

박판 Al 합금재료의 피로균열전파특성과 피로수명예측

김승권[†] · 이억섭^{*} · 양형렬^{**} · 여인철^{***} · 박성완^{***}

Characteristics of Fatigue Crack Propagation and Fatigue Life Prediction of Thin Sheet Al Alloy

Seung Gwon Kim[†], Ouk Sub Lee^{*}, Heang Ryeal Yang^{**}, In Cheol Yeo^{***}, Sung Wan Park^{***}

Key Words : Fatigue life(피로수명), Crack closure phenomenon(균열단합현상), Fatigue crack propagation(피로균열전파), Fatigue crack growth rate(피로균열성장률), Fatigue life prediction(피로수명예측), C-language(C-언어)

Abstract

In characteristics of fatigue crack propagation, it is important that fatigue life is affected by crack closure phenomenon in thin sheet Al alloy. The purpose of this paper is to analyze the characteristics of fatigue crack propagation in constant loading condition for sheet Al 2024-T3 alloy of two sort of thickness and identify the difference of fatigue life in thin sheet specimen comparing experimental results of thin sheet specimen and relatively thick sheet specimen under same fatigue loading condition. In applying fatigue related material constants from fatigue crack propagation analysis, we attempt to operate the fatigue life estimating process of thin sheet specimen by modified Paris' law considering crack closure phenomenon and analyze the experimental and prediction results of fatigue life in thin sheet Al alloy.

기호설명

a = Crack Length

N = Fatigue Life

K = Stress Intensity Factor

$2W$ = Width of Specimen

R = Load Ratio

m, C = Fatigue related Material Constants

U = Factor by Crack Closure Theory

exp = Result of Experiment

pre = Result of Prediction

1. 서론

피로균열전파특성에서 Al 합금재료의 두께에 따른 피로수명의 차이는 Crack Closure

† 인하대학교 대학원 기계공학전공

E-mail : kimsg@inhaian.net

TEL : (010)2309-7204

* 인하대학교 기계공학부

** 시립인천전문대학 기계과

*** 시립인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과

Phenomenon(균열단합현상)^(1,2,3)에 의한 영향이 주요원인 중 하나이다. 본 연구의 목적은 우선 일정진폭하중을 받는 두가지 두께의 판재 Al 2024-T3 합금재료의 피로균열전파특성을 실험을 통하여 파악하고, 동일한 피로하중조건하에서 박판시험편과 함께 상대적으로 두꺼운 후판 시험편에 대한 피로시험 결과를 서로 비교하여 박판시험편에서 나타나는 균열단합현상에 의한 피로수명의 차이를 확인해본다. 그리고 피로시험으로부터 얻어지는 피로관련 재료상수를 박판 시험편의 피로수명예측과정에 적용함에 있어서 균열단합현상을 고려한 Modified Paris' Law에 의해 피로수명을 예측해보고 박판 Al 합금재료의 피로수명에 대한 실험결과와 예측결과를 서로 비교분석하고자 한다.

일정진폭 하중하에서 행해지는 피로시험을 통하여 재료의 피로파괴특성인 m 과 C 가 얻어진다. m 과 C 는 da/dN 과 ΔK 로 이루어지는 그래프의 각 축을 log-scale 화하여

구할 수 있으며 피로파괴특성을 나타내는 대표적인 피로관련 재료상수이다. 이렇게 해서 얻어지는 m 과 C 는 피로해석에 널리 쓰이는 적절한 관계식의 핵심인자로 쓰이며 또한 계산에 의한 피로수명예측과정에도 사용될 수 있다. 본 연구에서는 피로수명을 계산함에 있어서 계산상의 복잡함과 시간적인 효율성을 감안하여 보다 효과적인 피로수명예측결과를 얻기 위해 computer language program을 계산과정에 활용하였다. 균열단합현상을 고려한 박관 AI합금재료의 피로수명예측에 쓰이는 대표적인 관계식으로는 Modified Paris' Law^(1,2,3)가 있으며 사용된 computer language program은 C-language(C-언어)⁽¹¹⁾이다.

