

펌프 임펠러의 부식 파손에 대한 연구 Study on the Corrosion Damages of Pump Impeller

김재욱 · 임희창 · 권오봉 · 배대석

J. W. Kim, H. C. Lim, O. B. Kwon and D. S. Bae

(접수일 : 2008년 8월 28일, 수정일 : 2008년 12월 26일, 채택확정 : 2009년 1월 19일)

Key Words : Pump Impeller(펌프 임펠러), Corrosion(부식), Cavitation(공동화), Erosion(침식)

Abstract : The steel impeller placed in a water pump has been studied with the aim to understand corrosion phenomena on the surface responsible for reducing the pumping efficiency of water inside cooling system. This preliminary experiment includes a period (over 5 months) observation with a powered microscope and weight measurements. The experiments are carried out at different conditions of water and mixtures of water and coolants, based on the water contents of 25%, 50%, 75%, and 100% water (pure tap water). From the visual results of microscopy, most of the steel surface is fitted and clear rusty or corrosion phenomena are noticeable as time goes. In addition, the weight loss of the sample specimen submerged in the water is linearly increased, whereas those in the mixtures of water initially be constant and then gain weight linearly.

1. 서 론

우리나라의 핵심기간 산업 중 하나인 자동차산업의 경쟁력은, 급격히 변화하는 세계 글로벌체제의 자동차시장에 발맞추어 핵심부품 및 시스템 기술개발이 절실히 필요하다. 특히, 동일한 가격대비 엔진의 성능을 보다 증가시키기 위한 성능개발에 많은 투자가 되고 있는 현실에서 이에 따른 냉각성능도 보조를 맞추어 개발이 되어야 하겠다. 현장에서 사용되는 냉각장치는 가동중인 엔진의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 실제 자동차 엔진의 실린더내의 연소가스의 온도는 대략 2000°C 가량의 고온고압으로 이때 발생된 열에너지는 피스톤, 배기손실, 마찰손실 그리고 냉각손실의 형태로 각각 변화되어 사용되어진다. 이때 냉각손실은 열의 대부분이 실린더 벽, 실린더 헤드 그리고 피스톤 밸브들을 통해 전달되는데 냉각장치를 통해 나온 부동액이 방출된 열을 식혀주는 아주 중요한 역할을 한다. 따라서, 엔진 내의 냉각장치의 효율적인 열전달을 위해서는 지속적인 펌핑작업에 의해서 냉각수를 지속적

으로 공급시켜야하고, 이에 냉각장치의 부하도 크리라 판단된다. 따라서 이와 같은 냉각장치에 관한 연구는 공학적 응용뿐만 아니라 학문적으로도 중요 가치가 있으며 아직도 수행되어야 할 연구들이 많이 남아 있다.

참고로 임펠러 및 펌프의 형상 변경에 따른 자동차 엔진 냉각시스템의 개선 및 성능개선에 대한 연구는 국내에도 많이 이루어졌다¹⁻³⁾. 하지만 직관적으로 임펠러의 부식과 이로 인한 자동차 성능 감소는 큰 연관이 있을 것이라 판단하고 이에 대한 연구는 국내에서는 물론이고 해외에서도 그러한 접근을 찾아보기가 힘들다. 즉, 냉각에 사용되는 부동액과 펌프 내의 임펠러 형상에 따라서 예측결과가 다를 수 있고, 현장 연구와 관련되어 재료들(부동액과 임펠러)의 성분이 해당 회사의 기밀유지로 인하여 공개가 잘 되지 않기 때문에 이러한 실험은 특정회사에서 수행되는 연구결과에만 의존하게 된다. 따라서, 여기서는 순수연구의 차원에서 냉각장치를 구성하고 있는 워터펌프 내 임펠러의 부식특성을 다루어 보고자 한다.

임펠러의 부식 및 침식에 대한 최근 한 과학신문⁴⁾에서는 "노후된 자동차의 엔진고장 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 냉각계통 고장과 그로 인한 엔진 과열이며 수십~수백만원을 들여 엔진블록과 헤드

임희창(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : hclim@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6141
김재욱 : 부경대학교 대학원
권오봉, 배대석 : 부경대학교 기계공학부

가스킷을 교체해야한다"라고 밝히고 있고, 이는 냉각계통이 얼마나 중요한 지 가늠할 수 있다.

