

## 금형내의 레이저에 의한 규소강판 적층가공에 관한 연구

강형식\* · 박인태\* · 박흥식\*\* · 전태옥\*\*

### A Study on the Laser Lamination Joining of Silicon Steel Sheets with Die

Kang Hyoung Shik\*, Park In Tae\*, Park Heung Sik\*\*, Jun Tae Ok\*\*

#### ABSTRACT

The technology of Laser lamination joining of silicon steel sheets has been studied in this paper. Conventional sheets lamination process does not meet the requirements for the improvement electric parts performance. In response to this, a new Laser spot joining method has been developed. This study performs the Laser spot lamination joining while synchronizing the silicon steel sheets in the dies with the press movement. Several conclusions have been drawn in this paper. Effects of beam focus, power, atmosphere gas and press oil etc.

**Key Words** : Lamination die (적층금형), Laser spot welding (레이저 스폿트 용접), Lamination joining (적층접합), Silicon steel sheet (규소강판)

#### 1. 서 론

레이저 가공은 레이저 빔 (beam)을 렌즈 또는 반사경으로 집광시켜서 얻어지는 높은 밀도의 빛을 이용하는 가공법으로 재료접합, 물질제거, 박막형성 및 표면개질 등 여러종류의 가공이 가능하다.<sup>(1,2)</sup> 근년, 레이저 가공기술의 발전에 따라 고기능, 고부가가치 제품의 가공과 더불어 compact화, 비용절감 및 설계를 단순화하는데 이용되고 있으며, 제품 및 부품의 marking, trimming, cutting, drilling, joining, repairing 등 광범위하게 생산설비에 도입되고 있다.<sup>(3-5)</sup>

일반적으로 전기, 전자기기 분야에서의 기간부품으로

되어 있는 motor, transformer 및 자기 head 부품 등의 가공에 있어서 지금까지 생산지향의 방법으로 일관화되어 있으며, 주로 금형에서 가공된 부품들은 수작업으로 적층하여 용접하거나 기계적인 접합 (caulking) 방식에 의해 2차 가공되고 있는 실정이다. 이러한 방법들은 가공변형에 의한 정도저하, 자력손실 및 절연 등의 문제점이 발생되고 있다. 여기에 대하여 최근에는 고정도, 고효율화 및 고품질화의 목적으로 레이저를 이용한 가공방법이 응용되고 새로운 제조공법이 개발되고 있다.<sup>(6-12)</sup>

레이저를 이용한 금형내에서 편칭에 의하여 박판을 순차적으로 접합하는 적층가공의 고정도화 (진원도, 진직도 및 적층 소재의 두께 등)를 실현하기 위해서는 레이저

\* LG 전자 생산기술센터  
\*\* 동아대학교 기계공학과

광의 선정이 문제가 되며, 이러한 레이저 광의 종류에는 YAG 고체 레이저와 CO<sub>2</sub>, Ar 이온 및 XeCl 등의 기체 레이저가 있지만 프레스 금형에 조합하여 사용하기 위해서는 강판을 필요한 강도로서 고찰시킬 수 있는 레이저 에너지와 고속 프레스 가공에 적합한 연속 발전성의 필요하며, 이를 위해서는 YAG와 CO<sub>2</sub> 레이저가 적합하다고 알려져 있다.

본 연구에서는 기존의 용접적층가공법에서 프레스가공과 적층가공이 별도로 분리되어 적용되었던 것을 레이저를 이용하여 레이저 발전장치로부터 레이저 빔을 프레스 금형에 광 fiber로 전송하고 또한 가공현장에서의 환경적 문제를 고려하여 YAG 레이저를 사용하여 전기, 전자분야의 소재로 주로 이용되고 있는 규소강판의 적층 제조방법으로 프레스 금형내에서 편칭가공과 동시에 레이저 적층가공을 일체화시킨 레이저 빔 가공에 대한 최적가공 조건을 결정하고자 하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료 및 실험장치

본 연구에서 사용된 재료는 폭 53mm, 길이 100m 및 판두께 0.5mm이고, SiO<sub>2</sub>로 피막된 냉간압연 로울재료의 시판용 규소강판인 S18, S30 및 S60 으로 이들의 기계적 성질은 Table 1에, 그리고 화학적 성분을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of silicon steels.

