

PDP 제조공정/설비개발에서의 CFD 적용 사례

이 글에서는 PDP 양산라인에서 대화면·고품질의 PDP 제품을 생산하기 위한 공정 및 설비 개발에 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics)을 적용한 대표적인 사례를 소개하고자 한다.

디스플레이(display)는 각종 전자기기의 전기적 정보를 시각 정보로 변환시켜 인간에게 전달하는 핵심 전자기술이다. 디지털 방송에 적합한 LCD(Liquid Crystal Display)와 PDP 등의 평판디스플레이(FPD : Flat Panel Display)는 40인치 이상의 대화면 HD TV(High Definition TV)를 구현할 수 있으며, 반도체, 전지(battery)와 함께 차세대 유망산업으로 급성장 중에 있다. 특히 PDP(Plasma Display Panels)는 LCD와는 달리 자체 발광 표시소자로서 자연광에 가까운 화질구현이 가능하며 제조공정이

비교적 간단하여 저가격화가 가능하므로 가격 경쟁력이 크다는 장점이 있다.

PDP의 방전 셀(cell)은 그림 1에 나타낸 것처럼 100~150 μ m

두께의 격벽으로 분리된 두 장의 유리기판 사이의 미소 공간에 각종 전극과 유전체막, MgO 보호막, 형광체막 등이 형성되어 있고 아르곤(Ar), 네온(Ne), 크립톤

