

구조용강재의 기계적 성질에 관한 통계적 연구

A Statistical Study on the Mechanical Properties of Structural Steels

장 동 일*, 이 종 득**, 경 갑 수***, 홍 성 욱****
Chang Dong-Il, Lee Jong-Deuk, Kyung Kab-Soo, Hong Sung-Wook

ABSTRACT

In this study, we have quantitatively estimated the mechanical properties of SM steels widely used in steel structures after correcting and analyzing the millsheets of the steels. From this result, in present, the mechanical properties of the steels produced in domestics have satisfied the prescribed values in Korean Standards on the whole.

The mechanical properties of the steels were dependent of plate thickness and class of the steels. Also, there have been linear relations between the plate thickness and the mechanical properties of the steels. And the results of this study have shown the similar tendencies with the existing results.

Because the upper limit value of yield strength are not prescribed in Korean Standards at present, it is necessary to prescribe the upper limit value of yielding ratio(or yield strength) in order to assure the deformation performance of the steels.

1. 서 론

강재는 자중에 비해서 강도가 매우 크고 대부분 공장생산을 하기 때문에 제품에 대한 신뢰성을 충분히 확보할 수 있고 현재 대다수의 강구조물의 각 부재는 공장에서 제작(fabrication)하여 현장으로 운반한 후 가설(erection)하기 때문에 공기를 단축시킬 수 있으며, 콘크리트 구조물에 비해서 구조적 거동을 보다 정량적으로 평가할 수 있는 등의 우수한 장점을 가지고 있다.

현재 설계 및 시공되는 대부분의 강구조물은 사회적, 기술적으로 장기간화에 따른 경량화 추세에 발맞추어 고장력강의 개발이 지속적으로 추진되고 있을 뿐만 아니라 극한지용 강재로서 개발된 TMCP강, 상수원보호를 위해 도장을 필요로 하지 않는 무도장내후성강, 내화성강 등 새로운 강재들이 속속 출현하고 있으며, 강재의 가공법과 시공법이 날로 발전함에 따라서 강구조물의 건설이 점차로 증가하고 있는 실정이다.

또한 구조물의 내하력(Load-Carrying Capacity)과 변형성능(Deformation Performance)은 구조물에 사용되는 재료의 강도특성, 변형능력에 의존하기 때문에 강구조물의 안전성 및 사용성을 정량적으로 평가하기 위해서는 강구조물에 사용되는 강재의 기계적 성질에 대한 특성을 정량적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

현재 도로교표준시방서에서 규정하고 있는 강재의 기계적 성질은 표 1에서 나타낸 바와 같이 항복점 응력(yield strength)의 경우 강재의 두께별로 하한값만이 규정되어 있고 그 하한값은 강재의 두께가 증가함에 따라 감소하고 있으며, 인장강도(tensile strength)의 경우 상한값과 하한값이 모두 규정되어 있지만 그 값을 강재의 두께별로 구분하고 있지 않은 실정이다. 또한 연신률(percent elongation)은 강재의 두께에 따라서 서로 다른 하한값이 주어져 있다.

-
- 1) 한양대학교 도시환경건설공학과군 교수, 공학박사
 - 2) 한국철도대학 철도시설토목과 교수, 공학박사
 - 3) 한국도로공사 도로연구소 강구조연구실 책임연구원, 공학박사
 - 4) 한림정보산업대학 토목과 전임강사, 공학박사

표 1. 기계적 성질에 관한 시방서 규정

구 분	인장시험 (단, 괄호안은 MPa로 환산한 값임)						
	항복점응력 (kgf/mm ²)			인장강도 (kgf/mm ²)	연 신 률		
	두께 (mm)				두께 (mm)	값 (%)	
$t \leq 16$	$16 < t \leq 40$	$t > 40$			$t \leq 5$	≥ 23	
SM400	≥ 25 (≥ 245.0)	≥ 24 (≥ 235.2)	≥ 22 (≥ 215.6)	41 ~ 52 (401.8 ~ 509.6)		$5 < t \leq 16$	≥ 18
						$16 < t \leq 50$	≥ 22
						$t \leq 5$	≥ 22
SM490	≥ 33 (≥ 323.4)	≥ 32 (≥ 313.6)	≥ 30 (≥ 294.0)	50 ~ 65 (490.0 ~ 637.0)		$5 < t \leq 16$	≥ 17
						$16 < t \leq 50$	≥ 21
						$t \leq 5$	≥ 19
SM490Y	≥ 37 (≥ 362.6)	≥ 36 (≥ 352.8)	≥ 34 (≥ 333.2)	50 ~ 62 (490.0 ~ 607.6)		$5 < t \leq 16$	≥ 15
						$16 < t \leq 50$	≥ 19

