

용접 시공 시스템

이 보 영 · 강 명 수

Welding Construction System

B. Y. Lee and M. S. Kang



이보영/한국항공대학교/1953년생/보수용접, 용접부 손상 해석, 용접 시공 기술 개발



강명수/한국항공대학교 대학원/1974년생/확산 접합, 송급성 관련 연구

1. 개 론

용접기술은 선박, 플랜트, 교량, 철골 건축물 등의 대형구조물에서부터 자동차, 철도차량, 항공기나 우주발사체 등의 수송기계와 프레스, 굴삭기 등의 산업기계 그리고 냉장고, 컴퓨터 등의 전기, 전자 제품과 부품들에 이르기까지 거의 모든 산업분야와 기기의 제작 및 유지·관리에 사용되고 있다. 용접기술은 성형, 체결, 절단, 표면개질 등 생산기술의 모든 방법을 포함하고 있는 기술로서 기계, 금속, 전기, 전자, 화학분야의 지식이 모두 복합적으로 활용되고 있는 총체적 기술분야이다. 그러나 용접기술 자체로 제품이 만들어지는 것보다는 제작과정중의 제조기술 특성을 갖는 것이 일반적이다. 이 때문에 용접관련 시공시스템을 소홀히 생각하거나 기능 위주로 잘못 생각하기 쉽다.

용접시공시스템은 용접기술을 이용하는 제조산업에서 규정이나 규격, 설계 또는 사용자 요구사항 등으로 정해진 여러 가지 성능을 만족시킬 수 있는 제품을 가장 경제적으로 생산하기 위한 생산시스템 중의 하나로서 용접구조물이나 용접물 제

작시 가장 중요한 역할을 하는 시스템인 것이다. 즉, 용접시공시스템은 설계, 생산 및 검사까지의 각 공정을 유기적으로 연계하여 최소의 비용으로 필요한 품질을 갖춘 용접부를 생산하기 위한 체계를 뜻하며 용접구조물 전체의 신뢰성을 좌우하는 중요한 시스템이다.

다른 기계가공이나 기계적 체결방법과 달리 용접시에는 높은 열과 압력이 가해지는 경우가 많으며 이로 인하여 재질의 변화와 변형 및 잔류응력 등이 발생하게 되고 결합이 생길 위험이 매우 높다. 따라서 이러한 문제점들을 방지하거나 최소화하기 위한 여러 가지 기술적 방법들이 필요하다. 이들 방법들을 용접 전·후와 중간에 적절히 적용하기 위해서는 용접법, 용접야금, 용접설계, 용접시공 등에 관한 올바른 지식이 있어야 하며, 특히 용접시공은 이들 용접관련 모든 지식들을 동시에 활용해야하는 특징이 있다.

용접 시공에는 모재확인, 용접재료확인, 용접기기, 절단 및 가공, 성형, 조립, 예열, 본용접, 용접 후열처리, 용접 후처리(덧살제거, 교정, 다듬질 등), 시험·검사 등의 공정들이 있으며 이들 각 공정에서의 품질이 올바르게 얻어지지 않으면 다

음 공정에서 올바른 품질을 얻기가 어렵게 될 뿐만 아니라 수정이나 보수 등의 별도 작업이 필요하게 되어 생산성을 저하 시키는 물론 최종제품의 품질을 보증할 수 없게 된다^{1,2)}.

따라서 각 공정에서의 필요한 품질 수준을 항상 적정수준으로 유지시키는 동시에 품질에 영향을 미치는 인자들에 대한 개별적 및 상호관계에 관한 총괄적 이해와 관리가 필요하다. 종래에는 품질 수준을 유지하기 위하여 품질 검사를 엄격히 실시하는 것에 중점을 두었으나 최근 들어서는 “제품의 품질은 검사에 의해 얻어지는 것이 아니라 각 공정마다 공정 중에 만들어지는 것”이라는 생각이 보급되어 합리적인 TQC 서클이나 자주관리활동이 정착되어 가고 있다. 시험·검사는 제품의 품질을 보증하기 위해서만이 아니라 각 공정을 중심으로 한 품질관리 시스템이 제대로 기능하고 있는지를 확인하는 목적도 갖고 있다.

