

輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

— 中性子照射效果의 冶金學的因子 —

1. 序 言

發電用原子爐의 壓力容器材料는 中性子照射에 의해 機械的性質이 變化하여 主로 強度의 상승과 靱性의 저하가 생긴다.

압력용기재료의 기계적성질로는 引張特性, 살피V노치衝擊特性(V노치試驗片에 의한 살피衝擊試驗特性) 및 破壞力學的手法에 의한 破壞靱性의에 疲勞特性도 문제가 된다. 疲勞特性에 대해서는 照射效果는 거의 없고, 高溫水 環境에 의한 영향이 크다는 것이 알려져 있다. 本稿에서는 引張特性和 살피 衝擊特性에 대한 실제 데이터의 例를 紹介하고 強度의 上昇과 靱性의 低下와의 關係, 살피衝擊特性의 평가방법 등에 대해서 알아보았다.

中性子照射後의 기계적성질의 데이터로는 實用爐에서의 監視試驗과 材料試驗爐 및 研究用 原子爐 등에 의한 照射試驗의 데이터가 있다. 다음에 中性子照射條件(供試材, 照射溫度, 照射量 등)이 압력용기재료의 기계적성질에 어떤 영향을 주는가를 알기 위해 中性子 照射條件을 여러가지로 바꾼 照射試驗의 데이터를 紹介한다.

2. 引張特性和 살피衝擊特性에 對한 照射效果

鐵鋼材料는 성분, 금속조직에 의해 정도에 차이는 있으나, 中性子照射에 의해서 引張特性에서는 強度(降伏強度, 引張特性)의 상승과 延性

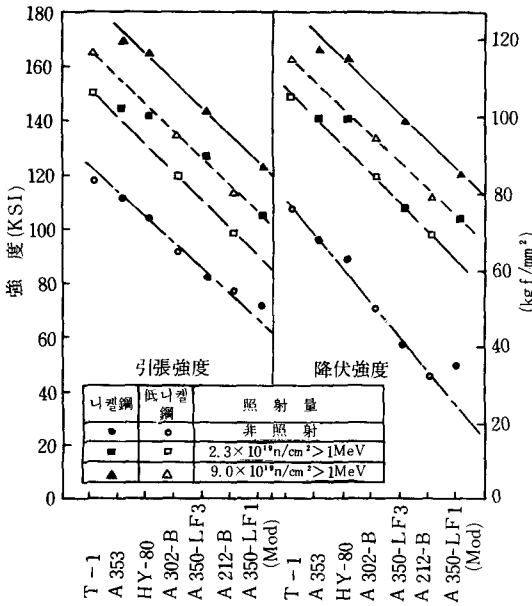
의 저하, 살피衝擊特性에서는 脆性-延性 遷移溫度의 상승과 上部棚에너지의 저하가 생긴다. 各種 鋼材에 대해서 強度와 遷移溫度의 照射前後의 測定例를 그림1 및 그림 2에 나타내었다.

그림 1은 250°F(121°C)以下에서의 照射의 경우이고, 그림 2는 500°F(260°C)以下에서의 照射의 경우인데 모두 照射量이 클수록 降伏強度, 引張強度 및 遷移溫度가 상승한다.

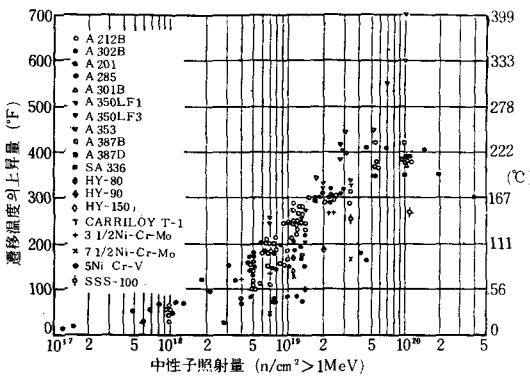
실제 압력용기재료의 主要재료인 SA533 B C1.1鋼에 대한 照射試驗의 代表例로는 美國의 HSST프로그램(Heavy Section Steel Technology Program)이 있다. 이 시험프로그램은 美國原子力委員會가 原子爐 1次系統의 健全성 향상을 위해 行한 대형연구로서 1967~1975년의 예정으로 行하여졌으며, 그 성과의 概要가 보고 되었다. HSST프로그램의 供試材는 實用規模인 12인치(약 30mm)두께의 鋼板(HSST 01, 02 및 03)이었는데 01 및 02鋼板은 美國내의 시험에 사용되었고, 03鋼板은 IAEA(International Atomic Energy Agency, 國際原子力機構)를 통해서 各國의 시험기관에 시험에 제공되었다. 다음에 이들의 시험결과를 나타내었다.

