Gamma Absorption Technique를 이용한 Trayed Column의 가동 중 내부 밀도분포 측정에 의한 유체 유동상태 진단

김재호, 정성희, 김종범, 김진섭, 이나영[*], 정의성[*]
한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부, [*]세이프텍(주)

2007년 11월 8일 접수 / 2008년 3월 6일 채택

석유화학 공정의 증류탑은 공정유체를 분리, 정제하는 중요한 장치 중의 하나로 가동효율은 설비의 생산성에 큰 영향을 미친다. 본 연구는 밀봉 감마선원을 이용하여 투과 감마선의 세기를 높이별로 측정함으로써 내부 밀도의 변화를 분석하여 공정의 가동 중 내부 상황에 대한 정보를 얻고자 하였다. 이를 위하여 한국원자력연구원에서 개발된 자동 증류탑 검사장치를 이용하여 증류탑 상부 양쪽에 밀봉 감마선원과 방사선검출기를 매달아 수직으로 내리면서 실험을 수행하였으며, 이때 감마선원으로는 Co-60 150 mCi과 방사선검출기로 BGO detector를 각각 사용하였다. 진단결과 설비 내부의 tray에는 구조적 결함이 관찰되지 않았으나, 유체분포를 고려할 때 상부는 기포층(vapor)의 밀도분포가 지배적인 반면에, 하단부에는 기포에 비해 유체가 상대적으로 많이 분포하는 것으로 계측되었다. 본 실험으로부터 밀봉 감마선원을 이용한 가동 중에 있는 대형 증류탑의 tray에 대한 구조적 건전성 및 내부 유체분포에 대한 정보를 성공적으로 제시하였다.

중심어 : 증류탑, 밀봉 감마선원, 방사선검출기, 자동 증류탑 검사장치, 감마 스캔, Tray, 산업공정진단

1. 서 론

국내 정유 및 석유화학산업은 생산규모가 세계 5위에 이를 정도로 급성장하였고, 전체 제조업 중 석유화학의 비중은 4.6%(생산액 30조원)에 이르며 매우 중요한 위치를 차지한다. 하지만 이 같은 양적인 성장에 비해 시설 대부분이 70년대 후반에 설치된 설비로서, 이의 유지 보수를 위해 매년 많은 예산이 소요되고 있다. 또한 설비의 이상 유무를 직접적으로 가동 중에 진단할 수 있는 기술이 거의 없으며, 다만 정기적으로 shut down을 통해 부속 자재를 점검교환하고 운전원의 경험에 주로 의존하는 실정이다. 전 세계적으로 방사성동위원소를 이용하여 산업공정의 문제해결과 가동효율 최적화를 위해 동위원소 이용기술이 광범위하게 사용되고 있다. 또한 선진국을 위시하여 감마선원을 이용한 가동 중 공정의 내부 이상 유무를 진단하는 기술이 각광을 받고 있는 추세이다[1].

국내의 경우 Ir-192를 이용한 정유 및 석유화학 공정에 대한 비파괴검사 기술은 활발히 진행되고 있으나, Co-60등을 이용한 가동 중 공정진단 기술은 1990년대 후반부터 연구가 시작되어 현재 상용서비스를 위한 산업화 단계에 이르렀다. 밀봉 감마선원을 이용한 공정진단 기술(감마 스캔)은 생산공정을 중단하지 않고도 가동 설비나 장치의 내부 검사를 수행하는 기술로서, 진단설비를 대상으로 감마선원을 투과시키고 설비 반대편에서 투과 및 산란된 방사선량을 계측함으로써 내부에 대한 정보를 획득하는 기술이다. 투과된 감마선량은 공정 내부의 물질에 의해 흡수 및 산란되므로 내부물질에 대한 중요한 정보를 제공할 수 있다. 내부에 존재하는 물질의 밀도가 높을수록 투과되는 감마선의 세기는 감소되고, 내부 밀도가 낮을수록 세기는 증가한다. 즉, 액체 상태에 비해 기체상태의 기포 층은 상대적으로 훨씬 많은 감마선을 투과시킨다. 한편 감마스캔 진단실험은 공정의 운전에 전혀 영향을 주지 않으며, 측정결과는 공정의 운전효율과 이상 현상의 원인 분석 등에 활용되므로 결과적으로 보수작업이 필요한 경우 공정의 가동중지 시간을 줄이고 작업의 계획을 체계적으로 수립하는데 기여한다. 실제로 다른 종류의 비파괴 검사기술 중 감마선을 이용한 진단이 가동 중인 설비 내부에 대하여 가장 선명한 결과를 보이는 것으로 인정받고 있다. 또한 감마 스캔 결과는 tray 등의 내부 구조물에 대한 과거 기록 또는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 동력학적 연구결과 등과 결합하여 이용됨으로써, 시설의 가동성능에 대한 이론적 한계뿐만 아니라 실질적인 한계를 명백히 하는데 효과적이다[1].

