

# 하이브리드섬유보강 고강도콘크리트의 피로거동에 관한 연구

## A Study on the Fatigue behavior of Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete

김 남 옥\*      최 고 봉\*\*      김 한 상\*\*\*      배 주 성\*\*\*\*  
Kim, Nam-Wook      Choi, Go-Bong      Kim, Han-Sang      Bae, Ju-Seong

### Abstract

Recently, as the concrete structures are becoming bigger, higher, longer and more special, high strength concrete is demanded. But the fracture behavior of high strength concrete is shown more brittle than that of the normal strength concrete. Therefore, in order to improve the brittle fracture behavior and crack propagation resistance, ACI Committee363 has been recommend the use of fiber reinforced concrete which showed superior property against the crack propagation resistance. On the other hand, bridges, concrete pavements and railroads etc. have been exposed to the repetition loading at least several million times during the service life. Therefore, fatigue load is dominantly most of all, but it is very difficult to estimate the suitable fatigue strength calculated by fatigue load. In this research, in order to examine the fatigue behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete, the static and fatigue tests were carried out. And from these results, it was estimated the fatigue strength of hybrid fiber reinforced high strength concrete.

### 요 지

최근들어 콘크리트 구조물이 대형화, 고층화, 장대화 및 특수화 됨에 따라 고강도콘크리트의 사용이 요구 되고 있으나 고강도콘크리트는 일반강도콘크리트 보다 취성적인 파괴거동을 나타내고 있다. 따라서 취성적인 파괴 특성을 개선하고 균열성장 저항성을 증진시키기 위하여 ACI 363 위원회에서는 섬유보강콘크리트의 사용을 추천하고 있다. 한편, 교량 및 콘크리트 포장 등은 공용기간중에 적어도 수백만회 이상의 반복하중을 받고 있어 피로하중이 지배적이나 이에 대한 피로거동 및 피로강도의 규명이 어려운 실정이다. 본 연구에서는 하이브리드섬유보강 고강도콘크리트의 피로거동과 피로강도를 규명하기 위하여 정적 및 피로시험으로부터 구한 반복회수와 중앙처짐과의 관계를 비교분석 하였으며 S-N선도로부터 피로강도식을 제안하였다.

**Keywords :** Fatigue Behavior, Hybrid Fiber, High Strength, S-N Diagram, Fatigue Strength

**핵심 용어 :** 피로거동, 하이브리드섬유보강, 고강도, S-N선도, 피로강도

\* 정희원, 신성대학 겸임전임강사, 공학박사

\*\* 정희원, (주)동아기술공사 엔지니어, 공학석사

\*\*\* 정희원, 캔사스주립대학교 토목공학과 연구조교

\*\*\*\* 정희원, 전북대학교 교수, 공학박사

E-mail : asahi00@naver.com 063-270-2427

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 국내산업의 급속한 발전과 더불어 사회간접자본시설, 산업용 대형플랜트의 건설, 고층빌딩, 각종 스포츠시설 및 원자력발전소 등 구조물이 대형화, 다양화 및 특수화 되면서 고강도콘크리트(이하, HSC)의 사용이 증가하고 있다. 그러나 HSC는 보통강도콘크리트와는 매우 다른 취성적인 파괴거동을 보이고 있어 이러한 역학적 특성을 개선시키기 위하여 ACI 363 위원회에서는 각종 하중하에서 균열성장 저항능력이 우수한 강섬유 보강콘크리트의 사용을 추천하고 있다. 최근 섬유보강콘크리트(FRC)의 국제적인 연구동향을 살펴보면, 1990년대부터 콘크리트 매트릭스에 단종, 단일길이의 섬유를 사용한 종전의 FRC를 대신하여 섬유의 길이나 종류를 달리하여 각각의 섬유가 가지고 있는 고유의 특성 중 장점을 이용한 이른바 하이브리드섬유보강 콘크리트(hybrid fiber reinforced concrete : HFRC)의 연구가 활발히 진행되고 있다. (김남욱, 2000) 한편 구조물의 반복하중에 의한 피로 시험 결과는 S-N(응력-하중반복회수)선도로 표시되며, 이 S-N선도가 하중반복회수 축과 평행한 점근선을 이룰 때, 이에 대응하는 응력값을 피로한도(fatigue limit)라고 한다. 대부분의 금속들은 이러한 피로한도를 가지고 있지만, 일반적으로 콘크리트와 같은 취성재료는 피로파괴의 역학적 거동이 복잡하게 진행되기 때문에 금속과 달리 미리 정한 반복회수에 대한 피로강도를 사용하고 있다. 콘크리트나 모르타에 대한 피로파괴 현상은 크게 다음과 같이 세가지 단계로 진행되는 것으로 추정되고 있다. (Romualdi 등, 1963, Norby 등, 1958)

