

국산 PS 강봉의 고응력범위에서의 직접 인장피로 특성

A Study on the Characteristics of Direct Tensile Fatigue of the Domestic PS Bar at High Stress Range

유 성 원¹⁾ · 서 정 인²⁾
Yoo, Sung Won Suh, Jeong In

요 지 : 본 연구에서는 국산 PS 강봉의 직경, 반복최소응력 및 반복최대응력 등을 실험변수로 하여 직접 인장 피로실험을 수행하였다. 정적 인장실험 결과, 국산 PS 강봉의 응력 - 변형률 곡선과 극한강도 등을 얻었다. 또한, 피로실험에서의 특징적인 실험결과는 PS 강봉의 직경은 피로 수명에 중요한 인자가 아니며, 반복 최소응력의 크기는 국산 PS 강봉의 피로수명에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 피로실험결과를 통계 분석하여 PS 강봉의 응력 범위 및 반복 최소응력 등을 변수로 하는 피로강도 예측식을 제안하였다. 피로실험 중, 시편중앙에 설치한 Extensometer를 이용하여, 변형률의 변화를 측정하였으며, 측정된 변형률 변화현상에서 탄성계수의 변화현상을 구하였다. 변형률 증가현상은 3단계의 형태 즉, 초기에 급격한 증가 후 서서히 증가하며 파괴 직전에 급격하게 증가하는 형태로 나타났다. 탄성계수의 변화현상은 변형률 변화현상과 유사하게 감소하는 것으로 나타났으며 응력수준은 탄성계수 변화에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : In this study, direct tensile fatigue tests of the PS bar were performed in terms of diameter, minimum stress level, and maximum stress level. In the static test, the stress - strain curve and ultimate strength of the PS bar were determined. Results of the fatigue test indicate that the diameter of the PS bar was not influenced by fatigue life. Minimum stress also had quite an influence on the fatigue of the PS bar. Thus, the fatigue characteristic equation was proposed in terms of stress range and minimum stress through statistical process. Strains on specimen that loaded direct tension were measured in the fatigue test, with the secant modulus of elasticity calculated from measured strains. The strain development consisted of three different stages, i.e., rapid increases during the initial fatigue life, uniform increases during the middle stage, and rapid increases until failure. The secant modulus of elasticity decreased during the fatigue life with increasing strain. However, stress level seemed to have no influence on the secant modulus of elasticity.

핵심용어 : 직접인장 피로, PS 강봉, 피로특성방정식, 고응력범위.

KEYWORDS : direct tensile fatigue, PS bar, fatigue characteristic equation, high stress range

1. 서론

현대 산업의 발전으로 교통물의 증량화 및 통행량의 증가는 구조물에 주는 진동의 주기는 대단히 짧고, 이와 반대로 진폭은 대단히 커져서 하중 반복횟수의 증가와 응력범위의 증가를 유발하므로 이러한 차량 하중으로 인한 교량, 도로 등 구조물의 피로파괴를 고려해야 하는 문제를 일으키고 있다. 또한 지속적인 파랑 하중을 받는 해양 구조물도 역시 이러한 피로 파괴의 문제가 야기된다. 이러한 차량 하중, 파랑 하중 등의 반복 하중을 받는 도로, 철도, 교량이나 해양 구조물에 PS 콘크리트

의 사용이 많아지면서, PS 강연선 및 강봉의 피로에 대한 관심이 점차로 증대되어 왔다.

1890년 모르타르 시편에 대한 피로 실험이 시작된 이후 콘크리트에 관련된 많은 논문들이 발표되고(Holmen, 1979), 1982년 ACI에서 "Fatigue of Concrete Structures"가 발간되어 비약적으로 발전하게 되었다.(Holmen, 1982) 그러나 이들 중 대부분은 무근 콘크리트에 관한 연구이며, 최근 AASHTO, PCA 등에서 발표된 논문들에 의하면 PS 콘크리트 구조물에서는 PS 강봉이 PS 강연선 및 콘크리트보다 피로에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

국내에서는 아직까지 PS 강봉에 대한 피로 연구는 전무한

1) 정희원, 우석대학교 토목공학과 조교수, 공학박사
(Tel. 063-290-1460, Fax. 063-290-1465, E-mail: imysw@woosuk.ac.kr)
2) 정희원, 우석대학교 토목공학과 조교수, 공학박사 (offsuhji@woosuk.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

실정에 맞춰 국내 실정에 맞는 PS 강봉의 피로 현상 확인 및 규정 설립을 위한 연구가 절실히 필요하다.

PS 강봉의 피로 특성에 영향을 미치는 인자는 PS 강봉의 강도, 직경, 하중의 재하 주기, 재하되는 하중의 최소 응력, 재하 도중의 휴지 기간, 하중의 재하 순서 등을 들 수 있다. 현재 까지 연구된 바로는 하중의 재하 주기 변화에는 PS 강봉의 피로 특성이 거의 영향을 받지 않는 것으로 밝혀지고 있다. 그러나 최소 응력, 재하 도중의 휴지 기간, 하중 재하 순서, PS 강봉의 강도, 응력 수준에 PS 강봉의 피로특성이 상당한 영향을 받는 것으로 규명되었다.

따라서 본 연구에서는 국내에서 생산되는 PS 강봉의 직경, 최소 응력 및 최대 응력을 피로 특성에 대한 영향 인자로 보고 직접 인장에 의한 피로 실험을 수행하였다. 실험에서 얻어진 결과로 피로하중-피로수명, 직경-피로수명 및 응력 범위-피로수명 관계를 얻어낸 후, 통계분석을 통하여 국산 PS 강봉 자체 고유의 피로강도 방정식을 제안하는 데 그 목적이 있고, 또한 각 경우에 대하여 변형률을 실험을 통해 측정하여, 피로수명과 최대 변형률과의 관계를 나타내고 누적 손상의 현상을 밝히는 데 그 목적이 있다. 특히 본 연구에서는 국산 PS 강봉의 피로 실험자료가 거의 없는 점을 감안하여 PS 강봉의 피로 특성을 전반적으로 확인하고 향후 추가 연구를 위한 기초자료로 활용하기 위해서 피로 응력 범위를 10~50%로 넓게 결정하여 실험을 수행하였다.

