

쌍 챔버 기반 장비의 로드락 구성에 따른 생산성 분석

홍주표* · 이기석†

*한국기술교육대학교 디자인공학과, †공주대학교 기계자동차공학부

Throughput Analysis of the Twin Chamber Platform Equipment according to the Load-lock Configuration

Joo-Pyo Hong* and Ki Seok Lee†

*Department of Industrial Design Engineering, Korea University of Technology and Education,

†Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

ABSTRACT

Productivity is one of the performance indices of the semiconductor equipment in manufacturing viewpoint. Among many ways tried and adopted for improvement of the productivity of the FAB equipment, variation of equipment configuration was considered and its effect on the throughput was analyzed. Parallel machine cycle charts that were generated based on the equipment log were used in the analysis. Efficiency of the equipment due to change of the structure and the probability of the usage in the manufacturing process were examined. The results showed that the modification of the control algorithm in the equipment and the redistribution of the process time for each process and transfer module along to the change in the structure enhance the throughput of the equipment.

Key Words : throughput analysis, equipment configuration, machine cycle chart (MCC), cycle time (CT)

1. 서 론

생산성 확보를 위한 반도체 제조 공정 기술은 웨이퍼의 크기에 따라 1990년대 200 mm 및 2000년대 300 mm 를 거쳐 2012년 이후 450 mm 시대를 예고하고 있다. 반도체 제조 장비 기술은 장비 내 웨이퍼 이송의 자동화 및 공장 자동화와 맞물려 매엽식(single wafer) 클러스터(cluster) 장비 및 트랙(track) 장비가 가장 많이 사용되고 있는 공정 장비가 되었으며, 계속 축소되는 반도체 소자의 CD(Critical Dimension)에 대응하기 위한 공정 및 장비의 지속적인 해석과 개발이 필수적인 요소가 되었다.

Wood 등[1,2]은 200 mm 장비에 유용하게 사용되었던 웨이퍼 카세트의 로드락(load-lock) 내장형 매엽식 클러스터 장비의 생산성 분석을 실시하였다. 공정과 이송에 따라 병목 구분을 하였으며, 공정 챔버간 순차

혹은 병렬 공정에 따른 생산성 분석을 하였다. Perkinson 등[3,4]은 한팔 이송 로봇의 고정된 이송 시간을 참조하여 챔버 개수에 따라 발생하는 시간 변동을 고려하였으며, 생산성 향상을 위한 방안으로 예지 알고리즘, 다단 속도 이송, 이중 로드락 등을 제시하였다. Venkatesh 등[5]은 양팔 이송 로봇의 생산성 분석을 시행하였다.

Srinivasan[6]은 웨이퍼의 챔버간 이송 흐름을 파악하는데 페트리 넷(Petri net)을 사용하였으며, Zuberek[7] 또한 페트리 넷을 이용하여 챔버 재방문의 경우에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서는 이태억 등[8,9] 이 장비 내 웨이퍼 이송 관련 페트리 넷을 이용한 연구를 실시하였다.

Lopez와 Wood[10]는 클러스터 장비에서 같은 공정을 수행하는 공정 챔버가 병렬(parallel)로 구성되어 있는 경우와 서로 다른 공정을 수행하며 순차 이송하는 연속(serial) 구성의 경우에 대해 생산 성능의 신뢰성 측면에서 연구하였다.

†E-mail : ks.lee@kongju.ac.kr

조정현 등[11]과 홍주표 등[12,13]은 장비 이력로그로부터 작성한 장비순환도(machine cycle chart, MCC)를 바탕으로 실적에 근거한 장비 생산성 분석을 수행하였으며, 병목 지점을 찾아 장비 생산성 향상 활동을 수행하였다.

Chien 등[14]은 경제적 분석을 통해 2012년 이후 450 mm 웨이퍼 시대를 예고하였다. 한편, 국내 장비업계에서 서태욱과 이기훈[15], 이동덕[16]은 웨이퍼 대형화 지원을 위한 300 mm 프라임(prime) 구축을 위해 고성능 로봇과 백본(back-bone) 기술의 필요성을 언급하였다.

본 연구에서는 쌍 체임버 기반 장비 내에서의 웨이퍼 이송에 있어 대기압 로봇과 이송 모듈 내의 진공 로봇을 연계시켜주는 로드락의 구성에 따라 장비 생산성을 분석하고자 하였다.

