

# 다단계(multi-indenture) 구조를 갖는 장비의 수리수준 분석 모형 개발

## The development of the level of repair analysis model with muti-indenture equipment structure

윤원영 \* 김귀래 \* 이유미 \* 정일한 \* 박삼준 \*\*  
\* 부산대학교 산업공학과 부산광역시 금정구 장전 2동 산 30번지  
\*\* 국방과학연구소 대전광역시 유성구 조치원길 462번지

### Abstract

In terms of that modern equipment become expensive, sophisticated and huge, the cost of developing the equipment is much considered in ILS. Therefore, the model of the level of repair analysis about equipment which have the multi-echelon and multi-indenture are purposed to derive optimal repair policy which mostly satisfy the availability by using the Mixed Integer Programming within the minimum cost.

### 1. 서론.

현대장비가 고가화 되고 있다. 그러나 대부분 장비의 총 순기동안의 약 80 ~ 85%는 운용과 정비하는 동안에 소비 된다[4]. 이처럼 장비의 중요성이 커짐에 따라 ILS(Integrated Logistic Support) 체계에서의 장비의 최적의 운용과 정비정책이 요구된다.

여기서, ILS(Integrated Logistic Support)이란 장비 체계에 대한 효과적이고 경제적인 군수지원을 보장하기 위하여 장비체계의 설계단계에서부터 소요제기, 개발, 획득, 운영 및 폐기단계까지 제반 군수지원요소를 종합관리 하는 활동이다.

또한, 적시적소에 적절한 군수지원이 가능하도록 함과 동시에 전 순기동안의 유지비용은 최소화 하며, 목표 운용 가용도를 유지 할 수 있도록 군수지원요소를 규명하고 개발하여 지원하기 위한 다양한 기술적 활동들을 계획하고 수행해 나가는 종합적인 관리활동을 말한다[1].

이와 같이, ILS(Integrated Logistic Support)체계에서의 장비에 대한 중요성이 커져가고 있으므로, 이에 대한 수리수준 분석 모형을 개발하여 최적의 정비 정책 수립이 필요하게 되었다.

이와 같이, 수리수준분석 모형 개발에 따른 최적정비정책의 결정에 있어서 많은 연구가 이루어져 왔으며, 최근 5년간 수리수준 분석에 대한 연구에는 Lilian Barros, Michael Riley(2001) 경험론적 분기 한정법(branch-and-bound)을 이용한 수리수준분석 [5], Hritha Saranga, U. Dinesh Kumar(2006) 유전자 알고리즘을 이용한 수리수준분석[3], Gregory Gutin, Arash Rafiey, Anders Yeo, MichaelTso(2006) 최소비용 Homomorphism 그래프 문제를 다루었다[4].

본 논문에서는 혼합정수계획법을 이용하여 장비의 전 순기 동안 비용을 최소화하고 목표 운용가용도를 만족할 수 있는, 최적의 정비정책을 도출 할 것이다.

이때, 수리수준 분석 모형의 CURPAR 값을 구하기 위한 방법으로 일반적인 Lagrangian방법을 사용하였다[2]. 1장에서는 서론으로 연구의 배경과 목적, 2장에서는 고려 대상 장비 체계의 특징을 알아 볼 것이며, 3장에서는 수리수준 분석 모형을 수립하고, 4장에서는 수립된 수리수준 분석 모형의 실행 흐름을 정의하고 마지막으로 5장에서 결론을 다루기로 한다.

