就 任 辭

社團法人 大韓熔接學會
會長 嚴 基 元

尊敬하는 會員여러분! 本學會의 91. 92.年度 第5期 會長職을 맡게 되여 責任의 重大함을 痛感하고 있습니다.

우리學會는 82年 10月에 創立하여 明年 10月에는 10週年의 記念行事를 擧行하게되는 榮光을 本人의 任期中에 맞이하게 되였습니다. 本學會는 會員數 1100餘名과 特別會員 34個社. 贊助會員 13個 機關으로 이루어져 있으며 오늘이 있기까지는 끊임없는 協議와 和合의 體系를 이룩하신 嚴東錫 前任會長과 理事任 그리고 會員여러분들의 獻身的인 學會活動의 結果라고 생각합니다. 故朴鍾殷 前會長과 前任會長과는 大韓機械學會와 大韓造船學會에서 主催하던 熔接技術 講習會에서 熱心히 일하던 생각이 走馬燈같이 腦裡를 스치고 지나갑니다.

故人의 冥福을 비는 마음은 全會員들과 더부러 河海와 같습니다.

本學會의 發展을 위하여 先輩諸賢과 新旧 理事任들의 指導鞭達과 積極的인 參與가 있으시기를 간절히 바랍니다.

現代熔接技術은 날로 새롭게 발전하고 있으며 尖端科學技術의 一翼을 담당하며 近代自動化 시스템에 必要不可缺의 技術입니다. 그리고 複合熔接加工技術은 製品의 高附加價値化, 生産性向上, 미케트로닉스械器, 新素材등의 開發을 先導하며 輕薄短小의 製品으로 急展開되고 있으므로 이에 適應되는 技術普及의 責務가 매우 重要함을 느낍니다. 近代 鐵鋼의 熔接은 融接으로하며, 異種金屬의 熔接은 壓接으로하며, 新素材의 熔接은 接着(혹은 蒸着)으로하며, 高附加價値와 生産性向上의 熔接은 最適熔接設計로 이루어진 複合熔接加工 技術로 하는 것입니다.

本人은 熔接學會의 任務를 技術社會의 中核으로써의 役割을 忠實히 遂行하고저 다음과 같은 具體的인 課題를 整理합니다.

① 熔接技術專門家集團의 活動과 相互親睦增大
② 國際熔接學會(IIW)와 같은 技術委員會 運營機構의 追求와 研究活動强化
③ 會員相互間의 奉仕機會捕捉과 活動弘報
④ 事務局의 業務處理合理化

이들 4개의 항은 어느것이나 獨立的으로 되는것은 하나도 없으며 또한 短期間에 達成되기가 容易한 것이 없습니다. 그러나 前任의 훌륭하신 理事陣에 의하여 出發된 各機關을 活發히 可動시키므로써 充分히 所期의 目的을 잘 이룩하게 되리라고 믿습니다.

學會의 發展은 各種技術委員會의 活動如何에 있습니다. 今年 7月에는 IIW의 國際會議가 네델란드(Netherlands)의 헤이그(Hague)에서 있게 됩니다. 적극적으로 참여하시여 좋은 論文發表의 기회가 되시기를 바랍니다. 明年에는 熔接用語 辭典의 發刊과 10週年行事가 있게 됩니다. 全會員任들의 共同事業이라고 생각하시여 회원모두가 參與할수 있는 멋있는 計劃을 기탄없이 알리여 주십시오.

끝으로 學會의 무궁한 發展과 會員任들의 健勝하심을 祈願하면서 이만 人事를 드립니다.

感謝합니다.

1991年 元旦.

解 說
大 韓 熔 接 學 會 誌
第 9 卷 第 1 號 1991年 3月
Journal of the Korean Welding Society
Vol. 9, No. 1, Mar., 1991

레이저 가공기술(III)

한 유 희*

Laser Beam Processing Technique(III)

Y. H. Han*

<목 차>

2. 레이저 용접의 특별사항
2.1. 용접부 준비 가공 (접합부 준비)
2.1.1. 이음부 형상
2.2. Plasma 영향
2.3. Shielding Gas의 영향
2.4. 편광 영향
3. 레이저 Beam의 진단 (Diagnostic)
3.1. 레이저 출력 측정
3.2. Intensity 측정
4. 결 언

2. 레이저 용접의 특별사항

2.1. 용접부 준비사항

용접하기전 이음부의 가공에 타 용접방법에서 보다 더 세심한 주의를 할 필요가 있다. 용융부위가 적은 관계로 이음부의 간극이 작아야 하고 촛점이 이음부에 정확히 조준되어야 한다.

2.1.1. 이음부 형상

허용간극은 레이저 빔이 수렴되는 형상과 용접열량에 영향을 받으므로 이음부의 허용간극을 일반적으로 규정 짓는 것은 불가능하다. 예로써 6 mm 두께의 강판을 각각 0.2, 0.5 그리고 1mm의 간극을 두고 맞대기 용접을 했을때 용접부 단면의 형상이 그림 15에 나타나 있다.

그림에서 간극이 클수록 함몰현상이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 허용간극 및 엇갈림의 범위는 재료두께에 따라 다음의 기준치를 넘지 않도록 한다.

재료두께	간 극	엇 갈 림
0.5- 3mm	0.1 d	0.15d
3 -10mm	0.05d	0.1 d

* 정회원, 한국해사 기술연구소.

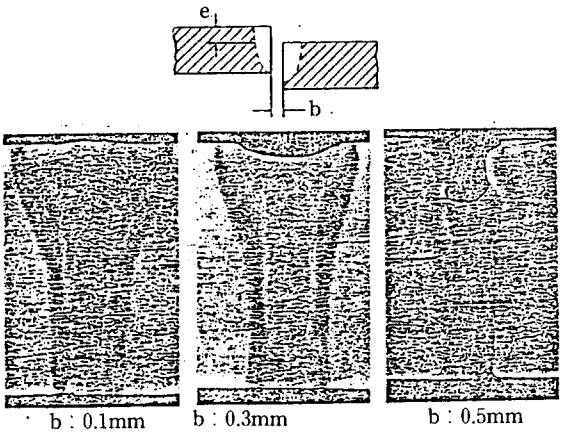


그림 15 이음부 간극에 따른 용접단면의 변화

2.2. 플라즈마 영향

레이저 용접의 효율은 레이저 빔 에너지를 얼마만큼 열에너지로 변환시키느냐에 달려 있다. 이같은 에너지 변환을 이해하기 위해서는 레이저 빔이 흡수되는 과정을 이해하는 것이 전제가 된다. 흡수는 두가지 방법이 있다.

-보통의 재료와 파장에 따른 흡수 (I < I c)

-출력의 밀도에 따른 흡수 (I > I c)

적외선의 금속표면 흡수율은 그림 16에서 보듯이 매우 적다. 흡수는 금속의 자유전자를 통해 일어나므로 열전도율과 전기 전도도에 역비례한다. 따라서 온도상승에 따른 흡수율의 변화(그림 17)가 있다. 증발온도 부근에서 반사율이 급격하게 감소하는 것은 금속증기 발생 -플라즈마 생성으로 흡수율이 높아진 것으로 설명될 수 있다.

