

## 원격 건식 오염제거기에 의한 세슘 시편의 세염

Decontamination of Test Specimens Contaminated by Cesium by Using a Simulated Remote Dry Decontaminator

신진명, 박장진, 김미자, 김기호, 이호희

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

핫셀내 고방사성 물질로 오염된 핵물질 취급장치에 대한 유지보수를 위해서 원격 건식 오염제거기가 개발되었다. 드라이아이스 입자 충격을 이용한 원격 건식 오염제거기의 최적 분사조건을 결정하기 위해서 모의 시편을 사용하여 기본 실험을 수행하였다. 시편의 제거효율은 XRF 및 분사 전 후의 표면 상태 변화로 평가하였다. 요오드화 세슘으로 고착된 오염시편의 경우, 세슘의 제거효율은 분사압력  $4 \text{ kg/cm}^2$ , 분사거리 20 cm, 분사시간 20초 정도로 유지할 경우 92 %의 제거효율을 얻을 수 있었다. 수산화세슘으로 고착된 오염 시편의 경우는 분사압력  $4 \text{ kg/cm}^2$ , 분사거리 20 cm, 분사시간 20 초 정도로 유지할 경우 약 96 %의 제거효율을 얻을 수 있었다.

### Abstract

Remote dry decontaminator has been developed to maintain nuclear material handling equipment contaminated with highly radioactive material in a hot cell. In order to determine the optimum blasting conditions of remote dry decontaminator using the impact of the dry ice pellets, the basic experiments have been conducted on the simulated test specimens. The removal efficiency of test piece was evaluated by XRF analysis and change of surface condition before and after blasting. The removal efficiency of cesium on the cesium iodide specimen was about 92 % under blasting pressure;  $4 \text{ kg/cm}^2$ , blasting distance; 20 cm, blasting time; 20 sec. In case of cesium hydroxide specimen, the removal efficiency of cesium was 96 % under blasting pressure;  $4 \text{ kg/cm}^2$ , blasting distance; 20 cm, blasting time; 20 sec.

### 1. 서 론

DUPIC 핵연료 제조공정은 고방사성 사용후핵연료 물질을 분말형태로 취급하는 공정을 포함하므로 핵연료 제조장비, 검사장비, hot cell 바닥 및 벽면, 공구 등의 표면이 미세 분진 및 방사화된 오염핵종 등으로 비고착성 및 고착성으로 오염될 가능성이 높다. 핵연료 제조 장비 및 시설의 제

염은 hot cell 내에서 제염하여야만 제조 핫셀의 건전성 및 작업자의 방사선 피폭저감을 유지할 수 있다. 또한 고가의 제조장비 및 검사장비는 제염하여 재활용되어야만 폐기물 발생량 및 제조비용을 줄일 수 있다.

현재 방사성물질로 오염된 장비는 주로 고압물제트 세척방법인 습식으로 오염관리를 하고 있으나 이 방법은 핵입계 문제, 2차 폐기물 발생 때문에 고방사성 환경인 핵연료물질을 취급하는 핫셀 내에서는 적용이 불가능하다. 따라서 운전자가 오염환경에 노출되지 않고, 2차 폐기물 발생이 없으며 핫셀내에서 원격조작이 가능한 제염법 개발이 요구된다. 최근에 건식 제염기술의 하나인 드라이아이스 분사 제염법은 장비파손 및 장비분해를 할 필요가 없어 주목을 받고 있다. 드라이아이스 분사제염기술은 장비파손 및 장비분해를 할 필요가 없어 슬래그 제거에서부터 정밀반도체, 회로판 세정, 원자력시설제염 등에 이르기까지 다양한 분야에 응용되고 있다[1-7].

