

## 강봉 및 강관을 이용한 프리스트레싱 유닛의 긴장 응력 손실 평가

심재일<sup>1</sup>, 문주현<sup>2\*</sup>

### Evaluation of Prestress Loss in Prestressing Reinforcing Units using Steel Bar and Pipe

Jae-Il Sim<sup>1</sup>, Ju-Hyun Mun<sup>2\*</sup>

**Abstract:** The objective of this study is to examine the loss of prestressing stress in the developed prestressing reinforcing units using steel bar and pipe (SP). The main parameters were the reinforcing bar type, the magnitude of prestressed force, and prestressing method. The test results showed that the loss of prestressing stress for SP was highest in the initial prestressing step, which was higher for the compression introduction typed specimens than tension introduction typed specimens. The loss of prestressing stress of SP made with P800 was 1.6% for the compression introduction typed specimen with  $0.8f_y$ , which was lowest than the other specimens. Meanwhile, the relaxation of SP with the respect to the time ranged between 0.4 and 1.9%, irrespective of SP material type, the magnitude of prestressed force, and prestressing method. These values were less than 2.5%, which is the maximum value for the relaxation of prestressed reinforcing steel bars in design codes. Consequently, considering the loss of stress developed in the initial prestressing step, the developed SP material type, prestressing introduction method, and magnitude are recommended to be P800, compression introduction type, and  $0.8f_y$ .

**Keywords:** Loss of prestressing stress, Relaxation, Prestressing, Reinforcing steel bar, Compressive and tensile stress

## 1. 서 론

프리스트레스트 보강재의 응력손실은 긴장력 도입시의 즉시 손실과 도입 이후의 시간적 손실로 구분된다(Lim and Kim, 2020). 즉시 손실은 보강재의 정착구에서 발생하는 슬립과 콘크리트의 탄성변형이 주요 원인이 된다(Kim et al., 2003). 또한 시간적 손실은 콘크리트의 크리프와 건조수축 또는 보강재의 릴랙세이션이 주요 원인이다(Collins, 1991). 이러한 콘크리트 또는 보강재의 특성에 의한 응력 손실은 결과적으로 구조부재에 도입된 유효 프리스트레스트력의 감소를 의미하는데, 이는 사용성하중하에서의 강성저하 및 균열저항성의 감소 또는 극한상태에서 최대내력 및 연성의 저하의 원인이 될 수 있다(Lee, 2009). 이와 같이 릴랙세이션에 의한 프리스트레스트 부재의 취약한 구조적 성능을 최소화하기 위해서 KS D 7002(2019), ASTM A 416(2018) 및 JIS G3536(2014)의 기준들에서는 보강재의 릴랙세이션을 2.5% 이하로 규정하고 있다. 따라서 프리스트레스트가 도입된 보강재는 긴장력 도입

장치에서의 즉시 손실 및 시간적 손실의 평가가 유효 프리스트레스트력을 결정하는데 가장 중요한 데이터이다(Kim and Yang, 2019; Nam et al., 2006).

프리스트레스트 부재에서 주로 사용하는 3연선 또는 7연선의 릴랙세이션은 보통 2.5% 이하의 품질이 요구된다(KS D 7002). 따라서 새롭게 개발된 프리스트레스트 보강재들은 시간에 따른 릴랙세이션의 변화와 함께 설계기준들에서 제시하고 있는 2.5%의 릴랙세이션의 기준을 만족하는지에 대한 평가가 반드시 이루어져야 한다.

이 연구의 목적은 강봉과 강관을 이용하여 프리스트레스트력의 도입이 가능하도록 개발된 프리스트레싱(prestressing reinforcing units using steel bar and pipe, 이하 SP) 보강재의 응력손실을 확인하는데 있다. 주요변수는 SP 보강재의 종류, 프리스트레스트력의 크기 및 도입방법이다. 프리스트레스트력의 응력손실은 시간에 따른 SP 보강재의 변형률로부터 평가하였으며, 이 변형률의 변화가 없는 시점까지 측정하였다. 이 결과들은 KBC 2016에서 제시된 기준값과 비교하여 긴장력 도입 이후의 응력손실을 고려한 SP 보강재의 프리스트레스트력을 제시하였다.

<sup>1</sup>정회원, 한국방재안전기술, 대표이사

<sup>2</sup>정회원, 경기대학교 스마트시티공학부 건축공학전공, 조교수

\*Corresponding author: mjh@kgu.ac.kr

Department of Architecture Engineering, Kyonggi University, Suwon, Kyonggi-Do, South Korea.

