

## 레이저에 의한 집속형 램파의 집속도 향상을 위한 원호형 슬릿 설계

### Arrayed-Arc Slit Design to Improve the Focusing Effect of the Focused Lamb Wave by Laser

장경영\*<sup>†</sup>, 김홍준\*\*, 신민재\*\*, 김재열\*\*\*

Kyungyoung Jhang\*<sup>†</sup>, Hongjoon Kim\*\*, Minjea Sin\*\* and Jaeyeol Kim\*\*\*

초 록 최근 램파를 비파괴검사에 이용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도, 레이저에 의해 집속형 램파를 발생시키는 방법은 비접촉식 검사의 장점과 함께 높은 공간분해능을 기대할 수 있다. 이 방법에서 레이저는 원호배열슬릿을 통하여 판재 표면에 조사되는데, 발생된 램파의 에너지가 원호배열의 초점에 집속되는 효과를 갖게 된다. 이 때 공간분해능의 향상은 램파의 집속도를 높임으로써 가능하다. 본 논문에서는 높은 집속도의 램파를 발생시키도록 원호형 슬릿을 설계하기 위해 슬릿의 형상인자와 램파의 집속도 사이의 관계를 분석하였다. 그 결과, 레이저조사반경과 원호각, 원호수를 증가시키거나 원호반경과 파장을 감소시킴으로써 집속도를 높일 수 있다는 것을 알 수 있었으며, 본 연구의 결과는 적절한 원호형 슬릿의 설계기준으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요용어: 원호형 슬릿, 레이저-초음파, 램파, 집속

**Abstract** In recent, Lamb wave has been actively studied for non-destructive testing of plate. Among those studies, laser generation method of focused Lamb wave is expected to have high spatial resolution with advantages of non-contact testing. In this method, the laser beam is illuminated on the surface of object by through an arrayed-arc slit, and then the energy of the generated Lamb wave is concentrated at a focus of arc. This focusing effect improves the spatial resolution, which is dependant on the geometries of arrayed-arc slit. In this paper, the relationships between the parameters of arc-shaped slit and the focusing ability of the generated Lamb wave was investigated by the simulation based parametric study. The results show that to improve the focusing effect, radius of illuminated laser, angle of arc and number of arcs must be increased, which minimum radius of arc and distance between arcs(=wavelength) must be decreased. These results are expected to be used as a guide to design the proper shape of slit.

**Keyword:** arrayed-arc slit, laser-ultrasonics, Lamb wave, focusing









#### 1. 서 론

유도초음파(Guided Wave)의 일종인 램파를 이용

한 비파괴평가법은 판재로 구성된 구조물의 검사에 가장 적합한 것으로 알려져 있다[1,2]. 그러나 기존 의 PZT (Piezoelctric transducer)에 의한 접촉식 검

사법은 대상체에 램파를 전파시키기 위해 접촉매질을 필요로 하기 때문에 검사의 자동화가 어려울 뿐만 아니라, 고온환경, 방사능이나 화학물질 등에 의한 유해환경, 접촉식 탐촉자를 밀착시킬 수 없는 굴곡부 등에는 적용하기 어려웠으므로, 비접촉식 비파괴 평가법의 필요성이 대두되었다. 이러한 필요성에 의해 전자초음파탐촉자(electro magnetic acoustic transducer; EMAT)[3], 에어커플 트랜스듀서(air-coupled transducer)[4], 레이저[5-7] 등에 의한 여러 종류의 비접촉식 램파 발생기법이 연구되기 시작하였다. 이 중, 레이저에 의한 방식은 초기의 레이저에너지에서 탄성파에너지로의 낮은 변환효율을 극복할 수 있도록 하는 기법들이 등장함으로써 주목받는 비접촉식 램파 발생기법으로 대두되고 있다. Table 1은 레이저를 이용한 램파발생기법의 대표적 유형과 그 특징을 정리하여 나타내고 있다.