2. 쌍 체임버 기반 장비의 생산성 분석

2.1. 생산성 분석 개요

쌍 체임버 기반 장비는 하나의 공정 모듈(process module)에서 펌프 등 일부 부품을 공유하며, 같은 시간 안에 하나의 공정 모듈에서 동시에 두 매의 웨이퍼를 처리하는 구조이고, 이러한 공정모듈이 장비에 2개 혹은 3개가 붙어 구성되어 있다. 로드락은 생산성 향상을 위해, 반복되는 펌핑(pumping) 및 벤팅(venting) 회수를 줄이기 위해 한 번에 많은 웨이퍼를 수납하는 형태와 공정모듈의 공정 시간 일부를 병렬로 진행하는 형태의 두 가지가 제안되었고, 두 가지 형태의 장비 상세 사항은 Table 1과 같다.

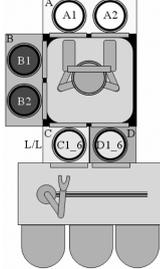
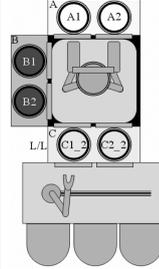
본 논문에서는 이 두 가지 형태의 로드락 구조에 따라 장비순환도 기반 생산성 분석을 실시하여 생산성 향상의 조건을 해석하였다.

일괄(batch) 적재 방식 로드락은 여러 장에 대해 일괄로 압력 조절 절차 수행하여 압력 조절 절차에 걸리는 시간을 줄이기 위하여 사용된다. 매엽(single wafer) 적재 방식 로드락은 장비의 공정 주기에 맞추어 로드락의 압력 조절 절차로 인한 간섭을 없애고, 공정 모듈에서의 사전가열(preheat) 같은 일부 공정을 분리하여 로드락에서 진행하기 위해 사용된다.

본 논문에서의 해석 조건은 각 공정 모듈에서 동일한 공정을 진행하고, 매 공정 후 동일한 체임버 세정 공정을 진행하는 것으로 하였다. 공정 장비로 진행한 웨이퍼 이력 로그로부터 장비순환도를 생성하였으며, 이를 바탕으로 장비 생산성을 분석하였다.

쌍 체임버 기반 장비도 다른 300 mm 공정 장비와 같

Table 1. Specifications of load-lock configuration

	(a) batch loading type load-lock	(b) single wafer loading type load-lock
synchronization of loadlock module's cycle	asynchronous condition	synchronous condition
wafer slots in load-lock	6 slots × 2 site	2 slots × 2 site
# of wafers to process / load-lock module cycle	8 wafers	2 wafers
preheat function	n/a	available
configuration		

이 공정 모듈(process module, PM), 이송 모듈(transfer module, TM), 로드락(load-lock), EFEM(equipment front end module)의 4가지 구조적 모듈로 구성되어 있다. 각각의 모듈은 기본적으로 독립적인 공정 주기(cycle)를 가지고 진행되나, 모듈 간 연관된 동기점(synchronized point)이나 트리거 이벤트(trigger event)에 의해 서로 간섭을 받게 된다. 장비의 생산성 및 장비 효율 향상을 위해서는 공정 모듈의 공정 주기가 다른 모듈의 공정 주기에 의한 간섭 지연이 발생해 주지 않도록 스케줄링(scheduling)을 할 필요가 있다. 대기압 상태의 EFEM과 진공 상태의 이송 모듈을 연결해주는 로드락 모듈은 다음과 같은 공정 주기를 갖는다.

Process cycle of loadlock: [pumping → slit valve open → wafer move by vacuum robot in the TM → slit valve close → venting → door open → wafer move by atmospheric robot in the EFEM → door close → pumping] (1)

2.2. 일괄 적재 방식 로드락

쌍 체임버 모듈 2개로 구성된 장비의 경우, 일괄 적재 방식은 초기에 웨이퍼 12매(6 slots × 2 site)를 로드락에 적재한 후 공정을 진행하게 된다. 공정 모듈의 유