•본 논문에 대한 토의를 2021년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 강봉 및 강관을 이용한 프리스트레싱 유닛(SP)의 개요

Fig. 1에는 강봉과 강관을 이용한 프리스트레싱(prestressing

reinforcing units using steel bar and pipe, 이하 SP) 보강재를 나타내었다. SP 보강재는 강봉과 강관, 강봉과 강관을 결합하는 고정나사, 그리고 천공된 홀에 삽입하는 엔드홀더로 구성된다. Fig. 2에는 SP 보강재를 이용하여 콘크리트에 프리스트레스트 도입하는 방법을 나타내었으며, 요약하면 다음과 같

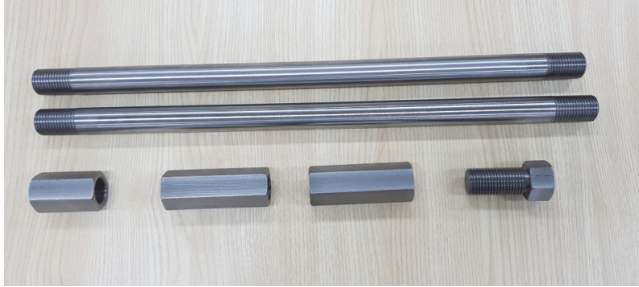


Fig. 1 Details of SP reinforcing bars

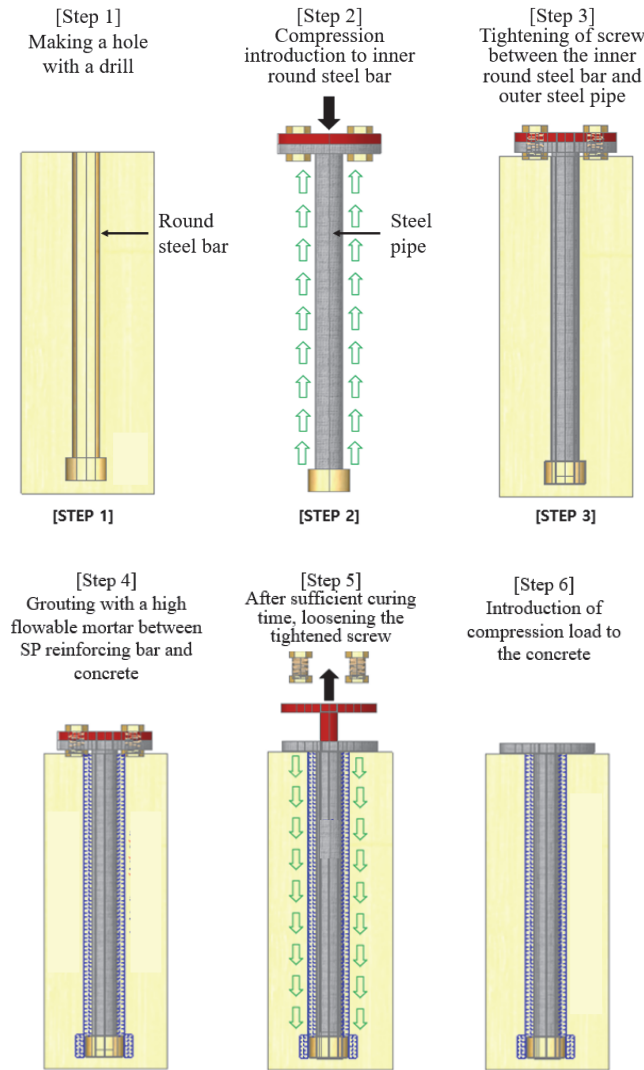


Fig. 2 Prestressing method of a concrete using SP reinforcing bars

다, 1) 보강될 콘크리트 부재에 엔드홀 직경 보다 2 mm 크게 천공한다; 2) 강관 내부에는 강봉이 삽입되어 있는 상태에서 강봉에 직접 압축력을 도입하거나 강관에 인장력을 직접 도입한다; 3) 강봉에 압축력을 도입하는 방식을 압축도입형으로, 강관에 인장력을 도입하는 방식을 인장도입형으로 구분한다; 4) 압축도입형은 강관 내부에 삽입되어 있는 강봉에만 압축력을 도입하고 고정나사를 조인다; 5) 도입된 압축력은 강봉의 끝부분에 설치된 엔드홀더에 의해 강관에 인장력으로 변환되어 전달된다; 6) 인장도입형은 강관에만 인장력을 도입하고 고정나사를 조인다; 7) 도입된 인장력도 내부에 설치된 강봉에 압축력으로 변환되어 전달된다. 8) 결과적으로 강관은 압축 및 인장도입형에 관계없이 인장력이 도입된다; 9) 콘크리트 부재에 천공된 홀에 SP 보강재를 삽입한다; 10) SP 보강재와 천공된 홀 사이에 주입재로 속채움한다; 11) 속채워진 주입재가 굳으면, 고정나사를 풀어 강봉의 압축력을 해방시킨다; 12) 강관에 도입된 인장력이 압축력으로 변환되어 최종적으로 콘크리트 부재에 압축력이 도입된다.

