



중·저준위 방사성 폐기물 처리용 시멘트 고화체의 압축강도와 동탄성계수의 관계

김진만¹⁾ · 정지용²⁾ · 최지호³⁾ · 신상철^{4)*}

¹⁾공주대학교 건축공학과 ²⁾한국철도기술연구원 ³⁾한국건설생활환경시험연구원 ⁴⁾큐슈대학교 대학원 인간환경학부

Relationship between Compressive Strength and Dynamic Modulus of Elasticity in the Cement Based Solid Product for Consolidating Disposal of Medium-Low Level Radioactive Waste

Jin-Man Kim,¹⁾ Ji-Yong Jeong,²⁾ Ji-Ho Choi,³⁾ and Sang-Chul Shin^{4)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Kongju National University, Cheonan 331-717, Korea

²⁾Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

³⁾Korea Conformity Laboratories, Seoul 153-740, Korea

⁴⁾Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University, Japan

ABSTRACT Recently, the medium-low level radioactive waste from nuclear power plant must be transported from temporary storage to the final repository. Medium-low level radioactive waste, which is composed mainly of the liquid ion exchange resin, has been consolidated with cementitious material in the plastic or iron container. Since cementitious material is brittle, it would generate cracks by impact load during transportation, signifying leakage of radioactive ray. In order to design the safety transporting equipment, there is a need to check the compressive strength of the current waste. However, because it is impossible to measure strength by direct method due to leakage of radioactive ray, we will estimate the strength indirectly by the dynamic modulus of elasticity. Therefore, it must be identified the relationship between of strength and dynamic modulus of elasticity. According to the waste acceptance criteria, the compressive strength of cement based solid is defined as more than 3.44 MPa (500 psi). Compressive strength of the present solid is likely to be significantly higher than this baseline because of continuous hydration of cement during long period. On this background, we have tried to produce the specimens of the 28 day's compressive strength of 3 to 30 MPa having the same material composition as the solid product for the medium-low level radioactive waste, and analyze the relationship between the strength and the dynamic modulus of elasticity. By controlling the addition rates of AE agent, we made the mixture containing the ion exchange resin and showing the target compressive strength (3 ~ 30 MPa). The dynamic modulus of elasticity of this mixtures is 4.1 ~ 10.2 GPa, about 20 GPa lower in the equivalent compressive strength level than that of ordinary concrete, and increasing the discrepancy according to increase strength. The compressive strength and the dynamic modulus of elasticity show the liner relationship.

Keywords : medium-low level radioactive waste, ion exchange resin, air entraining agent, compressive strength, dynamic modulus of elasticity

1. 서 론

방사성 폐기물이란 핵에너지를 사용하는 과정에서 발생하는 원자력 부산물을 지칭한다. 방사성 폐기물은 함유되어 있는 방사성 핵종에 따라 고준위 방사성 폐기물과 넓은 의미의 중·저준위 방사성 폐기물로 크게 분류된다.

고준위 방사성 폐기물은 원자로의 핵연료를 교체할 때 나오는 '핵연료'인데, 이것은 우라늄의 분열로 생겨난 온갖 핵분열 생성 물질을 포함하고 있다. 아직 임시저장 이외의 폐기 경험을 가진 나라는 없으며 보통 발전소 내부에 특수 설계된 수조 속에 임시 보관하고 있다. 중·저준위 방사성 폐기물이란 원자력발전소에서 나오는 폐필터, 폐유탄유, 폐이온 교환수지 등의 중준위 폐기물과 작업복, 장갑, 덧신, 폐부품, 방사성 동위원소 폐기물 등의 저준위 폐기물을 의미한다. 중·저준위 폐기물의 처리방법은 특별히 어떤 조작을 하는 것이 아니라 방사능이 자연 방사능 수준으로 떨어질 때까지 인간이나 자연으로부터

*Corresponding author E-mail : hiykhj@kongju.ac.kr
 Received December 10, 2012, Revised March 18, 2013,
 Accepted March 26, 2013
 ©2013 by Korea Concrete Institute

완전히 격리시켜 원자력 발전소 내의 임시저장시설이나 암반 동굴에 저장하여 처리하는 것이다.¹⁾

특히 이 연구에서 대상으로 하고 있는 페이온 교환수지는 원자력 관련기관의 방사성 액체 폐기물 처리과정에서 발생하는 것으로서 주로 시멘트나 아스팔트, 고분자 물질(polymer)로 고형화하거나 콘크리트로 차폐된 200L 드럼에 넣어 발전소 내에 보관하고 있다.²⁻⁵⁾ 우리나라에서는 연간 수 천 드럼의 중·저준위 방사성 폐기물이 배출되고 있으며 현재 각 원전의 임시 저장고에 저장하고 있다. 그러나 임시 저장고가 포화상태에 도달하게 되어 최종 폐기물 처분장(경상북도 경주, 2014년 준공 예정)으로 이송하여 관리해야 하는 시점에 이르렀다.

원전 부지 내에 임시로 저장하여 관리하고 있는 방사성 폐기물 드럼을 영구 처분장으로 이송하기 위해서는 드럼 내용물의 물리·화학적 특성이 처분사업자가 제시한 인수기준⁷⁾을 만족하는지 확인해야 한다. 특히, 분석항목 중 압축강도는 파괴시험을 실시할 경우 방사성 물질 유출이 우려되는 등 안전상의 문제가 발생할 수 있다.⁶⁾ 따라서 비파괴 시험을 통해 폐기물의 압축강도를 예측해야 하지만 일반적인 ‘비파괴시험을 통한 콘크리트의 압축강도 추정식’을 적용하기에는 무리가 있다. 그러므로 페이온 교환수지 방사성 폐기물과 유사한 시험체를 재현하여 압축강도와 비파괴시험을 실시하고 그 관계를 분석하여 적용하는 방법이 더 타당하다. 인수기준을 살펴보면 폐기물은 기준치 이상의 압축강도를 가져야 하며, 시멘트 등과 같은 경질 고화체의 경우 압축강도는 3.44 MPa (500 psi) 이상으로 규정되어 있다.⁷⁾ 현재로서는 과거에 처리한 폐기물의 압축강도를 정확히 알 수 없지만 시멘트의 수화반응은 오랜 시간에 걸쳐 강도 발현에 기여하기 때문에 기준치를 크게 상회할 가능성이 있다.

