鋼材 용접부의 확산성 水素의 擧動에 關한 研究

A Study on the Behavior of the Diffusible Hydrogen in the Steel Weld.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

지도교수 金永植

金守祚 · 金成彬

目 次

1. 序論
2. 熔接部로의 水素의 溶解
3. 水素 誘起 균열 発生 機構
4. 熔接部 水素 誘起 破壞의 특징
5. 擴散性 水素의 觀察裝置
6. 熔接條件에 따른 水素擧動
7. 結論

金屬材 용접부의 확산성 水素의 擧動

1. 서론.

오늘날 선박, 교량, 각종 저장용 탱크, 건축 등의 大型 구조물은 용접 공법에 의해 構築되고 있는 것은 주지의 사실이다. 이것은 용접공법의 경우 經濟性, 重量輕減, 構造物의 크기에 제한을 받지 않는 등 他工法에 比해 탁월한 長点을 갖고 있기 때문이다.

그러나 용접부는 그것이 매우 복잡한 熱履歷 현상으로 인해 변형, 잔류응력을 誘發하며, 同時에 熔接部 脆化, 또는 균열 현상이 발생하여 구조물의 信賴性 및 安全性 確保가 어려운 点으로 지적되고 있다. 이러한 문제점은 구조물의 사용조건이 가혹화되고 以前보다 높은 强度의 高張力 鋼材가 出現함에 따라 더욱 중요한 문제점으로 부각되고 있다

용접부에서 發生되는 균열은 발생 온도에 따라 高溫균열 (Hot cracking: 용접시 융점 온도에 근접하여 일어나는 균열)과 低溫균열 또는 冷間균열(cold cracking: 용접후의 Ms点 또는 약 300°C 이하에서 일어나는 균열)로 분류 할 수 있으나 一般構造用 압연 鋼材의 경우는 대부분 低溫균열이 문제시 되고 있다[1]

용접 이음부에서 발생하는 용접 저온 균열은 그 발생 장소, 時期 및 形狀이 多樣하지만, 그 本質은 용접시 용접부에 혼입되는 擴散性 水素가 關係하는 지연파괴(Delayed cracking) 현상으로 알려져 있다[2][3][4]

따라서 용접시 확산성 수소의 거동은 상술한 용접 구조물의 信賴性 문제에 가장 重要한 要因으로 作用한다고 볼 수 있다.

本 研究에서는 이러한 拡散性 水素에 대하여 이것이 용접부 손상에 끼치는 영향을 考察하고, 水素捕集 裝置를 利用하여 용접 금속의 拡散性 水素 挙動을 実験的으로 觀察함으로써 熔接時 水素의 용접부로의 흡입 및 拡散 挙動을 연구하였다.

2. 용접부로의 水素의 溶解

용접 금속에 供給되는 水素源, 即 아아크 분위기 중에서 발생하는 水素의 源으로서는 (1) 피복제 중의 有機物, (2) 피복제 중의 一水 또는 結晶水를 포함한 광물, (3) 피복제 중의 粘結剤(물 유리)가 갖는 水分, (4) 피복제에 흡착 또는 흡수된 水分 및 油脂類, 및 (5) 공기 중의 水分 등이다.

이와같이 용접時의 水素源의 大部分은 水分이며, 이것이 아아크 분위기중에 들어가서, 高温 때문에 一部가 解離하여 原子状의 水素로 되어, 용접 금속중에 용해한다.

용융 鐵中에 용해되는 水素의 量[H]는 다음과 같은 Sievert 法則에 따른다.[5]

$$[H] = K_H \sqrt{P_{H_2}}$$

여기서 K_H : 反応의 평형 상수

P_{H_2} : 気相中의 水素의 分圧

即 溶融鐵中의 水素의 含有量은 気相中의 水素分圧의 平方根에 比例한다. 그러므로 気相의 水素分圧이 1기압, 온도가 1600°C 일때 용융 純鐵中에는 0.0025% (28cc/100g)의 水素가 溶解한다. Fig1

dCollection

은 液相, 固相에서 모두 溫度의 上昇과 더불어 增加하고 있다. 이것은 鐵에서는 水素가 용해하기 위해서는 熱의 흡수(吸熱反応)가 必要함으로 溫度가 上昇할수록 용해가 容易하게 되기 때문이다. 또한 그림에서 γ는 바와 같이 용해도는 融点에서 큰 불연속부가 있으며, 용융 鐵의 溫度가 낮아져 응고될때에 용해도는 현저하게 감소한다. 또한 変態点에서도 불연속부가 存在하며 γ鐵은 α鐵, δ鐵 보다도 多量의 水素를 용해한다. 이 용해도는 鋼種에 따라 다르며, 또한 格子欠陥의 多少에 関係하는 冷間加工度에 따라서도 상당히 크게 변화한다.

水素는 다른 기체 즉 질소나 산소와는 달리 鐵中에 용해하여도 鐵과의 水素化物을 만들지 않고 거의가 鐵原子의 結晶格子 간격에 침입型 原子로서 存在한다. 또한 수소원자는 鐵원자에 비하여 그 크기가 매우 작기때문에 (Fe原子: 약 1.25Å, H原子: 약 0.46Å), 비교적 자유스럽게 格子間을 拡散운동을 할 수가 있다.

水素의 鋼中에 있어서의 拡散속도는, 鋼中의 C量이 增加함에 따라 또한 鋼이 冷間加工을 받으면 減少한다.

이것은 格子간격에 侵入하여 固溶되어 있는 C原子나 加工에 依해 생긴 格子欠陥이 水素의 拡散을 방해하기 때문인 것으로 생각되고 있다. 또한 鋼中의 水素의 拡散速度는 Fig 2.에 보이는 바와 같이 変化한다.[7] Fig 2에 依하면 예를 들어 600°C의 온도에서는 Ferrite 鋼中의 拡散速度는 Austenite 鋼中보다도 10数배나 빠르다.

