

## 붕산함유파라핀 고화체의 직경/높이 및 재하속도에 따른 압축강도비교

### Comparison on Compressive Strength of Paraffin Waste Form with H/D Ratio and Loading Rate

곽경길, 유영걸  
한국원자력연구소

#### 요 약

국내원전의 농축폐액건조설비에 적용되고 있는 붕산/파라핀의 혼합비가 3.3/1 인 고화체를 제조하여 H/D비가 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0인 시편과 50/100 mm인 시편으로 H/D 및 Loading rate에 따른 압축강도변화를 비교하였다. 실험에서 압축강도의 크기가  $d=50 > 75 > 100$  mm의 현상을 보였으며, 평균 압축강도는  $34.25 \text{ kgf/cm}^2$  ( $d=50\text{mm}$ ),  $24.94 \text{ kgf/cm}^2$  ( $d=100\text{mm}$ )에 걸쳐 시험체의 직경크기에 따라 감소하고 있음을 확인하였으며, 이들 모두 NRC/BTP에서 권고하고 있는  $4.1 \text{ kgf/cm}^2$  이상임을 알 수 있었으며 NRC/BTP에서는 시험체의 크기를  $D=2 \sim 3$  inch,  $H/D=2$ 를 권고하고 있는데 본시험에서도 H/D의 비가 2.0으로 하여 시편을 제조하여 시험하는 것이 바람직한 것으로 보인다. 또한 Loading rate에 있어서는 재하속도가 클수록 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.

#### Abstract

In case that the mixing weight ratio of waste form between boric acid and paraffin was 3.3/1, which had been adopted in the concentrate waste drying system(CWDS) of domestic nuclear power plants. Using several specimens with different diameters and heights, 50/100mm specimens. compressive strength were measured. The experiment result showed that the small diameter specimens of compressive strength are increased more than large diameter specimens. ( $d=50 > 75 > 100$  mm) The average compressive strength of specimens showed that the range from  $22.43 \text{ kgf/cm}^2$  to  $38.57 \text{ kgf/cm}^2$  (NRC standard  $\geq 4.1 \text{ kgf/cm}^2$ ). NRC standard is recommended that the compressive strength test specimens be right circular cylinders, 2 to 3 inches in diameter, with a height-to-diameter(H/D) ratio of approximately two. and compressive strength were increased more than large loading rate. As test result, this conditions are a good agreement, and estimated.

#### 1. 서 론

국내원자력발전소에서 발생하는 중·저준위 방사성폐기물로서 붕산 농축폐액이 발생되고있으며

이 농축폐액은 보통 포틀랜드 시멘트에 의해 고화처리되고 있으나 1990년대 중반부터 파라핀 왁스에 의해 고화처리가 이용되고 있다. 따라서 발생하는 봉산함유 파라핀고화체에 대한 건전성평가를 위해 수행되는 압축강도측정에 있어서 Flexible Type의 재료인 왁스(폴리머)에 대한 압축강도 측정시험을 수행하게 되었으며 고화체에 대한 처분장 인수기준에서 고화체의 압축강도는 단순히 고화체 적재 시 고화체가 수직으로 받는 하중을 고려한 것으로 고화체의 구조적 안전성을 평가하는데 가장 중요한 시험항목이다. 압축강도의 측정결과 자료는 경화된 고화체의 건전성을 판별하는데 적용되거나 온도내구성, 내방사선, 미생물영향, 침수시험전후에 고화체의 안전성을 비교하거나 판정하는데 사용된다. 10 CFR 61.56(b) (1)에 명시된 “ 구조적으로 안정한 고화체는 일반적으로 처분장의 예상조건 하에서 고화체는 물리적인 크기와 형태를 유지하여야한다.” 는 것을 기초로 처분장의 매몰재료의 밀도를  $1.9 \text{ g/cm}^3$  로 가정하여 최소한의 압축강도를  $3.4 \text{ kg/cm}^2$  (50 psi)로 고화체 기술지침서 (branch technical position on waste form. Rev.0, 1983)에 명시하였다. 그러나 Hanford 처분장의 매몰깊이가 깊어짐에 따라 (13.7 m에서 16.8 m) 모든 고화체에 대한 최소 압축강도를  $4.1 \text{ kg/cm}^2$  (60 psi)로 높였다. 한편 시멘트고화체에 대해서는 처분장의 매몰량(burial load)과 고화체의 dimension 과 form을 장시간 동안 유지할 수 있도록 새로운 값인 500 psi를 제시하여 이를 권고하고 있다(1991). 한편 본 시험에서는 시편크기에 따른 영향을 살펴보기 위하여 사전에 시편의 상하부분을 수평되게 연마한 후 ASTM-D-1074(Compressive Strength of Bituminous Mixtures)에 따라 파라핀고화체의 압축강도를 측정하였다. 일반적으로 압축강도는 시험체의 형상, 크기, 재하속도등의 시험조건과 구성하는 물질의 종류 등에 따라 크게 영향을 받는다. 특히 본시험에서는 원주형시멘트 고화체에 적용되고 있는 NRC/BTP의 시험체의 크기를 D=2~3 inch, H/D=2를 권고하고 있는데 본시험에서는 봉산함유 파라핀 고화체를 이용하여 비교하였으며 또한 재하속도에 따른 압축강도변화를 비교하였으며 이들 조건을 만족시키고 있는 것으로 확인되어 안정된 고화체로 판단되어지며 시편 크기 비 및 재하속도에 따른 강도변화를 비교하여 파라핀왁스의 최적시편 크기 비를 도출하여 표준시험방법에 활용하고자 하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험재료

