

공학석사 학위논문

# MLCC 가소공정의 생산일정계획

지도교수 고 시 근

이 論文을 提出함 學位論文 提出함



부경대학교 산업대학원

시스템경영공학과

이 홍 석

# 이홍석의 공학석사 학위논문을 인준함

2004년 12월

주 심 공학박사 김 민 수



위 원 공학박사 김 영 진



위 원 공학박사 고 시 근



## 목 차

제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 필요성 .....	1
1.2 선행연구의 분석 .....	5
제 2 장 병렬기계 BLSP 모형 .....	8
2.1 가정 및 용어설명 .....	8
2.2 총 완료시간 최소화 문제 .....	9
2.3 로트별 완료시간 합 및 완료시간 가중합 문제 .....	12
제 3 장 수치실험을 통한 휴리스틱 평가 .....	16
3.1 CMAX의 결과 .....	17
3.2 SUMCI의 결과 .....	19
3.3 SUMWC의 결과 .....	21
제 4 장 결 론 .....	23
참고문헌 .....	25
Abstract .....	27

## 표 목 차

표 1. BLSP 관련 기존 연구의 분류 .....	7
표 2. CMAX 문제에 대한 결과 .....	18
표 3. SUMCI 문제에 대한 결과 .....	20
표 4. SUMWC 문제에 대한 결과 .....	21

## 그림 목 차

그림 1. MLCC 제조공정 .....	1
그림 2. MLCC 제품의 구조 .....	2

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 필요성

본 연구는 (주)삼성전기 부산사업장의 MLCC(Multi-Layer Ceramic Capacitor) 제조라인에 대한 TOC(Theory Of Constraints) 구현 프로젝트 수행과정에서 발생한 생산일정계획 문제를 다룬다. TOC 구현과정의 핵심이 되는 라인의 제약자원 규명을 위해 실시한 부하분석의 결과 “가소” 공정이 제약자원임을 발견하였다. 따라서 이 제약자원을 최대한 활용하기 위한 방안의 하나로서 효율적인 생산일정계획문제가 등장하게 된 것이다.

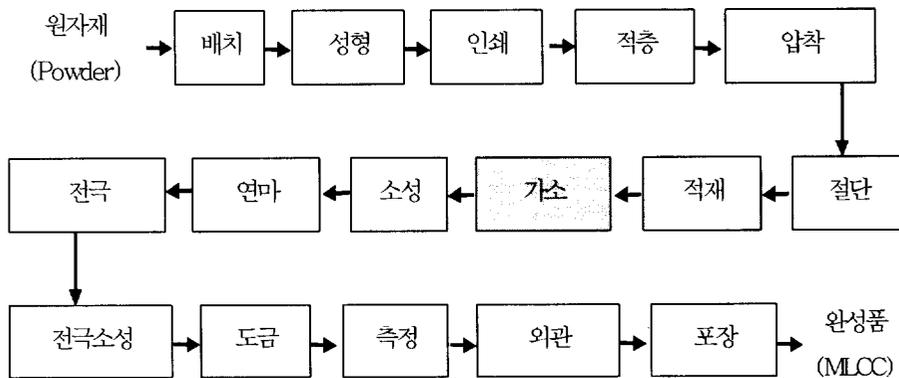


그림 1. MLCC 제조공정

MLCC 제조프로세스는 <그림 1>과 같은 단위공정들로 이루어져 있다. 전체적인 프로세스의 흐름을 간단히 설명하면 다음과 같다. 우

선 세라믹 파우더를 반죽하여 얇게 펴고 그 위에 전기회로를 인쇄한다. 전기회로가 인쇄된 얇은 세라믹 판들은 제품종류에 따라 몇 개 층으로 적층한 다음, 압착을 통해 하나의 판으로 결합시킨다. 아직까지 무른 상태인 이 세라믹 판들은 제품에 따라 적당한 크기로 절단된 후 열처리를 통해 단단하게 경화된다. 열처리가 끝나면 제품들의 뾰족한 모서리 부분을 매끄럽게 연마하고, 제품의 양쪽 끝부분에 전극을 설치하는 것으로 대략적인 제조 프로세스가 종료된다. 완성된 MLCC 제품의 구조는 <그림 2>에서 볼 수 있다.

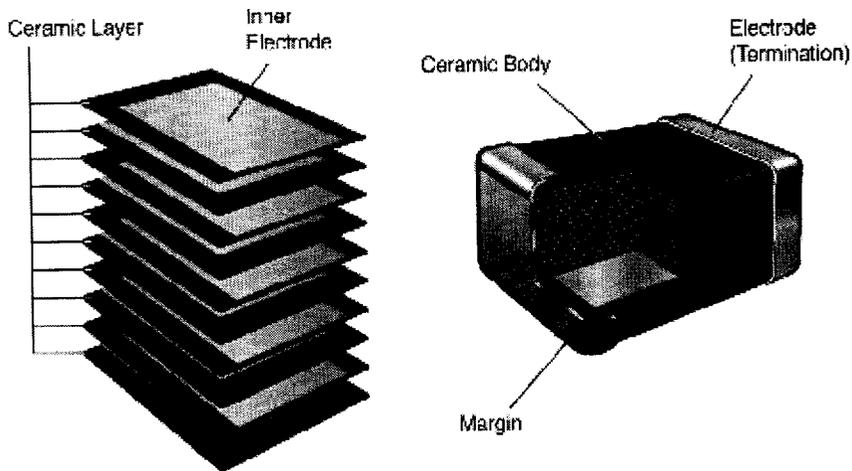


그림 2. MLCC 제품의 구조

이 제조과정에서 가장 시간이 많이 소요되는 부분이 열처리 과정이다. <그림 1>에서 가소 및 소성 공정이 열처리에 해당되는 과정으로서 이 두 공정에서의 소요시간이 전체의 25% 수준에 이른다. 그런데 이 두 공정 중 소성공정은 컨베이어 형태의 기계를 사용하고 있어

로트 투입간격이 20분 정도로 짧을 뿐 아니라 제품 특성별로 기계가 거의 전용화되어 있어 생산일정계획 상의 문제는 거의 없다. 반면에 가소공정은 로트가 한번 투입되면 24 ~ 44시간에 이르는 처리시간 동안 다른 일을 수행할 수 없다. 따라서 거의 100대에 이르는 가소기계를 운영하고 있으나 이것도 충분하지 않은 것으로 나타났다. 즉, 전문화된 바와 같이 실제 생산량과 공정별 표준시간을 사용한 부하분석 결과 가소 공정이 이 제조라인의 제약자원임을 발견할 수 있었던 것이다. 따라서 본 연구에서는 같은 종류의 기계가 병렬로 운영되는 가소 공정의 활용도를 최대화하기 위한 생산일정계획문제를 해결하고자 한다.

