

特輯 : POWER PLANT 설비의 보수용접

증기 터빈 로터의 용접보수기술의 동향

김광수 · 오영근

Trends in Repair Welding Technology for Steam Turbine Rotors

Gwang soo Kim and Young kun Oh



김광수/순천향대학교/
1958년생/Power Plant
재료 및 비철재료의 용
접아금 및 용접공정



오영근/기아자동차
(주)/1957년생/Tur-
bine Rotor 보수 용접,
자동차 용접기술개발

1. 서 론

터빈로터는 발전설비를 구성하는 부분중 가장 핵심부분으로 설비의 가동중 고온과 높은 응력에서 장시간 노출되는 부분이다. 현재 터빈로터에 사용되는 재료로는 NiCrMoV강, CrMoV강 등이 있으며, 최근에는 용량의 대형화와 효율 향상을 목적으로 12CrMoV강¹⁾을 이용하는 등 재료 선택 범위를 넓히고 있다. 그중에서도 1CrMoV강은 현재 국내 및 국외에서 가장 많이 사용되고 있는 재료이다.

이와 같이 고온과 고압에서 장시간 운전되는 터빈로터는 종종 열적피로, 크립손상, 고온부식 및 소러취성^{2,4)} 등의 문제점으로 중요한 발전설비의 운행 중단으로 이어지거나, 장치의 일부분이 교체해야 하는 경우가 발생하여 전력공급의 큰 차질을 초래할 수 있다. 이와 같이 발전 설비가 예기치 못한 문제를 일으킬 경우 발전설비 전체의 교체(overhaul)를 통하여 원상대로 복구하기에는 막대한 시간과 경비가 소요된다. 이러한 경우 손상된 부분이나 또는 재료 본래의 설계수명에 접근된 제한된 부분만을 제거한 후, 부분적으로 용접공정에 의하여 보수되고 본래의 성능을 회복할 수 있다면 매우

효과적인 방법이라 할 수 있다. 일 예로 미국의 경우 터빈로터 설비의 부분적인 손상 등이 발생한 경우 보수용접을 실시한 결과 완전교체에 비하여 직접적인 설비 보수에서만 약 1/6정도의 경비 절감을 할 수 있었으며 동시에 시간 절약적인 면에서는 완전보수에 비하여 약 1/5 정도의 수준이었다³⁾.

이와 같이 용접에 의한 보수가 효과적이기는 하지만, 불건전한 용접보수가 이루어진 경우에는 더 많은 손실을 초래할 수 있기 때문에 오랜동안 많은 시도가 이루어지지 않았었다. 특히 주조와 단조에 의해 만들어진 CrMoV강은 0.3% 이상의 탄소함량과 첨가원소들의 영향으로 용접성이 불량한 재료로 알려져 있다. 그러한 합금원소들은 CrMoV강의 용접시 열영향부에서 발생하는 재열균열, 또는 후열처리균열 등의 문제점이 종종 발생하는 것으로 보고되었다^{6,7)}. 그러나 최근 들어서는 용접기술의 발전과 더불어 발전설비의 긴급보수 및 운전의 욕구가 증대되어 과거에 어려운 문제로 인식되었던 CrMoV강의 용접을 보수용접의 관점에서 다양한 조사와 연구가 활발히 진행되어, CrMoV강의 용접시 발생하는 용접성의 문제점들을 효과적으로 향상시킬 수 있었다.^{8,9)}

따라서 본 내용에서는 비록 최근에도 국내에서

는 시도하지 못하고 있지만 가까운 시기에 국내에서도 적용될 수 있는 기술분야인 터빈 로터의 용접보수에 관련하여 국외에서 특히 미국에서 진행된 연구 수행과정과 동향에 관련된 사항들에 대하여 개괄적으로 설명하고자 한다.

2. 고압 터빈로터의 용접기술 개발

2.1 CrMoV 터빈 로터 합금과 용접성

CrMoV 강은 70년대를 기준으로 그 이전과 이후의 제조시기에 따라 조성의 차이가 있지만 대부분의 화학조성은 동일하며 단지 잔류원소의 양에 차이가 있는 것이 특징이다. Table 1은 70년도 기준으로 이전과 이후에 만들어진 터빈로터의 기본 화학조성을 나타낸다. 이 들중 잔류원소가 되는 P와 S는 모재의 소려취성의 원인과 함께 용접성에 있어서도 매우 나쁜 영향을 미친다. Table 2는 합금원소의 영향 이외에도 CrMoV강의 용접성에 영향을 미치는 요인들에 대하여 열거하고 있다. 비록 용접성에 영향을 미치는 인자들에 대하여 정량화하기는 매우 어렵지만 이러한 인자들에 대한 면밀한 고려가 이루어져야지만 고품질의 용접부를 생산할 수 있는 용접공정을 개발하여 간접적으로나마 용접성을 정량화하는 것이 가능하다고 할 수 있다.

대략 CrMoV강의 용접시에 나타날수 있는 용접

부의 문제점들로는 아래와 같다.