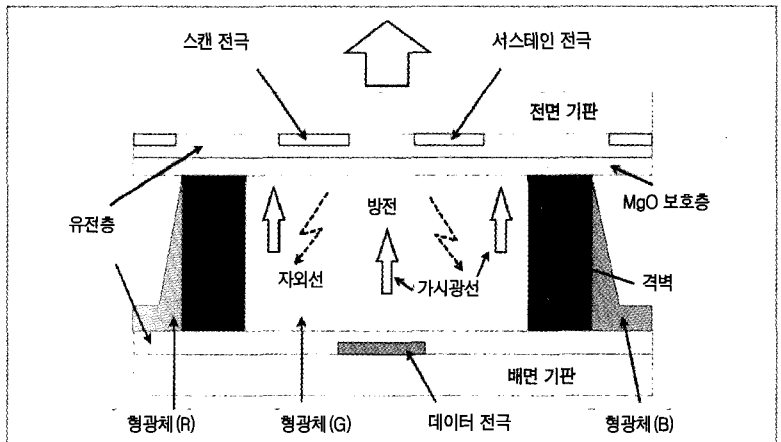


그림 1 PDP 방전 Cell의 단면 구조 및 기본 원리

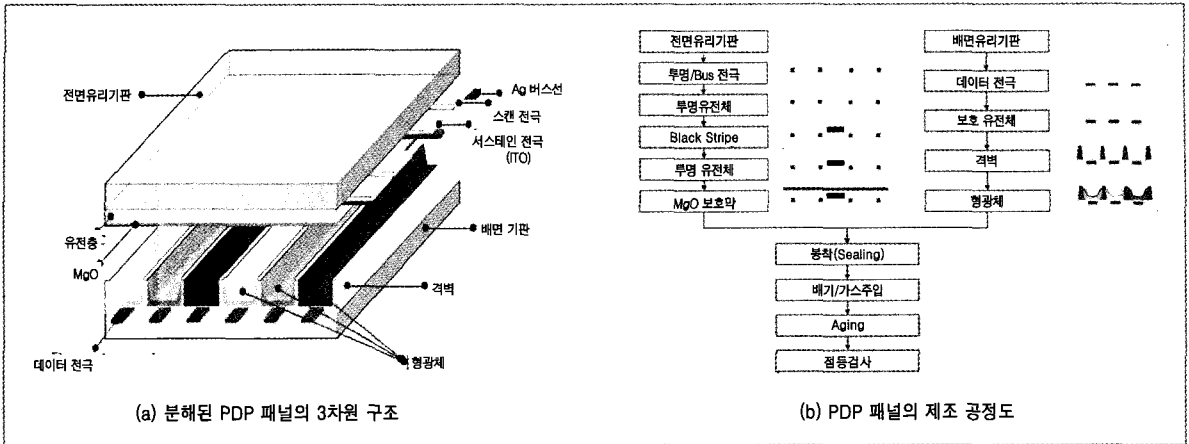


그림 2 PDP 패널의 3차원 구조 및 제조 공정도

(Xe) 등의 방전 가스가 혼합되어 채워져 있는 구조로 되어있다. 외부 회로에서 전기 신호를 입력하면 수많은 방전 셀에서 방전 가스가 플라즈마 상태로 변화하면서 자외선을 방출하게 되고, 형광체가 이 자외선을 흡수하여 여기(excited)되면서 가시광을 방사함으로써 화상을 구현하게 된다.

PDP 패널의 3차원 구조와 제조공정의 흐름도를 그림 2에 나타내었다. PDP 패널의 제조공정은 크게 기판공정인 전공정, 패널(panel)공정인 후공정 및 모듈공정으로 구분된다. 기판공정은 화상이 보이는 전면유리기판(front glass plate)에 scan 전극, bus 전극, 투명 유전체막, black stripe 및 MgO 보호막 등을 형성하며, 배면유리기판(back glass plate)에 address 전극, 백색 유전체막, 격벽 등을 형성하고 형광체를 도포하는 공정이다. 패널공정은 전면

및 배면기판을 봉착하고 배기한 다음 다시 방전 가스를 주입하는 공정이며, 모듈공정은 전극, 제어기, 전원 등을 연결하는 공정이다.

PDP 패널의 양산라인에서는 여러 가지 예상치 못한 불량들이 발생하는데 단시일 내에 불량 원인을 밝혀 내고 해결하는 것은 PDP 패널의 생산성 증대에 직결되는 매우 중요한 연구이다. 그런데 양산라인을 멈추고 실험으로 그 원인을 규명한다는 것은 막대한 경영손실을 초래하므로 거의 불가능하며 FEM(Finite Element Method)에 의한 구조 해석과 전자기장 해석, CFD에 의한 열/유동 해석 등의 CAE(Computer-Aided Engineering) 기술에 의한 해결방법을 그 대안으로 채택하고 있다. 한편 PDP 양산라인을 증설할 때 다면취 공법(한 장의 초대형 유리 원판에서 여러 장의 PDP 패널을 생산하는 공법)을 적용함으로써

각종 설비들이 초대형화 되면서 국내외 어느 설비업체에서도 제작해 본 경험이 없어 설비의 사양(specifications)을 검증할 방법이 없는 실정이다. 설비업체를 선정하고 설비를 제작하기 전에 설비의 사양을 정량적으로 예측하고 검증하는 데에도 CAE 기술을 유용하게 적용하고 있다.

이 글에서는 당 연구소에서 이미 완료했거나 진행 중인 PDP 제조공정 및 설비개발과 관련하여 구조 해석, 열/유동해석, 전자기장 해석 등 다양하게 수행한 해석들 가운데, 상용 소프트웨어인 FLUENT™와 FLOW3D™를 사용한 CFD(Computational Fluid Dynamic)를 적용한 대표적인 사례를 몇 가지 소개하고자 한다.

