300	246,800	1,212,000	275,000
	65%	205,200		777,600	228,800
		493,400		563,800	222,600
		543,000	530,000	2,100,000	935,100
		891,700	740,700	2,090,000	2,000,700
60%	719,600	374,800	1,820,000	614,700	
			2,611,000	941,000	
			2,001,000	2,000,000	
		2,001,000			
D22	90%	70,950		237,400	110,700
		93,500	76,620	309,900	166,900
		71,440	70,780	220,300	145,300
		81,600	83,730	321,000	129,100
	75%	72,610		287,900	163,700
		182,800		593,700	278,400
		164,500	215,400	742,100	299,100
		135,600	266,700	602,100	310,700
	65%	284,300	266,200	693,200	279,400
		161,700		1,581,000	323,600
		398,800	166,400	1,101,000	661,000
		411,400	361,200	861,200	689,800
60%	450,200	572,400	2,100,000	532,900	
	418,200		2,000,000	685,200	
	439,900		2,000,000	675,400	
		426,000			
D25	90%		693,200		
			694,800		
		114,500	115,300	353,300	126,400
		66,900	110,300	342,700	122,600
	75%	86,440	105,900	245,600	127,500
		87,680	112,000	288,600	126,400
		60,620	119,800	410,000	132,100
		162,300	260,900	1,378,000	222,900
	65%	150,600	360,900	2,000,000	289,600
		210,000	240,700	1,863,000	327,600
		147,300	140,500	2,000,000	327,500
		155,900	226,800	1,573,000	291,400
60%	392,800	519,600	2,000,000	536,400	
	406,300	381,300	2,000,000	764,800	
	464,700	675,200	2,000,000	570,400	
	394,900	343,000	2,000,000	619,900	
	929,500	769,000	2,000,000	569,400	

4. 비교 및 분석

4.1 직접인장과 보에 의한 철근의 S-N 상관관계

직접인장에 의한 철근의 피로실험이 보속에 배근 되었을 경우에 비하여 비교적 안전측으로 평가할 수 있음을 보이기 위하여, 비교실험을 실시하였으며, 회귀분석결과를 Table 10에 나타내었다.

Table 10 S-N relationships for rebar and beams

specimen	S-N relation	fatigue limit(%)
beam BF1 (p=0.61%)	$S = -0.3273 \log N + 2.7102$	64.8
beam BF2 (p=1.22%)	$S = -0.2434 \log N + 2.1766$	64.3
Rebars(D16)	$S = -0.2523 \log N + 2.1477$	55.5

Fig. 4는 콘크리트 보 속에 D16 철근을 1가닥(p=0.61%) 또는 2가닥(p=1.22%) 설치하였을 경우와 동일 철근에 대한 직접인장 피로실험결과를 나타낸 것이다. 즉, 철근비 변화에 따른 파소 철근 콘크리트보의 실험결과에 의하면 낮은 응력수준에서는 철근비가 피로수명에 큰 영향을 미치지 않았으나, 응력수준이 증가할수록 철근비 0.61%인 경우가 1.22%인 경우에 비하여 피로수명이 크게 증가하였음을 나타내고 있다.

한편, 철근콘크리트 보의 피로수명이 콘크리트 피로파괴에 의한 것인지 또는 철근의 피로파괴에 의한 것인지를 검증하기 위한 보의 피로실험결과에서 보면, 최대응력수준 90%의 경우 콘크리트 압축순단에 발생하는 최대응력은 140 kg/cm^2 로 2백만회 이하에서는 콘크리트의 피로파괴는 발생하지 않는 것으로 나타났다.

철근의 경우에는 보의 피로실험에서 재하한 최대 응력수준 90%에 의하여 발생하는 철근의 응력은 항복강도의 약 95%이고, 본 실험에서 수행된 직접인장 피로실험 결과로부터 도출한 S-N관계에 의하면 최대응력수준 95%인 경우 보에 사용한 철근과 동일한 철근의 직접인장 피로수명은 약 85,800회 정도로 나타났다. 따라서 보의 피로수명은 콘크리트 압축피로에 의한 수명이 아니라 철근의 인장피로파괴에 의하여 지배된 것으로 분석되며, 철근의 직접인장 피로수

명보다 동일 철근을 사용한 보의 피로수명이 같은 응력수준에서 더 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 철근의 직접인장피로실험에 의하여 비교적 안전측으로 피로특성을 규명할 수 있음을 알 수 있다.