Table 1 Comparison of Lamb wave generated by laser as different source types

	Source Type			
	Point	Line	Line-array	Arc-array
Directivity	Bad	Good	Good	Good
Frequency bandwidth	Wide	Wide	Narrow	Narrow
Focusing	X	X	X	O
Wave propagation				
Wave form				

초기에는 레이저를 한 점에 집중시켜 램파를 발생시켰는데, 이러한 방법에서는 램파의 에너지가 특정방향으로 전파하지 못하고 흩어지므로 발생한 램파의 강도가 매우 미약했다. 이를 해결하고자 레이저를 선형으로 조사함으로써 지향성이 우수한 램파를 발생시키는 방법이 고안되었다[8]. 그런데, 단일 선형소스에 의한 램파는 분산성이 그대로 남아 있으므로, 주파수성분이 일정한 램파를 발생시키고자 선형 소스를 등간격으로 여러 개 배열하여 파장이 일정한 램파를 발생시키는 방법이 등장하였다[9].

그러나, 선형배열소스에 의해 발생한 램파는 공간적으로 집중되지 않아 비파괴평가에 이용시 공간분해능과 결합검출능력이 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Fig. 1에서 보는 바와 같이 선형배열 대신 원호형 배열을 이용하여 발생한 램파를 원호의 중심점에 집중시키는 방법이 최근에 제안된 바 있다[10].

그런데, 원호형 배열에 의해 발생한 집중형 램파를 비파괴 평가에 이용하는 경우 램파의 집중도가 높을수록 결합의 검출능력과 공간분해능을 향상시킬 수 있다. 집중도는 소스의 형상과 밀접한 관련이 있으며 소스의 형상은 원호형 슬릿에 의해 결정된다. 따라서, 원호형 슬릿의 형상을 적절하게 설계함으로써 결과적으로 결합검출능력과 공간분해능을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서는 적절한 원호형 슬릿의 설계를 위해 원호형 슬릿의 형상과 집중도의 관계를 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 그리고, 슬릿의 형상인자들이 어떻게 설정되어야 하는지를 연구하였으며, 적절한 원호형 슬릿의 설계를 위한 기준을 제시하고자 하였다.

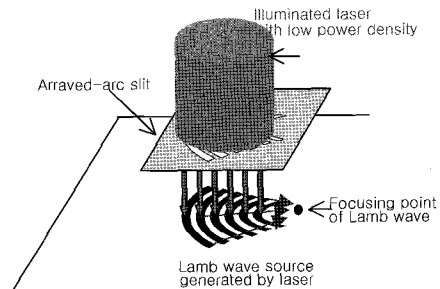


Fig. 1 Laser generation of focused Lamb wave

## 2. 슬릿형상인자와 집중도 평가지표의 정의

### 2.1. 원호형 슬릿 형상인자의 정의

Fig. 2에서는 집중능력에 영향을 미치는 것으로 예상되는 슬릿의 형상인자와 조사 레이저빔의 크기 및 위치에 대해 설명하고 있다. 레이저의 조사반경, 원호의 수, 원호반경, 원호각, 원호폭/원호간격, 원호간격을 파라미터로 하여 각각의 변화에 대해 램파 집중도의 변화를 계산하였다. 각각의 경우에 대해 초기 설정치는 Table 2와 같다.

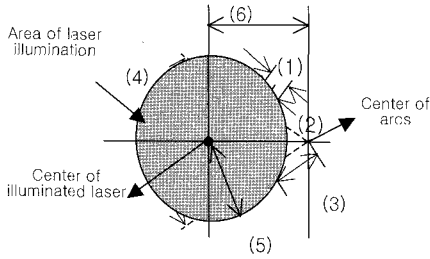


Fig. 2 Slit parameters for simulation : (1)  $D_a$ : Distance between arcs( = wavelength), (2)  $W_a$ : Width of arc, (3)  $R_a$ : Minimum radius of arc, (4)  $\theta_a$ : Angle of arc, (5)  $R_L$ : Radius of laser beam, (6)  $D_i$ : Distance from center of arcs to center of laser beam, (7)  $N_a$ : Number of arc

Table 2 Initial values of parameters for simulation

Parameter	Initial value
Radius of laser beam $R_L$	10 mm
Minimum radius of arc $R_a$	15 mm
Arc width/distance between arcs $W_a / D_a$	0.5
Angle of arc $\theta_a$	60°
Number of arc $N_a$	6
Wave length (=Distance between arcs $D_a$ )	1.65 mm

