

## 제품 사용데이터를 활용한 제품 열화상태 평가 방안에 대한 연구

신종호<sup>1</sup> · 전홍배<sup>2†</sup> · Cedric Cattaneo<sup>3</sup> · Dimitris Kiritsis<sup>4</sup> · Paul Xirouchakis<sup>4</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술대 디자인 및 인간공학부, <sup>2</sup>홍익대 산업공학과,  
<sup>3</sup>주)SAPAL, <sup>4</sup>스위스연방로잔공대 기계공학과

### A Method for Evaluating Product Degradation Status Using Product Usage Data

Jongho Shin<sup>1</sup>, Hongbae Jun<sup>2†</sup>, Cedric Cattaneo<sup>3</sup>, Dimitris Kiritsis<sup>4</sup>, and  
Paul Xirouchakis<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Design & Human Engineering, UNIST

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Hongik Univ.

<sup>3</sup>SAPAL, Co., Switzerland

<sup>4</sup>Department of Mechanical Engineering (STI-IGM-LICP), EPFL, Switzerland

Received 19 November 2012; received in revised form 3 January 2013; accepted 3 January 2013

#### ABSTRACT

In general, the product is used under several circumstances including environmental and usage conditions. According to the circumstances, the product has various performance degradation processes. In order to optimize the lifecycle of product usage, it is important to observe the degradation process and make suitable decisions on product operations. However, there are not much research works in evaluating the degree of product degradation based on product usage data. Recently, due to emerging ICT (Information and Communication Technology) technologies, it becomes possible to get the product usage data. Based on the gathered data, it is possible to analyze the degree of product degradation. The analysis of product usage data can improve product use and product design with advanced decisions. To this end, this study addresses one approach based on FMEA/FMECA method, called PDMCA (Performance, Degradation Modes and Criticality Analysis) for evaluating product degradation status and making suitable decisions.

**Key Words:** Degradation, FMEA, Middle of life, Product design improvement, Predictive Maintenance

## 1. 서 론

일반적으로 제품 사용 단계(MOL, Middle Of

Life)에서의 제품의 신뢰성, 품질, 안전 측면에 대한 관리는 사전에 마련된 제품 유지보수 정책에 의거하여 수행된다. 어떠한 유지보수 정책(사후보전, 예방보전, 예지보전 등)을 쓰느냐에 따라서 제품 사용 수명 및 유지보수 비용이 달라진다. 일반적으로 일정 주기를 기반으로 한 예방보전 정책이

<sup>†</sup>Corresponding Author, hongbae.jun@hongik.ac.kr  
©2013 Society of CAD/CAM Engineers

많이 쓰여져 왔는데 이러한 보전 정책이 갖는 문제점은 시간의 흐름에 따른 제품/시스템 열화 정도를 고려하지 못한다는 점이다. 최근 들어와서는 센서기술 및 ICT 기술의 발달에 힘입어, 중요한 제품/시스템들을 대상으로 상태기반 보전(예지보전) 정책을 채택하는 경향이 늘고 있다.

하지만 실시간 모니터링을 바탕으로 한 예지/예측 보전 관리방식의 문제점은 너무 제품/시스템에 특화된 솔루션인 경우가 대부분이어서, 제품 성능의 열화 정도를 평가하고 이를 바탕으로 제품의 운용 및 설계의 개선 등에 있어서 적합한 의사결정을 수행할 수 있는 일반적인 방법이 부재한 실정이다.

본 연구에서는 제품 사용 단계에서 수집된 데이터들을 활용하여 제품 운용 시 발생하는 제품 열화 정도를 평가하고 적절한 대응책을 마련하는 방법으로 FMEA를 기반으로 한 PDMCA (Performance, Degradation Modes and Criticality Analysis) 방법을 제시하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 PDMCA 개발과 관련된 연구를 소개하며, 3장에서는 본 연구에서 제안하는 PDMCA 방법에 대해 서술할 것이다. 4장에서는 제안한 PDMCA 방법의 유용성을 알아보기 위해 실제 산업체 사례에 적용한 내용을 살펴볼 것이다. 마지막 장에서는 PDMCA 방법에 대한 결론과 향후 발전가능성에 대해 언급할 것이다.

## 2. 관련연구

### 2.1 FMEA/FMECA

FMEA(Failure Mode and Effect Analysis)는 제품 혹은 시스템 개발 시 신뢰성 및 품질관리 측면에서 개발되어질 제품(시스템), 하위시스템, 부품들의 기능 및 고장 모드를 정의한 후, 고장이 전체 시스템에 미칠 수 있는 파장 정도를 체계적으로 사전 인지하고 제품 설계시 미처 고려하지 못한 약점들을 발견하여 설계 초기 단계에 고신뢰성 및 안전성을 확보할 수 있는 대안 설계를 할 수 있게 도와줌으로써 제품 생애주기 비용 및 개발기간의 단축을 도모할 수 있는 장점을 가지고 있다.

FMEA가 갖는 이러한 장점으로 인해서 초기 항공우주산업에부터 시작하여 전 산업 분야로 확대 적용되어져 왔다. 이런 와중에 초기 FMEA가 갖

고 있는 여러 제한점들을 해결하고, FMEA의 장점들을 여러 분야에 응용하기 위해서 FMEA의 변종이라 할 수 있는 여러 방법들(Process FMEA, System FMEA, FMECA 등)이 제안되어졌다. 고장 영향성의 심각도(Criticality)를 고려하고 이를 기존 RPN(Risk Priority Number)에 반영하여 정량화된 값으로 표현한 FMECA(Failure Mode, Effect and Criticality Analysis)도 그 중에 하나라고 할 수 있다.

이러한 개선 과정을 거쳐 FMEA/FMECA 방법은 제품 설계 단계에 있어서 제품의 신뢰성, 품질, 안전 측면에서 사전에 체계적으로 분석할 수 있는 효과적인 도구로서 인정받고 있다. 하지만, FMEA를 실제적으로 적용하기 위해서는 아직도 여러가지 제약점들이 극복되어야 한다.

그동안 기존 FMEA의 정성적인 평가방법이 갖는 제한점들을 극복하기 위한 RPN(Risk Priority Number) 관련 연구, 고장모드들간의 영향정도를 보다 체계적으로 표현하기 위한 연구등 다양한 분야에 걸쳐서 추가적인 연구들이 많이 수행되어졌다. 예를 들어, Xu *et al.*<sup>[1]</sup>와 Cesar *et al.*<sup>[2]</sup>은 RPN 지표 계산을 위해 퍼지이론을 활용하였다. 최근에 Hu *et al.*<sup>[3]</sup>은 Fuzzy AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법을 활용하여 제품의 고장뿐만 아니라 환경유해물질의 영향 정도를 분석하였다.