MLCC는 전기를 일시적으로 보관할 수 있는 전자소자로서, 제품 한 개의 크기가  $0.3 \times 0.3 \times 0.6 \sim 3.2 \times 5.0 \times 5.7$  입방 밀리미터 정도로 매우 작다. 따라서 제품의 크기에 따라 18,000개에서 840,000개까지의 다양한 사이즈로 로트를 구성하여 생산하게 된다. 그런데 이렇게 구성된 로트도 각각의 부피가 모두 다르므로, 한 개의 로트가 가소 기계 한대를 점유하는 정도가 모두 다르다. 즉, 기계 한대의 처리능력을 1로 보았을 때 제품의 종류에 따라 한 로트가 기계 한대를 점유하는 비율은 0.07에서 0.92로 매우 다양하다. 따라서 가소 기계 한대가 여러 개의 로트를 한꺼번에 배치로 처리할 수 있게 되므로 이 배치 방식의 효율성에 따라 라인의 제약자원인 가소 기계의 이용 효율에 큰 차이가 발생하게 된다.

회사에서 생산하는 MLCC 제품은 크기 외에도 다양한 전기적 특성에 따라 수백 가지 종류로 분류된다. 하지만 가소 공정의 입장에서는 다른 종류의 제품이라 하더라도 가소 공정 소요시간 및 가소 온도

가 같다면 동시에 처리할 수 있다. 즉, 제품의 종류가 다르더라도 소요시간 및 처리 온도에 따라 모든 로트들은 몇 개의 그룹으로 분류되고 같은 그룹에 속하는 로트들은 하나의 배치로 묶어서 동시에 처리될 수 있다는 것이다. Dobson & Nambimadom[2]은 이러한 형태의 문제를 BLSP (Batch Loading and Scheduling Problem)라고 표현하였다.

이러한 상황에서 관리의 주요 관심사는 단위시간당 산출(쓰루풋)의 최대화 및 재공품 재고(WIP)의 최소화이다. Lee & Uzsoy[9]는 총 완료시간(makespan)을 최소로 하는 것이 기계 이용율을 최대화하고 따라서 쓰루풋을 최대화하는 것이라고 하였다. 또한 Chandru et al.[1]은 로트별 완료시간 합(Total Completion Time)을 최소화하면 각 로트가 시스템에서 소비하는 평균 시간이 최소화되기 때문에 WIP가 최소화되며 나아가 쓰루풋도 증가한다고 지적하였다. 따라서 본 연구에서는 병렬기계 상황에서 총 완료시간과 로트별 완료시간 합을 최소화하기 위한 BLSP를 다루고자 한다. 또한 각 로트들이 납기와 같은 서로 다른 중요도를 가지는 경우에도 적용할 수 있도록 로트별 가중치를 고려한 “로트별 완료시간 가중합(Total Weighted Completion Time)”도 고려하기로 한다.

선행연구[2, 5, 12]에 의하면 BLSP 문제는 NP-hard class에 속하기 때문에 문제의 크기가 커지면 짧은 시간에 최적해를 구하는 것이 불가능하다. 실제로 대상 공장에서는 1시간에 5~8개의 로트를 생산하며 24시간 가동하므로 하루에 약 100~150개의 로트를 생산하게 된다. 계획대상기간이 1개월이라면 계획대상 로트의 수가 3,000~4,500 개에 이르므로 단시간에 최적해를 구하는 것은 불가능

하다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 현실적으로 사용가능한 휴리스틱 방법론을 제시하고 실험을 통해 우수한 휴리스틱 방법을 찾고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. 우선 1.2절에서 BLSP에 관련된 선행연구들을 살펴본 후 2장에서 병렬기계 BLSP를 해결하기 위한 여러 가지 휴리스틱 알고리즘들을 제안하고 3장에서는 2장에서 제시하였던 휴리스틱 알고리즘들을 비교·평가하기 위한 수치 실험 결과를 제시하였다. 마지막으로 4장에서는 본 논문을 요약하고 향후 연구과제의 방향을 제시하였다.

## 1.2 선행연구의 분석

BLSP는 그 동안 비교적 널리 연구되지 않았던 분야로서 Ikura & Gimple[6]의 연구가 이 분야의 첫 번째 연구였다. 그들은 모든 작업이 같은 처리 시간을 가지는 경우 정해진 납기를 준수하는 작업일정 계획을 작성하였다. Lee et al.[10]은 처리시간이 서로 다른 제품들을 하나의 배치로 묶을 수 있고 그 배치의 처리시간은 묶여진 작업들 중에서 가장 긴 처리 시간과 같아지는 경우의 BLSP를 연구했다. 그들은 단일 기계 및 병렬기계 문제에 대해 자연 작업의 수를 최소화하는 효율적인 알고리즘을 제안했다. Chandru et al.[1]는 단일 기계 BLSP의 최적해를 구하기 위한 branch-and-bound 알고리즘을 개발하였다. 그러나 이 알고리즘은 크기가 작은 문제에만 적용이 가능하므로 현실적인 크기의 문제를 해결하기 위해 2개의 휴리스틱 알고리즘을 제안하였다. Hochbaum & Landy[5]는 작업들의 완료시간 합

을 최소화하기 위한 효율적인 동적계획법(Dynamic Programming) 알고리즘을 제안하였다. Uzsoy [13]는 공통된 작업시간을 가지는 작업그룹들이 존재하여 같은 그룹에 소속된 작업들만이 한 배치를 형성할 수 있고 각 작업들의 부피는 모두 동일한 경우의 BLSP를 다루었다. 단일 기계 및 병렬 기계에 대해 여러 가지의 수행척도를 대상으로 최적 및 근사해를 구하는 알고리즘을 제시하였다. Mehta & Uzsoy [11]도 같은 그룹에 소속된 작업들만이 배치를 형성할 수 있는 경우의 BLSP를 다루었다. 그들은 총 지연시간을 최소화하기 위한 동적계획 알고리즘과 적정한 시간에 해답을 구할 수 있는 휴리스틱을 제시하였다. Lee & Uzsoy [9]는 작업의 도착이 동적일 때 총 완료시간을 최소화하기 위한 단일기계 BLSP를 다루었다. 그들은 몇 가지 휴리스틱 알고리즘을 개발하고 그 성능을 수치실험으로 관찰하였다.

