技術解說

레 이 저 加 工

金 弼 鉉*

1. 緖 言

1960年, 루비 레이저의 成功以來, 레이저光의 뛰어난 指向性과 高出力性에 着眼하여 레이저加工이 開發되어 왔다.

레이저光은 거의 平行光線이라고 보아지므로 光學系(例를들면 볼록렌즈)에서 상당히 작은 스포트로 收束된다. 레이저加工에는 瞬間出力値가 큰 레이저光을 使用하므로 收束된 部分에서의 單位時間當의 에너지密度는 대단히 크게된다. 따라서 레이저光을 加工面에 收束시키면 그 部分은 레이저光을 吸收하여 高溫으로 加熱되어 溶融 또는 蒸發한다.

레이저光에 依한 穿孔加工 및 熔接은 각각 레이저光에 의한 試料의 加熱蒸發 및 加熱溶融에 의하여 行하여 진다.

레이저加工을 目的으로한 레이저加工裝置가 發賣되고 있는데, 레이저 加工은 發展途上의 技術이고 現狀에서는 微細加工에의 適用을 試驗하고 있는 段階에 있다.

여기에서는 레이저加工의 現狀에 대해서 記述하려고 하는데 레이저加工을 理解하기 위해서 太陽光을 렌즈로 收束하여 검은 종이를 태운 經驗을 想起하시기 바란다.

2. 레이저光의 指向性과 出力

레이저光의 特徵으로서는 (a) 可干涉性 (b) 單色性 (c) 指向性 (d) 高出力性등을 들 수 있다.

여기에서는 레이저 加工에 關係가 있는 (c), (d)에 대해서 述한다.

2-1 指向性

平行平面型 共振器內에서 同一位相으로 發振하고 있는 레이저光의 열림角θ는 回折理論에 依하여 次式으로 나타내진다.

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D} \text{ (rad)} \qquad (1)$$

여기서 λ와 D는 각각 光의 波長과 光源의 徑이다. 例를들면 D=10mm의 루비 롯드를 使用하면 $\lambda=0.6943\mu$이므로 θ는 거의 10^{-4}rad으로 된다. 그러나 實際의 루비 레이저에서의 θ는 $10^{-2}\sim10^{-3}$rad이다. 이것은 結晶의 光學的 不均一등에 의하여 롯드軸에 따른 系狀의 部分이 個個로 發振하든지 軸外發振(롯드軸에 平行이 아닌 經路에서의 發振)을 하기 때문이다. 太陽光은 거의 平行光線으로 取扱하고 있는데 그 열림角은 대략 10^{-2}rad이므로 現狀에서도 레이저光의 平行度는 太陽光보다도 뛰어나다.

2-2 出力

一般으로 레이저 出力(E_0)은 次式으로 나타내진다.

$$E_0=\alpha(E_i-E_{th}) \qquad (2)$$

여기서 E_i는 勵起入力, E_{th}는 레이저發振에 必要한 最低勵起入力(threshold値)이다.

變換效率 α와 E_{th}는 使用한 레이저 롯드 및 勵起效率에 의해서 定해지는 量이다. 固體레이저에서의 α値는 $10^{-2}\sim10^{-3}$이고 數 1000J의 入力에 대하여 出力은 단지 數J의 경우가 많다. 그러나 레이저光은 그림1과 같이 펄스狀의 發振을 數밀리 m sec秒間 行하고 있으므로 平均出力値(出力/發振時間)는 數 kW의 크기로 된다. 例를들면 그림1의 경우 發振時間은 約 1 m sec이고 레이저 出力의 測定値는 대략 2J이었으므로 平均出力値는 2kW로 된다. 瞬間出力値는 1個의 펄스出力値를 나타내고 보통은 平均出力値의 數