이외에도 FMEA knowledge management, Criticality analysis, Functional modeling 등 FMEA와 관련한 여러 응용 연구들이 다양한 분야에 걸쳐서 수행되어져 왔다.

### 2.2 MOL 데이터 수집

근래에 들어서 RFID(Radio Frequency Identification), 센서 및 무선 통신 기술의 발달로 인한 제품인식 및 실시간 모니터링 기술의 획기적인 발전으로 언제, 어디서나, 필요한 데이터를 모니터링, 저장, 추적 및 활용할 수 있는 인프라를 구축하는 것이 가능하게 되었다<sup>[4]</sup>.

특히, MOL 단계에서는 RFID 기술 및 센서기술 등이 제품의 유통 및 사용 내역, 상태정보를 기록하는데 쓰일 수 있다. 예를 들어, 제품 유통 경로, 시간, 사용 조건, 제품 마모 상태, 불량 내역, 정비 기록 등의 데이터들을 실시간으로 추적 및 수집할 수 있다. 이러한 데이터가 중앙 서버로 취합되어 분석되고 분석 가공된 정보 및 지식들은 제품 전

체 라이프사이클에 걸쳐 여러 부분에서 운용의 효율화를 위해 이용될 수 있다.

근래 들어서 많은 연구 프로젝트들(예를 들어, EU의 PROMISE와 ELIMA project)이 스마트 정보장치를 제품에 부착하여 제품 사용 중에 발생하는 제품 상태 및 환경/운용 데이터(MOL 데이터)를 수집한 후 여러 라이프사이클 어플리케이션의 최적화에 이용하는 연구들을 수행해 왔다. EU PROMISE 프로젝트의 경우 총 10개의 산업체 응용 사례 연구들을 통하여 각각의 제품(냉장고, 가스보일러, 기차, 자동차, 공작기계, 중장비 차량 등)에 부착 가능한 PEID(Product Embedded Information Device)를 개발하고 제품 사용 도중에 수집된 데이터를 활용하는 사례연구들을 수행하였다. 이에 대한 보다 자세한 내용은 McFarlane *et al.*<sup>[5]</sup>, Parlikad *et al.*<sup>[6]</sup>, Kiritsis *et al.*<sup>[7]</sup>, EU PROMISE 프로젝트<sup>[8,9]</sup> 등에서 참고할 수 있다.

본 연구는 스마트 정보장치를 제품에 부착하여 제품 사용 중에 발생하는 제품 상태 및 환경 데이터(MOL 데이터)를 수집하는 기술을 이용하여 그 응용 방법을 개발하는 것으로 목표로 하고 있다.

### 2.3 MOL 데이터 응용

수집된 제품 사용/상태 데이터들은 여러 라이프사이클 단계에 걸쳐서 활용될 수 있다. 대표적인 분야가 제품 유지 보수이다. 이와 관련한 여러 연구들이 수행되어졌는데, 예를 들어, Lee *et al.*<sup>[10]</sup>는 watchdog agent라는 원격 예지보전 체계를 제안하고 제품 사용 중에 수집될 수 있는 데이터들을 분석하여 제품 예지보전 주요 의사결정에 활용하였다. 수집된 제품 사용 데이터의 또 다른 활용분야는 제품 설계의 개선이다. 많지는 않지만 이와 관련한 연구들이 그 동안 수행되어져 왔다. 예를 들어, Wilson<sup>[11]</sup>은 제품 사용 데이터를 모니터링하고 생애주기 특성 곡선(lifecycle characteristics curve), FMEA, FMECA, FTA(Fault Tree Analysis) 기법을 활용하여 유지보수를 고려한 설계(Design for Maintenance)에 적용하였다.

### 2.4 제품 degradation에 대한 연구

MOL 데이터를 제품의 유지보수에 적용하기 위해서는 제품의 사용 데이터를 기반으로 열화(degradation) 상태를 모니터링하고 분석해야 한다. 그동안 이를 위한 많은 연구들이 수행되어져

왔다. 예를 들어, Swanson *et al.*<sup>[12]</sup>은 Kalman filter를 사용하여 시간이 흘러감에 따라 동적으로 변하는 제품 성능 특성들의 변화를 추적할 수 있는 방안에 관한 연구를 수행하였다. Djurdjanovic *et al.*<sup>[13]</sup>은 feature map pattern matching, 로지스틱 회귀 모형, 신경망 패턴 매칭, hidden markov model등 제품 성능 평가 및 추정과 관련한 다양한 방법들에 대한 연구를 수행하여 제품의 열화상태를 평가하는 방법을 개발하였다. 더불어, Jayaram과 Girish<sup>[14]</sup>는 GEE(Generalized Estimating Equation)라 불리는 degradation 데이터 모델을 제안하고, 이 모델을 사용하여 degradation data의 포아송 분포 특성들을 예측하였다. 그리고 Iung *et al.*<sup>[15]</sup>은 사용조건, 상태모니터링, 유지보수 action 등을 고려한 degradation level 기반 degradation state model을 제안하였다. 하지만 실시간으로 수집되는 데이터를 사용하여 제품의 유지보수에 능동적으로 사용하는 방법의 개발은 미흡한 것이 사실이다.

이와 같이 스마트 정보 장치를 이용한 데이터 수집과 이를 제품개선에 적용하기 위한 다양한 노력들이 FMEA, Product degradation 연구등을 통해 시도되어 왔지만, 수집 가능한 제품 사용 데이터들을 바탕으로 제품의 degradation 상태를 분석한 후 이를 활용하기 위한 체계적인 방법론을 제시한 연구는 많지 않았다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 인지하여 FMEA 기법을 활용한 PDMCA 방안을 제시하고자 한다.

## 3. PDMCA

### 3.1 PDMCA의 정의

본 연구에서는 MOL 단계에서 수집되어질 수 있는 제품 사용/상태 데이터들을 여러 라이프사이클 단계에 활용하기 위해서 제품 열화상태를 파악하고 이를 바탕으로 적절한 의사결정을 하기 위한 방안으로 PDMCA(Performance, Degradation Mode and Criticality Analysis) 방법을 제시하고자 한다.

PDMCA는 제품 사용 및 상태 데이터를 활용하여 제품의 재설계 및 유지보수 정책을 결정하는데 활용할 수 있는 의사결정 방안이다.

