'96 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Borated Stainless Steel (BSS)의 기계적 특성에 관한 검토

장상균, 신태명
한국원자력연구소

요 약

핵연료를 고밀도로 저장하고 수송하기 위한 핵연료저장대 및 수송용기등에 중성자흡수재로 사용되는 Borated Stainless Steel (BSS)의 기계적 특성에 대해 검토하였다. BSS는 사용후연료의 저장 및 수송시 중성자흡수재로서 뿐만 아니라 구조재로 사용되기 때문에 구조물의 건전성측면에서 기계적 특성은 중요하다. 본 논문에서는 BSS의 기계적 특성 중에서 붕소농도 증가 및 중성자 조사전후 재료의 인장강도 및 항복강도, 충격에너지 및 경도 등에 대해 검토하였다. BSS는 원자력 부품용 지지구조물의 구조재로서 ASME 코드화되는 경우 핵연료 저장 및 수송용기등에 널리 활용될 것으로 판단된다. 검토된 자료는 BSS를 사용하는 핵연료 저장대의 구조설계에 활용될 것이다.

1. 서 론

가압경수로 발전소의 핵연료 저장수조내에 중성자흡수재를 사용하여 고밀도로 핵연료를 보관하기 위한 저장대는 보통 10인치 내외의 저장셀 사이의 간격으로 핵연료를 미임계로 유지하고 있다[1]. 고밀도 핵연료저장대에 사용되는 중성자 흡수재의 주요 선택기준은 중성자에 대한 저항성, 내부식성, 기계적 안정도, 재질의 무게, 감속재의 소모성, 기체 발생률, 가동중 검사의 필요성, 사용사례 및 문제발생 이력 등이다. 미국 원자력 규제 위원회에서는 중성자흡수재로 사용되는 물질의 기계적 건전성 및 장기간 동안의 안전성을 입증하려는 자료는 이를 확인하는 실제시험을 포함하여야 함을 인허가요건으로 규정하고 있다[2]. 중성자흡수재로 개발된 재료는 알루미늄과 탄화붕소의 복합재인 Boral, 실리콘 고분자 유기화합물과 탄화붕소의 복합재인 Boraflex, 스텐레스강에 붕소를 첨가한 BSS, 그밖에 Tetrabor, Cerashield, Boron-Al 합금 및 Cadminox등이 있다. 대부분의 중성자흡수재는 기계적인 강도 때문에 구조재로서 사용이 제한되며, 특히 Boral 및 Boraflex는 구조재의 벽면에 부착되어 중성자를 흡수하여 핵연료의 임계도를 조절하기 위해 사용되고 있다. 발전소내 습식용 핵연료저장대에 사용된 Boral은 조사에 따른 재료의 부풀림 등으로, Boraflex는 재료의 수축 및 감소로 인한 기능저하등의 이유로 설계 수명기간동안 감시 및 시험프로그램을 수행해야 한다[3]. 중성자흡수재뿐만 아니라 구조재로 사용되는 BSS에 대해서는 아직 ASME 코드 및 표준화를 위한 자료의 부재 이유로 미국내에서 널리 사용되지 않았지만 현재 일부 ASME코드화 작업이 완료되었고, 진행 중이므로 앞으로 핵연료저장대 및 수송용기등에 널리 활용될 것으로 보인다. BSS가 원자력 부품 등에 활용되기 위해서

는 재료에 대한 기계적 특성 규명이 중요하다. 본 논문에서는 BSS의 기계적 특성에 대한 실험결과 자료를 검토하여 앞으로의 BSS를 사용한 핵연료저장대의 구조설계에 활용하고자 한다. 참고로 현재 전세계적으로 BSS를 공급하는 업체는 미국의 Carpenter Technology Co., 영국의 British Steel Co., 일본의 Nippon Kokan K.K, Hitachi metals, Toshiba, 독일의 ENSA (Equipos Nucleares S.A)등이 있다.

