

레이저를 併用한 岩石의 掘削

李 根 喆

— 차 례 —

- 1. 序 論
- 2. 레이저에 의한 岩石切削試驗
- 3. 載荷試驗과의 併用
- 4. 레이저 切削의 應用
- 5. 結 論
- 6. 參考文獻

1. 序 論

터널 掘削과 鑛業分野에서의 增大되는 要求에 따라, 보다 빠르고, 보다 에너지를 効率的으로 使用할 뿐 아니라, 더욱 經濟的인 硬岩의 掘削技術을 開發하기 위한 勞力이 경주되어 왔다. 특히 集光된 레이저의 에너지를 硬岩의 破碎프로세스에 應用하는 方案이 많은 可能性을 보여 주고 있다. 初期에서 集光된 레이저빔이 硬岩을 貫入하여 이 때 發生된 熱에 의하여 岩石이 弱화되는 프로세스가 考察되었다⁽¹⁾. 따라서 레이저 切削作用의 岩石弱화效果가 機械的인 岩石掘削方法에 큰 도움이 될 수 있을 것으로 기대되었다.

本 論文에서는 어떻게 레이저의 切削이 硬岩의 回轉 機掘削에 併用될 수 있는가를 考察하였다. 특히 레이저 切削을 併用한 터널보잉머시인(tunnel boring machine)과 回轉式發破孔의 드릴링에 대하여 알아보았다.

初期의 研究^(2,3)에서는 高出力, 連續, 電氣放電式의 集光된 CO₂레이저빔이 터널게이지 커팅 메카니즘(tunnel gage-cutting mechanism)에 따라 充分한 깊이에 까지 岩石을 切斷할 수 있다는 結論을 얻었다. 5kW의 레이저出力에 21.2cm/sec의 切削速度로 限定된 이 實驗結果를 근거로하여, 充分한 應用을 위하여는 레이저의 出力이 100kW~300kW는 되어야 한다는 것도 알게 되었다.

그 後, 高出力레이저에 의한 試驗技術이 開發되고, 高速度의 미러트롤리(mirror trolley)가 製作됨에 따라 앞서의 試驗結果를 擴張할 수 있게 되었다. 16.5 kW의 레이저出力, 125cm/sec의 切削速度에 대한 이들 結果는 文獻⁽⁴⁾을 참고 하기 바란다.

* 正舍員: 韓國科學技術情報센터 第1技術情報部次長

* 譯著註: 本稿는 英國에서 發刊되는 International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanical Abstracts, Vol.13 pp. 207-219. 에 실린 記事를 抄譯한 것이다.

2. 레이저에 의한 岩石切削試驗

가) 岩石에의 레이저貫入過程

岩石表面의 焦點에 레이저빔을 集光시켜 주면 그림 1에서 보는바와 같은 레이저切削過程이 나타난다. 岩石은 強度가 가우스分布를 나타내는 레이저빔에 의하여 노치(notch)와 切削된다. 이 때 岩石의 熔融이 主된 效果이지만 레이저 強度가 제일 높은 光束의 中央部分에서는 一部가 氣化된다. 焦點에서의 에너지強度는 레이저出力과 集光度의 函數로서 集光度는 f/N 値에 의하여 決定된다.

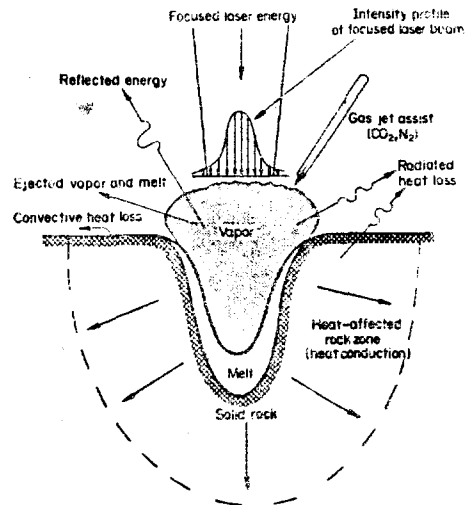


그림 1. 集光된 레이저빔과 岩石의 相互作用

또한 레이저의 에너지는 1) 岩石의 熔融과 氣化 2) 周圍岩石의 加熱과 熱應力 發生 3) 反射, 放射 對流 및 周圍의 大氣를 加熱시키는 데로 消費된다. 그러나 이 중 에서 2)와 3)의 效果는 1)에 비하여 상당히 적다고 볼 수 있다. 레이저의 出力 P 는 (1)式에 近似的으로 따 른다.

$$P = H_c \cdot ab \cdot V \quad (1)$$

여기서 H 는 單位體積切削에 要求되는 有効에너지이고, a 는 平均切削幅, b 는 平均切削深度, V 는 切削速度이다. 이 公式는 文獻⁽²⁾의 實驗데이터로부터 증명되었는데 abV 가 直接 測定될 수 있고 따라서 레이저出力을 알면 바로 H 를 구할 수 있기 때문에 아주 有用하다. 또한 H 의 값과 岩石의 熔解熱 및 氣化熱을 比較함으로써 切削效率를 求할 수 있다.

