

# 와이블 지연시간 모형 하에서의 FMEA를 위한 고장원인의 위험평가

권혁무\* · 이민구\* · 홍성훈\*\*

부경대학교 시스템경영공학부 · \*충남대학교 정보통계학과 · \*\*전북대학교 산업정보시스템공학과  
(2018. 2. 19. 접수 / 2018. 3. 20. 수정 / 2018. 5. 14. 채택)

## Risk Evaluation of Failure Cause for FMEA under a Weibull Time Delay Model

Hyuck Moo Kwon<sup>†</sup> · Min Koo Lee<sup>\*</sup> · Sung Hoon Hong<sup>\*\*</sup>

Department of Systems Management and Engineering, Pukyong National University

<sup>\*</sup>Department of Information and Statistics, Chungnam National University

<sup>\*\*</sup>Department of Industrial and Information Systems Engineering, Chonbuk National University

(Received February 19, 2018 / Revised March 20, 2018 / Accepted May 14, 2018)

**Abstract :** This paper suggests a weibull time delay model to evaluate failure risks in FMEA(failure modes and effects analysis). Assuming three types of loss functions for delayed time in failure cause detection, the risk of each failure cause is evaluated as its occurring frequency and expected loss. Since the closed form solution of the risk metric cannot be obtained, a statistical computer software R program is used for numerical calculation. When the occurrence and detection times have a common shape parameter, though, some simple results of mathematical derivation are also available. As an enormous quantity of field data becomes available under recent progress of data acquisition system, the proposed risk metric will provide a more practical and reasonable tool for evaluating the risks of failure causes in FMEA.

**Key Words :** FMEA, risk evaluation metric, weibull time delay model

### 1. 서론

FMEA에서 위험우선순위 평가지표로 사용되는 RPN (risk priority number)은 여러 가지 한계점을 지니고 있어 많은 학자들이 그 단점을 보완하기 위한 연구를 하였다. Liu 등<sup>1)</sup>은 FMEA에서 위험평가에 관련된 과거의 연구들을 종합하여 정리하고 논평하였다. FMEA에 대한 대부분의 과거 연구들은 고장원인 발생시점과 실제 고장발생시점의 차이를 고려하지 않고 있다. 그러나 산업현장에서 실제 현상을 살펴보면 대부분의 경우 고장 발생 이전에 적어도 하나 이상의 원인이 선행되는 것이 보통이다. 또한, 고장과 그 원인의 발생 사이에는 어느 정도의 시간 차이가 있게 되며 고장원인의 탐지와 조치 사이에도 마찬가지로이다. 고장위험의 평가에서 이와 같은 시간의 영향을 고려한 연구들은 소수에 불과하다. Rhee와 Ishii<sup>2)</sup>은 특정시스템의 설계 대안들을

분석하기 위해 전체 수명기간의 원가를 고려한 FMEA를 소개하였다. Kwon 등<sup>3)</sup>은 고장과 원인발생에 대해 동질적 포아송 과정을 가정하고 임무기간이 주어져 있을 경우의 기대손실모형을 제안하였다. 그러나, 이 연구들도 FMEA에서 고장 발견과 조치의 지연에 따른 영향을 위험평가에 반영하지 않고 있다. 현실적으로 영향의 심각도는 고장이나 그 원인이 아무런 조치 없이 방치되는 시간의 길이에 영향을 받게 될 것이다. 예를 들어 방사능이나 독극물의 누출을 초래하는 고장일 경우 즉시 찾아내어 조치하지 않는다면 시간 경과에 따른 손실과 위험이 증가하게 된다.

이와 같은 상황을 고려한 연구로서 Kwon 등<sup>4)</sup>은 고장으로 인해 임무수행이 불가능한 기간에 대해 2차손실함수를 적용하여 최적 검사주기 결정 문제를 다루었다. Jang 등<sup>5)</sup>은 FMEA에서 고장원인의 심각도가 발생 및 탐지시간에 의존하는 경우의 위험평가방안을 제시하였

<sup>†</sup> Corresponding Author : Hyuck Moo Kwon, Tel : +82-51-629-6480, E-mail : iehmkwon@pknu.ac.kr  
Department of Systems Management and Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

다. Jang 등<sup>6)</sup>은 여러 고장원인들이 2단 계층구조를 가질 경우의 위험평가모형을 제안하였다. 이러한 연구들은 모형의 단순화를 위해 고장 및 원인의 발생과 탐지에 관련된 시간이 모두 지수분포를 따른다고 가정하고 있다. 즉, 이 연구들은 모형의 단순화를 위해 고장원인 발생률이나 탐지율이 시점에 상관없이 일정하다는 가정에 근거함으로써 다소 비현실적이라는 한계점이 있다.

이 연구에서 고려하는 고장발생의 과정은 Jang 등<sup>5)</sup>과 같이 고장은 반드시 그 원인 중 하나 이상이 먼저 발생한 후에 발생하고 그 고장원인을 찾아내어 조치하는 데는 어느 정도의 시간이 필요한 상황을 전제로 한다. 고장원인과 고장의 발생에 따른 비용과 손실이 클수록 더 심각한 영향을 미치는 것으로 간주하고 기대 손실로써 위험의 크기를 평가한다. 손실 함수로서는 상수, 일차 그리고 이차 함수의 세 가지 유형을 사용하여 위험평가척도를 도출한다. 이 연구에서는 Jang 등<sup>5)</sup>의 연구를 고장 및 그 원인의 발생과 탐지 시간의 분포를 보다 일반적인 와이블 분포로 확장하여 결과를 도출하여 분석한다. 고장 및 그 원인의 발생과 탐지 시간이 와이블 분포를 따를 경우 위험평가척도가 닫힌 형태의 식으로 유도되지 않는다. 다만, 형상모수가 동일하고 손실함수가 상수 혹은 일차일 때에는 위험평가척도가 비교적 단순한 형태의 식으로 정리된다. 본 논문의 2절에서는 모형을 설정하고 위험평가척도의 산출과정을 서술한다. 3절에서는 위험평가척도의 계산을 예시하고 분포 모수값과 비용계수의 변화에 따른 위험평가척도의 민감도 분석을 실시한다. 4절에서 FMEA 적용 예를 보인 후, 5절에서 몇 가지 논점을 제시하고 결론을 맺는다.

