

시뮬레이션을 이용한 한국형 레몬법의 보증비용 추정

정승훈¹ · 한영진² · 윤원영^{1*}

¹부산대학교 산업공학과 산업데이터공학융합전공

²울산과학대학교 산업경영공학과

Estimation of Warranty Cost of Korean Lemon Law through Simulation

Seung Hoon Jung¹ · Young Jin Han² · Won Young Yun¹

¹Major in Industrial Data Science & Engineering Department of Industrial Engineering, Pusan National University

²Department of Industrial Management Engineering, Ulsan College

In this paper, we study on the two-dimensional warranty policy of automobiles with a multi-level structure sold under the Korean Lemon Law. The Korean Lemon Law is a warranty law that allows consumers to request an exchange or refund from the manufacturer in the event of repeated failures and long repair times within one year or 20,000 km of driving distance after purchase. From a manufacturer's point of view, it is important to determine an appropriate warranty unit to minimize the total warranty cost within the warranty period of the Korean Lemon Law. The total warranty cost of automobiles with a multi-level structure is estimated by simulation considering the complexity of the mathematical model. Also, numerical examples are studied to investigate the effect of the model parameters on the warranty cost.

Keywords: Korean Lemon Law, Monte Carlo Simulation, Warranty Cost, Multi-level Units

1. 서론

보증(Warranty)이란 제품 판매 후 일정기간 제품 고장 복구에 발생하는 비용을 생산자가 부담하는 것으로 자동차 제조사도 마찬가지로 정해진 기간 자동차의 하자가 발생하면 무상으로 부품의 수리 또는 교체를 통해 복구하는 무상보증을 시행하고 있다. 자동차 제조사마다 조금씩 차이는 있지만 소비자는 구입한 차량의 부품에서 하자가 엔진 및 동력전달계통의 부품에서 발생된다면 5년/10만km, 차체 및 일반부품이라면 3년/6만km까지 무상보증을 받을 수 있다. 다만, 무상보증의 기간과 주행거리와 관계없이 자동차의 낮은 품질 수준으로 많은 차량에서 하자가 발생하거나, 발생이 예측된다면 자동차 제조사는 관련 자동차의 리콜(Recall)을 시행하게 된다. 이 경우 대상 자

동차의 대수와 하자부품에 따라 제조사는 천문학적인 비용을 부담할 수 있으며, 그 결과에 따라 자동차 브랜드 가치가 하락하는 결과를 초래하기도 한다. 또한, 리콜은 소비자에게 수리 또는 교체 위해 서비스센터에 방문을 하여야하는 시간적 손해를 야기하며, 특히 리콜대상 부품이 안전과 관련된 부품이라면 소비자는 주행 중 불안감을 받을 수 있을 것이다. 이와 같이 자동차의 하자는 소비자와 제조사 모두에게 시간적, 경제적 손실을 안겨주며, 부품에 따라 소비자에게 생명 위협받을 수 있기 때문에 제조사는 높은 수준의 신뢰성을 확보한 자동차를 생산하려고 노력하고 있다. 그러한 노력에도 불구하고 한국교통안전공단에서 조사한 자료(2018~2021년)에 따르면 국산자동차와 수입자동차를 합하여 매년 200만대 이상의 자동차가 리콜이 되고 있다.

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2019R1F1A1062353).

* 연락처 : 윤원영 교수, 46241 부산광역시 금정구 부산대학교로 63번길 2 부산대학교 산업공학과, Tel : 051-510-2421, Fax : 051-512-7603, E-mail : wonyun@pusan.ac.kr

2022년 1월 28일 접수; 2022년 4월 15일, 2022년 5월 31일 수정본 접수; 2022년 6월 10일 게재 확정.

그동안 자동차 제조사에서 제공하는 무상보증과 리콜은 신차라 할지라도 자동차의 하자를 해결하기 위한 부품의 수리 또는 교체만 해줄 뿐이었다. 이런 문제점들을 해결하기 위해 등장한 것이 레몬법(Lemon Law)이며, 1975년 미국에서 자동차와 전자제품 관련 소비자 보호를 위해 제정된 연방법인 매그너슨 모스 보증법(Magnuson-Moss Warranty Act)의 별칭이다. 연방법 제정 이후 1982년 코네티컷주를 시작으로 점차 모든 주로 확산되었다. 미국에서 레몬법이 시행된 후 제도적으로 미흡한 부분과 제조사와 소비자 간 해석에 대한 차이를 해결하기 위해 연구들이 진행되었다. Kegley and Hiller(1986)는 매그너슨 모스 보증법이 제정된 1975년과 최초 레몬법이 제정된 1982년 사이의 자동차에 대한 보증사례와, 코네티컷 주의 레몬법에 대한 설명과 함께 다른 주들과의 차이점은 어떤 부분인지를 설명하였다. Dahringer and Johnson(1988)은 1982년 코네티컷 주를 시작으로 매그너슨 모스 보증법을 기반으로 한 레몬법이 미국의 여러 주들에서 도입될 때, 소비자가 신차의 수리 문제를 해결하는 것을 돕기 위한 주 입법내용을 소개하였으며, Terence and Michael(1995)은 미국의 조지아, 일리노이, 미네소타, 버지니아 4개주를 대상으로 자동차와 트랙터에 적용되는 레몬법의 차이점에 대해 소개하였다. 주마다 적용기준은 다르지만 적용항목은 주행거리, 사용기간, 수리기간 그리고 수리횟수로 동일하다. 국내에서도 자동차에 한하여 2019년 1월 1일부터 신차 구입 후 1년 이내 또는 2만km 이내로 주행하였을 때 동일한 중대하자 2회 또는 일반하자를 3회 수리하고도 하자가 해결되지 않거나, 누적 수리기간이 30일을 초과한 경우에 신차로의 교환이나 환불을 요청할 수 있는 한국형 레몬법이 도입되었다.

국내에 한국형 레몬법이 도입된 지 3년밖에 되지 않았음에도 불구하고 2022년 1월 기준 공식적으로 신청은 1454건, 종료된 건수는 총 781건으로 이중 교환 및 환불이 3건, 제조사 자체적 손해배상(신청취하조건)이 661건이었으며, 176건은 현재 진행 중이다. 제도적으로 미흡한 부분은 지속해서 보완하고 있으므로 소비자 불만족에 따른 신청 증가와 더불어 한국형 레몬법과 2차원 보증정책에 대한 연구도 활발하게 수행될 것으로 예상되며, 한국형 레몬법의 제도적 문제점 그리고 개선방안과 관련된 연구도 활발하게 진행되고 있다(Oh, 2017; Han and Kang, 2019). 한편, 한국형 레몬법의 시행으로 자동차 제조사 입장에서는 앞으로 더 많은 경제적 부담을 느끼게 될 것이므로 법안의 정확한 이해를 바탕으로 한 보증비용의 분석이 필요하다.

본 연구에서는 2차원 보증으로 판매된 자동차가 일정한 고장횟수를 만족하면 교환 및 환불이 가능한 “한국형 레몬법”을 연구한다. 다계층 구조로 이루어진 자동차 구조에서 고장횟수의 누적을 달리하는 보증단위 모형(모듈/최하위 부품)을 통해 한국형 레몬법의 보증기간 동안 자동차 제조사의 보증비용이 다를 수 있음을 분석한다. 보증비용은 자동차의 사용률, 부품의 신뢰도, 수리비용, 자동차의 판매가격을 변수로 결정한 뒤

Monte-Carlo Simulation을 통해 추정하며 한국형 레몬법의 교환 및 환불 조건 중 하나인 수리시간도 함께 고려하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 2차원 보증정책 및 보증비용과 관련된 기존 연구들을 살펴보고, 제3장에서 한국형 레몬법 하에서 판매된 자동차의 보증비용을 추정하기 위한 모형을 설명하며, 제4장에서는 Simulation 방법과 절차에 관하여 서술하였다. 제5장에서는 수치 예제를 통한 보증비용을 분석하며, 마지막으로 제6장에서는 결론과 향후 연구 방향을 서술하였다.