위에서 제시한 연구들은 모두 각 작업들의 부피가 같은 상황을 고려하였다. 작업들의 부피가 다른 경우의 BLSP에 대해서는 Dobson & Nambimadom [2]이 연구하였다. 그들은 같은 그룹에 소속된 작업들은 모두 동일한 처리시간을 갖는다고 가정하고 작업별 완료시간의 가중합을 최소화하는 BLSP를 다루었다. 그들은 최적해에 대한 하한을 제시하기 위해 문제에 대한 정수계획법 수리모형을 개발하고 몇 개의 휴리스틱을 제시한 뒤 최적해의 하한과 비교하여 휴리스틱의 성능을 평가하였다. Uzsoy [12]는 다른 그룹에 속한 서로 다른 부피의 작업이 하나의 배치로 같이 처리될 수 있는 단일기계 BLSP를 연구했다. 그는 배치의 처리시간이 배치 안에서 가장 긴 처리시간을 가진 작업의 처리시간과 같아진다는 가정 하에 총 완료시간을 최소로 하는 몇 개의 휴리스틱과 더불어 사이즈가 작은 예제의 경우에는 최적해를

구할 수 있는 branch-and-bound 알고리즘을 제안했다. Kempf et al.[8]은 기계의 능력 뿐 아니라 보드 이용률을 고려한 단일기계 BLSP를 연구했다.

표.1 BLSP 관련 기존 연구의 분류

구 분	Equal Sizes	Different Sizes
No family or Compatible family	Ikura and Gimple[6] Lee et al.[10] Chandru et al.[1] Hochbaum & Landy[5] Lee and Uzsoy[9]	Uzsoy[12]
Incompatible family	Uzsoy[13] Mehta and Uzsoy[11]	Kempf et al.[8] Dobson and Nambimadom[2]

<표.1>은 위에서 인용된 BLSP 관련 연구결과들을 문제의 2가지 특징에 의해 4개의 그룹으로 분류한 것이다. 이 분류에 따르면 본 연구는 오른쪽 아래 칸에 해당된다고 할 수 있다. 본 연구와 같은 칸에 속한 기존의 연구결과가 있으나 모두 단일기계 문제를 다루었던 것들이다. 또한 병렬기계 BLSP를 다룬 연구들[1, 5, 13]은 모두 작업의 부피가 동일한 상황을 다루었다. 따라서 본 논문은 작업들의 부피가 서로 다르고, 동일 그룹에 속하는 작업들끼리만 배치 형성이 가능한 경우의 병렬기계 BLSP에 대한 첫 번째 연구이다.

## 제 2 장 병렬기계 BLSP 모형

### 2.1 가정 및 용어 설명

제2장에서는 병렬기계 BLSP를 해결하기 위한 다양한 휴리스틱 알고리즘을 제시한다. 우선 문제를 명확하게 하기 위해 연구대상 시스템을 다음과 같이 가정한다.

(1) 처리해야할 로트의 개수는  $n$  개이다. 이 로트들은  $c$  개의 서로 다른 그룹들 중 하나에 속한다. 각 그룹에 소속된 로트들의 처리시간은 동일하며 그룹  $k$  의 경우 그 시간은  $p_k$  이다.

(2) 로트들을 배치로 묶어서 처리할 수 있는 동일한 사양의 기계들이  $m$  대 가용하다. 각 기계의 능력은 1이다. 로트들이 기계를 점유하는 비율은 서로 다를 수 있으며 로트  $i$  의 경우 그 값이  $s_i$  (단,  $0 < s_i \leq 1$ )이다. 하나의 기계는 점유율 합이 1보다 작거나 같은 한도 내에서 같은 그룹에 속하는 로트들을 하나의 배치로 묶어서 처리할 수 있다.

(3) 각 기계는 작업이 시작되면 완료될 때까지 다른 로트를 추가하거나 중지할 수 없다.

이 시스템의 평가기준으로는 총 완료시간(makespan), 로트별 완료시간 합(total completion time), 로트별 완료시간 가중합(total

weighted completion time) 등 3 가지를 사용하기로 한다. 앞으로 본 논문에서는 이 3 가지 문제는 Uzsoy[12]가 사용한 용어를 빌어 CMAX, SUMCI, SUMWC로 각각 표시한다

## 2.2 총 완료시간(Makespan) 최소화 문제 : CMAX 문제

이 절에서는 병렬 배치처리 기계에서 총 완료시간을 최소화하는 문제를 다룬다. 만약 로트들의 배치형성에 제약이 없고 (즉, 모든 로트들이 하나의 그룹에 속하고) 기계가 한대라면, 이 문제는 널리 알려진 Bin Packing 문제와 같아진다. Garey & Johnson[3]에 따르면, Bin Packing 문제는 NP-hard에 속하는 매우 복잡한 문제이다. 따라서 Bin Packing 문제보다 더 복잡한 본 연구의 대상문제도 당연히 NP-hard에 속한다. 따라서 제한된 시간 안에 CMAX 문제의 최적해를 구해주는 절차는 존재하지 않는다. 그러므로 본 연구에서는 효과적인 휴리스틱 절차를 찾는 데 관심을 집중하기로 한다.