- 용접된 로터의 열영향부에서 발생하는 고온균열 (Hot cracking)
- 용접부와 열영향부에서 발생하는 저온균열 (Cold cracking, Hydrogen cracking)
- 열영향부에서 발생하는 재열균열 (Reheat cracking)
- 용접후 운전중에 발생하는 크립노치 취성 (Creep notch sensivity embrittlement)

2.2 용가재(Filler metal)와 용접공정의 선택

CrMoV 강외의 용접시 용가재는 용접후에도 용접 전 모재의 고온 성질과 동등한 성질을 갖는 기존의 재료중에서 선택하거나 또는 선택된 용접공정과 공유하여 모재의 성질에 동등할 수 있는 새로운 재료의 디자인을 요구하는 중요한 부분이다. 용가재의 선택은 다른 화학조성을 갖고 있는 다양한 용가재에 대하여 각각 평가해야 하는 어려움은 있지만 용접부가 회복되어 운전조건에서 만족할 만한 기계적성질을 나타내야 하기 때문에 반드시 이루어져 한다. 참고적으로 AWS 5027 (0.30C, 1.0Cr, 1.0Mo, 0.08V), 1 1/4Cr, -1.0Mo (extra low residuals), Chromoloy (0.2C, 1.0Cr, 0.9Mo, 0.10V) 와 같은 3가지 선택된 용가재에 대하여 GTA (Gas Tungsten Arc) 용접공정으로 만들어진 용접부의 인장 및 응력-파

Table 1. (a) Nominal composition of old and new CrMoV rotor

	C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Sb	Sn	As	Old
0.32	0.85	0.03	0.03	0.25	0.20	1.05	1.25	0.25	0.16	0.006	0.002	0.02	0.02	New
0.32	0.83	0.009	0.009	0.27	0.23	1.07	1.17	0.25	0.09	0.003	0.001	0.008	0.01	

Table 2. (b) Factors that influence the weldability of CrMoV rotors

Chemistry	Carbon, Phosphorous, Sulfur, Chromium, Molybdenum, Vanadium levels
Melting Practice	Open hearth or Electric furnace (air, vacuum)
Heat Treatment	High or low normalizing/ tempering temperature
Metallurgical structure	Large or fine grain size and grain boundary segregation/precipitations
Embrittlement	Temper or loss in creep ductility

단 시험 결과를 살펴보면 Fig. 1과 같다. Fig. 1은 CrMoV강 용접부의 응력-파단 시험한 결과와 함께 모재 자체의 응력-파단 값을 나타냈는데, 위의 용가재들을 적용하여 만들어진 용접부중 어느 것도 모재의 응력-파단 값에 접근하지 못하였다. 또한 모든 용접부는 용접 후열처리를 하고 난 후에 모재의 항복강도인 85~100ksi를 만족하지는 못하는 것으로 나타났다. 결과적으로 이러한 용가재의 선택은 적절하지 않은 것으로 나타났으며, 모재의 고온 성질이나 일반적인 성질에 접근하는 용가재의 개발이나 다른 선택이 이루어져야 한다고 할 수 있다. 최근 들어서는 전문적으로 CrMoV강의 용접보수를 목적으로 하는 회사들이 자체 개발한 용가재로서 저탄소를 함유한 2 1/4Cr-1.0Mo-0.25V, 1.5Cr-1.0Mo, 2.0Cr-1.0Mo-0.2V 등을 단독 또는 복합적으로 사용하고 있다. 용가재와 더불어 용접 공정도 용접부의 성질을 고려 할 때 필수적으로 고려되어야 한다. 위에서 설명된 용가재들이 강도 감소에 따른 문제를 해결하고 또한 고온강도 상승을 목적으로 고Cr(5~7%)을 함유한 용가재를 각각 GTA, GMAW(Gas Metal Arc Welding), SAW(Submerged Arc Welding) 용접공정에 적용하여 용접부를 만든 후 응력-파단 시험을 한 결과 들도 접할 수 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 3가지 용접

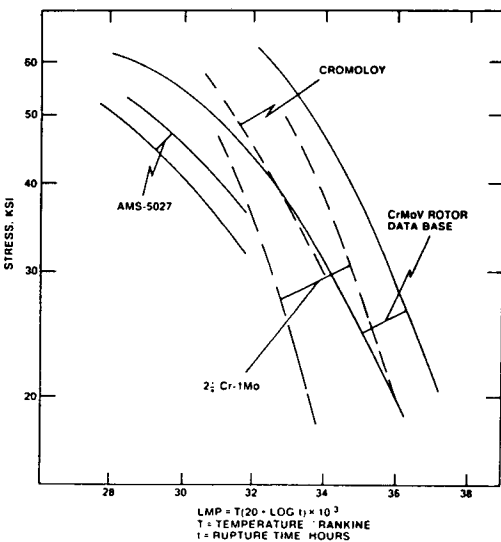


Fig. 1 Comparison of creep-rupture properties of CrMoV rotors and low alloy steel welds.