### 3. 실험의 개요

#### 3.1 실험체 상세

Fig. 3 및 Table 1에는 SP 보강재의 상세를 나타내었다. 실험체는 프리스트레스트 도입방법인 인장도입형과 압축도입형에 따라 2그룹으로 구분하였다. 인장도입형은 강관에 직접적으로 인장력을 도입하기 위한 상세를 가진다. Fig. 3(a)에 나타낸 바와 같이, 인장도입형 SP 보강재의 실험체는 강관, 강봉, 강관 단부의 폐쇄구조를 위한 엔드홀더와 볼트 및 강관의 길이 조절을 위한 커플러로 구성된다. 각 구성요소의 치수는 인장력을 받는 강관의 외경은 25.4 mm, 강관의 두께는 3.6 mm, 내부 강봉의 지름은 16 mm, 엔드홀더 및 커플러의 외경은 32 mm, 볼트의 외경은 25.4 mm이다. Fig. 3(b)에 나타낸 바와 같이, 압축도입형은 내부 강봉에 직접적으로 압축력을 도입하기 위한 상세를 가진다. 압축도입형 SP 보강재의 실험체는 강관, 강봉, 강봉의 힘을 볼트에 전달하기 위한 캡, 강관 단부의 폐쇄구조를 위한 엔드홀더, 볼트를 관통하여 강봉에 압축력을 전달할 수 있는 중공형 볼트와 볼트 및 강관의 길이 조절을 위한 커플러로 구성된다. 구성요소의 치수는 인장력을 받는 강관의 외경은 25.4 mm, 강관의 두께는 3.6 mm, 내부 강봉의 지름은 16 mm, 엔드홀더 및 커플러의 외경은 32 mm, 중공볼트의 외경은 25.4 mm 그리고 중공볼트의 내경은 13 mm이다. 각 구성요소에서 연결 상세를 위한 볼트 및 너트는 KBC 2016(2016)의 설계 절차에 의해 항복강도 대비 70%의 프리스트레스트력이 도입될 때에 약 100 kN의 힘에 저항할 수 있도록 하였다.

