

## 特輯 : POWER PLANT 설비의 보수용접

# 증기 터빈 케이싱의 용접 보수를 위한 용접성 평가

이해무 · 백운봉 · 윤기봉

## Evaluation of Weldability for Steam Turbine Casing Weld Repair

Hae Moo Lee, Un Bong Baek and Kee Bong Yoon



이해무/한국표준과  
학연구원/1957년생/  
고온설비 수명평가,  
극저온 역학적 특성  
평가



백운봉/한국표준과  
학연구원/1965년생/  
고온설비 수명평가,  
크리프-파로 특성  
평가



윤기봉/중앙대학교/  
1958년생/고온파괴  
역학, 수명 모니터  
링 시스템, 안전성  
평가

### 1. 서 론

일반적으로 터빈 케이싱은 정상적인 운전 조건에서 내압에 의해 부가되는 응력이 높지 않고, 두께가 두꺼우며, 비교적 연성/인성이 높은 재료로 제작되므로, 균열이 발생한 후에도 상당 기간 안전하게 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 터빈 케이싱의 잔여 수명은 초기 균열이 위험한 균열로 성장하는 균열전파 기간에 의하여 결정되므로, 사용 중에 터빈 케이싱에서 균열이 발견되었을 때에는 보수가 필요하기 전까지 안전하게 사용할 수 있는 기간을 균열진전 해석을 통하여 평가하여야 한다. 초기 발견된 균열이 많이 성장하여 정비가 필요하게 되면, 균열 크기의 심각성, 위치 등을 고려하여 적절한 방법으로 보수를 실시하여야 하는데, 보수 정비 작업에는 다음과 같은 방법들이 선택적으로 사용되어 왔다.

- ① 연마 (grinding) 에 의한 균열 제거
- ② 균열전파를 멈추게 하기 위한 균열선단에서의 드릴링 (stop hole drilling method)
- ③ 결함 부위를 금속으로 꿰매는 금속재단법 (metal stitching)

④ 연마 후, 연성이 큰 저합금강이나 Inconel과 같은 용접봉을 이용한 정비 방법

⑤ 연마 후, 모재와 유사한 재질의 용접봉으로 용접을 한 후 용접후열처리 실시

1970년대 초 전세계적으로 많은 주강 케이싱에서 균열이 발견되었지만, 당시 대부분의 케이싱 원제작자들은 용접 보수를 권장하지 않았는데, 이는 적절치 못한 절차로 용접 보수를 실시하면 결과가 좋지 않을 뿐만 아니라 뒤틀림이 발생하거나, 많은 경우 균열이 다시 발생하였기 때문이었다. 따라서 70년대 중반까지 고정용/재단용 재료로서 고강도 합금을 사용하여 금속재단하는 기계적 보수법이 많이 장려되었다.

그러나 기계적 보수 후에도 짧은 기간 사용 후 재단 부위에서 균열이 다시 발생함으로써 고온고압용 증기 터빈 케이싱에 있어서의 기계적 보수법은 임시 방편적이라고 80년대 초부터 인식되기 시작하였다. 그리고 기계적 보수를 한 부위에서 균열이 다시 발생되면 이를 가공하고 다시 용접해야 하므로 경제적으로도 매력적이지 않았을 뿐만 아니라, 70년대 후반에서 80년대 초반에 걸쳐 크게 향상된 보수용접 및 응력완화기술에 힘입어 그 후 용접에 의한 보수법이 기본적인 케이싱 결함 보수

법으로서 자리 잡게 되었다.

결국 기계적 보수법은 용접이 어려운 주철로 된 케이싱을 보수하거나, 저합금강으로 된 고온·고압용 증기터빈 케이싱을 임시적으로 보수하는데 사용할 수는 있지만, 기능적 및 경제적 측면 때문에 이들 경우를 제외하고는 거의 모두 용접보수법으로 대체되었다. Fig. 1은 터빈 케이싱의 균열 정비 절차<sup>1)</sup>를 나타내고 있다.

### 2. 터빈 케이싱 재질

터빈 케이싱의 주물 제작에는 여러 종류의 합금강이 사용되고 있는데, Table 1에 케이싱 재료<sup>2)</sup>로 사용되는 합금강 종류를 사용 온도와 함께 나타내었다. 고출력 발전설비에 대한 설계 기술이 발달함

