

## 크립 및 조사성장 이방성이 KOFA Zircaloy-4 피복관의 변형거동에 미치는 영향

김기항 · 이찬복 · 김규태

한국원자력연구소

### Impact of Anisotropy in Creep and Irradiation Growth on the KOFA Zircaloy-4 Cladding tube Deformation Behavior

Ki Hang Kim, Chan Bock Lee and Kyu Tae Kim

KAERI

**초 록** 가압 경수로 핵연료의 중성자 조사 조건에서 Zircaloy 피복관의 3축방향으로의 변형거동은 집합도 계수에 따른 크립 이방성과 조사성장 이방성을 통하여 분석될 수 있다. 이러한 크립과 조사성장의 이방성이 Zircaloy 피복관의 각 축방향 변형율에 미치는 영향을 평가할 수 있는 방법론이 제시되었다. 연소 후 측정된 KOFA Zircaloy-4 피복관의 변형율과 핵연료 성능 분석 코드의 예측치를 토대로 하여 각 축방향 변형율을 계산한 결과 KOFA Zircaloy-4 피복관의 원주방향 변형은 크립에 의해 주로 일어난 반면, 피복관의 길이방향 변형은 조사성장에 의하여 주로 일어났으나 낮은 조사량에서는 크립의 영향도 상당히 큰 것으로 나타났다.

**Abstract** Three-axial deformation behavior of the Zircaloy cladding tube under the irradiation condition of the fuel in pressurized water reactor can be analyzed by the anisotropy in the creep and the irradiation growth, which depends on the texture parameter. A methodology to evaluate the impact of the anisotropic creep and irradiation growth on the strain in each axial direction of the cladding tube has been proposed. Based on the measured strains after irradiation and predicted ones with the help of a fuel performance analysis code, it is found that a tangential strain of the cladding tube is caused mainly by the creep, whereas a axial strain of the cladding is caused mainly by the irradiation growth but with a considerable contribution of the creep at low irradiation.

## 1. 서 론

가압 경수로(pressurized water reactor)의 핵연료에 사용되는 Zircaloy-4 피복관은 원자로심 내에서 연소되는 동안 속 중성자 조사(fast neutron irradiation)뿐 아니라 300°C-350°C의 고온과 150기압 이상의 높은 냉각수 압력을 받기 때문에 조사성장(irradiation growth) 및 크립(creep)에 의한 변형이 일어난다. 이러한 피복관 변형은 연소되는 동안 핵연료 성능에 직접적인 영향을 주기 때문에 핵연료 설계시 크립과 조사성장에 의한 피복관 변형거동에 대하여 정확한 해석이 수행되어야 한다. 일반적으로 Zircaloy-4는 제한된 slip계를 갖는 hcp(hexagonal close packed) 결정구조를 가

지므로 피복관으로 제조 되는 동안 심한 냉간 가공을 받아 결정학적 집합조직(crystallographic texture)은 이방성(anisotropy)<sup>1)</sup>을 나타낸다. 따라서 피복관의 크립과 조사성장은 이러한 집합조직의 이방성으로 인하여 각 축방향에 따라 변형율의 차이를 나타내게 되므로<sup>1)</sup> 피복관의 각 축방향에 따른 변형거동을 분석하기 위해서는 집합도에 따른 변형 이방성 해석이 선행되어야 한다. 피복관에 작용하는 응력에 상관없이 속 중성자 조사에 의하여 일어나는 조사성장은 Zircaloy 결정조직의 조사손상에 의하여 hcp단결정의 일정방향으로 팽창과 수축이 일어나는 변형<sup>2)</sup>인 반면 피복관 크립은 작용하는 응력 조건하에서 Zircaloy의 slip기구에 의하여 일어나는 소성변형(plastic

deformation)<sup>2)</sup>이므로 이들 두 변형기구에 의한 변형 이방성은 서로 다른 거동을 나타낼 것이다. 따라서 피복관의 변형 이방성 해석을 위해서는 피복관의 결정학적 특성 및 피복관에 작용하는 응력조건과 아울러 이들 두 변형기구에 의해 서로 다르게 일어나는 변형 이방성을 모두 고려해야 한다.