이러한 배경에서 이 연구에서는 중·저준위 방사성 폐기물 처리용 시멘트 고화체의 재료구성을 유지하면서 3~30 MPa 범위의 다양한 강도 수준을 갖는 시멘트 고화체를 제조하고자 하였다. 이를 위해 이 연구에서는 AE제의 사용량을 정밀하게 조정하여 다양한 강도를 갖는 이온교환수지를 고화한 경화체를 제조하였고, 이를 대상으로 압축강도와 동탄성계수의 관계를 도출하였다.

2. 연구 내용 및 범위

2.1 연구 계획

이 연구에서는 1989년 한국전력공사 기술연구원에서 발표한 보고서 「방사성 폐기물 고화공정 프로그램 개발」의 내용에 준하여 페이온 교환수지를 고화시킨 폐기물을 재현 대상으로 하였다.⁸⁾ 상기 폐기물과 유사한 시험체를 제조하기 위하여 방사능 흡착공정에 사용되는 음이온 교환수지를 사용하였으며 배합조건 및 배합비는 당시의 조합대로 재현하기 위하여 보고서의 내용을 기준으로 하였다.

이 연구는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 2단계로 나뉘어진다. 1단계는 예비실험으로서 AE제의 사용량과 사용방법에 따른 강도발현 특성을 검토하여 압축강도와 AE제 사용량과의 관계를 유추하였다. 2단계인 이 실험에서는 1차실험 결과를 바탕으로 최적배합을 도출하여 시험체를 제조함으로써 목표 강도를 만족시켜 물리·역학적 특성을 검토하였으며 최종적으로 압축강도와 동탄성계수의 관계식을 구하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 고화재료

이 실험에 사용된 고화용 재료의 화학 조성은 Table 1과 같다. 재료는 과거에 페이온 교환수지를 고화시키기 위해 사용된 시멘트와 소석회를 사용하였다. 시멘트는 KS L 5201 규정을 만족하는 국내 H사의 보통 포틀랜드 시멘트(밀도 3.15 t/m³, 분말도 약 3000 cm²/g)를 사용하였고 소석회는 CaO 함량이 90% 이상인 1급 소석회를 사용하였다.

2.2.2 이온교환수지

실제 페이온 교환수지 방사성 폐기물과 이 실험 상의 이온교환수지를 고화시킨 시멘트 경화체는 유사한 환경을 갖는 것으로 가정하여 실험을 실시하였다. 사용된 이온교환수지는 방사성 액체폐기물 처리시 이온교환공정에서 사용하고 있는 수지로서 CI을 교환기로 가지고 있으며 styrene과 divinyl-benzene의 공중합체로 되어 있는 강염기성 음이온 교환수지이다. 수지는 약 50%의 함수율을 가지고 있고 수지 내부에 존재하는 수분은 시멘트 경화에 영향을 미치지 않지만 수지 입자 사이의 공극부피에 해당하는 수분은 시멘트 경화에 영향을 주게 된다. 따라

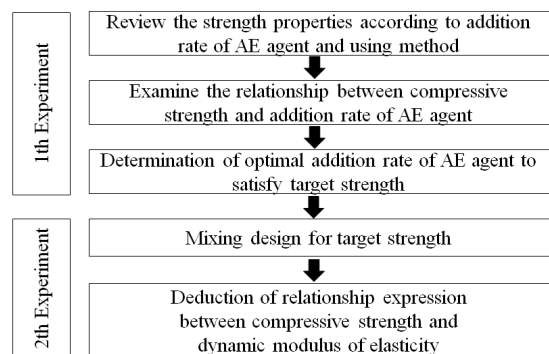


Fig. 1 Process of research

Table 1 Chemical composition of solidifiable materials

Type	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SiO ₃	K ₂ O	SrO	ZrO ₂	TiO ₂
PC ⁽¹⁾	72.1	11.2	2.3	0.1	5.5	5.2	2.7	0.1	-	0.3
CH ⁽²⁾	93.8	1.4	0.6	0.1	1.4	1.5	-	0.1	-	-

⁽¹⁾PC: potland cement, ⁽²⁾CH: calcium hydroxide

서, 수지 입자 주변에 정전기적으로 둘러싸인 수분이 없고 단지 수지 내부에만 수분이 존재하는 상태로 사용하였다. 음이온교환수지의 특성은 Table 2와 같다.

2.2.3 공기연행제

다양한 강도를 갖는 시험체를 제조하기 위해 매트릭스 내부에 공극을 도입하여 강도를 저하시킬 목적으로 사용한 AE제는 음이온성 계면활성제를 주성분으로 하는 콘크리트용 공기연행제를 사용하였다.

2.2.4 기포

기포는 시험체의 밀도를 낮춰 강도를 저하시킬 목적으로 선발포방식에 의하여 제조하였다. 기포 제조는 압축 공기를 통해 계면활성제 수용액을 유입시키고, 유입된 수용액을 비드로 채워진 관으로 통과시켜 액체를 유동시키는 방법을 사용하였다. 제조된 기포는 고화재료와 이온교환수지가 혼합된 슬러리에 직접 투입하여 추가적으로 믹싱하게 된다. Fig. 3, 4는 기포발생기와 발포된 기포의 형상을 나타낸 것이다.

Table 2 Properties of anion exchange resin

Matrix	Styrene divinyl-benzene copolymer
Physical form	Pale yellow translucent beads
Ionic form	Chloride
Specific gravity	1.063 ~ 1.093
Moisture (%)	49 ~ 55
Exchange capacity (eq/L)	above 1.3
Effective diameter (mm)	0.35 ~ 0.55

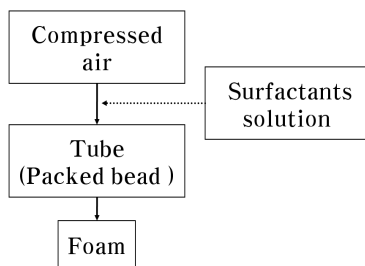


Fig. 2 Schematic diagram of foam production method



Fig. 3 Foam generator



Fig. 4 Produced foam

2.3 실험 방법

시험체는 보통 포틀랜드 시멘트와 소석회 및 음이온교환수지를 건비빔한 후 배합수를 첨가하여 혼합한 시멘트 슬러리에 AE제를 투입해 고속으로 믹싱하여 제조하였다. 제조된 시험체는 $\varnothing 100 \times 200$ mm 실린더 몰드에 타설하여 성형하였으며 항온항습실($20 \pm 1^\circ\text{C}$, RH 60 \pm 5%) 내에서 기건 양생하였다. 이온교환수지는 물과 접촉 시 팽윤되는 특성이 있기 때문에 균열과 함께 방사성 물질이 누출될 수 있고 또한 시멘트 경화체의 건조수축에 의해 균열이 발생할 수 있기 때문에 밀봉하여 외기와 차단한 상태로 양생하였다.

