

시간가동률 척도에 의한 Lean OEE의 연계지표 개발 및 적용

최성운*

*가천대학교 산업공학과

Development and Implementation of Chain Metrics for Obtaining Lean Overall Equipment Effectiveness Using Availability Measures

Sung-Woon Choi*

*Department of Industrial Engineering, Gachon University

Abstract

This paper aims to develop a new chain metrics for obtaining lean Overall Equipment Effectiveness(OEE) and present implementation strategy which considers the properties for Total Productive Maintenance(TPM) to reduce machine losses, Performance Analysis and Control(PAC) to reduce labor losses, Lean Production System(LPS) to reduce floor wastes, and Theory of Constraints(TOC) to minimize the problem of Capacity Constrained Resource(CCR).

The study reviews the related literatures and reformulates the structure of machine losses, labor losses and field wastes. The research also develops the integrated productivity metrics according to time, units, reliability and maintainability.

It is found that the study develops the actual productivity measure in terms of efficiency, effectiveness and standard productivity. In addition to that, it outlines and develops by using the integrated LPS and TPM, lean OEE measures such as Time Based Productivity(TBP), Unit Based Productivity(UBP), and Reliability & Maintainability Based Availability(RMBA).

Implication examples are proposed to make it easier and available for practioners to understand the implementation strategies about TPM OEE, lean OEE and TOC OEE.

Futhermore related to other studies, the research contributes to create a new chain productivity measures to clear the interrelationship concepts of productivity, efficiency and effectiveness. Moreover the paper develops the enhanced OEE measures by integration of TPM, PAC, LPS and TOC with the perspective of schedule, throughput, reliability, maintainability and availability.

Keywords : Lean OEE, TPM, PAC, LPS, TOC, CCR, Losses, Wastes, TBP, UBP, RMBA, Chain Productivity

† 이 논문은 2012년 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 것임(GCU-2012-R007)

† 교신저자: 최성운, 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342

M · P: 011-256-0697, E-mail: swchoi@gachon.ac.kr

2012년 4월 20일 접수; 2012년 6월 4일 수정본 접수; 2012년 6월 4일 게재 확정

1. 서 론

글로벌한 경제환경하에서 기업의 생산성은 국가의 경쟁력을 좌우한다. 생산성(Productivity)은 통상 산출(Output)에 대한 투입(Input)의 비율로, 성과(Performance), 수익성(Profitability), 효율성(Efficiency), 효과성(Effectiveness)과 함께 기업의 경쟁력을 평가하기 위한 지표로 주로 활용된다. 과거 사람의 작업에 수행되었던 전통산업에서는 노동생산성을 중시하였지만 최근 설비가 자동화, 장치화, 고도화되는 첨단산업에서는 설비생산성의 중요성이 증대되고 있다.

설비생산성은 중복소집단의 직제에 따른 업무의 일환으로 전사적으로 수행되는 TPM(Total Productive Maintenance)활동에 의해 수행된다. TPM은 자주보전(Autonomous Maintenance), 계획보전(Planned Maintenance), 초기유동관리(Development Management), 품질보전(Quality Maintenance), 사무간접(Office TPM), 안전환경(Safety, Health & Environment), 교육훈련(Education & Training), 개별개선(Focused Management) 등의 8가지 기능(Eight Pillars)에 의해 설비관련 로스(Losses)를 제거하여 설비종합효과 OEE(Overall Equipment Effectiveness)를 향상한다.

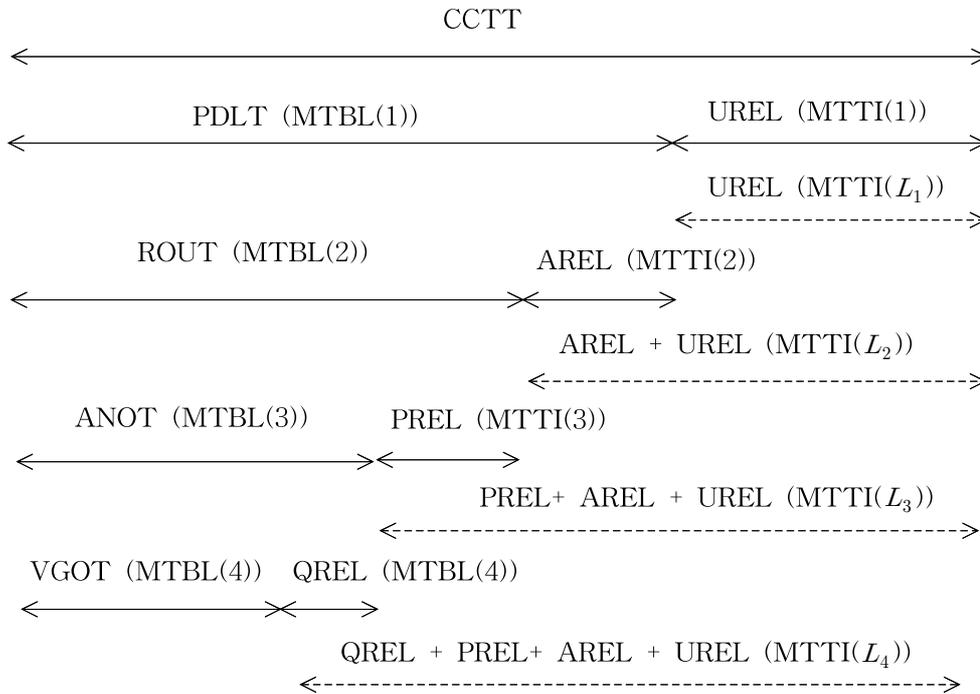
가공조립산업에 대한 TPM에 대한 연구로는 조업로스, 설비로스, 작업로스, 자재로스 등의 16가지 로스를 감축하기 위한 효율화 방안[6-10]이 있다. 그러나 이러한 연구에서는 설비로스를 감축하기 위한 체계적인 OEE와 다르게 작업로스를 단축하기 위한 OLE(Overall Labor Effectiveness)의 시간구성과 로스체계가 단계별 활동에 따라 명확하게 제시되어 있지 않다. 또한 장치산업 10대로스 효율화 방안에 대한 연구[2-3, 14-18]에서는 장치산업의 특성상 정기휴지보전(Planned Shutdown)과 사이클타임의 역수개념인 중량단위의 생산레이트(Rate)를 사용한다는 것 이외에는 가공조립산업 OEE의 시간구성과 로스체계가 차이가 없는 데도 불구하고, OPE(Overall Plant Effectiveness)에 따른 로스체계를 별도로 구분하여 기업실무자가 사용에서 혼란을 겪고 있으나 이를 포괄적인 시간구성과 로스체계로 재구성하는 연구는 거의 이루어지고 있지 않다. 따라서 설비 중심의 가공조립산업과 장치산업의 TPM OEE, 작업 중심의 PAC(Performance Analysis and Control)[13] OLE등의 시간구성별 로스감축활동이 단계별로 공용될 수 있는 포괄적인 로스체계 모형의 개발이 요구된다.