西村(1969)는 강재의 기계적 성질에 대해서 Millsheet에서 제시되어 있는 값을 M값, Checktest에 의해서 구한 값을 C값(1967년 1월부터 약 1년간 강재를 사용한 측에서 검증시험한 강재의 기계적 성질)으로 정의하고 이들의 상관관계를 설명하였다.

青木等(1986)은 1978년부터 1981년까지 약 4년간에 걸쳐서 생산된 강재의 Millsheet를 수집, 분석하고 강재의 기계적 성질(여기서는 항복점응력, 인장강도 및 항복비)에 대해서 통계분석을 실시하여 대상강재에 대한 기계적 성질의 분포특성을 정량적으로 규명하였다.

Y. Fukumoto(1994)는 판두께와 강종이 강재의 항복점 응력과 인장강도의 변동계수에 미치는 영향을 검토하고 SM490강에 대해서 항복점응력과 판두께 사이의 관계를 정량적으로 규명하였다.鈴木(1995)는 용접구조용 압연강재(SM400, SM490, SM490Y, SM520, SM570)에 대한 기계적 성질에 대한 실적조사를 실시하여 대상강재의 인장강도와 항복점응력 사이의 관계, 항복점응력과 항복비 사이의 관계식을 제안하였다.田中等(1996)은 약 20년간 수집한 Millsheet 자료에 기초해서 교량에 주로 사용되는 강재를 대상으로 통계적으로 분석함으로써 강종에 따른 기계적 성질의 분포특성을 정량적으로 평가하였다.

따라서 본 연구에서는 1993년에 생산된 강재중 SM400B, SM400C, SM490A, SM490B, SM490YA, SM490YB를 대상으로 대상강재의 기계적 성질에 대한 Millsheet 자료를 수집, 축적하고 이를 통계적으로 분석하여 대상강재에 대한 기계적 성질의 분포특성을 평가함으로써 향후 강구조물의 설계를 위한 강재의 재료적 특성을 정량적으로 평가하기 위한 기초적인 자료를 제시하고자 한다.

2. 분석방법

본 연구에서 사용한 Millsheet 자료는 국내 철강회사중 임의의 한 회사에서 실시한 기본물성시험의 결과이며, 본 연구에서는 수집하여 분석한 자료의 총수는 표 2와 같다.

표 2. 실험대상자료

구 분	SM400B		SM400C		SM490A		SM490B		SM490YA		SM490YB	
	$t \leq 16$	$t > 16$	$t \leq 16$	$t > 16$	$t \leq 16$	$t > 16$	$t \leq 16$	$t > 16$	$t \leq 16$	$t > 16$	$t \leq 16$	$t > 16$
갯 수	0	128	0	64	996	436	18	80	196	0	21	0
총 수	128		64		1432		98		196		21	

(1) Millsheet 자료를 데이터베이스화하고 여기에 기록된 내용을 다음과 같이 분류해서 정리하였다.

- ① 강재의 종류 ② 강재의 판두께
- ③ 강재의 기계적 성질 (항복강도, 인장강도, 연신률, 항복비)

(2) 데이터베이스에 기록된 자료를 판두께별로 구분하고 통계분석을 실시하여 대상강재의 판두께별 (16mm 이하, 16mm~40mm) 기계적 성질의 각 요소에 대한 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 산정하고 분포특성을 정량적으로 평가하였다.

3. 분석결과 및 고찰

본 연구에서는 SM400B, SM400C, SM490A, SM490B, SM490YA, SM490YB 강재에 대한 기계적 성질 즉, 항복강도, 인장강도, 연신률, 항복비에 대해서 데이터베이스에 등록된 자료의 통계분석을 실시함으로써 강종별 그리고 판두께별 각 기계적 성질의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 정리해서 나타내면 표 3 ~ 표 8과 같다.