본 실험은 NCC(Naphtha Cracking Center)의 증류탑을 대상으로 감마스캔을 통해 가동 중 유체의 유동상태와 내부 밀도분포 변화를 측정하였다.

책임저자 : 정성희 shjung3@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원 동위원소이용기술개발부
대전 유성구 덕진동 150번지

2. 재료 및 방법

감마선을 이용한 투과율 계측을 하기 위해 가동 중에 있는 증류탑의 양측에 방사선 계측기와 방사선원을 매달아 일정 간격으로 움직이면서 계측하였다. 감마 밀봉선원으로는 150 mCi의 ^{60}Co(Γ energy=1.17, 1.13 MeV, $t_{1/2}$=5.26년, Γ factor=1.295 R · m^2 · h^{-1} · Ci^{-1})를 이용하였고, 증류탑을 투과한 감마선의 검출에는 BGO(1x1 inch, Bicron) 검출기를 사용하였다. 이때 선원 holder의 재질은 텅스텐을 사용하였으며, collimation depth와 slit의 크기는 각각 3.5 cm와 1 cm이다. 선원 holder는 원반모양(Disc beam)의 감마선이 방출되도록 유도하기 위해 aperture 타입이 아닌 slit 타입으로 제작하였다.

각 실험구간에서 밀봉 감마선원과 방사선 검출기를 Fig 1.과 같이 유지하며 일정시간(10 sec) 동안의 투과 감마선을 계수(counting)한 후, 수직방향으로 일정 간격(5 cm)씩 이동시키면서 측정을 반복하였다. 본 실험에 사용된 증류탑 검사장치는 기존의 압축공기를 이용하던 pneumatic column scanner를 대신하여[1], 밀봉 감마선원과 계측기의 상하 구동과 데이터 처리가 자동화된 automatic column scanner를 한국원자력연구원에서 제작하여 사용하였다. 자동 증류탑 검사장치는 방사선 계측부에 데이터 전송회로를 포함시키고 방사선 계측신호를 digital로 변조하여 전송한 후 복조하는 방식을 사용하여 길이에 관계없이 방사선 계측신호를 계측할 수 있는 장치이다. 이러한 장치는 방사선검출기와 데이터 처리장치와의 거리가 먼 경우 매우 효과적이며 고주파 carrier 신호에 동조되는 loop coil을 사용함으로서 noise 제거기능을 갖는 장점을 가지고 있다. 검사장치의 회전부와 고정부 사이에 연결에 사용되는 slip ring을 대신하여 주변의 전기적 noise로부터 상대적으로 영향을 덜 받는 유도 coil을 통하여 데이터를 전송토록 하였다. 이러한 detector부와 감마선원의 이동은 step motor를 장착한 기계장치에 의해 동작되어지며, 이들 장치의 제어는 micom 및 pc에 의해 제어되도록 설계 되어졌다.