이것은 Austenite는 面心立方格子로, 原子間隔이 체심입방격자의 Fe-

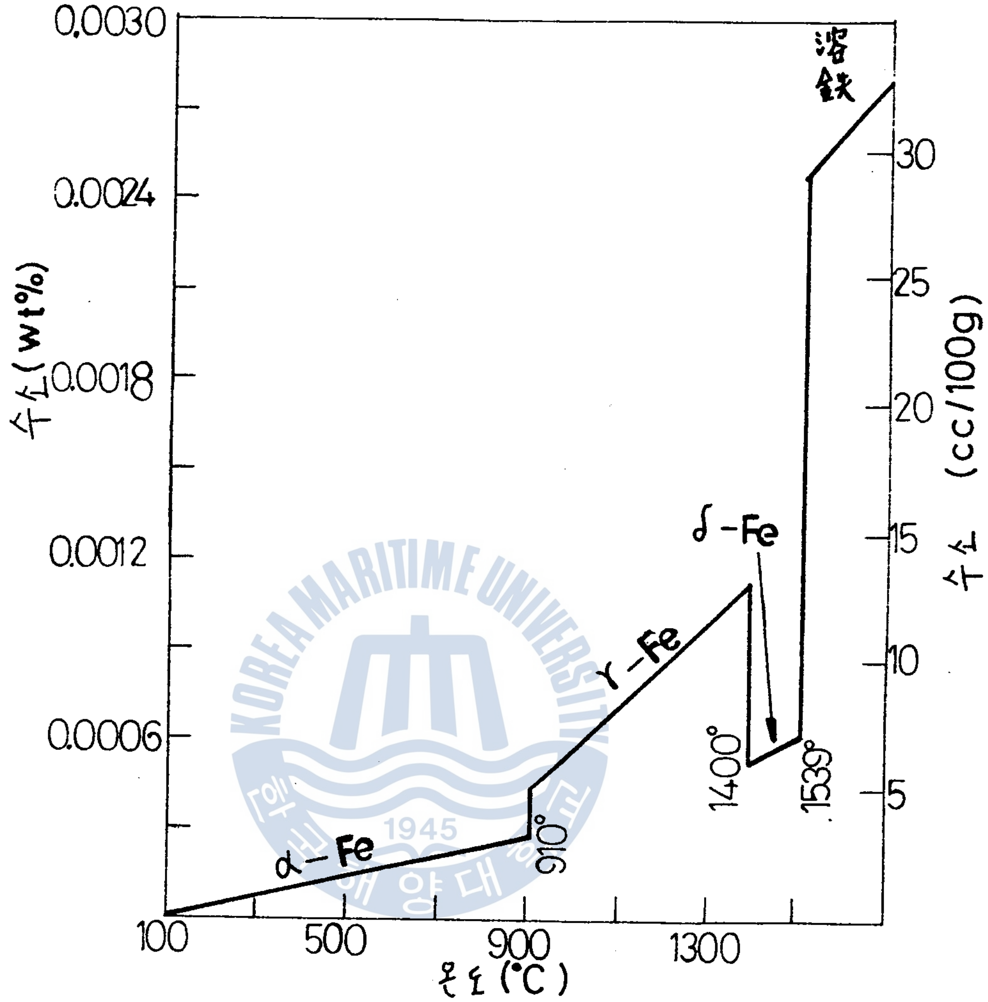


Fig.1 鉄에 대한 水素 용해도 (1atm, H_2)

Hi[illegible] 보다는 작고 [illegible] 때문에 水素의 検出이 곤란하게 되기 때문인 것으로 생각되고 있다.

水素의 溶解度는 Fig.1에서 보이는 바와 같이 凝固直後에 용융상태의 약 1/4로 저하한다. 이 때문에 용해되어 있던 水素는 용접금속의 응고와 더불어 拡散하여 外部로 많은 量이 방출된다.

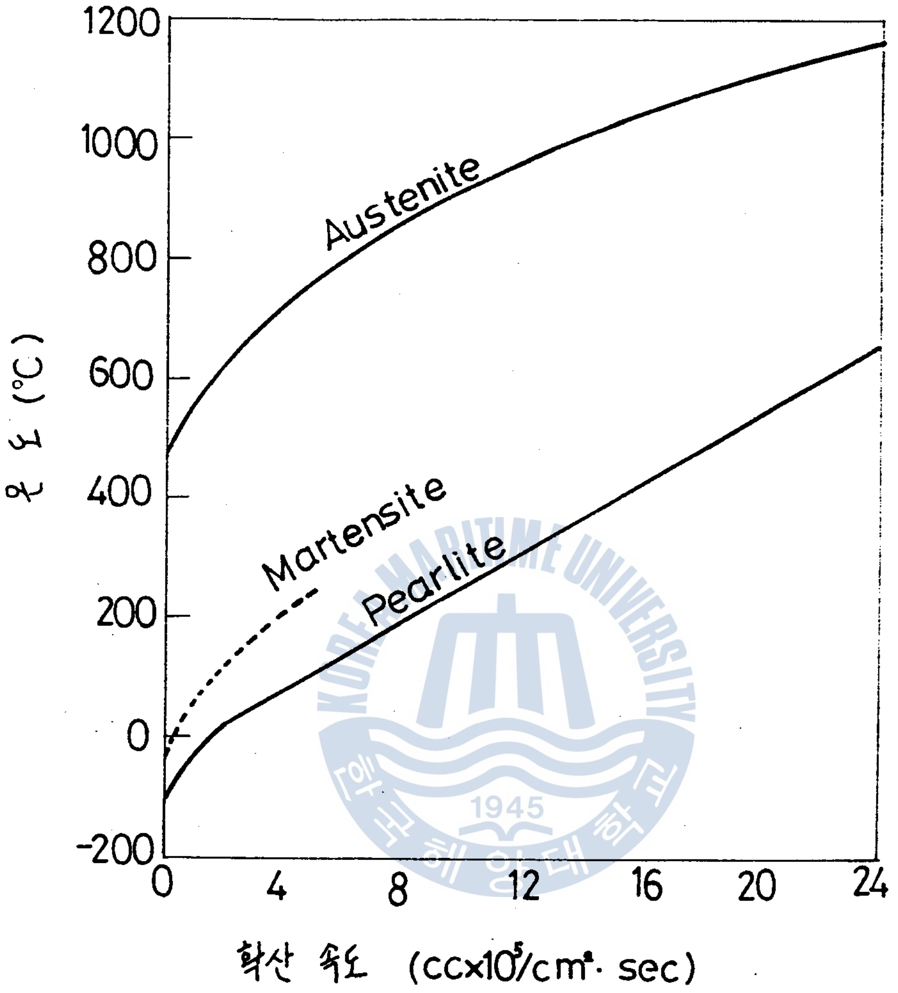


Fig.2 강중의 水素의 확산속도

그러나 아아크 용접부의 冷却速度는 매우 빨라서 응고후 1000°C 까지 냉각하는데 要하는 時間은 불과 數秒 정도에 지나지 않는다. 더욱이 이 溫度에서의 鋼은 全 γ相으로 上述한 바와 같이 γ相中에서의 擴散速度는 늦다. 따라서 800~700°C 정도의 溫度까지 相當한 量의 水素가 殘留한다. 더욱 온도가 떨어지면 γ相→α相의 相変

態가 이루어 진다. α상에서는 水素의 용해도는 γ相에서의 약 50%로 감소하며, 擴散속도는 증가한다. 따라서 水素는 용접금속으로 부터 방출된다. 이 때문에 水素 放出量은 500°C ~ 400°C 以下에서의 冷却속도에 따라 크게 영향을 받는다. 冷却속도가 늦으면, 거의 모든 水素가 外部로 放出되어 버린다. 따라서 水素量을 작게 하기 爲해서는 冷却속도를 느리게 하는 것이 필요하게 된다.

3. 水素 誘起균열 發生 機構

鐵 및 鋼의 結晶格子內에 용해되어 있던 原子狀 水素는 格子內를 자유롭게 擴散하는 동안 空孔, 미소균열, 非金屬介在物의 주변 등 비교적 큰 空隙이나 應力集中部의 비교적 넓게 되어 있는 格子 간격으로 擴散되어 이곳에서 分子狀 水素로 된다. 수소 원자가 이러한 領域에 우선적으로 흡수되는 理由는 侵入位置에 存在하는 것 보다 이러한 領域에 存在하는 것이 에너지的으로 더욱 안정된 상태가 되기 때문이다.

