한국농업기계학회지 제28권 제6호. pp. 537~544. 2003

트랙터의 전동라인 부품에 대한 고장 특성 분석 및 교체 수요 예측

Analysis of Failure Characteristics and Estimated Replacement Demands of Tractor Driveline Parts

박영준 이윤세 김경욱
정회원
Y. J. Park Y. S. Lee K. U. Kim

ABSTRACT

The objectives of this study were to investigate the failure characteristics of a total of 90 parts of tractor driveline, and to predict their average annual demands required to perform the after-sales service. The failure characteristics such as failure mode, mean time between failures, characteristic life and reliability were analyzed using the data collected through the experienced mechanics at the part centers of the tractor manufacturers. The analysis was based on the assumption that the failure distribution follows the Weibull distribution. The average annual demands were also predicted for the replacement parts using the mean time between failures and the renewal theory based on the Weibull distribution.

The results of the study revealed that the driveline parts failure was mostly from wearout and their average characteristic life is about 1,760 hours. The estimated mean time between failures was in a range of 670 ~ 3,740 hours and reliability in a range of 40~60%. The annual replacement demands were in a range of 4 ~ 45 for a service of 100 tractors.

Keywords : Parts of tractor driveline, Failure characteristics, Demands of repair parts.

1. 서 론

국내의 농기계 산업은 이제 지속적인 수요 창출보다는 대체 수요와 이미 보급된 기계에 대한 효율적인 사후 봉사에 보다 많은 관심을 가질 필요가 있다. 사후 봉사의 문제는 주로 수리 부품의 부재 또는 부족이 그 원인으로 지적되고 있다. 수리용 부품의 부족 또는 부재로 인한 경제적 손실은 농업 기계의 수리 지연에 따른 작업 적기의 상실, 이로 인한 손실 증대 등으로 나타날 수 있다. 또한, 부품 소재 확인과 배달에 소요되는 시간과 경비도 농민에게는 큰 부담이 될 수 있다. 대리점의 경우에는 수리 부품의 확보 기준이 없기 때문에 때로는 과도한 재고 부담을 감수해야 하며, 때로는 부품 부족으로 인하여 농민의 신뢰를 상실하는 어려움을 겪고 있다.

따라서, 수리 부품의 수요 예측은 대리점이 합리적으로 부품의 재고 계획을 수립하는 데 필수적이며, 사후 봉사 업소의 경영 합리화를 위해서도 반드시 필요하다고 할 수 있다. 농업 기계 생산업체에서도 부품의 고장 특성을 분석하고, 이를 이용하여 부품의 신뢰도를 예측할 수 있으며, 수리용 부품의 수요를 예측하여 부품 공급을 원활히 수행할 수 있다.

본 연구는 와이블 분포를 이용하여 트랙터의 전동라인을 구성하는 주요 부품에 대한 고장 특성과 신뢰도를 분석하고, 이를 이용하여 각 부품의 수요를 예측하기 위하여 수행되었다. 즉, 국내에서 생산되고 있는 트랙터의 전동라인에 대한 주요 부품의 고장 형태, 평균 고장 시간, 특성 수명, 신뢰도를 분석하고, 이를 이용하여 사후 봉사에 필요한 수리용 부품의 연간 평균 교체 수요를 예측하기 위하여 수행되었다.

2. 고장 특성 분석 및 교체 수요 예측 이론

가. 고장 분포 함수

부품의 고장 분포를 나타내는 데 가장 적합한 분포는 와이블 분포 함수로서(Dodson, 1994), 3개의 매개 변

This paper was submitted for publication in October 2003; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in 2003. The authors are Y. J. Park, Graduate Student, Y. S. Lee, Graduate Student and K. U. Kim, Professor at the Seoul National University. The corresponding author is Y. J. Park, Graduate Student, School of Bio-resources and Materials Engineering Seoul National University, 151-742, Seoul Korea. E-mail : 〈pyj7277@hanmail.net〉

수와 1개의 독립 변수로써 다음과 같이 표현된다.

$$F(t,\beta,\Theta,\delta)=1-\exp\left[-\left(\frac{t-\delta}{\Theta-\delta}\right)^{\beta}\right] \quad (1)$$

여기서 독립 변수 t는 부품의 사용 시간을 나타내며, β는 형상 계수(shape parameter)로서 와이블 함수의 기울기를, Θ는 척도 계수(scale parameter)로서 특성 수명을, δ는 위치 계수(location parameter)로서 최소 수명을 각각 나타낸다. 부품은 사용되기 전부터 이미 고장난 상태가 있을 수 있으므로 부품의 최소 수명을 0으로 가정하면 와이블 분포 함수는 2개의 매개 변수로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(t,\beta,\Theta)=1-\exp\left[-\left(\frac{t}{\Theta}\right)^{\beta}\right] \quad (2)$$

와이블 분포 함수 (2)에서 확률 밀도 함수 $f(t)$를 구하면

$$f(t)=\frac{\beta}{\Theta}\left(\frac{t}{\Theta}\right)^{\beta-1}\exp\left\{-\left(\frac{t}{\Theta}\right)^{\beta}\right\} \quad (3)$$

가 된다.