균열이 시작되는 첫째 단계는 콘크리트 구조체 내에 존재하는 공극이나 완전히 부착되지 않은 골재와 시멘트 풀의 경계면 등에서 나타나는 것으로, 이는 혼합물인 콘크리트가 가지는 근본적인 결함으로부터 야기된다. 두 번째 단계는 한계크기(critical size)에 대한 균열의 느린 성장 단계로 콘크리트와 같은 이질적인 재료 내에서 일어나는 복합적인 성질을 말한다. 콘크리트의 정적하중 상태에서 이러한 미세 균열화(micro-cracking stage)라고 불리는 결함의 성장은

통계적으로 응력영역 내에서 결함의 모양, 크기 및 배향 상태에 따라 한계크기까지 느리게 진전된다. 이 후에는 이러한 균열이 급하게 성장하게 되며, 이를 세 번째 단계인 한계크기에 대한 균열의 빠른 성장 단계(macro-cracking stage)라고 한다. 실제적으로 콘크리트의 피로파괴의 단계 중 첫 번째와 세 번째 단계를 조절할 수 있는 방법은 거의 없으나, 두 번째 단계를 콘크리트나 모르타에 강섬유나 폴리프로필렌섬유를 보강하여 균열의 느린 성장단계를 좀 더 늦추거나 억제하여 피로강도의 향상을 유도할 수 있다.

본 논문에서는 반복하중을 받는 고강도 콘크리트 부재의 피로거동을 증진시키기 위하여 섬유보강을 도입하였으며 특히 성능은 우수하나 아직까지는 연구실적이 미비한 하이브리드섬유보강을 적용하였다.

따라서 무보강, 단일섬유보강 및 하이브리드섬유보강에 대한 피로시험을 수행하여 반복회수와 중앙처짐과의 관계를 비교 분석하였으며, 피로파괴시의 반복회수로 부터 무보강, 단일섬유보강 및 하이브리드 섬유보강 고강도콘크리트의 피로강도를 구하였다.

## 2. 시험계획

### 2.1 사용재료

본 시험에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 적합한 국내산 D사의 분말도 3.15인 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고 굵은골재와 잔골재는 각각 비중이 2.53 이고 굵은골재 최대치수가 19mm인 쇄석과 비중이 2.65인 하천사를 사용하였으며 골재의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

강섬유 보강 시 그 혼입율이 증가함에 따라 슬럼프가 현저히 감소하므로 본 연구에서는 소정의 워커빌리티를 확보하기 위하여 고성능 AE제를 사용하였으며,

Table 1 골재의 물리적 특성

종류	비중	흡수율(%)	F.M	최대치수(mm)
잔골재	2.65	1.78	2.68	---
굵은골재	2.53	1.64	6.67	19

그 첨가량은 일본토목학회 “강섬유보강콘크리트의 설계시공지침”을 참조하여 목표 슬럼프 8±2cm가 되도록 예비시험시 수회의 슬럼프시험을 실시하여 결정하였고, 콘크리트의 고강도화를 위하여 실리카 흙을 사용하였다.

실리카 흙은 silicon, ferro-silicon, silicon-metal 을 제조할 때 발생하는 SiO<sub>2</sub>를 주성분으로 하는 초미립 혼화재료로서 콘크리트의 조직을 밀실하게 하는 효과가 있다. 본 연구에서는 캐나다산 분말형 실리카 흙을 시멘트 중량 대비 7.5%로 혼입하였다.