Fig. 1은 PDMCA 절차를 보여주고 있다. PDMCA 절차는 크게, Set-up, PDMA(Performance Degradation Mode Analysis), CA(Criticality Analysis), DA(Decision and Action)로 나누어 볼 수 있다. 각

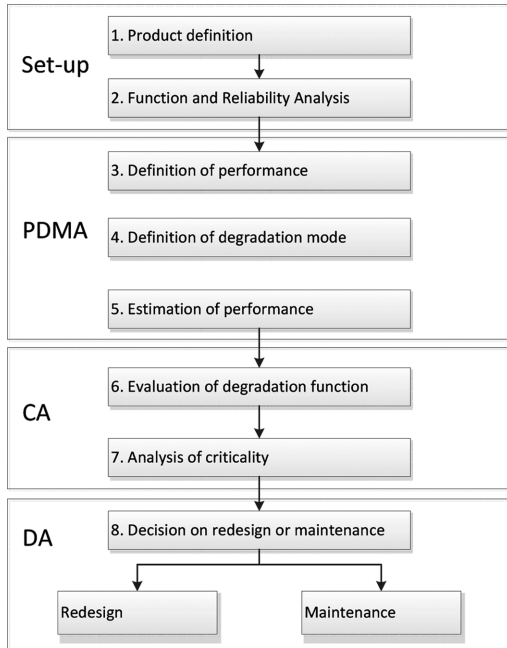


Fig. 1 PDMCA procedure

세부 절차에 대한 설명은 아래와 같다.

**Step 1. Product definition**

Step 1은 고려하는 대상 제품에 대한 정의를 내리는 단계이다. 이 단계에서는 대상 제품의 모델명, 주요 기능, 주요 사양, 운용조건 등을 파악한다.

**Step 2. Function and reliability analysis**

Step 2에서는 Step 1에서 정의한 대상 제품을 보다 자세히 이해하기 위해서 대상 제품을 구성하고 있는 요소들에 대한 이해와 이들의 기능들 및 신뢰성 측면의 상호작용에 대한 분석을 수행한다. 이를 위해 제품의 Function block diagram, Reliability block diagram 등을 작성하여 활용할 수 있다.

**Step 3. Definition of performance**

Step 3에서는 제품 성능에 대한 정의를 수행한다. 이를 위해 아래와 같은 작업을 수행한다.

- (1) 대상 제품의 주요 관심 성능을 기술한다.
- (2) 관심 성능에 따른 성능지표를 규정한다.
- (3) 제품의 성능 지표 예측과 연관된 제품사용 파라미터들을 정의한다.
- (4) 대상 제품의 성능지표와 제품사용 파라미터

들과의 연관성을 규정한다.

- (5) 제품사용 파라미터들을 이용하여 성능지표를 정량적인 값으로 측정하기 위한 성능 함수를 정의한다.

고려하는 제품의 관심 성능은 제품 자체의 특성 및 사용자의 관점에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 트럭 엔진의 성능은 엔진의 순간 출력이 될 수도 있고, 파국적인 고장이 없이 일정한 고장율 이하로 지속되어지는 기간이 될 수도 있다. 이러한 성능에 대한 개념을 정의한 후 정량적인 값으로 평가하기 위한 성능지표(P)를 규정한다. 예를 들면, 엔진 마력 또는 내용수명과 같이 정량적인 값으로 나타낼 수 있도록 성능 지표를 정의한다.

고려하는 제품의 성능 지표를 정의한 후에는 성능 지표를 예측하기 위해 성능지표에 영향을 미치는 파라미터들 (예를 들어,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ )을 제품 사용기간 동안에 수집 가능한 데이터 중에서 선별하여 정의한다. 이를 바탕으로 성능 함수를 아래와 같이 정의한다.

$$P = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

성능함수를 통해 제품의 현재 상태를 정량화하여 평가할 수 있다. 또한, 특정시점에서 제품의 성능 저하를 제품의 열화(degradation) 상태로 계산할 수 있다(Fig. 2 참조).

**Step 4. Definition of degradation mode**

그 다음 단계로 제품의 degradation mode를 정의한다. Degradation mode는 제품의 운용기간 동안 기대 예측 성능에 대해서 제품성능의 상대적인

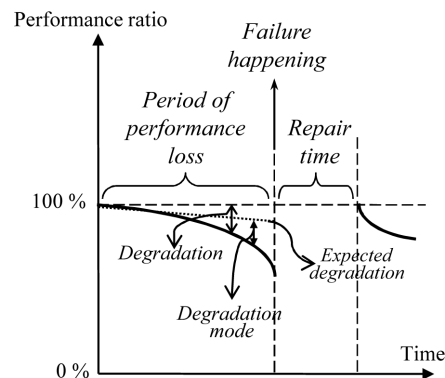


Fig. 2 Product degradation

열화 정도가 어떠한지를 나타낸다. 시간이 지남에 따라 제품 성능치는 원래 초기시점의 제품 성능치에 비해서 당연히 감소하겠지만, 특정시점에서의 기대 성능치에 대한 실제 제품 성능치와의 차이비교를 해보면, 실제 제품 성능치가 상대적으로 높거나 낮을 수가 있다. 따라서 제품 특성과 시간의 흐름에 따라 다양한 degradation mode가 존재한다. Fig. 2는 시간이 흐름에 따라 성능 손실이 급격히 가속화되는 degradation 상태와 이에 따른 degradation mode를 보여주고 있다.

Degradation mode는 제품 사용 중 열화추이 정도를 시간의 흐름에 따라 평가하기 때문에, 제품이 실제 운용되는 동안의 성능열화를 이해하는데 도움을 준다. 이를 통해 설계자는 제품의 성능저하 문제점을 인식하고 이를 보완하기 위한 재설계 방안을 고려할 수 있다. 또한 제품 사용자는 운용 단계에서의 성능 손실에 대한 behaviour를 분석하여 예지보전 정책을 위한 의사결정에 사용할 수 있다.

제품의 성능은 운용시간이 증가함에 따라 변화하기 때문에, 일정한 시점마다 계산되어야 하고, 이를 degradation mode 값에 반영한다. Degradation mode 값을 정량적 계산하기 위해 아래와 같은 함수를 정의한다.

$$D(t) = \frac{P(t)}{DP(t)}$$

$P(t)$  : 특정 시점  $t$ 에서의 제품 성능 측정치

$DP(t)$  : 제품 설계시 임의의 사용시점  $t$ 에서 예상되어지는 성능 기대치

(1)  $D(t) > 1 + \varepsilon$  : 특정 시점  $t$ 에서 제품 기대 성능치보다 실제제품 성능치가 높은 경우(여기서  $\varepsilon$ 는 1보다 작은 값으로 사례에 따라 경험적인 값을 사용한다.)