밀봉 감마선원이 바람이나 자체 회전에 의해 선원 조준경이 흔들려 계측결과에 영향을 줄 수 있으므로 Panoramic Source holder를 사용하였으며, 현장에서 실시간으로 실험 결과를 확인할 수 있도록 휴대용 컴퓨터를 이용하여 데이터를 수집하였다[2-4]. 실험데이터의 신뢰성과 대표성을 가질 수 있도록 반복 계측하였다. 실험대상은 tray 타입의 증류탑으로서 높이가 40 m이고 내경이 상부에서 하단으로 가면서 2.5 m에서 3.0 m로 변하는구조이다. 진단설비의 수평 및 수직 단면의 도면을 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 나타내었다. 추가적으로 Fig. 2에 사용된 밀봉감마선원과 방사선 검출기의 설치 위치와 스캔방향을 표시하였다. 그림에 표시된 숫자는 도면의 tray 번호를 의미하며, tray 번호의 짝수 홀수에 따라 타입이 변화하므로 이를 EVEN과 ODD로 Fig. 2에 표시하였다[2].

방사선이 물체에 조사되면 물질과의 상호작용에 의하여 광자가 흡수되거나 산란된다. 이 같은 현상에 의해 방사선이 물질을 통과하면서 $I = I_0 \times \exp(-\mu \cdot \rho \cdot t)$ (Lambert-Beer's law)의 관계식으로 입사광자의 강도(세기, intensity)가 감소한다. 여기서 I_0는 최초의 방사선의 세기이고 I는 물체의 일정 거리를 통과한 후의 방사선의 세기이며, μ는 주어진 방사선의 에너지와 매질의 종류 의해 결정되는 질량감쇠계수, ρ는 물체의 밀도, t는 물체의 두께를 의미한다. 즉 매질을 투과하여 계측기에 검출되는 방사선의 세기는 방사선이 투과하는 물질의 밀도와 투과거리에 지수 함수적으로 반비례하는 관계를 가진다[1].

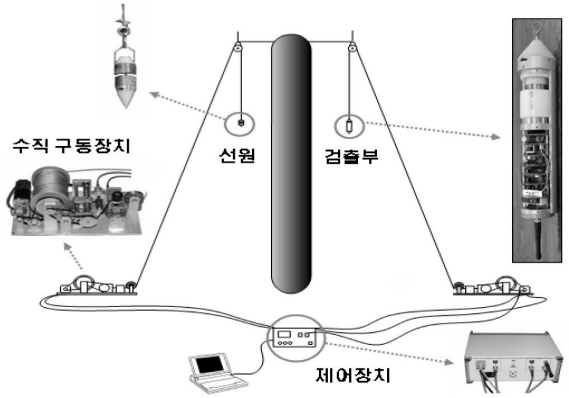
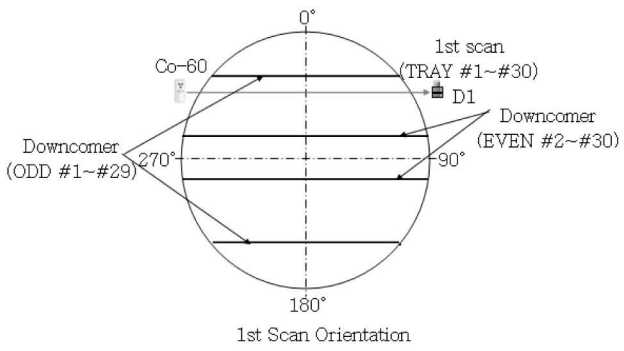
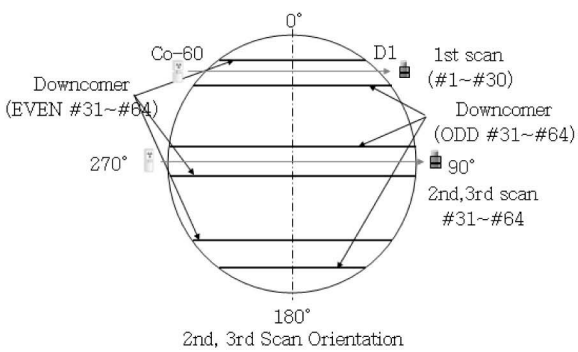


Fig. 1. Experimental set-up for scaled gamma radioisotope application to gamma scanning.