2. 기본 이론

2.1 일정진폭 하중하에서의 피로균열전파
일정진폭 하중하에서의 피로균열성장률, da/dN 은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}$$

여기서,

N_i 와 N_{i+1} : i 와 $i+1$ 번째의 하중 반복수

a_i 와 a_{i+1} : $N = N_i$ 와 $N = N_{i+1}$ 의 균열길이

본 연구에서 사용한 CCT(Center Cracked Tension) 시험편에 대한 ΔK 는 다음의 식을 사용하여 계산하였다.

$$\Delta K = \Delta K_{app} = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(g) \quad (4)$$

$$f(g) = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{2W}\right)} \cdot (\text{polynomial term})$$

여기서,

ΔK_{app} : 작용응력 확대계수 범위

$\Delta \sigma$: 작용응력 범위

a : 균열길이의 1/2

$2W$: 시편의 폭

하중비 R ^(1,8,9,10)은 다음과 같다.

$$R = \frac{\text{Min.load}}{\text{Max.load}} = \frac{\text{Min.stress}}{\text{Max.stress}}$$

da/dN 과 ΔK_{app} 의 관계는 Paris' Law⁽¹⁾를 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (1,7,8,9)$$

여기서,

m, C : 재료상수

그리고 균열선단에 생성되는 Plasticity(소성)의 영향을 고려한 균열단합현상에 의거해 Elber^(1,3)에 의해 제안된 유효응력 확대계수 범위 ΔK_{eff} ^(1,3)를 사용하게 되면 다음과 같다.

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$$

여기서,

$$U = 0.5 + 0.4R \quad (1) \quad (-0.1 \leq R \leq 0.7)$$

이로부터 Modified Paris' Law^(1,2,3)는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^m$$

위 식은 피로수명예측을 위한 프로그램에 사용된다.

2.2 피로수명예측

피로관련 재료상수 m, C 값을 활용하여 피로수명예측과정을 진행하는데에 적합한 computer language program으로 수치해석분야에서 Fortran과 함께 널리 활용되는 C-언어⁽¹¹⁾를 사용하였으며, 버전은 Visual studio 6.0 professional package에 포함된 Visual C++를 사용하였다.

C-언어의 효율적인 주요기능 가운데 하나인 함수의 기능을 피로수명예측을 위한 프로그램에 적용하여 Main 함수(메인함수)와 종속함수의 적절한 배치를 통해 피로균열성장률에 대한 각 함수의 역할배분에 효율성을 기하였다.