	Composition (%)				
	C	Si	Mn	P	S
S 18	0.01	2.0	0.2	0.015	0.005
S 30	0.01	1.3	0.2	0.015	0.01
S 60	0.01	0.3	0.2	0.015	0.01

Table 2 Mechanical properties of silicon steels.

	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
S 18	465	34.0	168
S 30	423	35.0	143
S 60	361	36.8	126

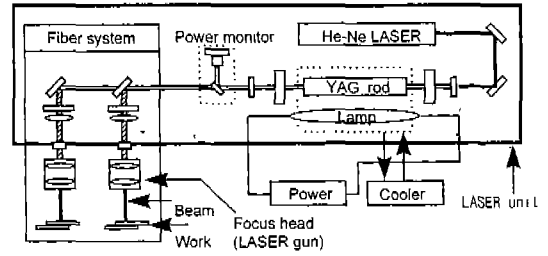


Fig. 1 Schematic diagram of LASER unit apparatus.

실험장치는 Fig. 1에 나타낸 바와같이 Nd-YAG 레이저 장치로서, 이것은 파장 1.064 $\mu$ m에 multimode의 빔으로 최대 400W의 레이저 조사가 가능하다. 금형에서 블랭킹되는 소재를 대칭으로 양단에 접합하기 위하여 2개의 분할 출력 시스템을 구성하는 형식으로 레이저 발전기에서 전송되는 빔을 1/2 반사거울을 통하여 2개소에서 각각 반사시켜 전송되는 레이저 출력을 반으로 감소시킨다. 분기된 2개의 빔 연결은 레이저 가공기와 프레스 금형과의 원적조정하여 설치의 용이성 및 Nd-YAG 레이저 가공기에 가능한 광 fiber system을 적용하였다. 광 Fiber (석영, GI Type,  $\phi$  0.6 mm)는 10m의 길이로서 조사장치를 거쳐 빔이 조사되며, 조사부에서는 레이저 빔 가공시 발생하는 스패터(splatter) 및 증발가스를 방지하기 위하여 보호유리를 설치 하였고, 레이저 빔과 동일한 축을 이루도록한 노즐을 통하여 아르곤 가스 및 공기를 각각 30 l/min 로 공급되도록 하였다.

그리고 금형가공용 프레스는 최대하중 50 톤인 eccentric 프레스로서, 레이저 집광기구에 의한 레이저 조사장치가 프레스 금형의 내부 양측단에 설치된 레이저 적층용 금형으로 이의 개요도를 Fig. 2에 나타내었다.

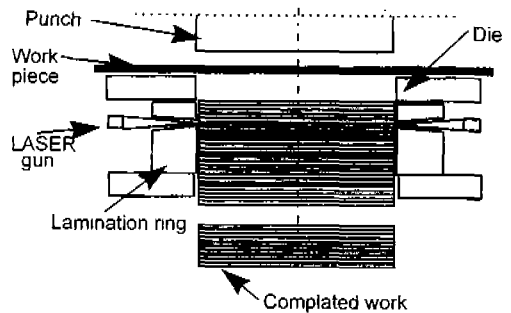


Fig. 2 Schematic diagram of LASER lamination die

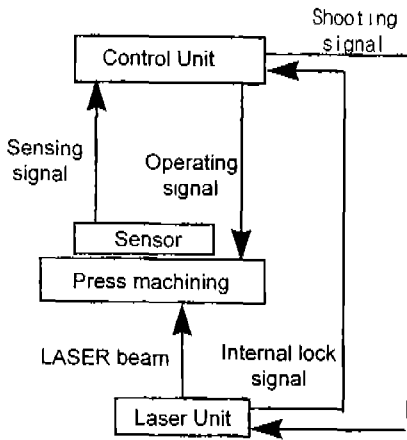


Fig. 3 Diagram of control system.

이것은 일반 프레스 금형구조에 Fig. 3과 같은 제어회로에 의하여 프레스에 설치한 근접 센서로서 편치 하사점의 위치신호를 받아들여 제어기에서 레이저 빔 조사신호를 발생시켜, 발생된 레이저 빔의 열원으로 프레스 금형작업과 동일화 시킨 상태에서 금형내에서 편치에 의하여 편칭된 전후 소재와 소재를 레이저 접합하여 적층가공이 되고, 또한 제어기에 의해서 설정된 매수의 결정 및 적층 수량을 조절하여 레이저 스폿트(spot)접합이 가능한 시스템으로 되어 있다.

