

원자력발전소 증기발생기 전열세관 보수기술



황 경 현(자동화연구부 부장)

- '76 서울대학교 기계공학과 학사
- '78 KAIST 기계공학 석사
- '86 Ohio. State Univ. 기계공학 박사

1. 서론

1.1 연구의 배경

증기발생기는 원자력발전소에 있어서 가장 중요한 열교환기로서 원자로에서 발생된 열에너지를 증기로 변환하여 터빈으로 보내는 역할을 기기로서 통상적으로 플랜트당 2~4기가 설치되며 높이 20m, 직경 4.5m 정도로 내부에는 傳熱細管이 약 3,000~4,000개가 삽입되어 있으며 총중량이 약 300톤 정도에 달하는 대형 구조물로서 기본 구조는 그림1.과 같다.

가압수형(加壓水型) 원자력발전소의 증기발생기는 가동중에 응력부식작용에 의해 전열관벽의 열화(degradation)를 가져오는 환경조건에 영향을 받기가 쉽다. 따라서 미국, 일본등 원자력발전소를 보유하고 있는 국가에서는 허용 가능한 열화 정도에 대한 한계를 명시하는 규정조항에 따라 정기검사시에 전체 전열관에 대한 검사를 실시하고, 그 결과에 따라 보수가 필요한 곳에는 튜브 폐쇄(tube plugging) 또는 슬리빙(sleeving)에 의해 보수를 하도록 하고 있다. 튜브 폐쇄 방식은 손상된 튜브를 마개를 사용하여 폐쇄하는 방법으로 폐쇄되는 전열관의 수가 증가할수록 열교환기의 열교환 성능이 저하되기 때문에 손상부를 보수하는 방법을 적용하여 전열관을 재사용하는 것이 선호되고 있다. 슬리빙 방식은 열화된 부위를 복구하기 위하여 손상된 튜브내에 전열세관보다 직경이 조금 작은 일정길이의 튜브를 삽입하고 소성변형에 의해 슬리브를 세관의 내벽에 압착한 다음 슬리브의 상단과

하단을 튜브에 접합시켜 leak-tight 또는 limited leak seal을 확보하는 작업이다. 슬리빙에 의한 보수공정으로는 기계적 또는 복합적 확장 접합, 브레이징 접합, TIG 용접, 폭발용접등의 기술이 적용 가능하며 일본과 미국의 경우에는 브레이징 접합법을 주로 사용하고 있지만 최근에는 시공영역의 확대, 시공효율의 향상에 의한 보수의 효율화가 요구됨에 따라 이와 같은 요구에 부응하는 새로운 전열세관 보수법으로 레이저 용접식 슬리빙기술이 개발되어 플랜트에 적용되는 단계에 있다.^{[1][4]}

1.2 기술개발현황

증기발생기의 레이저 용접식 슬리빙기술에 관한 연구개발 현황을 살펴보면 일본의 경우에는 미쓰비시중공업의 주도하에 昭和60년부터 연구에 착수하였으며, 그후 재단법인 발전설비기술 검사협회내의 確性委員會에 의해 기술적인 타당성이 확인되었으며, 平成元年 4월에 전기사업법에 의해 용접법으로 확정되었다. 그리고 실제 플랜트에의 적용은 北海島電力, 關西電力, 西國電力, 九州電力, 日本原子力發電과 같은 5개 전력회사의 지도아래 고도의 신뢰성이 요구되는 원자력발전소에도 적용할 수 있도록 여러 가지 문제점을 해결하였으며, 1989년부터 1993년까지의 통계자료를 보면 玄海1호, 大飯1호기 등을 비롯하여 세군대의 원자력발전소에서 39,000회의 슬리브 보수작업을 실시한 것으로 보고되고 있다.^[4] 미국의 경우에는 Westinghouse electric Corporation, Nuclear Services Division의 주도하에 80년대 말부터 연구를 수행하였으며, 1992년 4월 Farley 2호기의 Westinghouse model 51(7/8인치 튜브직경), 증기발생기에 처음으로 레이저용접에 의한 슬리브 보수법을 적용하여 2개의 증기발생기내에 35개의 전열세관에 98개의 슬리브를 성공적으로 장착함에 따라 그해 10월 Farley 1호기에 대대적인 보수작업을 실시하여 100% 성공적으로 보수작업을 완료하였다. 이와 같은 Farley 1,2호기에서의 성공적인 적용을 통하여 가능성을 확인한 후 2/4인치(22mm)직경의 전열세관을 갖는 증기발생기, 즉 Westinghouse model D, E 및 Combustion Engineering의 feed ring type에 적용할 용접시스템과 용접공정을 계속 개발하여 1994년 3월 Westinghouse model D 증기발생기를 채택한 원자력발전소에 이를 적용한 것으로 알려지고 있다.^[5]

