

국산 핵연료에 사용되는 Zircaloy-4 피복관의 조사성장 거동 해석

김기항 · 이찬복 · 김규태

한국원자력연구소

Analysis of Irradiation Growth Behavior for the Zircaloy-4 Cladding used in the KOFA Fuel

Ki Hang Kim, Chan Bock Lee, Kyu Tae Kim

Korea Atomic Energy Research Institute

초 록 국산 핵연료에 사용되는 KOFA Zircaloy-4 피복관의 조사성장 거동을 평가하고 제조 공정이 서로 다른 Siemens사 피복관의 조사성장거동과 비교하기 위하여 고리 2호기에 장전된 핵연료 피복관의 조사성장이 측정되었다. KOFA Zircaloy-4 피복관은 최종 열처리시의 부분 재결정화로 인하여 fully annealed Zircaloy 피복관에서 나타나는 전형적인 포화단계와 가속화단계의 2단계 조사성장 거동을 나타내었다. KOFA 피복관과 Siemens사 피복관의 측정된 조사성장율의 차이는 제조공정의 차이에 기인한 피복관 집합도 계수의 차이로서 설명할 수 있었다. 고리 2호기 국산핵연료에서 측정된 자료를 이용하여 KOFA Zircaloy-4 피복관의 2단계 조사성장 모델이 유도되었는데 향후 측정자료가 많이 축적되면 유도된 모델의 정확성이 보다 명확하게 검증될 수 있을 것이다.

Abstract The irradiation growth of the Zircaloy-4 cladding in the KOFA fuel loaded in the Kori-2 nuclear plant was measured to evaluate the irradiation growth behavior and to be compared with that of the Siemens cladding having different manufacturing process. Due to the partial recrystallization by final heat treatment, the KOFA Zircaloy-4 cladding showed a two step irradiation growth behavior such as the growth saturation and the acceleration which is typical of the fully annealed Zircaloy cladding. The difference in the measured irradiation growth rate between the KOFA and the Siemens cladding could be explained by the difference in the cladding texture which depends on the manufacturing process. From the measured irradiation growth data of Kori-2 KOFA fuel, a two-step irradiation growth model of the KOFA Zircaloy-4 cladding was derived, the accuracy of which can be more clearly verified as the measured data of the irradiation growth are accumulated in the future.

1. 서 론

Zircaloy-4는 작은 중성자 흡수 단면적, 고온에서의 우수한 기계적 특성, 냉각수에 대한 우수한 내부식성 그리고 좋은 열전도성 등을 가지고 있어서 상업용 가압 경수로의 핵연료 피복관 재료로서 널리 사용되고 있다. Zircaloy-4 피복관은 우라늄의 핵분열로 생성된 속 중성자(fast neutron) 조사에 의하여 일정 체적하에서 치수의 변화가 일어나는데 그 이유는 조사결함인 공공(vacancy) 및 격자간 원자(interstitial atom)가 각각 조밀육방정

(hcp)의 특정 면방향으로 편중 분배(biased partitioning)되어 <a> 축으로는 팽창하고 <c> 축으로는 수축이 일어나기 때문이다^{1~3)}. 따라서 일반적으로 제조되는 Zircaloy-4 피복관과 같이 <c> 축이 피복관의 반경방향으로 향한 결정립(grain)의 수가 많을수록 피복관의 축방향으로 성장이 많이 일어난다.

피복관은 제조되는 동안 여러단계의 심한 냉간 가공을 받게 되는데 Zircaloy-4의 제한된 슬립계 때문에 냉간가공으로 인한 결정 집합 조직(crystallographic texture)의 이방성(anisotropy)^{4~5)}을 갖게되며 이러한 집합도는

제조의 냉간 가공량 및 냉간 가공 방법에 좌우되므로 피복관의 제조 공정은 피복관의 조사 성장에 의한 길이 신장에 중요한 인자로 작용한다. 한편 조사 성장율은 조사에 의해 생성되는 결합의 밀도증가율과 원자 및 공공의 확산 속도에 비례하므로 원자로내에서 피복관이 받게 되는 속 중성자속 밀도(fast neutron flux density)와 피복관 온도는 조사 성장율에 직접적인 영향을 준다^{1,6)}. 피복관이 받게되는 속 중성자 조사량 및 피복관 온도는 원자로내에서의 연소 조건 및 냉각수 온도에 따라 달라지므로 조사 성장율은 이러한 피복관이 장전되는 발전소의 원자로에 따라 서로 다른 경향을 보일 것이다.