표 3. SM400B 강재의 기계적 성질

강 종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM400B	128	t > 16mm	최대	368	486	36	0.78
			최소	248	410	25	0.59
			평균	308	449	30	0.69
			표준편차	18.69	16.33	2.25	0.03

표 4. SM400C 강재의 기계적 성질

강 종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM400C	64	t > 16mm	최대	366	478	37	0.78
			최소	267	402	24	0.60
			평균	301	444	31	0.68
			표준편차	16.75	14.63	2.62	0.03

표 5. SM490A 강재의 기계적 성질

강 종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM490A	996	t ≤ 16mm	최대	564	603	33	0.91
			최소	320	478	11	0.60
			평균	383	538	24	0.71
			표준편차	32.40	18.79	2.30	0.05
	436	t > 16mm	최대	491	606	32	0.84
			최소	319	491	19	0.60
			평균	358	528	25	0.68
			표준편차	24.61	17.47	2.03	0.03

표 6. SM490B 강재의 기계적 성질

강 종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM490B	996	t ≤ 16mm	최대	467	589	26	0.86
			최소	338	522	19	0.64
			평균	395	543	24	0.73
			표준편차	39.43	17.80	1.52	0.07
	436	t > 16mm	최대	506	604	30	0.87
			최소	326	452	19	0.59
			평균	392	542	25	0.73
			표준편차	34.24	23.72	2.17	0.05

표 7. SM490YA 강재의 기계적 성질

강 종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM490YA	64	t ≤ 16mm	최대	530	608	33	0.87
			최소	363	517	17	0.69
			평균	426	570	22	0.75
			표준편차	34.76	21.20	2.29	0.03

표 8. SM490YB 강재의 기계적 성질

강종	갯수	두께	값	기계적 성질			
				항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신률(%)	항복비
SM490YB	64	t ≤ 16mm	최대	439	582	26	0.76
			최소	364	528	16	0.69
			평균	388	552	23	0.70
			표준편차	30.09	15.01	2.35	0.02

표 3 ~ 표 8에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 대상으로 한 강재들의 기계적 성질은 현재 국내에서 규정하는 기준값을 대체적으로 만족하고 있음을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서 대상으로 한 모든 강재에 대해서 항복강도가 인장강도보다 편차가 다소 큼을 알 수 있었는데 이는 현재 국내 시방서에서 항복강도에 대한 상한값이 규정되어 있지 않기 때문인 것으로 생각된다.

한편 강재의 강도등급이 기계적 성질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 강종별 기계적 성질의 통계분석 결과를 나타내면 그림 1 ~ 그림 4와 같다.

