

환경친화적 페브라운관 세정시스템 개발

송준엽*, 강재훈*, 허성필**, 이화조***

Environmentally-Conscious Cleaning System for End-of-Life CRT

Jun Yeob Song*, Jae Hun Kang*, Sung Pil Heo** and Hwa Cho Yi***

ABSTRACT

In this study, we suggest a environmentally-conscious and dry cleaning process mechanism for the more useful recycling of end-of-life CRT, and also develop a prototype cleaning system to verify the faulty of the designed mechanism. This system accommodates the specifications of 14~32" end-of-life CRT. In experimental result, it is expected that the developed system improve the productivity up to 10% and decrease the loss rate of cleaning glass 3~4 times than the glass blasting methods.

Key Words : End-of-life CRT(페브라운관), Dry Cleaning(건식세정), Environmentally-conscious(환경친화), Abrasive-jet(연마제분사), Panel(전면), Funnel(후면)

1. 서론

산업사회의 발달은 인류에게 풍요로운 물질공급과 삶의 질을 향상시키는데 기여한 반면 자원에너지의 고갈, 환경오염 및 산업폐기물 발생 등의 환경문제를 야기시키고 있다. 선진국들을 중심으로 이와 같은 환경위기의 문제점을 해결하기 위해 정치적, 사회적, 경제적 돌파구를 모색하는 것과 함께 최근 들어서는 자원재생 기술측면에서도 접근할 수 있는 관련 기술개발에 착수, 시도하고 있는 실정이다.

인류사회의 문명화에 있어 공언한 대표적인 산물 중의 하나가 TV라고 할 수 있는데, 그 보급정도(칼라 TV기준)는 국내현황만 파악하여도 1987년 이후 3,000만대를 상회하고 매년 5%이상의 확산보급을 예측하고 있다. 그러나 최근의 소비형태가 다양화되고, 대형화되면서 제품수명(Life Cycle)이 짧

아져 매년 상당량의 TV가 폐기되고 있는 실정이다. 한국자원재생공사 보고에 의하면 국내 폐TV의 배출잠재량은 2000년 기준으로 300만대에 육박하는 것으로 보고 있다¹⁾.

따라서 이러한 폐자원을 적절히 처리하여 재자원화하는 것이 점차 필수불가결하게 요구되고 있다. TV는 크게 몸체, 브라운관, 회로기판으로 구성되며 금속류(철, 알루미늄, 구리), 플라스틱류 및 유리 등의 성분 재료가 적용되나 최근까지 회수나 재활용이 잘 되지 않는 것이 CRT와 PCB인 것으로 보고되고 있다²⁾.

유리는 TV를 구성하는 재질 중에서 50~60% 이상을 차지하고 있어 재자원화할 주요 대상이지만 CRT의 부분(전면/후면)별 재질별 분리와 각종 유해(형광)물질의 처리를 위한 환경친화적인 세정기술이 도입되지 못하는 한편 기술생산성이 경제성을 수용하지 못하여 폐CRT의 재자원화를 지연시키는

2002년 6월 18일 접수

* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부

** 송내사

*** 영남대학교 기계공학과

원인으로써 제공되고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존 수작업에 의해 부분별로 분리하고, 파쇄, 재질별 분류에 의한 CRT처리공정을 환경친화적 처리기술로 구상한 건식 세정메커니즘의 설계 및 수율 극대화를 고려한 자동화 처리 전용시스템의 개발연구를 시도하였다.

2. 폐CRT 세정 관련기술의 현황

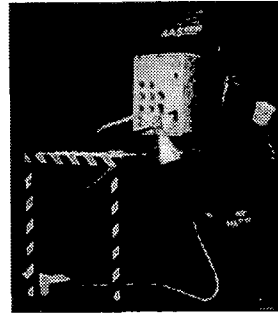
일반적으로 유리의 세정방식은 습식과 건식공정방식이 모두 검토, 활용되고 있다. 대표적인 습식 세정방식으로는 1) Panel/Funnel별로 분리, 파쇄 후 초음파 세정하는 방법, 2) 각각의 유리를 물로 세정, 파쇄하여 카레트화하는 방법, 3) NaOH 혹은 불산을 희석한 세정액을 사용하는 방법 등이 도입되고 있다. 그러나 습식 세정방식은 작업자에 유해한 산액을 사용하는 등 그다지 환경친화적인 공정이 아니며, 처리제품의 품질을 보증하기 위해 세정공정을 여러 번 거치는 등 자체적으로 완전한 처리에 문제가 있는 것으로 보고되고 있다. 건식세정방식으로 독일 VICOR사에서 사용하고 있는 Mechanical Dry Method, 기계적인 진공청소기를 이용한 형광물질 제거방법이 일부 활용되고 있다. 그러나 이 방법들은 Panel 유리에 도포되어 있는 형광체 제거는 가능하지만 후면이 도포되어 있는 Funnel 세정에는 활용이 불가능하여 흑백TV의 브라운관 세정에만 국한적으로 사용하고 있다.

