

논 단



방사성폐기물처분을 위한 완충재의 성능 및 요건 검토

김 건 영 · 김 승 수 · 최 종 원

한국원자력연구원 고준위폐기물처분연구센터

한 나라의 경제발전은 에너지소비량의 증가와 비례한다고 하여도 과언이 아니다. 현재 우리나라 전력수급의 약 40%를 원자력이 차지하고 있는 원자력 발전이 다른 경쟁국들에 비해 값싼 전력을 공급해줌으로써 우리나라의 경제발전에 미친 영향은 일반인들의 상상을 훨씬 뛰어넘는다. 이러한 원자력의 평화적 이용은 값싼 전력의 공급과 더불어 안전성의 문제라는 양면성을 동시에 가지고 있는 것은 사실이나 일반적으로 국민들에 의해 원자력발전 혹은 원자력발전소의 잠재적 위험성이 매우 높다고 생각되어지는 경향은 실제 원자력발전의 참된 모습과는 매우 차이가 있다. 또한 원자력발전과 더불어 필연적으로 발생하는 방사성폐기물의 처분 역시 그 실제 모습은 일반인들이 느끼고 있는 바와 매우 다르다.

일반적으로 고준위방사성폐기물의 처분은 지하 500~1,000m 깊이의 암반층에 처분하는 방안이 고려되고 있으며 현재 미국을 비롯하여 캐나다, 스웨덴, 독일, 영국, 핀란드 등 여러 나라가 자국의 환경에 맞는 심지층처분개념과 처분 시스템을 개발하고 있다. 심지층처분시스템은 처분용기, 완충재, 뒷채움재 등을 포함하는 공학적 방벽시스템과 이들을 둘러싼 자연방벽시스템으로 이루어지는 다중방벽개념을 적용하고 있으며 이들의 성능 및 안전성을 입증하기 위하여

각 선진외국에서는 다중방벽의 특성 및 성능, 방사성 물질의 거동 현상 등에 대한 연구 및 성능/안전성평가를 수행하고 있다. 이 중 처분장으로부터 방사성 핵종이 유출되는 것을 저지하는데 1차적으로 중요한 역할을 하는 것이 완충재이기 때문에 이들이 방사성폐기물처분장의 공학적 방벽 구성요소로서 가져야 할 성능 및 요건은 전체 다중방벽개념에서 매우 중요한 역할을 차지하고 있다. 이 글의 본론에서는 다중방벽개념에서 완충재의 설계시 고려해야 할 요건들을 현재 고준위방사성폐기물처분장의 완충재로서 가장 유력한 후보재료인 벤토나이트와 관련하여 간략히 설명하고자 하였으며 특히 각 설계요건에 대한 각론부분은 한국원자력연구소에서 발간된 기술보고서(한국원자력연구소, 2003)의 내용에서 주로 인용하였다.

우리나라의 방사성폐기물

방사성폐기물이란 방사성물질 또는 그에 의하여 오염된 물질로서 폐기의 대상이 되는 물질로서 원자력발전에 사용된 사용후핵연료를 포함하며 이는 일반적으로 방사능 준위에 따라 중저준위폐기물(발전 운전 또는 동위원소 이용으로 발

생)과 고준위폐기물(폐기 대상의 사용후 핵연료 또는 이의 재처리로부터 발생)로 구분된다. 이중 고준위폐기물은 그 방사능의 잠재 위해도가 자연 수준으로 감소하기까지 수십만년이 걸리며 수백년 동안 높은 방사선과 붕괴열을 방출하는 특성을 가진다.