Holt는 내압을 받는 Zircaloy 피복관에 대하여 각각 크립과 조사성장에 의한 변형율을 측정하였는데 피복관 원주방향에 작용하는 응력의 크기에 따라 연료봉 길이방향 변형은 조사성장 외에 전체 길이 신장의 30-60%가 크립에 의해 일어난 것으로 보고 하였으며<sup>3)</sup> 또한 Garzarolli도 가압 경수로의 핵연료 연소조건에서 피복관의 전체 길이신장을중 68%-73%는 조사성장에 의해, 27%-32%는 크립에 의해 일어난것을 관찰하였다<sup>4)</sup>. 이와같은 사실로부터 피복관의 정확한 변형거동을 해석하기 위해서는 크립과 조사성장에 의한 두 변형기구가 핵연료 연소조건에 따라 피복관 변형거동에 미치는 영향을 각각 평가하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 그동안 잘 알려져있는 Zircaloy 피복관의 변형 이론을 근거로 하여 국내 가압 경수로에 공급된 국산 핵연료의 KOFA Zircaloy-4 피복관에 대하여 조사성장 및 크립으로 인한 피복관 변형 이방성을 해석하였다. 또한 노내 연소후 측정된 KOFA 피복관의 변형율로부터 각각 크립과 조사성장에 의한 변형율 성분이 차지하고있는 양을 이론적으로 분석하여 각 변형기구가 피복관 변형율에 미치는 영향을 평가하였으며 핵연료 성능 분석 코드인 CARO-D<sup>5)</sup>를 이용하여 원자로에서 피복관이 받게되는 속 중성자 조사량(fast neutron fluence)에 따라 크립과 조사성장이 피복관의 원주방향과 길이방향 변형 거동에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 피복관 변형 이방성(anisotropy) 해석

### 2.1 피복관 크립 이방성

크립은 항복응력 이하에서 일어나는 일종의 소성 변형으로서 작용하는 전단응력에 비례하여 일어난다. 그림 1과 같은 3차원의 주응력 상태에서 1축방향으로 일어나는 크립 변형은

( $\sigma_1 - \sigma_2$ ), ( $\sigma_3 - \sigma_1$ )로 이루어진 두개의 주 전단응력면을 따르는 matrix의 shear에 의해서 일어난다<sup>6)</sup>. 이때 Zircaloy와 같이 이방성(anisotropy)을 나타내는 재료에서는 상기와 같은 두개의 주 전단응력이 동일한 비율로 1축 방향

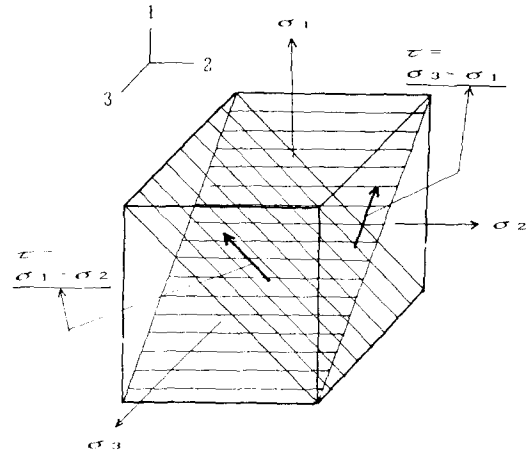


Fig. 1. Planes of principal shear stress affected on the deformation of 1-direction in 3-dimensional stress

