

Vibratory Cavitation Tester를 이용한 A5083 합금의 침식부식 거동

원 덕 수 · 전 경 수 · 고 영 태 · 이 진 흥
한국가스공사 연구개발원

Cavitation Behavior of A5083 Alloy by Vibratory Cavitation Tester

D. S. Won, K. S. Jeon, Y. T. Kho, and J. H. Lee
Korea Gas Corporation R & D Training Center

The cavitation behavior of A5083 alloy is investigated utilizing a vibratory cavitation tester. The tester(20.3kHz frequency) was manufactured according to ASTM G-32. The cavitation behavior of the specimens was examined by weight loss measurement and surface morphology change with peak-to-peak amplitudes and solutions. In order to investigate the cause of the damaged specimen's surface morphology change, the fluid velocity profile adjacent to vibrating specimen was measured by laser doppler velocimeter(LDV). The amount of weight loss was increased linearly with time after an incubation period. Cavitation test data in 3.5wt% NaCl solution showed that the amount of weight loss at small peak-to-peak amplitude($10\mu\text{m}$) was increased by synergy effect of mechanical vibration and electrochemical corrosion. Such synergy effect, however, became less significant in deionized water and 3.5wt% NaCl solution with bigger amplitude($>20\mu\text{m}$) where the mechanical damage predominates the corrosion damage. As the peak-to-peak amplitude was altered the damaged specimen exhibited significant morphology change. The circular type of damaged surface was shifted to the outer rim of the specimen and the damage intensity was increased with increasing amplitude. This morphology change could be attributed to the turbulence intensity whose maximum is found at the rim of specimen. LDV results have shown that turbulence intensity, which causes cavitative damage, increases with increasing amplitude, resulting in more intense damage. It is also suggested that the mechanism of morphology change could be resolved through farther LDV experiments. However, the obtained data did not showed exact correlation with the damaged surface morphology because the data were not obtained at the exact spots but relatively apart spots. We found some relationships with the damaged surface morphology and the LDV data.

1. 서 론

Cavitation erosion은 선박의 프로펠러, 임펠러 그리고 수력 터빈과 같은 고속의 유체흐름이 있는 곳에서 주로 발생한다.^{1,2)} 이렇게 고속의 유체흐름이 있게되면 cavitation에 의한 손상이 발생함에도 불구하고 유체를 다루는 비용을 최소화하기 위해 고유속에 대한 수요는 계속 증가하고 있다.³⁾

Cavitation은 액체내에서 국부적인 압력 변화에 의한 vapour cavities의 성장과 붕괴로 정의할 수 있다. Cavity들은 액체내에서 압력이 매우 낮은 지역, 예를 들면 프로펠러 날의 앞 모서리 뒷 부분 같은 곳에서 형성된다. 이러한 지점에서 액체는 액체의 응집력보다 큰 인장력을 받게 되고, 따라서 주위 액체의 증기압보다 낮은 음의 압력을 갖는 cavity나 기포들을 형성한다. 이렇게 형성된 기포들은 오래 지속하지 못하고 극히 빠르게(수백만분의 일초내에) 붕괴하여 주위의 액체를 매우 빠르게 가속시킨다. 기포가 존재하던 벽에서 cavity가 파괴되면 인접 재료에 손상을 주는 강한 충격파가 생긴다(cavity의 붕괴압력을 측정된 최근의 연구결과⁴⁾에 의하면 가해지는 압력이 거의 1.5GPa 으로 예상되고 있다). 초당 수백만개의 cavity가 붕괴하므로 손상이 매우 빠르게 발생하고 손상에 의해 거칠어진 표면은 새로운 기포의 형성을 보다 쉽게하여 cavitation에 의한 손상이 가속된다.⁵⁾

당 공사 인수기지에서는 LNG(액화천연가스)의 기화장치로 5기의 고압기화기와 3기의 저압기화기를 사용하고 있다. 이러한 기화기는 초저온(-160℃)상태의 LNG와 해수(5℃ 이상)의 counter flow에 의한 열교환 장치로서 열전달 특성이 우수한 Al합금으로 이루어져 있다. 열교환은 tube 외부를 타고 자유낙하하는 해수에 의해 이루어지는데 튜브의 높이가 6~9m인 관계로 tube 하단부에서는 해수의 흐름이 매우 빨라져 난류에 의해 air bubble이 생성되고 이들이 기화

