

인장시험에 의한 고강도철근(500MPa)의 용접특성에 관한 연구

Study on the Welding Characteristics of High Strength(500MPa) Reinforcing Bar According to Tensile Test

김 성 배* 이 창 남**
Kim, Sung-Bae Lee, Chang-Nam
양 재 근*** 김 상 섭****
Yang, Jae-Guen Kim, Sang-Seup

Abstract

This study conducted to know about effect of welding of high strength reinforcing bar. Welding of reinforcing bars was performed with heat treatment according to carbon equivalent. AWS D1.4(Structural Welding Code - Reinforcing Steel) provides that the preheat requirements of reinforcing bar was considered according to size of reinforcing bar when carbon equivalent exceeds the standard limit. In the study, the tensile tests of reinforcing bar with preheating, post weld heat treatment, and none of heat treatment were examined. Test results were evaluated according to the criteria of yield strength, tensile strength, and elongation with KS D 3054. SD500W and SD500 reinforcing bar were used in the tests.

키워드 : 고강도철근(500Mpa), 철근용접, 용접예열, 고강도 용접용철근

Keywords : High Strength Reinforcing Bar(500MPa), Welding of Reinforcing Bar, Preheating, SD500W

1. 서 론

건설 현장의 숙련공 부족과 인건비 증가는 자동화 및 공장제작의 필요성을 증가시키고 있다. 또한 건설업체들은 과도한 경쟁에서 살아남기 위해 다양한 신기술 및 신공법 개발로 공기단축과 원가절감에 총력을 다하고 있다. 공장 자동화로 가공 및 조립되는 철근선조립 공법은 현장 제작에 비하여 품질이 우수하고, 자재 손실이 절감하며, 공기단축 효과도 있다. 이러한 다양한 이점을 활용하기 위해 최근 대형 제강사는 철근선조립 제조업에 진출하고 있다.

철근은 크게 제강과 압연의 과정을 거쳐 생산된다. 제강과정을 통해 빌렛의 반제품을 생산하고, 생산된 빌렛을 압연하여 철근을 제작한다. 생산회사도 이러한 제조과정과 동일하게 제강사와 압연사로 구분되며, 제강사는 압연도 수행한다. 대표적인 제강사는 현대제철, 동국제강, 한국철강, YK스틸, 대한제강 등이며, 압연사는 제일제강, 대산철강 등이며 생산량이 제강사에 비해 미미하다. 국내 총 생산량은 2008년 기준 10,215천톤이며, 현대제철이

3,742천톤, 동국제강 1,773천톤, 한국철강 1,015천톤, YK스틸 1,011천톤(2009년 기준), 대한제강 918천톤 등이다. 상기 5대 제강사가 생산하는 철근량이 전체의 83% 정도이다. 또한 철근 생산량은 2003년 11,405천톤을 최대로 매년 약 천만톤 정도를 유지하고 있다⁽¹⁾. 철근의 압연과정은 국가별 각제조사별 노하우가 반영되어 빌렛의 크기와 철근직경의 관계(압하비), 압연 시 온도관리, 냉각과정 중 냉각수의 종류와 양, 냉각방법 등에 따라 철근조직이 다소 상이하게 된다.

우리나라에서는 이미 1990년대부터 대한주택공사와 철근가공업체를 중심으로 철근 기계화가공에 대한 연구 및 적용이 진행되었다. 초기 철근선조립 공법은 바리스트 작성방법, 표준가공 형상 등을 기준으로 기둥이나 보와 같이 동일하고 단순한 부재를 공장제작 후 현장설치가 주를 이루었다. 그러나 최근에는 대규모 중량의 코어벽체를 철근선조립 제작하여 생산성증대를 도모하고 있으며, 부재의 운반 및 적재를 개선한 접이식 철근선조립 공법 등 다양한 연구가 진행되고 있다^{(2)~(5)}. 이미 미국과 유럽 등에서는 철근선조립을 위한 철근용접의 관리규격과 철근용접을 적용한 다양한 제품이 사용되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 관리규격이 정비되고 있다^{(6)~(9)}. 그러나 국내에서 철근이음에 압접은 일부 사용되고 있으나, 용접은 잘 사용하고 있지 않다. 이러한 영향을 반영하여 철근용접에 관한 연구는 철근의 아크용접이음 및 가스압접이음에 대해 인장시험을 실시하여 비교한 시험결과가 발표된

* (주)센구조연구소 소장, 공학박사

** (주)센구조연구소 대표이사, 구조기술사

*** 인하대학교 건축공학부 부교수, 공학박사

**** 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사

(교신저자, 이메일 : kimss@kut.ac.kr)

“이 논문은 한국기술교육대학교 교육연구진흥비지원 프로그램의 일부지원에 의하여 수행되었음”

정도이다⁽¹⁰⁾.

철근선조립 공법은 공장제작 후 현장설치 하는 과정에서 용접이 발생한다. 용접은 띠철근을 이용하여 주근을 고정 및 설치하는 과정, 기둥과 보가 접합되는 부위에 플레이트를 이용한 접합 시, 공장제작 후 현장운반 설치하는 과정, 조립철근의 형태유지, 기둥과 보를 설치하는 과정 중 시공하중을 부담토록 하는 목적 등으로 구분할 수 있다. 부득불 발생하는 이러한 철근용접은 현장에서는 그 부위가 보강 및 이음에 한정되어 암묵적인 동의 또는 품질시험을 통해 확인 후 적용하고 있다. 이와 같이 철근용접이 국내에서는 다소 생소하나, 미국용접학회의 AWS D1.4에는 탄소당량 및 예열온도를 통해 철근용접의 시행 및 관리를 규정하고 있다⁽⁸⁾.

철근선조립 공법을 적용하기 위해서는 고강도철근과 용접용철근 적용이 필수불가결하다. 2009년 개정된 한국산업규격 KS D 3504의 철근콘크리트용 봉강에는 SD600, SD700의 고강도철근이 기준에 추가되었고, 일부 제강사는 800MPa급 초고장력 철근의 상업화를 서두르고 있다. 이에 본 연구에서는 국내에서 생산되고 있는 500MPa의 용접용 및 일반용철근을 대상으로 용접성능을 검토하였다. 용접성능은 철근선조립 과정에서 발생할 수 있는 용접부를 간략하게 형상화하여 인장시험으로 평가하였고, 예열 및 후열을 통해 성능개선방안도 검토하였다.

2. 고강도철근의 특성 및 구조기준

2.1 고강도철근의 특성

철근에 관한 한국산업규격은 KS D 3504 철근콘크리트용 봉강에 정리되어 있다. KS D 3504는 2009년 ISO 6935-2를 기준으로 변경되어 일부 철근의 종류가 삭제 및 추가되었다. SD600, SD700의 고강도철근이 기준에 추가되었고, 원형봉강인 SR240, SR300은 삭제되었다. 또한 철근직경도 대형교량 및 원자력발전소에 사용될 수 있는 D43, D57 직경이 추가되었고, 철근 표시방법도 변경되었다. 각 종류별 철근의 화학성분 및 기계적특성은 표 1, 표 2와 같다.