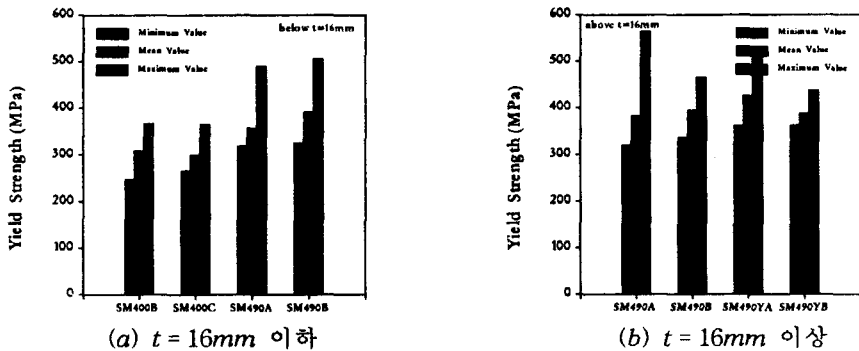


그림 1. 항복강도에 대한 통계분석 결과

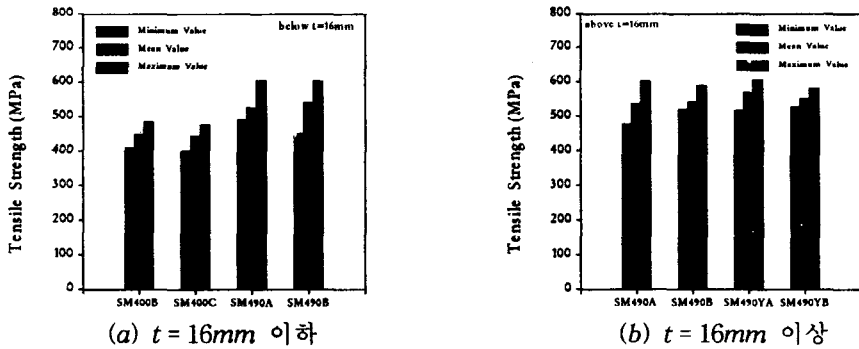


그림 2. 인장강도에 대한 통계분석 결과

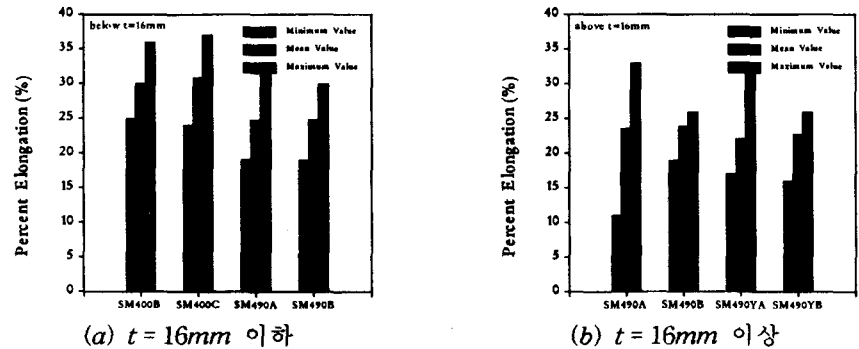
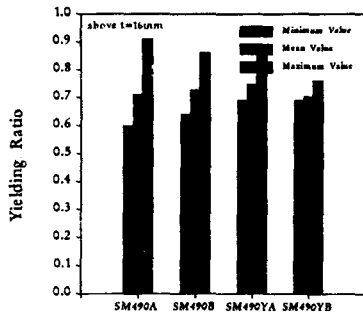
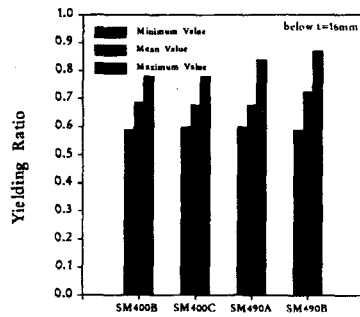


그림 3. 연신률에 대한 통계분석 결과



(a) $t = 16\text{mm}$ 이하

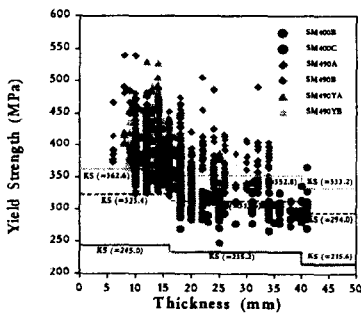


(b) $t = 16\text{mm}$ 이상

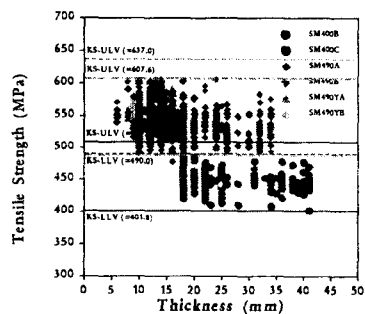
그림 4. 항복비에 대한 통계분석 결과

그림 1 ~ 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 항복강도와 인장강도는 강재의 강도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있으나 연신률의 경우는 강재의 강도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 그러나 항복비의 경우는 강재의 강도등급에 무관함을 알 수 있었다.

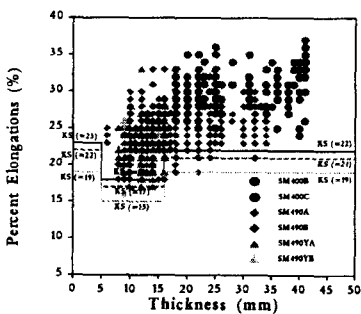
한편 강재의 판두께가 기계적 성질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해서 판두께별 기계적 성질의 분포특성을 나타내면 그림 5와 같다.