우선 관련되는 문제들을 위해 제시된 기존의 휴리스틱 알고리즘들을 살펴보기로 하자. Uzsoy[12]는 로트의 크기가 동일하지 않은 상황에서 단일 기계 시스템을 연구하였다. 그 연구에서는 로트 그룹에 대한 고려가 없었다. 즉, 처리시간이 다른 로트들이 하나의 배치를 형성할 수 있었고 그 때의 배치 처리시간은 그 배치에 속한 로트들 중에서 처리시간이 가장 긴 로트의 처리시간과 같다고 가정하였다. 그는 First Fit Decreasing 휴리스틱에 기초한 여러 휴리스틱을 제안하였다. First Fit Decreasing 휴리스틱은 Bin Packing 문제에 대한 휴

리스트틱 중에서 가장 널리 알려진 효과적인 휴리스틱이다[7]. 반면에 병렬 기계의 경우에는 Graham[4]이 배치작업이 아닌 일반적인 병렬 기계 스케줄 문제(통상  $P//C_{\max}$ 로 표시)에 대해 LPT(Longest Processing Time)의 성능을 분석적으로 연구하였다. 그 후 BLSP에 대한 여러 연구에서 이 Graham[4]의 연구결과를 적용했다. 첫 번째로 Lee et al.[10]이  $P/B/C_{\max}$  문제(병렬 배치처리 기계의 Makespan 문제)에 대한 최적해의 한계를 분석적으로 도출하였다. 그들의 연구에서는 로트 그룹의 존재를 인정하지 않았고 로트들의 크기도 모두 동일하다고 가정하였다. 그 후에 Uzsoy[13]는 로트 그룹이 존재하는 상황에 대해 같은 문제를 분석하였다.

본 절에서는 선행연구결과들을 바탕으로, 하나의 배치로 묶여질 수 있는 로트들에 제약이 있는(즉, 로트 그룹이 존재하는) 상황에서 각 로트들의 크기가 서로 다른  $P/B/C_{\max}$  문제에 대한 휴리스틱 알고리즘들을 제안하고자 한다. 이 문제는 두 단계로 나누어 해결할 수 있다. 1단계는 로트들을 배치로 묶는(Batching) 단계이고, 2단계는 묶어진 배치들을 병렬기계에 할당하는(Assigning) 단계이다.

로트 그룹별로 로트들이 묶여질 수 있으므로 Batching 단계는 각 로트 그룹별로 독립적인 해결이 가능하다. 즉,  $c$  개의 각 로트 그룹에 대해 같은 Batching 과정을 반복적으로 수행하는 것이다. 1단계에서 모든 로트 그룹에 대해 배치가 형성되면, 2단계에서는 이 배치들을 각각 하나의 작업으로 보고 일반적인 병렬기계 일정계획 문제를 해결하면 된다.

첫 번째 휴리스틱으로 가장 간단한 RNRN(Random Batching and Random Assignment)을 다음에 설명하였다.

### Algorithm RNRN

단계 1. 모든 로트 그룹에 대한 배치형성 작업이 끝나면 단계 3으로 간다.

새로운 로트 그룹에 대해 그룹 내에 속한 로트들을 임의의 순서로 정렬한다.

단계 2. 현재 배치형성 작업 중인 그룹에 로트가 남아있지 않으면 단계 1로 간다.

그룹 내의 로트 중 첫 번째 로트를 넣을 수 있는(즉, 그 로트를 포함시켜도 점유율 합이 1 이하인) 첫 번째 배치에 넣고 그룹에서 제거한다. 적합한 배치가 없을 경우에는 새로운 배치를 만든다. 단계 2의 처음으로 간다.

단계 3. 임의의 순서로 배치를 정렬한다. 앞쪽  $m$  개(즉, 전체 기계 대수)의 배치를 각 기계에 할당한다. 그리고 그 다음 배치들은 순서대로 작업이 먼저 끝나는 기계에 할당한다.

RNRN은 First Fit 휴리스틱에 기초해 만들어졌다. 일견하기에 너무 단순한 알고리즘으로 보이지만 실제 상황에서는 많이 사용되고 있는 방식이다. 즉, 배치처리 기계가 전체 라인의 중간에 위치하고 있을 경우 이 기계에 로트들이 도착하는 순서는 거의 Random에 가까워진다. 따라서 도착하는 순서대로 로트를 묶어 배치를 형성하고 형성된 순서에 따라 먼저 작업이 끝난 기계에 배정한다면 그 결과는 거의 RNRN과 같아지는 것이다. 또한 RNRN은 본 논문에서 개발된 다른 휴리스틱들과 비교하기 위한 기준으로 사용되기도 한다. 즉, 개발된

알고리즘의 성능을 RNRN의 결과와 비교하여 휴리스틱의 품질을 평가하는 것이다.

두 번째로 본 연구에서 제시하는 휴리스틱은 로트들을 배치로 묶을 때 First Fit Decreasing 휴리스틱을 사용하고 배치들을 기계에 할당할 때는 Random 방식을 따르는 LFRN(Largest Lot First Fit Batching and Random Assignment)이다.

### Algorithm LFRN

단계 1. 모든 로트 그룹에 대한 배치형성 작업이 끝나면 단계 3으로 간다.

새로운 로트 그룹에 대해 그룹 내에 속한 로트들을 기계점유율( $s_i$ )이 큰 로트부터 정렬한다.

단계 2. RNRN의 단계 2와 동일

단계 3. RNRN의 단계 3과 동일

다음으로 제안할 휴리스틱은 로트들을 배치로 묶을 때에는 First Fit Decreasing 휴리스틱을 사용하고 배치들을 기계에 할당할 때는 LPT(Longest Processing Time) 규칙을 따른다. 이것은 배치처리가 아닌 일반적인 병렬기계의 Makespan 문제에서 처리시간이 긴 작업부터 처리하는 LPT 규칙이 매우 좋은 결과를 보장[4]해주기 때문이다. 이 휴리스틱의 이름은 LFLT(Largest Lot First Fit Batching and Longest Processing Time Assignment)이다.

### Algorithm LFLT

단계 1. LFRN의 단계 1과 동일

단계 2. RNRN의 단계 2와 동일

단계 3. 배치들을 그 배치에 속한 로트들의 처리시간이 긴 배치부터  
순서대로 정렬한다.

단계 4. 정렬된 배치 리스트의 첫 번째 배치를 작업이 가장 먼저 완  
료되는 기계에 할당한 다음 그 배치는 리스트에서 삭제한  
다.

## 2.3 로트별 완료시간 합 및 완료시간 가중합 문제

SUMCI는 SUMWC의 특별한 경우이다. SUMWC에서 가중치를 모두 1로 두면 그 문제는 SUMCI와 같아지기 때문이다. 따라서 본 절에서는 이 두 가지 문제를 함께 다루기로 한다. 기계가 한 대인 경우의 SUMCI 문제가 NP-hard 임이 밝혀져 있으므로 [2, 12], 더 복잡한 문제인 병렬 기계의 SUMCI 문제도 역시 NP-hard이다. 따라서 본 절에서도 최적해보다는 효과적인 휴리스틱을 제시하는데 관심을 두기로 한다.