2. 기존연구

일반적으로 자동차에 적용되고 있는 1차원 보증은 보증기간, 2차원 보증은 두 변수(보증기간과 보증주행거리)로 보증영역을 나타낸다(Kim, 2005). 자동차의 보증비용측면에서 수행된 연구 중 보증기간만 고려하는 1차원적 보증정책보다는 보증기간과 보증주행거리를 함께 고려한 2차원 보증정책이 조금 더 현실을 반영한 모형으로 평가되고 있다. 2차원 보증으로 판매된 제품에 대한 고장 분석에는 1차원과 2차원 접근법이 있다. 1차원 접근법에서는 제품고장을 1차원 포인트과정(Point Processes)으로 보며, 2차원 접근법에서는 제품고장을 이변량 분포함수로 나타내어 보증영역 내에 발생하는 2차원에서의 포인트로서 모형화한다. 1차원 접근법에서는 제품 사용률이 사용자마다 다르며 특정 사용자에 대한 제품 사용률이 일정하다고 가정하고 분석하는데, Kim *et al.*(2020)은 자동차의 사용률은 사용자마다 다르며 특정 사용자의 제품 사용률은 일정하다는 가정 하에서 사용률에 따른 보증종료시점을 분석하는 연구를 수행하였다.

그동안 2차원 보증정책을 바탕으로 다양한 연구가 진행됐으며, 그중 Kim(2000)은 사용시간과 사용거리 중 먼저 도래하는 제품 중 일정범위까지는 고장이 발생한 제품을 신제품으로 무료로 교체해주고, 이후에 발생한 고장에 대해서는 보증범위에 한하여 사용시간 및 사용량에 비례해 일정액을 보상해주는 연구를 수행하였다. Jung(2019)은 일반보증과 함께 재생교체 보증이 함께 연장되는 새로운 보증모형을 제시하였고, 보증기간에 무료로 수리하여 주는 무료보증과 사용자가 일부 금액을 부담하는 비례보증의 두 가지 경우로 구분하여 제조사 입장에서의 총 평균보증비용을 연구하였다. 또한, Yun and Yoo(1996)는 사용시간과 사용거리 중 먼저 도래하는 제품 중 일정범위까지는 고장이 발생한 제품을 새 제품으로 교체해주고, 이후 보증범위까지는 고장이 발생할 시 수리하는 내용으로 일차원 접근 방법에 따른 평균보증비용을 추정하는 연구를 진행하였다. 그리고 Rao(2000)는 2차원 보증정책 하에서 제품고장을 이변량 지수분포로 표현하고 재생함수를 도출하여 보증비용을 분석하였다.

보증정책과 관련된 연구로 Chun and Tang(1999)은 제품의

사용률에 따른 2차원 보증정책을 제시하였으며, Kim *et al.*(2005)은 2차원적 보증정책 하에서 판매되는 수리 가능한 품목에 대해 사용기간과 사용량의 2차원 영역에 따라 최소수리-교체 정책을 연구하였다. 그리고 Bai and Pham(2005)은 일정 횟수까지는 수리를 진행하고, 그 이후에는 새 제품으로 교환하는 보증정책을 연구하였다. 이 외 Kwon(2008)은 자동차의 사용기간과 주행거리 데이터를 기반으로 주행거리별 부품의 신뢰도를 연구하였으며, Wang *et al.*(2017)은 제조사의 관점에서 판매된 중고제품의 보증비용을 최소화하기 위해 판매된 제품의 업그レード 또는 예방정비를 수행하는 2차원 보증정책에 관해 연구하였다. Zhang *et al.*(2019)은 자동차 제조업체의 매출 증가에 따른 수입과 보증비용으로 인한 지출 사이의 균형을 맞춰 자동차의 사용시간과 주행거리에 따른 자동차 제조업체의 기대예상이익을 최대화할 수 있는 2차원 보증기간을 연구하였다. Kwon(2019)은 보증기간(5년/10만km) 내 수리된 동일차종의 보증수리데이터를 바탕으로 부품의 신뢰도를 추정하였으며, 소비자에게 인도된 지 3년이 지난 자동차는 와이블분포를 적용하여 5년 동안의 주행거리로 환산한 주행거리를 사용하였다. 또한, 추정된 부품의 신뢰도 결과를 바탕으로 주행거리에 따른 고장수를 예측하였다.

레몬법의 보증비용과 관련된 연구로 Husniah *et al.*(2021)은 레몬법 하에서 중요부품(Critical Components)와 비중요부품(Non-Critical Components)로 구성된 제품이 2차원 보증으로 판매되었을 때 보증비용과 보증비용을 최소화하는 레몬법 기간을 연구하였다. Park and Park(2018)은 한국형 레몬법을 2차원적 보증정책에 적용하여, 레몬법으로 인해 제조사에서 환불하는 경우 보증비용을 최소화하는 최적의 보증기간과 보증보험료를 결정하는 연구를 하였다. 그리고 Kim *et al.*(2020)은 한국형 레몬법하에서 판매된 자동차의 기대되는 보증비용을 Monte-Carlo Simulation을 이용하여 추정하였으며, 해당 평균 품질보증 비용은 자동차의 사용시간과 사용거리에 따라 어떻게 변화되는지, 고장률의 변화에 따른 하자횟수와 평균품질보

증비용의 변화를 분석하였다.

3. 모형 설정

한국형 레몬법에서는 고장복구를 위해 교체하는 부품과 관계 없이, 하자현상이 발생한 단위에서 횟수를 누적하므로 제조사는 많은 모듈로 구성된 자동차의 보증단위를 결정하는 것도 보증기간 내 비용을 줄일 수 있는 방법 중 하나이다. 그러므로 본 연구에서는 하자횟수가 누적되는 보증단위를 고장이 발생하는 최하위 부품단위와 모듈단위로 나누어서 보증비용을 비교 분석한다. 또한, 모듈단위에 따른 보증비용을 비교하기 위해 보증비용 산출 모형을 정의하며, 2차원 보증정책 하에 판매된 자동차의 하자현상을 설명한다.

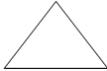
3.1 다계층 구조의 보증단위 모형

본 절에서는 다계층 구조로 이루어진 자동차 구조에서 보증 단위(최하위 부품/모듈)를 달리하는 두 모형을 설명하며, <Table 1>은 자동차의 다계층 구조 설명에 사용되는 기호이다. 기호별 정의는 Han(2015)을 참고하여 작성하였다.

한국형 레몬법에서는 자동차의 부품을 원동기, 동력전달장치, 조향 및 제동장치를 비롯해 주행, 조종, 완충, 연료공급장치, 주행관련 전자장치, 차대 등 주행 및 안전에 위협이 되는 중요하자를 유발하는 중요부품과 그 외 부품인 일반부품으로 구분하고 있다(Park and Park, 2018). 예를 들어, <Figure 1>과 같이 다계층 구조로 이루어진 자동차는 중요하자와 일반하자를 유발하는 모듈 A와 B로 구성되어 있는 것으로 가정한다.

보증단위가 최하위 부품인 A_1 에서 고장이 발생하면 A_1 의 교체가 이루어지며, 하자횟수도 A_1 에 누적된다. 반면, 모듈 B가 보증단위인 경우 최하위 부품 B_1 의 고장은 B_1 의 교체를 통해 복구되지만 하자횟수는 모듈 B에 누적된다. 이러한 예로

Table 1. Definition of Symbols Used in Multi-level Structure

Category	Symbol	Definition
Component		Unit at the lowest level in the system structure trees
Module		Unit at the intermediate levels in the system structure trees
System		Unit at the highest level in the system structure trees
Warranty unit		Units for counting the number of defects
Replacement target		Units subject to replacement
AND Gate		Series structure

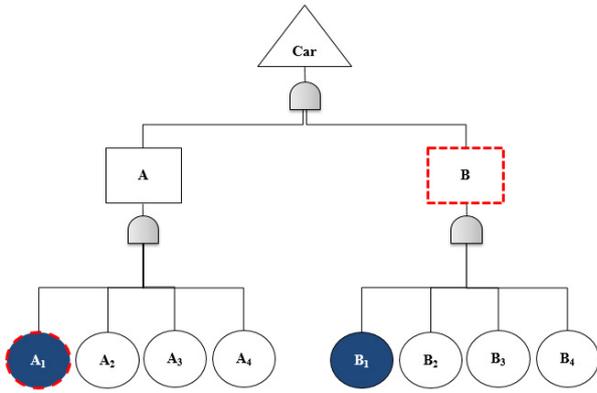


Figure 1. An Example of a Multi-level Structure Model

자동차의 대표적인 모듈인 엔진에서 “주행 중 과도한 떨림”이라는 하자가 발생되었을 경우, 엔진부품 중 최하위 부품인 점화플러그라는 부품의 엔진 내에서 점화 시 폭발이 제대로 이루어지지 않아 발생되지 않아 떨림이라는 하자가 발생할 확률이 높다. 이 하자현상을 해결하기 위해 점화플러그가 교체되지만 엔진 모듈에 속해 있는 부품이므로, 하자현상의 누적은 엔진에서 누적되게 된다.