또한 OEE는 조업이용률, 시간가동률, 성능가동률, 양품률의 네가지 성분으로 구성되는 데 조업이용률, 시간가동률은 조업, 가동시간으로, 성능가동률은 설비사이

클타임, 설비속도로, 양품률은 양품갯수 등의 서로 다른 측정단위의 데이터를 사용하여, 기업 실무자 입장에서는 일관성이 있는 TPM 개별지표관리를 수행하기 어려우나 이에 대한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다.

따라서 OEE를 구성하는 네가지 성분에 대해 생산시간기준, 생산수량기준, 신뢰성(작동시간)과 보전성(비작동시간)에 의한 시간가동률[4]에 의한 통일된 생산성지표 개발이 요구된다. 반도체 설비의 사이클타임 단축에 대한 연구[1,11]는 수행되고 있으나 Lean OEE의 적용에 대한 연구는 이루어지고 있지 않으며 제약자원의 문제점을 극복하기 위한 TOC(Theory of Constraints)[5]에서 TPM OEE의 적용방안에 대한 연구가 거의 이루어지고 있지 않다. 그리고 설비로스제거를 위한 TPM과 현장낭비제거를 위한 LPS(Lean Production System)에 대한 통합시스템에 대한 연구[12]가 진행되고 있으나 이 연구는 두 시스템의 개념과 원리에 따른 현장의 일반적인 개선활동이 적용절차를 소개할 뿐 TPM의 로스와 LPS의 낭비를 시간구성과 로스체계로 통합한 Lean OEE 종합생산성지표에 대한 연구는 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구의 목적(Purpose)은 설비로스감소를 위한 TPM, 작업로스감소를 위한 PAC, 현장낭비감소를 위한 LPS, 제약문제를 최소화하는 TOC 등의 특성을 고려한 통합 연계 생산성지표개발과 적용사례의 제시에 있다. 본 연구의 접근방법(Design, Methodology, Approach)은 TPM, PAC, LPS, TOC의 기존연구를 고찰(Review)하여, 설비로스, 작업로스, 현장낭비의 체계를 재구성(Reformulation)하고, 시간베이스, 수량베이스, 작동시간과 비작동시간의 시간가동률베이스로 유형화(Categorization)하여 연계 통합생산성지표를 개발(Development)한다. 본 연구의 결과(Finding)는 첫째로 실제생산성을 효율성, 목표생산성, 효과성에 의한 연계 생산성(Chain Productivity)지표를 개발하고 둘째로 LPS와 TPM 통합시스템의 Lean OEE에 대한 TBP(Time Based Productivity), UBP(Unit Based Productivity), RMBA(Reliability and Maintainability Based Availability)지표를 개발하는 데 있다. 본 연구의 실무적 적용(Practical Implication)을 위해 반도체산업에서 Lean OEE의 적용사례와 흐름동기화 생산을 고려한 TOC OEE의 적용방안을 TPM OEE, Lean OEE의 특징과 함께 제시한다. 본 연구의 차별성(Originality, Value)은 실제생산성, 효율성, 목표생산성, 효과성의 개념 및 관계를 새로운 연계 생산성지표로 제시한 데 있으며, TPM과 LPS가 통합된 Lean OEE에 대해 시간기준, 쓰루풋(Throughput)기준, 시간가동률기준을 기초로 각 기준별 측정단위가 동일한 일관성있는 연계 종합생산성지표를 새롭게 개발한 데 있다.