나. 고장 특성

와이블 분포의 신뢰도 함수 $R(t)$와 고장률 함수 $h(t)$는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$R(t)=1-F(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\Theta}\right)^{\beta}\right] \quad (4)$$

$$h(t)=\frac{f(t)}{R(t)}=\frac{\beta}{\Theta}\left(\frac{t}{\Theta}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

$t=\Theta$일 때, 신뢰도 함수는 $R(t)=e^{-1}=0.368$이 된다. 즉, 36.8%의 부품이 고장나지 않고 제 기능을 수행할 것으로 예상되는 시간은 Θ이다. 이 시간을 부품의 특성 수명이라고 한다. 다시 말하면 특성 수명은 공급된 동일 부품 중 62.3%가 고장나는 시간을 의미한다.

고장률 함수는 Fig. 1에서와 같이 부품의 사용 시간에 따라 3가지 형태의 특징을 나타낸다. 초기에는 고장률이 감소하는 형태로서 형상 계수가 $\beta<1$인 경우이며, 초기 고장에 해당된다. 초기 고장(infant mortality failures)은 소재 불량, 가공 불량, 검사 불량, 조정 불량 등 소재와 가공상의 결함으로 발생한다. 두 번째는 고장률이 일정한 형태로서 $\beta=1$인 경우이며, 사용 고장(useful failures)에 해당된다. 사용 고장은 제품이 사용측면에서 안정화된 이후 다양한 이유에 의하여 발생하는 고장을 말한다. 세 번째는 사용 시간에 따라 고장률이 점점 증가하는 형태로서 $\beta>1$인 경우이며, 마모 고장(wearout failure)에 해당된다. 마모 고장은 부품이 수명을 다한 정상적인 고장 상태를 나타낸다.

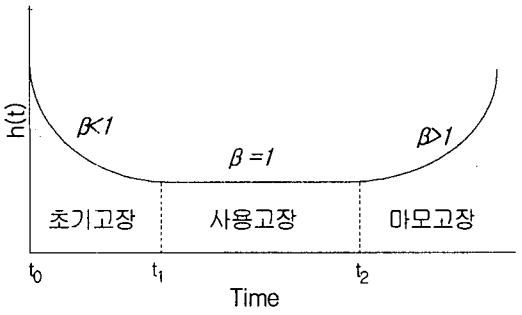

Fig. 1 Failure characteristics.

다. 부품의 기대 수명

부품의 기대 수명 즉, 부품이 고장나지 않고 제 기능을 정상적으로 수행할 것으로 기대되는 시간은 신뢰도 함수로서 표현할 수 있으며 고장 분포가 와이블 분포일 경우 부품의 기대 수명은 식 (6)과 같이 표현된다. 이 기대 수명을 평균 고장 간격(MTBF, mean time between failures)이라고 한다.

$$E(t)=\int_0^{\infty}R(t)dt=\int_0^{\infty}tf(t)dt=\Theta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right) \quad (6)$$

라. 교체 수요 이론

본 연구에서 부품의 수요는 일정한 수의 기계를 대상으로 원활한 사후 봉사를 수행하는 데 필요한 부품의 수로 정의하였다. 즉, 일반 공산품에 대한 수요 예측의 원리를 적용한 것이 아니라 부품의 고장 특성에 따른 평균 고장 시간을 기준으로 대체 이론(White, 1964)을 적용하여 산출한 것이다.

R대의 기계를 동시에 공급한 후 부품이 고장날 때마다 새로운 부품으로 교체할 때, i번째 기계에서 t시간까지 어떤 부품의 고장 횟수 또는 부품의 교체 수를 $n_i(t)$라고 하면, 전체 기계 R에 대한 총 부품의 교체 수 $N(t)$은

$$N(t)=\sum_{i=1}^{R}n_i(t) \quad (7)$$

이다. 공급된 기계의 수 R이 충분히 크다고 하면 $N(t)$은 정규 분포를 따르며, $N(t)$의 평균과 분산의 기대치는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$E[N(t)]=RE[n_i(t)]=Rm(t)=\mu(t) \quad (8)$$

$$Var[N(t)] = Rs^2(t) = \sigma^2(t) \tag{9}$$

여기서 $m(t)$는 일정한 시점 t에서 다음과 같이 적분 방정식을 만족하는 교체 함수(renewal function)이다.

$$m(t) = F(t) + \int_0^t m(t-x)\,dF(x) \tag{10}$$

즉, $m(t)$는 t시간까지 한 대의 기계에서 요구되는 평균 교체 수요이고, $s(t)$는 평균 교체 수요에 대한 표준 편차이며, x는 t^{β}을 의미한다. 식 (8)과 (9)에서 $n_i(t)$는 특정 부품의 고장 분포에 따르므로, $m(t)$과 $s(t)$도 부품의 고장 분포에 의하여 결정된다.

부품의 고장 분포를 와이블 분포라고 하면 부품의 고장 특성은 와이블 분포의 매개 변수 β와 Θ로서 표현할 수 있다. 와이블 분포를 이용한 부품의 교체 이론은 식 (8)과 (9)의 $m(t)$과 $s^2(t)$를 β와 Θ의 함수로써 표현한 이론이다. 화이트(White, 1964)는 $m(t)$과 $s^2(t)$를 각각 다음과 같이 유도하였다.

$$m(t) = m_1(t) \tag{11}$$

$$s^2(t) = 2m_2(t) + m_1(t) - m_1^2(t) \tag{12}$$

식 (11)에서 고장 분포 함수가 와이블 함수일 때 $m(t)$을 무한급수로 전개하면 다음과 같이 표현된다.

$$m_1(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} A_k t^{k\beta}}{\Gamma(k\beta+1)} \tag{13}$$

$$m_2(t) = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1} A_k t^{k\beta}}{\Gamma(k\beta+1)} \tag{14}$$

여기서, $A_k = \gamma_k - \sum_{j=1}^{k-1} \gamma_j A_{k-j}$, $\gamma_k = \frac{\Gamma(k\beta+1)}{k!}$

따라서 식 (10)과 (11)는 일정한 시점 t까지 필요한 교체 수요를 예측하는데 사용할 수 있다. 부품의 교체 수요를 예측하기 위해서는 교체 함수 $m(t)$과 $s(t)$를 구하여야 한다.