510°F(266°C)에서 $2\sim 8 \times 10^{19}n/cm^2 (>1MeV)$ 의 照射를 하였을 경우 HSST02鋼板의 강도상승과 照射量의 關係를 引張試驗溫度를 파라미터로 해서 나타낸 것이 그림 3이다. 이 시험조건외의 범위에서는 각 시험온도에서 降伏強度, 引張強度

〈그림 1〉 各種 鋼材의 250°F (121°C) 以下の 中性子照射을 行한 後의 降伏強度와 引張強度



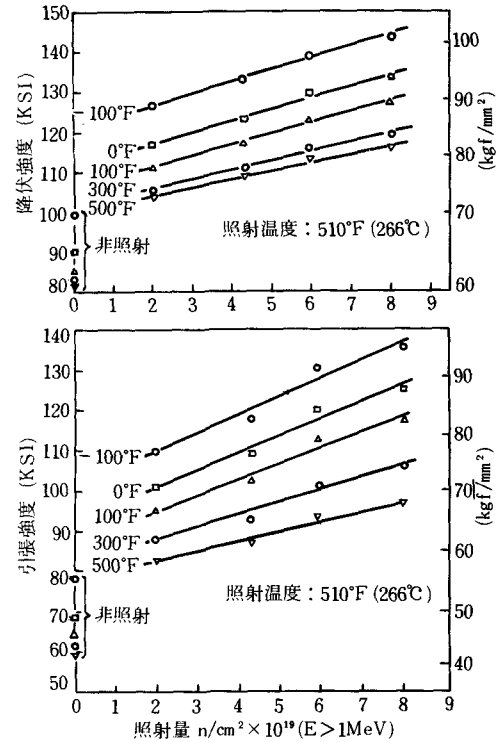
〈그림 2〉 各種 鋼材의 500°F (260°C) 以下の 中性子照射에 의한 遷移溫度의 上昇



모두 照射量과 線型關係에 있고, 그 勾配는 시험온도의 상승과 함께 감소하고 있다. 또 引張強度의 照射에 의한 상승은 降伏強度와 比較해서 작으므로 降伏強度가 照射感受性이 높은 것을 알 수 있다.

照射感受性의 정도를 나타내는 것으로 다음과 같은 照射感受性指數에 의한 평가가 제안되고 있다. 즉, 下部降伏強度와 살피吸收에너지遷

〈그림 3〉 여러가지 溫度에서의 SA 533 BCl.1 鋼 (HSST 02 鋼板)의 降伏強度와 引張強度에 미치는 照射量의 影響



移溫度의 照射에 의한 增加가 照射量의 1/2乘에 비례한다고 가정한 다음, 式에 의해서 降伏強度와 遷移溫度 각각의 照射感受性指數 AL_Y , Ac_v 를 표시하는 것이다.

$$\Delta\sigma_{LY} = AL_Y (\phi/10^{18})^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta DBTT = Ac_v (\phi/10^{18})^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 $\Delta\sigma_{LY}$ 는 下部降伏強度의 上昇量으로서 $\Delta DBTT$ 는 32ft-lb에 相當하는 온도의 상승량이다. 또 ϕ 는 1MeV 以上の 高速中性子照射量이다.

HSST 01 및 02鋼板의 母材 및 01鋼板의 submerged arc溶接部 및 6.3/8인치(160mm)두께의 SA302B鋼의 electroslag 溶接部에 대해서 앞의 AL_Y , Ac_v 를 측정된 결과를 ($\Delta\sigma_{LY}$ 와 $\Delta DBTT$ 의 단위는 각각 10^3psi , °F) 表1에 나타내었다. 이 시험에서 照射는 150~650°F (66 ~

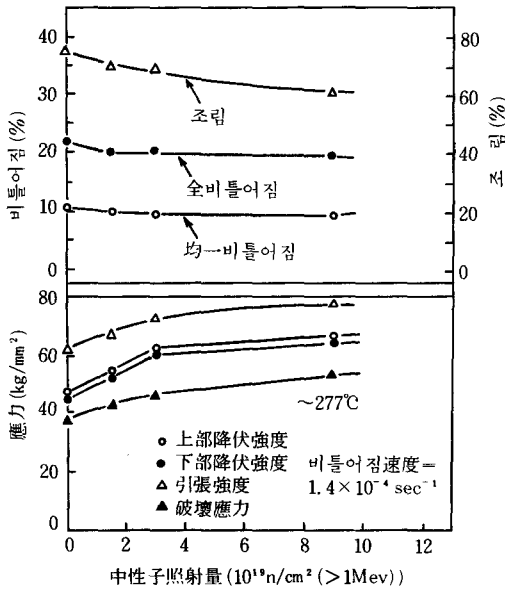
(表 1) SA533B Cl.1 鋼板과 2 種類의 溶接金屬에 대한 照射感受性指數