고체 CO<sub>2</sub>인 드라이아이스를 이용한 블래스팅 기술은 1970년대 후반에서 1980년대 초반에 걸쳐 Lockheed Corp.에 의해 개발이 시작되고 1987년에 최초로 상용화된 기술이다. 드라이아이스 블래스팅 제염 메카니즘은 열에너지, 운동에너지, 승화에너지의 복합적 작용으로 설명된다. 드라이아이스 펠릿이 오염대상 표면에 충돌하면 국부적으로 과 냉각이 유발되어 표면의 탄성이 소실되고 부착되어 있던 오염물질은 표면과의 결합력이 약해져 떨어져 나간다. 운동에너지 측면에서 보면 드라이아이스 펠릿과 공기의 운동에너지가 코팅 제거에 기여하는 것이다. 제트압 12 bar, 공기량 11 m<sup>3</sup>/min에서 고성능 원형노즐을 사용하여 드라이아이스를 블래스팅하였을 때 제트 충돌력은 최대 150 N에 이르고 입자의 탈출속도는 최대 300 m/s에 이른다고 보고하였다[8]. 드라이아이스가 승화하면 드라이아이스의 부피는 거의 800 배까지 증가하면서 압력의 변화를 유발하며, 이 과정이 제염공정을 더욱 촉진한다고 보고하였다.

국내에서는 핫셀내 고방사성 물질로 오염된 핵물질 취급장비에 대한 유지보수를 위하여 드라이아이스 입자들의 충격을 이용한 건식 오염제거장치가 개발되어 세슘으로 오염된 비고착성 및 고착성 모의 시편에 대하여 제염실험을 수행하였다[9]. 또한, 건식 오염제거장치에 제염물질의 재비산을 방지하는 분진 흡입 시스템과 원격으로 분사조건을 제어할 수 있는 원격 취급 시스템이 보완된 모의 원격 오염제거장치가 되기도 하였다. 원격 오염제거기의 최적 제염조건을 확립시키기 위해서는 공정변수가 제염효율에 미치는 영향을 이해할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 드라이아이스 펠릿 블래스팅 기술을 적용하여 원격으로 DFDF(DUPIC Fuel Fabrication Facility)내 핵물질 취급장비에 대한 유지보수 시 필요한 공정자료를 얻고자, DUPIC 핵연료 제조과정에서 발생할 수 있는 대표적 방사능 오염핵종인 세슘을 모사 오염물질로 선정하고 2가지 종류의 대표 표면에 대하여 모의 원격 오염제거장치를 이용하여 드라이아이스 펠릿 분사기술의 최적 공정조건을 도출하고자 하였다. 시편의 제거효율은 XRF 및 분사 전 후의 표면 조건변화로 평가하였다.

## 2. 실험

### 1) 실험장치

원격 건식 오염제거기는 건조공기 공급시스템, 압축공기 공급시스템, 드라이아이스 펠릿 공급 및 제염 체임버로 구성된다. 제염 체임버는 체임버 몸체부, 회전 적재부, 흡입부, 분사건 조종부로 구성된다. 체임버 몸체부는 투명아크릴을 사용하여 제염상황을 상시 모니터링 할 수 있도록 하였고 또한 글러브 박스를 설치하여 작업자가 체임버 내부로 접근이 가능하도록 하였다. 체임버 내부의 진공상태를 방지하기 위해서 free 필터를 상부에 설치하였다. 흡입부는 제염물질의 재비산을

방지하기 위하여 제염 체임버 하부에 HEPA 필터를 설치하였다. 사용된 드라이아이스 펠렛은 직경 3 mm 정도이었고 기밀된 드라이아이스 박스에 보관하여 사용하였다. Purge system은 드라이아이스 공급라인이 작동 중 막혔을 경우, 운전자가 쉽게 세척할 수 있도록 설계되었다. 그림 1과 같이 원격 건식 오염제거기는 오염시편을 고정하는 부분, 분사헤드를 수직으로 고정하는 부분, 분사헤드를 시편에 대하여 좌/우, 전/후, 상/하로 이동하는 부분으로 구성되었다.



그림 1. 원격 오염제거기 시스템.