한편 국내 8개 가압 경수로에 장전된 KOFA 핵연료의 피복관은 SIEMENS사의 기술 사양서에 의하여 WESTINGHOUSE사에서 제조된 Zircaloy-4 피복관을 사용하고 있다. 이들 두 제조회사는 각기 서로 다른 피복관 제조 공정을 사용하고 있기 때문에 이로 인하여 피복관의 조사 성장거동이 서로 다를 수 있다. 뿐만아니라 국내 원자로에서 이러한 피복관의 조사성장 측정자료가 현재 충분히 측정

되어 있지 않아서 국내 원자로에 사용되고 있는 피복관의 조사성장 거동 평가는 외국의 분석 자료에 의존할 수 밖에 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고리 2호기 원자력 발전소에서 연소된 KOFA 핵연료의 Zircaloy-4 피복관에 대한 조사성장 측정치를 분석하여 피복관 제조 방법의 차이가 피복관의 조사 성장에 미치는 영향을 평가하고 지금까지 알려진 Zircaloy 피복관의 조사성장 이론을 토대로 고리 2호기 원자력 발전소의 연소 조건에서 나타난 Zircaloy-4 KOFA 피복관의 조사성장 거동을 분석하는 한편 정확한 성능거동을 예측할 수 있도록 모델링(modelling) 하였다.

2. 측정 방법

2-1. 측정 대상 피복관의 특성

고리 2호기 KOFA 핵연료 피복관의 조사성장 측정은 SIEMENS사의 기술사양서에 따라 WESTINGHOUSE사에서 제조된 KOFA 피복관과 SIEMENS사가 공급한 피복관에 대하여 수행 되었는데 이들 피복관의 제조특성은 Table 1에 나타내었다. 피복관의 특성 시험(characterization test)^{7,8)}을 통해 나타난

Table 1. Metallurgical Properties of the KOFA and the Siemens Cladding Tube Materials

	Zircaloy-4	SIEMENS Zircaloy-4
Chemical Composition (w/o)	Sn : 1.20-1.70, Fe : 0.18-0.24, Cr : 0.07-0.18, O : 0.10-0.16, Fe+Cr : 0.28-0.37, 소량의 Al, Pb, C, Nb	
Texture Coefficient (Kearns number)	Fr : 0.521 Ft : 0.413 Fz : 0.060	Fr : 0.49 Ft : 0.41 Fz : 0.10
Recrystallization(%)	10-43	10-40

KOFA 피복관의 화학조성 및 재결정화율은 SIEMENS공급 피복관과 거의 동일하였다. 피복관의 제조 공정은 Fig. 1과 같이 여러 단계의 제조과정을 거치는데 진공 용융에 의하여 얻어진 Zircaloy Ingot는 열간 단조, Beta Quenching 및 압출 과정을 통하여 44.5mm O.D×7.62mm두께의 TREX로 제조되며 9.5mm O.D×0.64mm두께를 갖는 최종 크기의 피복관으로 될때까지 3 또는 4단계의 냉간 가공(cold pilgering)과정을 거친다. 이때 SIEMENS사의 피복관은 3단계의 냉간 가공(cold pilgering)단계를 거치며 KOFA 피복관

은 4 단계의 가공 단계를 거친다. 각 단계별 단면적 감소율과 외경 변화율에 대한 두께 변화율의 비를 나타내는 Q-factor는 피복관의 집합도를 결정짓는 주요 인자로서 가장 큰 영향을 미치는 최종 냉간가공 단계에서는 두 피복관의 경우 서로 유사하였다. 따라서 집합도 계수(Kearn's number)는 큰 차이를 보이지 않았는데 연료봉 길이방향의 조사성장과 관계되는 축방향 집합도 계수는 KOFA 피복관이 다소 작게 나타났으며 집합도 계수의 측정 오차는 최대 0.03이내에 분포하였다.

