

철근의 강종 및 직경 변화에 따른 부식특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Reinforcing Steel according to Specification and Diameter

○ 임재원*
Lim, Jae-won

지남용**
Jee, Nam-Yong

윤상천***
Yoon, Sang-Chun

최진만****
Choi, Jin-man

Abstract

Concrete structures move wholly with concrete and rebar, so they endure external force, but recently the embedded rebar in concrete has been corroded by environmental, physical and chemical factors. the embedded rebar corrosion influences concrete structure to deteriorate structure capacity.

To reevaluate effect to deterioration of concrete structure according to corrosion of rebar, the researcher mostly examined into corrosion rebar and complex relation of concrete. In that there are flexural strength deterioration of corrosion concrete structure and the bond strength of concrete. But It has not sufficiently studied about physical characteristic of corrosion rebar itself.

In this study I will compare specification of rebar through corrosion experiment with corrosion ratio of rebar according to diameter and reevaluate. And I will investigate the effect to strength characteristic of rebar according to corrosion ratio.

키워드 : 철근부식, 내구성, 성능저하, 철근직경, 철근강종

Keywords : Rebar corrosion, Durabilty, Deterioration, Diameter, Specification

1. 서론

지금까지 철근의 부식이 철근콘크리트 구조물의 내구성능 저하에 미치는 영향을 평가하기 위해 부식된 철근 콘크리트 구조물의 휨내력 저하, 철근과 콘크리트와의 부착특성에 관한 연구가 진행되어 왔으나, 철근 자체의 부식 특성과 부식된 철근의 기계적 특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이로써, 철근의 부식에 대한 특성과 이에 대한 기계적 특성이 규명된다면 구조설계 단계부터 우수한 재료를 선택하여 보다 안전한 건축물을 시공할 수 있게 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 강종(SD300, SD400, SD500)과 직경을 달리하여 철근부식 촉진 실험을 실시한다. 실험을 통해 부식전류를 측정하고 부식중량과 부식전류의 관계를 고찰한 후 철근의 강종과 직경이 부식에 미치는 영향을 파악하고, 부식된 철근의 기계적 특성을 최대인장하중으로서 분석하여 부식된 철근의 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험인자 및 수준

본 실험에서의 실험인자는 철근의 강종과 직경이고, SD500-D16을 제외하고 8수준이며 다음 표 1과 같다.

표 1. 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준 수	비고
강종	SD300, SD400, SD500	3	SD500의 경우는 D22, D25만 사용하였다.
직경	D16, D22, D25	3	

각각의 동일한 시험체를 3개씩 구성하였고, 부식을 측정 회수를 3회로 하여 전체 시험체를 72개로 구성하였다.

2.2 실험재료

1) 철근

본 실험에 사용한 철근은 KS D 3504에 규정된 국내 I사 제품을 사용하였으며 재료의 화학조성과 KS B 0802에 의해 시험편을 제작하여 시험한 결과는 각각 표 2, 표 3과 같다.

* 한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

*** 경주대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

**** 한양대학교 대학원 건축공학과 박사수료

표 2. 철근의 화학조성

강도	직경	화학조성 (%)							
		Fe	C	Si	Mn	P	S	Al V	Nb
SD300	D16	99.006	0.26	0.14	0.53	0.037	0.027	-	-
	D22	98.917	0.28	0.14	0.59	0.036	0.037	-	-
	D25	98.994	0.27	0.16	0.51	0.030	0.036	-	-
SD400	D16	98.485	0.32	0.15	0.98	0.027	0.038	-	-
	D22	98.417	0.28	0.15	1.08	0.032	0.041	-	-
	D25	98.937	0.23	0.16	0.61	0.030	0.033	-	-
SD500	D22	99.300	0.29	0.17	0.135	0.024	0.028	0.053	-
	D25	99.295	0.29	0.17	0.135	0.024	0.028	0.053	0.005