R대의 기계가 동시에 판매된 후 고장이 발생하였을 때, 고장난 부품을 즉시 교체하면 이 부품의 고장 빈도(failure frequency)는 Fig. 2에서와 같이 처음에는 감쇠 진동의 형태를 보이다가 시간이 경과함에 따라 일정한 수준에 이른다. 이 부품의 평균 수명을 μ, 표준 편차를 σ라고 하면 처음 R개의 부품은 μ에서 최대의 고장 빈도를 나타내며 이때에 교체된 부품이 다시 높은 고장 빈도를 보이는 시기는 2μ가 된다. 그러나 R개의 부품이 모두 동시에 교체되는 것이 아니라 초기의 부품이 고장남에 따라 점차적으로 교체되기 때문에 2μ에서 고장 빈도는 μ에서 보다 훨씬 낮다. 이와 같은 방식으로 부품을 교체하면 사용 시간이 경과함에 따라 R대의 기계에 사용되는 부품의 사용 시간은 서로 다르게 혼합되어 외견상 일정한 고장 빈도를 나타낸다. 부품의 사용 시간이 혼합되어 외견상 일정한 고장 빈도가 나타나면 R대의 기계에서 t시간 이전에 교체해야 할 부품의 총 수는 다음과 같이 표현된다.

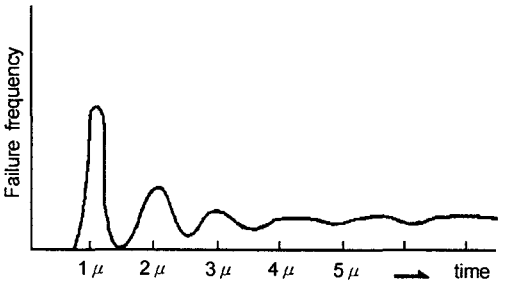

Fig. 2 Failure frequency.

$$\lim_{t\to\infty} E[N(t)] = \frac{Rt}{MTBF} \tag{15}$$

실제로, 일정 지역에 보급된 농업 기계는 사용 시간이 서로 다르기 때문에 부품 또한 사용 시간이 서로 다르다. 식 (15)은 기계의 사용 시간이 서로 다른 경우 일정 대수의 기계를 수리하는 데 필요한 부품의 소요 수량을 추정하는 데 적합한 식이다. 특히, 부품의 평균 수명이 기계의 내용 연수보다 훨씬 짧은 경우에 적합한 식이다.

3. 고장 데이터 분석

가. 고장 데이터 조사

부품의 고장 분석은 부품의 실제 사용 시간을 이용하여 분석하여야 한다. 그러나 실제 사용 시간에 대한 데이터를 얻기 힘들기 때문에 부품의 고장 데이터는 국내 4개 트랙터 생산업체의 각 도 영업소를 통하여 수집하였다. 영업소는 생산업체에서 대리점으로 납품하는 모든 부품을 취급하고 있을 뿐만 아니라 수리 경험이 20년 이상인 기사가 많았기 때문에 경험에 의한 부품의 고장 시간을 추정하는 데 가장 적합한 곳으로 판단되었다. 그러나 부분적으로 필요한 경우에는 대리점에서도 고장 데이터를 수집하였다.

본 연구에서 부품의 고장 데이터는 부품이 최초로 고장날 때까지 사용한 시간으로 정의하였으며 청취 또는 설문을 통하여 수리 기사의 경험에 의한 부품의 평균 사용 시간을 조사하였다. 하나의 부품에 대해서는 최소한 4 ~ 6개의 데이터를 수집하였다. 고장 데이터의 기본 단위는 시간으로 하였으나, 수리 기사에 따라 이를 사용 연수로써 추정하였기 때문에 연수를 시간으로

환산하기 위하여 조사 지역별 트랙터의 연간 평균 사용 시간 등을 함께 조사하였다.

나. 고장 분석

부품의 고장 분석은 부품의 고장 데이터를 이용하여 고장 확률 분포 함수, 고장률, 평균 수명, 신뢰도 등 고장 특성을 구명하는 것으로 하였다. 고장 확률 분포를 결정하는 방법에는 일반적으로 평균 계급법과 중위 계급법이 있으나(Kapur and Lamberson, 1977) 본 연구에서는 중위 계급법을 개선한 브롬 방법(Blom method)을 적용하였다(Dodson, 1994). 브롬 방법은 크기 순으로 정리된 n개의 고장 시간 중 j번째까지 고장이 발생할 것으로 기대되는 확률을 다음 식으로 결정한다.

$$P = \frac{j - 0.375}{n + 0.25} \tag{16}$$

만약 같은 시간에 고장난 부품이 2개 이상인 경우에는, 이 고장 시간에 대한 고장 순위, 즉, j값은 이 시간에서 고장난 부품 수의 1/2와 이보다 짧은 시간에서 고장난 부품 수를 모두 더한 값으로 한다. 이상과 같은 방법으로 고장 시간과 각 고장 시간에서 예상되는 고장 확률을 결정하여 와이블 확률지에 표시한다. 최대우도추정법(maximum likelihood estimation) (Dodson, 1994) 또는 최소자승법(least square estimation)을 이용하여 와이블 확률지에 표시된 점들을 직선화하고, 와이블 함수의 매개 변수 β와 θ을 결정하여 고장 분포 함수를 결정한다. β와 θ가 결정되면, 고장 분포 함수, 신뢰도 함수, 평균 고장 간격은 각각 식 (2), (4), (6)을 이용하여 구한다.