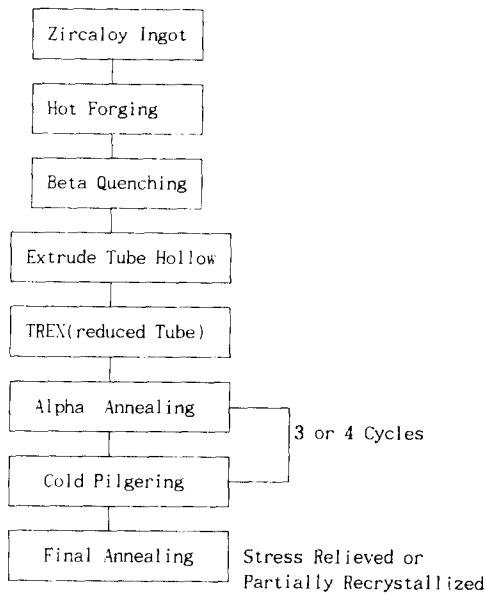


Fig. 1. Typical manufacturing process of Zircaloy cladding tube

2-2 연료봉 길이 측정

고리 2호기 7주기에서 1주기 연소된 3개의 핵연료 집합체 외곽면에 위치한 96개의 핵연료봉은 발전소 수중검사를 통하여 길이가 측정되었는데⁹⁾ 길이 측정은 VFES(Versatile Fuel Examination Stand) 장비에 의한 직접 측정 방식을 사용하였고 측정오차는 0.4mm 이내이다. 한편 7 및 8주기에서 2주기 연소된 핵연료봉은 1개의 핵연료 집합체를 대상으로 원자력연구소 조사후 검사 시설(PIEF)의 핫셀 및 풀(pool)에서 측정되었는데¹⁰⁾ 2개의 SIEMENS사 공급 연료봉을 포함한 12개 연료봉을 대상으로 스텝핑 모터 컨트롤러 (stepping motor controller)로서 측정하였으며 측정오차는 1mm 이내이다. 한편 조사성장에 의한 연료봉의 길이신장량은 제조사의 연료봉

길이, 3847mm(제조공차 1mm내)를 기준으로 세산하였다.

Table 2. Reduction of Area and Q-factor in Cold Pilgering Stage of Cladding Tube

		KOFA Cladding	SIEMENS Cladding
Reduction of Area (%)	1 step	51.1/1.01	80/1.23
	2 step	51.7/1.26	78.3/1.9
	3 step	7.87/2.02	76.8/1.75
Q-factor	4 step	80.3/1.75	-

3. 결과 및 고찰

3-1 연료봉 길이 신장

Table 3에는 측정된 연료봉의 조사 성장에 따른 길이 신장 및 속 중성자 조사량을 핵연료 집합체 별로 나타내었다. 이때 원자로에서 연소되는 동안 우라늄의 핵분열로 인하여 피복관이 받는 속 중성자 조사량(fast neutron fluence)($E > 0.821$ Mev)은 측정 대상 연료봉 각각에 대하여 생상된 최적(best-estimated) 속 중성자속 밀도(fast neutron flux density)로 계산되었는데 실제 피복관이 받는 속 중성자 조사량과의 차이는 5% 이하이다. 1주기 연소한 KOFA 핵연료의 경우 길이신장 및 속 중성자 조사량은 집합체 및 집합체내의 연료봉 위치에 따라 넓은 범위에 분포하여 $1.15 \sim 4.12 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 의 조사량에서 1.6~8.8mm의 길이 신장을 나타내었다. 2주기 연소한 KOFA 피복관은 $7.34 \sim 7.65 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 의 비교적 많은 조사량을 받아 15.7~17.4mm의 길이 신장을 나타낸 반면, SIEMENS 피복관은 KOFA 피복관과 비슷한 조사량을 받았음에도 불구하고 이보다 작은 13.69~14.2mm의 길이 신장을 나타내었다.