측정 항목 중 플로우는 <KS L 5111, 시멘트 시험용 플로 테이블>에 준하여 실시하였고 압축강도는 ASTM C 495-99a standard test method for compressive strength of lightweight insulating concrete에 의해 측정하였다. 또한, 슬러리 상태와 경화 후 시험체의 단위용적질량과 공기량은 <KS F 2409, 굳지 않은 콘크리트의 단위 용적 질량 및 공기량 시험 방법(질량 방법)>으로 산출하였고 <KS F 2424, 모르타르 및 콘크리트의 길이변화 시험방법>에 준하여 길이를 측정하였다. 동탄성계수는 <KS F 2437, 공명진동에 의한 콘크리트의 동탄성계수 및 동포아송비의 시험방법>에 의하여 측정하였다.

2.4 배합산정 절차

우선, 다양한 강도 범위를 갖는 시험체의 배합설계를 위하여 사전 실험을 통해 7일 강도와 28일 강도의 상관관계를 유추하였고 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 이온교환수지를 혼합한 시멘트 고화체의 7일과 28일 강도의 상관관계는 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$\sigma_{28} = 1.10 \times \sigma_7 + 0.90$$

여기서, σ_{28} : 재령 28일의 압축강도(MPa)

σ_7 : 재령 7일의 압축강도(MPa)

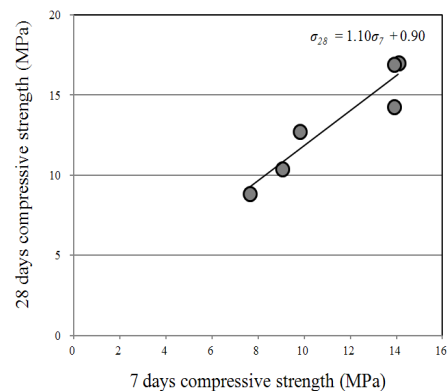


Fig. 5 Relationship between 7 and 28 days compressive strength from the previous experiment

배합의 산정은 1차 실험에서 측정한 7일 강도를 바탕으로 상기 수식을 적용하여 28일 강도를 추정된 후, 추정된 강도 값과 사용된 AE제 첨가율과의 관계를 도출하여 각각의 강도 수준에 필요한 최적의 AE제 첨가율을 역으로 계산하여 2차 실험에 적용하였다.

3. 1차 실험 - AE제 사용량 및 방법에 따른 강도 발현 특성 검토

3.1 실험 계획

1차 실험은 음이온 교환수지를 사용한 시멘트 고화체의 강도 범위를 알아보기 위한 실험으로서, AE제를 직접 사용하여 목표 강도를 만족시키는 방법과 AE제를 희석한 수용액을 발포시켜 만든 기포를 혼입하여 공극률을 높이는 방법으로 하였다. 문헌에서 제시한 최적 배합으로서 W/B는 35%, 수지함입률은 17.9%로 고정한 후, AE제 첨가량은 바인더 대비 중량비 0.0~2.0%의 9수준으로 설정하였다. 또한 발포된 기포를 슬러리 용적 대비 10, 30, 50, 70%로 혼입하였다. 시험체는 굳지 않은 상태에서 작업성을 고려하여 플로우를 측정하고 경화된 후 재령 3일과 7일의 압축강도를 측정하여 강도발현 패턴을 파악하고자 하였다. 또한, 측정된 압축강도와 AE제 사용량과의 상관관계를 분석하여 목표강도를 만족하는 시험체 제조를 위한 AE제 사용량을 추정하였다. 1차 실험 계획과 배합은 Table 3, 4와 같다.

Table 3 Plan of first experiment

Factor	Levels	Test items
Addition rates of AE agent (%)	0.0, 0.1, 0.2	- Flow - Compressive strength (3, 7 days)
	0.3, 0.4, 0.5	
	1.0, 1.5, 2.0	
	10 ⁽¹⁾ , 30 ⁽¹⁾ , 50 ⁽¹⁾ , 70 ⁽¹⁾	

⁽¹⁾: Addition rates of foams

Table 4 Mixing design of first experiment

Resin (%)	W/B (%)	AE agent (%)	Foam ratio (%)	Water (kg/m ³)	Unit volume (ℓ/m ³)				Unit weight (kg/m ³)			AE agent (kg/m ³)
					PC	CH	AER ⁽¹⁾	Foam	PC	CH	AER	
17.9	35	0~2	0	372	306	41	281	0	965	97	312	0~21
		0	10	334	276	37	253	100	869	87	281	0
		0	30	260	214	29	197	300	676	68	218	0
		0	50	186	153	21	141	500	483	48	156	0
		0	70	111	92	12	84	700	290	29	94	0

⁽¹⁾AER: anion exchange resin

3.2 실험 결과 및 고찰

3.2.1 플로우

각 시험체의 플로우 측정 결과는 Fig. 6과 같다. 플로우는 AE제를 첨가하지 않은 시험체에서 약 217 mm를 나타냈으며 AE제를 첨가하면 다소 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 콘크리트에 AE제를 첨가하게 되면 콘크리트 내에 구형의 미세한 독립기포를 발생시켜 ball bearing 효과에 의해서 타설 시 작업성이 향상되는데 이 연구에서도 유사한 결과가 나타났다. 하지만 AE제 첨가율 증가에 따른 경향은 나타나지 않았다. 이는 작업성을 고려하여 플로우는 210 mm로 설정하였고, AE제의 첨가량의 다소에 상관없이 모든 조건에서 충분한 유동성을 발현하였기 때문으로 판단된다.