강섬유는 굵은골재 최대치수를 고려하여 길이 60mm 및 30mm 인 양단 갈고리 형태를 사용하였으며, 폴리프로피렌섬유(PP섬유)는 길이 19mm 망사형으로 강섬유의 형태는 Fig. 1과 같으며 각 섬유의 물성치는 Table 2와 같다.

## 2.2 시험체 제작

본 연구에서는 섬유보강여부, 단일섬유보강, 하이브리드섬유보강 및 각 섬유의 혼입률에 따라 8종류의 시험체를 제작하였으며 각 시험체의 종류는 Table 3에 나타내었다. 모든 시험체의 설계기준강도는 51MPa로 하였으며, 섬유의 총 혼입률은 1.0%로 일정하게 하였다. 또한 콘크리트의 고강도화를 위하여 보통포틀랜드 시멘트 중량의 7.5% 실리카 흙을 사용하였으며 3점 휨시험 및 피로시험용 시험체의 크기는 150.0×150.0×550.0mm로 제작하였다.

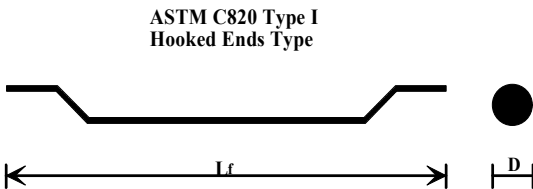


Fig. 1 강섬유의 형태

Table 2 사용한 섬유의 물성

섬유	길이:l (mm)	직경:d (mm)	형상비 (l/d)	비중	형태	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
강섬유	30	0.5	60	7.85	Hooked	1,121	203,874
	60	1.0	60	7.85	Hooked	1,121	203,874
PP섬유	19	0.1	190	0.9	Net	624	3,568

Table 3 시험체의 종류

시험체 번호	강섬유		PP섬유		총혼입률 (%)
	길이 (mm)	혼입률 (%)	길이 (mm)	혼입률 (%)	
1	-	-	-	-	0.0
2	30	1.0	0	0	1.0
3	60	1.0	0	0	1.0
4	30	0.25	0	0	1.0
	60	0.75			
5	30	0.50	0	0	1.0
	60	0.50			
6	30	0.75	0	0	1.0
	60	0.25			
7	30	0.75	19	0.25	1.0
8	60	0.75	19	0.25	1.0

## 2.3 시험

시험체는 28일간 수중양생을 실시한 후 최대휨강도를 산정하기 위하여 3점 정적 휨시험을 실시하였으며, 안정적인 균열성장을 유도하기 위하여 최대하중에 도달하는 시간을 5분 정도 걸리는 속도로 하는 RILEM 규정의 변위제어법에 의거 수행하였으며 각 시험체의 최대 정적하중의 70%, 80% 및 90%를 피로하중으로 하여 피로시험을 수행하였다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 3점 휨시험

본 시험에서는 단일섬유보강 및 하이브리드섬유보강 고강도콘크리트에 3점 휨시험을 통하여 최대하중을 구한 후, 이 최대 하중의 70%, 80% 및 90%의 하중을 피로시험 시의 하중으로 이용하였다. 한편, 각 시험체의 정적 최대하중 및 하중-처짐곡선은 Fig. 2~Fig. 9에 나타내었다. 각 시험체의 하중-처짐곡선으로 부터 섬유가 보강되지 않은 무보강 시험체 보다 섬유보강 시험체의 경우가 최대하중의 증가 및 균열의 성장에 대한 저항성이 증가되는 것을 알 수 있었다. 단일섬유보강 시험체와 하이브리드섬유보강 시험체의 경우는 단일 강섬유 30mm를 혼입한 시험체 2에 비해서 모든 하이브리드섬유보강 시험체의 경우가 최대하중의 증가에 효과적임을 알 수 있었다.