### 2. 대상 장비 체계의 특징

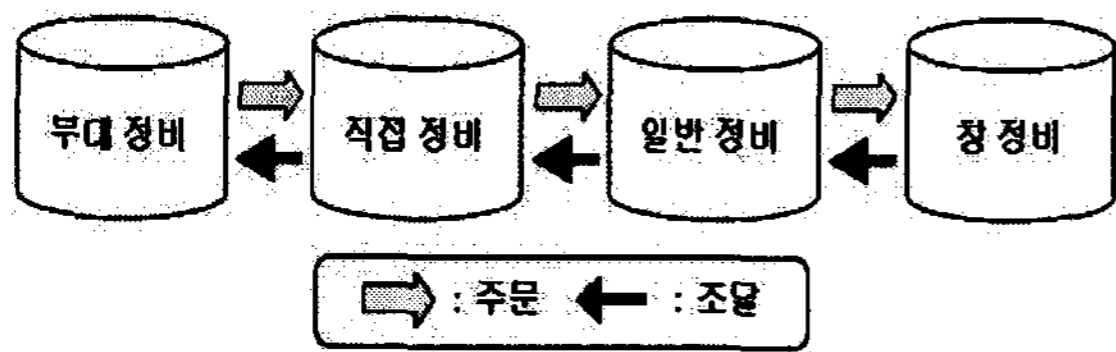
대상 장비 체계는 다양한 특성을 지니고 있다. 완제품의 지원체계는 [그림1]과 같이 창 정비, 일반 정비, 직접 정비, 부대 정비의 4계단 구조를 갖는다. 그리고, 폐기와 외주수리가 존재하기 때문에 어느 특정 품목에 대하여 6가지 정비정책이 주어질 수 있다.

하위 정비부대로부터 상위 정비 부대로 정비 지원 요청 또는 정비에 필요한 품목들의 지급 요청 등이 이루어지며, 상위 정비부대로부터 하위 정비부대로 정비 완료품목과 재고품목의 지급 그리고 정비지원이 이루어지는 다 계단 정비구조를 갖고 있

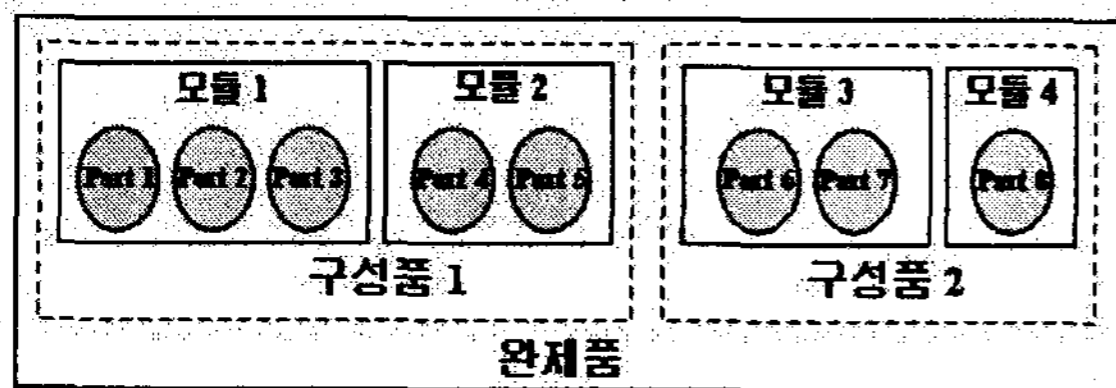
다.

완제품의 조립수준은 [그림2]와 같이 완제품, 구성품, 모듈, 부품의 4단계 구조를 가진다.

구성품은 완제품의 수리를 위해 교체되는 차 하위 조립체이며, 모듈은 구성품의 수리를 위해 교체되는 품목이다. 부품은 모듈의 수리를 위해 교체되는 품목이며 고장모드는 특정 구성품 내의 특정 모듈의 고장으로 인한 완제품이 고장 나는 것으로 정의하며 고장모드별로 정비정책이 할당된다.



[그림1. 다 계단 정비구조]



[그림2. 수리대상품목의 다단계 구조]

또한, 완제품을 구성하는 구성품, 모듈, 부품 등은 사용시간, 고장의 정도, 사용 중 고장 발생 횟수 등을 감안한 폐기 품목이 존재한다.

특정 품목의 최하위 정비계단 이상의 모든 정비계단에 이들 품목의 정비를 위한 수리 및 시험장비를 배치하고, 하위 정비계단에서 구성품 또는 모듈 등을 상위 품목의 정비를 위해 사용하였을 때는 각 품목의 재고량을 일정하게 유지하기 위하여 해당 품목을 직접 수리, 보충하거나 상위 정비계단에 수리요청을 하고 재고보급을 요청한다.

이때, 재고보급요청은 유지해야하는 재고량과 현재 보유하고 있는 재고량의 차이가 하나일 때이며, 장비의 가용성과 정비의 효율성을 위해 차 하위 품목의 수리를 상위 품목의 정비계단과 같거나 높은 수준의 정비부대에서 하는 정비정책의 특성을 지닌다.