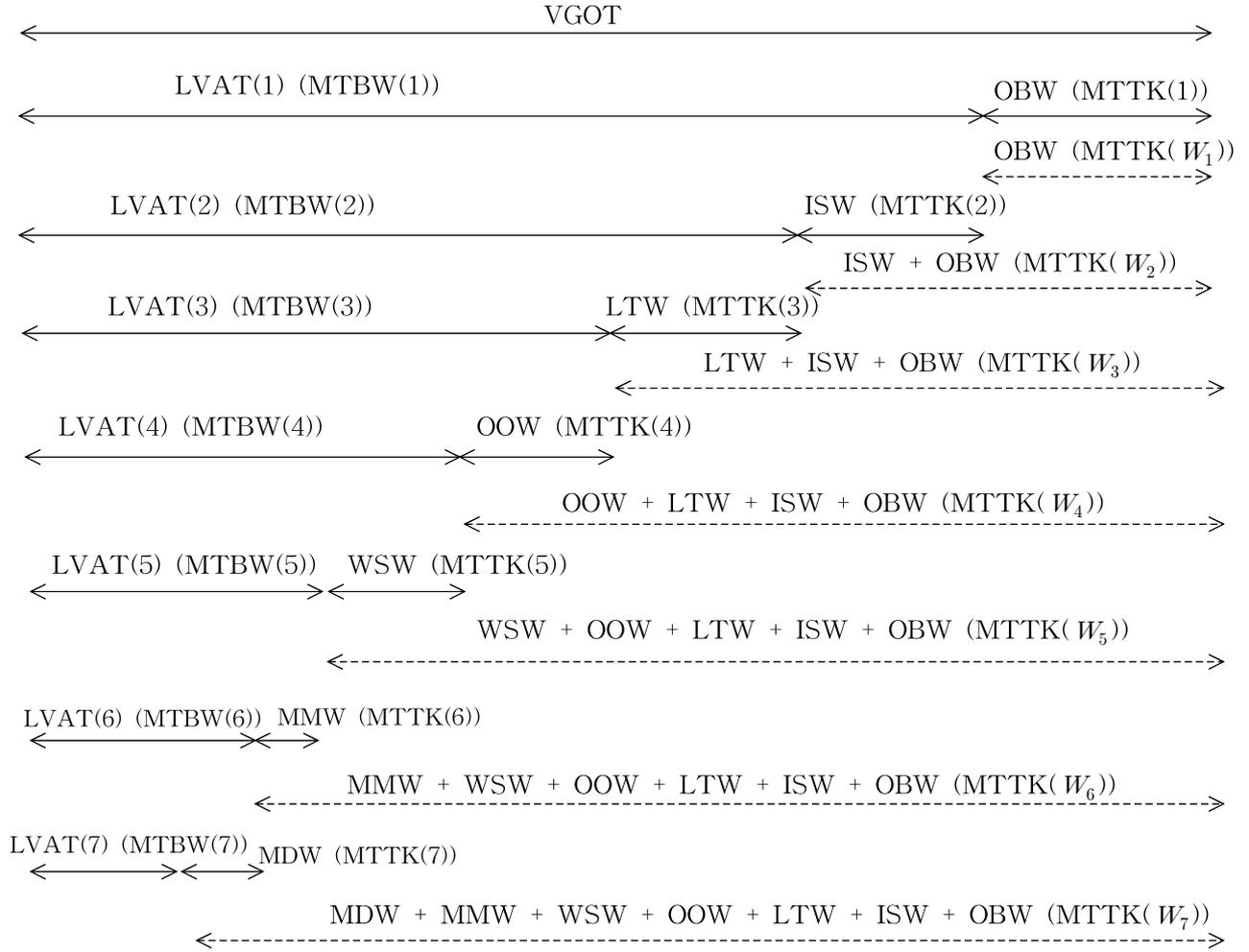


<Figure 3> Structure of TPM PAC OEE Measures

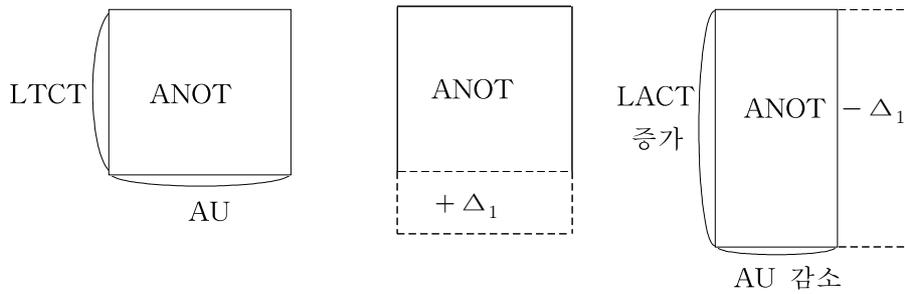
<그림 3>의 CCTT에서 UREL을 제외한 시간은 계획조업부하시간 PLDT(Planned Dudy Loading Time)이고, PLDT에서 AREL을 제외한 시간은 레이트운영가동시간 ROUT(Rated Operating Up Time)이고, ROUT에서 PREL을 제외한 시간을 실제순운영시간 ANOT(Actual Net Operating Time)이며, ANOT에서 QREL을 제외한 시간을 가치운영시간 VGOT(Valued Good Operating Time)이라 한다. OLE(Overall Labor Effectiveness)는 작업로스를 감소하여 노동종합효과를 향상시키는 방법으로 설비시간(Machine-Hour)을 작업시간의 공수(Person-Hour)로 치환할 경우 <그림 3>의 시간구성과 로스체계를 재구성하지 않고 TPM OEE를 그대로 사용할 수 있다. 장치산업의 경우 TPM OPE(Overall Palnt Effectiveness)도 <그림 3>의 TPM OEE에서 UREL 중 정기휴지보전(SD : Shutdown)과 ROUT 중 생산레이트로 나타내는 것을 제외하고는 같은 시간구성 로스체계의 사용이 가능하다. 단, U-Loss, A-Loss, P-Loss, Q-Loss별 세부로스의 내용은 달라지며 TPM OEE의 경우 U-Loss의 종류에는 계획 SD와 생산관리로스 PSDPCL(Planned Shutdown and Production Control Loss)이 있고, A-Loss의 종류에는 고장정지로스 FBL(Failure Breakdown Loss), 준비교체조정로스 SCAL(Setup, Changeover and Adjustment Loss), 치공구절삭로스 CJBCBL(Consumable Jig Breakage and Cutting Blade Loss)이 있으며, P-Loss

의 종류에는 일시정지로스 MSIJL(Minor Stoppage, Idling and Jam-up Loss), 속도성능저하로스 RSL(Reduced Speed Loss), 에너지로스 EL(Energy Loss)이 있고, Q-Loss의 종류에는 초기공정제품 수율로스 SURYL(Set-up and Reduced Yield Loss), 결점 불량 재가공로스 DRL(Defect and Rework Loss)이 있다. PAC OLE의 경우 A-Loss의 경우 유실제외로스 EXL(Excluded Loss)이 있고, A-Loss의 종류는 관리로스 ML(Management Loss), 동작로스 OMRL(Operating Motion-Related Loss)이 있으며, P-Loss의 종류는 편성로스 LOL(Line Organization Loss), 자동화변환로스 ADLL(Automatic Distribution and Logistics Loss)가 있고, Q-Loss의 경우 측정로스 MAL(Measurement and Adjustment Loss)가 있다.

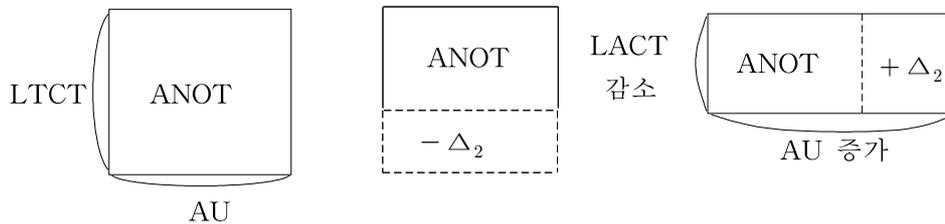
<그림 2>에서 Lean OEE의 현장낭비 TW는 <그림 4>와 같이 과잉생산과 공정(작업)대기 낭비 OBW(Overproduction and Blocking Waste), 재고스톡 낭비 ISW(Inventory and Stock Waste), 과도한 공정분할과 과잉분업에 의한 운반낭비 CTW(Conveyance Transporting Waste), 과잉가공낭비 OOW (Overprocessing and Overmachining Waste), 부품대기낭비 WSW(Waiting and Starving Waste), 일(Work)하지 않고 움직이는 (Move) 동작낭비 MMW(Motion Moving Waste), 불량을 만드는 낭비 MDW(Making Defective Waste)등으로 구성된다.