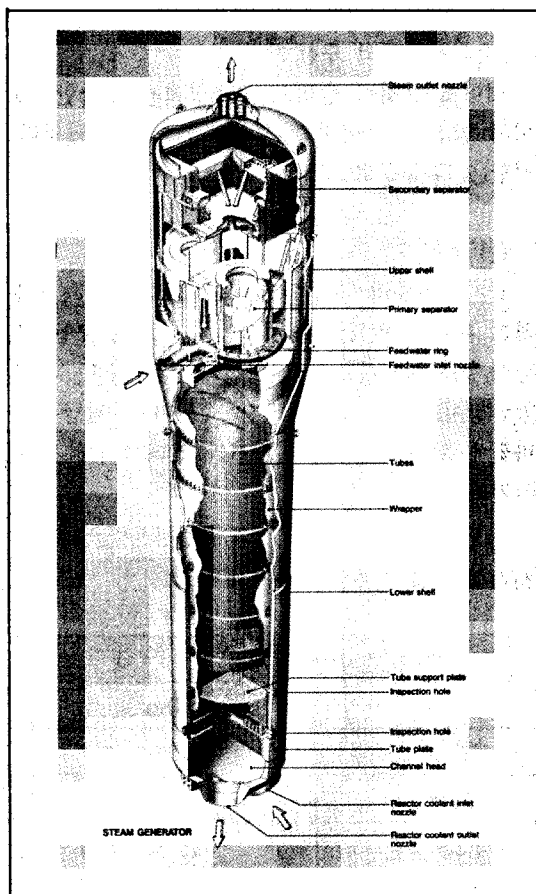


그림 1. 증기발생기의 구조

2. 레이저용접식 슬리브 보수기술

2.1 특징

고출력 Nd:YAG 레이저를 이용한 레이저용접식 슬리브 보수기술은 원자력발전소의 증기발생기의 tubesheet와 support plate 부분의 전열관이 secondary side corrosion, roll transition primary water stress corrosion 및 secondary side stress corrosion, intergranular attack에 의해 결함이 발생하면 전열관의 내부에 내경 약 16mm의 슬리브를 삽입·고정후 광파이버를 통해서 전송된 레이저빔을 여러개의 렌즈로 구성된 소형광학계로 집속시킨후 미러로 반사시켜 슬리브의 내면에 조사하여 슬리브와 전열관을 용접하는 공법이다.

브레이징접합을 비롯한 종래의 공법에 의한 슬리브 보수와 비교하면 다음과 같은 공정상의 특징이 있다.

- ① 슬리브의 길이가 짧으므로 외주부, 최상위 관판지지부에도 시공이 가능하므로 적용 범위가 확대된다.
- ② 작업이 일관성이 있고 효율적이므로 시공 능률이 대폭적으로 향상된다.

- ③ 원자로 1차 내압부재로서 외관상으로는 블레이징과 같은 모양을 가지면서도 높은 접합강도를 가지므로 신뢰성이 높다.
- ④ 습기, 표면방사율과 같은 부수적인 조건에 덜 민감하다.
- ⑤ 레이저빔은 집속되어 조사되므로 열영향부가 작으며 재료내부로의 열의 유입이 적어 열적변형이 거의 없으며 공정변수의 조절에 의해 용접품질의 제어성이 우수하다.

2.2 레이저용접식 보수 시스템

2.2.1 시스템의 구성^{[2][3]}

레이저 용접식 슬리브 보수장치는 조작반, 레이저 발전기, 레이저 전송용 광파이버와 커플러, 선단(先端)공구로 구성된다.

(1) 조작반

공사기간중의 작업인원의 線量當量을 최소화하기 위하여 원자로 격납용기 외부에서 모든 조작이 가능하도록 레이저발전기, 냉각장치, 전원공급장치를 비롯한 조작반을 원자로 격납용기 바깥에 위치한 전용트레일러와 컨테이너에 탑재시킨다.