따라서 타 분야에서 건식세정방식으로 활용되고 있는 방법, 1) 녹이나 스케일의 제거용으로 활용되고 있는 Abrasive-jet Machining방법, 2) Silica를 이용한 도금층의 최종 다듬질공정용 혹은 미소한버어 제거용으로 활용되고 있는 Sand Blasting방법 및 3) Hard Glass Media를 사용한 Glass Blasting방법 (Fig. 1참조)의 활용 가능성을 우선 검토하여 보았다³⁾.

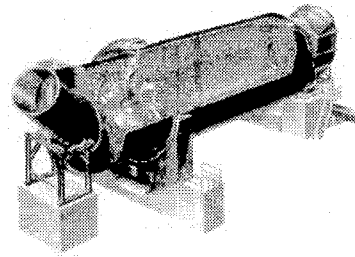
그 결과 본 연구에서는 사용 연마제의 재사용성, 불순물과 유리성분의 분리성, 세정유리의 Loss를 최소화 등의 요구조건을 수용할 수 있는 최적방법으로 Abrasive-jet세정메커니즘을 도입하게 되었다.

3. 환경친화적 건식 세정시스템 개발

3.1 세정용 연마제의 선정



(a) Sand blasting



(b) Glass blasting

Fig. 1 Representative method of cleaning

건식세정용 연마제로서 적용할 수 있는 대상재질들을 살펴보면 일반적으로 샌드 블라스팅 공정에 적용되는 실리카 계열의 샌드가 있지만 장기적이고, 지속적인 측면에서 재활용성이 불리하고, 상대적으로 미세하게 요구되는 크기의 제어가 곤란하며, 유사한 기계적인 물성치를 갖고 있어 페브라운관의 세정제로서는 부적합하다고 할 수 있다. 알루미늄 가넷 파우더는 재활용성이나 물성치가 우수하며, 비교적 균일한 크기의 제어가 가능하나 산화알루미늄 성분이 함유되고 실리카가 주성분이 아니므로 혼합성분 외의 기타 성분을 엄격히 제한하는 고부가가치의 CRT 재활용에 있어서 적용하는 것은 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 Table 1, 2와 같이 석영성분을 주로 하여 효율적으로 재활용할 수 있으며, 페브라운관의 소재와 유사하고, 비중선별이 용이한 고순도 글라스 미디어를 세정용 연마제로 채택하여 재활용성과 선별성을 극대화시킬 수 있도록 하였다.

Table 1 Comparison of material properties

Material properties	Silica based glass	Glass media
Density(1bs/ft ³)	120	183
Specific gravity	2.8	5.4
Hardness(Moh)	3.5	7.5

Table 2 Comparison of principal ingredient

Composition	Silica based glass	Glass media
SiO ₂	36	98
Fe ₂ O ₃	2	1
Al ₂ O ₃	20	>0.1
FeO	30	-
TiO ₂	2	>0.8
MnO	1	>0.03
MgO	7	>0.05
CaO	2	-

3.2 브라운관의 사양조사 및 분석

본 연구에서 대상으로 하고 있는 브라운관의 규격은 오실로스코프 혹은 각종 계측장비에 붙어 있는 소형 CRT를 포함하여 4인치에서 32인치까지 다양하다. 브라운관을 구성하는 전면부를 Panel(판넬)이라 하고 후면부를 Funnel(펀넬)이라고 호칭하는데 기준은 가로/세로의 크기와 각각의 높이로 구성된다. 현재 브라운관의 경우 거의 국내생산이 가능하며 제조사에서 생산하고 있는 브라운관이 앞으로의 폐기수요이기 때문에 보다 유연성 있게 대응할 수 있는 세정장치의 제작을 위하여 국내 제작사를 중심으로 브라운관의 규격을 조사하였다. Fig. 2는 본 연구에서 조사된 대표적인 브라운관 Panel부의 규격을 나타낸 것으로 인치별 주요사양이 Table 3이다.