본 연구에서 고장 분석은 통계용 소프트웨어 미니탭(MINITAB, Release 13)을 이용하여 수행하였다. 와이블 함수의 매개 변수 β와 θ는 최대우도추정법을 적용하여 구하였다. Fig. 3은 미니탭의 분석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3의 우측 상단에 표시된 값의 의미는 각각 다음과 같다.

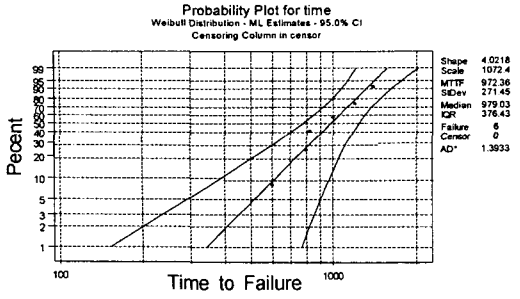

Fig. 3 Failure analysis using MINITAB.

Shape : 와이블 분포의 형상 계수 β로서 고장의 특성을 나타낸다.

Scale : 와이블 분포의 척도 계수 θ로서 부품의 특성 수명을 나타낸다.

MTTF(mean time to failure): 고장날 때까지의 평균 시간을 나타낸다. MTTF는 수리할 수 없는 부품의 수명을 나타낼 때 사용하며, 수리가 가능한 부품에 대해서는 MTBF(mean time between failures)로 나타낸다. 그러나 최근에는 이를 구별하지 않고 일반적으로 평균 수명이라고 한다.

StDev : 평균 고장 시간에 대한 표준 편차이다.

Median : 중위수로서 고장 데이터를 크기 순으로 정렬하였을 때 중간에 위치하는 고장 데이터이다. 즉, 부품의 50%가 고장나는 시간이라고 할 수 있다.

IQR : 고장 데이터를 크기 순으로 정리하였을 때 75 백분위 수와 25 백분위 수의 차이이다. 고장 시간 분포에 대한 변동성을 나타내는 척도로 사용되며 값이 작을수록 고장 시간의 분포가 균일하고, 클수록 고장 시간의 차이가 심하다.

Failure : 분석에 사용된 고장 데이터의 수를 나타낸다.

Censored : 고장 시험에서 관측을 중단한 부품의 수를 나타낸다. 본 연구에서는 관측 중단된 부품의 수가 0이었다.

AD* : 고장 데이터의 확률 분포와 이론 분포 함수의 적합도를 나타내기 위한 Anderson-Darling 시험값(Dodson, 1994)으로서, 본 연구에서는 와이블 분포 함수를 이론 분포 함수로 하였다. AD*값이 작을수록 와이블 분포 함수는 실제 고장 부품의 고장 확률 분포 함수를 나타내는 데 적합하다는 것이다.

트랙터 전동라인 부품은 와이블 분포에서 AD값이 다른 분포에서보다 작게 나타났으며, 이를 통하여 전동라인 부품의 고장 분포는 와이블 분포를 따른다고 판단할 수 있다.

다. 교체 수요 예측

본 연구에서는 수치해석 프로그램인 매트랩(MATLAB)을 이용하여, 교체 함수로써 교체 수요를 예측할 수 있는 프로그램을 작성하였다. 프로그램에 의한 부품의 교체 수요 예측은 부품의 평균 고장 시간 즉, 수명이 비교적 길 때 적용할 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 사후 봉사의 대상이 되는 기계의 평균 사용 연수를 내용 연수의 50%로 가정하고, 부품의 연간 교체 수요를 기계를 판매한 후 내용 연수의 1/2이 되는 연도에 기대되는 부품의 교체 수요로 산출하였다. 즉, 식 (17)에서 부품의 교체 수요를 산출하는데 필요한

변수 R과 T를 다음과 같이 결정하였다.

R = 사후 봉사 업소가 수리할 것으로 기대되는 트랙터 대수

T = 기계의 내용 연수의 1/2

따라서 연간 수리 부품의 소요 수량, APR(annual part requirement)는 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$APR = Rm(T) - Rm(T-1) \quad (17)$$

매트랩 프로그램에서 $m_1(t)$과 $m_2(t)$의 값이 ∞/∞가 되어 $m(t)$와 $s(t)$을 구할 수 없을 때는 식 (18)을 이용하여 연간 수리 부품의 소요 수량을 산출하였다.

$$APR = \frac{Rt}{MTBF} \quad (18)$$

여기서, t = 기계의 연간 사용 시간

$MTBF$ = 부품의 평균 수명

4. 고장 특성 분석

4개 업체의 각 도 영업소에서 조사한 트랙터 전동라인의 주요 부품은 A사에서 14종, B사에서 35종, C사에서 24종, D사에서 17종으로 총 90종이었다. 또한, 조사 지역의 연간 트랙터 이용 시간은 평균 300시간이었으며, 내구연수는 8.8년으로 추정되었다. 조사한 고장 데이터를 이용하여 미니탭으로 분석한 업체별 각 부품의 고장 형태(β), 특성 수명(Θ), 평균 고장 시간(MTBF), 평균 고장 시간까지의 신뢰도(R)는 Table 1~Table 4에서와 같다.

