

解 說

大韓熔接學會誌
第5卷, 第4號, 1987年12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.5, No.4, Dec., 1987

라멜라 균열(Lamellar Tearing)의 發生機構와 防止對策

高 震 炫*

1. 緒 論

라멜라 균열은 材料, 이음設計 및 熔接變數 등 세 因子들의 相互作用에 의하여 發生되기 때문에 간단히 정의하기는 힘들지만 材料의 두께方向(through-thickness, short transverse or Z direction)으로 길게 연신된 非金屬介在物이 熔接熱週期에 의한 熱的變形 및 용접이음의 拘束 때문에 母材와 非金屬介在物 사이의 分離에 의하여 發生되며, 열영향부에 인접한 母材에 存在하며 그림 1과 같이 계단형상(step-like or Zig-Zag appearance)을 보여줌이 그 특색이다.¹⁾

라멜라 균열은 흔히 용접이음 内部에 埋沒된 균열(buried tear)로 存在하기 때문에 超音波 探傷을 除外하고는 그 探知가 困難하다. 따라서 外國에서는 工事中이나 이미 完工된 建物 등에서 라멜라 균열이 發見되어 法律訴訟이 제기되는 등 工事遲延 事例가 많았다.²⁾

라멜라 균열의 熔接構造物에서의 重要性은 비록 라멜라 균열이 直接原因이 되어 發生한 事故는 드물지만 構造物 内部에 存在하고 있는 埋沒된 균열이 다른 균열(crack)의 성장 및 전파에 기여한 예는 여러차례 있었다.^{3,4,5,6)} 라멜라 균열은 海上構造物(offshore structure)^{4,7,8)} 다리,⁹⁾ 압력용기¹⁰⁾ (pressure vessel), pipe line,¹¹⁾ 原子力 發電所¹²⁾ 등과 관련되어 發生되고 있다. 특히 拘束力을 誘發하기 쉬운 용접 이음설계(joint design) 즉, 십자형(cruciform), T형상, 모서리(corner) 이음등과 관련되고 있다. 그리고 라멜라 균열은 炭素鋼, C-Mn鋼, Wrought鋼 및 高張力低合金(HSLA)鋼 등에 發生하고 또 normalized, as-rolled, quench and tempered

鋼등에 發生하고 있다.

라멜라 균열은 이상과 같이 複雜한 現象이며, 1960년대 부터 연구가 되어 왔지만 國內에서는 그 重要性을 인정하면서도 연구가 되지 않았기 때문에 본 해설에서는 라멜라 균열에 대한 전반적인 이해를 돕기 위해, 라멜라 균열에 미치는 因子 및 非金屬介在物, 形成機構, 개시온도 및 시간 그리고 防止策과 材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性을 평가하는 試驗 방법과 熔接構造物에서 라멜라 균열의 重要性 등을 기술하고자 한다.

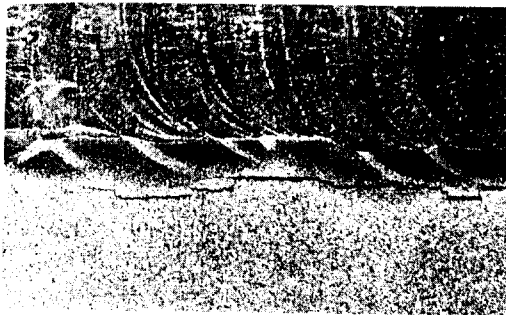


Fig.1. Lamellar tearing. (1)

2. 라멜라 균열에 영향을 미치는 因子 및 非金屬介在物

라멜라 균열 發生의 주된 因子들은 材料, 이음설계 및 熔接變數 등 세가지로 구분된다. 그림 2는 라멜라 균열에 미치는 因子들을 보여주고 있다. 라멜라 균열은 材料의 두께 方向의 낮은 연성과 이 方向으로 용접에 의해 부과되는 높은 변형에 의해 발생된다. 두께 方向의 낮은 연성은 非金屬介在物, 母

* 韓國에너지研究所

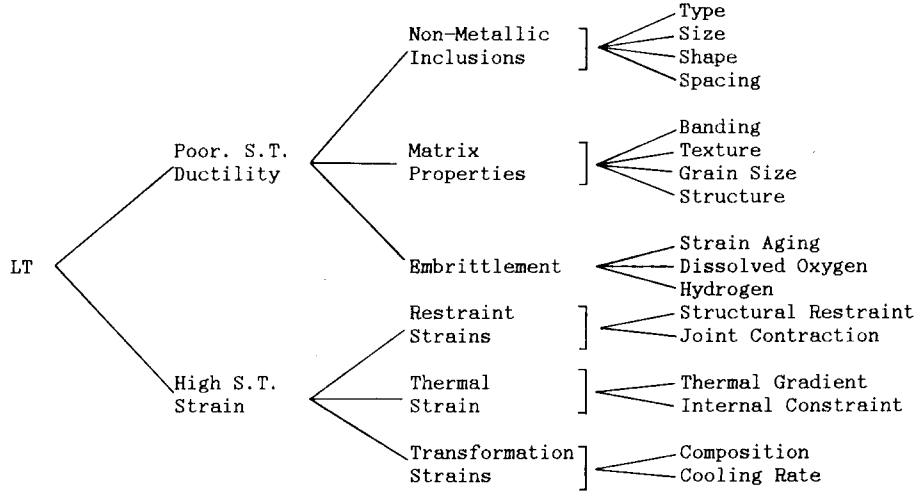


Fig. 2. Variables in Lamellar Tearing

材의 성질 및 脆性機構(embrittling mechanism) 등에 기인하고 이 方向에 부과되는 변형은 용접이음의 拘束力, 용접에 의한 熱的變形과 金屬의 상변태에 따른 변형때문이다.