2.2. 램파 집속도의 평가지표

Fig. 3에서는 슬릿수 6, 원호각 608, 레이저 조사 반경 10 mm, 원호간격 1.65 mm, 원호폭 0.825 mm, 최소원호반경 15 mm인 슬릿을 통과한 레이저에 의해 발생한 초음파의 초기 강도분포와 그로부터 전파된 초점부근에서의 강도분포 및 초점에서의 횡단면과 종단면을 보여주고 있다. 이것은 후술되는 수치계산에 의해 구한 것으로, 횡단면 및 종단면선도로부터 집속도를 나타내기 위한 지표를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$I_{max}$  : 최대 강도(Maximum intensity), 강도가 최대가 되는 위치에서의 강도

$D_f$  : 초점깊이(Focal depth), 최대강도의 절반이 되는 지점과 최대강도가 되는 지점 사이의 종방향 거리

$W_f$  : 초점폭(Focal width), 최대강도의 절반이 되는 지점과 최대강도가 되는 지점 사이의 횡방향 거리

$F_{eff}$  : 집속효과(Focusing effect),  $I_{max}/(D_f \times W_f)$

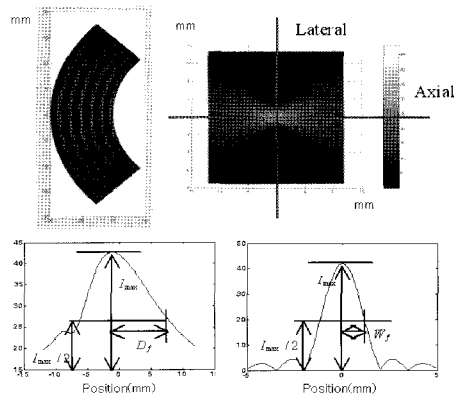


Fig. 3 Initial intensity distribution of laser-generated Lamb wave for simulation (upper left) and Lamb wave intensity distribution around focusing area propagated from the initial distribution (upper right) with its axial(down left) and tangential(down right) cross section (Number of arc: 6, Angle of arc: 60°, Radius of laser beam: 10, Distance between arcs: 1.65 mm, Arc width: distance between arcs/2, Minimum radius of arc: 15 mm)

3. 시뮬레이션 모델

원호형 슬릿의 형상인자의 변화에 따른 집속도의 변화를 조사하기 위해 시뮬레이션을 이용하였다. 시뮬레이션에서는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 원호 슬릿을 작은 격자의 집합체로 가정하고 격자 한 개를 하나의 독립적인 램파의 포인트소스(Point Source)로 가정한다. 그리고 개별 소스들로부터 발생한 파동이 전파하면서 관찰지점에서 중첩되어 나타나는 강도를 계산하였다. 또한, 일정한 영역내의 모든 관찰지점에서의 강도분포를 구하여 이로부터 집속도를 평가하였다.

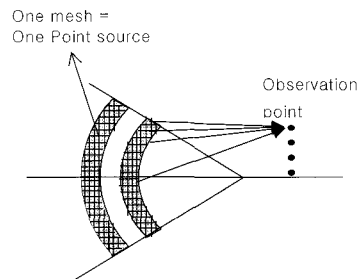


Fig. 4 Simulation model for calculation of the wave intensity distribution

이때, 소스에서 발생하는 파동은 단일주파수의 조화파로 가정하였다. 포인트 소스로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 임의의 측정점에서의 파동의 진폭을  $A(r)$ , 각주파수를  $\omega$ , 파수를  $k$ 라고 하면, 측정점에서의 변위는 다음과 같이 주어진다.

$$w(r,t) = A(r)e^{-j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

램파는 판재 내부를 2차원적으로 전파하므로 원통파와 비슷한 양상으로 전파한다고 할 수 있다. 따라서, 진폭  $A(r)$ 은  $r$ 의 제곱근에 반비례하는 것으로 생각할 수 있다. 즉,

$$A(r) = A_0 / \sqrt{r} \quad (2)$$

여기서,  $A_0$ 는 초기진폭이다. (1)과 (2)식에서, 포인트소스로부터 거리  $r$ 만큼 떨어진 측정점에 전달되는 파동은 다음과 같이 표현된다.