에 따라 터빈 케이싱에 유입되는 증기 온도가 지속적으로 증가하게 되어 케이싱의 고온 크리프 특성이 재료 선택에 주요한 요인이 되어 왔다. 따라서 크리프 강도를 향상시키기 위해 케이싱 재질은 C-½Mo강에서 1Cr-½Mo강으로, 1Cr-1Mo-¼V강에서 ½Cr-½Mo-¼V강으로 변천되어 왔다. 즉 1950년대 425 °C 이상에서 사용 가능한 C-½Mo강이 탄소주강을 대신하여 사용되기 시작하였고, 설비 규모 및 증기 온도가 점차적으로 증가함에 따라 525 °C까지 사용할 수 있는 1Cr-½Mo강이 사용되기 시작하여 C-½Mo강을 대체하게 되었다. 1950년대 중반 이후 설비 규모는 120 MW 정도까지 커지고 증기 온도는 538 ~ 565°C가 됨에 따라 기존의 재질은 사용할 수 없어 새로운 강종의 개발이 요구되었으며 그 결과 1Cr-1Mo-¼V강이 개발

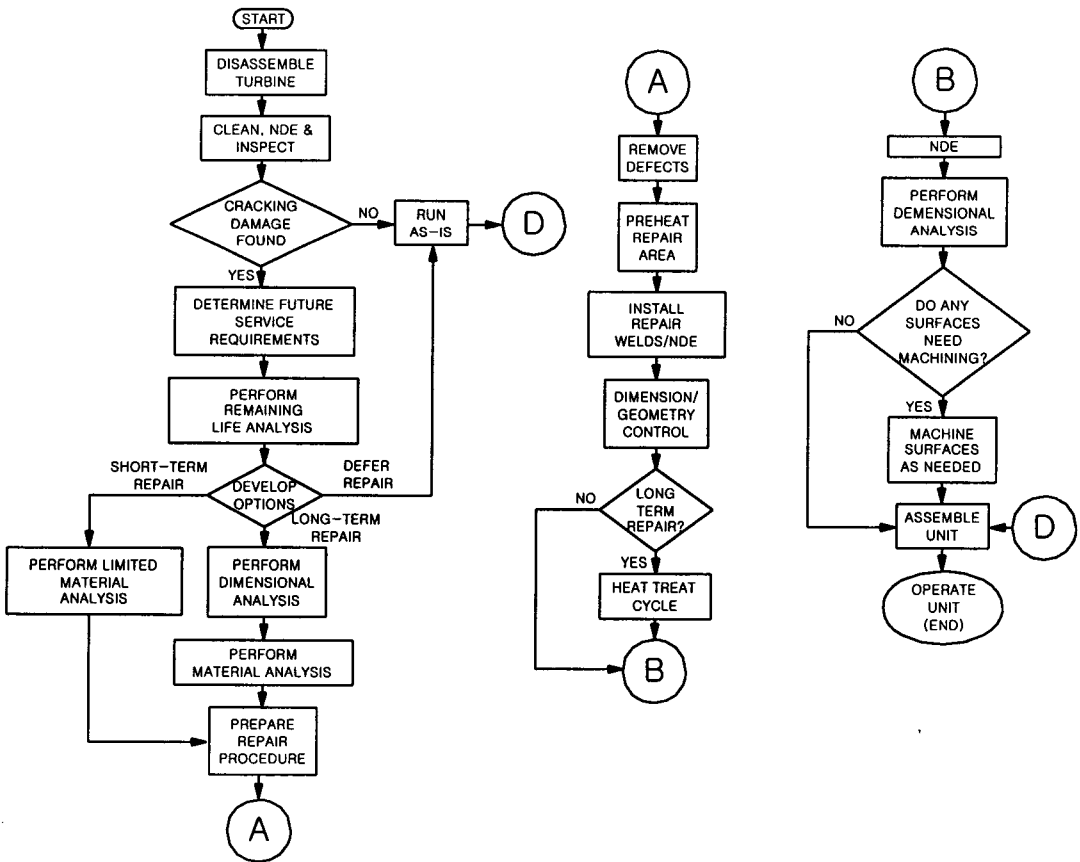


Fig. 1 A repair decision flow chart for turbine casings. <sup>1)</sup>

**Table 1.** Typical compositions of steels commonly used for manufacture of turbine casings<sup>2)</sup>.

Material	Composition, Wt%						Range of application, °C
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
Flake-graphite							
gray cast iron (a)	3.00	1.80	0.70	-	-	-	400 max
Ferrite SGI (a)	3.22	2.94	0.25	-	-	-	-
Carbon steel	0.20 max	0.50 max	1.10 max	-	0.50-0.70	-	-
C-½Mo	0.25 max	0.20-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	0.45-0.65	-	480 max
1Cr-½Mo	0.15 max	0.60 max	0.50-0.80	2.00-2.75	0.90-1.10	-	525 max
2¼Cr-1Mo	0.15 max	0.45 max	0.40-0.80	0.70-1.20	0.70-1.20	0.25-0.35	538 max
1Cr-1Mo-¼V	0.15 max	0.15-0.30	0.40-0.60	0.40-0.60	0.40-0.60	0.22-0.28	565 max
½Cr-½Mo-¼V	0.10-0.15	0.45	0.40-0.70				565 max