以上과 같이 分子狀으로 集結된 水素는 非擴散狀으로 되어 이 영역에서 내부 응력을 增加시켜 Fig3에 보이는 바와 같이 수소균열을 誘起한다.[8] 鋼에 侵入水素를 함유하고 있다고 해서 반드시 균열이 발생하는 것은 아니다. 鋼에 侵入水素가 存在할 경우 대부분 脆化되지만, 上述한 균열은 충분히 큰 應力, 또는 殘留應力이 存在할 경우만 발생하게 된다. 以上과 같은 發生機構로 因해 一般的

으로 수소 유기 균열은 發生까지 一定한 潛伏期間이 필요한 지연 균열(Delayed cracking) 形態를 取하며 伝播挙動 또한 간헐적이고 불연속적인 挙動을 나타낸다.

水素 誘起 균열에 있어 지연시간(Delayed time)은 応力에 거의 関係가 없으며 鋼中에 수소농도 증가, 경도 및 인장강도 증가 等에 따라서 감소한다. 鋼中에 수소농도가 낮은 경우에는 응력이 加해진 후 며칠이 지난후에 균열이 발생하게 된다.

아무리 시간이 지나더라도 지연 균열이 발생하지 않게 되는 임계最小応力은 鋼中의 水素농도가 增加할 수록 감소한다. Fig 4는 SAE 4340 鋼을 H_2SO_4 용액에서 음극 분극시켜 水素를 吸藏시킨 다음 静的 荷重을 加했을 때의 지연 균열 시간(Delayed cracking time)을 나타낸 것이다. 수소농도는 加熱에 依해서 여러가지 값으로 감소시켰다 이 그림에 依하면 侵入水素농도가 낮아질수록 파괴까지의 지연시간이 길어지고 있음을 잘 나타내고 있다.

4. 熔接部 水素 誘起 破壞의 특징

熔接部의 水素 誘起 破壞의 進展挙動은 Fig 5와 같은 clip gauge를 利用하면 把握할 수 있다. Fig 5의 概要図에서 보이는 홈(Welding Groove)부에 拘速狀態로 因해 応力集中 현상이 발생한다. 이러한 応力集中部에 前述한 拡散性 水素의 集合이 일어나고 이로 因해 균열이 발생되어 전파가 시작된다.

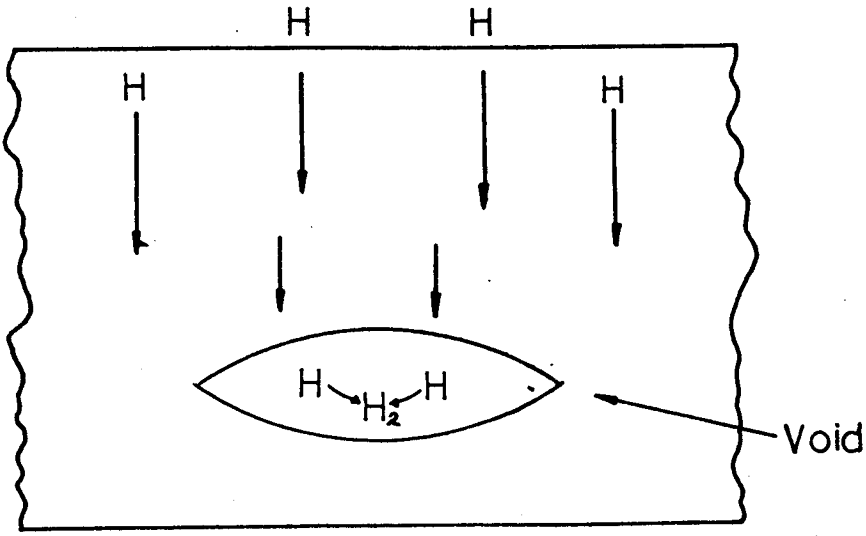


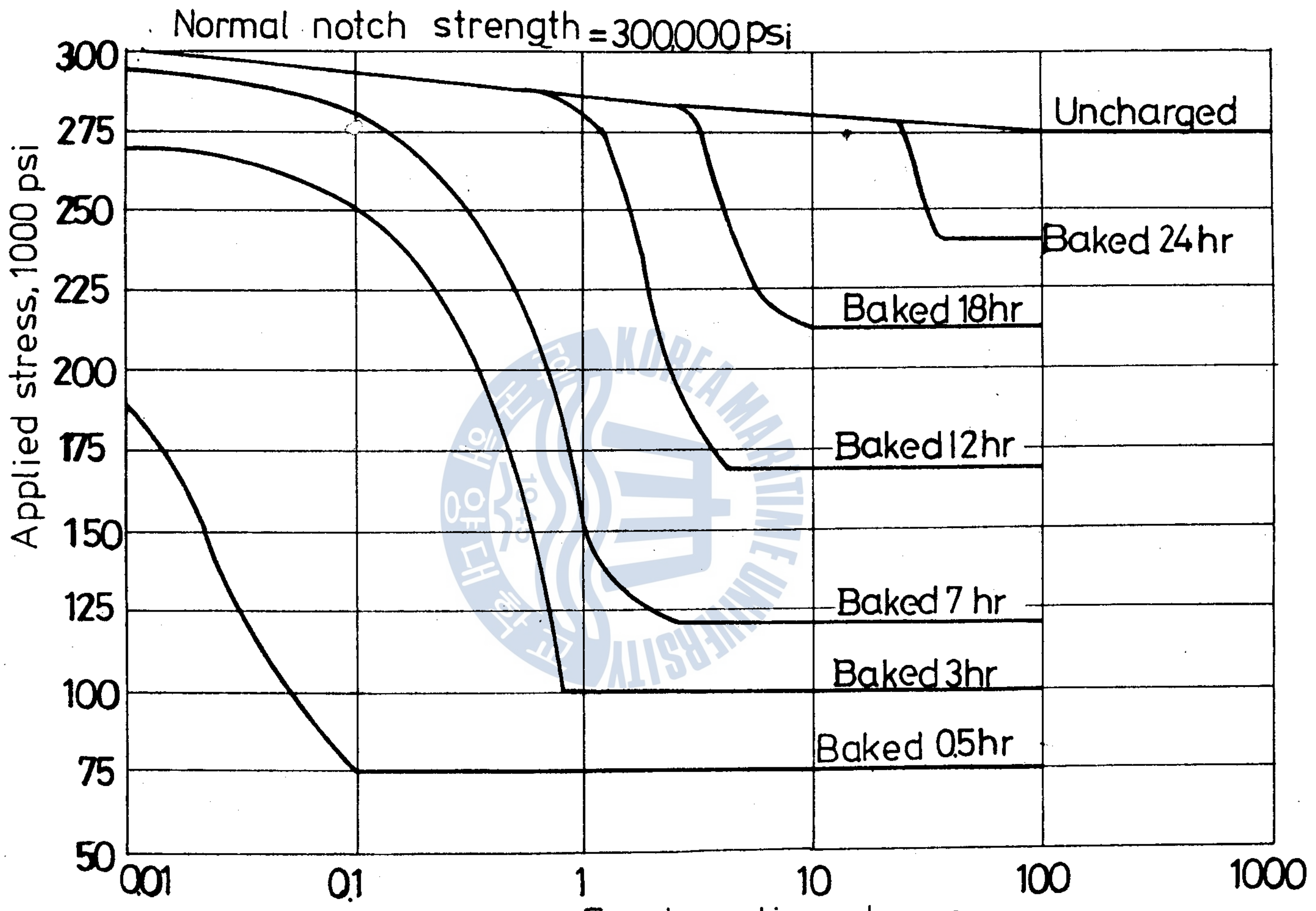
Fig.3 수소균열의 발생기구. 수소원자가 금속격자로 확산해 가서 수소분자가 생성된다. 수소분자는 확산이 불가능 하며 그 결과 내부응력을 증가시키게 된다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