두 실험체에서 응력손실을 평가하기 위한 SP 보강재는 총

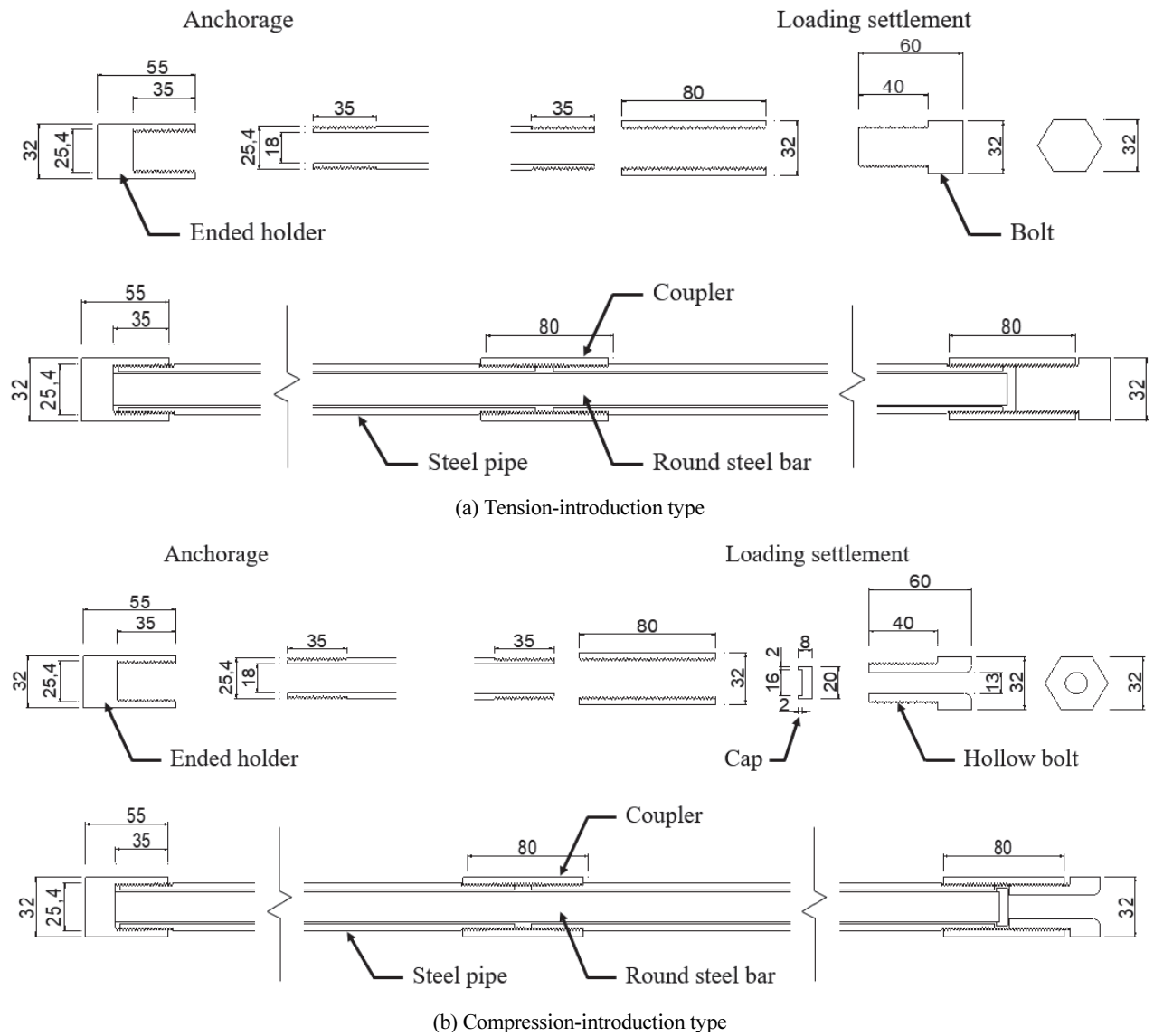


Fig. 3 Details of SP reinforcing bars according to the prestressing introduction method

Table 1 Details of experiments

Group	Specimen	Prestressing introduction method	Reinforcing bars type	Applied prestressing ratio (%)
I	I-TS40	Tension	SCM 440	40
	I-TS60			60
	I-TS80			80
	I-TP40		P800	40
	I-TP60			60
	I-TP80			80
II	II-S30	Compression	SCM 440	40
	II-S50			60
	II-S80			80
	II-P30		P800	40
	II-P50			60
	II-P80			80

48개가 제작되었으며, 주요변수는 SP 보강재의 재질 및 프리스트레스력의 크기이다. SP 보강재에 사용된 재질은 SCM 440과 P800이다. 프리스트레스력의 크기는 인장도입형에서 항복강도의 40, 60 및 80%로, 압축도입형에서 항복강도의 30, 50 및 80%로 변화하였다. 실험체 명에서 첫 번째 글자는 그룹 (I 그룹 = 인장도입형, II 그룹 = 압축도입형)을, 두 번째 알파벳은 SP 보강재 재질의 종류(S = SCM 440, P = P 800)를 그리고 마지막 숫자는 프리스트레스력의 크기를 의미한다. 예를 들어 I-S40은 I 그룹이면서 인장강도의 40%의 힘으로 도입된 SCM 440의 SP 보강재의 실험체를 의미한다.

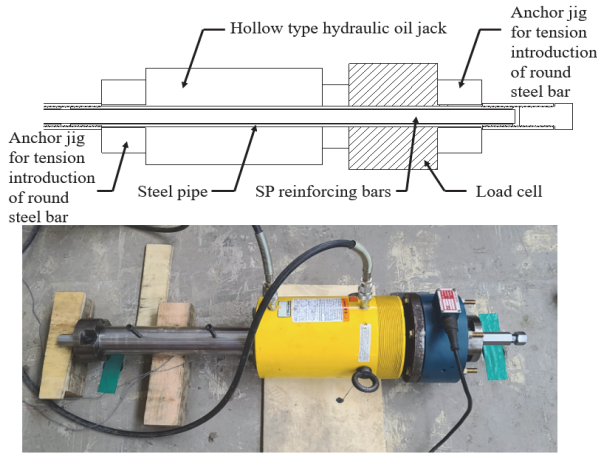
### 3.2 재료 특성

Table 2에는 SP 보강재로 사용된 강종의 역학적 특성을 나

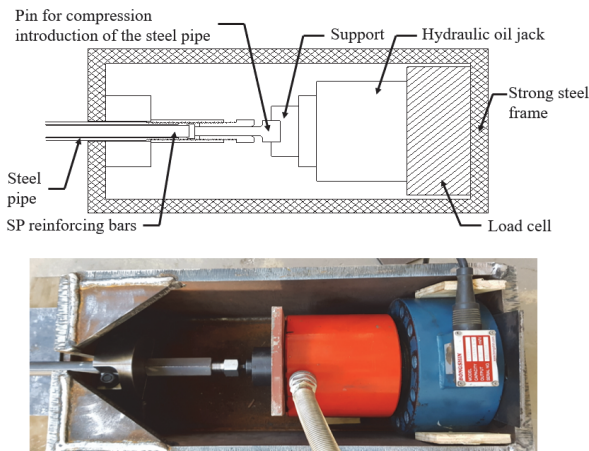
**Table 2** Mechanical properties of SP reinforcing bars

Type	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (MPa)
SCM 440	589	735	203,761
P800	731	931	218,355

Note]  $f_y$  = Yield strength,  $f_u$  = Tensile strength,  $E_s$  = Elastic modulus.