## 2) 모의 시편제조

고방사성 핫셀의 제염대상 재질을 모사하기 위해 대표적으로 2가지 구성 재질로 시편을 가공하여 사용하였다. 시편 종류들에는 SUS304를 단순 연마한 시편(specimen 1), SUS304를 polishing한 시편(specimen 2)을 이용하였다. SUS304 단순 연마한 시편(specimen 1)은 금강석으로 연마 후 pickling 처리한 것으로서 핫셀내 duct, 바닥 및 connector 등을 대표할 수 있다. SUS304를 polishing한 시편(specimen 2)은 SUS를 금강석 연마 후 알루미나를 이용하여 미세 연마한 것으로서 핫셀 벽면, 저장통 등을 들 수 있다. 실험에 사용된 시편은 표면오염 측정방법인 XRF 측정이 가능하도록 금속시편을 직경 43 mm, 두께 6 mm로 가공하여 실험에 사용하였다. 이들 시편 위에 고방사성 핫셀 내 대표적인 방사성 핵종인 Cs를 모사하기 위하여 CsI와 CsOH 두 가지 용액의 고착성 오염시편을 준비하였다. CsI와 CsOH 각각에 대하여 10,000 mg/L 농도의 용액을 만든 후 SUS 304 금속시편을 이용하여 1 ml를 고르게 떨어뜨리고 자연건조 시켰다. 완전히 건조된 것을 확인한 후 전기로(Lenton, UAF 17/12)를 이용하여 600 °C에서 12 시간 동안 가열하여 고착시켰다.

## 3) 제염실험

Cs 제염을 위한 공정 파라미터로 분사거리, 분사시간 및 분사압력을 선정하였다. Spur 등[8]은 제트각도가 70°에서 90°로 증가할 때 드라이아이스의 충격력과 주입속도가 증가하며 충격력은

수직으로 충돌할 때 최고가 된다고 보고하였다. 제염실험 조건은 드라이아이스의 주입률은 1 kg/min 으로 고정시켰고 분사각도는 시편에 대하여 수직이 되게 하였다. 분사거리는 5 cm에서 25 cm 까지 단계적으로 증가시켜 분사거리에 따른 제염효율을 측정하였다. 분사시간은 5 초에서 40 초까지 변화를 주면서 그 영향을 비교하였다. 일반적인 블래스팅 분사압력은 1~12 기압 정도이나 본 실험시설에 공급되는 최대 분사압력은 4기압이었다. 본 연구에서는 분사압력을 1 기압부터 4 기압으로 변화를 주면서 분사압력에 따른 영향을 측정하였다.

#### 4) 실험분석

XRF(X-ray Fluorescence) 분석법은 화학적 전처리가 필요 없고 측정에 의한 시료의 파괴가 없어 고체·액체 시료의 측정이 가능한 분석법이다. Na 부터 U까지의 모든 원소를 분석할 수 있으며 XRF 스펙트럼이 단순해서 해석이 용이하다. 또한 반도체 검출기를 이용한 시스템에서 많은 원소의 동시분석이 가능하다는 장점이 있다. 드라이아이스 분사제염 전, 후 모의 오염시편의 농도 분석은 표면 분석기술인 XRF 분석법을 이용하였다. XRF장치( Siemens, SRS-303 )는 Rh target 을 사용하고 출력 3 kw의 과장분산형이었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 1) CsI 제염 결과

분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사거리 20 cm에서 분사시간을 변화시키면서 오염시편들의 제염실험을 수행한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 제시된 것처럼 시편 종류에 상관없이 분사시간 20 초에서 최대 제거효율을 나타내었고 반면에 20 초 이상에서는 분사시간 증가에 따라 제거효율의 증가는 없었다. 한편 분사시간이 40 초에서는 시편의 표면이 흰 서리 모양으로 하얗게 덮여진 것을 육안으로 관찰 할 수 있었다. 이러한 이유는 분사시간이 증가할수록 시편의 온도가 주변 공기의 이슬점 이하로 내려가면 공기중의 수분이 시편 표면에 축적이 되어 드라이아이스 펠렛이 오염 표면에 접촉 후 곧바로 승화되지 못하고 표면에 계속 응결된 상태로 남아 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 드라이아이스 펠렛의 분사시간을 증가하여도 오염물의 제염 효율이 증가되지 않으므로 분사시간을 길게 할 필요는 없는 것으로 판단된다. 한편 polishing 한 시편 2의 세습 제거효율이 단순연마한 시편 1보다 약 5 % 정도 제거 효율이 높았다.