표 1의 화학성분은 SD300~SD700의 일반용철근과 SD400W, SD500W의 용접용철근으로 구분된다. 일반용철근의 경우 SD600이상의 고강도철근은 탄소당량(C_{eq} , Carbon equivalent)에 대한 규격이 추가되었다. 식 1은 철근콘크리트용 봉강(KS D 3504)의 탄소당량 산정식이고, 식 2는 용접구조용 압연강재(KS D 3515)의 탄소당량 산정식으로 철근과 강재가 다소 상이하다.

표 2는 기계적성질이다. 규격에서 기계적성질 중 굽힘 시험에 대한 사항은 제외하였으며, 항복비는 규격에 명기된 내용은 아니다. 인장시험 중 2호 시험편은 호칭지름이 25mm이하인 봉재이고, 3호 시험편은 25mm를 초과하는 경우에 적용한다. 연신율은 인장시험편의 종류에 따라 10

~20% 범위이며, 고강도가 될수록 인장강도에 대한 항복강도의 비인 항복비가 증가하고 있다.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (1)$$

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} \quad (2)$$

표 1. 화학성분 (KS D 3504)

구분	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	N(%)	C_{eq} (%)
SD300	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	-
SD350	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	-
SD400	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	-
SD500	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	-
SD600	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	0.63이하
SD700	-	-	-	0.05이하	0.05이하	-	0.63이하
SD400W	0.22이하	0.60이하	1.60이하	0.05이하	0.05이하	0.012이하	0.50이하
SD500W	0.22이하	0.60이하	1.60이하	0.05이하	0.05이하	0.012이하	0.50이하

표 2. 기계적성질 (KS D 3504)

구분	항복강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	인장 시험편	연신율 (Min. %)	항복비(%) (항복강도/ 인장강도)
SD300	300 이상	440 이상	2호 / 3호	16 / 18	68.2
SD350	350 이상	490 이상	2호 / 3호	18 / 20	71.4
SD400	400 이상	560 이상	2호 / 3호	16 / 18	71.4
SD500	500 이상	620 이상	2호 / 3호	12 / 14	80.7
SD600	600 이상	710 이상	2호 / 3호	10 / 10	84.5
SD700	700 이상	800 이상	2호 / 3호	10 / 10	87.5
SD400W	400 이상	560 이상	2호 / 3호	16 / 18	71.4
SD500W	500 이상	620 이상	2호 / 3호	12 / 14	80.7

2.2 건축구조기준 (KBC2009)

철근강도에 따른 구분은 설계기준항복강도(f_y)가 300Mpa인 경우를 일반강(SD300), 400MPa를 고강도강(SD400), 500MPa를 수퍼바(SD500) 등으로 구분한다.

건축현장에서는 철근조립 및 이음, 정착 등에 일부 용접이 적용되고 있으나, 건축구조기준(KBC 2009)과 건축공사표준시방서 등에는 고강도철근과 철근용접 적용에 대해 제한적인 조건을 제시하고 있다⁽¹¹⁾⁽¹²⁾. 건축구조기준에 언급된 고강도철근과 철근용접에 대한 내용을 정리하면 다음과 같고, 괄호 내의 번호는 건축구조기준의 각 항이다.

용접에 대해서는 철근조립을 위해 교차되는 철근은 용접하지 않아야 하고(0505.3.1), 지지력에 저항하는 철근의 용접이음은 기둥이나 보의 단부로부터 또는 철근항복이 비선형 횡변위 결과 발생할 수 있는 단면으로부터 부재

깊이의 2배만큼 떨어진 거리 안에서는 사용할 수 없다(0520.2.7). 반면 철근을 용접하는 경우 그 위치와 방법을 명기해야 하며(0502.2.3.2), 용접이음은 철근의 설계기준항복강도(f_y)의 125%이상을 발휘할 수 있는 완전용접이어야 한다(0508.6.1). 그러므로 건축구조기준에서 철근용접은 부분적으로 인정하나 범위를 한정하고 있으며, 용접에 대한 상세한 규정은 없다.

고강도철근 적용에 대해서는 철근의 설계기준항복강도(f_y)가 400MPa를 초과하는 경우 f_y 값을 변형률 0.0035에 상응하는 응력값으로 사용하여야 하며(0502.2.3.4), 긴장재를 제외하고는 철근의 설계기준항복강도는 550MPa를 초과하지 않아야 하고(0503.3.4), 전단철근의 설계기준항복강도와(0507.4.1) 전단마찰철근의 설계기준항복강도는 400MPa 이하로 하여야 한다(0507.7.2). 또한 지진력에 의한 휨모멘트 및 축력을 받는 골조나 구조벽의 경계요소에 사용하는 보강철근은 400MPa 이하여야 하고(0520.2.5), 합성기둥의 강도를 계산하는데 사용되는 구조용 강재 및 철근의 설계기준항복강도는 440MPa를 초과할 수 없다(0709.1.2) 등이다. 그러나 실험이나 해석에 의해 이 장에서 요구하는 사항을 만족하거나 그 이상의 구조성능을 갖는 것이 입증된다면 이를 사용할 수 있다(0520.2.1.4)고 예외규정을 두고 있다. 그러므로 고강도철근은 다양한 실험 및 연구 자료가 확보되면 적용이 가능한 것으로 판단된다.

2.3 미국용접학회의 철근 용접기준 및 용접량

건축구조기준 및 해설과 건축공사표준시방서 등에는 철근용접에 대한 구체적인 방법이 명기되어 있지 않다. 그러나 미국용접학회(AWS D1.4)에는 표 3과 같이 철근 직경과 탄소당량에 따라 최소예열온도 제한으로 철근용접에 대해 규정하고 있다. 표 3에서 미국용접학회의 철근에 대한 탄소당량은 식 3과 같다.

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} - \frac{Mo}{50} - \frac{V}{10} \quad (3)$$

표 3. 최소예열온도 (AWS D1.4)

탄소당량(C_{eq})	철근직경(D)	예열온도(℃)
$C_{eq} \leq 0.40$	$D \leq 36$	none
	$43 \leq D \leq 57$	10
$0.40 < C_{eq} \leq 0.45$	$D \leq 36$	none
	$43 \leq D \leq 57$	40
$0.45 < C_{eq} \leq 0.55$	$D \leq 19$	none
	$22 \leq D \leq 36$	10
	$43 \leq D \leq 57$	90
$0.55 < C_{eq} \leq 0.65$	$D \leq 19$	40
	$22 \leq D \leq 36$	90
	$43 \leq D \leq 57$	150
$0.65 < C_{eq} \leq 0.75$	$D \leq 19$	150
	$22 \leq D \leq 57$	200
$C_{eq} > 0.75$	$22 \leq D \leq 57$	260

3. 시험계획 및 방법

3.1 시험 계획

고강도철근을 공장제작 후 현장설치 하는 철근선조립에서 제작 중 용접이 발생한다. 용접은 주근 고정 및 설치과정과 기둥과 보 접합부위, 공장제작 후 현장운반 시, 기둥 보 설치 중 시공하중 분담 등의 목적으로 적용된다. 그림 1은 철근선조립을 이용할 경우 예상되는 기둥과 보 접합부 형상의 예이다.

