

A Study of Developing Wear Tester to Measure and Minimize Particle Levels in Cleanroom

Kwang Hee Park* · Kwonhak Noh** · Sung Ho Chang*[†]
Jonghwan Lee* · Young Cheul Cha* · Hae Dong Chun*

*Kumoh National Institute of Technology Graduate School of Consulting
**LG Display

장비 구동부품 기인 Particle 평가를 위한 마모측정기의 개발에 관한 연구

박광희* · 노권학** · 장성호*[†] · 이종환* · 차영철* · 전해동*

*금오공과대학교컨설팅대학원
**LG Display

Cleanroom could be largely classified into industrial cleanroom that can be contaminated by particles and bio-cleanroom that can be contaminated by biological particles. Electrical manufacturing companies producing precision machines and electrical parts essentially have industrial cleanroom facilities and clean technologies to produce defects free products due to particles.

Industrial cleanroom should be controlled in respect of 4M1E to prevent from foreign materials of sub-micro unit and to keep out contamination sources from outside. In this paper, a concept for a quantitative methodology to measure the particles from running components was suggested by combining both newly making clean booth such as wear tester and laser particle counter.

Keywords : Particle Counter, Clean Room

1. 서 론

산업이 발전될수록 클린룸의 사용 분야는 지속적으로 계속 확대되고 있다. 클린룸은 주로 부유성 입자를 중요하게 관리하는 산업용 클린룸(industrial clean room, ICR)과 세균, 곰팡이 등과 같은 생물성 입자를 중요하게 관리하는 바이오 클린룸(bio-clean room, BCR)으로 구분할 수 있다.

신소재, 정밀기계, 필름, 전지, 컴퓨터 하드디스크 드라이브, 반도체, 액정표시장치와 같은 제품을 생산하는

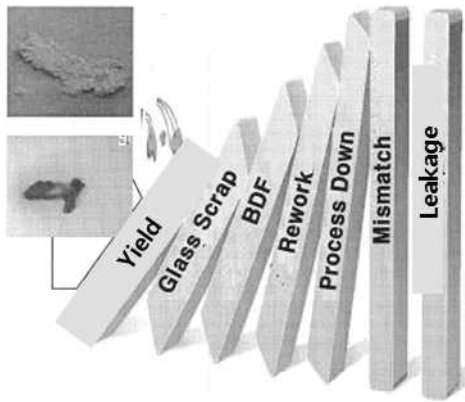
제조업체는 무결점(defect free) 제품 생산을 위해 외부와 의 환경격리, 향온 향습 등이 유지되어야 하는 산업용 클린룸 시설을 갖추고 유지해야 하는 것이 필수적이다.

이러한 각 산업 부문별 기업 부가가치(value added)를 창출하고 극대화하기 위한 기술 분야는 제조기술, 장비기술, 공정기술 등 매우 다양하다. 특히 청정룸 생산성 향상 및 품질확보 관점에서 클린룸 환경을 무오염(contamination free) 조건으로 유지하고 관리하기 위해 클린룸 이물 관리 및 제어 기술 확보가 매우 중요하다. <Figure 1>은 디스플레이 산업에서의 클린룸 내 이물이 LCD나 OLED와 같은 제품 생산성에 얼마나 큰 손실을 유발하는지를 보여준다[6].

Received 6 February 2013; Finally Revised 20 March 2013;

Accepted 1 May 2013

[†] Corresponding Author : changsh@kumoh.ac.kr



<Figure 1> Production Loss Due to Particles in Cleanroom

디스플레이 부품 제조회사인 A社에서의 클린룸내 이물 발생원을 <Table 1>과 같이 크게 4M1E(man, machine, material, method, environment) 관점으로 분류하여 정리하였다. 각 부문별로 살펴보면 Method 부분은 많은 업체들이 TPM, 6 Sigma 등 혁신기법을 이용하여 공정을 최적화하고 작업방법을 개선하여 이물을 개선시키고 있다.

<Table 1> Particle Origins in the View Point of 4M1E

Category	Type
Machine	Parts Chemical reaction
method	Process Condition Method of Assembly
Material	Defect of Material Material Characteristics
Man	House Keeping BM, PM, CM, PD
Environment	Air Pressure Air Flow

Material 관점으로는 Al, Cu와 같이 원가 저감과 더불어 이물발생이 최소화되는 새로운 material 개발이 진행되고 있으며, 업체별 기술력 차이는 있으나, 일부 적용되고 있는 상황이다.