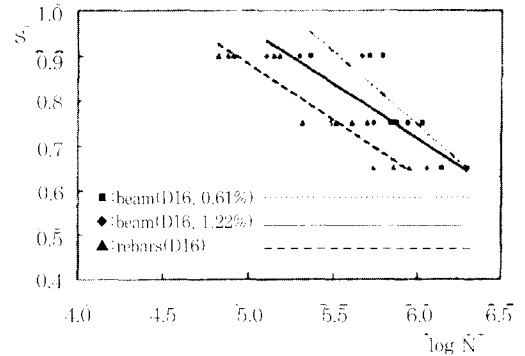
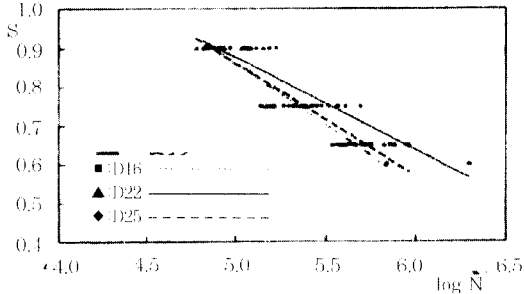


Fig. 4 Comparison of S-N diagram b/w rebar and beams

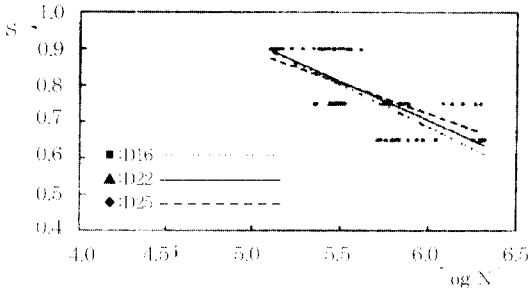
4.2 직경에 따른 피로특성

철근 직경을 D16, D22 및 D25에 국한하여 실시한 대한 피로강도는 생산사별로 고려할 경우 Fig. 5의 (a) 및 (b)에 나타난 바와 같이 D사제품의 경우 각각의 피로한계가 57%, 48%, 45%이며, I사제품의 경우 각각의 피로한계가 64%, 62%, 68%로 D사제품의 경우 직경이 가늘수록 피로한계가 높아지며, I사제품의 경우 D16은 D22에 비하여 피로한계가 높아지나, D25의 경우에는 D16 및 D22에 비하여 피로한계가 높게 나타남을 알 수 있다. 즉, 직경에 따른 일반적인 경향은 철근의 직경이 가늘수록 피로측면에서는 유리해지나, 강도등급 및 생산사에 따라 달라질 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 미국 NCHRP 연구에서 언급한 바와 유사하며, 철근의 피로특성이 단순히 직경에만 의존하는 것이 아니라 돌기형태 및 제조사에 따른 재료의 특성등 여러인자에 영향을 받은 것으로 판단된다.

한편, 일반적으로 철근이 다단 배치되면 단면의 외측철근이 먼저 피로파단되기 때문에 직경이 작은 철근을 다단 배치하는 것보다는 큰 직경의 철근을 배치하는 것이 유리한 것으로 나타나 있으나, 실제 배근 계획시에는 철근과 콘크리트의 부착성능까지를 고려하는 것이 바람직하다.



a) Rebars of maker D



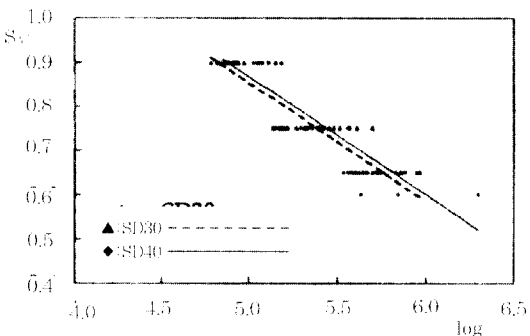
b) Rebars of maker I

Fig. 5 Fatigue characteristics according to bar diameter

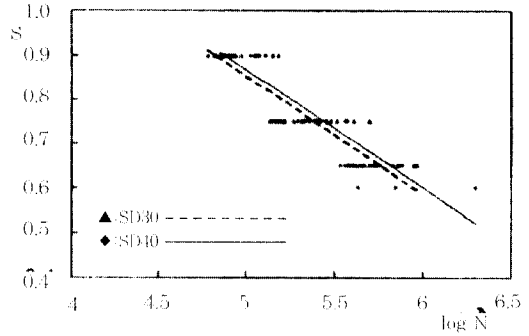
4.3 철근 등급에 따른 피로특성

철근 등급에 따른 피로특성의 분석을 위하여 D사 및 I사에서 생산된 SD 30 (D16, D22, D25)과 SD 40 (D16, D22, D25)철근에 대하여 피로실험을 실시하였다.

