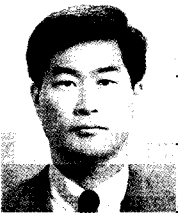


지진에 의한 강구조물 용접부의 손상과 용접설계에 대한 고찰



김진욱

(KIMM 원자력공인검사단)

- '86 부경대학교 기계공학과(학사)
- '88 부경대학교 기계공학(석사)
- '93 일본 고베대학교 기계역학(박사)
- '94 - '96 일본 고베대학교 문부성 조수
- '97 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



이병훈

(KIMM 원자력공인검사단)

- '79 고려대학교 금속공학과(학사)
- '81 한국과학기술원 재료공학(석사)
- '83 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



서승은

(KIMM 원자력공인검사단)

- '70 서울대학교 물리과(학사)
- '84 Certified Quality Engineer-ASQC
- '96 Certified welding Inspector-American welding Society
- '93 - 현재 한국기계연구원 책임기술원

1. 서 언

최근의 증가 추세인 지진에 관련된 통계와 여러 나라에서 발생하고 있는 격심한 지진은 우리나라 역시 지진재해에 대한 제도적인 충분한 대책을 가지도록 경고하고 있는 듯하다. 이미 국내에는 건설교통부의 '건축구조기준에 관한 규칙'안이 마련되어 전국의 15층 이상 고층아파트가 내진 등급 분류에서 '특등급'으로 내진설계기준이 강화되었다. 5층 이상의 숙박시설과 기숙사, 오피스텔도 종전의 2등급에서 1등급으로 강화되고 원주 등 강원 남부지역, 광주와 화순 등 전남 북서부 지역은 지진발생 가능성이 높은 제1구역으로 지정 관리된다고 시사된 바가 있다.[참조 건설교통부령 제235호, 2000년 5월 22일]

1970년대 고도 경제성장과 함께 철골조 건축물의 건설이 활발해져 왔으며, 대개의 고층건물은 이러한 강재 구조물로 세워지고 있다. 내진 설계가 요구되는 강재 구조 건축물은 심한 지진에도 구조적인 안정성을 확보하도록 요구되고 있다. 격심한 지진^[1]이 커다란 피해를 준 미국 캘리포니아주 LA 노트리지에서 발생된 강구조물의 피해 사례(Federal Emergency Management Agency, FEMA-267)를 살펴보고, 이에 대한 대책의 대안으로 국내에서도 용접기술기준으로 많이 사용되고 있는 기술기준(AWS D1.1)을 검토하여 보았다.

미국 LA 노트리지 지진의 예

1994년 1월 17일에 발생한 미국 캘리포니아주

LA시 동부지역인 노트리지(California, Northridge) 지진으로 100여 개의 강구조 건축물들이 파손되었다. 파손된 건축물들은 주거용 건축물뿐만 아니라 병원, 공공시설, 문화설비, 상업용과 산업용 건축물 등이 포함되어 있었다. 이러한 것은 보통의 경우보다 더 위험한 지진에도 생활 안정의 적절한 보호가 가능하다는 용접강재휨구조(welded steel moment frame, WSMF) 빌딩의 성능에 대하여 많은 의문을 불러일으키게 되었다. 노트리지 지진으로 파손된 강구조물의 용접강재휨구조 연결재 부위에서는 부재의 손상과 용접결함이 광범위하게 발견되었다. WSMF 빌딩의 몇몇 연결재 부위의 손상에서 발견된 국부적인 비틀림이나 항복 현상은 부재구조의 예상되는 거동과 일치하였으나, 취성파괴가 광범위하게 발생된 것은 노트리지 지진 이전에 예상했던 것과는 일치하지 않았다.

건축자재의 재료적인 측면에서 보면, 노트리지 지진에서 과거 10년간 설계된 많은 WSMF 구조물의 보(Beam/Girder)에는 ASTM A36 강재를, 기둥(Column)에는 ASTM A572 Grade 50 강재를 사용하였다. 이것은 건축물 관련 규정에 포함된 '강한 기둥-약한 보'(strong column-weak beam)의 구조물을 만드는 경제적인 방법이었다. 그러나 SSPC(structural shape producers council)에서 수행된 최근의 연구보고서는 A36 규격에 맞춰 전기로에서 생산된 H-beam의 항복강도가 50ksi를 초과하는 것도 발견되었으며, 강재의 항복강도/인장강도 값이 넓은 범위에 걸쳐 분포하는 특징을 갖고 있음을 보고하고 있다.