(2)  $D(t) = 1$  : 특정 시점  $t$ 에서 기대 성능치와 실제 성능치가 같은 경우

(3)  $D(t) < 1 - \varepsilon$  : 특정 시점  $t$ 에서 제품 기대 성능치보다 실제제품 성능치가 낮은 경우

$D(t_1) < D(t_2)$  :  $t_1$  시점보다  $t_2$  시점에서 성능 열화가 덜하다.

$D(t_1) > D(t_2)$  :  $t_1$  시점보다  $t_2$  시점에서 성능 열화가 심하다.

$D(t)$ 를 통해 제품의 성능 열화는 각 성능 측정

시점에서 degradation mode 값으로 수치화되며, 본식은 step 7에서 제품 운용상태의 위험도를 측정하는데 사용된다.

### Step 5. Estimation of performance

수집된 제품사용 데이터를 이용하여 특정 시점  $t$ 에서의 제품 성능치를 추정한다. 이를 위해 Step 3에서 정의한 성능 함수를 이용한다.

$$P(t) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n; t)$$

### Step 6. Evaluation of degradation function

$D(t)$  함수값을 가지고 특정 운용 기간 동안의 열화상태의 심각도에 따라 아래와 같은 분석을 할 수 있다.

(1)  $\int_{t_1}^{t_2} D(t) dt / (t_2 - t_1) > 1 + \varepsilon$  : 제품 열화가 설계시점에서의 예측치 보다 더디게 진행됨

(2)  $\int_{t_1}^{t_2} D(t) dt / (t_2 - t_1) \approx 1$  : 제품 열화 정도가 적당함

(3)  $\int_{t_1}^{t_2} D(t) dt / (t_2 - t_1) < 1 - \varepsilon$  : 제품 열화가 설계시점에서의 예측치 보다 빨리 진행됨

### Step 7. Analysis of criticality

제품 열화 정도의 위험도(Criticality)를 파악하기 위해, FMEA의 RPN 계산식을 응용하여 아래와 같은 CRIT 지표를 제안한다. CRIT 지표값은 각각, S(Severity), D(Detection), O(Occurrence), OH(Outage), DR(Degradation Rate) 세부지표들의 곱의 형태로 계산한다. 각각의 세부지표는 1에서 10까지의 척도로 평가되어진다. 따라서 CRIT 값의

Table 1 CRIT index

파라미터	설명
Severity (S)	Degree of severity for a failure mode (1 to 10 scale)
Detection (D)	Degree of detection for a failure mode (1 to 10 scale)
Occurrence (O)	Degree of occurrence for a failure mode (1 to 10 scale)
Outage (OH)	Degree of outage time due to a failure mode (1 to 10 scale)
Degradation rate (DR)	Degree of performance loss due to a degradation (1 to 10 scale)

범주는  $1 \leq CRIT \leq 100000$  이다. 각각의 지표에 대한 설명은 Table 1에 나와 있다.

$$CRIT = S \cdot D \cdot O \cdot OH \cdot DR$$

기존의 RPN 지표와는 달리 본 연구에서 제안된 CRIT는 OH와 DR 지표를 추가로 고려한다. DR은 제품이 사용되는 기간 전체의 성능 열화 정도를 반영할 수 있는 지표로, DR을 통해 RPN이 고려하지 못하고 있는 제품 사용시 발생하는 성능 열화의 정도를 고려할 수 있다. DR 지표는 제품의 사용 시간을 고려하여 아래의 식을 통해 계산된다.

$$DR = \sum_{i=1}^n \frac{\int_{t_{i-1}}^{t_i} D_i(t) dt}{t_i - t_{i-1}}$$

DR 지표의 계산은 운용시간 동안 시간에 대한

Table 2 DR index

평가 등급	Rating
Minor / low: The value of degradation mode is higher than 1, which means that the degree of performance loss is less than expected.	1
	2
Moderate: The value of degradation mode is around 1, which means that the tendency of performance loss is similar to the expected.	3
	4
	5
	6
	7
	8
High / Very high: The value of degradation mode is lower than 1, which means that the degree of performance loss goes beyond expected.	9
	10

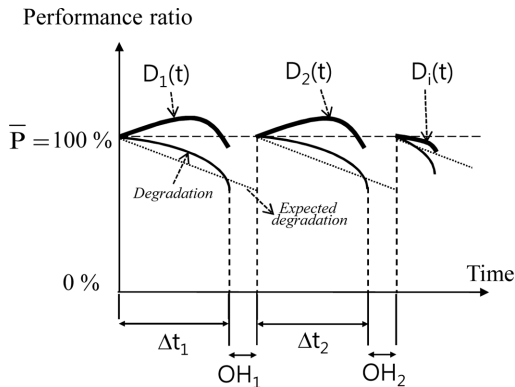


Fig. 3 OH and DR

Table 3 OH index

평가 등급	Rating
Minor / low: The downtime does not cause the work delay.	1
	2
	3
	4
Moderate: The downtime involves some amount of work delay times, but not serious.	5
	6
	7
	8
High / Very high: The downtime causes the long work delay until the product is recovered from the critical damage throughout reparation including part/product changes.	9
	10

$D(t)$ 의 평균으로 계산되며, 일정 기간마다 유지보수가 수행될 경우 이 기간을 제외하고 계산한다. 계산된 DR 지표의 평가 등급은 아래 표에 따른다.

이에 반해 OH는 제품의 평균 유지보수시간 (MTTR, Mean Time To Repair)의 길고 짧음에 따른 영향도를 평가하는 척도로 유지보수 정책에 결정에 영향을 미치는 요소이다.

OH 지표의 평가 등급은 수리 시간의 장단에 따라 아래와 같은 등급을 가진다.

각 세부 지표의 곱으로 계산되는 CRIT는 지표들간의 상관관계를 고려하지 않기 때문에 제품의 위험도를 나타내는 절대적인 척도라기 보다는, 각 제품 및 부품 위험도의 상대적인 중요도에 대한 비교 정보를 제공한다. 따라서, CRIT의 비교를 통해 설계자는 가장 우선적으로 고려해야 할 위험 제품 및 부품의 우선순위를 파악하고 필요한 유지보수 및 설계 변경을 취해야 한다. CRIT 값에 따른 위험 정도를 해석하기 위해 Stamatis<sup>[16]</sup>에 의해 제안된 RPN 지표에 따른 유지보수 필요성 평가 방법을 CRIT에 맞춰 Table 4와 같이 확장하였다. 설계자는 Table 4를 통해 각 지표에 따른 제품 열화와 중요도에 대한 평가하고 이를 보완하기 위한 후속조치에 대한 정보를 파악한다. CRIT 값이 적정수준 이상이 되는 경우에 우선 순위와 degradation의 원인을 고려하여, 각 지표들이 미치는 영향을 바탕으로 이를 보완하기 위한 유지보수 실행 및 제품 설계 수정 등의 후속조치를 취해야 한다.