현재 우리나라는 20기의 원자력발전소가 영광, 울진, 월성, 고리 등의 4개 원전부지에서 운영되고 있고, 이와 더불어 필연적으로 발생하는 방사성폐기물의 발생량은 2000년도 자료에 의하면 중저준위방사성폐기물과 고준위방사성폐기물의 발생량은 각각 95,000드럼(200리터)과 4,600톤이었다. 그러나 2015년에는 각각 225,000드럼 및 15,200톤에 이를 전망이다. 이러한 우리나라의 방사성폐기물들은 현재 발생된 원자력발전소 부지내의 임시 저장소에 저장되어 관리되고 있으며 특히 사용후 핵연료로 구분되는 고준위폐기물들은 건식으로 저장 관리되고 있는 월성발전소를 제외하고는 모두 각 발전소 부지내의 사용후핵연료 습식저장소에 보관하여 관리되고 있다. 그러나 이러한 각 발전소 부지내의 임시 저장시설은 2008년까지 모두 저장능력의 한계를 보임에 따라 방사성폐기물의 중앙집중식 처분이 시급히 요구되고 있다. 물론 각 임시저장시설의 확장 계획에 따르면 이 저장능력의 한계는 2016년 까지 연장될 수 있지만 임시저장시설의 확장은 각 원전부지내로 한정되어 있고 더구나 이는 본질적인 방사성폐기물의 처분방법이 될 수 없다. 다행히도 중저준위폐기물처분과 관련해서는 경주로 처분부지가 결정되어 2008년부터 처분장이 건설될 예정으로 되어 있으나, 사용후핵연료를 포함하는 고준위폐기물과 관련하여서는 이들을 영구처분할지, 재처리를 할지 아직 정해지지 않은 상태이다. 하지만 사용후핵연료 관리정책에 관계없이 고준위폐기물 처분은 반드시 필요하며, 또한 고준위폐기물의 처분은 한국의 특수성을 고려하여야 하고 장기적 안전성을 외국으로부터 보장

받을 수 없기 때문에 모든 처분관련 기술의 국산화가 매우 중요하다.

이와 관련하여 국내에서의 고준위폐기물 처분을 위한 연구개발은 과학기술부가 주도하는 원자력증장기연구개발사업의 일환으로 한국원자력연구원에서 1997년부터 추진되어오고 있으며, 최근 10년간의 연구 성과가 제시된 바 있다. 현재까지 수행된 고준위폐기물 처분연구는 국민이 신뢰할 수 있는 고준위폐기물의 심지층 처분기술개발을 목표로 처분안전성 확보와 관련된 기반기술 개발에 역점을 두었으며 우리나라의 고유한 심부환경 자료를 접목하여 한국형 기준 처분시스템을 확립하고, 일부 소규모 지하시험시설을 통하여 관련 요소 기술을 실증하는데 주력하고 있다. 이러한 궁극적인 연구목표 및 현재의 연구 경향은 비단 우리나라뿐만 아니라 우리보다 길게는 20년 이상 앞서 연구가 시작된 원자력 선진국들에 있어서도 큰 차이가 없다.

심지층처분과 다중방벽

현재 국제적으로 통용되고 있는 방사성폐기물의 관리 방법은 육지처분방식으로 일반적으로 중저준위폐기물은 천층처분방식으로, 고준위폐기물은 심지층처분방식으로 고려중이다. 이중 고준위방사성폐기물은 수 만년 이상이라는 장기간 동안 생태계로부터 안전하게 격리되어야 하기 때문에 지하 수백 미터 깊이에 위치한 안정한 암반내에 건설하는 개념이 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 대부분의 국가에서 처분장의 안정성은 다중방벽(multi-barrier) 개념에 근거하고 있으며, 다중방벽개념은 폐기물 용기를 지하수로부터 차단하고, 만약 지하수와의 접촉이 일어나도 지하수에 의해 용해되어 인간환경으로 이동될 수 있는 방사성핵종의 양을 최소화시키는 것이 기본개념이다(정찬호, 1992). 심

부지층의 결정질암에 건설되는 고준위폐기물처분장은 진입갱(shaft), 연결터널, 처분동굴 등으로 이루어진다. 처분동굴 바닥에 수직 처분공(borehole)을 파고, 이곳에 처분용기를 넣은 폐기물을 정치시킨 후 처분용기와 처분공의 벽 사이는 완충재(buffer material)로 충전시킨다. 처분동굴 내의 처분공들이 모두 폐기물로 채워지면, 처분동굴과 연결터널을 뒷채움재(backfill material)로 채운 후, 입구를 플러깅재(plugging material)로 막아 폐쇄시킨다. 진입갱과 부지조사에 사용된 수평 및 수직 시추공, 주요 균열지대 등은 콘크리트 그라우팅 등으로 밀봉시킨다(Simmons and Baumgartner, 1994; SKBF/KBS, 1983). 그러나 지질학적 시간개념에서 이들이 영구히 안정한 상태에 있는 것은 불가능하며 궁극적으로 폐기물은 지하수와 접촉하게 되어 폐기물에 함유되어 있던 방사성 핵종이 지하수와 함께 주로 암반의 단열대를 따라 이동하면서 유출되게 된다. 처분용기, 완충재 및 뒷채움재를 통칭하여 공학적 방벽(engineered barriers)이라고 하며, 이 중 처분장으로부터 방사성 핵종이 유출되는 것을 저지하는데 1차적으로 중요한 역할을 하는 것이 완충재이다. 따라서 완충재는 물에 대한 높은 흡수성, 낮은 투수성, 높은 이온 흡착능력 및 낮은 확산특성을