용접시공의 발달은 생산성 향상과 품질 향상에 있으며 생산성 향상을 위한 고능률화, 고생산성화에서 고품질화 및 자동화와 무인화 등의 방향으로 진행되고 있다. 특히 국내의 경우는 용접기능인력의 인건비 상승과 인력 부족으로 인해 최근 들어 고능률화와 고생산성화가 급속히 추진되고 있으며 이를 위한 기계화와 자동화가 급속히 진행되고 있다. 용접법에서는 퍼복아크용접법에서 슬리드 와이어나 플럭스 코어드 와이어를 사용하는 반자동 용접법의 사용이 눈에 띄게 증가하였으며 최고 6개의 전극 와이어를 사용하는 다전극 서브머지드 용접법의 활용, 용접흡의 각도 감소와 협개선(Narrow Gap) 용접의 실용화가 진행되었다.

자동화와 무인화를 위하여 필요한 용접선 추적 시스템에는 접촉식 센서가 주로 사용되고 있으나 아크 센서나 광학식 센서의 활용이 조금씩 증가되고 있는 추세이다. 또한 최근 들어서는 퍼지 이론이나 인공지능 시스템을 이용한 용접조건 제어나 결함식별 기술이 개발되고 있다.

용접기술의 적용확대와 병행하여 용접관련 안전 위생 분야에 대한 관심이 증가되기 시작하고 있다. 아크나 레이저에 의한 시각 손상과 전자빔에 의한 X선 발생 문제들이 대두되어 안전성 추구를 위한 국제적인 움직임이 진행되고 있으며 국내에서도 망간 중독사례 발생으로 인하여 용접 흡에 대한 관심이 집중되고 있다.

국가기술자격에 의한 용접기술자 자격제도가 실시되고 있어 용접기술사가 80명, 용접기사 1급이 260명, 용접기사 2급이 630명 이상 배출되었다. 이와 함께 1991년까지 독일용접협회의 용접전문기술자에 대한 교육도 국내에서 실시되어 약 150명의 독일자격보유자가 배출되었으며 1992년부터는 대한용접학회의 용접기술자(KWE) 자격검정을 통하여 약 90명의 KWE자격소지자가 배출되었다.

2. 시공 시스템 일반

용접은 다른 기술 분야와 달리 품질을 확인하고 관리하는 것이 매우 어려운 특징을 갖는다. 예를 들면 용접부에는 미세한 결함들이 존재해 있을 확률이 높으며 이들 결함들은 용접이 끝난 후 비파괴 시험법을 통한 확인이 매우 어렵다. 또한 용접 시공이 사람의 기량에 의존하여 실시되는 경우가 많기 때문에 용접 작업자의 심신상태에 따라 품질이 좌우되기 쉽다. 특히 용접이 완료된 후에 용접부의 품질을 확인하는 것은 파괴실험을 실시하는 경우를 제외하고는 거의 불가능하다. 따라서 용접 시공 시 용접부 품질 확인을 위해서는 3중, 4중의 확인 과정이 필요하다.

용접 기술은 전술한 바와 같이 용접 작업이 종료된 후 비파괴 시험법에 의한 결함 유무의 완전한 확인이나 기계적 특성들의 확인이 거의 불가능한 특징을 갖고 있기 때문에 용접 시공전과 용접 시공 중 그리고 용접 시공후로 구분하여 용접 품질을 확인하고 관리하게 된다. 용접은 ISO 9000 시리즈에서도 생산품에 대한 시험과 검사만으로는 품질을 보증할 수 없는 특수 공정으로 규정되어 있다. 용접 품질을 보증하기 위해서는 용접시공전에 공장 인증과 용접기능사 기량 확인, 용접 절차 확인을 거치고 용접 시공중에는 용접 관리자의 감독 하에 용접 시공을 실시하고 필요시에는 용접시공중에 생산중 용접품질 확인시험을 실시하며 용접이 끝난 후에는 결함 유무를 확인하기 위한 비파괴 실험을 실시해야 한다. 용접시공시스템의 구성도는 그림 1과 같다.