Table 3. Measured Length Changes and Fast Neutron Fluence for the Kori-2 Fuel Rod

Fuel Assembly	No. of measured FR	Cladding Tube	Length Changes (mm)	Fast Neutron Fluence (10^{21}n/cm^2)
J-31	16	KOFA	3.6-5.8	2.8-3.6
J-32	60	KOFA	1.6-5.5	1.2-3.6
J-40	16	KOFA	6.2-8.8	3.8-4.1
J-44	10	KOFA	15.7-17.4	7.3-7.7
J-44	2	SIEMENS	13.7-14.2	7.43

3-2 속 중성자 조사량에 따른 조사성장 거동 분석

속 중성자 조사량이 피복관의 조사성장 거동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Table 3에 나타난 연료봉 길이 신장량을 연료봉의 상대적인 길이 변화율로 전환하여 속 중성자 조사량에 따라 Fig. 2에 나타내었다. 조사성장은 대체로 속 중성자 조사량에 비례하여 증가하였는데 낮은 조사량 범위에서는 조사성장 속도가 조사량에 따라 지수함수적으로 감소하다가 약 $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 이상의 조사량에서는 이보다 더 증가된 성장속도를 가지고 조사성장이 일어난 것으로 나타났다. 이와같이 KOFA Zircaloy-4 피복관의 조사성장 속도는 속 중성자 조사량에 따라 성장 속도의 천이를 나타내었는데 이러한 성장 속도의 변화는 대표적인 fully annealed Zircaloy 피복관의 속 중성자 조사량에 따른 조사성장 거동을 통하여 분석하였다.

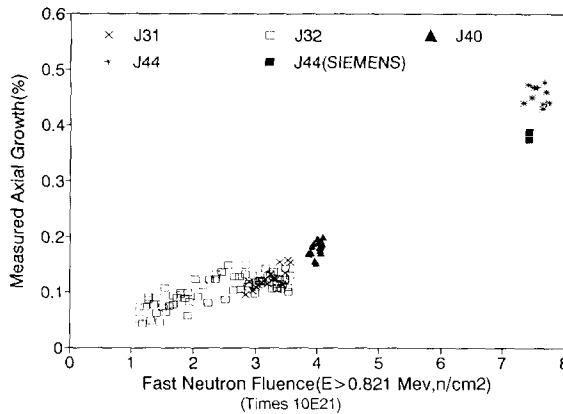


Fig. 2. Measured axial growth as a function of fast neutron fluence (E > 0.821 Mev)

Full annealing에 의하여 100% 재결정화된 피복관은 제조되는 동안 받은 심한 냉간가공의 영향이 거의 사라진 상태이므로 재료내에는 단지 중성자 조사에 의하여 생성된 국부적인 원자고갈영역(depleted zone)을 비롯하여 공극(vacancy), 격자간원자(interstitial atom) 및 전위루프(dislocation loop) 등이 존재한다^{11, 12)}. 지금까지 알려진 바에 의하면 속 중성자 조사 초기에는 과잉 공극이 결정립계(grain boundary) 및 아결정립계(sub-grain boundary)로 이동하고 과잉 격자간원자는 $1/2 \langle 112$