3.2 사용률과 보증비용 산출 모형

한국형 레몬법 하에서 보증기간에 기대되는 총보증비용을 추정하기 위해 하자로 인해 발생하는 교체 및 환불 비용을 모형화하고자 한다. 한국형 레몬법에서 자동차의 하자로 인해 고객이 제조사에 환불 또는 교체 요청은 일정한 하자횟수를 만족하면서 구입 후 1년 그리고 2만km 이내인 경우에만 가능하다. 즉, 자동차가 소유주에게 인도된 지 1년이 지나거나 2만 km를 초과 주행하였다면 제조사가 제공하는 일반 무상보증의 혜택을 받아야 한다. 따라서 한국형 레몬법 하에서 자동차 제조사가 부담하게 될 총 보증비용은 하자가 발생한 부품의 수리비용과 고객의 요청에 따른 환불비용의 합으로 산출할 수 있다. 부품의 수리비용은 부품의 교체비용과 교체 시 걸리는

시간당 공임비의 합으로 나타낸다. 그리고 환불비용은 환불시점에 차량의 주행거리를 바탕으로 계산하며 추가로 부대비용(취·등록세 등)이 포함된다. 한국형 레몬법의 환불 및 교환의 조건을 만족하지 못하고 보증기간이 지나면 환불비용을 제외한 교체비용만 보증비용으로 계산한다.

<Table 2>는 한국형 레몬법에 제조사에서 부담하는 총보증비용을 산출하기 위해 사용된 기호이다.

총 보증비용 E_C 은 누적 수리비용 R_C 과 환불비용 C_r 의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_C = R_C + C_r \tag{1}$$

누적 수리비용 R_C 은 하자가 발생된 부품의 교체비용과 수리시간에 따른 공임비의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_C = \sum_{x=0}^n G_x + \sum_{y=0}^n I_y + (R_T \times P) \tag{2}$$

한국형 레몬법에서 규정하고 있는 환불비용의 산출식은 다음과 같다(Park and Park,2008).

$$C_r = P_s \left(1 - \frac{d}{150,000km}\right) + C_0, \quad d \geq 0 \tag{3}$$

환불비용을 계산하기 위해선 환불시점의 누적주행거리가 필요하지만, 자동차의 경우 사용자마다 사용용도가 다르므로 주행거리의 정의가 필요하다. <Figure 2>에서 자동차는 자동차 제조사가 제공하는 사용시간에 따른 보증기간(T_L)과 주행 거리에 따른 보증거리(D_L), 한국형 레몬법 적용이 가능한 사용시간에 따른 보증기간(T_0), 주행 거리에 따른 보증거리(D_0)로 나누어진다. 본 연구에서는 한국형 레몬법의 보증영역 $[0, T_0) \times [0, D_0)$ 을 고려하였다. 따라서 사용률 r 을 가지는 사용자의 누적 사용기간(t)이 보증기간(T_0)보다 작고, 사용자의 누적 주행거리(D)가 보증거리(D_0)보다 짧아야 한국형 레몬법에 따라 고객은 하자로 인한 교환 또는 환불을 요청할 수 있다.

Table 2. Definition of Model Parameters

Type	Definition	Type	Definition
r	Usage rate	R_T	Accumulated repair time
T_L	Warranty period	R_C	Accumulated repair cost
D_L	Warranty mileage	E_C	Total warranty cost
T_0	Warranty period of Korean Lemon Law	G_x	Repair cost of minor parts
D_0	Warranty mileage of Korean Lemon Law	I_y	Repair cost of major parts
t	Accumulated use time	P	Labor cost
D	Accumulated mileage	C_0	Tax
I_F	Accumulated number of major defects for refund	P_s	Car price
G_F	Accumulated number of minor defects for refund	d	Mileage of refund time
C_r	Refund cost		

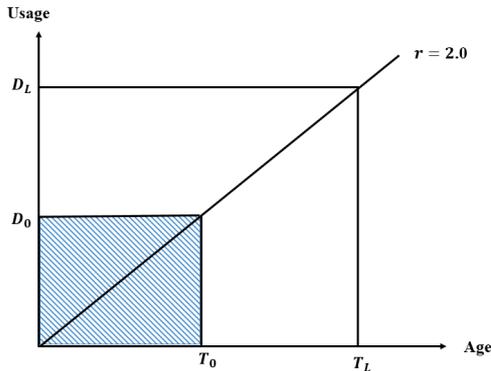


Figure 2. Two-dimensional Warranty Period

사용률 r 은 자동차의 연간 주행거리로 r 이 2.0일 경우 연간 주행거리는 2만km가 된다. 따라서 사용률 r 이 2.0보다 크다면, 사용자는 레몬법의 보증기간인 1년보다 보증거리인 2만km에 먼저 도달하여 보증이 종료된다. 반대로 사용률 r 이 2.0보다 작으면, 보증기간인 1년에 먼저 도달하여 보증이 종료된다. 즉, 본 연구에서는 다양한 특정 사용자에 대한 사용률 r 이 다르게 주어진 것으로 가정하는 1차원 접근법을 사용한다.

한국형 레몬법에서는 동일한 하자현상에 한해 중요부품은 2회, 일반부품은 3회까지 부품의 교체를 진행하고 이후부터는 고객이 환불 또는 교환을 요청할 수 있다. 그리고 부품의 교체기간이 30일을 초과할 경우 또한 자동차의 환불 또는 교환을 요청할 수 있다. 이를 바탕으로 한 본 연구에서의 보증비용 모형의 가정사항은 다음과 같다.

1. 하자발생 시 서비스센터까지의 이동시간과 수리를 위해 대기하는 시간은 무시한다.
2. 한국형 레몬법의 환불 및 교환 조건을 충족할 경우, 환불만 실시한다.
3. 하자로 인한 부품의 수리는 부품을 새것으로 교체(완전수리)한다.

4. 시뮬레이션 절차 및 구성

한국형 레몬법에서는 교환 및 환불을 위한 하자발생 횟수와 기간이 주어져 있는데, 이 경우 자동차 부품들의 하자발생 시점은 완전수리로 재생과정(Renewal Process)을 따른다. 즉, 부품들의 개수가 많을수록, 부품들의 신뢰도가 낮을수록, 하자의 발생횟수가 많아질수록 수리적 복잡성이 높아지므로 많은 수치계산이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 어려움 점을 해결하기 위해 Simulation을 활용하여 한국형 레몬법의 보증비용을 추정하였으며, 절차는 다음과 같다.

- Step 1. 사용률 r 을 입력한다.
- Step 2. 하자분포에 따라 하자시간을 생성한 후 Step 2.1로 이동한다.

- 2.1 하자가 발생된 부품의 종류에 따라 하자가 발생한 부품의 번호를 생성(입력)하고 Step 2.2로 이동한다.
- 2.2 자동차의 누적 사용시간 t 와 누적 주행거리 D , 주요 부품의 총 하자횟수 I_F , 일반부품의 총 하자횟수 G_F 를 계산하고 Step 3으로 이동한다.
- Step 3. 레몬법의 보증조건 중 자동차의 누적 사용시간 t 이 1년(T_0)을 초과하는 경우 Step 7로 이동한다. 아니면 Step 3.1로 이동한다.
 - 3.1 자동차의 누적 주행거리 D 가 2만km(D_0)를 초과하는 경우 Step 7로 이동한다. 아니면 Step 3.3으로 이동한다.
 - 3.2 중요부품의 누적 하자횟수 I_F 가 3회라면 Step 6으로 이동한다. 아니면 Step 3.3으로 이동한다.
 - 3.3 일반부품의 누적 하자횟수 G_F 가 4회라면 Step 6으로 이동한다. 아니면 Step 4로 이동한다.
- Step 4. 하자가 발생한 부품의 수리를 위해 수리분포에 따라 수리시간을 생성한 후 Step 4.1로 이동한다.
 - 4.1 자동차의 누적 수리시간 R_T 와 누적 사용시간 t 을 계산하고 Step 5로 이동한다.
- Step 5. 자동차의 누적 수리시간 R_T 이 720시간을 초과한 경우 Step 6으로 이동한다. 아니면 Step 5.1로 이동한다.
 - 5.1 자동차의 누적 사용시간 t 이 1년을 초과하는 경우 Step 7로 이동한다. 아니면 Step 2로 이동한다.
- Step 6. 누적 수리비용 R_C 을 계산한 후 Step 6.1로 이동한다.
 - 6.1 환불비용 C_r 을 계산하고 Step 6.2로 이동한다.
 - 6.2 총 보증비용 E_C 을 계산하고 Step 7로 이동한다.
- Step 7. 시뮬레이션을 종료한다.