표 3. 철근의 기계적 특성 시험

종류	구분	인장하중 (KN)	인장강도 (KN/mm ²)	항복강도 (KN/mm ²)	연신율 (%)
SD300	D16	120.79	0.608	0.401	25.1
	D22	237.17	0.613	0.398	22.3
	D25	313.98	0.620	0.403	26.2
SD400	D16	143.58	0.723	0.513	21.6
	D22	280.22	0.724	0.504	20.6
	D25	342.19	0.675	0.497	24.3
SD500	D22	315.74	0.816	0.611	19.5
	D25	414.56	0.818	0.616	20.4

2) 콘크리트

본 실험에 사용한 시멘트는 KS L 5201에 규정된 C사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재는 세척사이며, 굵은골재는 화강암계 부순돌로써 최대치기를 19mm이하로 조정하였다. KS F 2511~2531의 시험방법에 따른 잔골재와 굵은골재의 물리적 성질은 표 4와 같다.

표 4. 골재의 물리적특성

골재	비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적률 (%)	최대치수 (mm)	조립률
잔골재	2.58	1.04	1568	69.3	5	2.91
굵은골재	2.61	1.02	1578	59.5	19	8.73

표 5는 콘크리트 배합표를 나타낸 것이다. 콘크리트의 강도는 철근의 부식률에 영향을 미치는 데, 철근을 조속히 부식시키기 위해 콘크리트의 배합강도를 24.5N/mm²로 결정하였다. 양생온도는 20±3℃로 실험실에서 수중양생 하였다. KS F 2403에 의거한 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법에 따라 실린더형 몰드를 사용하여 제작하였다.

KS F 2405에 의거하여 7일 및 28일 콘크리트 압축강도 시험에 의한 결과는 표 6과 같다.

표 5. 시멘트 배합표

W/C	잔골재율	AE 감수제 (kg/m ³)	단위수량 (kg/m ³)	단위량(kg/m ³)		
				시멘트	잔골재	굵은골재
0.59	0.52	0.297	174	297	916	855

표 6. 콘크리트 시험결과

배합강도 (N/mm ²)	압축강도(N/mm ²)		슬럼프 (cm)	공기량 (%)
	7일	28일		
23.5	18.93	23.72	18	4.8

2.3 시험체 개요

콘크리트의 배합강도는 24.5N/mm²로 하였으며 피복두께는 30mm로 하였다. 시험체의 길이는 220mm, 폭과 높이를 각각 100mm로 하였다. 철근 중앙의 100mm 구간만 부식시키기 위해 이 부분을 제외하고 에폭시로 견고하게 코팅하였다. 또한 염화나트륨 수용액이 철근의 부식 구간에만 접할 수 있도록 콘크리트의 길이면과 마구리면 그리고 밑면의 양쪽 60mm구간에 에폭시로 견고하게 도포하였다.

시험체의 상세는 그림 1과 같다.

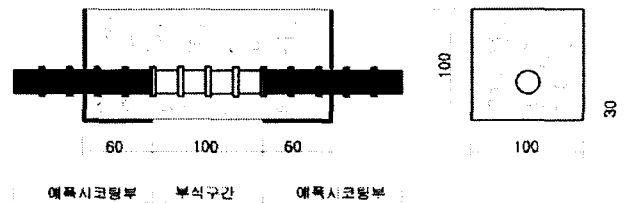


그림 1. 시험체 상세

2.4 실험내용 및 방법

1) 시험체 구성

시험체는 철근의 강종 및 직경에 따라 동일한 시험체를 3개씩 제작하였고, 5일 간격으로 철근의 부식률을 3회 측정하기 위해 전체 시험체를 72개 제작하였다.

2) 철근부식 촉진 실험

콘크리트에 매립된 철근을 부식시키기 위해 전위차를 이용한 부식 촉진 방법을 이용하였다.

데이터로거를 이용하여 20분 간격으로 전류량을 측정하여 적산전류량을 계산하였다. 28일 양생한 시험체를 그림 2와 같이 5%의 염화나트륨 수용액에 시험체를 침지하고 직류전원의 (+)극은 철근에, (-)극은 동판에 연결하여 각각의 시험체를 5일, 10일, 15일간 DC 12V 3A 용량의 정전압발생장치(Power Supply) 통해 적산전류량으로 부식을 촉진시켰다.