Makespan 문제와 달리 SUMCI 및 SUMWC 문제에서는 LPT 보다 SPT(Shortest Processing Time) 및 WSPT(Weighted SPT) 규칙이 효과가 좋다는 사실이 알려져 있다. 그런데 BLSP에서 배치들을 기계에 배정할 때는 그 배치의 처리시간 뿐 아니라 그 배치에 들어있는 로트들의 개수를 고려하여야 한다. Chandru et al.[1]은 단일

기계 BLSP에서 로트별 완료시간 합을 최소화하기 위해 각 배치에 포함된 로트들의 개수를 고려한 배치 가중 SPT(Batch Weighted SPT) 규칙을 제안하였다. 그들의 개념을 응용하여, 배치형성 과정에서는 점유율이 작은 로트부터 배치를 형성하는 변형된 형태의 First Fit 휴리스틱을 사용하고, 배치들을 기계에 할당하는 과정에서는 Chandru et al.[1]의 BWSPT(Batch Weighted SPT) 규칙을 사용하는 SFST(Smallest Lot First Fit Batching and Batch Weighted Shortest Processing Time Assignment) 휴리스틱을 제안한다. :

#### Algorithm SFST

단계 1. 모든 로트 그룹에 대한 배치형성 작업이 끝나면 단계 3으로 간다.

새로운 로트 그룹에 대해 그룹 내에 속한 로트들을 기계점유율( $s_i$ )이 작은 로트부터 정렬한다.

단계 2. RNRN 단계 2와 동일

단계 3. 각 배치에 대해  $p^j / N_j$  를 계산하여 이 값이 작은 배치부터 정렬한다. (단,  $p^j$  는 배치  $j$  에 속하는 로트들의 처리시간이고  $N_j$  는 배치  $j$  에 속하는 로트들의 개수이다.)

단계 4. LFLT의 단계 4와 동일

Dobson & Nambimadom[2]은 로트별 완료시간 가중합을 최소화하기 위한 단일기계 BLSP에 이 SFST를 응용한 휴리스틱을 적용하였다. 그들은 이 휴리스틱을 Greedy Heuristic이라고 불렀으며 그 내용은 다음과 같다.

### Algorithm GRD

단계 1. 모든 로트 그룹에 대한 배치형성 작업이 끝나면 단계 3으로 간다.

새로운 로트 그룹에 대해 그룹 내에 속한 로트들을  $s_i/w_i$  값이 작은 로트부터 정렬한다.

단계 2. RNRN의 단계 2와 동일

단계 3. 각 배치에 대해  $p^j / SW_j$  를 계산하여 이 값이 작은 배치부터 정렬한다. (단,  $p^j$  는 배치  $j$  에 속하는 로트들의 처리시간이고  $SW_j$  는 배치  $j$  에 속하는 로트들의 가중치를 모두 합한 값이다.)

단계 4. LFLT의 단계 4와 동일

원래 이 GRD 알고리즘은 SUMWC 문제를 위해 만들어졌지만 모든 가중치 값을 1로 두면( $w_i=1, i=1,2, \dots, n$ ) SUMCI 문제에도 쉽게 적용될 수 있는데 그것은 결과적으로 SFST 휴리스틱과 동일해진다.

다음에 제안되는 휴리스틱에는, SFST에서 부피가 작은 로트를 우선으로 배치를 형성하였던 것과는 반대로, 기계 점유율이 큰 로트부터 배치를 형성하는 First Fit Decreasing 휴리스틱이 사용되었다. 즉, 배치형성에는 Largest Lot를 우선으로 하는 First Fit 휴리스틱을, 배치의 기계배정에는 GRD의 BWSPT를 사용한 LFST(Largest Lot First Fit Batching and Batch Weighted Shortest Processing Time Assignment)이다.

### Algorithm LFST

- 단계 1. LFRN의 단계 1과 동일
- 단계 2. RNRN의 단계 2와 동일
- 단계 3. GRD의 단계 3과 동일
- 단계 4. LFLT의 단계 4와 동일

GRD 휴리스틱과 마찬가지로 이 LFST 알고리즘도 모든 로트들의 가중치를 1로 두면 SUMCI에 쉽게 적용된다. 그런데 아래 제시되는 BWST(Biggest Weight First Fit Batching and Batch Weighted Shortest Processing Time Assignment) 휴리스틱은 SUMWC 만을 위한 것이다. 이 휴리스틱은 가중치가 큰 로트를 우선으로 배치를 형성하고 배치의 기계배정은 BWSPT 방식에 따른다.

### Algorithm BWST

- 단계 1. 모든 로트 그룹에 대한 배치형성 작업이 끝나면 단계 3으로 간다.  
새로운 로트 그룹에 대해 그룹 내에 속한 로트들을  $w_i$  값이 큰 로트부터 정렬한다.
- 단계 2. RNRN 단계 2와 동일
- 단계 3. GRD 단계 3과 동일
- 단계 4. LFLT 단계 4와 동일

### 제 3 장 수치실험을 통한 휴리스틱 평가

본 논문에서 제안된 휴리스틱 알고리즘들의 성능을 평가하기 위해 무작위로 생성된 예제를 푸는데 휴리스틱들을 사용한다. 문제의 복잡도는 처리대상 로트의 수( $n$ ), 로트 그룹의 개수( $c$ ), 기계 대수( $m$ )에 달려있으므로 이 세 가지 파라미터를 여러 수준으로 통제하며 예제를 생성하도록 한다. 즉,  $n$  은 3개 수준(100, 200, 300),  $c$  는 4개 수준(5, 10, 15, 20),  $m$  은 3개 수준(10, 30, 50) 중의 한 값을 가진다. 이 36개 조합에 대해서 각각 무작위로 20개 문제를 생성하였다.

주어진  $(n, c, m)$  조합에 대해 문제를 생성한다는 것은  $n$  개의 로트에 대해  $s_i$  및  $w_i$  를 생성하고  $c$  개의 로트 그룹에 대해  $p_k$  및  $n_k$  를 생성한다는 것이다. 여기서  $n_k$  는 로트 그룹  $k$  에 속한 로트들의 개수를 뜻한다.  $s_i$  및  $w_i$  의 값은  $U(0, 100)/100$ 이다. 여기서  $U(a, b)$ 는 구간  $(a, b)$ 에서 무작위로 생성된 정수를 의미한다. 로트 그룹  $k$  ( $k=1, 2, \dots, c$ )에 대한  $p_k$  값은  $U(10k, 10k+10)$ 이다.  $n_k$  의 값은  $k < c$  일 때는  $\lfloor n/c \rfloor$ 이고,  $k = c$  일 때는  $n_c = n - \sum_{k=1}^{c-1} n_k$  이다. 단 여기서  $\lfloor x \rfloor$ 는  $x$  보다 크지 않은 정수 중 가장 큰 값이다.