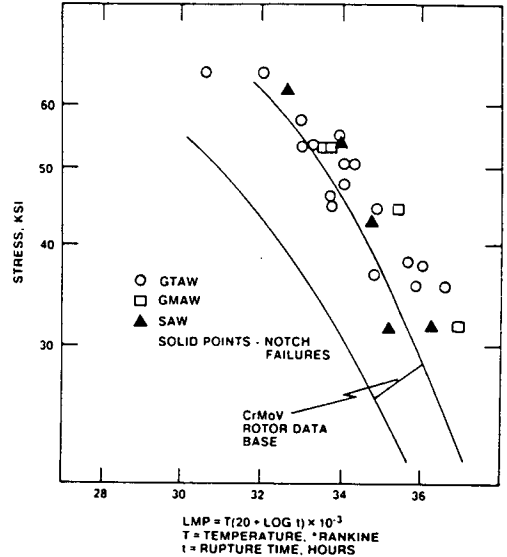


Fig. 2 Wall-papering의 제작순서

공정 모두에서 응력-파단 강도는 우수한 것으로 나타났으나 SAW 공정으로 용접한 경우에는 노치 민감도(notch sensitivity)에 있어서 열악한 성질을 나타내는 것으로 관찰 되었다. 따라서 블레이드 홈(blade groove)과 같은 날카로운 부위의 용접시에는 SAW용접은 완전히 배제해야 한다고 지적하고 있다¹⁰. Table 3은 Fig. 2에서 사용된 용가재와 각각의 용접공정으로 부터 얻어진 다른 기계적 성질의 평가 결과와 모재가 요구하는 성질들을 비교한 결과로서 용가재 선택에 있어서 정량적으로 참고할 수 있다. 이 밖에 3가지 용접공정중 가장 양호한 결과를 나타낸 GTA 용접부에서 평가된 다른 시험 결과는 Table 4에 나타났다.

2.3 열영향부(Heat Affected Zone)의 관리

용가재와 용접공정의 올바른 선택이 이루어져 용접부의 고온강도 등의 향상을 꾀할 수 있었다 하지만 용접열영향부의 특성평가도 용접보수 과정중의 하나가 된다. 열영향부의 특성평가의 예는 이미 소개된 5%Cr 을 포함한 용가재에 국한하여 설명하고자 한다. 위의 3가지 용접공정으로 만들어진 용접부 평가에 따르면 용접부중 가장 취약한 부위는 열영향부로 나타났다. 만약 용가재의 강도가 모

Table 3. Comparison of rotor and all-weld properties

		Typical High Pressure Rotor	SA Welds	GMA Welds	GTA Welds
Tension	0.2% YS, KSI	95	120	125	110
	UTS, KSI	112	130	140	125
	% Elong.	20	20	18	26
	% RA	55	55	55	75
Impact	FATT50 °C	150	85	-	-45
	R. T Joule	20	96	-	178

Table 4. Mechanical properties of the GTA welds

High Temperature Tension	AW*	High side of CrMoV scatter band for strength and ductility thru 700°C
	TW*	Low side of CrMoV scatter band for strength and ductility thru 700°C
Creep-Rupture	AW	Rupture strength on the high side or exceeding the upper bound for CrMoV rotors
	TW	Slightly below lower bound for CrMoV rotors
Low Cycle Fatigue Room Temp, 425°C, 538°C	AW	Properties exceed CrMoV rotor data
	TW	Properties equivalent to CrMoV at low strain rates and slightly lower at high strain rates
High Cycle Fatigue	AW	Equal to or slightly better than CrMoV rotor
	TW	Equal to or slightly lower than CrMoV rotor

* AW : all-welds, TW : transverse welds

재의 강도보다 낮은 경우에는 취약부는 용접부로 나타난다. 이러한 경우는 고온과 고응력에 노출되는 경우는 파단 강도가 낮아지기 때문에 바람직하지 않다. 특히 Transverse 용접시험편에 대한 시험에서 대부분의 기계적 성질이 모재에 비하여 열세인 것으로 나타났다. 이미 용가재 부분에서 이미 언급하였듯이 SAW인 경우에는 노치 민감도에 있어서 용접부가 견전하지 못한 것으로 규명되었고, 반면에 GMAW공정에 의한 경우에는 용접중에 심한 아크블로우(arc blow)로 인한 공정상의 제한이 따르게 된다. 따라서 3가지 공정중에서 터빈로터의 보수에 적합한 공정으로는 이 용가재의 경우 GTAW이 선택되어질 수 있다. 이 경우에 특별히 열영향부에서 연화현상이 발생하는 것으로 나타났는데 이러한 연화현상은 용접부와 열영향부사이에서 급격한 경도하락이 발생하는 현상으로 용접공정중에서 입열량을 관리하여 해결할 수 있다. 즉 용접을 GTAW로 하는 경우 다층용접 (multipass)에 의한 build-up과정에서 강도 손실분을 최소화하기 위하