파라핀 고화체시편은 원자력발전소에서 사용하고 있는 파라핀 왁스와 같은 미국 산 LUXCO, Model No. FR160 과 봉산분말을 이용하여 제조하였으며 파라핀왁스의 비중은 0.93이고, 파라핀은 72℃이상의 온도에서 녹기 시작하며 온도상승에 따라 점도가 낮은 액체가 된다. 파라핀왁스는 물에 불용성이며, 열을 가하지 않고도 일정한 압력하에서 변형이 일어나는 열가소성수지이다. 고화체 내의 파라핀은 봉산과 화학적 결합을 하지 않고 단지 혼합상태로 존재하며 실험에 사용된 봉산(Boric Acid)은 비중이 1.44이며, 녹는점은 171℃이고 끓는점은 359℃이다. 파라핀과의 비중차이로 인한 층 분리 현상은 혼합 시 적정온도에서의 혼합 및 혼합비율, 그리고 충분한 교반에 의해 해결하였다.

### 2.2 시편제조

본 시험을 위해 제작된 혼합기에 파라핀을 넣어 15분간 용해시킨 후 봉산을 조금씩 넣으며 교반을 통해 혼합하였다. 혼합온도조건은 70~120℃에 온도범위를 주고 파라핀왁스의 증발을 최소화하기 위해 70~90℃의 범위에서 혼합하였으며 봉산투입량을 3 batch로 나누어 용해된 파라핀에 투입하며 교반하였으며 혼합기의 교반속도는 300~500 rpm사이에서 교반하여 15분 동안 혼합시킨 후 실린더형의 PVC 몰드에 주입한 후 상부를 비닐 밀봉하여 실온에서 1주일간 경화시킨 후, 몰드

를 제거하고 표면을 가공하였다. 본 연구에서는 봉산과 파라핀의 혼합 무게 비(%)는 3.3/1 (원자력발전소의 PCP와 동일) 로 하였으며 직경 50, 75, 100mm에 따른 H/D비 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2 및 50/100mm의 시편을 제조하였다.

Table 2-1. Specification of Specimens with H/D Ratio

시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )	시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )
S-1	50.16	49.64	19.36	S-16	112.97	74.52	43.59
S-2	50.08	49.38	19.14	S-17	131.26	74.57	43.64
S-3	62.66	49.63	19.33	S-18	131.28	74.52	43.59
S-4	62.58	49.27	19.05	S-19	150.04	74.74	43.86
S-5	75.16	49.26	19.05	S-20	150.52	75.09	44.27
S-6	75.25	49.63	19.33	S-21	99.52	98.69	76.46
S-7	87.67	49.46	19.20	S-22	99.59	99.14	77.15
S-8	87.54	49.60	19.31	S-23	123.70	98.79	76.62
S-9	100.10	49.79	19.46	S-24	123.95	98.47	76.12

시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )	시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )
S-10	100.16	49.8	19.47	S-25	149.33	99.06	77.03
S-11	75.19	74.16	43.17	S-26	149.27	99.19	77.24
S-12	75.48	74.17	43.18	S-27	174.03	100.07	78.60
S-13	93.81	74.05	43.04	S-28	173.39	100.16	78.75
S-14	93.83	74.07	43.06	S-29	200.24	99.80	78.19
S-15	112.76	74.37	43.42	S-30	200.46	99.68	78.00