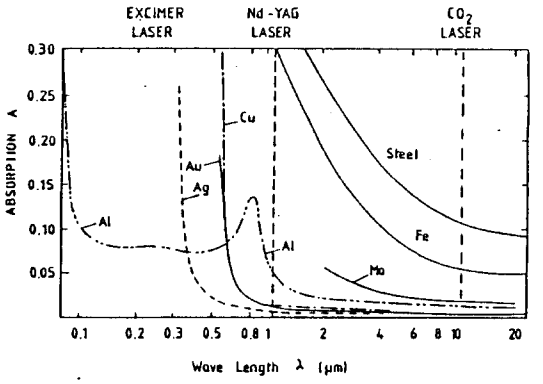


그림 16 금속에서 파장에 따른 흡수율 변화

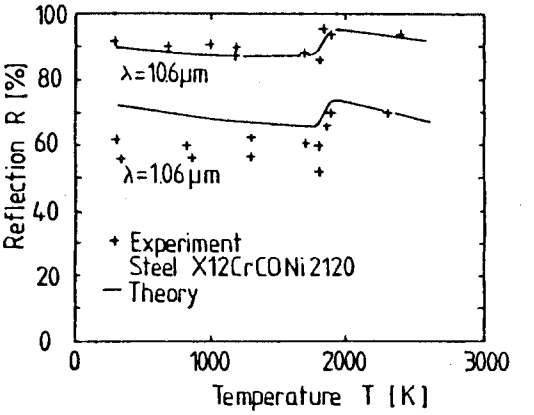


그림 17 온도에 따른 흡수반사율 변화

레이저 용접시 레이저 빔 에너지의 90% 이상이 열에너지로 변환, 즉 흡수율이 90% 이상 되는 것은 플라즈마의 발생 및 key hole 형성으로 설명할 수 있다.

현 시점에서 플라즈마와 key hole의 역할의 비중을 논하기에는 아직 연구가 미흡한 상태이다.

plasma설을 주장하는 측은 laser beam과 재료간의 에너지 전달은 다음과 같이 laser-plasma : plasma-재료, 즉 레이저 빔이 plasma에 흡수되고, plasma에 흡수된 에너지는 복사, 대류를 통해 재료에 전달된다고 주장한다. intemsity가 커지면 plasma가 과도 발생하고 레이저 빔은 plasma군에 의해 일부 반사 및 차단되어 용접효율은 감소하게 된다.

Key hole의 형성이 레이저 빔의 흡수를 올리는데 결정적인 역할을 한다고 주장하는 측은, plasma가 없이도 key hole의 다중반사를 통한 내벽의 흡수로도 과도흡수 효과를 설명할 수 있다고 주장한다. 출력밀도가 상승함에 따라 재료 표면에서 증발이 일어나며, 이때 증발압력에 의해 key hole이 형성되며, key hole 내벽은 일종의 wave guide 역할을 한다.

2.3. Shielding Gas (Process Gas)의 영향

과도한 plasma의 발생은 laser beam을 차단하고, 따라서 key hole이 닫히게 된다. plasma가 확산됨에 따라 다시금 key hole이 열리게 되고-plasma의 과도발생 -key hole닫힘-plasma확산 등의 반복이 일어나게 된다. 이로 인해 용접깊이의 변화가 현저하게 나타난다. 이같은 불량요인을

없애기 위해서는 plasma가 과도히 생성되는 것을 방지해야 하는데, 이때 주로 process gas를 key hole 주위에 불어서 plasma를 감소(금속증기내의 ion과 electron의 재결합(Recombination))시킨다. Laser beam이 plasma에 흡수되는 율은 전자의 밀도에 비례하므로 재결합(Recombination)으로 인한 만큼 흡수율이 감소된다. 재결합은 소위 3자충돌, 즉 ion과 electron 또는 neutral gas atom이 충돌함으로써 이루어진다.

Neutral gas aton의 밀도는 electron의 밀도보다 훨씬 크므로 neutral gas의 역할이 3자충돌에서 중요한 역할을 한다. 충돌의 확율은 gas atom의 운동성에 비례하므로 gas atom의 질량에 반비례한다. 따라서 helium, 질소, argon의 순서로 3자충돌의 효율이 감소된다. Plasma의 밀도가 적을수록 3자충돌의 확률 내지는 효율이 감소하므로 process gas(neutral gas)의 역할이 작음을 알 수 있다(그림 18).

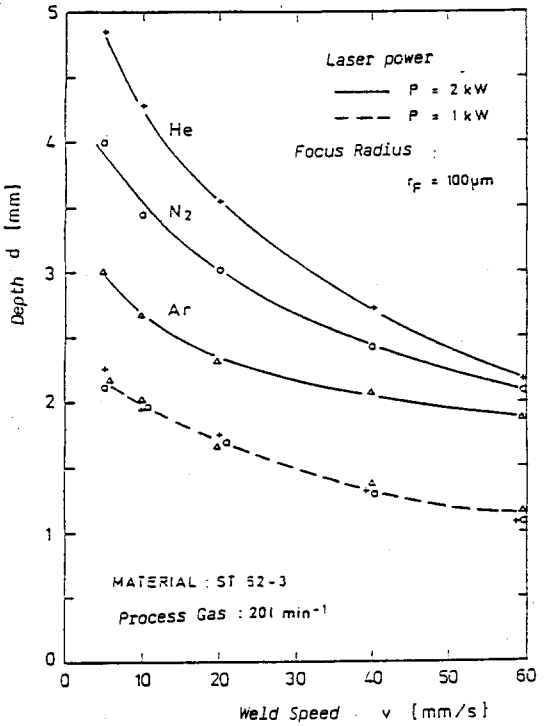


그림 18 각 process gas에서 용접속도에 따른 용접깊이 변화

2.4, 편광영향 (Linear Polarization)

레이저 절단에서 절단방향을 기준한 레이저 빔의 편광이 절단성에 영향을 준다고 하는 사실은 이미 알려져 있다. 용접에서도 편광이 적게나마 용접성에 영향을 준다(그림 19, 20).

-Intensity가 증가하고 용접속도가 감소함에 따라 금속증기의 밀도가 상승되며, 이로인해 plasma를 매체로한 빔의 흡수가 지배적으므로 그림 20에서 보듯이 용접속도가 적은 범위 (<40 mm/s)에서는 편광으로 인한 용접깊이의 차이는 볼 수 없다.

-용접속도가 클 경우에는 plasma의 밀도가 적어서 plasma를 매체로한 빔의 흡수가 상대적으로 줄어들어 편광의 영향이 크게 나타난다.

-Intensity가 작은 경우에도 그림 19에서와 같이 편광의 영향이 나타난다.

-용접속도가 20mm/s와 35mm/s에서 급격한 용접깊이의 변화가 있는 것음 임계 intensity(critical intensity)에 달했기 때문이다. 증발율이 이 경우에는 작은 관계로 plasma의 생성 및 유지가 어렵고 따라서 key hole이 형성되지 않았다.

편광성이 용접깊이에 영향을 주는 것은 그림 21에서 보듯이 입사각에 따른 반사율의 변화에 기인한다.

선형편광(linear polarization)을 circular polarization으로 바꿔줌으로써 편광방향에 따른 용접깊이의 변화를 방지할 수 있다(그림 22).