기 표면에 충돌하여 파괴된다. 이때 방출된 에너지는 기화기 표면의 보호층을 파괴하여 손상이 발생하고 있다(Fig. 1). 해수중에서 우수한 내식성을 갖는 Al합금도 6m/sec 이상의 유속에서는 침식부식에 의한 손상이 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁶⁾

Cavitation 현상은 유체역학, 열역학 그리고 기계적, 화학적 하중하에서의 재료거동 등을 포함한다. 이러한 복합적인 요소들 때문에 수많은 연구에도 불구하고 재료의 내구연한을 정확하게 예측하지 못하고 있다.⁷⁾ 재료의 침식부식 저항성을 측정하는 방법에는 flow channel을 이용한



Fig. 1. Photographs of heat exchanger tubes surface showing the cavitation damage.

방법, rotating disc, rotating cylinder, impingement test 등 여러가지가 있으나,⁸⁾ 어느 방법도 당 공사의 기화기의 침식부식 조건과 잘 부합하지 않으므로, 짧은 실험시간에 cavitation에 의한 손상을 집중적으로 연구할 수 있는 ultrasonic vibratory cavitation tester를 이용하여 기화기용 재료인 A5083 합금의 침식부식 거동을 살펴 보았다. 본 연구에 사용된 vibratory cavitation tester는 ASTM G-32에 의거 제작하였다. 실험은 진폭 및 용액을 변화시키면서 시간에 따른 무게 감량법 및 사진촬영을 통하여 침식부식 거동을 측정하였다. 또한 실험에 의해 파손된 시편 표면 형상에 대한 고찰을 위하여 사진촬영 및 LDV(Laser Doppler Velocimeter)를 이용하여 진동하는 시편 표면 근처의 유속거동을 측정하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 Vibratory Cavitation Tester

cavitation 발생장치로서 고유진동수가 20.3 KHz인 vibratory cavitation tester를 제작 실험하였으며, 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 본 장치의 제작에 사용된 진동부의 소자는

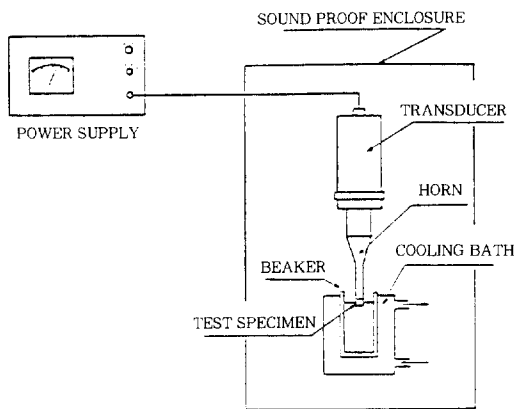


Fig. 2. Schematic representation of the vibratory cavitation test facility.

TDK사의 볼트조임 방식의 Langevien piezoelectric material을 사용하여 제작하였다. 이러한 종류의 진동자는 Q(Quality Factor의 약자로 공진 회로에서 공진의 날카롭기를 나타내는 값)가 높아서 손실이 적고 비교적 고온까지 사용할 수 있으므로 거의 냉각이 필요없으며, 혼 등과의 접합도 볼트로 조일 수 있으므로 사용이 매우 편리한 장점 등이 있다. 또한 본 장치에 사용된 발전방식은 진동 귀환형 방식을 이용하였는데 이 회로는 부하변동이 크고 진동계의 공진주파수가 크게 변화하는 부위에 널리 사용되는 방식이다.

본 장치의 제작에 사용된 진동부 소자(transducer)의 최대 진폭은 $10\ \mu\text{m}$ 이다. 그러나 이 진폭은 본 실험에 필요한 진폭인 $10\ \mu\text{m}\sim 30\ \mu\text{m}$ 보다 작으므로 booster와 horn를 이용하여 증폭하였다. booster와 horn의 재질은 처음에는 모두 duralumin으로 설계하였으나, 실험 도중에 horn의 시편 결합부위에서 파괴가 발생하여 horn의 재질을 강도가 보다 강한 Ti으로 교체하여 사용하였다.

진폭의 pick-up 및 진폭의 안정은 piezo-pick-up sensor를 transducer에 부착하여 진동에 의한 전류를 측정함으로써 해결하였다. 진폭의 측정은 horn에 시편을 결합시킨 후 자유 진동하는 상태에서 dial gauge로 진폭을 측정하였고 이 값으로 electronic digital indicator를 교정하였다. 그 후의 진폭변화는 electronic digital indicator를 이용하여 감시하였다.