材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性(susceptibility)에 대해서는 MnS, silicate, 알루미나(alumina) 및 산화물등의 非金屬介在物의 存在 때문이다. 이 가운데 silicate가 가장 유해한 영향을 미치고 있고 이는 silicate자체의 고유한 脆性 때문이다.¹³⁾ 철강材料에서 非金屬介在物의 存在는 製造過程과 관련되어 있고 MnS가 가장 흔하며 MnS는 그 형상에 따라 그림 3과 같이 Type I, II, III로 구분되며 이는 철강제조의 脫酸(deoxidation) 및 탈개스(degassing) 과정과 관련되어 있다.¹⁴⁾ Type I MnS(그림 3a)는 球狀이며 형상비(aspect ratio)가 2~20이고 semikilled나 fully killed된 鋼에 많고, Type II MnS(그림 3b)는 共晶 interdendritic 組織으로 형상비가 2~1000이고 길이 方向으로 길게 연신되어 있기 때문에 적은 변형에서

도 결합력 상실(decohesion)을 誘發하게 된다. Type III MnS(그림 3c)는 모가지고 때로는 길게 연신되며 Al을 함유하는 fully killed 鋼에 흔히 存在한다.

라멜라 균열이 發生되는 材料상의 이유는 異方性(anisotropy) 때문이다. 그림 4에서와 같이 주조된 인곳(ingot)에 存在하는 非金屬介在物의 형상은 등각지만 열간압연을 X 方向으로 하면 이들 介在物은 이 方向으로 평행하게 길게 연신된다. 이런 材料의 기계적 성질을 X, Y 및 Z 方向으로 비교하면 Z 方向에서의 기계적 성질은 X 및 Y 方向보다 현저히 減少된다.

이러한 材料를 두께 方向으로 용접이음을 할 때, 용접에 의해 發生된 변형이 그 材料의 연성을 증가하면 라멜라 균열이 發生된다(그림 4c). 이는 熔接變形에 따른 이음부의 收縮과 용접부 근처의 構造物에 의한 拘束, 특히 應力變形分布의 불균일 및 熱的 句配等の 相互作用에 의하여 發生된다. 그리고 두께 方向의 연성은 非金屬介在物의 형(type), 크기, 형

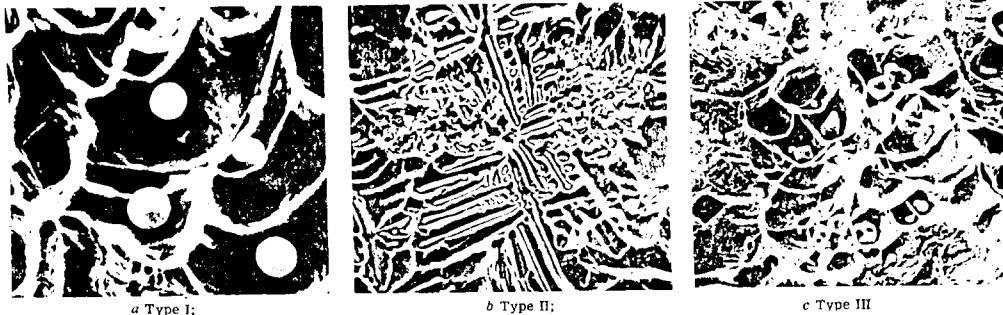


Fig. 3. Morphologies of MnS inclusions(×450)

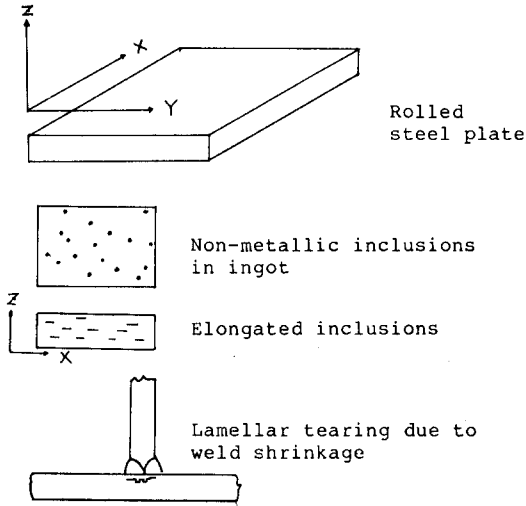


Fig. 4. Lamellar tearing by anisotropic of steels⁽⁷⁾

상 및 介在物 사이의 間隔 또 母材의 성질, 結晶學的 纖維組織, banding, 脆性機構(embrittlement mechanism) 등에 의하여 영향을 받는다. 이와같이 라멜라 균열은 복잡하게 發生하는 現象이기 때문에 라멜라 균열을 이해하기 위하여 그 形成機構 및 중요한 因子들에 대해 알아 보고자 한다.

3. 라멜라 균열 形成機構

일반적으로 라멜라 균열의 形成機構는 3단계 즉, 기공형성(void formation), 層連結(terrace linkage) 및 시어월(shear wall) 형성등으로 구분 될 수 있다.

3.1. 기공형성(氣空形成)

용접에 의해 材料의 두께方向이 熱的收縮 때문에 引張應力을 받게 되면 壓延方向으로 길게 연신되어 있는 非金屬介在物과 母材사이 界面에서 결합력 상

실(decohesion) 또는 分離(separation)에 의하여 그림 5와 같이 기공형성이 일어나게 된다. 이는 용접에 따른 局部應力이 介在物과 母材간의 界面의 결합강도를 증가할때¹³⁾ 또는 용접에 의한 殘留應力 때문에 介在物 주위에 發生하는 tessellated stress¹⁵⁾에 의해 또, 非金屬介在物과 母材의 熱的變形의 차이¹⁶⁾ 등 때문이다. 이 단계가 라멜라 균열의 개시(initialiation)이다.

3.2. 層連結

기공형성은 연신된 介在物이나 타원형 介在物⁹⁾에서 우선적으로 發生되는데 이는 그림 5에서와 같이 介在物의 兩端근처는 三軸應力(triaxial stress) 상태로서 심한 소성변형이 發生하며 동일 면상에 存在하는 기공사이 母材의 necking(necking) 또는 미세기공 결합(microvoid coalescence)에 의해 층 연결이 형성된다. 이것이 라멜라 균열형성의 두번째 단계로서 동일면상에 發生한 기공들이 전파되면서 연결되는 과정이다.

3.3. 시어월(shear wall) 형성

다른 면상에 存在하는 층들사이의 母材가 심한 소성변형은 받게 되면 중간 가장 脆弱한 부분이 파열되어 거의 수직으로 층들이 연결된다. 이 수직으로 파열된 부분을 시어월이라하며 그 파단면은 脆性的 벽개파열(cleavage fracture)를 보여주지만 때로는 非金屬 介在物의 存在에 의한 연성(ductile) 및 벽개파단면을 동시에 보여준다. 이와 같이 제단형상의 라멜라 균열이 발생된다.