## 2. 기대 손실 모형에 의한 위험평가

### 2.1 고장발생 메커니즘과 손실함수

시스템이나 부품이 고장을 유발하는 원인에 노출되었다고 하자. 만약 이 원인에 대해 아무런 조치를 취하지 않고 방치한다면 시간이 경과함에 따라 고장이 발생하게 된다. 이와 같은 고장발생과정은 고장원인의 발생 시점으로부터 고장발생시점까지의 경과시간 T로 묘사할 수 있다. 또한 고장 원인 발생 시점으로부터 이를 탐지하게 되는 시점까지의 경과시간을 D라 한다면 고장 발생 과정을 Fig. 1과 같이 도시할 수 있을 것이다<sup>5)</sup>. 단, 여기서는 고장 원인 발견 즉시 조치가 이루어진다고 가정한다. 그러면 고장 발생시간 T와 원인 발견 및 조치 시간 D를 토대로 고장원인에 대한 위험을 평가할 수 있는 모형을 설정할 수 있다.

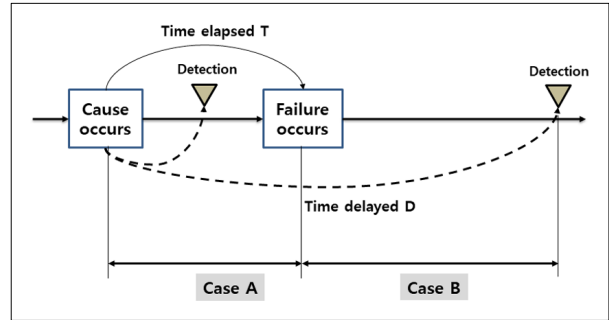


Fig. 1. The Time-oriented failure mechanism.

만약 Fig. 1의 Case A에서와 같이 실제 고장이 발생하기 전에 고장원인을 찾아내어 조치할 경우 그 고장원인의 영향은 그다지 크지 않을 것이다. 그러나 Case B와 같이 고장이 발생하고 난 뒤에 그 원인을 찾아 조치하는 경우에는 훨씬 더 심각한 영향을 가지게 될 것이다. 만약 독극물이나 방사능 누출에 관련된 고장이라면 그 영향은 시간의 경과에 따라 재앙에 이르는 수준이 될 수도 있다. 따라서 고장원인에 따른 영향의 크기는 수반되는 비용이나 손실로써 평가할 수 있을 것이며 이것은 다시 T와 D의 적절한 함수로서 모형화할 수 있을 것이다.

여기서는 상수, 일차 그리고 이차 함수의 세 가지 유형의 손실을 고려한다. 상수 손실 모형은 고장 발생 시 일정 크기의 손실이 발생하는 경우를 전제하고 있다. 실제 고장이 발생하기 전에 존재하는 고장원인을 발견하여 조치할 경우에는 일정 금액의 조치비용만 소요되고 실제 고장이 발생된 이후에는 고장 원인에 대한 조치비용을 포함하여 사후처리비용까지 훨씬 더 큰 손실이 발생할 것이므로 손실함수는 다음과 같이 모형화할 수 있다.

$$L_c = \begin{cases} a, & 0 < D \leq T \\ a + b_c, & T < D \end{cases} \quad (1)$$

일차 손실 모형은 고장발생으로 인한 손실이 미탐지 시간의 길이에 비례하는 경우에 적합한 모형이다. 실제 고장발생 이전에 고장을 유발할 수 있는 원인이 존재하는 것을 발견하고 조치한다면 고장원인에 대한 조치비용만 부담하면 될 것이다. 실제 고장 발생 이후에는 미탐지 시간의 길이에 비례하여 손실이 증가할 것이므로 손실 함수는

$$L_l = \begin{cases} a, & 0 < D \leq T \\ a + b_l(D - T), & T < D \end{cases} \quad (2)$$

와 같이 모형화된다.

이차 손실 모형은 고장발생으로 인한 손실이 미탐지 시간의 길이의 제곱에 비례하는 경우에 적합한 모형이다. 실제 고장발생 이전에 고장을 유발할 수 있는 원인이 존재하는 것을 발견하고 조치할 경우에는 손실이 상수 모형 혹은 일차 모형과 동일하게 될 것이다. 실제 고장 발생 이후에는 미탐지 시간의 길이의 제곱에 비례하여 손실이 증가하므로 손실 함수는

$$L_q = \begin{cases} a, & 0 < D \leq T \\ a + b_q(D - T)^2, & T < D \end{cases} \quad (3)$$

와 같이 모형화될 수 있다.

## 2.2 기대 손실

고장원인이 발생할 경우 그에 수반되는 위험의 크기는 고장원인 발생으로 인해 유발되는 손실의 기댓값으로 평가하는 것이 합리적일 것이다. 고장원인 자체의 발생 빈도에 대해서는 차후에 고려하기로 하고 여기서는 고장원인이 발생했을 경우 수반되는 손실의 기댓값을 구하는데 집중하기로 한다. 식 (1), (2), (3)으로 주어진 손실함수는 모두 원인 발생 후 고장발생시간  $T$ 와 고장원인 탐지시간  $D$ 에 의존하는 확률변수이다. 따라서 정량적인 위험평가척도로서 의미 있는 하나의 수치로 요약하려면 그 기댓값을 취하여 상수 값으로 정의해주는 것이 좋을 것이다.