가져야 하며 지하수의 성분에 큰 영향을 미치지 않아야 하고 구조적 운동(단층, 지진)에 대한 기계적 완충역할, 높은 열전도도 등의 특성을 가져야 한다(Brookins, 1984). 따라서 고준위폐기물처분장 완충재가 가져야 하는 요구사항은 낮은 수리전도도, 높은 핵종저지능, 높은 팽윤성, 낮은 팽윤압, 양호한 역학적 특성, 높은 열전도도, 장기건전성 및 낮은 유기물 함량이다(Simmons and Baumgartner, 1994; SKBF/KBS, 1983; SKB, 2001).

일반적으로 완충물질 또는 뒷채움재료로 단일 점토재료나 점토에 모래, 폐석, 제올라이트, 기타광물재료를 혼합한 혼합재료를 사용하는 것으로 구분할 수 있다. 이 중 벤토나이트는 높은 흡착능력, 양호한 팽윤성, 낮은 투수율, 높은 공극률 및 처분환경에서의 내구성 등의 특성을 가지며, 이 때문에 벤토나이트를 기본재로 하는 물질이 방사성폐기물 처분장 공학방벽 물질 중 최적의 후보재료로 고려되고 있다. 대부분의 국가에서는 모두 완충재나 뒷채움재의 재료로 자국에서 산출되는 벤토나이트를 채택하기 위한 연구를 수행하고 있으며 각국에서 고려하고 있는 완충재 후보물질들을 표 1에 요약하였다(한국 원자력연구소, 1996).

표 1. 각국의 고준위폐기물처분장 완충재 후보물질

국가	후보물질	건조밀도	다짐방법	정치방식
캐나다	50:50 sand : Na-bentonite	~ 1.67	In situ	Borehole
스웨덴	Na-bentonite	1.8 ~ 2.0	Precompacted blocks	Borehole
핀란드	Na-bentonite	1.8 ~ 2.0	Precompacted blocks	Borehole
프랑스	Ca-bentonite	1.4 ~ 1.8	Precompacted blocks	Long borehole
스위스	Ca-bentonite	1.65 ~ 1.75	Precompacted blocks	In-room
스페인	Ca-bentonite	1.4 ~ 1.8	Precompacted blocks	Borehole
일본	Na-bentonite	1.8	Precompacted blocks/In situ	Borehole/In-room

완충재 설계시 고려사항

열전도도

방사성폐기물로부터 생성된 열은 주변암반의 국지적인 열팽창을 일으켜 암반에 균열이 일어날 수 있으며 이를 통하여 지하수가 침투하기 쉽게 된다. 따라서 이러한 열에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 암반의 고열전도율, 고열함유능, 저열팽창율, 고인장강도, 높은 이완능력 등의 조건이 요구된다. 이 중 완충재의 높은 열전도도가 가장 중요한 열적 요구 특성 중 하나로서, 완충재는 열을 외부로 잘 소산시킬 수 있어야 한다. 왜냐하면 처분용기로부터 탈산되는 붕괴열이 완충재에 축적되면 완충재의 성능을 저하시킬 뿐 아니라 주변암반을 국부적으로 팽창시켜 암반의 균열이 발생할 수 있기 때문이다.

처분된 사용후핵연료의 최대온도는 3년 후에 완충재나 뒷채움재의 성능에 따라 160~200℃가 되며 이러한 온도는 폐기물과 처분용기 사이의 빈 공간에서 급격히 감소하여 처분용기 표면에서는 약 80℃ 이하가 되는 것으로 예상된다. 이러한 설계상의 처분용기의 온도 구배가 그대로 유지된다면 처분용기의 장기 안전성을 확보할 수 있지만, 만약 완충재의 열전도도가 낮아서 처분용기내의 열이 주변암반으로 충분히 잘 전달되지 못하고 처분공 내부에 축적된다면 처분용기 및 용기 내부의 사용후핵연료의 안정성도 확보될 수 없을 뿐더러 완충재 자체의 온도도 높아지면서 완충재를 구성하는 광물질(주로 스�멕타이트)이 용해되거나 완충재 내의 수분이 기화되어 증기압이 증가함으로써 뒷채움재를 파괴시키는 결과를 초래하게 되기 때문에 완충재의 온도는 100℃ 이하를 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위하여 가장 중요한 완충재의 설계요건이 높은 열전도도를 가져야 한다는 점이다.