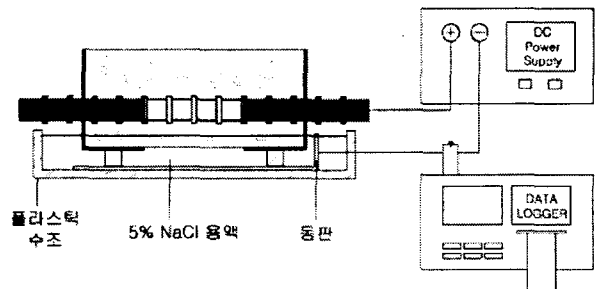


그림 2. 부식회로도

3) 철근부식의 평가

부식이 발생한 철근에서 부식률을 파악하기 위해 철근에서

부식생성물을 제거하여야하는데, ASTM G1-90 규준에 의해 콘크리트 시험체를 파쇄하여 추출한 부식된 철근을 10% 제2 구연산암모늄((NH4)2HC6H5O7)용액에 침지시킨 뒤 75-90°C로 20분간 가열하여 부식생성물을 완전히 제거했다.

철근 부식률을 평가하기 위하여 중량감소율에 의한 계산법을 사용하였으며 다음의 식으로 계산하였다.

$$\text{부식률(\%)} = \left(\frac{\text{부식전중량} - \text{부식후중량}}{\text{부식전중량}} \right) \times 100$$

부식된 철근을 KS B 0802에 의해 인장시험을 하여 최대인장하중을 구하였다.

4) 적산전류량의 평가

전하량(C)은 단위시간동안 회로에 흐른 전류량의 총 합으로 적산전류량으로 나타낸다. 즉, 1초 동안 1A의 전류가 흐를 때 생기는 전하량을 1C(쿨롱)이라고 하고 다음의 식과 같다.

$$\text{적산전류량(C)} = \text{부식전류(A)} \times \text{시간(sec)}$$

5) 인장하중과 인장하중저하율

기존의 연구는 부식된 철근의 단면적을 건전철근의 단면적과 동일하게 가정하고 부식철근의 인장강도를 평가하는 방법을 이용하였는데, 이는 인장강도가 철근의 고유한 특성임을 고려하지 않은 것이다. 따라서, 본 연구에서는 부식된 철근의 기계적 특성을 최대인장하중으로 평가하였고, 이를 바탕으로 인장하중 저하율로서 각각의 부식된 철근을 비교하였다.

인장하중저하율이란 건전철근에서 부식이 진행되었을 때, 부식으로 인해 저하된 인장하중의 양을 건전철근 인장하중에 대해 백분율로 나타낸 것으로 아래의 식과 같다.

$$\text{인장하중저하율(\%)} = \left(\frac{\text{건전철근인장하중} - \text{부식후인장하중}}{\text{건전철근인장하중}} \right) \times 100$$

3. 실험결과 및 분석 · 고찰

72개의 시험체에서 각각의 실험결과를 측정하고, 동일한 조건의 3개의 시험체의 각각의 측정값의 평균을 구하였다. 실험결과는 표 7과 같다

3.1 철근의 강종과 부식률

적산전류량에 따라서 철근의 강종별로 부식률에 미치는 영향을 알아보기 위해 직경별로 데이터를 분석하였다.

그림 3은 D16에서 적산전류량에 따른 강종별 부식률을 나타낸 것이다.

SD300이 SD400에 비해 부식률이 평균 1.16배 큰 것으로 나타났다. SD300의 경우 평균 적산전류량 15975C에서 부식률이 2.13%이고, SD400의 경우 16888C에서 2.12%로 SD300이 낮은 적산전류량에도 비슷한 수치를 기록하지만 적산전류량 30000C에서 SD300의 부식률이 3.87%, SD400의 부식률이

3.37%로 그 차가 0.5%이고 45024C에서 SD300이 6.26%, 45883C에서 SD400의 평균부식률이 5.45%로 SD300의 경우 800C 정도 낮은 상태에서도 약 0.81% 더 부식되었다.