照射感受性指數	A_{LY} (下部降伏強度指數)				A_{CV} (切欠韌性指數)			
	照射溫度 [°F] (°C)	150° (66°)	450° (232°)	550° (288°)	650° (343°)	150° (66°)	450° (232°)	550° (288°)
HSST 01 鋼板, 表面部	9.1	7.5	4.0	1.6	76	66	32	17
HSST 01, 02 鋼板 1/4, 1/2 두께部	12.3	8.9	5.5	2.6	65	58	31	9
submerged arc 溶接金屬	12.8	13.8	8.0	-	83	94	55	-
electroslag 溶接金屬	10.6	-	5.0	-	52	-	22	-

註) 照射感受性指數 A_{LY} 와 A_{CV} 는 本文中의 (1), (2)式에 의한 것임.

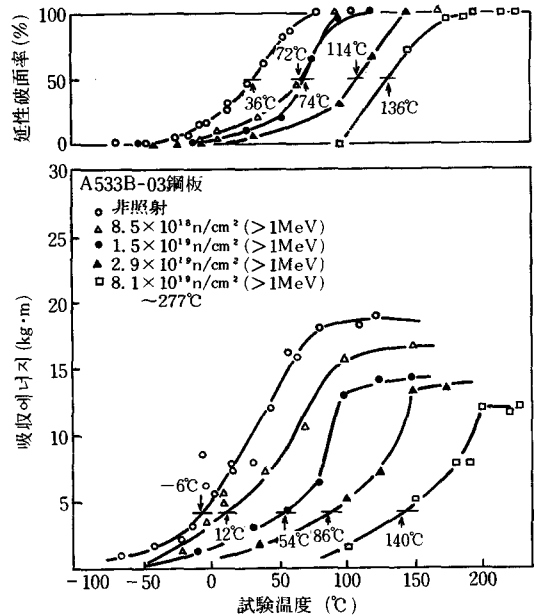
表中의 値는 4개의 그룹으로 분류한 평균치이며, 照射量의 범위는 $3.3 \sim 13.5 \times 10^{18}n/cm^2$ ($E > 1MeV$) 이다. 또 A_{LY} 와 A_{CV} 를 算出한 下部降伏強度上昇量과 切欠韌性遷移溫度上昇量의 單位는 각각 $10^3psi, ^\circ F$ 이다.

(그림 4) SA533B Cl.1 鋼(HSST 03 鋼板)의 引張特性에 미치는 中性子照射의 影響



343°C), $3.3 \sim 13.5 \times 10^{18}n/cm^2$ ($E > 1MeV$)의 범위에서 행해졌는데 低溫側에서는 照射量이 작고, 高溫側에서는 照射量을 크게 하여 照射溫度에 의한 영향이 크지 않게 시험조건에서 행해졌다. 또 供試材의 조건은 採取位置, 採取方向 등에서 9條件인데, 表 1에 나타낸 결과는 母材(表

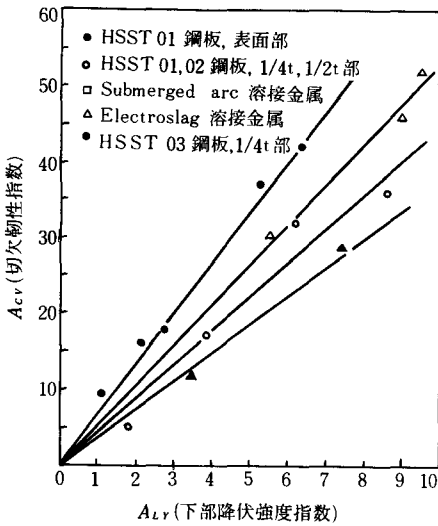
(그림 5) SA533B Cl.1 鋼(HSST 03 鋼板)의 引張特性에 미치는 中性子照射의 影響