* 日本理化學硏究所 理學博士

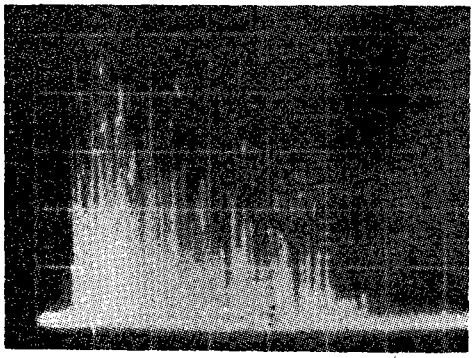


그림 1. 레이저發振波形

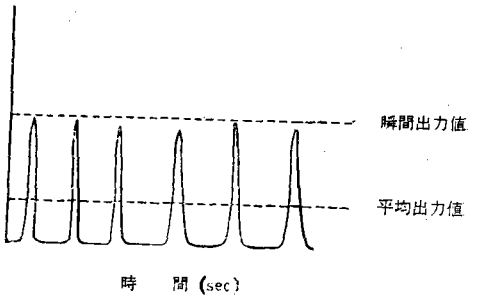


그림 2. 平均出力値와 瞬間出力値

10倍의 値를 나타낸다. 펄스發振 레이저의 平均出力値, 瞬間出力値의 關係를 그림2에 表示한다

比較하기 위해서 太陽光의 地球表面上 1cm²當의 照射파워를 表示하면 그 値는 대략 0.1W이고 레이저 出力에 훨씬 미치지 못한다. 太陽光을 렌즈로 收束하면 검은 종이를 태우는 것 같이 太陽光보다 數萬倍나 센 레이저光을 收束하면 金屬을 蒸發시킬 수 있다.

3. 最小스폿트徑과 파워密度

열림角θ의 平行光線을 焦點距離 f인 렌즈로 收束하면 焦點面에서의 스폿트徑 d는 次式으로 나타내진다. (그림3參照)

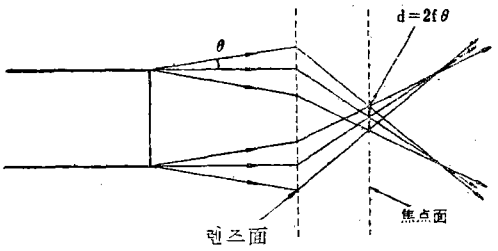


그림 3. 열림角과 收束徑의 關係

$$d=2f\theta \qquad (3)$$

레이저光의 경우 現狀에서는 $\theta=10^{-2}\sim10^{-3}$rad 이므로 焦點距離 數10mm인 렌즈를 使用하면 徑數 100μ의 스폿트가 얻어진다.

레이저光을 렌즈로 收束한 경우 焦點面에서의 레이저光의 파워密度(F)는 次式으로 나타내 진다.

$$F=\frac{4P}{\pi d^2} \qquad (4)$$

여기서 P는 레이저光의 出力파워이다. 例를들면 出力數 10J(平均파워 $\sim10^4$W)의 레이저光을 f=50mm의 렌즈로 收束하였을때의 파워密度는 式(3), (4)에서 $10^6\sim10^8$w/cm²로 된다. 比較하기 위해서 表1에 여러가지 에너지源의 最小스폿트 面積과 파워密度를 表示한다.

表1 에너지源의 比較

種別 / 項目	아세치렌 깨스	太陽光	電子빔	레이저*
最少스폿트面積 (cm²)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-7}	10^{-4}
파워密度(w/cm²)	10^4	10^5	10^9	10^9

* 레이저出力 : 10^5W, $\theta\sim10^{-3}$rad, f=50mm

4. 레이저加工裝置

레이저加工裝置는 레이저 헤드(레이저 롯드, Xe管, 反射鏡等), 收束用렌즈, 試料觀測用顯微鏡試料臺등으로 構成되고 있다. 加工裝置의 例를 그림4와 그림5에 表示한다. 레이저 헤드의 位置가 垂直인가 水平인가의 差異는 있는데 主要部의 構成은 꼭 같다.

그림4의 裝置에서는 길이 175mm, 徑 9.5mm의 루비 롯드를 使用하고 反復操作에 便利하도록 强制空冷을 行하고 있다. 光勵起에는 헤리칼狀 Xe管을 2個併用하고 레이저光의 收束에는