여 초기 몇 pass의 용접에서는 용접입열에 주의가 요구된다. 용접입열 최적화를 위한 결정은 미세조직, 경도검사, 응력-파단 시험등에 의존할 수 있다. Fig. 3은 용접시험편에서 용접부의 단면을 따라 경도를 측정된 결과로서 최소의 용접입열을 적용하여 열영향부의 연화현상을 제거한 결과를 보여준다. 한편 Fig. 4는 특히 낮은 기계적 성질을 나타내는 Transverse 용접시험편에 대하여 적절한 용접입열 결정을 위하여 시행된 응력파단 시험의 결과를 나타냈으며, 용접시에 초기 pass의 입열을 달리 고려한 경우와 모든 pass에서 일정한 용접입열을 적용한 경우의 결과를 비교하기 위하여 함께 나타냈다. 궁극적으로 초기의 몇 pass는 낮은 입열을 사용하여 열영향부의 결정립크기를 줄이므로써 문제를 해결할 수 있었다. 결정립크기의 감소는 연화현상을 억제할 뿐아니라 재열균열의 가능성도 낮출 수 있었으며, 동시에 열영향부의 인성과 파괴 강도도 증가시키는 것으로 나타났다.

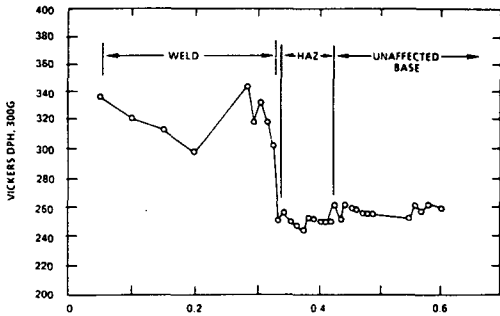


Fig. 3 Hardness transverse on weld made using the selected weld minimum heat input procedure.

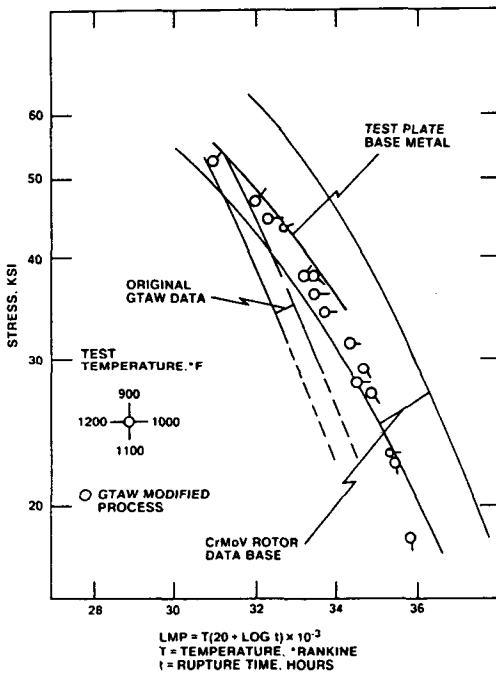


Fig. 4 Transverse-weld stress-rupture properties.

2.4 후열처리 (Postweld Heat Treatment)

용접이 완료된 이후 터빈로터와 같은 큰 부피의 용접물에서 후열처리는 반드시 이루어져야 하지만 온도와 시간의 변화에 따른 응력 완화 거동은 복잡하기 때문에 최적의 온도 및 방법 등을 결정하는 것은 다음과 같은 사항을 염두에 두고 이루어져야 한다.

- 용접에서 발생된 응력의 최소화
- 용접부와 열영향부의 충분한 소려
- 열영향을 받지 않은 모재의 over-tempering 방지
- 용접부 및 열영향부 성질의 최상화

로터의 용접보수에서 후열처리는 주로 용접부에 한하여 국부적인 후열처리가 일반적이며 용접부를 포함하는 360° 전역에서 이루어져야 한다. 종종 일반 plant 설비 용접시 국부적인 열처리를 하는 경우 화염 등에 의한 열처리를 하는 예가 있지만 이는 적절하지 않고, 로터의 용접시는 축방향과 원주방향에 따른 온도 구배를 고려해야 하기 때문에 유도 가열 방식이 많이 활용된다. 이러한 후열처리의 온도 구배 조건 등은 관리하기 복잡하기 때문에 finite difference calculations이나 finite element analyses 등에 의하여 처리하고 있다.

2.5 비파괴 검사 (Nondestructive Examination)

용접 개조 보수된 터빈로터의 안전도 확인을 위하여는 비파괴검사가 반드시 채택되어진다. 다양한 비파괴 검사 장비를 활용하고 있으며, 용접부와 열영향부의 평가를 주목적으로 한다. 용접에 한정하여는 2번의 비파괴 검사가 이루어지게 되어 있지만 그 회수는 보수공정에 따라서 대부분 늘어난다. 용접후 후열처리전에 하는 비파괴 검사는 용접공정 동안 발생할 수 있는 기공 (porosity), 용입부족 (lack of fusion), 그리고 기타 균열의 유무를 확인한다. 반면에 후열처리후에 이루어지는 비파괴 검사는 재열균열이나 저온균열 등의 발생유무를 관찰하기 위함이다. 대략 사용되는 비파괴 검사로는 후열처리 전과 후에는 초음파 (Ultrasonic) 탐상법이나 형광자분 (Fluorescent magnetic particle) 탐상법에 의하고 최종 가공이 완료되고 설치전에는 형광자분 (Fluorescent magnetic particle) 탐상법에 의하고 이 결과는 제조시 단조된 로터 모재의 기준에 적합한 지 검사된다

2.6 Mock-Up Weld Evaluation

용접에 의한 터빈 로터의 완전 보수의 최종 단계는 실물 크기의 모형에 의한 보수 용접공정이 된다. Mock-Up 용접공정의 예를 들면, 미국의 한

용접보수회사는 60년대 만들어져 사용되다 철거된 CrMoV 터빈로터강의 일부를 절단하여 용접 보수에 사용하였다. 이 시기에 만들어진 강재의 경우는 합금성분에서 언급하였던 바와 같이 가장 용접하기 어려운 상태의 재료로 알려져 있다. 열악한 용접성의 원인으로서는 다음과 같은 요인들을 근거로 하고 있다.