이러한 A36 H-beam의 항복강도 분포 특징은 강구조물의 용접연결부에서 적어도 '강한 기둥-약한 보'라고 하는 구조설계 엔지니어의 설계기준의 예측을 어렵게 만들고 있다. 혹자는 LA 노트리지 지진에서 경험한 가장 중요한 손상 원인 중의 하나는 기둥에 비해 너무 강한 강도를 갖는 보의 조합을 지적하고 있다. WSMF 빌딩의 전체 손상 감소 중 보와 기둥의 연결부

위에서 발생한 손상의 개소가 40%에 달하였다. 비록 LA 노트리지 지진에서 WSMF 빌딩의 완전 붕괴는 없었다 하더라도, 그러한 붕괴의 위험이 없다고 확신할 수는 없다. 1995년의 일본 고베 지진에서도 수많은 WSMF 빌딩이 붕괴되는 유사한 경험이 있었던 것은 이러한 사실을 입증하고 있는 것 같기도 하다. 일본 고베 지진에서 붕괴된 WSMF 빌딩에 대한 상세 내용은 미국의 현장 조사에서 밝혀진 전형적인 것과는 다소 차이가 있었다. 그러나, 파괴 손상이 발생했던 많은 부분이 LA 노트리지 지진에서 발견되었던 것과 유사하였다.

본고에서는 지진으로 손상을 입은 건축물에 대한 새로운 사실이 아니라, 새로운 빌딩을 설계하고 건조하는 방법들에 대한 미국연방정부의 FEMA-267B/June 1999 Interim Guidelines^[2]에서 추천된 사항과 관련하여 용접엔지니어와 건축물 관리자에게 지진으로 인한 강접합부의 손상 정보와 이들의 구조에 관련하여 실제적인 도움이 되도록, AWS D1.1의 기술기준을 중심으로 용접설계에 관련한 일련의 권고사항^[3]들을 제공하고자 한다.

2. 연결재 손상과 형태

노트리지에서 일어난 지진으로 Los Angeles 지역의 WSMF 빌딩에서 조사된 연결부재 구조 손상은 부재의 항복, 좌굴, 그리고 빔과 기둥 사이의 과도한 부재요소의 파괴와 이들의 연결재에서 관찰되었다. 손상을 입은 요소로 보면 거더, 기둥, 기둥 패널부, 빔과 기둥 플랜지의 용접부와 거더 북부에서 기둥 플랜지를 잇는 웨어 탭 부위 등으로 나타났다. 지진에 의해 손상을 입은 구조물의 검사와 수리를 맡았던 수많은 엔지니어들과 검사기관들이 통일된 용어 정의 없이 서로 다른 용어를 사용했기 때문에 손상등급이 표준화되어 있지는 않았다. 이에 대하여 Interim Guidelines에서는 WSMF 구조물에 대한

평가, 보수, 변경과 설계에 대한 기술기준을 제시하고 있다. 여기서는 두드러진 손상 요소에 대하여 간략하게 요약하고 용접부 손상에 대하여 설명하고자 한다.

2.1 거더 손상

거더에 대한 손상은 거더와 기둥 연결재 또는 그 부근에서 거더 플랜지의 좌굴, 항복, HAZ 내의 플랜지 파괴, HAZ 외의 플랜지 파괴, 플랜지의 상하부 파괴 등으로 존재하고 있다.

2.2 기둥 플랜지 손상

기둥의 손상은 횡 하중에 대한 지지뿐만이 아니라 건축 구조물의 자중을 지탱하는 구조물의 강도 약화를 초래하게 된다. 기둥의 붕괴는 건물 구조물의 붕괴로 이어지므로, 기둥의 완전 파단으로 인한 잠재적인 안전의 중요성을 감안한다면, 모든 기둥의 손상은 중요도에 따라 고려되어야 하며, 보수되어야 한다.

2.3 용접부 손상, 결함과 불연속

용접부 불연속에는 용접부 루트 지시와 용접 금속두께를 관통하는 크랙 등 6개의 형태로 나뉘어 정의한다.

W1과 W5와 같은 손상은 용접루트에 있는 작은 크기의 불연속 또는 용접결함이며, 비파괴검사

사(UT)로만 검출되며, 받침철판을 제거하면 육안검사(VT) 또는 자분검사(MT)로도 검출될 수 있다.[참조 그림 1.]

W2 형태의 균열은 용접두께를 완전히 관통하며 자분검사나 육안검사에 의해 검출된다. W3과 W4 형태의 균열은 거더 및 기둥의 플랜지 모재와 용접부 사이의 용융선에서 발생한다. W2, W3, W4 형태의 균열은 거더 플랜지와 기둥 플랜지의 연결부에서 인장 능력의 상실을 초래하게 하므로 보수하여야 한다.

용접부의 균열이 주로 보고된 거더의 손상으로는 기둥과의 연결에서 거더 하부 플랜지 용접부에서 가장 많이 보고되었으며, 상부 플랜지 용접부에서 보고된 균열의 예는 적었다. 실제 조사 자료에 따르면 이러한 용접균열의 25 %는 상부 플랜지에서 발생되었고, 나머지 75 %는 하부 플랜지에서 발생되었다.