2.2 실험재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 상업용 A5083 합금을 사용하였다. 시편은 vibratory horn에 부착 가능하도록 나선가공을 하였으며, 시편 선단의 직경은 15.9mm, 두께는 5.7mm 였다. 실험 시 유의해야할 사항 중 하나는 horn과 시편의 결합을 단단하게하여 힘의 전달을 확실하게 하는 것이다. horn과 시편의 결합이 불확실할 경우에는

laser이었으며, colorburst는 레이저광을 파장별로 나누어주는 장치로서 3가지의 파장을 독립적으로 조절할 수 있으나, 본 실험에서는 514.5nm의 단일파장을 이용하였다. colorlink는 광신호를 전기적 신호로 바꾸어주는 장치이며, signal processor(IFA750)는 신호 증폭, 노이즈 제거, filtering 등을 통하여 정류된 신호를 PC로 전송하는 장치이다. 집광용 광학계는 이중빔 모드를 이용하였으며, 산란광의 검출은 후방산란 검출법을 이용하였다. 산란광의 강도를 증가시키기 위해 산란입자로 3,000 Å 크기의 Al_2O_3 입자를 이용하였다. 유체의 속도와 산란입자(Al_2O_3)의 유속이 같다고 가정하고 실험을 하였으며, 유속의 측정은 진동하는 시편표면에서 1mm 떨어진 지점에 시편의 진동방향과 직각이 되는 방향으로 laser beam을 조사하면서 유속을 측정하였다. 유속이 읽혀지는 부위는 두개의 laser beam이 교차되는 곳이므로 측정부위를 정확히 확인할 수 있으며, 유속의 측정은 좌측 끝에서부터 직경방향으로 1mm 간격으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시간에 따른 시편의 무게 감량

Fig. 4는 진동수 20.3kHz인 vibratory cavitation tester를 이용하여, 온도 20°C에서 peak-to-peak amplitude(진폭) 및 용액을 변화시키면서 시간에 따른 시편의 무게 감량값을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 시간이 지남에 따라 시편의 무게 감량값은 시험시작 10분 이후 직선적으로 증가하고 있고, 진폭이 10 μ m에서 20 μ m로 증가함에 따라 시편에 가해지는 기계적 에너지의 증가로 인해 손상량이 증가하고 있다. 이러한 증가량은 이온교환수에서 실험을 행한 경우 1시간 경과 후 시편의 무게 감소량이 진폭이 10 μ m일 경우 22mg에서 20 μ m일 경우 63mg으로 증가 하였는데, 이는 Tsuda가 제안한 시편의 손상속도는 진폭의 제곱에 비례한다는 이론과

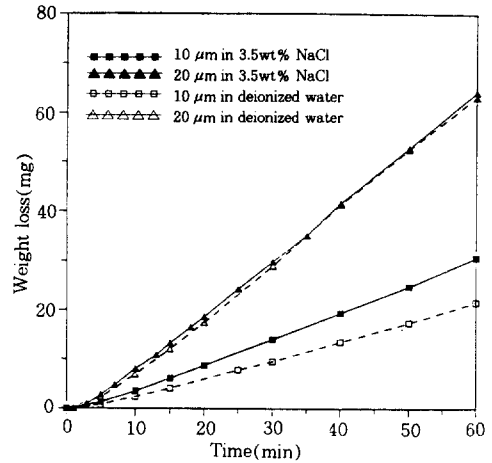


Fig. 4. Weight loss vs. time with peak-to-peak amplitudes.

잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.¹⁰⁾

전기화학적 부식이 시편의 손상에 미치는 영향을 알아보기 위하여 용액을 3.5wt% NaCl 용액으로 실험한 값을 실선으로 나타내었고 이온교환수를 사용한 경우의 실험값을 점선으로 표기 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 진폭이 20 μ m인 경우 시편에 가해지는 기계적인 에너지가 전기화학적 효과보다 훨씬 크므로 시편의 손상량이 63mg, 64mg으로 거의 차이가 없음을 나타내고 있다. 그러나 10 μ m의 진폭일 경우, 이온교환수 중에서 1시간 실험 후 손상량은 22mg이었는데 비해 3.5wt% NaCl 용액 중에서의 손상량은 31mg으로 약 50%의 손상량이 증가하는 경향을 보였다. 이러한 증가량은 순수한 전기화학적 부식에 의한 손상량으로 볼 수 없으므로 기계적인 효과와 전기화학적 효과가 상승작용을 일으켜 재료의 손상을 가속시킨 것으로 생각된다.¹¹⁾