우선 피로수명예측 프로그램전반에 쓰이는 균열길이(a)와 같은 변수는 글로벌변수로 선언하였고,

▶ 선행처리 및 변수선언부

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

double precracking(double); /* define function 'precracking' */
double cracking(double); /* define function 'cracking' */
double a, W, t, ...; /* define variables: geometry ... */
```

▶ Main(메인) 및 종속함수부

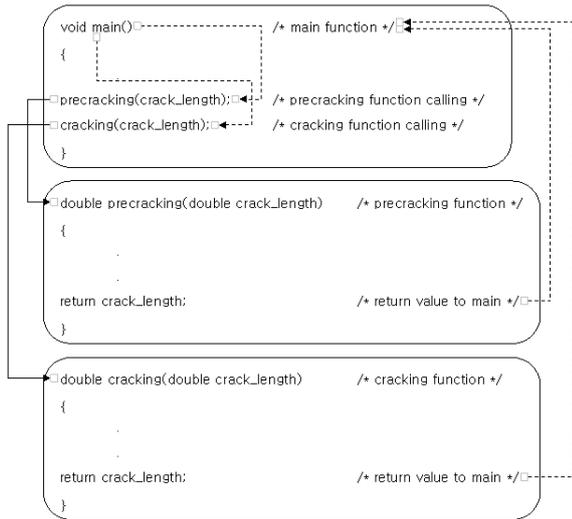


Fig. 1 Structural diagram of program

종속함수부를 이루는 precracking 과 cracking 의 연산을 수행하는 함수는 각각 precracking(), cracking() 으로 종속함수화하여 메인함수와 별개로 위치시킨 다음 메인함수에서 필요시에 종속함수를 호출하여 연산을 수행한 후 그 결과값을 메인함수에 반환하도록 구성하였다. 여기서 precracking()은 시편의 가공균열로부터 피로균열형성을 위한 과정이며 precracking()으로부터 생성된 자연피로균열은 cracking() 과정의 시작점인 초기균열길이 a_{ini} 가 된다.

Fig. 1 은 피로수명예측 프로그램의 함수간 구조를 그림으로 나타낸 것으로 주요변수와 종속함수의 선언 그리고 메인함수에서의 호출과 종속함수의 연산결과값 반환에 대한 흐름을 보이고 있다.

Precracking() 및 cracking() 함수에서 피로균열성장을 구현하기 위한 예로 Modified Paris' Law 를 code 화 하는 과정을 살펴보면 실험전반에 적용되어지는 일정진폭하중에 의한 피로균열성장률 $\frac{da}{dN} (= C \cdot \Delta K_{eff}^m)$ 과 균열길이 $a(i)$ 그리고 소성영역 $r_y(i)$ 의 함으로부터

반복되는 피로하중에 대한 피로균열성장길이를 계산하게 된다.

아래는 피로수명예측 프로그램 code 의 일부를 발췌한 것으로 변수선언부를 비롯, 메인함수에서 피로균열성장과 관련한 부분을 개략적으로 나타내보았다.

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
...
FILE *fp_filename;
char *txtfilename = "t1c4.txt";
char *sourcefilename = "t1c4.cpp";

/* Declaration of variables */

/* Geometry */
double a_0=0.00632, a, a_p=0.007166667, a_f=0.02379167;
double W=0.03, B=0.001016;
...
void main(void)
{
...
Y_TypeA_MP = pow(10, logY_TypeA_MP);
m_TypeA = slope_TypeA;
...
/* Fatigue crack propagation in Modified Paris' Law */
...
R_TypeA_MP = P_min_TypeA_MP/P_max_TypeA_MP;
U_TypeA_MP = 0.5 + (0.4*R_TypeA_MP);
delta_K_TypeA_MP = K_max_TypeA_M - K_min_TypeA_MP;
delta_K_eff_TypeA_MP = U_TypeA_MP * delta_K_TypeA_MP;
da_TypeA_MP = C_TypeA_P * pow(delta_K_eff_TypeA_MP,
m_TypeA);
...
if(a_r_y_range_TypeA_MP < a_r_y_range_fore_TypeA_MP) {
a_r_y_range_tank_TypeA_MP = a_r_y_range_fore_TypeA_MP;
...
r_req = a_r_y_range_switch_TypeA_MP - (a_TypeA_MP -
da_TypeA_MP);
if(r_req <= 0){
r_req = 0;
}
else{
...
if(only_one_count_first_AMP == NN_AMP){
if(only_one_count_second_AMP == 0){
a_TypeA_MP = a_Over[i_AMP];
...
i_AMP++;
j_AMP = i_AMP - 1;
}
else{
a_r_y_range_fore_TypeA_MP = a_r_y_range_TypeA_MP;
}
}
else{
a_r_y_range_fore_TypeA_MP = a_r_y_range_TypeA_MP;
}
}
...
}
```

피로수명예측방법과 관련한 프로그램의 flowchart 는 3.2 절에 나타내었다.

3. 시험편과 실험 및 예측방법

3.1 판재 Al 합금재료에 대한 일정진폭 하중하에서의 피로균열전파실험

본 연구에서 사용한 시험편 재료는 Al 2024-T3 합금이며 화학적 조성⁽⁶⁾을 Table 1 에, 기계적 성질⁽⁶⁾을 Table 2 에 각각 나타내었다.

Table. 1 Chemical composition of Al 2024-T3 aluminum alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.11	0.23	4.46	0.58	1.44	0.04	0.03	0.02	Bal

Table. 2 Mechanical properties of Al 2024-T3 aluminum alloy

Yield strength (MPa) (0.2 % offset)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
345	500	17

시험편⁽⁵⁾의 모양은 CCT(Center Cracked Tension) 형으로 일정진폭 피로하중하에서 자연피로균열을 1 mm 정도 성장시킨 균열선단까지를 초기균열길이 $2a_{ini}$ 로 채택하였다. 시험편의 형상은 Fig. 2 에 자세히 나타내었으며 시험편의 길이방향이 압연방향과 일치하게 제작되었다.