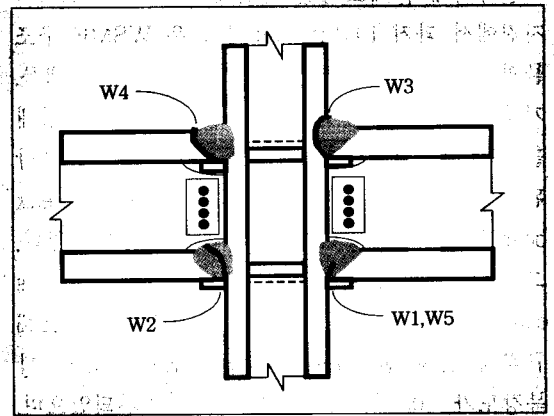


그림 1. 용접 손상의 형태

표 1. 용접손상의 형태, 결함과 불연속

형 태	설 명
W1	Weld root indications
W1a	Incipient indications - depth(3/16" or t/4; with(b/4
W1b	Root indications larger than that for W1a
W2	Crack through weld metal thickness
W3	Fracture at column interface
W4	Fracture at girder flange interface
W5	UT detectable indication - non-rejectable

2.4 전단 탭의 손상

전단 탭 손상은 전단 탭 연결부재의 파단이 거더에 대한 증력 하중을 지탱하는 능력을 상실하게 하고, 잠재적으로 지지하고 있는 층의 부분 붕괴를 유도할 수 있기 때문에 중요성을 갖고 있다. 심한 전단 탭의 손상은 연결부의 다른 부위도 심하게 손상되지 않고서는 발생되지 않는다. 만약에 거더 플랜지의 용접부와 인접한 모재가 손상되지 않았다면, 거더 플랜지의 용접과 모재들은 기둥과 거더 사이에서 발생하는 커다란 회전변형을 방지한다. 이러한 이유로, 매우 큰 전단 하중이 걸리지 않는 한, 거더 플랜지의 용접과 인접 모재는 전단 탭이 손상되는 것을 막아준다. 만약 과도한 전단하중이 발생될 경우, 전단 탭의 파손은 거더 플랜지의 용접이음에 집중되는 응력을 방출하는 역할을 한다.

2.5 패널부 손상

기둥 복부 패널과 인접한 요소에 대한 손상으로, 이러한 손상을 찾아내기는 가장 어려울 수 있다. 왜냐하면 패널부의 요소가 기둥의 약한 축으로 빔이 프레임을 형성하고 있으므로 불명확한 상태로 되어 있을 수도 있기 때문이다. 더군다나, 기둥 패널부는 접근하기도 어려우며, 중력하중의 지지를 위태롭게 하지 않으면서 보수를 위해 기둥의 일부를 제거하기는 대단히 어렵기 때문에 이러한 손상의 보수에는 매우 비싼 비용이 소요된다.

2.6 기타 손상

지진으로 손상을 입을 수도 있는 다른 구성요소에는 기둥 기초 대, 빔, 기둥, 그리고 횡축 지지를 맡기 위해 초기 설계에는 포함되지 않았던 이러한 것들과의 연결재들, 그리고 층과 지붕 격벽 등이 포함된다.

3. 용접강재구조 설계의 기본 방향

일반적인 구조 건전성을 확보하기 위해서 용접강재구조는 최소한 일반적으로 보급된 건축기준과 FEMA-267에 따라 설계되어야 한다.

기준이 설정되고 구조요소나 성분의 강도결정이 보조 지침으로 요구될 때는 UBC-94(uniform building code)에 포함된 기준을 따라 계산되어야 한다. 구조건전성을 확보하는 기준으로 파괴모드를 고려한 형상이 설계되고 설계자의 의도대로 완벽하게 용접 시공되어야 한다. 지진으로 문제가 되었던 구조물의 형상에 대하여 살펴본다.

3.1 형상 설계

프레임구조는 바람직한 소성변형구조가 사전에 결정된 위치에서, 거더 스패 내에서 소성 꺾임이 발생하도록 설계되어야 하며, 보와 기둥의 연결재는 기둥면에서 일정 거리만큼 떨어진 위치에서 소성 꺾임이 발생하도록 충분한 강도를 갖도록 설계되어야 한다. 이러한 상태는 소성 꺾임을 위해 보에서 의도하는 위치에 국부적인 취약부를 형성함으로써 달성할 수 있다. 기둥에 비해 상대적으로 약한 보를 위한 드릴 홀 또는 슬립-프릭션 연결장치 등의 소성 꺾임을 위한 구조는 소성적인 방법으로 수평 방향으로 변형이 가능해진다. 이러한 거동은 중요한 에너지를 가능하게 한다. 보에서와는 반대로 기둥에서의 꺾임 형성은 바람직하지 않다.

만약 소성 꺾임이 기둥 면과 아주 가까운 보 또는 기둥의 복부 패널부위에서 발생하면 이것은 기둥의 변형을 초래하며, 보 플랜지와 기둥 플랜지의 용접이음부에 매우 큰 2차 응력을 발생시키며, 이러한 응력 집중은 용접금속과 열영향부 주위에서 취성파괴를 일으킬 수 있다. 따라서 안전하며 신뢰할 수 있는 기둥과 보의 용접이음을 만들기 위해서는 기둥 면에서 일정한 거

리를 떠운 위치에서 소성 격임이 발생하는 취약 부를 형성하는 설계가 권장된다. [참조 그림 2.]