Fig. 5는 시간에 따른 침식부식 속도를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 진폭이 20 μ m인 경우에는 침식부식 속도가 용액의 종류에 관계없이 10분이 경과한 후 거의 일정한 경향을 보이고 있고, 10 μ m인 경우에는 15분이 경과한

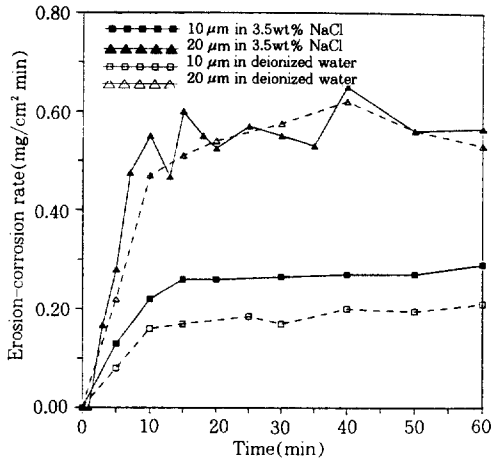


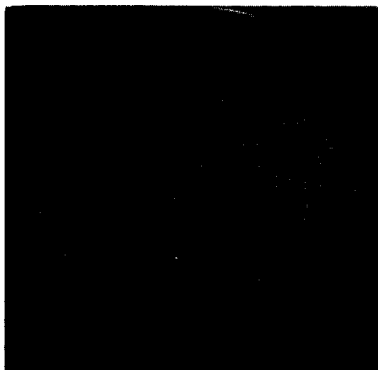
Fig. 5. Erosion-corrosion rate vs. time with peak-to-peak amplitudes.

후 안정된 침식부식 속도를 나타내고 있다. 그

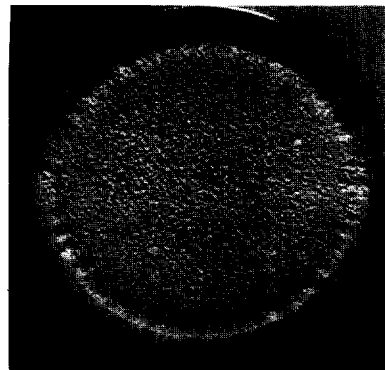
러나 진폭의 크기 및 용액의 종류에 상관없이 초기 5~10분동안 incubation period가 존재함을 알 수 있으나, 정확한 시간은 확인할 수 없었다. 이것은 Leith나 Thirivengadam이 제안한 incubation period 동안 weight loss없이 상당한 소성 변형이 발생한다는 이론으로 설명할 수 있다.¹²⁾ 즉, 실험초기에는 시편 표면에 가해지는 cavitation damage가 바로 무게 감량으로 나타나지 않고, 시편이 소성변형 등의 방법으로 기계적인 에너지를 흡수하기 때문으로 생각된다.

3.2 시간에 따른 시편표면 형상변화

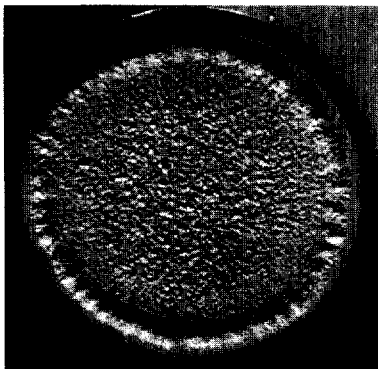
Fig. 6과 Fig. 7은 진폭이 20 μm, 10 μm일 때에 각 시편 표면의 시간에 따른 형상변화를 나타낸 사진이다. 우선 Fig. 6의 진폭이 20 μm인 경우의 사진을 보면, 10분이 경과하면 시편 가