4. 金屬的 因子

라멜라 균열에 가장 민감하게 영향을 미치는 것은 연신된 非金屬介在物의 存在이고 이 때문에 열간 압

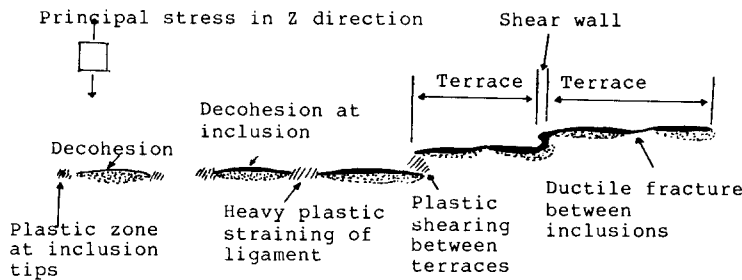


Fig. 5. Mechanism of lamellar tearing

연된 철강에 있어서 두께方向的 機械的 性質이 상당히 惡化된다고 이미 언급하였다. 그러나 이외의 金屬의 因子들은 母材의 조성과 관련하여 편석, 水素, 酸素, 磷, 稀土類 金屬, 硫黃, 母材의 微細組織, 페라이트-펄라이트 band組織, 가공시효와 철강의 두께 등이다.

4.1. 母材의 미세組織

라멜라균열 形成機構에서 언급되었듯이 층 및 시어월이 형성되기 위해서는 非金屬 介在物과 母材 사이에서 결합력상실(decohesion) 또는 기공이 형성되어야 한다. 이들이 전파되기 위해서는 decohesion 또는 기공근처 母材에 소성변형이 發生해야 한다. 母材의 성질을 결정짓는 微細組織은 또한 라멜라에 의해 파단된 파면 mode를 결정하는 因子가 된다. 일반적으로 母材固有의 연성이 증가함에 따라 라멜라 균열의 敏感性은 減少한다고 알려져 있다.¹⁷⁾

4.2. 불순물 영향

철강제조 과정에서 조절하기 힘든 원소들 즉 硫黃, 磷 및 酸素등^{18~24)}인데 특히 硫黃은 Mn과 화합하여 MnS를 형성하기 때문에 材料의 라멜라균열 敏感性에 큰 영향을 미친다.

그림 6²⁵⁾에서와 같이 硫黃 그리고 酸素가²⁶⁾ 증가함에 따라 材料의 두께方向 연성은 현저히 減少한다. 그러므로 硫黃 및 酸素가 증가함에 따라 材料의 라멜라 균열 敏感性은 증가한다.

磷이 라멜라 균열에 미치는 영향은 분명히 糾明되지는 않았지만 磷이 응고과정에서 결정립계에 편석되면 材料의 연성은 減少되기 때문에 라멜라 균열의 敏感性은 증가한다고 할 수 있지만 Farrar and

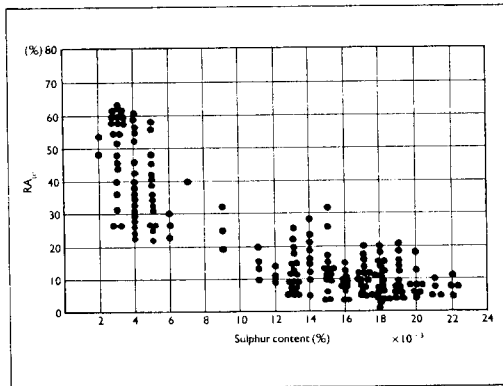


Fig. 6. The effect of sulphur content on ductility in short transverse direction.

Dolby¹⁾에 의하면 편석은 材料의 lamellar균열에 대한 敏感性에는 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다.

4.3. 水素

일반적으로 水素가 라멜라 균열을 조장한다는 것은 인정되고 있으나 라멜라 균열 形成機構의 측면에서 水素가 어떻게 라멜라 균열 형성시 材料를 脆弱하게 하느냐에 대해서는 異論이 있다. 일부학자들^{19, 27, 28, 29)}은 라멜라 균열을 일종의 水素脆性(hydrogen cracking, cold cracking or delayed cracking)으로 여기고 있다. 이는 라멜라 균열은 擴散 할 수 있는 水素(diffusible hydrogen)양이 증가하면 낮은 應力수준(stress level)에서도 發生하기 때문이다. Ganesh and Stout³⁰⁾는 라멜라 균열을 水素脆性이라고 주장하고 水素는 材料의 파단모형(fracture mode)을 변화시키지 않고 crack tip의 소성변형을 제한하면서 材料의 연성을 급격히 떨어뜨린다는 Beachem model³¹⁾을 이용하여 설명하였다. 그러나 Ueda³²⁾등은 diffusible 水素는 라멜라 균열개시에 거의 영향이 없고 라멜라 균열은 용접에 의한 殘留應力 및 변형에 의하여 發生된다고 주장하고 있다.

Leung³³⁾에 의하면 라멜라 균열이 응고중 200~300°C에서 發生한다면 水素는 라멜라 균열에 크게 기여하지 못한다고 복잡한 擴散기구를 이용하여 計算하였고 그리고 Koh³⁴⁾는 라멜라 균열은 200~300°C 發生하고 있음을 熔接熱週期(weld thermal cycle)를 이용한 熔接拘束試驗(weld restraint test)을 이용하여 라멜라 균열 개시를 측정하였다. 따라서 라멜라 균열은 水素脆性에 의하여 發生되는 것이 아니고 水素는 母材의 연성을 惡化시키면서 라멜라 균열을 조장한다고 할 수 있다.

4.4. 페라이트-펄라이트 밴드 微細組織 (ferrite-pearlite band microstructure)

페라이트-펄라이트 band組織이 라멜라 균열에 대한 영향은 아직 명확히 糾明되지 않고 있다. Ganesh and Stout¹³⁾, Heuschkel³⁵⁾ 및 Jubb³⁶⁾ 등은 페라이트-펄라이트 band組織은 라멜라 균열 개시와 전파에 영향을 준다고 보고하고 있지만 Farrar and Dolby¹⁾와 Owen³⁷⁾은 페라이트-펄라이트 band組織은 압연장의 이방성 및 라멜라 균열의 敏感性에 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다. 이와같이 상반된 의견은 정량적인 자료 부족에 기인한다.