이와같이 해서 発生된 용접부 水素균열의 巨視的 様相을 Fig.6에 보인다. Root 低部로 부터 水素誘起 低温균열이 発生하여 伝播하면 Root 간격에 変位가 생기게 되므로 이 変位를 clip gauge를 通하여 Recorder에 연속적으로 記録되도록 함으로써 균열의 発生 時期 및 伝播 상황이 把握된다.

Fig.7은 以上과 같은 方法으로 Root 部의 간격의 変化를 測定하여 記録한 것이다. 이에 依하면 용접후 약 15분 정도의 時間이 지나기 까지는 별다른 変化를 보이지 않으나 그 以후에는 突起部가 간헐적으로 보이고 있다.

dCollection



Normal notch strength = 300,000 psi
Uncharged
Baked 24 hr
Baked 18hr
Baked 12hr
Baked 7 hr
Baked 3hr
Baked 0.5hr
Applied stress, 1000 psi
300
275
250
225
200
175
150
125
100
75
50
0.01
0.1
1
10
100
1000
Fracture time, hours

Fig. 4

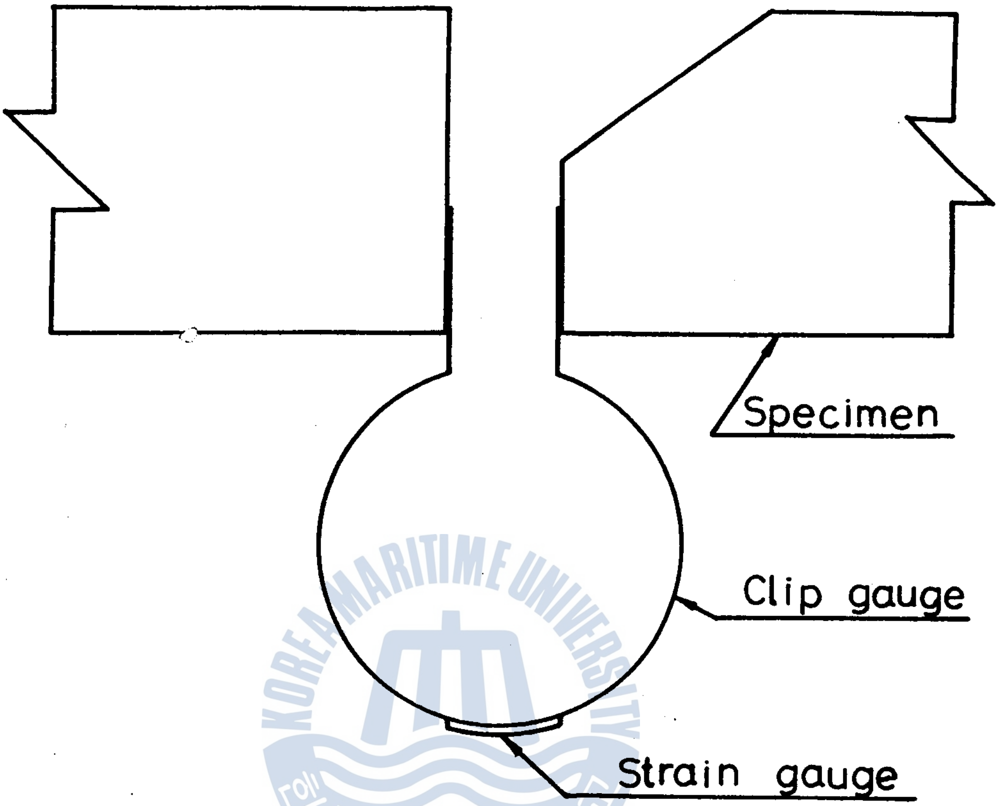
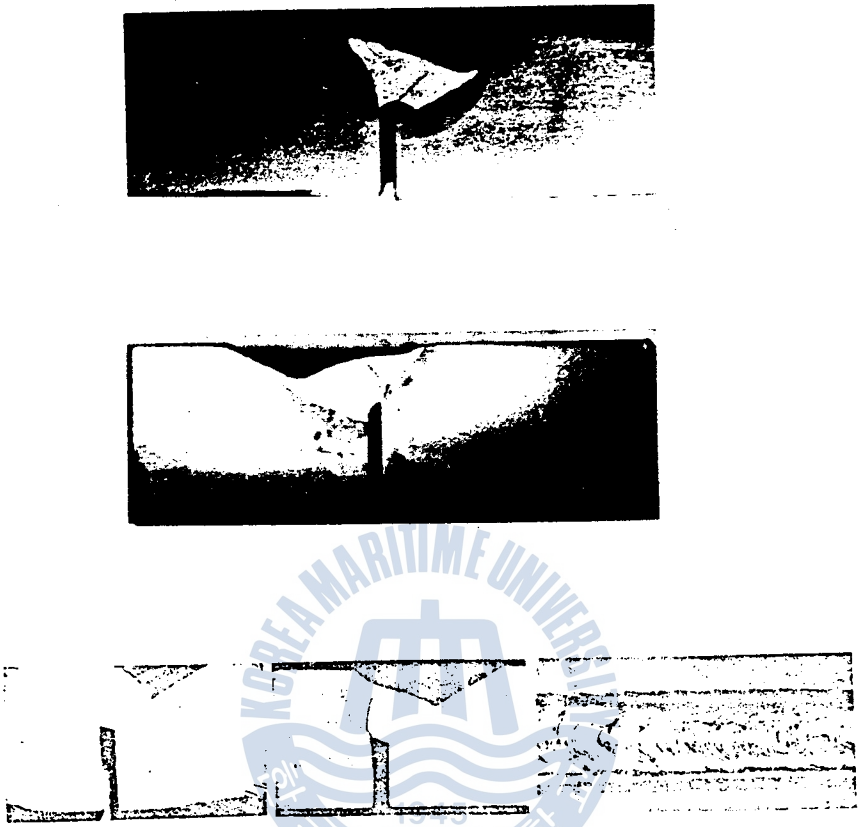


Fig.5 용접부 수소 유기균열의 진전거동을 파악하기 위한 실험 장치

以上과 같은 현상은 熔接時 흡수된 擴散性 水素가 Root部의 應力集中 領域에 集結하기까지 時間이 걸리기 때문에 균열 발생까지 潛伏期間이 必要하며 일단 균열이 發生된 후에도 그 先端에 또 다시 간헐적인 진전擧動을 나타내기 때문인 것으로 추측된다.