브라운관의 크기는 대각선의 길이로 표시하는데 이는 가로/세로의 크기에 의해서 결정된다. 브라운관이 대형화되고 제작 및 가공기술이 발달됨에 따라 새로운 평면화 기술 및 유리 강도기술이 적용되어 크기에 따라 높이가 증가하는 완전한 선형은 아니지만 대체로 가로/세로의 크기가 증가하면 Panel의 높이가 증가함을 알 수 있다. 이 분석자료

는 세정장치를 설계할 때 Panel부의 높이에 따라 노즐의 Z축 높이를 결정하는데 반영하였다.

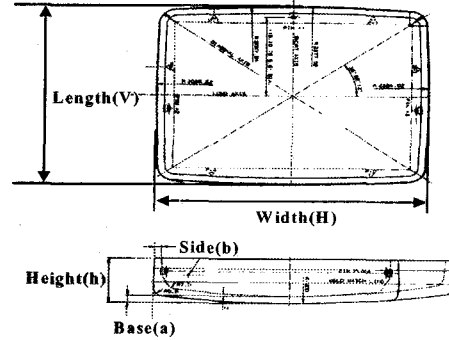


Fig. 2 Standard of CRT panel

Table 3 Specifications of CRT panel (단위 : mm)

Size(Inch)	15	17	20	21	25	29	
Width(H)	322.84	364.76	432.00	448.28	516.00	595.74	
Length(V)	253.90	285.36	326.24	348.66	400.68	463.34	
Height(h)	65.00	70.10	94.90	90.00	93.00	111.00	
Thick-ness	Base(a)	10.50	11.30	12.20	12.00	12.50	13.50
	Side(b)	8.50	9.00	9.20	9.20	9.60	11.40

특히 브라운관 Funnel의 규격 중 높이(h)는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 절단장치에서 전자총을 제거한 높이인 Neck Seal Line을 기준으로 삼았다. Panel부와 Funnel부는 접합물질에 의하여 접촉되는데 Funnel의 인치별 주요사양이 Table 4이다.

Table 4 Specifications of CRT funnel (단위 : mm)

Size (Inch)	15	17	20	21	25	29
Width (H)	324.30	366.62	432.76	449.64	516.00	595.10
Length (V)	255.24	287.50	327.06	349.94	400.80	462.74
Height (h)	194.80	203.40	237.60	244.70	199.50	212.61
Thickness	9.0	9.3	9.3	10.2	11.8	12.3

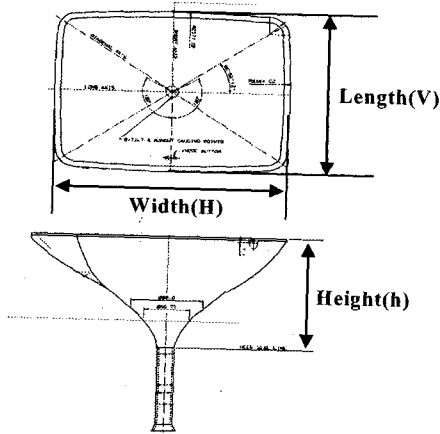


Fig. 3 Standard of CRT funnel

이상의 분석된 결과를 보면 브라운관의 사이즈(인치)가 증가할수록 가로/세로와 높이가 증가하나, 평면 브라운관 등의 새로운 기법 때문에 Funnel 부의 높이가 21인치와 25인치 사이에서는 줄어드는 경향을 보이고 있으며, 다른 제조사에 따라서도 근소한 차이를 보이고 있다.

3.3 연마제 분사식 제거세정공정 설계 및 해석

본 연구에서 검토한 연마제 분사식 제거세정메커니즘을 공정화시킨 구성도가 Fig. 4이며, 제시된 세부공정은 이후에 기술할 세정시스템의 주요 유니트로서 구성되게 된다.

