

Hot Isostatic Pressing 기술 적용 원전 해체폐기물 처리 국내 활용 방안 연구

박기현^{1,*}, 이경호¹, 정세원¹, 김태만²

¹(주)오리온이엔씨, ²한국원자력환경공단 방사성폐기물연구소

Study of Local Application Possibility towards Local Decommissioning Waste by using Hot Isostatic Pressing Technology

Kihyun Park^{1,*}, Kyungho Lee¹, Sewon Chung¹ and Taeman Kim²

¹ORION ENC, 37, 22 Gil Seongsui-ro, Seongdong-Gu, Seoul 04798, Republic of Korea

²Korea Radioactive Waste Agency (KORAD), 168, Gajeong-ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34129, Republic of Korea

Abstract The R&D of technologies for treating efficiently various and large quantity of decommissioning wastes, which are produced during decommissioning of nuclear power plants, are proceeding actively over the world. Especially the technologies for reduction of waste volume are welcomed and these are super compaction, melting, thermochemical treatment, etc. to meet the type and characteristics of wastes. The combined technology of sintering and compaction technology, namely Hot Isostatic Pressing (HIP) is the technology developed in 1953 firstly by ASEA for diamond processing [1] and is the technology to press the target isostatically by using inert gas at about 1,000°C and 100~200 MPa (about 1,000~2,000 atm), and is well welcomed recently in Japan and England, etc. in the field of radioactive waste treatment because of high compaction capability. Thus this paper investigates the various cases using HIP technology and suggests the application possibility for the reduction of volume of local decommissioning wastes.

Key words: Hot isostatic pressing, Decommissioning waste. Sintering, Inert gas

1. 서론

2016년 고리 1호기 영구 정지 이후 원전 해체가 본격적으로 국내에서 시작되었고 이에 따라 해체폐기물의 다량 발생에 대한 기술적 대처가 차곡차곡 준비되고 있다. 원전 1호기 해체 기준 약 80,000드럼(200 L 기준) 발생분에서 14,500드럼이 경주 처분장으로 처분되어질 계획이며 따라서 많은 해체폐기물이 감용 처리되어야 할 필요성이 대두되었다[1].

국내에서는 플라즈마, 용융, 압축 등 방법으로 감용을

위한 기술 개발이 진행되고 있으나 이외에도 다양한 최적의 감용 기술의 적용이 필요하다(“고리 1호기 해체계획서 초안” 참조). 최근 해외에서 각광받고 있는 HIP 기술은 1,000°C 내외의 온도 및 100~200 MPa(약 1,000~2,000기압) 압력에서 불활성 기체를 이용하여 등방으로 대상물을 압축하는 기술로 고 감용비를 갖는 장점으로 국내에서도 적용성에 대한 연구가 시작되었는데 HIP의 국내 적용성은 국내 발생 해체폐기물의 종류 및 특성과 해외의 방사성폐기물 처리 적용 결과 등에 따라 결정된다고 할 수 있다.

<http://www.ksri.kr/>

Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author. Kihyun Park

Tel. +82-2-3414-2039 Fax. +82-2-3414-2031 E-mail. khpark@orionenc.com

Received 29 September 2021 Revised 18 March 2022 Accepted 22 March 2022

따라서 본 논문에서는 HIP 기술의 방사성폐기물 적용 사례 및 개발 현황을 조사 분석하여 이를 토대로 국내 해체폐기물을 대상으로 활용 방안을 모색할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1. HIP 기술 특성

일반적으로 HIP 기술은 주로 1,000°C 내외의 온도 및 100~200 MPa (약 1,000~2,000기압) 압력에서 불활성 기체를 이용하여 등방으로 대상물을 압축하는 기술을 의미하는데 이때 사용하는 불활성 기체는 아르곤, 질소 및 헬륨이나 이들을 혼합한 가체도 이용된다(Fig. 1 참조).

HIP 기술은 최초 1953년에 스웨덴 ASEA (ABB로 후

에 개칭) 사가 인공 다이아몬드를 가공하는 데 적용된 기술로 이후 HIP 기술의 사용은 분말 재료의 가압 소결(Sintering), 소결품의 잔류 기공(Pore) 제거, 주조품 내 존재하는 내부 결함 제거 등에 이용되었다(“Hot Isostatic Pressing: Today and Tomorrow, Franz X *et al.*, 2008. 1” 참조). HIP 기술을 적용하면 제품의 기대 수명을 증가하거나 기계의 물성을 향상시킬 수 있다.

원자력 분야에서의 적용은 방사성폐기물의 처리 기술로 시작되었으며 주로 고준위폐기물의 감용 처리를 위해 사용되었다.

2.1.1. 기계적 물성 특성

HIP 기술의 응용 분야인 소결 및 소결품의 잔류 기공(Pore) 제거 연구를 위한 시험을 분석하면 일례로 티타늄 합금(모델 TA15) 포함한 파우더에 대한 소결에서 120 MPa 압력에서 각각 930°C(시편 HIP-A), 980°C(시편 HIP-B) 및 1,030°C(시편 HIP-C)에 대한 시험 결과, 온도의 증가 시 물성 중의 하나인 Grain size가 증가하였고 특히 930°C에서 980°C 온도 상승 시 큰 증가폭을 나타내었다(Fig. 2 참조). HIP-A, HIP-B 및 HIP-C는 HIP 적용 온도가 각각 930°C, 980°C 및 1,030°C일 때의 시편을 의미한다. 이러한 현상은 육방정(Hexagonal Close-packed, HCP) 구조에서 체심입방(Body-Centered Cubic, BCC) 구조로 변하는 전이 온도가 약 950°C 이므로 두 온도 구간에서 상 변화가 발생하였기 때문이며 BBC 구조의 원자 확산계수(Atom diffusion coefficient)가 HCP보다 약 100 배 이상 높기 때문에 발생된 특성 변화이다. 연성-취성 전이온도(Ductile Brittle Transition Temperature, DBTT)는 대상 물체의 탄소 등 내부 구성물의 성분 양 및 Grain 크기 등에 따라 변화가 있으며 탄소 등 내부 구성물의 성분