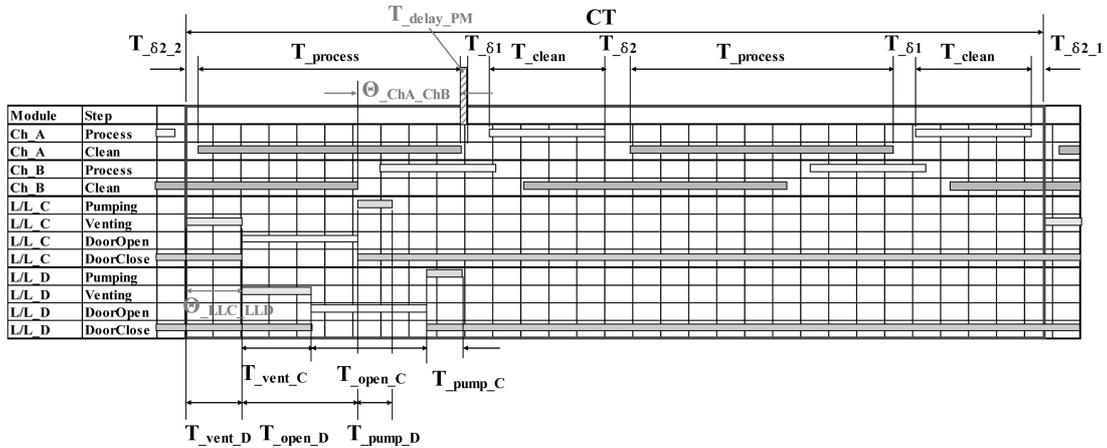


Fig. 1. MCC analysis for twin chamber platform equipment with batch loading type loadlock.

휴 시간(idle time) 발생을 피하기 위해, 12매 중 마지막 웨이퍼 4매(2 wafers at chamber A + 2wafers at chamber B)의 공정이 진행되고 있을 때 로드락에 있는 8매의 웨이퍼를 교체한다.

Fig. 1의 장비순환도 분석을 통해 나타난 주기시간(cycle time, CT)은 다음 식과 같다.

$$\text{Wafers per cycle: } 8(\text{wafers}/\text{CT}_{\text{PM}}) = 4(\text{sets}/\text{CT}_{\text{PM}}) \quad (2)$$

$$\text{CT}_{\text{PM}} = (\text{T}_{\text{process}} + \text{T}_{\text{clean}} + \text{T}_{\delta 1} + \text{T}_{\delta 2}) \times 2 + \text{T}_{\text{delay_PM}} \quad (3)$$

$T_{\delta 1}$, $T_{\delta 2}$ 은 로그 상에서는 확인할 수 없는 구간으로, 슬릿 밸브 개폐, 웨이퍼 이송 등의 필수동작을 포함하고, $T_{\text{delay_PM}}$ 은 모듈 간의 간섭에 의한 지연시간(delay time)으로 이루어진다. 로드락과 공정 모듈 간의 웨이퍼 이송에 대한 간섭에 따른 지연시간 $T_{\text{delay_PM}}$ 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{T}_{\text{delay_PM}} = \max\{(\Theta_{\text{LLC_LLD}} + \text{T}_{\text{vent_C}} + \text{T}_{\text{open_C}} + \text{T}_{\text{pump_C}}) - (\text{T}_{\delta 2,2} + \text{T}_{\text{process}}), 0\} \quad (4)$$

여기서, $\Theta_{\text{LLC_LLD}}$ 는 로드락 C의 주기와 로드락 D의 주기 간의 위상차이다.

일괄 적재 방식 장비의 최대 생산성은 $T_{\text{delay_PM}}=0$ 인 조건에서 나타나며, 공정 표준시간(standard time, ST) 및 시간당 생산성(unit produced per hour, UPH)은 다음과 같다.

$$\text{CT}_{\text{PM}} = (\text{T}_{\text{process}} + \text{T}_{\text{clean}} + \text{T}_{\delta 1} + \text{T}_{\delta 2}) \times 2 \quad (5)$$

$$\text{ST} = \text{CT}_{\text{PM}} / 8 \text{ wafers} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{UPH} &= 3600(\text{sec})/\text{ST} = 28800/\text{CT}_{\text{PM}} \\ &= 14400/(\text{T}_{\text{process}} + \text{T}_{\text{clean}} + \text{T}_{\delta 1} + \text{T}_{\delta 2}) \quad (7) \end{aligned}$$

2.3. 매엽 적재 방식 로드락

매엽 적재 방식 로드락은 일괄 적재 방식과는 달리 공정 모듈의 공정 주기와 로드락의 공정 주기가 맞물려 진행되기 때문에 펌핑과 벤팅 동작을 유발시키는 트리거 이벤트가 일괄 적재 방식에 비해 많이 발생하고, 그 이벤트의 발생 시기에 따라 Fig. 2와 같이 장비 순환도에 변화가 발생한다.