표 7. 부식실험 결과

부식 기간	강종	철근 직경	부식 전류량 (C)	중량 감소 (g)	부식률 (%)	부식철근 인장하중 (KN)	인장하중 저하율 (%)
5일	SD300	D16	15975	3.33	2.13	118.61	1.80
		D22	17064	3.83	1.26	233.50	1.55
		D25	16543	4.14	1.04	306.83	2.28
	SD400	D16	16888	3.31	2.12	141.17	1.68
		D22	16420	4.53	1.49	275.78	1.58
		D25	17731	4.85	1.22	334.65	2.20
	SD500	D22	16137	3.75	1.23	309.88	1.86
		D25	17212	4.45	1.12	407.57	1.69
10일	SD300	D16	29655	6.04	3.87	116.92	3.20
		D22	27713	7.20	2.37	229.44	3.26
		D25	35476	8.80	2.21	306.84	2.28
	SD400	D16	30040	5.26	3.37	138.99	3.19
		D22	29727	7.15	2.35	269.40	3.86
		D25	39391	8.76	2.20	327.18	4.39
	SD500	D22	32296	6.88	2.26	305.99	3.09
		D25	35548	7.06	1.77	394.69	5.24
15일	SD300	D16	45024	9.77	6.26	114.46	5.24
		D22	49513	11.22	3.69	226.63	4.45
		D25	48312	13.40	3.37	299.70	4.55
	SD400	D16	45883	8.51	5.45	136.37	5.03
		D22	48000	9.81	3.23	266.41	4.93
		D25	55999	13.05	3.28	318.97	6.79
	SD500	D22	48021	10.10	2.89	300.31	4.89
		D25	50237	11.24	2.82	391.39	5.59

그림 4는 D22에서 강종에 따른 부식률을 비교한 것이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 적산전류량에 따른 부식률이 SD300이 SD400에 비해 평균 1.15배, SD500에 비해 1.22배 큰 것으로 분석되었다.

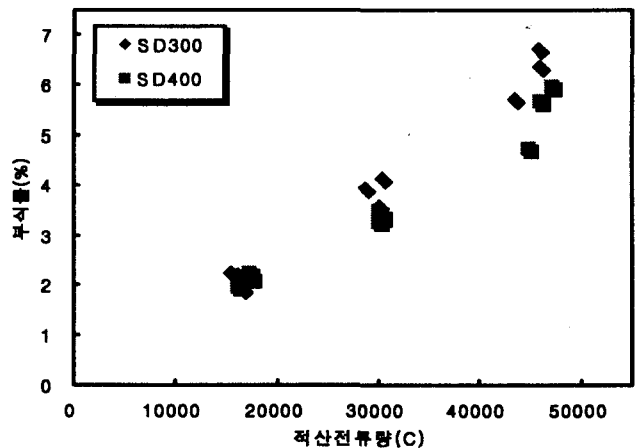


그림 3. D16 - 강종별 부식률

초기의 부식상태에서 SD300의 적산전류량 17064C에서 의 부식률은 1.26%, SD400은 16420C에서의 부식률이 1.49%로 SD 400이 0.23% 높다. SD500의 경우 17212C에서 1.12%로 SD300 보다도 0.14% 낮게 나타나 SD400, SD300, SD500 순으로 부식률이 큰 것으로 분석되었다.

이러한 경향은 부식률 2.3%를 전후로 하여 역전되는데, SD 300의 경우 적산전류량 27713C에서 부식률이 2.37%이고, SD 400은 29727C에서 2.35%로 오히려 SD300이 낮은 적산전류량에도 불구하고 0.02% 높게 나타났다. SD500은 32296C에서 2.26%로 가장 낮은 부식률을 나타냈다.