표 1. 레이저 용접식과 블레이징식의 비교(三菱重工業)

항 목		레이저	브레이징		
슬리브	길이	관 판 지 지 부			
		관 판 부	중 앙 부	150mm	280mm
			주 변	630mm	740mm
	관 두	210mm	419mm		
관 두		1.2mm	1.2mm		
적용범위	시공가능범위		95%	78%	
	시공가능높이		제7관지지판까지	제6관지지판까지	
시공능률비	관 판 지 지 부		2	1	
	관 판 부		4	1	
접합강도		모재이상	모재이상		

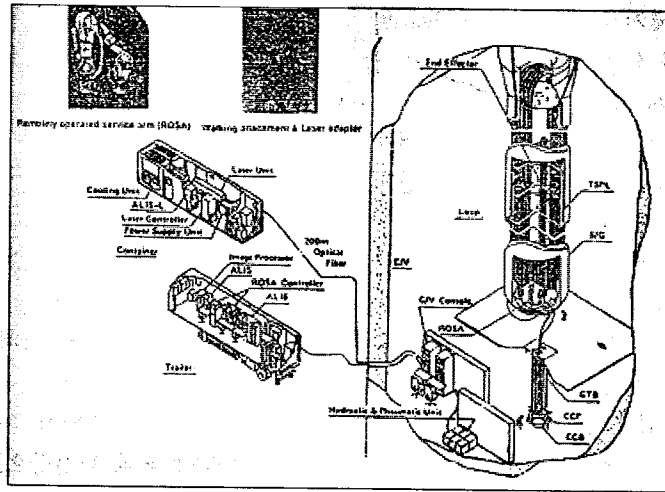


그림 2. 세관 레이저 용접식 슬리브 보수장치(三菱重工業)

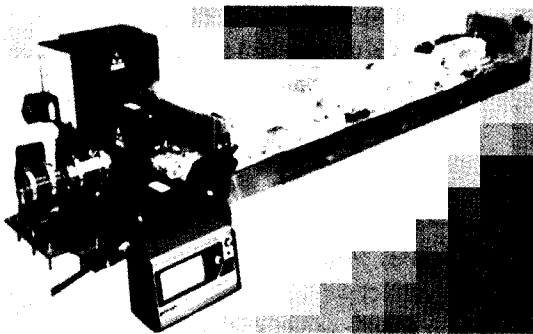


그림 3. 레이저발진기

표 2. 레이저발진기의 주요 사양

회사명	미쓰비시중공업	Westinghouse
항목		
발진매개체	Nd3+:YAG	Nd3+:YAG
파 장	1.06 μ m	1.06 μ m
여기용램프	Kr arc	Kr arc
발진모우드	Multi mode	Multi mode
출 력	1.8kW	1.0kW
냉각방식	공냉 chiller	-

(2) 레이저발진기

레이저발진기는 線量當量의 저감, 격납용기내의 설치장소의 문제, 미세한 광축조정의 필요성 및 광학적 청정도의 확보와 같은 이유로 격납용기 바깥에 설치하며 공조관리가 되는 전용 컨테이너에 탑재시킨다. 레이저발진기는 격납용기 바깥에 설치하기 때문에 광파이버에 의한 전송이 가능한 Nd:YAG 레이저를 사용하며, 발진출력은 용접에 필요한 출력, 전송손실, 안전성을 고려하여 선정한다. 표 2.는 미쓰비시중공업과 웨스팅하우스 용접시스템에 사용되는 레이저발진기의 사양이다.

(3) 광파이버 및 커플러

발진기로부터 나오는 레이저빔을 증기발생기내에 위치하는 용접헤드까지 전달하기 위하여 총길이 230m의 광파이버를 사용한다. 용접헤드의 취급을 용이하게 하기 위하여 광파이버는 레이저로부터 증기발생기 아래에 위치하는 접속장치까지를 연결하는 약 200m의 장거리부분(GI type)과 접속장치로부터 용접헤드를 연결하는 약 30m의 단거리부분(SI type)으로 구성된다. 200m의 빔전송에 사용되는 광파이버는 코어직경이 0.55~