시험체 계획은 플레이트와 주근용접, 주근과 띠철근의 용접, 본 용접을 실시하기 전의 가용접으로 구분하여 용접에 의한 고강도철근(500MPa)의 영향을 평가하였다. 또한 표 3과 같이 철근용접에 대한 최소예열온도 규정을 반영하여 예열을 하지 않은 경우와 예열, 후열로 구분하여 시험을 계획하였다. 예열온도 산정에 기본이 되는 탄소당량은 4종류의 주근(D41, D32, D29, D22)에 대해 화학성분조성을 확인하였다. 화학성분시험은 한국화학융합시험연구원을 통해 수행하였다.

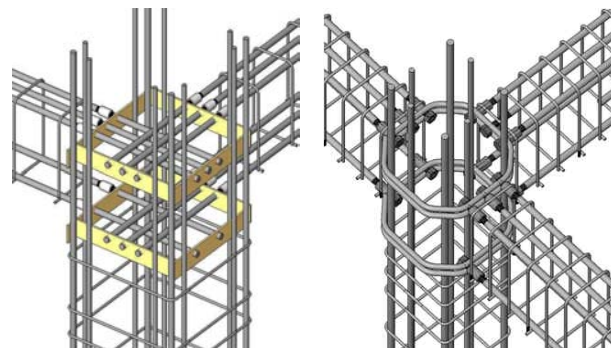


그림 1. 철근선조립을 적용한 기둥 보 접합부 예

3.2 시험체형상 및 시험방법

시험체형상은 그림 2~그림 4와 같이 전장 800mm이고, 중간에 일정한 용접부를 갖도록 하였다. 그림 2는 주근과 철판의 용접부로 용접량이 많은 경우이고, 그림 3~그림 4는 주근과 띠철근 용접부이며, 용접량이 중간과 적은 경우이다. 용접은 플럭스코어드 아크용접(FCAW)을 적용하였다. 플럭스코어드 아크용접에 사용된 용접봉은 철구조공장에서 일반적으로 사용하는 SF-71T의 연강 및 고장력강용 용접봉이며, 용접봉의 항복강도는 562MPa이다. 용접봉의 종류에 의한 용접특성은 본 연구에서 제외하였다. 용접은 용접절차서(WPS)에 준해 진행하였으며, 전류와 전압, 속도 등을 측정하였다. 플레이트와 주근의 용접은 철근의 한 면당 2회(pass) 실시하였으며, 나머지 용접은 1회씩 하였다. 철근 및 철판의 용접량은 AWS D1.4와 국내기준에 맞춰 한 면의 목두께(a) $a = 0.2d_b$ (d_b ; 철근직경)로 하였다. 예열 및 후열온도 측정은 적외선센서를 이용한 방사온도계로 용접선에서 100mm 위치에서 계측하였고, 예열 및 후열은 용접선에서 양측 100mm 범

위에 대해 수행하였다. 그림 5는 용접과정 및 온도측정 상황이다.

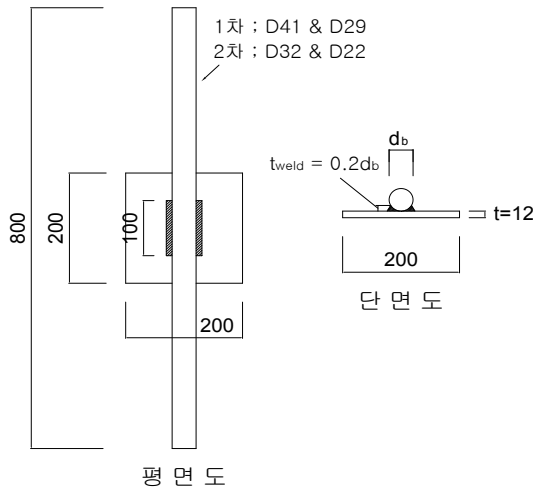


그림 2. 주근과 철판용접(용접량 많음)

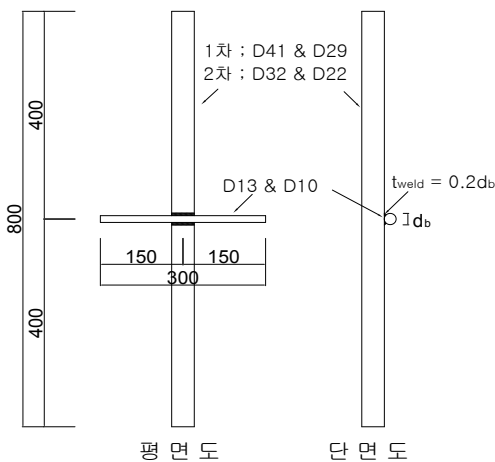


그림 3. 주근과 띠철근용접(용접량 중간)

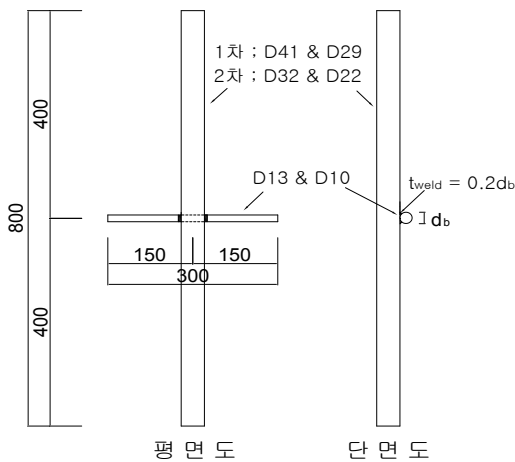


그림 4. 주근과 띠철근용접(용접량 적음)

시험은 1차와 2차로 구분하여 진행하였으며, 1차 시험은 용접용철근(SD500W)의 D41, D29를 주근으로 사용하였고, 2차 시험은 일반용철근(SD500)의 D32, D22를 주근으로 사용하였다. 1차 시험은 예열을 하지 않은 경우와 예열 및 후열과 함께 용접량을 변수로 하였다. 2차 시험은 1차 시험에서 용접량이 중간과 적은 경우 용접량의 차이가 크지 않으며, 시험결과도 큰 차이를 보이지 않으므로 띠철근의 직경을 13mm로 통일하였다. 또한 띠철근은 일반용철근(SD400)을 사용하였고, 강판은 SS400을 적용하였다. 건축구조기준에 의하면 띠철근은 주근이 32mm 이하는 10mm 직경을 사용할 수 있도록 되어 있다. 표 4는 1차와 2차 시험의 시험계획 및 시험체 일람이다. 1차 시험체의 03번은 띠철근 용접위치를 중앙에서 벗어나서 상부로부터 300mm위치에 실시한 경우이다. 시험체는 각각 2개씩 제작하였다. 그러므로 1차 시험 28개, 2차 시험 28개에 대해 시험을 구분하여 진행하였다.