(a) Typical Composition

되었고, 개발 후 급속한 사용 신장세를 보였다. 그러나 이 강종이 크리프나 크리프파단 특성이 좋기는 하였지만, 불림 온도로부터 공냉할 때 두께에 민감한 특성을 갖고 있어 후육부와 박부에서의 고온 기계적 특성 차가 매우 심하다는 큰 단점이 있었다. 이 때문에 개발된 것이 ½Cr-½Mo-¼V강이며 비록 1Cr-1Mo-¼V강보다 경화능은 떨어졌으나 크리프 성질을 유지하면서 기존의 문제를 해결할 수 있었을 뿐만 아니라 용접성도 좋아 565°C 이상에서 지금도 사용되고 있다. 그러나 Cr-Mo-V형 강종의 경우 1968년 용접열영향부에서 재가열균열(혹은 응력이완균열)이 발생되고 그 후 이들의 발생 빈도가 높아짐에 따라, 탈산과정, 불순물 원소의 제어(특히 Sn, Cu, S, P, Sb, As 등), 제작 및 보수를 위한 용접 이음매 설계 및 용접 절차, 전/후열처리 방법 및 온도 등의 측면에서 이 강종이 갖추어야 할 요구 사양이 엄격하게 설정되었다.

또한 케이싱의 설계 변경에 의해서도 제작 공정 중에 발생하는 균열은 물론 사용 중 발생하는 균열의 발생도 많이 감소되었다. 한편 일부 제작자들은 ½Cr-½Mo-¼V강에서 발생하는 파손을 방지하기 위하여 2¼Cr-1Mo강을 사용하여 케이싱을 제작하였는데, 이것은 2¼Cr-1Mo강이 크리프 연성이 높고, 저사이클 피로 특성이 우수하며 용접 보수성이 우수하다고 생각했기 때문이다. 현재 ½Cr-½Mo-¼V와 2¼Cr-1Mo의 두 종류의 강이 많이 사용되고 있는데 미세조직이 페라이트/퍼얼라

이트의 혼합조직을 형성하도록 열처리 조건을 설정하고 있다. 1970년대 초에는 티타늄과 보론이 첨가된 개량형 1¼Cr-½Mo강이 케이싱 재료로서 연구<sup>3)</sup>되었는데 이 강은 표준형 1¼Cr-½Mo강보다 인장강도, 파단강도, 파단연성값이 현저히 높은 것으로 알려져 있으며, 적용을 위해 다른 특성을 연구 중이다.

### 3. 용접성 - 보수의 경우를 중심으로

터빈 케이싱의 정비에는 ㉠ SMAW ㉡ FCAW ㉢ GMAW(MIG)의 세 가지 용접법이 사용<sup>4)</sup>되는데, 보수를 성공적으로 완료하려면 용접성에 대한 검토가 선행되어야 한다.

그런데 용접성은 관점에 따라서 크게 ㉠ 구조적 용접성 (constructional weldability) ㉡ 기능적 용접성 (operative weldability) ㉢ 금속학적 용접성 (metallurgical weldability)으로 나눌 수 있다. 즉 모재에서 바람직하지 않은 변화가 발생됨이 없이 금속을 국부적으로 결합시킬 수 있는 성질, 사용시 요구되는 성질의 저하 없이 용접할 수 있는 성질, 또는 경화능으로 대표되는 금속학적 인자의 제어와 관련된 성질 등으로 용접성을 정의할 수 있을 것이다. 그러나 많은 용접성 시험 결과들은 미사용된 모재부나 용접부로부터 얻어진 것이며 이 결과들이 오랫동안 사용된 재료의 용접 보수에도 그대로 적용되어 왔는데, 오래 사용된 재료의 용접

시에는 사용 조건이 유사한 경우가 혼치 않고 용접성을 평가해볼만한 적당한 치수의 사용재를 얻기가 쉽지 않았기 때문이다.

일반적으로 용접성 평가 및 이와 관련된 시험은 다음과 같은 가능성을 판별하는데 그 목적이 있다.

- ㉠ 용접 후 균열의 발생 여부
- ㉡ 용접재 사용시의 적절한 기능성 제공 여부
- ㉢ 용접재의 장기 사용 가능 여부

이들에 대하여 간단하고 확실한 결론을 내릴 수는 없는데, 특히 보수 용접, 혹은 장기간 사용된 요소의 경우에는 더욱 그러하다. 즉 터빈 케이싱과 같이 복잡한 형상을 갖는 경우에는 재질이나 사용 조건의 변화가 심하여 용접 보수 후 수명을 정확히 예측하는 것이 거의 불가능하여 대부분의 경우 임시보수의 개념으로 보수를 실시하게 되는데, 보수 후 급속히 상태가 다시 나빠지는 경우도 있고 수년간 보수 상태가 그대로 유지되는 경우도 있다. 따라서 터빈 케이싱의 용접성 평가는 최대한의 노력을 기울인다는 생각(best-effort basis)으로 보통 실시된다. 따라서 장시간 사용된 요소의 경우에는 반복되는 용접 보수를 가능한 한 피하여야 하기 때문에 보수를 위한 용접성 평가에서는 보수하고자 하는 요소 및 그 재질의 상태평가가 상당히 중요한 부분을 차지<sup>1)</sup>하고 있다.