(a) Tension-introduction type



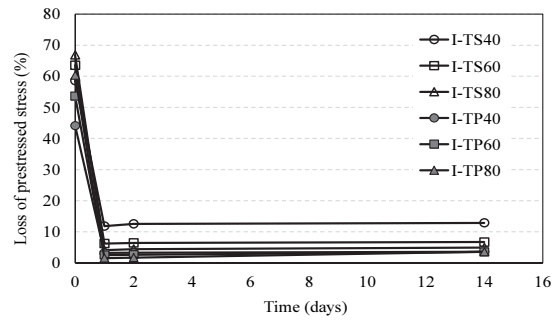
(b) Compression-introduction type

**Fig. 4** Prestressing installments for SP reinforcing bar

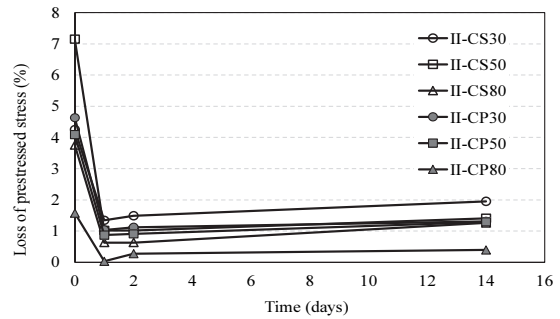
타내었다. SP 보강재로 사용된 SCM 440과 P800의 강종은 뚜렷한 항복점이 없어 0.2% 오프셋 방법으로 항복강도를 결정하였다. SCM 440의 항복강도, 인장강도 및 탄성계수는 각각 589 MPa, 735 MPa 및 203,761 MPa이었으며, P800은 각각 731 MPa, 931 MPa 및 218,355 MPa이었다.

### 3.3 긴장력 도입 및 측정상세

Fig. 4에는 인장도입형과 압축도입형 실험체에 따른 프리스트레스력 도입 장치를 나타내었다. 강관에 직접 인장력 도입(인장도입형)을 위한 방법은 다음과 같다; 1) 중공형 오일잭



(a) Tension-introduction type



(b) Compression-introduction type

**Fig. 5** Variation of prestresses with respect to the time

및 하중계에 SP 보강재를 삽입한다; 2) 커플러 사이 또는 커플러와 엔드홀더 사이에 지그를 체결한다; 3) 중공형 오일잭을 이용하여 강관을 긴장시킨다; 4) 강봉을 삽입하고 볼트를 체결한다. 또한, 내부 강봉에 직접 압축력 도입(압축도입형)을 위한 방법은 다음과 같다; 1) 강관내부에 캡이 부착된 강봉을 삽입한 후 중공볼트로 가체결한다; 2) SP 보강재 상부 커플러 하단에 정착 지그를 체결한다; 3) 지그가 체결된 SP 보강재를 하중계와 오일잭이 설치된 압축 프레임에 셋팅한다; 4) 중공볼트를 관통하여 강봉에 압축력을 전달할 직경 22 mm의 T형 압축핀을 삽입한다; 5) 오일잭을 이용하여 강봉에 압축력을 도입한다; 6) 볼트를 체결한다. 압축도입형은 내부강관에 압축력을 도입하여야 하므로 오일잭 지지를 위한 별도의 고정도 프레임이 사용되었다(Fig. 4(b)).

위의 방법으로 도입된 인장도입형과 압축도입형의 실험체들은 강제 변형률 게이지를 부착하였다. 강제 변형률 게이지로부터 얻어진 데이터들은 응력으로 환산하여 도입된 프리스트레스력과 시간에 따른 응력손실을 평가하였다. 측정은 강제 변형률의 변화가 없는 14일까지 수행하였다.