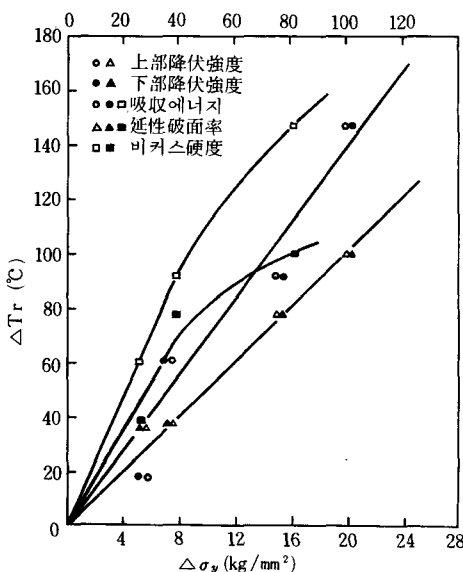
面部와 1/4t, 1/2t 部) 및 溶接部 12종류의 4 조건으로 나누어 A_{LY} , A_{CV} 를 평균화한 것이다. 다음은 美國에서의 HSST 01 및 02鋼板에서 照射試驗結果인데, IAEA의 照射試驗 프로그램에서의 HSST 03 鋼板에 대한 日本에서의 照射

試驗結果를 다음에 나타내었다. 供試材는 HSST 03 鋼板 母材의 1/4t部이며, 照射溫度는 270~277°C 이고, $8.5 \times 10^{18} \sim 8.9 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2 (> 1 \text{ MeV})$ 의 照射量으로 照射를 행한 것에 대한 引張特性과 脆性遷移溫度의 試驗結果를 그림 4 및 그림 5에

(그림 6) 照射感受性指數 A_{LY} 와 A_{CV} 의 相關. A_{LY} 와 A_{CV} 를 算出한 下部降伏強度上昇量과 切欠韌性遷移溫度上昇量의 單位는 각각 $\text{kgf/mm}^2, ^\circ\text{C}$ 이다.



(그림 7) SA 533 B Cl. 1 鋼 (HSST 03 鋼板)에 대한 中性子照射에 의한 各種機械的 性質의 變化量의 相關



표시했다.

이들의 시험결과에 대해 (1), (2)식에서와 같은 A_{LY}, A_{CV} 를 취하면 각각 $A_{LY}=2.24, A_{CV}=16.3$ (단, σ_{LY} 와 DBTT의 단위는 각각 $\text{kgf/mm}^2, ^\circ\text{C}$)이 된다.

表 1의 HSST 01, 02 鋼板의 시험결과에 03 鋼板의 시험결과를 합하여 A_{LY} 와 A_{CV} 의 상관관계를 나타낸 결과를 그림 6에 표시하였다. (단, 表 1의 값은 단위를 $\text{kgf/mm}^2, ^\circ\text{C}$ 로 변환하였다.)

表 1의 경우 같은 재료에서는 照射溫度에 관계없이 A_{CV} 와 A_{LY} 에 比例關係를 볼 수 있다. 따라서 $A_{CV}=\alpha \cdot A_{LY}$ 라고 하면 같은 照射量에 대해서는

$$\Delta \text{DBTT} = \alpha \cdot \Delta \sigma_{LY} \dots\dots\dots (3)$$

이 되며, α 는 表 1의 경우 4~8이다. 03 鋼板의 시험에서는 $\alpha=7$ 로서 02 plate의 1/4t部 ($\alpha \approx 5$)보다도 표면부에 가까운 값으로 되어 시험조건(照射量範圍)의 차가 나타난다고 추정된다. 그러나 그림 6 전체로는 A_{CV} 와 A_{LY} 에 거의 비례관계가 보이므로 照射後의 強度上昇과 韌性低下에는 (3)식과 같은 대응관계가 있다고 생각된다. 그리고 03 鋼板의 試驗에서 降伏強度의 變化量과 遷移溫度의 變化量의 직접적인 상관관계를 硬度 등을 포함해서 참고로 그림 7에 나타냈는데, 양호한 對應이 인정된다.

다음은 西獨에서 行해진 照射試驗結果인데, HSST 03 鋼板(Steel A), Mn-Ni-Mo-V鋼(Modified A533B, Steel B), Ni-Cr-Mo 鋼(Steel C)에 대해서 照射溫度와 照射量을 크게 바꾸었을 때의 上部棚에너지, 降伏溫度 및 遷移溫度의 變化를 그림 8에 표시하였다. 이 그림에서 降伏溫度의 變化와 遷移溫度의 變化 400°C의 照射溫度를 제외하고는 거의 같은 경향이 보여지며 (3)식과 같은 관계가 있음이 推察된다. 또 上部棚에너지의 감소 경향은 다른 기계적성질의 경향에 비해 다르다. 이 시험을 정리하여 D. Pachur는 다음의 결론을 얻고 있다.