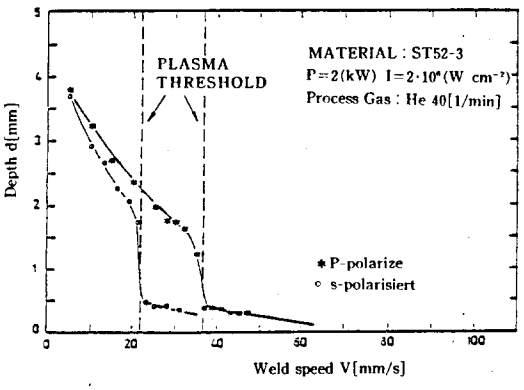


그림 19 편광방향에 따른 용접속도 변화에서 나타나는 용접깊이

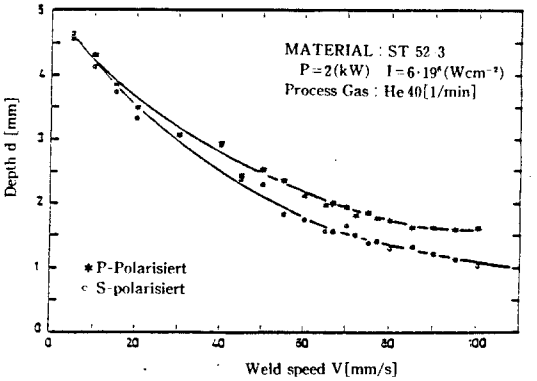


그림 20 편광방향에 따른 용접속도 변화에서 나타나는 용접깊이

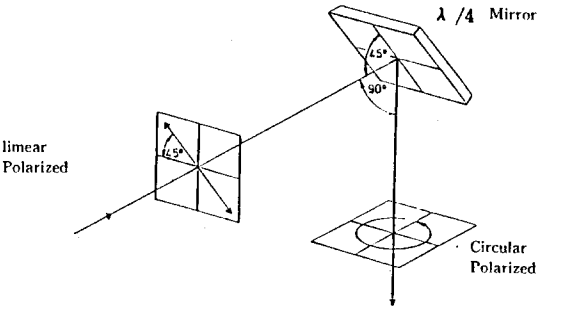
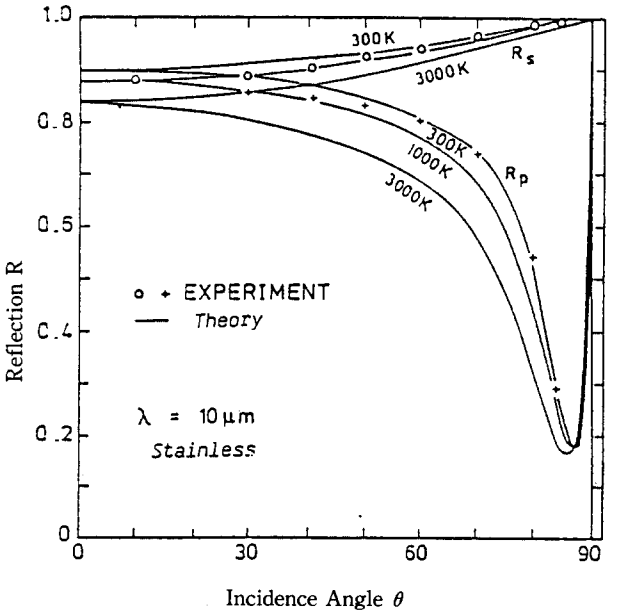


그림 22 Linear polarization을 circular polarization으로 변환



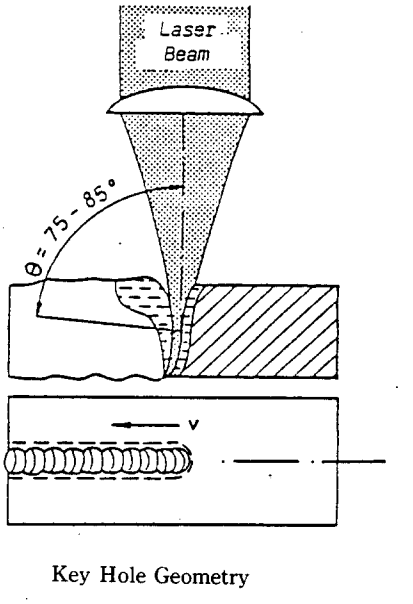


그림 21 입사각에 따른 반사율 변화

3. Laser Beam의 진단 (Diagnostic)

실제 Laser를 이용하는 산업분야에서 laser beam 진단장치의 중요성이 점차 인식되어 가고 있다. 이는 beam의 진단이 laser를 이용한 재료가공 하는데 있어 얼마만큼 중요한 위치를 차지하고 있는가를 말해주고 있다.

Laser 자체를 개발하는 분야에서는 beam quality를 정확히 잴 수 있음으로 해서 보다 나은 laser를 개발하게 되는 계기가 되고, laser system을 설치해 주는 기술자는 정확한 진단장치를 사용해서 laser가 가진 본래의 성능을 낼 수 있도록 보장할 수 있게 된다. 그리고 실제 laser를 사용하는 현장에서는 beam quality를 수시로 점검할 수 있어 품질검사 목적으로 진단장치를 사용하게 된다.

Laser beam을 진단한다고 하면 다음의 laser parameter를 측정한다고 말할 수 있다.

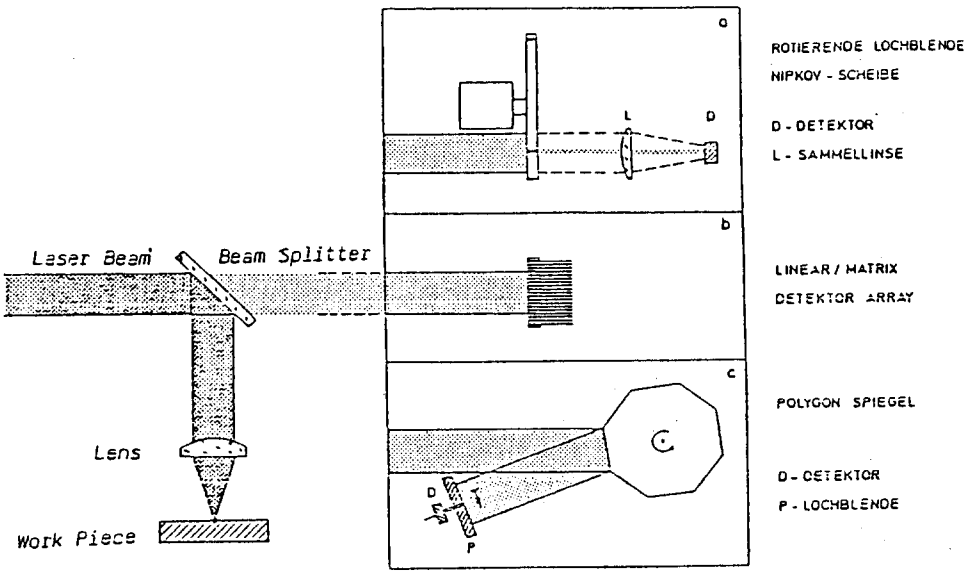
1) 출력
2) Polarization의 상태
3) Laser beam의 안정도
   (Beam poiniting stability)
4) Intensity

위의 4가지 중에서 intensity 측정은 재료가공에서 중요한 의미를 갖고 있다고 할 수 있다. 이는 출력, beam의 위치, beam의 직경, rayleigh length 그리고 divergence들이 beam의 intesity 분포로부터 산출되기 때문이다. 촛점이 맺히기 전과 촛점상에서 beam의 intensity 분포는 beam 이 전파되는 동안 거울, beam의 경로를 보호하는 관의 분위기 또는 lens등의 영향으로 인해 변한다. 따라서 실제 가공이 이루어지는 촛점 부근에서 intensity의 분포가 직접 가공 quality와 가장 밀접한 관계를 갖는다.

위에서 언급한 laser parameter를 파악하는 것 외에도 시간상에 따른 beam의 상태 변화를 측정하는 것도 고도의 품질을 요하는 가공에서는 중요하다고 하겠다. 시간의 변화에 따른 laser beam의 변화는 시간단위에 따라서 우선 수분에서 수시간에 이르는 시간 단위에서는 열영향으로 인한 resonator와 beam guiding system의 변형을 들 수 있다. 방전과 가스 유동에서의 변화에 기인한 출력의 불안정은 ms 범위의 시간단위에서 일어난다. 위의 현상들이 품질에 얼마나 영향을 주는가는 가공과제에 따라 다르다. 그러므로 가공과제에 따라 적합한 진단장치를 선택, 사용하는 것이 바람직하다.