水素誘起 破壞의 微視的인 破面樣相은 Fig 8 및 Fig 8'에 나타내었다. Fig 8 (a)는 水素誘起 低溫균열의 斷面 macro 組織이며 Fig 8(b)는 macro 破面 및 그 스케치를 보이고 있다. 또한 Fig



(a) Root crack.　　(b) Longitudinal crack.

Fig.6 Shape of cold crack.

8'(a)(b)(c)(d)는 Fig 8에서 보인 各 部分의 micro 斷面 樣相을 보인 것이다.

Fig 8'에 依하면 micro 破面의 거의 全部가 粒內破面이며, 一部에서 粒界破面도 보이고 있다. 粒內破面은 바로 水素脆化破面이며, 一部 水素擬劈開破面도 觀察된다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교
dCollection

以上의 結果로 부터 水素誘起破壞는 破壞發生時까지 一定한 潛伏期間이 必要하며 간헐적인 進展擧動을 보이며 그 破面은 대체로 擬壁開 破面樣相을 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 擴散性 水素의 觀察裝置

熔接時 熔接材料 및 熔接環境으로 因해 용접부에 混入되는 擴散性 水素를 測定할 目的으로 Fig 9와 같이 水素補集裝置를 제작하였다. JIS 규격에 입각한 길이 130 mm, 폭 25 mm, 두께 12 mm인 水素測定用 試驗片을 제작하여 熔接時 온도를 측정할 수 있도록 시험편의 중앙에 지름 4mm의 구멍을 뚫어 Thermo couple을 사용할 수 있도록 하였으며 그리세린으로 충만된 뷰렛에 넣어 45°C에서 48시간 방치한후 뷰렛 상부에 補集된 수소를 용접시 혼입되는 확산성 수소량으로) 1시간 간격으로 측정하였다. 이러한 擴散性 水素는 0.01cc까지 測定하여 이를 다시 용접금속 100gr 當의 量으로 換算하였다.

6. 熔接條件에 따른 水素擧動.

Fig.10은 熔接部의 擴散性 水素 測定時 時間에 따른 水素 擴散變化量을 보인 것이다.

Fig.10곡선①은 試驗片 및 熔接棒의 豫熱이 없이 熔接을 행한 후 물속서 急冷하였을 경우 擴散性 水素量의 變化를 나타낸 것이다.