PDMCA에서는 degradation의 상태는  $D(t)$  값, 사용시간 동안의 degradation의 영향은 CRIT 지표를 이용하여 현재 시점에서의 제품 상태를 판단할

**Table 4** CRIT guideline

Assessment rating					Cause of degradation	Action taken
S	D	O	OH	DR		
1	1	1	1	1	Ideal situation (goal)	N/A
10	1	1	1	1	Failure does not reach user	N/A
1	10	1	1	1	Assured mastery	N/A
1	1	10	1	1	Frequent fails, but not effective	N/A
1	1	1	10	1	Costly, but rare	YES
1	1	1	1	10	Design improvement is required	N/A
10	10	1	1	1	Failure reaches user	YES
10	1	10	1	1	Frequent fails with major impact	YES
10	1	1	10	1	Costly	YES
10	1	1	1	10	Severe problem in design	YES
1	10	10	1	1	Frequent fails, reaches user	YES
1	10	1	10	1	Costly, reaches user	YES
1	10	1	1	10	Reaches user, design improvement is required	YES
1	1	10	10	1	Frequent fails, costly	YES
1	1	10	1	10	Frequent fails, design improvement is required	YES
1	1	1	10	10	Design improvement is required	N/A
10	10	10	1	1	Trouble!	YES
10	10	1	10	1		
10	10	1	1	10		
10	1	10	10	1		
10	1	10	1	10		
10	1	1	10	10		
10	10	10	10	1		
10	10	10	1	10		
10	10	1	10	10		
10	1	10	10	10		
10	10	10	10	10		

**Table 5** PDMCA check sheet template

No.	Item	Description
1	Function	시스템 및 부품의 기능
2	Potential degradation	성능 열화 잠재적 현상
3	Potential causes	성능 열화의 잠재적 원인
4	Potential effects	성능 열화에 의한 잠재적 영향
5	Degree of detection (D)	성능 열화 확인의 어려움
6	Degree of occurrence (O)	성능 열화 현상의 빈도
7	Degree of severity (S)	성능 열화에 따른 심각도
8	Degree of outage (OH)	수리시간의 장단
9	Degree of degradation (DR)	사용시간 동안의 성능열화 추세
10	Degree of criticality (CRIT)	성능열화에 의한 위험정도
11	Degradation function (D(t))	특정 시점의 성능열화 정도

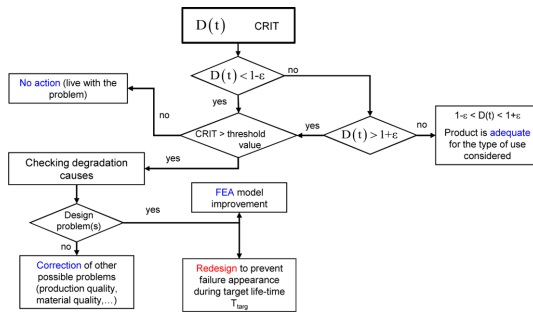


Fig. 4 Decision procedure

다. PDMCA 분석을 수행하기 위해 Table 5와 같은 PDMCA check sheet를 작성한다.

**Step 8. Decision on redesign or maintenance**

직전 단계에서 평가한  $D(t)$ 와  $CRIT$  값을 바탕으로 특정 시점  $t$ 에 제품의 상태를 진단한다. 자세한 의사결정 프로세스는 Fig. 4에 나와있다. 예를 들어,  $D(t)$  값이  $1 - \epsilon$ 보다 작거나 크면서  $CRIT$  값이 임계치 값보다 크다면 degradation의 원인을 면밀히 조사하여, 설계, 제조, 운용상의 문제가 없는지 여부를 면밀히 따져야 한다.

만약 degradation 정도가 적정 허용치 수준이면 제품을 정상 사용하지만 만약 degradation 정도가 기대 기준치 미만인 경우나, degradation 정도가 기대 기준치를 초과하게 되면  $CRIT$ 를 추가 고려하여 살펴본다. 여기서  $CRIT$  값이 임계치를 넘었다고 판단되면, 그 원인이 제품 설계에서 기인한 것인지 아니면 다른 이유에서 생긴 것인지를 파악한다. degradation 정도가 기대 기준치 미만이면, 제품이 과잉 설계(Over-designed)되어 있다고 판단되어 안전계수의 조정과 같은 설계 개선을 시도한다. 반면, degradation 정도가 기대 기준치를 초과하게 된 것이 미흡한 설계(Under-designed)에 기인한 것이라면 설계 개선을 실시한다. 예를 들어, 구조물의 경우는 유한요소해석을 통해 구조물의 특정 위치에 미치는 스트레스 강도와 구조물 설계 파라미터와의 관계를 재 고려함으로써 설계를 개선해 나간다. 동시에 제품 유지보수 차원에서는 예측 보전 스케줄 대안들을 생성한다. 예측보전 스케줄의 주요 변수인 보전의 종류(단순점검, 수리, 수리 및 교체 등), 보전 시간, 예상 보전비용 등을 추정한 후 대안들을 생성하여 보전 엔지니어에게 제시한다.

**4. PDMCA의 활용**

본 장에서는 EU PROMISE 프로젝트의 한 산업체 사례연구로 수행이 되어졌던 내용을 바탕으로 본 연구에서 제안한 PDMCA를 적용해 보았다.

**Step 1. Product definition**

본 사례연구의 대상 제품은 Fig. 5에서 보이는 것과 같이 한 건설 중장비 차량 모델의 lift arm 구조물이다. Lift arm 구조물은 건설 중장비 차량의 본체와 bucket을 연결하는 부위로 외부로부터 힘을 많이 받는 부위 중에 하나이다.

**Step 2. Function and reliability analysis**

Lift arm 구조물은 두 개의 arms과 cross member가 용접되어져서 결합되어져 있다. 보다 자세한 분



Fig. 5 Target product

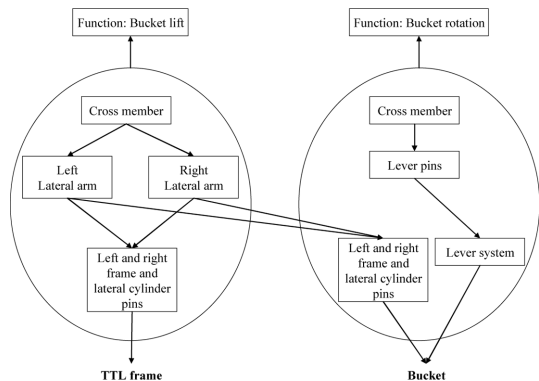


Fig. 6 Functional analysis



석을 위해 Life arm 구조물에 대한 functional analysis를 Fig. 6과 같이 수행하였다. Lift arm 구조물은 결함 및 고장이 자주 발생되어지는 않지만, 고장발생시 제품의 성능에 큰 영향을 미치는 중요부위이다. 전체 수명은 약 8000시간 정도로 알려져 있다.