분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20 초에서 분사거리를 변화시키면서 오염시편들의 제염실험을 수행한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 제시된 것처럼 분사거리 20 cm 에서 제거효율이 최대이었고 polishing 한 시편 2의 세습 제거효율이 단순연마한 시편 1보다 약 3% 정도 제거 효율이 높았다. 이러한 결과는 드라이아이스가 효과적으로 제염표면에 분사하여 접촉하기 위해서는 최적 거리가 필요함을 의미한다.

한편, 고착성 오염시편 표면에 세습을 고착한 시료를 분사시간 20 초, 분사거리 20 cm로 고정시킨 후 분사압력(3 ~ 4 kg/cm<sup>2</sup>)를 변화시켜 세습의 제거효율을 나타낸 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 제시된 것처럼 분사압력이 증가하면 세습의 제거효율이 약간 증가하였고 분사압력 4 kg/cm<sup>2</sup>서 단순연마한 시편 1과 polishing 한 시편 2의 경우, 각기 세습 제거율이 87 %, 92 %를 나타내었다. 세습의 제거효율이 분사압력을 계속 증가시킴에 따라 증가될 것으로 판단되나, 현재 당소 오염제거 실험실 내 건식오염장치외 가용 사용압력이 최대 4 kg/cm<sup>2</sup> 이상으로는 사용할 수

없어 실험을 더 이상 진행시킬 수 없었다. 그림 5에 분사압력 4 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20 초, 분사거리 20 cm 에서 polishing 한 시편 2 제염전후의 사진을 제시하였다. 그림 5에 제시된 것처럼 제염 전 시편표면에 고착된 검회색 오염층이 제염 후 오염층이 세척되어 제거되고 얇아진 것을 볼 수 있으며 또한 시편표면이 제염 전 보다 광택이 나고 있음을 알 수 있다.

## 2) CsOH 제염 결과

분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사거리 20 cm에서 분사시간을 변화시키면서 CsOH로 고착시킨 오염시편들의 제염실험을 수행한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 제시된 것처럼 시편 종류에 상관없이 분사시간 20 초에서 최대 제거효율을 나타내었고 반면에 20 초 이상에서는 분사시간 증가에 따라 제거효율의 증가는 없었다. 한편 polishing 한 시편 2의 세습 제거효율이 단순연마한 시편 1보다 약 5 % 정도 제거 효율이 높았다.

분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20 초에서 분사거리를 변화시키면서 오염시편들의 제염실험을 수행한 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에 나타낸 것처럼 분사거리 20 cm 에서 제거효율이 최대이었고 polishing 한 시편 2의 세습 제거효율이 단순연마한 시편 1보다 약 5% 정도 제거 효율이 높았다.

한편, 고착성 오염시편 표면에 세습을 고착한 시료를 분사시간 20 초, 분사거리 20 cm로 고정시킨 후 분사압력(3 ~ 4 kg/cm<sup>2</sup>)를 변화시켜 세습의 제거효율을 나타낸 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8에 제시된 것처럼 분사압력이 증가하면 세습의 제거효율이 약간 증가하였고 분사압력 4 kg/cm<sup>2</sup> 에서 단순연마한 시편 1과 polishing 한 시편 2의 경우, 각기 세습제거율이 90 %, 96 %를 나타내었다. 따라서 드라이아이스 펠릿을 이용하여 CsOH 고착성 오염물질을 제염한 결과 분사압력 4 기압, 분사거리 20 cm, 분사시간 20 초에서 Cs를 최고 96 %까지 제염하였다. 이에 따라 본 원격 오염제거기를 이용하여 제염작업을 수행할 경우 분사압력 4기압, 분사거리 20 cm, 분사시간 20 초로 하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

향후, 여러 오염핵종을 다양한 방법으로 오염시켜 제조한 모의오염시편과 실제 고방사능 핫셀내 방사능으로 오염된 취급 공구 및 장치에 대하여 원격 건식 오염제거장치의 제염기술에 대한 연구가 다양하게 이루어져야 할 것으로 본다.

