Implant 시험법에 의한 용접지연 균열발생 특성에 관한 연구

지 도 교수 김 영 식

한국 해양대학 선박기계공학과
강 태 효, 김 성석, 김 호근, 박 재 식

목 차

1. 서 론

2. 수소에 의한 지연균열 발생기구

3. 실험방법 및 실험장치

3.1 실험재료 및 시험편

3.2 실험장치

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지연균열 발생거동

4.2 예열이 지연균열 발생거동에 미치는 효과

5. 결 론

Collection

1. 서 론

용접시공시 발생되는 균열(cracking)을 크게 분류하면, 지연균열(delayed cracking), 고온균열(hot cracking), 재열균열(Stress relief annealing cracking)등으로 분류되고, 이 중 지연균열은 강의 M_s 변태점 이하에서발생하게 되는 용접지연균열로서 수소가 균열발생의 주원인으로 된다. 용접부에는 용접시공시 용접봉의 피복제(flux), 용접부의 유지, 녹등의 수분과 대기중의 수분으로 인해 아아크(arc)분위기 중에서 열해리 현상을 통해 수소가 유입될 수 있다. 이와 같이 용접부로 유입된 수소는 용접열 사이클에 의한 용접부에 경화(hardening)마르텐사이트의 생성)와 취화(embrittling) 및 구속응력(또는 변형율)등의 조건하에서 용접부를 확산하여 용접지연균열을 일으킨다.

확산성 수소(diffusible hydrogens)가 원인이 되어 발생되므로 이를 지연균열(delayed cracking)이라 하고 이 때 균열 발생 시기까지의 시간을 잠복기간(incubation time)이라 한다. 그런데 이와 같은 지연(또는 저온균열은 적당한 예열조건에 의해 확산성 수소의 방출을 촉진시키고, 마르텐사이트의 생성을 다소간 억제시킴으로서 효과적으로 방지할 수 있다.

지연균열의 감수성을 평가하기 위하여 제안된 시험방법으로서는 Lehigh 균열시험, TRC(Tensile restraint cracking)시험, RRC(rigid restraint cracking) 시험, 임플란트시험법등이 있으며 이들 중 특히 임플란트시험법은 프랑스의 H. Granjon에 의하여 제안된 시험 방법으로서 작은 시험편에 실제 용접부를 효과적으로 재현할 수 있는 방법이다.

본 논문에서는 수소에 의한 지연균열의 발생기구를 고찰하고, 임플란트 시험법을 통해 확산성 수소량의 변화에 따른 용접지연균열 감수성(Susceptibility)을 평가하였으며, 또한 이에 치는 예열(preheat)의 영향에 관해서도 연구하였다.

Collection

2. 수소에 의한 지연균열 발생기구

정적인 부하 상태에서 용접지연균열 진전을 생각하면 식(1)로 주어지는 조건에서 이루어 진다고 사료된다.

$$\sigma_a [\pi (c + c_1)^{1/2}] \geq K_{th} (CH) \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서 σ_a : 작용 응력

c : 주균열 길이

c_1 : 미소공동의 균열 길이

C_H : 단위면적내의 수소집적율

식(1)을 도식화하면 Fig 1과 같이 된다. 즉 균열 선단에 형성되는 3축 응력장의 전위고착부, 미소공공(microvoid)등에 수소가 확산 집결되어 이것이 일정 임계치에 도달하면 균열선단의 격자간 응집강도, $[K_{th}(CH)]$ 는 균열선단의 파단강도, $\sigma_a[\pi(c+c_1)]^{\frac{1}{2}}$ 이하로 저하되어 미소균열이 발생한다. 이러한 미소균열은 주균열과 연결되어 점진적인 균열 진전이 이루어 진다.

따라서 용접부에 확산성 수소량이 소량 혼입되면 단위면적당 평균 수소가 저하되고, 그러므로 격자간 응집강도는 향상된다. 그 결과 균열 선단의 지연균열 발생은 더욱 어려워지리라 사료된다.

3. 실험방법 및 실험장치

3.1 실험재료 및 시험편

본 실험에 사용된 실험재료는 일반 구조용 강재로서 조선 및 해양 구조물등에 널리 사용되어지고 있는 Normalized강재이고 Table .1은 이 강재의 화학적 성분, 기계적 성질을 나타낸 것이다.

Fig .2는 시험편과 용접모판(Backing plate)의 형상과 치수를 나타내고 있는 것으로서 깊이 1mm 원주노치는 예비실험을 통해 용접 열영향부에 오도록 가공하였다. 이와 같이 준비된 시험편을 그림과 같은 모판의 중앙에 뚫은 구멍에 삽입하여 용접을 실시하였다.

dCollection

Table .2는 본 실험에서 사용한 용접조건으로서 Ø7016(φ4㎜) 저수소계 용접봉을 사용하여 최대입열량은 20 KJ/㎝ 로 길이 130㎜ 의 bead-on-plate 용접을 실시하여 Fig .3에 나타난 바와 같이 임플란트 시험편상에 용접본드부 및 용접열영향부를 재현시켰다. 또한, 본 실험에서는 용접봉의 건조상태를 달리함으로서 용접부에 잔류하는 확산성 수소량을 변화시켰으며 각 상태에 따른 잔류 확산성 수소량을 측정한 결과 5.2 cc/100g 과 24.6 cc/100g 으로 측정되었다.