의 변형율에 작용하지않게 되는데 그 이유는 Zircaloy의 slip계 때문이다. 즉, 상온에서 약 500°C까지의 Zircaloy의 주된 slip기구는  $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 의 prism slip이라고 알려져 있다<sup>7)</sup>. hcp 단 결정의  $\langle a \rangle$ 축 및  $\langle c \rangle$ 축이 각각 그림 1의 3축 및 2축방향으로 배열되어 있는 경우 1축방향의 변형율에 작용하는 두개의 전단응력중 prism slip에 작용하는 전단응력은 ( $\sigma_3 - \sigma_1$ )이다. 그러나 전단응력( $\sigma_1 - \sigma_2$ )에 의해서는 prism slip이 일어나기는 어려우며 slip이 일어나려면  $\{10\bar{1}1\}$  또는  $\{11\bar{2}1\}\langle 2\bar{1}13\rangle$  pyramidal slip에 의해서 가능하다. 이러한  $\langle c+a \rangle$ 방향 slip기구는 특정 구속 조건이나 고온에서 주로 일어나는 slip기구 이므로 Zircaloy의 slip계중 가장 일어나기 어려운 slip이다. 따라서 전단응력( $\sigma_1 - \sigma_2$ )가 그림 1의 1축 방향의 변형에 미치는 영향은 전단응력( $\sigma_3 - \sigma_1$ )에 비해 작을 것이다. 이와같이 하나의 축방향 변형율에 대하여 서로 다르게 작용하는 두개의 주 전단응력의 영향은 Backofen<sup>8)</sup>이 제안한 이방성 인자 R, P를 이용하여 표현될 수 있는데 피복관 각 축방향 크립 변형율은 잘 알려진 Hill의

모델<sup>9)</sup>을 근거로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_r^c = \epsilon_R^c / \sigma_R (R(\sigma_r - \sigma_t) - P(\sigma_z - \sigma_t)) / P(R + 1) \quad (1)$$

$$\epsilon_t^c = \epsilon_R^c / \sigma_R (RP(\sigma_t - \sigma_z) - R(\sigma_r - \sigma_t)) / P(R + 1) \quad (2)$$

$$\epsilon_z^c = \epsilon_R^c / \sigma_R (P(\sigma_r - \sigma_t) - RP(\sigma_t - \sigma_z)) / P(R + 1) \quad (3)$$

여기서,  $\epsilon_r^c$ ,  $\epsilon_t^c$ ,  $\epsilon_z^c$  = 피복관의 반경방향, 원주 방향, 길이방향의 크립 변형율

$\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_z$  = 피복관의 반경방향, 원주방향, 길이 방향에 작용하는 응력

$\epsilon_R^c$  = generalized creep strain (=  $f(\sigma_R)$ )

$\sigma_R$  = generalized stress

$$(\sigma_R)^2 = \frac{R(\sigma_r - \sigma_t)^2 + RP(\sigma_t - \sigma_z)^2 - P(\sigma_z - \sigma_t)^2}{P(R + 1)}$$

위의 식에서 이방성 인자 R, P는 일축 인장 시험(uniaxial tension test)에서 다음과 같이 strain ratio의 측정값을 통하여 얻어진다.

$$R = d\epsilon_r / d\epsilon_t (\sigma_r = \sigma_t = 0, \sigma_z) \quad (4)$$

$$P = d\epsilon_z / d\epsilon_t (\sigma_z = \sigma_t = 0, \sigma_r) \quad (5)$$

Zircaloy는 속 중성자 조사에 의해서 주요 slip계 및 집합도가 거의 변하지 않으므로 상기 식과 같은 3차원 크립 변형 모델은 핵연료의 노내 연소조건에서 Zircaloy 피복관의 크립 변형율 해석에도 적용이 가능하다고 알려져 있다<sup>10)</sup>.