예를 들어, 고장 난 구성품의 수리를 직접정비에서 했다면 모듈은 직접정비 이상의 정비수준에서 수리해야 한다.

### 2.1 정비의 개념

정비정책을 결정한다는 것은 각 고장 모드에 따라 품목을 수리할 정비 계단을 결정하는 것이다.

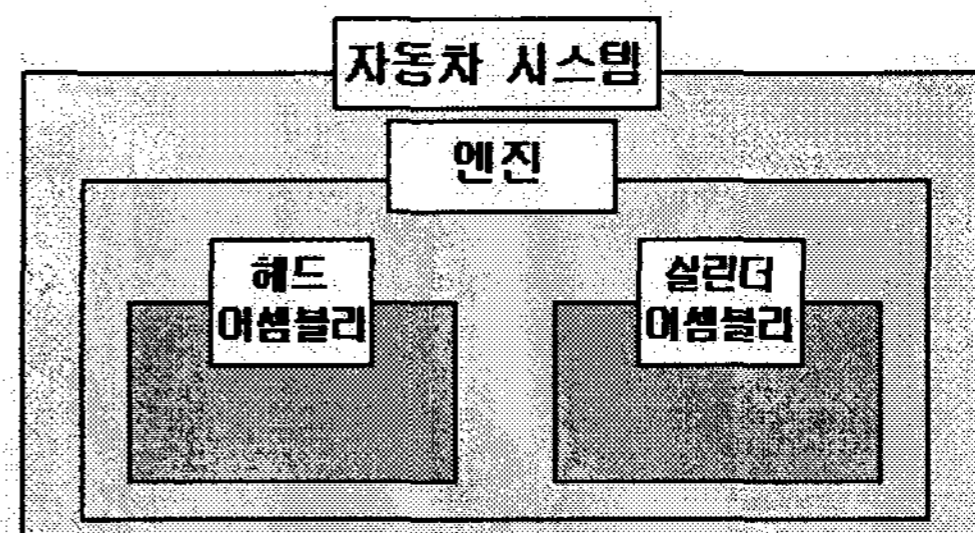
[그림3]은 자동차 구조에 대하여 예를 들어 정비를 설명한 것이다. 여기에서는 자동차가 완제품이 되고 엔진은 구성품이다. 구성품 엔진 아래에는 2개의 하위 모듈, 헤드 어셈블리, 실린더 어셈블리가 있고, 헤드 어셈블리는 흡기, 배기, 연료의 출입과 같은 통로 역할을 하고, 실린더 어셈블리는 연료의 연소가 일어나는 곳이다.

엔진 아래의 각 모듈의 고장에 따라 고장 모드가 결정되며 이에 따른 정비정책의 예를 아래에서 보여주고 있다.

헤드 어셈블리의 고장에 대해서 좀 더 살펴보면, 자동차가 고장이 나면 정비정책에 따라 부대정비에서 진단을 하여 고장여부를 판단하고 수리를 한다.

완제품인 자동차의 수리는 정상적인 엔진을 고장난 엔진과 교체함으로써 완료된다. 이제 고장난 엔진은 직접정비로 수리를 요청하고 수송을 하고, 하나의 엔진 재고가 고장에 의해 사용되었으므로 부대정비에서는 상위 정비계단에 보급요청을 하게 된다.

반면 고장난 엔진은 직접정비에서 고장난 헤드 어셈블리를 교체함으로써 수리가 완료되고, 헤드 어셈블리에 대한 정비정책이 폐기이므로 직접정비에서는 헤드 어셈블리를 폐기하고 헤드 어셈블리의 재고량을 유지하기 위해 상위부대에 헤드 어셈블리의 보급 요청을 한다.



| 자동차 시스템  |       |       |            |
|----------|-------|-------|------------|
| 고장모드     | 자동차   | 엔진    | 모듈         |
| 헤드 어셈블리  | 부대 정비 | 직접 정비 | Throw away |
| 실린더 어셈블리 | 부대 정비 | 일반 정비 | Depot      |

[그림3. 자동차 정비 시스템]

## 3. 수리수준분석 모형

### 3.1 고려 비용의 특징

정비작업은 진단(diagnostic)과 수리(repair)의 2 단계로 수행되며, 수리 시에는 폐기가 존재하고 외

주수리가 가능하며, 각 수리의 비용이 따로 존재한다.