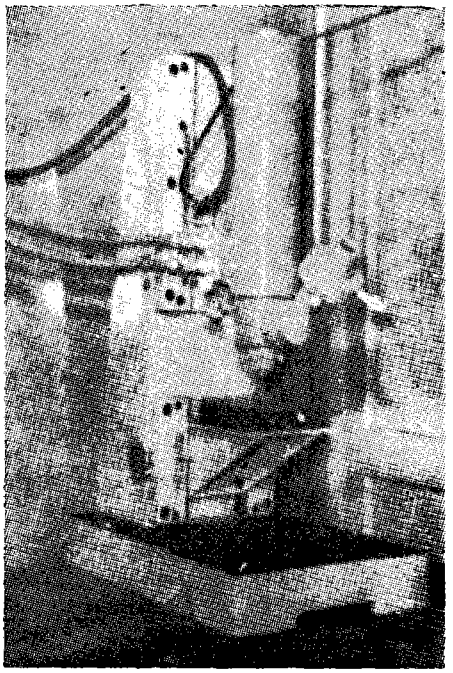


그림 4. 레이저加工裝置(理硏)

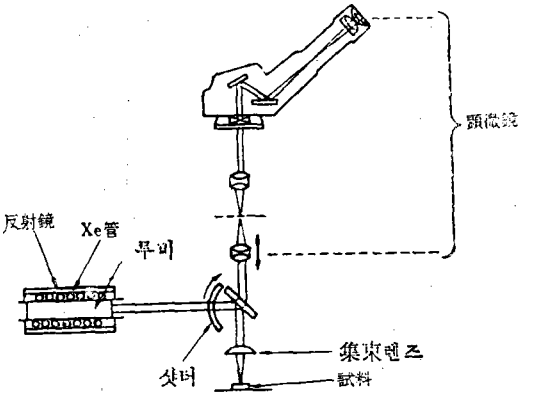


그림 5. 레이저加工裝置(Hughes社)

焦點距離 30mm, 또는 15mm의 렌즈가 使用되고 있다. 最高勵起 入力은 20,000J(5KV, 800μF×2), 最高出力~30J, 最大發振繼續時間~2msec이다. 레이저加工時에는 加工面의 位置를 顯微鏡으로 보면서 位置決定을 한後 거울을 내리고 레이저 發振을 시켜 試料를 加工한다. 安全하기 위해서 거울을 내리지 않은 狀態에서는 勵起用 Xe管은 發光하지 않도록 하고 있다.

管을 同時에 水冷하는 水冷式레이저 헤드를 使用할 때가 많다. 光勵起에 數個의 直線狀Xe管을 併用할때도 있다.

現在 加工에 使用되는 레이저는 出力이 큰 펄스狀發振(P)의 루비 레이저 및 Na 유리레이저인데, 連續發振(CW) 레이저라도 加工할 수 있을 程度의 大出力을 얻을 수 있는것이 開發되고 있다. 表2에 大出力레이저의 特性을 表示한다.

表2 레이저 特性

種 \ 項	레 이 저 物 質	發振波長 (μ)	最 高 出 力	指向性 (rad)	變 換 效 率
固體레이저	루 비	0.6943	P:1500J	10^{-2}~10^{-3}	~10^{-2}
			CW:>1W	~10^{-3}	~10^{-3}
	유리(Nd^{3+})	1.06	P:루비와同程度	10^{-2}~10^{-3}	~4×10^{-2}
	$Y_3A\ell_5O_{12}(Nd^{3+})$	1.06	CW:1~2W	~10^{-3}	~10^{-3}
氣體레이저	H_e-N_e	1.15	P:>200W 反復 2kc	10^{-3}~10^{-4}	~10^{-3}
	Ar	0.4880 0.5145	CW:>10W	10^{-3}~10^{-4}	~10^{-3}
	$CO_2(N_2, H_e)$	10.6	CW:~1KW	10^{-2}~10^{-3}	~10^{-1}

最近은 反復操作을 쉽게 하기 위해서 레이저 롯드를 水冷으로 하든지 또는 레이저 롯드와 Xe

레이저熔接에는 YAG($Y_3A\ell_5O_{12}$)레이저, CO_2 레이저等이 今後에 많이 使用될 것이라고 생각된

다. 또 CO_2레이저는 窄孔加工에도 充分히 利用된다.

5. 窄孔加工

레이저加工은 熱加工이므로 熱傳導로 消失되는 에너지를 될수록 적게하여 投入에너지가 加工에 有効하게 使用되도록 할 必要가 있다. 이렇게 하려면 펄스加工이 有効하다. 따라서 窄孔加工에는 펄스發振을 하는 固體레이저가 適合하다.