철근용접에 의한 영향평가는 인장시험을 통해 강도와 변형능력으로 구분하여 확인하였다. 시험은 만능시험기(UTM)를 이용하여 인장시험을 하였으며, 시험체 중앙부에 스트레인 게이지를 부착하였다. 그림 6은 만능시험기를 이용한 시험과정이다.



그림 5. 용접과정 및 온도측정



그림 6. 시험 전경

4. 시험결과 및 분석

4.1 강도시험결과

표 4는 시험체 일람표이고, 표 6은 시험결과이다. 시험 결과는 용접길이와 용접목두께, 연신율과 항복응력, 인장

응력, 파단위치 및 파괴형상 등을 정리하였다. 시험체명은 앞의 숫자(41, 29 등)는 철근직경이며, 그 다음 기호(N, P, A)는 열처리방법이다. N은 열처리를 하지 않은 경우, P는 예열, A는 후열의 표시이다. 그 다음 기호(L, M, S)는 용접량 구분이다. 용접량은 L이 많은 경우, M은 중간, S는 적은 경우이다.

용접길이와 용접목두께는 두 군데 측정하여 평균치를 표 6의 시험결과에 정리하였다. 용접면적은 용접길이와 용접목두께의 곱으로 표 7의 시험결과 분석에 정리하였다. 용접은 2면 수행되었으므로 표 6의 2배가 된다.

강도의 경우, 항복응력은 기준치 500MPa를 전부 만족하였으며, 인장응력은 2차 02-1시험체(32-N-M-1)만 기준치 620MPa보다 다소 적게 나타났다. 항복강도에 대한 인장강도의 비는 1.17~1.41의 범위이다.

표 4. 시험체 일람표

	구분	주근				용접부			용접량			열처리(℃)	
		D41	D32	D29	D22	plate	D13	D10	많음	중간	적음	예열	후열
1차 용접용 철근	01	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	none	none
	02	○	-	-	-	-	○	-	-	○	-	none	none
	03	○	-	-	-	-	○	-	-	○	-	none	none
	04	○	-	-	-	-	○	-	-	-	○	none	none
	05	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	90	-
	06	○	-	-	-	-	○	-	-	○	-	90	
	07	○	-	-	-	-	○	-	-	-	○	90	-
	08	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	-	90
	09	○	-	-	-	-	○	-	-	○	-	-	90
	10	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-	none	none
	11	-	-	○	-	-	-	○	-	○	-	none	none
	12	-	-	○	-	-	-	○	-	-	○	none	none
	13	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	소재시험	
	14	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	소재시험	
2차 일반용 철근	01	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	none	none
	02	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	none	none
	03	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	90	-
	04	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	90	-
	05	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	-	90
	06	-	○	-	-	-	○	-	-	○	-	-	90
	07	-	-	-	○	○	-	-	○	-	-	none	none
	08	-	-	-	○		-	-	-	○	-	none	none
	09	-	-	-	○	○	-	-	○	-	-	90	-
	10	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	90	-
	11	-	-	-	○	○	-	-	○	-	-	-	90
	12	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	-	90
	13	-	○	-	-	-	○	-	-	-	-	소재시험	
	14	-	-	-	○	-	○	-	-	-	-	소재시험	

용접용철근을 주근으로 사용한 1차 시험에서 연신율은 예열 또는 후열을 하면 9.2~18.6%로 다소 편차가 크나 평균이 15.1%로 나타났다. 예열 및 후열을 하지 않으면, 일부 연신율을 만족하지 못한 경우도 있으나 평균이 14.3%로 한국산업규격 14%를 상회하였다. 그러므로 고강도(500MPa) 용접용철근은 철근직경과 탄소당량에 따른 예열온도를 준수하면 변형능력의 확보가 가능할 것으로 판단된다.

일반용철근을 주근으로 사용한 2차 시험에서 연신율은 예열 또는 후열을 하면 평균이 11.7%로 나타났으며, 예열 및 후열을 하지 않으면, 평균이 6.9%로 연신율을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 파단위치는 대부분 용접부 주변의 열영향부에서 파괴되었으며, 특히 용접부에서 파괴된 경우 연신율이 저하된 것으로 나타났다. 그림 7은 스트레인게이지와 만능시험기를 통해 측정한 시험결과를 나타낸 것이다.

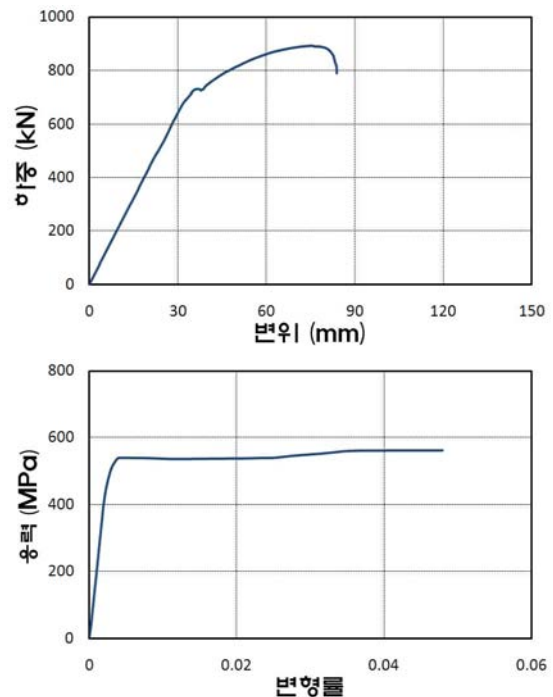


그림 7. 1차 41-N-M 시험체

4.2 화학성분 시험결과

표 5는 화학성분시험결과이다. 화학성분시험결과는 탄소당량산정을 위해 실시하였으며, 시험결과를 기초로 식 1의 국내식과 식 3의 미국용접학회(AWS)식을 비교하였다. 또한 검사증명서(Mill sheet)와 비교하였다.

시험에 사용된 4가지 종류의 철근을 시험 종료 후 한국화학융합시험연구원에 화학성분을 검사하였다. 일반용철근의 경우 검사증명서(M/S)에는 5대 원소(C, Si, Mn, P, S)와 탄소당량만 명기되어 있어 시험결과와 검사증명서를 직접 비교하기는 어렵다.