Table 2-2. Specification of Specimens for Loading rate

시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )	시편번호	높이 (mm)	직경 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )
S-31	99.85	49.52	19.25	S-36	100.17	49.88	19.53
S-32	100.09	50.71	20.18	S-37	100.09	49.65	19.36
S-33	100.18	49.89	19.53	S-38	100.08	49.85	19.51
S-34	100.07	49.79	19.46	S-39	100.10	49.64	19.35
S-35	100.07	49.71	19.40	S-40	100.28	49.74	19.43

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 재하속도에 따른 압축강도

재하속도에 따른 시험체의 압축강도 변화특성을 살펴보기 위해 50/100 mm의 봉산 함유파라핀 고화체를 제조하여 4주간 경화시킨 후 10톤 용량의 유압식 압축강도측정기를 사용하여 시험체의 강도를 측정하였으며 재하속도는 5mm/min, 7.5mm/min, 8mm/min, 10mm/min, 30mm/min으로 하였으며 그 결과를 Fig. 1 에 나타냈다. 그래프에서 보는바와 같이 재하속도가 증가할수록 압축

강도가 증가하였으며 재하속도를 대수좌표로 하여 표현한 결과 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

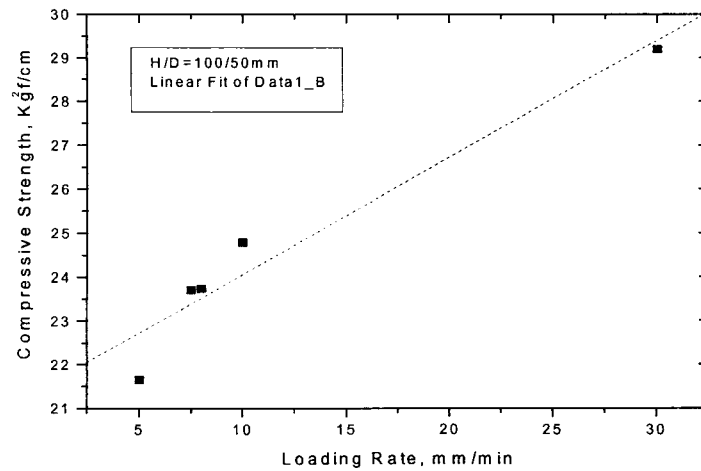


Fig. 1. Compressive Strength Change with Loading Rate

### 3.2 직경변화에 따른 압축강도

시험편은 응력집중을 피하기 위해 시험체의 양단을 정확한 수평면으로 가공되었으며 수평성이 결여되면 시험체와 재하판과의 유효접촉 면적이 감소하여 응력집중이 일어나 결보기강도가 감소하게 된다. Fig. 2 에서 보듯이 압축강도의 크기가  $d=50 > 75 > 100$  mm의 현상을 보이고 있으며, 조그만 시험체가 큰 시험체 보다 높은 강도를 나타내고 있다. 이 현상은 Graffith의 이론에 의하면 저응력도 하에서는 짧은 균열보다도 긴 균열이 성장하기 시작한다. 따라서 긴 균열이 존재하면 강도가 저하될 것이다. 그 외에 결함이나 불연속인 부분이 존재하여 그들의 기하학적인 성상이 높은 응력집중을 발생시킬 경우에는 더욱더 강도를 저하시킬 것이다.

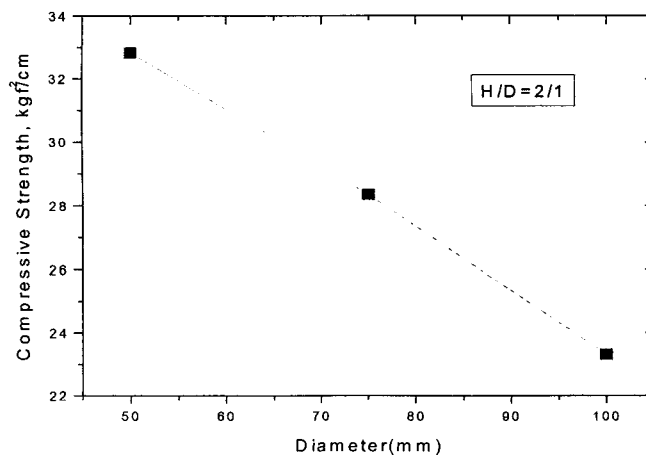


Fig. 2. Compressive Strength with Diameter

시험체가 그와 같은 약점 부를 포함할 가능성은 그 부피, 즉 크기가 증대함에 따라 커질 것이다. 따라서 봉산함유고화체의 압축강도는 조그만 시험체는 큰 시험체 보다 높은 강도를 나타내고 있는 것을 확인하였다.