노광기 냉각 시스템 해석 및 설계

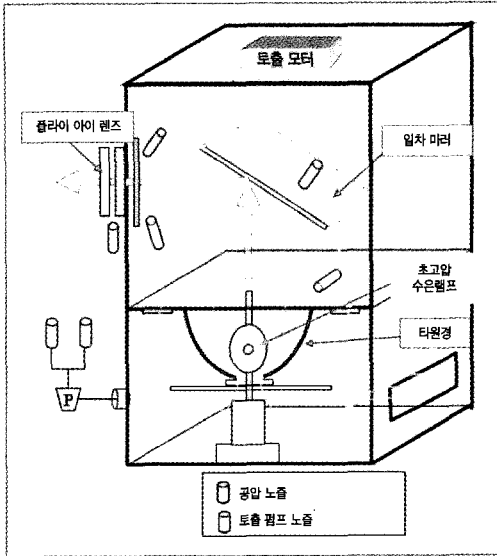


그림 3 노광기의 Lamp House 구조

house를 빠져나
가서 노광을 하게
된다.

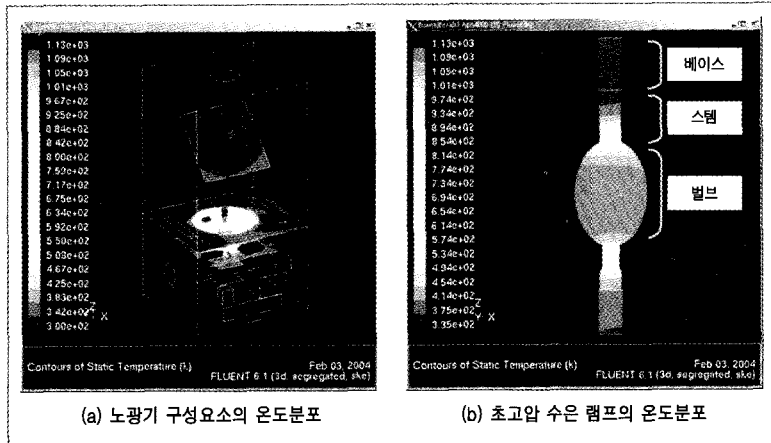
다면취 공법을
적용하는 PDP 양
산라인을 증설할
때 세계 최초이자
최대 크기의 초대
형 노광기를 개발
할 필요가 있었다.
노광기 광원으로
고용량의 초고압
수은 램프를 사용
함에 따라 램프에
서 굉장히 많은 열

만족하는 냉각시스템을 설계해야
했다.

약 한 달 정도의 단기간 내에
개념 설계안부터 출발하여 최적
의 냉각시스템 설계안을 제시하
고자 다음과 같은 해석모델을 시
도하였다. 우선 수은 램프 내부는
플라즈마를 동반한 매우 복잡한
물리/화학적 현상이 일어나지만,
노광기 전체 scale 대비 램프의
scale은 매우 작고 또 램프 자체
를 설계하는 것이 아니므로 램프
내부의 정확한 플라즈마 해석을
하는 대신 램프 내면에 heat
flux를 경계 조건으로 주어 노광
기 전체에 대한 유동 및 전도, 대
류, 복사 열전달 해석을 하였다.
그리고 heat flux 양은 램프 업
체에서 제공하는 램프의 총
electric power 중 복사 에너지
와 열에너지 분율에 관한 데이터
(data)를 근거로 정하였다. 이와
같은 해석모델로 해석 결과의 정
확성을 알아보기 위하여 electric
power가 작은 램프를 장착한 노
광기에 대하여 FLUENT™를 사
용한 해석결과와 램프 온도의 측
정결과를 서로 비교하였는데 약

10% 정도의 오차를 보이는 만족
할 만한 결과를 얻었다. 그림 4
에 열유동 해석결과인 lamp
house의 구성요소 및 수은 램프
의 온도분포를 나타내었다.