## 4. 케이싱 요소 및 사용 상태 평가

사용 중 파손되었거나 열화의 징후가 나타나는 요소의 상태를 평가하기 위해서는 여러 정보들이 필요한데, 여기에는 각 요소에 대한 기록, 요소의 상태에 영향을 줄 수 있거나 설명해 줄 수 있는, 균열 발생과 같은 이력 및 데이터 등이 있다.

### 4.1 기록 검토

요소 및 재질에 대한 제작 당시의 시방서, 도면, 제작시의 보수 상황, 검사 데이터, 인증서, 재료시험 결과 보고서 등으로부터 케이싱 설비의 사용 전 상태를 평가할 수 있다. 시간, 온도, 압력, 보수, 과도한 온도/압력 발생 상황 등을 포함하는 작업 데이터로부터는 케이싱 요소 및 재질의 현재 상태를 예상할 수 있다. 그러나 이들로부터는 광범위한 정보를 얻을 수 없는 경우가 대부분이므로 기록

문서 검토가 아닌 다른 방법을 사용해야 하는 경우가 보통이다.

## 4.2 요소의 상태 평가

요소의 재질, 금속학적 정보, 용접, 열처리, 검사 및 사용 이력 등에 대한 광범위한 정보는 일반적으로 쉽게 얻을 수 없기 때문에 이들의 평가시에 많은 가정이 필요하다. 배관의 경우처럼 널리 사용되는 기준에 평가 절차가 포함되어 있는 경우도 있지만 평가 절차가 없는 경우가 대부분이며, 특히 보수를 목적으로 하는 용접성 평가의 경우에는 더욱 그러하다. 터빈 요소의 경우처럼 법률적 기준의 적용을 받지 않는 경우 데이터나 보수에 대한 정보는 일반적으로 원제작자에 의해 독점적으로 제공되어 왔지만 최근에는 별도 기관에 의해서도 상태 평가, 보수 계획 수립 및 보수 지원/효율화가 이루어지기도 한다.

보수 결정 및 이 때 설정되는 가정은 관련 모재 및 용접 재료로부터 얻은 정보에 근거해야 하며 정보가 많을수록 명확한 접근을 할 수 있다. 손상이나 파손의 심각성, 요구되는 보수 결과(단기보수/장기보수), 보수를 하기 위해 활용 가능한 시간 등에 따라 평가 수준이 달라지는데 적절한 수준의 신뢰도로써 단기간 내에 보수하여 재사용 하는 것이, 비록 시간을 소비하더라도 최적 수준의 신뢰도를 갖도록 완벽한 평가를 하는 것보다는 더 나은 경우가 종종 있다.

보수를 하기 위하여 각 요소들을 평가하는 절차를 Fig. 2에 개괄적으로 나타내었다. Table 2에는 이에 필요한 추가적인 정보를 나타내었으며 Fig. 3에는 용접 보수가 필요한가에 대한 검토 순서를 나타내었다.

## 5. 요소 재질 평가

요소 재질 평가는 기록문서나 실제 재료에 대한 실험을 통해서 얻게 되는 데이터 취득 능력에 따라 직접 결정되며 크게 ㉠ 시료 채취 불가능시 ㉡ 유사 요소로부터 시료 채취 가능시 ㉢ 보수를 요하는 실기로부터 시료의 직접 채취 가능시의 3개 범주로 나눌 수 있는데, 필요한 정보량 및 시간과 재료가 허용하는 한도에 따라 Table 3과 같이 단계별로 재질을 평가할 수 있다.