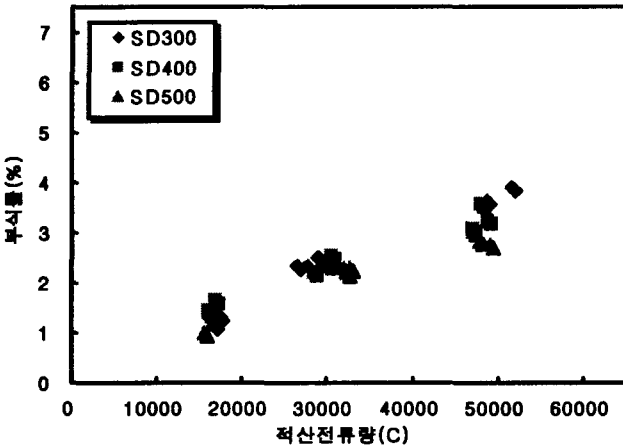


그림 4. D22 - 강종별 부식률

SD300의 적산전류량이 49513C일 때 부식률이 3.69%, SD400의 적산전류량이 48000C일 때의 부식률이 3.23%이고 그 차이가 0.46%로 나타나 적산전류량이 증가 할수록 그 부식률의 차도 더 커지는 것으로 분석되었다. SD500의 경우 48021C에서 부식률 2.89%를 기록하여 SD300에 비해서는 0.8% 낮게 나타났다.

D25에서 강종별 부식률에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 5에 나타냈다.

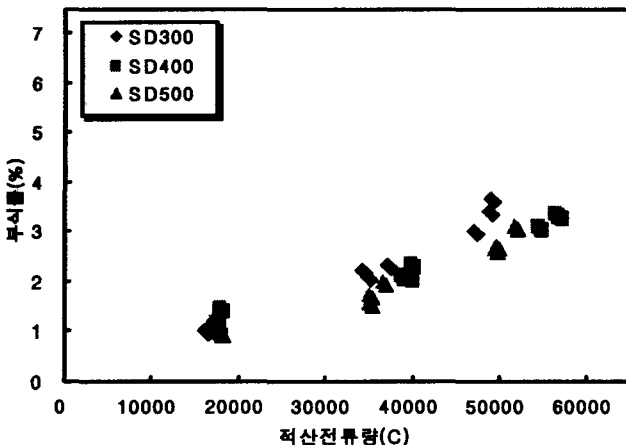


그림 5. D25 - 강종별 부식률

SD300은 SD400, SD500에 비해 적산전류량에 대한 부식률이 각각 평균 1.14배, 1.21배 크게 나타났다. SD300의 경우 16543C일 때 1.04%이고, SD400은 17731C에서 1.22%, SD500은 17212C일 때 1.12%를 나타내 적산전류량의 차를 고려할 때, 부식률의 차가 크지 않음을 알 수 있다.

그러나, SD300은 35476C에서 부식률 2.21%, SD400은 39391C일 때 2.20%, SD500은 35548C일 때 1.77%로 나타났다. 이것

은 SD300이 SD400에 비해 적산전류량이 약 4000C 작음에도 비슷한 부식률을 나타내 오히려 SD300이 SD400에 비해 부식률이 더 큼을 짐작할 수 있다. 철근에서 부식이 진행될수록 이러한 경향은 뚜렷이 나타난다. SD300이 48312C에서 3.37%를 나타냈는데, SD500을 같은 적산전류량에서 회귀분석해보면, 2.82%로 예상되어 SD300의 부식률이 0.55% 더 큰 것으로 예측되었다. SD500은 50237C에서 2.82%를 나타내 SD400의 회귀 분석한 결과 2.93% 보다 낮은 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 종합해보면, SD300의 부식률은 SD400에 비해 평균 1.15배 크고, SD500에 비해 1.21배 큰 것으로 분석되었다. 부식경향을 살펴보면, 부식률 2% 이하에서는 SD400의 부식률은 SD300과 비슷하거나 다소 크지만, 부식률 2.2%~2.3%를 전후로 하여 SD300의 부식률이 SD400의 부식률보다 커지는 것으로 분석되었다. SD500은 부식률이 가장 작은 것으로 나타났다.