1.0mm의 GI type 으로서 장거리 전송에서의 빔의 전송손실을 최대한 억제하기 위함으로 이 경우의 빔손실은 약 10% 정도로 광파이버는 전송손실이 적고, 내광성, 내방사선성이 우수한 것을 개발, 실용화하여 사용하고 있다. 레이저 발진기로부터 장거리부분 광파이버로의 빔의 입사, 접속장치로부터 용접헤드쪽 광파이버로의 빔의 입사를 위해서는 전용의 렌즈 어셈블리를 사용하며, 접속장치는 동력선, 신호선 및 광파이버의 접속을 위한 커플링이 내장되어 있으며, 용접분위기용 보호가스를 공급하는 가스공급장치가 내장되어 있다. 사용하는 광학계는 내광성, 투과율이 우수하고 높은 레이저의 전송이 가능한 것을 개발하여 사용하고 있는데 렌즈의 유효구경은 10mm로서 전송손실도 3% 이하로 억제하고 있다. 금속미러는 미러자체의 온도가 고온이 되더라도 반사율이 저하되지 않고 고반사율을 유지하는 것을 개발하여 사용하고 있다.

(4) 선단(先端)공구

증기발생기 전열관내에 슬리브를 삽입·확관·용접·검사하기 위하여 다음과 같은 공구를 사용하고 있다.

- 액압확관공구

슬리브를 잡고 전열관내에 슬리브를 삽입한 후 액압을 이용하여 확관시켜 전열관 내벽에 고착시키는 역할을 하는 공구이다.

- 레이저 용접공구

액압에 의해 확관된 슬리브내에 삽입되어 슬리브 내면에 레이저빔을 조사하면서 회전 및 축방향으로 이동하여 나선상으로 용접하는 역할을 하는 공구이다.

- 비이드폭 검사공구

용접 비이드를 imaging fiber, prism 등의 광학계 및 화상처리장치로 구성되는 것으로 용접 후 슬리브내에 삽입되어 용접부의 건선성을 확인하는 공구이다.

- 슬리브 ECT(Eddy current test) 공구

슬리브 용접시에 작업의 상태를 ECT 기준 데이터로 기록하고 플랜트 운전 후 슬리브 용접

부의 손상유무를 검사하는 공구이다.

2.2.2 슬리브 레이저 용접공구

슬리브 레이저 용접공구, 즉 용접헤드는 레이저 용접식 슬리브 보수장치의 핵심이 되는 공구로서 이의 상세한 구조 및 기능은 다음과 같다.

- 광파이버에 의해 전송되어온 레이저빔은 4개의 엔드로 구성된 집광 렌즈군에 의해 집광되고 미러에 의해 90° 반사되어 슬리브의 내벽에 수직인 방향으로 조사된다.

- 미러는 미러홀더에 의해 고정되어 있으며 모터에 의해 나선상으로 구동된다.

- 구동원이 되는 모터는 슬리브내를 통과할 수 있어야 하고 광파이버를 중앙에 배치할 수 있어야 하고 용접중에 필요한 보호가스를 충분히 견딜 수 있는 토크를 가져야 하고 증기발생기 반구부 외주부, U 밴드부 근처의 최상위 관지지부에 적용이 가능하도록 가능한 길이가 짧은 것이 좋으므로 이와 같은 이유로 인하여 초소형, 중공식 진행파형 초음파 모터를 개발하여 사용하고 있다. 여기에 사용하는 모터는 같은 사이즈의 다른 모터에 비해 높은 토크를 가지고 있으며 펄스에 의해 구동제어하므로 저속회전영역에서도 안정된 회전이 가능한 장점을 가지고 있다.

- 용접중 미러의 회전속도, 회전량을 파악하기 위하여 소형 중공식 엔코더를 개발하여 사용하고 있다.

- 공구의 하단부에는 와진류센서를 부착하여 전열관내에 삽입된 슬리브의 하단부를 검출하는 방법에 의해 공구를 슬리브에 대해 정확하게 위치결정 하는 것이 가능하다.

- 용접중에는 공구의 하단부에 위치하고 있는 고무띠가 공기에 의해 팽창하여 공구를 전열관에 고정시키는 역할을 하며, 상단의 조심기구는 용접공구 항상 슬리브와 동심이 되도록 유지시키므로 초점위치가 항상 일정하게 유지된다.