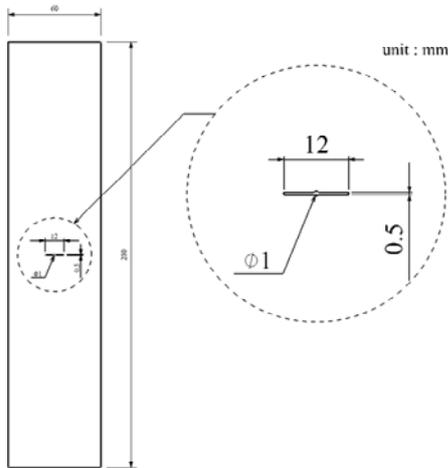


Fig. 2 Geometry of specimen

모든 실험은 10 ton 용량의 서보유압 시험기를 사용하였으며 하중조건은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$$

$$(\sigma_{\max} = 64.304 \text{ MPa}, \sigma_{ys} \text{ 의 } 18.6 \%)$$

$$\text{응력비 } R = 1/4$$

하중파형은 하중조건을 만족하는 일정진폭의 Sine wave(사인파형)로 주파수는 10 Hz 이다.

실험은 상온에서 수행되었고 균열길이 측정간격은 5,000 cycle 이었으며 모두 6 개의 시험편을 사용하였다.

박관합금재료의 피로에서 나타날 수 있는 균열단합현상을 확인하고자 두께 1.016 mm 의 Al 2024-T3 합금재료 시험편을 네차례 실험하였으며 두께가 두 배인 2.032 mm 의 시험편을 사용하여 두 차례의 실험을 실시하였다. 시험편의 형상 및 하중조건 등 두께를 제외한 전반적인 실험조건은 동일하게 하였다.

3.2 박판 Al 합금재료에 대한 피로수명예측

Fig. 4 는 피로균열전과 수명예측을 위한 code 의 flowchart 이다.

Flowchart 중앙부에 있는 True/False 를 판단하는 영역에서는 일정진폭하중조건 하에서의 피로시험의 경우 피로균열성장 지연거동이 나타나지 않게 되며 항상 True 값을 유지하면서 시험의 판단시까지 균열은 성장을 계속하게 된다.

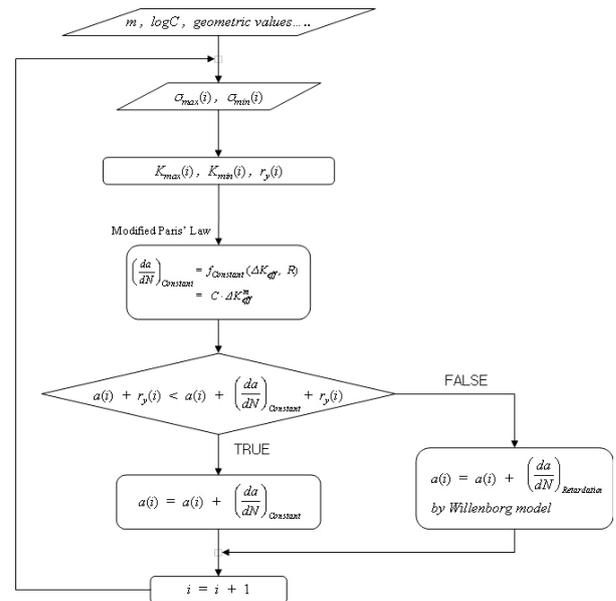


Fig. 3 Flowchart of program

피로균열성장률인 da/dN 의 경우 Modified Paris' Law 관계식을 적용하여 code 화 하였다.

일정진폭하중조건과 함께 과대하중이 포함된 실험조건인 경우에는 과대하중에 의한 소성영역으로부터 피로균열성장 지연거동이 나타날 수 있으며 판단부에서는 False 값이 되어 피로균열성장 지연거동과 관련한 유효한 Model⁽²⁾로부터 지연의 정도를 예상할 수 있다.