## 4. 결 론

드라이아이스 입자들의 충격을 이용한 원격 건식 오염제거기의 최적 분사조건을 확립시키기 위해서 2가지 종류의 재질에 대하여 CsI 및 CsOH 로 고착시킨 모의 시편으로 기본 실험을 수행한 실험결과 분사압력 4 kg/cm<sup>2</sup>, 분사거리 20 cm, 분사시간 20초 정도로 유지할 경우 87~96 %의 제거효율을 얻을 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

1. K. E. Archibald, "CO<sub>2</sub> Pellet Blasting Literature Search and Decontamination Scoping Tests Report," WINCO-1180(1993).
2. J. L. Tripp, "Criteria and Evaluation of Three Decontamination Technique," WINCO-1187 (1994).
3. L. Demmer, "Development of Simulated Contamination(SIMCON) and Evaluation of Three Decontamination Technique," WINCO-1188(1994).
4. C. E. Benson, J. E. Parifitt and B. D. Patton, "Decontamination of Surfaces by Blasting with Crystals of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>," ORNL/TM-12911(1995).
5. T. L. Aldridge, L. K. Aldrich, and E. V. Bowman, "CO<sub>2</sub> Pellet Decontamination Technology at Westinghouse Hanford," CONF-940511(1994).
6. C. A. Foster and P. W. Fisher, "Advanced Turbine/CO<sub>2</sub> Pellet Accelerator," CONF-940527-1 (1994).
7. A. M. Resnick "The ROVCO<sub>2</sub> Surface Decontamination System," DOE/MC/30165-5356(1996).
8. G. Spur, E. Uhlmann and F. Elbing, "Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application", *Wear* 233-235, p. 402-411, (1999).
9. J. M. Shin et al., "Dry Decontamination of Simulated Test Piece by Blasting Dry Ice Pellets" Proceeding of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Taejon, Korea, October (2000).

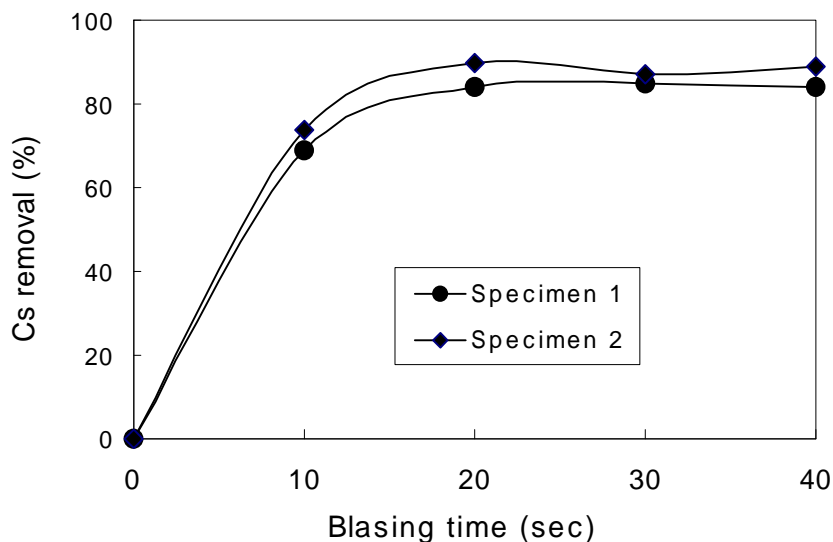


그림 2. 분사시간 변화에 따른 세슘의 제거율 (분사압 ; 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사 거리 ; 20 cm).