- 용접중에는 용접분위기의 확보, 용접시에 발생하는 스파터, 가스에 의해 미러와 렌즈의 손상을 방지함은 물론 미러를 냉각하기 위하여 보호가스를 공급한다.
- 용접중에는 레이저 전송용 광파이버 주위에 배치된 모니터용 광파이버를 사용하여 용접부의 광을 검출, 평가하는 방법에 의해 렌즈, 미러 등의 이상 유무를 in-process 모니터링하는 시스템을 개발하여 실용화하고 있다.

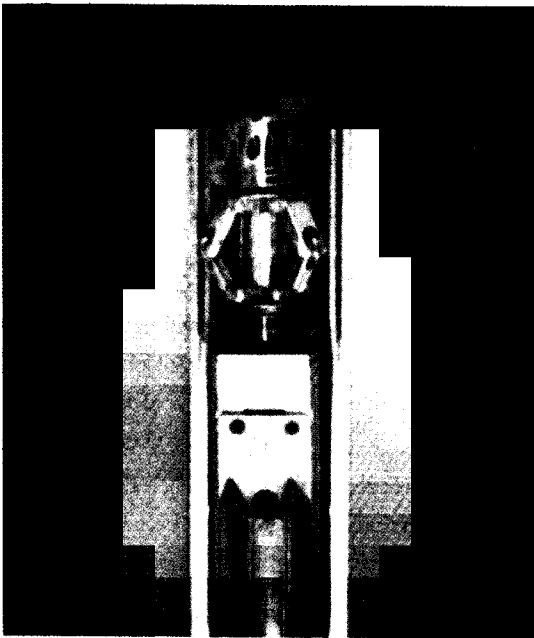


그림 4. 레이저용접헤드

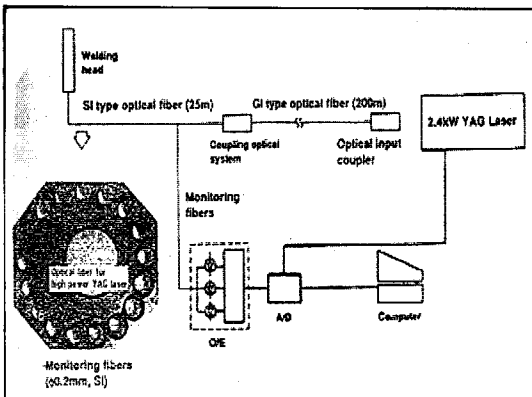


그림 5. In-process 모니터링 시스템의 구성도

2.2.2 용접상태 In-process 모니터링장치

용접상황의 in-process 모니터링은 펄스 용접 시 off-time 동안의 용접부에서의 발광을 검출하는 방법을 사용하고 있다. 모니터링장치의 구성을 보면 용접공구의 빔전송용 광파이버의 주변에 코어직경 0.2mm의 SI형 모니터링 파이버를 17가닥 배치하고 이 모니터링 파이버에 의해 특정 파장대의 광을 추출하고 포토다이오드에 의해 검출한다. 검출신호는 격납용기 외부에 설치된 발전기용 컨테이너내의 컴퓨터로 전달된다. 이와 같은 모니터링에 의해 레이저용접에 숙련자가 아니더라도 용접이 양호하게 진행되고 있는지 아닌지를 용접부에서의 발광, 레이저 반사광, 용접공구의 회전속도, 토오크 신호에 기초한 다변량해석에 의해 불량 발생 시에는 그 원인을 Neural network 시스템에 의해 추정하는 방법을 사용하고 있다.

3. 국내 연구개발현황

미국과 일본의 레이저 용접식 슬리브 보수법에 관한 연구개발 현황 및 실제 플랜트에의 적용 사례를 살펴본 바와 같이 이 방법은 원자력발전소의 증기발생기 보수법으로는 혁신적인 공법으로서 기술선진국으로 부터의 기술이전이 불가능하므로 국내에서 독자개발하는 외에는 다른 방도가 없다. 따라서 국내에서는 1994년부터 한국중공업의 총괄하에 레이저 용접식 슬리브 보수공정 및 시스템의 개발을 목표로 연구를 시작하였으며 한국기계연구원은 한국중공업의 지원하에 시스템의 핵심으로써 전열세관내에 삽입되어 슬리브의 용접을 수행하는 용접헤드의 개발을 목표로 하는 “원자력발전소 세관보수용 레이저 용접 슬리빙 기술 개발” 과제의 연구를 시작하였다.