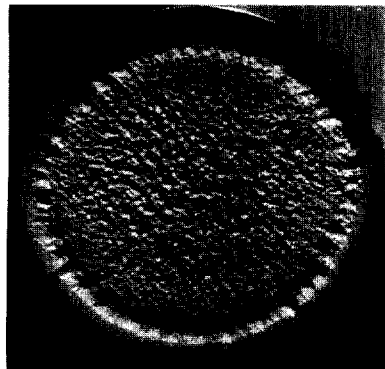
10 min



20 min



30 min



40 min

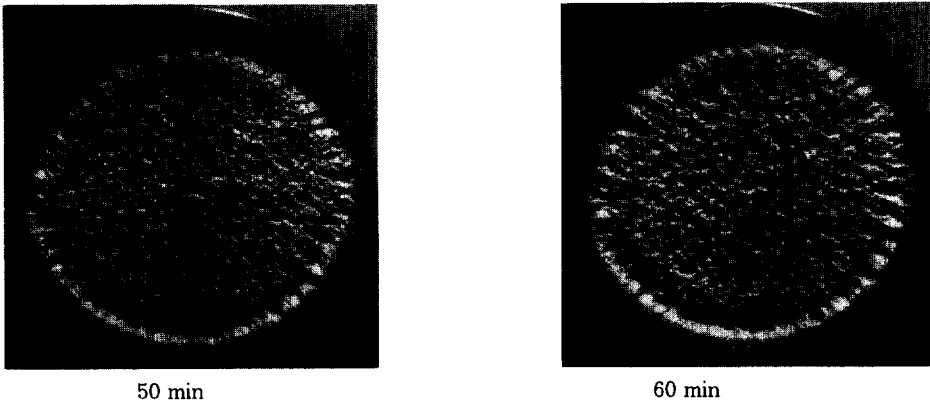


Fig. 6. The photographs of damaged specimens by cavitation. (20.3kHz, 20 μ m, in deionized water)

장자리에 약 0.5mm 가량의 침식 받지 않은 때가 존재하고 이 부분을 제외한 전체 표면이 침식에 의해 백색으로 변하였음을 알 수 있다. 그리고 시편 가장자리에서 부터 약 1mm 되는 곳에 1mm의 폭을 가진 중앙부위보다 침식이 심하게 진행된 방사선 모양의 손상부위가 있음을 알 수 있고, 시간이 경과함에 따라 그 정도는 더욱 심해짐을 알 수 있다. 시간이 약 30분정도 진행되면 시편 중앙부위에 pit가 형성되면서 파손이 진행되기 시작한다. 시간이 지남에 따라 pit의 갯수가 많아지고 깊이도 깊어지는 것을 알 수 있다. 그러나 시간이 더욱 경과하게 되면 pit수가 최대가되고 그 이후에는 pit의 크기는 커지나 pit수는 감소할 것으로 생각된다.

진폭이 10 μ m인 경우는 Fig. 7에 나타내었다. 10분이 경과한 후의 사진 상단부에 검게 나타난 부분은 실험 초기에 그 부분에서의 cavity의 발생이 미약하여 침식이 진행되지 않았기 때문으로 생각된다. 한편, 전혀 침식을 받지 않는 부위는 20 μ m일 경우와 큰 차이가 없지만 가장자리의 방사선 모양의 손상부위가 시편 외곽에서 2.5mm 되는 곳에서 나타나기 시작하나, 그 폭은 20 μ m일 때보다 넓지만, 강도는 약하게 나타나고 있다. 그러나 중앙부는 20 μ m일 때와는 달리 pit형상의 손상이 60분이 경과한 후에 서서히 형성되기 시작한다.

이와같이 진폭의 크기에 따른 손상부의 위치 및 손상량의 차이는 있지만, 시편의 손상은 전체 손상이 일어나지 않는 최외곽부, 손상이 방사선 모양을 띠며 집중적으로 일어나는 외곽부 그리고 pit 형태의 손상이 일어나며 시간이 지날수록 pit의 수와 깊이가 증가하는 중앙부위로 나뉘어 손상이 진행되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 손상부의 형태가 진폭의 변화에 따라 변화하는 이유 및 가장자리에 침식이 집중되는 원인을 알아보기 위하여 LDV 및 사진촬영을 이용하여 시편표면 근처의 유속을 측정해 보았다.

3.3 LDV에 의한 유속 측정 결과

Fig. 8은 진폭이 증가함에 따른 시편 근처의 cavitation flow를 촬영한 사진이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 진폭이 증가함에 따라 중앙부위의 기포군의 폭이 넓어지고, 그 세기도 증가함을 알 수 있다.