<Figure 4> Structure of Lean OEE Measures



<Figure 5.1> LACT > LTCT



<Figure 5.2> LACT < LTCT

<Figure 5> Difference Between NOR and NSR in PRE Measures

3.2 Lean OEE의 TBP 연계지표의 개발

<그림 2>, <그림 3>, <그림 4>에서 CCTT, PDLT, ROUT, ANOT, VGOT, LVAT의 시간기준에 의한 생산성(TBP : Time Based Productivity)지표는 식 (2)와 같으며 설비로스제거를 통한 4가지 지표인 설비이용률 URE, 시간가동률 ARE, 성능가동률 PRE, 양품률 QRE와 현장낭비제거를 통한 린레이트 LRE(Lean Rate Effectiveness)로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 \text{LeanOEE} &= \text{URE} \times \text{ARE} \times \text{PRE} \times \text{QRE} \times \text{LRE} \\
 &= \frac{\text{PDLT}}{\text{CCTT}} \times \frac{\text{ROUT}}{\text{PDLT}} \times \frac{\text{ANOT}}{\text{ROUT}} \times \frac{\text{VGOT}}{\text{ANOT}} \times \frac{\text{LVAT}}{\text{VGOT}} \\
 &= \frac{\text{LVAT}}{\text{CCTT}} \\
 &= \frac{\text{LGU} \times \text{LTCT}}{\text{CCTT}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

식 (2)의 성능가동률 PRE는 식 (3)과 같이 순가동률 NOR(Net Operating Rate)과 순속도레이트 NSR(Net Speed Rate)로 분해되는 데 <그림 5.1>과 같이 린실제 사이클타임 LACT(Lean Actual Cycle Time)이 린이론 사이클타임 LTCT(Lean Theoretical Cycle Time)보다 커서 성능가동률이 나쁜 경우 LACT가 증가함에 따른 실제수량 AU(Actual Units)가 감소하는 것을 나타내며 <그림 5.2>는 LACT < LTCT로 성능가동률이 좋은 경우 AU가 증가하는 것을 나타낸다. 식(3)의 NSR은 <그림 5> 점선부분의 델타(Δ)면적을 변하게 하여 사이클타임과 실제생산수량의 관계를 결정한다.

$$\begin{aligned}
 \text{PRE} &= \frac{\text{ANOT}}{\text{ROUT}} \\
 &= \frac{\text{AU} \times \text{LTCT}}{\text{ROUT}} \\
 &= \frac{\text{AU} \times \text{LACT}}{\text{ROUT}} \times \frac{\text{LTCT}}{\text{LACT}} \\
 &= \text{NOR} \times \text{NSR} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Lean OEE에 대한 식 (3)은 PAC OLE에 적용할 경우 용어와 적용순서를 약간 변경해 주어야 한다. LTCT, LACT는 PAC의 경우 각각 표준작업페이스(Pace), 관측작업페이스로 나타낼 경우 NSR은 작업속도를 평정하는 레이팅(Rating)계수에 해당한다, 식 (3)에서 NOR의 분자 AU×LACT는 평균관측작업시간에 여유율을 고려한 시간이다. 이와 같이 동작시간연구에서는 평균관측작업시간에 레이팅이 된 정미작업시간에 여유율을 가미하는 순서로 표준작업시간을 구하지만

식 (3)을 활용하는 PAC에서는 평균관측작업시간에 여유율을 고려한 NOR을 구하고 레이팅을 고려하는 NSR에 의해 표준작업시간이 구해진다. 또한 <그림 3>의 레이트운영가동시간 ROUT는 PAC의 경우 표준공수(Standard Person-Hour)가 된다.

Lean OEE는 CFT(Crossed Functional Team)의 중복소집단활동에 의해 직제별로 수행되며 식 (2)에서 URE, ARE의 생산전략과 생산계획부분은 경영자, 관리자의 역할이, PRE의 설비성과 작업페이스부분은 설비기술자, 감독자, 작업자의 역할이, QRE의 품질보전, 제품설계, 제조방법은 품질기술자, VE기술자, IE기술자의 역할이 단계별로 요구된다. TPM OEE에서 설비를 24시간 이용하는稼動率은 URE에, 설비가 필요할 때 즉시 사용이 가능한 可動率은 ARE에 해당하며 Lean OEE에서는 낭비작업에서 설비를 중지하고 수행하는 내준비작업(Internal Setup)이 포함되는稼動率과 설비가동 중 가능한 외준비작업(External Setup)만이 포함되는 可動率로 구분한다.

3.3 Lean OEE의 UBP 연계지표의 개발

3.2절의 식 (2)의 시간기준 생산성지표를 설비시간=수량×사이클타임의 관계를 이용해서 수량기준 생산성(UBP:Unit Based Productivity)지표로 나타내면 식 (4)와 같으며 TU(Total Units)는 CCTT의 전체수량, PU(Planned Units)는 PDLT의 계획수량, RU(Rated Units)는 ROUT의 레이트수량, AU(Actual Units)는 ANOT의 실제수량, GU(Good Units)는 VGOT의 양품수량, LGU(Lean Good Units)는 LVAT의 린양품수량을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \text{LeanOEE} &= \frac{\text{PU} \times \text{LTCT}}{\text{TU} \times \text{LTCT}} \times \frac{\text{RU} \times \text{LTCT}}{\text{PU} \times \text{LTCT}} \times \frac{\text{AU} \times \text{LTCT}}{\text{RU} \times \text{LTCT}} \\
 &= \frac{\text{GU} \times \text{LTCT}}{\text{AU} \times \text{LTCT}} \times \frac{\text{LGU} \times \text{LTCT}}{\text{GU} \times \text{LTCT}} \\
 &= \frac{\text{PU}}{\text{TU}} \times \frac{\text{RU}}{\text{PU}} \times \frac{\text{AU}}{\text{RU}} \times \frac{\text{GU}}{\text{AU}} \times \frac{\text{LGU}}{\text{GU}} = \frac{\text{LGU}}{\text{TU}} \quad (4)
 \end{aligned}$$

<그림 3>, 식 (2), 식 (4)를 이용해서 일일실동시간 T, 일일생산수량 N, 라인지연율 y₁, 불량률 α에 대한 피치타임(PT : Pitch Time)의 3가지 유형에 대한 Lean OEE의 이론사이클타임 TCT는 식 (5)와 같으며 PT₁은 <그림 3>에서 URE, ARE가, PT₂는 PRE가, PT₃는 QRE가 반영된 지표이다.