3.1 용접헤드 설계

증기발생기의 전열관내에 슬리브를 삽입하고

Nd:YAG 레이저를 이용하여 전열관내에서 용접을 하는 톨접헤드는 다음과 같은 조건에서 적용이 가능하도록 외경이 각각 $\phi 16.0\text{mm}$ 와 $\phi 13.8\text{ mm}$ 인 가지 시스템을 설계하였다.

- $\phi 16.0\text{mm}$ 시스템 : 전열관 외경 $\phi 22.22$
 내경 $\phi 19.79$
 : 슬리브 외경 $\phi 19.25$
 내경 $\phi 16.80$
- $\phi 13.8\text{mm}$ 시스템 : 전열관 외경 $\phi 19.02$
 내경 $\phi 16.80$
 : 슬리브 외경 $\phi 16.23$
 내경 $\phi 13.98$

그림 6.은 본 연구를 통하여 설계한 용접헤드의 단면을 나타낸 것으로 공구의 맨 아래쪽에는 용접시 필요한 보조가스를 공급함과 동시에 초음파모터, 로타리엔코더에 연결되는 각종 전선과 레이저빔을 전송하는 광파이버를 보호하는 역할을 하는 길이 약 5m의 플렉시블 튜브가 연결되어 있고 그 가운데로 광파이버가 통과되도록 되어 있으며, 바로 위에는 용접헤드가 슬리브내에 삽입되어 용접작업을 할 때 용접헤드를 고정시키기 위하여 용접시 사용하는 보조가스에 의해서 쉽게 부풀어나는 폴리우레탄과 같은 탄성 플라스틱재료의 슬리브와 강재 맨드릴로 구

성된 expandable bladder(fixing unit)가 위치하게 되며, 그 위에는 용접위치의 위치검출을 위한 eddy current sensor가 장착된 검출 유닛이 위치한다. 용접헤드의 맨 위쪽에는 용접헤드의 중심을 슬리브의 중심과 일치시키기 위한 중심기구가 설치되어 있는 구조를 갖는다.

용접헤드의 중심부를 통과하는 코어직경 1mm의 광파이버에서 출사되는 레이저빔은 2개의 렌즈(collimating, focussing)로 구성된 소형 용접용 집광광학계를 통과하면서 집광되고 고반사미러에서 90° 반사되어 슬리브면으로 조사되도록 구성되어 있다. 충분한 집합강도를 갖는 접합면을 얻기 위하여 슬리브의 주방향으로 레이저빔을 나선상으로 이동시켜 다중패스의 부분중첩용접을 실시해야 하므로 이를 위하여 2개의 렌즈 사이에서 빔이 평행하게 되는 부분을 이용하여 금속미러축의 렌즈, 즉 집광렌즈와 금속미러가 고정되어 있는 상부케이싱이 회전하는 구조로 되어 있다. 따라서 켈리메이팅렌즈는 회전을 하지만 광축방향으로의 이동은 없으나 집광렌즈는 회전하면서 광축방향으로 이동을 하게 된다. 이와 같은 나선상 운동에 의한 광축방향으로의 이송은 용접헤드의 상부케이싱과 하부케이싱을 나사로 연결함으로써 회전과 동시에 금속미러와 집광렌즈가 상하방향으로 진행하는 구조로 되어