공정 모듈의 유휴 시간은 로드락이 진공 상태로 전환과 진공 로봇의 웨이퍼 이송 시점에 의해 발생한다. 따라서, 매엽 적재 방식 장비의 최대 생산성을 확보하기 위해서는 공정 모듈의 공정 주기와 로드락의 공정 주기 간의 조정을 통해 공정 모듈의 유휴 시간을 제거하여야 한다.

공정 모듈에서의 공정 종료 후 공정 모듈 슬릿 오픈(wafer out from PM) 이벤트(;)와 세정 마침의 오프셋 시점(wafer in to PM) 이벤트(∩)가 로드락의 펌핑 시작 트리거 이벤트로 동작한다. 복수의 공정 모듈에서 발생하는 트리거 이벤트의 발생 시점과 식 (1)의 로드락의 단위 진행순서와의 간섭 관계에 따라 펌핑 시작 트리거 이벤트의 처리를 판단한다. 공정 모듈에서의 펌핑 시작 트리거 이벤트가 로드락의 벤팅과 도어 오픈 구간(a)에서 발생하면 펌핑 시작 트리거 이벤트는 대기 상태가 되어 로드락의 필요시간이 소요된 후 펌핑이 진행되고, 펌핑 시작 트리거 이벤트가 로드락 슬릿 오픈 구간(b)과 로드락의 펌핑구간(c)에서 발생하면 펌핑 시작 트리거 이벤트는 무시되어 펌핑 이후의 웨이퍼 이송을 순서에 맞추어 진행한다.

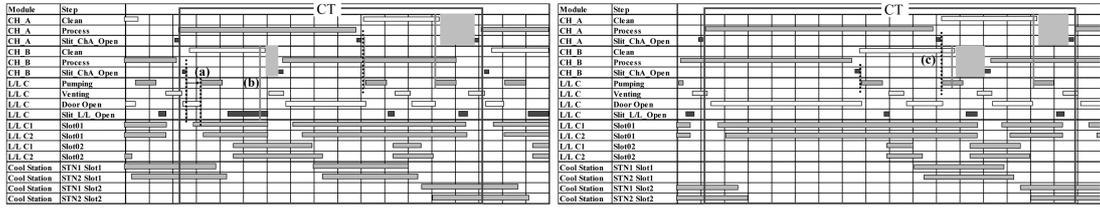


Fig. 2. MCC for twin chamber platform equipment with single wafer loading type loadlock.

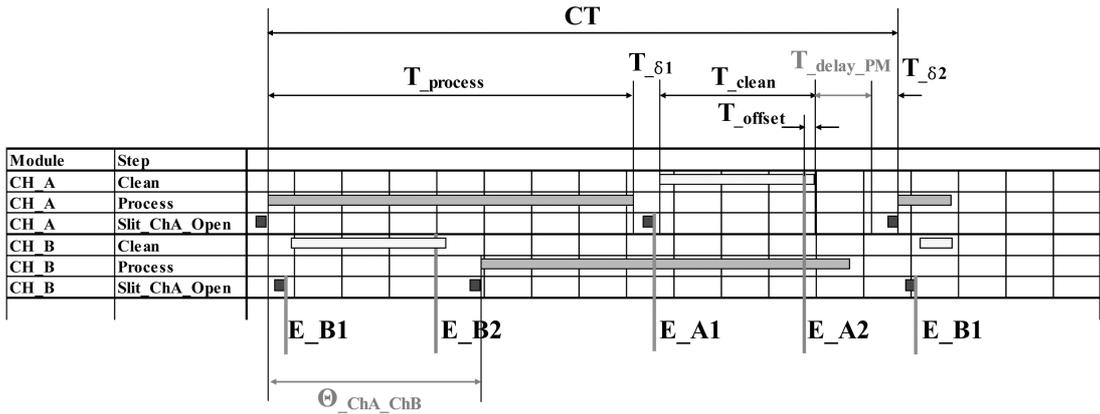


Fig. 3. MCC analysis for twin chamber platform equipment with single wafer loading type loadlock.