일반적으로 화강암의 열전도도는 약 3.5 Wm^{-1}

K^{-1} 로서 일반적으로 고려되는 완충재 블록보다 훨씬 크기 때문에 완충재의 열전도도가 매우 중요한데 100℃ 이하로 유지하기 위해서는 완충재의 열전도도가 $1.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 이상이어야 한다. 완충재의 열전도도는 일반적으로 압축밀도, 함수량, 모래 및 분쇄암석의 함량이 높을수록, 공극률이 낮을수록 증가하며, 온도의 영향은 그리 크지 않은 것으로 알려져 있다. 완충재로 사용되는 벤토나이트를 구성하는 광물에 따라서도 열전도도가 달라질 수 있는데, 벤토나이트 완충재의 열전도도 향상을 위하여 각국에서는 모래 등의 첨가재를 넣어 완충재를 제조하는 방안을 강구하기도 한다. 벨기에의 경우에는 흑연 분말의 첨가를 고려중이며, 우리나라의 경우에는 국내의 옥산 벤토나이트 원광을 완충재의 원료로 사용할 경우 벤토나이트 블록의 제작 용이성과 열전도 증가의 효율성을 고려하였을 때 건조밀도 1.6g/cm^3 , 모래 함량 10~30wt%, 함수량 15wt%로 벤토나이트 블록을 제조하는 것이 경제적, 기술적으로 가장 효율적인 것으로 제안된 바 있으며(김건영, 2006), 이후의 실험에서는 약 5% 흑연의 첨가만으로도 완충재 설계요건을 충족하는 열전도도의 향상을 보여주기도 하였다.

수리전도도

처분장 주변암반의 조건으로서 방사성핵종이 지하수를 따라 이동하는 것이 없거나 아주 적어야 한다는 점과 방사성폐기물을 백만년 고립시켜야 한다는 조건을 충족시키고자 독일의 처분장 선정과정에 관한 AkEnd Committee의 권고보고서에서는 처분장 주변 암반의 투수계수를 10^{-12}m/s 이하로 추천한 바 있다. 이러한 암반 조건에서 완충재의 수리전도도는 모암의 수리전도도를 기초로 지하수가 완충재에 모이지 않도록 주변암반과 비슷하거나 보다 낮은 수리전도도를 가져야 하기 때문에 10^{-12}m/s 이하의 낮은

수리전도도를 가져야 한다.

일반적으로 완충재의 수리전도도는 압축밀도가 낮고, 모래함량과 온도가 높을수록 증가하기 때문에 완충재를 이루고 있는 광물의 종류 및 그 함유량에 따라 달라지며, 따라서 압축밀도와 스멕타이트의 함량 및 첨가제의 함량을 변화시켜 요구되는 완충재의 수리전도도의 조절이 가능하다.

물리적 성질

완충재층은 지진 등 외부 충격으로부터 처분용기를 보호할 뿐 아니라 용기부식 생성물의 팽창이나 모암의 크립 변형 등을 물리적으로 흡수할 수 있어야 한다. 일본의 경우 탄소강의 부식에 따른 완충재가 받게 될 응력을 고려하여 완충재 두께가 30cm 이상이어야 한다고 연구된 바 있다. 이러한 물리적 성질과 관련하여 완충재에서 측정해야 하는 기본적인 물리적 특성들은 일축압축강도, 탄성률, 인장강도, 초기 공극률, 압축지수, 팽윤지수 등이 있으며 이중 벤토나이트의 팽윤압이 가장 중요한 물리적 요소이다.

일축압축강도 및 전단강도 등의 완충재의 물리적 성질은 대부분 모래 등의 첨가제와 함수비에 따라 변화한다. 팽윤압의 경우는 완충재의 장기 안전성 확보를 위하여 완충재가 외부 압력에 의해 손상되지 않아야 하므로 완충재의 팽윤압은 정수압을 지탱해야만 한다. 또한, 완충재는 처분공 굴착시 발생된 균열과 암반의 구조변화에 의해 생성되는 틈새를 메꾸는 역할을 해야 하므로 이를 위해서는 완충재의 팽윤압이 지하수 압력보다 1MPa 정도 더 커야 한다(SKB, 2001).

