

워터펌프 내에 있는 임펠러의 침식·부식에 관한 연구

김재욱, 임희창[†], 임우조

Study on the erosion-corrosion damages of pump impeller

Jae-Wook Kim, Hee-Chang Lim and Uh-Joh Lim

Key Words : Corrosion(부식); Impeller(임펠러); Water pump(워터펌프)

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 (around 1 month) 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 gain weight and become almost constant.

기호설명

- t : 시간(sec)
 R_w : 무게 감량 계수(kg/m²)
 C : 부식의 물질에 따른 회귀상수
 D : 침부식의 물질에 따른 회귀상수
 n : 침부식의 물질에 따른 회귀지수

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 다른 냉각 성능도 보조를 맞추어 개발이 되어야 하겠다. 이러한 냉각장치 (cooling system)는 가동중인 엔진의

온도를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 실제 자동차 엔진의 실린더내의 연소가스의 온도는 대략 2000-3000 도 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 이러한 열을 식혀주는 아주 중요한 역할을 한다. 따라서, 이러한 냉각 장치의 효율적인 열전달을 위해서는 지속적인 펌핑작업에 의해서 냉각수를 지속적으로 공급시켜야 하고, 이에 냉각장치의 부하도 크리라 판단된다. 따라서 이와 같은 냉각장치에 관한 연구는 공학적 응용뿐만 아니라 학문적으로도 중요한 가치가 있으며 아직도 수행되어야 할 연구들이 많이 남아 있다. 본 연구에서도 이러한 문제들 중 냉각장치를 구성하고 있는 워터펌프(water pump)내 임펠러(impeller)의 부식에 대한 문제를 다루어 보고자 한다.

임펠러의 부식에 대한 최근 한 과학신문에서는 “노후된 자동차의 엔진고장 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 냉각계통 고장과 그로 인한 엔진과열

[†] 회원, 부경대학교

E-mail : hclim@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1540 FAX : (051)620-1405

* 부경대학교

** 부경대학교



Fig. 1 Damaged impeller blades

이며 수십~수백만원을 들여 엔진블록과 헤드가스킷을 교체해야한다”라고 밝히고 있고, 이는 냉각계통이 얼마나 중요한 지 가늠할 수 있다.

이러한 임펠러의 부식에 대한 연구는 자동차의 워터펌프에만 국한된 이야기가 아니다. 시스템의 내부기관으로 펌프 및 팬을 외부기관으로 선박의 프로펠러 혹은 풍력발전의 풍날개(wind blade) 등 열유체를 포함한 모든 유동에 변형을 일으키는 분야와 아주 밀접한 관련이 존재한다.

대개 펌프내의 임펠러에서 관찰되는 손상(Fig.1 참조)은 침식(erosion)과 부식(corrosion)이 동시에 일어난다고 알려져 있다. 이러한 두 가지 현상을 고려함에 있어서 어느 현상이 크게 영향을 미칠지에 대한 영향 평가는 과거에 그리 많이 되어있지 않다. 최근 현장에서 발생한 이러한 침식 문제를 다른 참고논문⁽¹⁾은 그 내용 자체가 너무 특정 부분에 한정되어 있기 때문에, 이 문제를 두고 본 연구에서는 우선 실제 현장에서 문제가 발생했던 임펠러를 사용하여 부식이라는 차원으로 먼저 접근하고 차후 침식을 고려해서 산업현장에서 직접 부딪히는 연구내용들을 해결하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 실제 승용 엔진에 장착되어있는 워터펌프의 임펠러에 대한 부식 및 침식의 특성을 실제 현미경 및 무게 측정을 통해 파악하여 문제해결을 모색하고, 나아가 실제 산업 현장에서 사용되는 대형 임펠러에도 그 영향평가를 예측하고자 하였다. 즉, 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 파악하여 그 부식 특성에 대한 변화를 실험적으로 연구하고자 하였다.