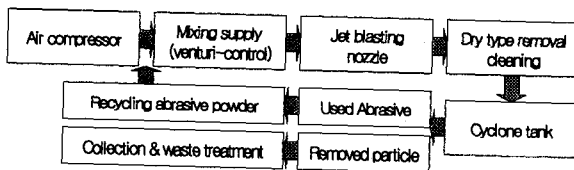


Fig. 4 Dry cleaning process of abrasive-jet removal method

특히 2장에서 고려된 선정조건 중의 하나인 유리의 세정손실률, 즉 세정제거량(Q)⁴⁾를 검토하면 다음의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \chi Z d^3 v^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\rho}{12H_\mu} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

여기에서, Z = 단위시간당 작용하는 연마제의 개수 (ea/s)

d = 연마제의 평균직경(mm)

v = 연마제의 분사속도(m/s)

ρ = 연마제의 밀도(g/cm³)

H_μ = 대상물의 경도(kg/cm²)

χ = 상수

상기 식(1)를 이용하여 본연구 3.1절에서 선정한 연마제, 글라스 미디어의 특성치 고정값(d, ρ, H_μ)와 세정조건 변화값(Z, v)에 따른 이론적인 세정제거량을 구하였다. 각 경우에 대한 조건의 변화를 Table 5에 나타냈으며, Z 는 노즐을 통하여 단위시간당 공급되는 유량과 유속을 감안하는 한편, 오리피스 혼입률을 1%로 설정하여 연마제의 평균크기로 내충되어 있는 개수로 산정하였다.

Table 5 Verification conditions for cleaning mechanism

Parameter	Case condition				
	1	2	3	4	5
Z	2,300	3,450	4,600	5,750	6,900
d	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
v	10	15	20	25	30
ρ	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
H_μ	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Q	14	23	36	52	71
Rt	9	15	24	35	47

Table 5에 제시된 것처럼 식(1)을 이용한 각 조건별 세정제거량(Q)의 산출결과인 14~71mm³/s를 유효 세정폭과 이송속도(3m/min)를 감안하여 제거두께(Rt)를 산정하면 약 9~47 μ m가 된다. 또한 이 결과를 연마제의 분사속도에 따른 세정 제거 두께층의 변화로 비교하여 Fig. 5에 나타내었다⁵⁾. 따라서 브라운관에 도포된 흑연층의 두께의 실제 측정치인 약 20~30 μ m를 감안할 때 세정제거공정 및 조건의 최적화를 위한 기본데이터로서 활용할 수 있음을 확인하였다. 또한 연마제 분사속도가 20m/s 이상일 경우는 세정제거층 두께가 비선형적으로 증대하며, 그 이하에서는 세정제거층 두께가 흑연도포층보다

적으므로 세정제거손실량의 억제와 효율적인 세정 제거화를 감안하면 적절한 연마제 분사속도가 설정 될 수 있음을 추정할수 있다.

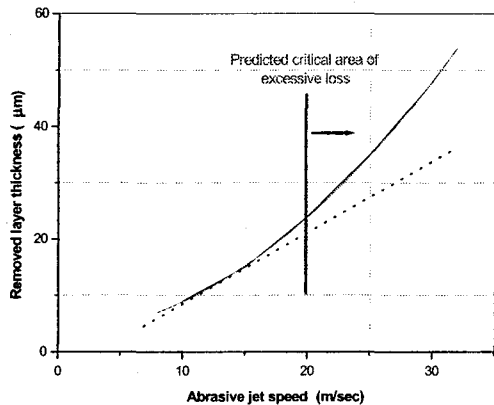


Fig. 5 Relationship of abrasive-jet speed and removed layer thickness

3.4 건식 세정시스템의 설계 및 제작

본 연구에서 제안한 건식 세정메커니즘과 대상으로 하고 있는 폐 CRT의 사양(크기) 및 형상 등을 고려하여 일차적으로는 기구학적인 공정을 수용하는 한편, 노즐갯수와 위치, 연마제의 분사각도와 속도 및 거리, 공기 공급량 등의 세정공정 조건을 적절히 변화하여 최적 조건 하에서 유연성 있게 활용할 수 있는 세정시스템을 설계·제작하였다⁵⁾⁶⁾. 개발된 세정시스템은 폐CRT의 Panel과 Funnel를 분리시키고, 전자총 및 밴드층 등을 제거하는 절단공정을 거쳐 분리된 Panel과 Funnel를 대상으로 한 후공정이다. 본 세정시스템의 전체 구성조립도와 제작된 사진이 Fig. 6이며, 시스템을 구성하는 세부 유니트들을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 세정 노즐부
- 2) CRT 세정이송 및 고정부
- 3) CRT 이송용 Wire Conveyor
- 4) 집진 및 싸이클론 장치부
- 5) Control Panel