만약, 구성품이 폐기 결정 되었다면 구성품에 속한 모듈들과 부품들 또한 폐기 되는 경우도 발생하게 된다.[3] 이때 수리 작업을 실시할 정비 계단에 따라 진단 및 수리비용이 다르다.

또한 정비작업 시에는 정비자원이 요구되며, 정비자원에는 각 정비계단마다 다른 비용을 지니고, 초기 개발비용을 포함하는 검사장비와 초기 훈련비용을 포함하며, 각 정비계단마다 임금, 작업시간, 작업 부하량이 다른 정비용원이 존재하게 된다. 수리 시 운송은 주문 및 회송시간이 각 계단마다 다르고, 운송비용은 거리에 의존한다.

또한, 비용 산출 시 비용발생 고려시간은 완성품의 유효 수명기간으로 한정하고, 비용 발생시점은 매년도 말로 가정하며, 비용은 현가로 고려한다.

이때, 대상 무기체계와 장비배치는 일시에 이루어진다는 가정을 가진다. 그와 관련된 비용에는 보급과 관련된 보급품 구입, 획득 조달 및 재고 유지비용과 교범개발비용이 있고, 정비원 및 장비관련 비용에는 정비원 초기훈련비용, 임금과 장비구입, 설치 및 유지비용과 테스트 프로그램 개발 및 문서화비용이 존재한다.

### 3.2 고려 비용의 수학적 모델

수리수준 분석 시에 총 수리비용과 군수 비용은 다음과 같다.

수식(1)에서 LC, LM은 각각 구성품, 모듈의 군수비용이며, RC, RM은 각각 구성품, 모듈의 수리비용이다.

FC(i,j)는 고장모드 ij에 의한 구성품 교체비율, FM(i,j)는 고장모드 ij에 의한 모듈 교체비율을 뜻한다.

$$C_{ij}(P, R, r) = FC(i, j) * LC(i, P, R) + FM(i, j) * LM(j, R, r) + RC(i, j, R) + FM(i, j) * (j, r) \quad (1)$$

### 3.3 결정변수

정비 작업에서 공급 장비와 정비원의 요구사항인 정비계단 k에 대한 장비 e의 배치 대수  $t_{e, k}$ 와 고장유형 ij의 수리에 대하여 완제품을 정비계단 P에서 수리하고, 구성품 수리는 정비계단 R, 모듈의 수리는 정비계단 r에서 이루어지는 정비정책이 차지하는 백분율인  $Y_{ij}(P, R, r)$ 를 결정해야 한다. 이때, 고려해야 할 정비 계단은 1:ORG, 2:DSU,

3:GSU, 4:DEPOT, 5:폐기, 6:외주수리 로 6가지 정비정책을 가진다.

### 3.4 MIP수식

수식에 사용될 기호는 다음과 같다.

$C_{ij}(P, R, r)$  : 고장모드 ij(구성품 i내의 j모듈 으 로 인한 고장)에 대해 완제품은 정비계단 P에서, 구성품은 정비계단 R에서, 모듈은 정비계단 r에서 수리할 때의 총 수리 및 군수 비용

$ESN_k$  : 정비계단 k의 단위 정비부대가 지원하 는 완제품 수

$w_{*j}(e)$  : 완제품 당 모듈 j를 수리하는데 소요 되는 시험장비 e의 작업 부하량

$w_{ij}(e)$  : 완제품 당 모듈 j가 고장 나서 구성품 i를 수리할 때 소요되는 시험장비 e의 작업 부하량

$w_{i*}(e)$  : 완제품 당 구성품 i가 고장 나서 완 제품을 수리하는데 소요되는 시험장비 e의 작업부 하량

$N_k$  : 정비계단 k의 정비부대 수

$C_{ek}$  : 정비계단 k의 시험장비 e의 획득 및 유지 비용

위의 사용기호를 고려한 순기비용을 최소화 하 는 목적 함수식은 다음과 같다.