나) 試驗裝置

實驗에서는 密閉式的 CO_2 크로스비임 放電對流型레이저⁽⁶⁾가 使用되었다. 使用된 레이저의 出力은 5~16.5kW였고, 레이저비임은 10~125cm/sec로 直線移動하는 牽引裝置에 積載된 集光系로 集光되어 岩石表面에 走査되었다. 그림 2는 이 裝置의 構造를 보이고 있다. 初期의 實驗에서는 球狀의 集光鏡이 使用되었다. 이 때 集光된 레이저비임의 스폿트(spot)直徑은 (2)式에 의하여 주어진다.

$$d_s = 2.44\lambda \left(\frac{f_1}{d_b} \right) \quad (2)$$

여기에서 λ 는 레이저의 波長(10.6 μ), f_1 은 거울의 焦點距離, d_b 는 비임의 直徑, f_1/d_b 는 集光系의 f/N 值이다. 實際에 있어서는 레이저비임의 狀態가 完全하지 못하기 때문에 스폿트의 直徑(d_s)는 위의 計算式의 結果보다 1.4倍정도 커진다.

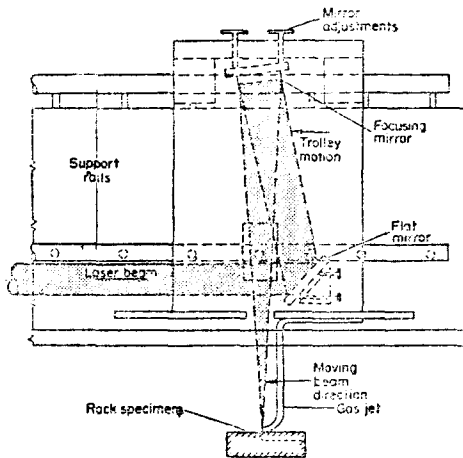


그림 2. 레이저 岩石切削트롤러

球狀鏡은 레이저의 出力이 增加함에 따라 焦點에서 가스의 崩壞(gas breakdown)가 일어날 염려가 있기 때문에 圓筒狀의 集光鏡이 새로이 開發되었다.

다) 實驗條件

實驗에는 相異한 化學的 및 鑛物學的 組成을 갖는 Vermont州 Barne의 花崗岩, Pennsylvania州 Qua-

kertown의 粗粒玄武岩과 South州 Dakota Sioux Fall의 珪岩 등 三種類가 使用되었다. 또한 이들의 各各 ~2,448kg/cm² ~3,519kg/cm², ~6,630kg/cm² 이었다. 壓縮強度는 試料의 最大크기는 15cm로서 表面은 평탄하도록 切削되었으나 研磨되지는 않았다.

實驗은 3가지 種類의 岩石에, 相異한 切削速度(25, 50, 75, 100, 125cm/sec)와 4段階의 레이저出力(5, 10, 15 >15kW)에 대한 레이저岩石切削效率를 測定하는 것이었다.

라) 貫入深度

레이저의 出力과 切削速度를 바꾸어가면서 레이저貫

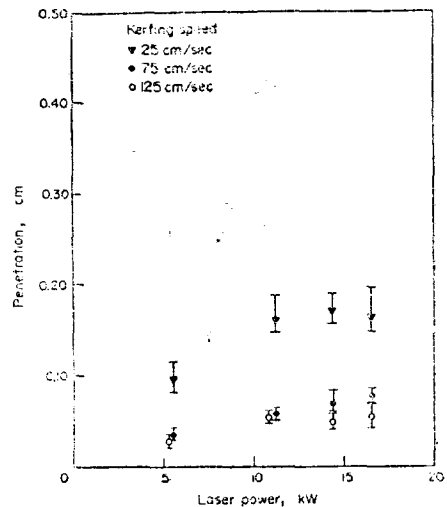


그림 3. $f/24$, 圓筒狀集光鏡을 使用하는 경우 花崗岩의 레이저切削深度(各點에서의 데이터는 5번 測定時에 대한 平均值인)

