

## 원자력 발전소 증기발생기 전열관 광섬유전송 레이저 용접광학계 설계 및 분석

김광석, 이승훈, 김철중

한국원자력연구소

### 요 약

원자력발전소 증기발생기 전열관의 레이저 용접을 위하여 광섬유 전송 레이저 용접광학계를 설계하고 분석하고 실제 레이저 용접에 활용코자 하였다. 이를 위해서 kW 급 고출력 Nd:YAG 레이저의 출력변수에 맞춘 광섬유 선정 및 sleeve 면에서의 용접 power density 와 초점깊이를 고려한 광학계통 설계를 수행하였다. 레이저 출력변수가 150 mm.mrad 이며 800 $\mu$ m 의 광섬유를 사용하는 경우, 3 회에 걸친 coupling 으로도 광섬유 출사부의 F# 를 2.48 정도로 하는것이 가능하며 이때 +- 0.5mm 정도의 초점깊이를 얻을 수 있었다.

### 1. 서 론

최근 10 여년 전부터 원자력발전소 증기발생기의 전열관 손상을 수리하기위한 레이저 sleeve 용접 공법이 도입되어 활용되고 있다. 특히 미국의 Westinghouse 나 일본의 미쓰비시 중공업은 이 방법을 이용하여 증기발생기의 교체없이 전력생산의 경제성을 높이고 있다.

그림 1 은 고출력 Nd:YAG 레이저를 이용하여 증기발생기 전열관 용접을 위한 광학계통의 개략도를 보여주고 있다. 레이저에서 발진된 레이저광은 광섬유 입사 렌즈를 통하여 광섬유에 집속된다. 이어 광섬유를 통과한 레이저광은 중간 연결구에서 렌즈쌍으로 연결되며 두번째 광섬유를 통과한 레이저 빔은 광섬유 출사 광학계에 의하여 용접부위에 도달하게 된다.

이와같은 광학계 설계에서 중요한 점은 경제성과 효율성을 동시에 만족하며 서로 깊은 관련이 있는 레이저 변수들을 용도에 알맞게 조절하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 광섬유의 직경, 광섬유 출사부의 F#, 용접 초점면에서의 power density 및 초점깊이 등을 고려한 광학계통을 설계하고 분석하였다.