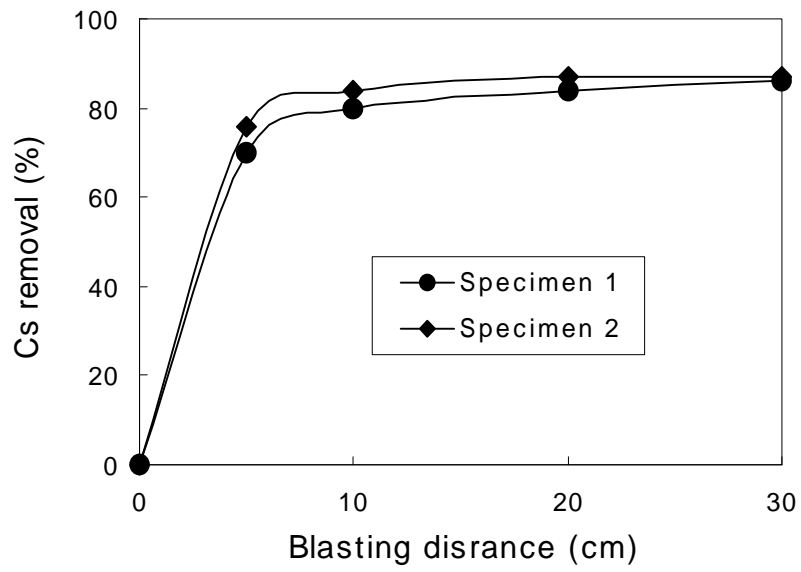


그림 3. 분사거리 변화에 따른 세슘의 제거율(분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20초).

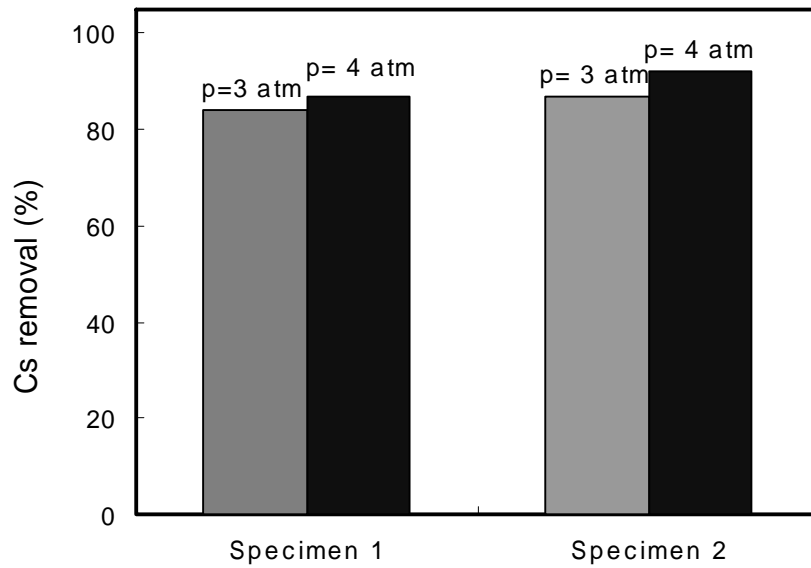


그림 4. 분사압력 3 atm과 4 atm에서 시편에 따른 세슘 제거율.



그림 5. CsI로 오염된 고착성 시편 2의 제염 전후의 사진(제염 조건: 분사압력 4 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20초, 분사거리 20cm).