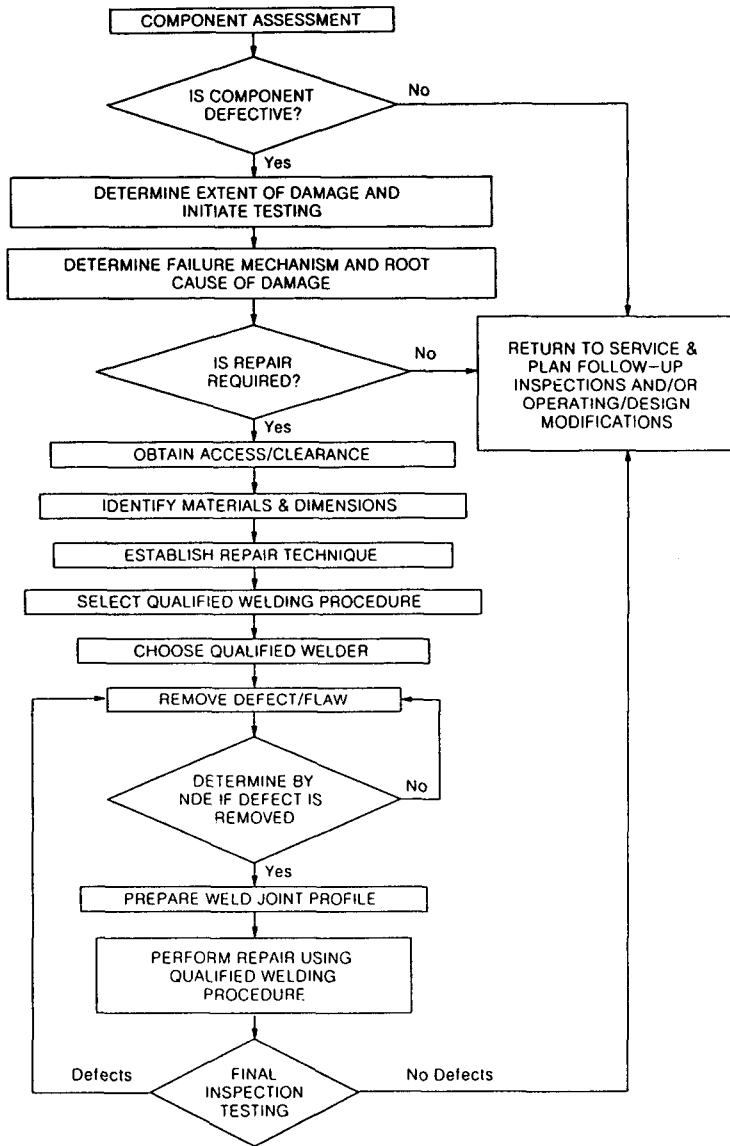


Fig. 2 Overall approach to component assessment and repair.

5.1 시료 채취 불가능시

가장 신뢰할 수 있는 정보는 동일한 사용 조건하에 있었던 대표적인 샘플로부터 얻을 수 있는데, 대부분의 경우 이러한 재질은 보수하려는 요소의 재질이 되지만 때에 따라서는 채취를 할 수 없는 경우도 있다. 재질 평가를 하려면 본질적으로 시편을 채취하여 파괴시험을 해야 하지만 시편 채취를

함으로써 요소의 성능이 저하 또는 상실될 수 있다. 이와 같이 요소로부터 재질을 채취할 수 없을 경우에는 요소에 손상을 주지 않으면서 유용한 정보를 얻을 수 있는 경도시험, 표면복제, 성분분석(X-선 형광분석법 이용) 등이 이용되지만 이들 방법들은 여러 가지 제약성을 갖게 된다. 경도시험은 상대적인 참고치만을 제공할 수 있으며 합금 조성이나 열처리 등을 명확히 판별할 수는 없다. 표면