목적함수식(2)는 모든 정비정책과 모든 수리정 책에서 모든 장비의 전 순기동안 비용을 최소로 하 는 함수식이다.

$$\text{Minimize : } \sum_e \sum_k C_{ek} * N_k * t_{e, k} + \sum_i \sum_j \sum_{P=1}^6 \sum_{R=P}^6 \sum_{r=R}^6 Y_{ij}(P, R, r) * C_{ij}(P, R, r) \quad (2)$$

제약식(3)은 모든 각 고장모드에 대하여 의무 적으로 정비정책이 반드시 할당되어야 하고, 그 비 율의 합은 1이 되어야 한다.

고장에 대한 정비정책을 할당하지 않음으로써 비용이 0이 되는 것을 막기 위한 것이다. 그리고, 하나의 정책이 결정되어 1이 되면, 다른 나머지 정 책대안은 0이 된다.

$$\sum_{P=1}^6 \sum_{R=P}^6 \sum_{r=R}^6 Y_{ij}(P, R, r) = 1 \quad (3)$$

자원 제약식(4)는 한 장비에 대한 제약식이며, 한 정비 계단에서의 장비에 대한 총 작업부하가 정비 계단에 존재하고 있는 장비의 수를 넘을 수 없음을 뜻한다. 이는 장비에 걸릴 수 있는 부하의 허용치를 무한대로 함으로써 장비 대수를 비현실적으로 적게 하여 낮은 비용이 나오는 것을 막기 위함이다.

정비계단 k에 장비 e에 대한 자원 제약 :

$$ESN_k * \sum_i \sum_j w_{ij}(e) * \sum_{P=1}^k \sum_{r=R}^6 Y_{ij}(P, k, r) +$$

$$ESN_k * \sum_i \sum_j w_{i*}(e) * \sum_{P=k}^6 \sum_{r=R}^6 Y_{ij}(k, R, r) +$$

$$ESN_k * \sum_i \sum_j w_{*j}(e) * \sum_{P=1}^6 \sum_{r=P}^k Y_{ij}(P, R, r) -$$

$$t_{e,k} \leq 0, \quad (4)$$

for e = 1, ..., k = 1, ...

All (ij), Y<sub>ij</sub>는 0또는 1, t<sub>e,k</sub> ≥ 0

이제 비용을 최소화하는 정비정책에 대한 수학적 모델은 결정되었지만 종합군수지원에서는 비용뿐만 아니라 가용도 또한 동시에 고려되어야만 한다.

장비의 수리수준분석은 수많은 정비 정책 대안 중에 최소의 비용으로 목표 운용가용도를 만족시키는 정비정책을 찾는 것을 목표로 하고 있다. 목표운용가용도의 평가는 현재의 주어진 재고와 수리정비정책을 기반으로 산출된다.

사용할 사용 기호는 다음과 같다.

OA : 운용가용도

MCTBF : 평균 고장간 카렌다 시간

MTTR : 평균 수리시간 (모든 조건 구비)

CDT : 평균 수송 시간

MLDT : 평균 군수 지연 시간

TARGET : 목표 운용가용도

위의 사용 기호를 고려한 운용가용도는 다음과 같다.