$0 \rangle$ Burger's vector를 갖는 침입형 전위루프(interstitial dislocation loop)로 이동하여 전위의 성장(climb)을 야기시키므로 $\langle 1120 \rangle$ 방향($\langle a \rangle$ 축)으로 팽창하여 전체적으로 성장이 일어나게 된다¹¹⁻¹³⁾. 그러나 조사량이 증가함에 따라 조사성장율은 지수함수적으로 감소하여 어느 일정값으로 포화(saturation)되는 거동을 나타낸다. 그 이유는 아직 이론적으로 명확히 보고된 바가 없으나 냉간가공의 영향으로 기지내에 존재했던 높은 전위밀도가 annealing으로 인하여 대부분 사라진 상태이며 조사량의 증가에 따라 조사결함의 sink로 작용하는 침입형 전위루프와 결정립계 및 아결정립계가 서서히 포화되는 것과 관련이 있는 것으로 사료된다. 조사량이 많아지면 Zircaloy-4내에 존재했던 Fe, Ni, Cr등의 금속간 석출물(intermetallic precipitate)이 기지내로 용질 원자(solute) 및 이차 석출물로 분해되어 $1/2 \langle 1123 \rangle$ Burger's vector를 갖는 $\langle c \rangle$ -component 전위루프의 핵생성 위치(site)로서 존재하게 된다. 이로 인하여 생성된 전위루프는 조사 결함의 새로운 sink로 작용하여 다시 조사성장을 가속화시킨다¹⁴⁻¹⁶⁾. 따라서 Fig. 3과 같이 fully annealed Zircaloy의 조사성장 거동은 조사량 초기에 나타나는 조사성장율의 포화 및 특정 조사량 이후에 $\langle c \rangle$ -component 전위루프의 생성에 의하여 조사성장율이 가속화되는 2단계의 성장 거동을 나타내게 된다. 한편 냉간가공된 상태의 Zircaloy 피복관은 제조되는 동안 받은 심한

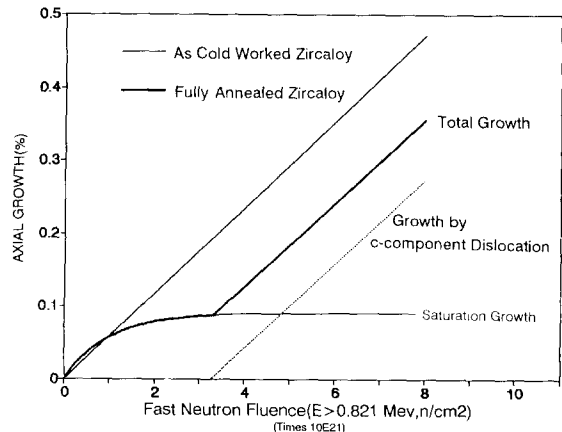


Fig. 3. Typical Irradiation Growth Model of fully Annealed and as-cold worked Zircaloy-4 Cladding material

냉간가공으로 인하여 지지내에 이들 결합의 sink로 작용할 수 있는 전위 및 전위 루프의 밀도가 충분히 크므로 이러한 포화현상이 나타나지 않고 초기부터 일정한 성장율을 가지고 선형적으로 증가하게 된다¹⁾.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 냉간가공된 후 annealing을 통하여 부분 재결정화(partial recrystallization)처리된 KOFA 피복관은 fully annealed Zircaloy 피복관의 조사성장 거동과 유사하였는데 $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 까지는 fully annealed Zircaloy의 포화 단계와 유사하게 조사성장 속도의 감소현상을 나타내었고 그 이후에는 일정한 조사성장 속도를 가지고 선형적으로 증가하는 조사성장 가속화 단계를 나타내었다. 조사성장 포화단계에서 fully annealed Zircaloy 피복관은 조사성장율이 최대 0.1%를 넘지 않는다고 보고되었는데¹⁾ KOFA 피복관의 경우 약 0.12%까지 나타난 것은 KOFA 피복관이 부분 재결정화되었기 때문에 완전 재결정화된 Zircaloy 피복관과 달리 지지내에 냉간가공에 의한 결합이 어느 정도 남아 있기 때문인 것으로 사료된다. 한편 <c>-component 전위의 생성은 원자 및 공공의 확산에 의존하기 때문에 피복관의 온도는 이러한 전위의 생성 및 성장속도에 영향을 미치며 따라서 조사성장 가속화 시점이 달라질 수 있다. 이러한 전위는 일반적으로 300°C 이상에서 핵생성(nucleation)되어 성장한다고 알려져 있는데^{13~15)} 고리 2호기 원자력 발전소의 핵연료 연소조건에서 피복관의 온도는 약 300~350°C이므로 가속화 현상이 일어날 온도조건이 되며 이러한 온도범위에서 가속화 시점은 속 중성자 조사량이 $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 수준인 것으로 나타났다.