(a) Upper Area(#1~#30)



(b) Lower Area(#31~#64)

Fig. 2. Orientation of gamma ray path according to the area of interest in a column.

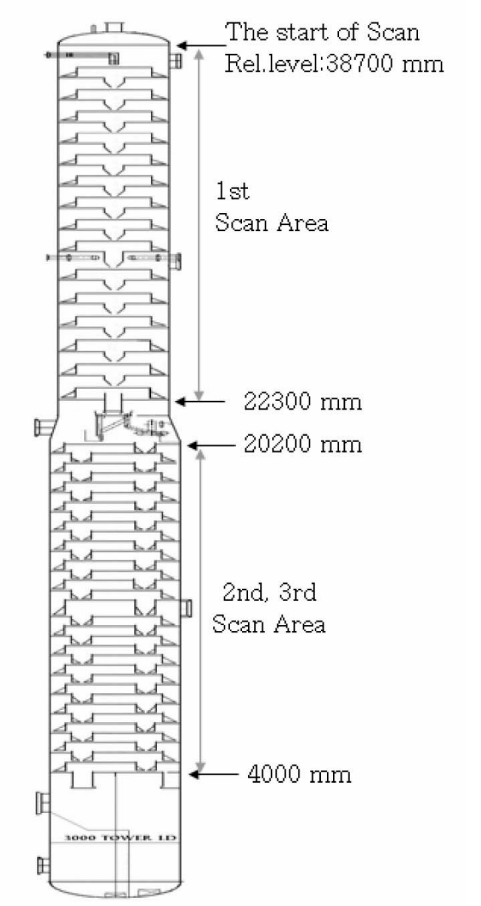


Fig. 3. Drawing of the column and scanning section for gamma scanning.

그러나 실제 계측에서는 방사선의 양이 위의 식에서 예측되는 것 보다 높게 계측된다. 이는 입사 방사선의 산란에 의한 결과로서 이를 정량적으로 산정하기 위해서는 축적계수(build up factor: B)를 고려해주어야 한다. 하지만 방사선원과 계측기 사이에는 다양한 물질들로 구성된 매질이 위치하므로 각각의 물질들에 대한 선형감쇠계수를 고려한 정확한 축적계수를 계산하기는 매우 어렵다. 따라서 컴프턴 산란이 우세한 에너지 영역 내에서 선형감쇠계수를 실험 대상 설비에 대하여 실질적으로 고려한 유효선형감쇠계수(effective linear attenuation coefficient)를 적용하였다.

$$I_{meas.} = BI_o e^{-\mu x} = I_o e^{-\mu_{eff} x}$$

여기서 $\mu_{eff} = \mu \ln(B)$인 관계가 있다. 유효선형감쇠계수인 μ_{eff}는 선원의 에너지 그리고 흡수체(absorber)의 투과두께와 밀도 등에 의해서 크게 영향을 받는 인자이다. 따라서 비록 감마선 투과선상의 각 재료들(steel, insulator, media 등)에 대한 축적계수를 산정함으로써 절대적인 밀도를 구하기는 어려우나, 본 실험조건에서는 동일한 선원을 사용하고 칼럼의 외벽두께와 절연재의 두께가 일정하므로 설비에 대한 투과 감마선 계측을 통해 내부 유체 및 미디어의 상대적인 밀도를 비교할 수 있다.