본고에서는 용접 시공시 품질 확인을 위한 관련 규격과 용접 시공 기술 일반과 특징에 대하여 약술하였다.

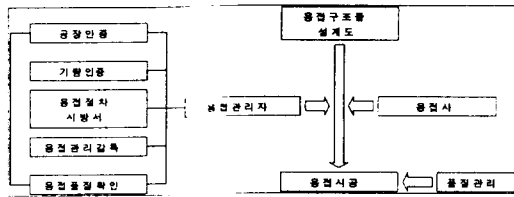


그림 1. 용접시공시스템 구성도

2.1 공장 인증

용접을 수행하고자 하는 공장은 용접에 필요한 적절한 장비와 공장을 갖추고 있어야 한다. 용접 공장이 갖추어야 하는 장비들은 다음과 같다.

- (1) 우천을 막을 수 있는 공장과 조립을 위한 장비, 용가재와 보조재를 위한 저장 장소와 건조용 장비
- (2) 조립과 운송을 할 수 있는 리프트(lift)
- (3) 기계와 공구들
- (4) 용접 및 절단 관련 장비들
- (5) 용접 및 절단용 치공구
- (6) 예열 및 후열 처리 장비
- (7) 모재와 용접부를 시험하기 위한 시험 장비들

2.2 용접사(용접 작업자 포함) 기량인증

현재에도 많은 부분의 용접들이 용접사에 의해 수동으로 실시되거나 기계식 또는 자동 용접의 경우에는 용접 작업자들에 의해 용접이 이루어지고 있다. 이들 용접사나 용접 작업자들은 용접에 관한 지식과 기능을 갖추고 용접 업무를 수행해야 하며 용접 지식이나 기량을 갖추지 못한 사람이 용접 작업을 담당하게 되면 올바른 용접 품질을 기대할 수 없게 된다. 따라서 생산 용접을 시작하기 전에는 용접부의 종류와 요구되는 품질 정도에 따라 용접사나 용접 작업자들의 기량이나 숙련 정도를 확인해야 한다.

용접 기량 인증은 용접법과 모재의 종류 및 두께 등에 따라 구분하여 확인해야 하며, 이에 관한 내용들이 미국의 ASME Code 나 European Standard EN 289 등에 규정되어 있다.

2.3 용접 절차 확인

제품 생산 용접을 위해서는 본용접 이전에 용접 절차의 확인이 필요하다. 전술한 바와 같이 용접이 갖는 특성상 용접 후 품질 확인이 불가능하기 때문에 용접에 필요한 모든 중요한 데이터들, 예를 들어 용접 재료, 이음부 종류, 이음부 형상, 용접 조건, 용접 방법, 용접 전후 처리(예열, 후열, 이음부 상태 등) 등에 관한 내용들을 결정하고 이 데이터들에 따라 용접 시공한 다음 용접부 특성을 확인하여 필요한 물성이 확보되었을 때 사용된 용접 데이터에 의한 용접 절차의 확인이 이루어지게 된다.

