**Variability**

**<Experimental result & analysis>**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1. Report on the results from the experiment 1 and decide which machine is better.   - Results from calculation   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | ***te*** |  |  | ***re*** | **A** | | **Hare X19** | 19.8072 | 3.0388 | 327.4598 | 0.0505 | 0.7573 | | **Tortoise 2000** | 20 | 0.475 | 50.5351 | 0.05 | 0.75 |   Theoretical Background를 적어보면 아래와 같다.    ,  *,*  *,*  **i) Hare X19**  문제에 따라, , 이다.    ,  ,    **ii) Tortoise 2000**  문제에 따라, 이다.    ,  ,    - Results from simulation (Variability observation)   |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | **Time Interval (0.5 hr)** | | **Time Interval (0.7 hr)** | | **Time Interval (0.9 hr)** | | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | | **Process time** | **Constant**  **(15 min)** | **UNIF**  **(5, 25)** | **Constant**  **(15 min)** | **UNIF**  **(5, 25)** | **Constant**  **(15 min)** | **UNIF**  **(5, 25)** | | **Hare X19** | 2.6161 | 2.6968 | 3.6408 | 3.7321 | 4.7693 | 4.795 | | **Tortoise 2000** | 0.3237 | 0.3417 | 0.48 | 0.4827 | 0.617 | 0.6246 |   **i) Time Interval (0.5 hr)**  **a) Constant**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.8482,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.1079,      **b) Uniform(5,25)**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.8734,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.1140,      **ii) Time Interval (0.7 hr)**  **a) Constant**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.6592,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.0889,      **b) Uniform(5,25)**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.6647,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.0906, ,      **iii) Time Interval (0.9 hr)**  **a) Constant**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.5981,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.0793,      **b) Uniform(5,25)**  **- Hare X19 :** Waiting time = 0.6025,  **- Tortoise 2000:** Waiting time = 0.0801, ,      Hare X19, Tortoise 2000의 MTTF:MTTR의 비율은 각각 774:248, 114:38로 유사하다. 그 수치에서 차이가 날 뿐이다. Hare X19는 비교적 고장이 잘 나지 않지만, 수리에는 더 오랜 시간이 걸린다.  실험 결과, Hare X19의 Variability가 더 크다. 즉, “long but infrequent failure”한 상황의 Variability가 더 크다.  추가로, 를 계산할 때, Hare X19와 Tortoise 2000은 값만 차이가 난다. 역시 Hare X19가 더 크므로 도 Hare X19가 더 크다. 실제로, 아래를 참고하면 Hare X19의 은 3.0388로 High Variability에 속하고, Tortoise 2000의 은 0.475로 Low Variability에 속한다.    따라서 실험 결과와 자료를 통해 보았을 때, Hare X19보다 Variability가 낮은 Tortoise 2000이 더 effective할 것이다. 실험 결과에서 Hare X19와 Tortoise 2000의 Number out을 비교하여 보았을 때에도, Tortoise 2000의 것이 더 크다. 따라서 Tortoise 2000이 더 effective하다.  추가적으로, 문제에서 process time이 Constant한 경우와 Uniform한 경우를 비교했는데, Constant의 Variability가 Uniform의 Variability보다 항상 근소하게 작았다. 이로부터 Processing time의 Variability의 증가가 전체 Variability 증가에 영향을 미쳤다고 할 수 있다.   1. Report on the results from the experiment 2 and decide which machine is better.   - Results from calculation   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **구 분** | ***te*** |  |  | ***re*** | **A** | | **No setup M/C(M/C1)** | 1.2 | 0.434 | 0.0625 | 0.8333 | 1 | | **Setup M/C(M/C2)** | 1.2 | 0.2619 | 0.3772 | 0.8333 | 0.8333 |   Theoretical Background를 적어보면 아래와 같다.  *,*  ,  *, ,*  **i) No setup M/C**  문제에 따라, 이다.  , , , ,  **ii) Setup M/C**  문제에 따라, 이다.  , , ,  ,  - Results from simulation (Time interval change)   |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | **Time Interval (1.2 hr)** | | **Time Interval (1.5 hr)** | | **Time Interval (2 hr)** | | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | | **Process time** | **Constant** | **Norm** | **Constant** | **Norm** | **Constant** | **Norm** | | **No setup M/C** | 0 | 0.0152 | 0 | 0.004 | 0 | 0.0001 | | **Setup M/C** | 0.1691 | 0.2356 | 0.1244 | 0.1287 | 0.083 | 0.0881 |   **i) Time Interval (1.2 hr)**  **a) Constant**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0,  **- setup M/C:** Waiting time = 1.01,  ,      **b) Norm**  **- No setup M/C:** Waiting time = 1.4643,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 1.3688,        **ii) Time Interval (1.5 hr)**  **a) Constant**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0,  **- setup M/C:** Waiting time = 0.2946,  ,      **b) Norm**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0.019,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 0.3001,  ,      **iii) Time Interval (2 hr)**  **a) Constant**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 0.1008,  ,      **b) Norm**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0.0001,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 0.1069,  ,      No setup M/C는 모든 Time interval에 걸쳐 Setup M/C에 비해 Variability가 낮다. 이는 setup을수행하지 않으면 변동성이 증가하는 데 영향을 미친다는 것을 나타낸다.  Time interval이 1.2에서 2로 늘어남에 따라 작업 수는 141개에서 85개로 감소했다. 이러한 작업 수 감소는 utilization와 대기 waiting time로 이어졌다. 결과적으로 Time interval이 1.2에서 2로 증가함에 따라 Variability도 감소했다.  Constant의 Variability은 Normal보다 지속적으로 작았다. 이는 Processing time의 Variability 증가가 전체 Variability에 영향을 미쳤음을 시사한다.  - Results from simulation (Setup change, Variability observation, Time interval = 1.2 hr)   |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | |  | **(*Ns*: 10, *ts* : 2 hr)** | | **(*Ns*: 5, *ts* : 1 hr)** | | **(*Ns*: 20, *ts*: 4 hr)** | | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | **Waiting time/U×t** | | | **Process time** | **Constant** | **Norm** | **Constant** | **Norm** | **Constant** | **Norm** | | **No setup M/C** | 0 | 0.0152 | 0 | 0.0188 | 0 | 0.0153 | | **Setup M/C** | 0.1691 | 0.2356 | 0.1176 | 0.186 | 0.2864 | 0.3462 |   **i) *Ns*: 10, *ts* : 2 hr**  전과 동일하다.  **ii) *Ns*: 5, *ts* : 1 hr**  **a) Constant**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 0.6936,  ,      **b) Norm**  **- No setup M/C:** Waiting time = 1.5225,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 1.0846,  ,      **iii) *Ns*: 20, *ts*: 4 hr**  **a) Constant**  **- No setup M/C:** Waiting time = 0,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 1.7141,  ,      **b) Norm**  **- No setup M/C:** Waiting time = 1.5037,  ,  **- setup M/C:** Waiting time = 2.0254,  ,      실험 결과에 따르면, Processing time이 Constant인 경우의 Variability가 Processing time이 Normal 분포를 따를 때보다 Variability보다 항상 작다. 이는 이전에 얻은 시사점과 통한다. 즉, 이는 Processing time의 Variability 증가가 전체 Variability에 영향을 미쳤음을 시사한다.    