$$\begin{aligned}
 PT_1 &= \frac{T}{N} = \frac{CCTT - UREL - AREL}{RU} \\
 &= \frac{ROUT}{RU} = \frac{RU \times TCT}{RU} = TCT \\
 PT_2 &= \frac{T(1 - y_1)}{N} = \frac{ROUT(1 - PREL/ROUT)}{AU} \\
 &= \frac{ROUT - PREL}{AU} = \frac{ANOT}{AU} \\
 &= \frac{AU \times TCT}{AU} = TCT \\
 PT_3 &= \frac{T(1 - y_1)(1 - \alpha)}{N} = \frac{ANOT(1 - QREL/ANOT)}{GU} \\
 &= \frac{ANOT - QREL}{GU} = \frac{VGOT}{GU} \\
 &= \frac{GU \times TCT}{GU} = TCT \tag{5}
 \end{aligned}$$

식 (5)의 이론사이클타임에서 이론(Theoretical)은 영문으로 Reference, Expected, Target, Goal, Standard, Nameplated, Rated, Designed, Designated, Ideal, Potential, Shortest, Accredited, Nominal, Highest, Maximum(역수인 Rate인 경우), Optimal, Best Known 으로 불리우며 단위는 [시간/개]로, 이의 역수는 UPH(Units Per Hour) 또는 UPEH(Units Per Equipment Hour)로 Speed Rate, Run Rate, Throughput Rate, Capacity Rate, Pace Maker로 불리우며 단위는 [개/시간]이다. TPM OEE에서는 UPEH를, PAC OLE에서는 UPPH(Units Per Person Hour)로 각각의 단위가 [개/대 · 시간], [개/인 · 시간]이다.

Lean OEE에 대한 3절의 내용을 요약하면 <표 1>과 같다.

<Table 1> Structure of Losses and Wastes in Lean OEE

Rate	Units	Uptime	Downtime			Lean Wastes
			Loss Time	TPM Losses	PAC Losses	
URE	TU→PU	CCTT	U-Loss : UREL	PSDPCL	EXL	
ARE	PU→RU	PDLT	A-Loss : AREL	FBL, SCAL CJVCBL	ML, OMRL	
PRE	RU→AU	RUUT	P-Loss : PREL	MSIJL RSL, EL	LOL ADLL	
QRE	AU→GU	ANOT	Q-Ross : QREL	SYRYL DRL	MAL	
LRE	GU→LGU	VGOT	L-Waste : LREW			OBW, ISW, CTW OOW, WSW MMW, HDW

4. Lean OEE의 RMBA 연계지표의 개발

3절의 <그림 2>에서 시간을 신뢰도와 보전도에 기초한 생산성(RMBA : Reliability and Maintainability Based Productivity) 지표를 $A = \text{Reliability} / (\text{Reliability} + \text{Maintainability}) = \text{Uptime} / (\text{Uptime} + \text{Downtime})$ 의 관계를 이용하여 구하면 식 (6.1), (6.2)와 같으며 MTBL(Mean Time To Loss)과 MTBW(Mean Time To Waste)는 Uptime을, MTII(Mean Time to Improvement & Innovation), MTTK(Mean Time To Kaizen)는 Downtime을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 A(L) &= \frac{VGOT}{VGOT + TL} = \frac{VGOT/L}{VGOT/L + TL/L} \\
 &= \frac{MTBL}{MTBL + MTTL} = \frac{\lambda_L}{\lambda_L + \mu_L} \tag{6.1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A(W) &= \frac{LVAT}{LVAT + TW} = \frac{LVAT/W}{LVAT/W + TW/W} \\
 &= \frac{MTBW}{MTBW + MTTK} = \frac{\lambda_w'}{\lambda_w' + \mu_w'} \tag{6.2}
 \end{aligned}$$

<그림 3>에 대한 RMBA에 대한 지표는 식 (7.1), (7.2)와 같으며 $MTTI(i) = UREL/L_i$ 로 i 번째 로스의 Downtime, $MTTI(L_i)$ 는 i 번째 까지의 로스에 대한 Downtime으로 확률분포의 경우 각각 PDF(Probability Density Function)과 CDF(Cumulative Density Function)에 해당한다. 처음의 로스에 대하여는 $MTTI(1) = MTTI(L_1)$ 이고 마지막 로스의 $MTTI(L_4) = MTTI$, 마지막 Uptime의 $MTBL(4) = MTBL$ 이 되어 식 (7.1)이 식 (7.2)로 간단히 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A(L_1) &= \frac{PDLT}{PDLT+UREL} = \frac{PDLT/L_1}{PDLT/L_1 + UREL/L_1} \\
 &= \frac{MTBL(1)}{MTBL(1)+MTTI(L_1)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_{L_1}} \\
 A(L_2) &= \frac{ROUT}{ROUT+(AREL+UREL)} \\
 &= \frac{ROUT/(L_2 + L_1)}{ROUT/(L_2 + L_1) + (AREL + UREL)/(L_2 + L_1)} \\
 &= \frac{MTBL(2)}{MTBL(2)+MTTI(L_2)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_{L_2}} \\
 A(L_3) &= \frac{ANOT}{ANOT+(PREL+AREL+UREL)} \\
 &= \frac{ANOT/(L_3 + L_2 + L_1)}{ANOT/(L_3 + L_2 + L_1) + (PREL + AREL + UREL)/(L_3 + L_2 + L_1)} \\
 &= \frac{MTBL(3)}{MTBL(3)+MTTI(L_3)} = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \mu_{L_3}} \\
 A(L_4) &= \frac{VGOT}{VGOT/(QREL+PREL+AREL+UREL)} \\
 &= \frac{VGOT/(L_4 + L_3 + L_2 + L_1)}{VGOT/(L_4 + L_3 + L_2 + L_1) + (QREL + PREL + AREL + UREL)/(L_4 + L_3 + L_2 + L_1)} \\
 &= \frac{MTBL(4)}{MTBL(4)+MTTI(L_4)} = \frac{\lambda_4}{\lambda_4 + \mu_{L_4}} \quad (7.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A(L) &= \frac{VGOT/L}{VGOT/L + TL/L} \\
 &= \frac{MTBL}{MTBL + MTTI} = \frac{\lambda_L}{\lambda_L + \mu_L} \quad (7.2)
 \end{aligned}$$