3-3 피복관 제조방법의 영향 평가

피복관의 제조 공정중 냉간가공 방법 및 가공량에 따라서 조사성장에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 축방향 집합도 계수 및 전위밀도가 달라질 수 있다. 일반적으로 냉간가공 과정 동안 단면적 감소율이 작고 Q-factor가 클수록 반경방향의 집합도 계수는 크다고 알려져 있는데^{4,5)} Table 2의 결과와 같이 피복관 집합도에 가장 큰 영향을 미치는 최종 냉간가공 단계에서 단면적으로 감소율은 KOFA 피복관이 6% 정도 컸으며 Q-factor는 거의 동일하였

다. 따라서 이와같은 사실로 미루어보아 KOFA 피복관의 반경방향의 집합도 계수가 더 작아야 하나 실제로 더 크게 나타난 것은 전단계에서의 단면적 감소율과 Q-factor가 피복관 집합도에 어느정도 영향을 미쳤다고 판단된다. 따라서 KOFA 피복관의 더 큰 반경방향의 집합도는 전체 냉간가공 단계를 통하여 분석해 볼때 중간가공제품인 TREX로부터 최종 크기의 피복관으로 감소될 때까지 KOFA 피복관은 4단계를 거치므로 3단계로 가공되는 SIEMENS 피복관에 비하여 각 단계에서의 단면적 감소율이 작기 때문인 것으로 판단된다. 이와같이 반경방향 집합도가 KOFA 피복관이 더 큼으로서 축방향 집합도계수는 Table 1과 같이 SIEMENS 피복관에 비하여 더 작게 나타났다. 축방향 집합도계수의 영향을 평가하기 위하여 KOFA 피복관과 SIEMENS 피복관의 조사성장 측정치를 비교해 보면 속 중성자 조사량이 $7.43 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 일때 KOFA 피복관이 약 16% 크게 나타났는데 이것은 축방향 집합도 계수를 통해 알 수 있듯이 조밀육방정의 <a>축이 피복관의 축방향으로 향한 결정립의 수가 KOFA 피복관에서 더 많기 때문이다. 잘 알려진 바와같이 조사성장율은 $(1 - 3f_z)$ (f_z : 축방향 집합도 계수)에 비례하므로^{17~19)} 두 피복관의 축방향 집합도 차이에 의한 조사성장율의 비는

$$\epsilon_{\text{KOFA}}/\epsilon_{\text{SIEMENS}} = (1 - 3f_z^{\text{KOFA}})(1 - 3f_z^{\text{SIEMENS}}) \dots (1)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 이 식으로 계산된 조사성장율의 비는 1.17로서 그림 2의 측정치로 계산된 1.18과 유사한 결과를 나타내어 두 피복관 간의 조사성장율의 차이는 주로 축방향 집합도 차이에 따른 영향으로 판단된다. 그러나 이러한 분석 결과는 SIEMENS 피복관의 측정치가 좀더 축적된 후에 검증될 수 있을 것이다. 한편 냉간가공에 의한 재료내의 전위 밀도는 측정된 자료가 없어 정확하게 분석될 수 없으나 두 피복관간에 최종 냉간가공시의 단면적 감소율이 단지 3.5% 차이이며 부분 재결정화율이 동일한 기술 사양서의 허용 범위에 있도록 최종 annealing처리가 되는 동안 냉간 가공율에 따라 존재하였던 전위밀도 차이는 거의 사라져 조사성장율에 영향을 줄 정도로 큰 차이는 없을 것으로 사료된다.