용접을 하기 위해서는 용접에 필요한 제반 데이터가 주어져야 한다. 용접에 필요한 데이터들은 용접 구조재의 재질의 종류와 두께 및 형상, 이음부 종류와 형상, 용접법, 용접 재료의 종류와 크기(용접봉 또는 용접 와이어의 종류와 크기, 보호가스 종류와 유량, 플럭스의 종류 등), 용접 조건, 용접 방법, 용접 전후 처리(용접 예열, 후열, 표면 가공 등)들이 있으며 이들 내용들을 모두 기록한 용접 시방서가 용접 작업자나 감독자들에게 주어져야 한다. 그러나 전술한 바와 같이 용접은 용접이 이루어진 다음에는 용접부의 품질 확인이 거의 불가능하기 때문에 생산 용접 전에 용접 데이터를 정하고 이에 따라 용접 절차 확인을 위한 용접을 하여 용접부의 조직과 경도 및 요구되는 제반 물성치를 확인하는 절차가 필요하게 된다. 이렇게 주어진 용접 조건을 가지고 용접하였을 때 얻어지는 결과, 즉 용접부의 기계, 물리적 특성을 확인하는 시험을 용접 절차 인증 시험이라고 하며, 시험 결과를 기록한 서류를 용접 절차 인증 기록서라고 한다. 용접 절차 인증 기록서를 근거로 작성된 용접 데이터 서류를 용접 절차 시방서라고 부르며 용접 절차 인증 시험을 거치지 않은 용접 데이터 서류는 예비 용접 절차 시방서라고 부른다. 용접 절차 인증 기록서에 기록하는 용접 조건 등의 데이터들은 시험중에 모니터링 된 값들이어야 하며 모니터링 되지 않은 값들은 기록하지 말아야 한다. KS에는 용접 절차 인증에 관한 규정이 없으며 ISO 9956에는 주어져 있다. ISO 9956에 따른 용접 절차 인증 방법은 그림 2와 같다.

용접 데이터들은 용접부의 품질에 영향을 미치는 정도에 따라 필수 변수와 비필수 변수들로 구분되며 필수 변수들이 다르거나 변경될 경우에는 그

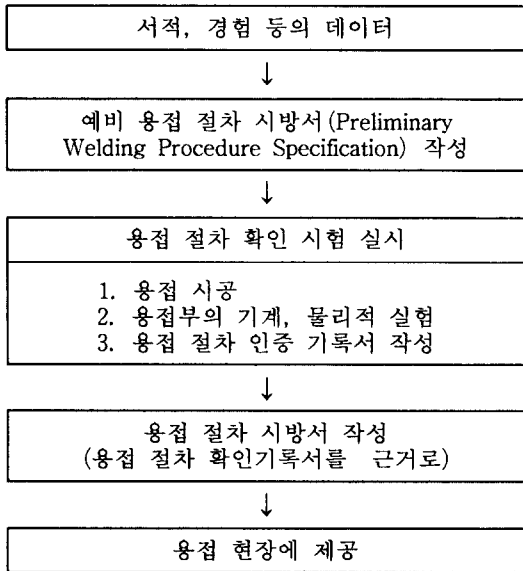


그림 2. ISO 9956 에 따른 용접 절차 인증 방법

때마다 용접 절차 인증 시험을 실시하여 용접부 품질 확인이 이루어져야 한다. 필수 변수들은 용접 이음의 종류에 따라 다르게 결정되어야 한다. 필수 변수와 비필수 변수의 예가 다음에 나와 있다.

- 1) 필수 변수 : 모든 용접 절차에 공통 적용 사항
 - 가) 용접법 : 용접법의 변경이나 인증 되지 않은 용접법을 조합하여 시공하고자 할 때
 - 나) 모재종류 : 모재의 종류가 바뀔 때
 - 다) 모재의 두께 : 모재의 두께가 허용 범위를 벗어날 때
 - 라) 이음부 형상 : 전자빔 용접, 레이저 용접, 마찰 용접 등에서
- 2) 비필수변수의 예
 - 가) 이음부 형상 : 전자빔, 스테드, 저항, 레이저 용접은 제외
 - 나) 루트 간격 : 전자빔, 스테드, 저항, 레이저 용접은 제외
 - 다) 용접 자세 : 전자빔, 스테드, 저항, 레이저 용접, 일렉트로 슬래그, 일렉트로 가스 용접은 제외
 - 라) 이면 가우징 방법 : 스테드, 저항 용접은 제외
 - 마) 피닝 : 전자빔, 스테드, 저항, 레이저 용접은 제외

바) 기타

필수변수와 비필수변수의 결정 기준은 변경되는 내용이 용접부의 품질에 얼마나 직접적인 영향을 미칠 수 있는가에 있다.