3.1. 레이저 출력 측정

고출력 레이저 beam을 진단하는데 있어서 기본적인 문제점은 짧은 단위시간에 큰 출력의 변화를 감지하는데에 있다. 큰 부하를 받을 수 있는 thermal detector는 수 kW 범의에서 사용되나, 반응시간이 긴 단점이 있다. 반응시간이 짧은 것이 요구될 때에는 Pyro-Detector 또는 Quantum-Detector를 선택하는데, 이들의 반응시간은 ms에서 nano sec 범위이며, 저온에서 작동한다. 고출력 레이저 beam을 진단하기 위해서는 위에 기술한 이유 때문에 beam을 약화시켜야 하는데 통상 chopper나 splitter를 사용한다. 부분 투과 거울을 통해 나온 레이저 빔을 Pyro-Detector를 이용해 출력을 측정하는 장치가 그림 23에 나타나 있다. 가공시 가공물에서 반사되는 beam에 의해 resonator 내부에 교란이 생겨 출력의 변화가 크게 나타나는 것을 그림에서 볼 수 있다.



a) Photon Tenhnology, San Jose, CA, USA ;
b) Molectron Corporation, Sunnyvale, CA, USA ;
c) Leb. Device

그림 23 Intensity 측정 원리

3.2. Intensity 분포 측정

그림 23에 3가지의 on-line 측정장치가 나타나 있다. 고출력 레이저에서는 앞에서 서술한 바와 같이 beam을 약화시켜야 하므로 beam splitter를 사용하고, 위치에 따른 출력, 즉 intensity를 측정하기 위해 hole, detector array또는 polygon mirror를 사용한다. 이같은 측정장치에서 beam splitter의 부하한계는 최고 1kW/cm²이다. Polarization방향에 따른 투과비율이 다르므로 polarization방향에서의 laser beam의 출력변화가 있을경우 측정오차가 생길 수 있다.

그림 24에서는 다른 4가지의 측정원리가 나타나 있다. 여기에서는 반사율이 높은 element가 광속의 단면을 지나갈때 반사된 빔을 detector로 측정한다. a, b, c의 방법을 raw beam의 intensity 측정에만 사용된다. d의 경우에 raw beam뿐 아니라 촛점에서의 intensity도 측정이 가능하다.

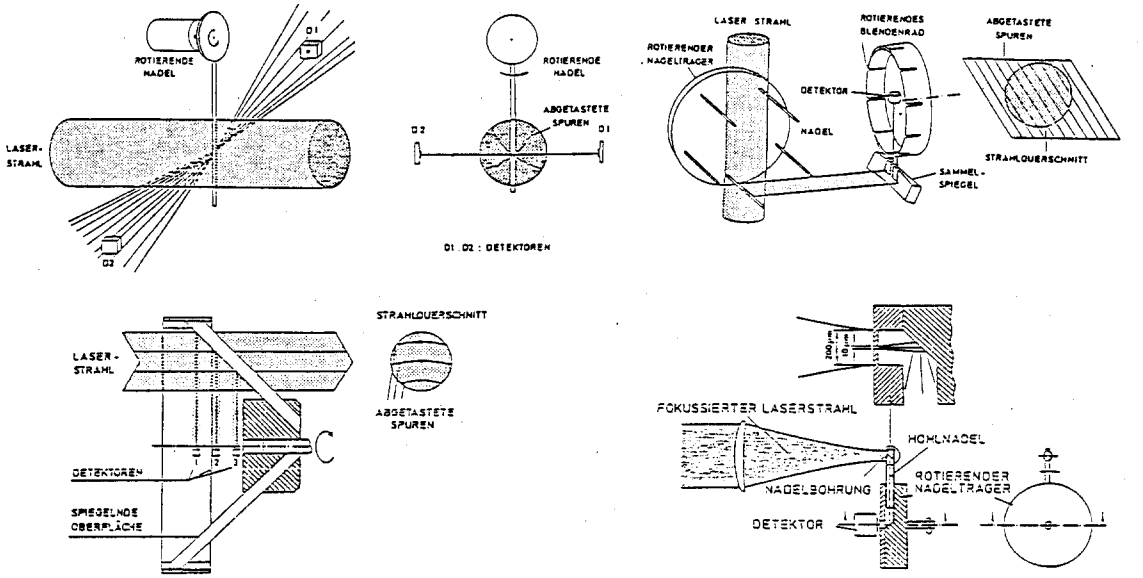
촛점의 intensity 측정으로 optic(lens, parabolic mirror)의 alignment를 점검을 할 수 있어 측정장비 d는 중요 장비로 부각되고 있다.

4. 결 언

레이저는 이미 SDI 또는 공상과학에서 나오는 살인광선이 아니라 우리의 실생활을 좀더 윤택하고 편리하게 해주는 이로운 도구로써 점차 그 영역을 넓혀가고 있다. 가깝게는 CD-player에서 시작해서, 의학, 통신, 재료가공 등에서 레이저가 응용되고 있다.

재료가공 분야에서 레이저가 차지하는 비중은 우리나라에서는 아직 미미하지만 선진국의 예를 보면 공장자동화와 품질 및 생산성 향상이 연계되어 이미 많은 부분에서 그 진가를 발휘하고 있다. 선진국에서 레이저를 사용하게 된 배경은, 우선 레이저를 사용함으로써 제품의 질을 높히는 외에 타 제조방법에 비해 경제적이기 때문이다.

이같이 산업발전에 초석이 되는 레이저 가공기를 국내에 보급시키기 위해 몇몇 회사에서 이미 시도를 했으나, 어떤 이유에서인지 기대할만한 성과를 가져오지 못한 것으로 안다. 나름대로 분석해 보면, 우선 인식부족이 가장 큰 장애요소가 되지 않았는가 사료된다. 신기술에 대한 막연한 두



a) Fa. Applikationslabor für Lasertechnik (ALL), Munchen
b) Bremer Institut für angewandte Strahltechnik Bremen(Bild nach BIAS/ Bremen)
c) Fraunhorer-Institut fur Produktionstechnologie, Aachen(Bild nach FhG - IPT/ Aachen)
d) Fraunhofer-Intitut für Lasertechnik, Aachen Vertieb : Fa. Prometec, Aachen

그림 24 Intensity 측정 원리

려움과 고가의 설비투자는 레이저의 생산능력을 실제로 인식하지 않고는 선뜻 하기 힘든 것이다.

선진국에서도 이와 똑같은 경우를 경험했고 아직도 사용범위를 위해 위의 어려움을 타파하려고 노력하고 있다.

우선 인식부족을 타개하기 위해서는 활발한 홍보활동이 전개되어야 한다. 이를 위해서 seminar 또는 work shop등이 개최되어야 하고, 실제 가공현장 견학 등이 부가되어야 한다.

다음 단계로 설비투자에 앞서 실제 공정가능성을 조사해야 하는데, 이같은 일을 수행하는 기관이 있어야 한다. 이곳에서 실제 샘플을 제작해 보고 성능 테스트를 거친 후에 비로소 레이저 가공기를 구입, 설치하게 된다. 위에서 언급한 수행기관은 레이저 전문 연구소 또는 레이저 가공기 제작회사가 될 수 있다. 이와 같은 기관의 필요성은 레이저가 일반 용접기와 달리 고가인만큼 각 업체마다 한대씩 구입해서 제품생산 실험을 하기에는 무리가 있기 때문이다. 가공목적에 따라 적당한 레이저를 선택해야 하므로, 각종 레이저가 설치된 연구소의 필요성이 있고, 실제 선진국에서는 laser center가 많이 운동되고 있다. Laser center에서는 정보제공, 자문, 연구개발 등을 해주고, 필요에 따라서는 pilot production과 생산라인의 lay out까지 하고 있다.

선진국으로 발돋음하고 있는 우리나라에서도 위와 같은 laser center를 설립할 시기가 오지 않았나 하는 소견이다.