$$OA = \frac{MCTBF}{MCTBF + MTR + CDT + MLDT} \geq TARGET$$

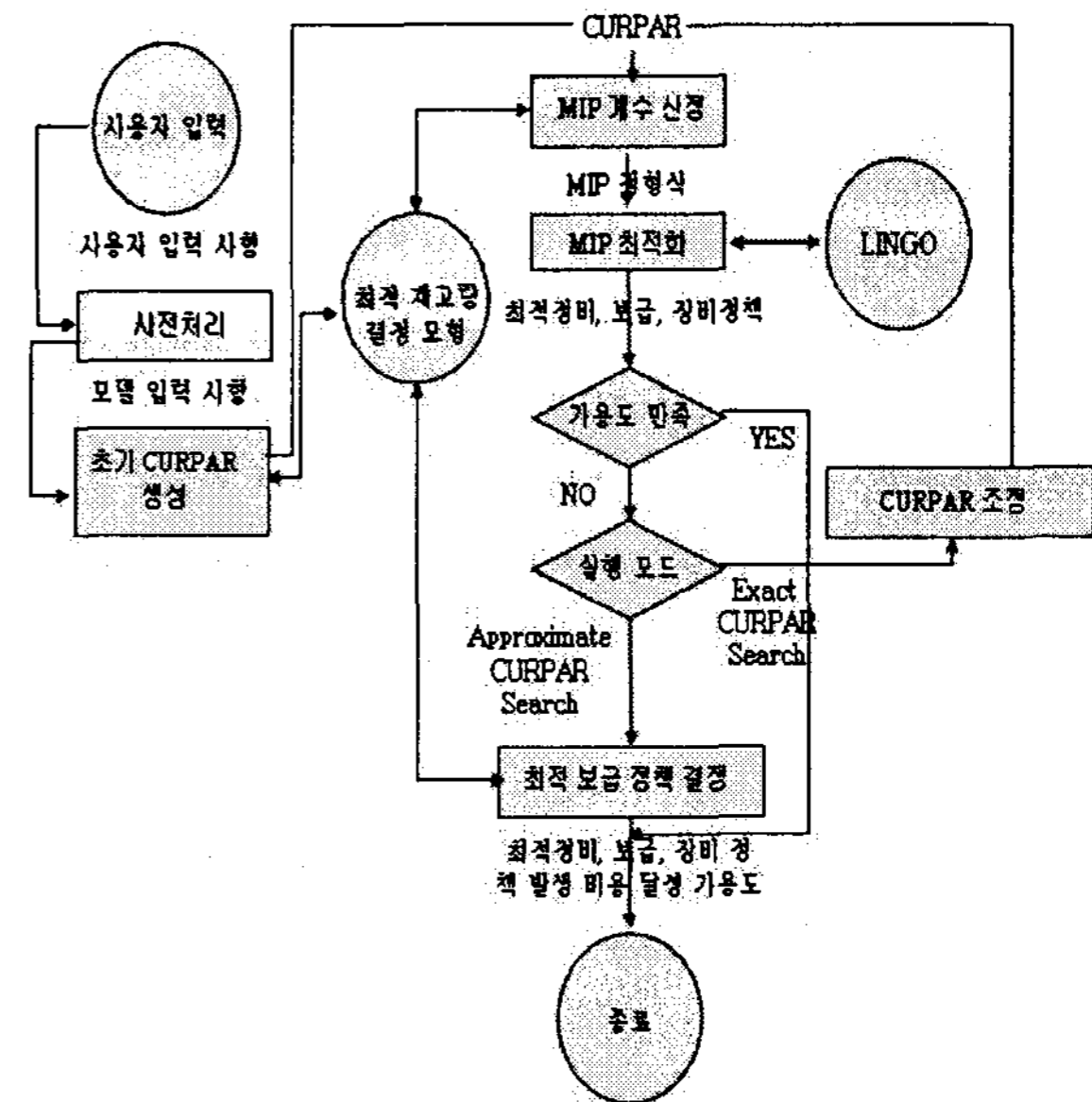
위의 사용기호에 나열된 운용가용도, 평균 고장간 카렌다 시간, 평균 수리시간, 평균 수송시간, 평균 지연 시간을 구할 수 있다.

#### 4. 수리수준분석 모형의 실행 흐름

수리수준분석 모형은 사전처리단계, 수식화단계, 최적화단계로 구성되며 혼합 정수 계획법(MIP)을 이용하여 최적 정비정책을 도출한다. 전체적인 프로그램의 흐름은 [그림4]와 같다.

먼저, 사용자의 입력사항을 사전처리단계에서 프로그램에 맞게 가공하고 이를 MIP수식화 단계를 거쳐 MIP문제로 정형화하여 상용 소프트웨어 LINGO를 이용하여 해를 구한다.

이때 수식화 단계에서 모든 가능 정비정책에 대한 보급량은 최적재고량 산출 결정모형(Stokage Optimizer)을 이용하여 결정한다.



[그림4. 복합형 수리수준분석 모형의 실행 흐름]

##### 4.1. EXACT CURPAR SEARCH 실행 로직

EXACT CURPAR값을 찾는 실행에 대한 로직은 다음과 같다.

Step 1. 모델 입력 사항들을 프로그램 입력 형식에 맞게 가공한다.(Preprocess)

-비용 모수와 발생 비율들의 고장 모수, 부하 계수를 계산하고, 사용자 입력사항을 반영 하여 의사결정변수를 결정.

Step 2. 가용도를 만족시키는 초기 CURPAR를 결정한다.