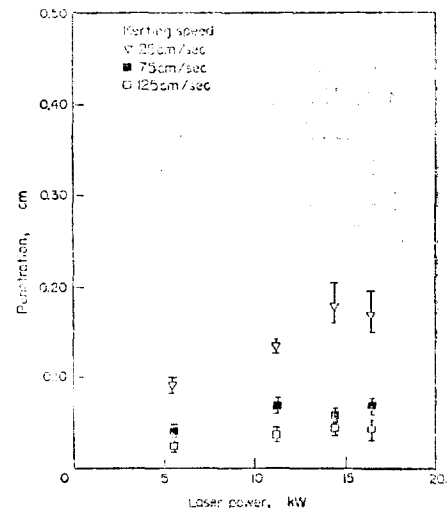


그림 4. 粗粒玄武岩의 레이저 切削深度

入深度를 測定하였는데 이의 結果가 그림 3~5에 表示되어 있다. 이로 부터, 貫入深度는 레이저의 出力이 增加함에 따라 增加하며 切削速度가 빨라짐에 따라 減小한다는 것을 알 수 있다. 또한 花崗岩과 粗粒玄武岩에 대한 貫入深度는 거의 비슷하나 놀랍게도 가장 강

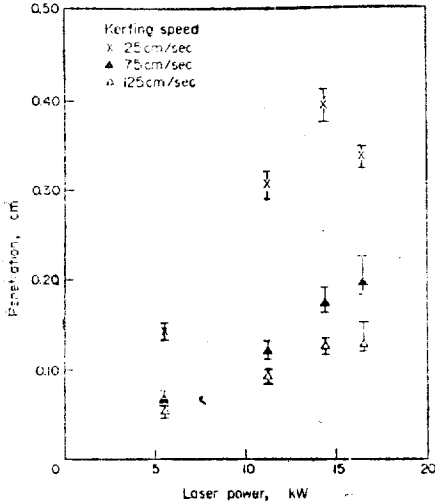


그림 5. 珪岩의 레이저 切削深度

한 珪岩의 경우가 보다 더욱 깊었다. 한편, 가장 낮은 切削速度의 경우 16.5kW에서 切削深度가 현저하게 줄어든다는 重要한 事實을 알 수 있는데 이와 같은 傾向에 대하여는 후에 說明하기로 하겠다.

마) 體積除却率

貫入深度와 더불어, 岩石의 除却率이 測定되었다. 이 結果가 그림 6~8에 表示되어 있는데 여기에서 直線은 (1)式의 P/abV 로 부터 구한 H_c 의 값을 表示한다. 花崗岩과 粗粒玄武岩의 除却率은 純粹한 熔融에너지에 基礎하여 구한 (6), (7)除却率(그림中の 點線)보다 적은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 그러나 珪岩의 경우, 5kW 以上の 레이저出力에서 實測值가 計算值를 上回하고 있다.

만일, 레이저에 의한 岩石除却메카니즘이 단지 熔融과 氣化에 의한 것 뿐이라면, 熔融에너지를 나타내는 直線이 가장 效果의인 切削率을 나타낼 것이다. 表 1에 單位體積의 熔融과 除去에 必要한 에너지를 比較하였다. 다른 2種의 岩石에 대한 경우와는 달리 珪岩의 除却에 必要한 에너지가 熔融에너지 보다 적다. 따라서 레이저 切削時에 熱스폴링이(thermal spalling)일어난다고 보아 무방할 것이다.