반면 기포발생기를 통해 발포시킨 기포를 혼입하여 시험체를 제조한 경우, 기포의 혼입률이 증가할수록 플로우는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 기포 혼입률이 증가할수록 단위질량이 낮은 기포가 용적의 대부분을 차지하게 되면서 슬러리밀도가 낮아져 유동에너지가 상대적으로 감소하였기 때문이라 생각된다. 또한, 긴 사슬구조

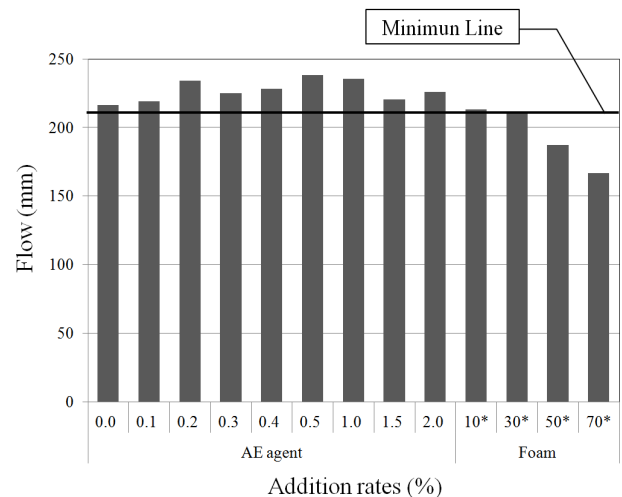


Fig. 6 Results of flow test

의 소수기 분자가 물의 계면에 배열되면서 기포 박막 내의 액체 흐름과 배수 속도를 감소시켜 액체의 점성이 증가되어 플로우가 감소하게 된 것으로 판단된다.⁹⁾ 특히, 기포를 50%와 70%로 혼입한 경우, 최소 플로우 값을 만족하지 못하였기 때문에 과거에 처리한 시멘트 고화체의 재현에 다소 무리가 있을 것으로 생각된다.

3.2.2 압축강도

1차 실험의 압축강도 측정 결과는 Fig. 7에 나타내었다. AE제를 사용하지 않은 시험체의 압축강도는 재령 7일에서 약 26 MPa를 나타내었으며, AE제를 사용할 경우 매트릭스 내부에 공극의 도입 효과가 나타나 압축강도는 감소하는 것으로 나타났다. AE제 첨가율 0.1%만으로도 압축강도는 약 60% 수준으로 급격하게 감소하였고 그 이후에는 AE제 첨가율이 증가하여도 압축강도의 감소폭이 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 0.1% 미만의 AE제 첨가율에 대해 검토하면 목표로 하는 다양한 강도(3~30 MPa)를 갖는 시험체의 제조가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 발포된 기포를 혼입한 시험체의 경우에도 압축강도의 컨트롤은 가능하였다. 한편, 기포를 70% 혼입한 시험체의 경우에는 손으로 만져도 부스러질 만큼 저강도였기 때문에 측정할 수 없었다.

3.2.3 소결

1차 실험 결과, 목표 강도를 만족하기 위한 강도 컨트롤은 AE제를 직접 사용한 경우와 기포를 제조하여 혼합한 경우 모두 가능할 것으로 판단된다. 그러나 AE제를 직접 사용한 경우에 실험이 간단할 뿐만 아니라 보다 안정적이고 정밀한 결과를 나타냈으며 동일한 강도 수준에서 작업성이 유리하기 때문에 AE제를 첨가하는 방법으로 충분히 강도 범위를 다양화 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 강도 수준별 AE제 첨가율 선정

선행 실험에서 도출된 결과를 분석, 검토하고 목표 강도를 만족하는 시험체를 제조하기 위한 최적의 배합을

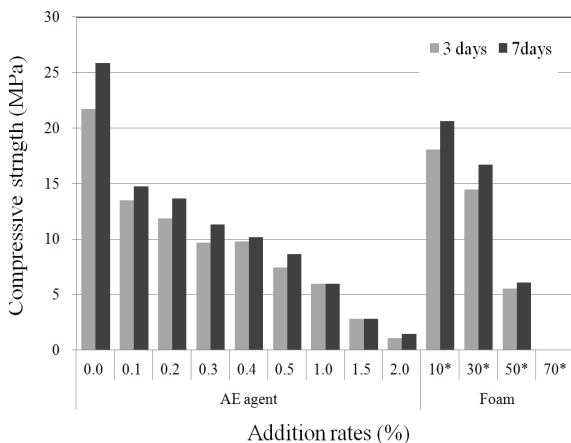
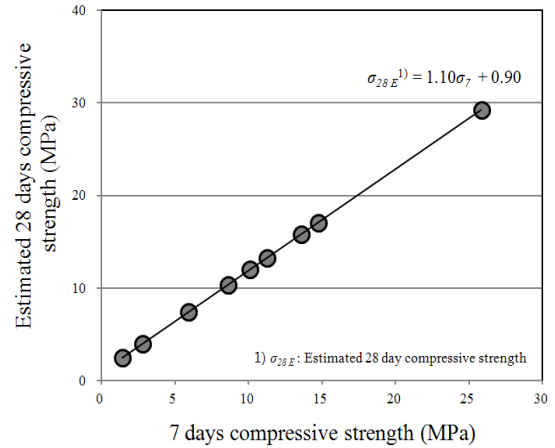
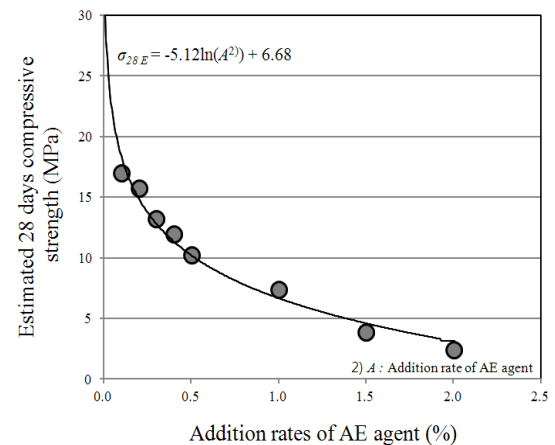