만약 고장발생시간  $T$ 와 고장원인 탐지시간  $D$ 의 확률분포가 주어진다면 손실  $L$ 의 기댓값을 구할 수 있다. 여기서는  $T$ 와  $D$ 가 고장 관련 분포로서 널리 사용되는 와이블분포를 따른다는 가정 하에 손실  $L$ 의 기댓값을 구하기로 한다. 그러면  $T$ 와  $D$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$f_T(t) = \beta \lambda^\beta t^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta}, \quad t > 0 \quad (4)$$

$$F_T(t) = 1 - e^{-(\lambda t)^\beta}, \quad t > 0 \quad (5)$$

$$f_D(d) = \alpha \mu^\alpha d^{\alpha-1} e^{-(\mu d)^\alpha}, \quad d > 0 \quad (6)$$

$$F_D(d) = 1 - e^{-(\mu d)^\alpha}, \quad d > 0. \quad (7)$$

각 손실함수의 유형에 따른 기댓값은 비용계수와 분포모수의 함수 꼴로 단순하게 정리될 수 없고 식 (8), (9), (10)과 같이 적분을 포함한 식의 형태로 나타난다. 따라서 비용계수나 모수 값이 주어진다고 하더라도 기대손실 값을 손으로 쉽게 구할 수는 없으며 컴퓨터 프로그램을 사용하여 수치적으로 계산할 수 있다.

$$E(L_c) = a + b_c \int_0^\infty f_T(t) [1 - F_D(t)] dt \quad (8)$$

$$E(L_l) = a + b_l \int_0^\infty f_T(t) \int_t^\infty [1 - F_D(u)] du dt \quad (9)$$

$$E(L_q) = a + 2b_q \left\{ \int_0^\infty f_T(t) \int_t^\infty u [1 - F_D(u)] du dt \right. \\ \left. - \int_0^\infty t f_T(t) \int_t^\infty [1 - F_D(u)] du dt \right\} \quad (10)$$

고장발생시간  $T$ 와 고장원인 탐지시간  $D$ 의 형상모수가 같을 경우에는 식 (8), (9), (10)을 식 (11), (12), (13)과 같이 훨씬 더 간단한 형태로 정리할 수 있다. 즉,  $\alpha = \beta$ 라고 한다면

$$E(L_c) = a + b_c \left( \frac{\lambda^\beta}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right), \quad (11)$$

$$E(L_l) = a + b_l \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \left\{ \frac{1}{\mu} - \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\}, \quad (12)$$

$$E(L_q) = a + b_q \left\{ \frac{1}{\mu^2} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) - \frac{2}{\mu\beta} G(\lambda, \mu, \beta) \right\} \quad (13)$$

과 같다. 단,

$$\Gamma(s) = \int_0^\infty y^{s-1} e^{-y} dy \quad (14)$$

는 감마함수이고

$$G(\lambda, \mu, \beta) = \int_0^\infty e^{-(\lambda t)^\beta} \Gamma \left( \frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) dt \quad (15)$$

는 적분결과를 단순한 형태로 나타내기 위해 새로이 도입된 함수이다. 또한,

$$\Gamma(s, x) = \int_x^\infty y^{s-1} e^{-y} dy \quad (16)$$

는 상위 불완전 감마함수를 나타낸다. 식 (12) 및 (13)에 대한 자세한 유도과정은 부록 (A1)과 (A2)에 나와 있다.

## 2.3 위험평가척도의 정의 및 산출 방법

FMEA는 예방을 목적으로 하는 기법이므로 각 고장원인으로 인해 초래될 수 있는 위험을 평가할 필요가 있다. 고장원인에 따른 위험은 그 고장원인이 얼마나 자주 발생하는가와 고장원인이 발생했을 때 그로 인해

수반되는 손실의 크기의 두 가지 요소에 의해 결정된다. 따라서 위험평가척도는 이 두 가지 요소를 결합하여 정의하는 것이 타당할 것이다. 2.2절에서 고장원인이 발생했을 때 그로 인해 유발되는 손실의 기댓값을 구했으므로 고장원인의 절대적인 위험을 구하려면 고장원인의 발생확률을 구하는 것이 타당할 것이다. 그런데 고장원인의 발생확률은 기간이 주어지지 않으면 구할 수 없으므로 고장원인의 발생빈도로 대신한다. 즉, 고장원인의 단위시간당 발생률을  $\tau$ 라 할 때, 위험평가지표(risk evaluation metric)  $REM$ 을

$$REM = \tau E(L) \quad (17)$$

으로 정의하기로 한다.

$REM$ 을 이용하여 각 고장에 대한 원인별로 수반되는 위험을 평가하려면 고장발생시간  $T$ 와 고장탐지시간  $D$ 의 분포에 관련된 모수  $\lambda, \mu, \beta$ 의 값을 알아야 한다. 만약 충분한 데이터가 있다면 최우추정법 등의 통계적 방법을 사용하여 이들 모수값들을 추정할 수 있을 것이다. 전문가나 실무자들의 사전지식이 있다면 베이지안 추정법 등도 사용할 수 있을 것이다. 전통적인 FMEA에서도 RPN계산을 위해 필요한 발생도나 검출도를 결정할 때 어느 정도의 정보가 주어져 있다는 것을 전제로 한다. 만약 발생도나 검출도에 대한 지식이 전혀 없다면 FMEA 워크시트에서 1부터 10까지의 수치를 부여하는 것 자체가 불가능하다. 만약 데이터가 충분하지 않을 경우에는 가속수명시험 등을 통해 얻은 데이터로부터 모수의 추정치를 구할 수도 있다.

다음으로 손실함수의 유형과 비용계수의 값을 정할 수 있어야 한다. 만약 고장이 발생하기 전에 고장원인이 발견된다면 그 고장원인을 제거하는데 관련된 비용만 소요될 것이며 이것은 바로  $a$ 에 해당된다.  $a$ 는 실제 고장과는 무관하게 고장원인에 대한 조치비용이므로 고장원인만 같으면 어느 유형의 손실함수이든지 상관 없이 똑같은 값을 가지게 될 것이다. 반면에 고장조치 지연시간에 대한 비용계수는 고장원인이 같다고 하더라도 어느 유형의 손실함수를 채택하는가에 따라 달라진다. 예를 들어 고장원인에 대한 조치 비용이 5이고 실제 고장 발생 후 10시간 동안 고장원인을 찾지 못하여 총 누적손실이 200에 이르렀다고 하자. 상수 손실함수일 경우  $a=5, b_c=195$ 가 될 것이지만 일차 손실함수일 경우는  $5+10b_l=200$ 로부터  $b_l=19.5$ 가 될 것이며 이차 손실함수일 경우는  $5+10^2b_q=200$ 으로부터  $b_q=1.95$ 가 될 것이다. 손실함수의 유형은 고장이 발생할 경우 어떤 방식으로 손실 혹은 위험 상황이 전개되는가를 살펴

봄으로써 결정할 수 있을 것이다. 예로서 고장이 독극 물이나 방사능 유출을 초래하는 경우와 같이 시간이 갈수록 위험의 정도가 급속도로 증가할 때에는 이차 손실함수가 적합할 것이다. 반대로 한번 손실이 발생하면 더 이상의 피해가 없는 고장일 경우는 상수 손실함수가 적합할 것이다.