검사증명서는 용접용철근과 일반용철근 모두 표 1의

한국산업규격 값을 만족하였다. 그러나 화학성분 시험결과 용접용철근과 일반용철근 모두 탄소(C)량이 한국산업규격 관리기준값인 0.22%를 상회하였다. 시험결과는 본 연구에 사용된 철근으로 한정되었으나, 검사증명서와 편차가 크다. 또한 일반용철근은 한국산업규격에서 관리되고 있지 않으나, 0.30% 이상으로 나타났다. 용접용철근의 탄소당량은 한국산업규격에서 0.50%이하로 관리되고 있고, 일반용철근은 제한치가 없다. 용접용철근은 화학성분 시험결과와 검사증명서 모두 탄소당량치를 만족하였고, 일반용철근은 화학성분시험결과 0.50%를 상회하였다.

한국산업규격 KS D 3504의 탄소당량은 식 1이 적용되고 있고, AWS D1.4는 식 3을 사용하고 있다. 두 식에 의한 탄소당량치를 비교한 결과 한국산업규격값이 약 10% 더 크다. 그러므로 AWS D1.4에서 제시하고 있는 표 3을 적용하려면, KS D 3504의 탄소당량을 약 90%로 저감시켜 반영해야 한다.

표 5. 화학성분시험 결과

구분(%)	SD500W				SD500			
	D41		D29		D32		D22	
	성분 시험	M/S	성분 시험	M/S	성분 시험	M/S	성분 시험	M/S
C	0.24	0.21	0.29	0.21	0.30	0.30	0.34	0.32
Mn	0.83	0.80	0.20	1.27	0.91	0.71	1.15	1.15
Cr	0.21	0.16	0.15	0.10	0.15	-	0.20	-
V	0.004	0.02	0.003	0.04	0.003	-	0.034	-
Mo	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	-	0.03	-
Cu	0.32	0.31	0.38	0.35	0.38	-	0.24	-
Ni	0.11	0.13	0.11	0.09	0.11	-	0.08	-
C _{eq}	식 1	0.45	0.41	0.51	0.48	-	0.61	0.58
	식 3	0.41	0.37	0.47	0.44	-	0.56	-
비고	1차 용접용철근				2차 일반용철근			

4.3 파단면 양상

그림 8은 표 6의 파단면 형상에 대한 구분이다. 그림 8의 파단면 구분은 환봉 인장시험에 의한 통상적인 분류이다. (i)은 가장 많이 확인되는 컵앤콘(cup and cone)형상으로 중심부에 균열이 발생 후 균열과 표면 사이에 전단변형이 발생되어 파단된다. (ii)는 더블콘(double cone)형상으로 연성이 풍부한 재료에서 확인되며, (iii)은 국부수축이 생기지 않고 거의 수직파단 되는 형태로 고강도 또는 취성재료에서 확인된다. (iv)는 (ii)보다 연성이 더 큰 재료이고, (v)는 국부전단변형 파단, (vi)은 크로커다일(crocodile type) 형으로 구분한다⁽¹³⁾.

표 6의 시험결과와 파단면 형상을 구분하여 연신율과 비교하였다. 각 유형별 연신율 평균치는 (i)유형의 컵앤콘이 14.09%, (iii)유형의 수직파단이 6.76%, (v)유형의 국부전단변형 파단면이 15.57%이다. 그러므로 파단면 유형과 연신율은 높은 관계성을 가짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 그림 8과 시험결과 중 각 예를 정리한 것이다. 그림 9의 (iii)유형에서는 파괴기점을 시작으로 파단면의 진행방향을 확인할 수 있다.

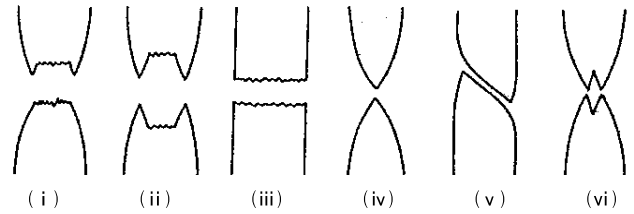


그림 8. 파단면 형상 구분



(a) type i

(b) type iii



(c) type v

그림 9. 시험결과와 파단면 형상

4.4 용접과 철근종류의 영향

그림 10은 열처리를 하지 않은 경우 용접량과 연신율 및 강도의 관계이다. 각 종류별 시험체의 평균치로 정리한 것이다. 용접량과 연신율의 관계는 명확한 관계성을 갖지 않는 것으로 보인다. 그러나 용접량이 많은 철근과 플레이트 용접의 경우 연신율이 급격히 저하되는 경향을 보이며, 주근과 띠철근의 용접을 형상화한 용접량이 중간 또는 적은 경우 연신율이 상대적으로 적게 저하되는 경향을 보인다. 고강도의 용접용철근(SD500W) D41, D29는 일반용철근(SD500)의 D32, D22 보다 연신율이 높게 나타나서 용접에 의한 영향을 적게 받는 것으로 판단된다.

용접량과 강도의 관계는 항복강도와 인장강도 모두 모재를 기준으로 용접량에 따른 강도의 변화는 적다. 용접용과 일반용철근의 차이는 용접용철근이 용접에 의한 강도편차가 적고 안정적인 강도를 확보하였다.