(表 2) IAEA CRP Phase II 計劃의 一環으로 行해진 照射試驗에서 供試材의 化學成分과 熱處理條件

材料 / (製造所)	供試材 記 號	供試材化學成分 (wt %)										熱 處 理
		C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Other	
日本製鍛造材 A 508-3 (日本製鋼所)	JF1, JF2	0.18	1.31	0.26	0.007	0.005	0.74	0.11	0.48	0.03	0.026 Al 0.008 Co 0.01 V 0.005 Ta	1
日本製 S/A 溶接金 屬 (a) (三菱重工業)	512, 513	0.084	1.24	0.36	0.009	0.007	0.71	0.07	0.48	0.04	0.010 Al 0.028 Co 0.009 V 0.012 Sn 0.005 As 0.003 Sb 0.010 N	2
프랑스製鍛造材 A508 -3 (Framatome)	27, 28, 29, 30	0.15	1.37	0.25	0.009	0.008	0.69	0.24	0.47	0.07	0.02 Co 0.01 V	3
英國製 S/A 溶接金 屬 (b) (Babcock Power)	UK-1	0.05	1.50	0.49	0.009	0.008	1.56	0.13	0.35	0.21	0.01 Al 0.006 Sn 0.003 Ti 0.01 V 0.012 Co	4

熱處理 1. 870 to 899°C - 6.25h, WQ : 635 to 645°C - 7.50h, AC

2. 615°C to 26h, FC (溶接後熱處理)

3. 805 to 880°C - 3h, WQ : 630 to 650°C - 5.30h, AC : 615°C - 8h, AC

4. 905 to 935°C - 6h, WQ : 590 to 610°C - 42h, AC : 640 to 660°C - 6h, AC

(a) 溶接部表側表面 1/4두께位置에서의 化學成分

(b) 溶接部裏側表面 1/4두께位置에서의 化學成分

※ 日本製 및 프랑스製供試材는 IAEA 共通試驗材이며, 英國製供試材는 比較試驗材이다.

① 照射量이 한정된 범위에서 겉으로 보면 飽和效果가 생긴다.

② 여러가지 기계적성질의 변화 경향은 다르며, 각각 다른 損傷메카니즘이 원인이 되는 것으로 나타나고 있다.

③ 照射脆化에는 照射溫度가 큰 영향을 준다 (低溫에서의 脆化가 크다).

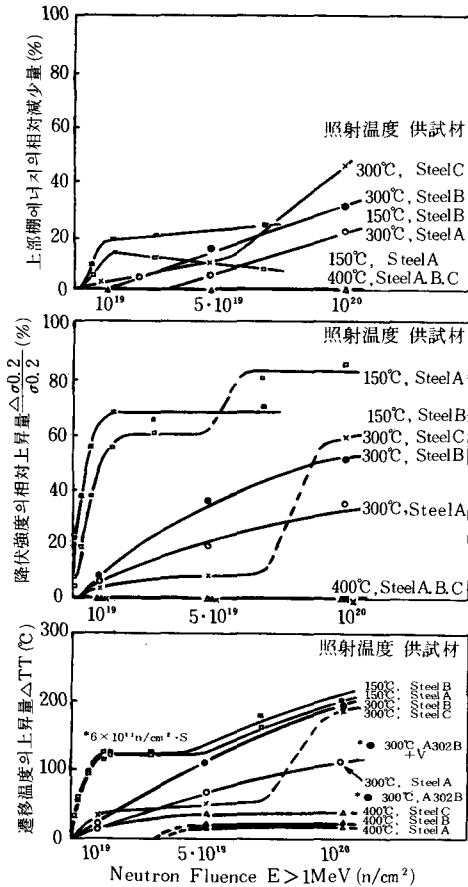
앞의 ②에 대해서는 150~400°C의 照射試驗溫度域에 대한 결론이며, 照射後의 강도상승과 韌性低下라는 관점으로는 적절한 결론이라고 할 수 없다고 생각한다.

150~300°C의 시험결과와 앞서서의 試驗例를 종합적으로 보면 400°C와 같은 回傷現象이 생기는 高溫의 照射溫度域을 제외하면 降伏強度의 상승과 遷移溫度의 上昇量은 거의 對應하고 있다고 생각된다. 同일의 損傷메카니즘이 兩者의 최대의 요인이라고 推定된다.