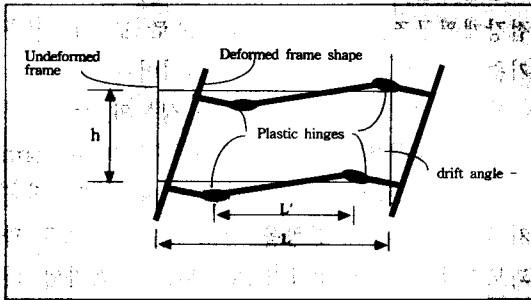


그림 2. 바람직한 소성 구조물의 거동

1994년 LA 노트리지 지진에서 많은 휨-구조 연결재가 보의 소성 격임 현상이 없이 파괴되었거나 기둥 패널부의 항복으로 파손되었다. 이에 대한 대책으로, 회전이 요구되는 연결재에 대하여는 소성 회전능력이 0.03 라디안 이상인 휨-구조 연결재를 사용하여야 한다.

3.2 강한 기둥-약한 보 상태에 대한 검토

보에서 소성 격임의 형성을 이용하는 빌딩은 기둥에서 소성 격임을 우선적으로 구성하는 메카니즘의 빌딩보다 더욱 많은 에너지를 소산할 수 있다. 만약 빌딩의 설계가 기둥보다는 보가 격이는 설계라면, 보와 기둥의 용접이음부에 보 강재를 보강하는 방법으로 이러한 거동을 바꾸지 않도록 주의해야 한다. 만약 바람직한 강한 기둥-약한 보로 설계하기 원한다면, 보와 기둥의 연결재는 다음과 같은 식이 만족되는가를 확인하여야 한다.

$$\Sigma Z_c (F_{yc} - f_a) / \Sigma M_c > 1.0 \quad (1)$$

여기서 : Z_c 는 연결재 상하 기둥 면의 소성계수
 F_{yc} 는 기둥 상하에 대한 최소 항복응력
 f_a 는 기둥 상하에 대한 축 하중
 M_c 는 기둥 중앙에서 계산된 모멘트

3.3 설계절차

구조물이 소성 격임이 생길 정도의 중력 또는 횡 축력이 가해질 때는 보의 스펠 내에서 소성 격임이 형성되도록 개념이 세워져야 하며, 다음과 같은 절차로 요약된다.

- (1) 소성 격임의 위치 결정
- (2) 격임 위치에서 예상 소성 모멘트 결정
- (3) 소성 격임 위치에서 전단력 결정
- (4) 각 결정적 부위에서 요구강도 결정
- (5) 강한 기둥-약한 보 조건을 위한 검토
- (6) 기둥 패널부 검토

4. 통계로 본 강재의 강도 특성 변화

WSMF 연결재의 손상에는 그 성능에 대한 기하학적이며 강도적인 면에서의 손상과 용접에 관련된 요소로써 손상으로 요약할 수 있다. 3가지 유형^[4]으로 나뉘어질 수가 있다고 본다.

- (1) 설계에서 만들어진 가정
- (2) 용접방법에 관련된 원인
- (3) 그리고 모재와 용접금속의 본래적인 특성 앞에서 설명되었듯이, 응력은 노치와 복잡한 기하학적인 것에 기인하여 용접부 인접 면에 집중되고, 이에 따라 결함과 같은 크랙이 강재 기둥 용접부 또는 인접 부위에 나타난다. 또 다른 요소는 연성과 파괴 인성치가 현저하게 감소되는 HAZ 부에서의 강재 특성 변화이다.

미국에서 생산되는 강재는 ASTM 규격에 준하고, 이 중에서 건축구조용 강재로 사용될 수 있는 강재는 AISC Spec.에 명시되어 있다. 한국이나 일본의 건축구조용 강재와 미국의 것을 비교해 보면 전혀 다른 분류체계와 강재 명칭을 갖고 있다. KS와 JIS 규격에서는 판 두께에 따라 항복강도와 연신율을 달리하고 있으나, ASTM 규격에서는 동일 강재일 경우도 등급에 따라서 항복강도, 인장강도, 연신율을 달리하고 있음을 알 수 있다. 또한 인장시험의 경우 미국과 한국

및 일본의 시험체 규격이 다소 차이가 있기 때문에 각국의 건축구조용 강재의 연신율을 일단 일로 비교하는 것은 곤란함을 알 수 있다.^[5]

4.1 화학적 성분

ASTM 규격은 각 강재에 대한 요구사항을 규정하고 있다. 화학분석은 각 강재의 용탕(heat) 별로 생산자에 의해 수행된다. 특정한 강재에 대해서는 최종 제품에 대한 분석도 규정될 수 있다. 재료시험성적서(CMTR)는 사용자에게 제공된다. 설계자는 설계자의 확인 검토를 위해 재료 시험성적서의 제출을 규정하여야 한다. 일반적으로 ASTM에서는 강재에 대해 탄소, 규소, 인, 황에 대해 최대치를 규정하고 있다. 기타 합금원소에 대해서는 허용범위나 최소치를 규정하고 있다. 크롬, 콜롬비움, 구리, 몰리브데늄, 니켈, 바나듐 등은 강도, 인성, 용접성, 내식성 등을 위해 첨가될 수 있다. 이러한 화학적인 요구사항에 대해서는 주어진 규격 범위 내에서 생산품과 형태에 따라 변화할 수 있다.