한편, 피복관은 얇은 두께를 가진 원통형 관이므로 각 축방향에 작용하는 응력상태는 잘알려진 바와 같이 다음과 같은 2축 응력상태로 가정할 수 있다.

$$\sigma_r = 2\sigma_t, \sigma_z = 0$$

따라서 식(1), (2) 및 (3)은 다음과 같이 단순히  $\sigma_t$ 와 R, P의 함수로 표현할 수 있다.

$$\epsilon_r^c = -\frac{\epsilon_R^c}{\sigma_R} \frac{2R + P}{2P(R + 1)} \sigma_t \quad (6)$$

$$\epsilon_t^c = \frac{\epsilon_R^c}{\sigma_R} \frac{R(P + 2)}{2P(R + 1)} \sigma_t \quad (7)$$

$$\epsilon_z^c = \frac{\epsilon_R^c}{\sigma_R} \frac{1 - R}{2(R + 1)} \sigma_t \quad (8)$$

여기서 R은 식(4)에서와 같이 피복관의 길이방향으로 일축인장을 하였을때 나타나는 피복관 두께 변형율에 대한 외경 변형율의 비를 나타내는 CSR(Contractile Strain Ratio)로서 Zircaloy의 집합도를 나타내기 위한 하나의

방법으로 사용되고 있으며 Kearns number에 의한 집합도 계수와는 다음과 같은 일정한 관계를 갖는다<sup>11,12)</sup>.

$$CSR = R = d\epsilon_r / d\epsilon_t = f_r / f_t \quad (9)$$

여기서,

$f_r$ ,  $f_t$  = 피복관 반경방향, 원주방향의 집합도 계수(반경, 원주방향으로 Basal Pole이 향한 결정립의 분율)

이와같이 하나의 축방향으로 일어나는 변형율은 그 축방향에서의 집합도 계수에 반비례 하는데 이것은 전술한 바와 같이 Zircaloy의 slip 방향이 주로 hcp단결정의 basal pole과 직각방향인 <a>축방향이므로 변형이 일어나고자 하는 방향과 평행하게 hcp단결정의 basal pole이 배열된 결정립이 많을수록 그 방향으로의 변형이 일어나기 어렵다는 것을 의미한다. 이와 같이 일축인장에서 변형율 비와 집합도와의 관계를 통하여 볼때 이방성인자 P는 식(5)에서 두께방향 변형율에 대한 길이방향 변형율의 비를 의미하므로 다음과 같은 집합도와의 관계로 나타낼 수 있다.

$$P = d\epsilon_z / d\epsilon_t = f_r / f_t \quad (10)$$

여기서,

$f_r$ ,  $f_t$  = 피복관 반경방향, 길이방향의 집합도 계수(반경, 길이방향으로 basal pole이 향한 결정립의 분율)

Zircaloy hcp 단결정의 슬립은 상온에서 약 500°C까지의 온도 범위에서 주로 prism 슬립에 의하여 일어나고 있는 것으로 알려져 있으며<sup>7)</sup> 원자로 내에서 피복관이 받는 온도는 300°C-350°C이므로 상기와 같이 일축인장시험에서 나타난 집합도와 크립 변형 이방성과의 관계는 원자로의 온도범위에 있는 피복관에도 적용이 가능하다고 사료된다.

Zircaloy 피복관에서 나타나는 크립 변형율의 이방성을 식(6), (7) 및 (8)을 따라서 각 축방향 간의 변형율 비로서 나타내면 크립 이방성은 식(9) 및 (10)에서와 같이 이방성인자 R, P와 집합도 계수와의 관계를 통하여 다음과 같이 피복관 집합도 계수의 함수로 표현될 수 있다.