2. 피로 실험의 개요

2.1 시편의 제작 및 실험 변수

본 실험에 사용된 시편은 국내의 K아연에서 제작한 PS 강봉으로, 정적 인장 강도와 직접 인장피로 측정용으로 그림 1과 같은 길이의 PS 강봉을 사용하였다. 사용된 PS 강봉의 강도는 SBPD 130/145이며, 직경은 6.15 및 9.15mm이다. 실험 변수는 표 1과 같으며, 총 시편의 수량은 42개이다. 또한, 시편의 길이는 ASTM(1963)과 KS 인장 시험편 및 피로 시험편의 규정에 맞추어 결정하였으며, 그림(Grip)부분은 시험기기의 여건에 맞추어 결정하였다.

그림 1과 같은 크기의 시편은 피로 하중에 의한 시편의 파단 위치를 시편의 중앙부로 유도하기 위해서 그림 2와 같이 별도의 보조장치를 제작하여, 직경의 3배 정도의 길이로 용접하여 실험을 수행하였다.(ASW,1979)

본 연구의 실험 변수는 표 1에 나타냈듯이 PS 강봉의 직경, 최소 응력 수준(F_{min}) 및 최대 응력 수준(F_{max})이며, 각각 2수준, 2수준 및 3수준으로 각각을 3회 반복하여 실험을 수행하였으며, 정적 파괴강도를 3회 반복하여 실험을 실시하였다.

(Unit : mm)

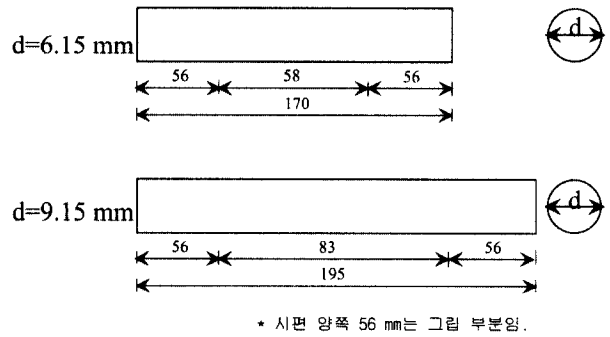


그림 1. 피로 실험용 PS 강봉의 시편

표 1. PS 강봉의 실험 변수 및 각 경우의 시편 개수

직경	6.15 mm		9.15 mm	
F_{min}	0.4 F_u	0.6 F_u	0.4 F_u	0.6 F_u
F_{max}				
Static	3		3	
0.90 F_u	3	3	3	3
0.80 F_u	3	3	3	3
0.70 F_u	3	3	3	3

(unit : mm)

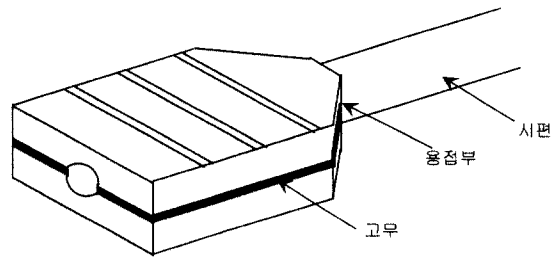
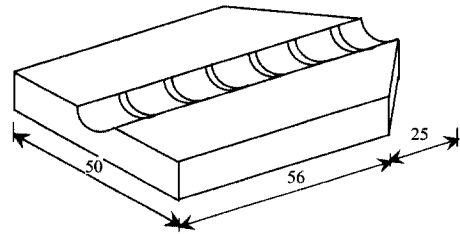


그림 2. 피로 실험용 PS 강봉에 부착한 보조장치

2.2 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 기기는 미국 INSTRON사에서 제작한 유압식 피로 시험기이며, 실험 기기의 장치도는 그림 4에 나타내었으며, 실험 기기의 형상은 그림 3에 나타내었다.

이 피로 시험기는 그림 4와 같은 일정한 진폭과 주기를 가진 반복하중을 시편에 가하며, 시편이 파괴되면 자동으로 멈추게 되어 이때의 반복 횟수 N이 파단 수명이 된다.