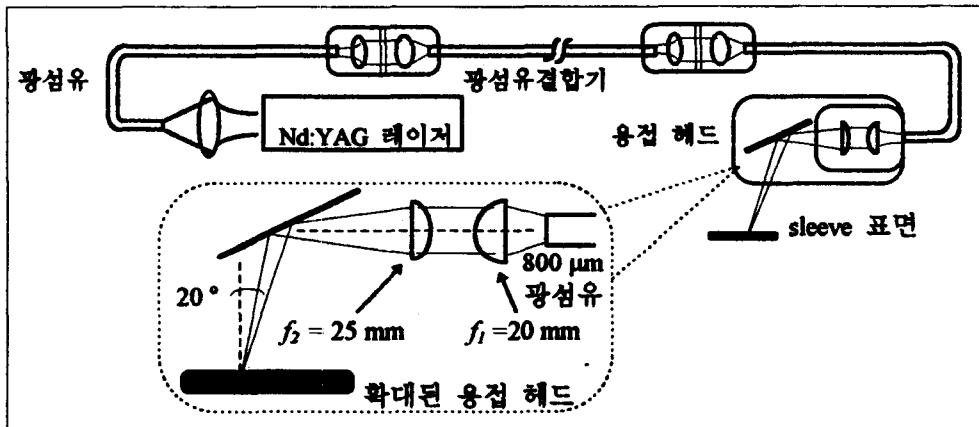


그림 1 증기발생기 전열관 용접을 위한 레이저 광학 계통 개략도

## 2. 본 론

### 2-1 레이저 출력 변수의 불변성

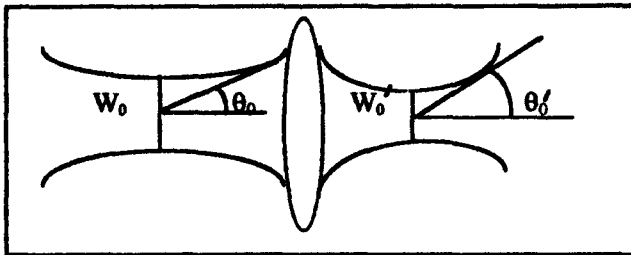
일반적으로 고출력 레이저빔은 고차 가우시안 모드로 렌즈를 통과할때 그림 2 와 같은 전파특성을 가지며 이때 레이저 모드는 spot size  $w_0$ , 및 발산각  $\theta_0$  로 설명되어진다. 렌즈 등으로 이루어지는 광학계는 일종의 1 차원적인 변환으로 초기에 렌즈에 입사하는 레이저빔의  $w_0, \theta_0$ 는 렌즈투과후  $w_0', \theta_0'$ 로 변환되며 이들간에는 다음과 같은 보존법칙이

$$w_0\theta_0 = w_0'\theta_0' \quad (1)$$

성립한다.

## 2-2 광섬유 전송시 발생하는 1차원 불변량의 변화

일반적으로 전열관 용접에 사용되는 kW 급 Nd:YAG 레이저의 불변량  $w_0\theta_0$ 은 약 200mm.mrad 정도이다. 따라서 이 레이저빔을 코아 구경이  $D$ 이며 개구수가  $NA$  인 광섬유에 입사시키기 위해서는 정렬오차를 고려할때 다음과 같은 조건이 성립해야한다.



$$w_0\theta_0 = w_0'\theta_0' < D \cdot NA \quad (2)$$

또한 광섬유를 투과한 레이저빔의 불변량은  $w_0'\theta_0'$ 에서  $D \cdot NA$ 로 커지게 된다. 따라서 광섬유를 투과할때 마다 이 불변량은 커지게 된다.

그림 2 렌즈에 의한 레이저 빔 변환

## 2-3 광섬유 출사부의 광학적 특성

광섬유 출사부는 그림 1에서도 볼 수 있듯이 collimation 렌즈와 집광렌즈 쌍으로 구성되어 이들렌즈의 초점비에 의하여 광섬유 코아 직경과 용접면에서의 spot size 비율이 결정된다. 이 비율은 용접면의 bead 폭과 초점깊이를 결정하며 collimation lens의 초점거리의 조절로 bending mirror의 손상을 조절할 수 있다.

## 2-4 광섬유 전송 광학계의 설계 및 분석

### 2-4-1 광학계 설계원칙

본 설계에서는 처음 시작점에서의 레이저 불변량을 약 150 mm.mrad (600-700Watt의 레이저 출력)로 하였다. 광섬유의 코아 직경은 작을수록 경제적이므로 용접부의 bead 폭을 고려하여 코아 직경이 800  $\mu\text{m}$ , 개구수가 0.22인 광섬유를 사용하였다. 한편 입사 레이저빔의 집속  $F\#$ (렌즈의 초점거리/레이저빔 유효직경)는 출사부의 광학계를 고려하여 3.1 정도로 하였다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 중간 연결구에서 레이저빔의 전송손실이 없게 하기 위해서는 레이저빔을 축소하여야 하며 본 설계에서는 축소배율을 0.9로 하면 3회의 광섬유 연결을 하고도 출사부의  $F\#$ 를 2.48로 유지할 수 있다. 최종 용접부의  $F\#$ 는 용접의 기하학적 구조를 결정하므로 용접에 미치는 영향을 고려해야 한다.  $F\#$ 가 작으

면 sleeve 내부의 좁은 공간상에서 플라즈마를 제어하기가 힘들어지고 용접 표면부의 열 확산 정도가 커져서 좋지 않으며 그 반대일 경우는 용접면에서 충분한 레이저 power density 를 얻기가 힘들며 반사거울에서의 레이저 크기가 작아 손상을 입히게 된다. 한편 용접부에서의 spot size 는 광섬유 코어 단면이 용접부에 영상 맺히게 될때 얻어지며, 렌즈 쌍으로 이루어진 광학계의 배율에 의한 크기위에 렌즈들의 수차에 의해 더해지는 크기가 된다.