Man관점으로는 무인화 차원에서 클린룸내 작업자의 출입을 최소화시키고, 방진복, 방진화와 같은 출입복장 규정 및 교육 관리를 통해 운영되고 있으며 작업자 기인 이물, 오염원 통제 및 관리가 진행되고 있다.

Environment 관점으로는 클린룸 건설초기부터 건설 자재 점검 및 시공업체 작업자 관리를 통해 청정도 관리를 한다. 운전 중에 온도, 습도를 포함한 클린룸 내에서의 파티클 발생 모니터링 시스템 구축 및 운영, 기류 최적화 및 관리를 통한 신속한 제거, 세정품질의 완성도 향상을 위한 세정기술 개발 등 활발한 활동을 통해 이물을 포함

한 각종 오염원을 제어하고 있다.

마지막으로 Machine 측면으로는 장비제작업체, 설비 제작업체, 부품제작업체의 자체적인 기술개발로 이물발생 정도가 많이 개선되었으나 현실적으로는 클린룸을 운영하는 디스플레이 제조업체 측면에서는 고수율, 고수익성 창출을 위해 더 많은 개선이 필요하다[2].

본 연구에서는 상기 4M1E중 관리기술을 이용해 클린룸 청정도 확보가 이루어지고 있는 Man, Material, Method, Environment부문을 제외한 Machine 부문에 대해서 새로운 접근 방법을 제시하고자 한다.

디스플레이용 장비는 구동 unit, 반송 unit 등 여러 가지 unit과 부품으로 구성되어 있다. 이러한 부품들에 덮개를 설치하여 격리시키고, 초순수를 적용하여 세정을 하며, 윤활유를 급유하여 파티클 발생을 최소화하고 있다. 그러나 부품이 구동하면서 마찰과 마모현상으로 인한 파티클이 비산하는 것을 완전히 제어하지는 못한다. 즉, 근본적인 대책으로 부품에서 발생하는 이물을 처음부터 억제하는 대책이 필요하다.

발생되는 파티클의 크기는 sub-micro 단위로 육안으로는 식별이 불가하고, 측정을 하더라도 외부의 환경으로 인해 측정의 신뢰성을 보장하지는 못하는 상황이다. 따라서 어떤 부품이 구동할 때 파티클이 얼마나 발생하는지를 정확하게 측정하기 위해서, 현재 상용중인 마모 측정기(wear tester)를 검토해 보았다. 하지만 현재 상용중인 마모 측정기는 230여 종류로 다양하며, 측정변수는 마모량, 마모율, 길이, 단면적, 부피 변화와 같은 형상변화, 마찰계수, 시편의 질량 변화 등으로만 제시될 뿐, 이물의 크기와 수량 측면으로는 제시되지 못한다.

실제 클린룸의 청정도를 관리하는 생산자 입장에서는 파티클 크기 및 수량에 대한 정보가 더 중요하다. 현재까지 생산장비 제작업체 및 부품 제조업체에서는 파티클 발생이 매우 적다라고 정성적으로만 제시할 뿐 정량적으로 얼마만한 크기의 이물이 얼마만큼 발생했다는 데이터를 확보하고 있는 업체는 거의 없는 실정이다.

본 연구의 목적은 디스플레이용 생산장비에서 발생하는 파티클 발생량을 최소화시키기 위해 최적의 부품 재질 및 사용 조건을 도출하기 위한 새로운 마모 측정기를 개발하는 것이다.

2. 상용중인 마모 시험기 및 파티클 측정기

마모 현상은 매우 복잡한 원인에 의해 일어나기 때문에 재료의 마모 특성을 평가하기 위해서는 그 재료가 사용되는 사용 조건에서의 마모 현상을 관찰해야 한다. 따라서 다른 기계적 성질 및 물성 측정 장비와 같이 통일

된 규격의 시험기는 많지 않다.