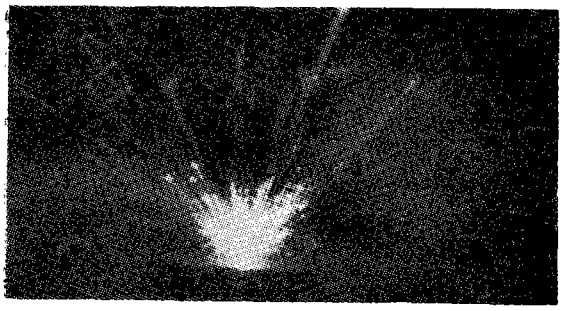
파워密度 F인 레이저光이 金屬試料에 照射되고 있을때 레이저光은 表面層數 100A로 거의 吸收되어 熱로 된다. 表面溫度T는 레이저光을 均一한 熱流 또는 圓狀熱源으로 하고 加工試料를 半無限體로서 取扱하면 熱傳導論에 依하여 次式으로 주어진다.

$$T=\frac{2F}{K}\left(\frac{Kt}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (5)$$

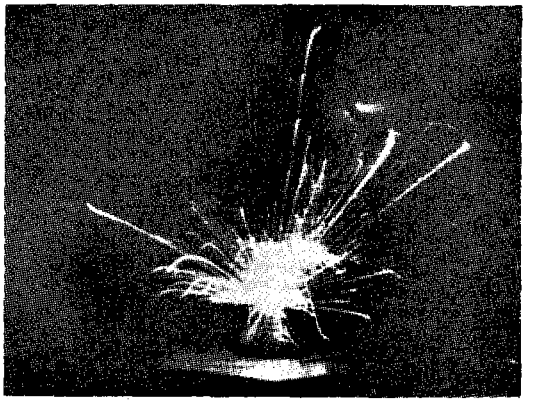
여기서 K는熱傳導率(w/cm°Csec), K는 熱擴散率(cm^2/sec), t는 照射時間이다. 레이저 파워密度로서 平均파워密度를 照射時間으로하여 發振繼續時間을 使用하여 表面溫度를 槪算하면,金屬의 表面溫度를 沸點程度로 올리는데 必要한 파워密度는 대부분의 金屬에 대하여 10^5~10^6w/cm^2이다. 따라서 레이저光의 收束에 f=30mm의 렌즈를 使用하면, 金屬의 加工에 必要한 레이저出力은 數J(平均파워數kW)이다.

그림6은 레이저加工의 瞬間을 表示하는 사진이고, 레이저光이 試料面에 부디친 瞬間, 加工點에서 多數의 高熱溶融塊가 튀고 있다. 眞空中에서의 加工에서는 溶融塊의 飛散은 대부분의 金屬에서 觀測 되지 않는다.

(a)各種材料의 加工 : 그림 7에 各種金屬에 대한 加工例를 表示한다. 融點이 높고 蒸發키 어려운 W, Ta는 加工되기 어렵다. 加工되기 쉬운것은 스테인레스나 Zr이고, 어느것이나 金屬中에서는 熱傳導率이 작은 材料이고 融點도 그렇게 높지 않다. 熱傳導가 나쁜 非金屬材料의 加工에서는 레이저光을 照射한 瞬間, 加工材가 잘게 쪼개져버릴때가 많으므로 레이저出力, 發振時間등을 適當히 콘트롤 하지 않으면 안된다.



(a)



(b)

그림 6. 레이저加工의 瞬間(試料 : (a)炭素鋼, (b) 실리콘

그림8은 다이야몬드에 다이스用의 구멍을 뚫은 例이다.

出力 10J, 發振時間 0.5msec의 레이저光을 125μ의 徑으로 收束하면 그림8(a)와 같이 다이야몬드는 破壞되는데, 出力을 3J로 내리면 窄孔이 可能하였다. 그림 8(b)는 두께 350μ의 다이