또한, 이러한 부식을 일으키는 주 인자들이 무엇인지에 대해 파악하고자 하였다. 본 연구에서는 이러한 특성을 파악하기 위하여 현장에서 사용되는 임펠러를 가공하여 넓이가 각각 차이는 있지만 대략 $2.0 \times 2.0 \text{mm}^2$ 그리고 두께가 약 2mm 인 시편(specimen)들을 준비하였고, 실제 자동차에서 널리 사용되고 있는 부동액을 물과 적절한 양으로 배합하여 가시화 및 무게측정 실험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시편분석

본 연구는 우선 이러한 임펠러의 시간에 따른 부식의 특성을 파악하기 위하여 실제와 비슷한 조건 및 그 외 극한의 조건 등을 분류하여 실험에 적용하였다. 사용한 시편(specimen)의 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 2mm 가량으로 만들었다.

사용한 시편은 실험의 공정성을 위하여 부경대학교 공동실험실습관에 있는 HITACHI 사의 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM/EDS) S-2400 를 사용하여 그 성분을 분석하였다. 측정원리는 고 진공 하에서 고전압을 필라멘트에 가하면 열 전자빔이 방출되고 이 열전자빔이 도전성을 가진 시료 표면에 입사된 후 전자빔이 그 에너지의 대부분을 열발생으로 잃게되지만 나머지 10%정도가 시편의 구성원자를 여기시켜서 산란되어 나오게 된다. 이때 여러가지 정보를 가진 신호를 방출하는데, 이 신호 중 나온 X 선의 에너지 값을 분류하여 시료의 화학조성에 대한 정성 및 정량분석을 가능하게 한다. 시편의 분석을 위해서 가해진 전압은 20kV 였으며 빔전류는 150 피코암페어(picoAmps)였다. 분석된 시편 재료의 성분은 Table. 1 에 첨부하였다.

Table.1 에서 살펴보면 성분의 대부분(약 91%)이 Fe 로 철강을 일반적으로 정의하는 주철(Cast Iron, 대개 탄소함유량이 1.7%이상)이라 불리는 시편이다. 주철은 대부분의 철강재료에 사용되기 때문에 워터펌프의 임펠러에 적용하기에 무난한 재료로 선택되었으리라 판단된다. 또한 그 외 K-ratio(강도비)와 Atomic % (몰비)를 같이 성분 분석하였지만, 여기서 크게 고려하지 않았다.

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

2.2 현미경 측정(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 부식 정도의 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 마이크로구조(microstructure)를 확인해 보았다. 이러한 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 무게 측정(Weight measurement)

일반적인 부식반응의 특성을 확인하기 위하여 실험의 중간중간에 드라이기를 이용하여 습기를 완전히 제거한 후 고정밀 저울(high precision scale)로 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. 이러한 중량측정을 이용하여 그 부식량을 측정하는 방식은 이미 산업현장에서 많이 사용되고있는 방식이지만, 그 측정을 위해서 시편을 구하는 것도 쉽지 않을뿐더러, 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 주성분으로하는 용액을 사용하였다. 부동액은 일반적으로 에틸렌글리콜만으로는 부족한 것으로 알려져있다. 즉, 부식된 냉각장치에서 떨어져 나온 덩이들이 냉각기를 막으면 엔진이 과열될 위험이 있으므로 실제 부동액에는 대개 부식방지제를 넣어준다. 여기에는 보통 아질산염과 트리에탄올아민이 사용된다. 또 냉각수의 산성이 커지는 것을 막기 위해 여분의 알칼리 성분도 들어 있다. 근래에는 밀봉제도 넣어 냉각기에 생긴 미세 구멍으로 냉각수가 새나오는 것을 막기도 한다. 또한 여러가지 요인으로 부동액이 거품을 만들 때가 있는데 이렇게 되면 냉각 기능이 저하되므로 이를 방지하기 위해 거품 방지제도 섞는다. 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 4 가지 조건들 - 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 임펠