<그림 4>에 대한 RMBA에 대한 지표는 식 (8.1), (8.2)와 같으며 $MTTK(i)=OBW/W_i$ 로 i 번째 낭비의 Downtime, $MTTK(W_i)$ 는 i 번째까지의 낭비에 대한 Downtime으로 각각 분포에서 PDF, CDF에 해당한다. 처음의 낭비에 대하여는 $MTTK(1)=MTTK(W_1)$ 이고 마지막 낭비의 $MTTK(W_7)=MTTK$, 마지막 Uptime의 $LVAT(7)=LVAT$, $MTBW(7)=MTBW$ 가 되어 식 (8.1) 이 식 (8.2)로 간략히 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A(W_1) &= \frac{LVAT(1)}{LVAT(1)+OBW} = \frac{LVAT(1)/W_1}{LVAT(1)/W_1 + OBW/W_1} \\
 &= \frac{MTBW(1)}{HTBW(1)+MTTK(L_1)} = \frac{\lambda_1'}{\lambda_1' + \mu_{W_1}'} \\
 A(W_2) &= \frac{LVAT(2)}{LVAT(2)+(ISW+OBW)}
 \end{aligned}$$

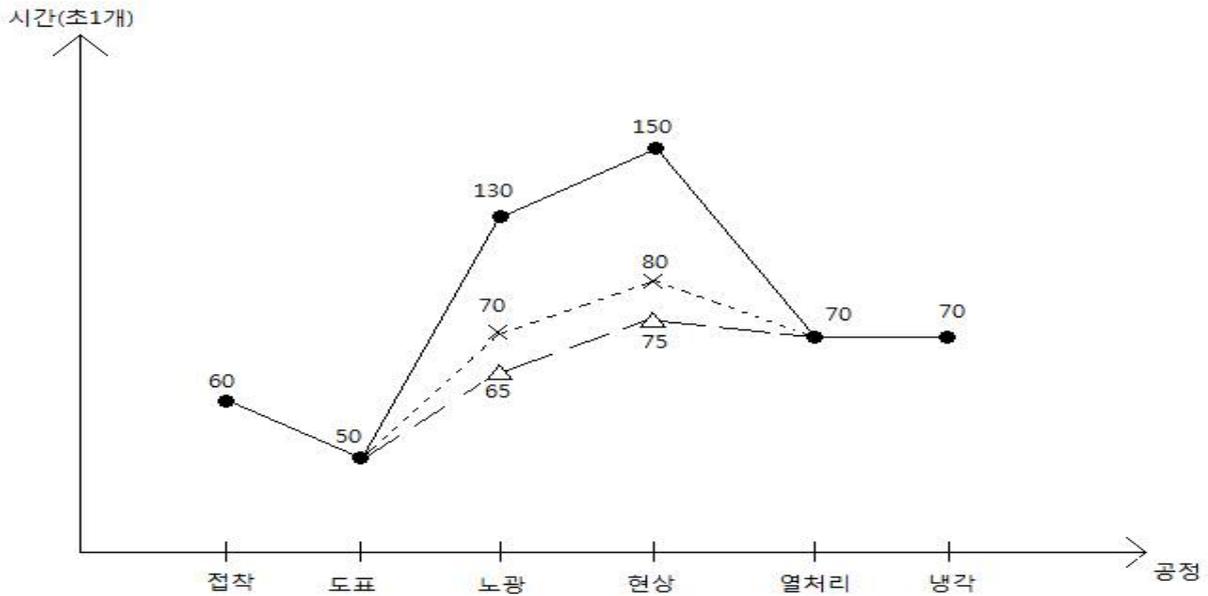
$$\begin{aligned}
 &= \frac{LVAT(2)/(W_2 + W_1)}{LVAT(2)/(W_2 + W_1) + (ISW + OBW)/(W_2 + W_1)} \\
 &= \frac{MTBW(2)}{MTBW(2)+MTTK(L_2)} = \frac{\lambda_2'}{\lambda_2' + \mu_{W_2}'} \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \vdots \\
 A(W_7) &= \frac{LVAT(7)}{LVAT(7)+(MSW+MMW+\dots OBW)} \\
 &= \frac{LVAT(7)/(W_7 + W_6 + \dots + W_1)}{LVAT(7)/(W_7 + W_6 + \dots + W_1) + (MSW + MMW + \dots OBW)/(W_7 + W_6 + \dots + W_1)} \\
 &= \frac{MTBW(7)}{MTBW(7)+MTTK(L_7)} = \frac{\lambda_7'}{\lambda_7' + \mu_{W_7}'} \quad (8.1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A(W) &= \frac{LVAT(7)/W}{LVAT(7)/W + TW/W} \\
 &= \frac{MTBW}{MTBW+MTTK} = \frac{\lambda_W'}{\lambda_W' + \mu_W'} \quad (8.2)
 \end{aligned}$$

5. Lean OEE와 TOC OEE 적용방안

5.1 Lean OEE 적용사례

<표 1>의 달력재적충시간 CCTT에서 TPM의 4가지 로스인 U-Loss, A-Loss, P-Loss, Q-Loss와 LPS의 7가지 낭비인 L-Waste를 제외한 Lean OEE 식 (2)의 린부가가치시간 $LVA T = 43 \times 10^7$ 초이고 전체설비 $M=1000$ 대인 DRAM, SRAM 제조공정이 있다. 확산, 박막, 사진, 식각의 전체공정에서 사진의 1차 세부공정인 포토공정의 전체공정시간이 430초/개로 애로공정(Bottleneck)의 린이론 사이클타임 LTCT이다, UPEH를 향상하기 위해 <그림 6>과 같이 포토공정의 2차 세부공정인 접착, 도포, 노광, 현상, 열처리, 냉각의 6개 공정(n)에 대한 로스와 낭비제거를 통해 라인밸런싱 LB와 목표 UPEH달성을 시도하였다. 개선방안으로는 현상공정 중 용해와 수세방법에 대한 일시 정지로스인 P-Loss와 노광공정 중 스테핑과 정렬방법에 대한 공정대기낭비인 L-Waste의 제거를 목표로 각각 150초/개에서 80초/개, 130초/개에서 70초/개로 <그림 6>의 점선부분과 같이 LTCT=300초/개의 목표계획을 설정하였다. 실제 개선활동결과 P-Loss, L-Waste 부분에서 각각 5초/개를 더 단축하여 <그림 6>의 세모부분과 같이 현상공정은 75초/개, 노광공정은 65초/개인 LTCT=290초/개로 개선되었다. P-Loss와 W-Loss의 개선효과를 알아 보기 위해 현재, 목표, 실제에 대한 LTCT의 단축과 이에 따른 UPEH의 향상이 <표 2>에 나타나 있으며 포토 세부공정의 라인밸런싱지수 또한 좋아짐을 알 수 있다.