조사한 부품은 대부분 마모 고장 즉, 본래의 수명을 다한 정상적인 고장 형태인 것으로 나타났다. 부품의 특성 수명은 Table 1~Table 4에서와 같이 A사의 경우 1,200 ~ 4,200시간, B사의 경우 760~5,400시간, C사의 경우 880 ~ 1,700시간, D사의 경우 1,230 ~ 1,910시간인 것으로 나타났으며, 전체적으로 평균 특성 수명은 1,760시간 정도인 것으로 나타났다. 부품의 평균 고장 시간은 특성 수명과 유사한 분포 형태를 나타내었다. A사의 경우에는 1,130 ~ 3,740시간, B사의 경우에는 670 ~ 5,260시간, C사의 경우에는 780 ~ 1,580시간, D사의 경우에는 1,100 ~ 1,730시간 정도이었다. 이와 같이 특성 수명과 평균 고장 시간의 범위가 큰 것은 부품에 따라 예상 수명이 차이가 크다는 것을 나타낸다. 즉, 부품에 따라 최소 1.2배에서 최고 7.8배의 수명 차

Table 1 Failure Characteristics of Tractor Driveline Parts(A company)

부 품 명	β	Θ, 시간	MTBF, 시간	R, %
스냅링	1.9	4,107.1	3,644.8	45.0
슬라이딩거	1.0	3,751.0	3,738.8	36.9
실드	2.1	1,500.6	1,329.2	45.9
오일게이지	1.1	3,566.5	3,396.4	38.8
클러치카버조합	1.4	1,924.6	1,747.5	41.9
클러치판	2.1	1,498.5	1,327.3	45.9
구동체인	1.8	1,742.0	1,548.6	44.6
주축	2.0	2,381.3	2,110.8	45.5
추진축	2.3	1,269.2	1,124.3	46.8
추진축케이스	1.2	2,331.4	2,184.2	39.7
커플링	2.2	1,554.8	1,377.0	46.5
클러치디스크조합	1.3	1,671.6	1,550.8	40.3
클러치압력판조합	1.3	1,671.6	1,550.8	40.3
P.T.O.축	1.9	1,931.4	1,715.4	44.8

Table 2 Failure Characteristics of Tractor Driveline Parts(B company)

부 품 명	β	Θ, 시간	MTBF, 시간	R, %
강판	1.1	5,368.8	5,257.9	37.6
구멍용스냅링	1.5	3,060.9	2,756.2	42.7
두부핀	1.4	3,011.3	2,746.1	41.5
레버캡	3.5	2,456.2	2,208.5	50.0
로드	1.5	1,421.0	1,282.3	42.5
링기어조합	2.3	3,282.7	2,909.1	47.1
마찰판	3.4	2,544.9	2,285.4	49.9
메인베어링	2.3	3,282.7	2,909.1	47.1
메인체인지아암	9.0	1,256.4	1,189.7	54.2
미션케이스패킹	1.7	1,935.0	1,729.5	43.6
방출베어링	2.9	1,461.0	1,303.6	48.9
볼베어링	4.2	1,644.2	1,493.6	51.1
부츠	1.2	3,071.6	2,903.6	39.2
샤프트아암	2.3	3,282.7	2,909.1	47.1
세트스프링	2.1	1,297.7	1,149.5	46.0
스프링	1.5	2,164.5	1,948.9	42.7
스프링핀	1.2	3,051.5	2,859.0	39.7
시일	1.5	1,063.0	960.0	42.4
시프터아암홀더	12.5	992.2	952.1	55.0
오일실	1.8	763.5	678.3	44.7
주변속케이스관계	5.7	893.6	826.5	52.6
차동축	1.6	3,936.3	3,525.9	43.3
차동피니언라이너	3.5	2,886.0	2,595.3	50.0
축부싱	2.1	763.4	676.2	45.9
케이스	4.9	2,425.6	2,224.9	52.0
클러치디스크	3.1	1,133.6	1,014.2	49.4
클러치디스크조합	8.1	898.8	847.0	53.9
클러치커버조합	3.8	1,166.9	1,055.0	50.7
턴버클	2.6	1,448.2	1,286.4	48.0
평행핀	1.5	3,060.9	2,756.2	42.7
피스	2.0	1,816.9	1,610.0	45.6
기어, 디플렌셜	1.6	3,936.3	3,525.9	43.3
P.T.O.축	1.3	3,024.9	2,795.7	40.5
피니언, 디플렌셜	1.1	5,368.8	5,257.9	37.6
링기어	2.3	3,282.7	2,909.1	47.1

Table 3 Failure characteristics of tractor driveline parts(C company)