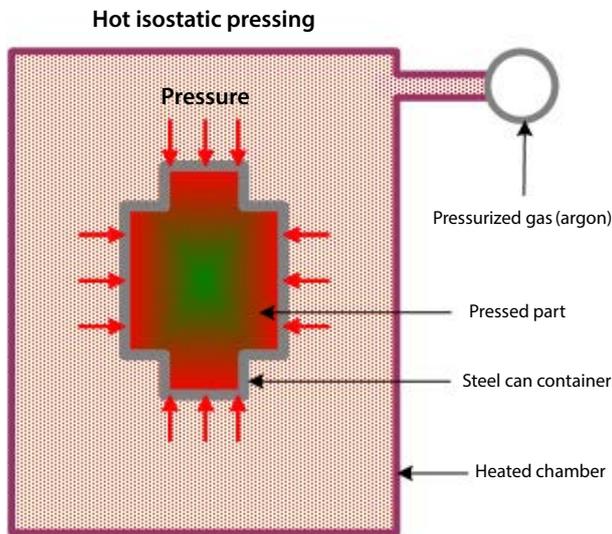


Fig. 1. HIP system.

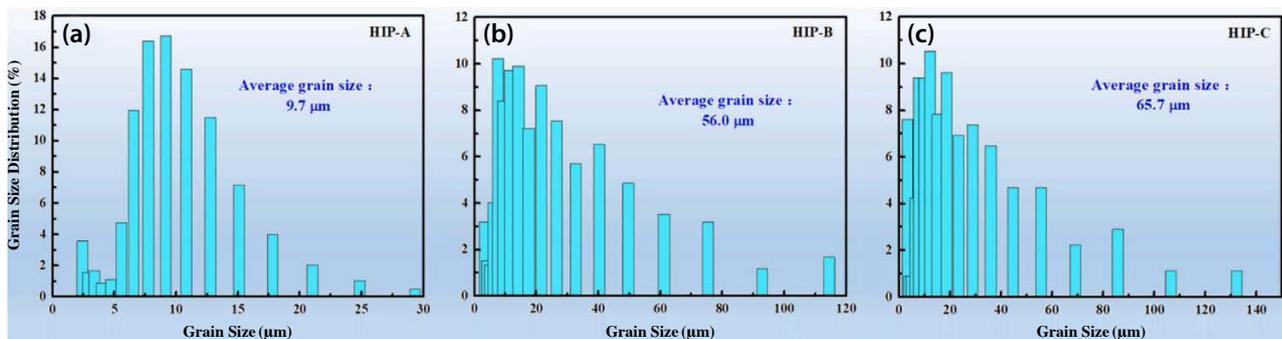


Fig. 2. Grain size distribution graphs after HIP towards TA15 specimens under (a) 930°C, (b) 980°C, (c) 1,030°C condition.

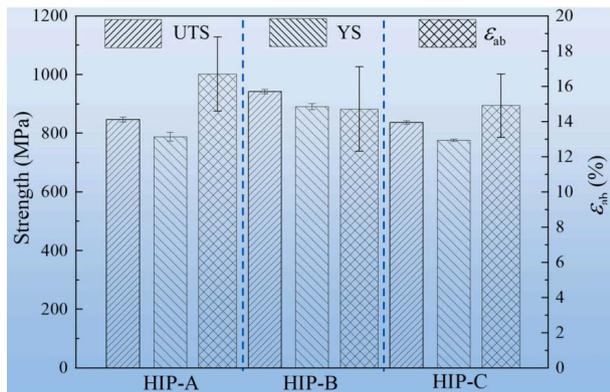


Fig. 3. Ultimate tensile strength (UTS), Yield strength (YS) and Elongation (ε) graph measured at room temperature after HIP towards TA15 specimens under (a) 930°C, (b) 980°C, (c) 1,030°C condition.

양이 많으면 DBTT가 상승하고 Grain이 크기가 작을수록 DBTT가 하강한다. HIP-A의 Grain 크기는 5~15 μm (평균 9.7 μm)의 분포를 가지며 HIP-B 및 HIP-C의 경우 Grain 크기는 주로 10 μm 이상의 크기를 가진다(각각 평균 56 μm 및 평균 65.7 μm). 같은 시편에 대한 인장 시험 결과, 극한인장강도(Ultimate Tensile Strength, UTS), 항복강도(Yield Strength, YS) 및 인장율(Elongation, ε)은 980°C 경우가 930°C 경우보다 증가하였으나 1,030°C에서는 감소하는 경향을 나타내었다(Fig. 3 참조). 이러한 현상은 Grain size가 크게 증가함에도 불구하고 야금결합강도(Metallurgical Bonding Strength)가 강해졌기 때문이며 온도가 더 상승할수록 Grain size의 증가하여 인장강도 등이 작아지는 경향이 나타났기 때문이다. 이러한 결과는 첫째, HIP 온도가 높아지면 파우더 입자를 유연(soft)하게 하며 이는 파우더의 심각한 소성변형 및 면과 면 사이의 강도(interfacial strength)를 늘리기 위해 이웃의 두 개 미소관속(Preprophase band;PPB) 사이의 틈새에서 재결정화 발생을 야기하는 현상 발생과 둘째, 높은 HIP 온도하에서 이웃 간 입자의 원소의 상호 확산이 확산되어 금속결합 강도를 높이기 때문이다. 다른 온도에서의 특성 변화 비교를 위해 온도 500°C, 600°C 및 700°C에서 인장시험의 결과도 비슷한 추이를 나타내었다. 500°C에서는 HIP-A는 약 550~600 MPa의 크기를 보이나 HIP-B 및 HIP-C는 각각 약 425~670 MPa, 510~575 MPa의 크기를 나타낸다. 600°C에서는 HIP-A의 경우, 약 525~620 MPa의 크기를 보이나 HIP-B 및 HIP-C는 각각 약 480~570 MPa, 500~575 MPa의 크기를 나타낸다. 700°C에서는 HIP-A의

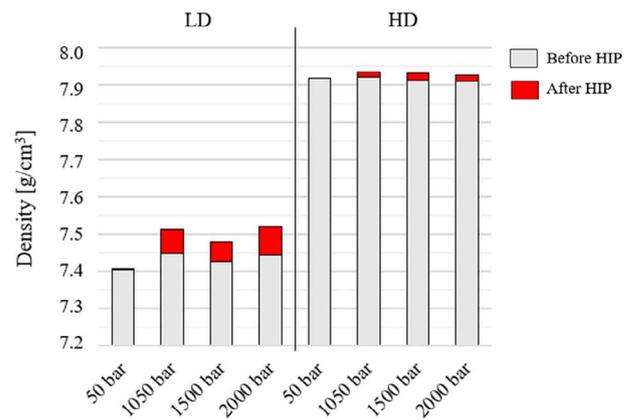


Fig. 4. Density graph before and after HIP at 1,150°C and 50, 1,050, 1,500 and 2,000 bar pressure.