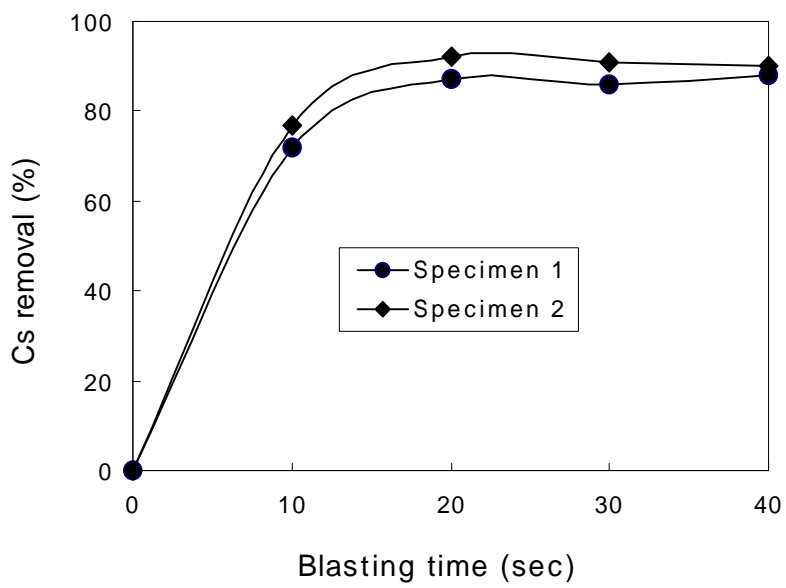


그림 6. 분사시간 변화에 따른 세슘의 제거율 (분사압 ; 3kg/cm<sup>2</sup>, 분사거리 ; 20 cm).



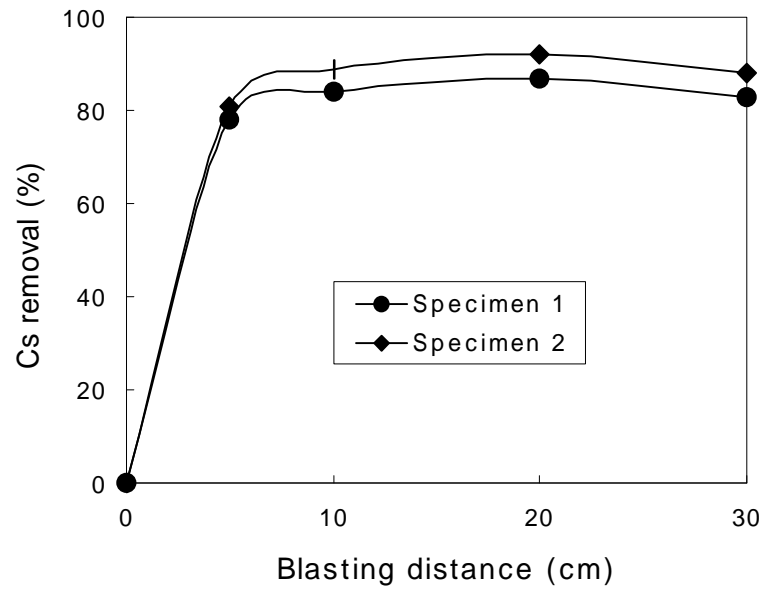


그림 7. 분사거리 변화에 따른 세슘의 제거율(분사압력 3 kg/cm<sup>2</sup>, 분사시간 20초).

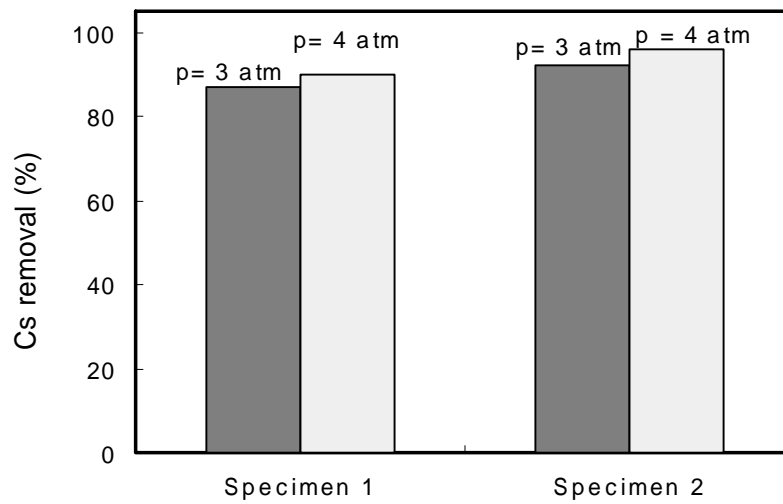


그림 8. 분사압력 3 atm과 4 atm에서 시편에 따른 세슘 제거율.