### 2.2 실험방법

금형내에서 1회의 편칭이 이루어 지면 적층소재에 레이저 빔이 1회 조사되어 접합되므로 금형의 편칭, 부품의 적층 및 레이저 접합의 3가지 기능이 동시에 이루어 지게 된다. 레이저 발진기에서 발진된 레이저 빔은 광 fiber를 통하여 전송되고 조사장치에 의해서 조사됨으로서 프레스 금형에서 1회 편칭에 따른 1회의 레이저 스폿트 접합이 가능하고, 이것을 계속하게 되면 적층이 이루어진다. 이때 적층된 소재 사이의 원활한 분리를 위해 분리시점에서는 레이저 빔의 조사가 이루어지지 않도록 하였다. 그리고 금형의 수명과 고속화를 위하여 프레스 oil을 사용하였으며, 레이저 빔의 조사영향을 비교하기 위하여 일반 프레스 oil과 급속건성 oil을 사용하였다.

레이저 가공은 다양한 파라미터(parameter)에 의해 영향을 받는다. 레이저 접합의 경우는 특히 레이저 출력, 초점거리 및 보조가스의 영향이 크게 미치므로 본 실험

에서는 이들 3가지를 주요 파라미터로 선정하여 Table 3과 같은 조건으로 실험을 수행하였다.

Table 3 LASER lamination test parameters.

Parameters	Conditions
1. LASER power (J/s)	3.0 ~ 7.5
2. Focus length (mm)	Focus / Defocus(+2)
3. Atmosphere	Ar Gas, Air

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 초점거리 및 레이저 출력의 영향

Fig. 4는 규소강판 S60의 경우 레이저 스폿트 접합부의 용입깊이(penetration)에 미치는 초점거리 영향에 나타내었다. 레이저 스폿트 접합부는 초점거리의 변화에 따라 두 가지의 용입형태로 구분되며, 그림중의 점선부는 점선 위 부분의 심용입형(deep type) 용융부와 아래 부분의 열전도형(shallow type) 용융부의 경계선을 표시하고 있다. 그림에서 초점에서 7mm 벗어난 거리(defocus)까지는 심용입형 용융부를 나타내며 그 이상의 초점거리에서는 열전도형 용융부를 형성하고 있다. 또한 용입깊이는 초점에서 1mm 까지 벗어났을 때 가장 깊게 나타나며, 그 이상의 거리에서는 용입깊이가 점점 감소하

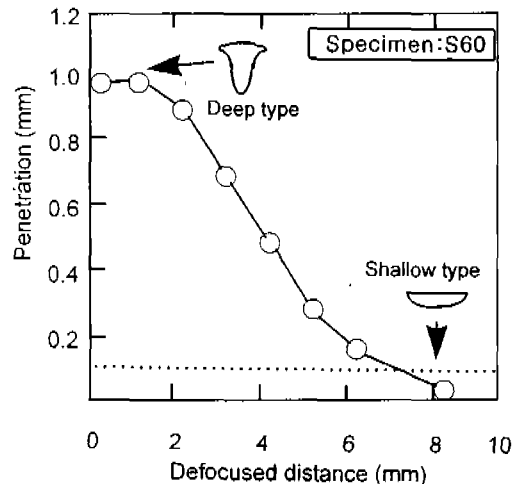


Fig. 4 Effect of defocused distance on penetration

는 것을 볼 수 있다. 한편 초점에서 1mm까지의 용융부 중심에는 크레이터(crater)가 형성되면서 격렬한 금속의 증발현상과 용입형성이 불안정하게 되었다. 초점에서 벗어남에 따라 용융부의 형태가 심용입형에서 열전도형으로 전환되는 것은 defocus에 따른 레이저 에너지 밀도가 감소하기 때문이며, 초점거리가 1mm 까지 용입깊이가 가장 크게 형성되는 것은 레이저 빔 에너지가 집중되고 분포형태가 가우스 형<sup>(6)</sup>으로 레이저가 조사되어 중심부의 레이저 광강도가 크고 또한 부분적으로 증발현상과 스패터가 형성되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 레이저 출력의 변화에 따른 레이저 스폿트의 defocus와 focus의 경우 S60의 너깃(nugget)