이것은 I. Hanson 과 K. A. Morch 연구팀의 진동하고 있는 시편의 고속사진촬영 결과 시편 표면에 반구형의 cavity cluster(기포군)가 형성되고 이들 cavity cluster의 집중적인 파괴에 의해 손상이 진행된다는 결과¹³⁾와 비슷한 양상을 보이고 있다. 이러한 시편 근처의 유속 분포를 보다 정량적으로 알아보기 위하여 LDV를 이용하여 유속을 측정하여 보았다. Fig. 9는 시편 표

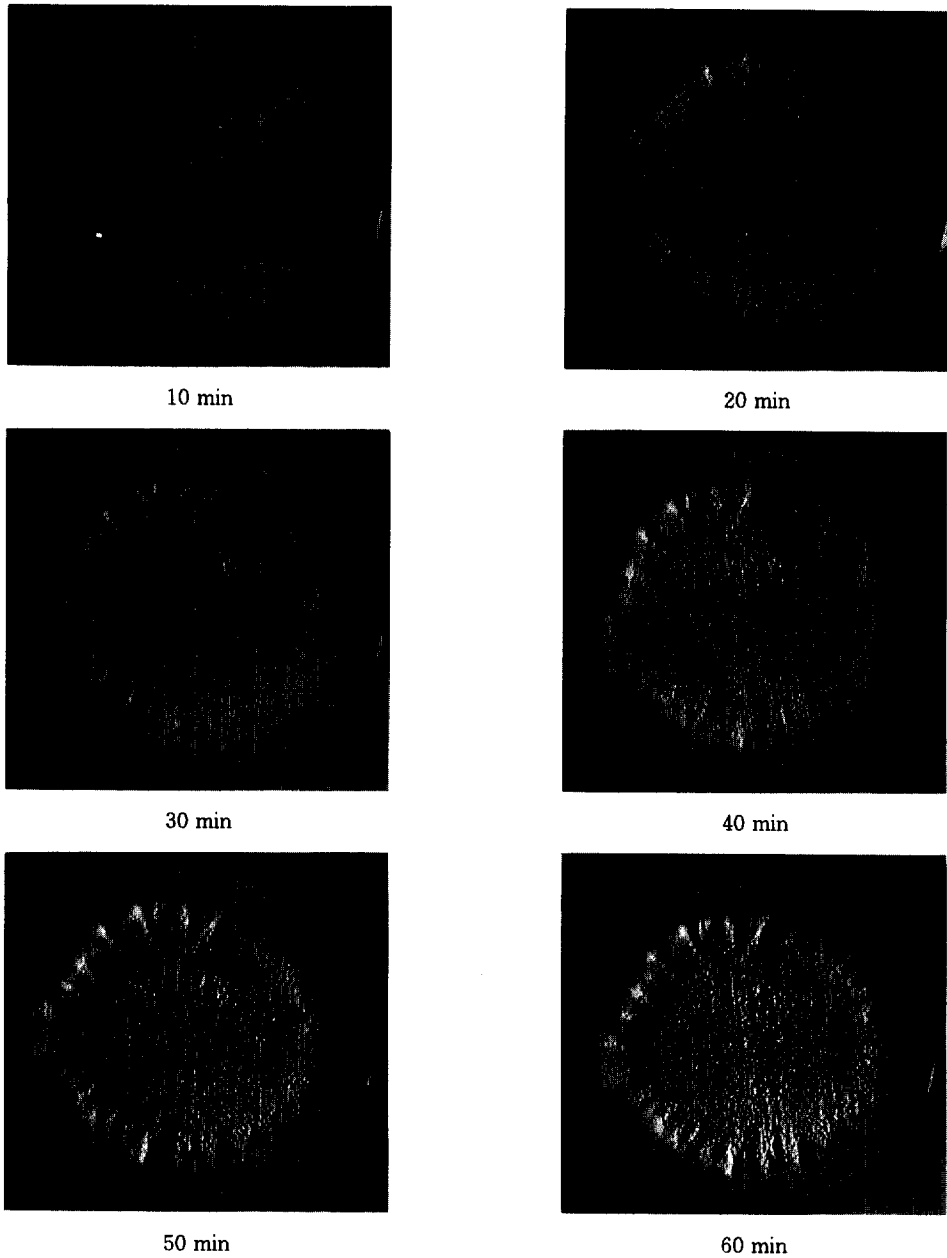


Fig. 7. The photographs of damaged specimens by cavitation. (20.3kHz, $10\mu\text{m}$, in deionized water)

면에서 1mm 떨어진 곳에서의 시편의 직경방향으로 거리에 따른 유속 측정값을 나타내는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시편의 가장자리는 유체의 흐름이 거의 감지되지 않고 있으나 시편 중앙쪽으로 갈수록 유속이 증가하는 경향을 보