경우, 약 425~670 MPa의 크기를 보이나 HIP-B 및 HIP-C는 각각 약 490~590 MPa, 390~650 MPa의 크기를 나타낸다. 따라서 500°C, 600°C 및 700°C에서도 온도가 상승할수록 인장강도가 낮아진다는 것을 알 수 있다. 연성(Ductility)의 경우 HIP-A 시편이 가장 우수하였으며 이는 HIP-A는 미세구조 형태의 하나인 망(lath-like) 구조에 해당하는 한편 HIP-B 및 HIP-C는 적층(Lamellar) 구조 특성 때문이다[2].

316 L S/S 시편(저밀도(LD) 및 고밀도(HD))에 대하여 50, 1,050, 1,500 및 2,000 bar (1 bar=0.987기압) 압력에서 3시간 동안 HIP를 진행 후 밀도 및 기계적 물성 변화에 대한 시험결과, 50 bar에서는 밀도 변화가 없었고 나머지 압력에서는 HIP 후에 밀도가 상승하였다. 또한 일정 압력 이상부터는 밀도의 변화는 없었다(Fig. 4 참조).

기계적 물성의 경우 극한인장강도(UTS)는 HIP 조건에 상관없이 변화가 거의 없고 항복강도(YS)는 HIP 이후 감소하였다. 인장율은 HIP 이후 증가하였고 압력이 높을수록 증가율은 더욱 상향하였다(Fig. 5 참조).

경도(Hardness)의 경우 시편에 큰 변화가 없는 경향을 나타낸다(Table 1 참조). 시편의 하단부는 거의 일정한 값을 보이나 상단부는 압력의 증가에 따라 경도가 증가하는 경향이 하단부보다 높음을 알 수 있다[3].

S/S에 대한 타 실험의 경우, 1,125°C 및 137기압하에서 4시간 동안 HIP 후에 시편의 밀도, 기공율, 항복강도, 극한인장강도, 인장율, 영률 등에 대한 변화를 확인하였으며 결과적으로 항복강도(YS)는 HIP 후 감소하였고 극한인장강도(UTS)는 HIP 후에 수직방향으로 증가하였으나 수

Table 1. Hardness after HIP (Load 1,000 g Hardness value)

Post-process	Hardness 1,000 g (HV)	
	Bottom	Top
None	242 ± 11.7	242 ± 3.3
HIP50	158 ± 10.5	166 ± 10.5
HIP1050	161 ± 5.0	171 ± 18.7
HIP2000	159 ± 9.6	186 ± 17.4
Solubilization	194 ± 11.7	191 ± 5.9
HIP1050 + solubilization	156 ± 5.8	189 ± 14.2

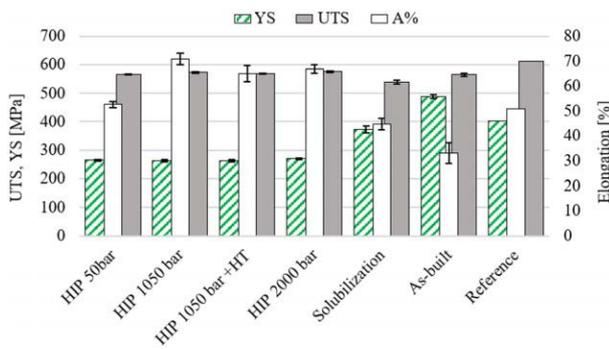


Fig. 5. Ultimate tensile strength, yield strength and elongation graph before and after HIP at 1,150°C and 50, 1,050, 1,500 and 2,000 bar pressure.

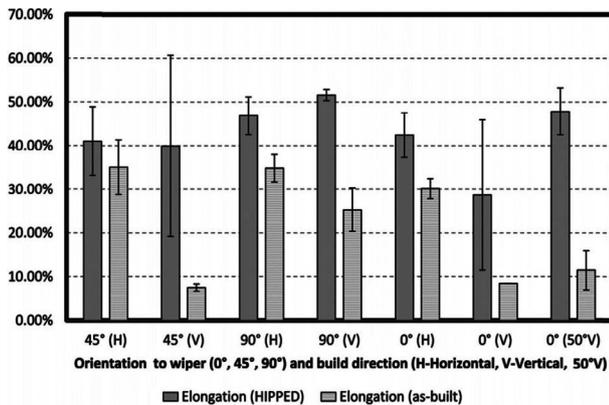


Fig. 6. Elongation graph after HIP in consideration of orientation to wiper (0°, 45°, 90°) and build direction (H-Horizontal, V-Vertical, 50°V).

평방향으로는 감소하는 것을 확인하였다. 또한 인장율은 HIP 후 크게 증가하는 것을 확인하였다. 영률 및 전단계수 (Shear Module)는 HIP 후 증가하였다(Figs. 6 and 7 참조).

탄소나노튜브 (Carbon Nanotube, CNT) 및 알루미늄 복합 재료 (CNT/Al2009)에 대한 HIP 처리 결과 인장강도 및 항복강도가 증가하였으며 (Table 2) 이는 HIP가 탄소나노

Table 2. Tensile strength characteristics at room temperature in CNT/Al2009 composite material

Process	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%
Hot extrusion	540	423.3	10.0
HIP and hot extrusion	560	443.3	10.2

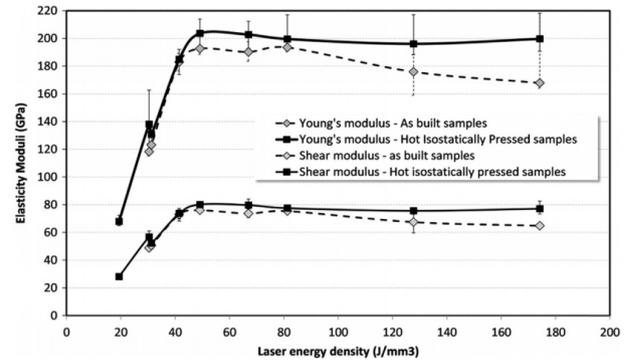


Fig. 7. Young's Module and Shear Module graph after HIP.