3. 결과 및 논의

설비 내 유량은 공정 최상단과 중간부분에서 연결된 배관에 의해 유입되고 있으며, 하단부의 유입증기에 의해 분별증류가 되는 방식으로 운전되고 있다. 실험은 총 3회에 걸쳐 이루어졌다. 1차 scan에서는 공정 상부구간에 대해 실험을 하였으며, 2차와 3차 scan은 공정 하단부 만을 실험하였다. 하단부 영역은 시설 운전원들이 이상현상이 발생되었을 것으로 의심하는 구간으로서, 해당영역에서 가동 조건을 변화시키면서 반복실험을 수행하였다. 진단설비의 운전조건과 감마스캔을 위한 실험조건을 아래의 Table 1에 나타내었다. 1차 스캔은 설비 높이 38.7 m~22.3 m에 대해서, 그리고 2-3차 스캔은 20.2 m~4.0 m에 대해서 각각 수행하였다.

증류탑 진단 계측실험 결과를 Fig 4.(상부: 1차)와 Fig 5.(하부: 2차, 3차)에 각각 나타내었다. 그림에서 x축의 CPS(counts per second)는 collimated된 감마선이 증류탑 내부를 통과하여 반대편에서 검출된 방사선 계수치를 나타내며, 이는 투과 경로 상의 단위 질량(density on the path length)과 반비례하는 상관관계를 가진다[6]. 또한 y축은 scan 구간의 상대적인 높이를 의미하고, 도면상의 #는 설비 내부의 tray 번호를 일컫는다.

Table 1. Experimental Conditions of Column for Gamma Scan.

Scan no.	Operation condition	Scan section	ID.(mm)	Scan level(mm)	Scan direction
1st	⊿P=0.68kg/cm^2,g Reflux:68ton/hr	#1~#30	2,500	38,700~22,300	Top-Down
2nd	⊿P=0.68kg/cm^2,g Reflux:68ton/hr	#31~#64	3,000	20,300~4,000	Mid.-Down
3rd	⊿P=0.68kg/cm^2,g Reflux:62ton/hr	#31~#64	3,000	20,300~4,000	Mid.-Down

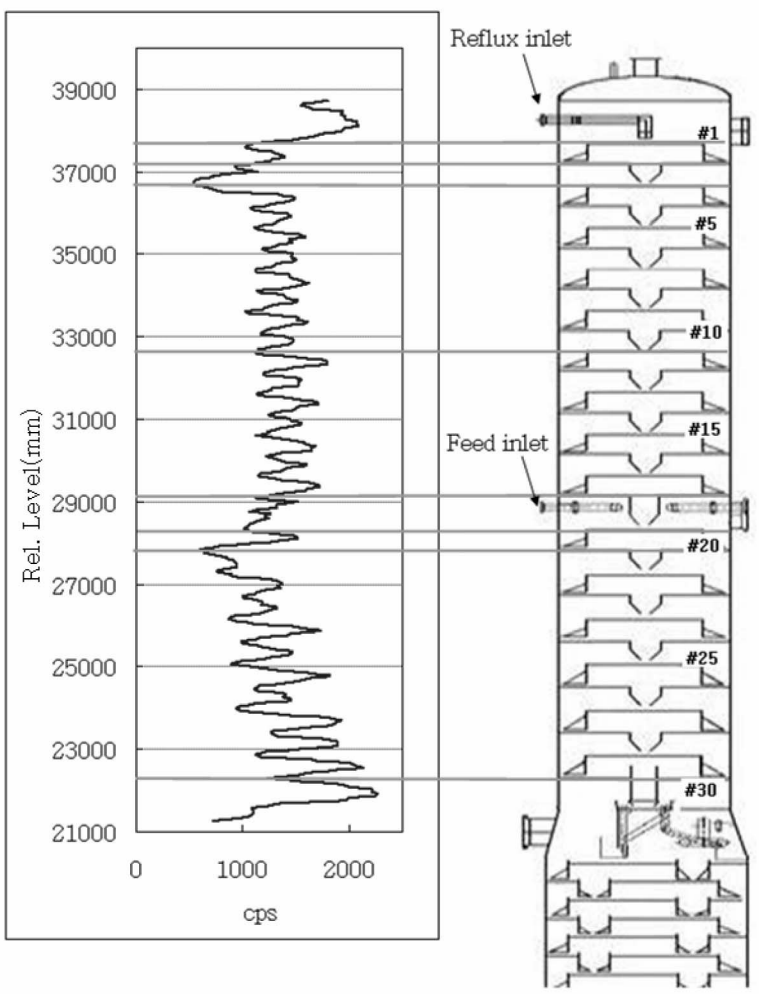


Fig. 4. Gamma radiation count profile in the upper part of a column.