3. 照射後의 살피衝擊特性

IAEA CRP (Co-ordinated Research Programme) Phase II 計劃에서 照射前後의 살피遷移曲線의 측정결과를 알아본다. 이들의 供試材는

〈그림 8〉 原子爐壓力容器用材料의 機械的性質에 미치는 中性子照射量의 效果

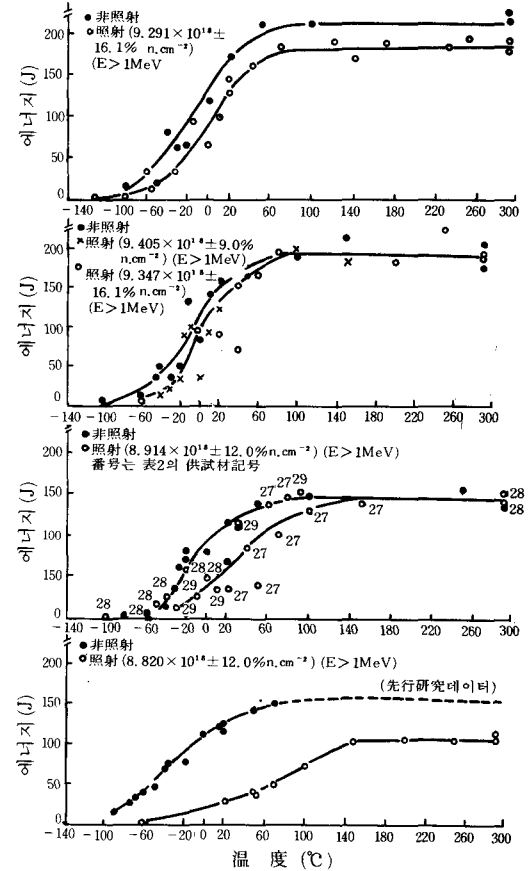


영국, 프랑스, 일본에서 제조된 實用規模의 鍛造材(SA 508 Cl.3 鋼, 前記의 A 533 B Cl. 1 鋼板과 화학적으로는 거의 동등) 및 溶接金屬(submerged arc 溶接)이며, 시험은 영국에서 행해졌다. 각 供試材의 化學成分과 열처리 조건을 表 2 에 나타내었다.

그림 5 및 그림 9 에서 보는 바와 같이 しゃ피吸收에너지의 遷移曲線의 中性子照射에 의한 변화는 일반적인 傾向으로

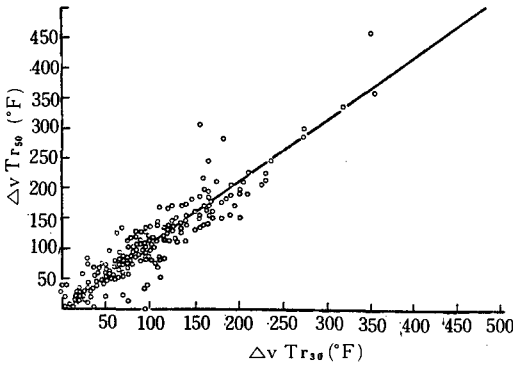
- ① 高温側으로의 shift,
 - ② 遷移領域 勾配의 低下,
 - ③ 上部 에너지의 低下
- 등이 생기나, 각각의 정도는 照射條件과 材

〈그림 9〉 表 2 에서의 IAEA CRP Phase II 計劃의 供試材에 대한 中性子照射前後의 しゃ피吸收에너지遷移曲線. 照射溫度는 290 °C 이다.