의 표면직경 및 용입깊이를 나타낸 것으로 레이저 출력의 증가에 따라 defocus와 focus 모두 너깃의 표면직경 및 용입깊이가 증가함을 알 수 있다. 여기서 defocus 거리는 초점에서 2mm이다. focus 상태에서는 레이저 출력에 관계없이 전술한 바와같이 크레이터와 스패터 형성과 같은 불안정한 현상을 확인하였고, defocus 부근에서는 안정된 표면형상 및 용입깊이가 얻어졌다. 따라서 레이저 빔을 조사할 경우에는 focus 보다는 defocus를 하는 것이 유리하며, 또한 defocus가 2mm 이상이 되면 지나치게 표면형상이 크지고 용입깊이가 낮아지므로 defocus는 2mm로 하는 것이 가장 양호하다고 생각된다.

Fig. 7은 defocus의 경우 레이저 출력의 변화에 따른 적층력을 나타낸 것으로서 실험결과에서 3.0 J/s 이하의 레이저 출력에서는 적층력이 불안정하였기 때문에 본 연구에서는 레이저 출력을 3.0 J/s 이상으로 하였다. 그림에서 출력이 증가할 수록 적층력도 선형적으로 증가하고, 레이저 출력이 3.0 J/s 에서는 너깃 외경이 작아서 접합력이 불안정하고, 6.5 J/s 이상에서는 과도한 에너지의 영향으로 스패터의 비산이 심하고 다량의 증발가스도 발생되었다.

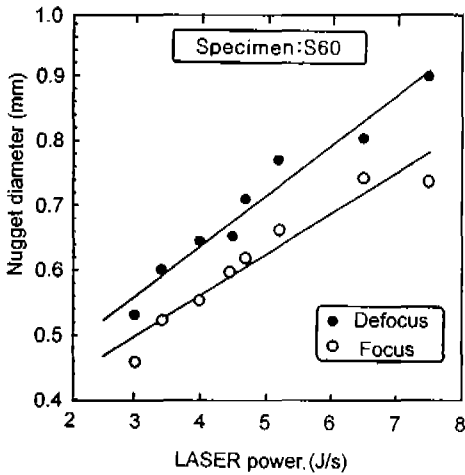


Fig. 5 Relation between nugget diameter and LASER power.

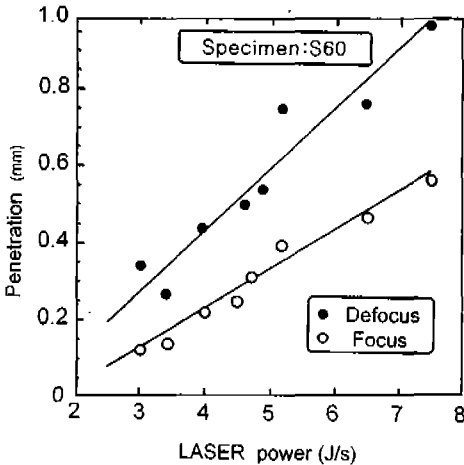


Fig. 6 Relation between penetration and LASER power.

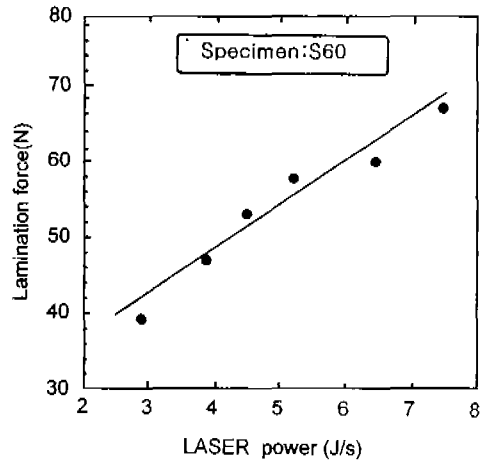
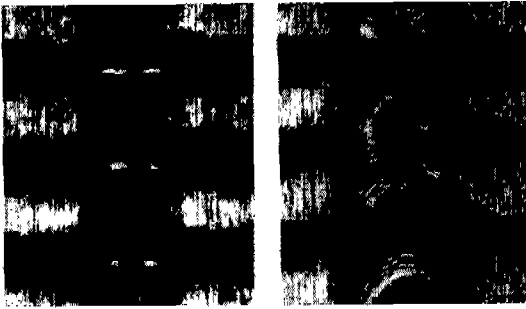


Fig. 7 Variation in lamination force with LASER power.