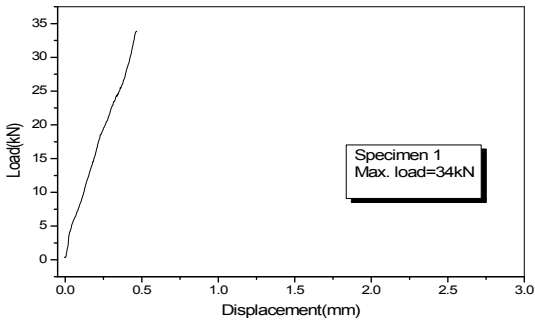


Fig. 2 시험체 1의 하중-처짐곡선

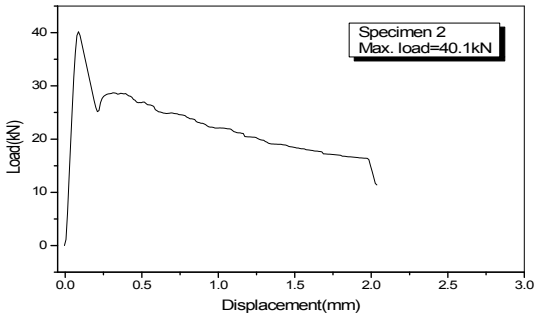


Fig. 3 시험체 2의 하중-처짐곡선

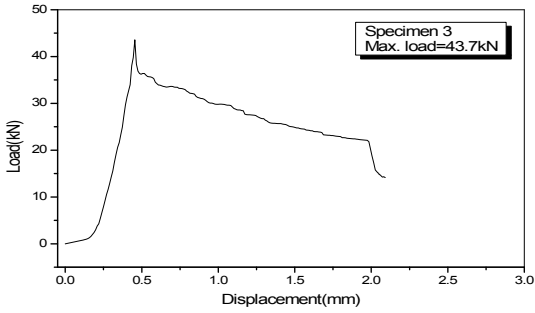


Fig. 4 시험체 3의 하중-처짐곡선

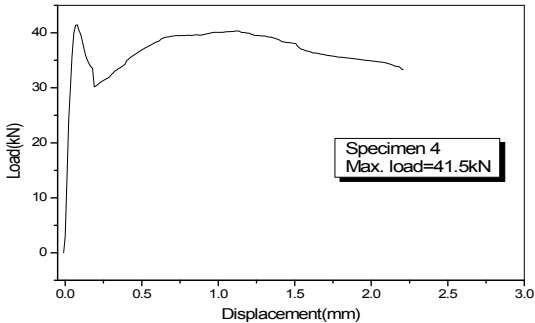


Fig. 5 시험체 4의 하중-처짐곡선

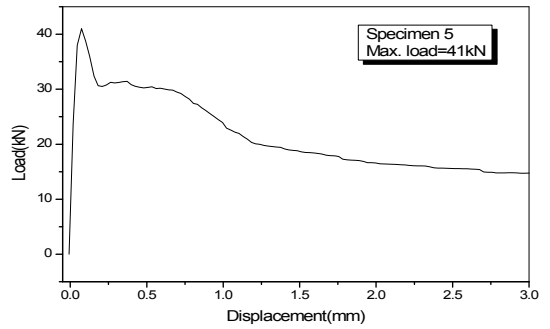


Fig. 6 시험체 5의 하중-처짐곡선

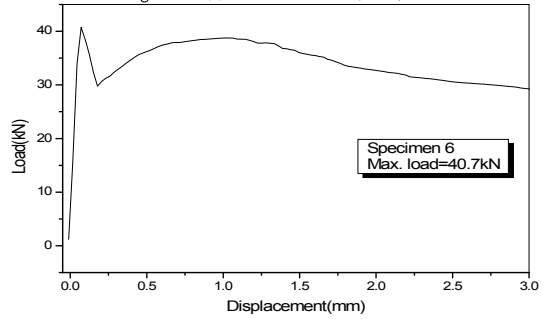


Fig. 7 시험체 6의 하중-처짐곡선

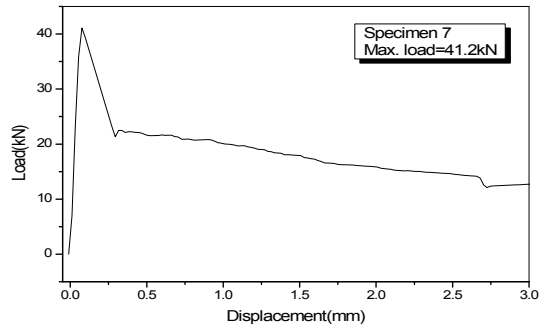


Fig. 8 시험체 7의 하중-처짐곡선

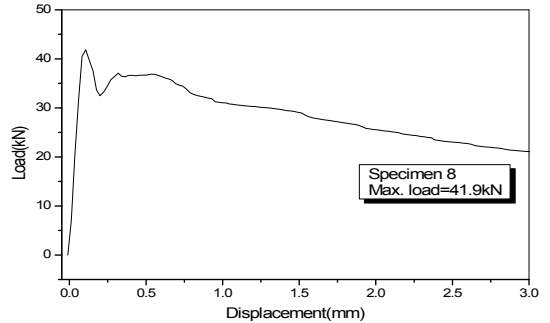


Fig. 9 시험체 8의 하중-처짐곡선

한편, 단일 강섬유 60mm를 혼입한 시험체 3의 경우 최대하중은 하이브리드섬유보강 시험체보다 약간 높게 나타나 섬유의 길이가 긴 경우 최대하중의 증진에는 효과적이나, 파괴에 대한 저항성은 하이브리드섬유보강 시험체가 효과적인 것으로 나타났다.