Fig. 6은 철근의 등급에 따른 S-N곡선을 도사한 것으로서 철근의 강도등급이 증가할 때 응력비로 나타난 철근의 피로한계가 생산사에 따라 다소 다른 경향을 나타냄을 알 수 있다.



a) Rebars of maker D



b) Rebars of maker I

Fig. 6 Fatigue characteristics according to grade of rebars

4.4 타 연구와의 비교

피로하중을 받는 철근 및 과소 철근콘크리트 보의 피로실험 결과의 검증은 위하여 Pfister, Hognestad, Burton, Hanson, Jhamb, MacGregor, Lash 등이 직경 #5~#11, grade 40, 60, 70인 철근을 사용하여 얻은 피로실험결과와 본 연구 결과를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 이들 실험 결과는 사용재료, 철근의 성분, 실험조건 등이 본 연구와 동일하지 않으므로 직접적인 비교는 될 수 없으나, 본 연구결과가 타 연구결과에 비하여 크게 다르지 않은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

4.5 철근의 피로기준 제안

철근의 직접인장 피로실험 결과로부터 철근 콘크리트보의 피로검토에 사용할 수 있는 피로기준을 제시하려면 응력범위 ($\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$)와 수명(N) 사이의 상관관계를 도출하는 것이 중요하다. 따라서 table 9의 자료를 기초로 통계적인 회귀분석을 수행하여 얻어진 $\Delta\sigma - N$ 상관관계는 table 11과 같으며, 반복하중 2×10^6 회에 대한 강도별 피로강도는 SD 30의 경우 1.356 kg/cm^2 , SD 40의 경우 1.524 kg/cm^2 이하를 얻었다.

Table 11 Regression results

grade	$\Delta\sigma - N$ relationship	fatigue strength (kg/cm ²)
SD30	$\Delta\sigma = 7.657 - 1.000 \log N$	1.356
SD40	$\Delta\sigma = 7.657 - 1.000 \log N$	1.524

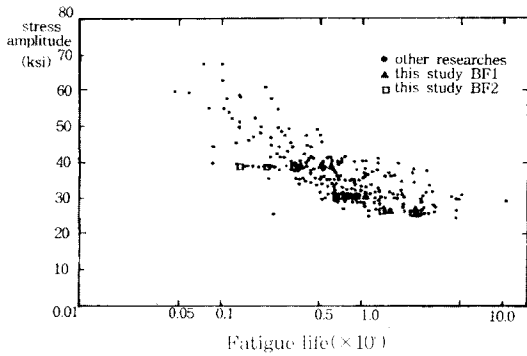


Fig. 7 Comparison with other researches

한편, 미국 ACI에서는 피로설계를 위한 응력범위를 $1,400\text{kg/cm}^2$ 이하로 규정하였으며, 일본토목학회의 경우 피로에 대한 허용응력을 도로교 시방서에는 SD30의 경우 $1,400\text{kg/cm}^2$, SD40의 경우 $1,800\text{kg/cm}^2$ 로, 콘크리트 시방서에는 SD 30의 경우 $1,600\text{kg/cm}^2$, SD 40의 경우 $1,800\text{kg/cm}^2$ 로 규정하고 있으며, 영국 BS규정에는 연강의 경우 $2,703\text{kg/cm}^2$, 고강도철근의 경우 $3,315\text{kg/cm}^2$ 로 규정하고 있다. 즉, SD30철근의 경우 국내에서 생산되고 있는 철근의 피로설계를 위한 응력범위가 $1,300\text{kg/cm}^2$ 으로 미국의 기준에 비하여 약 93% 수준이 됨을 알 수 있다. 한편, 일본 토목학회의 경우 피로에 대한 허용응력이 $1,400\sim 1,600\text{kg/cm}^2$ 이며, 국산철근에 대한 피로실험시 최소응력수준이 10%임을 고려할 때, 국산철근의 피로강도는 104~119% 정도 수준에 있음을 알 수 있으며, SD40철근의 경우도 일본에 비하여 약 107%수준에 있는 것으로 평가되었다.

5 결론

국산 철근을 사용한 철근 및 철근 콘크리트 보의 피로특성에 관한 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 여러 가지 다양한 정착구를 사용한 철근의 피로 시험을 통해 grip 부분의 응력집중을 최소화시키고 철근의 정밀한 피로강도 평가가 가능한 아연 정착구를 고안 하였다.

2. 철근의 직접인장 피로시험과 동일한 철근을 사용한 철근콘크리트 보의 피로 시험을 수행하였으며

보의 피로 수명은 철근의 인장 피로 파단에 의해 지배되며 이 경우 철근의 직접 인장 피로 실험에 의하여 안전측으로 철근콘크리트 보의 피로특성을 규명할 수 있음을 밝혔다.