증류탑 상부의 경우(Fig 4.) tray #2~#3(37200 mm~36700 mm) 구간에서 밀도가 국부적으로 증가하는 구간이 관찰되었으며, 그 아래의 영역 tray #3~#19(36700 mm~29100 mm)에서는 유체에 비해 기포층(vapor)이 우세하게 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 본 설비는 내부가 유체와 vapor가 혼합되어 있는 상태로서 tray #2~#3 구간에서 유체가 down-comer 내로 원활하게 흐르지 못하여 일시적으로 유동이 정체되는 것으로 예상되며, 이로 인하여 그 아래의 구간(tray #3~#19)이 상대적으로 유체의 흐름이 적어 높은 방사선 계수치가 나온 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 해당 영역에서 유체 흐름의 편중현상과 밀접한 관계가 있으며, 그 주요 원인으로 tray #2~#3에서 유체흐름을 방해하는 고밀도 고형물의 형성을 예상할 수 있다. Fig 4.에서 tray #19~#20(28200 mm~27800 mm) 구간에 나타난 패턴은, 상기 tray #2~#3 (37200 mm~36700 mm) 구간에서 나타난 profile의 형상과 유사한 패턴을 보인다. #18~#19(29200 mm~28200 mm) 사이에 feed inlet(liquid+vapor)이 존재함에도 불구하고, #21(27000 mm)부터 하단부로 내려갈수록, 전반적으로 투과 감마선 계측치가 증가하는 추세를 보이고 있어 vapor의 양이 상부에 비해 높을 것으로 판단된다. 이는 column 내부의 유체 흐름이 불안정하고 유량증가에 따라 공정이 분리(separation) 작용을 효율적으로 하지 못하고 있음을 시사한다. tray #2~#3과 #19~#20에서의 국부적인 질량 증가 현상은 장시간 운전에 따라 하단부로 점차 확대될 가능성이 있을 것으로 예상된다.

한편, Fig 5.의 level 22000 mm에서 계측 count의 급격한 증가는 내부 밀도가 다른 영역에 비해 현저히 낮음을 나타내는데, 이는 해당 구간의 내부가 유체의 흐름이 없는 빈 공간에 해당하기 때문에 발생하는 현상이다. 반면에 그 영역의 하단부에 속하는 tray #31~#64 (20300 mm~4000 mm) 구간에서 전체적으로 밀도가 증가하는 현상이 관찰되었는데, 이는 Fig 4.에서 보인 계측 결과와는 달리 전체적으로 유체의 질량분포가 높아져 있음을 나타낸다.

Fig 5.의 2차 scan의 경우 내부 유체의 질량분포가 tray #47(12800 mm)을 중심으로 서로 다르게 계측되고 있다. Tray #47을 기점으로 상부에서는 tray의 위치와 액면(liquid phase)/기면(vapor phase)의 존재를 명확히 확인할 수 있지만, 그 하부에서는 tray의 위치만 미세하게 확인할 수 있을 뿐 flooding 현상에 가까운 계측 패턴을 보이고 있다. 즉 tray #47