$$A(r,t) = \frac{A_0}{\sqrt{r}} e^{-j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

그리고, 원호형 슬릿 내의 모든 포인트소스로부터 하나의 측정점으로 전파되는 파동을 중첩시키면 전체 소스로부터 전파된 임의의 측정점에서의 파동의 변위를 구할 수 있다. 따라서, 측정점에서의 파동의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(r,t) = \sum_x \sum_y A(r,t) = \sum_x \sum_y \frac{A_0}{\sqrt{r}} e^{-j(\omega t - kr)} \quad (4)$$

본 시뮬레이션에서 계산하고자 하는 것은 파동의 세기에 대한 상대적인 공간적 분포이기 때문에 (4)식에서 시간에 대한 항은 고려하지 않았다. 또한, 초기값  $A_0$ 의 경우 조사되는 레이저의 에너지 밀도에 비례한다고 가정하여 조사점을 중심으로 Gaussian분포를 이루도록 설정하였다. 이러한 조건들을 고려하면 실제로 시뮬레이션에서 계산되는 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W(r) = \sum_x \sum_y A(r) = \sum_x \sum_y \frac{A_0(\bar{r})}{\sqrt{r}} e^{jkr} = \sum_x \sum_y \frac{A_0}{\sqrt{r}} e^{(-r^2/2\sigma^2 + jkr)} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma = R_L / \sqrt{2}$ ,  $R_L$ 은 레이저 조사반경,  $\bar{r}$ 은 레이저 조사 중심으로부터의 거리이다. 본 시뮬레이션 모델에서는 발생 가능한 다양한 모드의 램파 중 원호간격과 일치하는 파장을 갖는 모드만 발생한다고 가정하였기 때문에 파장은 원호간격과 동일하게 설정하였다.

#### 4. 변위분포 측정실험

시뮬레이션 방법이 타당한지를 확인하기 위해 변위분포 측정실험을 수행하였다. 실험에서는 레이저 여기 램파의 변위분포를 마이켈슨 간섭계를 이용하여 측정하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 단, 여기서는 이론적 집중점 부근에서의 변위의 상대적 분포로부터 집중성을 확인하고자 하였으며 변위의 절대량에 주목하지는 않았다. 실험에 사용된 간섭계는 Fiberpro사의 MI7000이며, 레이저에 의해 발생한 집중형 램파의 변위분포를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같은 레이저-초음파 발생 및 측정 시스템을 구성하였다. 초음파의 발생을 위해 사용된 레이저는 Spectron Laser Systems사의 Pulsed Nd:YAG Laser로 1064 nm의 파장에 최대출력은 230 mJ이다. 또한 슬릿은 시편에 최대한 근접시켜 회절에 의한 영향을 억제하였다. 변위분포는 Fig. 6과 같이 원호형 슬릿의 기하학적중심(0,0)을 기준으로 하여 종방향과 횡방향으로 간섭계를 이동시키며 측정하였다.

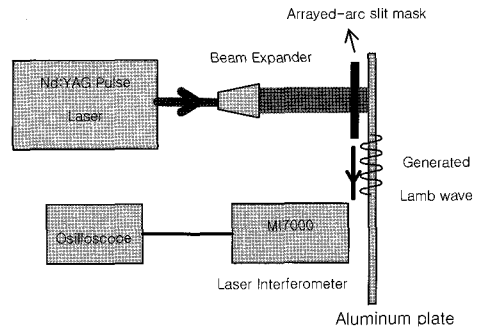


Fig. 5 Laser generation and detection system for measurement of intensity distribution of the focused Lamb wave

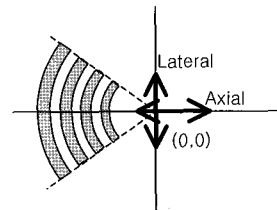


Fig. 6 Scanning range of the interferometer

Fig. 7은 간섭계에 의해 측정된 변위분포이다. 실험에서는 원호수 6, 원호각 120도, 레이저조사반경 8 mm, 원호간격 1.65 mm이며 원호폭은 원호간격의 1/2인 슬릿을 이용하였다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 각각

형방향, 종방향분포를 나타내고 있으며 실선은 시뮬레이션 결과이다. 실험에 의한 측정결과는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 앞에서 기술된 시뮬레이션에 의한 집속형 램파의 해석이 적합함을 보여준다. 따라서, 이후의 다양한 슬릿형상인자에 대한 집속성 평가는 실험을 별도로 수행하지 않고 계산결과만을 토대로 수행되었다.