Fig. 8은 레이저 출력이 (a) 3.0 J/s의 저출력과 (b) 6.5 J/s의 고출력에서의 S60의 표면형상을 나타낸 것이다. 그림에서 (a)인 저출력 상태에서는 적층접합을 형성시켜 주는 너깃직경이 적기 때문에 접합을 형성하는 직경 근방의 접합길이가 짧고, 또한 (b)인 고출력의 경우에는 과도한 에너지의 집중에 따라 다량의 증발가스, 크레이터

및 스패터가 발생되고 너짓의 오버 랩(over lap) 현상이 일어난 것을 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서 접합부의 양호한 적층력을 고려한 레이저 출력 구간은 저출력에 의한 접합력의 불안정과 고출력의 스패터 발생 방지를 고려하면 4.0~5.2 J/s가 적정하다고 생각된다.



(a) Lower power(3.0J/s) (b) High power(6.5J/s)  
Fig. 8 Photographs of lamination surface.

3.2 보조가스의 영향

Fig. 9에서는 3 종류의 시험편 S18, S30 및 S60을 이용하여 레이저 출력을 5.2 J/s로 하고, 2 가지 보조가스 즉, 아르곤 가스와 공기를 노즐에 각각 수직으로 공급 하였을 때 시험편 재료와 보조가스인 분위기 가스의 변화에 따른 적층력의 최대값, 최소값 및 그 평균값을 나타낸 것이다. 그림에서 적층력은 보조가스가 공기의 경우가 아르곤 가스의 경우보다 최대값과 최소값의 편차가 큰 범위에서 변동하고, 또한 평균값의 크기도 공기의 경우가

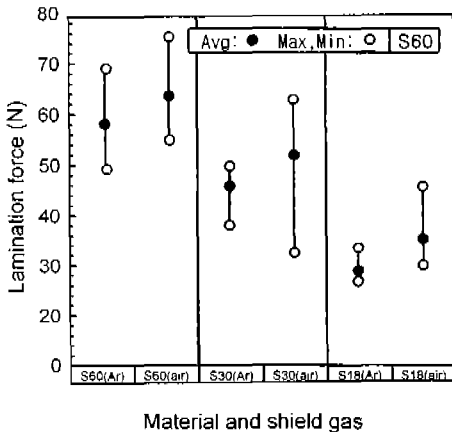
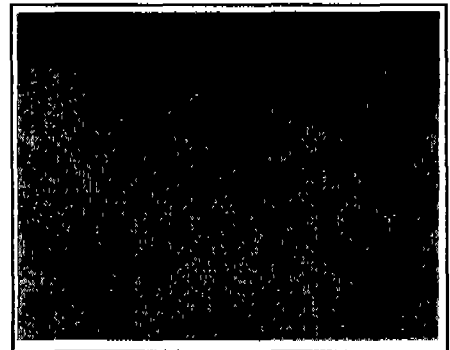


Fig. 9 Lamination force vs. material and shield gas.

아르곤 가스 보다 다소 크다는 것을 볼 수 있다. 또한 보조가스에 관계없이 적층력에 있어서는 S60, S30 및 S18의 순으로 적층력이 감소하고 있다. 본 실험의 결과로 부터 적층력만을 고려할 때는 접합부의 보조가스는 고가의 아르곤 가스를 사용하는 것보다 공기를 사용하는 것이 적층력이 훨씬 양호하게 나타나는 것은 공기중에서 용융이 일어나게 되어 아르곤 가스 보다 활성화 되었음을 나타내 주고 있다고 생각되지만 공기의 경우에는 적층부에 기공과 불순물의 혼입 및 적층조직의 조대화 등의 문제점이 남아있다고 생각된다. 그리고 시험편 재료에 함유되어 있는 Si는 페라이트(ferrite)에 고용되어 강도증가에 기여하지만 과도한 Si의 양은 조직을 취약하게 하고 결정립을 조대화하여 기계적 성질을 저하<sup>(10)</sup>시키기 때문에 Si 함량이 많을수록 적층력이 감소된다고 생각된다.