3.2 실험장치

본 실험에 사용한 임플란트 시험장치는 위엄과 위엄기어를 이용한 기계식 원리로 작동되도록 고안된 장치로서 그 개략도는 Fig .4와 같다.

용접을 실시한 후 용접본드부의 온도가 150℃가 되었을 때 하중을 가하여 각각의 하중조건에서의 파단시간을 시간 기준 pen 기록계에 의하여 측정하였으며 24시간의 하중 부하에서도 파단되지 않는 최대하중의 환산 응력값을 임계파단응력(the Critical fracture stress)으로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지연균열 발생거동

Fig .5는 본 실험의 재료로서 사용된 Normalized 강 용접부의 경도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 급열, 급냉의 용접 열사이클로 인하여 열영향부에 조직의 변화가 초래되어 용접 열영향부의 경도값은 모재보다도 훨씬 더 높은 값으로 상승한다. 이와 같은 경도값을 가지는 조직은 경(hard)하고, 연성(ductility)이 적은 마르텐사이트, 혹은 베이나이트 조직이라 사료되어 진다.

Fig .6은 저수소계 용접봉을 이용하여 비건조 상태에서 용접하였을 때인 확산성 수소량이 5.2 cc/100g 인 조건에서 임플란트 시험을 행한 결과를 정리한 것이다. 이 결과에 의하면 용접 열영향부의 정적강도는 57 ㎏/㎟ 이었으나, 그 임계파단응력은 46 ㎏/㎟ 으로 추정되었다.

Collection

Table .2는 본 실험에서 사용한 용접조건으로서 Ø7016(φ4㎜) 저수소계 용접봉을 사용하여 최대입열량은 20 KJ/㎝ 로 길이 130㎜ 의 bead-on-plate 용접을 실시하여 Fig .3에 나타난 바와 같이 임플란트 시험편상에 용접본드부 및 용접열영향부를 재현시켰다. 또한, 본 실험에서는 용접봉의 건조상태를 달리함으로서 용접부에 잔류하는 확산성 수소량을 변화시켰으며 각 상태에 따른 잔류 확산성 수소량을 측정한 결과 5.2㏄/100g 과 24.6㏄/100g 으로 측정되었다.

3.2 실험장치

본 실험에 사용한 임플란트 시험장치는 위엄과 위엄기어를 이용한 기계식 원리로 작동되도록 고안된 장치로서 그 개략도는 Fig .4와 같다.

용접을 실시한 후 용접본드부의 온도가 150℃가 되었을 때 하중을 가하여 각각의 하중조건에서의 파단시간을 시간 기준 pen 기록계에 의하여 측정하였으며 24시간의 하중 부하에서도 파단되지 않는 최대하중의 환산응력값을 임계파단응력(the critical fracture stress)으로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지연균열 발생거동

Fig .5는 본 실험의 재료로서 사용된 Normalized 강 용접부의 경도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 급열, 급냉의 용접 열사이클로 인하여 열영향부에 조직의 변화가 초래되어 용접 열영향부의 경도값은 모재보다도 훨씬 더 높은 값으로 상승한다. 이와 같은 경도값을 가지는 조직은 경(hard)하고, 연성(ductility)이 적은 마르텐사이트, 혹은 베이나이트 조직이라 사료되어 진다.

Fig .6은 저수소계 용접봉을 이용하여 비건조 상태에서 용접하였을 때인 확산성 수소량이 5.2㏄/100g 인 조건에서 임플란트 시험을 행한 결과를 정리한 것이다. 이 결과에 의하면 용접 열영향부의 정적강도는 57㎏/㎟ 이었으나, 그 임계파단응력은 46㎏/㎟ 으로 추정되었다.

dCollection

Photo .1은 확산성 수소량이 5.2 cc/100g일 때 구속응력이 49 kg/mm²이고 파단까지의 지연시간(delayed time)이 85 min 인 조건에서 파단된 파면을 주사형전자현미경으로 촬영한 사진으로서 지연파괴의 특징인 수소의 영향으로 인한 의벽개파면이 관찰되고 있다.

Fig .7은 흡습한 저수소계 용접봉을 이용하여 용접하였을 때인 확산성 수소량 24.6cc/100g인 조건에서 임플란트 시험을 행한 결과를 정리한 것으로서 임계파단응력은 38 kg/mm² 으로 측정되었며 이 결과는 확산성 수소량이 5.2 cc/100g인 조건일 때의 임계파단응력(46 kg/mm²)보다도 훨씬 더 낮은 값이라는 것을 알 수 있다.

Photo .2는 확산성 수소량이 24.6cc/100g일 때 구속응력이 38.5 kg/mm²이고 파단까지의 지연시간이 50min인 조건에서 파단된 파면을 촬영한 사진으로서 수소 의벽개파면이 관찰되고 부분적으로 입계파면도 관찰되어지고 있다.

Fig .6은 이상의 실험을 정리한 것으로서, 종축을 용접 열영향부의 정적강도, σ_u ,와 임의의 수소조건에서의 임계파단응력, σ_{cri} ,와의 비(한계응력비), σ_{cri}/σ_u 로 취하고 횡축을 확산성 수소량의 대수값으로 취한 것이다.