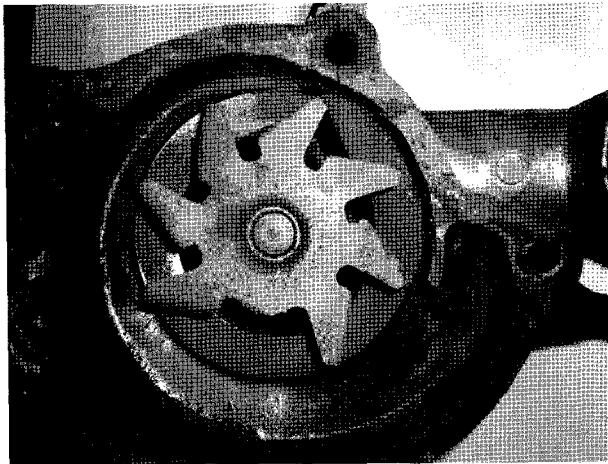


Fig. 1 Damaged impeller blades

본 연구에서 하고자하는 임펠러의 부식 및 침식에 대한 연구는 자동차의 워터펌프에만 적용될 뿐만 아니라, 이 외에도 펌프 및 팬 등의 시스템 내부기관 뿐만 아니라, 외부기관으로 선박의 프로펠러 혹은 풍력발전의 풍날개(wind blade) 등 열유체를 포함한 모든 유동에 의해 변형 및 파괴를 일어나는 분야와 아주 밀접한 관계가 존재한다⁵⁾.

대개 펌프 내의 임펠러에서 관찰되는 손상(Fig. 1 참조)은 침식과 부식이 동시에 일어난다고 알려져 있다. 위 언급한 두 가지 현상을 고려함에 있어서 어느 현상이 크게 영향을 미칠지에 대한 영향 평가는 그리 많이 되어있지 않다. 현장에서 발생하는 이런 침식 문제를 다룬 참고논문⁶⁾은 그 내용자체가 너무 특정분야에 한정되어 있기 때문에, 우선 실제 현장에서 발생한 문제를 활용하여 부식실험을 먼저 수행하고 차후 침식영향을 파악한다.

실제 승용 엔진에 장착되어있는 워터펌프 내의 임펠러에 대한 부식 및 침식의 특성을 파악함으로써, 나아가 실제 산업현장에서 사용되는 중/대형 임펠러에도 그 영향평가를 예측할 수 있다고 판단된다. 본 연구 수행을 위하여, 실제 워터펌프내의 임펠러를 현장조건과 동일한 혹은 다른 여러 다른 조건의 혼합액(여기서는 부동액과 물의 조합)에 일정 기간 방치시킨 후, 그 표면의 상태 변화와 전체적인 무게변화를 파악하여 그 부식 특성에 대한 변화를 실험적으로 연구하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험시편분석

Table 1 SEM/EDX material analysis report of specimen

Element	Weight %	K-ratio	Atomic %
C	8.76	0.0182	30.88
Fe	91.24	0.8905	69.12

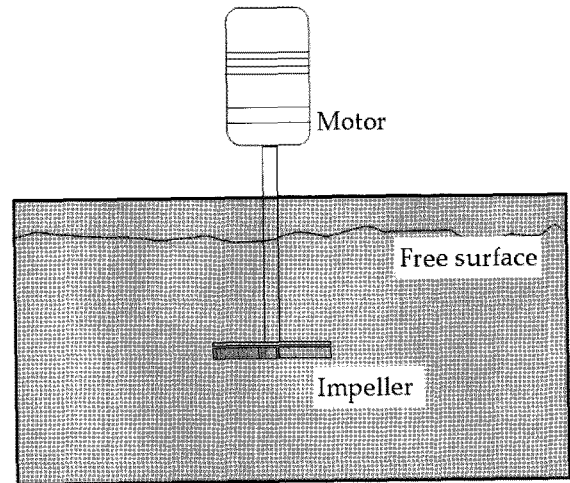


Fig. 2 Schematic diagram and a photo of the impeller chamber

본 연구는 우선 현장에서 구한 임펠러의 시간에 따른 부식의 특성을 파악하기 위하여 실제와 비슷한 조건 및 그 외 극한의 조건 등을 분류하여 실험에 적용하였다. 사용한 시편의 실제 차량 엔진에 장착한 워터펌프 내의 임펠러에서 가져온 재료를 사용하였다. 또한, 실험의 객관화된 관찰을 위해서 시편들은 대부분 유사한 크기로 절단하였고 그 크기는 가로와 세로가 각각 $2.0 \times 2.0 \text{mm}^2$ 이고 두께는 약 1mm가량으로 만들었다.