따라서 피복관 제조 방법이 조사성장에 미치는 영향은 주로 피복관 집합도 계수에 영향을 미침으로서 나타난 것으로 사료된다.

3-4 KOFA 피복관의 조사성장 거동 모델링 (modelling)

원자로내에서 연소되는 동안 KOFA 핵연료 피복관의 조사성장 예측을 위하여 사용되는 조사성장 모델²⁰⁾은

$$\Delta L/L = A(\phi t) \dots\dots\dots(2)$$

여기서, A = 상수

$$\phi t = \text{속 중성자 조사량} (\times 10^{21} \text{n/cm}^2)$$

와 같이 속 중성자 조사량에 따라 선형적으로 증가하도록 예측한다. 하지만 KOFA 피복관의 조사성장 거동은 Fig. 2와 같이 조사량에 따라 일정하지 않으므로 상기 조사성장 모델과는 다른 거동을 보였다. 지금까지 알려진 Zircaloy 피복관의 조사성장 모델은 먼저 낮은 조사량 범위에서 $\Delta L/L = D_s(1 - \exp(-A \cdot \phi \cdot t))$ ($D_s = \text{saturation growth}$)와 같이 조사성장속도가 지수함수적으로 감소하여 포화되었을때의 한계값 D_s 에 접근해가는 모델^{18, 21)}과 조사량이 증가함에 따라 조사성장이 선형적으로 증가하는 거동을 묘사하는 $\Delta L/L = A(\phi \cdot t)$ 와 같은 모델^{20, 22, 23)}로 분류될 수 있다. KOFA 피복관의 조사성장 측정치를 분석해 볼때 정확한 조사성장 거동을 묘사하기 위해서는 상기와 같이 2단계로 조사성장을 모델링하는 것이 보다 적절한 것으로 사료된다. 따라서 모든 속 중성자 조사량 범위에서의 KOFA 피복관 조사성장 측정치를 2단계 조사성장 모델로서 회귀 분석한 결과 다음과 같이 나타낼 수 있다.

속중성자조사량 < $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$:

$$\Delta L/L (\%) = 0.145 [1 - \exp(-0.6 \phi t / 10^{21})] \dots\dots(3)$$

속중성자조사량 > $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$:

$$\Delta L/L (\%) = 7.74 \times 10^{-2} (\phi t / 10^{21}) - 0.128 \dots\dots(4)$$

식 (3)에서 상수 0.145는 기존의 모델에서처럼 완전히 포화되었을 때의 조사성장율의 한계치를 의미하지는 않는다. 왜냐하면 KOFA 피복관은 fully annealed 피복관과는 달리 냉

간가공으로 인한 영향이 존재하므로 완전한 포화상태의 거동을 보이지 않고 Fig. 2처럼 단지 성장속도가 감소하는 현상만 나타내기 때문이다. 따라서 부분 재결정화된 KOFA 피복관의 조사성장율은 Fig. 3의 냉간 가공된 상태의 피복관 조사성장율과 fully annealing 된 피복관의 조사성장율의 사이에 위치할 것이며 피복관의 재결정화율이 증가할수록 냉간 가공된 상태에서 나타나는 선형적 증가율에 가깝게 나타날 것이다. Fig. 4에는 상기 모델의 결과를 기존 모델의 결과와 같이 나타내었다. 새로이 2단계로 설정된 KOFA Zircaloy-4 피복관의 조사성장 모델은 조사성장 측정치의 거동을 잘 묘사한 반면 기존 모델은 전 조사량 범위에서 측정치의 거동을 잘 묘사하지 못하고 조사량에 따라 큰 차이를 보였다.