일반적으로 마모 시험은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 즉, 실제 사용 환경에서의 실물시험과 실험실 차원에서 진행될 수 있는 모의(simulation) 마모 평가이다. 실물 평가의 경우 실제 사용 조건하에서의 마모 수명을 정확히 판단할 수 있는 장점이 있는 반면에 장비의 운용이나 시험기간 등의 문제가 있어 신속한 실험 및 정밀한 조건의 실험이 어려우며, 마모 특성이나 마모 원리를 규명하기 위한 여러 가지의 측정 장비를 적용시키기 어려운 단점이 있다. 반면에 실험실적인 방법은 마모 기구의 이해나 변수 결정에는 유익하나 실제 조건을 정확히 모사(simulation)할 수 없고 통일된 마모 시험기와 마모 시험 규정이 없기 때문에 각각의 결론이 재현성이 부족하거나 크게 차이가 날 수 있는 단점이 있다. 따라서 실험실적 마모 실험을 통한 내구성 향상의 연구에 있어서는 내마모재가 사용되는 부위의 조건을 잘 파악하고 그에 따라 사용 조건을 잘 모사할 수 있는 마모 시험기를 제작하여 시험을 해야 하며, 시험 결과에 대한 분석을 철저히 하여 내마모재의 마모 기구와 마모 특성을 평가하여야 한다[6].

대표적인 마모 시험의 형태인 미국 재료 시험협회(american society for testing and materials, ASTM)의 STP(selection and use of wear tests for metals)에 의하면 시험의 크기는 25mm(1.0 inch : pins of blocks) 이상부터 75mm(3.0 inch : rings or disks) 보다 큰 것까지 다양하며, 하중은 g~Kg단위까지 평가할 수 있다. 또한 마찰 속도도 시험기에 따라 매우 넓은 범위(2.5mm/s에서 2.540mm/s까지)로 변화시킬 수 있다.

대표적인 마모시험기의 개발연구를 보면, 최갑수[2]에 의해 작성된 논문에서는 시험기에 대한 검증을 위하여 마찰 마모 시험기의 핵심 요소인 테스트 지그헤드(test jig head)에 대해 시험 정밀도에 미치는 인자들을 발굴하고, 시뮬레이션과 시험기 개선 설계와 제작, 비교 실험을 통한 검,교정 등 마찰 마모 시험기에 대한 연구를 수행하였다.

김학주에 의하면 타이어 마찰로 인한 마모 측정기는 실험실 차원에서의 모의시험과 실제 조건에서의 측정 결과 값의 차이가 크게 발생하는 문제점으로 인해 기존의 고무 마찰 마모측정기 및 평가 결과의 한계를 극복하여 다양한 측정 관점으로 고무의 마찰 마모 거동 현상을 재해석 하였다[5].

정형범, 윤재륜은 하이브리드 복합재료의 미끄럼 마찰 및 마모 특성에 관한 연구에서 트라이볼로지 특성을 측정하기 위하여 핀 온 링(pin on ring) 형태의 마찰 및 마모 시험기를 개발하여 평가하였다.[4]

최인수, 이민구는 공구의 마모에 대한 정량보정 계획에 대한 연구로 초기 설정값과 보정한계를 구하는 모형

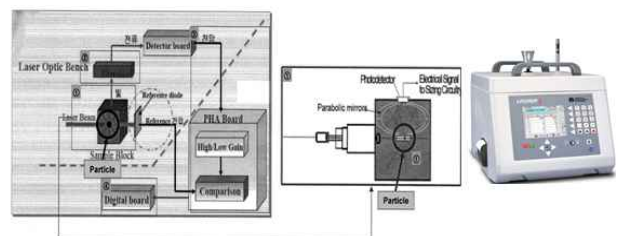
에 대하여 연구하였다[1].

하지만 대부분 연구에서의 측정 결과 값은 마찰력, 마찰계수에 국한되어 있다. 본 연구의 목적인 파티클의 크기와 수량 측정 관점으로 마모 평가를 위해 상용중인 마모 측정기 개발, 생산 업체를 파악하고, 개발 의뢰를 하였으나 마모 측정기 제작 전문업체에서는 필요성을 못 느끼고 있었다. 따라서 클린룸에서의 청정도 관리 관점에서 재료의 마모로 인해 발생하는 파티클의 크기 및 정량적인 수량을 측정할 수 있는 측정기에 대한 필요성이 절실하다.