그림 3에는 ISO 9956에 주어진 용접 절차 인증 기록서의 예가 주어져 있다.

2.4 용접 절차 시방서

용접에 사용되는 데이터를 제시하는 서류를 용접 절차 시방서(Welding Procedure Specification 의 약자로 WPS 라고 하기도 함)라 하며 WPS 에 포함되어야 하는 내용들은 다음과 같다.

- 1) 제작자 관련사항 : 제작자 신원 사항, WPS 의 번호
- 2) 모재 관련사항 : 모재의 규격, 치수, 형상
- 3) 공통사항
 - (1) 용접법
 - (2) 이음부 형상
 - (3) 용접자세
 - (4) 홈가공 방법 및 상태
 - (5) 용접 기법 : 위빙 유무 등
 - (6) 이면 가우징 : 유무 및 방법
 - (7) 받침 : 유무 및 재질과 크기 등
 - (8) 용가재 종류 : 규격, 제작자, 상표명 등
 - (9) 용가재 치수 : 지름, 폭 등
 - (10) 용가재와 플럭스의 취급 방법
 - (11) 전기적 용접 변수 : 전류, 전압, 극성, 펄스조건 등
 - (12) 기계 용접 조건 : 용접 속도, 와이어 송급속도
 - (13) 예열 조건
 - (14) 패스간 온도
 - (15) 후열 처리 조건
- 4) 용접법별 필요사항
 - (1) 피복 아크 용접법
 - 용접봉 단위 길이당 용접선 길이
 - (2) 서브머지드 아크용접
 - 다중 전극의 경우 전극의 형상 및 개수와 전류 연결 방법
 - 와이어 돌출 길이 : 전극팁과 모재 사이의 거리
 - 플럭스 규격과 상품명

용접절차인증기록서 (WPQR) 형태

용접절차인증시험 성적서		
제조자의 용접절차 관련번호 :	검사자 또는 시험기관 관련번호 :	
제조자 :		
주소 :		
기준/시험 규격 :		
용접일자 :		
인증 범위 :		
용접법 :		
이음 종류 :		
모재 : 열처리 상태 :		
두께 (mm) :		
바깥지름 (mm) :		
용가재 종류 :		
보호가스/플럭스 :		
용접 전류의 종류 :		
용접 자세 :		
예열 :		
용접 후열처리 :		
기타 사항 :		
위의 규격에 따라 준비되고 실시된 시험 용접의 결과가 규격에 만족되었음을 증명함.		
장소	발행일	검사자 또는 시험기관 이름, 날짜와 서명

그림 3. 용접 절차 인증 기록서 견본 (계속)

- 추가 용가재
- (3) 보호가스 금속 아크 용접법
 - 보호 가스 종류와 유량 및 노즐 지름
 - 전극 와이어의 개수
 - 와이어 송급속도
 - 추가 용가재
 - 와이어 돌출 길이 : 접촉 팁과 모재 사이의 거리
- (4) 보호가스 텅스텐 아크 용접법
 - 텅스텐 전극의 종류와 지름
 - 보호가스 종류와 유량 및 노즐 지름
- (5) 플라즈마 아크용접법
 - 플라즈마 가스 조건 : 종류, 노즐 지름, 유량 등
 - 보호가스 조건 : 종류, 노즐 지름, 유량
 - 토치 종류
 - 플라즈마 전류
 - 접촉 팁과 모재 사이의 거리

그림 4에는 ISO 9956에서 제시한 용접 절차 시방서의 견본이 주어져 있다. 용접 절차 시방서에 주어진 조건들은 용접 절차 인증 기록서의 조건들을 근거로 결정되어야 하며 현장 편의를 위하여 과도하게 넓은 범위값을 사용해서는 안된다.