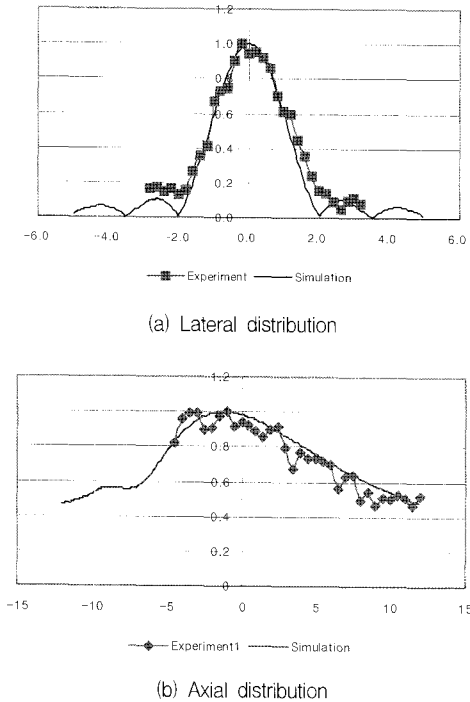


Fig. 7 The measured intensity distribution of focused Lamb wave generated by laser and the calculated one by simulation (solid line). (a) Lateral distribution (b) Axial distribution (Number of arcs: 6, angle of arc: 60°, radius of laser beam: 10, distance between arcs: 1.65 mm, arc width: (distance between arcs)/2, Minimum radius of arc: 15 mm)

### 5. 시뮬레이션에 의한 Parametric Study

각각의 슬릿형상인자들을 변화시키면서 그에 따른 집속효과의 변화를 계산하였다. 시뮬레이션에서 변수가 아닌 다른 인자들의 값은 Table 2의 값으로 설정되었다. 시뮬레이션의 결과들은 하나의 그래프에 표시하기 위하여 각각의 최대값들에 대한 상대적인 값으로 나타내었다.

#### 5.1. 레이저 조사반경 ( $R_L$ )

Fig. 8은 레이저조사반경의 변화에 따른 집속도 지표의 변화를 보여주고 있다. 레이저 조사반경의 변화는 초음파의 집속에 두 가지 상반된 영향을 미친다. 하나는 초음파를 생성하는 음원의 유효면적의 증가로 이로 인해 램파의 세기가 커지는 것이며, 또 한가지는 레이저 에너지의 밀도를 떨어뜨려 램파의 세기를 감소시키는 것이다. 시뮬레이션 결과는 이러한 상반된 효과를 잘 반영하고 있다. 레이저 조사반경을 6 mm에서 24 mm까지 점차 증가시키면 최대강도가 증가하다가 15 mm 이상이 되면 더 이상 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 초기에는 초음파 음원면적의 증가로 세기가 향상되지만 너무 확대되면 에너지밀도를 떨어뜨리기 때문이다. 반면, 초점의 폭과 깊이는 점차 감소하는 것으로 나타났는데, 이들은 에너지 밀도 자체에는 큰 영향을 받지 않기 때문이다.

최대강도의 상승이 멈추는 지점은 위에 서술한 첫 번째 효과가 슬릿 자체의 유효면적에 영향을 받기 때문에 슬릿의 전체적인 폭과 원호각 등의 요소를 고려하지 않고는 정확하게 결정하기 힘들다. Fig. 9는 슬릿 수가 2, 6, 10개일 때 레이저 조사반경에 따른 최대강도의 변화를 나타낸다. 최대가 되는 레이저 조사반경이 각각 8, 12, 16 mm로 슬릿 수가 증가함에 따라 최대가 되는 레이저 조사반경의 크기도 커지고 있음을 보여준다. 그러나 실제에서는 지나치게 조사반경을 크게 할 경우 레이저의 에너지밀도가 초음파를 발생시킬 수 없을 정도로 낮아지게 된다. 따라서, 열탄성영역의 탄성파를 발생시킬 수 있을 정도의 충분한 에너지 밀도를 갖는 한도 내에서 조사반경이 클수록 집속효과를 높일 수 있다고 할 수 있다.