세정 노즐부는 크게 노즐과 장착치구 및 세정을 위해 투입되는 CRT의 형상(크기, 높이 등)에 따라 노즐배치부위를 상하 이동시키는 Up/Down 운동부

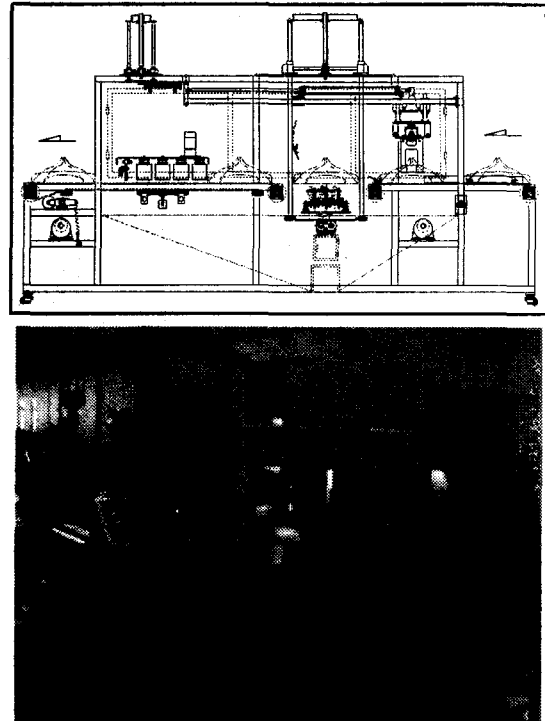


Fig. 6 Developed dry cleaning system

위로 구성되어 있다. 노즐유니트는 연마제 공급호스와 고압에어 공급호스가 연결되어 공기량에 의해 연마제 분사량(소모량)을 결정할 수 있도록 설계하고, 상·하좌·우 조정이 가능한 구조를 채택하였다. Fig. 7은 구성한 CRT외부 세정용 노즐부이며, Fig. 8은 CRT내부 세정용 노즐부의 구성사진이다. 2장에서 기술한 것처럼 흑연이 도포된 Funnel은 내·외부를 모두 세정하여야 함으로 Fig. 7에 제시된 것처럼 Funnel을 고정시켜 놓고 하단에 구성시킨 노즐부가 180° 반복 회전하며 연마제를 분사시킬 수 있도록 하였다.

CRT 세정이송 및 고정부는 초기에 와이어 컨베이어에 놓여진 CRT의 세정작업을 위해 작업영역에 들어서면 자동 이동시 좌우로 이탈하는 것을 방지하고, 고압에 의한 세정작업 중의 흔들림이나 방향의 변경 등을 발생하지 않게 CRT를 고정시키면서 세정진행방향으로 전진시켜주는 역할을 한다. 특히, 이 부분은 이송 마찰력을 적절히 구현하는 한편, 취성이 높은 유리와의 구속력을 완화하기 위하여 폴리우레탄 고무재질로 표면이 코팅된 롤러를

사용하고, CRT의 크기(적용범위 : 14~32인치)에 따라 유연하게 자동 조절할 수 있도록 메커니즘을 구성하였다. 이 부분의 적용사진이 Fig. 9이다.

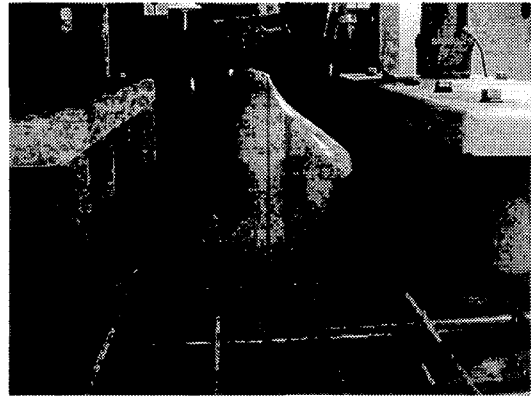
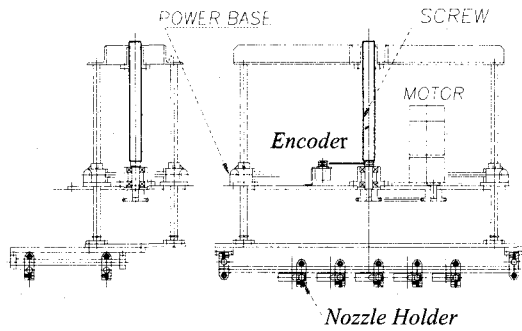