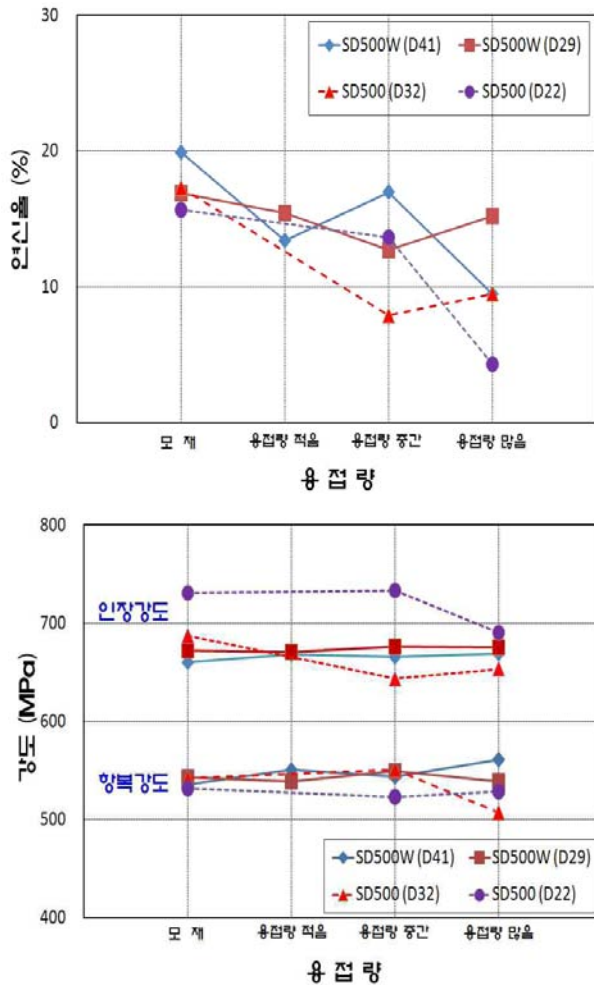


그림 10. 열처리 하지 않은 경우 용접량과 연신율 및 강도 관계

4.5 예열의 영향

그림 11은 예열의 영향을 평가하기 위해 용접량에 따른 연신율과 강도변화를 비교하였으며, 예열을 한 경우와 예열하지 않은 것을 함께 비교하였다. 예열을 하는 것이 예열을 하지 않는 경우 보다 연신율이 증가하였다. 또한 용접용철근은 일반용철근 보다 연신율이 증가하는 경향을 보였다. 그러나 대부분의 경우 모재보다 연신율이 저하되었으며, 일부 시험체의 경우 모재보다 상승하였다. 이러한 연신율 증가는 용접량이 많은 경우 특히 두드러지며, 용접량이 적거나 중간인 경우, 상대적으로 그 효과가 적은 것으로 나타났다. 용접량이 많은 경우 예열의 영향이 크게 나타난 것은 제조과정 중 압연과 냉각과정을 거쳐 증가된 강도가 예열 및 용접의 반복과정을 통해 열처리에 의한 뜨임효과가 나타난 것으로 판단되나, 이에 대해서는 추가적인 연구 및 확인이 필요하다.

예열을 한 경우 강도변화는 그림 10과 비교하면, 항복강도와 인장강도 모두 용접량에 관계없이 강도편차가 크지 않음을 알 수 있다. 또한 일반용철근은 강도편차가 크게 감소하였다. 이러한 예열에 의한 강도편차 감소도 연신율과 동일하게 열처리에 의한 영향으로 판단된다.

표 6. 시험결과

구분	시험체명	용접 길이 (mm)	용접 목두께 (mm)	연신율 (%)	항복 응력 (MPa)	인장 응력 (MPa)	인장응력/항복응력	파단 위치	파단 면형상
1차 용접용 철근	01-1 41-N-L-1	125.8	10.0	8.6	588.1	685.8	1.17	a	i
	01-2 41-N-L-2	126.9	10.0	10.3	534.3	652.2	1.22	a	i
	02-1 41-N-M-1	23.0	5.0	15.7	544.0	665.7	1.22	a	i
	02-2 41-N-M-2	23.0	5.1	18.0	530.6	654.5	1.23	b	i
	03-1 41-N-M-1	23.0	5.8	16.0	534.3	654.5	1.23	a	v
	03-2 41-N-M-2	24.8	7.8	18.2	565.7	687.3	1.22	b	v
	04-1 41-N-S-1	13.0	5.8	12.7	537.3	656.7	1.22	a	i
	04-2 41-N-S-2	12.2	6.5	14.1	564.2	679.1	1.20	a	i
	05-1 41-P-L-1	124.8	9.0	18.6	535.1	659.0	1.23	b	i
	05-2 41-P-L-2	125.5	10.0	9.2	569.4	681.3	1.20	a	i
	06-1 41-P-M-1	18.4	5.9	15.8	564.9	682.1	1.21	a	i
	06-2 41-P-M-2	17.8	5.3	17.6	533.2	661.2	1.24	b	i
	07-1 41-P-S-1	10.8	5.8	15.9	535.8	661.2	1.23	a	i
	07-2 41-P-S-2	14.5	7.1	15.1	541.2	660.4	1.22	a	i
	08-1 41-A-L-1	112.7	9.0	12.8	586.4	713.4	1.22	b	i
	08-2 41-A-L-2	115.6	11.5	13.8	543.6	667.2	1.23	a	i
	09-1 41-A-M-1	23.5	6.0	16.3	589.6	703.6	1.19	a	i
	09-2 41-A-M-2	22.5	5.5	16.0	531.3	649.3	1.22	a	i
	10-1 29-N-L-1	112.0	9.1	14.2	535.5	675.6	1.26	b	i
	10-2 29-N-L-2	113.5	9.3	16.2	543.0	675.6	1.24	b	i
	11-1 29-N-M-1	20.0	6.5	13.6	558.8	680.3	1.22	a	v
	11-2 29-N-M-2	19.9	5.4	11.8	540.2	672.5	1.25	a	i
	12-1 29-N-S-1	11.5	5.8	13.3	538.6	669.4	1.24	a	v
	12-2 29-N-S-2	11.9	5.7	17.6	538.6	672.5	1.25	b	i
2차 일반 용접 철근	13-1 41-N-1	-	-	19.4	536.9	660.9	1.23	-	v
	13-2 41-N-2	-	-	20.4	535.1	659.0	1.23	-	i
	14-1 29-N-1	-	-	18.4	541.7	670.9	1.24	-	i
	14-2 29-N-2	-	-	15.4	544.8	674.0	1.24	-	v
	01-1 32-N-L-1	110.0	8.0	9.4	508.4	653.5	1.29	a	i
	01-2 32-N-L-2	105.0	8.5	9.6	505.2	653.5	1.29	a	i
	02-1 32-N-M-1	26.0	6.0	7.2	538.2	608.2	1.13	a	iii
	02-2 32-N-M-2	28.0	7.0	8.6	564.1	678.4	1.20	a	iii
	03-1 32-P-L-1	100.0	8.0	18.7	532.9	679.7	1.28	b	i
	03-2 32-P-L-2	110.0	8.0	19.0	528.2	681.2	1.29	b	v
	04-1 32-P-M-1	28.0	6.0	9.9	568.4	666.3	1.17	a	iii
	04-2 32-P-M-2	25.0	5.0	11.9	566.9	684.7	1.21	a	iii
	05-1 32-A-L-1	110.0	8.0	10.8	572.9	708.9	1.24	a	i
	05-2 32-A-L-2	100.0	8.5	9.8	526.8	672.9	1.28	a	i
	06-1 32-A-M-1	26.0	6.0	14.7	543.9	692.3	1.27	a	v
	06-2 32-A-M-2	28.0	6.0	14.9	505.5	660.0	1.31	a	v
	07-1 22-N-L-1	105.0	7.0	3.9	527.5	705.8	1.34	a	iii
	07-2 22-N-L-2	110.0	7.0	4.7	529.6	675.3	1.28	a	iii
	08-1 22-N-M-1	22.0	5.0	5.3	526.5	680.4	1.29	a	iii
	08-2 22-N-M-2	20.0	6.0	6.2	521.3	728.5	1.40	b	i
	09-1 22-A-L-1	105.0	7.0	5.8	528.0	716.6	1.36	a	iii
	09-2 22-A-L-2	110.0	7.0	5.0	530.6	697.0	1.31	a	iii
	10-1 22-A-M-1	22.0	6.0	13.5	528.5	734.7	1.39	b	iii
	10-2 22-A-M-2	21.0	5.0	10.5	524.4	731.1	1.39	a	iii
	11-1 22-P-L-1	110.0	7.5	5.3	529.6	746.1	1.41	a	iii
	11-2 22-P-L-2	115.0	8.0	10.7	524.4	736.2	1.40	b	i
	12-1 22-P-M-1	21.0	6.0	13.4	523.9	735.2	1.40	b	i
	12-2 22-P-M-2	21.0	6.0	13.9	522.9	731.6	1.40	b	i
	13-1 32-N-1	-	-	18.3	522.3	668.3	1.28	-	iii
	13-2 32-N-2	-	-	16.3	561.8	706.1	1.26	-	i
	14-1 22-N-1	-	-	15.7	530.1	740.9	1.40	-	i
	14-2 22-N-2	-	-	15.6	533.7	721.3	1.35	-	i