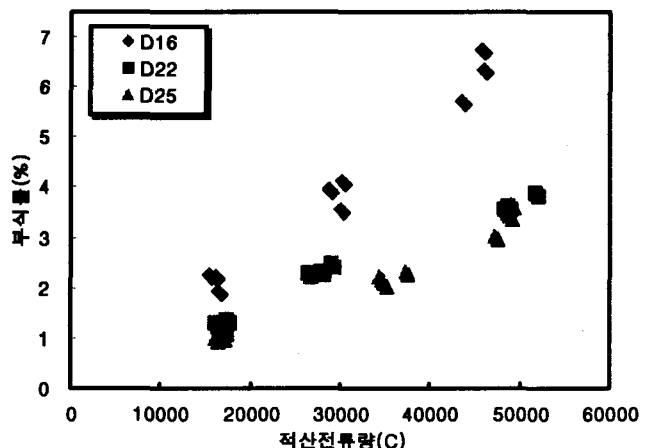
3.2 적산전류량과 직경별 부식률

적산전류량이 증가함에 따라 부식률도 함께 증가하는데, 그림 3, 4, 5에 나타난 데이터를 바탕으로 1차 회귀분석하여 각 철근의 직경별로 부식률을 살펴보면, D16의 경우 적산전류량 10000C 증가함에 따라 부식률은 1.27%씩 증가하고, D22는 0.71%씩, D25는 0.60%씩 증가한다.

3.3 철근의 직경과 부식률

다음은 철근의 직경에 따른 부식률을 비교하기 위해 각 강종별로 데이터를 분석하였다.

그림 6은 SD300에서 각 직경별로 부식률을 비교한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 적산전류량이 증가함에 따라서 직경이 작은 철근의 부식률이 큰 것을 알 수 있는데, D16이 D22, D25에 비해 각각 평균 1.77배, 2.04배 큰 것으로 분석되었다.



산전류량이 45024C에서 6.26%, D22는 49513C에서 3.69%, D25는 48312C에서 3.37%를 나타내었다. D16의 경우 D22, D25의 차가 2.57%, 2.89%를 나타내 부식이 진행될 수록 부식률 차의 폭이 이 구간에서만 부식률이 각각 1.7%, 1.8% 더 증가한 것으로 나타났다.

다음은 SD400에서 각 직경별로 부식률을 비교하였다. 그림 7에서와 같이 D16은 D22, D25에 비해 적산전류량에 대한 부식률이 1.62배, 2.02배 큰 것으로 나타났다.

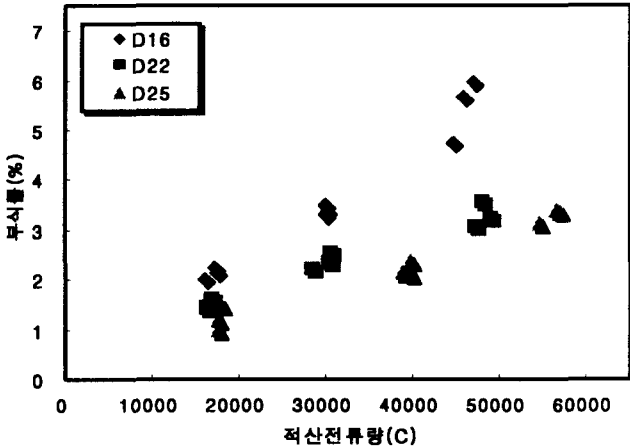


그림 7. SD400 - 직경별 부식률

D16은 적산전류량 16888C에서 2.21%를 나타내고, D22는 16420C에서 1.49%, D25는 17731C에서 1.22%를 나타냈다. 동일한 적산전류량으로 가정해도 부식률의 차가 D16이 D22에 비해 0.72%, D25에 비해 0.99%를 나타냈다. 부식이 진행됨에 따라서 부식률의 차이는 현저히 증가하는데, 회귀분석에 의해 48000C에서의 부식률을 예측해보면, D16이 5.65%, D22가 3.23%, D25가 2.80%를 나타내게 된다. 이 때 부식률의 차는 D16이 D22, D25에 비해 각각 2.42%, 2.85%를 나타냈다.