4.5. 가공시효(strain aging)

材料的 측면에서 가공시효 脆性^{34,36,39}이 라멜라 균열을 發生하는 주된 기구로 고려되고 있다. 가공시효 脆성은 두 因子의 조합 즉, 가공변형과 탄소 및 질소등의 침입형 원소들이 轉位로 擴散함으로써 材料的 연성을 惡化시키기 때문이다. 특히 다중 패스용접(multipass weld)은 온도주기와 熱的變形이 이 脆성을 惹起시키기에 이상적인 조건이라고 보고 되고 있다.³⁹ 또 材料에 미세균열이나 노치(notch)들이 存在할때 이들은 변형을 집중시키고 材料를 더욱 脆弱하게 만든다.

4.6. 철강의 두께

라멜라 균열에 민감한 철강두께의 범위는 13~175 mm^{10,17,40,41}로 보고되고 있다. 두꺼운 철판은 얇은 철판에 비해 용접후 응고 收縮에 의해 심한 拘束을 받지만 라멜라 균열에 대한 敏感性은 적다.^{1,10,17,18,35,40,41,42} 이는 만일 같은 압연비에서 철판이 제조되었다고 가정할 때 얇은 철판에 存在하는 非金屬介在物들이 壓延方向으로 더욱 심하게 연신되기 때문이다. 따라서 얇은 철판이 材料的 고유 특성 때문에 라멜라 균열의 敏感性을 갖는다고 할 수 있겠다. 지금까지 보고된 바에 의하면 3mm⁴³두께의 철판에서도 라멜라 균열이 發生되었다.

5. 라멜라균열 開始時間 및 溫度範圍

이는 라멜라균열의 發生機構 理解와 熔接構造物의 제작자 및 검사자들에게도 중요한 것으로 사료된다. 그러나 여기에는 相衝突 의견들이 있다. 일부학자들은^{23,44,45} 라멜라 균열은 水素脆性에 의해 熔接金屬이 100°C 이하로 냉각될 때 개시되고 또 용접 완료 후 24시간 까지 發生되었다고 이를 cold crack 또는 delayed crack으로 간주하고 있다. 그러나 Heuschkel³⁵ 및 Nicholls⁴⁶ 등은 라멜라 균열에 의해 破斷된 파면의 색깔변화에 의하여 라멜라균열 發生 개시온도를 Heuschkel은 230°C 이상이라고 추정했다. 또 Nicholls는 표면산화 때문에 240°C 이상 이라고 추정했다. Lombardini⁴⁷는 철강의 소성변형이 현저히 減少된 400~550°C를 라멜라 균열 發生開始 온도범위로 보았다. 그러나 Jubb³⁰과 Koh³⁴는 라멜라 균열은 가공시효 취성에 의해 용접후 온도가 200~300°C 사이에 냉각될 때 재료의 두께방향 연성이 현저히 저하되었고 또 앞에서 언급하였듯이 라멜라 균

열 發生 조건인 재료의 두께방향 연성저하, 용접 및 구속을 내포하고 있는 용접구속 시험 및 조각 굽힘시험(slice bend test)에 의하여 라멜라 균열이 200~300°C에서 응고도중 가공시효에 의하여 형성됨이 확인되었다.

6. 防止策

라멜라 균열이 發生할 수 있는 十字形, T字形 및 모서리 이음을 제작할 때 라멜라 發生을 防止 또는 最小化 하기 위하여 세가지 因子 즉 材料, 이음설계 및 熔接變數등을 동시에 고려하여야 한다.

材料的 관점에서 拘束力이 큰 용접이음에는 electroslog 재용용 공정이나 진공 탈가스 공정에 의하여 제조된 clean steel을 사용할 것이 권장된다. 低硫黃, 低磷과 稀土類 金屬(rare earth metal) 및 Ca, Zr등을 첨가하여 非金屬介在物의 형상을 등골게 변화시킨 철강의 사용이 권장된다. 이렇게 제조된 철강들은 기계적 성질에서 거의 등방성을 보이지만 실제로 비싸다.

예를 들면, 해양構造物의 node 이음에는 硫黃의 함량이 0.005% 이하, 두께方向의 연성이 35% 이상 되는 clean steel 사용이 권장된다.^{48,49} 또 拘束이 부과되는 중요한 이음에는 구조강 또는 단조강^{40,50}의 사용이 권장된다. 이들은 두께方向에서 높은 연성과 피로균열에 대한 저항이 크기 때문이다. 그러나 용접이음 설계상 높은 拘束力을 갖지 않는 이음부는 비싼 clean steel을 사용할 필요가 없다.

용접이음 설계측면에서 될 수 있는 한 두께方向의 용접에 의한 변형이 최소한으로 부과되도록 하여야 한다. 라멜라 균열이 發生될 수 있는 용접이음과 그 개선책은 그림 7에 나타나 있다. 용접이음 설계측면에서 라멜라 균열 發生 위험을 줄일 수 있는 방법은

- (a) 두께方向으로 최소한의 熔接變形 부과
- (b) 拘束을 최소로 받게끔 균형잡힌 용접이음 등이다.

용접 sequence 및 변수의 측면에서 라멜라 균열에 미치는 용접변수는 입열량(heat input), 예열, 용가재, interpass 온도, 용접 비이더시퀀스 및 용접방법 등이다. 경험과 실험에 의하여 권장되는 라멜라 龜裂發生을 減少시키는 방안들은 다음과 같다.