튜브와 알루미늄 매트릭스 간의 경계에 있는 탄소 및 알루미늄의 반응을 촉진하여 Al4C3 상을 형성하여 경계의 결합을 강화하게 하는 것으로 확인되었다[4,5].

2.1.2. 기공 물성 특성

316 L S/S 시편의 경우 HIP 후 기공율이 감소하였다 (Fig. 8 참조). 기공율의 감소에 따라 HIP 후에는 전단계수는 증가하는 경향이 확인되었다. 여러 실험 결과 HIP 후에 구조적으로 내부 기공을 없앨 수 있으며 따라서 기공율의 감소는 기계적 물성의 향상은 물론 방사성폐기물의 부피 감용에 활용될 수 있음을 확인하였다.

2.2. HIP 기술 개발 현황

HIP는 1950년대 소개된 기술로 1953년 스웨덴 ASEA사가 최초 인공다이아몬드 가공을 위해 활용되었다. 이후 일본에서 1970년대 KOBELCO사가 HIP 장비를 개발하여 판매를 시작하였고 아르곤, 질소, 산소 등 다양한 기체를 활용한 연구 개발이 이루어졌다. HIP 장비의 경우 고가이며 장비의 온도 조절에 대한 많은 시간이 소요되는 문제로 활용분야가 제한적이었으나 Modular 형태의 장비가 개발되어 연질 페라이트 생산을 위해 활용되었다 (Fig. 9 참조).

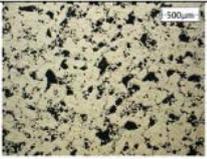
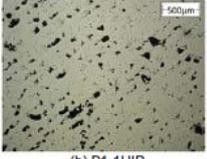
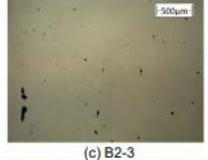
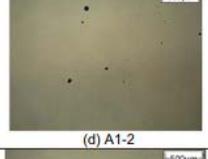
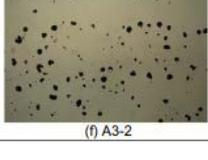
Laser energy density (J/mm ²)	As-built samples	Hot isostatically pressed sample
19.36	 (a) C1-2	 (g) C1-1HIP
31.27	 (b) B1-3	 (h) B1-1HIP
49.13	 (c) B2-3	 (i) B2-2 HIP
81.29	 (d) A1-2	 (j) A1-1HIP
127.74	 (e) A2-3	 (k) A2-2HIP
174.19	 (f) A3-2	 (l) A3-1HIP

Fig. 8. Various specimens' changes in pores before and after HIP.

Modular HIP system은 처리 대상을 압력용기에 투입하기 전에 열처리 과정을 수행 후 불활성 기체가 내장된 로를 이용하여 이송하는 방식을 활용하였고 압력용기에서 압축, 고정, 감압의 과정만을 수행하여 2~2.5배의 생산성을 달성할 수 있도록 하였다.

또한 작업 시간 단축을 위해 높은 온도를 직접 냉각하여 처리 시간을 줄인 급속 냉각로(Rapid Cooling Furnace)도 개발되었다(Fig. 10 참조). 이후 급속 냉각로의 2차 순환 기능만의 이용을 개선하여 1차 및 2차 순환을 할 수 있도록 하여 열교환량을 증가하여 1.5배 이상의 빠른 냉각 속도를 유지할 수 있도록 신개념의 급속 냉각로 기술이 개발되었다(Fig. 11 참조).

새 시스템은 급속 냉각을 15°C/min로 유지할 때

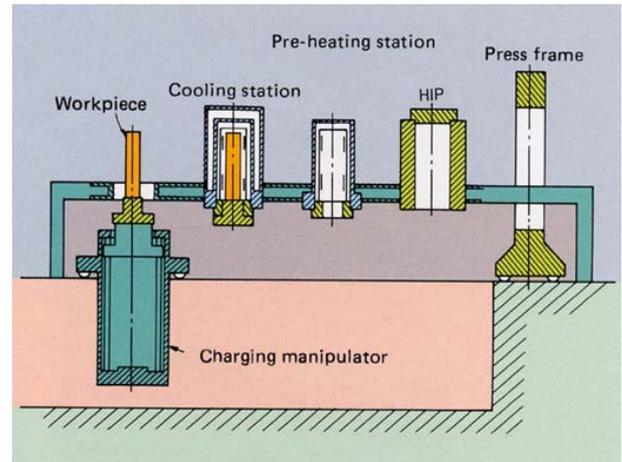


Fig. 9. Modular HIP system.

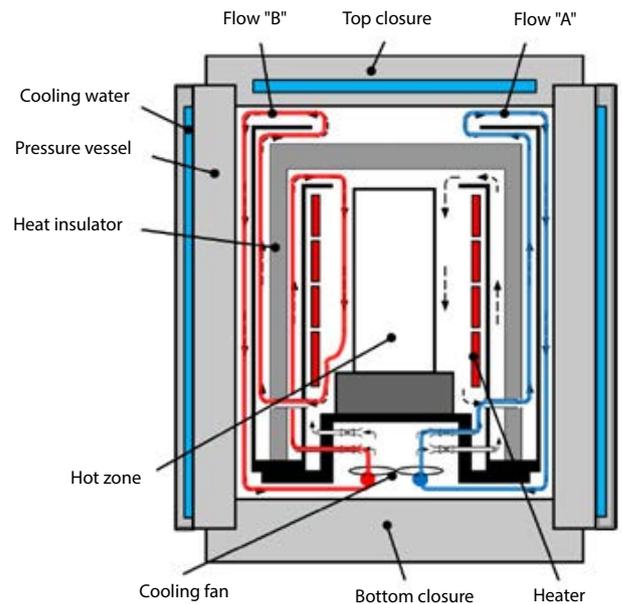


Fig. 10. Rapid cooling furnace.