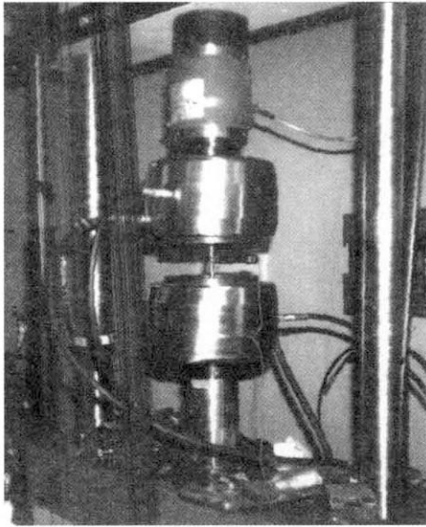


그림 3. 피로 실험기 형상

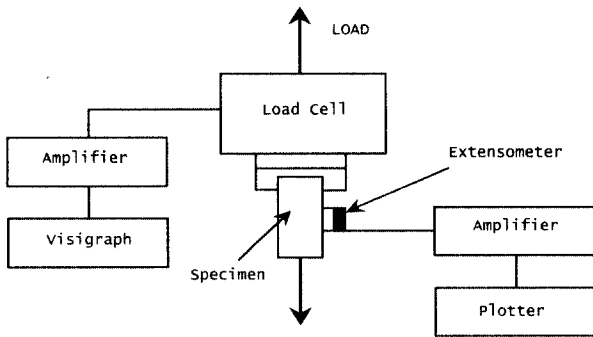


그림 4. 실험 장치의 개략도

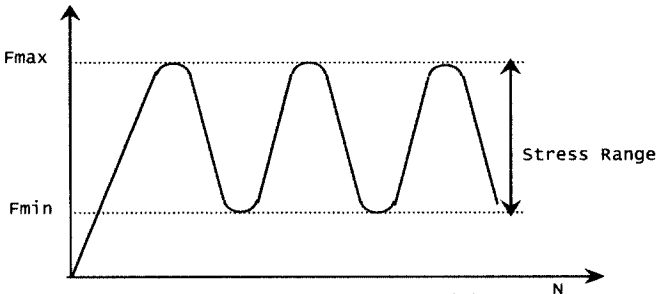


그림 5. 작용하는 피로 하중 형태

2.3 실험 방법

본 실험에서는 먼저 정적실험을 수행하여 정적 강도 F_u 를 구한 후, 반복 최소 응력 F_{min} 과 반복 최대 응력 F_{max} 를 피로 하중으로 작용시켜 피로수명을 구했으며, 시편 중앙에 Extensometer를 부착하여 자동으로 변형률 변화를 측정하였다. 이때 작용시킨 하중의 주기는 5Hz (=300 cycles/min) 이다. 실험시 피로 하중 반복수가 1,000,000회까지 시편이 파괴되지 않는 경우는 피로한도의 상태인 것으로 간주하였다.(Bennett, 1982)

한편 반복 최소 응력 F_{min} 은 정적 강도 F_u 의 40 % 및 60 %이며, 반복 최대 응력 F_{max} 은 정적 강도 F_u 의 70 %, 80 % 및 90 %이다. 이때, 반복 최소 응력을 다소 크게 결정한 이유는 PSC 구조물에서 도입 직후 또는 유효프리스트레스 힘에 의한 PS 강봉에 작용하는 응력이 큰 점을 감안하였기 때문이다. 즉, 본 연구에서는 높은 응력 상태에서 PS 강봉의 피로 거동 특성을 파악하는데 실험의 목적을 두었다. 또한, 국내의 설계기준 등에서는 피로한계를 하중 반복수가 2,000,000회인 경우로 하고 있으나, Bennett(1982)의 연구에 의하면 1,000,000회를 피로 한도 값으로 결정하여도 콘크리트 구조물에서는 큰 차이가 없는 것으로 연구되어 피로한계를 하중 반복수가 1,000,000회인 경우 결정하여 실험을 수행하였다. 또한 일반적으로 강재는 명확히 피로한도가 존재하고 콘크리트의 경우는 그렇지 않은 것으로 알려져 있다. 따라서 PS 강봉도 강재이므로 피로한도가 있을 것이고 1,000,000회보다는 2,000,000회로 실험을 수행하면 그 현상을 명확히 확인할 수 있을 것으로 추정된다. 이러한 이유로 국내 도로교 설계기준과 Bennett의 실험과의 피로한도 차이가 있는 것으로 추정된다. 그러나 본 논문에서는 고응력 범위에서 피로 실험을 수행하였으므로 1,000,000회 이내에서도 피로한도를 찾을 수 있을 것으로 판단되어 1,000,000회를 피로 한도로 보고 수행하였다.

3. 정적 실험 결과

피로 실험을 수행하기 위한 기본 단계로 각 경우의 PS 강봉에 대해 정적 실험을 수행하여 극한 강도, 항복강도, 탄성계수 및 응력-변형률 곡선을 얻었으며, 그 결과는 그림 6와 표 2에 나타내었다. 정적 실험 결과는 일반적으로 잘 알려진 형상과 동일한 결과를 얻었으며, 각각의 오차도 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 국산 PS 강봉의 피로실험 결과 및 분석

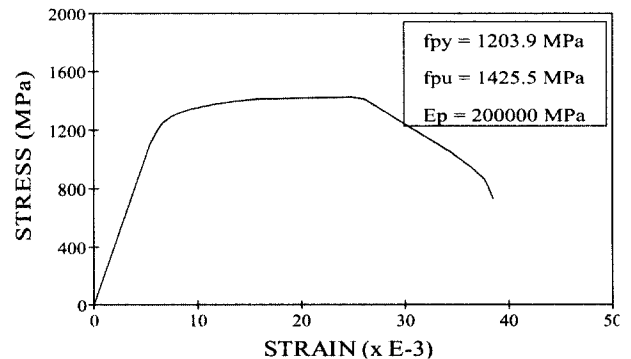


그림 6. 국산 PS 강봉의 정적 인장 실험 결과

표 2. 국산 PS 강봉의 정적 인장 실험 결과
(단위 : MPa)

직경	6.15 mm	9.15 mm
1	1432.0	1430.0
2	1430.0	1430.0
3	1428.0	1416.5
평균	1430.0	1425.5

4.1 피로하중과 피로수명 관계

실험으로부터 얻어진 피로하중과 피로수명의 관계를 나타내기 위해서 일반적으로 사용하는 다음과 같은 최대 응력수준-반복수, 응력범위-반복수 등 두 가지 형태의 S - N 곡선을 이용하였다. (Helgason 등, 1976; 오병환, 1985) 물론 좌변이 무차원인 식 (1a)와 응력단위를 가지는 식 (1b)는 서로 공학적으로 의미하는 바가 다를 수 있지만, 최대 응력과 응력범위에 대한 S-N선은 각각의 의미가 있는 표현방법이므로 본 논문에서는 이 두 가지의 표현식을 모두 사용하였다.

$$\frac{F_{max}}{F_u} = a + b \cdot \log_{10} N \quad (1a)$$

$$S_r = c + d \cdot \log_{10} N \quad (1b)$$

여기서, F_u : PS 강봉의 극한 정적 강도

F_{max} : 반복 최대 응력

N : 피로수명

$S_r (= F_{max} - F_{min})$: 응력 범위

표 3~4는 각 실험 변수별 피로하중에 대한 피로 수명을 나타낸 것이다. 또, 실험으로부터 얻은 피로 하중과 피로 수명을 가지고서 식 (1)에 알맞은 상수들을 직선 회귀 분석하여 구한 결과를 표 5에 나타내었다. 그림 7~8은 반복 최소 응력별 S-N 곡선을 최대 응력수준(F_{max}/F_u), 응력 범위별로 각각 나타낸 것이다.