### 3.2 피로시험

#### 3.2.1 반복회수와 중앙처짐

단일섬유보강 및 하이브리드섬유보강 고강도 콘크리트의 섬유 혼입율의 변화 및 하중레벨의 증가와 반복회수에 따른 중앙처짐을 파악하기 위하여 피로시험을 실시하였다. 재하속도는 모든 하중레벨에서 일정하게 유지하기 위하여 하중레벨이 70% 및 80%인 경우 10Hz 및 5Hz로 하였으며 90%인 경우는 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위해 1Hz의 속도로 재하하였다.

처짐은 측정자료 중 최대처짐을 이용하였으며 콘크리트의 파괴 이후 처짐의 비교는 의미가 없으므로 본 연구에서는 파괴 직전까지의 처짐 자료를 이용하였다.

각 응력레벨에서 LVDT를 통해 측정된 반복회수 및 중앙처짐의 결과를 각 시험체별로 정리하여 Fig. 10~Fig. 12 및 Table 4에 나타내었다.

결과에서 나타난 바와 같이 모든 하중레벨에서 하이브리드 강섬유 보강인 시험체 4의 반복회수가 가장 크게 나타나 피로파괴에 대한 저항성 증진에 가장 효과적임을 알 수 있었다. 또한, 초기균열제어에 효과가 있는 폴리프로필렌섬유와 강섬유를 혼입한 하이브리드 섬유 보강 시험체 7 및 8은 강섬유들의 하이브리드섬