<Figure 6> Photo Processing Times in Semiconductor

<Table 2> Implementation of UPEH in Photo Process

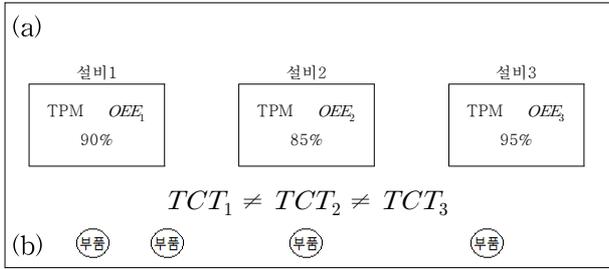
	현재(Theory)	목표(Plan)	실제(Actual)
Given	$LVA T = 43 \times 10^7$ 초	설비 $M = 1000$ 대	$LVA T / M = 43 \times 10^4$ 초/대
$LTCT$ [초/개]	430	300	290
$\frac{LGU/M}{LTCT}$ [개/대]	1000	1431	1483
$\frac{UPEH}{LTCT}$ [개/대 · 초]	2.3×10^{-6}	3.3×10^{-6}	3.4×10^{-6}
$L_B = \frac{LTCT}{n \times CT} \times 100$ (%) 공정수 $n = 6$	$CT = 150$ 초/개 48%	$CT = 80$ 초/개 63%	$CT = 75$ 초/개 64%

5.2 TOC OEE 적용방안

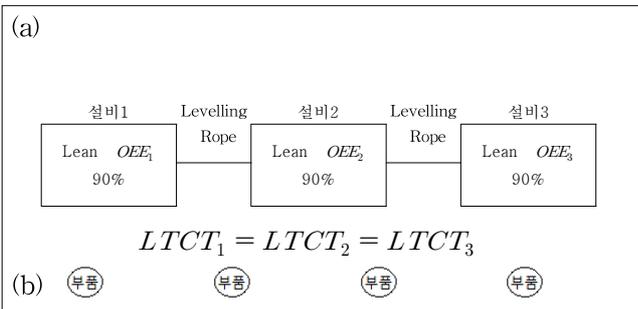
TPM OEE는 U-Loss, A-Loss, P-Loss, Q-Loss의 단축을 통해 개별설비(Equipment)의 OEE를 최대로 하는 전략을 실행한다, 그러나 전(Upstream), 후(Downstream) 설비의 의존성(Dependency)을 고려하지 않고 개별설비 OEE를 최대로 하는 부분최적화(Suboptimization)를 추구하였을 경우 전체공정의 변동성(Variability, Randomness, Uncertainty, Fluctuation)이 커져 이에 따른 문제점을 통제할 수 없게 된다. <그림 7.a>에서 비애로공정(Nonbottleneck) 설비1은 과잉생산(Overproduction)되

어 애로공정(Bottleneck) 설비2에서 공정대기(Blocking)가 발생하고 비애로공정 설비3은 부품대기(Starvation) 현상이 발생한다, 과도한 WIP(Work In Process)의 발생을 방지하기 위하여 TPM OEE에서는 애로공정 설비의 로스개선으로 이론사이클타임(TCT) 단축의 라인 밸런싱으로 JIT(Just In Case)의 방법으로 설비 OEE의 능력균형화를 추구하지만 <그림 7.b>과 같이 부품간의 WIP이 일정하지 않아 이에 따른 생산변동이 통제불능의 상태로 이루어질 수 있다. 이러한 부익부 빈익빈의 개별설비의 OEE를 최대로 하는 TPM OEE에서 통상 전체설비의 평균과 중요도를 고려한 가중평균치로

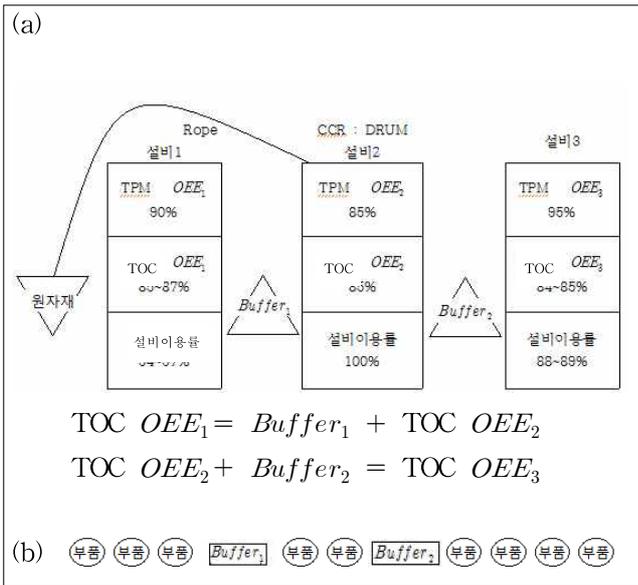
OEE의 대표치로 활용하지만 실제 애로공정의 OEE가 비애로공정의 OEE에 종속되어 체인에서 가장 약한 고리부분이 체인의 지탱하는 힘을 결정하듯이 제일 작은 설비의 OEE가 전체공정의 생산능력을 결정하게 된다.



<Figure 7> TPM OEE Case



<Figure 8> Lean OEE Case



<Figure 9> TOC OEE Case

TPM OEE가 설비간의 의존성과 변동성을 고려하지 않고 밀어내기식(Push)으로 생산능력의 균형을 추구하는 반면 Lean OEE는 시작점이 생산계획이 아닌 주문을 받는 시점에서의 영업계획을 기준으로 Kanban을 이용한 잡아당기식(Pull)의 생산방식을 활용한다. 따라

서 갑작스러운 주문에 대한 생산을 맞추기 위하여 모든 설비의 OEE는 <그림 8>과 같이 균형화(Levelling, Heijunka)되어 JIT(Just In Time)의 생산을 추구한다. 따라서 Lean OEE는 팔린만큼 만든다는 원리로 시장수요율(Market Demand Rate)에 맞춘 균형화된 개별설비의 OEE에 대한 표준편차 관리를 위하여 음악에서 사용하는 Metronome 같은 정피치 Pace Maker를 사용한다. TPM OEE가 최대, 최소능력을 고려하지 않고 평균 OEE를 대상으로 하는 반면, Lean OEE는 L-Waste의 단축을 통해 표준편차 OEE를 Zero로 즉 작은 박자의 Tack(Takt) Time인 개별설비의 LTCT가 같도록 생산을 유지하는 방식이다.