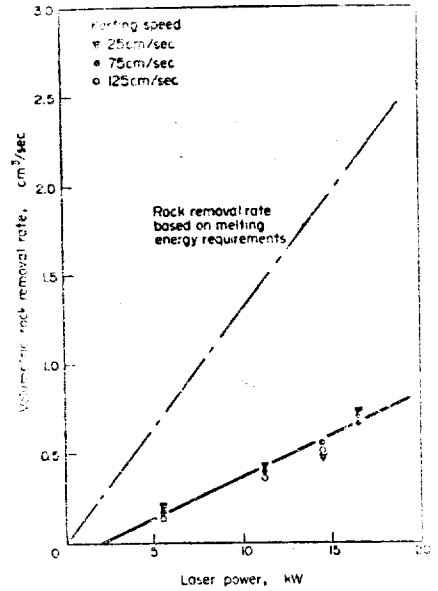


그림 6. 花崗岩의 體積除却率과 레이저出力의 關係

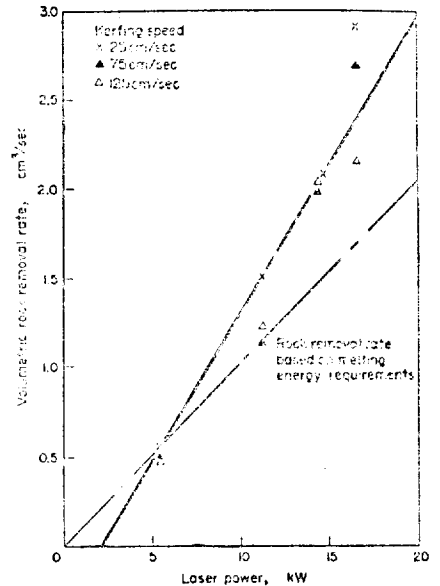


그림 7. 粗粒玄武岩의 體積除却率과 레이저出力의 關係

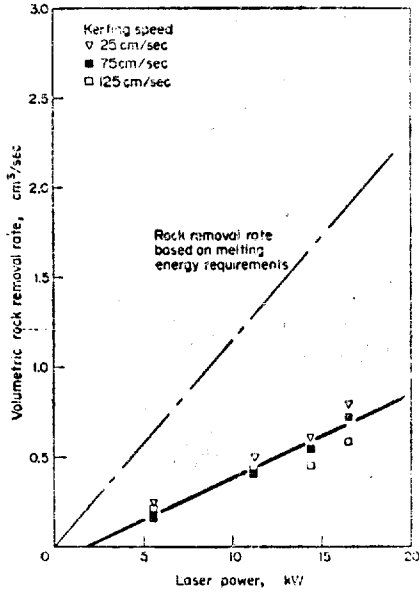


그림 8. 珪岩의 體積除却率과 레이저출력의 關係

표 1. 單位體積當의 岩石溶融에너지와 岩石除却 에너지

Rock	Melting Energy Requirement -kJ/cm ³ -	Measured Rock Removal Energy -kJ/cm ³ -
Granite	7.6	21.0
Diabase	8.7	21.0
Quartzite	9.7	6.0

바) 最適條件

實驗結果, 補助的으로 使用되는 가스噴射의 壓力,

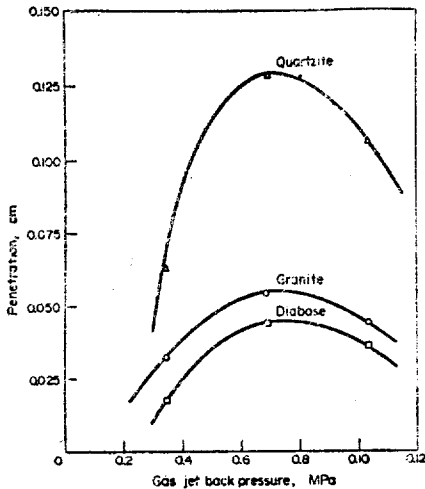


그림 9. 貫入에 대한 가스噴射壓의 效果(레이저출력 16.5kW, 切削速度 125cm/sec)

集光程度(즉, 集光系の f/N 值) 및 圓筒狀集光鏡의 歪曲度의 3가지 條件이 큰 影響을 미친다는 것을 알게 되었다. 그림 9로 부터 가스噴射壓이 岩石의 種類에 無關係한 最適條件이 存在한다는 것을 알 수 있다. 이것은 높은 가스壓力에 의한 切削部의 冷却效果와, 낮은 가스壓力에 의한 熔融物과 氣體의 除却率이 低下되는 두가지 要因 사이에 平衡이 이루어지기 때문인 것으로 推측된다. 그러나 가스噴射壓의 條件은 레이저의 出力, 切削速度 및 f/N 值에 따라서 決定된다고 보아야 할 것이다.

다음으로 f/N 值가 焦點域의 幅과 焦點에서의 레이저 強度에 影響을 미친다. 球狀集光鏡을 使用한 경우, 焦點에서의 強度와 切削速度와의 關係가 그림 10²⁾에 表示되었다. 다른 文獻²⁾과 今回의 實驗으로 부터 焦點에서의 平均強度 I (W/cm²)는 레이저出力 P (kW)과 아래의 關係式에 따른다는 것을 알게 되었다.

$$I = 0.094 \times 10^6 \left(\frac{P}{f/N} \right) \quad (3)$$

즉, 焦點強度는 레이저出力과 f/N 의 값에 의하여 決定된다.