이 결과에 의하면

$$\sigma_{cri} = \sigma_u \times (0.956 - 0.2074 \log H)$$

따라서 임계응력비(σ_{cri}/σ_u)는 용접부의 확산성 수소량이 증가할수록 감소한다는 것을 나타내고 있다.

4.2 예열을 행한 조건에서의 저온균열 발생거동

Fig .9는 모판을 150°C 로 예열한 조건에서 용접을 실시하였을 때의 임플란트 시험결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 예열을 실시했을 경우의 임계파단응력은 열영향부의 정적강도와 거의 차이가 없는 아주 우수한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 table.3에서도 알 수 있는 바와 같이 150°C의 예열을 행하였을 경우 확산성 수소의 대기에로의 방출이 가능한 시간이 훨씬 길어져 용접부에 잔류하는 확산성 수소량은 급

dCollection

격히 저하되고 또한 늦은 냉각속도때문에 마르텐사이트의 생성이 다소 간 억제된 때문이라 사료된다.

5. 결 론

임플란트 시험법을 이용하여 Normalized강재에 대해 용접지연균열 감수성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수소가 내재된 상태의 파단강도는 열영향부의 정적강도에 대해 현저히 저하하며 그 저하폭은 수소량에 비례한다.

2. 실험의 결과로 부터 임계파단응력, σ_{cri}, 열영향부의 정적파단강도, σ_u, 및 용접부에 혼입된 확산성 수소량, H, 와의 관계는 다음과 같이 나타난다.

$$\sigma_{cri} = \sigma_u \times (a - b \cdot \mathrm{Log}\, H)$$

a, b : 재료상수 (material constant)

3. 임플란트 임계파단응력은 예열을 실시함으로서 상당히 개선될 수 있고 적절한 예열 조건을 선택하면 지연균열을 효과적으로 방지할 수 있다.

4. 용접지연균열의 파면은 고응력에서는 입내(transcrystalline)로 저응력에서는 입내와 입계(intercrystalline)가 혼재된 상태로 나타난다.

dCollection

참 고 문 헌

1) 김 영 식, "철강용접부의 균열발생과 그 실험방법", 대한용접학회지 4권 3호 (1986년 12월호), PP 13 ~ 25.

2) 안 영 호, "임플란트 시험법에 의한 저온용강의 용접성에 관한 연구" 한국 해양대학 대학원 논문집 (1985년 2월)

3) 김 영 식, "용접부 수소용기 균상의 파면학적 고찰", 제 1회 재료강도 심포지움 (1987), PP 187 ~ 192

4) K. Easterling "Introduction to the physical Metallurgy of welding", Butterworths, PP 180 ~ 194.

5) 鈴木春義外, 溶接全書 1 "溶接金属学" 産報出版, 1978, PP 55 ~ 62

6) 김 경 근, "The lecture note of the Heat Transfer" 제 20장 온도, 유량 및 압력 측정

7) 鈴木春義, JWS BULLETIN "鋼材の溶接割れ (低温割れ)", 1976, PP 1 ~ 43.

8) 일본용접협회, Implant 形 溶接割れ 試験方法, WES 1104 - 1980.

dCollection

$$\sigma_a[\pi(C+C_1)]^{1/2} \geq Fm(C_H) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