1,150°C에서 400°C까지의 냉각을 수행할 때 내부 벽면 온도가 120°C까지 상승 후 110°C 온도로 안정화되는데 이러한 결과는 설계 온도가 150°C임을 고려 시 매우 좋은 결과를 보임을 알 수 있다(Fig. 12 참조).

유럽의 경우 유럽 파우더 야금협회(European Powder Metallurgy Association, EMPA) 산하에 유럽 HIP 그룹(EURO HIP)가 2009년 11월 결성되어 원재료, 기기 제작사, 고객 등을 위한 공급 체인을 제공하고 있으며 기술적인 지원도 제공하고 있다. 이는 주로 금속 및 세라믹 기기를 효율적으로 만들기 위한 조직이다. HIP 기술을 가진 업

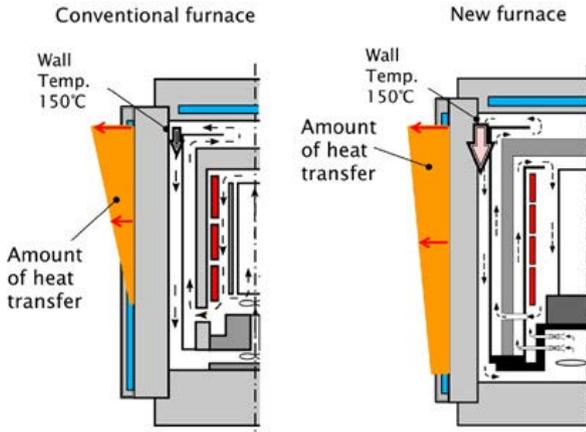


Fig. 11. Heat transfer technology improvement in new furnace.

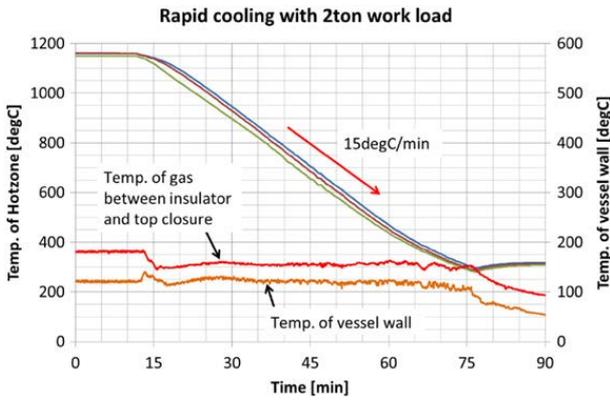


Fig. 12. Gas and inner wall temperature change graph in rapid cooling (2 tons work load).

체들은 가스 압축기의 임펠러, 기아 절단 기구, 밸브 본체, 노즐 펌프 하우징, 링 부품 등 다양한 제품 생산을 위해 장치를 개발하여 실용화하고 있다.

2.3. HIP 기술 원자력 분야 적용 사례

HIP 기술의 원자력 분야 시초는 1950년대 미국 Battelle Memorial Institute가 핵연료 및 원자로 재료의 가공을 위한 개발이 최초이다. 이후 HIP 기술의 원자력 특히 방사성 폐기물 처리 분야의 적용은 1970년대 스웨덴 ASEA사(나중에 ABB로 개칭)가 최초이다. 이후 미국, 영국, 호주, 일본 등을 중심으로 슬러지, 이온교환수지 등에 대한 처리를 위한 연구가 수행되어 왔다.

2.3.1. 영국

영국은 Georoc사를 중심으로 HIP 기술에 대한 개발을

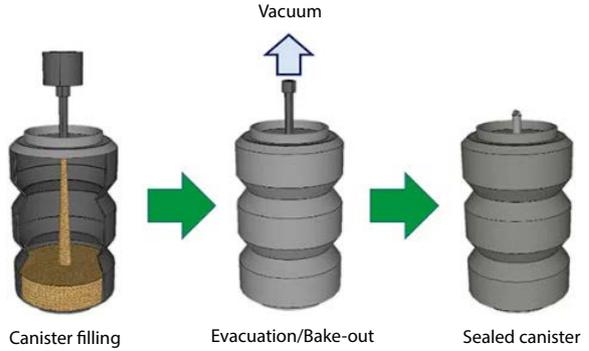


Fig. 13. Canister for HIP [5].

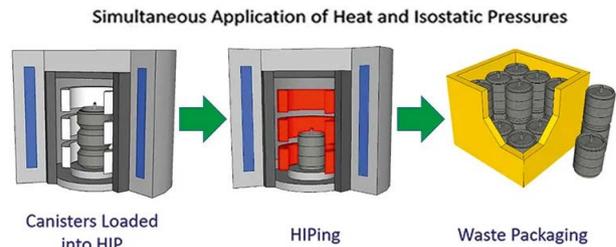


Fig. 14. HIP processing for radioactive waste [5].

수행하여 왔다. 영국은 주로 고준위폐기물에 대한 유리화 기술을 개발하였고 중준위폐기물에 대한 유리화 기술의 적용 방안도 검토하고 있다. 유리화는 휘발에 따른 폐기물 처리의 어려움, 복잡한 배기시스템의 구성 및 2차폐기물의 처리 등 문제로 많은 난점이 있어 중준위폐기물 처리에 대한 대안으로 HIP 기술을 개발하였다. 아르곤 가스가 불활성 기체로 이용되고 있으며 HIP 전에 특별히 제작된 용기(Canister)에 폐기물을 장착하고 용기 내 폐기물은 HIP 장치 내 온도 및 압력이 상승하면 압축력에 의해 안정된 부피 감소된 형태의 폐기물로 전환하게 된다(Figs. 13 and 14 참조).