그림 2~4에서 보는바와 같은 高出力狀態에서 貫入率이 低下되는 原因으로는 가스崩壞³⁾와 이에 따르는 레이저빔의 吸收高出力비임의 質的, 低下⁴⁾, 및 集光鏡의 歪曲등의 3가지 原因을 생각할 수 있는데, 이들을 檢討한 結果 集光鏡의 歪曲이 原因이었음이 밝혀졌다. 즉, 레이저에너지의 一部分이 集光鏡에 吸收되어 鏡을 膨脹시키며 鏡의 曲率을 變하게 한다. 따라서, 鏡의 焦點距離가 增加하니, 岩石表面에서의 平均強度는 低下되므로 貫入深度도 낮아지는 것이다. 따라서, 今後 高出力레이저를 長時間使用하게 되는 경우 集光鏡을 冷却시키는 方案을 강구해야 될 것이다.

사) 實驗結果의 一般化

새로운 實驗結果를 一般化하는 것은 어려운 일이지만, 測定值를 基礎로 하여 一般化를 試圖하여 보았다.

任意的 레이저 出力과 速度에서 除却된 岩石은 測定值와 同一하다고 가정하고, 또한 任意的 切削速度에 대하여, 高出力時에도 出力 5kW에서 平均切削幅이 유지된다고 하면, 任意的 레이저出力에서 切削深度 b' 는 (4)式으로 表示된다.

$$b' = (R_p/R_s)b \quad (4)$$

여기에서, R_s 와 R_p 는 各各, 5kW 및 任意的 레이저出力時에 대한 體積除却率, b 는 5kW時의 深度이다.

(5)式은 切削深度 c (cm)와 切削速度 V (cm/sec)에 대한 레이저出力 P (kW)를 表示하는 式으로 여러가지 岩

石에 대한 定數 A,B,C의 값은 表 2에 나타나 있다.

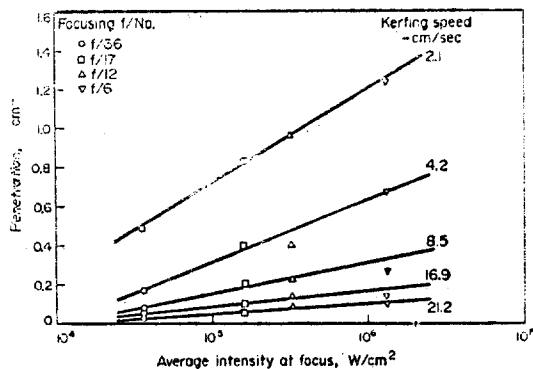


그림 10. 花崗岩의 貫入에 미치는 集點強度의 效果(레이저出力은 5kW)

表 2. 레이저 切削係數

	A	B	C
Granite	-16	+102	-8
Diabase	0	+ 55.9	+13
Quartzite	-5.7	+ 35	+ 7

$$P = [A(V/50)^2 + (V/50) + C]b + 2 \quad (5)$$

(1)式과 比較할 때 (5)式에서는 花崗岩과 珉岩의 경우 $-V^2$ 項이 추가되어 있다고 볼 수 있는데, 이것은 單位 切削面積을 만들기 위하여 低速에서 보다 高速에서 보다 낮은 레이저出力이 要求된다는 것을 뜻한다.

3. 載荷試驗과의 併用

레이저는 岩石을 切削할 뿐 아니라 熱應力의 近傍의 岩石을 劣化시키는 役割도 한다. 따라서, 機械應力을 使用하여 劣화된 岩石을 除却하는 것은 비교적 簡單한 일에 속한다.

그림 11은 L字型으로 切斷된 荷崗岩에 대하여 레이저와 커터로 切斷面에 홈을 만들어 點荷重試驗^{(9),(10)}을 한 것을 보이고 있다. 實驗은 (1) 레이저切削을 行한 後 約40秒지나서 荷重을 가한 경우, (2) 數日後에 荷重을 가한 경우 (3) 커터로 切削한 後 荷重을 加하는 3가지 段階로 구분하여 하였다. 이 結果(1)의 경우 40,000N에서 破壞가, 試料의 壁開表面에서는 2.75cm²의 岩石片이 分離되었으며, 이 때의 比에너지(specific energy)는 2,450J/cm²로 推定된다. TBM(tunnel-boring machine)과 레이저切削을 併用하는 경우, 切削 速度~144cm/sec에서 1cm의 切削深度를 만들기 위하여 必要한 레이저出力은 (5)式에 의하여 155kW가 된다. (2)의 경우, 破壞荷重은 (1)의 경우 보다 33%정도 增加하였다. 또한 (3)의 경우, 切削에 荷重이 併用된 경우에는 破壞가 일어나지 않았으나 60,000N보다 더 큰 荷重에 대하여는 2個의 岩塊로 分離되었다. 이들 實驗結果로 부터, 레이저切削은 岩石을 切削하여 一時的으로 脆弱하게 할 뿐 아니라 切削의 周邊部를 永久的으로 劣化시키는 役割도 한다는 것을 알게 되었다.