Fig. 9 Application of CRT feeding & fixturing mechanism

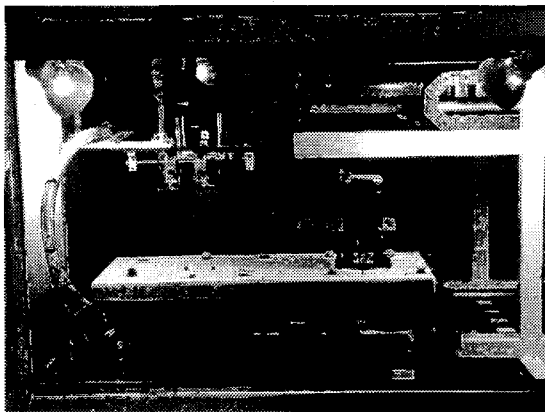


Fig. 7 Structure of nozzle part for CRT outside

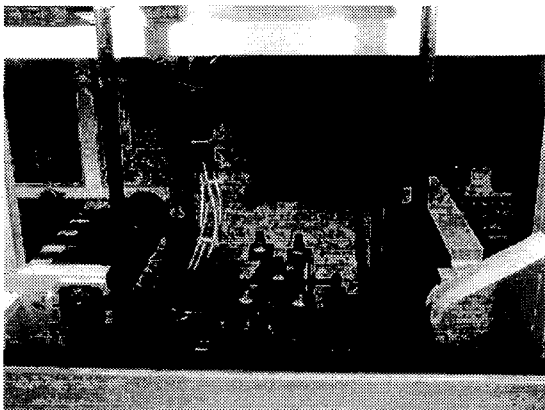


Fig. 8 Structure of nozzle part for CRT inside

4. 특성실험 및 고찰

본 절에서는 Fig. 10에 도식한 것처럼 연마제 분사식 세정공정의 최적조건을 설정하기 위해 다음과 같은 세정조건들을 변화하며 특성실험을 수행한 결과를 기술한다.

- 1) 단위노즐의 공압력(분사속도)
- 2) 세정면과 노즐선단의 거리
- 3) 노즐간격에 따른 세정범위

4.1 단위노즐의 공압력

브라운관의 이송 속도를 3m/min로 공급하며 브라운관 표면으로부터 노즐 선단까지의 수직 거리는 300mm로 설정한 후, 공압의 변화에 따라 세정되는 폭을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

Table 6에 나타낸 바와 같이 부가되는 공압을 4.0, 5.5, 7.0, 8.5 kg/cm²로 변화시키며 실험한 결과 공압이 높을수록 세정되어지는 폭이 넓어지고 세정 정도가 양호해 지는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 7.0 kg/cm² 이상의 공압을 부가하는 경우 약간의 편차는 보이고 있지만 세정폭에 있어서는 큰 변화를 확인할 수 없었다. 이러한 결과는 전체시스템의 가동, 즉 집진기, 세정노즐(10 여개)의 연마제 분사, 대상물의 이송 및 Gripping과 산란된 연마제의 집진 등에 40 HP의 공압이 소요되는 관계로 노즐당 투입되는 공압력을 최소화하면서 최적의 세정 폭을 확보하는데 반영시킬 필요가 있다. 따라서 본

실험에서는 7.0 kg/cm² 이상의 공압을 부가하는 경우에 세정폭의 변화가 두드러지게 나타나지 않으므로 7.0 kg/cm²를 최적 공압으로 추정할 수 있다.

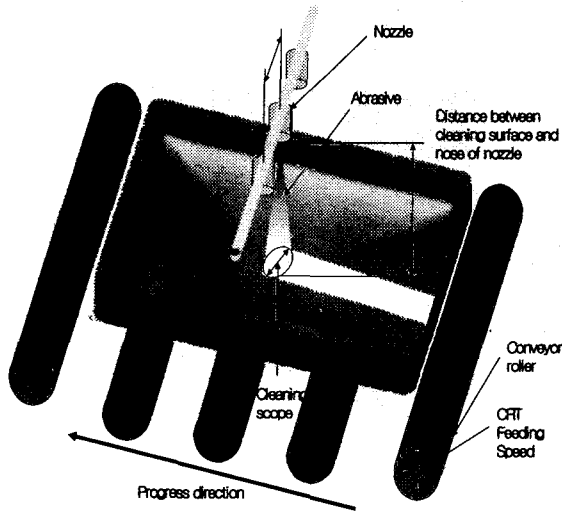


Fig. 10 Optimum parameter of dry cleaning mechanism

Table 6 Comparison of removed width area according to various pressure (단위 : kg/cm²)