GeoRoc사는 세라필드 부지에서 Magnox 연료에서 발생하는 magnesium hydroxide 슬러지와 SIXEP (Site Ion Exchange Effluent Plant) 시설에서 발생하는 Clinoptilolite (제올라이트 주성분) 슬러지 약 5,000 m³을 처리하고자 연구 조사한 바 있고 현재 세라필드 부지의 운영사인 세라필드사에서 사용을 검토 중이다. GeoRoc사의 시험적인 결과로는 160L의 슬러지가 40L로 감용되었으며(감용비: 4) 이러한 성공에 힘입어 중준위폐기물 처리를 연구 중이다. 영국 NDA(원자력해체청)에서는 부피 감용을 위한 5개년 계획을 수립하였고 다양한 방사성폐기물 종류를 대

상으로 HIP 기술 개발을 추진 중이다. 특히 영국은 우라늄 증착(uranium doped) 방사성 시료를 대상으로 연구가 진행되고 있다. 영국은 HIP 기술의 적용으로 부피 감용에 따른 비용 절감, 처분장 활용도 확대, 단순 운반처리 등의 이점을 부각할 수 있을 것으로 예측하고 있다.

2.3.2. 미국

미국은 1980년 이후 LLNL (Lawrence Livermore National Lab.) 및 Idaho 연구소에서 고준위 방사성폐기물 처리를 위한 연구를 수행하였다. 2000년대 말 이후 웨스팅하우스사가 운영 중인 Idaho Chemical Processing Plant (ICPP)에서는 하소 폐기물 (calcined waste, 열을 가하여 휘발성 물질을 제거) 대상으로 세라믹 형태의 폐기물로 전환하는 작업을 수행하고 있다. Idaho 연구소에서는 하소 폐기물을 대상으로 HIP 기술을 적용하여 부피 감용은 20~70%, 비용은 유리화를 대비할 때 1:1.74로 비용 절감의 효과가 있다고 보고하고 있다[6].

Idaho 연구소는 wire를 돌린 용기를 사용하였으며 wire

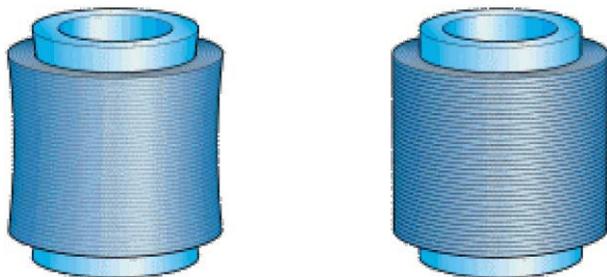


Fig. 15. Pre-stressed wire wound vessel.

를 두른 HIP 장치를 개발하여 폐기물 처리를 수행하였다 (Figs. 15 and 16 참조).

Idaho 연구소는 HIP 적용 조건에 따라 다양한 감용 결과를 도출하였다(Fig. 17 참조). HIP 시설의 구축을 위해 Battelle Energy Alliance (BEA) LLC사는 HIP 실험실 규모로 Idaho 연구소와 협력하여 시설을 제작한 바 있다.

또한 폐기물의 고정화 또는 유리화에 비해서 HIP 기술 적용의 장점을 아래와 같이 도출한 바 있다(Table 3) [7].

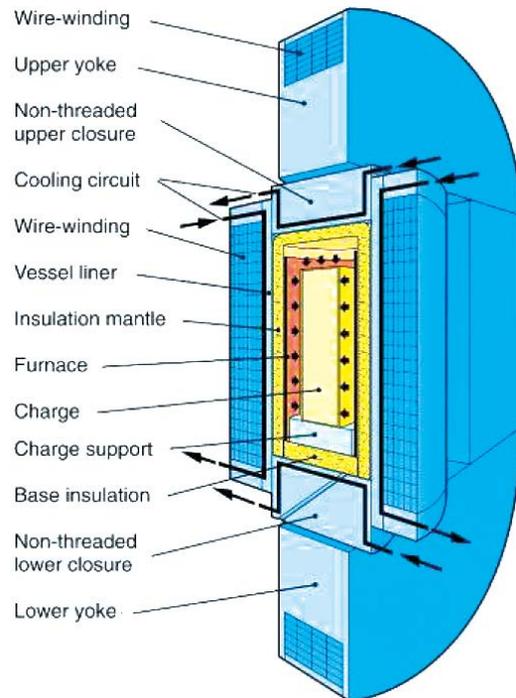


Fig. 16. Pre-stressed wire wound HIP equipment.



Fig. 17. Volume reduction cases at various conditions.

Table 3. HIP Merits comparing to consolidation and vitrification (Dr. Anders Eklund, 2019)

Consolidation	HIP	Vitrification (JHM)
Matrix	Glass-ceramic	Borosilicate glass
Waste loading	60~90%	20~35%
Durability	10~100 × EA-glass	10 × EA-glass
Final volume (relative to untreated calcine)	20~70% reduction (treat = low, non-treat = high)	Min. 100% increase
Temperature	1,050~1,200°C	1,150°C
Pressure	35~50 (100) MPa	Atmosphere
Off-gas/By-product waste	Minimal	Medium-high
Flexibility	-	-
Calcine	Treat or super-compact	Treat only
Future mission	Diverse/Flexible	Limited/Less flexible

미국은 Idaho 지역의 4,400 m³에 해당하는 고준위폐기물을 처리하기 위한 계획을 수립하였고 2010년 HIP 기술로의 처리를 결정한 바 있다. 이때 미국은 50억 규모의 비용 절감과 50% 이상의 부피 감용이 가능하다는 평가를 내린 바 있다.

2.3.3. 호주

Australian Science & technology Organization (ANSTO)는 고준위 및 중준위폐기물을 대상으로 한 폐기물 처리 기술 개발에 주력해 왔으며 호주 국립대학에서 1978년 개발한 특수 세라믹 형태의 Synroc 물질을 활용하여 휘발성 핵종인 Cs이나 Tc 등이 포함된 폐기물의 HIP 처리를 수행하고 있다. ANSTO는 1994년 미국의 LLNL 연구소와 협력하여 플루토늄 물질의 처리를 위한 공동 연구를 수행하였으며 이때 불활성 기체인 아르곤을 활용하고 150 MPa 압력에서 1,280°C 온도의 조건으로 HIP 장치의 운영을 수행한 바 있다(Fig. 18 참조).