참고문헌

You-Hie Han : Werkstoffveraenderungen beim Laserstrahlschneiden von Staehlen, Ni-Basis und Cu-Ni-Legierungen und derenEinfluss auf die Schwinnnngfestigkeit. Doctor Thesis

David Belforte(Editor) : The Industrial Laser Anual Handbook. Penn Well Books 1987 Tulsa, Oklahoma USA

Lutz Cleemann(Editor) : Schweissen mit CO_2-Hochleistungslasern. VDI Verlag Duesseldorf

解 說

大 韓 熔 接 學 會 誌
第 9 卷 第 1 號 1991年 3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 9, No. 1, Mar., 1991

TMCP강의 절단변형

김 희 진*·배 강 열*

Cutting Camber of TMCP Steel Plates

H. J. Kim*, K.Y. Bae*

I. 서 론

Thermo-mechanical Control Process(TMCP)는 가속냉각 공정의 적용여부에 따라 (i) 가속냉각형 TMCP와 (ii) 비가속냉각형 TMCP로 대별되고 있는데, 이와같은 분류는 가속냉각공정이 TMCP에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있기 때문이며 최근구조용 강재로써 주목을 받고 있는 것도 가속냉각형 TMCP 강재이다. 가속냉각형 TMCP 공정은 Fig.1에서 보듯이 기존의 제어 압연(controlled rolling)공정에 가속냉각과정을 단순하게 추가한 것이라고 할 수 있다. 가속냉각은 강판의 온도가 800℃정도에서 시작하여 약 500℃정도에서 끝나게 되는데 이과정에서의 냉각속도는 (냉각장치의 성능에 따라 다소 차이는 있겠지만) 20mm두께의 강재를 기준으로 약 4~20℃/sec 정도이다. 그리고 일반선급용 고장력 강판에 적용되는 냉각속도는 약 7℃/sec 정도로 알려지고 있는데, 이러한 냉각속도는 자연냉각속도(약 1℃/sec이하)와 비교하여 볼 때 무척 빠름을 알 수 있다.

가속냉각형 TMCP강재는 日本에서 1981년에 최초로 개발되어 line pipe용 강재로 사용되다가, 1983년부터 선급용 강재로 인정받아 선박건조에 사용되면서 그 사용량이 급격히 증가하였다. 수년전부터는 기존

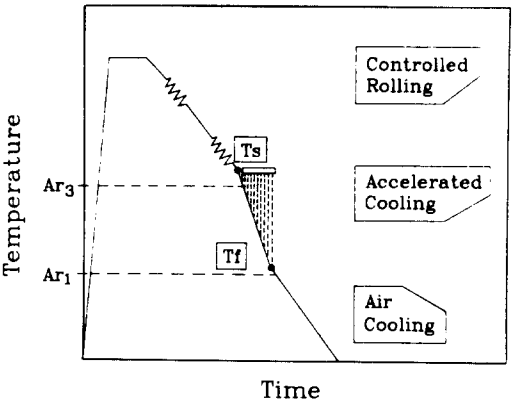


Fig. 1 Schematic illustration of accelerated-cooled type TMCP

강재를 완전히 대체하여 모든 선급용 고장력강에 TMCP강재만이 사용되고 있다고 한다. 이와같이 TMCP강재가 선급용 강재로 크게 호응을 받을수 있었던 것은 TMCP강의 용접성이 기존 강재보다 우수하여 TMCP강을 상용함으로써 생산성을 향상시킬수 있다는 판단에서 유래되었다[1]. 이와같은 판단을 바탕으로 日本은 국내 조선소의 경쟁력이 강화될 것을 우려하여 지금까지도 한국으로의 TMCP 강재 수출을 금지하고 있으며, 단지 해양구조물이나 특수 project

* 정회원, 현대중공업(주), 종합연구소.

에 대해서만 선별적으로 공급하여 주고 있는 실정이다.

국내에서는 1988년 하반기부터 50kg/mm²급 TMCP 강재가 생산되기 시작하여 국내 조선업계도 TMCP강재의 사용이 가능하게 되었다[2]. 이에따라 국내수요가들은 국산 TMCP 강재의 원활한 사용을 위하여 생산자 주관으로 'TMCP강종개발위원회'를 주기적으로 개최하여 국산 TMCP강의 품질 평가와 함께 TMCP강의 단점 등을 여러 측면에서 검토·보완하고 있다. 본 해설에서는 TMCP강재의 문제점들 중에서 선박용 강재로 사용하고자 할때 가장 큰 문제점으로 제기되고 있는 절단변형에 대해 기술코자 한다.

절단변형(cutting camber)은 강판을 길이방향으로 절단하였을 때 절단된 부재가 Fig.2에서 보여주는 바와같이 한쪽 방향으로 휘게되는 현상을 칭하는데, 만약 이와같은 변형이 매우 심하게 발생하게되면 기계적 또는 열적교정을 수행하여야 하기 때문에 생산성 저하의 요인이 된다. 더구나 절단변형은 길이변화를 수반하여 부재의 길이가 수축되거나 신장되기 때문에 처음에 예상하였던 길이와 다를 수도 있다. 특히 선급용 강재의 경우는 약 20%정도가 길이방향으로 절단되어 선체의 보강재로 사용하고 있을 뿐만아니라, 복잡한 형상을 가지는 부재로 절단되어 사용되고 있기 때문에, 절단부재에서 위와같은 변형 및 길이부족현상이 발생하게되면 생산공정에 지대한 영향을 주게 된다.

그런데 이와같은 절단변형 문제가 TMCP강재를 사용하고자하는 시점에서 심각하게 제기되고 있는 것은 과거 日本에서(TMCP강재를 사용하던 초기에) 그와 같은 문제로 많은 어려움을 겪었다고 듣고 있기 때문이다. 일본에서는 그와같은 문제점을 해결하기 위하여 절단변형의 발생원인 및 발생기구 등에 대해 많은 연구를 수행하였고, 그 연구결과를 바탕으로 원인제거를 위한 설비보완 및 공정변경 등을 수립하였다고 한다. 그러나 지금도 절단용 강판에 대해서는 생산자가 특별히 관리할 필요가 있기 때문에, 생산자는 주문자에게 절단용과 非절단용을 구분하여 주문하여주기를 바라고 있다.

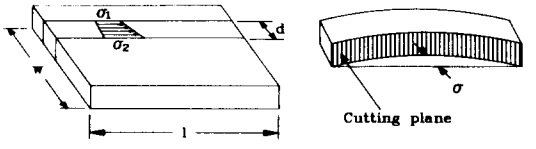


Fig. 2 Schematic illustration of cutting camber

2. 절단변형 발생원인

일반적으로 강재는 flame이나 plasma와 같은 열원을 이용하여 절단하게 되는데, 이와같은 열적절단(thermal cutting)에 있어서 발생되는 변형은 다음과 같은 두가지 원인으로 설명되어지고 있다.

(i) 열적절단(thermal cutting)시 양쪽 절단면 간에 입열이 동일하지 않을 경우 입열의 차이로 인하여 발생하는 변형.

(ii) 강판 제조과정에서 발생되는 잔류응력이 강판內에 균일하게 분포되어 있지 않기 때문에 발생되는 변형.

이상의 두가지 원인중에서 입열의 差異에 의해 발생하는 변형은 절단조건이 균일하지 못하기 때문에 발생하는 현상이므로 강재의 제조공정과는 전혀 무관하다고 하겠다. 다시말하면 절단조건 때문에 발생하는 변형은 모든 강재에서 같은 정도로 나타날 수 있는 변형이기 때문에 TMCP강재이기 때문에 특별히 우려되는 사항은 되지 못한다. 결국 TMCP강에 있어서 절단변형이 크게 우려된다면 이는 후자의 영향, 즉 잔류응력 때문에 발생하는 변형량이 클 것이라고 예상할 수 있다. 이러한 예상은 TMCP강이 가속냉각 과정을 거쳐서 생산된다는 사실에서 유래된다(Fig.1). 가속냉각은 고온상태(800℃~500℃)의 강판에 냉각수를 뿌려서 냉각을 가속화시키는 과정인만큼 아무리 정교한 냉각장치를 사용한다고 하더라도 엄밀한 의미에서 대기중에서 수행되는 자연냉각만큼 냉각이 균일할 수 없을 것이다. Fig.3은 가속냉각된 TMCP강판에서 측정된 온도분포를 보여주는 한 예인데 본 강판에 있어서의 최대온도편차는 약 90℃정도였음을 보여주고 있다. 이와같은 온도편차는 냉각과정에서 열응력을 발생시키는데, 열응력의 발생은 최종적으로 강판의 변형으로 나타나거나 강판내에 잔류응력으로 남게된다. 여기서 강판의 변형은 hot leveler라고 하는 교정기를 통과하면서 교정되기 때문에 최종제품에서는 나타나지 않지만, 잔류응력은 이러한 교정과정을 거치더라도 제거되지 않는다. 따라서 잔류응력분포의 불균일성은 TMCP강판자체가 가지는 문제점이라고 할 수 있으며, 불균일한 정도는 냉각장치의 성능및 생산기술 및 경험등에 따라 결정된다고 하겠다.