사용한 시편은 실험의 공정성을 위하여 부경대학교 공동실험실습관에 있는 HITACHI사의 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM/EDS) S-2400를 사용하여 그 성분을 분석하였다. 즉, 고진공 하에서 고전압을 필라멘트에 가하면서 산란된 여러가지 정보를 가진 신호는 시료의 화학조성에 대한 정성 및 정량분석을 가능하게 하였다. 시편의 분석을 위해서 가해진 전압은 20kV였으며 빔전류는 150pA(picoAmps)였다. 분석된 시편 재료의 성분은 Table 1에 첨부하였다.

실험에 사용된 임펠러는 실제 승용차량의 워터펌

프에 부착되어있고, 임펠러 제작에 사용된 부품의 성분은 회사에서 정보공유를 하지 않기 때문에 공정한 실험을 위해 우선 실험시편분석을 수행하였다. Table 1의 실험시편 분석결과를 살펴보면 성분의 대부분(약 91%)이 Fe로 철강을 일반적으로 정의하는 주철(Cast Iron, 대개 탄소함유량이 1.7%이상)이라 불리는 시편이다. 주철은 대부분의 철강재료에 사용되기 때문에 자동차회사에서는 워터펌프의 임펠러에 적용하기에 무난한 재료로 선택되었으리라 판단된다. 또한 Fe에 대해 K-ratio(강도비)와 Atomic % (몰비)는 각각 0.9와 69% 가량으로 추출되었다.

2.2 현미경관찰(Microscopy measurement)

임펠러의 시간에 부식의 특성을 파악하기 위하여 여러 가지 조사방법을 사용한다. 우선 육안을 통한 부식도의 분류와 외관관찰 그리고 시간에 따른 부식의 가시적인 변화를 현미경을 사용한 부식정도의 확인, 또한 부식량의 무게 측정 등을 들 수 있다. 무게 측정에 대한 사항은 다음 절에서 다루기로 하고 본 절에서는 현미경에 대해 이야기하고자 한다. 본 연구에서 사용된 현미경은 고배율 900×에서 저배율 40×에 이르기까지 다양한 배율로 이미지 영상을 얻을 수 있는 삼원과학의 KSM-BA3 현미경을 사용하였고 각 시편의 미세조직을 확인해 보았다. 현미경 측정에서 문제가 되는 것은 고배율을 사용할 경우, 부식이 진행됨에 따른 부동액에 포함되어있는 방청제에 의해서 가시도가 나빠진다는 것이다. 따라서 고배율은 측정이 진행됨에 따라서 사용이 어렵게 되어서, 저배율의 결과들만 주로 제시하고자 한다.

2.3 무게측정(Weight measurement)

일반적인 부식반응의 특성을 확인하기 위하여 실험의 중간중간에 드라이기를 이용하여 습기를 완전히 제거한 후 고정밀 저울로 정밀무게를 측정하였다. 저울의 정확도는 1/10000kg 의 오차로 몇 마이크로 그램까지 측정할 수 있는 고정밀 저울로 본 실험처럼 시간에 따른 무게가 극미량 변할 경우, 아주 적절한 장비라고 판단된다. 본 연구와 같이 중량측정을 이용하여 그 부식량을 측정하는 방식은 이미 산업현장에서 많이 사용되고있는 방식이지만, 그 측정을 위해서 시편을 구하는 것도 쉽지 않을 뿐더러,

이미 부식이 많이 진행된 상태에서는 현장에서의 적용성 또한 의문시되므로 대부분 포기하는 경우가 많다.