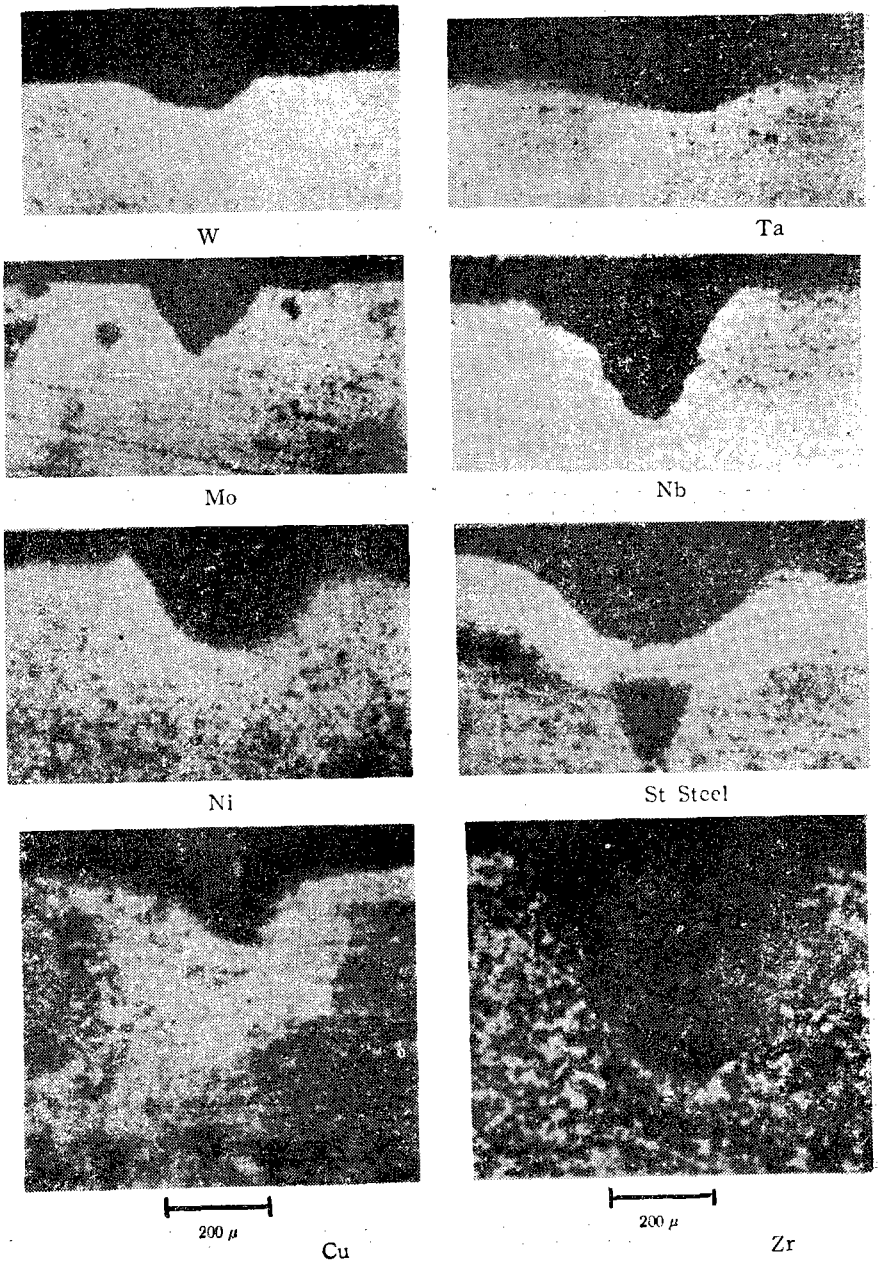
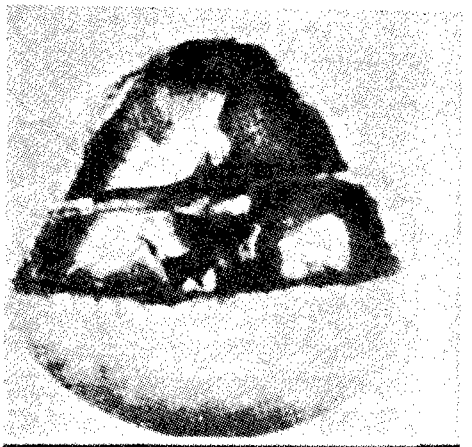


그림 7. 레이저加工된 各種金屬의 斷面腐食像) (레이저出力 : 1.2J 焦點距離 : 30mm)