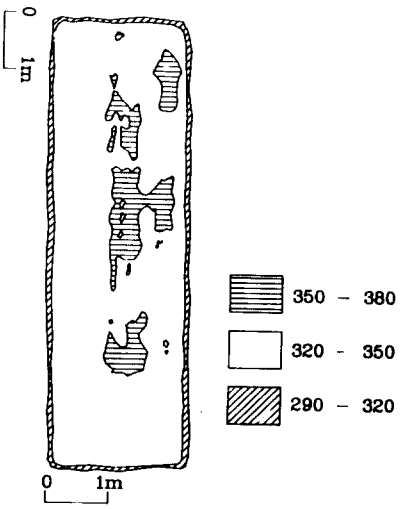


Fig. 3 Example of temperature distribution recorded in the accelerated cooled TMCP steel plate

3. 절단변형 발생 기구

앞절에서 설명한 바와 같이 TMCP강의 절단변형은 잔류응력의 불균일성에서 유래되고 있는바, 이를 보다 구체적으로 설명하기 위하여 본 절에서는 불균일한 잔류응력 분포가 절단변형을 유발하는 과정을 열응력 측면과 잔류응력 해방측면에서 고찰하여 보았다. 본 고찰의 전제조건은 절단조건이 동일하여 입열 差 때문에 발생하는 변형은 없다는 것다.

3. 1. 잔류응력과 열응력에 의한 변형

강재를 gas 절단하게 되면 절단면 부위는 절단입열에 의하여 가열·냉각되면서 온도분포를 가지게 되는데 이러한 온도분포는 절단면 부위에 열응력을 발생시킨다. 열응력의 크기와 분포는 gas절단조건과 구속조건에 따라 다르겠지만, 절단면에서의 응력상태는 열팽창이 억제되기 때문에 압축응력으로 나타난다. 이러한 압축응력은 강판내에 존재하는 잔류응력과 중첩되어 변형으로 나타나게 된다. 즉 판재에 압축잔류응력이 존재하면 열응력과 더불어 압축항복응력을 초과하게 되고 초과된 만큼은 소성변형으로 나타나게 된다. 그 결과 절단면 부근에서는 길이가 상대적으로 많이 줄어드는 현상이 발생한다. 따라서 절단조건이 동일하다고 하더라도 폭방향으로의 잔류응력 분포가 균일하지 못하면 절단면에서 발생하는 수축량에 차이가 발생하여 절단된 부재는 수축량이 많이 나타나는 쪽으로 휘게되어 camber가 발생한다. 그런데 이와같이 발생되는 camber(열응력에 의한 변형)는, 그 量이 잔류응력의 함수로 표현되는 것이 바람직한데, 현실적으로 절단면 부위에서의 열응력 분포, 고온에서의 재료의 소성변형거동, 절단열에 의한 잔류응력의 재배치등이 명확히 이해되지 못하고 있기 때문에 그와같은 함수를 구체화 한다는 것은 거의 불가능 한 것 같다. 따라서 비록 잔류응력 분포를 정확히 알고 있다고 하더라도 이에 의한 열변형의 크기를 예측하지 못하는 어려움이 있다. 결국 본해설에서는 이에 의한 변형이 다음절에 기술되는 '잔류응력해방에 의한 변형'에 비해 무척 작을것으로 보고 이를 무시하였다.

3. 2. 잔류응력해방에 의한 변형

잔류응력을 가지는 강판을 절단하게 되면 절단된 부재는 잔류응력이 해방되어 역학적으로 평형이 되도록 변형을 일으키게 된다. 잔류응력 해방에 의해 발생되는 변형 양상과 변형량을 이론적으로 예측하여 보면 다음과 같다. 먼저 잔류응력이 Fig.2에서 보여주는 바와 같이 폭방향으로 직선적인 분포를 하고 있고, 이러한 분포가 전길이에 있어서 동일하게 존재하고 있다고 가정하자. 그리고 강판을 길이방향으로 절단하였을 때 나타나는 절단변형은 전적으로 강판의 잔류응력의 해방에 기인한다고 하면, 절단에 따른 변형량(δ) 또는 단위길이당 절단변형량(δ/l)은 beam theory에 의하여 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\delta=\frac{\Delta\sigma\cdot l^2}{8\cdot E\cdot d},\ \text{또는}\ \frac{\delta}{l}=\frac{\Delta\sigma\cdot l}{8\cdot E\cdot d} \qquad (1)$$

여기서

δ : 절단변형량

δ/l : 단위 길이당 절단변형량

$\Delta\sigma$: 절단면 간의 잔류응력 差($\sigma_2-\sigma_1$)

l : 절단부내의 길이

d : 절단부재의 폭

E : 탄성계수

위식에서 알 수 있듯이 절단변형량(δ)은 잔류응력의 差($\Delta\sigma$)가 증가할수록 커지며, 절단부재의 길이(l)가 길어질수록 커짐을 알 수 있다.

만약 (1)식에서 나타난 잔류응력 差($\Delta\sigma$)가 TMCP강판의 냉각온도편차에 의해 발생되었다고 하고, 온도변화에 따른 탄성계수의 변화를 무시할 수 있다고 하면, (1)식은 다음과 같이 폭방향의 온도差

(ΔT)의 함수로 표현될 수 있을 것이다.

$$\delta=\frac{\alpha\cdot\Delta T\cdot l^2}{8\cdot d} \qquad (2)$$

여기서 α : 선팽창계수

ΔT : 폭방향의 온도差

예를들어 길이 20m인 강판을 400mm의 폭으로 절단한 경우에 있어서 부재의 변형량을 1mm/m이하로 관리하고자 할 때 필요한 조건들을 위의 식을 이용하여 각각 계산하여 보면, 먼저 (1)식으로부터 $\Delta\sigma$는 3 kg/mm²이하로 유지되어야 할 필요가 있음을 알 수 있고, (2)식으로부터는 폭방향의 온도편차(ΔT)를 10℃이하로 매우 엄격히 관리하여야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 절단변형 최소화를 위한 대책

이상에서 고찰한 바와 같이 TMCP강의 절단변형은 폭방향으로의 불균일 냉각에 따른 잔류응력 분포에 기인하므로, 절단변형량을 최소화하기 위해서는 잔류응력을 최소화·균일화할 필요가 있다. 이를 위해서는 우선적으로 잔류응력의 발생원인이 되는 냉각의 불균일성(ΔT)을 최소화하는 방안과 냉각후 가공등에 의하여 잔류응력의 분포($\Delta\sigma$)를 최소화하는 방안이 있다.

4.1. 냉각의 균일화

TMCP강의 가속냉각은 기계적 성질의 균질성을 위해서 강판 전체가 균일하게 냉각되는 것이 바람직한데, 특히 폭방향으로의 균일한 냉각은 절단 변형을 최소화하기 위해서도 필수적이라 하겠다. 이를 위하여 가속냉각 설비에는 폭방향으로의 온도편차를 최소화하기 위하여 다음과 같은 방법들을 적용하고 있다.

(i) 강판 상부의 냉각에 있어서는 냉각수가 폭방향으로 흘러 내려가기 때문에 폭 방향으로의 냉각속도가 불균일하여진다. 이와같은 현상을 고려하여 냉각수량을 폭방향으로 조절하여 중앙부에서 가장자리로 멀어질수록 적어지도록 한다. 그리고 폭 가장자리 부위는 過冷을 방지하기 위하여 masking장치를 한다.