dCollection

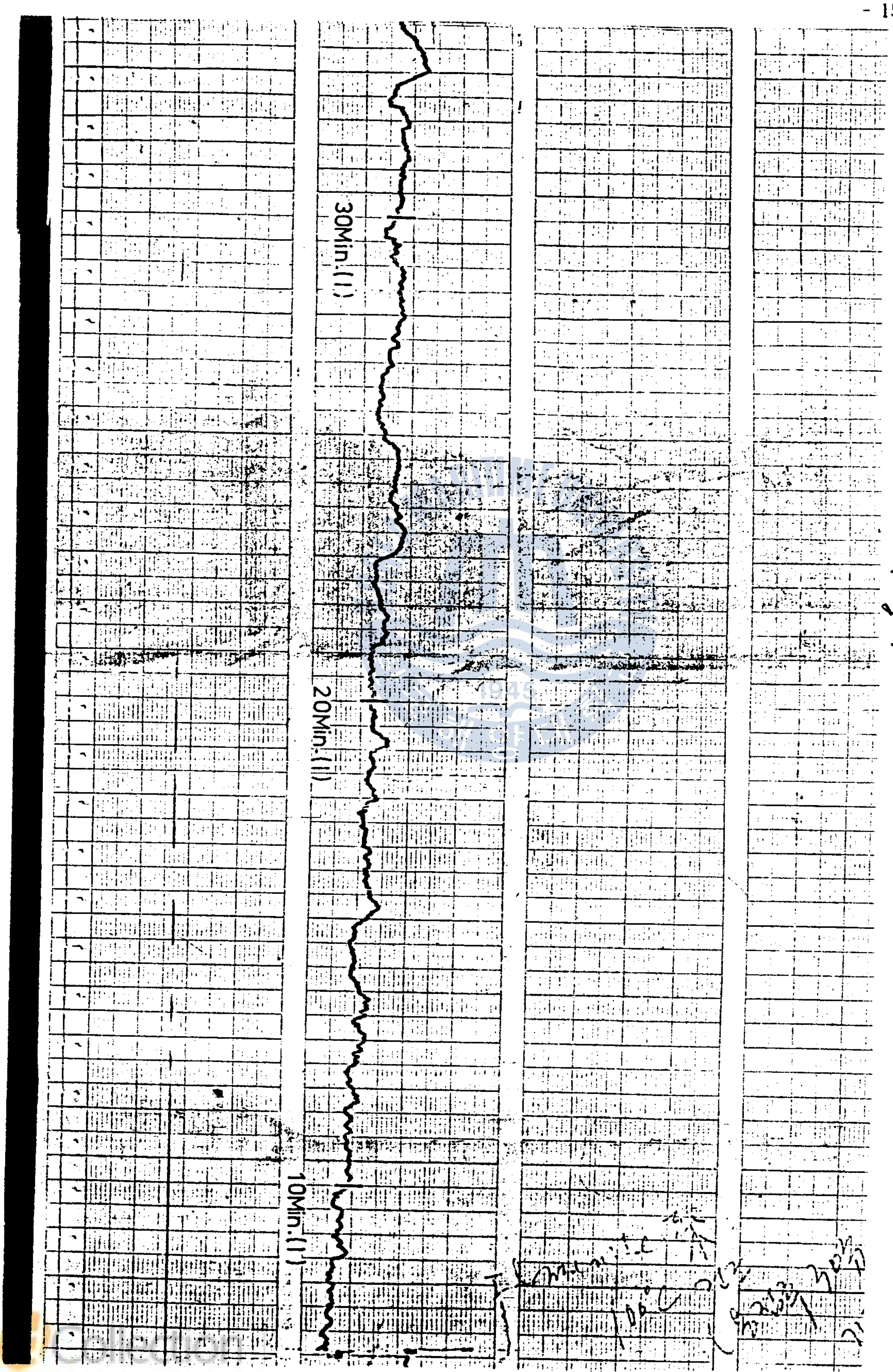


Fig 7-1

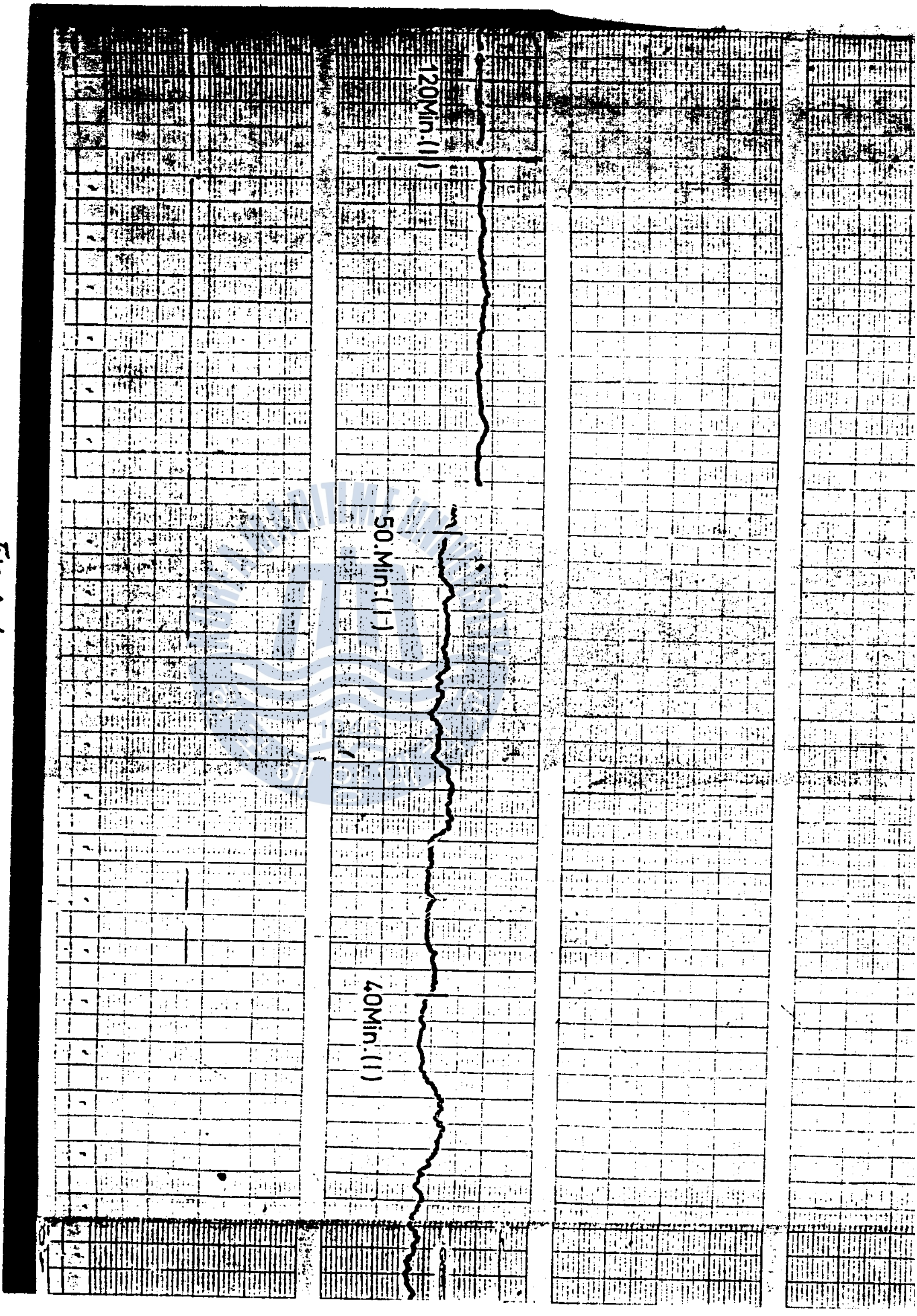


Fig 9-1

dCollection

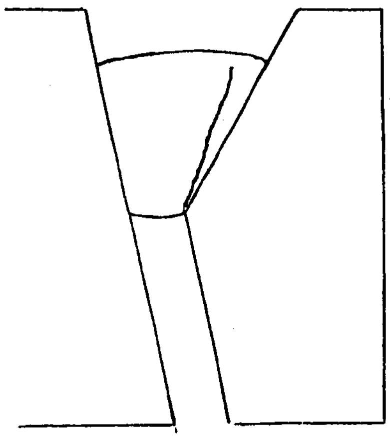


Fig.8(a) 수소유기 저온 균열의 단면

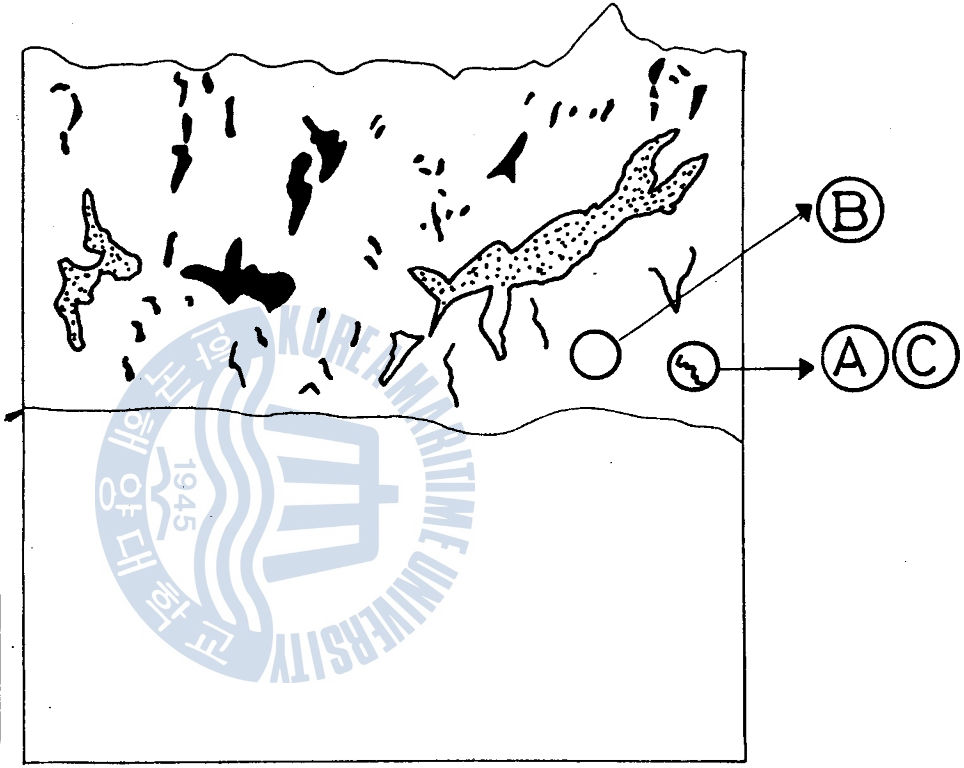


Fig.8(b) Macro 파면의 스케치

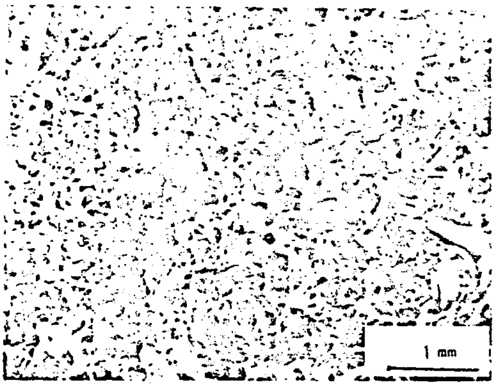


Fig.8'(a) 양 단면

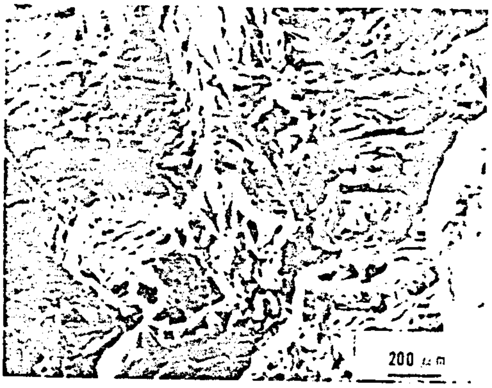


Fig. 8'(b) 수소 의벽개 단면

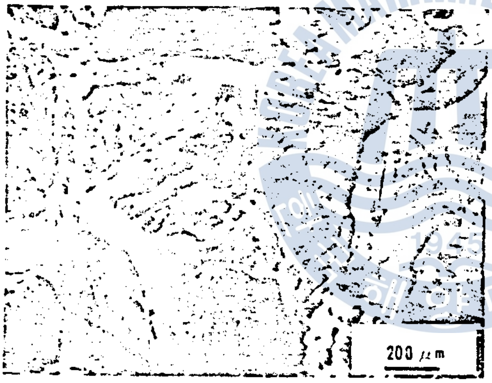