<표 2>, <표 3>, <표 4>는 실험결과이다. 각 표는  $(n, c, m)$  조합에 따라 36개 칸으로 구성되어 있다. 각 칸은 무작위로 만들어진 20개 테스트 문제에 대한 결과를 요약한 것이다. 각 칸에는 2개의 값이 들어 있다. 하나는 해당 휴리스틱의 결과를 RNRN 휴리스틱의 결과와 비교한 비율값을 백분율로 표시한 것으로서 20개의 실험문제의

결과를 평균한 값이다. 다른 하나의 수치는 20개의 결과에 대한 표준 편차이다. 예를 들어 <표 2>의 왼쪽 위 모서리( $n=100$ ,  $c=5$ ,  $m=10$ 인 경우)에 위치한 79와 4.59는 다음과 같은 절차로 구해진 것이다.

<표 2> CMAX 문제에 대한 결과

m	c		n = 100	n = 200	n = 300
			LFLT	LFLT	LFLT
10	5	mean	79	78	78
		SD	4.59	2.04	1.42
	10	mean	78	80	80
		SD	3.20	2.35	2.03
	15	mean	81	81	82
		SD	3.47	2.93	2.47
	20	mean	83	84	82
		SD	3.53	3.14	2.17
30	5	mean	72	71	73
		SD	5.55	2.66	2.41
	10	mean	66	71	74
		SD	4.21	2.46	2.79
	15	mean	69	73	75
		SD	4.56	3.69	2.15
	20	mean	67	73	75
		SD	4.59	2.85	2.24
50	5	mean	70	67	70
		SD	5.55	3.90	3.32
	10	mean	77	67	70
		SD	5.03	2.76	1.80
	15	mean	77	67	69
		SD	4.98	3.04	2.43
	20	mean	83	68	70
		SD	6.93	3.26	2.21

- 1) 무작위로 생성된 20개의 실험 예제에 대해 RNRN 휴리스틱을 적용한 결과로 얻어진 총 완료시간(Makespan) 값들은 각각 254,

- 246, 302, 263, 259, 238, 251, 250, 233, 228, 271, 271, 264, 278, 286, 213, 234, 277, 223, 262 이다.
- 2) 같은 문제에 대한 LFLT 휴리스틱의 결과는 각각 194, 199, 208, 217, 212, 208, 204, 207, 188, 195, 219, 207, 202, 222, 220, 168, 176, 197, 178, 192 이다.
- 3) LFLT의 결과값을 RNRN의 결과값으로 나누고 100을 곱하면 각각 76, 81, 69, 83, 82, 87, 81, 83, 81, 86, 81, 76, 77, 80, 77, 79, 75, 71, 80, 73% 이다.
- 4) 이 % 값의 평균과 표준 편차는 각각 79 및 4.59 이다.

### 3.1 CMAX의 결과

<표 2>는 CMAX의 결과로서 LFLT 휴리스틱의 결과만을 보여주고 있다. 제2장에서는 LFRN 휴리스틱도 제안하였으나 LFLT와 매우 큰 차이를 보여주고 있어 LFLT의 결과만을 제시하였다.

이 표의 평균 비율 값은 67%~84%로 다양하다. 이것은 LFLT 휴리스틱을 사용할 경우 RNRN 휴리스틱을 사용할 때보다 16%~33% 일찍 모든 작업을 끝낼 수 있다는 것이다. 다시 말해서 10일이 소요되던 작업을 LFLT 휴리스틱으로 일정계획을 작성하면 1.6 ~ 3.3일을 단축해서 마칠 수 있다는 뜻이다. TOC(Theory of Constraints)의 관점에서 본다면 제약자원의 능력이 곧 생산라인 전체의 능력이므로, 이 결과는 신규 투자 없이 공장의 능력을 16% ~ 33% 증대한 것과 같은 결과이다.

이 표에서 우리는 LFLT를 사용함으로써 얻을 수 있는 효과가 기

계 대수가 증가할수록 더욱 커진다는 사실을 알 수 있다. 즉, 기계 대수가 많아질수록 RNRN에 의한 일정계획보다 LFLT에 의한 일정계획의 총 완료시간이 더욱더 짧아지는 것이다. 기계 대수 이외의 파라미터( $c$  및  $n$ )는 휴리스틱의 성능차이에 큰 영향이 없는 것으로 생각된다.

<표 3> SUMCI 문제에 대한 결과

m	c		n = 100		n = 200		n = 300	
			SFST	LFST	SFST	LFST	SFST	LFST
10	5	mean	65	66	60	61	59	59
		SD	4.06	3.74	2.86	2.77	1.75	1.93
	10	mean	65	65	59	59	57	58
		SD	4.78	4.47	2.56	3.10	2.19	2.28
	15	mean	64	65	59	59	56	56
		SD	3.22	3.48	2.61	2.58	1.94	2.07
	20	mean	66	66	58	58	56	56
		SD	3.79	3.78	2.39	2.97	2.40	2.45
30	5	mean	82	80	70	68	66	66
		SD	2.86	2.78	3.12	2.85	2.43	2.54
	10	mean	81	79	67	66	63	63
		SD	3.05	3.48	2.08	2.54	2.46	2.40
	15	mean	79	78	67	66	63	62
		SD	4.04	3.80	2.69	2.99	2.20	2.36
	20	mean	81	81	67	67	62	62
		SD	2.71	2.62	2.31	1.73	1.48	1.44
50	5	mean	92	88	78	75	71	70
		SD	2.07	2.10	2.13	1.83	2.28	2.26
	10	mean	95	92	78	75	70	69
		SD	1.87	2.11	2.27	2.32	2.45	2.34
	15	mean	94	92	76	74	69	68
		SD	2.51	2.48	1.78	1.84	2.16	2.30
	20	mean	94	93	76	75	69	68
		SD	2.51	2.32	2.14	2.01	2.01	2.08

### 3.2 SUMCI의 결과

SUMCI 결과는 <표 3>에 나와 있다. 이 표는 SFST와 LFST의 결과를 요약한 것이다. 두 휴리스틱의 결과는 거의 차이가 없어 보인다. 대부분의 경우 LFST가 SFST보다 미세하게 좋아 보이지만 경우에 따라 반대인 경우도 있다. 좀 더 현실에 가까운 상황(로트 수와 기계 대수가 큰 경우)에서 LFST가 우세하므로 SUMCI의 경우에는 LFST를 사용하는 것이 좋아 보인다.