그림 8과 같이, SD500에서는 D22와 D25의 적산전류량에 따른 부식률을 비교하면 전체적으로 D25에 비해 D22의 경우가 평균 1.2배 큰 것으로 나타났다.

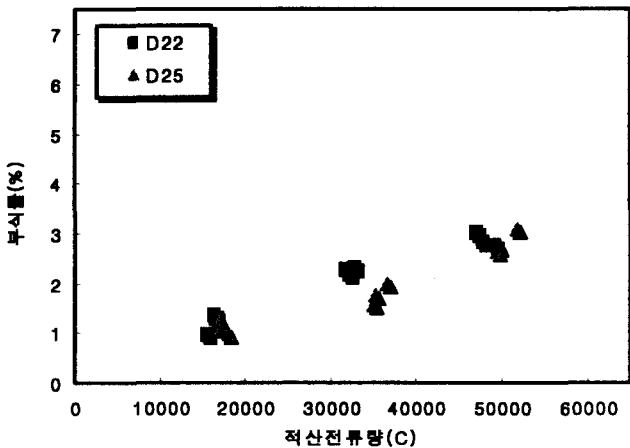


그림 8. SD500 - 직경별 부식률

결과적으로 철근의 직경이 작은 철근일수록 부식률은 더 크다는 사실을 알 수 있었고, D16이 D22에 비해 부식률이

1.7배 크며, D25에 비해 2배 이상 크고, D22가 D25에 비해 평균 1.2배 크다는 사실을 알았다.

적산전류량과 각 직경별 부식중량을 비교해 본 바에 의하면 직경이 작은 철근이 부식으로 인한 중량 손실이 작게 나타났다. 그런데, 직경이 작은 철근이 큰 철근에 비해 부식률이 크게 나타난다. 이것은 부식률이 전체 철근의 무게에 대한 부식중량 손실의 비율을 나타내는 것이므로, 철근의 직경이 작을수록 직경이 큰 철근과 비교해 볼 때, 부식으로 인한 중량감소가 전체 중량에 비해 상대적으로 크기 때문에 판단된다.

3.4 부식률과 부식된 철근의 인장하중

부식된 철근의 최대인장하중을 부식률에 따라 비교하였다. 부식률이 증가함에 따라서 철근의 최대인장하중은 감소하는 경향을 나타낸다.

그림 9는 D22에서 강종별 부식률에 따라 인장하중이 저하되는 상태를 나타낸 것이다.

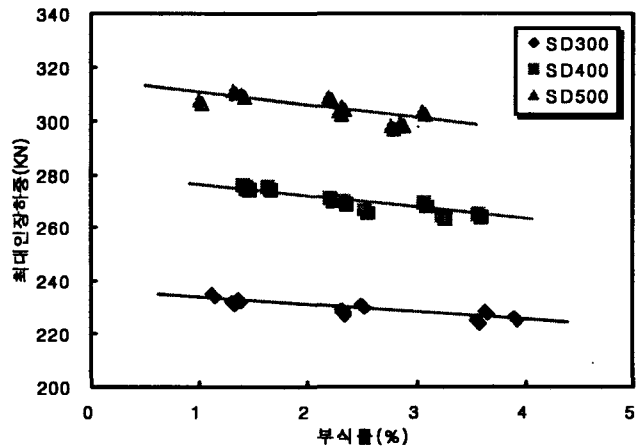


그림 9. D22 - 부식률에 따른 인장하중

그림에 나타난 바와 같이 부식률이 증가 할수록 그에 따른 인장하중도 감소하는 데, 정확한 분석을 위해 각각의 데이터를 1차 회귀분석하여 부식된 철근이 최대인장하중 저하에 미치는 영향을 알아보았다.

부식률 1%에 대한 인장하중 저하율이란 각 데이터를 1차 회귀분석한 결과를 바탕으로, 전철근에서 부식이 1% 진행 되었을 때, 인장하중 저하율을 예측한 것이다.

각각의 회귀분석식과 부식률 1%에 대한 인장하중 저하율은 표 8과 같다.