3. 개념적인 파티클 측정기 개발

본 연구에서는 독립된 공간을 확보하여 특정 부품의 마찰과 마모로 인해서 발생하는 이물의 크기와 개수를 측정하기 위해 마모 파티클 측정설비에 대한 개념을 개발하는 것이 목적이다. 따라서 제시하는 마모 파티클 측정기를 개발하기 위해 상용중인 레이저를 이용한 부유성 이물 측정기(airborne particle counter, APC)를 활용하였다. 즉, 부품의 구동 시 마모되는 파티클 크기와 개수를 측정하기 위해 이물 측정기를 연결하였다. 이물 측정기는 미국 PMS사의 모델 LASAIR II-110을 활용하였고 Laser Particle Counter 모습 및 측정원리는 <Figure 2>와 같다.

파티클이 Inlet 튜브를 통해 진입하면 레이저 광원을 지나가고 이 때의 파티클에 의해 레이저 빔이 산란된다. 산란된 빛은 optic 벤치에 포집되고, 포집된 산란 빛(scattering light)을 photodiode가 감지한다. 감지된 빛은 전류로 변화되고, detector 보드를 통과한 후 전압(volt)으로 변환된다. Reference Diode를 기준으로 큰 산란 빛은 높은 전압으로 변환되고, 낮은 산란 빛은 낮은 전압으로 변환된다. 이 각각의 전압 크기에 따라 파티클의 크기가 결정되고, 빈도수가 이물의 개수로 측정이 된다. 이물 측정기가 측정할 수 있는 파티클의 크기 범위는 0.1um부터이나, 보통 0.3um, 0.5um, 1.0um, 5.0um, 10um, 25um이다. 측정 용량은 1CFM(cubic feet per min)이며, 28.3리터이다[7].



<Figure 2> Schematic View of Laser Particle Counter

측정기는 반드시 0점 측정이 되는지 확인을 해야 하며, 검교정 주기를 필히 준수해야 한다. 검교정이 잘 된 측정기라도 신뢰성이 높은 것이 아니기에, 데이터가 정상적인 분포가 아니라면 측정기 내부가 이물질에 의한 오염 가능성을 의심해야 한다[8, 9].

본 연구에서 제시하는 마모 파티클 측정설비에 대한 구체적인 개념을 다음과 같이 제시한다. 측정설비는 크게 4가지 유닛으로 구성된다. 이는 신선한 공기를 주입하는 필터유닛, 측정 대상 부품이 회전구동 또는 왕복운동을 하는 구동유닛, 전원 및 회전속도를 조절할 수 있는 제어유닛, 마지막으로 앞에서 소개한 이물 측정기이다. 각각의 유닛에 대한 설명은 다음과 같다.

필터유닛은 부품이 구동되는 공간 내부에 오염되지 않은 신선한 공기를 넣어주기 위해서 ULPA 필터를 장착하고, 분당회전수인 RPM(revolution per minute) 조절 기능과 전원 On/Off 기능을 구현한다.

구동유닛은 평가 대상 부품이 운동으로 인하여 이물이 생성되는 유닛으로 부품에 인가되는 하중, 부품의 운동 속도, 연결될 지그, 마찰 마모로 오염된 공기가 배출될 수 있도록 On/Off 가능한 램프, 파티클을 측정하는 측정기와 연결된 프로브(probe)로 구성된다.

측정설비 전체 운영을 담당하는 제어유닛은 모터 rpm, ULPA 필터 On/Off, 가동시간과 모터 회전시간을 조절할 수 있는 자동/수동 모드를 조절하는 기능으로 구성된다. 수동 모드일 경우에는 필터와 모터의 구동 시간을 임의로 조절할 수 있고, 자동 모드일 경우에는 평가자 임의로 설정한 시간대로 필터와 모터가 구동을 하는 기능을 의미한다.