- (a) 저장도의 熔接金屬을 사용하여야 한다. 이는 두께方向의 변형을 줄여주기 때문이다.
- (b) 100°C에서 예열함으로써 水素의 영향을 減少

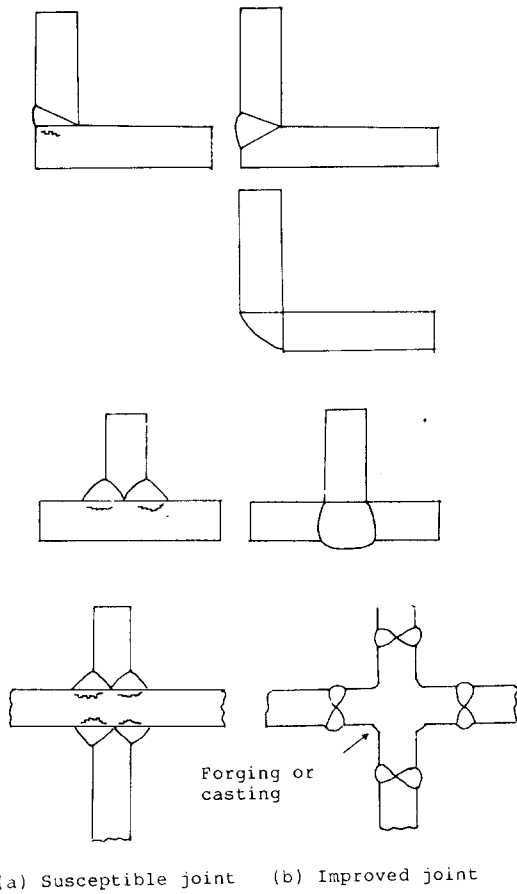


Fig. 7. Methods to reduce through-thickness contraction strains.

시킬 수 있어 균열에 대한 재료의 저항을 향상시킬 수 있다.

- (c) **Buttering:** 그림 8에서와 같이 용접전에 저강도의 용착 금속을 한층 또는 두층 증착함으로써 母材를 용접부로 부터 멀리하게 되고 또 다중 pass에 따른 용접에 의하여 누적되는 변형을 흡수할 수 있으므로 라멜라 균열 발생을 줄일 수 있다.
- (d) 대입열 용접방법 즉, submerged아크용접을 사용함으로써 큰 熱影響部를 얻게되고 변형구배가 용접부에서 점차적으로 분포되어 있기 때문에 라멜라 龜裂發生을 줄일 수 있다. 대입열 용접에 의한 부드러운 熔接金屬은 두께 方向에 부과되는 변형을 수용 할 수 있기 때문이다.

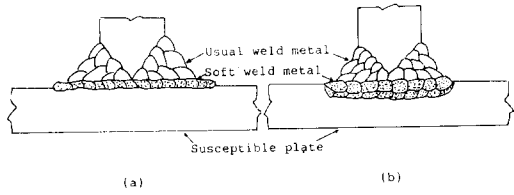


Fig. 8. Techniques to reduce risk of lamellar tearing
(a) Technique of buttering
(b) Technique of grooving and buttering

7. 材料의 라멜라 균열 敏感性 評價試驗

材料의 라멜라 균열 敏感性을 평가하기 위하여 다수의 試驗들이 사용되고 있다. 이것은 크게 두가지로 분류되는데 첫째 용접하지 않고 材料의 비파괴試驗, 둘째 시편을 용접 또는 용접하지 않고 파괴試驗이다.

7.1. 非破壞 試驗

超音波 감쇠(ultrasonic attenuation)^{17,36,51}가 材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性을 평가하기 위하여 사용되어 왔다. 이미 언급되었듯이 라멜라 균열은 非金屬介在物의 存在에 의해 發生되고 있다. 이 試驗은 超音波가 材料를 전파하여 나갈때 超音波 에너지는 非金屬介在物의 量 및 크기에 따라 흡수 또는 산란되어져 back wall echo signal의 크기가 경감됨을 이용하여 材料의 라멜라 균열 敏感性和 非金屬介在物의 체적분율과의 상관관계를 고려하는 것이다. 그림 9는 저감쇠와 고감쇠를 보여주고 있다.

Tamburelli⁵¹)는 材料에서 超音波 감쇠와 속도가 이용하여 材料의 이방성과 介在物의 量을 측정하였지만 이 감쇠치와 超音波속도변화는 두께 方向의 성질에 가장 민감하게 영향을 미치는 개재물의 크기 및 형

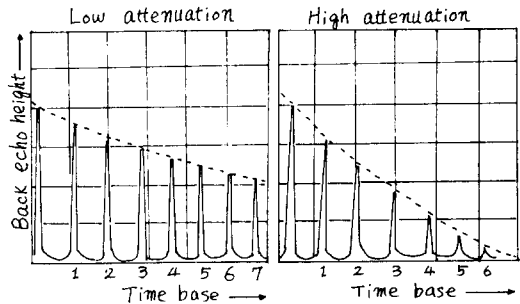


Fig. 9. Illustration of attenuation of the back wall echo signal during ultrasonic testing.

상을 측정할 수 없는 脆弱點이 있었다. 그리고 영국 의 The Welding Institute^{17,36)}에서도 연구를 하였지만 만족할 만한 결과를 얻지 못했다.

7.2. 파괴試驗

材料를 용접하지 않고 라멜라 균열에 대한 敏感性을 평가하는 試驗들은 다음과 같다.

7.2.1. 두께方向 引張試驗(through-thickness or short transverse tensile test)

두께方向의 연성을 평가하기 위하여 가장 널리 사용되는 것이 인장試驗인데 이는 연성이 減少할수록 라멜라 균열 發生에 더욱 민감해지기 때문이다.⁴⁴⁾ 그러나 일반적으로 열간 압연한 철강의 두께는 얇기 때문에 시편 준비가 어렵고, 시편 길이를 연장하여야 하고 또 시편가공이 비싸며 또 짧은 게이지 길이 내부만 試驗할 수 있는 것이 단점이다.

7.2.2. 조각굽힘試驗(slice bend test)

두께方向으로 얇은 시편을 그림 10과 같이 절단하여 철판에 용접한다. 이 시편의 표면을 연마하여 계

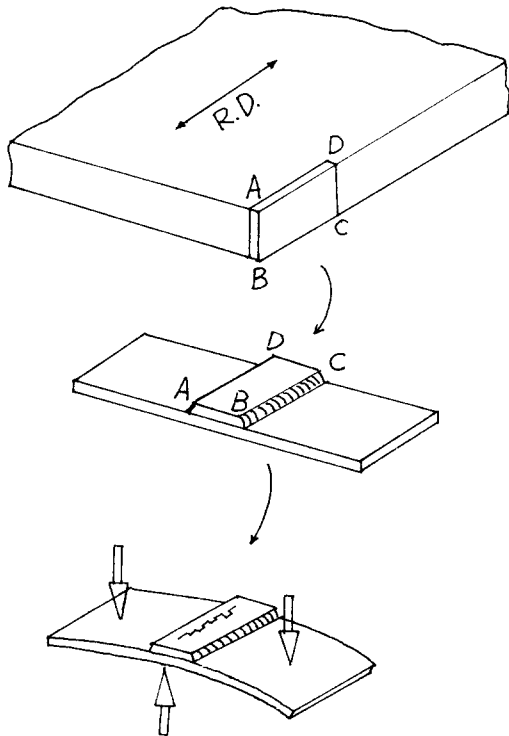


Fig.10. Manufacturing and testing sequence for slice bend test.