CMAX의 경우와 달리 여기서는 기계 대수가 증가할 때 휴리스틱의 성능이 저하되는 현상을 볼 수 있다.

### 3.3 SUMWC의 결과

<표 4>는 SUMWC에 대한 GRD 및 BWST의 결과를 요약한 것이다. SFST와 LFST 알고리즘도 실험하였으나 GRD 및 BWST에 비해 매우 나쁜 결과를 보여주었으므로 표에서 제외하였다. 이 표를 보면 BWST가 미세하나마 GRD에 비해 대체로 좋은 결과를 도출해준다는 것을 알 수 있다.

BWST에 대한 평균 비율 값은 43% ~ 92% 까지 다양하다. 다시 말해 병렬 배치처리 기계를 스케줄하는데 BWST 휴리스틱을 사용하면 무작위 스케줄과 비교했을 때 각 로트들의 처리시간 가중합을 8% ~ 57% 줄일 수 있다는 것이다.

[표4] SUMWC 문제에 대한 결과

m	c		n = 100		n = 200		n = 300	
			GRD	BWST	GRD	BWST	GRD	BWST
10	5	mean	54	53	46	45	45	44
		SD	4.16	4.07	2.04	1.96	2.50	2.46
	10	mean	56	55	47	45	44	43
		SD	3.54	3.66	2.49	2.48	2.74	2.46
	15	mean	53	52	46	45	44	43
		SD	3.92	3.38	2.28	2.37	1.96	1.89
	20	mean	56	55	48	47	44	43
		SD	3.48	3.36	2.71	2.46	2.21	2.11
30	5	mean	74	72	58	57	51	50
		SD	3.45	3.45	2.84	2.85	1.65	1.66
	10	mean	73	72	59	57	52	51
		SD	3.37	3.39	2.30	2.15	2.21	2.17
	15	mean	75	74	69	57	52	50
		SD	4.38	4.51	2.74	2.56	1.93	1.78
	20	mean	74	73	58	57	52	51
		SD	4.00	3.85	3.57	3.37	1.95	1.87
50	5	mean	90	90	67	66	59	58
		SD	3.84	3.95	3.11	2.93	1.78	1.60
	10	mean	90	90	69	67	60	58
		SD	3.27	3.41	2.75	2.47	3.05	2.85
	15	mean	92	92	69	67	58	57
		SD	2.80	2.76	2.85	2.86	2.38	2.37
	20	mean	92	91	69	68	60	58
		SD	2.86	2.90	2.28	2.34	2.00	2.03

## 제 4 장 결 론

MLCC 제조 라인의 가소공정이 계기가 되어, 로트들의 기계 점유율이 서로 상이하고 한 배치로 묶여질 수 있는 로트들에 제한이 있는 상황에서의 병렬 배치처리 기계의 일정계획 문제를 연구하였다. 일정계획 문제의 평가지표로는 총 완료시간(Makespan), 로트별 완료시간 합(Total Completion Time), 로트별 완료시간 가중합(Total Weighted Completion Time) 등 세 가지를 사용하였다. 실제 문제의 사이즈가 매우 크고 NP-hard 문제이기 때문에 휴리스틱을 통한 문제해결을 시도하였다. 큰 사이즈의 문제를 적정 시간 안에 해결하기 위해 각 문제에 대한 휴리스틱 알고리즘을 여러 개 제안하고 컴퓨터 실험을 통해 각 휴리스틱 알고리즘들을 평가하였다.

컴퓨터 실험의 결과를 통해 휴리스틱들이 문제에 대해 서로 다른 결과를 보여주었다. 총 완료시간 문제에 대해서는 LFLT, 로트별 완료시간 합 문제에서는 LFST, 로트별 완료시간 가중합 문제에서는 BWST 휴리스틱이 대체로 가장 우수한 결과를 보여 주었다.

본 연구의 후속연구로는 다음과 같은 것들을 제안할 수 있다. 우선 로트들의 납기를 고려하고 로트별 기계점유율이 서로 다른 상황에서의 단일기계 BLSP는 아직 연구되지 않았다. 따라서 납기에 관련된 평가지표를 고려하는 문제를 병렬 기계 경우 뿐 아니라 단일 기계에 대해서도 연구되어야 한다. 둘째로, 본 연구에서는 가소 공정이 MLCC 제조라인의 병목공정이므로 이 공정의 일정계획에만 초점을 맞추었다. 그러나 실제 관점에서는 병목공정을 스케줄하기 위해서 다른 여러 공정의 제한이 있을 수 있다. 여러 제한을 가진 스케줄링 문

체에 대한 연구도 필요할 것이다. 마지막으로, 본 논문에서 제시한 휴리스틱 이외에도 성능이 더 우수한 휴리스틱 알고리즘이 있을 것이다. 이러한 휴리스틱을 찾는 것도 좋은 연구과제가 될 것이다. 특히 유전 알고리즘(GA; Genetic Algorithm), 터부 검색(Tabu Search), 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing) 등과 같은 메타 휴리스틱(Meta Heuristic)의 적용함으로써 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

## 참고문헌

1. Chandru, V., C.Y. Lee and R. Uzsoy, 1993, Minimizing total completion time on batch processing machines, *International Journal of Production Research* 31, 2097-2121.
2. Dobson, G. and R.S. Nambimadom, 2001, The batch loading and scheduling problem, *Operations Research* 49, 52-65.
3. Garey, M.R. and Johnson, D.S., 1979, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NPCompleteness* (San Francisco: W.H. Freeman).
4. Graham, R.L., 1969, Bounds on multiprocessor timing anomalies. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 17(2), 416-429.
5. Hochbaum, D.S. and D. Landy, 1997, Scheduling semiconductor burn-in operations to minimize total flowtime, *Operations Research* 45, 874-885.
6. Ikura, Y. and M. Gimple, 1986, Scheduling algorithms for a single batch processing machine, *Operations Research Letters* 5, 61-65.
7. Johnson, D.S., Demers, A., Ullman, J.D., Garey, M.R. and Graham, R.L., 1974, Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms. *SIAM*