Fig. 10은 레이저 접합부의 단면을 (a) 아르곤 가스 분위기와 (b) 공기 분위기를 비교하여 나타낸 것으로서 2 가지의 보조 가스 모두 bonding line은 전형적인 wine cup 형상을 이루고 있다. 그리고 접합부 단면의 결정조



(a) Ar gas



(b) Air

Fig. 10 Cross sectional view of nugget center line.

직은 주로 주상정(columnar grains)으로 구성되어 있고, 이 주상정의 특징은 동일한 방향성을 가지며 미세한 셀결정(cellular grains)을 가지고 있지만 아르곤 가스 분위기 보다 공기 분위기의 경우가 더욱 현저하게 발달되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 냉각시에 공기중의 경우가 급냉의 영향을 더욱 크게 받기 때문이라고 생각된다. 한편 용입깊이를 비교해 볼 때 (b)인 공기 분위기가 (a) 아르곤 가스 보다 용입깊이가 훨씬 깊다는 것을 알 수 있다. 이는 공기중의 경우에는 O<sub>2</sub>가 흡수되어 이로 인한 산화가 쉽게 일어나 용융이 더욱 빠르게 진행되었기 때문이라 생각된다.

### 3.3 프레스 oil의 영향

프레스 가공에 있어서 고속화 및 금형의 수명을 연장시키기 위하여 일반 프레스 oil을 금형 또는 소재의 표면에 도포한다. Fig. 11은 레이저 출력을 5.2 J/s로 하고, 보조가스로 공기 분위기 중에서 2 가지의 프레스 oil인 일반 oil과 급속건성 oil을 사용하였을 때의 S60 규소강판의 적층력(그림의 좌측)과 너그의 표면적경 및 용입깊이(그림의 우측)를 나타낸 것이다. 적층력 및 접합부 표면적경의 크기는 일반 oil이나 급속건성 oil에 관계없이 거의 유사하나 용입깊이는 급속건성 oil을 사용한 경우가 더욱 깊다는 것을 볼 수 있다. 이것은 레이저 접합이 금형 내부에서 이루어지므로 일반 oil의 경우는 oil에 함유된 탄소 유기물로 인하여 레이저 조사시 oil 및 스퍼터가 비산되어 접합부에 혼입되고 또한 소재표면에 잔류된 oil이 기공 및 다량의 증발가스를 유발시켜 레이저 빔의 투과작용에 방해로 주지만<sup>7)</sup>, 탄소 유기물을 감소시킨 급속건성 oil의 경우에는 편칭 후 조기에 oil성분이 증발되고 또한 oil이 잔류하여도 증발가스의 발생이 억제되어 용

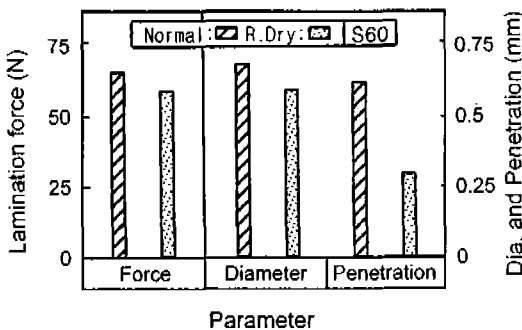


Fig. 11 Comparison parameter for normal and rapid dry oil.

입깊이가 깊게 된다고 생각된다.

### 3.4 적층부의 offset 영향

일반적인 적층가공은 금형에서 편칭된 부품을 적층하여 레이저로 연속접합<sup>8)</sup> 할 때는 offset을 고려 할 필요가 없으나 금형내에서 레이저 접합에 의한 적층가공의 경우에는 소재의 두께변화, 프레스 oil에 의한 유막 및 오염도에 따라서 소재 1매당 대개 1~3mm의 공차를 수반하므로 offset의 치수공차의 영향을 고려 하여야 한다. 따라서 수 μm의 공차를 수식 때에 적용하는 경우 누적오차를 감안하면 적층부의 위치가 변하게 되어 offset이 발생하게 된다.