4. 실험결과 및 검토

4.1 일정진폭 하중하에서의 피로균열진전거동

박판 Al 합금재료의 피로에서 나타날 수 있는 균열단합현상에 의한 피로균열성장지연을 확인하고자 행한 두께 1.016 mm Al 합금재료에 대한 피로시험의 결과로 얻어지는 하중반복 사이클수 N 과 균열길이 a 의 관계를 Fig. 6 에 나타내었다.

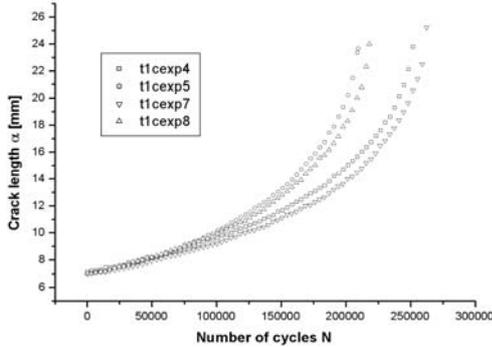


Fig. 4 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al alloy, $t = 1.016 \text{ mm}$

다음은 두께가 2.032 mm 인 Al 합금재료의 하중반복 사이클수 N 과 균열길이 a 의 관계를 Fig. 7 에 나타내었으며, 응력확대계수 ΔK 와 피로균열성장률 da/dN 의 관계를 Fig. 8 에 나타내었다.

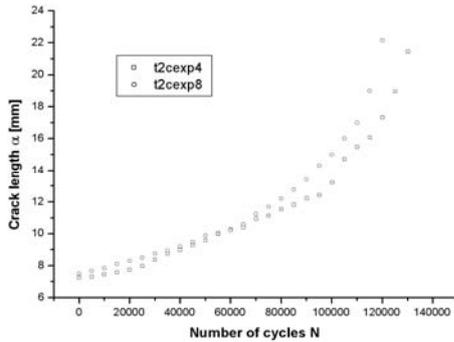


Fig. 5 Crack length plotted against the number of repeated cycles in Al alloy, $t = 2.032 \text{ mm}$

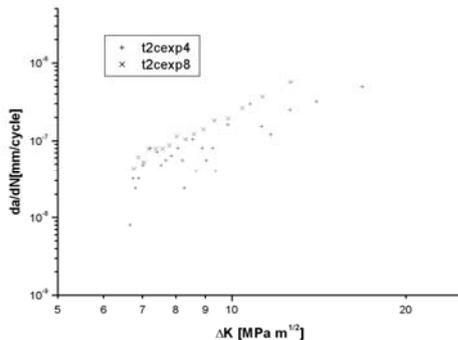


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in Al alloy, $t = 2.032 \text{ mm}$

다음 Table 3 에는 두께 2.032 mm 인 Al 합금재료에 대한 실험결과로부터 얻어지는 피로관련 재료상수를 나타내었다.

Table. 3 Mean value of m, C

Al 2024-T3	$R = 1/4, \Delta\sigma = 48.228 \text{ MPa}$	
	m	$\log C$
	3.8798	-10.37265

m 과 C 는 $\frac{da}{dN} - \Delta K$ 선도에서 최소자승법에

의한 Linear fitting 을 통하여 구하였다.

동일한 하중조건인 피로시험에서 박판시험편의 피로수명이 상대적으로 두꺼운 후판시험편에 비해 높게 나타나는 경향을 확인할 수 있으며, 이로부터 박판 Al 2024-T3 합금재료의 피로균열성장에 영향을 미치는 주요인자 중 하나로 균열단합현상이 존재함을 확인할 수 있다.

4.2 일정진폭 하중하에서의 피로균열진전거동에 대한 실험치와 예측치의 비교

두께 2.032 mm 시험편에 대한 피로시험으로부터 얻어지는 재료상수 m, C 값을 참조하여 두께 1.016 mm 시험편에 대한 피로수명예측을 실시하였다. 피로균열성장률인 da/dN 에는 균열단합현상을 적용시키고자 Modified Paris' Law 관계식을 사용하여 code 화 하였으며, 예측결과는 다음의 $a - N$ 선도를 사용하여 나타내었다.