## 4. 응력손실의 결과 분석

### 4.1 프리스트레스력 도입방식의 영향

프리스트레스력 도입 방법에 따른 응력손실의 평가 결과는

**Table 3** Summary of the test results

Group	Specimens	No.	Applied prestressing loads to SP reinforcing bar (kN)	Strain ( $\mu$ )				
				Maximum values at initial prestressing step of SP reinforcing bar	Right after initial prestressing SP reinforcing bar	At 1 day	At 2 days	At 14 days
I	I-TS40	1	53.0	953	336	284	283	282
		2	51.3	789	330	281	280	279
		3	52.3	857	357	325	320	318
		4	52.1	821	386	354	350	350
	I-TS60	1	78.5	1423	397	368	367	366
		2	78.3	1482	564	507	506	504
		3	77.6	1418	590	564	563	559
		4	78.0	1506	577	560	558	558
	I-TS80	1	96.9	1872	518	504	503	501
		2	96.5	1816	607	581	580	577
		3	97.2	1744	635	616	614	612
		4	95.4	1789	628	588	584	579
	I-TP40	1	58.4	1183	713	707	707	705
		2	58.8	1261	668	631	632	631
		3	57.2	1108	637	617	617	613
		4	56.9	1195	631	609	608	606
	I-TP60	1	86.4	1745	691	691	691	687
		2	86.5	1701	749	722	722	718
		3	86.6	1766	853	814	811	800
		4	85.6	1562	836	820	820	810
I-TP80	1	134.3	2558	1150	1137	1135	1114	
	2	133.5	2063	859	851	851	833	
	3	133.1	1856	624	618	615	602	
	4	133.4	2682	1031	999	999	984	
II	II-S30	1	39.5	637	628	613	613	610
		2	44.4	902	838	834	832	829
		3	46.1	956	928	918	917	913
		4	42.4	668	630	622	621	616
	II-S50	1	66.6	1345	1207	1194	1194	1189
		2	66.2	1337	1227	1218	1218	1212
		3	67.9	992	932	918	918	915
		4	66.7	978	938	931	931	928
	II-S80	1	90.3	1089	987	979	979	975
		2	93.4	1417	1392	1378	1378	1368
		3	90.4	1528	1517	1511	1511	1503
		4	90.5	1139	1102	1099	1099	1090
	II-P30	1	43.2	790	751	740	740	738
		2	45.5	944	902	889	890	888
		3	43.5	851	818	811	807	807
		4	43.6	890	844	840	840	839
	II-P50	1	73.5	1448	1419	1409	1408	1405
		2	73.0	1459	1403	1388	1387	1383
		3	74.5	1365	1294	1284	1284	1277
		4	43.1	1224	1160	1149	1149	1142
II-P80	1	103.0	1889	1883	1882	1883	1881	
	2	105.2	2231	2228	2222	2222	2220	
	3	102.4	1500	1479	1469	1469	1466	
	4	106.7	2224	2125	2144	2122	2120	

Table 3에 요약하였으며, Fig. 5에는 강제 변형률로부터 측정된 시간에 따른 강재의 응력변화를 나타내었다. 외부강관에 인장력을 직접 가하는 인장도입형은 프리스트레스력 도입 즉시 응력손실이 44.1%~66.8%로서 높은 수준이었다. 이에 반해 내부강봉에 압축력을 직접가하는 압축도입형은 프리스트레스력 도입 즉시 응력의 손실이 1.6%~7.1%로서 매우 낮은 수준에 있었다. 이 응력 손실은 시간의 경과함에 따라 거의 일정한 수준에 있었다. 인장도입형이면서 SCM 440 강종인 SP 보강재에 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 I-S80 실험체 응력의 손실은 프리스트레스력 도입 즉시 66.8% 이었는데, 1일에 4.1%로 그 응력의 손실이 다소 발생하였다. 반면 2일 및 14일에는 각각 4.4% 및 4.9%로 응력의 변화가 거의 없었다. 압축도입형도 인장도입형과 마찬가지로 시간에 따른 응력의 변화가 거의 없었다. 압축도입형이면서 SCM 440 강종인 SP 보강재에 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 II-S80 실험체의 응력의 손실은 프리스트레스력 도입 즉시 60.3%이었는데, 1일에 1.5%로 응력의 손실이 다소 발생하였다. 이후 2일에서 14일로 변화함에 따라 응력이 손실이 1.7%로 큰 변화가 없었으나, 15일에서는 3.6%로 미미하게 증가하는 결과를 보였다. 이로서 SP 보강재는 프리스트레스력을 직접 도입하는 초기단계에서의 응력손실이 가장 크게 있는데, 특히 외부강관에 인장력을 직접 가하는 인장도입형에서 그 응력손실이 가장 높음을 확인하였다. 따라서 SP 보강재의 프리스트레스력의 도입방법은 응력 손실이 적은 내부강봉에 압축력을 직접가하는 압축도입형의 방식이 추천된다.

#### 4.2 프리스트레스력 크기의 영향

SP 보강재의 응력손실은 프리스트레스력의 크기에 미치는 영향이 현저하였다. 외부강관에 인장력을 직접 가하는 인장도입형이면서 SCM 440 강종인 SP보강재의 응력손실은 프리스트레스력이 항복강도의 40%, 60% 및 80%에서 평균적으로 각각 58.6%, 63.5% 및 66.8%이었다. 결과적으로 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 SP보강재 응력손실이 가장 컸는데, 프리스트레스력이 항복강도의 40%로 도입된 실험체보다 약 1.14배 높았다. 반면, 릴랙세이션의 크기는 도입 즉시 응력손실의 크기와 반대의 경향을 보였다. 응력 도입 후 1일이 경과한 이후의 릴랙세이션은 인장력을 40% 도입한 경우가 11.8%로 가장 컸으며, 인장력을 80% 도입한 경우가 4.1%로 가장 작았다. 더불어 릴랙세이션 크기의 차이는 시간이 경과함에 따라 미미하게 감소하였는데, 인장력을 40% 도입한 경우가 80%인 경우에 비해 2일 및 14일에서 각각 2.8배 및 2.6배 높았다. 결과적으로 인장도입형에서 SP 보강재의 릴랙세이션은 도입된 인장력이 감소함에 따라 4.9~12.8%으로 변화하였다.