#### 2-4-2 수차분석

광섬유 출사부의 용접광학계는 그림 1 과 같이 간단한 plano-convex 렌즈 두개에 의해 형성된다. 여기에서 두개의 렌즈에 의한 배율을  $X=f_2/f_1$  ( $f_2$  는 집속렌즈,  $f_1$  은 collimation 렌즈), 집속렌즈측의 F#를 A, 광섬유의 직경을 D 라하고 레이저빔이 두렌즈 사이에서 평행광이 되게 조절하고 3 차 구면수차만을 고려할때 구면수차에 의한 최소 spot 직경(d) 은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{구면수차 } S_1 = 1/(64A^4) f_1 \sigma_1 \quad (\sigma_1 = 4(1+(2-n)/n)/(n-1)^2) = 9.1 ; n = \text{렌즈의 굴절률 } 1.51 \quad (3)$$

2 개의 렌즈의  $S_1$  합  $S_{tot}$  는

$$S_{tot} = 1/64 [A^4 f_2 9.1(1+X^3)] \quad (4)$$

이 되며 구면수차에 의한 최소 직경 d 는

$$d = 1/2(AS_{tot}) = 0.0711f_2(1+X^3)/A^3 \quad (5)$$

이며

$$A = \text{광섬유 출사부의 F\#} \times 0.9X \quad (0.9 \text{ factor 는 렌즈 위치 오차}) \quad (6)$$

광섬유 출사부 F#를 3.1 로, 배율을 1.25 배로,  $f_2 = 25\text{mm}$  로 하고 풀면  $d = 175\mu\text{m}$  이며 전체 spot 크기 S 는

$$S = 1.25D + d = 1.175 \text{ mm} \quad (7)$$

이며 그림 1 에서 보듯이 용접시 spatter 등의 조절목적으로 bending mirror 가 35 도 기울어져 있으므로 광축과 용접면이 직각이 아니고 20° 더 기울어져 있으므로 spot 형태는 원형이 아니고 기울어진 방향으로 6% 정도 더 길어진 타원형태를 취하게 된다.

#### 2-4-3 용접부의 초점깊이 분석

용접광학계에서 중요하게 고려해야할 변수가 용접부의 초점깊이 허용도이다. 렌즈에  
서의 레이저 빔의 크기를  $W$  라하고 집속된 초점의 spot size 를  $S$  라고 하면 defocus  $\delta f$  에  
따른 직경  $S'$  은 그림 3 에서 보듯이

$$S' = | \delta f | / f (W-S) + S \quad (8)$$

이며 spot size 변화율을  $A_s$  라고하면

$$A_s = (S'-S)/S = | \delta f | (W-S) / f / S \quad (9)$$

이 된다. 따라서 spot size 가 10% 증가  
할때의  $\delta f$  는 (8)과 (9)식을 이용하고,

collimation 렌즈측 F#가 3.1 이고 초점깊이  
가 20mm 이므로  $W$  는 8.06mm 가 되며,  $S$  는

1mm,  $f$  는 25mm 를 이용하여 풀면 약 177 $\mu$ m 가 된다. 만약 앞에서 언급한 바 있듯이  
그림 3 에서 spot size 가  $S$  인 초점면이 광축에 대해 20° 기울어져 있다면 spot 의 외각부분  
의 defocus 가  $+0.5\sin 20 = +0.17$ mm 정도가 된다. 이는 위에서 계산한 10% spot size 증가와  
저의 같게되어 무시할 수 없는 양이된다.