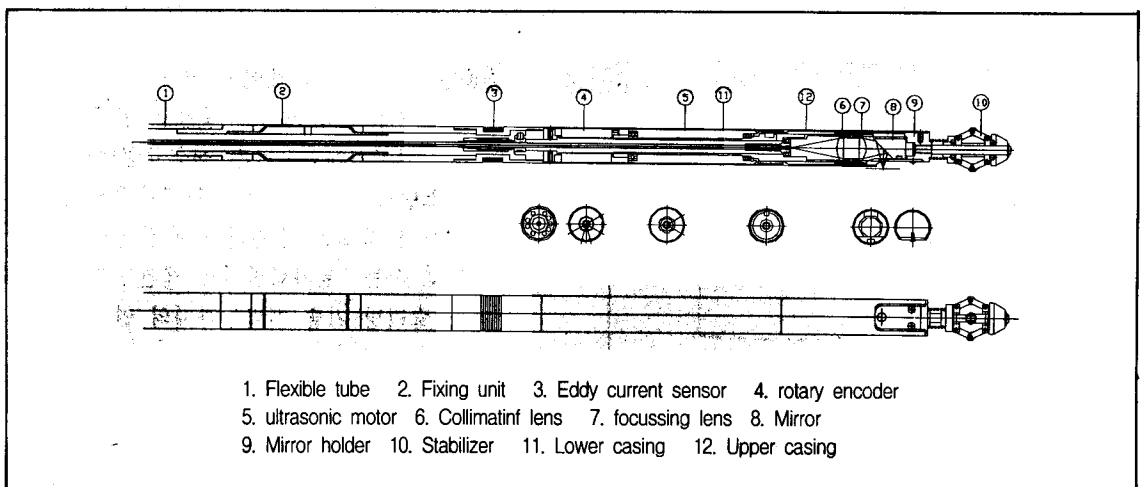


그림 6. 용접헤드의 구조

있다. 이와 같은 회전운동의 구동원은 中空의 초음파모터에 의해서 이루어지며 초음파모터의 축 또한 中空으로 광파이버가 통과하고 고정되게 되며 컬리메이팅 렌즈의 홀더역할도 하도록 설계되어 있다. 초음파모터의 바로 뒤에는 로타리엔코더가 설치되어 모터의 회전속도를 제어하고 위치를 검출할 수 있도록 되어 있다. 그리고 초음파모터, 로타리엔코더로 연결되는 모든 전선들은 작업시의 손상을 방지하기 위하여 용접헤드의 내부로 통과되도록 되어 있다.

3.2 요소부품 설계 · 제작

3.2.1 초소형 집광광학계

용접헤드용 집광광학계를 설계할 때 고려해야 할 조건으로는 광파이버에서의 빔의 出射조건과 렌즈의 크기에 대한 제약조건을 들 수 있다. 본 연구에서 선정한 레이저빔 전송용 광파이버는 SI type으로 NA(numerical aperture)는 0.2, 코어직경은 1mm로서 파이버 끝단에서의 빔의 出射각도는 402.7mrad정도이다. 렌즈의 크기에 대한 제약조건으로는 외경 $\phi 16.0\text{mm}$ 와 $\phi 13.8\text{mm}$ 의 용접헤드내에 장착될 수 있어야 하며, 최종

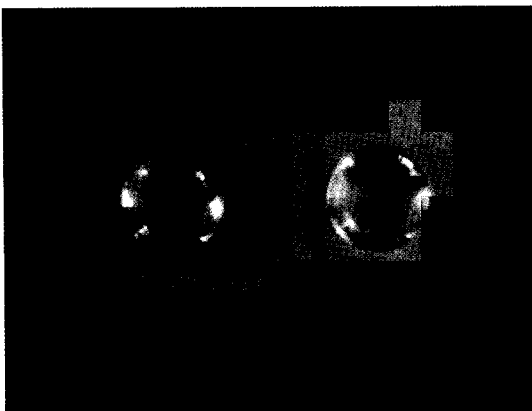


그림 7. 초소형 렌즈(직경: 11mm)

단 렌즈면에서 용접결상면까지의 거리, 즉 back focal length는 용접작업중에 용접부에서 발생하는 스패터와 plume으로부터 광학계를 보호할

수 있는 정도로 길어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이 두가지의 제약조건을 만족하면서도 초점에서의 높은 파워밀도를 얻을 수 있도록 가능한 작은 직경의 집광빔이 얻어지는 광학계를 설계 제작하였다. 렌즈의 직경은 각각 $\phi 11.0\text{mm}$ 와 $\phi 10.0\text{mm}$ 이며 렌즈내에서의 최대 광속직경은 9.0mm, back focal length는 16.645mm이며 가능한 집광스팟을 작게하기 위하여 plano-convex 타입의 비구면렌즈로 설계하였다.

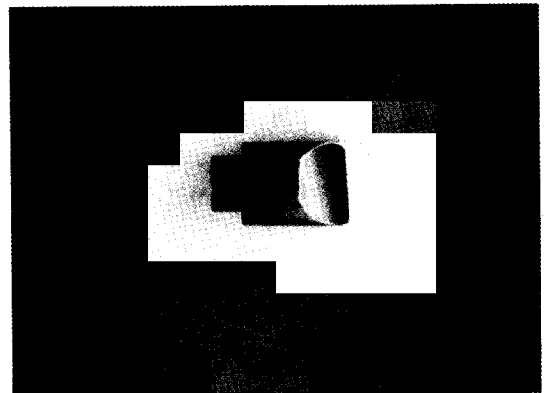


그림 8. 초소형 미러(직경: 9mm)