매엽 적재 방식 로드락 설비의 장비순화도 분석은 Fig. 3과 같다. 펌핑 시작 트리거 이벤트가 무시 상태가 될 때 한 번의 로드락 슬릿 오픈 구간 동안 공정 모듈에서 로드락으로의 웨이퍼 이동과 로드락에서 공정 모듈로의 웨이퍼 이동이 이루어지고, 한 번의 로드락 도어 오픈 구간 동안 EFEM에서 로드락으로의 웨이퍼 이동과 로드락에서 EFEM으로의 웨이퍼 이동이 이루어진다. 공정 모듈의 주기시간 동안 공정 모듈에서 펌핑 시작 트리거 이벤트가 총 4회 발생하므로, 생산성 향상을 위해서는 2회의 무시 조건을 발생시켜 로드락의 펌핑 및 벤팅 주기를 공정 모듈의 주기시간 당 2회로 제어하여야 한다.

로드락 단위 공정 주기는 웨이퍼의 출입과 연관된 이송 모듈의 진공로봇과 EFEM의 대기압 로봇의 움직임에 의해 모듈 간의 동기점을 갖는다. 따라서, 2개의 공정모듈에서 발생하는 펌핑 시작 트리거 이벤트가 웨이퍼 입력 이벤트와 출력 이벤트가 교차적으로 발생하는 다음 조건에서 로드락의 펌핑 및 벤팅 주기가 공정 모듈 주기시간 당 2회로 제어된다.

$$\begin{aligned} & \max\{(T_{process} + T_{\delta 1}), (T_{clean} + T_{delay_PM} + T_{\delta 2})\} \\ & \geq \Theta_{ChA_ChB} \text{ 분리} \geq \min\{(T_{process} + T_{\delta 1}), \\ & (T_{clean} + T_{delay_PM} + T_{\delta 2})\} \end{aligned} \quad (8)$$

그리고, 식 (8)의 조건에서 $T_{delay_PM} = 0$ 이 되는 조건은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \Theta_{ChA_ChB} > (T_{vent} + 2 T_{EFEMLL} + 2 T_{LLEFEM} + T_{pump} \\ + T_{PMLL} + T_{LL \rightarrow PM} + T_{\alpha}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $T_{EFEM \rightarrow LL}$ 는 EFEM의 대기압 로봇이 웨이퍼를 FOUP(front opening unified pod)에서 로드락으로 옮기는 시간, $T_{LL \rightarrow EFEM}$ 는 대기압 로봇이 웨이퍼를 로드락에서 냉각위치로 옮기는 시간, $T_{PM \rightarrow LL}$ 는 이송모듈의 진공 로봇이 웨이퍼를 공정 모듈에서 로드락으로 옮기는 시간, $T_{LL \rightarrow PM}$ 는 진공로봇이 웨이퍼를 로드락에서 공정 모듈로 옮기는 시간, 그리고 T_{α} 는 모듈 간 병렬로 진행되지 않는 필수적인 시간들이다.

식 (8,9)가 만족할 때, 매엽 적재 방식 로드락 장비의 최대 생산성은 다음과 같다.

$$\text{Wafers per cycle: } 4(\text{wafers}/CT_{PM}) = 2(\text{sets}/CT_{PM}) \quad (10)$$

$$CT_{PM} = T_{process} + T_{clean} + T_{\delta 1} + T_{\delta 2} \quad (11)$$

$$ST = CT_{PM} / 4 \text{ wafers} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{UPH} = 3600(\text{sec})/ST = 14400/CT_{PM} \\ = 14400/(T_{process} + T_{clean} + T_{\delta 1} + T_{\delta 2}) \end{aligned} \quad (13)$$

3. 결 과

식 (7)과 식 (13)에서 일괄 적재 방식과 매엽 적재 방식이 지연 시간이 없을 경우, 동일한 생산성을 갖는 것을 알 수 있다. 지연 시간을 최소화하기 위한 조건은 두 가지 로드락 구조에서 서로 다르다. 일괄 적재 방식은 로드락 모듈 간의 위상차(Θ_{LLC_LLD})를 최소화 하여야 하고, 매엽 적재 방식의 경우는 공정 모듈 간 위상차(Θ_{ChA_ChB})를 공정에 따라 조정하여야 한다.