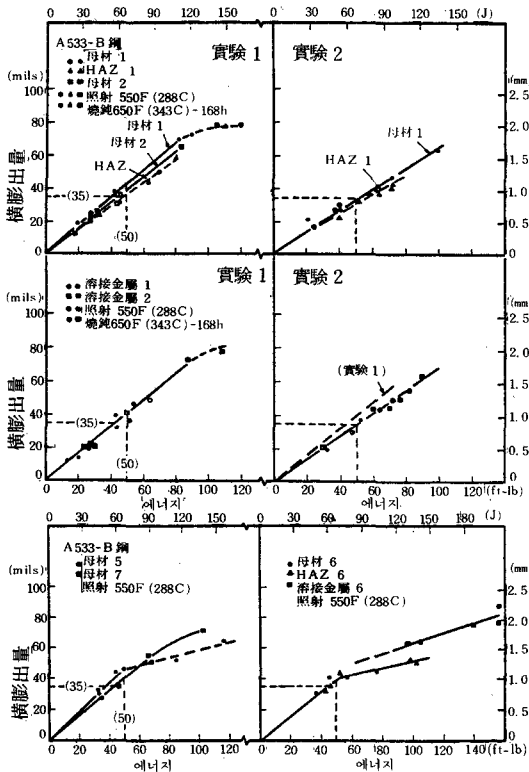


質(成分, 금속조직)에 의해서 다르다. 따라서 遷移曲線의 照射效果에 의한 변화를 定量化시킬 경우에는 비교의 기준으로 하는 에너지레벨을 적절한 값으로 설정할 필요가 있으며, 통상은 30ft-lb(4.1kgf·m) 또는 50ft-lb(6.9kgf·m)의 값이 선정된다. 30ft-lb에 대응하는 온도의 遷移量(ΔUTr_{30})과 50ft-lb에 대응하는 온도의 遷移量(ΔUTr_{50})의 상관관계에 대해서 미국의 MPC(Metal Properties Council)가 1977년까지의 照射데이터를 정리한 결과를 그림 10에 나타내었다. 이 그림에서는 ΔUTr_{30} 과 ΔUTr_{50} 과는 좋은 線型關係가 보여지며 다음의

〈그림 10〉 MPC에서 정리한 照射데이터의 ΔvTr_{50} 과 ΔvTr_{30} 의 相關 [$t^{\circ}C = (t^{\circ}F - 32)/1.8$]



〈그림 11〉 SA 533 B Cl. 1 鋼 및 그 容接部에 대한 中性子照射後의 吸收에너지와 橫膨出量의 相關

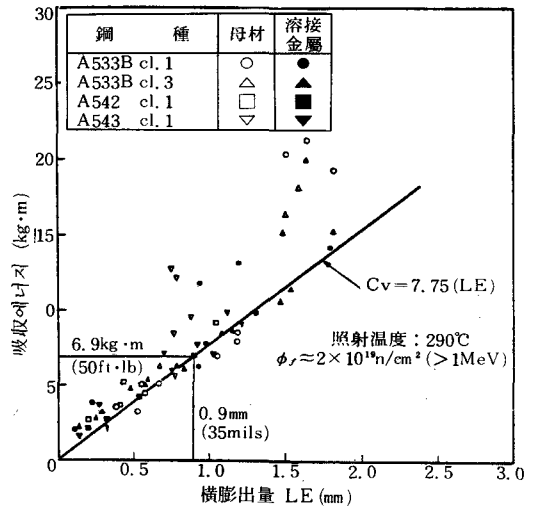


관계식이 얻어지고 있다.

$$\Delta vTr_{50} = 3.9 + 1.05 \cdot \Delta vTr_{30} (^{\circ}F) \dots\dots\dots(4)$$

그러나 MPC에서는 ΔvTr_{30} 쪽이 흠어짐이 적다는 것, ΔvTr_{50} 는 低上部棚 에너지의 경우에 (4)식의 上方에 위치한다는 것 등의 점에서 Δv

〈그림 12〉 各種壓力容器用鋼과 그 溶接金屬의 非照射材 및 照射材에 대한 橫膨出量과 吸收 에너지의 相關



Tr_{30} 을 照射데이터의 統計的解析에서의 遷移 溫度의 지표로 선택하고 있다.

다음에 RT_{NDT} (Reference Temperature)의 결정에는 落重試驗에 의한 $NDTT$ (Nil-Ductility Transition Temperature) 이외에 살피試驗에서의 흡수에너지와 橫膨出量이 사용되는데, 照射材의 흡수에너지와 橫膨出量의 관계를 검토한 결과를 그림 11 및 그림 12에 나타내었다.

非照射材 및 燒鈍材도 포함해서 흡수에너지와 橫膨出量은 거의 線型關係에 있다고 생각된다. R_{NDT} 의 결정에 사용되는 50ft-lb (6.9kgf·m)와 35mils (0.9mm)에 대해서는 많은 경우 50ft-lb에 대응하는 橫膨出量의 値가 35mils以上으로 되어 있으며, 흡수에너지가 R_{NDT} 에 대해서 지배적으로 되어 있음을 나타내고 있다. 그러나 50ft-lb以上에서는 照射材의 일부에서 橫膨出量이 飽化하는 경향이 보이기 때문에 지금까지는 上部棚領域에서는 흡수에너지의 低下만이 문제로 되어 왔으나, 橫膨出量의 低下가 그 이상으로 중요해지는 경우도 있음을 고려할 필요가 있다.