이고 있다. 진폭이 $10\mu\text{m}$ 일 경우 중앙부위에서의 최고 유속이 약 55cm/sec의 유속을 나타내고, 진폭이 $20\mu\text{m}$ 로 증가함에 따라 약 80cm/sec로 증가하고 있다. 이 결과는 비록 cavitation에 의한 시편표면에 가해지는 직접적인 기계적 에

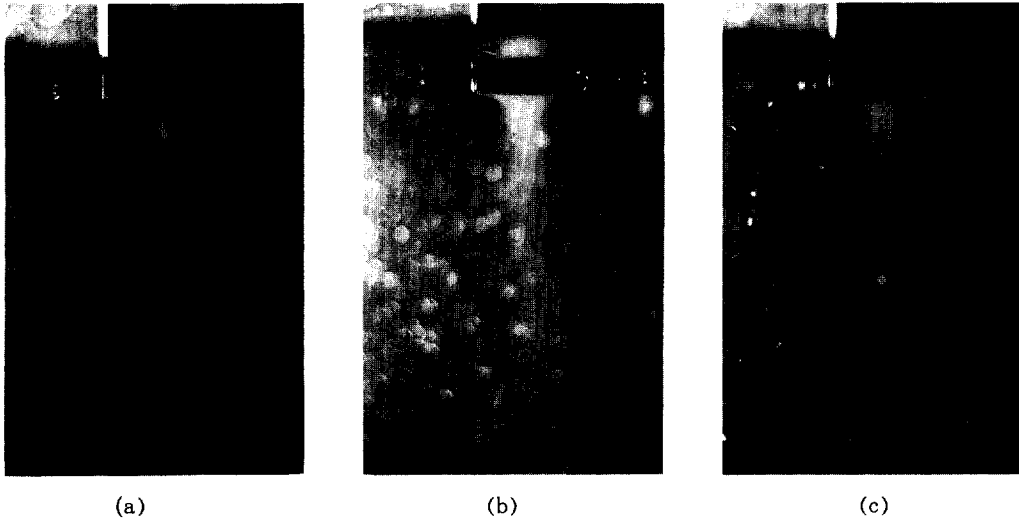


Fig. 8. The photographs of cavitation flow with peak-to-peak amplitudes. (a:10 μm, b:20 μm, c:30 μm)

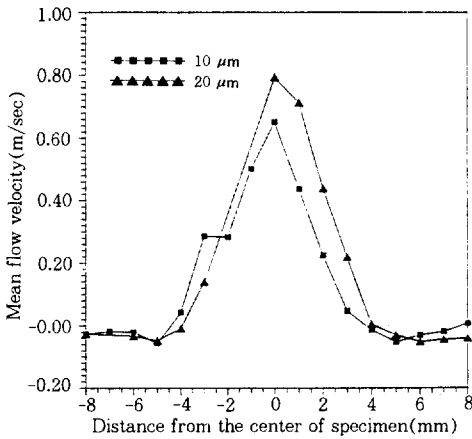


Fig. 9. Mean flow velocity variation at 1mm below vibrating specimen with peak-to-peak amplitude variation.

너지를 나타내고 있지는 않지만 간접적인 data로 활용할 수는 있다. 즉, 시편 중앙부위에서의 재료손상이 이와 같은 빠른 유속과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

그러나 이 data만으로는 시편 외곽에서 1mm 되는 곳에서의 가장자리 집중침식을 설명할 수가 없으므로 유체의 기계적인 에너지값을 나타

내는 난류강도($\nu = \sigma_v \times 100 / \bar{V}$, ν ; turbulence intensity(%), σ_v ; standard deviation, \bar{V} ; 평균유속)를 Fig. 10에 나타냈다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 turbulence intensity가 시편 중앙에서 어느 정도 떨어진 부위에서 크게 증가하는 경향을 보이고 진폭이 증가함에 따라 그 값도 크게

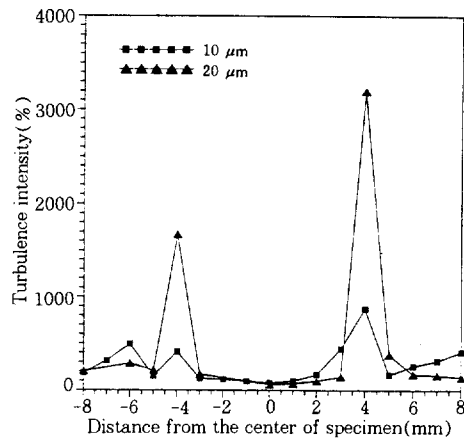


Fig. 10. Turbulence intensity variation at 1mm below vibrating specimen with peak-to-peak amplitude variation.