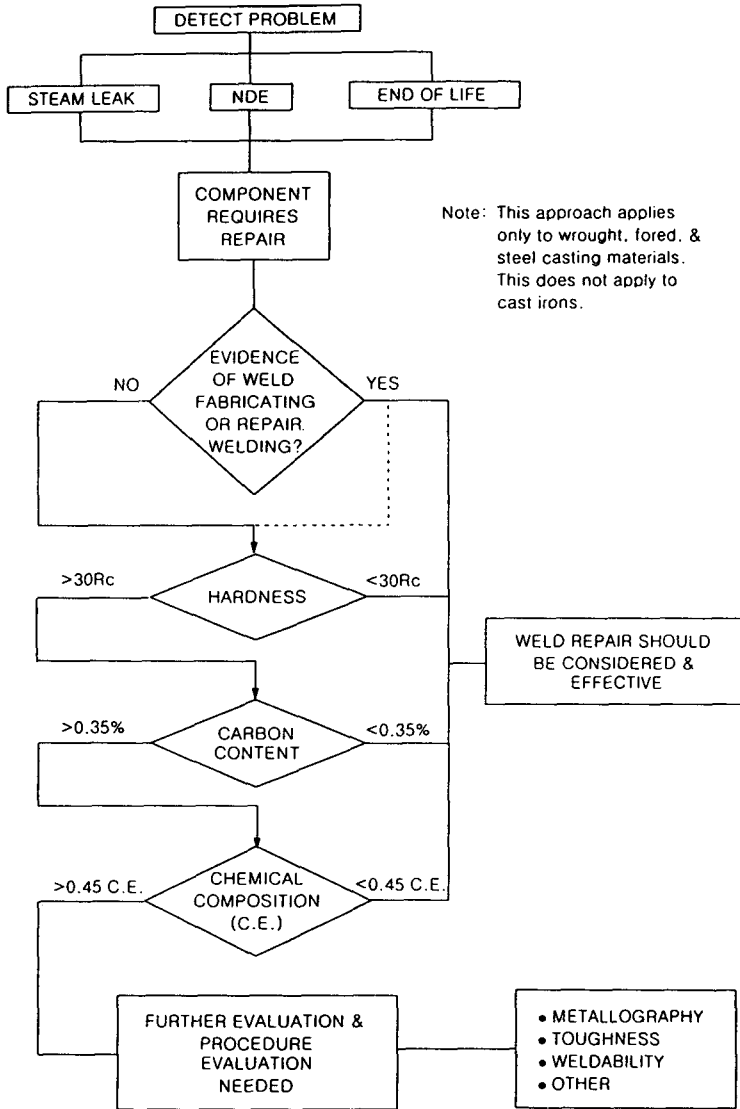


Fig. 3 Approach for determination for weld repair.

복제는 재질이나 요소의 미세조직을 알 수 있을 뿐만 아니라 사용이력도 유추할 수 있지만, 그 결과는 표면복제를 실시한 부위에서만 결과를 나타내며 두께 방향으로의 전반적인 정보는 얻을 수 없다. 성분 분석의 경우, 보수가 필요한 요소로부터 재질을 전혀 채취할 수 없을 경우에는 주요 원소의 조성 분석을 위해 X-선 형광분석법을 사용할 수 있다. 상용화된 휴대장비의 경우 원자번호 13인 알루미늄에서부터 원자번호 92인 우라늄까지 분석 가능

하지만 원자번호 6인 탄소는 소량의 시료를 채취하는 기존의 방법을 사용하지 않으면 안된다.

### 5.2 유사 요소로부터 시료 채취 가능성

요소의 형상이나 특성상 시료의 채취가 가능할 경우 동종 기기의 요소나 폐기된 요소로부터 시료를 채취하여 파괴시험을 함으로써 성질이나 사용에 의한 영향 등을 알아낼 수 있다. 비파괴적으로

**Table 2.** Evaluating components for repair by welding.

Determine whether weld repair should be considered	a) Is there evidence of welding from fabrication or previous repairs? b) Establish relative hardness of component material. c) Establish chemical composition (documentation or by analysis to indicate alloy)
Determine whether flaw is the result of fabrication, previous repair, or service induced	a) Review fabrication and service records. b) Examine the location and geometry of the component and flaw. c) Review metallographically (optical microscopy, replication). d) Characterize fracture surface (visually, optical microscopy, SEM).
Evaluate current condition of component material	a) Perform tensile testing. b) Perform notch toughness testing. c) Perform implant or direct weldability testing (segregation of hydrogen versus stress related problem). d) Perform stress analysis (compare operating stresses with current material properties).

**Table 3.** Typical material characterization testing versus material availability.

Test	Component material availability		
	Unavailable for testing Section 5.1	Similar Material Section 5.2	Actual material Section 5.3
Hardness	○	○	○
Chemical Analysis			
- X-ray fluorescence	○	○	○
- Other, requiring sample	-	○	○
Replication	○	○	○
General metallography	-	○	○
Weldability	-	○	○
Tensile	-	○	○
Bend	-	○	○
Notch toughness	-	○	○
Fatigue	-	○	○
Implant	-	○	○
Weldability	-	○	○

얻은 결과(5.1 참조)와 파괴시험으로부터 얻은 결과(인장, 굽힘, 노치인성, 피로 등)의 조합된 정보로부터 재질에 대한 현재의 성질 및 용접성을 상당히 정확하게 평가할 수 있다. 그렇지만 채취할 시료는 재질, 등급, 조성, 불순물 함유량, 미세조직, 제강 방법, 가공, 열처리, 사용 중 보수, 사용수명, 요소내의 위치/형상, 사용조건(온도, 온도구

배, 압력, 환경) 등이 평가 대상 요소 재질을 대표할 수 있어야 한다. 실험 크기까지의 일련의 여러 가지 시험이 가능하여 광범위한 평가를 할 수 있다는 장점이 있지만 실제로는 시간이나 재료의 제약성으로 생략하는 경우가 많다.

### 5.3 보수를 요하는 실기로부터 시료의 직접 채취 가능성

비파괴적 방법을 사용하여 보수나 평가 대상 요소로부터 데이터를 얻을 수 있다. 그리고 필요로 하는 재료의 제한성 때문에 대규모 시험 평가는 일반적으로 할 수 없지만, 보수용 구멍 (repair cavity) 을 크게 하든지 또는 위험성이 없는 부위나 그 근방에서 시료를 채취하여 평가할 수 있다. 이 때 시료 채취의 위치가 매우 중요 (특히 주물재의 경우) 하지만, 이러한 시료 채취 방법은 개략적 평가 결과로 수명이 거의 소비된 것으로 나타나 상세 평가가 필요한 경우를 제외하고는 통상적으로 사용되지 않는다.