Fig. 7 Results of compressive strength test

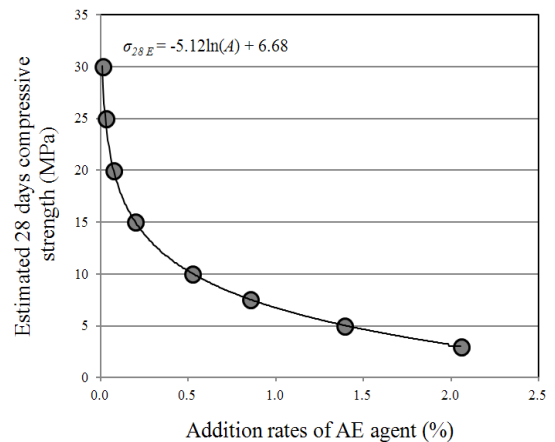
산정하고자 하였다. 이 배합의 산정은 Fig. 8에 나타난 것과 같다. 1차 실험의 28일 강도를 추정식으로부터 유추하였다(a). 그 후, AE제 첨가율에 따른 28일 추정 압축강도와의 관계를 로그함수로서 도출하였고(b), 이 함수를 이용하여 원하는 강도를 얻기 위해 필요한 AE제의 첨가율을 산정하였다(c). 여기서 얻어진 AE제 첨가율이 목표로 한 압축강도를 만족하는지 여부는 2차 실험에서 확인하였다.



(a) Estimated 28 days strength of the first experiment



(b) Estimated 28 days strength by addition rates of AE agent



(c) Determination of optimal addition rates of AE agent

Fig. 8 Process of calculation of optimal addition rates of AE agent

4. 2차 실험 - 다양한 강도를 갖는 시험체 제조 및 압축강도-동탄성계수 관계식 도출

4.1 실험 배합

이 실험의 디자인은 Table 5와 같이 W/B 35%, 수지함입률 17.9%로 고정하여 배합 조건을 동일하게 하였다. 목표 강도는 3, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30 MPa의 8수준으로 설정하였고 이를 만족시키기 위해 1차 실험에서 계산된 적정량의 AE제를 첨가하였다. 시험체는 굳지 않은 상태에서 유동성과 단위용적질량 및 공기량을 측정하였고 굳은 상태에서 압축강도와 동탄성계수를 측정하여 관계식을 구하였다. 또한 경화체의 기타 특성으로 단위용적질량, 공기량, 길이변화를 측정하였다.

4.2 유동성

Fig. 9는 플로우 측정 결과를 나타낸 것이다. 플로우는 약 220~240 mm로 측정되어 1차 실험 결과와 유사하게 나타났다. AE제를 첨가하면 유동성은 약간 증가하는데 0.01~0.07% 범위의 극소량을 사용한 경우 AE제 첨가율 증가와 함께 플로우도 증가하지만 이러한 특성은 한계를 갖는 것으로 나타났다. 이는 0.07% 이상의 첨가율에서 플로우는 다소 감소하거나 동등한 것으로 나타났기 때문이다. 이는 플로우 테이블의 수직낙하를 수작업을 실시한 실험오차라고 판단할 수 있지만 재료의 물성 즉, AE제 첨가율에 따라 달라질 수 있는 슬러리의 점성이나 분산거동 등을 검토해 볼 필요성이 있다. 따라서 AE제 사용량 변화가 슬러리의 흐름성에 미치는 연구 및 고찰이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

반면, 모든 시험체의 유동성이 실제 폐기물을 처리했을 당시의 플로우 기준(210 mm 이상)을 만족하는 것으로 나타나 과거에 고화 처리했던 폐이온 교환수지 폐기물의 재현이 가능하였다.

4.3 압축강도

시멘트계 경화체의 압축강도는 재료의 단위용적질량

과 매우 밀접한 관계가 있다. 즉, 단위용적질량이 높으면 공극률이 낮으며 매트릭스 내에 시멘트 수화물의 용적이 상대적으로 많기 때문에 압축강도에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 연구에서도 AE제의 강도 감소 효과를 실험변수로 하여 각 시험체의 공극률에 변화를 주어 이에 따라 달라지는 압축강도를 평가하는 것을 목표로 하였으며 그 결과는 Fig. 10과 같다.

시험체의 압축강도는 AE제 첨가율이 낮은 수준에서 급격하게 감소하고 첨가율 증가에 따라 완만하게 낮아지

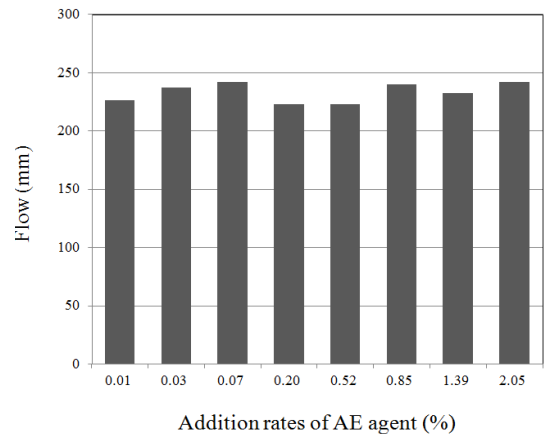


Fig. 9 Results of flow test

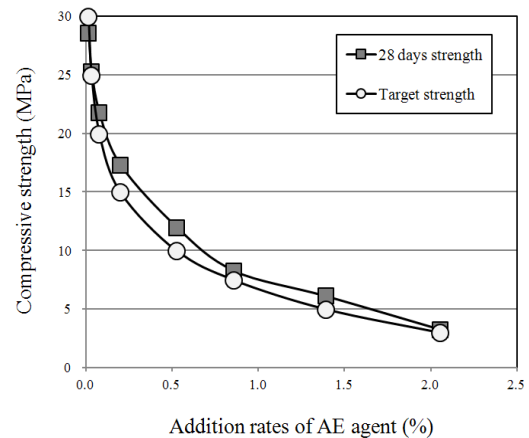


Fig. 10 Results of compressive strength test

Table 5 Experimental design

Resin (%)	W/B (%)	Target strength (MPa)	AE agent (%)	Water (kg/m ³)	Unit volume (L/m ³)			Unit weight (kg/m ³)			AE agent (kg/m ³)	Test items
					PC	CH	AER	PC	CH	AER		
17.9	35	30.0	0.011	372	306	41	281	965	97	312	0.1	- Flow - Unit weight (slurry & hardened state) - Air content (slurry & hardened state) - Length change - Compressive strength - Dynamic modulus of elasticity
		25.0	0.028								0.3	
		20.0	0.074								0.8	
		15.0	0.197								2.1	
		10.0	0.523								5.6	
		7.5	0.853								9.1	
		5.0	1.390								14.8	
		3.0	2.054								21.8	