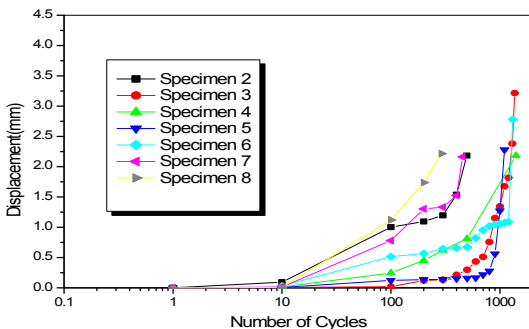


Fig. 10 하중레벨 70%인 경우 반복회수와 중앙처짐 관계

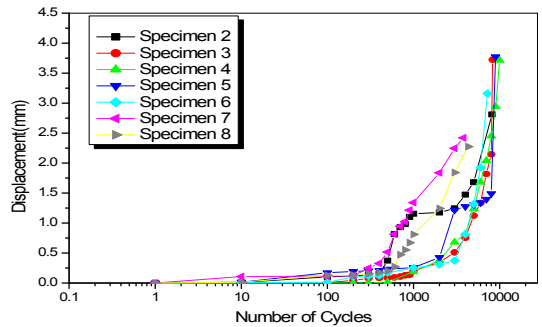


Fig. 11 하중레벨 80%인 경우 반복회수와 중앙처짐 관계

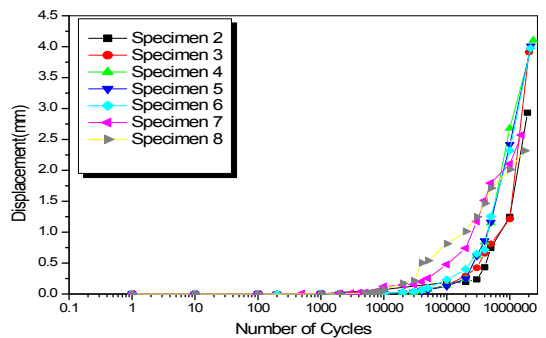


Fig. 12 하중레벨 90%인 경우 반복회수와 중앙처짐 관계

유 보강 시험체 3~6보다 반복회수가 작은 것으로 나타났다. 이는 폴리프로필렌섬유가 초기균열제어에는 효과가 있지만, 반복적인 피로하중을 받아 균열이 확장되어진 경우에는 균열에 대한 저항 성능이 감소되기 때문이라고 판단된다.

한편, 하중레벨 90%의 경우, 60mm 단일 강섬유를 보강한 시험체 3이 시험체 4를 제외한 다른 하이

Table 4 시험체별 반복회수 및 중앙처짐

시험체 번호	하중레벨 70%		하중레벨 80%		하중레벨 90%	
	반복 회수	처짐 (mm)	반복 회수	처짐 (mm)	반복 회수	처짐 (mm)
1	132	0.354	618	0.365	854	0.371
2	497	2.184	8143	2.812	1910942	2.932
3	1364	3.215	8271	3.723	2013762	3.912
4	1404	2.182	10973	3.714	2374130	4.104
5	1100	2.279	8963	3.774	2164321	4.012
6	1312	2.782	7194	3.162	2120423	3.975
7	454	2.162	3794	2.421	1543275	2.571
8	291	2.216	4316	2.274	1703184	2.318

브리드섬유보강 시험체 보다 반복회수가 더 커지는 경향을 보였다.

그러나 고강도 콘크리트구조물의 사용하중이 일반적으로 최대하중의 60~70%인 점을 고려할 때, 본 연구결과, 최대하중의 70%~80% 범위에서는 하이브리드 강섬유보강 시험체의 반복회수가 단일 강섬유보강 시험체 보다 큰 것으로 나타나, 구조물의 실제 하중상태를 고려한다면 하이브리드섬유 보강이 효과적이라고 판단된다.

### 3.2.2 S-N 선도

일반적으로 피로수명과 피로강도와의 관계식은 다음과 같은 지수형태의 함수인 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$R = K \times \exp(-C \times \log N_f) \quad (1)$$

여기서, R은 피로강도,  $N_f$ 는 피로수명, K와 C는 실험상수

식(1)의 양변에 대수를 취하여 정리하면 식(2)와 같다.

$$\log R + C \times \log e \times \log N_f = \log K \quad (2)$$

윗식에서  $\log R = a$ ,  $C \times \log e = \beta$ ,  $\log K = Y$ 로 놓으면, 식(2)는 아래의 식(3)으로 치환될 수 있다.

$$Y = a + \beta \times \log N_f \quad (3)$$

본 연구에서는 무보강 고강도콘크리트, 섬유의 총 혼입율을 1.0%로 고정시킨 단일섬유 보강 고강도콘크리트 및 하이브리드섬유보강 고강도콘크리트에 대해서 피로시험을 수행하여 구한 피로수명을 이용하여 S-N 선도를 작도하였으며 이로부터 피로강도식을 구하였다. 무보강, 단일 강섬유보강, 하이브리드 강섬유보강 및 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드 섬유보강 시험체의 S-N선도는 각 각 Fig. 13~Fig. 16에 나타내었다. 기존의 연구에서 무보강 고강도 RC부재의