본 연구에서는 Monte-Carlo Simulation을 활용해서 확률분포에 따른 각 부품의 하자시간과 수리시간을 생성하였다. 이는 확률 밀도함수를 이용해서 확률분포의 분포 특성이 반영된 난수(Random Number)를 추출하는 방식이다. 그리고 시뮬레이션을 통해 한국형 레몬법의 환불비용을 구하기 위해 자동차의 판매가격(P_S)은 40,000,000원, 부대비용(C_0)은 차량 판매가격의 7%인 2,800,000원으로 가정하였다. 일반부품과 중요부품의 신뢰도는 중요부품에 해당하는 동력전달 부품의 신뢰도는 보증수리데이터에 기반하여 추정된 Kwon(2019)의 논문을 참고하여(형상모수(T)는 1,179, 척도모수(b)는 1,037,375(신뢰도 99.64%)) 설정하였으며, 일반부품과 중요부품 중 중요부품의 신뢰도가 더 높다고 가정하였다. 해당 신뢰도는 동력전달 부품의 신뢰도이며, 한국형 레몬법에서 동력전달 부품은 중요부품으로 분류되기에, 해당 신뢰도를 바탕으로 부품의 신뢰도를 가정하였다. 부품과 모듈 단위 보증모형 모두 일반·중요 부품은 각 100개씩으로 가정하며, 모듈단위의 경우 20개의 부품이 하나의 모듈에 연결되어 있다고 가정한다. 즉, 모듈단위의 일반·중요 부품에 연결된 모듈의 수는 총 10개이며, <Figure 3>과 같다.

본 연구에서는 Kim et al.(2020)이 제안한 시뮬레이션 반복횟수 결정을 참고하여 Two Sample T-Test(유의수준 5%)를 통한 유

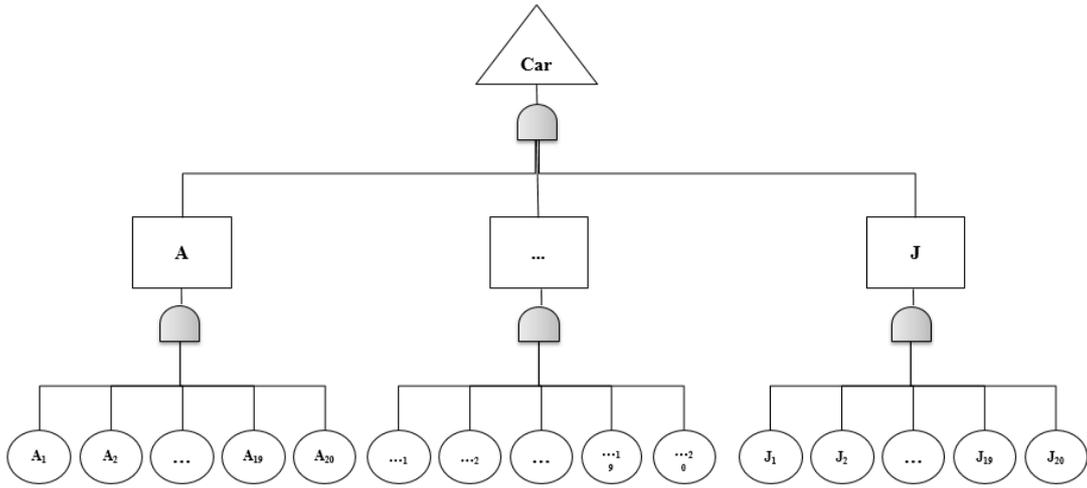


Figure 3. Example of Warranty Units in a System

Table 3. Two Sample t-test for Model Verification about Repetition Number

r	Number of repetitions	Average warranty cost	Standard deviation	Standard error	Significance probability
0.5	60,000	5,499,536.66	2,693,383.40	10,995.69	0,480
	80,000	5,500,268.50	2,687,745.76	9,502.61	

의성 검증으로 시뮬레이션 반복횟수가 충분한지 검증하였다. 검증을 위해 다음과 같은 귀무가설 H_0 와 대립가설 H_1 을 설정하였으며, 검증 결과는 <Table 3>과 같이 유의확률이 0.480으로 귀무가설이 채택되어 반복횟수를 60,000번으로 하였다.

- 귀무가설 H_0 : 반복횟수 60,000번과 80,000번의 총 평균 보증비용은 서로 같을 것이다.
- 대립가설 H_1 : 반복횟수 60,000번과 80,000번의 총 평균 보증비용은 서로 다를 것이다.
- μ_1 : 반복횟수 60,000번의 총 평균보증비용
- μ_2 : 반복횟수 80,000번의 총 평균보증비용

$$H_0: \mu_1 = \mu_2, H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \quad (4)$$

5. 수치예제

한국형 레몬법에서 제조사의 보증비용은 2차원 보증기간(주행거리, 사용기간) 내 자동차의 중대 및 일반하자의 발생횟수, 교환된 부품, 총 수리시간, 환불시점의 누적주행거리, 자동차의 판매가격에 영향을 받는다. 이 중 누적주행거리는 사용률 r , 중대 및 일반하자의 발생횟수는 부품의 신뢰도와 관련이 있으며, 수리비용과 판매가격에 따라 보증단위가 모듈, 부품일 때 각각 발생하는 보증비용이 달라진다. 이에, 연구에서는 사용률 r 의 변화, 부품의 신뢰도 변화, 수리비용 및 판매가격 변화에 따른 각 보증단위의 총보증비용을 비교한다. MathWroks

의 Matlab R2019a로 시뮬레이션을 개발하고 실험환경은 AMD Ryzen 5 3600 6-Core Processor @ 3.59GHz, 메모리(RAM) 32GB이다. <Table 4>와 <Table 5>는 수치실험에 사용한 일반 부품과 중요부품의 입력정보이다.

5.1 사용률 r 의 변화에 따른 총 평균보증비용 분석

먼저 첫 번째 수치실험에서는 자동차의 사용률 r 을 0.5부터 3.4까지 0.1씩 증가시켜 보증단위에 따른 총 평균보증비용을 비교한다. 사용률 r 이 0.5 ~ 2.0 구간에서 부품과 모듈단위의 총 평균보증비용은 <Figure 4>와 같이 일정한 추세를 보이지 않으면서 각 사용률의 총 평균보증비용은 서로 달라 Two Sample T-Test를 통해 사용률 간 총 평균보증비용이 같은지 검증하였다. 검증을 위해 비용의 편차가 부품단위 보다 큰 모듈단위의 사용률 r 0.7과 1.8을 선택하였으며, <Table 6>과 같이 유의수준 0.05를 만족하는 것으로 나타났다. 이는 사용률 r 이 0.5부터 2.0까지의 총 평균보증비용은 같다고 할 수 있다.

사용률 r 이 2.0보다 작은 경우는 1년에 2만km 이하를 주행하는 사용자로서, 한국형 레몬법의 보증기간(1년)과 보증거리(2만km) 모두를 만족하므로, 1년 동안 레몬법의 보증혜택을 받을 수 있지만, 2.0보다 크면 보증기간이 지나기 전에 보증거리에 먼저 도달하여 보증이 종료됨에 따라, 보증혜택을 받을 수 없고, 그 결과로 보증비용이 감소하였다고도 판단할 수 있다. 즉, 한국형 레몬법의 보증기간 내 주행거리가 많은 사용자일수록 자동차 제조사가 부담해야 할 보증비용이 줄어든다는 것으로 판단할 수 있다.