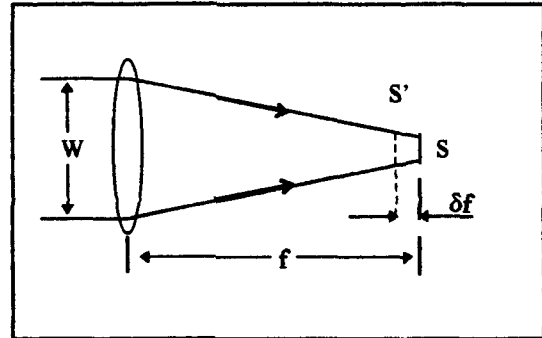
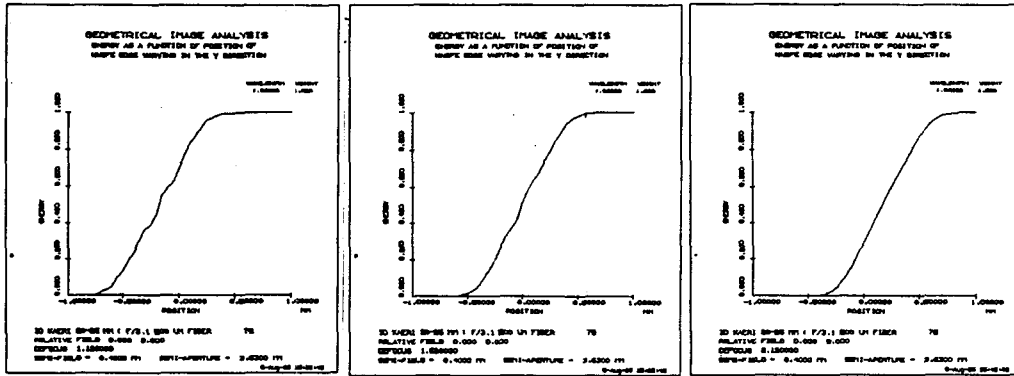


그림 3 렌즈에 의한 레이저빔 집광

#### 2-4-4 컴퓨터를 이용한 광선추적

본 설계에서는 그림 1 과 같은 용접광학계의 수차분석 및 기하학적 광선추적을 이용하  
여 컴퓨터 분석을 하였다. 그림 4 는 그림 1 과 같은 광학계에서 용접부 면에서의 초점  
거리 변화에 따른 에너지 분포도이다. 이 분포도는 Y 축(그림 1 의 수평축) 방향의 칼날  
(knife edge) 이동에 따른 에너지 분포이다. 그림 4 의 좌측으로 부터 용접면을 최적 초점  
면에서 -0.5, 0, +0.5mm 만큼 이동하였을 때의 에너지 분포를 나타낸다. -0.5mm 이동시(최  
적면의 윗방향) 레이저의 분포는 최적면에 비해 용접 상단부(그림 1 에서 +Y 방향)의  
power density 감소를 볼 수 있다. 각각의 경우 계산된 spot size 는 최적 초점면에서의  
1.1mm 를 중심으로 +0.5mm 의 이동에 대해 약 10% 이내의 spot size 변화를 보여주고 있  
다. 따라서 이결과를 볼때 용접면에서의 초점깊이는 약 +0.5mm 정도인 것으로 판단되었  
다.



$\delta f = -0.5\text{mm}$

$\delta f = 0\text{mm}$

$\delta f = +0.5\text{mm}$

그림 4 칼날 이동에 따른 에너지 분포도

### 3. 결론

원자력발전소 증기발생기 전열관 용접에 응용하기 위한 레이저 광섬유 전송 광학계를 설계하였다. 경제성, 활용성, 실제 발생 할 수 있는 정렬오차등을 설계에 반영하였으며 컴퓨터를 이용한 광선추적을 계산하여 광학계 분석을 시도하였다.

3차 구면수차 분석을 통하여 수차가 최소로 되는 초점면 및 수차를 확인하여 보다 정확한 분석을 할수 있었으며 레이저 출력 변수가 150 mm.mrad 이며 800  $\mu\text{m}$ 의 광섬유를 사용할때, 초점면의 충분한 power density 와 +0.5mm 정도의 초점거리를 유지 할 수 있는 최종 용접부의 F#를 3.1 정도로 유지할 수 있었다.