표 8. 부식된 철근의 인장하중저하에 따른 회귀식

강종	직경	회귀식	R2	부식률 1%에 대한 인장하중 저하율(%)
SD300	D16	$y = -1.01 x + 120.79$	0.93	0.83
	D22	$y = -2.97 x + 237.17$	0.78	1.25
	D25	$y = -4.11 x + 313.98$	0.58	1.31
SD400	D16	$y = -1.32 x + 143.58$	0.92	0.92
	D22	$y = -4.19 x + 280.22$	0.84	1.50
	D25	$y = -6.92 x + 342.19$	0.80	2.02
SD500	D22	$y = -4.89 x + 315.74$	0.63	1.54
	D25	$y = -8.78 x + 414.56$	0.59	2.12

부식률 1%에 대한 인장하중 저하율을 강종별로 비교해보면, D16에서 SD300은 0.83%, SD400은 0.92%로 SD400이 0.09% 더 높게 나타났다. D22에서는 SD500이 SD 400과 SD300에 비해 각각 0.04%, 0.29% 더 높게 나타났다. D25에서도 SD500이 SD400에 비해 0.10%, SD300에 비해 0.81% 높게 나타나, SD500의 저하율이 SD400과 SD300에 비해 각각 평균 0.07%, 0.55% 높게 나타났다.

부식률 1%에 대한 인장하중 저하율을 직경별로 비교해 보면, SD300에서 D25의 경우 1.31%, D22가 1.25%, D16이 0.83%로 D25가 D22, D16에 비해 각각 0.06%, 0.48% 높게 나타났다. SD400의 경우도 D25가 D22, D16에 비해 각각 0.52%, 1.1% 높게 나타났다. SD500의 경우 D25가 D22에 비해 0.58% 저하율이 큰 것으로 분석되어, D25의 1% 부식에 따른 인장하중 저하율이 D22와 D16에 비해 각각 평균 0.29%, 0.79% 높게 나타났다.

4. 결 론

- 1) 적산전류량이 증가함에 따라 부식률도 함께 증가하는데, 각 철근의 직경별로 부식률을 살펴보면, D16의 경우 적산전류량 10000C 증가함에 따라 부식률은 1.27%씩 증가하고, D22는 0.71%, D25는 0.60%씩 증가한다.
- 2) 강종에 따른 부식률은 강도가 높은 철근일수록 낮았으며, 부식경향을 살펴보면 부식률 2% 이하에서는 SD400의 부식률은 SD300과 비슷하거나 다소 크지만, 부식률 2.2%~2.3%를 전후로 하여 SD300의 부식률이 SD400의 부식률보다 커지는 것으로 분석되었다. SD500은 부식률이 가장 작은 것으로 나타났다.
- 3) 철근의 직경이 작은 철근일수록 부식률은 더 크며, 직경별로 부식률은 D16이 D22에 비해 1.7배 크고, D25에 비해 2배 이상 크게 나타났다.
- 4) 부식률 1%에 따른 인장하중 저하율은 강종별로 SD500, SD400, SD300 순으로 저하율이 큰 것으로 나타났고, 직경이 클수록 부식률에 대한 인장하중의 저하가 큰 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 주식회사 대우건설과 아이앤아이 스틸 주식회사의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김현욱, 윤상천, 지남용, “철근의 부식도가 콘크리트의 부착강도에 미치는 영향 -콘크리트의 강도와 철근매입 조건을 인자로 하여-”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집 14권 2호, 2002, pp537~542
2. 안창준 “철근부식에 따른 철근콘크리트보의 휨내력저하에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위논문, 2002.
3. KS D 3504 철근 콘크리트용 봉강
4. KS F 0801 금속재료의 인장시험편
5. ASTM G1-90 (Reapproved 1999) Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens
6. C.L.Page, K.W.J.Treadaway, P.B.Bamforth, “Corrosion of Reinforcement in Concrete”, Society of Chemical Industry
7. 米澤敏男, 出頭圭三, “鐵筋腐食の診斷”, 콘크리트構造物の耐久性診斷シリーズ