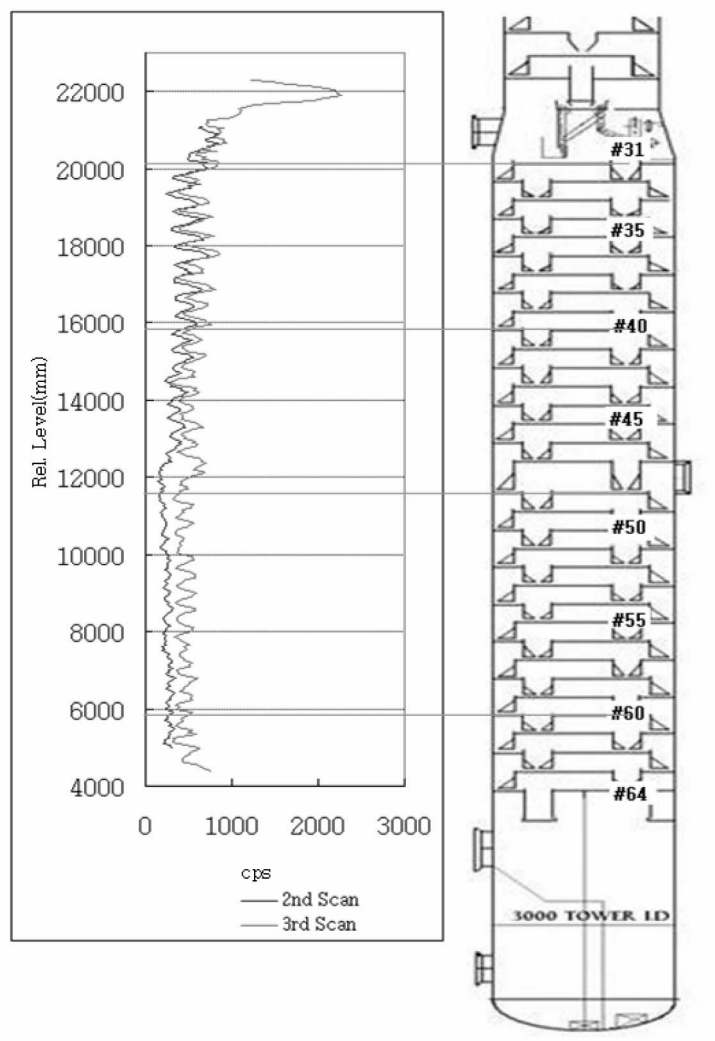


Fig. 4. Gamma radiation count profile in the upper part of a column.

위치에서의 비정상적인 현상으로 인해 #48~#64(12100 mm~4500 mm)에서는 유체가 down-comer를 통해 원활하게 흐르지 못하고, 기포(vapor)가 효율적으로 상승하지 못하는 현상이 발생하고 있는 것이다. 2차와 3차 scan 구간은 외벽두께, 단열재 등 다른 요인이 동일하므로 반복실험에서 다른 패턴이 발생한 것은 내부 유체의 변동에 의한 것으로 사료되며, 이와 같은 결과에 대한 확인 및 검증이 필요하여 동일 위치에 대해 추가적으로 실험을 수행하였다(3차 scan). 실험결과, 차 scan에서 관찰된 flooding에 유사한 현상이 사라지고 하단부 전 구간에 걸쳐 유체분포가 많지만 거의 정상조건에 가까운 상태로 회복되었음을 확인할 수 있었다. Tray의 구조적인 상태는 2차와 3차 scan 모두에서 규칙적인 tray 구간별 신호요철 패턴이 확인됨을 고려할 때, tray의 구조적인 결함은 없는 것으로 판단된다. 따라서 진단실험 대상인 column의 내부에 tray의 변형이나 탈락과 같은 중대한 구조적 결함은 발생하지는 않았지만, 내부 유체의 유동흐름이 전 영역에 걸쳐 균일하지 않고 편중되어 일시적으로 불안정한 상태가 반복되는 것으로 예상되었다.