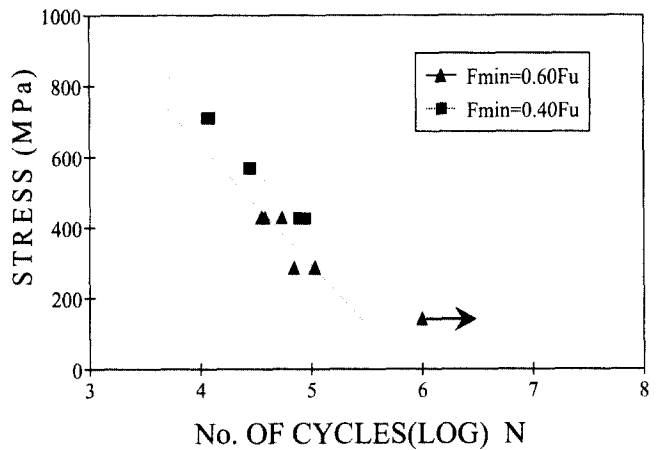
표 3. 6.15mm PS 강봉의 피로수명과 피로 강도

Fmin \ Fmax	0.90Fu	0.80Fu	0.70Fu
0.60Fu	54,430	108,010	1,000,000→
	35,310	70,420	1,000,000→
	38,100	109,430	1,000,000→
0.40Fu	11,420	27,250	76,200
	11,760	28,140	80,300
	12,150	27,900	88,320

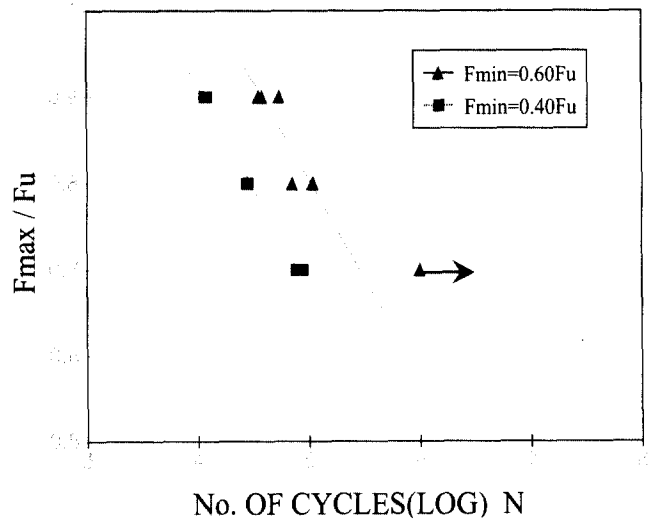
표 4. 9.15mm PS 강봉의 피로수명과 피로 강도

Fmin \ Fmax	0.90Fu	0.80Fu	0.70Fu
0.60Fu	34,740	70,560	39,910
	56,380	114,170	1,000,000→
	28,800	107,090	1,000,000→
0.40Fu	12,840	30,800	44,850
	12,530	25,650	86,880
	10,920	25,450	88,640

표 5에서 알 수 있듯이 실험 결과를 직선 회귀분석한 결과의 상관계수는 모두 0.95 이상으로 실험 결과의 상관성은 상당히 우수한 것으로 나타났으며, 최대응력수준에 의한 S-N선과 응력범위에 의한 S-N선의 신뢰도는 거의 유사하게 나타났다. 또한, 반복 최소 응력이 작은 경우의 실험 결과가 더 신뢰도가 높으며, 작은 직경의 경우의 실험 결과가 큰 직경의 경우보다 약간 더 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.



(a) 응력범위 - 피로 수명 관계



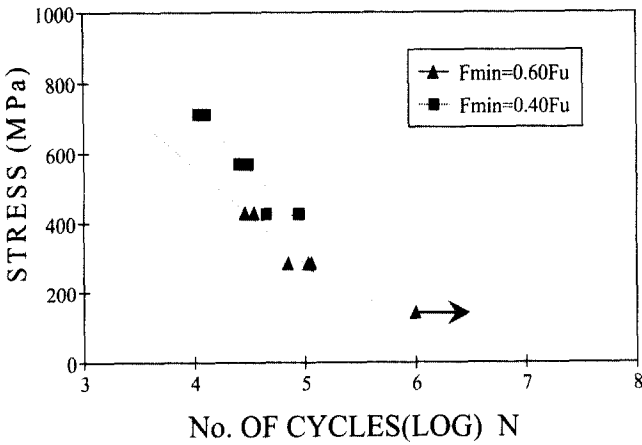
(b) 최대 응력비 - 피로 수명 관계

그림 7. 6.15mm PS 강봉의 S - N선

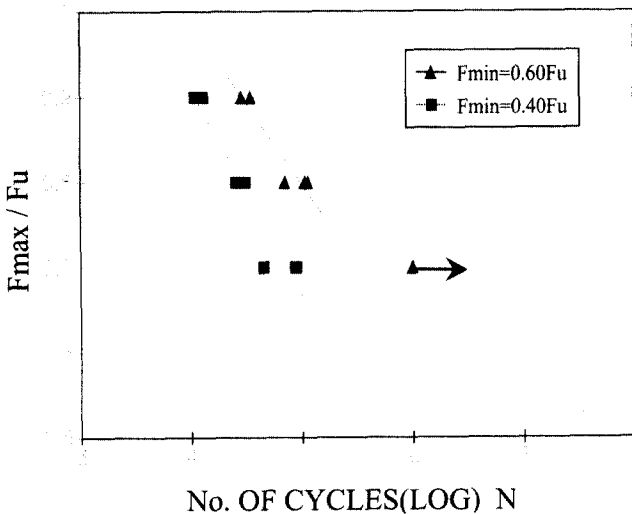
표 5. PS 강봉의 직선 회귀식

y		Fmin	0.60Fu		0.40Fu		
			a	b	r	a	b
6.15 mm	Fmax/Fu	a	1.9540		a	1.8584	
		b	-0.2301		b	-0.2365	
		r	-0.9841		r	-0.9943	
	Stress Range (MPa)	a	1960.84		a	2074.72	
		b	-334.27		b	-336.45	
		r	-0.9837		r	-0.9999	
9.15 mm	Fmax/Fu	a	1.7447		a	1.8336	
		b	-0.1890		b	-0.2305	
		r	-0.9509		r	-0.9896	
	Stress Range (MPa)	a	1628.5283		a	2039.3980	
		b	-268.8616		b	-327.9427	
		r	-0.9509		r	-0.9896	