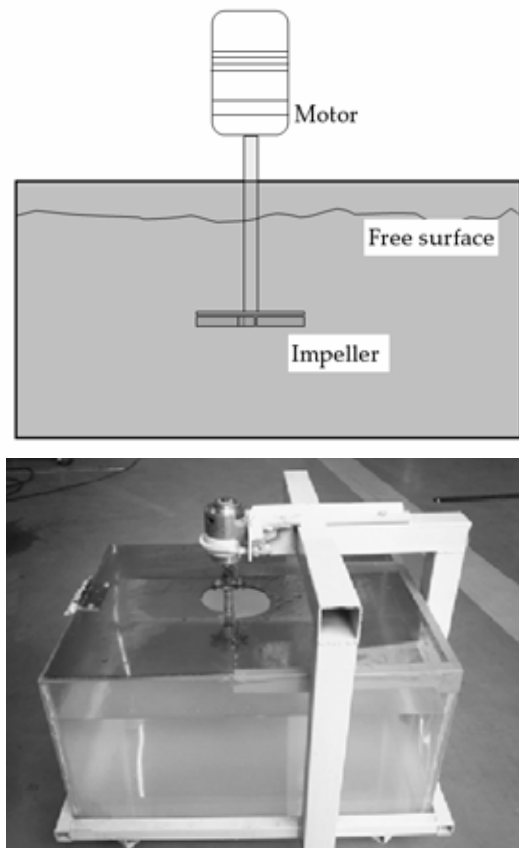


Fig. 2 Schematic diagram and a photo of the impeller chamber

러의 조각들을 준비해서 각각의 조건에 대해 두 개씩의 시편들을 준비하고, 동일한 혼합액에 투입시켜서 실험의 공정성을 증가시켰다.

2.5 임펠러의 침식도 실험

실제 차량내의 엔진에서는 정적인 상태에서의 수분에 의한 부식 뿐만 아니라 동적인 특성에 영향을 받는 침식이라는 더 심각한 조건에 놓이기 때문에 그 침식 및 부식에 대한 예측이 어렵다고 판단된다. 따라서 본 연구에서도 이러한 현장에서

의 문제점들이 무엇인지 파악하기 위해서 임펠러를 실제 회전시켜서 그 임펠러 표면의 부식변화를 살펴보고자 하였다. Fig. 2 는 임펠러의 동적거동 실험에 사용한 단순 개략도를 나타내고 있다. 모터는 본체와 연결지지대 그리고 임펠러는 실제 차량에서 구할 수 있었으며 모터에 의한 임펠러의 회전속도는 약 rpm 이었다. 임펠러의 동특성에 따른 부식 및 침식의 정도는 부동액과 물이 약 50:50 의 비율로 섞인 혼합액을 사용하여 실험을 수행하였다.

