

Simulated Annealing을 활용한 복수공장 신발생산계획 연구

2017. 06. 02

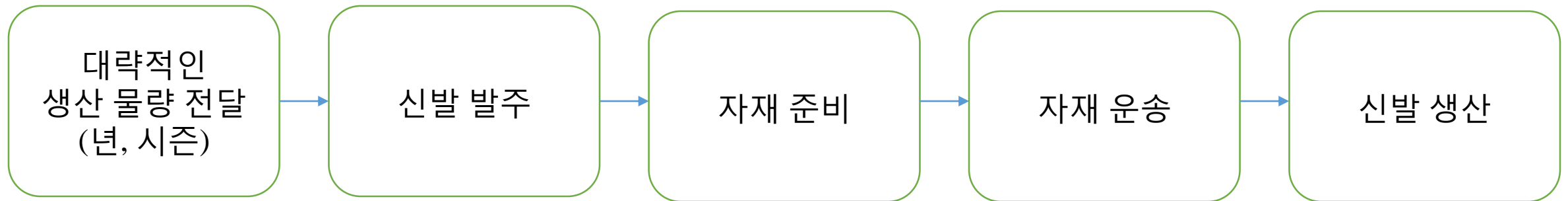
김동규, 정세윤, 송현호, 하병현
부산대학교 산업공학과

구성

1. 서론
2. 문제 정의
3. 수리모형
4. 알고리즘
5. 실험결과
6. 결론

1. 서론

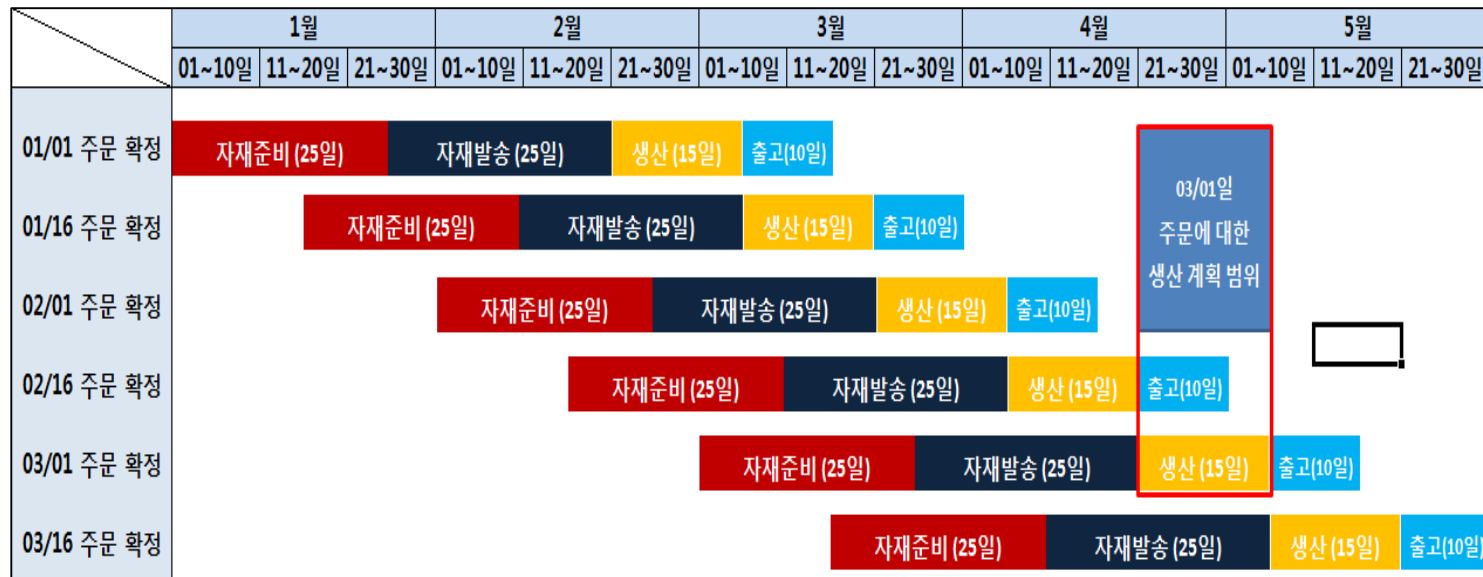
- 신발 공정
 - OEM (Original Equipment Manufacture)
 - 주문자 상표 부착 방식
 - 인건비가 저렴한 지역에 공장을 운영하는 업체에게 생산을 의뢰
 - 납품받은 제품에 주문자의 상표를 부착
 - 나이키, 아디다스 등
 - 신발 주문
 - 년 초, 혹은 시즌 초에 대략적인 전체 생산 물량을 전달
 - 주기적으로 주문 확정