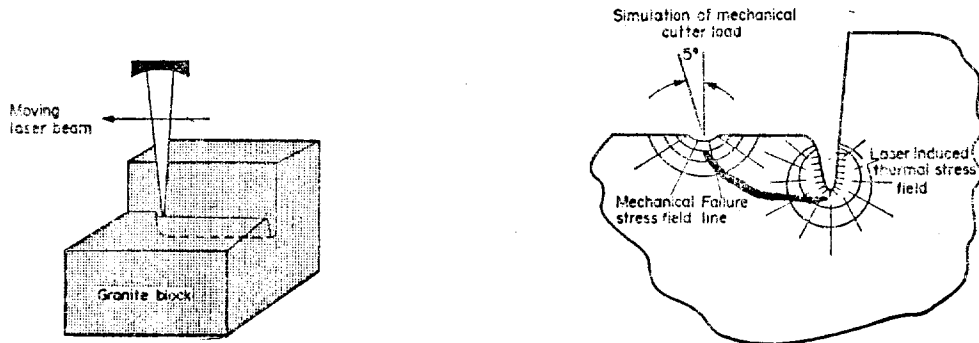


그림 11. 레이저와 機械的 岩石載荷의 併用試驗

4. 레이저切論削의 應用

今回の 實驗과 文獻⁽³⁾으로 부터, 레이저 비입은 게이저切削에 使用할 수 있을 정도로 充分한 深度에 빠른 速度로 岩石을 切削할 수 있다는 것을 알게 되었다. 그러나 完全하게 應用되기 위하여는 100~300kW의 레이저 出力이 要求되며, 급속히 發展되고 있는 레이저技術은 가까운 將來에 高出力레이저를 만들 수 있을 것으로 確信된다. 아래에서 두가지 應用에 대하여 考察하여 보자.

가) 터널게이지切削(tunnel-gage kerfing)

TBM에 의한 硬岩의 터널게이지切削에 레이저를 併用하는 경우^{(2), (11)}에 대하여 알아보자. 그림 12는 이 裝置의 概念圖이다. 直徑 4.5m의 터널을 掘削하기 위하여는 約 144cm/sec의 레이저切削速度가 必要하며 또한 一回轉當의 前進距離와 레이저貫入深度는 같아야 한다. 表 3⁽⁴⁾은 5種의 岩石에 대한 前進距離, 레이저貫入深度, 레이저出力의 값을 구한 結果이다. 一見하여 岩石의 強度가 增加함에 따라 TBM의 貫入率은 低下하며 必要한 레이저 出力도 減小되는 것을 알 수 있다. 그림 12는 이들 5種類의 岩石에 4.5m의 터널을 掘削는 경우의 機械게이지切削(mechanical gage-cutter:MGK)⁽²⁾과 레이저게이지切削(LGK)의 費用을 算定한 것이다(1974年 基準)이로 부터, 岩石의 強度가

增加함에 따라 게이저切削의 費用은 增加하며 砂岩을 제외한 나머지 岩石의 경우에는 LGK의 方式이 MGK보다 有利하다는 것을 알 수 있다.

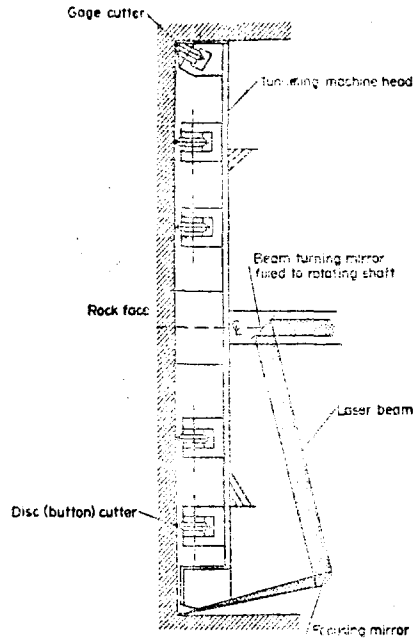


그림 12. 레이저게이지切削을 應用한 터널掘削의 概念圖

表 3. 4.5m의 터널掘削에 레이저게이지切削을 應用하는 경우의 諸值

Rock Type	Tunneling Machine Penetration Rate -meter/hr-	Laser Penetration Depth Required -cm-	Laser Power -kW-
Berea sandstone	4.85	1.33	154.1
New Haven traprock	2.16	0.59	81.2
Barre granite	1.78	0.49	77.0
Quakertown diabase	1.23	0.34	61.0
Sioux quartzite	0.88	0.24	16.5

