

P.S 콘크리트 구조물의 신뢰성 해석

안세희*, 고상훈**, 박종철***, 김두환****

서울산업대학교 * ** *** ****

1. 개 요

본 연구에서는 Post-Tensioning System용 정착구의 구성품인 2 Piece Wedge 와 3 Piece Wedge를 장착한 P.S 콘크리트 시험체의 피로 수명 예측과 피로수명 분포특성을 고찰하기 위하여 피로시험을 수행하였다. 피로 시험결과를 피로해석에 적합한 것으로 알려진 Weibull 분포에 적용하여 실험과 확률해석에 의한 회귀분석식 및 피로강도의 비교, 2 Piece Wedge 와 3 Piece Wedge 시험체의 안전계수, 응력수준별, 피로 수명 분포도, 응력 수준별, 파괴확률, 2 Piece Wedge 와 3 Piece Wedge의 위험함수등을 고찰하였다.

2. Weibull 분포

대수정상분포함수가 수학적 편의성 때문에 금속피로에 널리 사용되었지만, Weibull 분포가 피로거동에 대한 물리적 현상을 잘 설명할 수 있어 피로해석에 더 적합하다고 알려졌다. Weibull 분포는 콘크리트의 피로 해석에 적용하는 연구실적은 극히 적으나 피로 거동 예측을 하는 데에는 적합한 것으로 알려져 있다.

Weibull 분포의 확률밀도함수(PDF)는 식 2.1, 누적분포함수(CDF)는 식 2.2 로 표시 할 수 있으며, 그림 2.1, 2.2 와 같이 나타낼 수 있다.

확률밀도함수(PDF) :

$$f_N(n) = \frac{k}{u-n_0} \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right]; n \geq n_0 \quad \text{식 2.1}$$

누적분포함수(CDF)

$$F_N(n) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{n-n_0}{u-n_0} \right)^k \right]; n \geq n_0 \quad \text{식 2.2}$$

여기서, u = Characteristic life parameter occurring at point where 63.2 percent have failed

k = 형상변수(shape parameter), n_0 = 최소수명 (minimum life),

n = 시험체의 수명(specimen life)

Weibull 분포의 위험함수(hazard function)는 식 2.3 같이 나타낼 수 있다.

$$h_N(n) = k \left(\frac{n - n_0}{u - n_0} \right)^{k-1} : n \geq n_0 \quad \text{식 2.3}$$

Weibull 분포도의 일반적인 확률밀도함수에서 피로수명의 폭은 특성치 u 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 피로실험결과의 S-N선도를 근거로 추정하였다.

피로실험결과로부터 응력과 반복횟수에 대한 회귀분석식은 $N \times S^A = B$ 와 같으며, 피로수명 N 이 Weibull 분포를 따를 때, 매개변수 k, u 는 식 2.4와 같이 구할 수 있다.

$$k^2 = \frac{\pi^2}{6s^2} \quad u = \frac{0.5772}{k} + \ln(B \times S^{-A}) \quad \text{식 2.4}$$

여기서, s 는 $\ln N$ 의 추정에 대한 표준편차, A 와 B 는 실험상수, S 는 응력 수준이다. 주어진 응력 수준에 대한 평균피로수명은 식 2.4로부터 식 2.5 같이 구할 수 있다.

$$E(N) = u \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = B \times S^{-A} \exp\left[\frac{0.5772}{k}\right] \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{식 2.5}$$

실제수명 N_D 는 피로파괴가 일어나는 확률을 최소화시킬 수 있도록 정해져야 하며, 파괴확률은 $p_k = P[N < N_D] = F_N(n)$ 이므로 누적분포함수와 동일하다. 따라서 파괴확률 p_f 에 대응하는 실제수명 N_D 는 식 2.2로부터 식 2.6과 같다.

$$N_D = u \left[\ln\left(\frac{1}{1 - p_f}\right) \right]^{\frac{1}{k}} \quad \text{식 2.6}$$

요구되는 평균 피로 수명은 식 2.5 및 식 2.6 으로부터 식 2.7과 같다.

$$E[N] \approx N_D \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) (p_f)^{-\frac{1}{k}}, \quad N_D = \frac{E[M]}{\phi} \quad \text{식 2.7}$$

여기서, ϕ 는 실제수명에 대한 안전계수로 해석될 수 있다.

3. Weibull 분포에 따른 시험체의 피로강도해석

그림 3.1은 실험결과로부터 Weibull 분포의 계수들을 결정한 후, 각각의 응력 수준별 분포도를 나타낸 것이다.

3.1. 확률해석

피로실험을 한 후 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 S-N선도와 회귀 분석식은 그림 3.1, 3.2 와 같다.

표 3.1 S-N 선도에 의한 회귀 분석식

시험체명	S-N 선도에 의한 회귀분석식	
2 Piece Wedge	$S = N^{-0.0993} B^{2.003}$	$N_f \cdot S^{10.73} = 2005$
3 Piece Wedge	$S = N^{-0.0825} \cdot B^{1.67}$	$N \cdot S^{12.103} = 508.23$

Weibull 분포의 계수를 구하기 위하여 회귀 분석에 의한 결과 값과 실험에 의한 실험값은 표 3.2와 같다.