신발 생산 과정

1. 서론

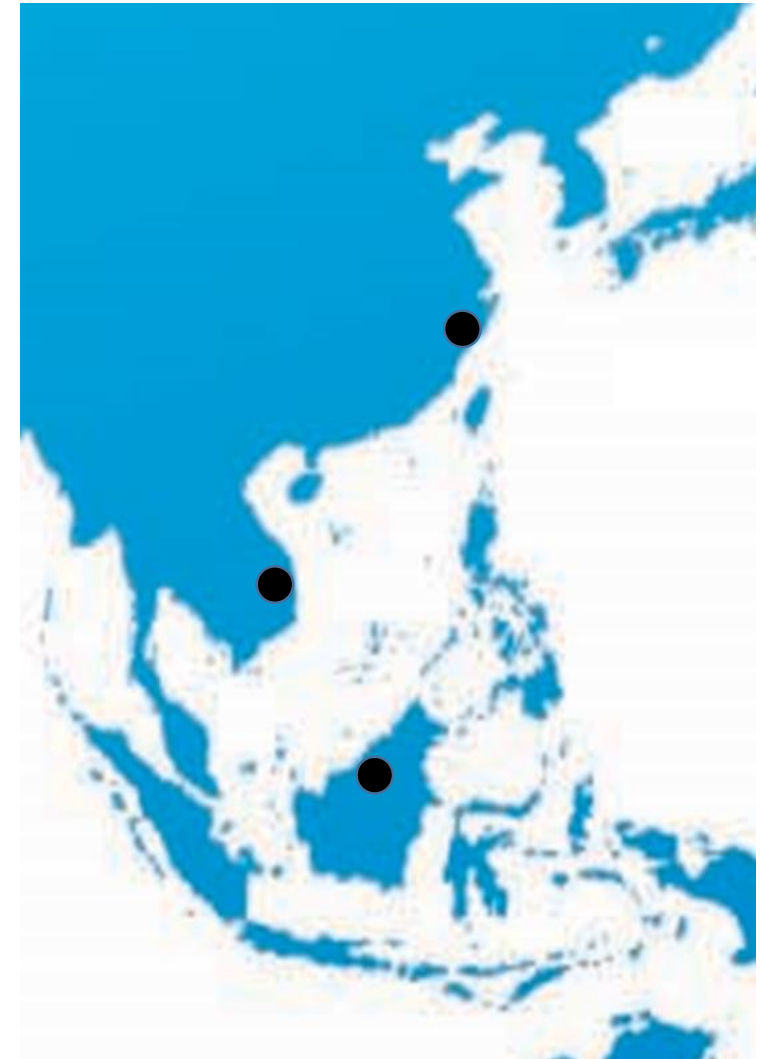
- 신발 생산 공정의 특징
 - 주문의 확정부터 생산 일정까지 기간이 존재
 - 앞으로 발주될 것이라 예상되는 제품에 대해서도 고려 필요
 - 생산지 변경에 상당한 비용이 부가
 - 치공구, 몰드 이전비용
 - 라인 설치, 변경 비용



주문 확정 후 소요 기간

1. 서론

- 주문 할당의 문제점
 - 현장 전문가가 각 공장의 여유 능력을 고려하여 수작업으로 배정
 - 공장 및 라인의 규모가 커지면서 문제가 복잡해 짐
 - 지역적인 특성 및 공장/라인의 특성이 고려되지 않음
 - 지역적인 특성: 인건비, 자재 운송 및 구입 비용
 - 공장/라인의 특성: 라인의 생산 능력, 라인의 습속도, 공장의 회수율
 - 수작업으로는 고려하기 힘든 부분을 포함하여 보다 효과적인 주문 할당 계획의 수립이 요구됨



2. 문제 정의

- 신발 공정 구성요소
 - 고객 주문
 - 고객 주문이 확정: 한달에 두 번
 - 매 고객 주문마다 예상되지 않은 주문이 존재
 - 신제품, 생산을 하지 않던 제품
 - 공장
 - 위치에 따라 인건비, 운송비가 다름
 - 재작업을 하는 비율(수율)이 다름
 - 라인 단위의 작업장이 존재