단, $y = a + b \cdot \log_{10} N$, $r =$ 상관 계수



(a) 응력범위 - 피로 수명 관계



(b) 최대 응력비 - 피로 수명 관계

그림 8. 9.15mm PS 강봉의 S - N선

그림 8~9에서 알 수 있듯이 같은 응력 범위에서는 반복 최

소 응력이 클수록 그때의 최대 응력도 커져서 피로 수명도 감소하며, 최대 응력이 일정한 경우에는 반복 최소 응력이 작을수록 그때의 응력 범위도 커져서 피로 수명도 감소한다. 이는 반복 최소 응력의 크기가 PS 강봉의 피로에 상당한 영향을 미치는 것을 말해주고 있다.

한편, 응력범위와 반복 최대 응력수준과 피로수명으로 표현하면 반복 최소 응력수준에 따라 구분하여 판단해야 하므로 이들을 통합한 응력비(Fmax/Fmin)에 따른 S - N선을 그림 9에 나타내었다. 그림 10에서 알 수 있듯이 응력비가 클수록 피로수명은 감소하는 반비례 관계임을 알 수 있다.

4.2 PS 강봉의 피로 강도 방정식의 제안 및 비교

4.2.1 PS 강봉의 피로강도방정식의 제안 및 허용응력범위

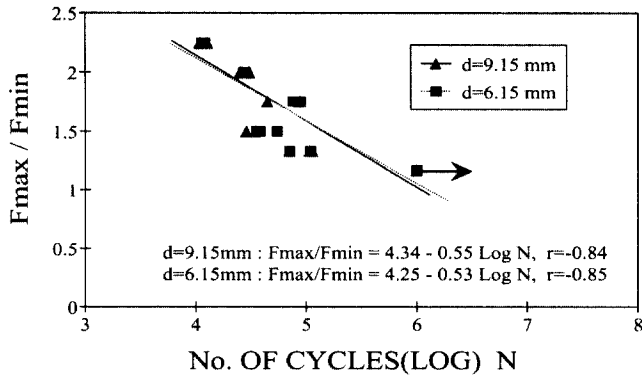
본 연구에서는 PS 강봉의 피로 영향 인자를 전 절에서 밝힌 반복 최소 응력뿐만 아니라 PS 강봉의 직경도 피로 영향 인자로 보고 실험을 수행하였으므로 본 절에서는 PS 강봉의 직경이 피로 수명에 미치는 영향에 대해서 고려할 필요가 있다. 일반적으로 직경에 대한 영향은 크기효과(Size Effect)로 설명하면 적절할 것으로 판단된다. 즉, 시편의 크기가 작을수록 피로수명은 더 크게 나타날 것으로 추정된다. 그러나 앞의 그림 7~8과 표 3~5에서 알 수 있듯이 국산 PS 강봉의 경우, 직경에 의한 피로 수명의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 응력비(Fmax/Fmin)에 따른 S - N선으로 나타낸 그림 9에서 좀 더 명확하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 원인으로는 본 연구에서 수행한 피로실험이 고응력 범위에서 실험을 수행한 이유로 이러한 크기효과가 잘 나타나지 않은 것으로 판단된다. 응력범위가 낮은 상태이면 이러한 크기효과로 직경에 대한 영향이 있었을 것으로 추정된다. 그러나 본 연구에서는 고응력 범위에서의 피로 특성에 주안점을 둔 이유로 직경에 대한 영향을 무시한 상태로 최소 응력과 응력 범위를 변수로 한 국산 PS 강봉의 피로 수명 예측식을 식 (2)와 같이 제안하였다. 제안된 방정식은 회귀분석 프로그램인 IMSL의 부프로그램인 ZXSSQ를 이용하였다.

$$S_R = 1.6575 - 0.3322S_{\min} - 0.2273 \log N \quad (2)$$

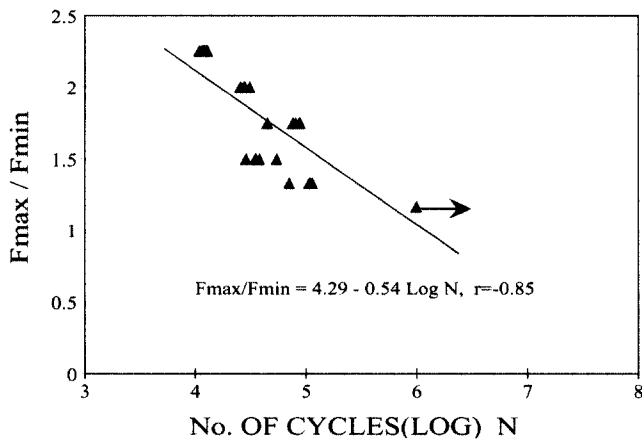
여기서, N : 피로 수명 (회)

$$S_R : \text{응력범위} \left(\frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{pu}} \right)$$

$$S_{\min} : \text{반복최소응력} \left(\frac{F_{\min}}{F_{pu}} \right)$$



(a) 직경에 따른 S - N선



(b) 직경을 무시한 S - N선

그림 9. PS 강봉의 응력비(Fmax / Fmin)에 대한 S - N선

4.2.2 제안된 PS 강봉의 피로 강도 방정식의 비교

식 (2)와 같이 제안된 국산 PS 강봉의 피로 강도 방정식에서 피로 수명이 200만 회 때의 허용 응력 범위를 구하면 다음 표 6과 같다. 표 6에서 알 수 있듯이 최소 응력이 증가하면 피로한도수명에서의 허용 응력 범위는 감소하는 것을 알 수 있으며, 최소 응력이 5~60%이면 허용 응력 범위는 2.60~20.9 F_{pu} (37.1~297.9MPa)를 나타내고 있다.