- 고탄소 함량
- 1010℃에서의 소준 열처리
- Creep 에서의 notch sensitivity
- Creep ductility
- 고강도와 저연성 (High tensile strength, low tensile ductility)
- 높은 P와 S의 함량

이와 같은 상태의 모재를 이용하여 만들어진 mock-up 용접부에 대하여 비파괴검사, transverse 와 all-weld 시편에 대한 용력-파단, 고주기 저주기 피로 시험, 충격시험, 고온인장 시험 등이 이루어졌으며, 그 결과에 의하면 열영향부에서의 성질이 가장 낮았지만 이 수치들은 본래 모재에서 요구하는 수치들에 거의 동등한 값을 나타냈다.

2.7 전형적인 로터의 용접보수 과정
(Typical Repair Weld Process Cycle)

2.6절까지는 보수 용접에서 고려해야 할 사항중

직접 용접공정과 관련되는 사항들에 대하여 주로 설명되었다. 그러나 이들을 포함하여 발전 설비 전체에 대한 광범위한 평가가 이루어지는 것이 실제 상황이 된다. 전반적인 용접보수에 대한 시험 평가시 고려해야 할 부분을 크게 3범주로 나눌수 있으며 Table 5와 같이 나타낼수 있다.

Table 5가 용접보수에서 고려되어야 할 사항이라면 실제로 CrMoV 로터강의 보수 용접을 위한 전체적인 순서는 다음과 같다.

1. 보수하려는 로터의 청결작업 (blast clean) 과 육안 검사
2. 파손되어 손실된 부분까지 포함한 크기 검사
3. 용접을 위한 가공
4. 용접보수될 부분의 비파괴 검사 (magnetic particle, ultrasonic)
5. 선택된 공정에 의한 용접
6. 비파괴 검사를 위한 가공
7. 국부적인 후열처리
8. 청결작업 (blast clean)
9. 후열처리에 따른 비파괴 검사 (ultrasonic, magnetic particle)
10. 기계적 시험검사 (hardness, tension, stress-rupture)
11. 최종 크기 검사
12. 최종 가공
13. 최종 비파괴 검사 (magnetic particle)

Table 5. Typical Testing and Evaluation Guidelines for Rotor Weld Repair

Metallurgical Considerations	Perform a broad scope failure analysis
	Determine the failure cause
	Determine base metal composition
	Determine the base metal mechanical Properties
	Conduct mechanical and metallurgical tests of a mock-up weld
	Conduct metallurgical testing of the welded component
Mechanical Considerations	Apply classical engineering stress analysis
	Perform finite analysis of the weld design
	Assess rotor dynamics
	Program vibration monitoring
Inspection Requirements	Conduct rotor boresonic inspection
	Ultrasonically test periphery of the weld
Quality Assurance	Obtain the approval of the weld repair plan by insurance company

3. 고압-중압 로터에서 용접에 의한 보수(Repair) 및 제작(Fabrication)에

2절에서는 보수 용접에서 관리해야 할 중요한 사항에 대한 설명을 위주로 하였다. 본 절에서는 실제로 어떠한 용접보수가 가능한지를 예를 들어 설명하고자 하였다. 한편 이부분은 2절에서 설명된 부분과 용접 공정상에서 차이를 나타내는데 이것은 보수 전문회사별로 독자적인 용접기술에 의존하기 때문이며, 자세한 용접공정 등은 know-how에 따른 이유로 공개하지는 않았다. 국내에서는 현재에 이르기 까지 용접공정에 의한 plant 설비의 보수, 개선 또는 제작이 극히 제한된 범위에서만 적용되고 있다. 반면에 2절에서 설명된 바와 같이 국외에서는 전문적으로 다양한 용접보수나 용접에 의해 plant 설비의 핵심부분이 되는 터빈 로터가 제조되는 예를 접할 수 있다. 터빈 로터에 있어서 초기 단일체형으로 만들어진 부분의 용접보수를 하던 또는 분할 형태의 각부분을 단일체로 조합하여 용접 생산에 의존하던 두가지 경우 모두 deep, narrow groove의 용접에 의존하게 된다. 이러한 작업은 크게 구분하여 아래의 3단계로 이루어진다고 할 수 있다.

1 단계 : 로터를 수직으로 세운 상태에서 유도가 열에 의하여 예열을 하면서, GTA 용접공정으로 진행한다. (Fig. 5) 이때 다수의 GTA 용접토오치가 동시에 적용되는 것이 상례다.