본 사례 연구에서는 lift arm 구조물의 주요 용접부위에 crack이 번져 나가는 정도를 측정하고 잔여 수명을 예측하기 위해서 CrackFirst<sup>TM</sup> 센서를 부착하여 crack propagation 정도를 12단계로 구분 지어서 모니터링 하였다.

### Step 3. Definition of performance

Lift arm 구조물의 성능 지표는 주요 용접부위의 잔여 수명(remaining life time)으로 정하였다. CrackFirst<sup>TM</sup> 센서에 의해 예측되는 용접부위의 잔여 수명( $T_R$ )은 아래와 같은 함수로 정의할 수 있다.

$T_R(t) = f(\text{CrackFirst}^{\text{TM}}, \text{Mission profile}; t)$	
$T_R(t)$	Estimated remaining life time at time $t$
CrackFirst <sup>TM</sup>	Crack length sensing value to estimate remaining life time (remaining no. of wire, $1 \leq \text{wire} \leq 12$ )
Mission profile	User model considering working environment
$t$	Time of use

제품에 부착된 스마트 장치로부터 수집된 제품 사용 환경 정보를 바탕으로 제품사용에 대한 Mission Profile을 식별한다. Mission Profile은 제품의 사용 특성에 따라서 정의되는 것으로, 중장비 건설 차량인 경우는 사용 중 주된 작업들(Excavating, Loading/Unloading, Dozing, Backdragging 등)이 무엇이고 어떤 비율의 작업들로 중장비 차량이 사용되었는지에 따라, 여러 Mission Profile 타입(User model과 working environment의 조합)들을 정의할 수 있다. 예를 들어, 암석만을 주로 옮기는 중장비 차량, 흙더미를 주로 옮기는 일만 하는 중장비 차량 등 현장에서 중장비 차량이 어떻게 쓰여 졌느냐에 따라 그것에 특화된 Mission Profile을 정의해 볼 수 있다.

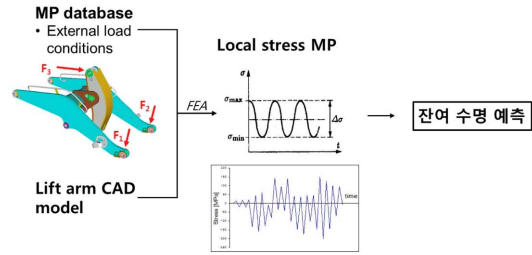


Fig. 7 Remaining life time estimation approach on lift arm structure (Cattaneo<sup>[17]</sup>)

### Step 4. Definition of degradation mode

$$D(t) = \frac{T_R(t)}{T_T(t)}$$

$T_T(t)$  Theoretical remaining life time at time  $t$

용접 부위의 degradation mode 값  $D(t)$ 는 이론적 잔여수명에 대한 CrackFirst<sup>TM</sup> 센서에 의해 측정된 잔여 수명의 비로 정의한다.

이에 반해 이론적 잔여수명  $T_T(t)$ 는 식별되어진 mission profile 타입 하에서 Cattaneo<sup>[17]</sup>이 Lift arm 용접 구조물의 피로 잔여 수명을 예측하기 위해 제안한 균열 진전 식과 잔여수명 식을 사용하여 예측하였다. 이와 관련한 구체적인 설명은 본 연구의 범위를 벗어나므로 참고문헌을 참고하기 바란다. Fig. 7에 간략히 잔여수명예측에 대한 개요가 나와 있다.

### Step 5. Estimation of performance

MOL 사용데이터를 바탕으로 lift arm 구조물의 성능지표인 특정 시점  $t$ 에서의 구조물의 잔여 수명  $T_R(t)$ 를 추정한다. 이를 위해 CrackFirst<sup>TM</sup> 센서에서 수집되어진 데이터와 Mission profile 데이터를 사용하여  $T_R(t)$ 를 추정한다. 본 사례연구에서는 아래와 같은 Mission profile 데이터와 CrackFirst<sup>TM</sup> 센서에 의해 측정된 값을 고려하여 Mission profile type에 특화된 잔여 수명 예측을 수행하였다.

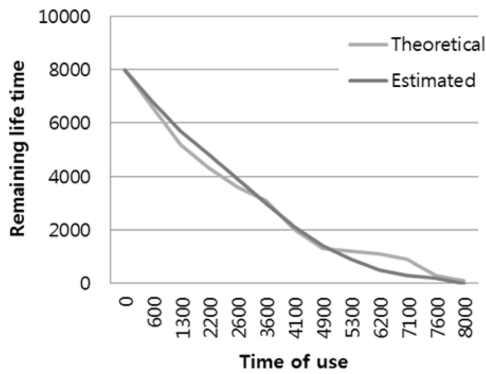
- User model: Waste transfer, forestry, road construction, quarry, ship hold, demolition (building), house construction, and so on.
- Working environment: 작업토양, 지역

### Step 6. Evaluation of degradation function

Lift arm 구조물 용접 부위 성능의 degradation을

**Table 6**  $D(t)$  calculation result

$t$ (hour)	$T_T(t)$	$T_R(t)$	$CrackFirst^{TM}$	$D(t)$
0	8000	8000	0/12	1
600	6600	6800	1/12	1.03
1300	5200	5700	2/12	1.10
2200	4300	4800	3/12	1.12
2600	3600	3900	4/12	1.08
3600	3100	3000	5/12	0.97
4100	2000	2100	6/12	1.05
4900	1300	1400	7/12	1.08
5300	1200	900	8/12	0.75
6200	1100	500	9/12	0.45
7100	900	300	10/12	0.33
7600	300	200	11/12	0.67
8000	100	0	12/12	0



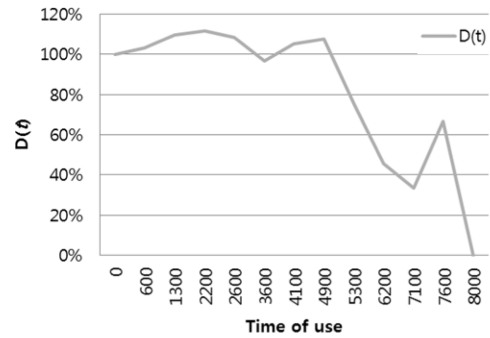
**Fig. 8** Comparison between theoretical remaining life time and estimated remaining life time

평가하기 위해 Fig. 7의 공식(Cattaneo<sup>[17]</sup>)에 의해 예측된 이론적 잔여수명과  $CrackFirst^{TM}$  센서에 의해 예측된 추정 잔여 수명(Fig. 8 참조)과의 비교를 통해  $D(t)$  값을 계산한다. Table 6은 이론적 잔여수명과 예측된 추정 잔여 수명과 이에 따라 계산된  $D(t)$  값에 대한 예를 제공하고 있다.