Pressure	4	5.5	7	8.5
Removed width area	33mm	35mm	36mm	36mm

또한 3.3절에서 해석한 결과에 대한 실험적인 이송속도 50mm/s, 연마제 분사속도 25m/s(공압 : 7.0 kg/cm²)의 세정조건 하에서 20회 반복 세정을 실시한 후의 세정단면 형상과 유효 세정폭을 측정하여 보았다. 그 결과를 Fig. 11에 나타냈으며, 20회 반복 세정후에 실제 측정된 평균 세정제거 두께가 초기 기준면으로부터 약 0.53mm 정도로 형성되어 평균 제거두께가 약 26.5 μ m/회 정도로 이뤄졌다고 추정할 수 있다. 따라서 식(1)의 이론해석 시 설정한 세정 제거폭 약 30mm 하에서의 제거두께 24 μ m를 수용하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

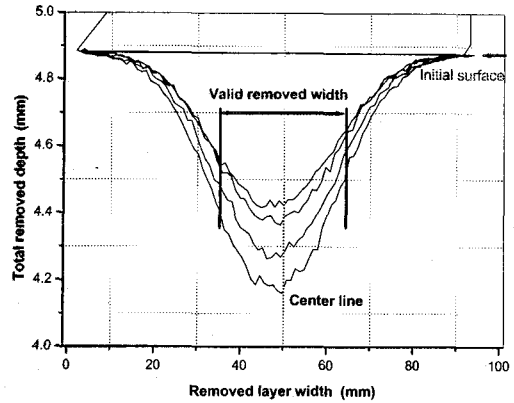


Fig. 11 Measured cross-section shape of removed width area

4.2 세정면과 노즐선단의 거리

브라운관의 이송속도를 3m/min로 공급하며, 7.0 kg/cm²의 공압을 부가하는 경우에 있어서 브라운관 표면으로부터 노즐 선단까지의 수직 거리를 230~383mm로 변화시키며 세정되는 폭을 파악하기 위한 실험을 수행하였다.

Fig. 12에 나타난 결과와 같이 브라운관 표면으로부터 노즐 선단까지의 수직 거리가 길수록 세정되는 폭이 넓어지나 360mm 이상이 되면 오히려 세정되는 폭이 좁아진다는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 브라운관 표면으로부터 노즐 선단까지의 수직 거리가 임계값 이상이 될 경우 공압이 확산 소실되어 연마제의 적정한 분사 각도를 형성하지 못하게 되므로 가속 충돌작용이 둔화되기 때문이라고 추정된다. 따라서 공압과 브라운관 표면으로부터 노즐선단까지의 수직 거리는 상응된 관계를 지니고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

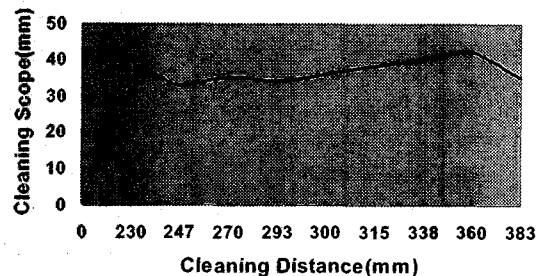


Fig. 12 Cleaning scope according to various distance between cleaning surface and nose of nozzle

4.3 노즐개수 및 노즐간의 간격

본 실험은 브라운관 이송속도를 3m/min, 공압 부가압을 7.0 kg/cm², 브라운관 표면으로부터 노즐선단까지의 수직 거리를 360mm로 각각 설정하고, 두 개의 노즐을 대상으로 노즐간의 거리를 30~50mm로 다양하게 변화시키며 불완전한 세정부위가 연마제의 간섭 분사작용으로 인하여 효율적으로 제거될 수 있는 조건을 설정하고자 하였다.