압축도입형이면서 SCM 440 강종인 SP보강재는 인장도입형 SP보강재와 반대로 프리스트레스력이 증가함에 따라 응력손실이 다소 감소하는 경향을 보였다. 압축도입형 실험체의 응력손실은 프리스트레스력이 항복강도의 30%, 50% 및 80%에서 평균적으로 각각 4.3%, 4.1% 및 3.8%이었다. 또한 시간에 따른 이들 응력손실의 변화는 거의 없었다. 결과적으로 압축도입형에서 SP 보강재의 릴랙세이션은 1.3%~1.9%로 평가될 수 있었다. 위의 결과들을 기반으로 SP 보강재의 프리스트레스력은 응력손실을 감안할 때에 인장도입형에서 항복강도의 80%로, 압축도입형에서 항복강도의 80%로 추천된다.

#### 4.3 보강재 강종의 영향

SP 보강재의 응력손실은 P800 보다 SCM 440에서 더 현저하였다. 인장도입형이면서 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 SP 보강재에서 프리스트레스력 도입 즉시의 응력손실은 SCM 440에서 66.8%로서의 P800의 60.3% 보다 1.11배 높았다. 그 높음의 정도는 시간 경과와 관계없이 일정한 수준에 있었다. 또한 압축도입형이면서 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 SP 보강재에서 프리스트레스력 도입 즉시의 응력손실은 SCM 440에서 3.8%로서 P800의 1.6% 보다 2.39배 높았다. 긴장재의 릴랙세이션은 P800의 경우가 SCM 440에 비해 1.1~3.2배 높았다. 결과적으로 SP 보강재의 재질은 응력손실이 적은 P800의 사용이 추천된다.

#### 4.4 즉시손실과 릴랙세이션을 고려한 SP 보강재의 제시

설계기준들(ASTM A416, 2018; JIS G3536, 2014; KS D 7002, 2019)은 프리스트레스력 도입 이후 보강재의 릴랙세이션을 2.5%이하로 제시하고 있다. 따라서 위의 실험결과들의 분석과 설계기준들(ASTM A416, 2018; JIS G3536, 2014; KS D 7002, 2019)에서 제시된 2.5% 이하의 릴랙세이션을 고려할 때에 SP 보강재의 재질과 프리스트레스력 도입방식 및 크기는 각각 P800, 압축도입형 및 항복강도의 80%로 추천된다. 압축도입형이면서 P800으로 제작된 SP보강재에서 시간에 따른 응력의 릴랙세이션을 고려한 초기 프리스트레스력( $F_i$ )은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F_i = \xi R F_y \quad (1)$$

여기서,  $R$ 는 프리스트레스력의 비율을,  $F_y$ 는 SP 보강재의 항복강도를,  $\xi$ 은 응력 손실율을 의미한다. 식 (1)에서  $\xi$ 은 위의 실험결과를 이용하여 다음과 같이 일반화할 수 있었다 (Fig. 6).

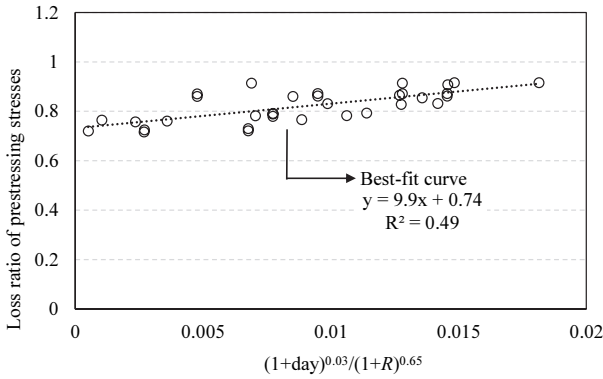


Fig. 6 Modeling of initial prestressing loads considering relaxation of SP reinforcing bar

$$\xi = 9.9 \left[ (1+d)^{0.03} / (1+R)^{0.65} \right] + 0.74 \quad (2.a)$$

$$d \leq 14 \quad (2.b)$$

여기서,  $d$ 는 프리스트레스력의 도입 이후의 경과된 일수를 의미하는데, 14일을 초과할 수 없다. 이는 SP 보강재 응력의 릴랙세이션이 14일 이전에 수렴한다는 실험결과를 반영한 것이다. 결과적으로 식 (1)과 (2)를 통해서 추천된 압축도입형이면서 P800의 강종으로 제작된 SP보강재에서 시간에 따른 응력의 릴랙세이션을 고려한 초기 프리스트레스력을 산정할 수 있다.