현재 CMTR은 규격서에서 제한하고 있지 않은 원소에 대해서도 표시하고 있다. CMTR은 구리, 콜롬비움, 크롬, 니켈, 몰리브데늄, 규소, 바나듐을 표시하고 있다. 이러한 분석 자료가 표시된다면 용접기술자에 의해 용접시방서(WPS) 준비에 매우 유용하게 사용될 수 있다.

4.2 강도 특성

기계적 성질을 나타내는데 주로 사용되는 항목은 최소 항복강도, 최대 인장강도, 최소 연신율 등이다. 그러나 규격서에 해당하는 강재의 실제 기계적 성질은 상당한 편차가 있을 수 있다. 1992년도부터 SSPC는 미국 국내 생산업자의 CMTR에 기초하여 ASTM A36과 ASTM A572 Grade 50의 강도 특성에 관한 통계 자료를 수집해오고 있다. 표 2에서는 ASTM A36과 ASTM

A572 Grade 50의 양 특성을 견비하고 있는 dual grade 재료에 대해서도 나타내고 있다.

표 2. 구조용 형강에 대한 통계

통 계	A 36	Dual Grade GRADE	A572 Gr.50	A913 Gr.65
항복 강도 (Fy, ksi)				
평균 값	49.2	55.2	57.6	75.3
최소 값	36.0	50.0	50.0	68.2
최대 값	72.4	71.1	79.5	84.1
표준 편차(s)	4.9	3.7	5.1	4.0
평균 값+1s	54.1	58.9	62.7	79.3
인장 강도 (Fu, ksi)				
평균 값	68.5	73.2	75.6	89.7
최소 값	58.0	65.0	65.0	83.4
최대 값	88.5	80.0	104.0	99.6
표준 편차(s)	4.6	3.3	6.2	3.5
평균 값+1s	73.1	76.5	81.8	93.2
항복강도/인장강도 비				
평균 값	0.72	0.75	0.76	0.84
최소 값	0.51	0.65	0.62	0.75
최대 값	0.93	0.92	0.95	0.90
표준 편차(s)	0.06	0.04	0.05	0.03
평균 값+1s	0.78	0.79	0.81	0.87
평균 값-1s	0.66	0.71	0.71	0.81

주 : 1. 상기 자료들은 1994년도에 SSPC가 수행한 연구자료를 근거해서 작성되었다. A913의 기계적 특성은 한 제강회사의 자료를 근거로 작성되었으며, 모든 제강회사가 A913의 자료를 제공하지는 않는다.

인장 시험용 쿠폰은 광폭 플랜지의 웹에서 채취한다. 부재의 서로 다른 위치에서 서로 다른 압연율, 압연온도 및 냉각조건은 인장시험과 충격치에 영향을 미친다. 전형적으로 웹은 플랜지에 비해 급속한 냉각이 이루어지기 때문에 약 5% 정도 높은 강도를 나타낸다. 설계전문가는 ASTM 규격에서 제공하고 있는 실제 성질 변화치까지도 알고 있어야 한다. 이것은 특히 항복강도에서 특별히 중요하다. ASTM A36 재료의 항복강도는 지난 15년 동안 꾸준히 증가하여 왔기

때문에 기둥이나 보에 사용된 여러 재료는 여러 등급의 인장강도를 갖는 강재가 뒤섞여 있을 수도 있다. 노트리지 지진에 의해 손상된 구조물의 조사에서는 설계자의 의도와는 반대로 보의 항복강도가 기둥의 항복강도를 상회하는 WSMF의 접합부가 발견되었다.

한 예로서 표 3은 노트리지 지진에 의해 손상된 한 건물 내에서 발견된 재료 성질의 변화량을 보여주고 있다. 표는 항복강도, 인장강도, 충격치를 나타낸다. A36과 A572의 성질을 갖는 동시에 갖고 있는 dual grade 재료는 A36보다 50% 높은 항복강도를 갖고 있다.

표 3. 노트리지 지진에 피해를 입은 강재의 특성 비교

형 강	F _y , ksi	F _u , ksi	CVN, ft-lb.
W36 X 182	38.0	69.3	18
W36 X 230	49.3	71.7	195

주: 1. 설계서는 상기 두 개 형강재를 모두 ASTM A36 강재로 명시하고 있다.