2.5 용접시공의 관리와 감리

일정 수준 이상의 품질이 요구되는 용접 구조물에 대한 용접 시공은 그것을 허용 받은 공장에서 자격을 갖춘 용접사에 의해 준비된 용접 절차 시방서에 따라 수행되어야 한다. 이를 위해서는 실제 구조물 제작시

첫째, 용접사의 기량이 용접사 기량 인증서의 수준 이상이 유지되어야 하며

둘째, 용접 절차 시방서에 따라 용접이 이루어져야 한다.

따라서 용접 관리자는 용접사의 심리 및 신체 상태를 파악하여 용접 난이도와 중요도에 따라 적재적소에 배치해야 할 필요가 있다. 이와 함께 용접 절차 시방서와 실제 용접시공간에 상이점이 발생하지 않도록 지속적인 관리가 필요하며 이를 위한 제3의 감리 감독자를 선정 운영해야 하는 경우도 많다.

2.6 용접부의 품질확인

용접부는 전술한 여러 가지의 인증 및 감리작업을 통하여 제작되어야 하나 이런 과정들만으로 용접부 품질을 신뢰할 수는 없다. 따라서 용접부가 만들어지는 중간 과정이나 용접이 끝난 용접부에 대한 비파괴검사를 통하여 내부나 표면 결함의 유무와 형상 결함들에 관한 품질 확인 절차가 필요하다.

비파괴 검사와 함께 규정이나 계약 내용중에 생산중 용접품질 확인시험이 규정되어 있는 경우에는 생산중 시험, 즉 제품 생산중 생산조건과 동일한 시험편을 만들기 위하여 생산제품에 시험편을 부착하여 용접 시험편을 만든 후 분리하여 시험하므로써 제품의 품질을 간접적인 파괴시험을 통하여 확인해야 한다. 생산중 용접 품질 확인 시험은 생산 제품의 품질을 확인하는 방법이기 때문에 배관 용접의 경우는 생산 용접중 용접부를 분리해 내거나 용접선 끝부분에 용접 시험편을 부착하여 용접을 연장, 완료한 뒤 시험편만을 떼어내는 방법이 있으며 경우에 따라서는 생산품 중 임의의 시험편을 골라내어 시험 확인하는 방법 등이 있다.

2.7 용접 관리자

용접은 올바른 용접시공을 통한 용접 구조물의 사용중 성능보장을 위하여 용접 공정중 관리를 필요로 하는 특수공정이기 때문에 용접기능을 담당하는 용접사 외에 용접관련 제반업무를 담당하는 용접 관리자가 필요하다. 용접 관리자는 용접 시공을 직접 수행하는 용접사와는 다르며 용접엔지니어, 용접테크놀로지스트, 용접스페셜리스트로 구분될 수 있다. 용접 관리자가 담당해야 하는 업무 내용은 표 1에 주어져 있으며 유럽규격 EN 719에 상세한 설명이 주어져 있다.

3. 규격과 기준

용접 구조물의 제작, 품질 보증과 관련된 규격과 기준들은 법규, 규격, 기준, 표준 등으로 구별될 수 있다. 이들은 법으로 제정되어 강제적으로 준수해야 하는 법규와 규격이 있고, 임의적으로

표 1. 용접관리자의 업무 내용과 역할구분(계속)

- • • 포괄적 책임
 - • 제한적 책임¹⁾
 - 용접 기본지식 범위내 책임¹⁾
- 1) 교육과정 수료 등을 통한 지식습득이 확인될 경우 업무책임 영역을 넓힐 수 있음