2. 본 론

원자력발전소용으로 이용되는 BSS는 핵연료저장대의 구조대로 활용하기 위해 자연 및 농축붕소를 중성자 감쇠요건에 따라 최고 2.25 wt %까지 스텐레스강에 첨가한 합금으로 제작 및 용접시 특별한 주의를 필요로 한다[4]. BSS는 보통 1.0 wt % 이상의 붕소를 포함하여야만 핵연료 임계도를 조절할 수 있는데 붕소농도가 증가함에 따라 재료의 기계적 성질이 변함으로 이에 대한 실험결과 및 평가가 필요하다. 따라서 BSS의 붕소농도 변화 및 중성자 조사전후의 기계적 특성에 대해 실험적 결과[3]을 근거로 검토하기로 한다.

2.1 BSS의 화학적 성분 및 기계적 시험요건

ASTM A887-89[4]에서 제시한 BSS의 각 유형에 따른 화학적 성분 및 기계적 시험요건은 표 1, 2와 같다. 표 1에서 분류는 붕소농도(최저 0.20 wt % ~ 최고 2.25 wt %)에 따라 8가지로 분류되고, 표 2에서 등급 A, B의 분류는 붕소분포도의 균질성에 기준을 두며, 등급 A는 B보다 최적의 균질한 분포도를 갖고 있다. 등급A의 재료는 Powder Metallurgy 공정으로 생산되고, 등급 B는 Ingot Metallurgy공정으로 생산된다.

2.2 기계적 특성

초기 BSS는 핵연료를 저장하고 수송하기 위한 구조재 및 핵연료 임계 조절용으로 Ingot Metallurgy공정에 의해 생산되었다. 핵연료의 임계조절용으로 사용하기 위해서는 최소 1.0 wt % 이상의 붕소농도를 함유하여야 하는데, 그림 1에서 보여주는 바와 같이 붕소농도가 증가함에 따라 인장강도 등은 증가하나 연성 및 충격강도 등은 감소한다. 따라서 사용후연료의 저장 및 수송에 구조재로서 사용이 제한되었다. 그후 재료의 구조재로서 연성 및 충격저항을 개선하고 중성자흡수 능력을 향상시키기 위해 붕소농도를 2.25 wt %까지 첨가시킨 BSS가 Powder Metallurgy방법에 의해 개발되었다. 미국의 Carpenter Technology Corp.에서 개발한 NeutroSorb plus는 ASTM A887-89의 등급A 요건을 따르고 있다. NeutroSorb plus는 ASTM A887-89의 등급B의 요건에 적합한 NeutroSorb를 개선한 것이다. 등급 A 와 B의 선택기준은 차폐에 필요한 붕소량, 기계적 성질, 재료 두께 및 설계수명동안의 비용 등에 따른다. 등급 A는 재료의 연성 및 충격저항을 개선함으로서 구조물의 공간 효율화 및 경량화, 구조적 건전성 강화, 제작성을 향상시킬 수 있다. 참고문헌 3은 붕소농도를 0.25 wt % ~ 2.01 wt % 함유하고 있는 BSS에 대해 중성자속 레벨을 $1x10^{13}$ ~ $1x10^{17}$ n/cm^2 까지 조사한 후 기계적 특성에 대해 기술하고 있다. 재료의 샘플은 ASTM A887-89 등급 A, B의 요건에 따라 미국의 Carpenter Technology Corp.가 제작하였다. 다음은 BSS의 붕소농도 증가 및 중성자 조사전 후의

기계적 특성 중에서 인장강도, 항복강도, 충격강도 및 경도에 대해 검토하고자 한다. NeutroSorb plus 및 NeutroSorb는 ASTM A887-89의 등급 A, B의 요건에 적합하기 때문에 각각 등급 A, B로 명명한다.