Fig.8'(c) 수소 의벽개 파면의 보편적인 경계 단면

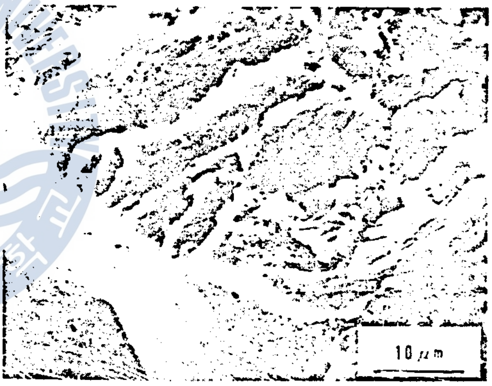


Fig. 8'(d) 수소의 벽개 단면

Fig8' 수소 유기 파괴의 각 부분의 micro 단면 양상

곡선 ①은 試驗片만을 電氣炉에서 300°C로 豫熱하고 即時 熔接을 행한 후 물속서 急冷하였을 때 擴散性 水素量의 変化를 나타낸 것이다. 곡선 ②는 試驗片 및 熔接棒을 電氣炉에서 300°C로 10分間 豫熱하고 即時 熔接을 행한 후 大氣중에 5分間 放置한 후 擴散性 水素 發生量의 変化를 나타낸 것이다.

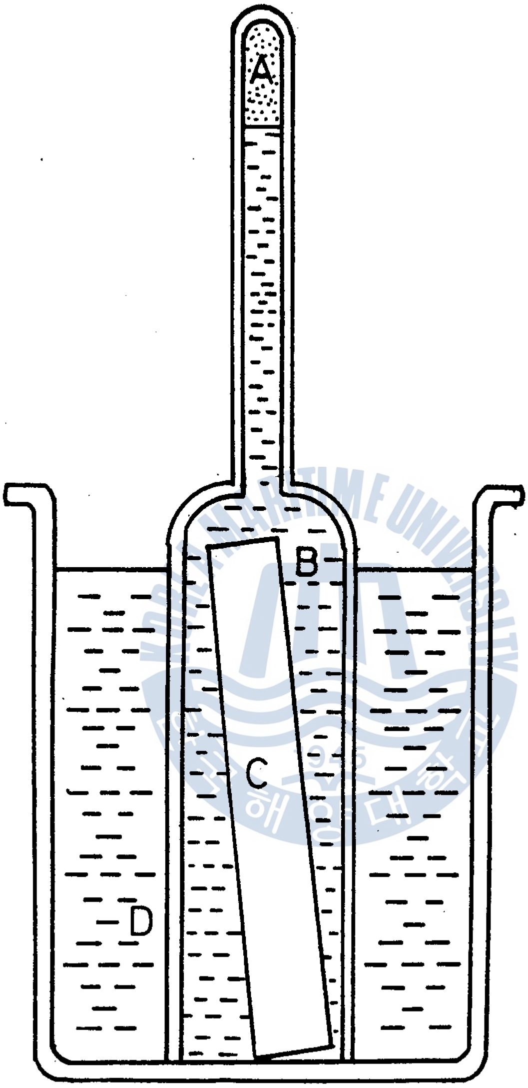


Fig.9 Schematic diagram of hydrogen measuring apparatus.