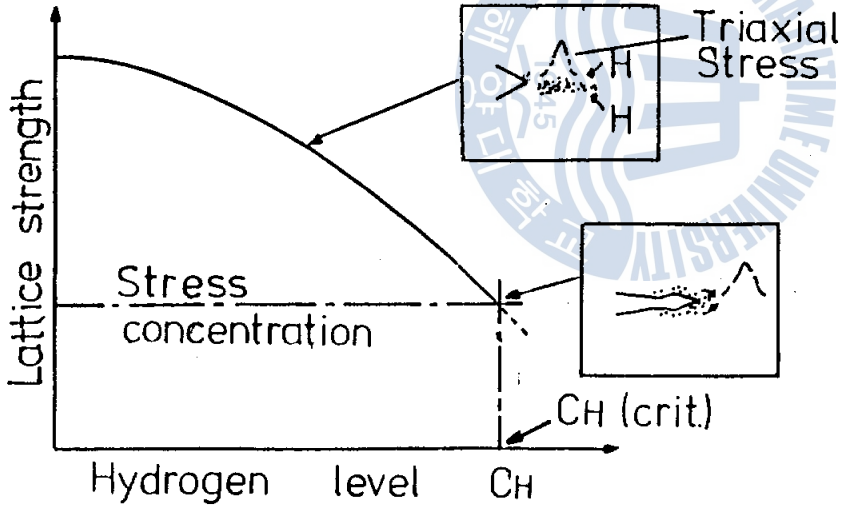
σ_a: Applied stress

C : Main crack length

C_1: Crack length of microcavity

C_H: Average hydrogen concentration per unit area

Fm: Cohesive force of the lattice



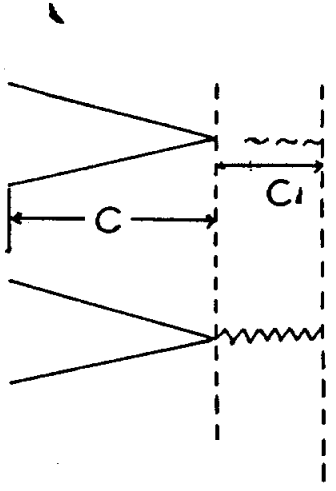


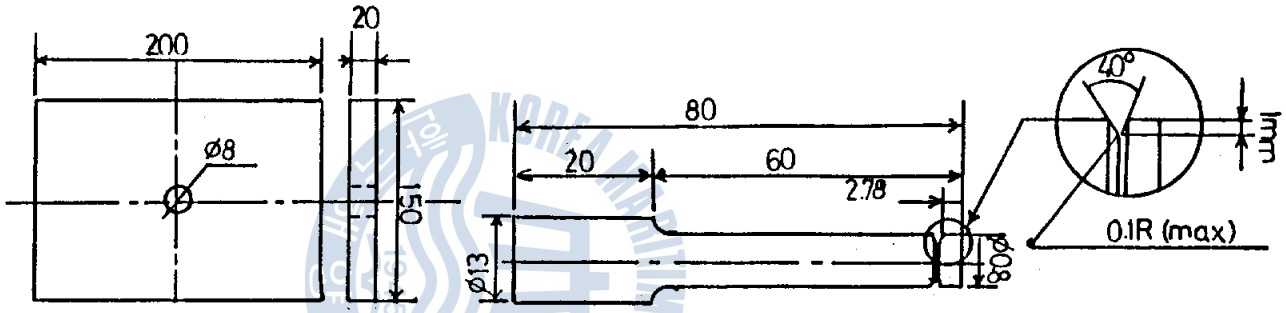
Fig.1 Possible models of Quasi-cleavage

Table 1. Chemical composition and mechanical properties.

materials	chemical composition (wt.%)							mechanical properties		
	C	Si	Mn	Ni	Ti	Ceq	Pcm	Y.S.	T.S.	El.(%)
Normalized	0.13	0.40	1.43	0.23	0.017	0.391	0.234	36.9	54.5	30.0

$$Ceq = C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{24}Si + \frac{1}{40}Ni + \frac{1}{5}Cr + \frac{1}{4}Mo + \frac{1}{14}V \ (\%)$$

$$Pcm = C + \frac{1}{30}Si + \frac{1}{20}Mn + \frac{1}{20}Cu + \frac{1}{60}Ni + \frac{1}{20}Cr + \frac{1}{15}Mo + \frac{1}{10}V + 5B \ (\%)$$