2.4 부동액과 물의 혼합

부식 실험을 위해서 부동액은 실차에서 사용되고 있는 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol, ethane-1, 2-diol)을 주성분으로 하는 용액을 사용하였다. 일반적으로 에틸렌글리콜만으로는 부족한 것으로 알려져 있다. 즉, 부식된 냉각장치에서 떨어져 나온 덩이들이 냉각기를 막으면 엔진이 과열될 위험이 있으므로 실제 부동액에는 대개 아질산염과 트리에탄올아민 같은 부식방지제를 넣어준다. 그 외에도 냉각수의 산성이 커지는 것을 막기 위해 여분의 알칼리 성분을, 근래에는 밀봉제도 넣어 냉각기에 생긴 미세 구멍으로 냉각수가 새나오는 것을 막기도 한다. 현재 시중에 시판되고 있는 부동액의 성분에 대해서는 판매 회사에서 대외비를 유지하고 있기 때문에 성분의 대부분을 차지하고 있는 에틸렌글리콜 외의 성분을 확인할 수 없었다. 부동액과의 혼합을 위한 물은 일반 수도물(tap water)을 가지고 실제 현장과 동일한 조건을 맞추고자 하였다.

실험의 객관성을 위해서 부동액과 물을 여러가지 비율로 맞추어서 준비하였다. 비율은 총 4가지 조건들, 즉 - 75:25, 50:50, 25:75 그리고 0:100 (부동액: 물의 %비율)을 사용하였다. 실제 차에서는 부동액 100%의 차량은 거의 없으므로 부동액만으로 100% 사용하지 않았다. 또한, 비슷한 크기의 임펠러의 조각들을 준비해서 각각의 조건에 대해 두 개씩의 시편들을 준비하고, 동일한 혼합액에 투입시켜서 실험의 공정성을 증가시켰다.

3. 결과 및 고찰

3.1 부식관찰

Fig. 3과 Fig. 4는 시간이 지남에 따라 현미경으로 100배 확대해서 측정한 임펠러 시편의 표면상태를 보여주고 있다. 지면의 여건상 사용된 시편들의 자료들 중 부동액과 물의 비율이 50:50%와 물만 100%의 자료를 상대적으로 비교해보았다. 이는 일반 승용차량에 사용되는 평균적인 혼합비율은 50:50%비율을 사용하고 있고, 물만 사용하는 경우에 그 시편표면에서의 변화를 한 눈에 봄으로써, 즉

각적 시각적인 차이를 볼 수 있다.

Fig. 3에서 일반 수돗물의 경우, 부동액을 섞은 경우에 비해 부식의 정도는 심해지리라는 단순한 예측은 하였다. 실제, 결과에서도 알 수 있듯이 우선 표면의 밝기 자체가 점점 밝아지고 있고, 미세한 입자들의 밝기 정도가 시간이 지남에 따라 눈에 띄게 바뀌는 것을 확인할 수 있다. 이는 부식이 급속도로 진행되는 일반적인 경향을 보여주는 사진이라 할 수 있다.