2. 문제 정의

- 가정 사항(계속)
 - 고객 주문
 - 년 단위, 시즌 단위로 생산해야 할 주문의 수량은 대략적으로 알고 있다고 가정
 - 고객의 주문은 투입되는 작업자 수와 표준 작업시간에 따라 난이도가 결정됨
 - 모델의 난이도 = 투입된 작업자 수 \times 표준 작업 시간
 - 인건비
 - 하루 동안의 표준 인건비를 산정
 - 근무 기준: 하루 8시간
 - 공장에 따라 인건비가 다름
 - 잔업
 - 고객의 주문 수량을 만족시키지 못하는 경우 잔업 발생
 - 잔업 양에 따라 추가 비용 발생
 - 하루 최대 잔업 시간: 3시간

2. 문제 정의

- 가정 사항(계속)
 - 운송비
 - Inbound Cost와 Outbound Cost가 존재
 - Inbound Cost
 - 원자재의 구매, 해상 운송, 육로 운송 등의 비용을 합한 값
 - 공장의 수율으로 인하여 고객 주문 수량 이상의 원자재를 구매
 - Outbound Cost
 - 완성된 제품의 출하, 목표 항구까지 배송하는데 소모되는 비용
 - 초과 생산된 수량은 고려하지 않으므로 고객의 주문 수량만큼 고려

2. 문제 정의

- 가정 사항(계속)
 - 생산지 이전 비용
 - 라인을 설치, 변경하는 비용
 - 제조하는 신발에 따라 라인을 설치 혹은 변경을 진행하는데 소모되는 비용
 - 치공구 및 몰드 이전 비용
 - 치공구 및 몰드를 다른 공장으로 이전하는데 소모되는 비용
 - 치공구: 신발의 윗부분(upper)의 제작에 사용되는 도구
 - 몰드: 신발의 밑창을 생산하는데 사용되는 도구
 - 앞으로 생산할 물량을 함께 고려하여 비용 추정

2. 문제 정의

- 가정 사항(계속)
 - 습속도
 - 제품을 생산하는데 얼마나 익숙한지 나타내는 정도
 - 공장의 각 라인마다 제품에 따른 습속도가 다름
 - 한 주기(15일)의 생산량/한 주기의 생산능력으로 계산
 - 수율
 - 투입 공수 대비 회수 공수의 비율
 - 투입 공수 = 투입된 사람수 × 투입 시간
 - 회수 공수 = 표준 생산 시간 × 회수된 생산량
 - 작업장의 온도, 기후, 설비 상태 등의 요인으로 변경

| 날짜 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 생산량 (족) | 달성량 (%) |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|------------|
| 생산량 (기준) | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 30000 | 100% |
| 1공장 | 1200 | 1250 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1650 | 1700 | 1700 | 1800 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 25100 | 84% |
| 2공장 | 1200 | 1350 | 1400 | 1550 | 1750 | 1900 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 27150 | 91% |
| 3공장 | 1200 | 1200 | 1250 | 1300 | 1350 | 1400 | 1500 | 1600 | 1650 | 1700 | 1700 | 1800 | 1850 | 2000 | 2000 | 23500 | 78% |

2. 문제 정의

- 신발 공정의 공장 별 주문 할당 문제
 - 목표
 - 습속도, 수율, 인건비 등을 고려한 운영 비용 최소화
 - 결정사항
 - 공장 별 주문 여부 결정
 - 각 공장의 각 라인 별 가능 생산량 결정
 - 각 공장의 각 라인 별 잔업량 결정

3. 수리모형

- Parameter
 - m : 공장 k 의 총 개수
 - n : 제품 j 의 총 개수
 - L_k : 공장 k 의 i 라인의 총 개수
 - D_j : j 제품의 주문량
 - C_i^k : 공장 k 의 i 라인의 여유 능력
 - E_{ij}^k : 공장 k 의 i 라인에서 j 제품을 생산 시 습속도
 - R^k : 공장 k 의 회수율
 - H_j : j 제품 별 난이도
 - T^k : 공장 k 에서 j 제품 생산 시 운송비
 - W_{ij}^k : 공장 k 에서 j 제품 생산 시 인건비/족당
 - S_j^k : 공장 k 에서 j 제품을 생산 시 치 공구 및 몰드 이전 비용
 - O^k : 공장 k 의 잔업 비용/족

3. 수리모형

- Objective Function

$$\min \underbrace{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{L_k} \sum_{j=1}^n \frac{W_{ij} H_j}{R^k E_{ij}^k} X_{ij}^k}_{\text{제품당 인건비}} + \underbrace{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{L_k} \sum_{j=1}^n T_j^k X_{ij}^k}_{\text{제품당 운송비}} + \underbrace{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n S_j^k Y_j^k}_{\text{공장 이전 비용}} + \underbrace{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{L_k} O^k z_i^k}_{\text{잔업비용}}$$