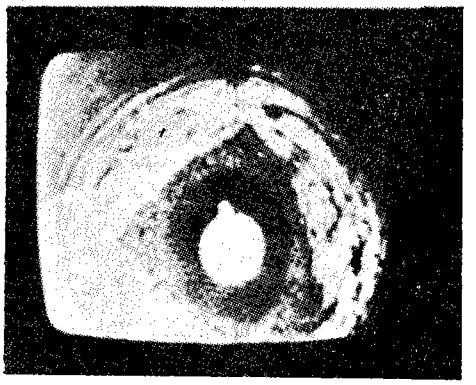


그림 8. 다이아몬드의 窄孔加工例

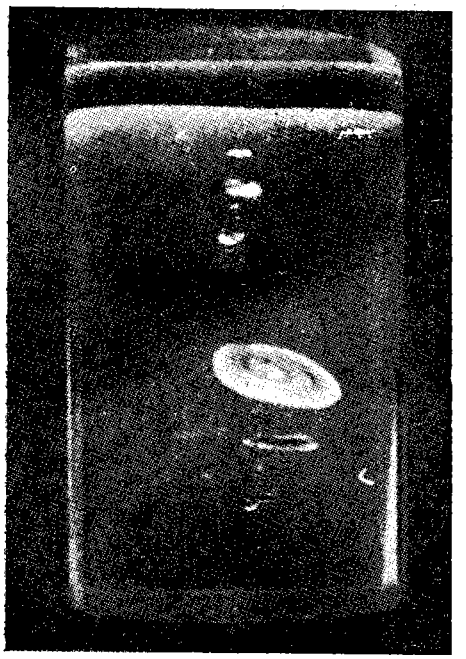


그림 9. 透明樹脂의 加工

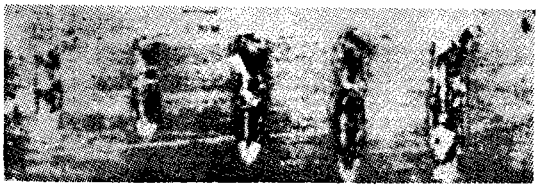


그림 10. 反復照射에 依한 窄孔加工例

그림 11. 反復照射에 依한窄孔加工例
(照射回數 : 20回)

야몬드에 出力 4J, 發振時間 0.5msec의 레이저光을 22回照射하여 175μ의 구멍을 뚫은 例이다

光의 透明體는 거의 加工되지 않는데 透明樹脂에서는 그림9에 表示하는바와 같이 收束렌즈의 焦點近傍에 加工模樣이 생긴다. 透明體를 通하여 그 內部를 加工할 수 있는것은 레이저加工의 長點이고 眼科用凝固機는 이 原理를 應用하고 있다.

(b) 反復加工 : 그림10은 出力 8J, 發振時間 0.65msec의 레이저光을 反復照射하여 T_i板에 窄空加工을 한 例이다. 6回照射까지는 거의 照射回數에 比例하여 깊이는 깊어지고 있는데 그 以上 照射하여도 깊이는 그렇게 變하지 않는다 이것은 加工穴의 入口部에서 金屬이 再固化하여

레이저光은 이 部分의 蒸發에 거의 使用되기 때문일 것이다. 그림11은 出力95J의 레이저光을 20回照射하여 T₁板에 窄孔加工을 한 例이다. 이 때에도 照射回數 7回以降은 구멍의 깊이는 그렇게 變하지 않았다.

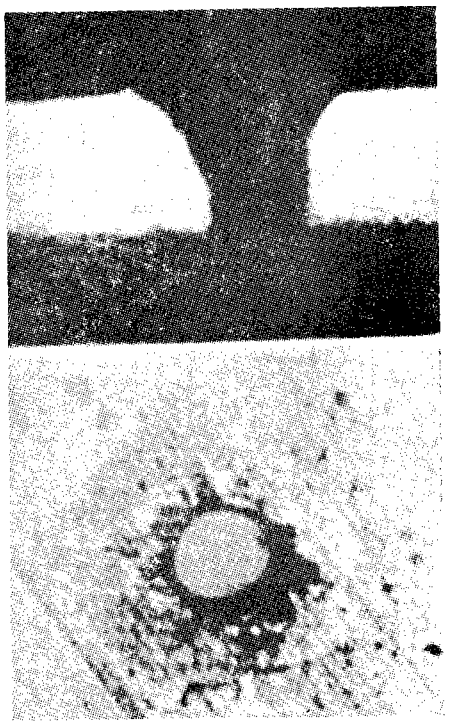


그림 12. 窄孔加工例(스테인레스)