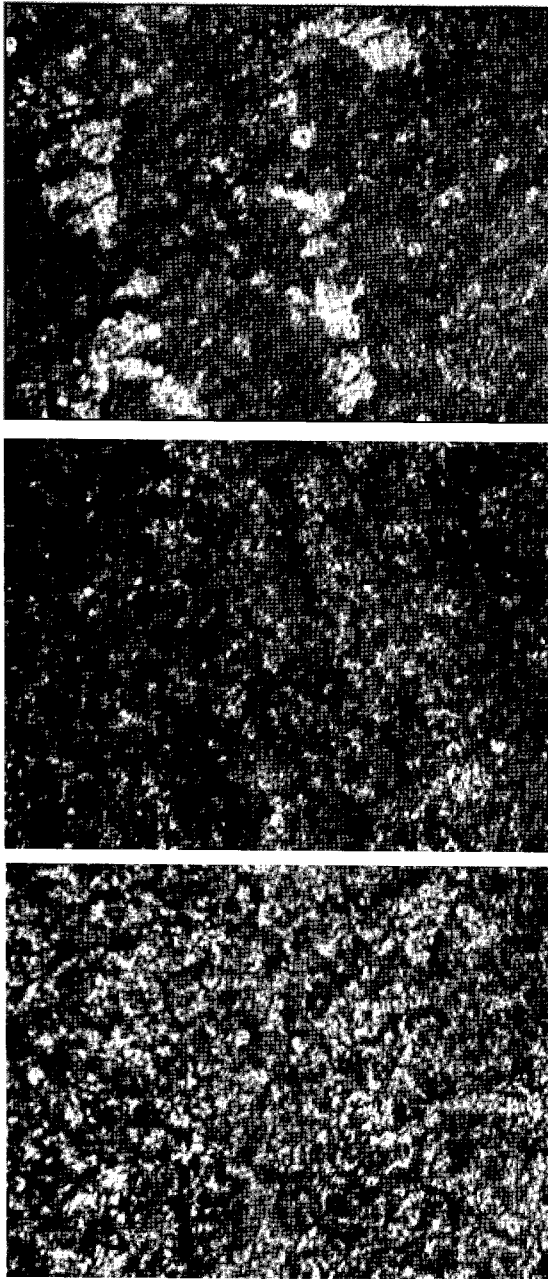


Fig. 3 Temporal variation of the corrosive surface (100× magnified) of specimen in tap water after (a) 0 days(upper), (b) 10 days (middle), (c) 25 days(lower picture)

이에 반해서, Fig. 4의 부동액과 물의 비율이 50:50%으로 혼합된 용액의 경우, 초기의 표면에 비해 그 미세한 표면입자들이 생겨나고는 있지만, 그 변화가 물만 사용한 표면에 비해 현저히 부식의 정도가 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다.

미세한 표면입자들이 생겨나는 현상은 이미 여러 참고문헌⁷⁾에 잘 알려진 현상으로 본 실험과 같이 두 개의 주성분(Fe와 C)로 이루어진 시편은 서로 다른 상변화를 가지게 되는 것이 주요인이라는 것

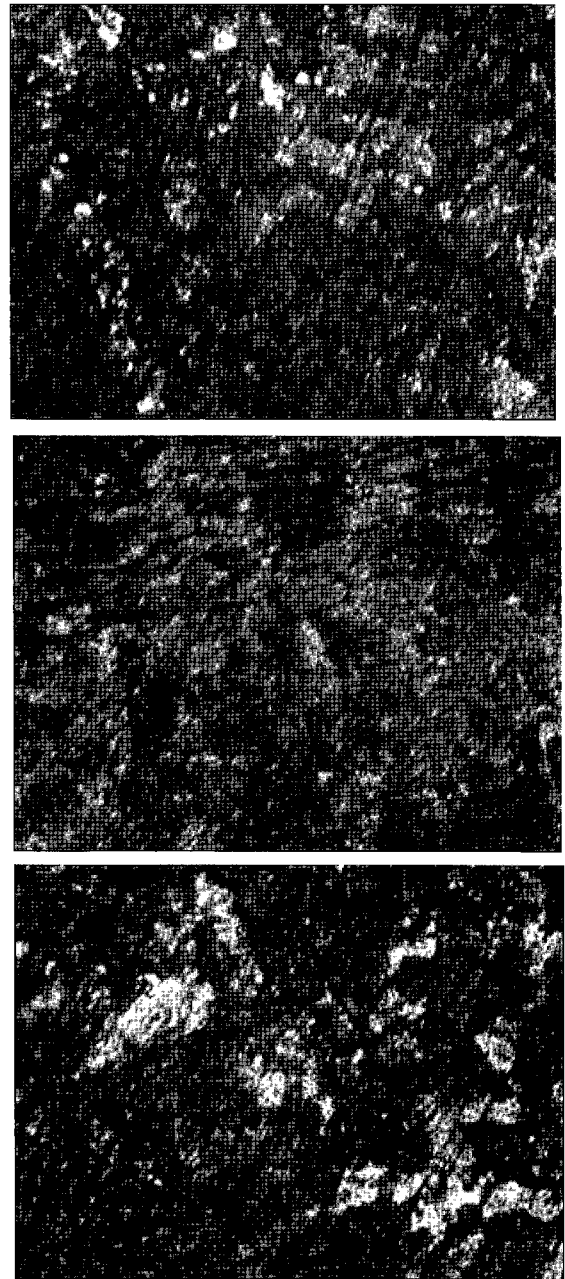


Fig. 4 Temporal variation of the corrosive surface (100× magnified) of specimen in 50:50 coolant tap-water mixtures after (a) 0 days(upper), (b) 10 days(middle), (c) 25days(lower picture)

으로 밝히고 있다. 즉, 앞 절에서 구한 두 개의 주성분은 서로 다른 부식에 의한 산화도를 가지게 되는데, 부식이 점점 진행되면서 이 두 주성분이 서로 반응을 일으킴으로써, 이 중 산화도가 높은 성분이 상대적으로 낮은 쪽으로 침투(infiltration)하여 사진과 같은 미세조직을 만들어내게 되는 것으로 판단된다.