는 것으로 나타났다. 일반적으로 콘크리트에 혼화제로서 첨가하는 AE제의 양은 0.02~0.05%이며 이 실험 역시 소량의 AE제만으로도 기포를 연형시켜 압축강도를 낮출 수 있었고 사용량을 증가시키면 더 낮은 수준의 강도를 얻는 것이 가능하였다. 결과적으로 일정한 범위(3.3~28.6 MPa)의 강도 수준을 얻어 목표로 했던 강도(3~30 MPa)를 만족시킬 수 있었다. 특히 1차 실험에서 확인하지 못한 0.1% 미만의 AE제 첨가율 조건에서 추정했던 강도 범위를 비교적 잘 만족하는 것으로 나타났다. 비록 거의 모든 시험체의 실제 측정된 값이 약간 높게 나타났지만 목표 강도 대비 실제 강도 발현율은 평균 약 88%로 나타나 7일 강도를 기준으로 추정한 것임을 감안한다면 상당히 양호한 수준이라고 판단된다.

4.4 동탄성계수

압축강도는 시멘트계 경화체의 품질과 상태를 나타내는 가장 대표적인 지표 중의 하나이며, 여전히 강도의 측정 및 평가방법에 대한 연구는 콘크리트 공학에서 주된 관심사이다. 이를 위해 반발경도법, 초음파속도법을 비롯하여 관입법, 인발법, 압입법 등의 비파괴적인 방법들이 개발되어 적용되어왔다.

방사성 물질을 포함하고 있는 페이온수지 고화체는 압축강도를 측정하기 어려우므로 간접적으로 역학적 성질을 나타낼 수 있는 동탄성계수를 측정하여 현재의 강도를 추정해야 한다. 동탄성계수를 구하는 방법에는 초음파 전파속도와 진동에 의한 공명주기를 이용하는 등의 여러 가지 방법이 있으나 이 연구에서는 시험체의 1차 공명주기, 즉 고유진동수에 의한 방법을 이용하여 다음 식(KS F 2437 참조)에 의해 구하였다.¹¹⁻¹³⁾

$$E_D = 161 \times 10^{-5} \frac{L^3 T}{d^4} W f_2^2$$

- 여기서, E_D : 동탄성계수(N/mm²)
- L : 공시체의 길이(mm)
- d : 공시체의 지름(mm)
- W : 공시체의 질량(kg)
- f_2 : 변형 진동의 1차 공명 진동 수(Hz)
- T : 수정계수

Fig. 11은 시험체의 압축강도와 동탄성계수를 나타낸 것이다. 또한 이러한 상관관계를 좀 더 정확하게 파악하기 위하여 기존의 문헌에서 제시하고 있는 콘크리트의 압축강도-동탄성계수 데이터와 비교하였으며 그 관계는 식 (1)~(3)으로 나타낼 수 있다.^{14,15)}

$$E_d = 0.27\sigma_c + 2.56 \quad (1, \text{This experiment}) \quad (1)$$

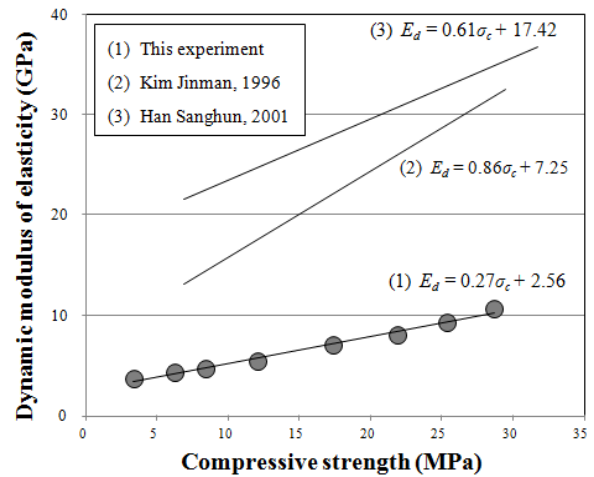


Fig. 11 Relationship between compressive strength and dynamic modulus of elasticity

$$E_d = 0.86\sigma_c + 7.25 \quad (2, \text{Kim Jinman, 1996}) \quad (2)$$

$$E_d = 0.61\sigma_c + 17.42 \quad (3, \text{Han Sanghun, 2001}) \quad (3)$$

페이온 교환수지 고화체를 재현한 시험체의 동탄성계수는 압축강도가 높아질수록 증가하는 일정한 경향이 나타났으며 약 3.7~10.7 GPa 수준의 범위를 나타내고 있다. 그러나 이전 문헌에서 제시하고 있는 압축강도와 동탄성계수의 관계와 비교하면 현저히 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이 연구에서의 시험체와 일반 콘크리트의 동탄성계수 차이는 강도 증가에 따라 다소 증가하였으며 평균 약 20 GPa 수준인 것으로 나타났다. 따라서 동일한 강도를 갖더라도 경화체의 재료 즉, 골재의 사용유무라든지 이온교환수지가 포함되었다는 점 등에서 재료적인 특성에 의해 달라지는 경화체 내부 조직에 따라 공명진동에 차이가 나는 것으로 판단할 수 있다.

추후 실제 폐기물의 동탄성계수 측정에 있어서 페이온수지 고화 폐기물의 관리기준을 3.44 MPa(500 psi)로 규정한 것을 감안한다면, 최소 3.49 GPa 수준의 동탄성계수를 만족해야 최종 처분장으로서의 이송 시 문제가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

4.5 기타 특성

4.5.1 단위용적질량 및 공기량

일반적으로 시멘트계 경화체의 압축강도는 시험체의 단위용적질량에 의해 지배적으로 영향을 받게 된다. 즉 사용재료 및 배합조건이 같은 경우 단위용적질량이 낮을수록 시험체 내부에 공극이 증가하여 압축강도는 감소하게 된다. 이 실험에서도 이와 같은 특성을 이용하여 여러 수준의 밀도를 갖는 시험체를 제조하는 것을 목표로 하였으며 그 결과는 Fig. 12와 같다.