2 단계 : 다음으로는 로터를 수평으로 한후 역시 예열을 부과하면서 groove를 채우기 위한 SAW 용접이 적용된다. SAW 용접에서도 다수의 토오치를 사용할 수 있으며 용접중 중간온도(interpass temperature)의 관리를 위하여 disk에서의 온도 변화를 관찰하면서 용접이 되어진다. (Fig. 6)

3 단계 : 용접완료 후에는 용접시에 발생된 잔류 응력의 제거를 위하여 후열처리가 이루어져야 하며 후열처리는 부분 용접의 경우에는 국부적으로 행하지만 단일체의 로터 제조를 목적으로하는 경우에는 여러개의 가열지역으로 분리된 수직 전기로를 사용할 수 있다. (Fig. 7)

용접 보수 공정이 완료된 이후에는 이미 설명된 바와 같이 다양한 파괴적 또는 비파괴적 검사가 이루어져야 하고, 용접부에서 이루어지는 기계적인

시험 검사에 사용되는 시험편은 실제 용접부와 같은 크기의 파괴검물로부터 준비되어야 한다.

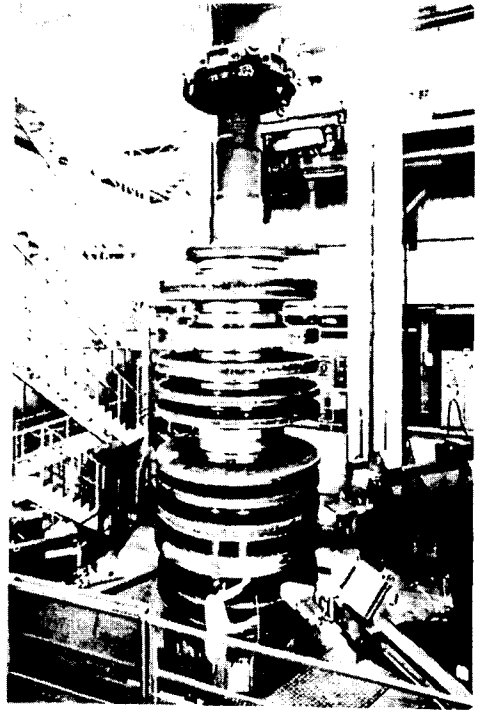


Fig. 5 Vertical GTA welding procedure and preheat treatment

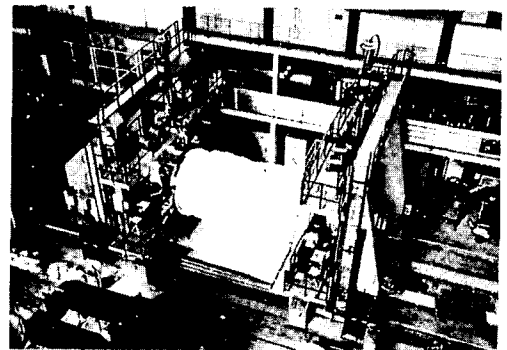


Fig. 6 Horizontal SA welding procedure.

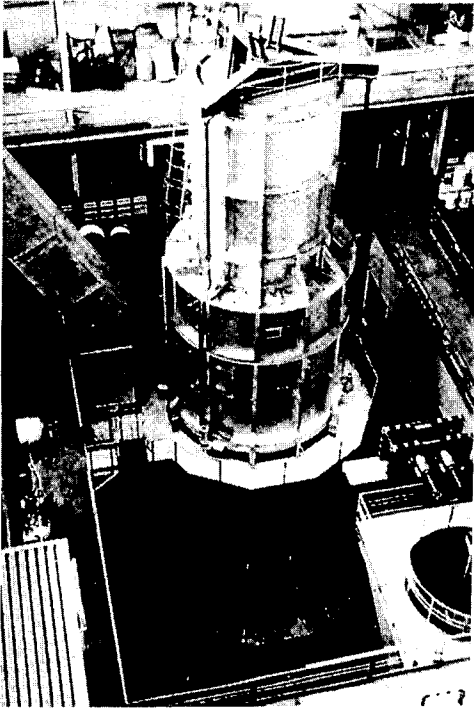


Fig. 7 Postweld heat treatment procedure.

4. Case studies¹⁰⁾

4. 1 고압 로터에서 Governing stage의 대체(125MW, 250MW)

125mw급 터빈 발전시스템에서 용접에 의하여 제작된 governing stages가 대략 120,000 시간 운전 후에 용접부에서 creep-fatigue 균열이 발생하거나 또는 수명연장을 위하여 새로운 governing stage를 적용하는데 보수 용접을 이용하였다. Fig. 8(a)는 용접에 의한 보수시에 보수 용접부의 개략도를 보여준다. 새로운 governing stage를 삽입하는 보수 용접은 대략 아래와 같은 공정을 근거로 한다.