(A) Backing plate (B) Shape of specimen

Fig.2 Schematic diagram of the test components

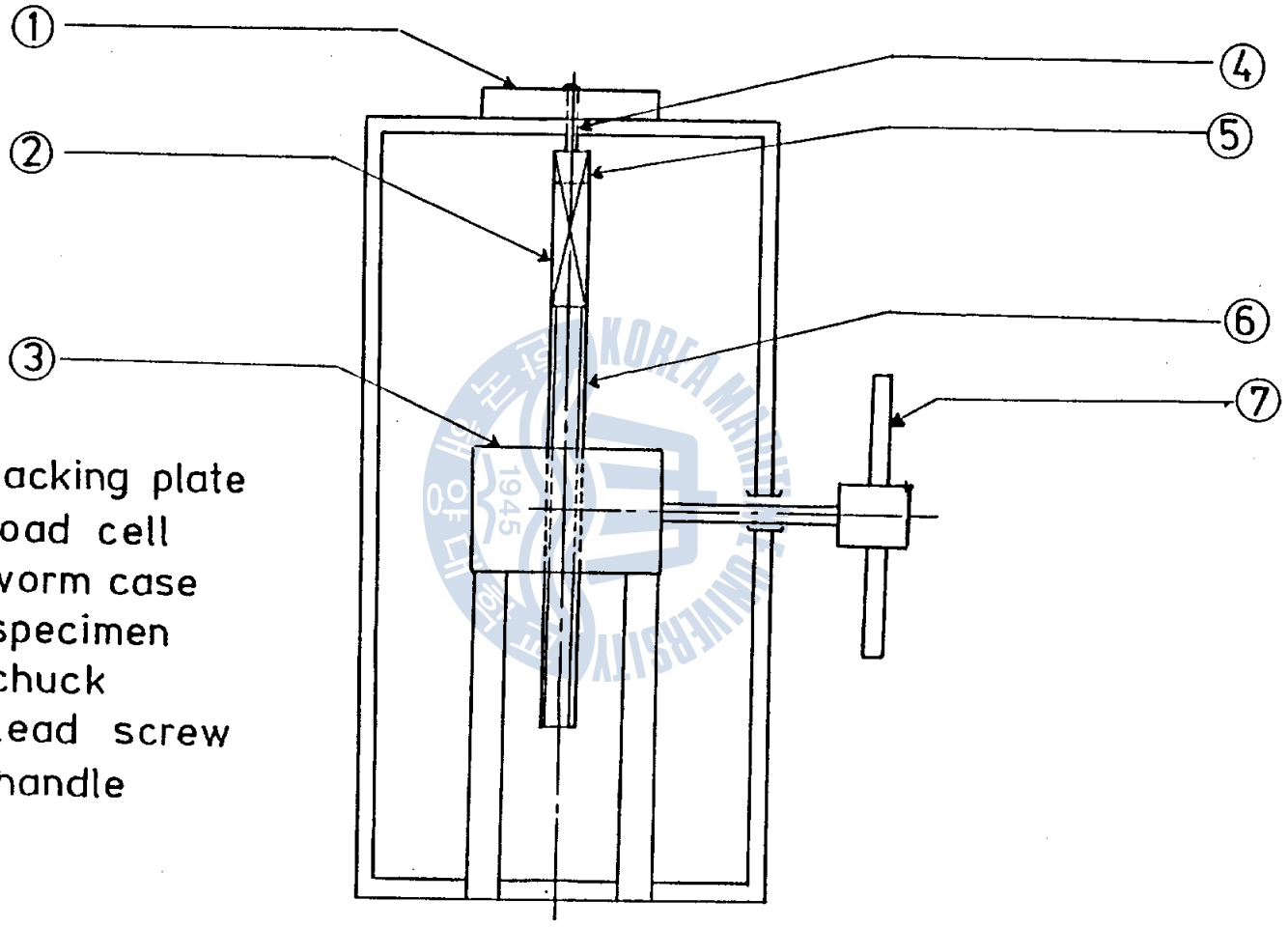


Fig. 4. The schematic diagram of Implant tester.

Collection

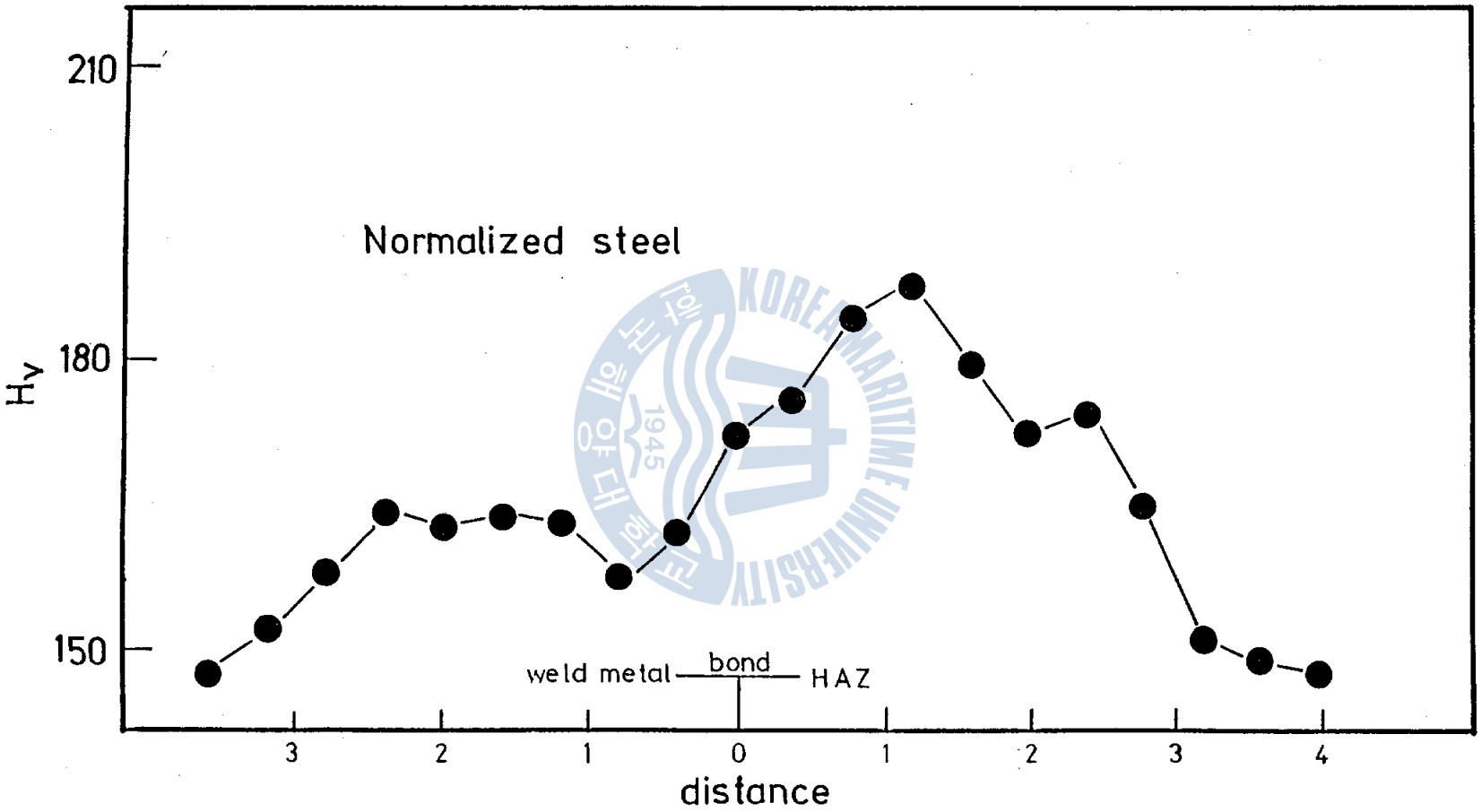


Fig.5. Distributions of the Vickers hardness.