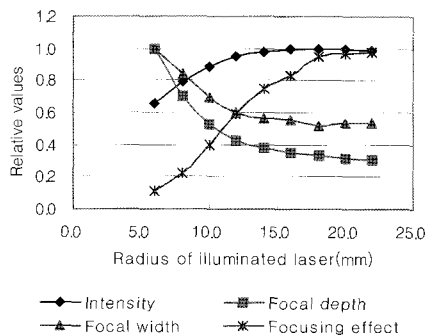


Fig. 8 Simulation results as variation of laser beam radius

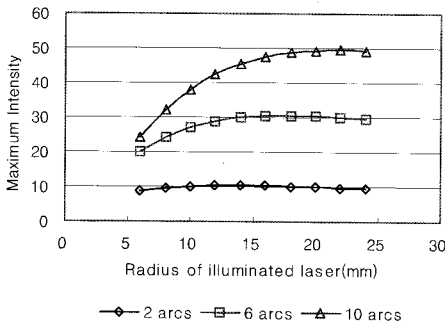


Fig. 9 Maximum intensity variation as increasing of laser beam radius when the number of arcs is 2(a), 6(b) and 10(c)

5.2. 최소원호반경 ( $R_a$ )

Fig. 10은 최소원호반경의 변화에 따른 시뮬레이션 결과이다. 최소원호반경의 증가는 레이저 조사면적이 동일할 경우 원호의 집속 각도를 줄이게 되어, 결과적으로 원호를 선형화한다. 이로인해 집속 효과가 저하되는데, 시뮬레이션 결과는 이러한 효과를 잘 보여주고 있다. 즉, 원호반경이 증가하면서 램파의 강도는 줄어들고 초점깊이와 폭이 모두 증가하여 초음파의 집속효과를 감소시킨다.

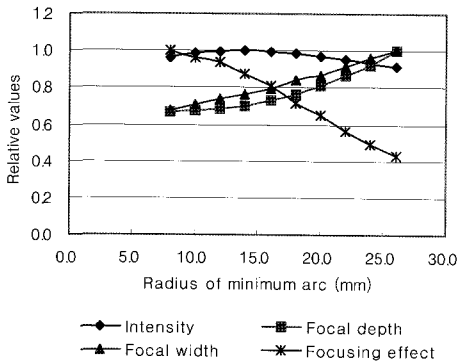


Fig. 10 Simulation results as variation of minimum radius of arc

5.3. 원호폭/원호간격 ( $W_a/D_a$ )

Fig. 11은 원호폭/원호간격의 변화에 따른 시뮬레이션 결과이다. 파장대비 원호의 폭(슬릿에서 레이저를 통과시키는 영역)의 비율을 어떻게 해야 최적의 집속 효과를 얻을 수 있는지를 확인하기 위한

시뮬레이션이다. 결과에서 확인되는 바와 같이 원호의 폭이 원호간격의 1/2이 되었을 때 최대의 초음파 강도를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 슬릿에서 레이저가 통과하는 영역이 이보다 더 증가하더라도 램파의 강도가 더 커지지 않는 이유는 발생한 램파 사이에 서로 상쇄간섭을 일으키기 때문이다. 초점깊이와 초점폭은 원호폭/원호간격의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

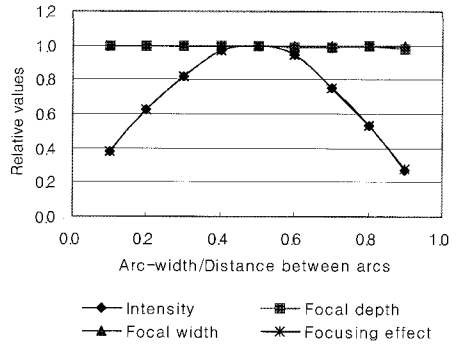


Fig. 11 Simulation result as variation of arc-width / distance between arcs

5.4. 원호각 ( $\theta_a$ )

Fig. 12에서는 원호각을 30도에서 150도까지 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과를 나타내었다. 원호각의 증가에 따라 집속효과가 향상됨을 알 수 있다. 그러나, 120도 이상이 되면 큰 효과를 보지 못하게 되는데, 이것은 120도 이상의 원호각이 되면 원호각의 증가로 인해 새로이 추가되는 원호의 영역이 레이저조사반경의 바깥쪽에 위치하여 초음파 소스로서의 역할이 미약하기 때문인 것으로 사료된다.