1. 본래의 row ring부분을 절단하고 용접을 위하여 disk profile부를 기계 가공한다.
2. 용접전에 새로 제작된 ring을 용접부에 위치한다.
3. 용접은 두가지 공정에 의하여다.
 - 피복아크 용접에 의한 초기 저층 용접

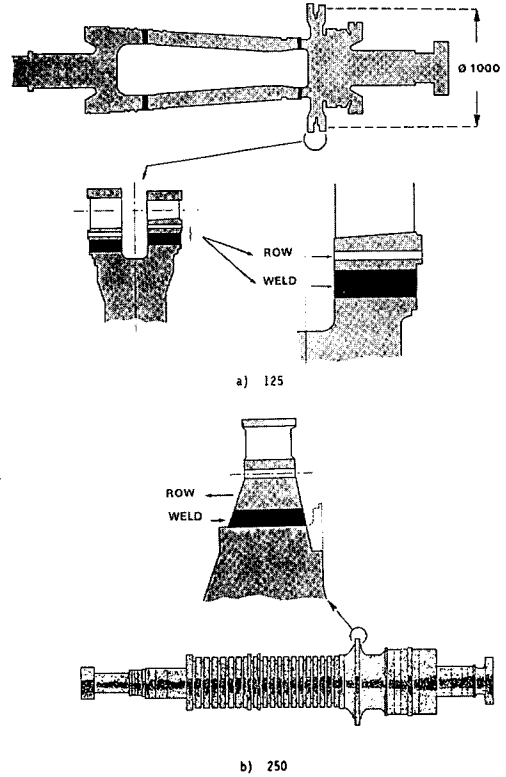


Fig. 8 Replacement of governing stages on high-pressure rotors.

• 초기 p 층의 용접이후 SAW 용접공정으로 용접 종결

4. 용접부의 비파괴 검사
5. 용접부에서 유도가열 장치에 의한 국부 후열 처리
6. 본래의 크기대로 최종 가공
7. 로터의 발란싱 검사.

250mw 급에서도 이러한 용접공정이 적용되었지만 본래 row 재료의 수명이 125mw급에 비하여 반 정도로 대략 평균 60,000 시간이 경과한 이후 용접 보수가 이루어졌으며 새로 대체되는 row부분의 고온기계적 성질을 개선하기 위하여 본래 모재부는 CrMoV강이지만 새로 삽입되는 부분은 고 크롬계인 12%Cr 강으로 변경하였다. (Fig. 8(b))

4. 2 고압 로터에서 용접에 의하여 새로운 End Shaft의 대체

125mw급 로터에서 본래 수명에 접근한 end shaft 부분을 제거하고 새로운 end shaft부분을 적용하면서 샤프트 부분의 디자인을 변경하여 대체하였다. (Fig. 9)

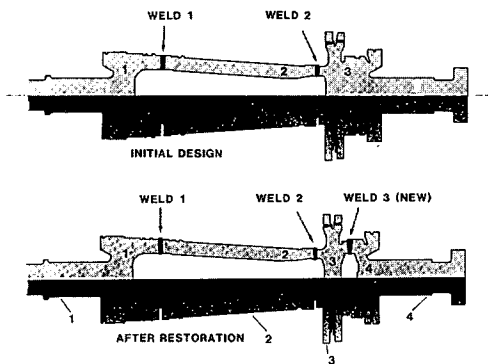


Fig. 9 Reconstruction of a high-pressure rotor by welding new end shafts.

1. 본래의 용접부에서 1부분을 절단하여 제거한다.
2. 본래의 end shaft부분이 되는 3부분을 제거하고 2의 governing 부분은 유지한다.
3. 새로 준비된 1부분을 용접한다.
4. 제거된 3의 end shaft 부분에 적용되는 부분은 용접에 의하여 새롭게 디자인된 end shaft부를 용접한다. (3의 내부 디자인 개선은 기술적 know-how로 공개하지 않음)

** 3, 4 용접공정은 governing stage의 보수용접에서 열거한 1~7의 과정과 유사한 공정이 고려된다.

4. 3 고압 compressor 로터에서 Blade 가 부착되는 groove의 재구성

대형 고압 compressor부에서 부착되는 blade의 groove중 blade의 균열 발생에 따라 야기된 2번째 groove에 보수 용접을 적용한다. (Fig. 10)

1. 보수용접을 위하여 용접에 적합한 형태로 기계가공 한다.
2. 로터의 용접될 부분에 중앙 ring이 위치하도록 조절하여 2개의 용접groove를 가공한다.
3. 가공된 groove를 용접에 의하여 채우며 용접

한다.

- 피복아크 용접에 의한 초기 저면층 용접
- 초기 저면층 이후 SAW 공정에 의하여 용접 완료

4. 임시로 설치된 중앙의 ring 을 제거하고 적층된 용접부의 내부에 새로운 형태의 blade에 적절한 groove를 기계 가공한다.

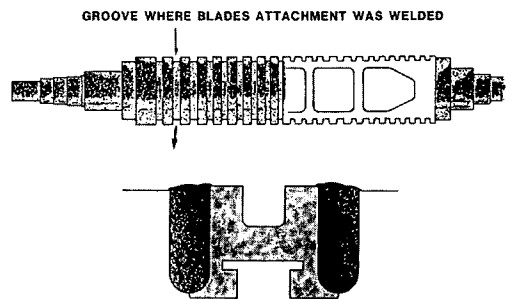


Fig. 10 Reconstruction of a groove on second high-pressure stage of a compressor.