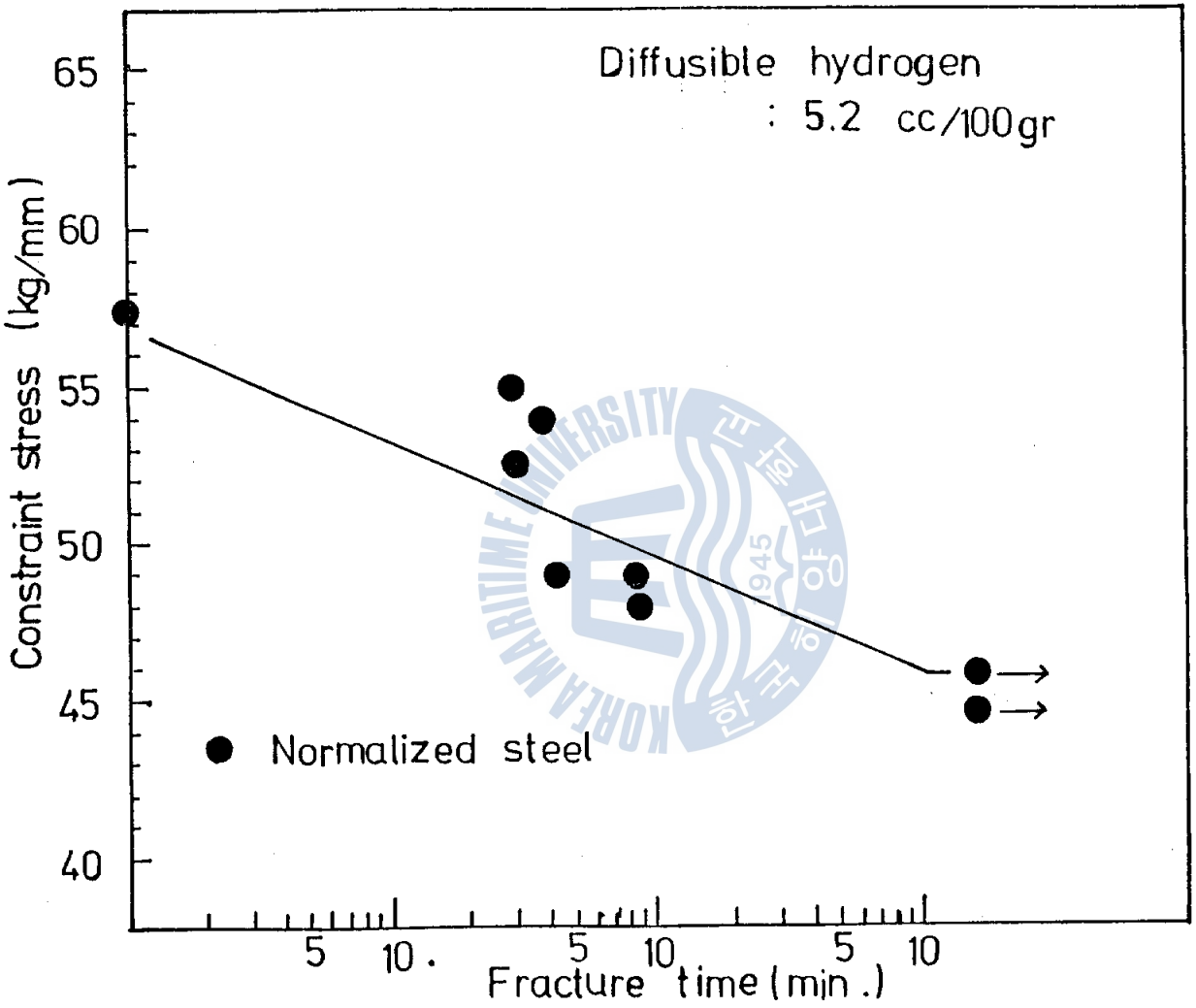


Fig. 6. Implant test result.