AE제 첨가율이 증가할수록 시험체의 공극량은 높아져

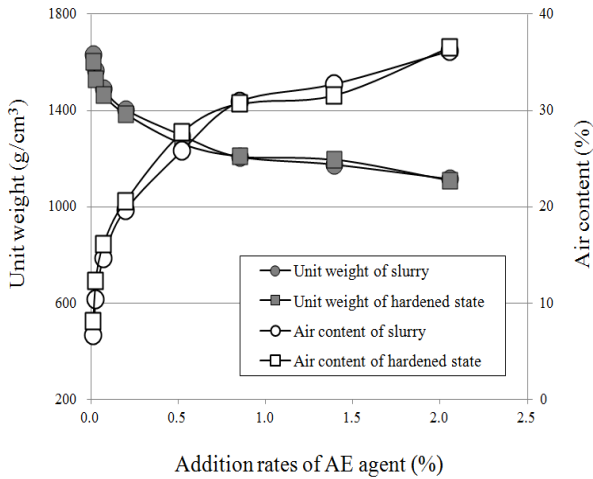


Fig. 12 Results of unit weight and air content test

단위용적질량은 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 0.1% 미만의 첨가율에서 단위용적질량은 다른 조건과 비교하여 급격하게 감소하였으며 그 이후 완만하게 낮아지는 경향을 나타내었다. 또한, 경화된 후 시험체의 단위용적질량은 다소 감소하였는데 이는 양생과정에서 수분의 증발에 의해 내부 공극률이 소폭 증가하여 나타난 것으로 판단된다. 그러나 일부 시험체에서는 오히려 경화된 시험체의 단위용적질량이 큰 것으로 나타났다.

공기량은 이론적인 배합 상의 단위용적질량(1745 g/cm³)과 실제 측정된 값과의 차이를 공극으로 간주하여 계산하였다. 따라서 공기량은 단위용적질량의 결과와 정반대의 경향을 나타내고 있다. 0.1% 미만의 극소량을 사용하더라도 공기량은 급격하게 증가하였으며 그 이후 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. AE제를 최대 2.1% 사용한 시험체의 공기량은 37%까지 증가되어 단순히 기계적인 교반만으로도 매트릭스 내에 많은 공극을 발생시킬 수 있었다.

4.5.2 길이변화

시멘트계 경화체는 건조시키면 주로 모세관수의 증발과 함께 수축한다. 기온이 높고 바람에 노출되면 물의 증발이 빨라 표면이 수축하고 시멘트의 수화에 의해 경화조직이 급격히 형성되므로 증발에 의해 없어지는 표면의 물을 내부에서 공급하는 속도가 늦어져 표면의 수축이 더욱 진행되고 균열이 발생한다. 또한 이 실험에서 사용한 이온교환수지는 물과 접촉하면 팽윤되며, 그 정도는 중합체의 구조 및 용액의 총이온 농도에 따라 달라진다.¹⁰⁾ 따라서 시멘트의 수축과 수지의 팽윤 특성이 상쇄되어 나타나는 체적안정성 및 균열을 검토할 필요성이 있다. 길이변화 측정 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

시험체의 길이는 일반적인 콘크리트의 건조수축 패턴과는 달리 재령 7일까지 다소 증가하였으며 그 이후에는 약간 감소하거나 유지하는 패턴을 나타냈다. 재령 초기에는 이온교환수지의 팽윤 특성에 의해 체적 팽창이 발생하지만 시간이 지날수록 시멘트 수화가 진행되어 약간

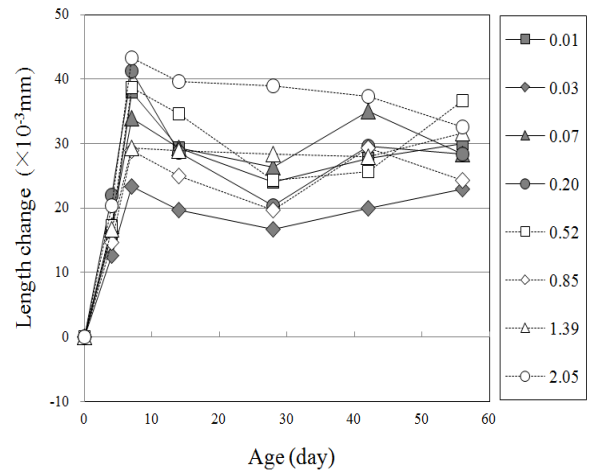


Fig. 13 Results of length change test

수축하는 것으로 나타났다. 8주 양생 후 시험체의 길이는 23~37×10⁻³ mm 정도 늘어난 것으로 나타났으며 육안 상으로 시험체의 표면을 관찰한 결과, 균열은 발생하지 않았다.

실제 중·저준위 방사성 폐기물 드럼은 밀폐시켜 외기와 차단하여 보관하기 때문에 이 실험에서도 비닐로 밀봉 양생하여 거의 유사한 환경을 갖도록 하였고 실험 결과와 같이 실제 폐기물의 재료적 균열은 외부와의 차단으로 어느 정도 방지할 수 있을 것으로 생각되며 체적 변화에 의한 균열은 거의 발생하지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

다양한 압축강도 범위를 갖는 중저준위 방사성 폐기물 처리용 시멘트 고화체를 재현하고 이를 대상으로 압축강도와 동탄성계수의 관계를 알아본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) AE제 첨가율의 변화에 의해 목표로 설정하였던 3~30 MPa 범위를 만족하는 중저준위 방사성 폐기물인 이온교환수지를 처리하기 위한 고화체의 제조가 가능하였다.
- 2) 미리 기포를 제조하여 혼입하는 방법 보다 비빔수에 AE제를 혼합하여 비빔시 발포되도록 하는 방법에 의해 단위용적질량 및 강도를 보다 정확히 조절하는 것이 가능하였다.
- 3) AE제의 첨가율에 의한 단위용적질량과 공기량의 변화는 첨가율이 낮은 범위에서는 매우 민감하였지만, 첨가율이 증가할수록 그 변화는 줄어들었다.
- 4) 이온교환수지 처리용 시멘트 고화체의 동탄성계수는 4.1~10.2 GPa 범위로 나타났으며, 일반콘크리트 보다 동일한 압축강도에서 약 20 GPa 정도 낮고 그 차이는 강도의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 동탄성계수에 의한 실제 중저준위 방사성 폐기물인 폐이온 교환수지 고화체의 압축강도는 다음 식에 의해 추정할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{100(E_d - 2.56)}{27}$$

감사의 글

이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEPP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20114010203040). 또한 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 폐금속 유용자원재활용기술개발사업(Project No.:11-C21-ID)에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분에게 감사의 말씀을 드립니다.