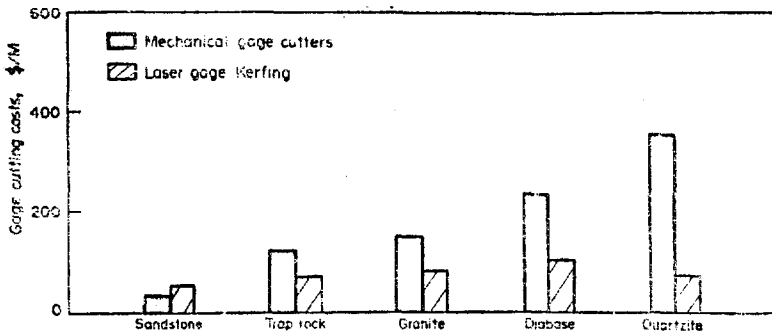


그림 13. 直徑 4.5m의 터널掘削時 터널게이지切削 費用의 比較

터널게이지切削의 費用은 터널掘削費用⁽¹¹⁾의 約 10%에 지나지 않는다. 따라서 LGK를 併用하는 경우에도 費用總減은 10%를 넘지 못하는 적은 量이라고 생각할지 모르지만 그렇다고 바로 無視수 할 餘는 것이 貫入率의 向上과 같은 다른 利點이 터널掘削費用을 減小시킬 수 있기 때문이다.

나) 發破孔穿孔

TBM에의 應用以外에, 從來드릴링으로 穿孔하던 發破孔의 穿孔⁽¹²⁾에 레이저 切削을 併用할 수 있을 것이다. 現在 深度 15m, 直徑 20~40cm의 發破孔을 穿孔하는 것이 一般的인데, 穿孔時에 게이지部 切削이 가장 困難한 問題이다. 만일 게이지가 簡單히 切削될 수 있다면 穿孔에 必要한 에너지量도 줄어 들고, 그만큼 비트의 壽命을 延長시킬 수 있다. 그림 14는 從來의 드릴과 레이저에 의한 게이지 切削을 組合한 裝置의 概念圖이다.

그림 15은 孔의 直徑 30cm, 回轉數 60rpm에서 드릴의 壽命을 現在와 같은 경우, 2배, 3배되는 경우에 레이저를 併用한 發破孔穿孔의 費用을 計算한 結果⁽¹²⁾, ⁽¹³⁾이다.

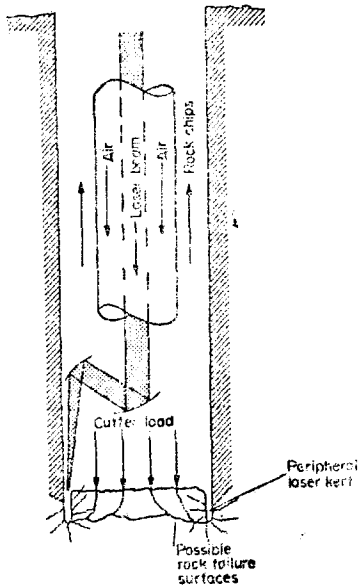


그림 14. 레이저를 併用한 發破孔穿孔의 概念圖

그림에서의 破線은 現在의 費用인 23\$/m를 表示한다. 또한, 비트의 壽命이 從來와 같은 경우, 29kW의 레이저出力을 내는 裝置가 採算이 맞는다는 것을 알 수 있다. 다음으로 이 때, 穿孔能率은 從來의 10m/hr에서 18m/hr로 80%나 增加될 것이다.

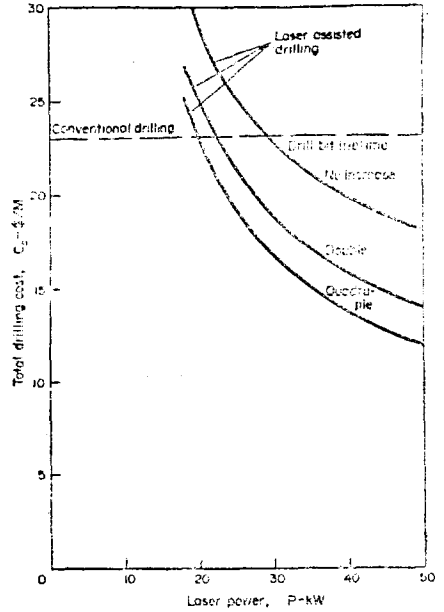


그림 15. 레이저를 併用한 發破孔穿孔의 全體費用

레이저를 併用한 發破孔穿孔裝置는 本質적으로 可能하다. 將來의 技術의 問題는 要求되는 出力을 유지하는 것으로 드릴비트(drill bit)와 레이저裝置를 組合하고, 孔底에서 극단적인 粉塵과 振動條件下에서도 신뢰할 수 있는 게이지切削機構를 完成하는 것이다.