처분용기와 관련해서는 완충재의 팽윤압은 암반과 금속용기에 접촉이 잘 되도록 충분히 커야 하지만, 처분용기를 파괴할 정도로 커서는 안된다. 또한 처분용기가 견딜 수 있는 압력은 지하수압, 빙하나 상부 지층의 무게, 완충재의 팽윤압을 더한 압력보다 높아야 한다. 여기서 지하

수압과 상부 지질에 따른 압력은 고정된 압력이고, 팽윤압은 완충재의 특성에 따라 조절 가능한 압력이기 때문에 완충재의 팽윤압과 처분용기의 물리적 성질은 상호 보완적으로 조절할 수 있다. 즉, 완충재를 우선 결정할 경우는 처분용기가 완충재의 팽윤압을 받아들일 수 있도록 설계/제작되어야 하며, 반대로 처분용기의 설계요건이 우선 결정되었을 경우에는 처분용기가 지탱할 수 있는 압력에 적합하게 완충재의 팽윤압을 조절하여 설계·제작해야 된다.

완충재의 조성

완충재로 일반적으로 고려되고 있는 벤토나이트는 주로 몬모릴로나이트(montmorillonite)로 구성된 점토광물의 집합체를 통칭하며, 이는 일반적으로 층간 양이온의 종류에 따라 Ca형과 Na형으로 나누어진다. 다른 나라에서 완충재로 고려되고 있는 벤토나이트를 표 2에 정리하였다. 대부분 완충재의 성능향상 및 취급/제작의 용이성을 위하여 첨가제 사용을 고려하고 있다.

벤토나이트에 모래를 첨가하면 열전도도와 기체의 투과도를 높이고 완충재의 취급 및 제작이 쉽게 되어 경제적이지만, 수리전도도를 증가시키면서 팽윤압을 낮추기 때문에 처분조건에 따라 장점으로도 혹은 단점으로도 작용할 수 있다. 따라서 적절한 완충재 및 첨가제의 선택은 처분장 주변의 지하수, 모암의 단열특성, 처분용기의 거치방법 등의 여러 가지 처분장의 현장조건을 고려하여 선택하여야 한다. 스웨덴, 일본, 캐나다의 경우에는 완충재로서 벤토나이트에 각각 0, 30, 50%의 모래첨가를 고려하고 있다.

첨가제 이외에 완충재의 조성으로써 고려해야 할 항목이 유기물의 함량이다. 완충재에 유기물질이 2wt% 이상 포함되면 토양이 물러지거나 굳어지는 현상이 지연된다. 그러나 처분관점에서 보다 중요한 영향은 유기물이 형성한 콜로이

표 2. 각국에서 완충재로 고려되고 있는 벤토나이트

Clay	Manufacturing company	Mont. content
Montm. MX-80	American Colloid (USA)	75
Montm. Tixoton	Sud-Chemie (Germany)	90
Montm. Moosburg	Sud-Chemie (Germany)	65
Montm. IBECO Na	Silver & Baryte (Greece)	80
Montm. IBECO Ca	Silver & Baryte (Greece)	80
Saponite S	(Thtough Enresa, Spain)	70
Beidellite	(Thtough Enresa, Spain)	35
Kunigel	Kunimine Ind., Japan	50
Montm. RMN	Obrnice (Czech Republic)	90
Mixed-layer, Friedland	DURTEC (Germany)	45

드가 핵종을 흡착하여 핵종의 이동을 증가시키게 되는데, 완충재의 밀도가 높으면 공극의 크기가 작아져서 콜로이드의 이동을 저지시킬 수 있다. 따라서 유기콜로이드의 생성과 이동을 막기 위해서는 완충재 내의 유기물 함량을 2% 미만으로 제한하고 완충재의 밀도를 높여서 제조하여야 한다(Pusch, 2002).

핵종지연효과

방사성핵종은 지하수의 이동이 없다 하더라도 확산에 의해 모암으로 유입되고 그로부터 생태계도 이동한다. 따라서 완충재는 처분용기로부터 노출되는 방사성핵종들의 이동지연효과가 높아야 한다. 또한 공극수에서 방사성핵종들의 용해도는 낮아야 하며, 지하수 화학조성의 급격한 변화를 막을 수 있는 화학적 완충기능이 있어야 한다. 방사성핵종의 확산계수는 방사성핵종의 확산 모델에 의한 계산에 의해 결정되는데, 완충재에서 핵종의 이동이 암반보다 낮아야 암반과의 경계면에서 농도편차에 따른 암반내 핵종의 확산이동이 작게 된다. 따라서 캐나다와 스위스의 경우에는 길보기 확산계수를 양이온은 $10^{-11}m^2/s$ 이하, 음이온은 $10^{-9}m^2/s$ 이하가 되게 설계요건을 정하고 있다.