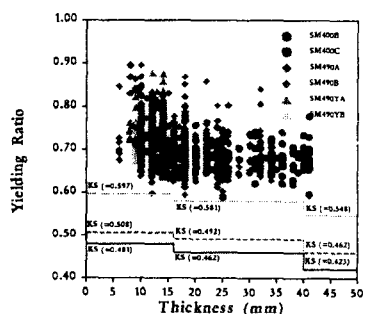
(a) 판두께별 항복강도의 분포특성



(b) 판두께별 인장강도의 분포특성



(c) 판두께별 연신률의 분포특성

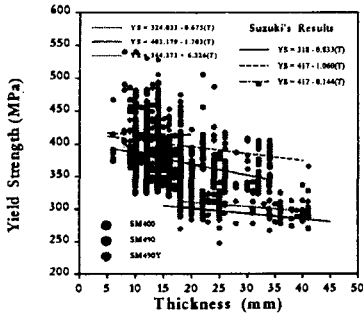


(d) 판두께별 항복비의 분포특성

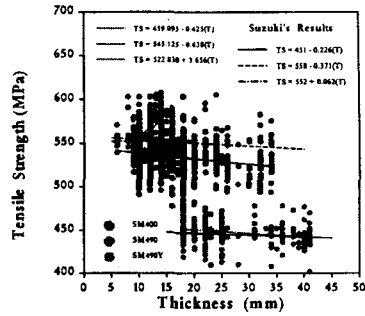
그림 5. 판두께별 기계적 성질의 분포특성

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 대상으로 한 강재중 SM400과 SM490 강재의 경우 항복강도와 인장강도는 판두께가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있지만 SM490Y 강재의 경우는 상반되는 경향을 나타내고 있으므로 강재의 항복강도와 인장강도는 판두께와 상호의존성이 있음을 알 수 있었다. 또한 강재의 연신률은 판두께가 증가함에 따라서 증가하는 경향을 나타내고 있으므로 연신률 역시 판두께와 상호의존성이 있으나 항복비의 경우는 판두께에 무관함을 알 수 있었으며, 현재 국내 시방서에서 규정하는 하한값과 상당한 편차가 있음을 알 수 있었다.

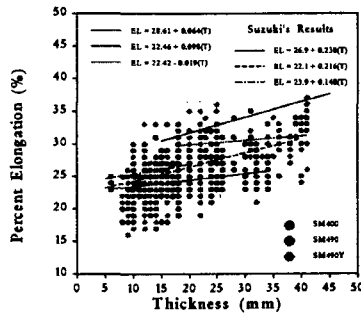
한편 그림 5의 결과를 이용해서 항복강도와 판두께, 인장강도와 판두께 및 연신률과 판두께 사이의 관계를 회귀분석법을 이용해서 산정하고鈴木(1995)의 결과와 비교해서 나타내면 그림 6과 같다.



(a) 항복강도와 판두께 사이의 관계



(b) 인장강도와 판두께 사이의 관계



(c) 연신률과 판두께 사이의 관계

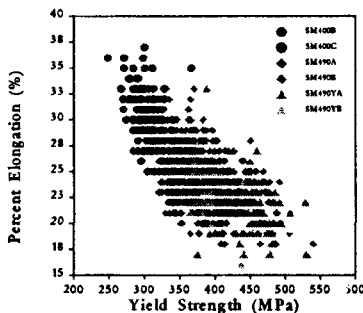
그림 6. 기계적 성질과 판두께 사이의 관계

그림 6에서 알 수 있는 바와 같이 항복강도, 인장강도 및 연신률과 판두께 사이에는 선형적인 관계가 성립함을 알 수 있으며,鈴木(1995)의 연구결과와도 유사한 경향이 있음을 확인할 수 있었다.