- Journal on Computing, 3(4), 299–325.
8. Kempf, K.G., R. Uzsoy and C.S. Wang, 1998, Scheduling a single batch processing machine with secondary resource constraints, *Journal of Manufacturing Systems* 17, 37–51.
  9. Lee, C.Y. and R. Uzsoy, 1999, Minimizing makespan on a single batch processing machine with dynamic job arrivals, *International Journal of Production Research* 37, 219–236.
  10. Lee, C.Y., R. Uzsoy and L.A. Martin-Vega, 1992, Efficient algorithms for scheduling semiconductor burn-in operations, *Operations Research* 40, 764–775.
  11. Mehta, S.V. and R. Uzsoy, 1998, Minimizing total tardiness on a batch processing machine with incompatible job families, *IIE Transactions* 30, 165–178.
  12. Uzsoy, R., 1994, Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes, *International Journal of Production Research* 32, 1615–1635.
  13. Uzsoy, R., 1995, Scheduling batch processing machines with incompatible job families, *International Journal of Production Research* 33, 2685–2708.

# Production Scheduling for MLCC Bake-out Process

Hong-Seok Lee

*Department of Systems Management & Engineering  
Graduate School of Industry, Pukyong National University*

## Abstract

Motivated by a bottleneck operation in an MLCC (Multi-Layer Ceramic Capacitor) production line, we study a scheduling problem of the parallel batch processing machines in which a number of jobs are processed simultaneously as a batch. Volumes of the jobs are different each other and each job belongs to a family in which all jobs have a same processing time. In this situation we analyse three kinds of problems whose performance measures are makespan, total completion time, and total weighted completion time, respectively. Since these problems are known as NP-hard, we propose a number of heuristics for the problems. Through some computational experiments, we evaluate the performances of the heuristic algorithms proposed for each of three problems.

**Keywords:** scheduling, batch processing, integer programming, heuristic

## 감사의 글

대학생활 4년은 조선공학을 전공하고 첫 직장생활은 자동차부품을 만드는 대전의 한 중소기업에 입사하여 영업부서에서 4년간 직장생활을 하다가 삼성전기(주)에서 자동차부품 사업을 시작할때 경력사원으로 입사하여 생산기술연구소 기획부서에서 기획업무를 3년정도 하다가 새롭게 생산성 관리업무를 맡고 이론적 밑바탕이 없는 상태에서 책과 현장에서 몸으로 부딪치며 IE 이론을 익히느라 고심이 많았던 저에게 BB 산학협력과정에 대한 지원 기회가 주어져 의욕을 갖고 열심히 공부해 보겠다고 나선것이 어느덧 2년이 지나 산업대학원 졸업이 눈앞에 다가왔습니다.

돌이켜보면 참 바쁘게 살아온 2년이었지만 조금은 더 열심히 할 수도 있었는데 라는 아쉬움이 남습니다

산업대학원 입학 6개월전 회사에서 실시한 TOC 산학협동 연구과제 수행시 인연을 맺게되어 부족한 제자가 졸업을 못할까 노심초사하시며 관심과 사랑으로 지도해 주시고 이끌어 주시며 용기를 북돋아 주셨던 고시근 교수님께 머리 숙여 깊은 감사를 드립니다. 업무에 바빠 교수님 기대에 부응하지 못함을 꾸짖기 전에 넓은 이해심으로 직장다니며 공부하느라 힘들지 않은지 먼저 위로와 격려를 아끼지 않으시고 이끌어 주셨는데 제가 그 모든 가르침을 제 것으로 소화할 하지 못한 것 같아 송구스럽고 죄송스런 마음이 오래도록 아쉬움으로 남을 것 같습니다.

늘 푸근하시고 미소가 가득하신 구평희 교수님, 김병남 교수님, 학교 기획처로 영전하시어 학교도 운영하시며 제자들 가르치시라 더욱 바빠지신 권혁무교수님, 이운식교수님, 이웃집 아저씨 같이 편안하게 대해 주셨던 옥영석교수님, 교수님들의 가르침에 깊은 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 항상 건강하

시고 열정적으로 가르치시는 지금의 모습 계속되시길 바랍니다.

지난 2년동안 같이 공부하며 관심과 격려 주셨던 산대원 선·후배님들께도 깊은 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 특히 김영진교수님의 깊이있는 가르침과 김여일주임의 학년 총대의 역할을 하느라 정말 고생 많았으며, 이에 대한 감사의 마음을 전합니다.

내가 회사업무에 바쁘고, 학교가느라 바빠 잣 회사에 입사하여 아무것도 모르는 신입사원이 마음고생 심했던 이가영씨에게 더 다가가지 못하고, 더 세심하게 가르켜주지 못하고, 더욱 너그럽게 대해주지 못했던 상사로써 부끄럽지만 그동안 업무에 적응하며 소리없이 따라준 것에 대해 고맙고 미안한 마음을 전하고 싶습니다.

나의 소중한 두왕자님, 옆집 아저씨 아주머니가 아빠 뭐하시니 하고 물으면 우리아빠는요 일요일날 잠만 자요 라고 대답할 정도로 많이 놀아주지 못했던 아빠가 너무 많이 미안하구나, 새해부터는 아빠가 될 수 있으면 같이 많이 놀아줄 수 있도록 노력할게. 용서해줄거지...

집안에 큰일이 있을 때마다 맞추어 회사일이 핑계대고 혼자서 많은 아픔을 감내하게 한 아내에게 미안하고 고맙고 늘 사랑하고 있다는 말을 이렇게나마 전하고 싶습니다.

멀리떨어져 자주 찾아뵙지도 못한 이 아들이 대학원 졸업한단 말에 축하한다 말로 기쁨을 감추지 못하시는 부모님, 장인어른, 장모님, 한번도 감사하던 말, 사랑한다는 말, 무뚝뚝한 아들 사위라 입밖으로 표현하지 못했지만 늘 감사하고 너무나도 사랑하고 있다는 것을 이렇게나마 전하고 싶습니다.

이 홍 석 드림