4. 諸基準에서 샤피衝擊特性的 評價方法

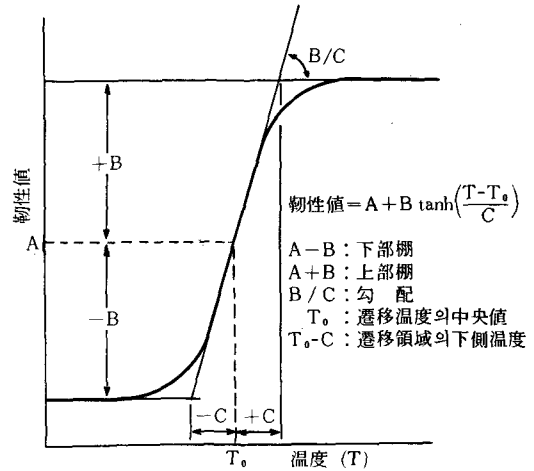
原子爐壓力容器材料 破壞靱性値의 下限値로는 落重試驗과 샤피試驗에서 求해지는 RT_{NDT}를 參照値로 하는 ASME Code Sec.III(設計時)의 K_{IR}曲線 및 同 Sec.XI(供用時)의 K_{IC}曲線과 K_{IA}曲線(K_{IA}曲線은 K_{IR}曲線과 동일)이 사용된다. 따라서 어느 基準曲線에서도 單一參照値인 RT_{NDT}만으로 破壞靱性値와 온도의 關係가 正해지기 때문에 이 R_NNDT 결정법이 중요하며, 특히 照射後의 RT_{NDT}의 결정법이 문제가 된다.

이것은 RT_{NDT}는 製造時에는 落重試驗에서 求해지는 NDTT로 결정되는 일이 많음에 대해, 照射後에는 落重試驗의 실험이 곤란하므로 실제의 監視試驗에서는 행해지지 않았으며 또 照射試驗프로그램 등에서의 데이터도 대단히 적기 때문이다. 이 照射後의 RT_{NDT} 결정법에 대해 현행의 여러 기준에서는 샤피시험의 데이터가 불충분할 경우는 照射量과 화학성분(Cu,P)에서 추정하도록 하고 있다(Regulatory Guide. 1.99, Rev.1). 이 추정된 RT_{NDT}는 Adjusted Reference Temperature라고 불리는데, 샤피시험에 의한 경우에는 照射前의 RT_{NDT}에 照射前後의 샤피시험에서 求해지는 遷移溫度의 s-shift量 ΔRT_{NDT}를 加한 것이다.

ΔRT_{NDT}를 求하는 방법으로는 以前에는 vTr₅₀ 또는 vTr_{35mils}의 shift量의 큰 값을 취하는 방법이 있었으나, 현재는 vTr₃₀의 shift量を 취하는 방법이 일반적이다(JEAC 4201, ASTM E185, 10CFR50 Appendix G.Rivised).

K_{IC}, K_{IR}(K_{IA})의 曲線도 遷移領域以下의 破壞靱性에 대한 것이며, 모두 200ksi/in(706kgf·mm^{-3/2})로 하고 있다. 上部棚領域의 破壞靱性에 대해서는 현재 檢討段階이며, 샤피시험에서의 上部棚에너지의 低下量의 평가방법에 대해서도 확립된 방법은 없다. 다만, 샤피에너지上 上部棚에너지의 값에 대해서는 10CER50에서 製造時 75ft-lb(10.4kgf·m)以上, 供用時 50ft-

〈그림13〉 tanh曲線の 形과 各係數의 意味



1b(6.9kgf·m)以上을 要求하고 있다.

이상과 같이 현행기준에서는 照射後 破壞靱性의 평가는 샤피시험결과에 의한 방법이 주가 되며, 이를 위해 吸收에너지遷移曲線을 결정하는 방법이 중요하다. 이 遷移曲線을 求하는 방법으로 基準化된 것은 없으나, 제안되고 있는 대표적인 방법으로는 다음의 tanh曲線에 의한 방법이 있다.

$$vE = A + B \cdot \tanh\left(\frac{T - T_0}{c}\right) \dots\dots\dots(5)$$

여기서 vE는 샤피흡수에너지, T는 試驗溫度이며, A, B, C 및 T₀는 定數이다. (5)式은 일반적으로 그림13과 같이 표시되며 샤피흡수에너지 뿐만아니라 計裝샤피試驗 등의 破壞靱性試驗에도 적용되고 있다. (5)式의 利點은 4개의 파라미터(A, B, C, T₀)에 의해서 遷移曲線의 形이 간편하게 표시되며 비교의 표준화 등에 이용될 수 있다는 점이다.

上記의 tanh曲線近似 외에 Gauss積分에 의한 近似法 등도 제안되고 있으나, 모두 非線型最小自乘法을 사용하게 된다. 이 計算處理上의 難點은 최근에는 컴퓨터이용기술의 발달로 상당히 해결되고 있으며 앞으로 컴퓨터處理에 의한 遷移溫度shift量의 데이터가 축적되고 있다.