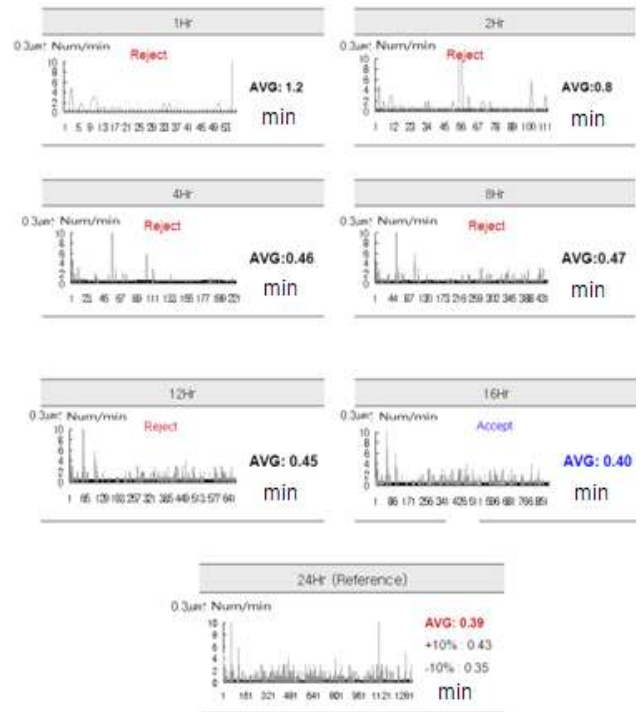
마지막으로 파티클 측정기는 앞서 설명한 기 상용화되고 있는 미국의 PMS사 모델 LASAIR II-110을 연결한다.

상기와 같은 개념으로 측정 설비를 개발하면, 측정 변수가 마찰계수, 마모량 등으로만 표현되는 기존의 마찰 마모 측정기의 단점과, 현재 상용화 되어 있는 레이저 이물 측정기의 활용 범위 확대가 가능해 질 것이다.

4. 타이밍벨트 마모 파티클 측정결과 및 실증 연구

타이밍벨트 구동시 파티클 발생의 인자들을 부품 자체의 조건과 외부 조건 2가지로 구분하여 측정하였다. 먼저 본 연구를 통해 개발한 파티클 마모 측정설비를 이용해서 타이밍벨트를 얼마나 오랫동안 측정을 해야 하는지를 파악하고 결정하기 위한 평가를 진행하였다. 평가 시간을 길게 하면 할수록 전수 검사하는 방식이 되어 바

람직한 방법이 되지만 현실적으로는 시간적인 제약조건 때문에 오랜 시간 동안 측정은 불가능하였다. 그래서 1일 24시간인 1,440분을 평가하고 안정화된 상태인지를 검토하고 이상이 없는 것을 확인한 후 0.3 μ m 이상 크기의 파티클 누적 평균 수량의 $\pm 10\%$ 를 만족시키는 누적 시간을 선정하기로 결정하였다. 평가 시료 타이밍벨트는 Mitsubishi사의 모델 150-S3M-750-U로 선정하였고 평가 결과는 <Figure 3>과 같이 맨 아래의 그래프는 24시간 구동했을 때의 분당 평균 0.3 μ m/sec 이상 크기의 파티클 수량을 나타내며 이때의 평균이 0.39개이고 평균 $\pm 10\%$ 의 개수는 0.35~0.43개이다. 즉, 24시간 구동을 기준으로 해당 수량 범위 내에 수렴하는 개수를 보이는 평가 시간대는 16시간대인 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 타이밍벨트의 구동시 마찰 마모로 인해 발생하는 파티클 수량을 알기 위해서 개발된 마모 측정기로 16시간 평가해야 평가의 재현성을 확보할 수 있다고 판단할 수 있다.



<Figure 3> Timing Belt Operating Time vs. Number of Particles

	Rubber(G)	Urethane(U)	Coating
Material			
Tension	65N(Maker SPEC)		
RPM	30 RPM		
Spec	150-S3M-750 (Maker : Mitsubishi)		
	Belt Width : 15mm, Pulley Dia : 13.37mm, Belt length : 750mm		