Setup의 *Ns*와 *ts* 를 변경했을 때, No setup M/C에서는 Variability가 거의 변하지 않는 반면 Setup M/C에서는 변화를 관찰할 수 있었다. 공식과 문제에서 주어진 값으로부터 을 비교해보면 아래와 같다.  *Ns*:10, *ts* : 2 - 0.3772 / *Ns*:5, *ts* : 1- 0.1788 / *Ns*:20, *ts*:4 - 0.7764  결과에 따르면, 모든 값은 모두 1.2에 매우 가깝기 때문에 일정하다고 가정할 수 있다. 그렇다면 의 값은 에 의해 결정된다. 주어진 데이터를 살펴본 결과, *Ns*:5, *ts* :1일 때 Variability가 가장 작았으며, *Ns*:10, *ts* : 2, *Ns*:20, *ts*:4 순으로 Variability의 값이 크게 증가했다. 다시 말해, *Ns*와 *ts*의 비율이 동일하더라도 짧고 빈번한 setup 시간을 갖는 경우 Variability가 감소하는 것으로 나타났다. |

**<Discussion & conclusion>**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| (1) Discuss the effects of variability on the production system.  Variability가 증가하게 되면, 우선 (Waiting time)가 증가한다. 이기 때문이다. 나아가, Total Cycle time은 Processing time과 Waiting time의 합이므로 Waiting time의 증가는 전체 Cycle time의 증가로 이어지며, 고객들의 Service level이 낮아지게 된다. Cycle time의 증가는 WIP의 증가로도 이어지는데, 이는 곧 Inventory Cost의 증가로 이어지기도 한다.  위의 실험 결과를 다시 살펴보아도, Ns,와 ts가 달라지더라도 Setup M/C에서 Processing time constant인 경우보다 Norm분포를 따를 때 모두 Variability가 증가하고, Waiting Time과 WIP 역시 모두 증가함을 확인할 수 있다.  (2) Consider the reason of using CV value instead of variance when measuring variability.  (Variance)는 “absolute” variability를 측정하기 위한 값이다. 그러나 이는 Scale-Free 하지 않기 때문에 변동성을 측정하는데 적합하지 않다. 평균이 다를 때 분산의 값이 같아도 분산의 영향의 크기를 알 수 없으므로, 분산을 평균으로 나누는 scaling이 필요하다. 따라서 표준편차를 평균으로 나눈 척도인 CV(Coefficient of variation)를 변동성의 척도로 사용하는 것이다.    위 표와 같이, CV값에 따라 변동성을 low, moderate, high 세 범주로 나누어 분류할 수 있다.  (3) Discuss why maximum utilization is not always the best.  언뜻 생각해보면 utilization을 가능한 높게 할수록 좋아 보일 수 있으나, Utilization Law에 의하면 utilization을 1에 가깝게 증가시키면 평균 WIP과 cycle time이 highly nonlinear fashion하게 증가한다. 즉, Utilization을 1로 maximize하게 되면, 아래의 그림과 같이 Average Cycle Time이 급격하게 증가한다.    실습에서 계속해서 다룬 공식을 살펴보면 u가 1에 가까워지면 Waiting time이 증가한다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.  따라서 maximum utilization이 항상 best이지 않다.   |  |  | | --- | --- | |  |  |   위 예시에서 살펴보아도 full capacity를 사용하지 않을 때 보다 WIP이 안정적임을 확인할 수 있다.  (4) Can you say ‘variability is always evil’?  “variability is always evil”이라고 말할 수 없다.  Variability는 생산 공정 측면에서는 이를 줄이는 것이 product defects을 줄이고, product quality를 높이는 전략이다. 그러나 공정에는 악영향을 주더라도, 비즈니스 측면에서 전체 수익이 증가하여 악영향을 상쇄한다면, 이는 기업의 성장에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다.  예시로, Product Variety의 증가를 비즈니스 전략으로 삼아 보다 높은 variability를 가지게 되었음에도 큰 수익을 낼 수 있다. 또한, 변동성은 급변하는 기술 속에서 Technological change로 이어질 수 있다.  따라서 variability는 공정의 효율성 면에서는 악영향을 미칠 수 있지만, 전체 비즈니스의 성장을 이끌 수 있기 때문에 ‘variability is always evil’이라고 말할 수는 없다.  (5) Discuss the possible variability inside and outside of the production system.  i) Production System 내부의 변동성은 설비와 관련된 요인과 인적 요인에 의해 발생한다. 설비 요인으로는 기계 고장, setup, 작업 공간 변동, 수율 손실, 재작업 등이 포함되며, 인적 요인으로는 다양한 작업 능력, 작업자의 업무 제한 등이 있다.  ii) Production System 외부의 변동성은 고객 주문의 변동(주문 변경, 중도 취소 등), 기술 변동(기술 변경), 정책 변경 등에 의해 발생한다. 천재지변으로 인한 원자재 수급 문제 등 역시 이에 해당한다.  위의 문제들은 모두 대응 가능한 상황이며, 주기적인 설비 및 인적 자원 점검, 운영 관리 방법 변경을 통해 변동성의 영향을 줄이거나 없앨 수 있다. 또한, Variability를 줄이기 위해 Buffer를 활용하는 방법도 있다. Inventory / capacity / time buffer를 적절히 활용하여 변동성으로 인한 부정적인 영향을 최소화할 수 있다. 예를 들어, 판매점에서는 재고 buffer를 사용하고, 응급 상황의 앰뷸런스는 capacity buffer를 활용하며, 장기 이식을 위한 상황에서는 time buffer를 설정하여 변동에 대비할 수 있다. |