가. 인장강도 및 항복강도 (그림 2, 3)

ASTM A887-89(표 2)에서 BSS의 인장강도 요건으로 붕소농도에 관계없이 최소 515 MPa를 제시하고 있다. 보통 등급 A,B 모두 붕소농도의 증가에 따라 등급 A BSS의 인장강도는 2.0 wt %에서 812 MPa까지 약 45° 기울기로 증가하고, 등급 B의 경우 붕소농도 1.0 wt %에서 644 MPa, 2.0 wt %에서 659 MPa까지 완만하게 증가하였다. 등급 A,B 모두 고 중성자속(1 x 10^{17} n/cm^2)에 조사된 경우가 중 중성자속(5 x 10^{15} n/cm^2) 및 저 중성자속(1 x 10^{13} n/cm^2)에 조사된 경우보다 약간 인장강도가 증가하였다. BSS의 항복강도요건으로 참고문헌 4에서는 205 MPa로 규정하고 있는데, 인장강도 특성과 함께 붕소농도 증가에 따라 증가한다. 등급 A의 경우 붕소농도 0.95 wt %까지는 조사전의 BSS는 중저 중성자속에 조사된 경우와 동일한 항복강도를 갖으나 농도가 2.0 wt %에 이를 수록 고저 중성자속 조사에 따라 항복강도가 증가하였다.

나. 충격강도 (그림 4)

BSS는 재료 특성 때문에 무붕소 스텐레스강(SA 304)에 비해 최소 25 %이상 충격강도가 감소하며, 또한 붕소함량의 증가에 따라 감소함으로서 충격에 대한 구조재로서의 문제점을 갖고 있다. 등급 A의 충격강도는 등급 B보다 동일한 붕소농도에 비해 최고 4배까지 증가하도록 개선하였다. 등급A의 경우 붕소 0.25 wt %에서 중 중성자속에서의 충격강도가 조사전 및 저고 중성자속에 비해 약 23 Joule(J) 크지만, 붕소농도가 증가함에 따라 중성자속의 변화에 무관하게 충격강도는 23 ~ 26 J로 수렴되었다. 그러나 ASTM A887-89(표2)에서 제시하고 있는 304B7A의 충격강도 요건(14 J)은 ASME Sec. III, NF에서 제시한 제한값(20.3 J)을 만족하지 못하고 있다.

다. 경도 (그림 5)

BSS의 경도는 등급 A, B 모두 붕소농도의 증가 및 중성자 조사에 따라 증가하였다. 조사전 등급 A는 등급 B에 비해 4 %정도 미미하게 개선되었고, 중저 중성자 조사보다는 고 중성자 조사에 경도가 증가하였다. 참고문헌 3에 인용된 재료 샘플에 대한 경도는 ASTM A887-89에서 제시한 요건보다 최고 18 %가량 낮다.

2.3 BSS의 ASME Code Case

ASME Code Case [5]에서 ASTM A887-89 등급A에서 제시된 기계적 요건이 ASME Sec. III, NF 및 NG

지지구조물의 설계요건으로 적합한지에 대한 승인을 받았다. 적용되는 재료의 종류는 304B4A, 304B5A, 304B6A로 붕소농도를 1.00 ~ 1.74 % 함유하고 있다. 2.2절의 나항에서 지적한 바와 같이 ASTM A887-89의 304B7A는 ASME Sec. III, NF에서 제시한 제한값(20.3 J)을 만족하지 못하기 때문에 ASME Code Case 문의에서 제외하였다. ASME Sec. III으로 승인된 세가지 재료에 대해 원자력 부품용으로의 사용여부는 미국 원자력위원회의 승인을 아직 받지 않은 상태이다. 참고자료 5는 ASTM의 세 가지 재료가 ASME Sec. III, NF 및 NG에 따라 설계될 경우 응력강도(Sm), 인장강도(Su) 및 항복강도(Sy)요건을 표 3과 같이 제시하고 있다. 또한 참고문헌 5는 피로해석 평가 및 charpy V-notch 충격시험에 관한 요건을 기술하고 있으며, 충격강도에 대한 최소요건은 ASTM A887-89(표2)를 인용하고 있다. 본 Code Case에 적용되는 재료를 사용하여 설계할 경우 중성자속은 1 x 10^{17} n/cm^2를 초과하여서는 안된다.

3. 결 론

3.1 사용후연료의 저장대 및 수송용기의 중성자흡수재로서 뿐만 아니라 구조재로도 사용되는 BSS의 붕소농도 증가 및 중성자 조사전후 재료의 인장강도, 항복강도, 충격강도 및 경도등 기계적 특성에 대해 검토하였다.