3.2 무게감량측정

본 연구에서 제시된 부식과 관련해서 앞서 언급했듯이, 감량자체의 변화를 확인하는 것은 부식의 진전도를 측정하는 기본적인 척도가 된다. Fig. 5는 서로 다른 네 가지 조건(부동액과 물 혼합액 25:75%, 50:50% 그리고 75:25% 그리고 물 100%)에 시편들이 놓였을 경우, 그 무게의 감량에 대한 변화 정도를 시간에 따라서 측정한 결과이다.

여기에서 사용된 무게감량계수(R_w)는 초기무게에 대한 시간에 따른 무게변화를 총 면적으로 나누어 구하였다. 무차원시 질량으로 무차원할 수 있었으나, 부식은 주로 표면에서 발생하기 때문에 사용되어진 면적을 이용하여 분모로 나누었다.

Fig. 5의 비교에서 바로 알 수 있듯이, 수돗물 100%의 경우, 시간에 따라서 무게감량이 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 수돗물만 이용할 경우 그 부식 정도가 선형적으로 증가하는 결과를 낳는다는 사실을 확인시켜준다. 이에 반해서, 부동액을 25~75%를 포함한 혼합액내에서는 시간이 지남에 따라서 부식에 의한 무게감량정도가 미미한 것으로 확인되었다.

그림에서 사용된 실선은 측정된 결과에 회귀함수를 구한 것이다. 이 무게감량계수는 시간이 지남에 따라 그 회귀함수가 다음과 같은 시간(일)함수에 다음과 같이 선형적으로 표현된다.

$$R_w = C \times days \quad (1)$$

여기서, C는 본 실험에서 부식의 물질에 따른 상수로 임펠러 실험에서 구해진 상수는 0.2로 도출되었다. 그림에서 약 두 달 반(약 70일) 가량이 지났을 무렵 시편 A와 B가 약간의 편차를 가지고 있지만 대체적으로 비슷한 경향을 가지고 있다.

3.3 실제 임펠러의 동적특성에 따른 부식특성

Fig. 6은 실제 임펠러를 아크릴로 특수 제작한 챔버에 넣고, 매일 4~6시간 가량 모터를 회전속도(rpm)을 바꾸어가면서 시간이 지남에 따른 무게감량특성을 파악하였다. 사용된 용액은 부동액과 물의 비율을 50:50%로 동일한 비율로 섞어서 그 침부식의 특성 변화량을 파악하였다. 본 연구와 관련해서 발표된 연구결과⁸⁾에 따르면, 최초 한 달 동안은 포물선($R_w = D \times days^n$)의 급격한 무게감량의 곡선 형상을 보여주었다. 하지만, 차후에 또 다른 실험을 수행하여 약 석달 반 가량의 보완 실험결과인 Fig. 6을 도출할 수 있었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 무게감량이 최초 약 두달 반 가량(약 75일가량)은 침부식이 거의 없는 일정한 값을 보이다가 사용되는 물의 산화에 의한 영향으로 앞서 물에 의한 부식의 변화를 관찰했던 경우와 유사하게 시간에 따라 선형 기울기로 증가하는 경향을 보여주었다. 참고로 그림에서 사용된 실선은 측정된 결과에 회귀함수를 구한 것이다. 이 회귀함수도 물에 넣어 두었던 시편의 부식과 마찬가지로 다음과 같이 표현되었다.

$$R_w = D \times days \quad (2)$$

여기서, D는 임펠러 부식의 물질에 따른 상수로 본 실험을 통해 구해진 상수는 0.2로 도출되었다.

이와 같은 부식결과에 따라 우선 생각해 볼 수 있는 이유는 임펠러가 회전함에 따라 앞서 정적상태에서 발생되지 않았던 냉각수의 수질적 변화와 임펠러의 표면에서의 부식현상이 임펠러가 회전함에 따라서 표면에 침식현상을 더욱 가속화시키기 시작하고, 제시된 임펠러의 동특성은 표면에서의 산화를 촉진시켜 그 부식을 가속화시킨다고 판단된다. 하지만, 이 결론 중 냉각수의 수질적 변화가 이러한 침식현상에 영향을 미쳤다는 결론을 내리기에는 현재로서는 이르다고 판단된다.