해석모델의 정확성을 검증한
후 여러 가지 냉각시스템 설계안
에 대하여 각각 열/유동 해석을
수행하고 속도분포, 압력분포 및



(a) 노광기 구성요소의 온도분포

(b) 초고압 수은 램프의 온도분포

그림 4 노광기 Lamp House에 대한 열유동 해석 결과

노광기는 각종 전극 형성공정
에서 PR(Photo Resister) 등을
노광할 때 사용되는 설비다. 그림
3에 노광기 구조를 나타내었는
데, 램프(lamp)에서 방사된 광은
타원경에 의해 집광된 후 노광에
필요한 파장의 beam만 일차 미
러로 입사 및 반사되어 fly eye
lens를 통과한 다음 lamp

이 발생할 것으로 예측되었으며,
노광 성능 및 설비의 신뢰성 확
보를 위해서는 램프 및 노광기
전체를 냉각하기 위한 냉각시스
템 설계가 매우 중요한 사항이었
다. 특히 온도차에 의한 램프의
crack을 방지하고자 램프의 원
주방향으로 온도가 균일하고 최고
온도는 램프 제작업체의 사양을

온도분포를 계산하여 분석한 다음, 램프의 crack에 가장 안전한 온도분포를 얻는 최적의 냉각시스템을 선정하였는데, CFD를 적용함으로써 실험횟수를 최소화하고 개발기간을 단축할 수 있었다.

격벽 공정의 Sand Blasting Nozzle에 의한 유동해석

Sand blasting에 의한 격벽 형성 공법은 그림 5에 나타난 바와 같이 먼저 격벽재를 기판 전체에 코팅(coating)한 다음 그 위에 감광성 필름(DFR : Dry Film photo-Resist)를 laminating 하고 현상을 하여 격벽의 pattern을 새긴다. 그 다음 sand(CaCO나 SUS 재질의 고체입자)를 공기 유동에 부유시키고 노즐을 사용하여 높은 압력으로 분사시켜 노출된 격벽재를 깎아 내는 방법으로 격벽을 형성한다. 그런데 이 공법은 노즐 출구에서 sand가 균일한 밀도로 분사되어야 균일한 격벽 형상이 만들어진다. 또한 노즐 안에서 sand가 기류와 와류에 말려 정체되면 sand 입자가 응집되고 이러한 입자가 분사되면 격벽 형상에 불량을 유발하기도 하는데, 이와 같은 문제들을 해결하기 위한 노즐 형상 설계에 CFD를 적용하였다.

Sand blasting nozzle에 대한 유동 해석은 기체와 고체입자

(연마제)의 이상유동(two-phase flow) 해석이다. 이 고체입자의 volume fraction이 약 10% 이하이면 유동장을 계산한 다음 lagrangian formulation을 사용하여 기류 내에서 입자의 궤적을 계산하게 된다. 그림 6에 Sand blasting 노즐에 대한 이상유동 해석결과 중 고체입자의

하여 최적의 노즐 형상을 설계하는데 CFD를 유용하게 이용할 수 있었다.

Sand blasting 공법은 격벽의 pattern을 새기기 위한 공정이 복잡하며, 격벽재가 미세한 분말 상태로 제거되므로 주위의 환경을 오염시킬 뿐만 아니라 격벽재에 부착된 sand를 제거하기

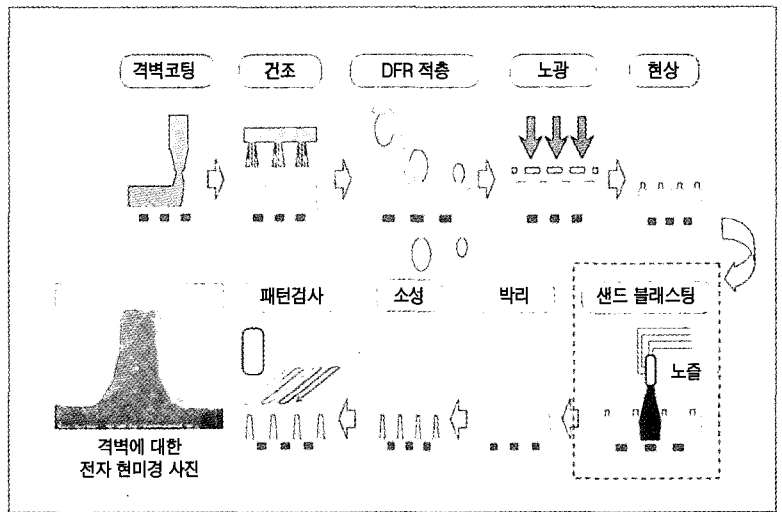


그림 5 샌드 블래스팅에 의한 PDP 격벽 형성 공정도

궤적을 나타내었다.