Table 6에 의해 3600시간 사용 후 lift arm 용접 부위의 degradation mode,  $D(t)$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$D(3600) = \frac{3000}{3100} = 0.97$$

Lift arm의 사용기간 동안 계산된  $D(t)$  값을 사용 시간에 따라 나타낸 것이 Fig. 9이다.



**Fig. 9**  $D(t)$  values according to time of use ( $t$ )

**Step 7. Analysis of Criticality**

$CRIT$ 를 계산하기 위해서 Severity, detection, occurrence, outage, degradation rate에 대한 값을 평가하였다. 마지막 지표인  $DR$ 는 각 측정 시간 사이 동안 step 7에 있는 공식으로 계산이 되며, 3600 시간 사용 후의  $DR$ 는 아래의 식과 같이 계산된다.

$$D(3600) = \frac{3000}{3100} = 0.97$$

Step 7에서 제안된 식에 의하면 lift arm 용접 부위의  $DR$ 를 계산하기 위해서는  $D(t)$  값이 사용시간에 따라 적분이 되어져야 하나, 사례연구에서 사용된  $D(t)$  값은  $CrackFirst^{TM}$  센서에 의해 이산적으로 측정된 값이기 때문에 바로 적분으로 계산하기가 어렵다. 따라서, 근사값으로  $DR$ 를 계산하기 위해 두 측정값 사이에  $D(t)$  값이 선형적으로 변화한다고 가정하고  $D(t)$  값의 면적을 아래와 같이 각 측정 구간 사이 사다리꼴 형태의 합으로 계산하였다. 또한, 본 사례 연구에서는 lift arm의 용접 부위에 대한 유지보수가 실시되지 않았기 때문에  $OH$ 가 고려되지 않아 사용시간 동안의 단일 적분으로  $DR$  값이 계산되었다.

**Table 7** Description of  $CRIT$  index

파라미터	분석 결과
Severity (S)	10 (very severe)
Detection (D)	1 (easy to find by the $CrackFirst^{TM}$ )
Occurrence (O)	2 (slowly happen)
Outage (OH)	9 (long period to repair)
Degradation rate (DR)	2 (calculated by the example equation : 1.06)

$$DR = \frac{((600-0) \times (1) + (600-0) \times (1.03-1) \div 2) + ((1300-600) \times (1.03) + (1300-600) \times (1.10-1.03) \div 2) + ((2200-1300) \times (1.10) + (2200-1300) \times (1.12-1.10) \div 2) + ((2600-2200) \times (1.08) + (2600-2200) \times (1.12-1.08) \div 2) + ((3600-2600) \times (0.97) + (3600-2600) \times (1.08-0.97) \div 2)}{3600} = 1.06$$

각 지표 별 평가 결과는 Table 7과 같다.

Table 7에 따른 CRIT는 아래와 같이 계산된다.

$$CRIT = 10 \times 1 \times 2 \times 9 \times 2 = 360$$

계산된 CRIT 값은 severity와 outage의 지표에서 상당히 높은 값을 가지는 것으로 평가되었다. Table 4의 CRIT 참조 값을 고려하여 분석해보면, 현재는 제품 열화로 인해 당장 문제가 발생할 소지가 많아 보이지는 않지만, severity와 outage의 두 지표가 높은 값을 가지고 있으므로, degradation이 심각히 발생할 경우 상당한 손실비용 초래가 예상된다. 따라서, lift arm 용접 부위의 성능 저하가 설계 이상으로 발생하지 않도록, 관심을 가지고 모니터링 하는 유지보수 정책이 필요하다. CrackFirst™에 의해 측정된 lift arm 용접 부위의 DR지표는 낮은 값을 보여주고 있어 실제 사용기간 동안에 용접부위의 열화가 설계 시 고려된 범위를 크게 벗어나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 하지만, 제품 사용 시간이 증반을 넘어 감에 따라 degradation이 급격히 증가하는 점을 고려하여 후속 제품에서는

이에 대한 개선방안을 적용하는 것이 필요하다.

3600시간 사용후의 제품 degradation에 대한 평가를 하기 위해 아래와 같은 PDMCA 표를 작성할 수 있다.

### Step 8. Decision on redesign or maintenance

사용 후 3600시간이 지날 때의  $D(t)$ 의 값은 0.97를 나타내고 있다. 이는 lift arm의 용접 부위가 설계 시 계획된 degradation 정도를 잘 따르고 있다는 것을 의미한다. 분석된 CRIT 값은 360으로 그리 높은 값은 아니지만 왜 그런 수치 값이 나왔는지 이해해 볼 필요가 있다. CRIT의 세부적인 지표 값을 살펴보면, severity와 outage가 CRIT 값을 증가시키는 주요 요인임을 알 수 있다. 이는 lift arm의 고장 발생시 미치는 중요도와 영향이 크다는 점을 나타내고 있으며, 당장 시급한 사안은 아니지만 다음 제품 모델의 설계 시 엔지니어는 용접 부위의 안전도를 높이고 고장 발생시 수리 시간을 줄일 수 있는 방법을 고려해볼 필요가 있어 보인다. 제품의 운용 중 발생 빈도와 degradation의 특성에서는 설계 시 예상치에 부합하고 있어서 유지보수와 관련해서 따로 특별한 조치가 필요하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 FMEA 기법을 확장한 PDMCA 방법에 대한 연구 소개를 하였다. 제안된 PDMCA 방법은 제품 사용기간 동안에 생성된 제품 사용

Table 8 PDMCA check sheet

No.	Item	Description
1	Function	Lift arm과 cross member 결합
2	Potential degradation	크랙 발생
3	Potential causes	반복적인 stress
4	Potential effects	Lift arm과 cross member의 분리
5	Degree of detection (D)	CrackFirst™ 센서로 정확히 탐지 (1)
6	Degree of occurrence (O)	용접부분의 크랙 발생빈도 작음 (2)
7	Degree of severity (S)	크랙파손시 lift arm의 기능 손실로 작업 불능 (10)
8	Degree of outage (OH)	수리를 위해 중장비의 이동이 필요해 피해가 큼 (9)
9	Degree of degradation (DR)	운용중 degradation 상태 양호함 (2, DR=1.06)
10	Degree of criticality (CRIT)	문제발생시 비용이 많이 발생됨 (360)
11	Degradation function (D(t))	크랙발생 범위 양호 (0.97)

및 환경에 관한 데이터를 분석하고 제품 열화상태를 평가하여 이를 제품 유지보수 및 설계 향상에 적용하고, 궁극적으로 제품의 성능 향상을 위한 적절한 의사결정을 수행하는데 도움을 주는 프레임워크라고 할 수 있다.