이지 길이를 만들고 삼점굽힘試驗(three point bend test)을 이용하여 평가한다. 라멜라균열은 열영향부에 인접한 母材에 發生하기 때문에 材料의 内部를 평가하는 引張試驗 보다 라멜라 균열의 敏感性을 평가하는데 적합하다고 하겠다.

7.2.3. 衝擊試驗(Charpy test)

材料의 이방성을 평가하기 위하여 衝擊試驗이 사용된다. 특히 upper shelf energy 값은 材料가 라멜라 균열에 민감할수록 減少한다. 또 파단면조사(fractography)에 의하여 材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性을 조사할 수 있다. 그러나 이 試驗은 試驗코저하는 부분을 정확하게 試驗하기 어렵고 또 55mm 두께 이상의 철판만이 가능하며 표면 가까이는 試驗할 수 없는 것이 단점이다.

7.3.4. 非金屬介在物의 定量적 분석

材料의 라멜라 균열 敏感性和 직접 관련이 있는 非金屬介在物의 수, 크기, 형상 및 분포를 현미경을 이용하여 定量적으로 조사하는 것이다. 이것은 실험실에서 수행하기는 적합하지만 실제로 현장에서는 비실용적이다.

8. 용접을 이용한 파괴試驗

앞에 기술된 파괴試驗은 라멜라 균열이 發生되는 실제적인 상황이 결여되어 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Cranfield test, Window test 및 Lehigh lamellar tear test 등이 개발되었다.

8.1. Cranfield test¹⁰⁾

그림 11(a)에서와 Cranfield test는 시편과 stem plate사이의 각이 45° 또는 60°로 경사져 있고 다중 패스용접이 수행된다. 이때 매 패스의 용접이 수행된 후 충분히 냉각된 후 다음 패스가 용착되어야 한다.

그림에서와 같이 라멜라 균열은 용접 root 근처에 發生한다. 이는 용접에 따른 변형이 weld root 근처에 집중되기 때문이다. 이실험은 材料의 높은 拘束을 평가하는데는 적합하나 용접주기의 변화로 材料에 균일한 변형을 적용하기가 어렵다.

8.2. Window test³⁶⁾

그림 11(b)에서와 같이 네모진 구멍이 뚫린(window) 拘束판에 시편을 삽입한다. 그림에서와 같이 단일 pass의 용접을 상하 1,2로 수행하여 시편을 拘

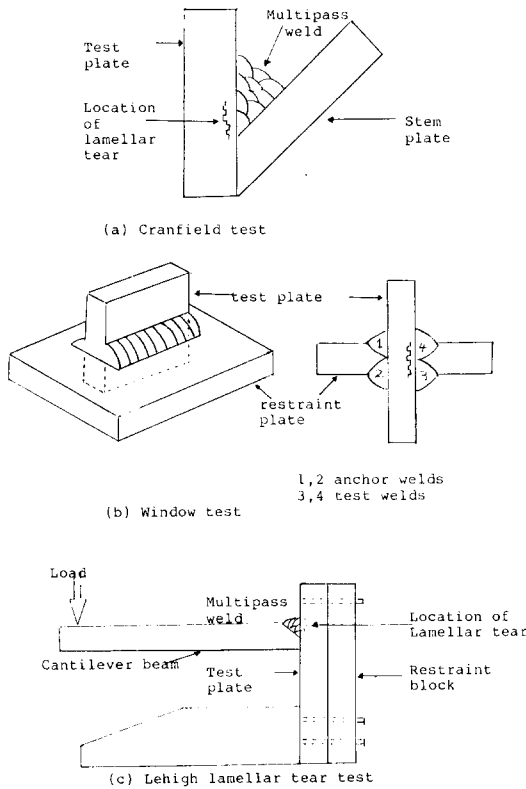


Fig. 11. Tests for materials susceptibility to lamellar tearing.

束판에 집합하며 이를 anchor용접이라고 하고, 오른편 홈 3, 4의 순서로 또 다시 한 패스를 용착하여 fillet용접을 하면 십자형의 이음이 된다. 먼저 용접된 anchor welds는 후에 용접된 test welds의 凝固收縮을 拘束하여 시편은 두께方向으로 應力을 받게되어 라멜라 균열이 發生된다. 이 試驗에서 용접을 신중히 하면 재현성 있는 결과를 얻을 수 있으나 정량적인 결과는 얻기 힘들다.

8.3. 리하이 라멜라 균열 試驗(Lehigh lamellar tear test)³⁸⁾

라멜라 균열에 영향을 미치는 변수들을 정량적으로 측정하고 또 앞의 두 試驗들의 결함을 보완하기 위하여 이 試驗이 개발되었다. 그림 11(c)에서와 같이 시편과 일단에 45°의 홈(groove)이 준비된 cantilever beam을 용접하여 T형상의 이음을 제작한다. 용접에 의한 凝固收縮에 대하여 시편에 拘束을 부과하기 위하여 拘束철판(restraint plate)를 시편위에

볼트로 연결한다. 라멜라 균열을 시편에 發生시키기 위하여 또 동시에 材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性을 평가하기 위하여 매 용접패스에 이어 용접 면적에 따라 외부하중을 가한다. 材料의 라멜라 균열의 敏感性을 평가하기 위한 기준으로 임계용접 拘束度(critical weld restraint level, CWRL)를 計算하는데 이는 라멜라 균열이 發生할 때의 材料 파괴應力(fracture stress)과 cantilever beam의 displacement의 곱이다.

이와같이 이 試驗은 복잡하여 材料의 품질관리에는 적합하지 못하지만 材料의 라멜라 균열에 대한 敏感性 평가에는 유용하다.