## 6. 용접성 시험

용접성 시험은 용착금속이나 모재에 있어서 구속력, 외력, 비드 밀 균열, lamellar tearing과 관련된 균열 발생 민감성을 평가하기 위하여 실시한다.

모재의 용접성을 평가하는데 있어서 주요한 두 가지 인자는 경화능 및 경화 조직의 균열에 대한 민감성으로써, 모재내의 탄소 및 합금 성분이 증가하면 이들 두 인자의 값은 커지며 일반적으로 탄소 함량, 탄소 당량 (carbon equivalent) 및 임계경도로 평가된다.

탄소 함량: 일반적으로 탄소 함량이 0.35 wt. % 를 넘으면 용접성이 낮아지며 예열, 층간 용접, 용접 변수, 용접 절차 및 후열처리 등에 특히 신경을 써야 한다.

탄소 당량: 탄소 당량은 재료의 화학 조성이 경화능에 미치는 영향을 하나의 수치로 나타내기 위하여 정의되었으며 그 예를 보면

$$C. E. = C + Mn/6 + Mo/4 + Cr/5 + Ni/15 + V/5 \quad (1)$$

$$C. E. = C + Mn/6 + Mo/4 + Cr/5 + Ni/40 + V/24 \quad (2)$$

$$C. E. = C + Mn/6 + Mo/4 + Cr/5 + Ni/15 + Cu/13 \quad (3)$$

등이 있는데 탄소 당량은 주로 C, Mn, Mo, Cr 함량에 따라 주로 영향을 받기 때문에 이들 식으로부터 얻은 값들은 서로 비슷한 값을 갖게된다. 현재는 International Institute of Welding에서 제안한 식, 즉 IIW 식으로 알려져 있는 다음 식이 가장 많이 사용되고 있다.

$$C. E._{IIW} = C + Mn/6 + Cr/5 + Mo/5 + V/5 + Ni/15 + Cu/15 \quad (4)$$

탄소 당량이 0.35% 이하면 특별한 주의를 하지 않아도 쉽게 용접을 할 수 있으나 탄소 당량이 이보다 커지면 건전한 용접을 시행하기가 어려워진다. 탄소 당량은 용접성 평가 뿐만 아니라 Table 4와 같이 예열온도 선택을 위한 지침<sup>4)</sup>이 되기도 한다.

Table 4. Preheat temperatures as a function of carbon equivalent<sup>4)</sup>.

Equivalent Carbon Content	Suggested Preheat
Up to 0.45%	Optional
0.45% to 0.60%	95 - 200℃
Above 0.60%	200 - 370℃

임계경도: 경도와 미세조직간의 관계를 이용하는 방법으로서 어떤 임계경도값에서 미세조직 (특히 HAZ) 은 균열 발생에 민감해지는데 수소 존재 여부, 냉각속도, 변태에 의한 생성물 등이 균열 민감성에 영향을 미친다.

용접성을 직접 평가하기 위한 여러 가지 시험법이 사용되고 있는데 Table 5에는 그 종류 및 적용범위를, Table 6에는 여러 측면에서 이들을 서로 비교하여 나타내었다. 이들 시험 방법에 대해서는 다른 문헌<sup>5,6)</sup>에도 자세히 기술되어 있다.

## 7. 맺음 말

지금까지 터빈케이싱의 보수를 위한 용접성 평가법에 대하여 개괄적으로 살펴보았다. 장시간 사용된 터빈 케이싱의 경우와 같이 열화된 재료의 경우에는 반복되는 용접 보수는 오히려 상태를 더욱 악화시키는 경우가 많으므로 용접 보수시 많은 주의가 필요하다. 즉 용접 보수를 함에 있어서 사용중 발생된 열화를 고려하지 않는 경우가 많아, 용접 보수 후 그 위치나 다른 인접 위치에서 조기 파손이 발생하는 경우가 적지 않기 때문에, 보수를 하기 위해서는 사전에 장시간 사용된 재질이 나타내는 성질을 명확히 파악해야 하며, 따라서 터빈 케이싱의 보수를 위한 용접성 평가에서는 터빈 케이싱 및 그 재질의 상태평가가 상당히 중요한 부분



**Table 5.** Types of weldability tests and range of applicability<sup>5)</sup>.

Type	Range of applicability					
	Weld metal cracking			Base metal cracking		
	Solidification	Root and toe	Microcracks	H-assisted	Stress-relief	Lamellar tearing
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Restraint tests</li> <li>Lehigh test</li> <li>Slot test</li> <li>Tekken test</li> <li>RRC test</li> <li>Circular weld tests</li> </ul>	○	○	○	○	○	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Externally-loaded tests</li> <li>Implant test</li> <li>TRC test</li> <li>Varestraint test</li> </ul>				○	○	○
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Underbead cracking tests</li> <li>Longit.-bead test</li> <li>CTS test</li> <li>Cruciform test</li> </ul>				○		
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lamellar tearing tests</li> <li>Cantilever test</li> <li>Cranfield test</li> </ul>						○