암반의 핵종저지능은 장주기 방사성핵종에 대

한 흡착능을 나타내는 Kd값으로 표시할 수 있으며 이 값은 처분장의 방사성안전성평가에 의해 결정된다. 처분장의 방사성안전성평가는 처분장에 의해 개인이 받을 수 있는 연간허용방사선량, 0.01 mSv 이하를 기준으로 수행되는데, 이때 요구되는 Kd 값은 $0.001m^2/kg$ 이상이 되어야 하며 이 값은 암반의 공극률이 0.15일 때 지하수내의 방사성핵종의 이동이 10 내지 20 배 정도 지연되는 것을 의미한다. 한편, 이 Kd 값은 광물의 종류와 양에 의존하는데, 점토 광물들, 망간, 산화철, 산화알루미늄, 철과 망간의 과산화물 혹은 수산화물, 석탄과 토탄 같은 유기물질 등은 방사성핵종에 대해 흡착성이 강한 반면, 규암, 사암, 화강암, 편마암 등과 같은 비점토성 암석은 약한 것으로 알려져 있다.

공극의 크기

일반적으로 완충재층은 콜로이드, 유기물, 미생물의 이동을 물리적으로 억제할 수 있도록 완충재 내의 공극크기는 암반의 공극크기보다 같거나 작아야 하며, 약 1 μm 이하로 유지시켜서 방사성 핵종이 확산에 의해서만 이동할 정도로 낮아야 한다. 이와 관련하여 일본 벤토나이트의 경우 유효점토밀도가 0.7 이상이면 콜로이드가 통과하지 못하였고, 스웨덴의 경우에는 지하수

로 포화된 완충재의 밀도가 1.9 이상이면 박테리아의 기생이 곤란한 것으로 보고된 바 있다.

암반 공극내 물의 이동은 공극표면으로부터 0.5 μm 이상에서 이루어지는데 이 거리 내에서는 표면과 물분자간이 정전기력에 의해 물의 점성이 증가하여 물의 이동성이 감소한다. 따라서 공극의 지름이 1 μm 이하인 공극에서는 물의 이동은 잘 일어나지 않는다. 콜로이드의 크기는 대부분 1 μm 미만이므로 1 μm 정도의 공극을 통과할 수 있으나, 1 μm 공극내에서는 물의 이동이 없으므로 물의 이동에 의한 콜로이드의 이동은 기대할 수 없으며, 농도 편차에 의한 확산에 의해서만 이동이 가능하다. 따라서 이런 작은 공극을 갖는 암반은 핵종의 이동을 억제할 수 있어 방사성폐기물의 처분암반으로서 적합하다. 이와 같은 암반의 조건으로부터 완충재의 공극 크기도 1 μm 미만이 되어야 하는데, 완충재의 공극의 크기가 1 μm 이상이 되면 공극수내의 용해물질 또는 콜로이드는 확산 속도보다 빠르게 이동하여 완충재와 암반의 경계면에 축적되게 된다. 이렇게 축적된 콜로이드나 용해물질은 경계면 암반내에 농도편차를 형성하게 되고 이 농도편차는 시간이 경과함에 따라 증가되므로 결과적으로 이들의 암반내 확산을 가속시킨다. 따라서 암반 공극내에서 콜로이드나 용해물질의 확산이 가속되는 것을 방지하기 위해서는 완충재 내의 공극크기를 암반의 공극크기와 같거나 작게 유지시켜 경계면에서 이들이 축적되지 않도록 해야 된다.

기체확산

처분환경에서 기체는 처분된 폐기물의 방사선에 의해 지하수, 용해물질 또는 유기물이 분해되어 발생하거나 박테리아의 작용, 처분용기의 부식 등에서 발생할 수 있다. 이렇게 생성된 기체는 완충재층을 잘 통과할 수 있어야 하지만, 그로 인하여 완충재층 내에 공동이나 통로가 형성되어서

는 안된다. 처분의 안전성 평가에서 중요한 것은 기체의 최대 발생량과 발생률인데, 기체 발생량은 폐기물의 형태와 내용물, 폐기물내 수분함량, 그리고 폐기물에 공급되는 지하수 또는 용해물질에 의존한다. 기체 발생률은 처분지역 또는 폐기물내의 온도, 수분함량 및 화학적 환경에 의존한다(Harrington and Horseman, 2003).