### 3.3 H/D 변화에 따른 압축강도

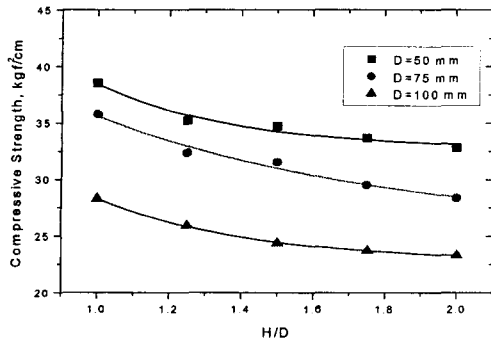


Fig. 3. Compressive Strength with H/D Ratio

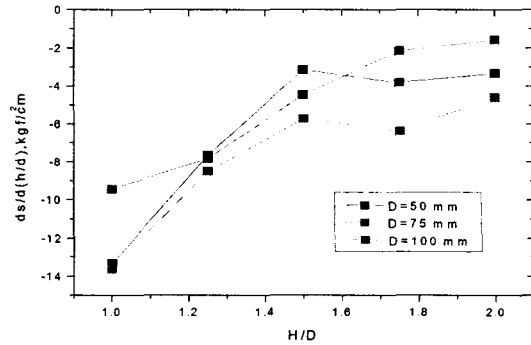


Fig. 4. Differential Value of Compressive Strength with H/D Ratio

높이/직경 비에 따른 강도시험시 재하속도는 30 mm/min로 일정하게 하였다. Fig. 2에서보면 H/D 비가 증가함에 따라 압축강도가 감소하였으며 H/D=1.7 이상부터는 기울기가 완만하여 감소 비율이 비교적 낮았다. 각 곡선에서의 기울기를 구하여 Fig. 3에 나타냈는데 H/D=1.5 에서부터 H/D=2.0 까지 기울기가 완만하였으며 이 범위 내에서 가장 낮은 차이를 보이고 있다. 그러므로 이와 같은 비율로 시편을 제조하는 것이 바람직하며 규격이 다른 시험체를 시험하였을 경우도 2.0 을 기준으로 하여 압축강도를 보정하여 자료 분석하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 봉산함유 고화체의 H/D 비의 변화에 따른 압축강도측정시험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 재하속도에 따른 시험체의 압축강도측정결과 재하속도가 증가할수록 압축강도가 증가하였으며 재하속도를 좌표로 하여 표현한 결과 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
2. 압축강도의 크기가  $d=50 > 75 > 100$  mm의 현상을 보이고 있으며, 본 시험체의 평균 압축강도는 시험체의 직경크기에 따라  $34.25 \text{ kgf/cm}^2$  ( $d=50\text{mm}$ ),  $24.94 \text{ kgf/cm}^2$  ( $d=100\text{mm}$ )로 감소됨을 알았으며 이들 모두  $4.1 \text{ kgf/cm}^2$  이상임을 알 수 있으며 매우 안정된 고화체로 판단된다. 조그만 시험체가 큰 시험체 보다 높은 강도를 나타내고 있다. 이는 저응력도 하에서 짧은 균열보다도 긴 균열이 성장하기 시작하여 높은 응력집중을 발생시켜 조그만 시험체는 큰 시험체 보다 높은 강도를 나타내고 있는 것을 확인하였다.
3. NRC/BTP에서는 원주형 시멘트 고화시험체의 크기를  $D=2\sim 3$  inch,  $H/D=2$ 를 권고하고 있는데 본시험에서도 H/D의 비가 2.0으로 하여 시편을 제조하여 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 박헌휘외, "고화체 특성규명연구", KAERI-NEMMAC/RR-65/92.
2. 김기홍외, "고화체 특성규명연구",KAERI-NEMMAC/RR-139/94.
3. American Society for Testing and Materials Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM C39, October 1984.
4. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Low-Level Waste Licensing Branch Technical Position on Waste Form" , Rev. 0. May 1983.
5. ASTM D-1074, "Compression Strength of Bituminous Mixtures" , American Society for Testing Materials, 1980.