9. 라멜라 균열의 熔接構造物에서의 重要性

이미 언급했듯이 라멜라 균열은 용접열영향부에 인접한 母材에서 發生한다. 라멜라 균열이 용접끝(weld toe)과 용접 root 근처에 發生했다면 熔接構造物의 사용중 이 라멜라균열은 용접 표면으로 연결될 것이며 또한 육안검사, dye penetrant 및 magnetic particle 등의 비파괴 검사에 의해 探知되어 용접이 음은 보수될 수 있다. 그러나 라멜라 균열은 특징적으로 構造物内部에 埋沒된 균열로 存在할 경우 超音波 探傷을 除外하고는 그 探知가 困難하고 또 의문은 이 埋沒된 균열이 熔接構造物의 건전성(integrity)에 어떻게 영향을 미치는가 하는 것이다.

라멜라 균열이 용접끝 근처에 存在한다면 熔接構造物이 정적하중(static loading) 및 피로하중(cyclic loading) 하에 있다면 埋沒된 균열의 크기에 상관없이 보수되어야 한다.

이는 라멜라 균열에 민감한 熔接構造物의 사용중에는 용접끝은 큰 應力集中이 發生하기 때문에 라멜라 균열 형성 개시상태에 있는 埋沒된 균열이라 할지라도 급격히 성장하여 構造物의 파괴를 誘發할 수 있기 때문이다.^{34,52)} 그러나 埋沒된 라멜라 균열이 용접끝에서 부터 構造物内部로 멀어짐에 따라 외부하중에 의해서도 큰 應力이 부과되지 않기 때문에 그 크기가 커도 熔接構造物의 load carrying capacity에는 큰 영향을 주지 않는다.^{34,52)} 埋沒된 라멜라 균열이 熔接構造物에 미치는 영향을 組織의으로 평가하기 위해서는 파괴역학 측면에서 고려되어야 할 것이다.

10. 결 론

라멜라 균열에 대한 연구는 다양하게 수행되어 왔

고 상당한 부분이 理解되고 있지만 라멜라 균열 形成機構 및 水素의 영향 그리고 그 重要性에 입각하여 용접 構造物内部에 存在하는 라멜라 균열의 파괴 역학 측면에서 더 연구가 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Farrar, J.C.M and Dolby, R.B., "An Investigation into Lamellar Tearing", Metal Constr. and Bri. Weld, J., Feb. 1969, pp22-29
2. Wilson, W.G., "Minimizing Lamellar Tearing By Improving Z-Direction Ductility", Weld J., Nov. 1974, pp691-695
3. Granstrom, A., "The Strength of Large Structural Elements as Influenced by Lamellar Tearing", Report 15:16, Swedish Institute of Steel Construction, April 1978, pp43
4. Almar-Naess, A., Haagensen, P.J., Lian, B., Moan, T., and Simonsen, T., "Investigation of the Alexander L. Kielland Failure Metallurgical and Fracture Analysis", Offshore Technology Conference, OTC. 4236, May 1982.
5. Easterling, K., "Introduction to the Physical Metallurgy of Welding", Butterworths, 1983
6. Electric Power Research Institute, "The Significance of Lamellar Tearing in Structural Steels", EPRI NP-3570, June 1984
7. Adams, C.J and Popov, E.P. "Through-thickness Fatigue Properties of Steel Plate", WRC Bulletin 217.
8. Takeshi, Y., "Lamellar Tearing and Marine Structures", Welding and Fabrication, Dec. 1975, pp. 740-746.
9. Burdekin, F.M., "Lamellar tearing in Bridge Girders a Case Study", Metal Construction and British Welding Journal, May 1971, pp. 205-209.
10. Elliot, D.N., "Lamellar Tearing in Mutipasses Fillet Joints", Weld. J., Sept. 1969, pp. 409-S414-S.
11. Purazarang, K. and Tavassoli, A.A., "Technical Note: Inclusion Induced Lamellar Tearing in Steel Pipe", Weld. J., Sept. 1979, pp. 262-S-266-S.
12. Nichols, R.W., "Welding for Nuclear Power", Welding and Metal Fab., Sept. 1969, pp. 344-345.
13. Ganesh, S. and Stout, R.D., "Material Variables Affecting Lamellar Tearing in Steels", Weld. J., Nov. 1976. pp.341-S-355-S.
14. Australia Welding Research Association Technical note 6, "Controlling of Lamellar Tearing", April 1976.
15. Brooksbank, D., and Andrews, K.W., "Stress Fields around Inclusions and Their Relation to Mechanical Properties", J. of the Iron and Steel Inst., April. 1972, pp.246-255.
16. Manuder, P. G. H. and Charles, J. A., "The Behavior of Nonmetallic Inclusions in An 0.2% Carbon Steel Ingot During Hot Rolling", J. of Iron and Steel Inst., 206, 1968, pp.705-715.
17. Farrar, J.C.M., Dolby, R.E. and Baker, "Lamellar Tearing in Welded Structural Steels", Weld. J., July 1969, pp.274-S-282-S.
18. Nuclear Regulatory Commission, "Potential for Low Fracture Toughness and Lamellar Tearing on PWR Steam Generator and Reactor Coolant Pump Supports," NUREG-0577, Oct. 1979.
19. Ito, Y., Izeki, Y., Bessyo, K., and Nakanishi, M., "High Tensile Strength Steel with Low Susceptibility to Lamellar Tearing". Welding of HSLA(Microalloyed) Structural Steels, Proceedings of an International Conference, Nov., 1976, Rome, Italy.
20. Nakao, N. and Ohsuzu, Y., "Properties of Steel Plates in Thickness Direction", Weld. Research Abroad, Vol.14, No.9, 1973.
21. Horikawa, K., Tanaka, J., Harasawa, H., Matsubana, H. and Osuka, T., "Weldability of Newly Developed Low Alloy High Strength Heavy Plates", Australian Welding Journal, Vol.16, No.6, Sept./Oct. 1972.
22. Turner, M.J., "The Welding of Higher Tensile Steels Used in Shipbuilding Part I", Metal Construction and British Weld. J, Oct. 1970, pp.431-435.
23. Kobyashi, K., Narumoto, A., Funakoshi, T. and Hirai, Y., "Propagation under Through-thickness of Fatigue Cracks in Structural Steels with Varying Sulfur Content", Weld in the