**Table 6.** Comparison of weldability tests<sup>5)</sup>.

Test	Fields of use	Controllable variables	Type of data	Spec. Equip.	Cost
Lehigh restraint test	W.M. hot & cold cr., root cr., HAZ H-crack, str. rel. crack	Joint geom., process, filler metal, restr. level, heat inp., preheat, PWHT	Critical restr., or % hindered contr.	None	Costly machining
Slot test	HAZ H-cracks	Filler m., interpass time, preheat	Time to crack, critical preheat	None	Low cost
RRC test	W.M. hot & cold cr., root cr., HAZ H-crack	Joint geom., process, restr. level, filler m., heat in., preheat	Critical restr. (MPa)	Restr. jig	Costly mach. & set-up
Tekken test	W.M. root crack, HAZ H-crack	Joint geom., process, filler m., heat in., preheat	Critical preheat	None	Low cost
Circular groove test	W.M. hot & cold crack, HAZ H-crack	Process, filler m., preheat	Go-no go	None	Costly prep.
Implant test	HAZ H-crack, str. relief crack	Process, filler m., preheat, PWHT	Critical fracture stress, critical preheat	Loading jig	Med. cost
TRC test	HAZ H-crack	Process, filler m., heat in., preheat	Critical fracture stress, critical preheat	Loading jig	Costly mach. & set-up
Varestraint test	W.M. & HAZ hot cracks	Process, filler m., heat in.	Crack length, % strain	Loading jig	Costly prep. & analysis
Longit. bead on plate test	HAZ H-crack	Electr. type, heat input	% cracking	None	Low cost
CTS test	HAZ H-cracks in fillet welds	Electr. type, cooling rate, preheat	Go-no go (at 2 cooling rates)	None	Costly prep.
Cruciform test	HAZ H-crack, W.M. root cracks	Process, heat in., preheat, filler m.	Go-no go	None	Costly prep.
Lehigh Cantilever test	Lamellar tearing	Process, filler m., heat inp., preheat	Critical restraint stress and strain	Loading jig	Costly spec. prep.
Cranfield test	Lamellar tearing	Filler metal	No passes to crack	None	Low cost
Nick bend test	W.M. soundness	Filler metal	Go-no go	None	Low cost

을 차지하고 있다. 터빈 케이싱의 상태평가와 관련된 여러 가지 사항 즉 터빈 케이싱의 손상 기구 및 그 평가법, 결함이 주로 발생하는 부위 및 검사 방법, 균열진전 해석을 통한 잔여수명 평가 등에 대해서는 여러 문헌<sup>7-9)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

최근 국내에서도 터빈 케이싱의 수명 평가 작업을 쉽게 할 수 있는 수명 평가 프로그램 및 정비 기술이 개발<sup>10)</sup>되는 등 고온 기기의 장수명화를 위한 노력이 활발하게 이루어지고 있고, 여러 가지 경제적/사회적 여건으로 볼 때 그 필요성은 더욱 커질 것이므로, 따라서 용접 보수의 활용성은 더욱 증대되리라 예상된다.

### 참 고 문 헌

1. State-of-the Art Weld Repair Technology for High Temperature and Pressure Parts, Electric Power Research Institute, EPRI TR-103592, (1996)
2. R. Crombie: High Integrity Ferrous Castings for Steam Turbines-Aspects of Steel Development and Manufacture, Mater. Sci. Tech., Vol. 1, (1985), pp.986-993
3. R. Viswanathan: Effect of Ti and Ti+B Additions on the Creep and Rupture Properties of  $1\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo Steel, Met. Trans., Vol. 8A, (1977), pp. 57-61
4. Literature Review Weldability of Cast Steels, Steel Founders Society, Special Report No. 21, (1982)
5. Robert D. Stout: Weldability of Steels, 4th Edition, Welding Research Council, (1987)
6. 鐵鋼便覽, Vol. III (鐵鋼材料, 試驗, 分析), 日本鐵鋼協會編, 玄永昌 譯編, 圖書出版 世和, (1991)
7. R. Viswanathan: Damage Mechanisms and Life Assessment of High Temperature Components, ASM International, (1989)
8. 火力·原子力および化學プラント機器·構造部材の經年劣化と壽命豫測, Realize Inc.
9. 動力プラント·構造物の余壽命評價技術, 日本機械學會編, 技報堂出版, (1992)
10. 백수곤 외: 터빈케이싱 수명예측 및 정비기술 개발, 전력연구원, TR.94YJ08.97.62, (1997)