마지막으로 고장원인의 발생빈도는 제품이나 부품의 사용 수명기간 동안 얼마나 많이 발생할 것인가를 유추하여 설정할 수 있다. 예를 들어 어떤 환경적 요인이 고장원인으로 작용한다면 제품이나 부품이 사용기간 동안에 얼마나 많이 그와 같은 환경적 요인에 노출될 수 있는가를 고려하여 고장원인의 발생빈도를 설정할 수 있다. 이와 같이 각 고장 및 그 원인별로 필요한 모수 값과 비용계수들이 정해지면  $REM$ 을 계산할 수 있고 그 결과 값을 비교함으로써 고장원인별 비중과 예방조치 우선순위를 결정할 수 있다.

### 3. REM 계산과 민감도 분석

#### 3.1 REM 계산 예시

액체 성분의 물질을 공급하거나 이송하는 펌프 시스템의 구성품인 회전샤프트에 장착되는 기계적 샤프트 씰을 생각해보자. 관통샤프트가 장착되는 펌프의 경우 완벽한 봉인이 매우 어렵기 때문에 누출을 최소화하는 것은 펌프업체에서는 중요한 과제이다. Grundfos의 기술 문서에 의하면 펌프시스템 고장의 39%는 샤프트 씰의 고장에 기인된다<sup>7)</sup>. 기계적 샤프트 씰에는 윤활고장, 오염고장, 마모고장, 설치고장, 그리고 시스템고장 등 몇 가지 전형적인 고장유형이 있는데 이 중 윤활고장을 살펴보자. 샤프트 씰에는 수많은 형태가 있으나 가장 기본적인 유형은 회전부를 고정부에 결합시킨 형태의 씰이다. 적절하게 설계되어 장착되었을 경우 회전부는 두께 0.00025 mm의 윤활층 위에 위치한다. 만약 이 윤활층이 지나치게 두꺼우면 펌프 속의 이송액체가 누출되고, 지나치게 얇으면 과도한 마찰로 인해 접촉면이 과열되어 씰 고장이 유발될 수 있다. 펌프 시스템에 윤활유가 제대로 공급되지 않아 윤활유 없이 펌프가 가동될 경우 고온의 마찰열이 발생하게 되어 냉각시스템이 가동된다고 하더라도 온도 상승과 냉각의 주기적인 스트레스가 가해지면서 씰 표면에 미세한 균열이 발생한다. 초기의 미세한 균열은 시간의 경과에 따라 성장함으로써 누출(고장)이 발생한다.

윤활유 공급 부족(고장원인)은 평균적으로 매년 5회 정도 ( $\tau=5$ ) 발생한다고 하고 윤활유 공급 부족 상태에서  $T$  시간 계속 작동되면 고장에 이르게 된다고 하자.

또한 전자 센서에 의한 샤프트 쉘 동작 상태의 지속적인 모니터링으로 윤회용 공급부족상태는 발생 후  $D$ 시간 만에 탐지된다고 하자.  $T$ 는 척도모수  $10(\lambda=0.1)$ , 형상모수  $3(\beta=3)$ ,  $D$ 는 척도모수  $2(\mu=0.5)$ , 형상모수  $3(\alpha=3)$ 인 와이블분포를 따른다고 하자.

이제  $a=20$ 이고 고장조치 지연시간의 비용계수가 세 가지 유형의 손실함수에 대해 모두 100일 경우 위험평가지표인  $REM$ 을 통계 소프트웨어 R프로그램을 사용하여 계산해보면 다음과 같다.

$$REM = \begin{cases} 103.97, & \text{상수 손실모형} \\ 102.37, & \text{일차손실모형} \\ 102.40, & \text{이차손실모형} \end{cases}$$

### 3.2 분포모수와 비용계수의 영향 분석

앞 절에서  $a=20$ 이고 고장조치 지연시간의 비용계수가 100일 경우에 세 가지 손실모형의  $REM$ 을 계산하였다. 지연시간과 관련 없는 비용계수  $a$ 의 경우에는 손실모형이 다르더라도 동일한 값을 갖는다는 것이 그다지 무리한 가정이 아닌 것으로 보인다. 왜냐 하면 이항은 실제 고장 발생 전에 고장원인을 제거하는 경비이므로 고장 이후의 손실 유형과는 무관하기 때문이다. 그러나 고장발생 후에 조치의 지연에 따른 손실을 결정하는 계수인  $b_c, b_t, b_q$ 의 경우에는 손실모형에 따라 그 값이 서로 상당히 다를 수 있다.

한편, 분포 모수의 영향을 검토하기 전에 먼저 고장원인이 생긴 후 실제 고장발생까지 평균시간과 고장원인을 탐지하여 조치할 때까지의 평균시간을 구하면,  $T$ 와  $D$ 는 와이블분포를 따르므로 각각

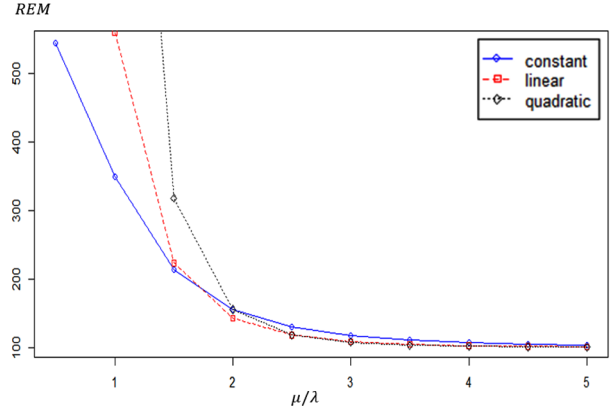
$$E(T) = \frac{1}{\lambda} \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (18)$$

$$E(D) = \frac{1}{\mu} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha} + 1\right) \quad (19)$$