Table 4. Input Data of Minor Parts

Part name	Part repair cost	Labor cost	Average repair time	Average repair time deviation	Scale parameter	Shape parameter
Minor part_1	50,000	20,000	1.0	0.0	50,000	1.31
Minor part_2	55,000	20,000	1.5	0.1	50,000	1.32
Minor part_3	60,000	20,000	2.0	0.2	50,000	1.33
Minor part_4	65,000	20,000	2.5	0.3	50,000	1.34
Minor part_5	70,000	20,000	3.0	0.4	50,000	1.35
Minor part_6	75,000	20,000	3.5	0.5	50,000	1.36
Minor part_7	80,000	20,000	4.0	0.6	50,000	1.37
Minor part_8	85,000	20,000	4.5	0.7	50,000	1.38
Minor part_9	90,000	20,000	5.0	0.8	50,000	1.39
Minor part_10	95,000	20,000	5.5	0.9	50,000	1.40
Minor part_11	100,000	20,000	6.0	1.0	50,000	1.41
Minor part_12	105,000	20,000	6.5	1.1	50,000	1.42
.
Minor part_96	525,000	20,000	48.5	9.5	50,000	2.26
Minor part_97	530,000	20,000	49.0	9.6	50,000	2.27
Minor part_98	535,000	20,000	49.5	9.7	50,000	2.28
Minor part_99	540,000	20,000	50.0	9.8	50,000	2.29
Minor part_100	545,000	20,000	50.5	9.9	50,000	2.3

Table 5. Input Data of Major Parts

Part name	Part repair cost	Labor cost	Average repair time	Average repair time deviation	Scale parameter	Shape parameter
Major part_1	200,000	20,000	51	10	100,000	1.31
Major part_2	210,000	20,000	51.5	10.1	100,000	1.32
Major part_3	220,000	20,000	52	10.2	100,000	1.33
Major part_4	230,000	20,000	52.5	10.3	100,000	1.34
Major part_5	240,000	20,000	53	10.4	100,000	1.35
Major part_6	250,000	20,000	53.5	10.5	100,000	1.36
Major part_7	260,000	20,000	54	10.6	100,000	1.37
Major part_8	270,000	20,000	54.5	10.7	100,000	1.38
Major part_9	280,000	20,000	55	10.8	100,000	1.39
Major part_10	290,000	20,000	55.5	10.9	100,000	1.40
Major part_11	300,000	20,000	56	11	100,000	1.41
Major part_12	310,000	20,000	56.5	11.1	100,000	1.42
.
Major part_96	1,140,000	20,000	98	19.4	100,000	2.25
Major part_97	1,150,000	20,000	98.5	19.5	100,000	2.26
Major part_98	1,160,000	20,000	99	19.6	100,000	2.27
Major part_99	1,170,000	20,000	99.5	19.7	100,000	2.28
Major part_100	1,180,000	20,000	100	19.8	100,000	2.29

또한, 사용률 r 에 따른 모듈단위 총 평균보증비용이 부품단위 보다 더 높으며 <Figure 5>를 통해 상세비용을 보면, 일반·중요부품의 수리비용은 부품과 모듈단위는 비슷한 결과를 보

여주고 있다. 하지만 환불비용에서는 큰 차이를 보이고 있는데, 직렬구조를 고려한 다계층구조에서는 모듈단위가 부품단위 보다 더 불리하기 때문이다. 그리고 중요부품의 신뢰도가 일반

부품보다 높다고 가정하였음에도 모듈단위에서의 환불비용이 모두 중요하자로 인해 발생한 것을 <Table 7>을 통해 알 수 있

다. 이는 한국형 레몬법에서 환불조건이 일반하자의 하자누적 횟수 보다 중요하자가 1회 더 적기 때문이라고 볼 수 있다.

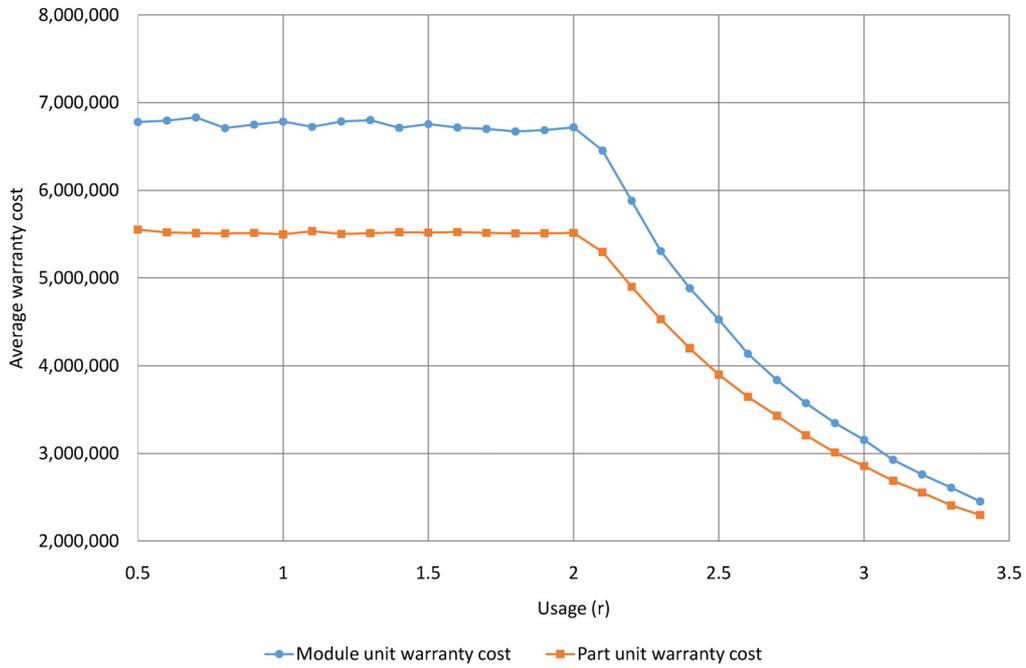


Figure 4. Average Warranty Costs in Cases with Different Usage(r)

Table 6. Two Sample T-test for Usage 0.7 and 1.8

r	Number of repetitions	Average warranty cost	Standard deviation	Standard error of the mean	Significance probability
0.7	60,000	5,510,710.39	2,272,896.24	11,136.58	0,441
1.8	60,000	5,508,358.40	2,719,470.37	11,102.19	

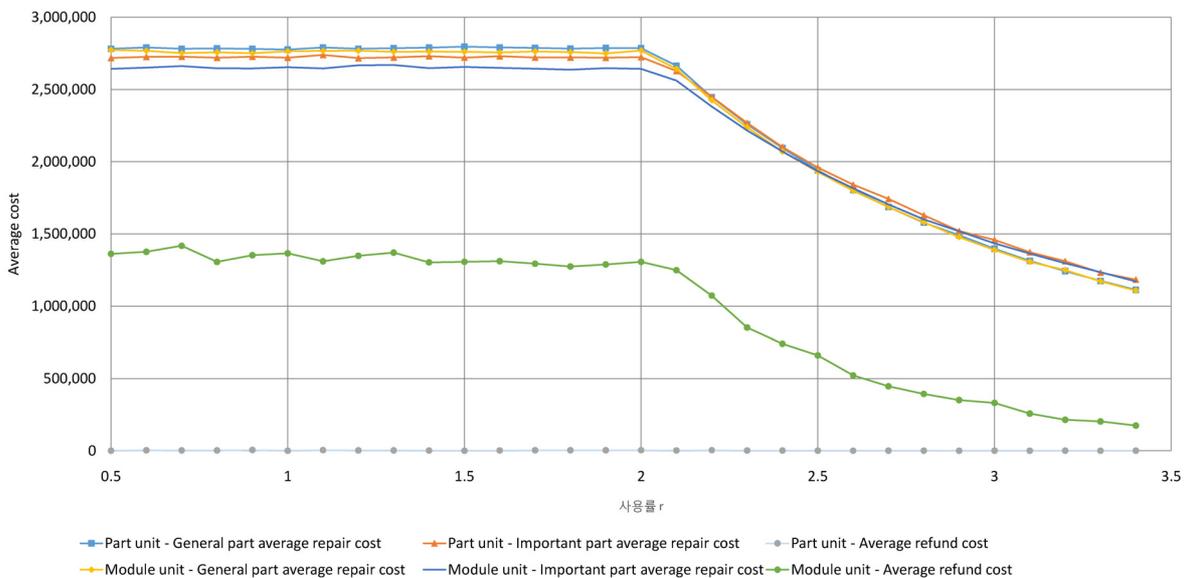


Figure 5. Average Repair and Refund Costs in Different Usage(r)

Table 7. Probability of Refunds in Module Warranty Units

r	0.5	2.5	3.4
The probability of refund due to a major defect	3.26%	1.71%	0.45%
The probability of refund due to a minor defect	0%	0%	0%

사용률 r 의 변화실험을 통해 보증기간 내 주행거리 높은 소비자는 한국형 레몬법의 혜택을 누리는 것이 어려우며, 특히 <Table 7>을 통해 사용률 r 2.0 이후부터는 중요하자로 인한 환불비용이 급격하게 줄어든다. 만약 자동차 주행거리가 많은 소비자가 보증단위를 선택할 수 있다면 모듈단위로 설정하는 것이 더 유리하다.