4.3 인성치

온도가 떨어지거나 변형속도가 증가됨에 따라 인성치는 감소한다. V- 노치 인성치, 낙중시험 등의 인성치 시험방법은 연성을 잃어버리고 완전히 취성 파괴를 일으키는 인성천이(nil ductility) 온도를 확인시켜 준다. 미시적 관점에서 이것은 전단형태로부터 벽개형태로 파단이 변화하는 것이다. 항복강도 이하의 공칭 인장응력하에서 벽개 형태로 파단하는 것을 취성파괴라 일컫는다. 취성파괴는 낮은 온도, 인장응력, 높은 변형속도 및 급속적, 기계적인 노치가 조합될 때 일어날 수 있다.

소성변형은 전단응력에 의해서만 일어날 수 있다. 전단응력은 1축 변형이나 2축 변형이 일어날 때 형성된다. 3축 변형 상태에서는 최대 전단응력은 주응력이 증가함에 따라 0에 접근한다. 이러한 응력값들이 서로 같아질 때 벽개파괴가 일어나게 된다. 용접과 기타 잔류응력이 합쳐지

면 3축 응력 상태를 형성하며 취성파괴를 일으킬 수 있다.

최소 인성치에 관한 규정의 필요성에 대한 합의가 성립되지 못한 상태이며, 또한 인성치의 최소 요구 값에 대하여도 합의가 이루어지지 못하고 있다. AWS의 task group은 사용 온도에서 15ft-lb를 추천하고 있다.

5. 용접 설계

5.1 용접법

용접을 실시하기 위해 사용하는 용접법은 용접보수에 관한 계약서에 규정되어야 한다. 신규 건설에 해당하는 계약서에는 용접법이나 용접변수에 대한 모든 제한사항이 기술되어야 한다. 대부분의 노트리지의 용접은 보호개스로 CO₂ 가스를 사용하지 않고 자체 보호개스가 발생하는 Self-Shielded 플럭스쿠어드 용접이 사용되었다. 엄격한 조건을 맞추거나 또는 공장용접에서는 손상부의 보수를 위해 간혹 SMAW용접이 사용되었다.

5.2 용접절차

용접은 AWS D1.1에 의한 용접시방서와 용접봉 제조업체에 의해 제작된 용접변수 내에서 수행되어야 한다.

예를 들면, 용접자세, 용접봉 직경, 용접전류 또는 용접선 공급속도, 용접전압, 용접속도와 돌출 용접장 등의 용접변수가 규정되어야 한다. 이러한 정보는 WPS로 제작자에 의해 제공된다. 전류, 전압, 용접속도, 돌출 용접장과 용접선 공급속도는 중요한 용접변수이다. 기승인 WPS가 사용되는 경우, 이러한 변수는 AWS D1.1의 요구사항에 따라야 한다. FCAW와 SMAW 용접에 대해서 이러한 변수는 제조자마다 서로 다를 수 있다. 따라서 이러한 용접법에 대해 제조자는

용접봉제조업체에 의해 제공된 추천범위 내에서 작성하는 것이 바람직하다. 기승인 이외의 또 다른 방법으로 제조자는 AWS D1.1 조항과 일치하게 시험하고 그 결과에 따라 WPS 변수를 작성할 수도 있다. 상호용접에 대해서는 용접봉 제조자와 무관하게 솔리드와이어는 거의 균일하게 사용되므로 AWS D1.1은 특정 전류를 추천하고 있다. 용접봉 제조업체의 지침서는 전류, 전압, 용접봉 공급속도, 극성, 돌출 용접장에 대한 데이터를 제공하고 있다. 그러나 이 지침서는 접합부 형상에 따라 달라지는 용접속도에 관한 자료를 제공하지 않고 있다. 계약자는 코드에서 정한 용접형상이 만들어질 수 있도록 용접속도를 포함한 적절한 용접변수를 선택하여야 한다.

5.3 용접봉

중요한 용접부(보-기둥 완전용입 홈용접부 또는 기타 Z-방향 인장 응력부, 3축 응력부 등)에 대해서는 용접재료에 대한 인성치 조항이 규정되어야 한다. 보다 엄격한 사용조건이 적용되거나 특별히 계약사항에서 규정되지 않는 한, 0°F에서 최소 20ft-lb의 충격치 값을 가져야 한다. 용접재료가 인성치를 확보하고 있는지를 확인하기 위해 AWS A5 규격에 의해 시험되어야 한다.

AWS D1.1에서는, ASTM A36 또는 A572 grade 50 재료에 사용되는 용접봉에 대해서는 충격치를 요구하지 않는다. 이러한 주제에 대해서는 1994년 10월 28, 29일에 실시된 SAC/AISC/AISI/NIST 공동 워크샵에서 깊이 검토되었다. 이러한 주제에 대해서 AWS에서도 진지하게 검토되었지만 용접공속에 대한 인성치를 결정하기 위해서는 보다 추가적인 연구가 요구되는 것으로 결론지었다. 단지 용접재료에 대한 인성치 요구사항을 추가한다는 일반적인 합의만이 이루어졌다. 공동워크샵에서의 추천사항은 -20°F에서 20ft-lb가 바람직한 것으로 추천하고 있다. SAC 워크샵에서는 0°F 미만이면서 동시에 최저

사용온도보다 30°F 낮은 온도에서 20ft-lb를 추천하고 있다. AWS는 ASTM A709에 따른 기 후권역에 따라 서로 인성값을 추천하고 있다. 특히 1권역에서는 70°F, 2권역에서는 40°F, 3권역에서는 10°F에서 20ft-lb를 추천하고 있다. AWS에서는 모재에 대해서도 인성치 값을 추천하고 있다.