날로 중요도가 높아져 가는 기업 주요 자산관리에 있어서 첨단기술을 활용하여 수집된 제품사용 정보를 바탕으로 제품이 사용되는 동안의 성능열화를 분석하여 제품 재설계 및 유지보수 운용에 있어서 필요한 의사결정을 수립하는 방법론을 제시했다는 점에서 본 연구의 의의가 있다고 본다.

### 감사의 글

본 연구는 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(20120002426). 본 연구의 사례 데이터들은 EU FP6 PROMISE 프로젝트 결과물을 기반으로 하였음.

### 참고문헌

- Xu, K., Tang, L. C., Xie, M., Ho, S. L. and Zhu, M. L., 2002, Fuzzy Assessment of FMEA for Engine Systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 75(1), pp. 17-29.
- Cesar, A., Guimaraes, F., Marcelo, C. and Lapa, F., 2004, Fuzzy FMEA Applied to PWR Chemical and Volume Control System, *Progress in Nuclear Energy*, 44(3), pp. 191-213.
- Hu, A. H., Hsu, C. W., Kuo, T. C. and Wu, W. C., 2009, Risk Evaluation of Green Components to Hazardous Substance Using FMEA and FAHP, *Expert Systems with Applications*, 36(3), pp. 7142-7147.
- Thomas, V., Neckel, W. and Wagner, S., 1999, Information Technology and Product Lifecycle management, *Proceedings of IEEE International Symposium on Electronics and Environment*, pp. 54-57.
- McFarlane, D. et al., 2003, Auto ID Systems and Intelligent Manufacturing Control, *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 16, pp. 365-376.
- Parlikad, A. K. et al., 2003, *The Role of Product Identity in End-of-life Decision Making*, Cambridge: Auto-ID Center, Institute for Manufacturing, White Paper.
- Kiritsis, D., Bufardi, A. and Xirouchakis, P., 2003, Research Issues on Product Lifecycle Management and information tracking using smart embedded systems, *Advanced Engineering Informatics*, 17, pp. 189-202.
- PROMISE Project Consortium, 2004, *PROMISE-Integrated Project: Annex I-Description of Work*, Technical Report DoW 1.0.
- Jun, H. B., 2010, A Study on the Concept of Product Lifecycle Management and Its Applications for Each Lifecycle Phase, *Entrue Journal of Information Technology*, 9(1), pp. 157-167.
- Lee, J., et al., 2006, Intelligent Prognostics Tools and e-maintenance, *Computers in Industry*, 57(6), pp. 476-489.
- Wilson, R. M., 2006, Design for Maintenance, The 9th Institution of Engineering and Technology Professional Development Course on Electric Traction Systems, Manchester, UK, pp. 385-407.
- Swanson, D. C., et al., 2000, Prognostic Modelling of Crack Growth in a Tensioned Steel Band, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(5), pp. 789-803.
- Djurdjanovic, D., et al., 2003, Watchdog Agent - An Infotronics-based Prognostics Approach for Product Performance Degradation Assessment and Prediction, *Advanced Engineering Informatics*, 17(3-4), pp. 109-125.
- Jayaram, J. S. R. and Girish, T., 2005, Reliability Prediction Through Degradation Data Modeling Using a Quasi-likelihood Approach, *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 193-199.
- Iung, B., et al., 2008, Degradation State Model-based Prognosis for Proactively Maintaining Product Performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), pp. 49-52.
- Stamatis, D. H., 2003, *Failure Mode Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, American Society for Quality Press
- Cattaneo, Cedric, 2006, *Development of a New Approach for Product Design Improvement, Considering Middle-of-life (MOL) Data*, Master thesis, Dept. of Mechanical Engineering, EPFL, Switzerland.



### 신 중 호

연세대학교 기계공학과에서 학사를 마쳤으며, 한국과학기술원 산업공학과에서 생산 및 제조시스템 분야로 석사학위를 취득하고, 스위스 연방 로잔공대(EPFL)에서 PLM 연구를 통해 박사학위를 취득하였다. KIST 유럽연구소에서 선임연구원으로 2년간 재직 후, 현재 UNIST에서 선임연구원으로 근무 중이다. 주요 연구 관심분야는 제조 IT 시스템, 지능형 유지보수 시스템, PLM 등이다.



### 전 홍 배

연세대학교 응용통계학과에서 학사를 마쳤으며, 한국과학기술원 산업공학과에서 석사 및 박사학위를 취득 하였다. 삼성SDS를 거쳐 박사 후 연구과정으로 스위스 연방 로잔공대(EPFL)에서 PLM관련 EU PROMISE 프로젝트(2004.11-2008.2)를 수행하고, 2008년 3월부터 홍익대학교 산업공학과 부교수로 재직중이다. 주요 연구 관심분야는 RFID, PLM, 예지보전, 재제조 최적화 등이다.



### Paul Xirouchakis

Paul Xirouchakis 교수는 MIT에서 박사학위를 마쳤으며, 현재 스위스 연방 로잔공대(EPFL) CAD/CAM 연구실을 이끌고 있다. 주요 관심 분야는 product modeling and reasoning for manufacture/assembly/remanufacture, manufacturing information systems, informatics for planning and scheduling for manufacture/assembly/remanufacture 등이 있다.



### Dimitris Kiritsis

Dimitris Kiritsis 교수는 그리스 Patras 대학에서 기계공학 석박사학위를 마쳤으며, 1989년 이후 스위스 연방 로잔공대(EPFL) 기계공학과에 재직중에 있다. PROMISE를 비롯한 많은 EU 프로젝트들의 수행 리더로서 활동하고 있다. 주요 연구 관심분야는 integrated product design, computer aided process planning modeling, closed loop product lifecycle modeling 등이 있다.

### Cedric Cattaneo

Cedric Cattaneo씨는 스위스 연방 로잔공대(EPFL) 기계공학과에서 학사 및 Diploma 학위를 취득했으며, 현재는 스위스 SAPAL 회사에서 엔지니어로 근무하고 있다. 주요 연구 관심분야는 PLM, CAD/CAE 등이다.