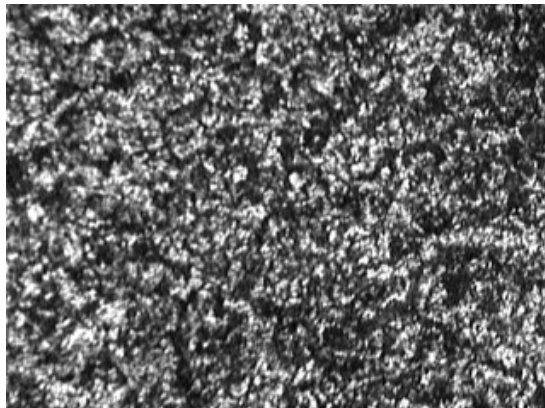
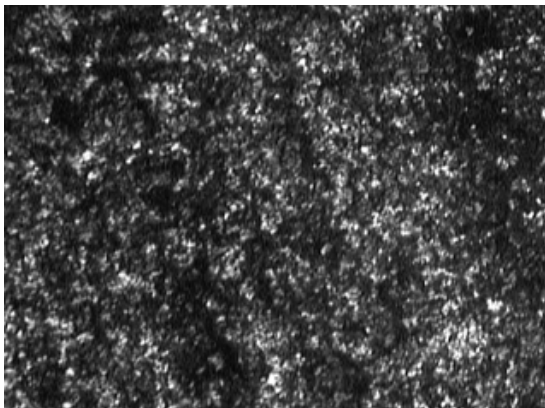
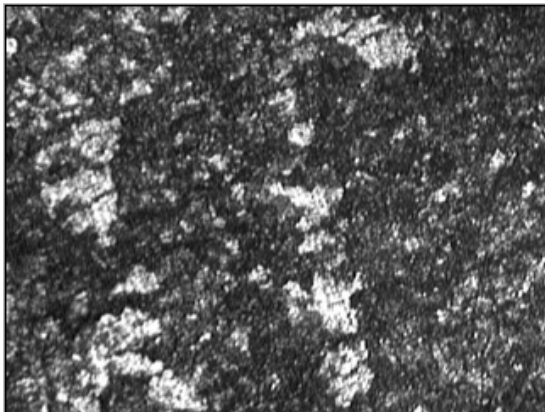


Fig. 3 Temporal variation of the corrosive surface (100× magnified) of specimen in tap water after (a) 0 days (upper) (b) 10 days (middle) (c) 25days (lower picture)

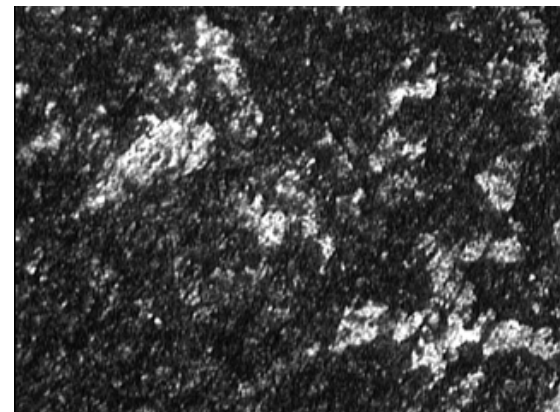
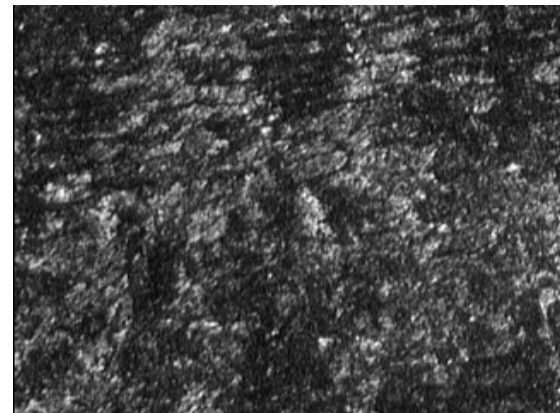
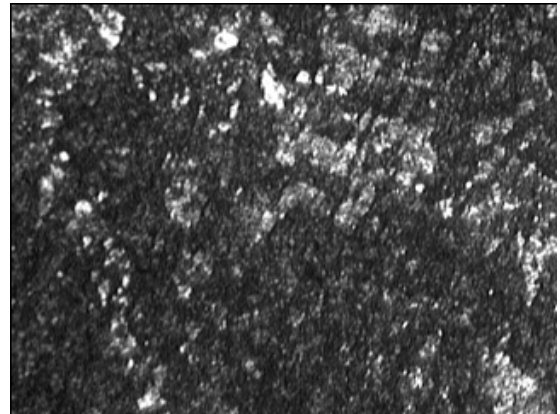


Fig. 4 Temporal variation of the corrosive surface (100 × magnified) of specimen in 50:50 coolant-tap-water mixtures after (a) 0 days (upper) (b) 10 days (middle) (c) 25days (lower picture)

3. 결과 및 토의

3.1 부식측정

Fig. 3 과 Fig.4 는 시간이 지남에 따라 현미경으로 100 배 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, 즉각적 시각적인 차이를 볼 수 있다.