1997년에는 미국 Argonne national Lab. (ANL)과 고준위폐기물에 대하여 Synroc 물질을 활용한 상업적 규모의 처리장치를 개발하였고 Tc, Cs, Sr 및 I 등 휘발성 물질의 처리에 효율적임을 확인하였고 배기가스의 방출도 없는 것을 확인하였다. 이에 따라 미국에너지부(DOE)는 1998년 Synroc의 특수형태(Pyrochlore-rich)를 고준위폐기물 처리에 활용하도록 결정하였고 2007년까지 사바나강 지역에 플루토늄 고정화 시설을 건설기로 한 바 있다.

ANSTO는 프랑스의 코제마사와 협력하여 플루토늄 고정화 시설에 2000년 입찰 참가하였으나 미국 정부의 MOX (Mixed Oxide) 연료 시설의 건설로 플루토늄 고정



Fig. 18. ANSTO HIP equipment (Pressure: 200 MPa).

화 시설 계획이 2010년에 중지된 바 있다.

2010년 ANSTO는 미국에서 4,400 m³에 해당하는 고준위폐기물 처리 사업을 수주하였고 이때 HIP 기술에 사용된 재질은 특수 유리 세라믹이었다. 유리 세라믹 재질은 나트륨이나 실리콘이 포함된 폐기물 처리에 유용하며 또한 1,200~1,400°C 온도에서 용융되는 ANSTO의 Synroc 유리 혼합물은 HIP 운영 조건인 1,150°C 및 14 MPa에 이점을 갖는 것으로 확인되었다.

2005년 ANSTO는 영국의 국립원자력연구소(National Nuclear Lab., NNL)과 불순물 함유 플루토늄 폐기물 5톤을 처리하기 위한 협력을 하였으며 이 폐기물은 세라필드 부지에서 50년 동안 저장되었고 유리화가 불가능한 폐기물이었다. ANSTO는 NNL과 시범 시설을 만들어 처리사업을 하였고 이후 악티나이드계 폐기물 처리도 가능한 것

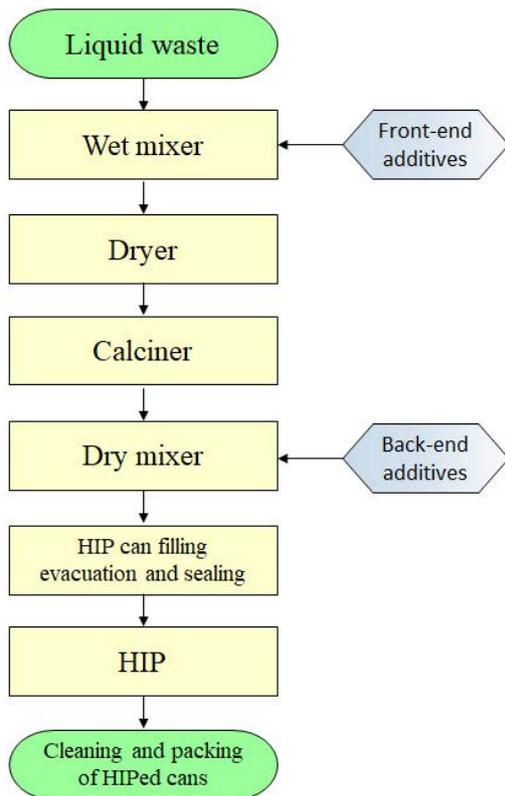


Fig. 19. HIP process for liquid waste treatment.

으로 판단하였다.

ANSTO는 시드니 주변의 Lucas Heights 지역의 Mo-99 생산 시설과 관련하여 중준위 액체폐기물을 처리하기 위한 Synroc 시설을 건설하였으며 HIP 시설의 적용 전에 2년 동안 반감기 감쇄 후 처리가 시작되었으며 90% 이상의 부피 감용 결과를 성공시켰다(Fig. 19 참조). 현재 국제 원자력기구(IAEA) 분류에 따르면, 농축된 U 베어링 표적의 원자로 조사를 이용한 Mo-99 생산 시 발생하는 폐기물은 액체 및 고체 형태로 중준위(ILW)에서 저준위(LLW)까지 다양하다. ANSTO는 Synroc 시설을 이용하여 매년 320개 용기를 처리하였으며 각 용기는 30 L(무게 1.4톤)이었다. 이러한 성공은 방사선 의학 분야에서 중준위폐기물 처리에 대한 기대를 향상시켰다. ANSTO는 시멘트 고정화 처리 폐기물과 비교하여 처분 부피를 1%까지 감용 처리하였다.

또 다른 형태의 Synroc (zirconolite-rich) 물질은 고준위 폐기물 중 Am/Cm/희토물질(Rare-earth)을 대상으로 처리 가능함을 확인하였다.

3. HIP 국내 활용 방안

HIP 기술의 국내 적용은 해외 사례에서 확인되었듯이 주로 파우더 형태 또는 공극을 제거할 수 있는 콘크리트 슬러지, 토양 등의 폐기물과 이온교환수지 및 중준위폐기물 등이 대상으로 될 것으로 판단된다. HIP 기술의 장점에서와 같이 기공의 제거와 함께 휘발성 핵종의 제거 등에 탁월할 것으로 판단된다. 국내는 아직 고준위폐기물에 대한 처리, 처분계획의 수립이 확립되어 있지 않은 관계로 고준위폐기물에 대한 적용은 아직 시기상조라 판단된다 [8].

현재 원전 해체 시 해체 폐기물의 발생은 Table 4와 같이 보고되고 있다.

상기 자료에 따라 HIP 기술 적용이 가능한 것은 200 L 드럼 기준 시 Scabbling concrete (스캐블링 콘크리트) 740 드럼, Asbestos (석면) 26드럼, Spent resin (폐수지) 44드럼 (폐필터량 전체 1/2로 점유 산정 제외), Concrete piece (콘크리트 조각) 2,706드럼이 해당 가능할 것으로 판단되고 이는 전체 처분 대상 폐기물량의 33%를 차지한다고 할 수 있다. 본 예상은 원전 해체폐기물에 대한 예측이며 현재 원전 운영 중 발생된 폐기물은 고려하지 않았다. 운영 폐기물은 농축폐액, 폐수지, 잡고체 및 폐필터로 구분되고 이 중 농축폐액 및 폐수지 양이 상당한 만큼 운영폐기물의 처리를 고려한다면 HIP의 적용성은 상당하다고 할 수 있다.