3.2 BSS의 기계적 특성 중에서 인장강도, 항복강도, 경도는 붕소농도 증가 및 중성자조사에 따라 증가하나, 충격강도는 감소한다. 특히 붕소농도를 1.75 ~ 2.25 % 함유하고 있는 ASTM A887-89 304B7의 충격에너지요건(14 J)은 ASME Sec. III, NF에서 제시한 요건(20.3 J)보다 낮아 충격저항에 취약하다.

3.3 ASTM A887-89에서 제시된 BSS의 재료 중에서 붕소함량이 1.00 ~ 1.74 %인 304B4A, 304B5A 및 304B6A는 '92년 ASME Code Case(Nuclear Component)에 적용할 수 있도록 승인되었으나 원자력 부품용으로 미국 원자력위원회의 허용승인을 아직 받지 않았다.

3.4 중성자흡수재 및 구조재로 사용되는 BSS는 설계수명기간 동안 감시프로그램이 필요 없는 등 여러가지 장점을 갖고 있으므로 앞으로 핵연료 저장대 및 수송용기등에 널리 활용될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. EPRI NP-4724, Behavior of High-density Spent Fuel Storage Racks, 1986. 8
2. NRC Docket No. 50-269/270/287, OT Position for Review and Acceptance of Spent Fuel Storage and Handling Applications, 1978
3. EPRI TR-100784, Borated Stainless Steel Application in Spent Fuel Storage Racks, 1992. 6
4. ASTM A887-89, Standard Specification for Borated Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Nuclear Application.
5. ASME Code Case(1992 Edition), Supplement No. 7, Nuclear Components, N-510, Borated Stainless Steel for Class CS Core Support Structures and Class 1 Component Supports Section III, Division 1, 1993. 12

표1 BSS의 화학적 성분 요건

Type	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	B	Other Element
304B	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	0.20-0.29	N 0.10 max
304B1	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	0.30-0.49	N 0.10 max
304B2	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	0.50-0.74	N 0.10 max
304B3	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	0.75-0.99	N 0.10 max
304B4	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	1.00-1.24	N 0.10 max
304B5	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	1.25-1.49	N 0.10 max
304B6	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	1.50-1.74	N 0.10 max
304B7	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	18.00-20.00	12.00-15.00	1.75-2.25	N 0.10 max

표2 BSS의 기계적 시험요건

Type	Grade	Tensile Strength (min)	Yield Strength (min)	Elongation in 2″ or 50 mm, %	Hardness (max)	Charpy V-Notch Energy, ft-lb(J), min	Boron Content
		ksi (MPa)	ksi (MPa)		Brinell/ Rockwell B		
304B	A	75 (515)	30 (205)	40.0	201/92	65 (88)	0.20-0.29
304B1	A	75 (515)	30 (205)	40.0	201/92	60 (81)	0.30-0.49
304B2	A	75 (515)	30 (205)	35.0	201/92	48 (65)	0.50-0.74
304B3	A	75 (515)	30 (205)	31.0	201/92	38 (52)	0.75-0.99
304B4	A	75 (515)	30 (205)	27.0	217/95	30 (41)	1.00-1.24
304B5	A	75 (515)	30 (205)	24.0	217/95	23 (31)	1.25-1.49
304B6	A	75 (515)	30 (205)	20.0	241/100	16 (22)	1.50-1.74
304B7	A	75 (515)	30 (205)	17.0	241/100	10 (14)	1.75-2.25
304B	B	75 (515)	30 (205)	40.0	201/92	40 (54)	0.20-0.29
304B1	B	75 (515)	30 (205)	35.0	201/92	35 (47)	0.30-0.49
304B2	B	75 (515)	30 (205)	27.0	201/92	16 (22)	0.50-0.74
304B3	B	75 (515)	30 (205)	19.0	201/92	10 (14)	0.75-0.99
304B4	B	75 (515)	30 (205)	16.0	217/95	-	1.00-1.24
304B5	B	75 (515)	30 (205)	13.0	217/95	-	1.25-1.49
304B6	B	75 (515)	30 (205)	9.0	241/100	-	1.50-1.74
304B7	B	75 (515)	30 (205)	6.0	241/100	-	1.75-2.25