한편 공동화의 영향과 관련해서 실험에서 수행된 펌프의 회전속도 2,500~3,800rpm에 해당하는 임펠러 팁에서의 접선속도는 최소 13m/s에서 최대 20m/s까지 이르게 된다. 이를 이용하여 베르누이방정식의 높이 수두를 제외한 압력과 수력학 수두만으로 구성된 식($p/\rho + v^2/2 = c$, 여기서 c 는 상수)으로 임펠러 끝단 표면에서의 압력에 대한 개략적인 범위는 16,900~98,300Pa로 산정된다. 20°C에서 물의 증기압은 2,337Pa로서 현재의 속도범위로는 이

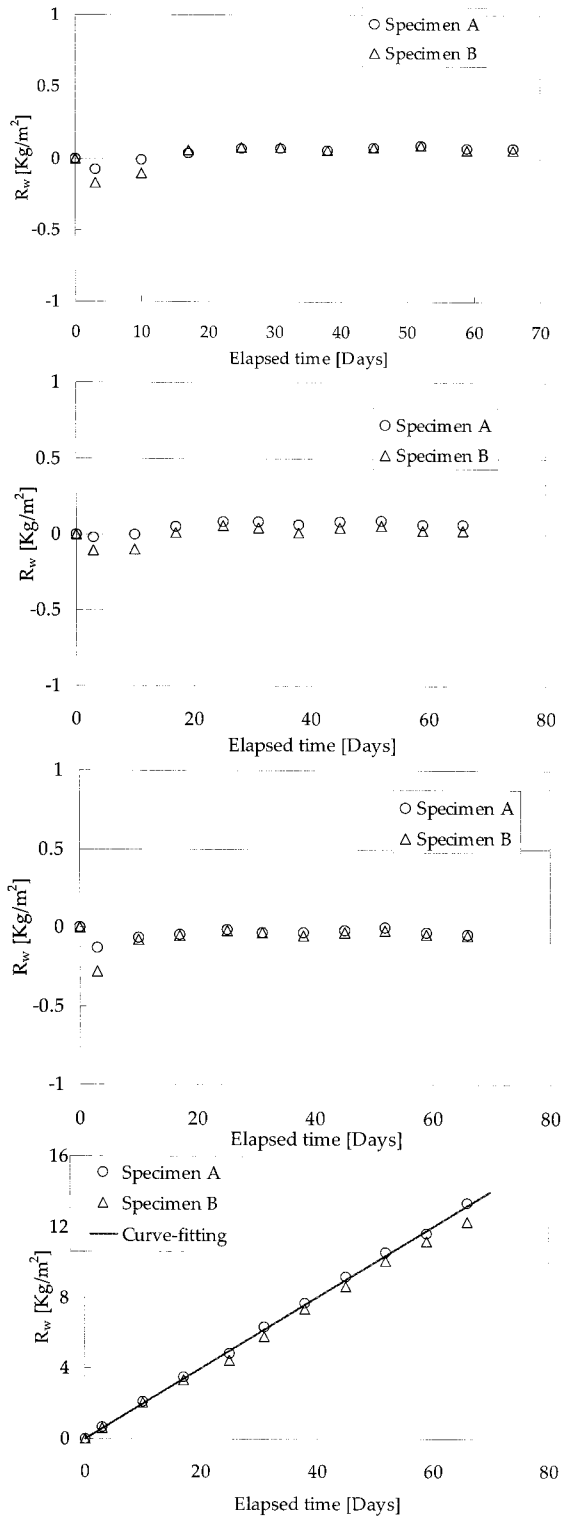


Fig. 5 Variation of weight reduction per unit area (a) 25:75%, (b) 50:50 % mixture, (c) 75:25% coolant-water mixture, (d) 100% water

러한 공동화현상을 일으킬 수 있는 압력범위가 되지 못한다. 그러나, 실제 자동차에서의 임펠러가 펌프 내에 위치해 있으므로 이 때 압축 또는 팽창되는 압력은 상황에 따라 크게 달라질 것으로 판단된다.