5. 結 論

가) 貫入深度와 體積除却率의 測定値로부터, 試料로 使用된 種類의 岩石에 대하여 必要한 레이저出力이 切削速度와 切削深度의 函數關係를 갖는다.

나) 레이저切削으로 인하여 切削部周邊에 急激하고 恒久的인 岩石의 劣化現象이 일어난다. 이 永久的인 効果는 切削口에서 일어나는 應力의 集中의 效果에 기인하며, 短期間의 熱應力은 岩石에의 熱傳導에 기인한다.

다) 珪岩의 레이저 切削은 熱스포울링에 의하여 일어나는데 이 現象은 既知의 熔融熱과 單位體積의 珪岩을 除却하는데 必要한 레이저에너지의 測定値를 比較함으로써 확인할 수 있다. 또한 珪岩의 切削時 溶融物이 남지 않는다는 사실이 이 스포울링現象을 입증하는 또 다른 증거가 된다.

라) 터널게이지切削을 機械式게이지 切削과 레이저게이지切削의 費用과 比較한 結果 砂岩以外에는 레이저게이지 切削이 보다 經濟的임을 알게 되었다. 또 이점은 岩石의 強度가 增加함에 따라 增加한다. 또한, 實規模

의 턴벨게이지切削에 레이저切削을 應用하는 경우, 레이저出力은 100kW以下가 要求된다.

다) 硬岩의 發破孔穿孔에는 레이저게이지切削을 利用하면 相當한 費用을 削減할 수 있다. 이 경우, 50kW 以下の 레이저出力이 要求되며, 레이저集光裝置와 드릴비트를 組合하기 위한 開發努力이 必要하다.

參 考 文 獻

(1) Carstens, J.P. et al. Heat-assisted tunnel-boring machines. UARL Report No. J970802-13, Final Report on U.S. DoT Contract No. FR-9-0035(1970).

(2) Carstens J.P. et al. Research investigation of laser rock kerfing. UARL Report L-911329-8, Final Report on U.S. DoT Fed. Railroad Admin. Contract No. DoT FR-20021, NTIS No. PB-214439-2(1972).

(3) Jurewicz B.R. et al. Rock kerfing with high-power lasers. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech. Denver, CO(1974).

(4) Jurewicz B.R., Greenwald L.E. & Brown C.O. Focused laser beams to assist rock excavation. UARL Report N-971543-11, Final Report on U. S. DoT Fed. Railroad Admin. Contract No. DoT FR-20021, NTIS No. FRA-ORDSD-75-20 (1974).

(5) Brown C.O. & Davis J.W. Closed-cycle performance of a high power electric discharge.

laser. Appl. Phys. Let. **21**, 10(1972).

(6) Lindroth D.P. & Krawza W.G. Heat content and specific heat of six rock types at temperatures to 1000°C. U.S. BuMines Report 7503(1971).

(7) Bacon J.F. et al. Determination of rock thermal properties. UARL Report No. L-91139-74, Final Report to the U.S. BuMines under Contract HO220052(1972).

(8) Smith D.C. & Fowler M. C., Ignition and maintenance of a cw plasma in atmospheric-pressure air with CO₂ laser radiation. Appl. Phys. Let. **22**, 10(1973).

(9) Gobetz F. W. Development of a boring machine cutter instrumentaiton program. Dept. Interior, Bureau of Mines. United Air craft Research Laboratories Report M-971373-10(1973).

(10) Peterson C.R. Roller cutter forces. Soc. Petrol. Eng. J. pp. 57-65(1970).

(11) Handewith H.J. Predicting the economic success of continuous tunneling in hard rock. Paper presented at the 71st Annual General Meeting of the CIM, Montreal (1969).

(12) Cummins, A.B. & Given I.A. (Editors). SME Mining engineering handbook. section 11, Fragmentation (1973).

(13) Jurewicz, B.R. A preliminary analysis of two laser-assisted rock excavation concepts. UARL Report R-171099-2(1975).

生活 속 에 科學 심 어 祖國 繁榮 이 른 하 자

勤 儉 節 約

節 電