A:Hydrogen B,D:Glycerin C:Specimen

dCollection

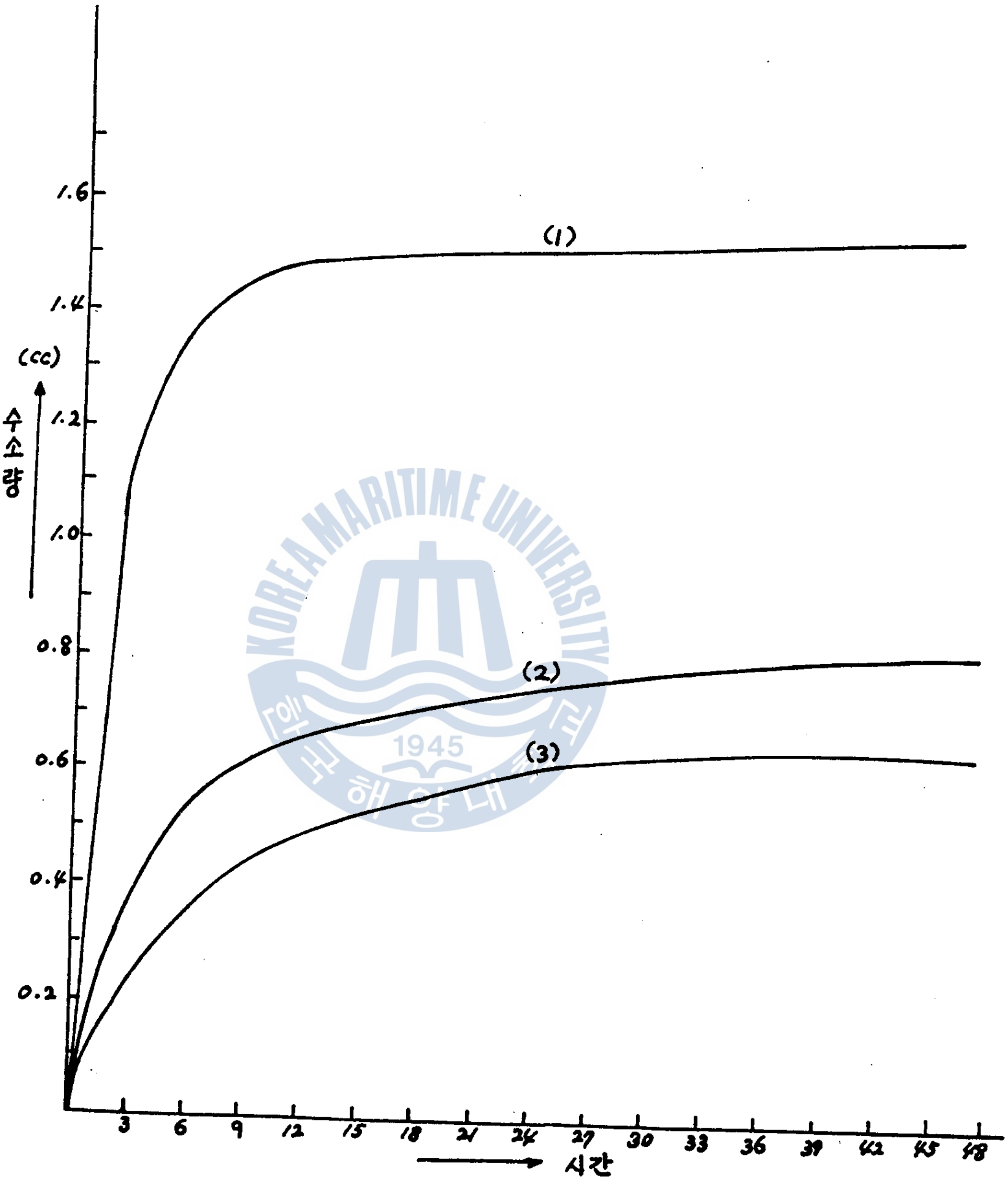


Fig. 10 확산 수소 발생

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교
dCollection

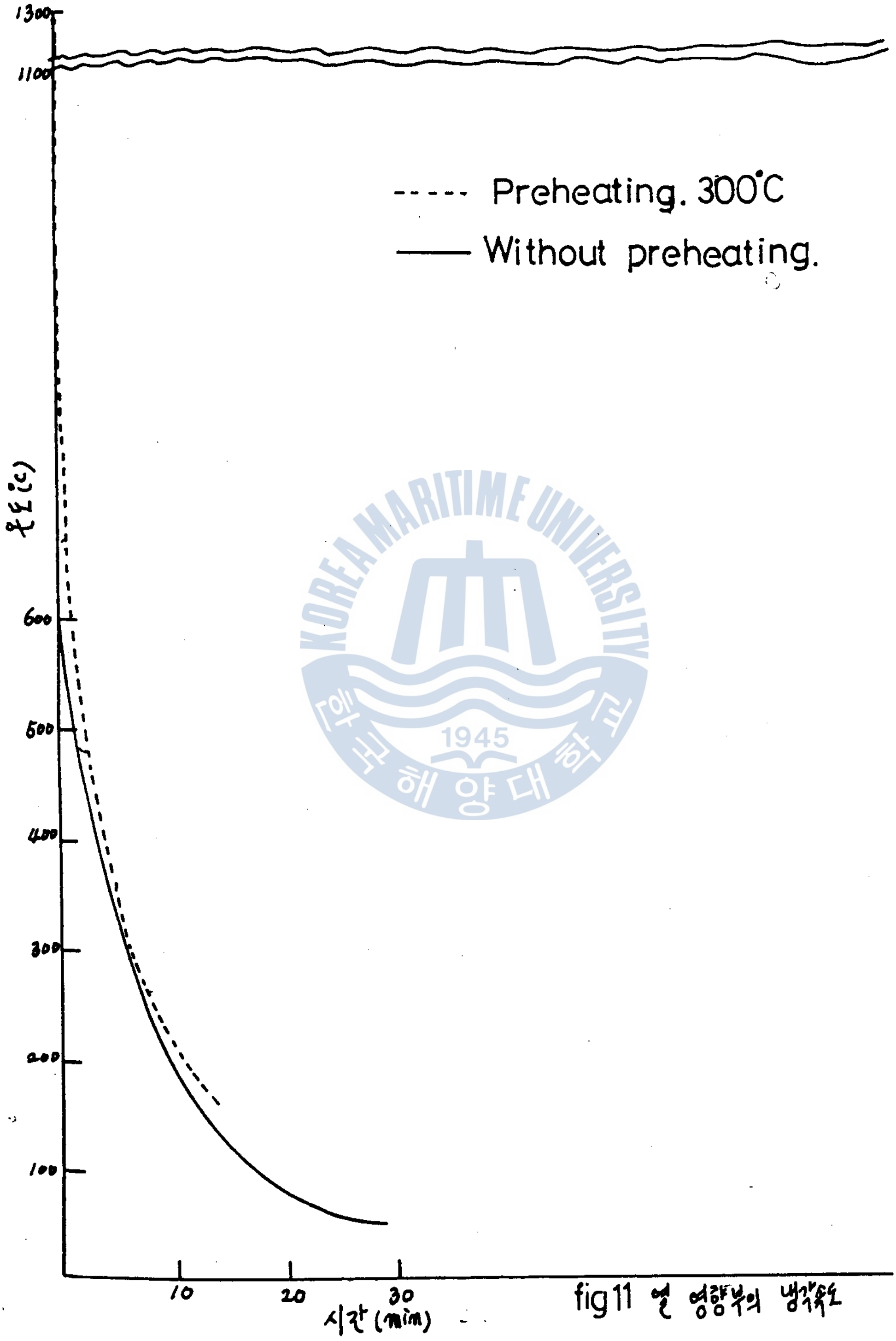


fig11 열 영향부의 냉각속도

dCollection

이에 依하면 용접조건과 放置환경에 따라 熔着금속중의 水素量은 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Fig.10에서 곡선 ①,②,③은 확산성 수소발생량의 차이가 매우 많다는 것을 알수 있다. 이것은 水素가 金属중에 용해하기 위해서는 熱의 흡수가 필요하므로 온도가 상승할수록 용해가 容易하게 되기 때문이다. 또한 Fig.11은 용접후 냉각온도를 표시한 것으로서 실선은 예열이 없는 경우이며, 파선으로 표시한 것은 예열을 한 경우이다. 그러므로 냉각속도가 완만할 수록 확산성 수소량은 활발하다는 것을 알수 있다.

7. 結論

이상과 같은 고찰과 実験을 통한 重要한 結果를 整理하면 다음과 같다.

(1). 侵入水素농도가 낮아질수록 파괴까지의 지연시간이 길어지고 그 破面의 거의 全部가 粒内破面이며, 一部에서 粒界破面도 보이고 있다.

(2) 예열을 한 경우에는 냉각속도가 느리며 확산성 수소 거동이 활발하다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교
Collection

參考文獻

1) 稻垣, 伊藤, 高張力鋼, 低溫用鋼의 溶接, 産報出版 p.120

2) 中山, 松本, 稻垣, 建築鋼構造繼手의 各種溶接方法에서의 熔接材에 관한 硏究, 熔接學會誌. VOL.45, (1974) NO.11, P1103

3) 菊田, 荒木, 鋼의 水素에 起因하는 破壞와 破面形態의 分析 VOL.45, (1976) NO.12 P.985

4) 松井, 溶接欠陷의 發生機構와 防止對策, 日本學術會議溶接硏究連絡委員會, 溶接 Symposium 資料, (1977) p.1

5) 荒木透, 金子秀夫, 三本木貢治, 橋口隆吉, 盛利貞, 鉄鋼의 溶接, 1974, p103

6) 荒木透, 金子秀夫, 三本木貢治, 橋口隆吉, 盛利貞, 鉄鋼의 溶接, 1974 p106

7) 荒木透, 金子秀夫, 三本木貢治, 橋口隆吉, 盛利貞, 鉄鋼의 溶接, 1974 p107

8) 孫雲澤, 용접 공학, 1981, p166

dCollection

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교
dCollection