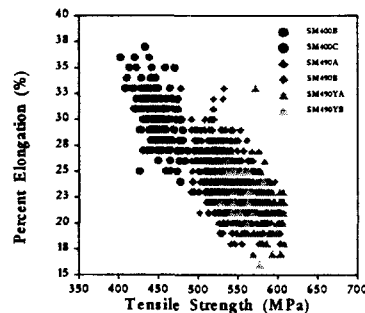
또한 항복강도와 판두께 사이의 관계를 나타내는 그림에서 SM490Y 강재의 경우 기존의 연구결과[鈴木, 1995]와 상반된 결과를 나타내고 있는데 이는 본 연구에서 사용한 SM490Y 강재에 대한 자료

다. 그러나 인장강도는 기존의 연구결과와 동일하게 SM490Y 강재에서 판두께가 증가함에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

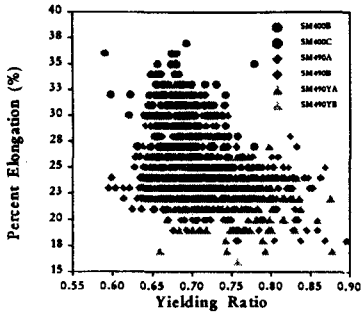
한편 기계적 성질 사이의 상호관계를 정량적으로 평가하기 위해서 항복강도, 인장강도 및 항복비와 연신률 사이의 관계, 항복강도와 인장강도 및 항복강도와 항복비 사이의 관계를 나타내면 그림 7과 같다.



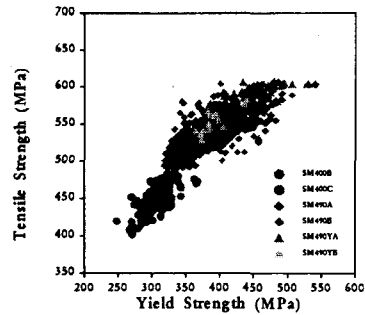
(a) 항복강도와 연신률 사이의 관계



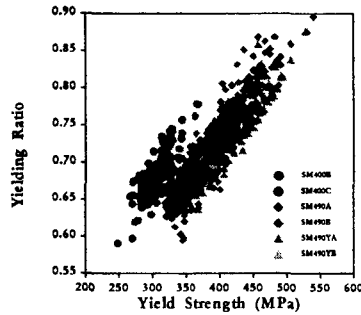
(b) 인장강도와 연신률 사이의 관계



(c) 항복비와 연신률 사이의 관계



(d) 항복강도와 인장강도 사이의 관계

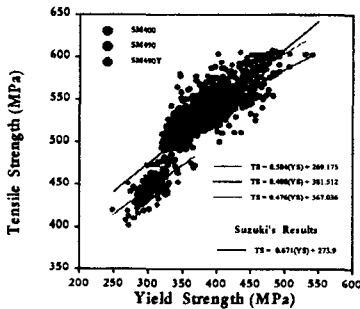


(e) 항복강도와 항복비 사이의 관계

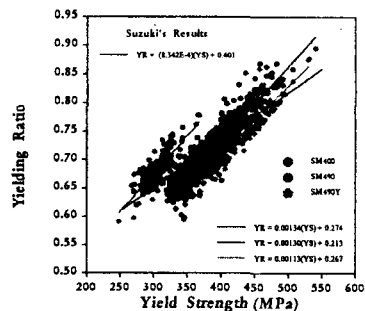
그림 7. 기계적 성질 사이의 관계

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 항복강도, 인장강도 및 항복비가 증가함에 따라 연신률은 일정하게 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 이로부터 항복강도, 인장강도 및 항복비와 연신률 사이에는 선형적인 반비례 관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 항복강도가 증가함에 따라 인장강도 및 항복비는 일정하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 이로부터 항복강도와 인장강도 및 항복비 사이에는 선형적인 비례관계가 있음을 알 수 있었다.

한편 그림 7의 결과를 이용해서 기계적 성질 사이의 관계식을 회귀분석법을 이용해서 산정하고 이 결과를鈴木(1995)의 결과와 비교해서 나타내면 그림 8과 같다.



(a) 항복강도와 인장강도 사이의 관계



(b) 항복강도와 항복비 사이의 관계

그림 8. 본 연구결과와 기존 연구결과의 비교

그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구결과로부터 산정한 기계적 성질 사이의 관계는鈴木(1995)의 연구결과와 유사한 경향을 나타내고 있으나 다소 차이가 존재하는 이유는鈴木의 연구결과는 SM400, SM490, SM490Y 강재 뿐만 아니라 SM520 및 SM570 강재를 모두 포함한 결과를 나타

내고 있으나 본 연구에서는 SM400, SM490, SM490Y 강재만을 대상으로 한 결과이기 때문인 것으로 생각된다.