- Decision Variables

- X_{ij}^k : 공장 k 의 i 라인에서 생산할 수 있는 j 의 양
- $Y_j^k = \begin{cases} 1, & \text{만약 공장 } k \text{에서 제품 } j \text{를 생산하면} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$
- z_i^k : 공장 k 의 i 라인에서 작업하는 잔업의 양

3. 수리모형

- Subject To

| | | | |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----------------------|
| $\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{L_k} X_{ij}^k \geq D_j$ | \forall_j | (1) | 수요제약 |
| $\sum_{j=1}^m \frac{H_j}{R_i^k E_{ij}^k} x_{ij} \leq C_i^k$ | \forall_k, \forall_i | (2) | 라인의 생산량 제약 |
| $Z_i^k \leq 0.375 \times C_i^k$ | \forall_k, \forall_i | (3) | 라인의 잔업 생산량 제약 |
| $x_{ij}^k \leq M \times y_j^k$ | $\forall_k, \forall_j, \forall_i$ | (4) | 공장 주문 여부 |
| $\sum_{k=1}^m Y_j^k = 1$ | \forall_j | (5) | 하나의 주문은 한 공장에 할당되어야 함 |
| $x_{ij}^k \geq 0$ | $\forall_k, \forall_j, \forall_i$ | (6) | 최소 생산량 제약 |

4. 알고리즘

- Simulated Annealing(SA)
 - Y_j^k 를 결정하는데 사용
 - 각 주문을 어떤 공장에 할당하는지 결정
 - 초기해
 - 임의의 Y_j^k 해를 생성
 - 이웃해 탐색
 - 생성된 Y_j^k 에 대하여 한 주문을 선택
 - 해당 주문이 할당된 공장을 변경
 - Temperature
 - T_0 : 초기 온도, T_1 : 타겟 온도, T = 온도
 - p_i : 온도 감소 비율
 - $T = p_i * T$
 - $T \leq T_1$ 이 되면 탐색 종료

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 공장의 생산 능력

| 생산지 | 총 생산 능력 | 라인 개수 | 라인 생산능력 |
|-----|-----------|-------|------------|
| 1공장 | 10만 (족/일) | 50라인 | 2000 (족/일) |
| 2공장 | 4만 (족/일) | 20라인 | 2000 (족/일) |
| 3공장 | 6만 (족/일) | 30라인 | 2000 (족/일) |

생산지 별 생산능력 정보 (실 생산지 자료)

- 운송비

| 운송비/ 족당 (T) | 1공장(\$) | 2공장(\$) | 3공장(\$) |
|----------------|---------|---------|---------|
| 모 델 | 0.035 | 0.020 | 0.041 |

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 수요

| 주문 정보 & 생산정보 | | | | |
|--------------|-----------------|--------------|---------------|---------|
| 모델 | 주문수량 (족/15일) | 생산량 (족/일) | 작업자수 (명/일) | 제품별 난이도 |
| A | 120,000 | 8,000 | 2,000 | 1.25 |
| B | 90,000 | 6,000 | 1,260 | 1.05 |
| C | 54,000 | 3,600 | 598 | 0.83 |
| D | 127,500 | 8,500 | 1,598 | 0.94 |
| E | 33,000 | 2,200 | 550 | 1.25 |
| F | 34,500 | 2,300 | 612 | 1.33 |
| G | 43,500 | 2,900 | 580 | 1.00 |
| H | 37,500 | 2,500 | 400 | 0.80 |
| I | 18,000 | 1,200 | 223 | 0.93 |
| J | 13,500 | 900 | 153 | 0.85 |
| K | 10,500 | 700 | 126 | 0.90 |
| L | 7,500 | 500 | 115 | 1.15 |
| M | 1,500 | 100 | 20 | 1.00 |
| N | 3,000 | 200 | 38 | 0.95 |
| O | 4,500 | 300 | 67 | 1.12 |