5.2 부품의 신뢰도 변화에 따른 총 평균보증비용 분석

일반 · 중요부품의 신뢰도 변화에 따른 모듈과 부품단위의

총 평균보증비용 변화를 분석하며 신뢰도 및 사용률은 제외한 시뮬레이션의 입력값은 5.1절과 같다. 중요부품과 일반부품의 척도모수 (T)값을 -70%, -30%, +100%, +200% 경우로 실험을 진행하였으며, 사용률 r 은 0.5, 2.0, 3.5로 나누어 진행하였다.

<Figure 6>과 <Figure 7>은 사용률 r 이 0.5와 2.0일 때 부품들의 척도모수 (T) 변화에 따른 총 평균보증비용을 나타낸 것으로, 척도모수 (T)값을 -70% 변화한 경우, 부품단위의 총 평균보증비용이 모듈단위 보다 높은 것으로 나타났다. 반면, 척도모수 (T)값을 +100%, 200%로 변화시키면 보증단위에 관계없이 총 평균보증비용은 유의성 0.05 이내에서 같은 값을 보여 주었다. 보증단위에 따른 평균 수리비용과 평균 환불비용을

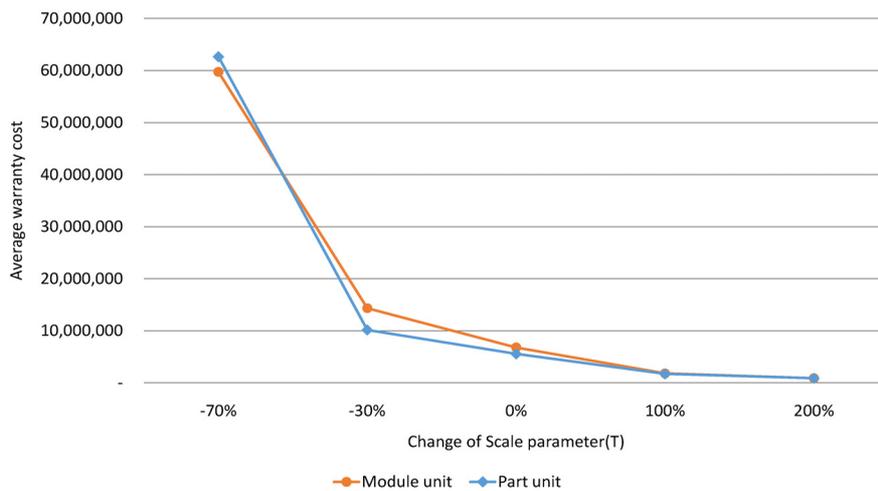


Figure 6. Average Warranty Cost in Different Reliability ($r=0.5$)

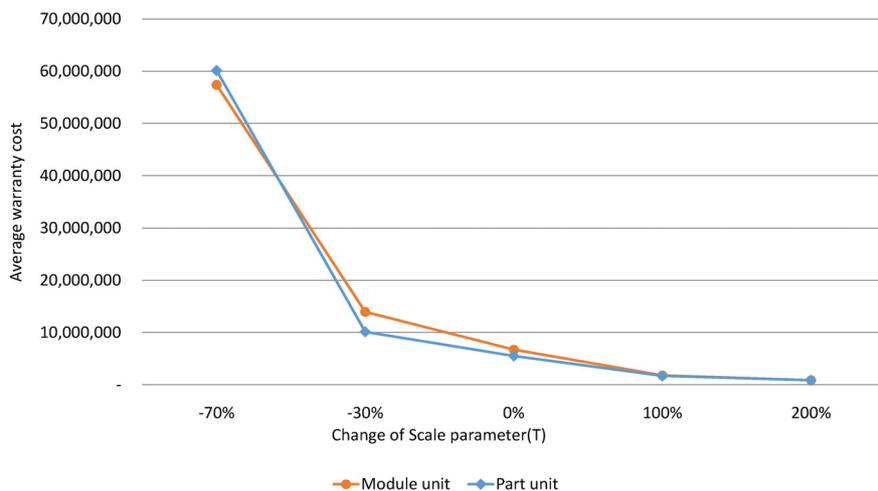


Figure 7. Average Warranty Cost in Different Scale Parameters (usage(r)= 2.0)

살펴보면, 평균 환불비용은 비슷한 결과를 보여준다. 그러나 평균 수리비용의 경우 부품단위가 모듈단위 보다 높아서 총 평균보증비용도 부품단위가 높은 것을 <Table 8>을 통해 알 수 있다. 즉, 부품의 신뢰도 저하로 인한 잦은 고장은 한국형 레몬법에 환불 조건을 만족하기까지 높은 수리비용을 발생하기 때문에 오히려 모듈단위에서 보증을 하는 것이 더 나은 선택으로 보여진다.

또한, 한국형 레몬법하에서는 같은 하자현상으로 인한 하자횟수조건 또는 정해진 수리기간을 초과하면 고객은 환불을 요청할 수 있는데, 두 보증단위 모두 환불비용에 큰 편차가 없으므로 환불이 될 확률은 비슷하다고 할 수 있다. 다만, 환불조건이 하자횟수와 수리기간으로 나누어짐에 따라, 환불사유에 대해 확인해 보았다. 우선 평균 하자횟수를 확인한 결과 <Table 9>에서 부품단위에서 일반부품 평균 2.2회, 중요부품 평균 0.5회 더 많은 하자가 발생하였으며 그 결과로 평균수리비용이 높게 나왔다.

모듈단위에서 수리기간 초과로 인한 보증종료가 전체 보증종료 중 60%, 중요부품의 하자횟수 초과가 40%이며, 부품단위는 수리기간 초과 99%, 중요부품의 하자횟수 초과 0.5%, 일

반부품의 하자횟수 초과가 0.5%로 나타났다. 즉, 부품들의 잦은 하자발생으로 인해 한국형 레몬법의 환불조건을 충족할 확률이 높아졌으며, 모듈단위가 부품단위 보다 적은 수의 하자로 하자횟수조건을 충족할 수 있으므로 높은 수리비용이 발생하기 전에 환불이 되므로 수리비용으로 인한 총 보증비용의 상승이 상대적으로 적었다. 반면, 부품단위는 환불을 요청할 수 있는 하자횟수 조건을 충족하지 못하였지만 수리기간 초과로 인한 환불이 99%인 결과로 볼 때, 총 수리비용에서 공임비가 차지하는 비율도 높다는 것을 알 수 있다.

사용률 r 이 3.5인 경우의 총 평균보증비용인 <Figure 8>에는 이전 5.1의 실험결과와 동일하게 부품의 신뢰도와 관계없이 보증단위를 부품단위에서 설정하는 것이, 상대적으로 보증비용이 더 적게 나타났다. 또한, <Figure 6>, <Figure 7>과 동일하게 부품의 신뢰도가 높은 경우에는 보증단위와 상관없이 총 평균보증비용은 비슷하게 나타났다.