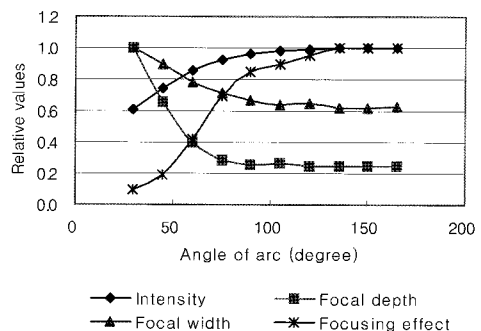


Fig. 12 Simulation result as variation of angle of arc

5.5. 원호수 ( $N_a$ )

Fig. 13은 원호수 증가에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 원호수의 증가는 유효소스면적을 증가시킨다는 점에서 집속효과를 증대시킬 것으로 예상되는데, 시뮬레이션 결과도 이를 잘 보여주고 있다. 다만, 레이저의 조사반경에 한계가 있기 때문에 점차 램파 강도의 증가세는 줄어들게 된다. 반면, 초점깊이와 초점폭은 지속적으로 증가하고 있다. 이처럼 원호수의 증가는 강도면에서는 유리하나 집속효과의 측면에서는 한계를 가짐을 알 수 있다. 본 연구의 경우 원호수가 10개를 넘어가면서 집속효과의 증가세가 둔화되는 것을 알 수 있다.

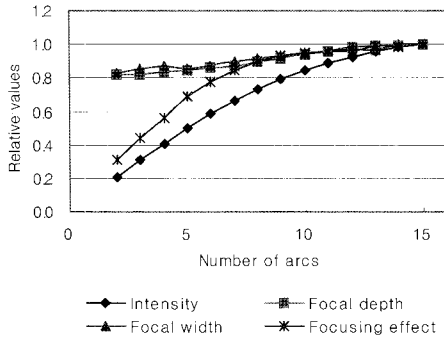


Fig. 13 Simulation result as variation of number of arcs

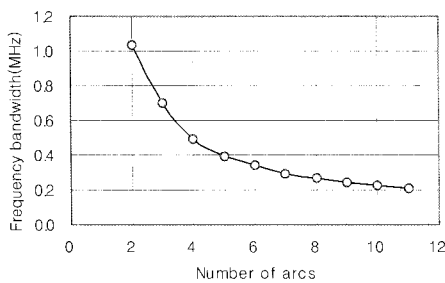


Fig. 14 Variation of frequency bandwidth as increasing number of arcs

한편, 다른 형상인자들과는 다르게 원호수의 변화는 주파수 대역폭을 변화시킬 것을 예상할 수 있다. 이러한 변화를 조사하기 위해 원호수를 변화시켜가며 주파수 대역폭을 계산하였다. 그 결과가 Fig.14에 나타나 있다. 원호수의 증가로 인해 주파수대역폭이 지속적으로 감소하고 있음을 보여주고

있다. 주파수대역폭은 S/N비 측면에서 작을수록 좋다고 할 수 있는데 본 연구의 경우 원호수가 6개 이상이면 비교적 대역폭의 감소에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

5.6. 파장(=원호간격,  $D_a$ )

원호간격은 발생하는 램파의 파장과 일치한다. 따라서, 원호간격을 변화시킨다는 것은 곧 발생시키고자 하는 파장을 변화시키는 것을 의미한다. Fig 15에는 이러한 원호간격의 변화가 집속효과에 미치는 영향을 보여준다. 최대강도와 초점깊이, 초점폭 모두 원호간격의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 최대강도의 증가는 원호간격의 증가에 의한 소스면적의 증가로 인한 것인데, 초점깊이와 폭이 함께 증가하므로 결과적으로는 집속효과를 저하시키는 것으로 나타났다.