노즐 내부에서 유동의 circulation이 발생하지 않도록 하는 여러 가지 노즐 형상 설계안에 대하여 각각 유동해석을 한 다음, 유동장 및 연마제 거동을 가시화하고 분석

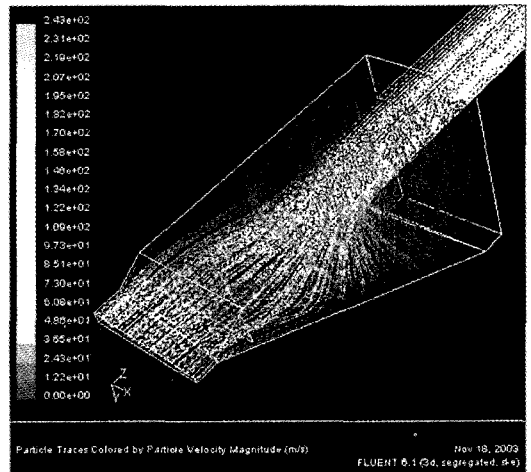


그림 6 샌드 블래스팅 노즐에 대한 이상유동 해석결과 (고체입자궤적)

위한 별도의 세정 공정이 필요하다. 또한 이 공정은 격벽의 형성에 따른 많은 시간이 소요되며 격벽재의 2/3 정도를 버려야 하므로 회수 및 재생이 불가능하여 원가가 높다. 특히 HD TV용 PDP panel을 제조하기 위하여 현재 많은 PDP 생산업체들이

etching 공법이나 감광성 paste 공법에 의한 격벽 형성 공법을 도입하고 있다.

MgO 증착 공정에서의 희박기체 유동해석

MgO 보호막은 유전층을 보호하

고, 방전 전압, 전압 마진(margine), 지연 시간 등에 영향을 주는 이차전자 방출계수를 증가시키는 역할을 한다. 일반적으로 MgO 보호막은 그림 7에 나타난 설비에서 기판을 이송하면서 진공증착법으로 약 700nm 정도의 두께로 형성한다. 그런데 기판 전체에 걸쳐 MgO 박막이 균일하게 형성되어야 하는데 다면취 공법을 도입함에 따라 MgO 보호막의 uniformity 문제가 심각하게 대두되었다. 한편 MgO를 증착할 때 고진공의 MgO 증착실에 미량의 수소, 산소, 아르곤 등의 가스를 주입하는데 이러한 가스들이 물리화학적으로 MgO 보호막 형성에 많은 영향을 준다는 것은 현상적으로 알지만 어떤 가스 분자가 어떠한 영향을 주는지 그 메커니즘을 명확하게 밝힌 연구가 없다. 그래서 증착실 내에서 이들 가스의 압력 및 농도분포를 계산하여 간접적으로 그 영향을 판단해 보고자 CFD를 적용하였다.

MgO 증착실 내부는 고진공이기 때문에 연속체 기반의 유체역학을 그대로 적용하여 해석할 수 없고, 대신 희박기체 이론에 바탕을 둔 slip 경계조건을 적용하여 유동해석을 해야 한다. 이때 slip 경계조건 적용 여부는 평균자유경로(λ)와 특성길이(L)의 비인 Knudsen 수(λ/L)로 판단한다.