Collection

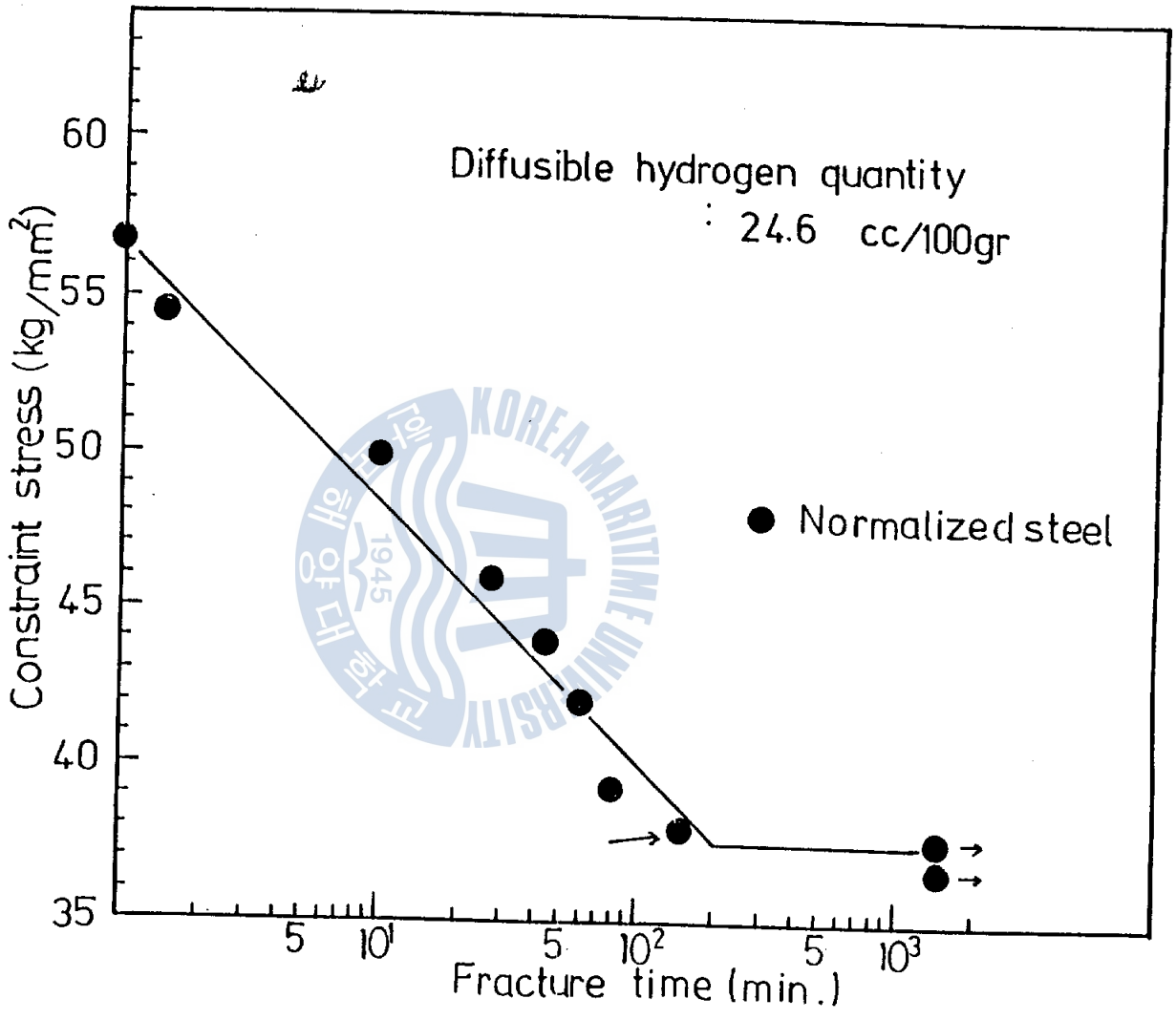
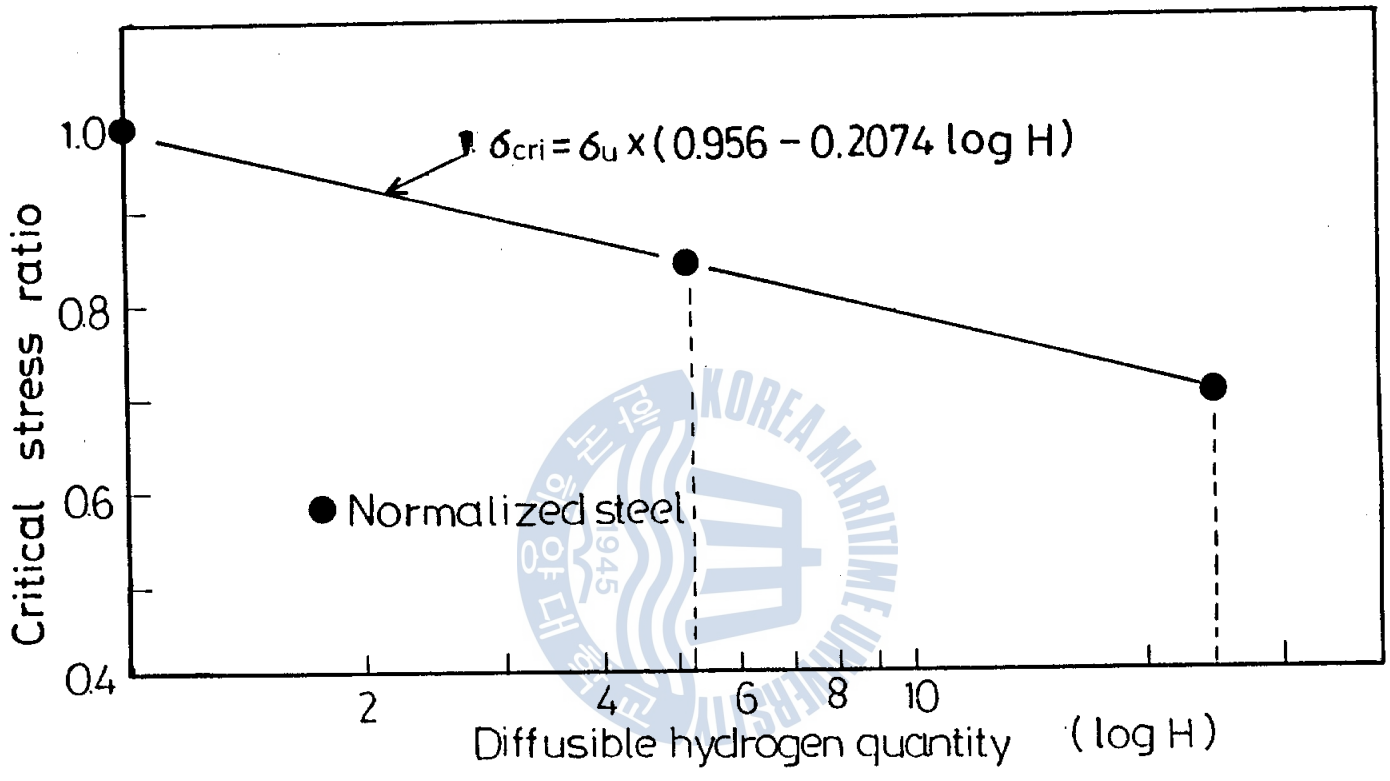