4. 결 론

가동 중인 column에 대하여 내부 구조물의 상태와 유체 분포에 대한 정보를 얻기 위한 감마스캔을 수행하였다. 실험 대상 증류탑 상단부의 경우 일부 영역(tray #2~#3, tray #19~#20)에서 일시적인 밀도 증가현상이 발생하였고, 이로 인해 내부 유체가 편중됨으로써 그 이하의 영역에서 기포층이 유체에 비해 우세하게 분포함이 예상되었다. 반면에 증류탑 하단부의 경우에는 전체적으로 유체의 분포가 상단부에 비해 많았으나 2차 scan을 통해 tray #47 위치 이하에서 flooding 현상에 가까운 패턴을 확인하였다. 동일 위치에서 증류탑의 운전조건을 변화시켜 반복 수행한 추가실험(3차 scan)에서는 flooding 현상이 사라지고 정상가동에 가까운 패턴을 보였다. Tray 구간별 신호요철이 일정함을 고려할 때, 실험결과 Tray patch와 실제 도면상의 Tray level 위치가 정확하게 일치함으로 tray의 구조적인 결함은 발생하지 않았으나, 내부 유체가 원활하게 분리작용(separation)을 하지 못하고 있는 불안정한 상태임을 진단실험을 통해 성공적으로

확인하였다. 따라서 밀봉 감마선원을 이용한 trayed column에 대한 진단기술은 가동 중에 있는 공정의 이상현상 원인규명 및 정량적인 위치를 밝혀냄으로써 설비의 성능개선 및 운전효율을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단을 통하여 과학기술부가 시행한 원자력연구개발사업 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정성희, 김종범, 진준하. 감마선을 이용한 가동 중 증류탑 진단실험. J. Korea Ind. Eng. chern, 2002;13(1):19-24.
2. 김진섭, 정성희, 김종범. 밀봉감마선원을 이용한 Pyrolysis Effluent Fractionator 공정 내부 유량분포 측정에 대한 연구. Applied Chemistry, 2006;10(1):105-108.
3. Kim JS, Jung SH, Kim JB. Gamma-ray application to the measurement of a media distribution at the catalyst cooler of a residue fluid catalytic cracking unit(RFCCU) in the petrochemical industry. Proc. of the 7th Far-east conference on nondestructive testing, Gyeongju, Korea, 2006;121-127.
4. Kim JS, Jung SH, Kim JB. In-service identification of the heterogeneous zone in petrochemical pipelines by using sealed gamma-ray sources(^{60}Co, ^{137}Cs). Proc. of the 7th Far-east conference on nondestructive testing, Gyeongju, Korea, 2006;197-202.
5. 김진섭, 정성희, 김종범. 밀봉감마선원을 이용한 석유화학산업의 유체이동배관 내 가동 중 이상 진단기술. J. Korea Ind. Eng. Chern, 2005;16(6):794-799.
6. Fulham MJ and Hulbert VG. Gamma Scanning of Large Towers. Chan. Eng. Prog, 1975;71-73.

In-service Investigation on the Flow Dynamics of a Trayed Column from the Measurement of an Internal Density by using a Gamma Absorption Technique

Jae Ho Kim, Sung Hee Jung, Jong Bum Kim, Jin Seop Kim, Na Young Lee, Sung Sik Lee*, Seok Joon Jang*
Korea Atomic Energy Research Institute, Radioisotope Research Division, *Safetech Co Ltd

Abstract - A distillation tower is one of the important facilities which separates and refines a crude oil stream according to certain boiling points. Its operation efficiency can affect the productivity of a refinery substantially. The objective of this study is to elucidate some operational information on the internal conditions of a distillation tower from a measurement of density profile by using a sealed gamma-ray source and a radiation detector. Gamma radiation counts were measured by a BGO detector positioned diametrically outside the tower-wall, opposite to the gamma source(Co-60) as the detector and the source were lowered concurrently. From the results, structural abnormality of the trays was not found inside the tower. Considering the flow distribution patterns, however, a vapor phase was dominantly formed at the upper part of the tower and a liquid phase at the lower part. From the gamma scanning of the distillation tower, it is anticipated that the gamma absorption technique can be used as an important tool for confirming the structural soundness of trays and investigating flow distribution in refinery facilities.

Keywords : Distillation tower, Sealed gamma-ray source, Automatic column scanner, Gamma scan, Tray,Industrial process diagnosis