(ii) 강판 하부 냉각에 있어서도 nozzle을 小容量으로 많이 설치하고, 냉각수를 공급하는 header에는 정류판을 설치하여 각 nozzle에서 공급되는 수량이 균일하도록 한다.

4.2. 냉간 교정에 의한 잔류응력의 균일화

잔류응력을 가지는 판재에 항복응력이상의 응력을 주게되면 항복과정을 거치면서 초기잔류응력이 감소하게 된다. 따라서 이러한 현상을 잘 이용하게 되면 잔류응력의 크기를 감소시키고 그 분포를 균일하게 할 수 있을 것이다. 그러나 현재 TMCP강판에 적용되고 있는 냉간교정방법은 各社의 know-how로 규정되어 그구체적인 방법은 알 수 없지만, 주로 냉간압연 또는 곡직교정(mechanical bending)등의 방법을 적용하고 있는것 같다. 곡직교정은 판재 전체를 길이방향으로 곡직작업을 하여 폭방향으로 인장 및 압축소성변형이 동시에 발생하도록 하는 것으로 이를 양쪽방향으로 수회 반복하게 되면 잔류응력이 감소되어 균일화되는 현상을 이용한 것이다.

5. 절단변형의 평가 방법

5.1. 잔류응력을 직접 측정하는 절대평가방법

절단변형이 TMCP강에 있어서 크게 우려되는 이유는 TMCP강 자체가 불균일한 잔류응력 분포를 가지고 있기 때문이라고 하였다. 따라서 TMCP강의 절단변형을 평가하는 방법으로 잔류응력을 강판에서 직접 측정하여 그 분포를 얻는 방법이 있을 수 있다. 이 방법은 Fig.1에서 나타난 σ_1과 σ_2등을 강판에서 직접 측정하여 이들 차이로부터 절단변형 정도를 예측코자하는 방법인데, 여기서 문제가 되는것은 강판의 잔류응력이 두께방향으로 일정치 않다는 것이다. TMCP강재를 포함한 모든 강판은 냉각이 빨리되는 표면부위에서는 압축잔류응력이 존재하고, 냉각이 서서히 진행된 중앙부에서는 인장잔류응력이 존재하고 있어서 두께방향으로의 잔류응력은 Fig.4와 같은 분포를 가지고 있다. 그런데 절단변형에 영향을 주는 잔류응력(Fig.2의 σ_1과 σ_2)은 절단면에서의 잔류응력이므로 이는 두께방향으로의 적분치를 의미한다.

즉

$$\sigma=\frac{1}{t}\int_0^t\sigma_r(t)\,dt$$

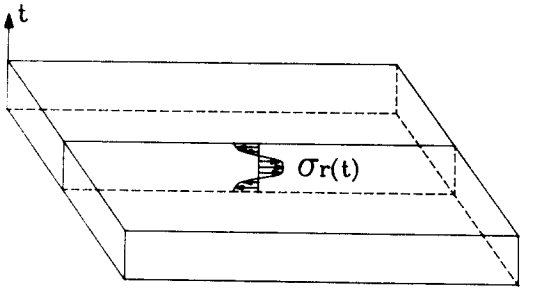


Fig. 4 Schematic drawing of residual stress distribution in the thickness direction of steel plate

여기서 σ : 절단면에서의 잔류응력, σ_1또는 σ_2

t : 강판두께

$\sigma_r(t)$: 두께방향으로의 잔류응력분포

그럼으로 절단면에서의 잔류응력값을 구하기 위해서는 먼저 두께방향으로 잔류응력분포를 정확히 측정할 필요가 있다. 두께방향으로의 잔류응력분포는 逐次제거법등을 이용하여 측정하는데[5], 이 방법은 한쪽 표면을 순차적으로 제거해가면서 제거에 따른 변형량을 반대쪽면에서 측정하고, 측정된 값으로부터 제거된 위치에 존재하였던 잔류응력값을 구하는 것이다. 이와같은 측정을 폭 방향으로 여러지점에 대해 수행하게 되면 폭 방향으로의 잔류응력분포를 구할 수 있게 된다. 이러한 실험과정을 거쳐서 측정된 잔류응력분포를 Fig.5에서 보여주고 있는데 이 결과는 가속냉각이 매우 균일하게 행하여진 TMCP강판에서 측정된 경우로서, 폭방향으로 ±1kg/mm²정도의 잔류응력만이 존재하고 있음을 보여주고 있다. 만약 이러한 강판을(길이가 20m라 가정하고) 400mm 폭으로 절단하였다고 하면 최대 변형량은 식(1)로부터 약 5mm정도가 예상된다. 이것이 바로 잔류응력을 폭방향으로 직접 측정하여 강판의 절단변형 정도를 평가할 수 있는 절대평가 방법인 것이다. 그러나 이 방법은 수 m의 폭을 가지는 강판에서 두께방향의 잔류응력분포를 여러지점에서 측정할 수 있어야 적용가능하기 때문에 기술적으로나 시간적으로 많은 제약이 있을 것으로 생각된다.

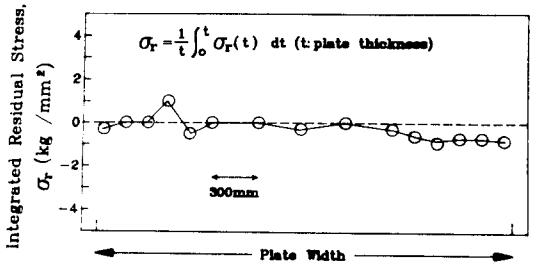


Fig. 5 Distribution of integrated residual stress in the width direction of TMCP steel plate

5.2. TMCP강재와 기존 강재를 동시 절단하여 각각의 변형량을 비교 평가하는 방법

본 방법은 TMCP강판을 기존 강판(as-rolled 또는 normalized강판)과 동일한 절단 조건에서 절단한 후 각 강재에서 발생한 변형량을 비교함으로써 TMCP강의 절단변형정도를 상대적으로 평가하고자 하여 제안된 방법이다[3].

이러한 방법을 시험하여 보고자 본 저자들은 두께와 길이(13645mm)가 같은 TMCP강재와 기존강재를 Fig.6과 같이 700mm 폭으로 순차적으로 동시 절단하였다. 본 실험에 사용된 TMCP 강판은 절단용으로 특별히 주문되어 수입된 강판이었다. 절단작업이 끝나고 충분한 시간이 경과한 후 각각에 대하여 변형량을 측정한 결과 기존 강재에 있어서는 변형량이 0-2mm로써 매우 미소한 반면 TMCP강재에 있어서는 7-15 mm정도의 변형량이 발생하였다. 본 실험의 결과로부터 TMCP강재는 비록 절단용으로 특별히 주문되었다

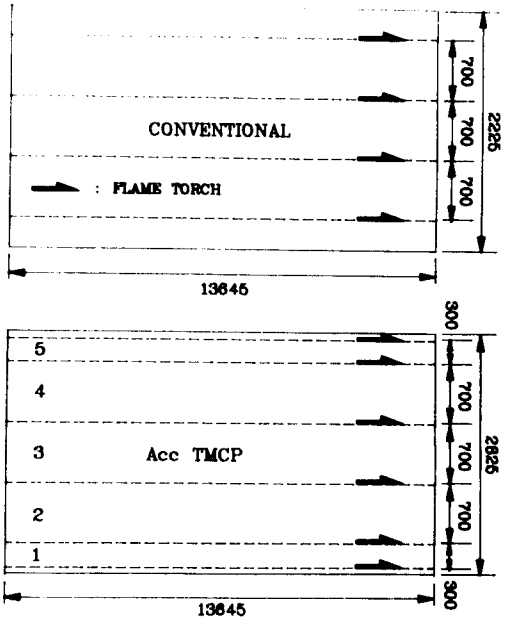


Fig. 6 Size and cutting lines of steel plates for simultaneous flame cutting experiment

고 하더라도 변형량에 있어서는 기존 강재보다 상당히 크게 나타난다는 사실을 알 수 있었고, 그 크기는 최대 약 1mm/m정도를 보여준다는 것도 알 수 있었다.