Fig. 12는 적층매수를 40매로 한 경우 적층재료의 offset 접합 위치(mm)를 3 단계 즉, A형(0~0.1), B형(0.1~0.15) 및 C형(0.15~0.2) 변화시켰을 때의 적층력을 나타낸 것으로서 A형과 B형의 경우에는 적층력의 변화는 거의 없으나 C형의 offset에서는 A형의 경우에 비해서 74% 정도의 적층력을 나타내고 있다는 것을 볼 수 있다. 그러나 C형인 0.2mm 이상의 offset에서는 급격히 적층력이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 적층력은 적층재료의 두께가 0.5mm에 대하여 약 30% 수준인 B형(0.15mm) 까지는 양호하였지만 C형(0.2mm) 이상의 경우에는 별도의 offset 보증 장치가 필요로 한다고 생각된다.

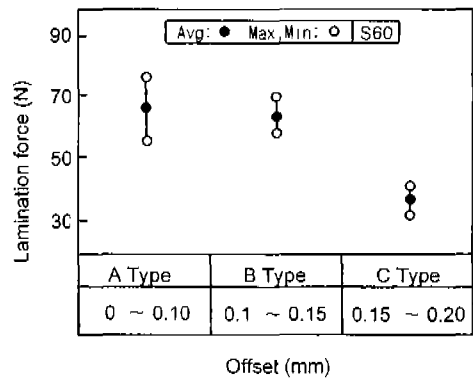


Fig. 12 Influence of offsets on the lamination force.

## 4. 결 론

본 연구에서는 0.5mm 두께의 Si양을 달리한 3 종류 규소강판의 적층가공을 금형에서 편칭과 동시에 레이저 가

공을 일체화한 레이저 적층 금형으로 레이저 빔의 파라미터 즉, 초점거리, 출력변화, 보조가스 및 프레스 oil의 영향 등을 비교, 분석하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 빔의 조사시 focus 상태는 크레이터 발생 및 용입이 불안정하므로 조사는 defocus 하는 것이 유리하다.
2. 레이저 출력의 증가와 함께 적층력은 상승하지만 과도한 증가는 다량의 스파터 및 증발가스가 발생하므로 적정 레이저 출력은 4.0~5.2 J/s이다.
3. 레이저 조사시 보조가스는 아르곤 가스보다 공기를 공급할 경우가 용입깊이가 깊고, 또한 Si의 함량이 적을수록 적층강도가 높다.
4. 프레스 oil은 급속건성 oil의 경우가 일반 oil의 경우보다 적층강도가 양호하며, 적층부의 offset은 적층재료 두께의 30% 정도내에서는 적층력의 변화가 없다.

#### 참 고 문 헌

1. A. Matsunawa, "Presentation and future trends of LASER materials processing" ISOE, 1994.

2. 레이저學會, "레이저 핸드북", 오ーム社, 1992.
3. 宮崎俊行, "레이저 가공 기술", 産業圖書, pp. 97~105, 1991.
4. 川澄轉通, "레이저 가공 기술", 日刊工業新聞社, 1991.
5. 西澤敬次, "YAG 레이저による熔接工程への應用自動化技術", 第 7회 레이저 기술 세미나-1989.
6. 難波 進, "레이저와 가공", 共立出版, pp. 81 ~ 98, 1984.
7. 河野泰久, "모터코어의精度向上と小型化を實現した 레이저 PAC 工法", 型技術, Vol. 10, No.1, pp. 95~101, 1995.
8. C.Zutao, "The application of LASER welding in the electric motor stators and rotators", LAMP., pp. 999-1000, 1992.
9. 宮田 修, "自動車電裝品の 레이저 가공", 第 11회 레이저 기술 세미나, 1993.
10. 矢島悦次郎, 市川理衡, 古澤浩一, "機械·金屬材料", 丸善株式會社, pp. 109~124, 1994.
11. NIKEI MECHANICAL, pp. 34~44, 1992. 9.
12. INTERNATIONAL FORUM on LASER PROCESSING, p. 44, 1996.