Fig.3 에서 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.

이에 반해서, Fig.4 의 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.

이러한 미세한 표면입자들이 생겨나는 현상은 이미 여러 참고자료⁽²⁾에 잘 알려진 현상으로 본 실험과 같이 두 개의 합금으로 이루어진 시편은 서로 다른 상변화를 가지게 되는 것이 주요인이라는 것으로 밝히고 있다. 즉, 활성적인 성분과 불활성적인 성분이 서로 반응을 일으킴으로써 일어나게 되는데, 이 활성 성분은 그 비활성 성분에 침투(attach)하여 이러한 미세조직(microstructure)을 만들어내게 된다.

3.2 무게감량측정

이러한 부식과 관련해서 앞서 언급했듯이, 감량 자체의 변화를 확인하는 것은 부식의 진전도를 측정하는 기본적인 척도가 된다. Fig.5 는 서로 다른 두 조건(부동액과 물 50:50% 혼합액과 물 100%)에 시편들이 놓였을 경우, 그 무게의 변화정도를 시간에 따라서 측정할 결과이다.

여기에서 사용된 무게감량계수(R_w)는 초기무게에 대한 시간에 따른 무게변화를 총 면적으로 나누어 구하였다. 무차원시 질량으로 무차원할 수

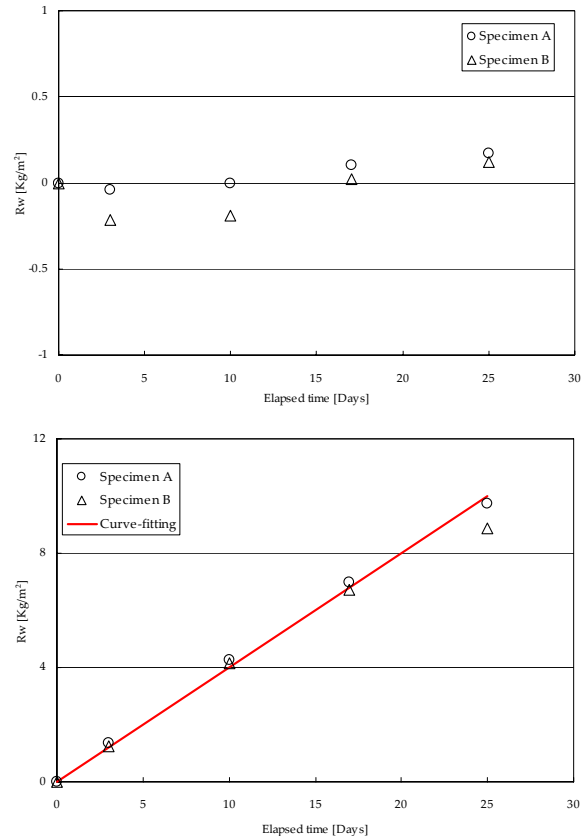


Fig. 5 Variation of weight reduction per unit area, (a) 50:50 % mixture, (b) 100% water

있었으나, 부식은 주로 표면에서 발생하기 때문에 사용되어진 면적을 이용하여 분모로 나누었다.

Fig.5 의 비교에서 바로 알 수 있듯이, 수돗물 100%의 경우, 시간에 따라서 무게감량계수가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 수돗물만 이용할 경우 그 부식 정도가 선형적으로 증가하는 결과를 낳는다는 사실을 확인시켜준다.

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

$$R_w = C \times \text{days}, \quad (1)$$

여기서, C 는 본 실험에서 부식의 물질에 따른 상수로 임펠러 실험에서 구해진 상수는 0.4 로 도출되었다.