4. 시사점 및 결론

해외에서 각광을 받는 HIP 기술의 해외 개발 사례와 시설 운영의 사례를 통하여 국내 적용 가능성을 확인하였다. HIP 기술은 비용적인 측면과 장치 운영의 어려움 등으로 고준위 및 중준위폐기물을 대상으로 이용되어 왔으나 높은 감용률 및 운영 경험의 축적 등으로 이온교환수지 및 고정화 대상 폐기물에 대한 효율적인 대체 기술로 각광받고 있다. 국내에서도 운영폐기물의 처리 및 과거 폐기물(Historical waste, 인수 기준 마련 전에 처리된 방사성폐기물)과 유기폐액 등의 액체폐기물 처리에 활용이 가능하고 해체폐기물에서도 스캐블링 콘크리트, 토양(발생시), 석면 등의 처리에 효율적이라 판단되므로 충분한 검

Table 4. Decommissioning waste production (Kori #1 basis)

Class	Type	Volume (m ³)		200 L drum (EA)	
		Production q'ty	Q'ty after reduction	Production q'ty	Q'ty after reduction
Clearance waste (CW)	Cable	354	438	1,947	2,408
	Concrete piece	112,954	112,954	734,199	734,199
	Hazard waste	25	25	152	152
	Asbestos	366	366	2,012	2,012
	Large equipment	2,282	2,282	14,831	14,831
	Small metal	23,546	31,078	153,046	202,006
	Spent fuel storage rack	0	245	0	1,594
Intermediate level waste (ILW)	Small metal	8	8	54	54
	Spent resin or spent filter	15	15	85	85
Low level waste (LLW)	Cable	22	0.01	119	0.1
	Concrete piece	229	229	1,488	1,488
	Scabbling concrete	34	34	189	189
	Dry active waste (DAW)	409	94	2,456	565
	Hazard waste	11	0.5	65	3
	Asbestos	12	0.4	65	2
	Large equipment (Cutting)	832	105	5,408	579
	Large equipment (Original)	832	832	5,408	4,576
	Reactor vessel (Cutting)	199	23	1,293	152
	Reactor vessel (Original)	199	199	1,293	1,094
	Small metal	3,416	203	22,207	1,118
	Spent fuel storage rack	490	28	3,188	156
Spent resin or spent filter	19	1	103	3	
Very low level waste (VLLW)	Cable	83	0.1	457	1
	Concrete piece	187	187	1,218	1,218
	Scabbling concrete	100	100	551	551
	Hazard waste	22	1	132	6
	Asbestos	129	4	712	24
	Small metal	6,308	769	41,004	4,228
	Spent fuel storage rack	0	28	0	156
Spent resin or spent filter	0	0	0	0	
Disposal waste total (Cutting)		12,525	1,830	80,794	10,578
Disposal waste total (Original)		12,525	2,733	80,794	15,517

토를 거쳐 향후 국내 도입을 검토할 필요가 있다. 경주(중수로) 및 울주/부산(경수로) 지역에 설치될 원자력 혁신연구센터에서도 효율적으로 방사성폐기물 처리에 대한 기술 확보가 필요하므로 HIP 기술에 대한 본격적인 연구를 기대한다.

일반 산업 분야에서는 향후 Mo-99 생산 시설 등 의료 분야에서 발생할 수 있는 비교적 방사선 준위가 높은 액체폐기물을 포함한 HIP 기술이 적용 가능한 방사성폐기

물에 대하여 운용성을 높여야 하고 방사성폐기물 분야가 아닌 원자력 재료 분야에서도 HIP 기술의 적용성을 향상시켜야 한다.

사 사

본 논문은 “원전해체발생 고형화 처리 방폐물의 처분을

위한 인수기준 적용방안 및 방폐물 인증프로그램(WCP) 요건(안) 개발” 과제(과제번호: 20193210100120)의 지원으로 작성되었습니다.

참고문헌

1. 성낙훈, 최규섭, 이재설, 윤경섭, 송양수, 김해영, 이상현. 2012. 한국원자력환경공단. 원전 해체폐기물 처분방안 분석 용역 최종보고서. DD-KO-R-100:101-106.
2. Cai C, Gao X, Teng Q, Kiran R, Liu J, Wei Q and Shi Y. 2021. Hot isostatic pressing of a near α -Ti alloy: Temperature optimization, microstructural evolution and mechanical performance evaluation. *Mater. Sci. Eng.* **802**:140426. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140426>
3. Liverani E, Lutey AHA, Ascari A and Alessandro F. 2020. The effects of hot isostatic pressing (HIP) and solubilization heat treatment on the density, mechanical properties, and microstructure of austenitic stainless steel parts produced by selective laser melting (SLM). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **207**:109-122. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05072-9>
4. Niu Y, Chen Y, Jiang J, Pan Y, Yang C and Wang C. 2020. Enhanced Thermoelectric Performance in Li Doped SnS via Carrier Concentration Optimization. *Mater. Sci. Eng.* **738**: 012016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/738/1/012016>
5. Lavery NP, Cherry J, Mehmood S, Davies H, Girling B, Sackett E, Brown SGR and Sienz J. 2017. Effects of hot isostatic pressing on the elastic modulus and tensile properties of 316L parts made by powder bed laser fusion. *Mater. Sci. Eng.* **693**:186-213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.03.100>
6. <https://researchfeature.com>. Hot Isostatic pressing can substantially reduce the volume of nuclear waste.
7. Eklund A and Matzie RA. 2019. Hot Isostatic Pressing of Radioactive Nuclear Waste: The Calcine at INL. *Materials Research Proceedings* **10**:11-17. <https://doi.org/10.21741/9781644900031-2>
8. 송지영, 송교혁, 박진호, 지승후, 도태관, 김광표. 2018. 경희대학교. 원자력시설 해체 시 극저준위방사성폐기물 처분을 위한 국내외 방사성폐기물 분류체계 및 인수기준에 대한 연구. 방사선산업학회지. **12**(3):239-247. <https://doi.org/10.23042/radin.2018.12.3.239>