부 품 명	β	θ, 시간	MTBF, 시간	R, %
가스켓	2.3	1,016.8	901.0	47.0
디스크 2조합	4.3	1,009.8	918.7	51.3
디프메탈	6.3	1,255.9	1,168.3	53.1
부시(35X39X26)	1.7	925.5	824.9	44.1
스프라인캡	5.4	1,107.6	1,021.1	52.4
씨일	1.8	910.7	809.9	44.5
씨일(오일)조합	2.0	1,037.4	919.3	45.6
씨일조합	2.0	950.0	842.3	45.4
압력판조합	3.5	1,229.4	1,106.8	50.2
오일실(D)	2.0	1,001.7	887.7	45.6
오일씨일	1.8	887.6	789.2	44.5
육각볼트(보통)	6.0	1,227.0	1,138.0	52.8
육각볼트(SP)	7.9	1,013.6	954.2	53.8
최종구동케이스A	1.2	1,693.3	1,577.3	40.0
카바조합	2.7	1,205.1	1,071.7	48.3
캡(72)	5.3	1,024.4	943.3	52.3
커플링	3.4	1,241.2	1,115.4	49.9
클러치디스크	4.1	1,077.4	978.6	51.1
클러치카바조합	5.2	1,195.2	1,099.6	52.2
클러치(P.T.O.)조합	4.1	1,077.4	978.6	51.1
클러치디스크조합	4.0	1,072.4	972.4	50.9
클러치카바	4.5	1,177.2	1,074.1	51.6
텐션스프링	4.0	1,285.7	1,166.2	51.0
O링	3.1	1,063.7	951.0	49.3

Table 4 Failure characteristics of tractor driveline parts (D company)

부 품 명	β	θ, 시간	MTBF, 시간	R, %
기어	4.7	1,472.7	1,346.6	51.7
기어슬리브	4.7	1,472.7	1,346.6	51.7
기어조합	4.7	1,472.7	1,346.6	51.7
라이너	2.8	1,736.9	1,546.3	48.5
레일캡	2.8	1,736.9	1,546.3	48.5
릴리스베어링	2.9	1,233.7	1,099.8	48.8
마찰판	2.9	1,233.7	1,099.8	48.8
볼트P.T.O.축	2.1	1,497.8	1,326.5	46.2
슬리브	3.9	1,909.4	1,728.2	50.8
클러치카바	3.7	1,686.4	1,522.4	50.5
클러치디스크조합	2.9	1,233.7	1,099.8	48.8
클러치총조합	3.2	1,288.7	1,154.8	49.6
클러치카바	4.7	1,304.1	1,193.7	51.8
플레이트P.T.O.	5.9	1,600.2	1,483.0	52.8
피동축캡	8.6	1,593.0	1,505.7	54.1
피이스	4.7	1,472.7	1,346.6	51.7
P.T.O.축	8.6	1,593.0	1,505.7	54.1

Table 5 Annual demands of repair parts of tractor driveline based on 100 units (A company)

부 품 명	Ψ	1st	2nd	3rd	4th	5th
스냅링	4.8	0.9	2.9	5.9	9.8	14.6
슬라이딩거	8.0	7.9	15.8	23.8	31.8	39.7
실드	22.7	3.7	14.4	31.2	51.9	74.6
오일게이지	8.0	6.7	13.9	21.4	29.3	37.3
클러치카버조합	15.8	7.3	18.7	32.2	47.1	62.9
클러치판	22.8	3.6	14.4	31.2	52.0	74.7
구동체인	18.3	4.5	14.4	28.3	44.9	63.2
주축	11.7	1.8	6.5	14.1	23.9	35.5
추진축	28.1	4.0	17.4	39.2	66.1	94.2
추진축케이스	12.7	9.3	20.0	31.7	44.0	56.7
커플링	22.1	2.9	12.1	27.3	47.0	69.1
클러치디스크조합	18.4	12.3	27.6	44.5	62.3	80.7
클러치압력판조합	18.4	12.3	27.6	44.5	62.3	80.7
P.T.O.축	16.0	3.5	11.6	23.1	37.3	53.3

이가 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 부품의 신뢰도는 평균 고장 시간까지의 신뢰도로 하였다. 즉, 평균 고장 시간까지 부품이 고장나지 않고 제 기능을 수행할 것으로 기대되는 확률이다. 평균 고장 시간까지의 신뢰도는 부품에 따라 다르며 Table 1 ~ Table 4에서와 같이 대부분 40 ~60%의 범위에 있는 것으로 나타났다.

5. 평균 교체 수요

Table 5 ~ Table 8은 부품의 고장 특성을 이용하여 사후 봉사에 필요한 부품의 연간 교체 수요를 산출한 것이다. 대리점 또는 수리점의 경우에는 100대당 연간 평균 교체 수요(Ψ)를, 생산업체의 경우에는 100대의 트랙터를 동시에 공급하였을 때의 연차별 누적 교체 수요(1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th year)를 산출하였다. 100대당 평균 교체 수요는 100대를 사후 봉사하는 데 소요될 것으로 예상되는 부품의 연간 평균 수요를 나타낸 것이다. 100대당 연간 평균 교체 수요를 산출하기 위하여 부품의 평균 사용 시간은 내구 연수의 0.5배로 하였다. 사후 봉사의 대상이 되는 특정 지역의 트랙터는 최근 출고된 것에서부터 내구 연수에 이른 것까지 기계의 사용 시간이 모두 다르기 때문에 전체 트랙터의 평균 연간 사용 시간을 내구연수의 50%로 가정한 것이다.