미러의 경우에는 용접헤드의 구조 및 기능상의 제약조건에 의해 수냉을 할 수 없으므로 수냉이 필요없을 정도로 고반사율을 갖는 미러의 사용이 필수적이므로 구리베이스에 쿼츠를 접착하고 쿼츠의 표면에 유전체 다층막($\text{ZrO}_2/\text{SiO}_2$)을 입혀 반사율을 99% 이상으로 높인 미러를 개발하여 사용하였다. 미러의 반사면은 장축이 12.7mm, 단축이 9mm인 타원형이며 전체중량은 약 2g정도로 매우 소형으로서 보호가스에 의해서 냉각된다.

3.2.2 초음파모터 및 엔코더

용접헤드의 구동원으로서 초음파모터를 선정하고 초음파모터의 국제특허를 갖고 있는 일본의 (株)新生工業과 공동으로 $\phi 15.0\text{mm}$ 와 $\phi 13.0\text{mm}$ 의 모터를 개발하였다. 개발된 초음파모터의 구동원리는 탄성체를 압전세라믹을 붙인 스테이터에 시간과 함께 이동하는 진행파를 발

생시켜 대면접촉한 로터를 회전시키는 진행파방식이며 충분한 토오크를 얻기 위하여 4개의 모터유니트를 직결하고 이를 하나의 케이싱내에 조립한 4연구동방식을 채택하였으며 모터의 앞단에 감속기를 부착하였다.

로터리엔코더는 초음파모터의 속도를 제어함과 동시에 위치를 제어하기 위한 것으로 개발된 로타리엔코더의 크기는 $\phi 15.0 \times 20\text{mm}$ 로 소형이며 광학식 엔코더로 1회전당 240펄스의 근사정현파의 신호를 출력한다. 엔코더에 의한 초음파모터의 속도제어에는 PWM(pulse width modulation)방식을 사용하였으며 PC에서 원하는 회전수, 회전속도, 회전방향의 변수를 입력하면 자동적으로 기동하고 정지하도록 C 언어로 구성된 제어전용의 소프트웨어를 개발하였다.

3.3 용접헤드 제작 및 용접실험

가공된 요소부품의 치수검사를 거친후 용접헤드를 조립하고 pc를 이용한 제어실험을 완료하였다. 조립된 용접헤드는 약 30cm 길이의 선단부와 5m 길이의 튜브부분으로 구성되어 있으며, 튜브의 내부로는 광파이버, 전력공급선 및 신호

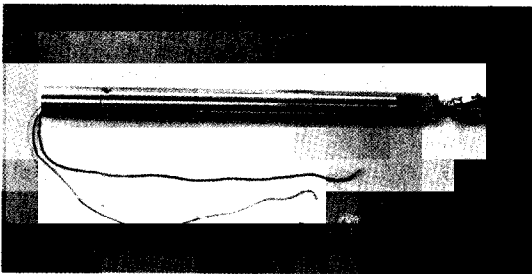


그림 9. 완성된 용접헤드

선이 통과하고 있으며, 보호가스를 공급하기 위한 포트와 pc와 모터 드라이브에 연결되는 전선을 빼내기 위한 포트가 각각 장착되어 있다.

이와 같이 용접헤드의 조립과 작동실험을 거친후 현재 한국중공업에서 용접실험을 실시하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] 황경현, 이성국, 윤경구, 김재구, 이웅숙, "원자력발전소 증기발생기 세관 보수용 레이저 용접 sleeving 기술 개발", 한국기계연구원, 1996, 8
- [2] Takashi Ishide, Osa Matsumoto, Yasumi Nagura and Tadashi Nagashima, "Optical fiber transmission of 2kW CW YAG laser and its practical application to welding", SPIE Vol. 1277, 1990
- [3] Akira Yokoyama, Takashi Ishide, Osa Matsumoto, Yasumi Nagura and Tadashi Nagashima, "YAG laser welding sleeving technology for steam generator tubes in nuclear power plants", 5th Int'l Symposium of Japan Welding Society, 1990. April
- [4] "蒸氣發生器 レーザ 溶接式 スリーブ 補修装置의 開發 實用化", 三菱原子力 技報, 1990, No.56
- [5] Bala R Nair, "Lasers make light work of sleeving", Nuclear Eng. Int'l, 1993, 10