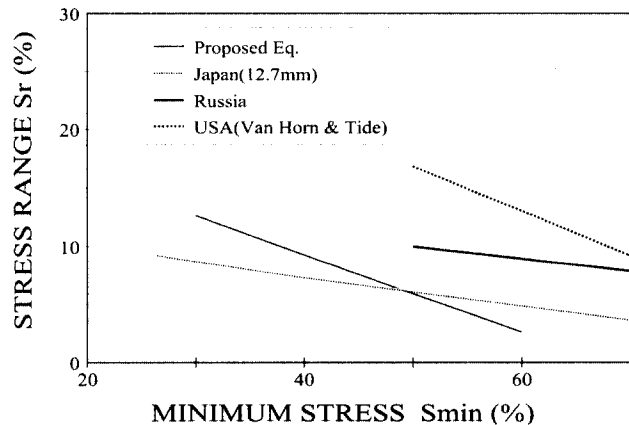


그림 10. 피로수명 200만회에서 국가별 PS 강재의 허용응력범위

표 6. 국산 PS 강봉의 200만회 피로수명시의 허용 응력범위

최소응력 Smin = Fmin/Fpu (%)	200만회에서의 허용응력범위 비 (%)	국산 PS 강봉의 허용응력범위 (MPa)
5	20.9	297.9
10	19.2	273.7
15	17.5	249.5
20	15.9	226.7
30	12.6	179.6
40	9.23	131.6
50	5.92	84.4
60	2.60	37.1

표 7. 국산 PS 강봉의 상대 반복수비와 변형률 실험 결과

Fmin	Fmax = 0.90Fu		Fmax = 0.80Fu		Fmax = 0.70Fu	
	N/Nf	Strain	N/Nf	Strain	N/Nf	Strain
0.40 Fu	0	2.471	0	2.471	0	2.471
	0.00008	7.001	0.00004	5.765	0.00001	4.738
	0.00080	7.273	0.00039	5.948	0.00011	4.786
	0.03990	7.404	0.06287	6.040	0.00677	4.836
	0.07981	7.546	0.21611	6.085	0.04513	4.887
	0.19952	7.623	0.41257	6.452	0.14215	4.887
	0.35914	7.623	0.67191	6.726	0.29783	4.987
	0.63847	7.710	0.82515	6.808	0.37906	5.038
	0.71828	7.745	0.98232	7.046	0.53023	5.038
	0.83799	7.841			0.62162	5.138
	0.95770	7.950			0.70000	5.138
					0.97022	5.138
					0.98150	5.289
					0.99278	5.289
				0.99842	5.390	
0.60 Fu	0	3.912	0	3.912	0	3.912
	0.00003	7.001	0.00001	5.765	0.00002	4.736
	0.00007	7.101	0.00009	5.895	0.00040	4.983
	0.00010	7.167	0.00850	5.938	0.20000	4.983
	0.00035	7.309	0.02801	6.067	0.30000	4.983
	0.01632	7.376	0.07470	6.067	0.40012	4.983
	0.05208	7.501	0.17742	6.067	0.50301	4.983
	0.14931	7.585	0.28014	6.153	0.55000	4.983
	0.38194	7.627	0.37539	6.153	0.60341	4.983
	0.71979	7.794	0.47717	6.153	0.65014	4.983
			0.56028	6.153	0.66002	4.983
			0.65366	6.153	0.67028	4.983
			0.74704	6.153	0.70040	4.983
			0.84041	6.153	0.75000	4.983
		0.93379	6.153			

변근주 등(1999)에 의해 조사된 외국의 실험자료와 본 연구에서 제안된 국산 PS 강봉의 피로 강도 방정식을 비교하여 그림 10에 나타내었으며, 그림 10에서 알 수 있듯이 외국의 실험 결과와 본 연구에서의 결과는 기울기는 비슷하지만 국가별 피로 특성은 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이는 본 연구에서는 국산 PS 강봉의 실험결과이며, 외국의 실험결과는 강

봉과 강연선 전체의 실험 결과인 데서 나타나는 차이로 추정된다. 특이한 점은 일본의 실험 결과와 국산 PS 강봉의 피로 특성 크기가 상당히 유사하고 또한 경향은 오히려 미국의 실험 결과와 유사하게 나타나고 있다는 점이다. 이러한 현상은 아마도 일본과 미국의 기술 및 설비 영향을 많이 받아 생산된 데서 발생되었을 것으로 추정된다.

다만 그림 10에서 나타낸 국산 PS 강봉의 결과는 최소 응력이 40, 60%인 경우의 실험결과를 이용하여 작성된 회귀식인 이유로 경향 파악은 가능하나 높은 최소 응력 범위에서는 또 다른 결과가 나타날 것으로 예상된다. 왜냐하면 최소 응력이 "100"인 경우의 응력범위 값은 "0"이 되어야 하기 때문이다. 즉 전체적인 국산 PS 강봉의 최소 응력과 응력범위의 관계는 직선이 아닌 피로한도가 존재하는 반비례 곡선으로 예상된다.

5. PS 강봉의 피로에 의한 누적 손상 특성

5.1 피로 수명비와 최대 변형률과의 관계

본 절에서는 PS 강봉의 피로에 의한 변형률을 측정하여 피로 수명비와 최대 변형률과의 관계를 분석하고자 한다. 이때 피로 수명비라 함은 변형률을 측정할 때의 피로하중 반복수(N)와 시편 파단시의 반복수(Nf)의 비를 의미한다. 다만, 변형률 실험 자료 중, 실험 당시 PS 강봉의 피로 파괴를 일으키는 순간에는 시편 중앙에 설치한 Extensometer에 상당한 충격을 주어 파괴시의 정확한 변형률을 측정할 수 없는 어려움을 가지고 있다.