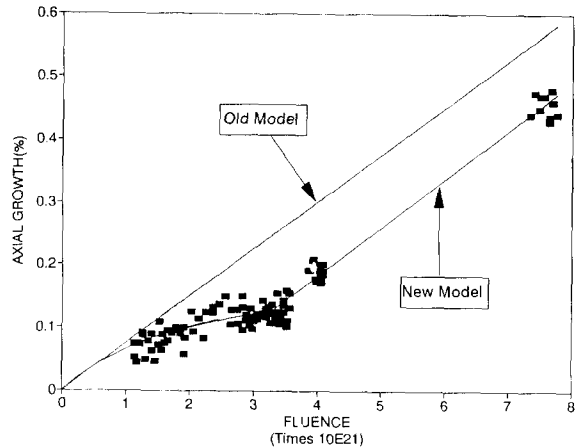


Fig.4. Comparison of measured Axial Growth and calculated Axial Growth by old and new Axial Growth Model

4. 결 론

1. 국산 핵연료에 사용되는 KOFA Zircaloy-4 피복관의 조사성장 거동을 평가하기 위하여 고리 2호기에 장전되어 연소된 핵연료 피복관의 길이 신장률이 측정되었다. 측정 결과 KOFA 피복관은 SIEMENS사의 피복관에 비하여 큰 조사성장율을 보였다.
2. 속 중성자 조사량에 따른 KOFA 피복관의 조사성장 거동은 fully annealed Zircaloy 피복관과 유사하게 속 중성자 조사 초기에 조사량에 따라 성장율이 지수함수적으로

감소하는 단계와 그후 일정한 조사성장율을 가지고 선형적으로 증가하는 가속화 단계를 나타내었으며 가속화 시점은 속 중성자 조사량이 약 $3.2 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 부근이었다.

3. 피복관 제조방법이 조사성장에 미치는 영향은 주로 각 냉간가공 단계에서의 단면적 감소율에 의해 결정되는 집합도의 변화로서 나타났는데 KOFA 피복관 및 Siemens 사 피복관의 측정된 조사성장율의 차이는 축방향 집합도 계수의 차이로서 설명할 수 있었다.
4. 지금까지 사용되어 왔던 기존의 조사성장 모델은 KOFA 피복관의 조사성장 거동을 잘 예측하지 못하여 실제보다 크게 예측하였다. 따라서 고리 2호기 KOFA 핵연료 피복관의 조사성장 측정자료를 통하여 속 중성자 조사량에 따른 조사성장 포화 및 가속화의 2단계로 설정된 모델이 개발되었는데 측정 자료가 좀더 많이 축적되면 이 모델의 정확성이 검증될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. V. Fidleris, Journal of Nuclear Materials, 159, 22 (1988).
2. R.H. Zee, Journal of nuclear Materials, 150, 319 (1987)
3. A. Jostsons, Journal of Nuclear Materials, 66, 236 (1977).
4. Takao Konishi, ASTM STP 939, 653 (1987)
5. Erich Tenckhoff, Deformation Mechanics, Texture., 1st ed., philadelphia, PA19103 (1988)
6. H. Wiedersich, Journal of Nuclear Materials, 90, 157 (1980)
7. KAERI Report, KAERI/RR-1021/91.
8. KAERI Report, KAERI/RR-1025/91.
9. KAERI Report, KAERI/TR-217/91.
10. KAERI Report, unpublished.
11. M. Griffiths, Journal of Nuclear Materials, 150, 159 (1987)
12. R.A. Holt, Journal of Nuclear Materials, 82, 419 (1979)
13. M. Griffith, Journal of Nuclear Materials, 159, 190 (1988)
14. M. Griffith Journal of Nuclear Materials, 150, 169 (1987)
15. O.T. Woo, Journal of Nuclear Materials, 87, 70 (1970)
16. V. Perovic, Journal of Nuclear Materials, 171, 327 (1988)
17. V. Filderis, AECL-7053 (1980)
18. H. James Williard et al, ASTM STP 824, 452 (1984)
19. Friedrich Garzarolli et al, ASTM STP 1023, 641 (1989)
20. R. Eberle and I. Distler, KWU Technical Report B111/e117/82 (1982)
21. V. Fidleris, Summary of Experimental Results on In Reactor., Chalk River, Canada, p.51 (1980)
22. D.G. Franklin, ASTM STP 754, 235 (1982)