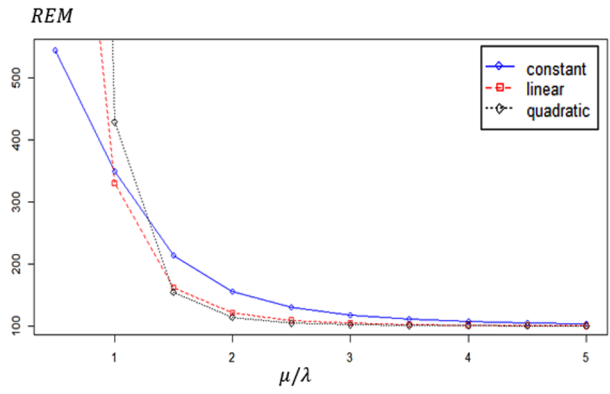
이 된다. 따라서  $\mu/\lambda$ 는 고장발생 대비 얼마나 신속하게 고장원인을 탐지하여 조치하는가에 관계된 값이라 할 수 있다.

이제 비용계수와 분포의 형상모수의 영향을 검토하기 위해 서로 다른  $(b_c, b_t, b_q)$ 와  $(\beta, \alpha)$ 의 값에 대해  $\mu/\lambda$  값의 변화에 따라  $REM$ 의 값이 어떻게 변하는지 살펴보자. Fig. 2는 다른 조건은 3.1절의 예시와 동일하게 하고  $(b_c, b_t, b_q)$ 의 값이  $(100, 50, 25)$  및  $(100, 25, 6.25)$ 일 경우에 대해  $REM$ 의 변화를 살펴본 것이다.

Fig. 2에서  $b_c, b_t, b_q$ 이 어떤 조합이든  $\mu/\lambda$ 의 값이 크면 손실모형의 유형에 상관없이  $REM$ 값이 비슷하게 되는데 이것은 당연한 결과라 할 수 있다. 반면에  $\mu/\lambda$



(a)  $(b_c, b_t, b_q) = (100, 50, 25)$



(b)  $(b_c, b_t, b_q) = (100, 25, 6.25)$

Fig. 2. REMs with different values of  $(b_c, b_t, b_q)$ .

값이 작을 때에는 손실모형에 따른  $REM$ 의 값이 큰 차이를 보이고 있으므로 올바른 손실모형의 선택이 중요하다라는 것을 알 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이  $\mu/\lambda \geq 2$ 이면 손실모형에 따른 위험 차이는 크지 않은 것으로 보인다. 예의 경우는  $T$ 와  $D$ 의 형상모수가 똑같이 3이므로  $\mu/\lambda \geq 2$ 는 고장원인이 실제 고장 발생보다 평균 2배 이상 신속하게 탐지됨을 의미한다.

다음으로 고장발생시간과 고장원인 탐지시간의 형상모수의 차이에 따른 위험의 변화정도를 살펴보았다. Fig. 3은  $(\beta, \alpha) = (3.0, 1.0)$  및  $(1.0, 3.0)$ 일 경우에 대해 1차 및 2차 손실모형의  $REM$ 값이 상수모형의  $REM$ 값의 몇 배가 되는지 계산하여 도시한 것이다. 먼저 이 경우는  $\mu/\lambda$ 가 고장발생에 비해 고장원인을 얼마나 신속하게 탐지하여 조치하는가를 나타내는 척도가 아니라 주의할 필요가 있다. 왜냐 하면 식 (18), (19)에서 알 수 있듯이 고장발생 혹은 고장원인 탐지에 있어서 형상모수도 평균시간을 결정하는 중요요소인데  $\beta \neq \alpha$ 이면  $\mu/\lambda$ 가 고장발생평균시간 대비 고장원인탐지평균시간이 될 수 없기 때문이다. Fig. 3의 (a)와 (b)에서 보듯이 형상모수의 값이 다를 경우  $\mu/\lambda$ 이 6이상

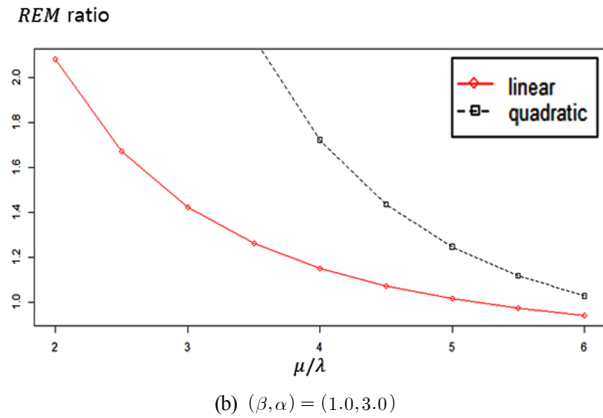
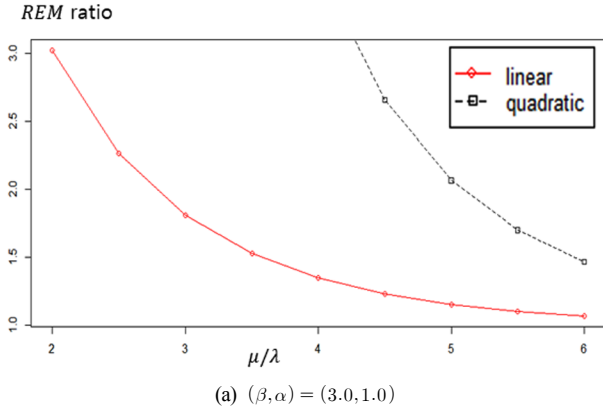


Fig. 3. REM ratios with different shape parameters.

되는 경우에도 REM 비율에 꽤 차이가 있어서 손실모형별 위험에 상당히 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 고장발생시간과 고장원인 탐지시간의 형상모수에 차이가 있을 경우에는 손실모형의 정확한 선택이 아주 중요하다는 것을 의미한다.