매엽 적재 방식의 경우 로드락의 구조 개선을 실시하여 공정 모듈에서 진행되는 공정 단계 중 일부인 사전 가열 단계를 분리하여 로드락에서 진행할 수 있다. 이 경우 식 (13)의 $T_{process^*}$ 는 기존 공정 시간 $T_{process}$ 보다 작은 값을 갖게 되므로 생산성이 증가하게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

웨이퍼 크기가 증가함에 따라 반도체 공정 설비들의 생산성 향상은 공정시간 단축뿐 아니라 설비 자체의 생산성 향상에 많은 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 공정 장비의 웨이퍼 이력 로그에 기반한 병렬장비순환도(parallel machine cycle chart)를 구성하고, 이를 통해 쌍 챔버 구조의 공정설비의 공정 주기를 분석하여 장비생산성 향상에 필요한 조건들을 구하였다. 또한, 설비 생산성 향상을 위해서는 설비 제어 알고리즘에서 공정 모듈 간의 공정 주기의 시간 차이를 제어해야 함을 보였다.

참고문헌

1. Wood, S. C., Tripathi, S., and Moghadam, F., "A Generic Model for Cluster Tool Throughput Time and Capacity," IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 194-199, 1994.
2. Wood, S. C., "Simple Performance Models for Integrated Processing Tools," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 9, No. 3, pp. 320-328, 1996.
3. Perkinson, T. L., McLarty, P. K., Gyurcsik, R. S., and Calvin III, R. K., "Single-Wafer Cluster Performance: An Analysis of Throughput," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 7, No. 3, pp. 369-373, 1994.
4. Perkinson, T. L., Gyurcsik, R. S., and McLarty, P. K., "Single-Wafer Cluster Tool Performance: An Analysis of the Effects of Redundant Chambers and Revisitation Sequence on Throughput," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 9, No. 3, pp. 384-400, 1996.
5. Venkatesh, S., Davenport, R., Foxhoven, P., and Nulman, J., "A Steady-State Throughput Analysis of Cluster Tools: Dual-Blade Versus Single-Blade Robots," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 10, No. 4, pp. 418-424, 1997.
6. Srinivasan, R. S., "Modeling and Performance Analysis of Cluster Tools Using Petri Nets," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 11, No. 3, pp. 394-403, 1998.
7. Zuberek, W., "Cluster Tools with Chamber Revisiting-Modeling and Analysis using Timed Petri Nets," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 17, No. 3, pp. 333-344, 2004.
8. Kim, J.-H., Lee T.-E., Lee, H.-Y., and Park, D.-B., "Scheduling Analysis of Time-Constrained Dual-Armed Cluster Tools," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 13, No. 3, pp. 521-534, 2003.
9. Lee, H.-Y. and Lee, T.-E., "Scheduling Single-Armed Cluster Tools with Reentrant Wafer Flows," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 19, No.2, pp. 226-240, 2006.
10. Lopez, M. J. and Wood, S. C., "Systems of Multiple Cluster Tools: Configuration, Reliability, and Performance," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Vol. 16, No. 2, pp. 170-178, 2003.
11. Cho, J. H., Ryu, S. J., and Chae, S.-K., "Throughput Analysis for Cluster Tool under Transfer Bound Condition and Its Application to Dry Etch Equipment," 12th IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pp. 289-292, 2003.
12. Hong, J.-P., Kim, J.-K., Han, J.-H., and Chae, S.-K., "Throughput Analysis and Productivity Enhancement for CVD Equipment," 15th IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 48-51, 2004.
13. 홍주표, "반도체 제조 공정 박막 증착 기술 연구," 한국기술교육대학교 논문집, 제14권, 제1호, pp. 250-261, 2007.
14. Chien, C.-F., Wang, J. K., Chang, T.-C., and Wu, W.-C., "Economic Analysis of 450mm Wafer Migration," 16th International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pp. 283-286, 2007.
15. 서태욱, 이기훈, "차세대 CVD Metal 공정 개발 현황," 반도체및디스플레이장비학회 제1차 산학기술협의회, 2008.
16. 이동덕, "PECVD World Market Share Number One 장비 개발," 반도체및디스플레이장비학회 제1차 산학기술협의회, 2008.

접수일: 2008년 5월 21일, 심사일: 2008년 6월 2일
 게재확정일: 2008년 6월 18일