a ; 용접부 파단, b ; 모재 파단

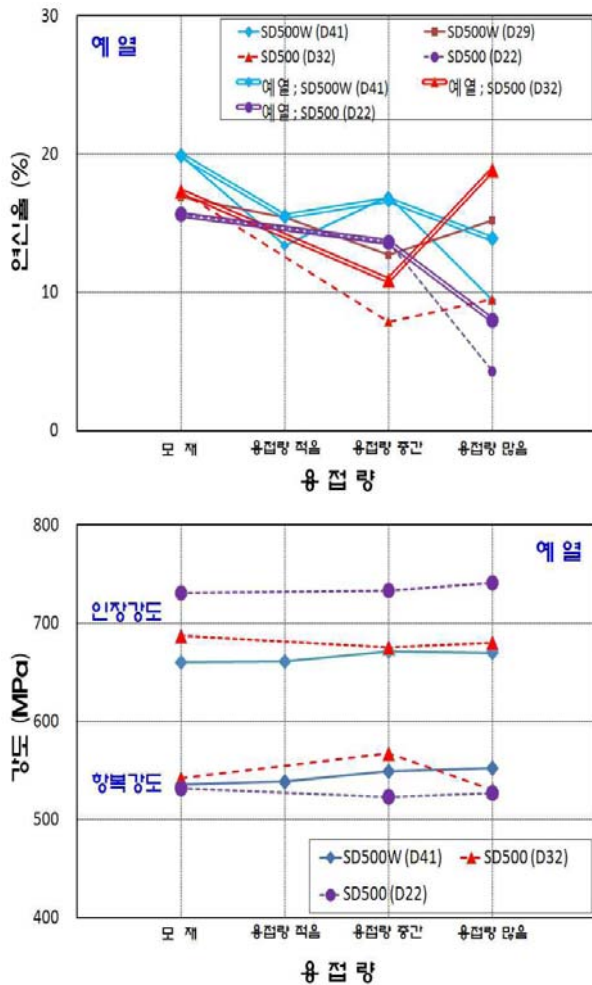


그림 11. 예열을 한 경우 용접량과 연신율 및 강도 관계

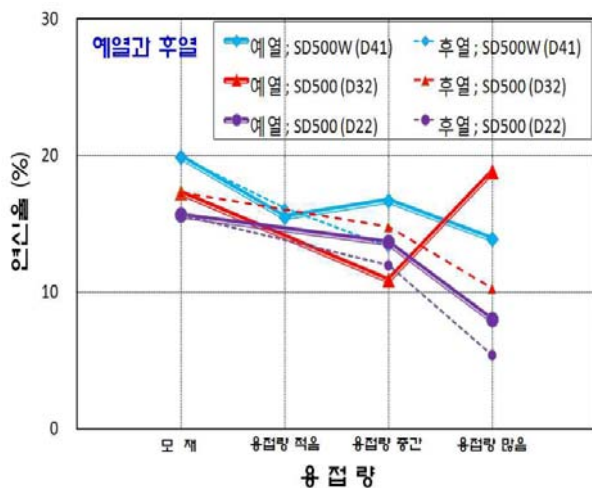


그림 12. 예열과 후열에 의한 용접량과 연신율의 관계

4.6 후열의 영향

그림 12는 동일한 온도로 예열과 후열을 한 경우, 용접량과 연신율의 관계를 정리한 것이다. 용접용철근을 사용

하는 경우 용접량에 의한 예열과 후열의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 반면 용접량 증가에 따른 연신율 상승은 확인되지 않았다. 용접량이 많은 일반용철근의 경우, 연신율은 후열 보다 예열이 더 효과적이며 용접량이 적을수록 영향은 적은 것으로 나타났다.

표 7은 표 6의 시험결과를 열처리방법과 용접량에 따라 재정리한 표이다. 예열을 한 경우 용접용철근과 일반용철근의 연신율 평균치는 각각 16.5%, 14.1% 이고, 후열을 한 경우 용접용철근과 일반용철근의 연신율 평균치는 각각 16.5%, 12.6% 이다. 후열을 한 경우 일반용철근의 연신율이 다소 저하하였으나, 일부 시험체(22-P-L, 22-A-L) 시험결과와 큰 오차를 고려하면 차이는 거의 없는 것으로 판단된다. 그러므로 예열 및 후열 등의 열처리 방법은 현장 작업조건에 따라 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

표 7. 시험결과 분석

구분	시험체명	용접면적 (mm ²)	용접면적/직경 (mm)	연신율 (%)	항복응력 (MPa)	인장응력 (MPa)	인장응력/항복응력
열처리 않은 경우	용접용 철근	41-N	-	19.90	536.0	656.0	1.23
		41-N-L	2,527.0	61.63	561.2	669.0	1.19
		41-N-M	279.6	6.82	543.7	665.5	1.22
		41-N-S	154.7	3.77	550.8	667.9	1.21
		29-N	-	16.90	543.3	672.5	1.24
		29-N-L	2,074.8	71.54	539.3	675.6	1.25
		29-N-M	237.5	8.19	549.5	676.4	1.23
	일반 용 철근	29-N-S	134.5	4.64	538.6	671.0	1.25
		32-N	-	17.30	542.1	687.2	1.27
		32-N-L	1,772.5	55.39	506.8	653.5	1.29
		32-N-M	352.0	11.00	551.2	643.3	1.17
		22-N	-	15.65	531.9	731.1	1.37
		22-N-L	1,505.0	68.41	528.6	690.6	1.31
		22-N-M	252.0	11.45	523.4	733.4	1.40
예열	용접용 철근	41-N	-	19.90	536.0	660.0	1.23
		41-P-L	2,378.2	58.00	552.3	670.2	1.21
		41-P-M	202.9	4.95	549.1	671.7	1.22
		41-P-S	165.6	4.04	538.5	660.8	1.23
		32-N	-	17.30	542.1	687.2	1.27
		32-P-L	1,680.0	52.50	530.6	680.5	1.28
		32-P-M	293.0	9.16	567.7	675.5	1.19
	일반 용 철근	22-N	-	15.65	531.9	731.1	1.37
		22-P-L	1,745.0	79.32	527.0	741.2	1.41
		22-P-M	252.0	11.45	523.4	733.4	1.40
후열	용접용 철근	41-N	-	19.90	536.0	656.0	1.23
		41-A-L	2,343.7	57.16	565.0	690.3	1.22
		41-A-M	264.8	6.46	560.5	676.5	1.21
		32-N	-	17.30	542.1	687.2	1.27
		32-A-L	1,730.0	54.06	549.9	690.9	1.26
		32-A-M	324.0	10.13	524.7	676.2	1.29
		22-N	-	15.65	531.9	731.1	1.37
	일반 용 철근	22-A-L	1,505.0	68.41	529.3	706.8	1.34
		22-A-M	237.0	10.77	526.5	732.9	1.39