업 무 내 용	(EWE ²⁾)	(EWT ³⁾)	(EWS ⁴⁾)
1. 계약서 검토 - QA Handbook	• • • • • •	• • • • •	• • • • •
2. 설계검토 2.1 하중에 따른 용접부 위치 2.2 용접과 시험을 위한 접근용이도 2.3 용접이음부 형상 2.4 관련규정 요구품질	• • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • •	• • • • • • •
3. 소재검토 3.1 모재 3.2 용가재	• • • • • •	• • • •	• •
4. 하청업체 4.1 하청업체의 적합성	• • •	• • •	• • •
5. 생산계획 (Production Plan) 5.1 용접절차 시험 계획 5.2 EN 288 Part 2에 따른 용접지시 5.3 치 공구 5.4 용접사 기량시험 5.5 용접 및 조립순서 5.6 용접부 시험법 5.7 안전 및 화재예방	• •	• •	• • • • • • • • • • • • • • • •
6. 용접장비 6.1 적합 용접장비 6.2 보조장비	• • • • • •	• • • • • •	• • • • • •
7. 용접시공 7.1 용접전 준비 7.2 용접사 확인 7.3 용접	• • • • • •	• • • (•)••	• • • (•(•))•
8. 시험검사 8.1 육안검사 8.2 파괴검사 - 인장 굽힘 충격시험 및 결과평가 - 파단시편 평가 - 경도 및 시험결과 평가 - 비파괴 시험결과 평가 - 특수시험 평가	• •	• • • • • • • • • • • • • • • • •	((•)•)• (•)•• • • • • • • •

표 1. 용접관리자의 업무 내용과 역할구분

업 무 내 용	EWE	EWT	EWS
9. 용접인증			
9.1 관리 및 시험검사 결과 평가			
- 결함 및 불일치도
- 보수가능성 결정
9.2 용접보수			
- 구조물상에 결함 표시
- 결함제거 방법
- 보수용접 방법
9.3 보수용접부 평가
9.4 개선 제안
10. 서 류

- 1) 교육과정 수료를 통한 지식습득이 확인될 경우 업무책임 영역을 넓힐 수 있음.
- 2) Welding Engineer
- 3) Welding Technician (Technologist)
- 4) Welding specialist

선택하여 사용할 수 있는 표준과 사양(일부 Standard 와 Specification)들로 구분된다.

용접 규격은 용접 구조물 또는 제작물의 요구사항들을 규정하는 규격으로서 응용규격(Application)으로 불린다. 응용규격들은 설계 기준, 생산 표준 또는 구조 기준으로 불리기도 하며 용접과 관련된 다음 주요 사항들을 규정한다.

- 설계 부분에서의 이음부 형상, 공차 등
- 시공 부분에서의 품질 시스템과 시공 요구 사항 등
- 시험 및 검사 부분에서의 시험과 검사 내용 등
- 재료 부분에서의 재료 물성 요구 사항 등

이들 응용규격들은 일반 금속 구조물, 압력 용기, 보일러, 배관, 교량, 저장 탱크, 크레인, 승강기, 기계류 등과 같은 구조물들을 대상으로 한다.

국내의 규격으로는

- 한국 공업 표준 (KS)
- 한국 발전 산업 기술 기준 (KEPIC)

등이 있으며 외국의 기준이나 표준들로는

- AWS Code : 미국 용접 협회 용접 기준

- ASME Code : 미국 기계학회 보일러 및 압력 용기 기술 기준
 - API Specification
- 이 있다.

참 고 문 헌

1. 이보영 : 국내화학플랜트 설비의 용접부 손상 사례보고, 대한금속학회 제9차 재료강도 심포지엄, p.403-410, 1995. 10
2. 백광기, 임채선, 최기영 : 중공업 설비용 금속 소재의 파손사례연구, 대한용접학회 1996 추계학술대회, p. 51-53, 1996. 10