표 3.2 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 각 용력 수준별 회귀분석과 실험결과

용력수준	2 Piece Wedge		3 Piece Wedge	
	회귀분석 결과값	실험값	회귀분석 결과값	실험값
60%	481,450	455,948	246,091	363,421
65%	203,964	199,283	93,405	199,843
70%	92,090	95,661	38,092	48,357
75%	43,925	49,461	16,527	9,986

위의 표로부터 2 Wedge 의 경우는 표준오차(s)는 0.14이고 형상변수 k는 9.16이며, 3 Wedge 인 경우 표준오차(s)는 1.02이고 형상계수 k는 1.26이다.

표 3.3 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 Weibull 분포계수

시험체 \ 계수	k	A	B
2 Piece Wedge	9.16	10.73	2005
3 Piece Wedge	1.26	12.103	508.23

표 3.4 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 용력수준에 따른 평균수명

시험체	평균 수명	60%	65%	70%	75%
2 Piece Wedge	E(N)	332,714	140,952	63,641	30,355
	u	512,764	217,230	98,080	46,781
3 Piece Wedge	E(N)	598,783	227,269	92,685	40,213
	u	389,085	147,678	60,226	26,130

실험결과와 파괴확률 50%인 경우의 확률해석결에 의한 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 회귀분석식과 피로강도는 표 3.5와 같다.

표 3.5 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 임의 응력수준에 대한 피로강도 해석식과 피로강도

구 분	회 귀 분 석 식	100만회에 대한 피로강도	확률/실험
2 Piece Wedge 실험값	$S = -0.0605072 \times \ln(N) + 1.39156$	55.56%	1.0
2 Piece Wedge 확률해석값	$S = -0.0626 \times \ln(N) + 1.4173$	55.24%	1.013
3 Piece Wedge 실험값	$S = -0.0535343 \times \ln(N) + 1.26412$	52.45%	1.0
3 Piece Wedge 확률해석값	$S = -0.0555 \times \ln(N) + 1.2871$	52.03%	0.992

일반적으로 철근콘크리트의 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적강도의 약 50%~60%인 것으로 알려졌으며, 위의 표로부터 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 반복횟수 100만회에 대한 피로강도는 정적강도의 50%~60%로 나타나 일반콘크리트와 유사하지만, 하중저항능력은 2 Piece Wedge 가 우수한 것으로 나타났다.

3.2 안전계수

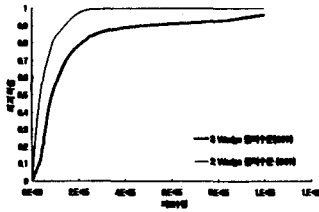
그림 3.3 a), b)는 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 S-N-P 선도이며, 파괴확률 50%인 경우는 확률해석의 평균값이다. 실험과 파괴확률5%에 대한 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 안전계수는 아래의 표와 같으며, 일반적으로 강재의 경우 응력수준에 대한 안전계수는 1.5에서 2.0이상이며, 반복회수에 대한 안전계수는 10에서 20이상이다. 해석결과 피로수명 100만회에 대한 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 안전계수(X_N)는 2 Piece Wedge 시험체의 경우 안전계수가 2.4, 3 Piece Wedge 시험체의 경우 안전계수가 1.42로 나타났고, 임의의 응력수준60%에 대한 반복회수의 안전계수는 2 Piece Wedge 시험체의 안전계수는 1.56, 3 Piece Wedge 시험체의 안전계수는 3.37로 나타났다.

표 3.6 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 안전계수

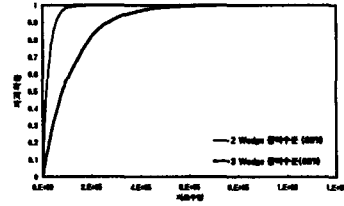
구 분	2 Piece Wedge	3 Piece Wedge
반복회수 100만회에 대한 응력수준의 안전계수	$X_N = \frac{S_{exp}}{S_{5\%}}$ $= \frac{55.56}{23.14} = 2.4$	$X_N = \frac{S_{exp}}{S_{5\%}}$ $= \frac{52.45}{36.82} = 1.42$
임의의 응력수준60%에 대한 반복회수의 안전계수	$X_N = \frac{N_{exp}}{N_{5\%}}$ $= \frac{437796}{279201} = 1.56$	$X_N = \frac{N_{exp}}{N_{5\%}}$ $= \frac{509617}{153620} = 3.37$

3.3 Weibull 분포와 파괴 확률

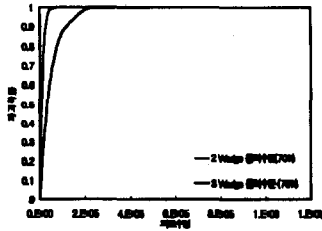
그림 3.4는 용력수준별 Weibull 분포와 누적분포함수 즉, 파괴확률을 나타내고 있다. 그림 3.4 으로부터 2 Piece Wedge의 피로수명 100만회에서의 파괴확률은 3 Piece Wedge보다 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. 즉 용력수준이 높을수록 2 Piece Wedge 가 3 Piece Wedge 보다 우수함을 알 수 있다.