<Figure 4> Materials of Timing Belt

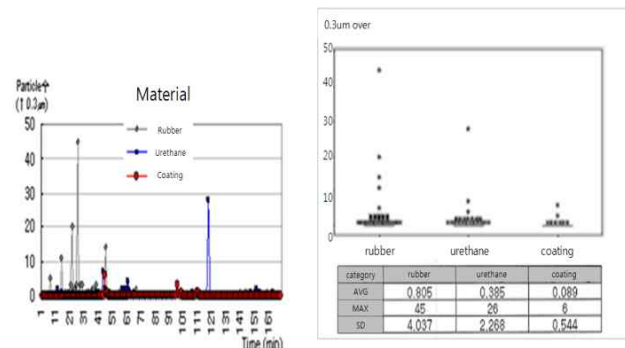
타이밍벨트의 재질을 <Figure 4>와 같이 고무, 우레탄, 고무 치면코팅(pulley와 마찰하는 치면에 특수 처리된 나일론포 코팅) 3가지 수준으로 나누어 장력 65N, 30rpm으로 상온, 상습에서 3시간 구동하여 0.3 μ m/sec 크기 이상의 파티클 수준을 평가하였다. 평가 결과는 <Figure 5>와 같이 고무가 평균 0.805개로 가장 많이 발생하였고, 우레탄은 0.385개, 고무 치면코팅은 0.089개로 가장 적게 발생하였다. 즉, Pulley와 마찰하는 고무 치면에 나일론포 코팅을 하는 것이 타이밍벨트 구동시 마찰 마모로 인한 파티클이 최소화됨을 알 수 있었다.

다음은 타이밍벨트의 장력(tension) 수준에 따른 파티클 발생수준을 평가하여 최적의 장력이 얼마인지를 도출하였다.

평가 대상 모델은 우레탄 재질로 고무 치면코팅을 하지 않은 Mitsuboshi사의 150-S3M-750-U이다. 이 모델은 단위질량(mass) 1.9g, span 길이308mm, 벨트의 폭은 15mm, 장력은 크게 5가지 수준인 35N, 50N, 65N, 80N, 95N이며, 상온, 상습에서 24시간 구동시켰다. 시료 모델은 메이커에서도 65N에서 사용할 것을 권장하였고, 평가 결과 <Figure 6>에서 볼 수 있듯이 역시 65N에서 파티클 발생

량의 함이 제일 적은 것으로 확인되어 메이커의 권장 장력이 바람직하다는 것을 확인할 수 있었다. 타이밍벨트의 장력은 사용 시간에 따라 적정장력에서 과장력이나 저장력으로 변하고 심한 경우 절단이나 소음 등 이상 현상을 유발할 수 있으므로 주기적인 관리가 필요하다.

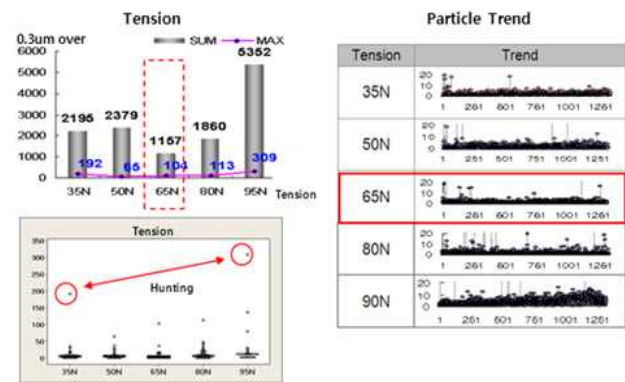
다음은 타이밍벨트 치형(tooth shape)별 파티클 발생수준을 <Table 2>와 같이 평가하였다. 치형은 둥근 치형과 사다리꼴 치형 2가지로 분류하였으며, 평가 모델은 우레탄 재질과 고무 재질의 치형별 유의차를 보기 위해 2개 업체(Mitsuboshi사, Gates Unitta사)로 선정했고, 장력은 65N, 100N으로 메이커의 권장 장력을 준수하였다. 구동 조건은 30rpm에서 24시간 구동하였다. 평가 결과는 <Figure 7>에서와 같이 사다리꼴 치형 대비 둥근 치형의 타이밍벨트가 파티클 발생수량이 적음을 알 수 있다. 이 원인은 사다리꼴 치형은 각진 부분에 피로하중의 집중으로 마모 발생이 많고, 둥근치형은 Pulley 사이의 이물질이 적절히 하중 분산이 되고 모서리 부분이 없기 때문에 파티클 발생이 적다라고 판단할 수 있었다.