또한 일반적으로 항복강도가 증가함에 따라 항복비가 증가하게 되고 항복비가 증가하면 연신률이 감소하게 되며 연신률이 감소하면 강재의 인성(toughness)이 저하하는 것으로 알려져 있기 때문에 항복점이 지나치게 높은 강재를 사용하면 변형능력의 측면에서 바람직하지 않은 것으로 알려져 있다. 즉, 지진하중과 같은 과대한 하중으로 인해서 구조물의 막대한 손상과 파괴를 일으킬 가능성이 많으므로 가급적 항복비를 시방서의 규정값에 근접시키기 위해서는 현재 전술한 바와 같이 하한값만을 규정하고 있는 시방서의 규정을 인장강도의 경우와 같이 항복강도에 대한 상한값을 규정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4. 결 론

- (1) 국내에서 생산되는 강재의 기계적 성질은 현재 국내 시방서에서 규정하고 있는 기준값을 대체적으로 만족하고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 강재의 항복강도, 인장강도 및 연신률은 판두께와 일정한 관계가 있었으나 항복비는 판두께에 무관하였다.
- (3) 강재의 항복강도, 인장강도 및 연신률은 강도등급과 일정한 관계가 있었으나 항복비는 강도등급에 무관하였다.
- (4) 항복강도와 인장강도, 항복강도와 항복비 사이에는 일정한 선형적인 관계가 성립하였으며, 기존의 연구결과와도 유사한 경향을 나타내었다.
- (5) 현재 국내 시방서에서는 항복강도의 상한값이 규정되어 있지 않으므로 강종에 따라서 항복강도가 인장강도에 약 90% 정도까지 근접하는 값을 나타내는 강재도 있음을 알 수 있었는데 과대하중에 의한 구조물의 손상을 방지하기 위해서는 강재의 변형능력을 충분히 확보하여야 하므로 항복강도 또는 항복비의 상한값을 규정할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

5. 참고문헌

- (1) 건설교통부, “도로교표준시방서 - 설계/시공 및 유지관리편”, pp.119-122, 1996.
- (2) 김종락 외 3인, “용접구조용 압연강재의 제성질에 관한 통계적 연구 - SM490A, SM490B, SM490C 강재의 제성질”, 한국강구조학회 학술발표논문집, pp.52-59, 1999.
- (3) 장동일 외 4인, “SWS490A 강재의 화학성분 및 기계적 성질에 대한 통계적 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.131-134, 1999.
- (4) 西村 昭, “ミルシート値とチェックテスト値との關係について - 鋼材の機械的性質調査委員會”, 日本鋼構造協會紙, 第5巻, 第38號, pp.3-26, 1969.
- (5) 西村 昭, “鋼材の機械的性質のばらつきについて”, 日本鋼構造協會紙, 第5巻, 第48號, pp.68-74, 1969.
- (6) 山田桑太郎, 矢島 浩, 安田健二, “最近の船體用高張力鋼の使用についての動向(1) - 使用性と今後の研究課題”, 日本造船學會紙, 第639號, pp.1-10, 1981.
- (7) 青木博文, 村田耕司, “鋼材の降伏点, 引張強さおよび降伏比に關する統計的調査”, 日本建築學會論文報告集, 第335號, pp.157-166, 1986.
- (8) 鈴木博之, “溶接構造用壓延鋼材の機械的性質の實績調査”, 日本鋼構造協會紙, 第18號, pp.23-28, 1995.
- (9) 田中雅人, 鈴木博之, “ミルシートに基づく橋梁用鋼材の分析”, 東骨技報, 第41號, pp.39-51, 1996.
- (10) Yuhshi Fukumoto, “New constructional steels and structural stability”, Proceedings of 50th Anniversary Conference of SSRC, pp.211-225. 1994.
- (11) Chang, D.I., Chung, Y.W., Kyung, K.S. and Hong, S.W., “Statistical Study on the Chemical Compositions and Mechanical Properties of SM Steels based on Millsheets”, Proceedings of 5th Joint Seminar on Steel Bridges, (Printing), 1999.