## 5. 결론

강재의 재질, 프리스트레스력의 크기 및 긴장력 도입방법에 따른 개발된 프리스트레싱 유닛(prestressings reinforcing units using steel bar and pipe, 이하 SP)의 응력손실을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SP 보강재의 응력손실은 프리스트레스력이 직접 도입하는 초기단계에서 가장 크게 있는데, 인장도입형에서 44.1% ~ 66.8%이며, 압축도입형에서 1.6% ~ 4.6%이었다.
- (2) 인장도입형 SP 보강재의 응력손실은 프리스트레스력이 증가할수록 증가하지만, 압축도입형에서는 감소하였다. 프리스트레스력이 항복강도의 40%에서 80%로 증가할때에 인장도입형 SP 보강재에서는 응력손실이 약 1.14배 높았으며, 압축도입형에서는 1.13배 높았다.
- (3) SP 보강재의 응력손실은 P800 보다 SCM 440에서 더 현저하였다. 프리스트레스력이 항복강도의 80%로 도입된 인장 및 압축도입형 SP 보강재에서 프리스트레스력 도입 즉시의 응력손실은 SCM 440에서 66.8% 및 3.8%로서 P800의 60.3% 및 1.6% 보다 1.11배 및 2.39배 높았다.
- (4) 프리스트레스력 도입 이후 SP 보강재의 응력손실은 프

리스트레스력 도입방식, 프리스트레스력의 크기 및 보강재의 강종에 관계없이 시간에 경과함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다.

- (5) SP 보강재에서 인장도입 방식은 프리스트레스력 도입 즉시 발생하는 응력손실(44.1% 이상)과 시간 경과에 따른 릴랙세이션(4.1% 이상)을 증가시키기 때문에 압축도입 방식을 추천한다.
- (6) 압축도입방식을 이용한 SP 보강재의 릴랙세이션은 0.4~1.9%로 평가될 수 있었는데, 설계기준들에서 제시하고 있는 릴랙세이션 2.5% 이하를 만족한 수준에 있었다. 결과적으로 프리스트레스력 도입 즉시 발생하는 응력손실과 릴랙세이션을 감안할 때에 개발된 SP 보강재의 재질과 프리스트레스력 도입방식 및 크기는 각각 P800, 압축도입형 및 항복강도의 80%로 추천된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었습니다(과제번호 21CTAP-C157662-02).

## References

1. ASTM A416 (2018), Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete. ASTM International, PA, USA.
2. Collins, M. P. (1991), Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, New Jersey.
3. JIS G3536 (2014), Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete. Japanese Standards Association, Tokyo, Japan.
4. Kim, J. K., and Yang, J. M. (2019), Ultra-High Strength Steel Strand and Prestressed Concrete Using the Strand, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 31(4), 21-17. (in Korean)
5. Kim, W. H., Ra, J. K., Kim, T. H., and Shin, H. M. (2003), Analytical Study on the Prestress Losses of Prestressed Concrete Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 7(1), 131-138. (in Korean, with English abstract)
6. KS D 7002 (2019), Uncoated Stress-Relieved Steel Wires and Strands for Prestressed Concrete. Korea Agency for Technology and Standards, Seoul, Korea.
7. Lee, J. H. (2009), Time-Dependant Analysis of Precas Prestressed Concrete Bridge considering Long-Time Prestress Loss, Master's thesis, Daegu, Kyungpook University, Department of Civil Engineering.
8. Lim, Y. J., and Kim, H. S. (2020), Effect of Outrigger Wall Reinforced with Post Tension on Reducing Differential Column Shortening, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 33(4), 237-244. (in Korean, with English abstract)
9. Nam, Y. S., Cho, C. G., and Park, M. H. (2006), Time-Dependent

10. Architectural Institute of Korea (2016), Korean Building Code, Architectural Institute of Korea, Korea, Seoul.

---

**요 지 :** 이 연구의 목적은 강관과 강봉을 이용하여 프리스트레싱의 도입이 가능하도록 개발된 프리스트레싱(prestressing reinforcing units using steel bar and pipe, 이하 SP) 보강재의 응력손실을 확인하는데에 있다. 주요변수는 SP 보강재의 종류, 프리스트레싱의 크기 및 도입방법이다. 실험결과 SP 보강재의 응력손실은 프리스트레싱이 직접 도입하는 초기단계에서 가장 크게 있었는데, 그 크기는 압축도입형 보다 인장도입형에서 더 크게 있었다. SP 보강재의 응력손실은 프리스트레싱이 항복강도의 80%로 도입된 P800 강종인 압축도입형 실험체에 서 1.6%로 가장 낮았다. 한편 시간경과에 따른 SP 보강재의 릴랙세이션은 압축도입형의 경우 SP 보강재의 종류, 프리스트레싱의 크기에 관계없이 0.4~1.9%로 평가되었는데, 이는 설계기준들에서 제시하고 있는 릴랙세이션 2.5% 이하를 만족하는 수준이었다. 결과적으로 프리스트레싱 도입 즉시 발생하는 응력손실을 감안할 때에 개발된 SP 보강재의 재질과 프리스트레싱 도입방식 및 크기는 각각 P800, 압축도입형 및 항복강도의 80%로 추천된다.

**핵심용어 :** 프리스트레싱의 응력손실, 릴랙세이션, 프리스트레싱, 보강재, 압축 및 인장응력

---