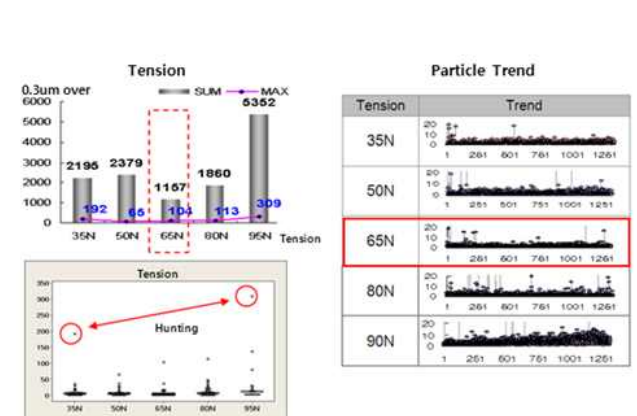
<Figure 5> Number of Particles of Timing Belt Depending on Materials

<Table 2> Operating Condition of Timing Belt Depending on Tooth Shape

Maker	Model	Tension	Tooth Shape
MITSUBOSHI	① 150-S3M-750-U	65N	
	② 290-XL-059-U	65N	
GATES UNITTA	③ 750-5GT-15(GT)	100N	
	④ 750-5M-15(HTD)	100N	
	⑤ 290-XL-059(CTB)	65N	

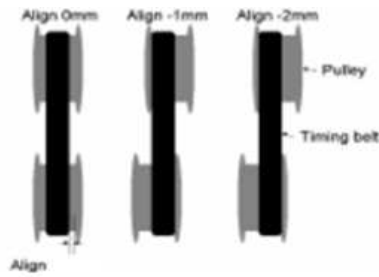


<Figure 6> Number of Particles of Timing Belt Depending on Tension

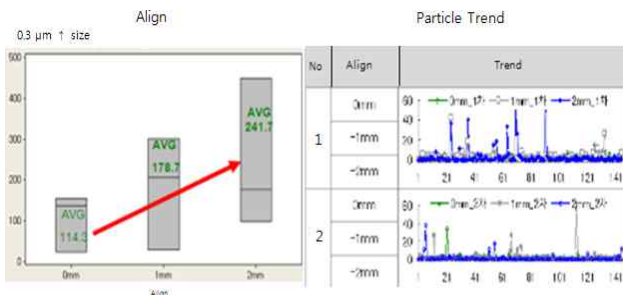


<Figure 7> Number of Particles Depending on Tooth Shape

마지막으로 타이밍벨트가 구동되는 Pulley와 Pulley간의 틀어짐(misalign)정도를 <Figure 8>과 같이 평가하여 정리하였다. 평가 시료는 Mitsuboshi사의 우레탄 재질로 모델 150-S3M-750-U이며, rpm은 30, 장력은 메이커 권장 수치인 65N으로 적용하여 24시간동안 2차에 걸쳐서 구동시켰다. 틀어짐 정도는 0mm, 1mm, 2mm로 조절하였으며, 0mm는 Pulley간에 틀어짐이 없다는 의미이다. 평가 결과는 <Figure 9>와 같이 Pulley간에 정렬이 0mm로 잘 된 경우에 타이밍벨트 양 옆의 마찰 마모정도가 감소되어 파티클 발생량이 적음을 알 수 있다. 결론적으로 타이밍벨트의 정렬 정도에 대한 이상 여부를 정기적으로 관리해야 함을 알 수 있다.



<Figure 8> Misalignment of Pulleys



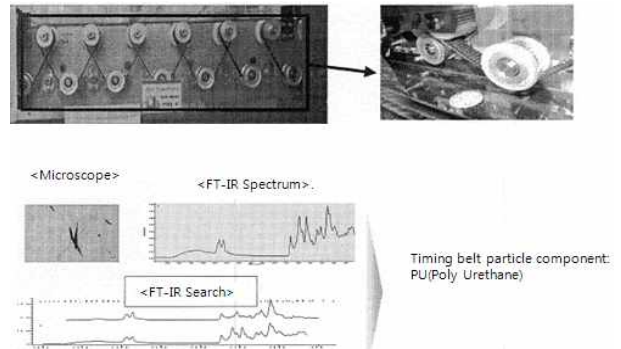
<Figure 9> Number of Particles Depending on Misalignment

이상과 같이 타이밍벨트의 재질, 장력, 치형, 틀어짐 정도별 구동시 마모되는 파티클 수준을 확인하였다.