### 4. FMEA 적용

#### 4.1 FMEA 적용을 위한 서식

고장은 각각 고장유발 가능성이 다른 여러 원인들 중 하나에 의해 유발될 수 있고 각 고장원인 역시 발생률

이 모두 다를 수 있다. 또한 각 고장원인을 찾아 조치하는데 요구되는 시간도 다 다르게 되므로 어떤 부품이나 제품의 전체적인 고장 메커니즘을 살펴보려면 FMEA와 같은 서식을 사용하면 효과적일 것이다. Table 1은 이와 같은 목적을 위해 전통적인 FMEA 서식을 약간 수정한 것이다. Table 1은 고장유형  $F_i$ 의 원인으로 세 가지  $C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}$ 가 있는 경우를 예시한 REM 워크시트를 보여주고 있다. 물론 실제로는 제품이나 부품에 따라 각 고장유형에 따른 원인과 각 원인에 따른 고장 발생시간 그리고 탐지시간이 보다 많거나 적을 수도 있다. Table 1에서는 REM의 구체적인 계산과정은 나타내지 않으며 각 고장유형과 그에 대한 고장원인들과 영향에 대한 정보를 종합하여 보여주는 한편 REM은 계산된 결과를 요약하여 보여준다. 즉, Table 1은 특정 제품이나 부품의 고장유형들과 고장원인들을 망라하여 정리하고 각 고장원인에 대한 위험평가지표 REM을 보여줌으로써 절대적인 위험수준과 예방조치를 취해야 하는 고장원인의 우선순위를 부여할 수 있도록 해준다. Table 1에서는 한 고장 원인에 대해 세 가지 손실유형의 REM을 모두 보여주고 있는데 실제 적용할 때는 그중 가장 적합한 손실유형의 REM 값만 기재하도록 해야 한다.

#### 4.2 수정된 FMEA 서식 사용 예시

Table 2는  $\lambda, \beta, \mu, \alpha, \tau, a, b$ 가 주어졌다는 전제 하에 윤활고장의 네 가지 원인에 대해 계산된 REM값을 보여주고 있다. 윤활고장은 결과적으로 이송 매체의 누출을 초래하며 이것은 방치된 시간이 길어질수록 누출량이 증가하게 된다. 만약 인체에 유해한 매체일 경우 방치되면 극히 위험한 상황이 초래될 수도 있으므로 이차손실모형을 적용하였다. 3절에서 살펴보았던 바와 같이  $\beta$ 와  $\alpha$  값이 다르면 손실모형의 유형에 따른 REM값의 차이가 크게 된다. 이차손실모형에서 예시된 결과가 다른 손실모형일 경우와는 차이가 날 수도 있으므로 단순성을 유지하기 위해 두 모수의 값을 모두 같은 경우를 예로 들었다. 예시에서는 열 방사(Heat dissipation)가 가

Table 1. REM Worksheet

Failure mode	Failure		Cause				Effect		REM		
	Failure time		Root cause	Detection time		Occurrence ( $\tau$ )	$a$	$b$	Constant loss	Linear loss	Quadratic loss
	$\lambda$	$\beta$		$\mu$	$\alpha$						
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
$F_i$	$\lambda_{i1}$	$\beta_{i1}$	$C_{i1}$	$\mu_{i1}$	$\alpha_{i1}$	$\tau_{i1}$	$a_{i1}$	$b_i$	$REM_{i1}$	$REM_{i1}$	$REM_{i1}$
	$\lambda_{i2}$	$\beta_{i2}$	$C_{i2}$	$\mu_{i2}$	$\alpha_{i2}$	$\tau_{i2}$	$a_{i2}$	$b_i$	$REM_{i2}$	$REM_{i2}$	$REM_{i2}$
	$\lambda_{i3}$	$\beta_{i3}$	$C_{i3}$	$\mu_{i3}$	$\alpha_{i3}$	$\tau_{i3}$	$a_{i3}$	$b_i$	$REM_{i3}$	$REM_{i3}$	$REM_{i3}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

Table 2. REM Worksheet of the mechanical shaft seal for FMEA

Mode	Failure		Cause			Effect		REM	
	Time		Root Cause	Detection		Occ	<i>a</i>		<i>b</i>
	$\lambda$	$\beta$		$\mu$	$\alpha$				
Lubrication Failure	0.1	3	Dry running	0.5	3	5	10	100	102
	0.05	2	Excessive pressure	0.25	2	3	10	100	93
	0.04	1.5	Low viscosity	0.2	1.5	2	15	50	163
	0.02	1.2	Heat dissipation	0.1	1.2	2	15	50	1500
∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴	∴

Table 3. The effect of corrective action on the failure cause 'Heat Dissipation'

Parameter	Value		Improved REM	Amount reduced in REM
	Original	Changed		
$\lambda$	0.02	0.01	350	1150
$\beta, \alpha$	1.2	2.4	39	1461
$\mu$	0.1	0.2	100	1400
$\tau$	2	1	750	750

장 위험한 것으로 평가된다.

위험을 감소시키기 위해 조치를 취한다면 분포모수  $\lambda, \beta, \alpha, \mu$  및  $\tau$ 의 값이 변하게 될 것이다. Table 3은 가장 효과적인 조치에 대한 통찰을 얻기 위해 가장 위험의 크기가 큰 고장원인인 열 방사에 대해  $\lambda, \beta, \alpha, \mu$  및  $\tau$ 에 두 개의 서로 다른 값을 적용하여 얻은 REM의 값을 비교하여 보여주고 있다. 어느 한 모수 값의 변화효과를 분석할 때에는 다른 모든 모수들의 값은 원래 예제에서 주어진 대로 고정시켰다. 변화 수준은 예제에서 원래 주어진 모수 값에 비해 두 배로 증가하거나 절반으로 감소한 것으로 하였다.