증가하는 경향을 보이고 있다. 이상의 실험 결과로 볼 때, 시편 가장자리에서의 방사선 모양의 손상부위가 나타나는 것은 시편 가장자리에서의 유속은 비록 작지만 기계적인 에너지를 나타내는 turbulence intensity가 훨씬 크기때문에 침식이 더욱 심하게 일어나는 것으로 생각된다. 그리고 중앙부위에서의 손상은 기포군의 집중적인 파괴에 의한 것으로 생각된다. 그러나 이 결과와 시편 손상부의 위치가 정확하게 일치하고 있지 않은 것은 시편 표면에서의 cavity cluster가 반구형으로 형성되고,¹³⁾ 측정 부위가 시편 표면에서 1mm 떨어진 곳의 간접 data이기 때문으로 생각된다. 그러나 진폭의 증가에 따른 경향이 뚜렷하게 나타나고 있지 않으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

4. 결 론

A5083 합금에 대한 침식부식 거동을 vibratory cavitation tester를 이용하여 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시험시간에 따른 시편의 무게감량은 초기의 incubation period(약 5분)후에 직선적으로 증가였다.
2. 진폭이 10 μ m로 작을 경우, 진동에 의한 기계적 에너지와 부식에 의한 전기화학적 영향의 상승작용으로 이온교환수에서 보다 3.5wt% NaCl 용액에서 무게감량이 증가 하였다. 그러나 진폭이 20 μ m로 클 경우, 용액의 종류에 그다지 영향을 받지않고 비슷한 경향을 보였는데, 이는 전기화학적 영향과의 상호작용보다는 기계적인 영향에 의해 지배되기 때문으로 생각된다.
3. 진폭이 증가함에 따라 시편 가장자리의 방사선 형태의 손상부가 외곽쪽으로 이동하며, 그 폭은 감소하지만 강도는 더욱 증가하는 거동을 보였다.
4. 진동하는 시편 근처의 유속 profile을 LDV를 이용하여 측정한 결과 유속은 시편 중앙부위

에서 가장 빠르고 가장자리로 갈수록 감소하였다. 그러나 turbulence intensity는 중앙부위보다는 가장자리에서 훨씬 큰 값을 나타내었으며 진폭의 증가에 따라 증가하였다. 그러나 시편손상양상과 유속 profile이 정확히 일치하지 않았는데, 이는 유속 측정 부위가 시편 표면에서 1mm 떨어진 곳의 간접 data이기 때문으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. K. R. Trethewey, T. J. Haley, C. C. Clark, Br. Corros. J., **23**, 55 (1988).
2. M. S. Plesset and A. T. Ellis, Trans. ASME, **77**, 1055 (1955).
3. A. Karami and J. L. Martin; Int. Met. Rev., **31**, 1 (1986).
4. E. Heitz "Chemo-Mechanical Effects of Flow on Corrosion" in "Flow-induced Corrosion; Fundamental Studies and Industry Experience", Kevin J. Kennelley, 1-1, NACE (1991).
5. W. J. Tomlinson and D. Chapman, Wear, **130**, 381 (1989).
6. R. W. Elkington, Aluminium Industry, **5**, 19 (1986).
7. H. Durrer, Sulzer Technical Review, **3**, 55 (1986).
8. U. Meyer, C. C. Brosman, K. Bremhorst, A. Atrens, Conf; Step into the 90's, Queensland, Australia 27-31, **3**, 885 (1989).
9. Y. Yeh, H. Cummins, Appl. Phys. Letters, **4**, 176 (1964).
10. Ken Tsuda, Yoshitada Suezawa(Tokyo Inst. of Tech.) Kagaku Kagaku **38**, 873 (1974).
11. V. K. Gouda, A. H. Al-Hashem, A. M. Abdullah, W. T. Riad, Br. Corros. J., **26**, 109 (1991).
12. Yu-Kang Zhou, F. G. Hammit, Conf; Cavi-

tation and Multiphase Flow Forum 1983
Houston Tec, USA, Pub; American Society
of Mechanical Engineers 345 E. 47th st.,

New York, N.Y. 10017, USA, 15 (1983).

13. I. Hansson and K. A. Morch, J. Appl. Phys.
51, 4651 (1980).