그 결과 노즐간의 간격이 50mm 정도로 벌어지면 세정부위는 확대(108mm)되나 양 노즐을 통하여 분사되는 연마제의 간섭작용에 따른 각 세정 폭 사이에 불완전한 세정부위가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 40mm 이하에서는 연마제의 간섭 분사작용이 적절하게 이뤄져 불완전한 세정부위 없이 효율적으로 세정(세정범위 : 96mm)이 이뤄지는 것도 확인(Fig. 13 참조)할 수 있었다.

한편, 본 실험결과에 의하면 노즐 1개를 사용하여 세정되는 면적은 평균 38mm 정도였으나 노즐 2개를 40mm간격으로 배치시켜 세정하였을 경우에는 96mm 정도로 2.5배 정도가 확대되었다. 이러한 결과는 단위노즐 사용시 불완전한 세정범위에 포함되던 부분이 복수노즐의 사용에 따른 중첩효과로 세정면적이 크게 늘어난다는 것을 제시하는 것이다. 따라서 29인치 브라운관(595.1*462.74mm)의 경우 가로방향으로는 6개, 세로방향으로는 5개 정도면 브라운관 전 면적을 수용한 세정이 가능할 것으로 추정된다.

5. 결론

본 연구에서는 페브라운관의 부가가치가 높고 효율적인 세정방법을 모색하기 위하여 환경친화적으로 적용할 수 있는 연마제 분사식 완전 건식세정 메커니즘을 제안하는 한편, 14~32인치 폐CRT의 규격을 수용하면서 제안한 메커니즘의 수용여부를 검증하기 위해 Prototype 건식 세정장치를 개발하였다. 개발한 시스템을 활용한 성능평가실험을 실시한 결과 기존 수작업에 비해 생산성이 10% 이상 증가하며, 특히 세정유리손실률에서는 기존의 습식 방법에 비해 3~4배정도의 감소효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, 향후에는 세정 최적화 조건, 세정노즐의 배치각도, 브라운관의 이송속도와 일차적으로 실시한 세정조건간의 상관관계를 규명하기 위한 세정실

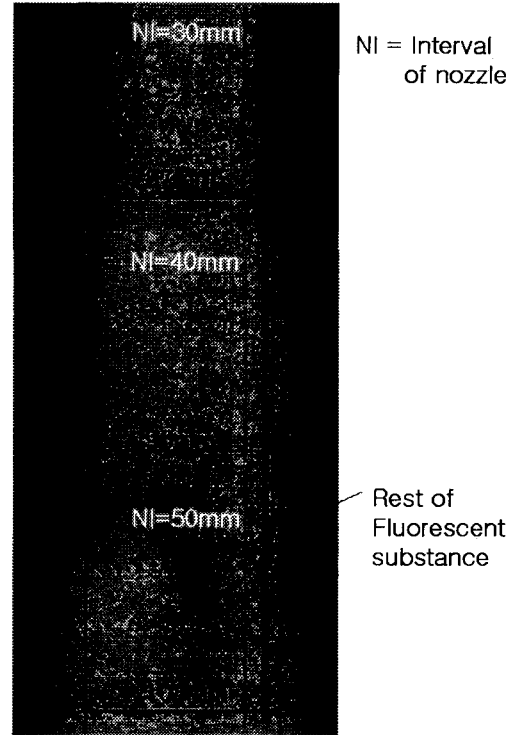


Fig. 13 Cleaning scope according to various intervals of nozzle

험을 추가적으로 실시하여 세정공정을 최적화하고 세정시스템을 보완하기 위한 연구와 개발한 시스템을 실용화 장비로서 발전시키는 관련연구를 지속적으로 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 한국폐기물학회, “폐컴퓨터(TV포함)의 효율적 회수 및 처리방안 연구,” 한국재생공사, 1998. 7.
2. 石田岩雄, “使用済みTVガラスのリサイクル技術,” セラミックス, Vol. 34-2, 1999.
3. 송준엽, 강재훈 외, “페브라운관 건식 세정방법 및 장치,” 특허출원 10-2001-0034514, 2001.6.
4. Paul S., Hoogstrate M., “Analytical and experimental modelling of the abrasive jet machining of ductile materials,” Jr. of Materials Processing Technology, Vol. 73, pp. 189-199, 1988.

5. 송준엽, 강재훈 외, “폐CRT 건식 세정메커니즘에 관한 연구,” 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp415-419, 2002. 5. 18.
6. 이화조, 송준엽, “페브라운관 분리 및 세정시스템 개발,” 청정사업보고서, 2002. 5.