PS 강봉이 반복 하중을 받게 되면 피로하중에 의하여 손상이 발생되며 이에 따라 변형률이 점차 증가하게 된다. 표 7과 그림 11은 PS 강봉의 인장 피로에 의한 피로 수명비에 대한 최대 변형률과의 관계를 나타내었다. 그림 11에 의하면 반복하중에 의한 변형률 증가는 하중 반복수 증가에 따라 점점 증가되는데 이는 콘크리트의 "Cyclic Creep"과 유사한 현상으로 판단되어 본 연구에서는 누적 손상이라는 용어를 사용하였다. 또한 그림 11에서 알 수 있듯이, 피로 수명비에 대한 최대 변형률 곡선은 피로 수명의 초기 즉 1~2%에서 급격한 증가와 5~10%까지는 최대 변형률이 완만히 증가하는 위로 볼록한 곡선을 보이며 피로 수명의 약 80~85%까지는 거의 일정한 증가를 보인 후, 그 이후에서부터 피로 파괴 순간까지는 최대 변형률이 급격하게 증가하는 현상이 발생하였으나 센서로부터 측정할 수는 없었다. 그림 11에서 알 수 있듯이 응력수준은 피로수명비 및 변형률과는 비례관계 즉, 응력수준이 높을수록 변형률도 큼을 알 수 있다. 강재의 피로실험에 관한 기존의 연구 결과에서는 본 연구에서와 같이 변형률을 측정할 경우가 거의 없어 콘크리트 시편의 휨피로실험을 수행한 Holmen(1982)

의 실험 결과와 비교하여 보면, 이러한 결과는 Holmen이 실험한 휨인장 피로를 받는 콘크리트 시편의 3 단계 변형률의 변화와 일치하는 경향이 나타났으며, 응력수준과 변형률의 비례 관계 역시 유사한 결과를 보여주고 있다.

5.2 피로 수명비와 탄성계수와의 관계

탄성계수(Secant Modulus of Elasticity)를 피로에 의한 최대 변형률과 최소 변형률을 측정하여 다음과 같은 식 (3)에 의하여 구하였다.(유성원, 1990; 이희택, 1987; Miner, 1945)

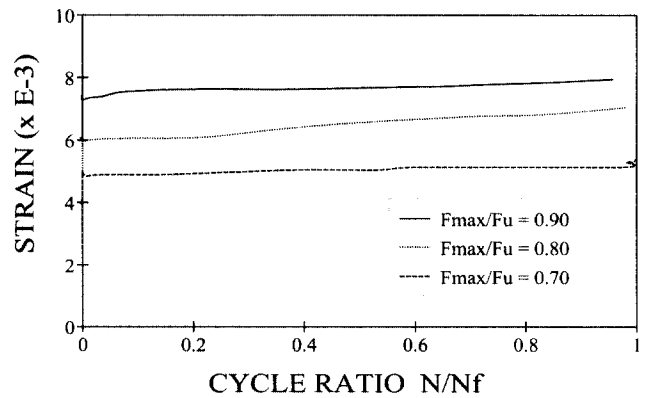
$$E = \frac{F_{max}}{(\epsilon_{max} - \epsilon_{min})} \quad (3)$$

여기서, E : 탄성계수

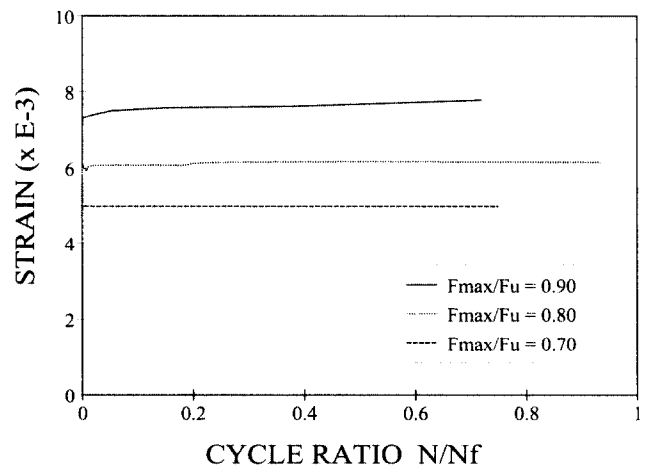
F_{max} : 반복 최대 응력

ϵ_{max} : 반복 최대 변형률

ϵ_{min} : 반복 최소 변형률



(a) $F_{min} = 0.40 F_u$ 인 경우



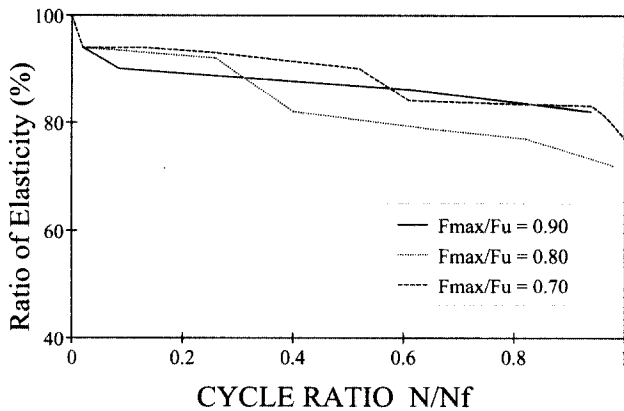
(b) $F_{min} = 0.60 F_u$ 인 경우

그림 11. 9.15mm 국산 PS 강봉의 변형률 - 피로 수명비 관계

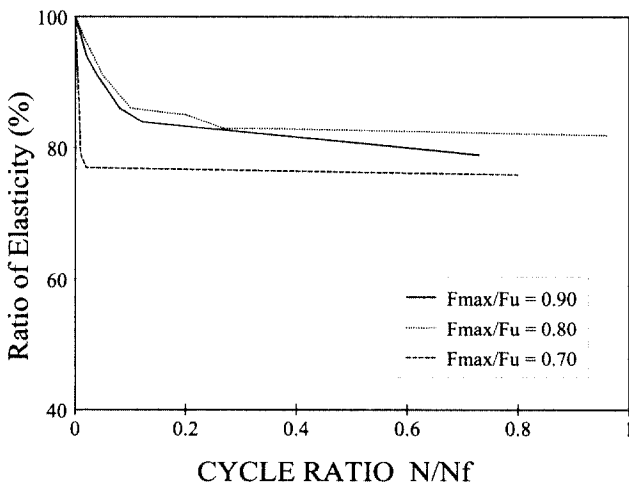
그림 12는 식 (3)에 의하여 구한 탄성계수의 초기 값을 100%로 하여 피로 수명비에 대한 탄성계수의 감소를 나타내는 그림이다. 그림 12에서 알 수 있듯이 탄성계수의 변화는 피로수명의 초기 즉 1~2%에서 급격한 감소와 5~10%까지는 초기보다는 완만하지만 급격한 감소를 보이다가 그 이후에서는 일정하게 감소하는 경향을 보이며 피로수명에 가까워진 피로수명의 약 90%이상에서는 다시 급격하게 감소하는 경향을 보인다.