4. 4 중압((Intermediate pressure)로터의 최종 disk의 재구성

약 100,000 시간 운전된 160mw급의 단일체형(monobolic) 로터에서 발생된 최종 disk의 복구를 위한 용접보수 작업으로 아래와 같은 공정의 순서에 따라 진행되었다. (Fig. 11)

1. 최종 disk 부분에서 blade 부착부분을 완전히 제거한다.
2. 사용되던 disk (0) 부분에 중간 ring (1)을 부분을 용접한다.
3. 사용되던 disk (0)와 새로운 ring (2)를 용접할 수 있도록 groove를 상호 가공한다.
4. (2)와 (0)에 만들어진 groove를 수직방향(vertical)으로 용접하여 결합한다.
5. 임시로 만들어진 ring (1)을 제거하고 groove의 아래 부분을 가공한다.
6. 본래의 디자인에 알맞게 최종 가공한다.

5. 맺음 말

일반적인 발전 설비의 보수 용접은 현재 국내에서도 많이 이루어지고 있다. 그러나 터빈 로터와

ROTOR OVERALL DIMENSIONS AND WEIGHT

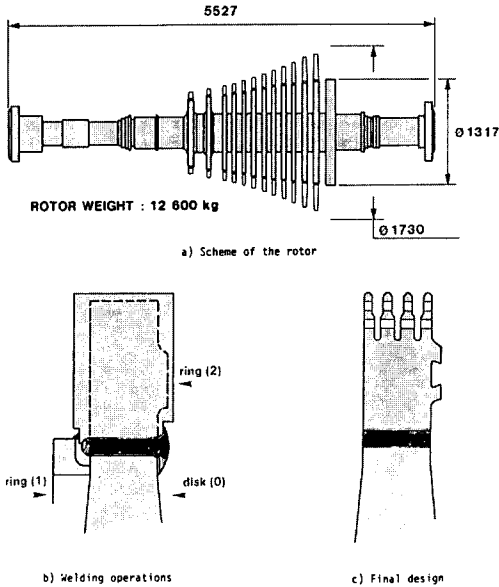


Fig. 11 Reconstruction of the last disk of a intermediate pressure rotor.

같이 핵심이 되는 부분에서는 용접에 의한 보수는 거의 고려하지 않고 있다. 이러한 경향은 실제 외국에서도 80년대 전반기 까지만 하더라도 거의 마찬가지였지만 80년대 이후에 접어들면서 세계적으로 터빈로터의 제조회사가 되는 General Electric Corporation, Westinghouse Electric Corporation, Alstom Internal, Brown Boveri and Company 등과 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)가 콘소시움을 구성하여 다양한 연구들이 진행되었고 다수의 결과들이 매우 긍정적인 것으로 나타났다. 비록 발전설비에 대한 용접보수가 만능이 될 수는 없지만 시간과 비용을 고려 할때 이제는 국내에서도 점차 관심을 갖고 접근해야하는 중요한 기술분야라고 생각된다.

참 고 문 헌

1. S.C. Lee and S.W. Nam : A Study on

Condition Low Cycle Fatigue Properties of 1% Cr-Mo-V Steel Used in Turbine Rotors, J. Kor. Inst. Met., Vol. 28, No. 9, (1990), pp. 18-824

2. S.H. Bush : Failures in Large Stream Turbine Rotors, Electric Power Research Institute Proceedings, WS/79/235, Sept., (1981), pp. 1-27

3. R.T. Hagaman : Failures Experience with Generator Rotor, Electric Power Research Institute Proceedings, WS/79/235, Sept., (1981), pp. 32-39

4. R. Viswanathan and A. Joshi : Effect of Microstructure on the Temper Embrittlement of Cr-Mo-V Steels Met. Trans. Vol. 6A, (1975), pp. 2289

5. R.E. Munson and N.D. Russell : Welded Rotor Repair, An Insurer s Perspective EPRI Proceedings GS/6233, April, (1989), pp. 43-54

6. D. Murray : Stress-Relief Cracking in Carbon and Low Alloy Steels, British W. J., August, (1967), pp. 447-456

7. K.P. Bently : Precipitation During Stress-Relief of welds in CrMoV Steels, British W. J., vol. 11, (1964), pp. 507

8. G.S. Kim : Evaluation of Reheat Cracking Susceptibility with simulated Heat Affected Zones in CrMoV Turbine Rotor Steel, J. KWS, Vol. 13, (1995), pp. 89-101

9. T.D. Spry, D.J. Graves, G. Kulnen, G. Faber and H. Bartsch : Weld Repair HP and IP Turbine Rotors Having Extensive High Temperature service, American Power Conference, April 1987, Chicago, IL.

10. R.E. Clark, R.L. Novak and D.R. Amos : Development of Techniques for High Pressure Rotor Weld Repair EPRI Proceedings GS/6233, April, (1989), pp. 2-1~27