3. 국산 철근의 피로강도는 철근 직경이 감소할수록 증가함을 규명하였으며 반복횟수 2백만회에 대한 SD30과 SD40의 피로응력 범위는 각각 $1,356\text{kg/cm}^2$ 와 $1,524\text{kg/cm}^2$ 이었다.

건설교통부 제정 콘크리트 표준시방서의 과소 철근콘크리트 보 설계 규정에 따라 본 연구는 철근 콘크리트 휨부재의 피로에 대한 안정성 검토는 반복 인장하중을 받는 철근의 피로에 대한 검토로 대체하여도 좋다는 것을 밝혔으며 본 논문에서 얻어진 응력범위는 1996년 개정된 콘크리트 표준 시방서¹⁶⁾에서 피로검토를 위한 철근의 응력범위로서 국산철근 SD30에 대해서는 $1,300\text{kg/cm}^2$, SD40에 대해서는 $1,500\text{kg/cm}^2$, SD35에 대해서는 그 중간 값인 $1,400\text{kg/cm}^2$ 으로 채택되었다.

감사의 글

이 논문은 연세대학교 학술연구비와 국립건설시험소의 지원에 의하여 이루어진 것으로 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wood, W.A., Recent Observation on Fatigue Fracture in Metals, ASTM STP237, 1958, p.110.
2. Hanson, J.M. and Ballinger, C.A., "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", ACI Journal, Vol.71, No.3, March, 1974, pp.97-121.
3. Rehm, G., "Contributions to the Problems of Fatigue Strength of Steel Bars for Concrete Reinforcement", International Association for Bridge and Structural Engineers, 6th Congress Preliminary Publication, 1960, pp.35-46.
4. Fisher J.W., and Viest, L.M., Fatigue Test of Bridge Materials of the AASHTO Road Test, Highway Research Board, Special Report No.66, 1961, pp.132-147.

5. Jhamb, I.C. and MacGregor, J.G., Fatigue Strength of Deformed Reinforcing Bars, Structural Engineering Report No. 18, The Univ. of Alberta, 1969, pp.155-176.
6. Pfister, J.F., and Hognestad, E.: "High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 6, Fatigue Tests", PCA Journal, Vol.6, No.1, Jan., 1964, pp.65-84.
7. 노명철, 응력비·재하형태·물재차수·재하 속도가 무근 콘크리트의 피로특성에 미치는 영향, 연세대학교 석사학위논문, 1986.
8. Ople, F.S. and Hulsbos, C.L., "Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient", ACI Journal, Proceedings Vol.63, No.1 Jan. 1966, pp.59-82.
9. Hilsdorf, H.K. and Kesler, C.E., "Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses", ACI Journal, Oct. 1966, pp.1059-1075.
10. Kravshenko, P.Ye, Fatigue Resistance, Pergamon Press, 1962, pp.276-291.
11. Tetelman, A.S. and McEvily, A.J., Fracture of Structural Materials, John Wiley and Sons Inc., 1967, pp.82-101.
12. 岸谷孝一, 西澤紀昭, 疲勞, 技報堂, 1987, pp. 37-88.
13. 井上正三, 西林新藏, "RCはり部について", 土木學會第36回年次學術講演會講演概要集, 1974.
14. 上田, 岡村 等, せん断補強鉄筋のないよりのせん断疲勞補強, 콘크리트工学 Vol.20, No.19, Sept. 1982.
15. 檜具 勇, 鉄筋コンクリートはりのせん断破壊に關する研究, 土木學會論文報告集, 第279號, 1978.4.
16. 국립건설시험소, 국산철근의 피로특성에 관한 실험적 연구, 1994.
17. 대한도목학회, 콘크리트표준시방서, 건설교통부 개정, 1996. *

요 약

철근 콘크리트 구조부재는 철근과 콘크리트로 구성된 합성부재이므로, 철근 콘크리트 구조부재의 피로 강도는 철근과 콘크리트 고유의 피로특성에 따라 변화하게 된다. 철근사체의 피로특성은 철근의 정적강도 특성과 상이하므로, 실험을 통하여 규명할 필요가 있다. 본 논문에서는 대표적인 국내 2개사에서 생산되는 철근에 대하여 직접인장 피로실험을 실시하여 이들의 피로특성을 규명하였으며, 철근콘크리트 휨부재 내부의 철근 피로특성과 철근만의 직접인장 피로특성의 비교 분석으로부터 직접인장 피로실험만으로 철근콘크리트 휨부재의 피로특성을 평가할 수 있음을 밝혔다. 또한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 피로검토를 위한 기준을 제시하였다.

(접수일자 : 1997. 6. 24)