전동 라인 부품의 연간 교체 수요는 Table 5 ~ Table 8에서와 같이 A사의 경우 4~29개, B사의 경우 6~45개, C사의 경우 19~43개, D사의 경우 18~36개 정도인 것으로 나타났다. 이러한 예상 교체 수요는 부품의 평

Table 6 Annual demands of repair parts of tractor driveline based on 100 units (B company)

부 품 명	Ψ	1st	2nd	3rd	4th	5th
강판	5.4	5.1	10.4	15.7	21.1	26.5
구멍용스냅링	8.6	2.9	8.2	15.0	22.8	31.5
두부핀	9.1	4.6	11.1	18.8	27.3	36.4
레버캡	8.6	0.1	1.0	3.5	8.6	17.2
로드	22.7	9.5	25.9	45.8	67.5	90.1
링기어조합	5.9	0.5	2.0	5.0	9.4	15.2
마찰판	7.9	0.1	1.0	3.3	8.1	16.0
메인베어링	5.9	0.5	2.0	5.0	9.4	15.2
메인체인지아암	50.2	0.0	0.2	5.6	48.5	98.7
미션케이스패킹	13.6	4.9	13.8	24.9	37.5	51.1
방출베어링	26.6	1.0	7.2	21.8	44.5	71.0
볼베어링	26.1	0.1	1.6	8.0	23.9	50.0
부츠	9.4	7.4	15.6	24.4	33.5	42.8
샤프트아암	5.9	0.5	2.0	5.0	9.4	15.2
세트스프링	26.9	4.9	19.0	40.4	65.9	92.7
스프링	13.7	4.9	13.8	24.9	37.5	51.1
스프링핀	9.4	6.9	14.8	23.4	32.4	41.8
시일	31.0	14.7	39.3	67.9	98.3	129.4
시프터아암홀더	31.5	31.5	63.0	94.5	126.0	157.5
오일실	44.1	17.5	54.5	98.4	143.0	187.1
주변속케이스관계	22.7	0.3	10.6	64.9	103.2	125.9
차동축	5.9	1.8	5.1	9.4	14.6	20.5
차동피니언라이너	5.3	0.1	0.6	2.1	5.1	10.4
축부실	44.2	14.0	50.4	95.5	140.5	184.8
케이스	6.0	0.0	0.1	0.8	3.2	9.2
클러치디스크	31.7	1.7	13.2	39.6	74.7	106.4
클러치디스크조합	35.4	0.0	4.4	63.6	141.7	177.1
클러치커버조합	32.0	0.7	7.9	31.4	69.2	101.2
턴버클	25.5	1.7	9.8	25.9	48.5	74.1
평행핀	8.6	2.9	8.2	15.0	22.8	31.5
피스	17.5	2.7	10.5	22.6	38.0	55.5
기어, 디플렌셜	5.9	1.8	5.1	9.4	14.6	20.5
P.T.O.축	9.3	5.9	13.2	21.5	30.3	39.6
피니언, 디플렌셜	5.4	5.1	10.4	15.7	21.1	26.5
링기어	5.9	0.5	2.0	5.0	9.4	15.2

균 고장 시간을 기준으로 하였기 때문에 실제 고장 시간을 기준으로 한 수요보다는 높게 추정되었을 것으로 판단된다. 조사된 부품의 평균 고장 시간(MTBF)은 부품의 신뢰가 40~60% 즉, 고장 확률이 40~60% 정도이기 때문에, 신뢰도가 0% 즉, 고장 확률이 100%인 고장 시간을 기준으로 한 수요보다는 높게 추정된다. 그러나 고장 확률이 100%인 고장 시간을 추정하기는 현실적으로 불가능하기 때문에 이를 기준으로 한 수요를 예측하기도 어렵다. 따라서 Table 5 ~ Table 8에 제시된 예측 수요는 정확한 수요라기보다는 확실한 사후 봉사가 가능한 여유있는 수요라고 보는 것이 타당할 것이다.

Table 7 Annual demands of repair parts of tractor driveline based on 100 units (C company)

부 품 명	Ψ	1st	2nd	3rd	4th	5th
가스켓	34.0	6.0	26.6	58.3	93.5	127.5
디스크 2조합	25.3	0.6	10.6	46.2	91.1	116.4
디프메탈	42.8	0.0	1.3	12.2	52.9	95.7
부시(35 × 39 × 26)	36.4	14.4	42.6	77.1	113.4	149.8
스프라인캡	25.3	0.1	4.0	28.4	79.0	104.2
씨일	37.1	13.6	42.1	77.6	114.8	151.9
씨일(오일)조합	33.3	8.1	30.0	60.2	93.4	126.7
씨일조합	36.0	10.3	36.1	70.1	106.3	142.4
압력판조합	32.3	0.9	8.1	28.9	62.2	94.6
오일실(D)	34.4	8.6	31.9	63.7	98.2	132.6
오일씨일	38.1	14.1	43.8	80.4	118.6	156.7
육각볼트(보통)	38.6	0.0	1.8	15.3	58.5	97.1
육각볼트(SP)	31.4	0.0	1.9	32.7	125.8	157.2
최종구동케이스A	18.1	12.6	27.8	44.6	62.2	80.3
카바조합	30.5	2.4	14.4	38.0	68.5	99.0
캡(72)	19.1	0.2	6.2	40.0	91.0	110.1
커플링	32.0	1.0	8.6	29.1	61.3	93.3
클러치디스크	28.2	0.6	8.6	38.1	81.5	109.7
클러치카바조합	34.4	0.1	2.9	20.8	64.3	98.7
클러치(P.T.O.)조합	28.2	0.6	8.6	38.1	81.5	109.7
클러치디스크조합	28.7	0.6	9.3	39.4	82.0	110.7
클러치카바	32.6	0.3	5.0	26.2	67.3	99.9
텐션스프링	34.4	0.3	4.6	21.2	53.8	88.2
O링	32.0	2.1	16.1	46.5	83.7	115.7