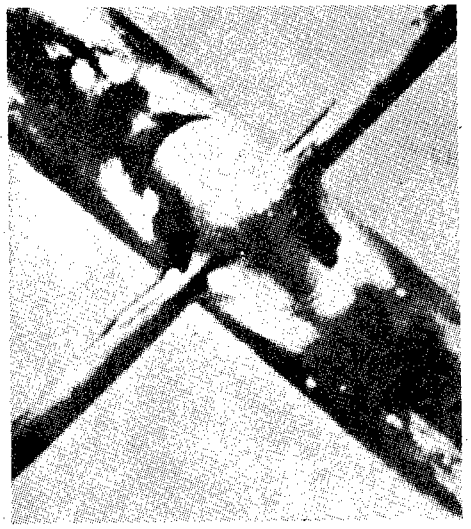


그림 13. 線까리의 溶接例

(c) 加工徑과 加工깊이 : 加工깊이는 加工徑의 5~10倍程度이고, 最小스포트徑은 거의 100μ이다.

(d) 加工穴의 形狀 : 그림12는 出力 1.2J에 레이저光을 f=30mm의 렌즈로 收束하여 두께 0.3mm의 스테인레스薄板에 구멍을 貫通시킨 例이다. 구멍의 形狀이 둥글지 않는것은 레이저光의 열림角이 롯드軸에 對하여 對稱이 아닌 때문이다. 加工斷面은 그림 7,11,12에 보여지는 바와 같이 逆텔形을 하고 있고 熱加工의 特徵을 나타내고 있다.

(e) 加工效率 : 펄스發振의 固體레이저를 使用하면, 펄스加工이 自然히 行하여지고 있는것이 되고, 加工材表面에서의 反射損失은 있어도 熱加工으로의 加工效率은 훨씬 높을것이 期待된다. 그림7의 스테인레스의 窄孔加工에서의 加工效率(加工에 使用된 에너지의 照射레이저 에너지에 對한 百分率)은 數10%이다. 電子빔加工에서의 加工效率은 數%이다.

6. 溶 接

金屬材料의 溶接時에는 溶接部에 溶融帶를 만들지 않으면 안된다. 레이저 에너지는 金屬의 表面層에서 거의 吸收되므로 溶融帶는 熱傳導에 依해서만 일어난다. 따라서 溶接에는 피크파워가 그렇게 크지 않은 連續發振레이저를 使用하는 것이 좋다. 表2에서 보는바와 같이 溶接에 充分히 利用될 連續發振레이저가 開發되고 있는데 아직 그렇게 使用되지 않는것이 現狀이다.

펄스發振의 固體레이저에서는 發振時間을 延長하여도 ~10msec가 限度이므로 펄스레이저에 依한 溶接은 얇은 金屬材料에만 適用되고 熱傳導率이 좋은 材料일수록 溶接하기 쉽다고 할 수 있다.

이제 平均파워 10^4W, 發振時間 1msec인 레이저光을 鋼및 銅에 照射하여 例를 들면 表面溫度를 融點의 約3倍, 즉 3000~4000°C로 하는데는 式 (4),(5)에서 스포트徑을 ~4mm(鋼), ~2mm(銅)로 되도록 레이저光을 收束하지 않으면 안된다. 이때 材料의 融點을 考慮하면, 熱計算의 結果, 鋼에서는 ~0.1mm, 銅에서는 ~0.4

mm程度의 두께인 材料의 溶接이 可能하다. 材料를 겹쳐서 溶接할 때, 下側材料에도 溶融帶를 만들지 않으면 안되므로 溶接可能한 材料의 두께는 더욱 엷어진다.