노트리지와 고베 지진에서의 파단면은 부적절한 용접재료와 용접절차를 사용한 용접을 보여주고 있다. 부적절한 사용의 가장 전형적인 것은 고용착 비드이다. 1~1.5인치의 비드 폭과 0.5인치 비드 깊이의 용착이 많이 발견되었다. 이같은 용접비드와 관련한 입열량은 열영향부에서의 입도 조대화와 낮은 노치 인성치를 촉진하게 된다. 루트갭, 접근성, 전극봉 직경, 돌출 용접장, 용접 비드 두께, 용접비드 폭, 용접속도, 용접봉 공급속도, 전류 및 전압은 용접부를 평가하는데 있어 중요한 문제들이다.

강구조물 용접기술기준인 AWS D1.1은 표 3.7 기인증 용접사양에 관한 규정^[3]에서 FCAW 용접에 대한 최대 용접비드 폭은 16mm(5/8in.), 최대 용접비드 깊이는 6mm(1/4in.)로 제한하여 용접 입열량을 제한과 용접부의 입도 조대화에 따른 노치 인성치의 저하를 규제하고 있다.

5.4 예열 및 충전온도

지진 손상부에 대한 보수용접시 필수, 비다재하(fracture-control, non-redundant) 부재에 적용하는 경우 AASHTO/AWS D1.5 교량용접 기술기준을 적용하여야 한다.

또한 용접부와 열영향부에서의 균열은 반드시 피해야 한다. 용접균열의 일종으로 수소취성균열이 있다. 강재의 용접에서 발생하는 수소취성균열을 감소시키기 위해서는 다음 사항들을 주의해야 한다.

- (1) 수소를 낮춘다
- (2) 보다 높은 예열과 충전온도를 사용한다.

(3) 용접후가열(post heating)을 실시한다.

(4) 냉각속도를 늦춘다(보온재 사용).

내진구조물에 대해서는 저수소계 용접봉을 사용하여야 한다. 적절한 예열과 층간온도를 유지시켜야 한다. AWS D1.1은 새로운 구조물의 건설에 적합하다. 높은 구속정도를 갖는 보수용접에는 보다 높은 예열온도가 요구될 수도 있다.

수소취성균열을 방지하기 위해서는 수소량과 적절한 예열 및 층간온도의 관리가 용접후가열 또는 냉각속도의 저감보다도 더욱 효과적이다.

용접기술자는 적절한 예열과 저수소계용접봉의 사용에 주의하여야 한다. 이러한 방법이 균열 예방에 효과를 보지 않는다면, 용접기술자는 더욱 적절한 방법을 강구하여야 하는데 이러한 방법에는 보다 높은 예열온도, 용접후가열 및 냉각속도의 저감 등이 필요하게 된다.

일반적인 시공용접이나 보수용접에는 저수소계 용접봉의 사용과 적절한 예열이 필수적이지만 용접후가열과 냉각속도의 저감은 일반적으로 요구되지는 않는다.

5.4.1 예열과 층간온도의 사용목적

(1) 용착금속이나 열영향부에 유기되는 수소의 양을 감소시키기 위하여 강재 표면에 존재하는 습기를 제거하기 위함

(2) 용접후 냉각 과정에서 용착금속 주위를 둘러싸는 열영향부의 급속한 냉각을 방지하기 위함

실제로 모든 용접보수는 구속도가 높은 상태에서 수행된다. 따라서 보수용접시에는 높은 예열과 층간온도가 요구된다. 강재는 A3 온도(1330°F) 이상으로부터 냉각되기 때문에 냉각시 변태온도를 통과하게 된다. 이러한 변태 구역을 빠르게 통과하게 되면 경도가 높고 취성이 높은 마르텐사이트가 형성된다. 또 이러한 변태 구역을 서서히 통과하게 되면 연하고 인성이 높은 상인 베이나이트 또는 펄라이트/페라이트가 형성된다. 예열은 용착금속과 열영향부의 주위를 서서히

냉각하게 되는 효과를 가져온다.

미연 방교통부(AASHTO)는 강교 필수(fracture-critical)부재의 보수지침서에서, 보수용접은 매우 위험한 것으로 취급하고 있다. 이것은 용접시 고온으로 상승하게 되므로 용접부 주위의 금속에서 많은 소성이 발생하거나 항복 현상이 발생하기 때문이다.