Fig. 7, Implant test result.



$$\text{Critical stress ratio} = \frac{\text{Critical fracture stress}}{\text{Tensile strength of haz}}$$

Fig. 8 A variation of critical failure stress ratio with the change of diffusible hydrogen quantity

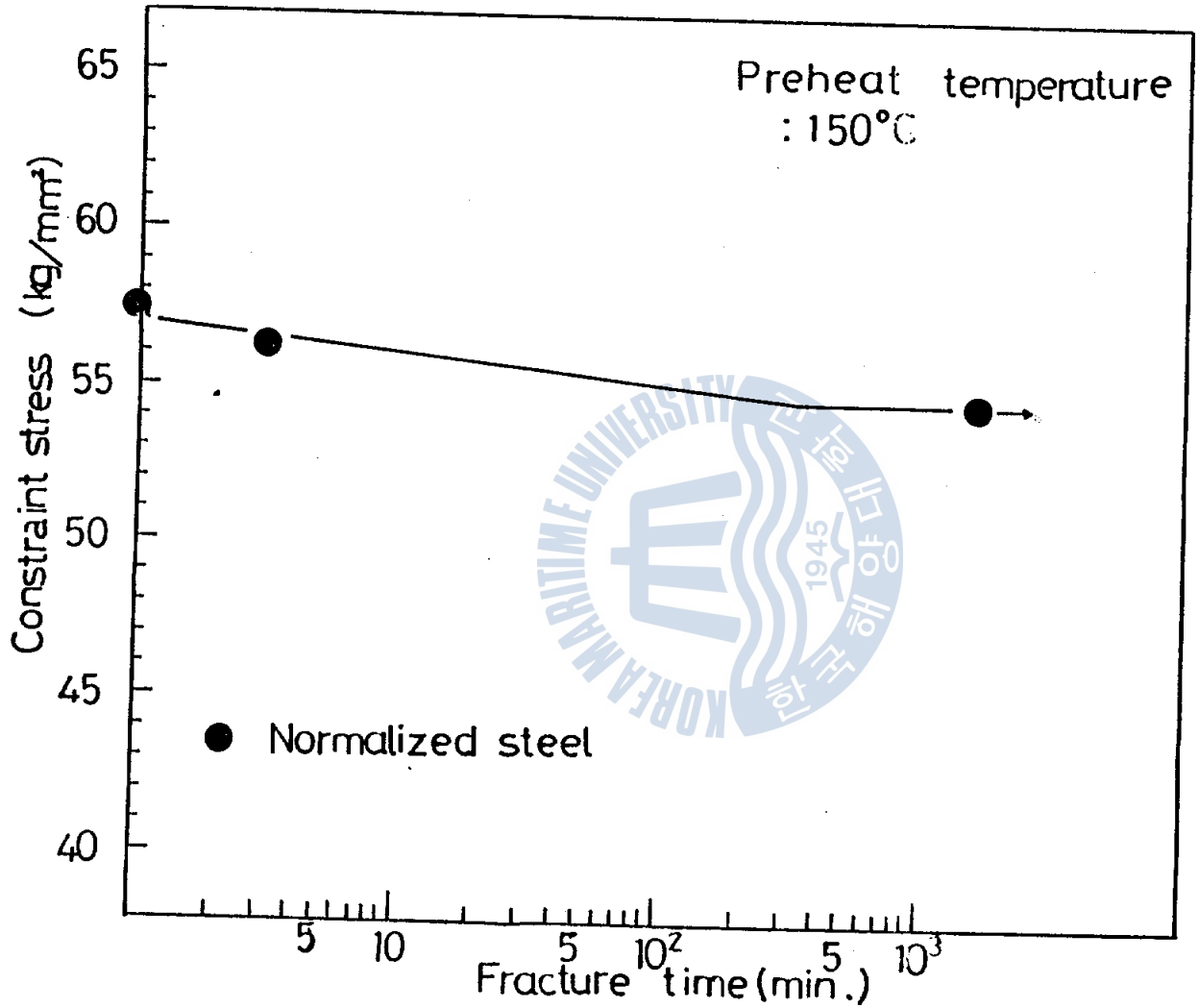


Fig. 9. Implant test result .

Table. 3 예열온도의 변화에 따른 확산성 수소량과 Δt150의 변화

		확산성 수소량	Δt150
예열하지 않음	20℃	응고시수소량의 43%	1분 20초
예열온도	100℃	응고시수소량의 5%	—
	150℃	응고시수소량의 2%	9분 30초
	200℃	응고시수소량의 0%	—

平板의 맞대기 이음 熔接時 가로 收縮의 近似的 計算式에 관한 硏究

指導敎授 王 之 錫

韓國海洋大學 船舶機械工學科 4學年

南 鳳 熙 朴 龍 泰 柳 基 善

dCollection