이에 대해서는 차후 냉각수의 농도실험 및 수중청음기를 이용하여 실차에 설치된 펌프의 임펠러를 이용하여 부가적인 추가 연구가 필요하다고 생각되고, 차후 보완 연구를 수행할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 승용엔진에 장착되어있는 워터펌프의 임펠러에 대한 부식 및 침식의 특성을 실제 현미경 및 무게 측정을 통해 파악하였다. 실제 워터펌프에 장착된 임펠러를 현장조건과 동일한 혹은 다른 여러 가지 조건의 혼합액(여기서는 부동액과 물의 조합)에 일정기간 방치시킨 후, 그 표면의 상태 변화와 전체적인 무게변화를 관찰하였다. 일반 수돗물의 경우, 부동액을 섞은 경우에 비해 부식의 정도가 심하게 나타났고, 표면에 미세조직이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 부식은 시간에 따라서 선형적으로 급속히 진행되었고, 그 선형상수는 0.2로 도출되었다. 실제 임펠러를 실제 차량에 적용되는 부동액과 물의 50:50%의 혼합액에서 회전시켜 그 동적거동에 의한 침부식 상태를 측정하고 정적인 상태의 부식현상과 유사하게 선형적으로 무게감량이 발생하였다. 이것은 임펠러가 회전함에 따른 표면에서 침식에 의한 산화를 촉진시켜 수돗물 내에 놓인 시편의 정적상태의 부식과 유사한 현상이 일어났다. 이는 임펠러가 회전하는 동적상태에서는 침식현상이 발생하고, 시편 표면에서의 산화가 촉진되어 그 부식을 가속화시킨다고 판단된다. 하지만 아직 침식현상에 대한 관찰을 위해서는 차후 냉각수의 농도실험 및 수중청음기를 이용하여 임펠러침식에 영향을 줄 수 있는 실차에서의 공동화(cavitation)실험이 보조적으로 필요한 것으로 사료된다.

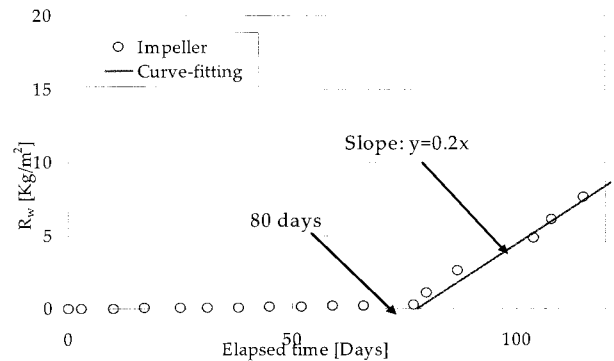


Fig. 6 Variation of weight reduction per unit area of an impeller in the mixture of 50:50 coolant-water

후 기

본 연구와 관련해서 현미경 및 무게감량측정 실험에 많은 조언을 주신 실험실의 임우조교수님과 측정을 도와주셨던 윤병두 박사, 그리고 실제 임펠러 실험이 진행되는 동안 많은 도움을 주신 (주)성안자동차의 임직원들에게 감사를 표한다. 이 논문은 2008년도 정부재원(교육인적 자원부 학술 연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음. (KRF- 2008-331-D00082)

참고 문헌

1. 전문수, 황용하, 2004, "엔진 냉각 시스템 개선에 관한 실험적 연구", 한국액체미립화학회지, 제9권, 제4호, pp. 77~82.
2. 허형석, 이기수, 배석정, 2006, "자동차 밀폐형 워터펌프의 토출구 형상이 수력성능에 미치는 영향", 한국자동차공학회논문집, 제14권, 제1호, pp. 39~47.
3. 허형석 외 4인, 2004, "자동차용 양토출 단흡입 워터펌프의 성능예측에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 27~36.
4. 문정선, "자동차 냉각계통 균열잡는다", 2007, <http://www.hellodd.com>.
5. Trethewey K. R. and Chamberlain J., 1988, "Corrosion: For Students of Science and Engineering," Longman Scientific & Technical.
6. Ariely S. and Khentov A., 2005, "Erosion corrosion of pump impeller of cyclic cooling water system", Engineering Failure Analysis, Vol. 13, pp. 925~932.
7. Davis J. R., 2000, "Corrosion: Understanding the Basics", The Materials Information Society.
8. 김재욱, 임희창, 임우조, 2007, "워터펌프 내에 있는 임펠러의 침식·부식에 관한 연구," 2007년도 대한기계학회 춘계학술대회 요약집, p. 186.