신뢰도가 낮은 부품의 경우 제조사에서 부담하는 평균수리비용을 증가시키므로 모듈단위로 보증해서 빠르게 소비자에게 환불 하는 것이 더 경제적인 선택이다. 물론 소비자 역시 고

Table 8. Average Repair and Refund Costs of Warranty Units

r	Module unit		Part unit	
	Average repair cost	Average refund cost	Average repair cost	Average refund cost
0.5	17,786,663	41,946,965	20,803,895	41,847,635
2.0	17,766,446	39,626,214	20,808,805	39,317,051

Table 9. Average Number of Minor and Major Failures for Warranty Units

r	Module unit		Part unit	
	Average number of minor failure	Average number of major failure	Average number of minor failure	Average number of major failure
0.5	14.8	4.7	17.0	5.4
2.0	14.7	4.7	16.9	5.4

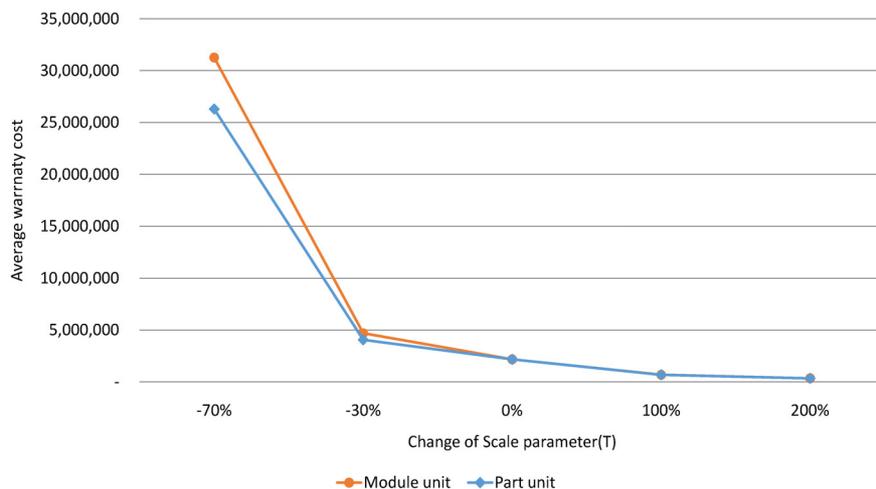


Figure 8. Average Warranty Cost in Different Scale Parameters (usage $r=3.5$)

장이 잦은 자동차는 가급적이면 이른 시기에 교환 및 환불 받는 것이 좋다. 그리고 부품의 신뢰도가 높을수록 하자 발생횟수가 줄어들기 때문에 모든 소비자에게 좋지만 특히 한국형 레몬법의 혜택을 보기 어려운 주행거리가 높은 소비자에게는 보증기간 이후에도 낮은 수리비용으로 자동차를 운영할 수 있을 것이다.

5.3 수리비용 및 판매가격 변화에 따른 총 평균보증비용 분석

본 실험에서는 수리비용 중 공임비와 자동차의 판매가격을 같이 +100%, +200%, +300%, +400% 변화시켰을 때 보증단위에 따른 총 평균보증비용을 비교하였으며 사용률 r 은 0.5, 2.5 3.5로 설정하였다. <Figure 9>와 <Figure 10>의 총 평균보증비용 추세를 볼 때, 공임비와 판매가격이 증가할수록 두 보증단위의 총 평균보증비용 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 본 실험

의 부품의 신뢰도는 5.1절과 같으므로 공임비 및 판매가격 증가비용이 곧 증가되는 총 평균보증비용의 비율과 같다고 할 수 있으며, 하자횟수에 따른 보증비용의 변화는 없다고 할 수 있다. 또한, <Figure 9>, <Figure 10>, <Figure 11>에서 사용률 r 이 높을수록 두 보증단위의 총 평균보증비용 차이가 줄어들며 이는 5.1절과 같은 추세를 보여준다. 즉, 부품들의 신뢰도 변화 없이 차량의 공임비와 차량가격 상승은 총 평균보증비용 증가를 가져오며 그 외 결과들의 추세는 5.1절과 같다.

현재 수치실험에 설정된 부품의 신뢰도 수준으로는 제조사 입장에서는 부품단위의 보증하는 것이 더 경제적이라는 것을 알 수 있다. 이는 공임비 증가로 인해 평균수리비용이 증가하더라도 판매가격이 더 높은 수준으로 높아졌기 때문이다. 그러나 사용률이 높은 고객일수록 각 보증단위의 평균품질비용 차이가 줄어들고 있어서 제조사는 어느 보증단위를 선택하더라도 큰 영향은 없다고 볼 수 있다.

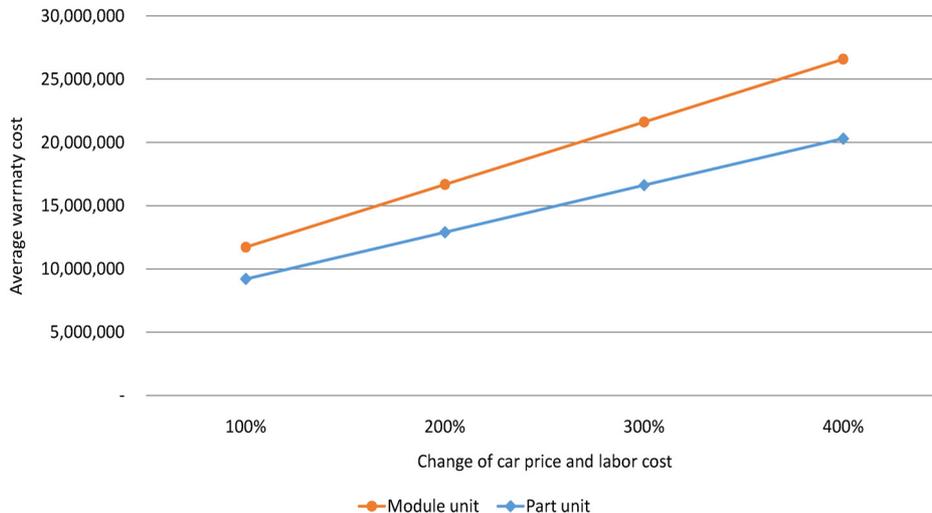


Figure 9. Average Warranty Cost in Different Car Prices (usage(r)= 0.5)

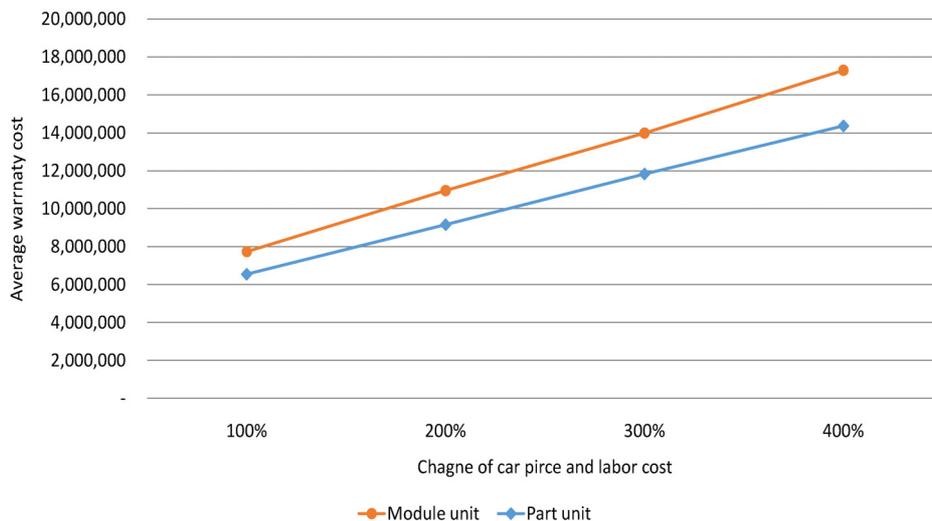


Figure 10. Average Warranty Cost in Different Car Prices ($r=2.5$)

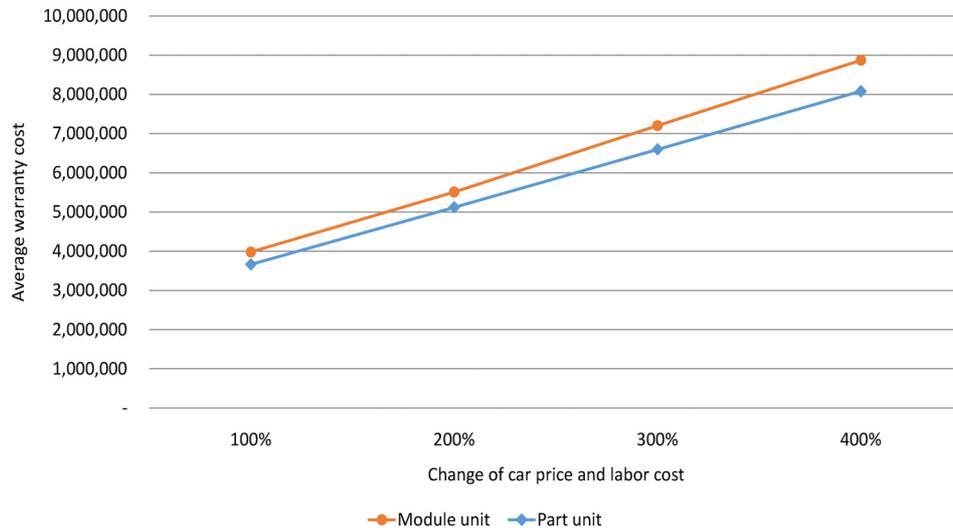


Figure 11. Average Warranty Cost in Different Car Price and Labor Cost (r=3.5)