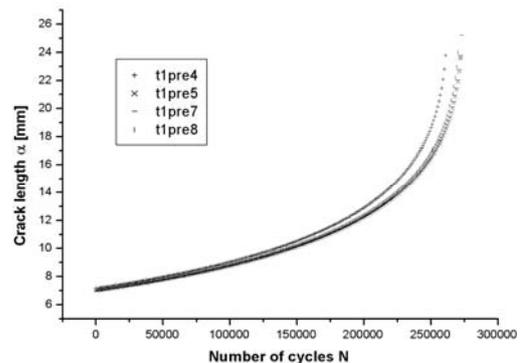


Fig. 7 Crack length plotted against the number of repeated cycles obtained by prediction; constant amplitude loading condition

두께 1.016 mm 시험편에서 실험에 의한 피로수명 평균값은 235,325 cycle 이며 균열단합현상을 고려한 Modified Paris' Law 를 적용한 피로수명예측결과는 268,968 cycle 로 오차율은 약 14.3 % 이다. 이에 대한 경향은 Fig. 6 과 Fig. 9 에 각각 나타내었다.

5. 결 론

판재 Al 합금재료의 피로균열전파특성을 파악하기 위해 실시한 일정진폭 하중조건에서의 피로시험과 피로수명예측과정으로부터,

동일한 피로하중조건에서 박판재료의 균열단합현상이 피로균열성장지연의 한 원인임을 확인할 수 있었고, 본 피로시험에서 사용된 두께 2.032 mm 시험편에 대한 두께 1.016 mm 시험편에서의 피로수명 연장률은 약 87.4 % 이다. 이는 균열단합현상이 박판에서 피로수명에 영향을 미치는 주요한 인자 중의 하나임을 알려주는 결과이다.

균열단합현상을 고려한 Modified Paris' Law 를 사용하여 작성한 피로수명예측 프로그램과 이로부터 구해지는 피로수명예측값은 실험에 의한 피로수명과 약 14.3 % 의 비교적 근소한 오차를 보인다. 이로부터 박판에서 나타날 수 있는 균열단합현상의 영향이 Elber 에 의해 제안된 Modified Paris' Law 에 의한 피로수명예측과정에 나타나고 있음을 파악할 수 있다.

참고문헌

- (1) Anderson T. L., 1995, "Fracture Mechanics," *CRC Press, Inc.*, Vol. 1, No. 1, pp. 513~528.
- (2) Dominguez J., 1994, "Handbook of Fatigue Crack Propagation in Metallic Structures," *Elsevier Science B. V.*, Vol. 2, No. 1, pp. 970~975.
- (3) Bannantine J. A., Comer J. J., Handrock J. L., 1990, "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," *Prentice Hall, Inc.*, Vol. 1, No. 1, pp. 101~113.
- (4) Zahavi E., 1996, "Fatigue Design - Life Expectancy of Machine Parts," *CRC Press*, Vol. 1, No. 1, pp. 141~149.
- (5) ASTM Designation : 647-95, 1995, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," Vol. 1, No. 1, pp. 578~614.
- (6) ASTM Designation : B209-95, 1995, "Standard Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Sheet and Plate," Vol. 1, No. 1, pp. 125~151.
- (7) Song S. H., Lee J. M., 2004, "Effect by Applying Mode of Single Overload on Propagation Behavior of Fatigue Crack," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 109~116.
- (8) Sim D. S., Kim K. B., Kim. J. K Song S. H., 2000, "Fatigue Life Prediction for High Strength Al-alloy under Variable Amplitude Loading," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol.

24, No. 8, pp. 2074~2082.

- (9) Sim D. S., Hwang D. Y., Kim J. K., 2002, "Prediction of Crack Growth in 2124-7851 Al-alloy under Flight Simulation Loading," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 26, No. 8, pp. 1487~1494.
- (10) Seo C. M., Kim K. R., 1997, "Fatigue Crack Growth Properties of Ceramic Coated 1Cr-1Mo-0.25V Steel," *Transaction of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 21, No. 10, pp. 1674~1682.
- (11) Woo K., Kang D. J., Kim E. J., 2004, "C++ by Dissection," *ITC*, Vol. 1, No. 1, pp. 85~153.