그림13에 徑 0.13mm인 W線과 徑 0.5mm인 Aℓ線의 溶接例를 그림14에 두께 0.25mm인 코발 薄板의 빗트·씸溶接例를 表示한다. 그림15

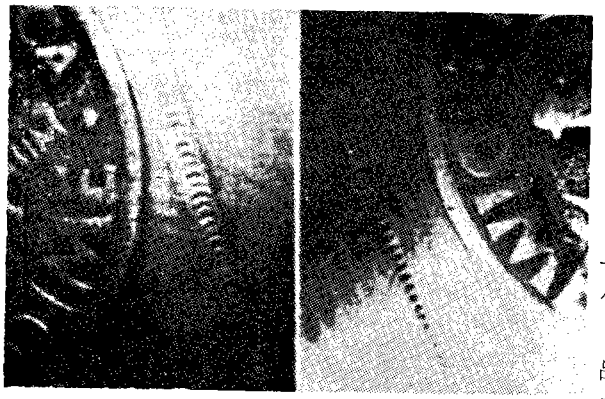


그림 14. 빗트·씸溶接例

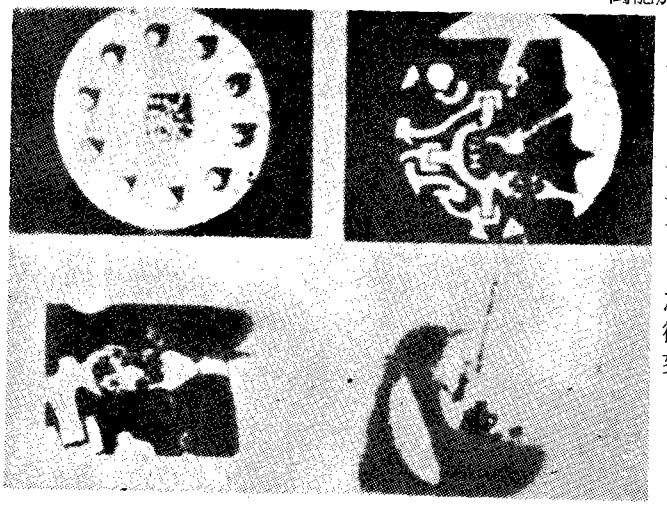


그림 15. 리드線의 溶接

는 超小形回路에서의 리드線의 溶接例이다. 그림16은 0.5mm인 N_i線의 랩프溶接에서의 레이저 强度와 溶接强度의 關係를 表示하는 實驗例이고, 레이저出力에 最適點이 있다.

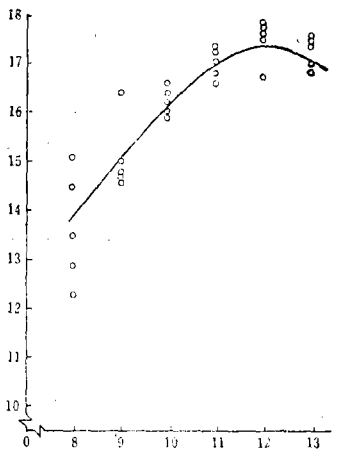


그림 16. 레이저出力과 溶接强度

7. 結 語

레이저 加工은 加工材에 加工器具를 接觸시키는 일없이 加工된다는 特徵을 갖고 그 應用으로서는

i) 金屬 및 非金屬의 微小窄孔 ii) 微小回路部品의 切斷, iii) 蒸着마스크의 製作, iv) 薄膜의 製作等이 생각되고 있다. 그러나 레이저에 依한 萬能加工機를 꿈꾸는 것은 틀린 생각이고 그 適用範圍에 嚴格한 限界가 있는것을 잊어서는 안된다.

問題點으로서는 i) 레이저 出力을 보다 向上시킬것 ii) 보다 微小한 收束스포트徑을 얻는것 iii) 窄孔 또는 溶接條件에 맞도록 發振繼續時間레이저 出力을 보다 正確하게 制御하는 것.

iv) 펄스레이저에서는 反復操作回數를 增加하는것 v) 패턴加工을 위해 光의 偏向制御技術을 確立하는 것等이고 그 解決에의 努力이 여러곳에서 行하여지고 있다.

參 考 文 獻

(1) S. Namba and P. H. Kim; Japan, J. Appl Phys. 3(1964) 536

(2) S. Namba and P. H. Kim: Sci, Papers I. P. C. R. 60(1966) 91

(3) 難波, 金：溶接學會誌, 34(1966) 16

(4) Editor; A. B. El-Kareh: "Proc Electron and Laser Beam Symp" Penn. State Univ. (1965)

(5) Editor: G. I. Haddad; "Proc. 8th Electron and Laser Beam Symp" Univ. Michigan. (1966)