그림 12에서 알 수 있듯이 반복 최소 응력이 클수록 초기의 탄성계수의 감소 현상이 더 크게 나타나나, 피로수명비가 10~90% 범위에서는 반대 현상 즉, 반복 최소 응력이 작을수록 탄성계수의 감소 폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 다만 피로 파괴 시점에서의 측정치가 없어 피로수명비가 90% 이상의 경우 현상은 불분명하게 나타났다.

또한 그림 12에서 알 수 있듯이 이러한 탄성계수의 감소에 있어서 반복 최대 응력에 대한 영향은 거의 없을 것으로 나타났다으며, 이는 Holmen(1982)의 콘크리트 시편 실험결과와 유사한 경향을 보여준다.



(a) $F_{min} = 0.40 F_u$ 인 경우



(b) $F_{min} = 0.60 F_u$ 인 경우

그림 12. 9.15mm 국산 PS 강봉의 탄성계수 - 피로 수명비 관계

6. 결 론

본 연구에서는 국내에서 생산되는 PS 강봉을 대상으로 고응력 범위에서의 응력 수준 및 직경별로 직접 인장 피로 실험을 수행하여 피로수명, 변형률의 변화 및 탄성계수의 변화 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 같은 응력 범위에서는 반복 최소 응력이 클수록 그때의 최대 응력도 커져서 피로 수명도 감소하며, 최대 응력이 일정한 경우에는 반복 최소 응력이 작을수록 그때의 응력 범위도 커져서 피로 수명도 감소한다.
- (2) 국산 PS 강봉의 경우, 고응력범위에서는 직경에 의한 피로 수명의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.
- (3) 최소 응력이 증가하면 피로 한도 수명에서의 허용 응력범위는 감소하는 것을 알 수 있으며, 최소 응력이 5~60% 이면 허용 응력 범위는 $2.60 \sim 20.9 F_{pu}$ (37.1~297.9 MPa)를 나타내고 있다.
- (4) 직접 인장 피로 실험 결과로부터 국산 PS 강봉의 각 응력 상태에서 피로 강도를 예측할 수 있는 회귀식을 제안하여 외국 실험 결과와 비교한 결과, 외국의 실험 결과와 본 연구에서의 결과는 경향은 비슷하지만 국가별 피로 특성은 차이가 있는 것으로 나타났다. 특히, 일본의 실험 결과와 국산 PS 강봉의 피로 특성 크기가 상당히 유사하고 또한 경향은 오히려 미국의 실험 결과와 유사하게 나타났다.
- (5) 국산 PS 강봉의 피로 하중에 의한 변형률의 변화는 피로 수명의 초기 1~2%에서 급격한 증가와 약 5~10%까지는 최대 변형률이 완만한 증가를 보이다가 10% 이후에는 일정하게 증가하며, 피로 수명의 80~90% 이후에는 다시 크게 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 응력수준은 피로수명비 및 변형률과는 비례관계 즉, 응력수준이 높을수록 변형률도 크게 나타났다.
- (6) 국산 PS 강봉의 피로 하중에 의한 탄성계수비의 변화는 최대 변형률의 변화와 유사한 경향으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 반복 최소 응력이 클수록 초기의 탄성계수의 감소 현상이 더 크게 나타나나, 피로수명비가 10~90% 범위에서는 반대 현상 즉, 반복 최소 응력이 작을수록 탄성계수의 감소 폭이 크게 나타났다.

감사의 글

이 논문은 우석대학교 학술연구비 지원에 의한 것입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 변근주, 송하원, 박상순, 노병철(1999) 국산 저이완 PS 강연선의 피로특성에 관한 연구, 한국콘크리트학회 논문집, 제11권 제6호, pp. 113-119.
- 오병환(1985) 콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험 연구, 대한토목학회 논문집, 제5권 제4호, pp. 113-119.
- 유성원(1990) PS 강봉 및 프리스트레스트 강봉의 피로 특성에 관한 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문.
- 이희택(1987) 일정 및 변동 진폭 하중하에서의 콘크리트의 피로 특성 연구, 서울대학교, 석사학위논문.
- American Society for Testing and Materials(1963) A Guide for Datigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data, *ASTM Special Technical Pub. 91 - A*.
- American Welding Society(1979) *Structural Welding Code - Reinforcing Steel, 3rd Ed., AWS D1.4-79*, pp. 35.
- Bennett, E. W.(1982) Fatigue Tests of Spliced Reinforcement in Concrete Beams, *Fatigue of Concrete Structures, SP-75*, ACI, pp.177-194.
- Helgason, T., Hanson, J. M., Somes, N. F., Corely, W. G., and Hognestad, E.(1976) *Fatigue strength of High - Yield reinforcing bars*, NCHRP Report 164.
- Holmen, J. O.(1979) Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading, Dr. Ing.-Thesis, The University of Trondheim, NTH. Nov. 1979, 218 pp.
- Holmen, J. O.(1982) Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading, *SP-79*, ACI, 1982, pp. 71-110.
- Miner, M. A.(1945) Cumulative Damage in Fatigue, Transactions of the ASME, *Structural Journal of the Applied Mechanics*, V.67, pp.159-164.
(접수일자 : 2003. 2. 6 / 심사일 2003. 2. 17 / 심사완료일 2003. 3. 21)