Table 3으로부터 형상모수  $\beta$  혹은  $\alpha$ 가 REM에 가장 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 그러나 형상모수는 고장메커니즘과 밀접한 관계가 있을 가능성이 높고 따라서 변경이 용이하지 않을 수도 있다. 탐지시간의 척도 모수  $\mu$ 가 그 다음으로 영향을 주는 모수이고 비교적 변경이 용이할 가능성이 높다. 고장시간의 척도모수  $\lambda$ 는 세 번째로 큰 영향을 주는 모수이며 마지막으로 고장원인의 발생률  $\tau$ 가 가장 작은 영향을 준다. 그러나 이러한 분석은 주어진 예제의 경우에 대한 것으로 대체적인 패턴을 추론하는데 사용될 수 있을 뿐으로 일반화하기에는 많은 검증 작업이 더 필요할 것이다.

또한 현장에서 실제 개선조치를 취하고자 할 경우에는 개선에 요구되는 시간과 경비 및 자원 등을 고려하지 않을 수 없다. 그러나 개선에 필요한 인적 및 물적 자원에 대해서는 비교적 쉽게 추산할 수 있을 것이다. 따라서 이미 실시하여 작성된 FMEA의 REM 워크시트를 토대로 각 항목별로 개선 효과를 시뮬레이션하여

계산해보면 투입자원을 함께 고려하여 개선 조치의 우선순위를 정할 수 있다.

### 5. 결론

전통적인 FMEA에서는 고장의 영향이 고장발생과 조치시간에 상관없이 위험평가지표인 RPN이 결정된다. 그러나 현실적으로 산업현장의 많은 상황에서 시스템이 고장 났을 경우 문제를 해결하거나 개선하기 위한 조치가 늦어지면 더 심각한 영향을 초래하게 된다. 제안된 모형은 이러한 현실적인 상황을 고려하여 기존의 FMEA를 보완하고자 하였다. 제안 모형은 기존의 RPN에 비해 정량적이고 객관적이며 위험의 절대적인 평가지표로서 더 의미 있는 REM을 제시함으로써 보다 효과적인 위험분석을 가능하게 하였다. 특히, 고장발생시간과 고장원인조치시간의 분포를 와이블 분포로 가정하여 REM을 도출함으로써 지수분포일 경우보다 일반적인 상황을 분석할 수 있도록 하였다.

그럼에도 제안 모형은 여전히 여러 가지 한계점을 지니고 있어 이를 보완할 수 있는 연구가 더 필요하다. 먼저 4차 산업혁명의 결과로 전자 센서 등을 사용하여 고장원인을 연속적으로 점검하는 것을 전제하고 있는데 아직은 주기적인 점검이 더 일반적인 것이 현실이다. 이와 같은 현실성을 고려한다면 탐지시간이 이산형 확률변수로 되어 복잡한 문제가 될 것이다. 그리고 고장 발생 이전의 원인 탐지 시간과 고장 발생 후의 원인탐지시간의 분포는 완전히 다른 분포를 따를 수도 있다. 실제 고장이 발생하기 이전에는 고장원인이 발생했는

지 주기적인 점검활동을 통해 확인함으로써 탐지하겠지만 실제 고장이 발생했을 경우에는 원인이 이미 발생했다는 것을 아는 상태에서 집중적으로 조사할 것이기 때문이다. 또한, 위험평가지표인 REM을 정의하기 위해 고장원인에 따른 기대손실을 구한 다음 고장원인의 발생률을 곱하여 구하였다. REM이 고장원인에 기인된 손실로서의 의미를 가지려면 발생률이 아니라 발생 확률을 곱해야 할 것이다. 확률을 구하려면 시간 구간이 주어져야 하므로 이 구간을 어떻게 설정하는 것이 타당할 것인가에 대한 새로운 문제가 대두된다.

그밖에도 이 연구에서 고려하지 못한 여러 가지 현실적인 상황이 있다. 현재까지의 연구 결과의 한계점이나 부족한 점을 보완하기 위하여 향후 추가적으로 연구되어야 할 내용으로 i) 고장원인에 대한 주기적인 점검이 이루어질 경우의 위험평가모형, ii) 실제 고장발생 시점을 전후하여 고장원인 탐지시간의 분포가 달라질 경우의 분석 모형, iii) 하나의 고장원인이 여러 고장을 유발하게 될 경우 혹은 공통고장원인일 경우 그 고장원인에 대한 위험평가방법 등에 대한 연구가 기대된다.

**감사의 글:** 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음

### References

- 1) H. Liu, L. Liu and N. Liu, "Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: A Literature Review", Expert Systems with Applications, Vol.40, pp.828-838, 2013.
- 2) S. J. Rhee and K. Ishii, "Using Cost based FMEA to Enhance Reliability and Serviceability", Advanced Engineering Informatics, Vol.17, pp.179-188, 2003.
- 3) H. M. Kwon, S. H. Hong, M. K. Lee and A. Sutrisno, "Risk Evaluation Based on the Time Dependence Expected Loss Model in FMEA," J. Korean Soc. Saf., Vol.26, No.6, pp.104-110, 2011.
- 4) H. M. Kwon, S. H. Hong and M. K. Lee, "An Expected Loss Model for FMEA under Periodic Monitoring of Failure Causes", Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers, Vol.39, No.2, pp.143-148, 2013.
- 5) H. A. Jang, W.Y. Yun and H. M. Kwon, "Risk Evaluation in FMEA when the Failure Severity Depends on the Detection Time", J. Korean Soc. Saf., Vol.31, No.4, pp.136-142, 2016.

- 6) H. A. Jang, M. K. Lee, S. H. Hong and H. M. Kwon, "Risk Evaluation based on the Hierarchical Time Delay Model in FMEA", Journal of the Korean Society of Quality Management, Vol.44, No.2, pp.121-138, 2016.
- 7) Grundfos Management A/S, "Mechanical Shaft Seals for Pumps", <http://machining.grundfos.com/technical-library>, 2009.