-초기 가용도값을 0으로 두고 목표 운용 가용도를 만족할 때까지 CURPAR값을 조정하여 수행하고, 모든 구성품에 대하여 2개의 초기 정비정책 후보 중 최소비용을 제공하는 초기 정비정책을 결정하는 초기 CURPAR값을 생성한다.

Step 3. 주어진 CURPAR 값을 기준으로 하여 모든 정비정책 후보에 대한 비용요소를 구한다.

-모든 정비정책 후보에 대하여 최적재고량 산출모형(Stokage Optimizer)에서 재고량 및 부재고량이 산출되고, 이를 기반으로 모든 비용 요소를 계산하여 MIP식을 생성하여, 모든 정비정책 후보에 대해 목표 운용가용도의 만족 여부를 확인한다.

Step 4. MIP 계수를 산정한다.

-MIP식을 생성하기 위한 모든  $Y_{ij}(P, R, r)$ 의 계수를 산정한다. 주어진 CURPAR하에서 모든 고장모드의 비용계수  $C(i,j)$ 를 계산하고, 모든 구성품과 모듈에 대하여 개별적인 가능한 정비정책 후보를 생성한다. 뿐만 아니라 보급, 수리관련비용을 계산하고, 총비용과  $t_{e,k}$ 의 계수를 계산한다.

Step 5. LINGO 소프트웨어를 사용하여 MIP식의 해를 구한다.

-최소의 비용을 제공하는 정비정책 및 장비와 정비원 정책을 선정한다.  
-선정된 정비정책에 해당하는 보급정책이 최적 보급정책으로 선정된다.

Step 6. LINGO에서 선정된 정비정책과 보급정책 하에서 목표 운용가용도를 계산한다.

Step 7. 계산된 목표 운용가용도가 만족할 수준이면 현재의 정비/보급/장비정책이 최적이며 종료하고 만약, 목표 운용가용도를 만족할 수준이 아니면 CURPAR값을 조정하여 단계2를 수행한다.

## 4.2. APPROXIMATE CURPAR SEARCH 실행 로직

APPROXIMATE CURPAR값을 결정하는 실행 로직은 EXACT CURPAR SEARCH실행 로직의 Step 6단계 까지 동일하다. 그러므로, Step 7부터 정의 한다.

Step 7. LINGO에서 선정된 정비정책과 보급정책 하에서 운용가용도를 계산하여 만족할 수준이면 종료한다.

Step 8. 계산된 운용가용도가 만족할 수준이 아니면 선정된 정비정책을 최적재고량 산출 결정 모형 (Stokage Optimizer)에 입력하여 목표 운용가용도를 만족하는 재고를 계산하고 종료한다.

## 5. 결론

장비의 개발에 있어서 그 기술적 달성도뿐만 아니라 전 순기동안에 장비에 대한 적절한 지원성을 유지하며, 최소의 비용과 목표 운용가용도를 달성 하는 것은 가장 중요한 목표 중 하나일 것이다.

그러나, 장비의 정비/보급 개념상에 현실적으로 발생 가능한 많은 제반사항들을 모두 고려한 최적 정비 및 보급 정책을 도출하기란 쉽지 않은 일이다.

이에 원하는 운용가용도와 비용을 절충하여 최소의 비용으로 운용가용도를 최대한 달성 할 수 있도록 하기 위해 두 가지 실행대안으로 체계적인 접근 방법을 하여 수리수준분석 모형을 개발해 보았다.

우리의 모형을 이용하여 장비시스템에 있어서 최적정비 및 보급정책을 도출을 도모할 수 있을 것이라 기대된다.

## 참고문헌

[1] 성장섭, 이태억 외 4명(1994), 천마 정비/보급 체계의 지원성 평가 및 ILS 요소 개선 방안 연구, 기술연구본부

[2] Marshall L Fisher(2004), The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems, Management science, p1861-1871.

[3] Haritha Saranga, U. Dinesh Kumar(2006), Optimization of aircraft maintenance/support

infrastructure using genetic algorithms-level of repair analysis, Ann operation research 143, p91-106.

[4] Gregory Gutin, Arash Rafiey, Anders Yeo, Michael Tso(2005), Level of repair analysis and minimum cost homomorphism, Science direct 154, p881-889.

[5] Lilian Barros, Michael Riley(2001), A combinatorial approach to level of repair analysis, European Journal of Operational Research 129, p242-251.