피로강도는 반복회수 200만회에서 최대하중의 약 60%~65% 정도로 나타나고 있는데 본 연구결과, 섬유를 혼입하지 않은 무보강 시험체의 경우 63.7% 정도로 산정되어 기존의 연구결과와 비교할 때 본 연구결과는 타당하다고 판단된다.(Batson, 1972)

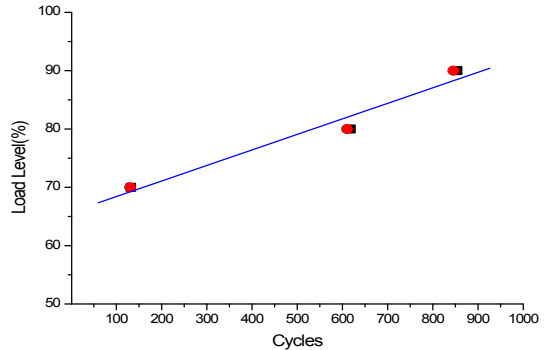


Fig. 13 무보강 시험체의 S-N선도

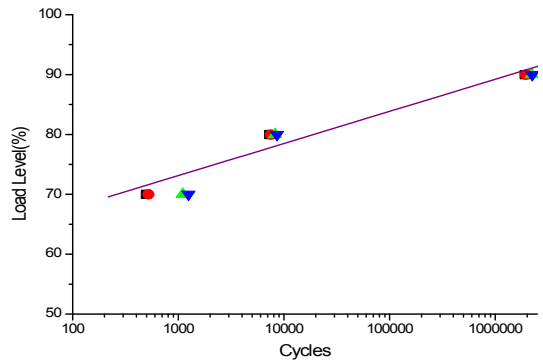


Fig. 14 단일강섬유보강 시험체의 S-N선도

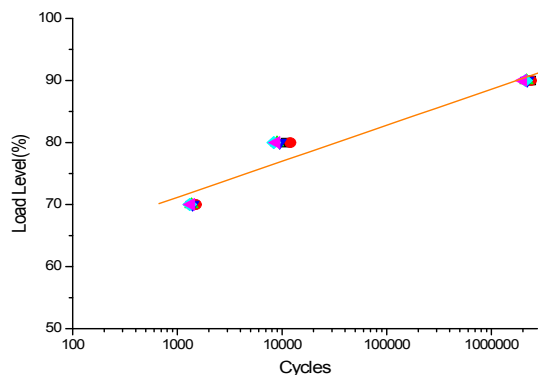


Fig. 15 하이브리드 강섬유보강 시험체의 S-N선도

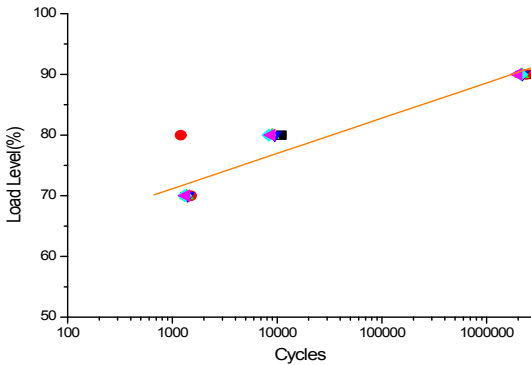


Fig. 16 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드섬유보강 시험체의 S-N선도

본 연구에서 산정된 피로강도식을 이용한 반복회수 200만회에 대한 피로강도는, 무보강 시험체는 최대하중의 63.7%, 단일 강섬유보강 시험체는 71.5%, 하이브리드 강섬유보강 시험체는 75.6% 및 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드섬유보강 시험체는 70.5%이었다. 따라서 콘크리트의 피로강도가 섬유 혼입으로 인하여 증대되는 것을 알 수 있었으며, 특히 하이브리드 강섬유 보강이 피로강도 증진에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

한편, 본 연구의 범위내에서 회귀분석에 의한 피로강도와 피로수명의 관계는 다음과 같은 직선식들로 나타낼 수 있다.