5.3. 기계적으로 절단하는 방법

강판을 gas절단하여 나타나는 절단변형은 열적인 인자와 잔류응력에 의한 인자가 동시에 작용하고 있다고 하였는데 TMCP강에서 특히 절단변형이 크게 우려되는 것은 잔류응력의 영향이 크기 때문이라고 하였다. 따라서 절단과정에서 열적인 요인만 제거한다면, 즉 기계적 절단을 할 수 있다면 절단후 발생하는 변형량은 전적으로 강판의 잔류응력에 의해 발생하는 것이라 할 수 있을 것이다[4]. 이에 따라 저자들은 非절단용으로 주문된 즉, 절단용으로 특별히 주문하지 않은 TMCP강판을 sawing machine을 사용하여 Fig.7에서 보여주는 바와같이 압연방향으로 기계절단하였다. 절단은 절단부재의 길이가 1m, 폭이 100mm가 되도록 하였다. 절단후 절단변형량을 측정한 결과 M1부재에서는 0.20mm, M2 부재에서는 0.69mm의 절단변형이 발생하였음을 알 수 있었다.

이들 측정값으로부터 길이 14m의 강판을 폭 350 mm로 절단하였을 때 예상되는 절단 변형값을 식(1)을 이용하여 계산하여보면 11.2mm와 38.6mm로 나타난다. 이와같이 계산된 예측치가 어느정도 정확성이 있는가를 확인하기 위하여, 실제로 25mmt×2130 mm×14000mm의 원판을 350mm의 폭으로 gas 절단하여 보았다. 절단후 변형량을 측정한 결과 12, 6, 35, 18, 20, 35mm의 변형값을 얻을 수 있는데, 이들 값은 기계적 절단에서 예상되었던 값(11.2mm, 38.6 mm)과 매우 유사하여 기계적 절단이 TMCP강판의 절단변형량을 예측하는데 매우 유용하게 사용될 수 있

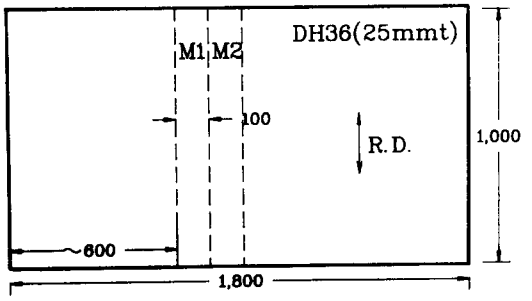


Fig. 7 Size and cutting lines of TMCP steel plates employed for mechanical cutting experiment

음을 보여주었다. 뿐만 아니라 절단용으로 특별관리를 하지 않고 생산된 TMCP강판을 절단하였을 경우에는 절단변형 문제가 매우 심각하게 나타나기 때문에 절단용 강재로서는 결코 사용할 수 없다는 사실을 명확히 보여주었다.

6. TMCP강의 절단변형 정도관리

앞절의 실험 결과에서 보여주듯이 TMCP강판의 절단변형정도는 생산과정에서 이에 대한 고려 여부에 따라 커다란 차이를 보여주고 있다. 만약 非절단용으로 생산된 강판을 절단하였을 경우에는 5.3.절에서 기술한 바와같이 매우 심한 변형을 보이는 반면, 절단용으로 주문된 강재에 있어서는 5.2.에서 보여준 바와 같이 변형량이 상대적으로 매우 작게 나타난다. 따라서 수요가는 TMCP강판이 절단용과 非절단용으로 구분되어 생산되고 있는 현재의 상황을 인식하고, 절단용 강판에 대해서는 이를 필히 명시하여 주문하여야 한다. 그러나 TMCP강판이 비록 절단용으로 주문되었다고 하더라도 절단변형정도는 기존 강재에서 경험했던 변형정도와 동일한 수준에 있다고는 할 수 없다. 단지 변형정도가 충분히 작아서 추가적인 수정작업을 하지 않고도 절단부재로 사용할 수 있는 수준에 있다고 하는 것이다.

그러면 여기서 추가적인 교정작업을 요구치 않는 정도의 변형량의 한계, 즉 TMCP강에 대해 어느 정도의 절단변형량을 허용해 줄 것인가 하는 문제가 제기되는데, 이문제는 현재 일본에서 생산되고 있는 절단용 TMCP강재의 변형정도를 살펴봄으로써 TMCP강의 절단변형을 어느정도까지 관리하여야 하는가에 대한 해답을 얻을 수 있을 것이다.

Fig.8은 현재 日本에서 생산되고 있는 절단용 TMCP강재에서 절단변형을 측정한 결과를 보여주고 있는데, 강판 길이가 20m까지는 절단변형량이 1mm/m이하로 충분히 관리되고 있음을 보여주고 있다. 본 연구소에서도 5.2.절에서 설명한 바와 같이 절단용으로 생산된 14.5m길이의 TMCP강판에 대해 절단시험을 수행한 바 있는데, 시험 결과 최대 변형량이 15 mm정도로 나타나고 있어서 TMCP강재가 절단용으로 주문·생산될 경우에는 단위 길이당 변형량이 1 mm이하로 관리되고 있음을 확인할 수 있었다. 한편 日本의 S社의 경우는 절단 변형량에 대해 자체적인 기준을 만들어 적용하고 있다고 하는데 그 규정에 의하

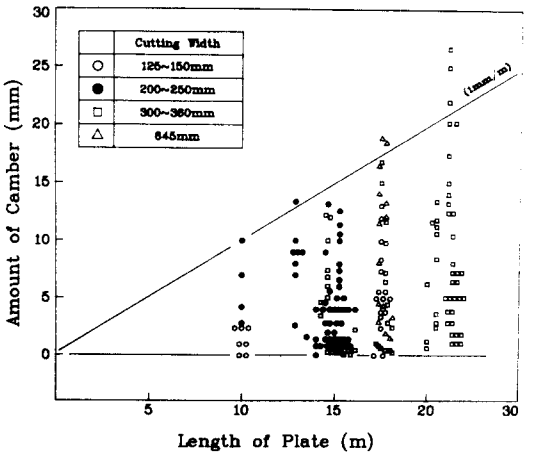


Fig. 8 Amount of cutting cambers showing in the Japanese TMCP steel plates

면, 강판의 길이가 10m이하일 경우는 단위 길이당 변형량을 최대 0.5mm/m로 하고, 강판의 길이가 10m 이상일 경우는 길이에 관계없이 최대 변형량을 15mm로 하고 있다[6]. 결국 이러한 정도 및 규정을 가지고 생산되는 TMCP강판이 日本의 수요가들로부터 거부감없이 사용되고 있다는 사실로부터 이 정도의 변형량이라면 국내의 수요가들도 만족할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 국산 TMCP강재에 있어서도 이들의 규정을 목표로하여 생산 평가함이 현재로서는 바람직하다고 생각된다. 그러나 앞으로 TMCP강재에 대한 사용 경험이 국내에서도 축적되게 되면 강종개발위원회와 같은 위원회를 통하여 보다 합리적인 규정을 도출해 낼 수도 있을 것이다.

참고문헌

1) 김희진 : 선박용 강재로서의 TMCP강의 경제성, 대한용접학회지, 제8권, 제2호, (1990), pp. 13~26.
2) 제1회 TMCP강종개발위원회, 포항제철 품질관리부, 1988년 2월 23일.
3) 김희진, 배강열 : TMCP강의 cutting camber 현상, 대한용접학회, '88년도 춘계학술발표대회, 부산 유스호텔, 1983년 3월 29일.
4) 배강열, 김희진 : TMCP강의 잔류응력과 절단변형에 대한 고찰, 대한용접학회 '90년도 춘계학술대회, 재료강도(II)분야, 창원기계공업관리공단, 1990년 4월 20일.
5) Private Communication.
6) Private Communication.