- World, Vol.1S, No.9/10, 1977.
24. Billingham, J., "Material for Offshore Structures", *Metal and Materials*, August 1985, pp.472-478.
 25. Nakao, N. and Ohsuze, H. "Properties of Steel Plates in Thickness Direction", *Weld. Res. Abroad*, Vol.19, No.9, Dec. 1972 pp.23-31.
 26. Stout, R.D. "Characteristics of Lamellar Tearing in Welded Steel", IIW-1976-MT.
 27. Nishio, Y., Yamamoto, Y., Kajimoto, K. and Horozane, K., "On the Lamellar Tearing in Multirun Fillet Welds", *Weld. Res. Abroad*, Vol.69, No.6, June/July, 1973.
 28. Arita, Y. and Kajimoto, K., "The Study of Lamellar Tearing in Offshore Structure", Offshore Technology Conference Held in Houston, Texas, May 1972.
 29. Garland, J.G., Kirkwood, P.R. and Still, J. R., "Node Joint Fabrication in Fixed Offshore Production Platforms, Part.3, Problems Encountered During Node Assembly Fabrication", *Weld. and Metal Feb.*, Oct. 1975, pp.602-604.
 30. Ganesh. S., and Stout, R.D., "Effect of Welding Variables on Lamellar Tearing Susceptibility in the Lehigh Test", *Weld. J.*, Vol.56, No.3, March 1977, pp.72-S-87S.
 31. Beachem, C.D., "A New Model for Hydrogen-Assisted Cracking (Hydrogen Embrittlement)", *Met. Trans.*, Vol.3, Feb.1972, pp.437-451.
 32. Ueda, Y., Fukuda, K., Nishimura, I., Iiyama H., and Chiba, N., "Cracking in Welded Corner Joints", *Metal Constr.* Jan. 1984, pp.30-34.
 33. Betz, E. and Leung, H.K., "Technical Note: Hydrogen Diffusion in Welded Joints and Its Relation to Lamellar Tearing", *Weld. J.*, June 1979, pp.177S-178S.
 34. Koh, J.H., "The Initiation, Significance and Detection of Buried Lamellar Tearing in Welded Tee Joint", Ph.D. Dissertation, Lehigh University, PA. USA., 1987.
 35. Heuschkel, J., "Anisotropy and Weldability", *Weld. J.*, March 1971, pp.110-S-126-S.
 36. Jubb, J.C.M., Carrick, L. and Hammond, J., "Some Variables in Lamellar Tearing", *Metal Constr. and Brit. Weld. J.*, 1(2), Feb. 1969.
 37. Owen, W.S., Cohen, M., and Avervach, B. L., "The Influence of Ferrite Banding on the Impact Properties of Mild Steel", *Weld. J.*, Aug. 1958, pp.368-S-374-S.
 38. Oates, R.P. and Stout, R.D., "A Quantitative Weldability Test for Susceptibility to Lamellar Tearing", *Weld. J.*, Vol.57, No.11, Nov. 1973, pp.481-S-491-S.
 39. Soete, W., "One Run Versus Multirun Welds", *Weld. J.*, March 1971, Vol.50, No.3, pp.127-S-136-S.
 40. McEnerney, J.W., "Assessment of Lamellar Tearing", ORNL/NUREG/TM-171, Oak Ridge National Laboratory, March 1978.
 41. Billingham, J., "Materials for Offshore Structures", *Metal and Materials*, Aug. 1985, pp.472-478.
 42. "Discussion Session 3 and 4 on Lamellar Tearing", *Metal Constr. and Brit. Weld. J.*, Vol.1, No.2, Feb. 1969, pp.117-124.
 43. Granstrom, A., "The Strength of Large Structural Elements As Influenced by Lamellar Tearing", IIW Doc. 15-420-78.
 44. Nishio, Y., Yamamoto, Y., Kajimoto, K. and Hirozane, T. "On the lamellar Tearing in Multirun Fillet Welds", *Weld. in the World*, Vol.19, No.6, June/July 1973.
 45. Ito, Y., Ohmori, Y., Nakanish, M. and Kimizo, Y., "The Effects of Metallurgical Factors on Lamellar Tearing Susceptibility in Low Alloy High Strength Steels", IIW Doc.9-1021-77.
 46. Nicholls, D.H., "Lamellar Tearing in Hot Rolled Steels", *British Weld. J.*, March 1968, pp.103-112.
 47. Lombardini, J., "Determination of the Temperature of Lamellar Tearing Initiation", IIW Doc.10-849-1977.
 48. Thredgill, P.L., "Avoiding HAZ Defects In Welded Structures", *Metal and Materials*, July 1985.
 49. Wilson, W.G., "Minimizing Lamellar Tearing by Improving Z-direction Ductility", *Weld. J.*

- Nov. 1974. pp. 691-695.
50. Sommella, J., "Significance and Control of Lamellar Tearing", Department of Transportation, US. Coast Guard Report SSC-290, 1979.
51. Tamburelli, C., "Use of Ultrasound in Assessing the Susceptibility of Steel to Lamellar Tearing", NDT International, Feb. 1977, pp. 3-8.
52. Kaufmann, E. J. and Stout, R. D., "The Toughness and Fatigue Strength of Welded Joints with Buried Lamellar Tears", Weld. J., Nov. 1983, pp. 301-S-306-S.

대한 용접학회지 투고 안내

당 학회는 여러분의 투고를 언제나 기다리고 있습니다. 보다 내용이 충실한 학회지를 만들기 위해서 1987년 1월 1일부터 접수되는 원고에 대해서 다음과 같이 게재료를收受하고 또한 투고료를 지불하기로 하였사오니 회원 제위의 보다 적극적인 투고 있으시기를 바랍니다.

다 음

- ◎ 연구논문 ; 인쇄후 6페이지 까지 기본료 20,000원, 6페이지 초과시 페이지 당 10,000원씩의 게재료를 저자가 부담.
- ◎ 연구논문 이외의 강좌, 해설, 전망, 수상, 논설, 기술자료 심포지움, 좌담회 기록 ; 학회로부터 인쇄 페이지 당 6,000원씩의 투고료를 저자에게 지불.
- ◎ 원고 작성은 대한 용접학회지 집필요강 (本誌, 제4권 제2호, 1986년 9월 호)을 준수하여 주십시오.