표3 BSS의 응력강도, 항복강도 및 인장강도 요건

Temperature °F	Stress Intensity Sm, ksi	Yield Strength Sy, ksi	Ultimate Tensile Strength Su, ksi
100	20.0	30.0	75.0
200	20.0	28.2	75.0
300	20.0	27.0	72.3
400	20.0	26.1	70.0
500	20.0	25.1	69.1
600	20.0	24.1	68.8
650	20.0	23.7	68.6
700	20.0	23.5	68.5
750	20.0	23.4	68.3

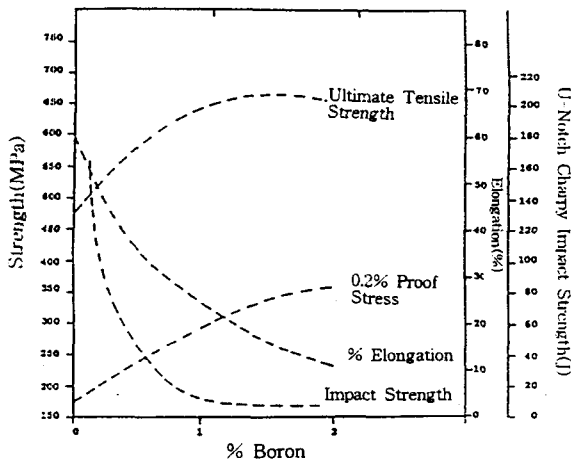

그림 1 BSS(HYBOR 304L)의 기계적 특성

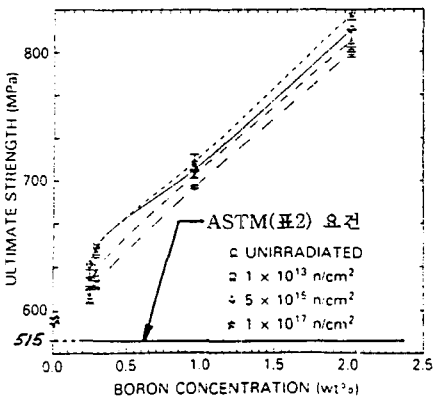

그림 2 NeutroSorb plus의 인장강도

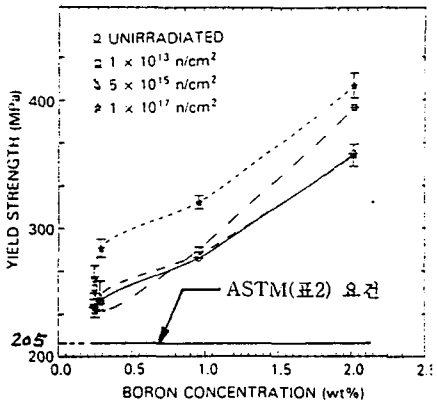

그림 3 NeutroSorb plus의 항복강도

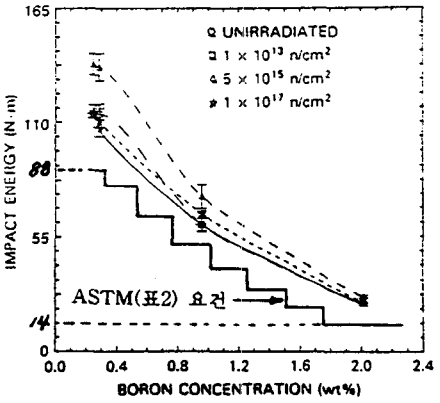

그림 4 NeutroSorb plus의 충격강도

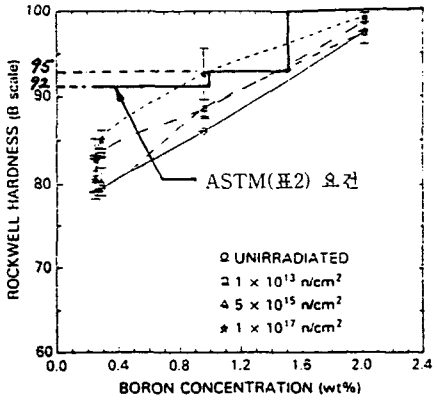

그림 5 NeutroSorb plus의 경도