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 습속도

| 습속도 (E) | 1공장 | | | | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 모델 | 1line | 2line | 3line | 4line | 5line | 6line | 7line | 8line | 9line | 10line |
| A | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 |
| B | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| C | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 |
| D | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| E | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 |
| F | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 |
| G | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 |
| H | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 |
| I | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| J | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| K | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| L | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| M | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |
| N | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 |
| O | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 1 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |

| 습속도 (E) | 2공장 | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 모델 | 1line | 2line | 3line | 4line |
| A | 0.91 | 1 | 1 | 0.91 |
| B | 1 | 0.91 | 0.91 | 1 |
| C | 0.91 | 1 | 1 | 0.91 |
| D | 1 | 0.91 | 0.91 | 1 |
| E | 0.91 | 1 | 1 | 0.91 |
| F | 0.91 | 1 | 0.91 | 0.91 |
| G | 1 | 0.91 | 0.91 | 0.91 |
| H | 0.91 | 1 | 0.91 | 1 |
| I | 0.91 | 0.91 | 1 | 0.91 |
| J | 0.91 | 0.91 | 0.91 | 0.91 |
| K | 0.91 | 1 | 0.91 | 0.91 |
| L | 0.91 | 0.91 | 0.91 | 1 |
| M | 1 | 0.91 | 1 | 0.91 |
| N | 0.91 | 0.91 | 0.91 | 0.91 |
| O | 0.91 | 0.91 | 0.91 | 0.91 |

| 습속도 (E) | 3공장 | | | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 모델 | 1line | 2line | 3line | 4line | 5line | 6line | 7line | 8line |
| A | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 |
| B | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| C | 1 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 |
| D | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 |
| E | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| F | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 1 |
| G | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 |
| H | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| I | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 |
| J | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 |
| K | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| L | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 | 1 | 0.87 | 0.87 |
| M | 0.87 | 0.87 | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| N | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 |
| O | 1 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 1 |

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 치공구 및 몰드 이전 비용

| 이 전 비 용 /족 당 (\$) | 1공 장(\$) | 2공 장(\$) | 3공 장(\$) |
|----------------------|----------|----------|----------|
| 제 품 | All-line | All-line | All-line |
| A | - | 19,600 | 19,600 |
| B | 19,600 | - | 19,600 |
| C | 19,600 | 19,600 | - |
| D | - | 19,600 | 19,600 |
| E | 19,600 | - | 19,600 |
| F | 19,600 | - | 19,600 |
| G | 19,600 | 19,600 | - |
| H | 19,600 | 19,600 | - |
| I | - | 19,600 | 19,600 |
| J | 19,600 | - | 19,600 |
| K | 19,600 | - | 19,600 |
| L | - | 19,600 | 19,600 |
| M | 19,600 | 19,600 | - |
| N | 19,600 | - | 19,600 |
| O | 19,600 | - | 19,600 |

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 인건비

| 인건비/ 족당 (W) | 1공장(\$) | 2공장(\$) | 3공장(\$) |
|----------------|----------|----------|----------|
| 모델 | All-line | All-line | All-line |
| A | 3.75 | 5.14 | 3.20 |
| B | 3.00 | 4.11 | 2.56 |
| C | 2.50 | 3.43 | 2.13 |
| D | 2.81 | 3.86 | 2.40 |
| E | 3.75 | 5.14 | 3.20 |
| F | 3.75 | 5.14 | 3.20 |
| G | 3.00 | 4.11 | 2.56 |
| H | 2.50 | 3.43 | 2.13 |
| I | 2.81 | 3.86 | 2.40 |
| J | 3.75 | 5.14 | 3.20 |
| K | 3.75 | 5.14 | 3.20 |
| L | 3.00 | 4.11 | 2.56 |
| M | 2.50 | 3.43 | 2.13 |
| N | 2.81 | 3.86 | 2.40 |
| O | 3.75 | 5.14 | 3.20 |

5. 실험결과

- 입력값(계속)
 - 잔업비용

| 잔업비용 (F) | 1공장(\$) | 2공장(\$) | 3공장(\$) |
|-------------|---------|---------|---------|
| 모델 | 16.5 | 22.6 | 14.1 |

- 수율

| 수율 (R) | 1공장 | 2공장 | 3공장 |
|--------|------|------|------|
| 모델 | 0.72 | 0.79 | 0.68 |

5. 실험결과

[illegible]

6. 결론

- 본 연구는 생산 비용을 최소화 하는 생산계획 수리모형을 제시함
 - 전문가가 고려하지 못한 사항인 습속도, 수율, 생산지 변경 비용 등을 고려
 - 최적 생산지 배분 할당 계획의 수립이 가능함을 검증함
- 추후 연구 및 한계점
 - 결과가 현실에 더 일치하도록 고려하지 못한 변수 추가
 - 수율
 - 생산지 별 고정 수율이 아닌 생산지 별과 제품 별 수율의 부분이 동시에 고려 되어야 할 필요가 있음
 - 습속도
 - 보다 정확한 데이터의 수집 및 통계치를 이용할 필요가 있음
 - 치공구 및 몰드 이전 비용
 - 비율 검증 필요