Lean OEE가 애로공정과 비애로공정의 OEE 능력을 균형화하는 방법을 추구한다면, TOC OEE는 차별화된 흐름 동기화생산에 맞추는 JIF(Just In Flow Synchronization) 방식이다. TOC OEE에서는 <그림 9>와 같이 애로공정 설비2의 OEE=85%가 전체공정의 Throughput을 결정하기 때문에 CCR(Capacity Constrained Resource)인 설비2가 원자재투입공정과 Rope로 연결(Pull)되어 Drum으로 OEE를 맞추고 비애로공정간 OEE 차이로 발생하는 능력차는 Buffer로 해결하여(Push) 생산하는 Pull and Push의 DBR(Drum Buffer Rope) 방식이다. TOC OEE에서는 <그림9>와 같이 애로공정인 설비2의 OEE=85%가 전체 공장의 생산능력을 결정하기 때문에 이용률을 100%로 수행하는 것을 목표로 전공정의 비애로공정에서의 부품대기(Starvation)를 방지하기 위하여 Buffer₁을 설정하고 애로공정의 예상치 못한 문제로 OEE가 달성되지 못할 경우 후공정인 비애로공정의 부품대기(Starvation)를 방지하기 위하여 Buffer₂를 설정한다. Lean OEE가 WIP을 Zero로 하는 균형화된 OEE의 Rope를 거는 방식이라면 TOC OEE는 WIP을 Buffer로 사용하는 차별화된 OEE의 Rope를 거는 DBR 방식이다.

6. 결론

본 연구에서는 설비로스(Loss) 개선을 위한 TPM, 작업로스(Loss)개선을 위한 PAC, 현장낭비(Waste) 개선을 위한 LPS, CCR의 문제점을 해결하기 위한 TOC의 특성을 고려한 OEE의 연계 생산성지표개발과 적용 사례를 제시하였다.

연계 생산성지표는 새롭게 재구성된 U-Loss, A-Loss, P-Loss, Q-Loss, L-Waste의 시간구성과 로스, 낭비체계에 대해 단계별 일관된 단위가 적용될 수 있도록, TBP(Time Based Productivity), UBP(Unit Based

Productivity), RMBP(Reliability and Maintained Based Productivity)의 3가지 척도로 개발되었다. 실무자의 이해를 돕기 위해 반도체공정에서의 Lean OEE와 UPEH 적용사례를 제시하고 TPM OEE, Lean OEE, TOC OEE를 개별설비의 능력(Capacity)과 전체설비의 흐름(Flow)의 관점에서 적용방안을 제안하였다.

향후 연구로는 본 연구에서 제안한 실제생산성, 효율성, 목표생산성, 효과성의 체인 지표를 이용하여 생산 투입요소가 고려된 OEE의 통합지표개발에 있다.

7. 참고 문헌

- [1] 이영훈 외(2001), “반도체 FAB 공정의 사이클타임 단축을 위한 병목일정계획”, 한국경영과학회 추계 학술대회논문집 : 298-301.
- [2] 일본 플랜트 메이티너스(2009), 신 TPM 전개 프로그램 : 가공조립산업, 한국표준협회.
- [3] 일본 플랜트 메이티너스(2004), 신 TPM 전개 프로그램 : 장치산업, 한국표준협회.
- [4] 최성운(2008), “IT 서비스 관리에서 신뢰성, 보전성 및 가용성 척도”, 대한안전경영과학회지, 10(4) : 159-163.
- [5] 함정근 외 공역(2005), TOC 동기화 경영, 동양문고.
- [6] Ahuja I.P.S., Khamba J.S.(2008), “Total Productive Maintenance : Literature Review and Directions”, International Journal of Quality and Reliability Management, 25(7) : 709-756.
- [7] Borris S.(2006), Total Productive Maintenance, McGraw Hill.
- [8] Gotoh F., Tajiri M.(1999), Autonomous Maintenance in Seven Steps, Productivity Press.
- [9] Hansen R.C.(2001), Overall Equipment Effectiveness, Industrial Press Inc..
- [10] Levitt J.(2010), TPM Reloaded, Industrial Press Inc.
- [11] Lin Y., Tsai C., Li R., Chen C., Chen H.(2008) “The Study of the Cycle Time Improvement by Work-In-Process Statistical Process Control Method for IC Foundry Manufacturing”, The Asian Journal on Quality, 9(3) : 71-91.
- [12] McCarthy D.(2004), Rich D.N., Lean TPM, Elsevier.
- [13] Meyers F.E., Stewart J.R.(2001), Motion and Time Study for Lean Manufacturing, Prentice Hall.
- [14] Nakajima S., Bodek N.(1988), Introduction to TPM : Total Productive Maintenance, Productivity Press.
- [15] Robinson C.J., Ginder A.(2007), Implementing TPM, Productivity Press.
- [16] Suzuki T.(1994), TPM in Process Industries, Productivity Press.
- [17] Tajiri M., Gotoh F.(1992), TPM Implementation, McGraw Hill.
- [18] Willmott P., McCarthy D.(2001), TPM : A Route to World-Class Performance, Butterworth-Heinemann.

저 자 소 개

최성운



현 가천대학교 산업학과 교수. 한양대학교 산업공학과에서 공학사, 공학석사, 공학박사 학위를 취득하고, 1994년 한국과학재단 지원으로 University of Minnesota에서 1년간 Post-Doc을 수행했으며, 2002년부터 1년반 동안 University of Washington에서 Visiting Professor를 역임하였음. 주요 관심분야는 자동화 생산 및 장치 산업에서의 품질관리이며, 통신, 정보시스템의 보안, 신뢰성 설계 및 분석, 서비스 사이언스, RFID시스템, Wavelet에도 관심을 가지고 있음. 주소 : 경기도 성남시 수정구 성남대로 1342 가천대학교 산업공학과