상용 소프트웨어인 FLUENTTM로 수십 mTorr(1Torr =

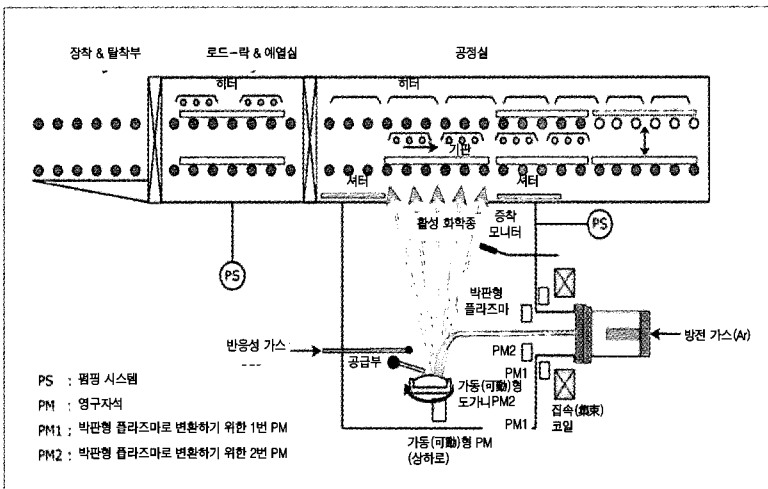


그림 7 PDP MgO 증착 설비

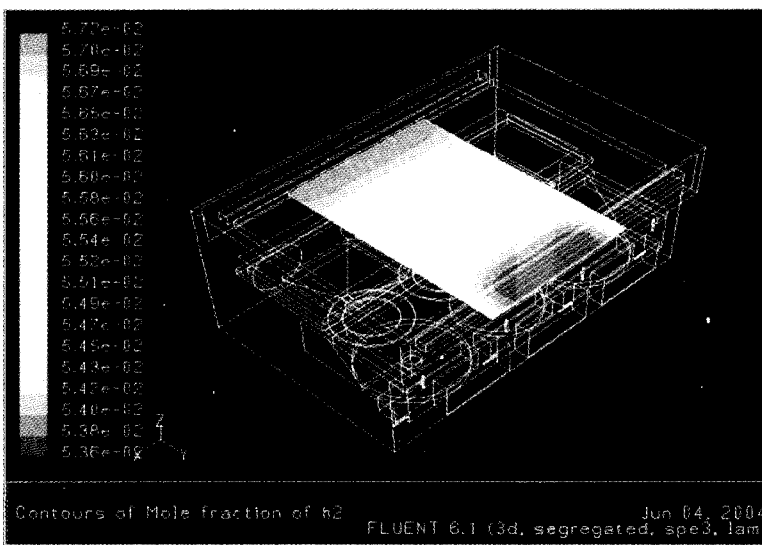


그림 8 PDP MgO 증착실에서 희박기체 유동해석 결과(기판표면에서 수소의 물 분을 분포)

1,267Pa)의 압력까지 해석할 수 있으며, 질량 보존식, slip 경계 조건을 적용한 운동량 보존식, 에너지 보존식 및 수소, 산소, 아르곤 등의 농도분포를 계산하기 위한 species transport 식을 지배방식으로 구성하여, 가스 유량, 가스 주입구 위치, 진공펌프의 배기압 등을 변화시키면서 해석을 수행한 다음, 기판 표면에서 수소, 산소, 아르곤 등의 농도 및 분압 분포를 비교/분석하여 MgO 증착막의 비대칭성 여부를 살펴보았다. 그림 8은 MgO 증착 공정에서 유동해석의 대표적 결과인 기판표면에서 수소의 몰 분율 분포를 나타내고 있다.