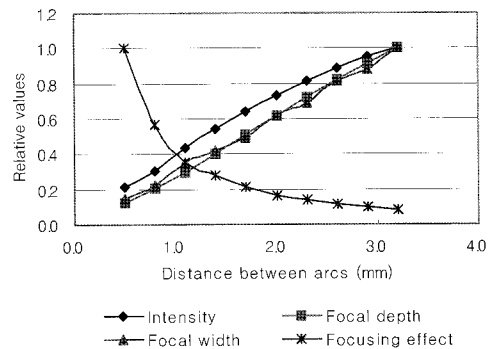


Fig. 15 Simulation results as variation of distance between arcs

6. 결 론

레이저에 의한 집속형 램파의 집속효율을 높이기 위한 원호형 슬릿의 설계기준을 확립하기 위하여 시뮬레이션을 이용하여 집속도와 슬릿형상인자 사이의 관계에 대해 분석하였다. 그리고 시뮬레이션 기법이 타당한지의 여부를 실험적으로 확인하고자 레이저에 의해 발생시킨 집속형 램파의 음압분포를 마이켈슨 간섭계를 이용하여 측정하고 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 그 결과 시뮬레이션이 실험에 의한 결과를 대신할 수 있을 정도로 잘 일치함을 보여주었다. 시뮬레이션에 의한 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 레이저 조사 반경은 열탄성영역의 초음파를 발생시킬 수 있는 정도의 에너지 밀도를 유지하는 한도 내에서 가능한 크게 한다.
- 2) 원호 반경은 작을수록 집속도가 증가한다.
- 3) 레이저 조사반경이 충분히 크다면 원호각은 클수록 집속도를 높일 수 있다.
- 4) 원호폭은 원호간격의 1/2일 때 집속도가 가장 높다.
- 5) 원호수는 많을수록 초음파의 강도를 증가시키고 주파수대역을 줄이지만 초점깊이와 초점폭 역시 증가시킨다. 본 연구에서의 경우 6개 이상의 원호는 주파수대역의 감소에 큰 영향을 미치지 않는다.
- 6) 원호간격(파장)의 증가는 집속효과를 떨어뜨린다.

## 후 기

본 연구과제는 조선대학교 레이저 응용 신기술개발 연구센터(LARC)의 연구비 지원에 의해 수행된 것임.

## 참고문헌

- [1] U. Bork and R. E. Challis, "Nondestructive evaluation of the adhesive fillet size in a t-peel joint using ultrasonic lamb waves and a linear-network for data discrimination," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 1, pp. 72-84, (1995)
- [2] D.N. Alleyne, and P. Cawley, "The interaction of lamb waves with defects," *IEEE Transaction Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 39, No. 3, pp. 381-397, (1992)
- [3] D. A. Oursler and J. W. Wagner, "Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves," *Material Evaluation*, Vol. 53, pp. 593-597, (1995)
- [4] A. Gachagan, G. Hayward, S. P. Kelly and W. Galbraith, "Characterization of air-coupled transducers," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 43 No. 4, pp. 678-689, (1996)
- [5] R. J. Dewhurst, C. Edwards, A. D. McKie and S. B. Palmer, "Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, No. 14, pp. 1066-1068, (1987)
- [6] D.A. Hutchins and K. Lundgren, "A laser study of transient Lamb waves in thin materials," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 85, No. 4, pp. 1441-1448, (1987)
- [7] Y. Tsukahara, "Analysis of the elastic wave excitation in solid plates by phase velocity scanning of a laser beam," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 59, No. 25, pp. 2384-2385, (1991)
- [8] J. Huang, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach, "Laser-generation of narrow-band surface waves," *Ultrasonics Symposium, Proceedings.*, IEEE 1991, pp. 537-541, (1991)
- [9] D. Cerniglia, K. Y. Jhang and B. B. Djordjevic, "Non-Contact Ultrasonic testing of Aircraft Lap Joint," *Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing*, edited by G. Nardoni et al., Italian Society for NDE, 161st in CD title, (2000)
- [10] K. Y. Jhang, H. J. Kim, H. M. Kim and J. Ha, "Laser Generation of Focused Lamb Waves," *Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 6, pp. 637-642, (2002)