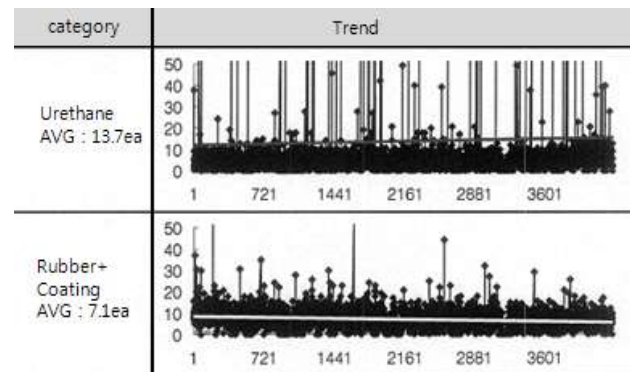
실제 현장에서의 사례를 보면 <Figure 10>처럼 반송장비에서 반송 Roller를 회전시켜 주는 타이밍벨트에서의 파티클 발생 수준이 문제가 되어 이물을 채취하여 FT-IR 성분 분석한 결과 <Figure 10>과 같이 벨트 재질인 폴리우레탄 성분으로 확인되었다.

이에 앞서 평가된 결과대로 치면에 특수 나일론 코팅한 재질을 적용한 결과 발생하는 파티클 수량은 감소하게 됨을 확인하였다. 기존의 우레탄 재질에서 0.3 μ m/sec 발생된 파티클 수량은 평균 13.7개이나 나일론 코팅한 타이밍벨트 재질에서의 수량은 <Figure 11>에서 볼 수 있듯이 7.1개로 48% 감소되었으며, 서서히 감소하는 경

향을 보이고 있다. 즉, 마모 파티클 측정기로 평가했던 결과와 실제 생산 장비에 적용하여 평가한 결과가 동일함을 알 수 있었다.



<Figure 10> Analysis of Materials of Timing Belt



<Figure 11> Improvement of Timing Belt Materials

4. 결론 및 추가연구

기존의 마찰, 마모측정기와 파티클 측정기는 클린룸 내의 오염원을 찾아내기에는 한계가 있다는 것을 알았으며, 특히 구동부품의 마모로 인한 이물의 크기와 수량을 정량적으로 규명하기에는 현재의 측정기로는 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안하는 측정기로 이의 한계점을 극복하고자 한다.

실증연구의 결과를 토대로 각 부품에 대한 적정 재료의 선정과 최적의 사용법을 찾고자 하였다. 하지만 각 부품의 마모는 부품에 따라 다른 원리로 결정되어 지기 때문에 이에 따른 추가적인 연구가 필요하다.

Acknowledgement

This study has been partially supported by a Research Fund of Kumoh National Institute of Technology, Korea.

References

- [1] Choi, I.-S. and Lee, M.-G., A Fixed Amount Compensation Plan for a Tool Wear Process. *Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 1996, p 233-240.
- [2] Choi, G., Pyun, Y., Park, J., and Kim, J., AUEZHAN AMANOV, Development of Multi-purpose wear and friction tester. *Korea Society of Machine Tool Engineers*, 2010, p 1839-1843.
- [3] Clean Technology Seminar for increasing Yield. KMAC, Seoul, 2003, p 3-61.
- [4] Jung, H. and Youn, J., A study on Sliding Friction and Wear Characteristics of Hybrid Composites at Medium Sliding Speed. *The Korean Society for Composite Materials*, 2000, Vol. 13, No. 1.
- [5] Kim, H. and Jeon, I., Wear and Frictional Behavior of Tire Rubber. *Polymer science and technology*, 2000, Vol. 11, No. 5.
- [6] Kim, H., Yeon, Y., Ji, M., Honh, Y., and Song, G., *Experiment of Metal Material Application*. Kijeonyeongusa, 2010, p 119-198.
- [7] Noh, K., A Study on the How to Measure Particle Levels Due to the Equipment Components by Developing a Wear Tester [PhD Thesis], [Gumi, Korea]; Kumoh National Institute of Technology, 2012.
- [8] Particle College Seminar, Seoul, 2010.
- [9] Robert, G.K. and Donald, L.V., Optical Particle Monitors, Counters, and Spectrometers : Performance Characterization, Comparison, and Use. *Institute of Environmental Sciences*, 2001, p 751-771.