4.7 용접량의 영향

용접은 철근과 플레이트의 용접, 철근과 철근의 용접으로 구분되는데, 플레이트와 철근용접 등 용접량에 의한 두 변수간의 관계는 명확하지 않다.

그림 13은 용접량을 철근직경으로 나누어 철근직경당 용접길이와 연신율의 관계이다. 철근직경당 용접길이와 연신율의 관계는 용접길이가 감소할수록 연신율이 증가하는 경향을 보인다. 두 변수간의 상관관계(r)는 0.4~0.5 정도로 유의성이 높지 않으나, 반비례관계의 경향은 확인할 수 있다. 이러한 용접길이와 연신율의 상관성은 철근 압연과정과 관계가 있는 것으로 판단되며, 두 변수간의 상관성은 더 많은 자료가 축적되면 상호연관성을 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

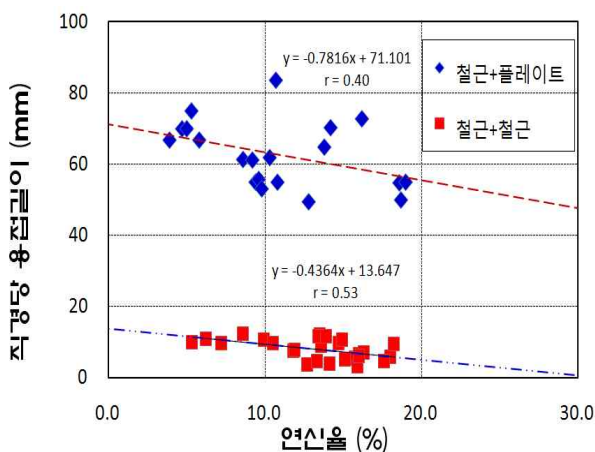


그림 13. 철근직경에 대한 용접길이와 연신율의 관계

5. 결론

최근 사용량이 증가하고 있는 고강도(500MPa)의 용접용철근과 일반용철근을 대상으로 용접성능을 검토하였다. 용접성능은 철근선조립 과정에서 발생할 수 있는 용접부를 간략하게 형상화하여 인장시험으로 평가하였으며, 예열 및 후열을 통해 성능개선방안도 검토하였다. 향후 철근직경과 탄소당량에 따른 예열온도 산정과 초고강도철근(600MPa 이상)의 상용화를 위한 시험결과의 축적이 필요하리라 생각된다. 시험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 500MPa 고강도의 용접용철근과 일반용철근에 용접을 수행하는 경우, 용접량에 관계없이 항복강도 및 인장강도는 한국산업규격의 관리기준을 만족하는 것으로 나타났다.

2) 500MPa 고강도 용접용철근의 경우, 연신율은 예열 또는 후열을 하면 9.2~18.6%로 다소 편차가 크나 평균 15.1%로 나타났다. 예열 및 후열을 하지 않는 경우, 일부

시험체는 연신율을 만족하지 못하였으나 평균 14.3%로 한국산업규격 14%를 상회하였다. 그러므로 일정한 자재 및 용접관리가 수행되면 고강도강 용접용철근의 경우 연신율이 확보될 것으로 판단된다.

3) 국내에는 철근용접을 위한 관리기준이 아직 정비되지 않은 상태이나, 철근에 용접을 하는 경우 미국용접학회 AWS D1.4의 탄소당량에 따른 예열온도를 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 미국용접학회 기준을 적용하는 경우, 한국산업규격(KS D 3504)의 탄소당량식과 미국용접학회의 탄소당량식이 다소 상이하므로 한국산업규격에 의해 산정된 탄소당량을 저감하는 것이 필요하다.

4) 예열을 하는 경우, 용접량이 많을수록 연신율은 비례적으로 증가하는 경향을 보이며, 항복강도와 인장강도 모두 강도편차가 감소하였다. 이러한 경향은 용접량이 많은 경우 압연과 냉각과정을 거쳐 증가된 강도가 예열 및 용접에 의한 열영향으로 뜨임효과(tempering)를 나타낸 것으로 판단된다. 그러나 후열의 경우 이러한 영향이 확인되지 않아 열처리에 의한 뜨임효과 규명 등은 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

5) 용접량이 연신율에 미치는 영향은 명확하지 않으나, 용접면적을 철근직경으로 나눈 철근직경당 용접길이와 연신율의 관계는 용접길이가 감소할수록 연신율이 증가하는 경향을 갖는다. 두 인자간의 상관성은 철근 제조과정과 관계가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 철강통계연보(2009), 한국철강협회, 2009. 7.
2. 대한주택공사, 철근선조립 공법을 적용한 구체공사의 시스템화 연구, 1993. 12
3. 김동진, 김옥중, 철근공사 공장가공 합리화 방안, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집, 2004
4. 이준하, 동북아 무역센터 신축공사, 한국건설관리학회, 제10권 3호, 2009. 06
5. 정영철, 이병윤, 김광희, '접이식 철근 선조립 공법의 적용 가능성 검토에 관한 연구', 한국건축시공학회논문집 제10권 2호, 2010. 4
6. ICC-ES, 'AC403 - BauGrid Reinforcement', 2008. 10
7. KS B ISO 17660-1(2007), 용접-철근용접 제1부: 하중을 받는 용접 이음, 기술표준원
8. American Welding Society D1.4, Structural welding code - Reinforcing steel, 1998
9. PCI Design Handbook, 6th Edition, 2004
10. 이목영, 장웅성, 주성민, 홍성용, 이영권, 초고층 건축물을 위한 철근 용접에 관한 연구, 대한용접접합학회 2006년도 춘계 학술대회 발표논문, 2006
11. 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 2010. 2
12. 대한건축학회, 건축공사표준시방서, 2006. 4
13. 佐藤邦彦 편, 溶接強度ハンドブック, 1988. 3

(接受: 2010. 9. 16)