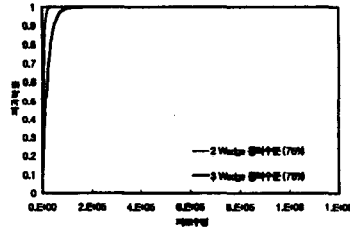
a) 용력수준 60%



b) 용력수준 65%



c) 용력수준 70%



d) 용력수준 75%

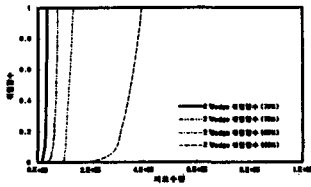
그림 3.1 용력수준별 파괴확률

3.4 위험함수

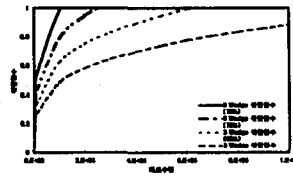
그림 3.5는 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체 별로 위험함수를 나타내었다. 반복회수가 증가함에 따라 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체 관계없이 위험함수가 증가하는 것으로부터 Weibull 분포는 피로해석에 적합한 것을 알 수 있다.

3 Piece Wedge 시험체의 경우, 용력수준이 낮을 때는 위험함수의 증가가 적지만 용력수준이 높을 때는 위험함수는 급작스런 증가를 나타내고 있다. 따라서, 낮은 용력수준에서는 3 Piece Wedge 사용이 가능하지만 높은 용력수준에서는 적절하지 못한 것으로 사료된다.

2 Piece Wedge 시험체의 경우, 용력수준이 높을수록 위험함수는 크게 나타났지만 3 Piece Wedge 시험체와는 달리 급작스런 증가는 없는 걸로 나타났다. 또한 용력수준과 관계없이 반복회수 초기에는 위험함수가 크게 증가하였다. 그러나 반복회수가 증가할수록 위험함수의 증가율은 3 Piece Wedge 시험체보다는 적기 때문에 피로에서는 안정적인 것으로 나타났다.



a) 2 Piece Wedge 시험체



b) 3 Piece Wedge 시험체

그림 3.2 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 시험체의 위험함수

4. 결론

본 연구의 결과는 P·S 콘크리트 구조물의 정착부에서 많이 쓰이는 2 Piece Wedge, 3 Piece Wedge 로 시험체를 제작하여 시험체의 피로특성과 피로수명분포를 비교·고찰하기 위하여

피로실험과 Weibull 분포에 의한 피로해석을 수행하였으며, 그 결과 Weibull 분포에 의한 특성치로부터 응력수준이 높을수록 2 Piece Wedge 시험체는 3 Piece Wedge에 비해 피로수명은 상대적으로 긴 것으로 나타났으며, 안전계수는 2 Piece Wedge 시험체보다 상대적으로 크게 나타났다. 2 Piece Wedge 시험체의 경우, 응력수준이 높을수록 위험함수는 크게 나타났지만 3 Piece Wedge 시험체와는 달리 급작스런 증가는 없는 걸로 나타났다. 따라서 2 Piece Wedge가 3 Piece Wedge보다 피로하중에 효과적인 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

- 1) 박철림 외 4명, “구조물 보강용 탄소섬유쉬트의 부착특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술 발표회집, 9권, 제2호, 1997.11, 99.653~658
- 2) 심중성, 배인환, 박성재, “손상된 R/C보의 피로거동에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제16권 제I-2호, 1996.3. pp.135~142
- 3) 심중성 외 4명, “유기 및 무기재료로 보수된 R/C보의 동적거동 특성비교”, 한국콘크리트학회 가을 학술 발표회집, 제7권, 제2호, 1995년.11., pp.350~354
- 4) 이리형 외 3명, “탄소 섬유 쉬트에 의한 콘크리트 보의 휨 보강효과에 관한 실험연구”, 한국콘크리트학회 봄 학술 발표회집, 제9권, 제1호, 1975.5., pp.605~610
- 5) 장동일, “파괴역학개론”, 한양대학교, 토목공학과, pp.76~77
- 6) 정란 외 4명, “강판, 탄소섬유쉬트, 탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트보의 구조적거동”, 한국콘크리트학회 가을 학술 발표회집, 제9권, 제2호, 1997.11., pp.691~696
- 7) 정영수 외 3명, “TYFO 유리섬유로 보강된 노후교량 상판에 대한 피로실험”, 한국콘크리트학회 가을 학술 발표회집, 제9권, 제2호,