6. 결 론

본 연구는 최근 시행된 한국형 레몬법을 적용한 다계층 구조인 자동차의 2차원 보증정책 연구로 제조사 입장에서 총보증비용을 최소화하는 보증단위 분석 연구를 수행하였다. 수치실험을 통해 자동차의 사용률 r , 부품의 신뢰도, 공임비 및 판매가격 변화를 통해 보증단위에 따른 총평균보증비용을 비교 분석하였다. 먼저 한국형 레몬법에서는 같은 하자가 지속해서 발생하면 고객이 교환 또는 환불을 요청할 수 있으며 부품의 신뢰도가 낮아 잦은 하자 현상이 발생하는 경우 수리비용으로 인한 총평균보증비용이 증가하는 것을 막기 위해 모듈단위보증에 더 유리한 것을 알 수 있었다. 이는 모듈보다 부품단위가 환불을 위한 하자횟수를 만족시키기 위해 더 많은 하자를 허용함에 따라 발생하는 높은 수리비용이 들어간 경우와 같은 하자횟수는 충족하지 못하지만, 수리시간이 30일을 넘겨 공임비가 많이 발생하기 때문이다. 다양한 민감도 분석을 통해 얻은 결과는 한국형 레몬법으로 인해 자동차 제조사가 선택하여야 할 보증단위의 선택과 보증비용의 산정과 관련하여 기본자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 자동차 제조사에서 신차를 개발할 때 개발단계에서 각 부품을 샘플로 만들어 T-car, Proto, Pilot 단계를 거치면서 충분한 양산성 평가를 하는데, 이때 각 부품에 설정된 신뢰도를 활용한다면 차량을 출시하기 전 단계에서도 충분한 보증비용 분석이 가능하리라 판단된다.

또한, 자동차를 운행하는 소비자 역시 본 연구 결과를 통해 한국형 레몬법에 대해 다른 관점을 가질 수 있을 것으로 생각된다. 먼저 평소 주행거리가 많은 소비자는 이른 시간에 2차원 보증을 만족시켜 한국형 레몬법의 혜택을 적게 볼 수밖에 없을 것으로 예상된다. 만약 중대 또는 일반하자의 발생빈도가 높은 자동차라면, 보증기간 이후에도 노후화로 인해 발생빈도가 높아질 수 있으므로 소비자는 모듈단위로 보증해서 이른 시기에 교환 및 환불받는 것이 유리하다. 그리고 수리비용과

판매가격이 모두 높은 자동차라면 제조사는 높은 환불비용을 피하려고 부품단위로 보증하겠지만, 소비자는 높은 판매가격을 지불하고 구매한 자동차인 만큼 모듈단위로 보증하는 것을 원할 것이다.

본 연구에서는 한국형 레몬법에서 보증조건 중 교환은 고려하지 않았으며, 향후 차량의 교환과 관련된 연구를 포함한 보증정책 및 보증비용과 관련된 연구가 필요할 것으로 예상된다. 또한, 레몬법에서 환불이나 교환이 발생하여 대외적인 자동차 제조사의 브랜드 이미지 하락을 정량적으로 평가할 수 있는 기준을 정립한 연구를 바탕으로 보증비용에 대한 비용분석과 같은 제조현장에서 직접 사용할 수 있는 연구가 진행될 필요가 있다. 또한, 본 연구에서 모든 부품은 하자가 발생할 시 자동차의 운행이 중단되는 직렬구조로 연구를 진행하였지만, 부품에 하자가 발생하더라도 자동차의 운행이 가능한 부품들을 포함한 보증비용의 분석이 추가적인 연구과제가 될 것이다.

참고문헌

Bai, J. and Pham, H. (2005), Repair-limit risk-free warranty policies with imperfect repair, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, **36**(6), 765-772.

Chun, Y. H. and Tang, K. (1999), Cost analysis of two-attribute warranty policies based on the product usage rate, *IEEE Transactions on Engineering Management*, **46**(2), 201-209.

Dahringer, L. D. and Johnson, D. R. (1988), Lemon laws: Intent, experience and proconsumer model, *Journal of Consumer Affairs*, **22**(1), 158-170.

Han, B. K. and Kang, S. Y. (2019), Korean lemon law(Law for refund and exchange of defective cars), *Auto Journal: Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, **14**(8), 50-53.

Han, Y. J. (2015), Optimal RAM design and maintenance schedule for a multi-unit system (Masters thesis), Pusan National University, Busan.

- Husniah, H., Wangsaputra, R., Pasaribu, U. S., and Iskandar, B. P. (2021), Cost analysis for two dimensional warranted products protected by lemon laws considering multi component system, *2021 5th International Conference On System Reliability and Safety*, 276-280
- Iskandar, B. P., Murthy, D. N. P., and Jack, N. (2005), A new repair-replace strategy for items sold with a two-dimensional warranty, *Computers & Operations Research*, **32**(3), 669-682.
- Jung, K. M. (2019), Warranty cost analysis of the new extended two-phase warranty model, *Journal of Applied Reliability*, **19**(4), 389-395.
- Kegley, M. B. and Hiller, J. S. (1986), "EMERGING" Lemon Car Laws, *American Business Law Journal*, **24**(1), 87-103.
- Kim, H. G., Yun, W. Y., and Chung, I. H. (2020), Warranty cost estimation of two-dimensional warranty under Korean lemon law, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **46**(4), 385-392.
- Kim, H. G. and Rao, B. M. (2000), Expected warranty cost of two-attribute free-replacement warranties based on a bivariate exponential distribution, *Computers & Industrial Engineering*, **38**(4), 425-434.
- Kim, H. G. (2015), Maintenance policies following the expiration of two-dimensional free replacement warranty, *Journal of Applied Reliability*, **15**(1), 6-11.
- Kim, J. S. (2000), Warranty cost models for a product with a two-dimensional warranty policy, *Journal of Korean Society for Quality Management*, **28**(1), 57-77.
- Kwon, Y. I. (2008), Collection and analysis of automotive field reliability data, *Journal of Applied Reliability*, **8**(1), 1-13.
- Kwon, Y. I. (2019), Estimation of automobile components reliability using warranty repair data comprising early failures, *Journal of Applied Reliability*, **19**(1), 31-38.
- Oh, K. Y. (2017), A study on the legislative direction and issues concerning lemon law of the motor vehicle, *Journal of Consumer Policy Studies*, **48**(1), 109-129.
- Park, M. J. and Park, D. H. (2018), Two-dimensional warranty policy for items with refund based on Korean lemon law, *Journal of Applied Reliability*, **18**(4), 349-355.
- Wang, Y., Liu, Z., and Li, X. (2017), On reliability improvement program for second-hand products sold with a two-dimensional warranty, *Reliability Engineering & System Safety*, **167**(June), 452-463.
- Terence, J. C. and Michael, E. W. (1995), Obligations and penalties under lemon laws: Automobile versus tractors, *Journal of Agricultural and Resource Economics*, **20**(1), 135-145.
- Yun, W. Y. and Yoo, S. H. (1996), Cost analysis of a two-dimensional warranty policy with replacement and repair regions, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **22**(2), 247-253.
- Zhang, Z., He, S., He, Z., and Dai, A. (2019), Two-Dimensional warranty period optimization considering the trade-off between warranty cost and boosted demand, *Computers & Industrial Engineering*, **130**(March), 575-585.

저자소개

정승훈 : 경남대학교 조선해양IT공학과에서 학사, 부산대학교 산업공학과에서 석사학위를 취득하였다. 연구분야는 시뮬레이션, 품질공학이다.

한영진 : 동의대학교 산업공학과에서 학사, 부산대학교 산업공학과에서 석사와 박사학위를 취득하였다. 2017년부터 울산과학기술대학교 산업경영공학과 교수로 재직하고 있다. 연구분야는 신뢰성공학, 시뮬레이션, 최적화이다.

윤원영 : 서울대학교 산업공학과에서 학사, 한국과학기술원에 석사와 박사학위를 취득하였다. 1987년부터 부산대학교 산업공학과 교수로 재직하고 있다. 연구분야는 신뢰성공학, 품질공학, 시뮬레이션, 최적화이다.