- 1) 무보강 시험체

$$Y = 55.76 + 0.023 \log N_f \quad (R^2 = 0.985)$$

(4)

- 2) 단일 강섬유보강 시험체

$$Y = 57.05 + 5.36 \log N_f \quad (R^2 = 0.981)$$

(5)

- 3) 하이브리드 강섬유보강 시험체

$$Y = 53.73 + 5.81 \log N_f \quad (R^2 = 0.968)$$

(6)

- 4) 강섬유 및 폴리프로피렌섬유의 하이브리드 섬유보강 시험체

$$Y = 58.20 + 5.26 \log N_f \quad (R^2 = 0.964)$$

(7)

#### 4. 결론

본 연구에서 무보강, 단일섬유보강, 하이브리드 강섬유보강 및 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드섬유보강 고강도 콘크리트 시험체에 대하여 정적3점 휨시험 및 피로시험을 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 섬유를 혼입하지 않은 무보강 시험체 보다 섬유보강의 경우 최대하중 및 균열성장에 대한 저항성이 증진되었으며, 단일섬유보강 보다 하이브리드섬유보강 시 더욱 효과적으로 나타났다.
- 2) 모든 하중레벨에서 길이 30mm와 60mm의 강섬유를 각각 0.25% 및 0.75% 혼입하여 하이브리드섬유보강한 시험체4의 경우, 반복회수가 가장 크게 나타나 피로에 대한 저항성 증진에 가장 효과적인을 알았다.
- 3) 하이브리드 강섬유보강 시험체 보다 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드보강 시험체가 피로에 대한 저항성 효과가 적은 것으로 나타났는데, 이러한 현상은 폴리프로피렌섬유가 초기균열제어에는 효과적 이지만, 지속적인 반복하중을 받아 균열이 확장되어진 경우에는 균열에 대한 저항성이 떨어지기 때문이라고 판단된다.
- 4) 섬유를 보강하지 않은 고강도 RC부재에 대한 기존의 연구와 본 연구의 피로강도가 거의 일치하게 나타나 본 연구결과는 타당하다고 판단된다.
- 5) 본 연구에서 산정된 피로강도식을 이용한 반복회수 200만회에 대한 피로강도는, 무보강 시험체는 최대하중의 63.7%, 단일 강섬유보강 시험체는 71.5%, 하이브리드 강섬유보강 시험체는 75.6% 및 강섬유와 폴리프로피렌섬유의 하이브리드섬유보강 시험체는 70.5%이었다. 따라서 콘크리트의 피로강도가 섬유의 혼입으로 인하여 증대되는 것을 알 수 있었으며, 특히 하이브리드 강섬유 보강이 피로강도 증진에 가장 효과적인 것으로 나타났다

---

## 감사의 글

본 연구는 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.



---

### 참고문헌

1. 손영현, "강섬유보강 콘크리트의 휨피로거동에 관한 연구" 한양대학교 대학원 석사학위논문, 1991 pp.29~41.
2. 金南旭, 長短纖維を混入したハイブリッド纖維補強コンクリートのひび割れ抵抗性に關する研究, 北海道大學 工學博士學位論文, 2000. 3.
3. Glucklich, Goseph, "On The Compression Failure of Plain Concrete," T & A.M. Report No. 215, University of Illinois, Urbana, Mar. 1962.
4. Norby, G. M., "Fatigue of Concrete- A Review of Research," Journal of ACI, Proceedings Vol. 57, No.8, 1958, pp.174~219.
5. Romualdi, J.P. and Batson, G. B, "Mechanics of Crack Arrest in Concrete," ASCE, EM3, 1963, pp.147~168.
6. Romualdi, J.P. and Batson, G. B, "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement." Journal of ACI, Proceeding Vol. 60, 1963, pp.775~790.
7. Batson, G. B, "Flexural Fatigue Strength of Concrete Beam", Journal of ACI, Proceedings Vol.11, 1972, pp.673~677.

(접수일자 : 2004년 7월 26일) (금행)