예열온도는 용접부의 두께만큼 용접부로부터 떨어진 위치이면서 최소한 어느 방향으로도 3인치 이상 떨어진 곳에서 측정되어야 한다. 서로 다른 두께의 모재가 용접되는 경우는 두꺼운 모재를 기준해서 예열온도를 적용하여야 한다. 용접시 예열온도의 유지(즉 층간온도)는 필수적이다. 필수부재에 대한 최대 층간온도는 기승인된 WPS의 경우 최대 550°F(287°C)로 제한된다. 더 높은 온도의 층간온도가 시험에 의해 입증된 경우에는, 더 높은 층간온도가 채택될 수도 있다.

5.5 용접후가열

용접후가열은 용접 직후 450°F-550°F의 온도로 열을 가하는 것이다. 용접후가열의 목적은 용착금속부와 열영향부로부터 수소를 제거하여 수소취성균열의 발생을 감소시키기 위함이다. 수소는 용착금속 내에서 450°F에서 1시간당 약 1인치를 이동하며, 70°F 상온에서는 1개월에 1인치를 이동한다. 수소취성균열이 문제가 될 때는 용접후가열은 균열을 예방하는 좋은 대책이 된다. 그러나 저수소계 용접봉의 사용과 적절한 용접절차 및 균일한 예열의 적용은 용접후가열보다는 수소취성균열의 문제를 해결하는 효과적이며 경제적인 방법이다.

AASHTO/AWS D1.5-95 규격은 용접후가열이 요구될 때는 용접 직후 즉시 시행할 것을 요구하고 있다. 용접후가열은 부재의 두께 1인치당 1시간을 적용하거나 또는 2시간 중 작은 시간을 450°F-550°F 온도로 적용하면 된다.

6. 결론

상기의 권고 사항들은 LA 노트리지 지진에서 손상을 입은 건축물에 대한 자료를 수집하고 해석한 연구 프로그램의 결과물에 근거를 두고 있다. 본 보고서는 지진으로 인하여 손상을 입은 건축구조물에 대한 새로운 사실이 아니라 관련 엔지니어와 건축물 관리자에게 구조물의 손상원인과 대책에 관련하여 현시점에서 무엇을 알아야 할 것인가에 대한 정보와 실제적인 도움이 되도록 일련의 권고사항들을 제공하고자 작성된 것으로서 아래와 같은 몇 가지 요건으로 요약된다.

(1) 구조물이 소성 꺾임이 생길 정도의 중력 및 횡 축력이 가해질 때는 보의 스펜 내에서 소성 꺾임이 형성되도록 설계가 이루어져야 한다.

(2) 지진에 대비하여 건축구조물의 안전성을 확보하기 위한 약한 보-강한 기둥의 설계 개념이 확보되기 위해서는 신규 건축물에 사용되는 강재의 정확한 재료시험성적서를 바탕으로 시공 관리가 실시되어야 한다. 즉, 기둥 재료에는 A572 Gr. 50 강재를, 보 재료에는 항복강도가 기둥 재료인 A572 Gr. 50 강재의 항복강도보다 낮은 A36 또는 A572 Gr. 42 강재를 적용하여야 하며, 제작과정에서 매 강재의 재료시험성적서(CMTR)를 확인하여, 항복강도가 설계기준 값을 초과하지 않도록 주의한다.

(3) 지진으로 인한 건축구조물의 손상에 대비하여 필수부재 또는 비다재하(non-redundant)부재에 대해서는 인성치가 확보된 모재와 용접재

료를 사용하여야 한다. 즉, 건축구조물이 사용될 장소의 최저 사용온도에서 샤프 V-노치 충격 값이 20ft-lb 이상 되는 강재와 용접봉 재료를 사용하고, 적용 용접시방서(WPS)도 최저 사용온도에서 20ft-lb 이상의 내충격 값을 갖는 용접방법을 적용하여야 한다.

(4) 용접부의 내충격성을 확보하기 위해서는 매 용접비드의 폭과 깊이는 AWS D1.1 표 3.7 기인중 용접사양에 관한 규정^[3]에 따른 16mm/6mm, 수직용접은 25mm/6mm 기준을 충족시켜야 하며, 용접 예열온도와 충전온도는 해당 용접시방서의 기준을 따라야 한다.

참 고 문 헌

- [1] 최병정, "엔지니어의 입장에서 살펴본 지진의 이해와 특성", 한국강구조학회지, 제12권 4호, 2000, p.196~199.
- [2] Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Steel Moment Frames, SAC Joint Venture, Report No. SAC 95-02, 1995.
- [3] 서승은, "강구조물 용접 시방서(AWS D1.1)", 과학기술 도서출판, 2000, pp.127.
- [4] 조창빈, "Steel Moment Connection Design in USA -Past, Present, and Future", 한국강구조학회지, 제11권 3호, 1999, p.58~65.
- [5] 임성우, "건축구조용 강재의 이해", 한국강구조학회지, 제12권 4호, 2000, p.180~191.