기체발생으로부터 처분안전성을 증가시키기 위해서는 기체 발생을 최소화시키거나 발생된 기체를 외부로 방출시켜 내부의 압력을 크게 증가시키지 않아야 한다. 기체의 발생량이 작은 경우는 완충재 공극수에 용해되어 기체가 방출되나, 지하수에 용해되어 확산되는 기체 이동은 지하수에 의한 기체의 용해도가 낮기 때문에 매우 느리다. 따라서 보다 다량의 기체발생이 지속되면 공극수의 용해도 이상이 되어 결국 기체압력이 증가하게 된다. 이러한 기체압력 증가를 줄이기 위해서는 완충재와 암반의 기체투과능이 높아야 하나, 기체 투과능이 높으면 투수력 또한 증가하게 되어 이에 따른 기체 발생이 증가된다. 따라서 완충재와 암반은 처분조건하의 내부압력을 유지할 수 있는 정도의 투수력을 가져야 한다. 한편, 기체가 완충재내로 침투하려면 기체압력이 지하수로 포화된 완충재의 팽윤압과 지하수의 압력보다 커야 하지만, 만약 기체압력이 계속 증가하면 완충재의 파괴가 발생하기 때문에 완충재의 팽윤압과 지하수의 압력 < 기체의 압력 < 완충재 파괴점의 관계가 유지되어야 한다.

완충재의 제조

완충재로 사용되기 위하여 벤토나이트 혹은 벤토나이트와 첨가제와의 혼합물은 설계된 처분 시스템에 알맞게 원하는 건조밀도를 얻기 위하여 수분함량과 압력을 조절하여 블록으로 제조되는데, 완충재로서 벤토나이트 블록을 제조하는 데 영향을 미치는 인자들은 수분함량, 블록

형태, 가압력 및 가압속도, 압축동안의 크립 현상, 벤토나이트의 종류와 입자크기 등이 있다 (Pusch, 2002). 궁극적으로는 완충재는 크기, 형태, 조성 등이 균일하고, 블록 성형 중 분말의 비산을 억제할 수 있어야 하고, 블록 성형작업이 용이하여야 한다. 또한 성형된 블록은 취급하기에 충분한 강도를 가져야 하며, 거치 그리고 기타 작업도 용이하여야 한다. 이렇게 최종적으로 제조된 벤토나이트 블록은 본래의 물리적 화학적 특성이 오랜 기간 유지되어야 한다. 벤토나이트 블록을 제조할 때 1.9~2.0mg/m³의 건조밀도를 얻기 위해서는 100MPa의 압력이 필요하나 그 이상의 압력에서는 밀도가 크게 증가하지 않는다고 알려져 있다. 함수량을 변화시켜 압축효과를 증대시킬 수 있는데, 유사한 함수량을 보유한 점토는 가압력과 밀도의 관계가 대체로 유사한 값을 갖는다. 또한, 블록은 균일한 밀도를 가져야 하는데, 일정 수분을 포함하고 있는 벤토나이트를 높은 압력으로 압축할 경우 가

압면에서 멀어질수록 공극률이 증가하기 때문에 이를 보완하기 위해서는 수분의 함량을 높이거나 압력을 높여야 한다.

벤토나이트 블록 제조 후 압력을 제거하면 벤토나이트는 탄성력에 의해 다시 팽창하게 되는데, 포화상태보다(수분함량이 약 21%) 수분함량이 적으면 복원력이 증가하는 경향을 나타내므로 완충재 제조시 벤토나이트 복원력을 고려하여 처분공에 벤토나이트 블록이 용이하게 장전될 수 있도록 제조해야 된다. 또한, 벤토나이트 블록 제조시 가압속도와 가압 지속시간에 따른 영향은 수분함량이 높은 벤토나이트를 가압할 경우 가압속도에 영향을 받지 않으나 낮은 수분 함량에서는 약간의 영향을 주기 때문에 보다 높은 밀도를 얻기 위해서는 빠른 속도로 가압해야 한다. 또한 수분함량에 관계없이 가압지속시간이 길면 길수록 공극률이 감소하는, 즉 밀도가 커지는 경향을 나타내기 때문에 상대적으로 높은 밀도의 벤토나이트 블록을 얻기 위해서는 빠른