References

1. Lee, J. M., "A Study on the Characteristics of Solidified Waste Form Produced at Korean Nuclear Power Plant and Durability of Disposal Facility for the Safety Assessment of Low and Intermediate Level Radioactive Waste Disposal," KyungHee University Doctoral Dissertation, 2002, pp. 1-12.
2. Hoberg, A. J., Watson, C. D., and West, G. A., *An Evaluation of Asphalt and Other Materials for Lining Radiochemical Waste Storage Basins*, ORNL-2508, 1958, 50 pp.
3. Rodier, J., Scheidhauer, J., and Malabra, F., *The Conditioning of Radioactive Waste by Bitumen*, CEA-1992, 1961, 23 pp.
4. Hild, W., Kluger, W., and Krause, H., *Bituminization of Radioactive Wastes at the Nuclear Research Center Karlsruhe-Experience from Plant Operation and Development Work*, ISBN 92-64-01509-4, 1976, pp. 129-145.
5. Eschrich, H., *The Bituminization of Radioactive Waste Solutions at Eurochemic*, ISBN 92-64-01509-4, 1976, pp. 26-55.
6. Park, J. K., Maeng, S. J., Lee, Y. H., and Hwang, T. W., "Evaluation of X-Ray System for Nondestructive Testing on

- Radioactive Waste Drums," *Journal of Korean Radioactive Waste*, Vol. 6, No. 3, 2008, pp. 189-203.
7. Sung, S. H., Jeong, E. Y., and Kim, K. H., "Radwaste Characteristics and Disposal Facility Waste Acceptance Criteria," *Journal of Korean Radioactive Waste*, Vol. 6, No. 4, 2008, 352 pp.
8. Korea Electric Power Research Institute, *Solidification Program Development of Radioactive Waste*, 1989, pp. 284-304.
9. Korea Electric Power Research Institute, *Solidification Program Development of Radioactive Waste*, 1989, pp. 284-304.
10. Kim, T. K., Song, J. S., and Hong, G. P., "A Study on the Leaching Characteristics of Bituminized Solid Form of Radioactive Waste Resin by Addition of Poly Ethylene," *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 26, No. 1, 2004, pp. 35-36.
11. Kim, J. K., Kim, H., and Noh, J. H., "Estimation of Mechanical Properties of Concrete in Early Age by Resonance Frequency Test," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 7, No. 5, 1995, pp. 164-165.
12. Oh, S. H., Kim, H. S., Jang, B. A., and Seo, M. C., "A Comparative Study on Dynamic & Static Elastic Modulus of Cement Mortar Specimens," *Journal of Korea Geophysical Society*, Vol. 3, No. 2, 2000, pp. 128-130.
13. Han, S. H., Kim, J. K., Park, W. S., and Kim, D. H., "Effect of Temperature and Aging on the Relationship between Dynamic and Static Elastic Modulus of Concrete," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13, No. 6, 2001, pp. 610-618.
14. Kim, J. M., "A Study on the Influence of Factors on the Engineering Properties of High Strength Concrete," Chungnam University Doctoral Dissertation, 1996, pp. 275-286.

요약 방사성 폐기물 최종 매립장이 완공됨으로써 그동안 원자력 발전소 내에서 관리하고 있던 중·저준위 방사성 폐기물은 최종 처분장으로 이송하여 관리해야 한다. 주로 액상의 이온교환수지로 구성된 중·저준위 방사성 폐기물은 플라스틱 또는 강재 용기 안에서 시멘트계 재료로 고화처리 되고 있다. 시멘트계 재료는 취성적이므로 이송 중 낙하, 충돌 등에 의해 붕괴될 경우, 방사성 물질이 유출될 수 있는 가능성이 있다. 안전성이 있는 이송장비를 설계하기 위해서는 현재의 고화체가 어느 정도의 강도를 발현하고 있는지를 확인할 필요가 있다. 그러나 방사성 물질을 포함하고 있는 폐기물의 강도를 직접법에 의해 측정하는 것은 위험하므로 불가능하기 때문에 동탄성계수와 같은 비파괴시험을 통해 간접적으로 강도를 파악하여야 한다. 따라서 방사성 폐기물의 압축강도와 동탄성계수의 관계를 규명할 필요가 있다. 폐기물 시점에서 이온교환수지 처리용 고화체의 압축강도는 3.44 MPa (500 psi)이다. 이론적으로 시멘트는 시간의 경과에 따라서 강도가 증진되기 때문에 폐기된 후 수년에서 수십년이 경과한 현 시점에서 고화체의 강도는 기준치를 크게 상회할 가능성이 있다. 이와 같은 배경에서 이 연구에서는 중·저준위 방사성 폐기물 처리용 시멘트 고화체의 재료구성을 유지하면서 3~30 MPa 범위의 다양한 강도 수준을 갖는 시멘트 고화체를 제조하고 이를 대상으로 압축강도와 동탄성계수의 관계를 도출하고자 하였다. 실험 결과, AE제 첨가율의 변화에 의해 목표로 설정하였던 3~30 MPa 범위를 만족하는 고화체의 제조가 가능하였다. 또한 미리 기포를 제조하여 혼입하는 방법보다 AE제를 배합수에 직접 혼합하는 방법이 단위용적질량 및 강도를 보다 정확히 조절하는데 유리한 것으로 나타났다. AE제 첨가율에 의한 단위용적질량과 공기량은 첨가율이 낮은 범위에서 급격하게 변화하였으며 첨가율이 증가할수록 변화량은 감소하였다. 이온교환수지 처리용 시멘트 고화체의 동탄성계수는 4.1~10.2 GPa 범위로 나타났으며, 일반콘크리트 보다 약 20 GPa 정도 낮고 그 차이는 강도의 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이온교환수지 처리용 시멘트 고화체에서도 압축강도와 동탄성계수는 선형적인 관계를 보이고 있다.

핵심용어 : 중·저준위 방사성 폐기물, 이온교환수지, AE제, 압축강도, 동탄성계수