### 부록

#### A1. 식 (12)의 유도

먼저 부분적분법을 이용하여 다음 등식의 성립을 보일 수 있다.

$$\int_t^\infty x f_D(x) dx = \int_t^\infty x \beta \mu^\beta x^{\beta-1} e^{-(\mu x)^\beta} dx \quad (a1)$$

$$= t e^{-(\mu t)^\beta} + \frac{1}{\mu \beta} I\left(\frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta\right)$$

$$\int_0^\infty I\left(\frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta\right) f_T(t) dt = I\left(\frac{1}{\beta}\right) \left\{ 1 - \mu \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\} \quad (a2)$$

이제 식 (a1) 및 (a2)를 이용하여 다음과 같이 식 (12)를 얻는다.

$$E(L_i) = a + b_i \int_0^\infty \int_t^\infty (x-t) f_D(x) f_T(t) dx dt$$

$$= a + b_i \int_0^\infty f_T(t) \left\{ \int_t^\infty x f_D(x) dx - t \int_t^\infty f_D(x) dx \right\} dt$$

$$= a + b_i \int_0^\infty f_T(t) \left\{ t e^{-(\mu t)^\beta} + \frac{1}{\mu \beta} I\left(\frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta\right) - t e^{-(\mu t)^\beta} \right\} dt$$

$$= a + \frac{b_i}{\mu \beta} \int_0^\infty I\left(\frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta\right) f_T(t) dt$$

$$= a + \frac{b_i}{\mu \beta} I\left(\frac{1}{\beta}\right) \left\{ 1 - \mu \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\}$$

$$= a + b_i I\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \left\{ \frac{1}{\mu} - \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right\}$$

#### A2. 식 (13)의 유도

부분적분법을 이용하여 다음 등식의 성립을 보일 수 있다.

$$\int_t^\infty x^2 f_D(x) dx = \int_t^\infty x^2 \beta \mu^\beta x^{\beta-1} e^{-(\mu x)^\beta} dx \quad (a3)$$

$$= t^2 e^{-(\mu t)^\beta} + \frac{2}{\mu^2 \beta} I\left(\frac{2}{\beta}, (\mu t)^\beta\right)$$



$$\int_0^{\infty} t^2 e^{-(\mu t)^\beta} f_T(t) dt = \int_0^{\infty} t^2 e^{-(\mu t)^\beta} \beta \lambda^\beta t^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta} dt \quad (\text{a4})$$

$$= \lambda^\beta \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{1 + \frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

$$\int_0^{\infty} \Gamma \left( \frac{2}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) f_T(t) dt = \Gamma \left( \frac{2}{\beta} \right) \left\{ 1 - \mu^2 \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \right\} \quad (\text{a5})$$

$$\int_0^{\infty} t f_T(t) \Gamma \left( \frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) dt = G(\lambda, \mu, \beta) - \mu \Gamma \left( \frac{2}{\beta} \right) \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \quad (\text{a6})$$

그런데 식 (13)의 기대손실은

$$E(L_q) = a + b_q \int_0^{\infty} \int_t^{\infty} (x-t)^2 f_D(x) f_T(t) dx dt$$

$$= a + b_q \int_0^{\infty} f_T(t) \left\{ \int_t^{\infty} x^2 f_D(x) dx - 2t \int_t^{\infty} x f_D(x) dx + t^2 \int_t^{\infty} f_D(x) dx \right\} dt \quad (\text{a7})$$

로부터 얻을 수 있다. 식 (a7)의 각 항은 (a1), (a3), (a4), (a5), (a6)를 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$\int_0^{\infty} f_T(t) \int_t^{\infty} x^2 f_D(x) dx dt = \int_0^{\infty} f_T(t) \left\{ t^2 e^{-(\mu t)^\beta} + \frac{2}{\mu^2 \beta} \Gamma \left( \frac{2}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) \right\} dt$$

$$= \lambda^\beta \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{1 + \frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) + \frac{2}{\mu^2 \beta} \Gamma \left( \frac{2}{\beta} \right) \left\{ 1 - \mu^2 \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \right\}$$

$$= \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) \left\{ \lambda^\beta \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{1 + \frac{2}{\beta}} + \frac{1}{\mu^2} - \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \right\}$$

$$= \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) \left\{ \frac{1}{\mu^2} - \left( \frac{\mu^\beta}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right) \left( \frac{1}{\mu^\beta + \lambda^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \right\}, \quad (\text{a8})$$

$$\int_0^{\infty} t f_T(t) \int_t^{\infty} x f_D(x) dx dt = \int_0^{\infty} t f_T(t) \left\{ t e^{-(\mu t)^\beta} + \frac{1}{\mu \beta} \Gamma \left( \frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) \right\} dt$$

$$= \int_0^{\infty} t^2 e^{-(\mu t)^\beta} f_T(t) dt + \frac{1}{\mu \beta} \int_0^{\infty} t f_T(t) \Gamma \left( \frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) dt$$

$$= \left( \frac{\lambda^\beta}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right) \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) + \frac{1}{\mu \beta} \int_0^{\infty} e^{-(\lambda t)^\beta} \Gamma \left( \frac{1}{\beta}, (\mu t)^\beta \right) dt - \frac{1}{\beta} \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \Gamma \left( \frac{2}{\beta} \right)$$

$$= \left( \frac{\lambda^\beta}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right) \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) + \frac{1}{\mu \beta} G(\lambda, \mu, \beta) - \frac{1}{\beta} \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \Gamma \left( \frac{2}{\beta} \right), \quad (\text{a9})$$

$$\int_0^{\infty} t^2 f_T(t) \int_t^{\infty} f_D(x) dx dt = \int_0^{\infty} t^2 f_T(t) e^{-(\mu t)^\beta} dt$$

$$= \int_0^{\infty} t^2 \beta \lambda^\beta t^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta - (\mu t)^\beta} dt$$

$$= \lambda^\beta \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{1 + \frac{2}{\beta}} \int_0^{\infty} y^{\frac{2}{\beta}} e^{-y} dy$$

$$= \lambda^\beta \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{1 + \frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)$$

$$= \left( \frac{\lambda^\beta}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right) \left( \frac{1}{\lambda^\beta + \mu^\beta} \right)^{\frac{2}{\beta}} \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) \quad (\text{a10})$$

마지막으로 식 (a8), (a9), (a10)을 식 (a7)에 대입하여 정리하면 식 (13)이 얻어진다.