코팅 공정에 대한 유동 해석 및 설계

다면취 공법을 적용하는 PDP

양산라인에서 격벽, 격벽 PR, 유전체 등을 형성할 때 채용하는 대면적 코팅공법은 그림 9와 같이 간격(gap)이 좁고 길이가 매우 긴 slot die를 PDP 기판 위에서 일정한 간격으로 움직이면서 코팅액을 균일하게 분사시켜 주는 것인데, 저렴한 비용으로 신속하게 기판 전체를 도포할 수 있어 PDP 패널의 생산성 향상에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. 이러한 코팅 공법에서 무엇보다도 중요한 것은 코팅액이 기판 전체에 걸쳐 매우 균일한 두께로 도포되어야 한다는 것이다. 코팅 두께의 균일도(uniformity)를 확보하려면 결국 die의 폭 방향과 진행방향으로 안정되고 균일한 유량이 토출되도록 Die의 형상을 설계하여야 한다.

Slot die의 형상 설계에 CFD를 적용할 때 크게 두 가지 해석 모델로 접근하고 있다. 첫 번째

모델은 die 내부만 해석영역으로 잡아서 3차원 유동 해석을 하는 것인데, die 폭 방향의 코팅 균일도 확보를 위하여 die 내부의 유로 형상을 설계하는 모델이다. 두 번째 해석모델은 die와 기판을 모두 포함한 2차원 자유표면 유동해석을 하는 것인데, 코팅액이 die lip에서 토출하여 기판에 코팅되는 과정 전체를 해석하는 것으로, 안정된 자유표면이 되는 die lip의 형상설계와 안정된 코팅을 할 수 있는 공정 변수의 허용 범위를 나타내는 코팅 윈도우(coating window)를 도출하기 위함이다. die 내부의 3차원 유동해석은 FLUENT™를, 2차원 자유표면 유동해석은 VOF(Volume Of Fluid) 방법에 강점이 있는 FLOW3D™를 사용하고 있다. 한편 PDP에 사용되는 코팅액은 대부분 점도가 shear rate에 따라 변하는 비뉴턴성 유체