Table 8 Annual demands of repair parts of tractor driveline based on 100 units (D company)

부 품 명	Ψ	1st	2nd	3rd	4th	5th
기어	34.8	0.1	1.7	9.9	32.3	67.1
기어슬리브	34.8	0.1	1.7	9.9	32.3	67.1
기어조합	34.8	0.1	1.7	9.9	32.3	67.1
라이너	20.2	0.9	5.3	15.2	31.0	51.2
레일캡	20.2	0.9	5.3	15.2	31.0	51.2
릴리스베어링	30.5	1.8	12.1	34.2	64.4	94.9
마찰판	30.5	1.8	12.1	34.2	64.4	94.9
볼트P.T.O.축	23.0	3.4	13.9	30.4	51.3	74.3
슬리브	17.3	0.1	1.2	5.4	15.4	32.7
클러치카바	23.6	0.2	2.4	9.7	25.0	48.6
클러치디스크조합	30.5	1.8	12.1	34.2	64.4	94.9
클러치총조합	31.0	1.1	8.5	27.5	57.1	88.1
클러치카바	38.1	0.1	2.7	16.1	49.4	87.5
플레이트P.T.O.	32.4	0.0	0.5	3.9	17.3	49.7
피동축캡	36.0	0.0	0.1	1.0	9.0	45.0
피이스	34.8	0.1	1.7	9.9	32.3	67.1
P.T.O.축	36.0	0.0	0.1	1.0	9.0	45.0

6. 결 론

본 연구에서는 국내에서 생산된 트랙터의 전동 라인 부품에 대한 고장 특성을 구명하고, 이를 이용하여 원활한 사후 봉사를 수행하는 데 필요한 수리 부품의 연간 평균 교체 수요를 산출하였다.

부품의 고장 특성으로는 실제 사용 시간이 아닌 영업소의 수리 기사의 경험을 기본으로 한 부품의 고장 시간을 조사하여 와이블 분포 함수로써 고장 형태, 특성 수명, 평균 고장 시간, 평균 고장 시간까지의 신뢰도를 추정하였다. 또한, 부품의 고장 특성과 평균 고장 시간을 이용하여 부품의 연간 교체 수요를 예측할 수 있는 교체 함수(renewal function)를 제시하였으며, 대리점 또는 수리점의 경우에는 100대당 평균 교체 수요를, 생산업체의 경우에는 100대의 기계를 동시에 공급하였을 때 연차별 교체 수요를 예측하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1) 전동라인 부품의 고장 형태는 대부분 마모 고장인 것으로 나타났다.

2) 전동라인 부품의 특성 수명은 A사의 경우 1,200 ~ 4,200시간, B사의 경우 760~5,400시간, C사의 경우 880~1,700시간, D사의 경우 1,230~1,910시간인 것으로 나타났으며, 전체적으로 평균 특성 수명은 1,760시간 정도인 것으로 나타났다.

3) 평균 고장 시간은 특성 수명과 유사한 분포 형태를 나타내었으며, A사의 경우에는 1,130 ~ 3,740시간, B사의 경우에는 670 ~ 5,260시간, C사의 경우에는 780~1,580시간, D사의 경우에는 1,100 ~ 1,730시간 정도였다.

4) 신뢰도는 부품에 따라 다르나 대부분 40 ~ 60%의 범위에 있는 것으로 나타났다.

5) 100대의 트랙터를 사후 봉사하는 데 필요한 부품의 연간 교체 수요는 A사의 경우 4~29개, B사의 경우 6~45개, C사의 경우 19~43개, D사의 경우 18~36개 정도인 것으로 나타났다.

본 연구의 결과는 국내에서 생산된 트랙터의 전동라인에 대한 신뢰도를 평가하고, 신뢰도를 높이기 위한 기술 개발의 자료로서 활용할 수 있을 것이다. 부품의 고장 특성과 신뢰도 연구는 한 번의 결과를 계속하여 사용할 수 없기 때문에 부품의 고장 시간을 지속적으로 추적하여 보다 정확한 교체 수요를 추정할 수 있도록 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김경욱. 2000. 농기계 부품의 효율적인 공급과 관리 방안. 한국농업기계학회.
2. 이대원, 김경욱, 금동혁. 1983. 동력 경운기 주요 부품의 수명 추정에 관한 연구. 한국농업기계학회지 8(1):30-37.
3. 이대원, 김경욱. 1984. 사후봉사를 위한 동력 경운기 주요 부품의 소요 수량 추정에 관한 연구. 한국농업기계학회지 9(1):5-10.
4. 한국농업기계학회. 2003. 농업기계연감. 한국농기계공업협동조합.
5. Dodson, B. 1994. Weibull analysis. American Society for Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
6. Kapur, K. C. and L. R. Lamberson. 1977. Reliability in engineering design. John Wiley & Sons, Inc. New York, NY.
7. Lipson, C. and N. J. Sheth. 1973. Statistical design and analysis of engineering experiments. McGraw-Hill, New York.
8. Smith, W. L. and M. R. Leadbetter. 1963. On the renewal function for the weibull distribution. Technometrics 5(3):393-396.
9. White, J. S. 1964. Weibull renewal analysis. Proceedings of the 3rd Annual Aerosp. Rel. Maintainability Conference, Washington, D. C. June 29-July 1, 1964.