표 3. 세계 여러 국가들의 고려되고 있는 완충재 요건 비교

	Sweden	Belgium*	Japan	Korea
Material	MX-80	FoCa clay(60%) +sand(35%) +graphite(5%)	Kunujel VI 70 sand 30	Kyungju Ca-bentonite
density(mg/m ³) (dry density)	2.0 (1.59)		(1.60)	(1.60)
initial water content(%)	10-17		7	
dry porosity (%) (pore size)	41 (<1 μ m)	30~40, 5 nm (mean)		
Thermal conductivity (W/mK)	1.05(1year), 1.15(15years)	Graphite 첨가 (1.5→4로 증가)	0.78	>1.0
Hydraulic conductivity (m/s)	<1x10 ⁻¹²	1x10 ⁻¹²	4.5x10 ⁻¹³	<1x10 ⁻¹²
Diffusion coeff. (m ² /s)	1x10 ⁻¹¹ for cation			<10 ⁻¹¹ for cation <10 ⁻⁹ for anion
Swelling pressure (MPa)	8 (for 700m depth)		<정수압 + 1.0	< 정수압 + 1.0
Thickness (cm)			70	50

* Belgium is considered the mixed concept for buffer and backfill materials.

속도(0.3mm/s 이상)로 가압하고 가압한 상태를 장시간(500초 이상) 유지시키는 것이 필요하다.

결론

앞서의 설명과 관련하여 세계 각국에서 현재 고려하고 있는 기준 완충재들의 특성을 표 3에 나타내었으며, 일반적으로 적용되는 완충재 설계시 고려해야 할 사항들을 다음과 같이 정리될 수 있다.

1. 완충재는 처분용기를 보호하고 핵종의 이동을 지연시켜야 한다.
2. 낮은 수리전도도, 높은 핵종저지능, 높은 팽윤성, 적절한 팽윤압, 양호한 역학적 특성, 높은 열전도도, 장기전전성 및 낮은 유기물 함량을 가져야 한다.
3. 완충재의 수리전도도와 핵종의 이동성은 암반보다 작아야 하며, 처분용기 벽의 온도를 100℃ 이하로 유지하기 위하여 열전도도가 1.0Wm⁻¹K⁻¹ 이상이 되어야 한다.
4. 완충재의 팽윤압은 암반과 금속용기에 접촉이 잘 되도록 충분히 커야 하지만, 처분용기를 파괴할 정도로 커서는 안된다.
5. 완충재의 조성구성과 두께는 핵종유출, 열역학적 성능, 경제성 및 처분용기의 부식으로 인한 팽윤 등을 고려하여 결정하여야 한다.
6. 완충재의 크기, 형태, 조성은 균일하고, 처분장에서의 이동, 거치 등의 작업이 용이하여야 한다.

참고문헌

김건영, 김승수, 최종원, 박성완, 배대석 (2006) 완충재의 물리적 성능향상을 위한 국내 벤토나이트의 열전도도 측정실험. 한국광물학

회지, 19, 89-98.
정찬호 (1992) 방사성폐기물처분장 인공방벽재료. 광물과 산업, 4, 31-34.
한국원자력연구소 (1996) 고준위폐기물 처분기술 개발 : 처분시스템평가 기술개발 연구. KAERI-NEMAC/RR-170/96, 과학기술부, 483 p.
한국원자력연구소 (2003) 사용후핵연료 처분을 위한 처분용기, 완충재, 뒷채움재의 성능 및 설계요건, KAERI/TR-2628/2003.
Brookins, D.G. (1984) Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal, 267-278, Springer-Verlag.
Harrington J.F. and Horseman S.T. (2003) Gas migration in KBS-3 buffer bentonite: Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, SKB-TR-03-02.
Pusch, R. (2002) The buffer and backfill handbook: Part 1 Definitions, basic relationships, and laboratory methods, SKB-TR-02-20.
Roland, R. (2002) The buffer and backfill handbook: Part 2 material and techniques, SKB-TR-02-12.
Simmons G. R. and Baumgartner P. (1994), The disposal of Canada's nuclear fuel waste: engineering for a disposal facility, Atomic Energy of Canada Limited Report, AECL-10715, COG-93-5.
SKB (2001) RD&D-Programme 2001: Program for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, TR-01-30.
SKBF/KBS (1983) Final storage of spent fuel - KBS-3.