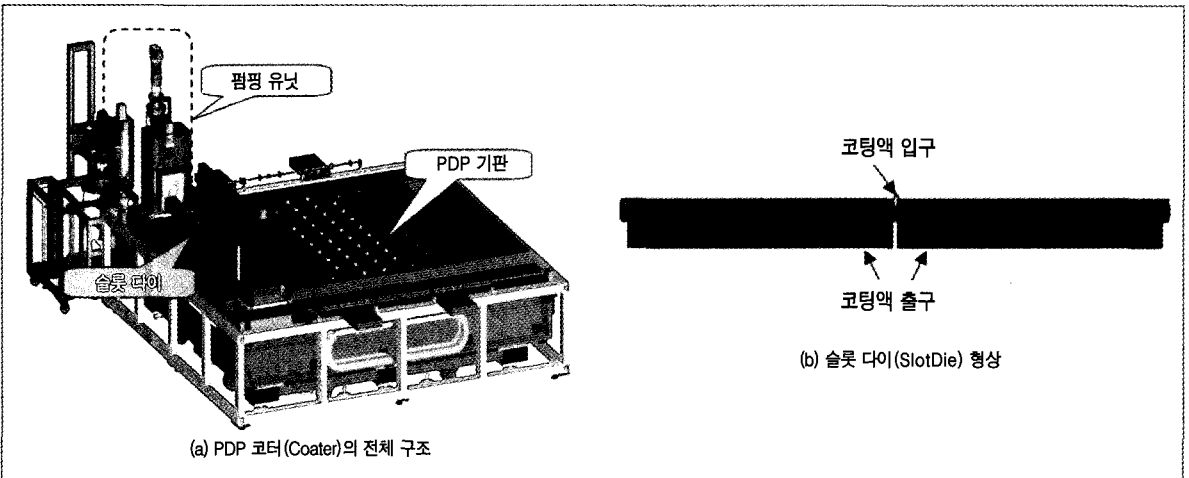


그림 9 PDP Coater의 전체 구조 및 Slot Die 형상

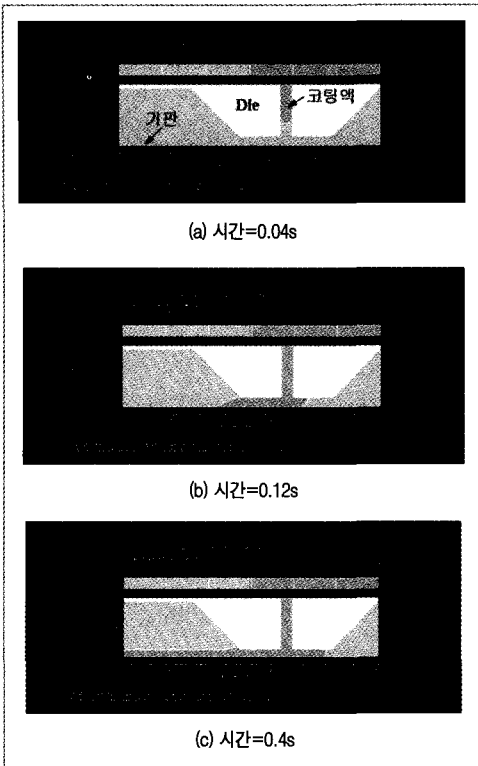


그림 10 PDP 코터(Coater)에 대한 시간의 경과에 따른 2차원 자유표면 유동해석

(Non-Newtonian Viscosity Model)을 세워서 해석에 반영하고 있다. 그림 10은 FLOW3D™를 사용하여 2차원으로 해석한 결과인데 코팅액이 slot die에서 토출되어 기판에 코팅되는 과정을 시간의 경과에 따라 나타내고 있다.

이상 소개한 사례 외에 형광체 dispenser 공법, 건조 공정, 소성 공정, 배기 공정, aging 공정 등에도 CFD를 적용하고 있다. PDP 제조 공정은 매우 복잡한 물리화학적 현상

엄밀한 해석을 할 시간적인 여유가 없으므로, 적절한 가정하에 어느 정도의 정확성을 희생하면서 시간과 경비를 모두 고려한 해석 모델을 개발하면 소기의 목적에 부합하는 결과를 얻을 수 있다. 끝으로 PDP가 치열한 평판 디스플레이 시장에서 시장 점유율을 높이기 위해서는 가격경쟁력에 결정적인 영향을 미치는 재료와 공정 및 설비 등에 대한 독자적인 기술개발이 선행되어야 한다. 그런데 현재 한국은 디스플레이 제품의 세계적인 생산국이지만 핵심 부품과 재료는 수입에 의존하는 비중이 높으며, 주요 공정의 설비 기술은 일본 등의 선진업체에 비해 상대적으로 뒤쳐져 있는 실정이다. 차세대형 대화면의 Full-HD PDP TV의 실용화를 위한 생산기술을 선점하는데 산·학·연 공동개발과 컨소시엄 구성에 많은 관심과 참여가 요구된다.

(Non-Newtonian Fluid)인데, Rheometer로 점도를 측정한다음 적절한 비뉴턴 점도 모델

이 공존하므로 multi-physics 해석을 해야 보다 정확한 해를 얻을 수 있지만 산업현장에서는

기계용어해설

재순환 배기(Recirculated Exhaust Gas)

연소장치의 배기 배출물중 NOx 배출물을 저감시키기 위해 사용하는 EGR(Exhaust Gas Recirculation) 혹은 FGR(Flue Gas Recirculation)과 같은 배기 순환 방법에 있어서 연소실내로 재순환되는 배출가스를 의미한다.

미세유동 칩(Microfluidic Chip)

바이오 물질을 분석하는 데 사용되는 소형화되고 자동화된 마이크로 칩을 의미한다.

유연다물체(Flexible Multi-body)

강체가 아닌 변형의 효과를 고려하는 유연체가 조인트 등에 의해서 구속된 운동을 하는 여러 물체로 구성된 시스템을 의미한다.