그림에서 약 25 일가량이 지났을 무렵 시편 A 와 B 가 약간의 편차를 가지고 있지만 일단 차후의 실험계획확정을 고려하여 더 두고 보아야 할 사항으로 판단된다.

4. 결론

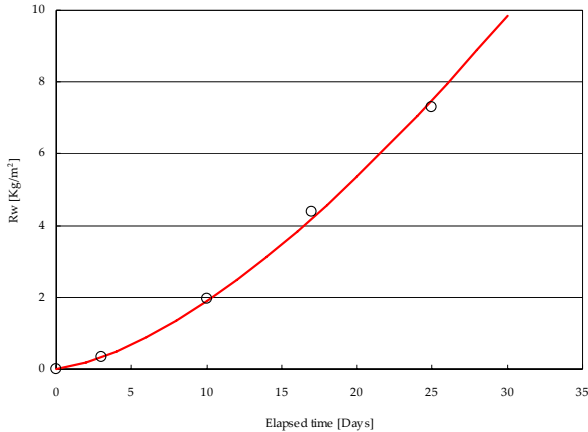


Fig. 6 Variation of weight reduction per unit area of an impeller in the mixture of 50:50 coolant-water

3.3 실제 임펠러의 동적특성에 따른 침부식특성

Fig.6 은 실제 임펠러를 아크릴로 특수 제작한 챔버에 넣고, 매일 4-6 시간 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. 그림에서 확인할 수 있듯이 침부식의 변화는 시간에 따라 포물선형태로 급격히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그림에서 사용된 실선은 측정된 결과에 회귀함수를 구한 것이다. 이 회귀함수는 부식의 선형적인 함수와는 달리 시간(일)에 따라 다음과 같이 비선형적으로 표현된다.

$$R_w = D \times \text{days}^n, \quad (2)$$

여기서, D 와 n 은 침부식의 물질에 따른 상수로 본 실험을 통해 구해진 상수는 각각 0.06 과 1.5 로 도출되었다.

이러한 침부식결과에 따라 우선 생각해 볼 수 있는 이유는 임펠러가 회전함에 따른 표면에서의 침식이 일어나기 시작하고, 이러한 임펠러의 동특성은 표면에서의 반응과 연관되어 그 침부식을 가속화시킨다고 판단된다. 하지만, 시간적인 부족으로 인하여 결론을 내리기에는 이르다고 판단된다. 이에 대해서는 부차적인 연구를 수행해서 보완적인 데이터가 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 이러한 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 복잡한 미세조직이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 부식은 시간에 따라서 선형적으로 급속히 진행되었고, 그 선형상수는 0.4 로 도출되었다. 실제 임펠러를 실제 차량에 적용되는 부동액과 물의 50:50%의 혼합액에서 회전시켜 그 동적거동에 의한 침부식측정결과 포물선형태의 곡선으로 급격히 무게감량이 발생하였다. 이것은 임펠러가 회전함에 따른 표면에서의 침식이 일어나기 시작하고, 시편 표면에서의 반응과 연관되어 그 침부식을 가속화시킨다고 판단된다. 하지만 아직 관찰에 필요한 시간에 따른 오차요인을 고려했을 때, 차후 보조 실험이 필요하다고 판단된다.

후 기

본 연구와 관련해서 현미경 및 무게감량측정 실험에 많은 도움을 준 실험실의 윤병두박사와 실제 임펠러 실험이 진행되는 동안 장소 및 실차로 부터의 부품확보에 도움을 주신 (주)성안자동차의 임직원들에게 감사를 표한다.

참고문헌

- (1) Ariely S. and Khentov A., 2005, "Erosion corrosion of pump impeller of cyclic cooling water system," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, pp. 925-932.
- (2) Davis J.R., 2000, "Corrosion: Understanding the Basics," *The Materials Information Society*.