$$\epsilon_1^c/\epsilon_2^c = (f_1 + 2f_2)/(f_1 - f_2) \quad (11)$$

$$\epsilon_1^c/\epsilon_3^c = -(f_1 + 2f_2)/(f_1 - f_2) \quad (12)$$

$$\epsilon_1^c/\epsilon_1^c = -(f_1 + 2f_2)/(2f_2 + f_1) \quad (13)$$

$$\epsilon_1^G/\epsilon_2^G = (1-3f_1)/(1-3f_2) \quad (14)$$

$$\epsilon_1^G/\epsilon_3^G = (1-3f_1)/(1-3f_1) \quad (15)$$

$$\epsilon_1^G/\epsilon_1^G = (1-3f_1)/(1-3f_1) \quad (16)$$

여기서,

$\epsilon_1^G, \epsilon_2^G, \epsilon_3^G$  = 피복관 반경방향, 원주방향, 길이방향의 조사성장을

### 2.2 Zircaloy 피복관의 조사성장 이방성

Zircaloy-4 피복관은 집합조직의 이방성 때문에 크립 변형을 뿐만 아니라 조사성장에 의한 변형율도 각 축방향에 따라 이방성을 나타낸다. 잘 알려진 바와 같이 조사성장은 피복관이 원자로내에서 우라늄 핵분열에 의하여 발생된 속 중성자 조사를 받아 hcp 단결정의 <a>축방향으로 팽창하고 <c>축방향으로는 수축하는 일정체적하의 변형거동이다<sup>11,13)</sup>. 따라서 특정 방향으로 <a>축이 배열되어 있는 결정립의 수가 많을수록 그 방향으로 신장이 일어나며 <c>축이 배열되어 있는 결정립의 수가 많을수록 그 방향으로 반대로 수축이 일어난다. 이러한 조사성장율은 집합도와  $(1-3f_d)$  ( $f_d$ : d방향의 집합도 계수)의 관계를 갖는다<sup>13)</sup>. 따라서 피복관의 결정립(grain)이 등축정(equiaxed grain)이라고 가정하였을 때 조사성장 이방성을 각 축방향간의 조사성장 비로서 나타내면

이와 같은 식은 실험 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 보고되고 있으며<sup>14,15)</sup> 고리 2호기 핵연료 조사후 검사에서 서로 다른 집합도를 갖는 KOFA 피복관과 Siemens 피복관의 피복관 길이 신장을 분석을 통하여 확인되었다<sup>16)</sup>.

### 3. 크립 및 조사성장 이방성에 의한 KOFA 피복관의 변형거동 분석

#### 3.1 KOFA 피복관의 변형 이방성

식 (11), (12) 및 (13)과 같이 집합도 계수의 함수로 표현된 크립 이방성 해석의 타당성을 검증하기 위하여 여러 집합도를 갖는 피복관에 대하여 Holt가 계산한 결과<sup>3)</sup>와 비교한 결과 table 1과 같이 잘 일치하는 것으로 나타났다. Holt는 각 축방향에서 일어나는 크립

Table 1. Comparison of Strain Ratios by Texture Parameter and by Holt's Result under Biaxial Stress Condition.

Cladding	Texture			Strain ratios (in this study)			Strain ratios (by Holt's result) <sup>3)</sup>		
	$f_r$	$f_1$	$f_2$	$\epsilon_1/\epsilon_2$	$\epsilon_1/\epsilon_3$	$\epsilon_1/\epsilon_1$	$\epsilon_1/\epsilon_2$	$\epsilon_1/\epsilon_3$	$\epsilon_1/\epsilon_1$
A	0.39	0.54	0.08	-0.79	3.67	-4.67	-0.78	3.60	-4.60
B	0.59	0.34	0.08	-1.50	-3.00	2.00	-1.48	-2.96	2.00
C	0.47	0.46	0.08	-1.02	-63.00	62.00	-1.02	-63.00	62.00

을 계산할때 80% prism slip과 20% basal slip에 의하여 일어난다고 가정하여<sup>17)</sup> 계산하였는데 계산된 각 축방향간의 변형율 이방성은 실험 결과와 잘 일치되는것으로 알려져있다. 그러나 Holt의 모델을 적용하기 위해서는 대상 피복관의 측정된 극점도(pole figure)의 해석을 필요로 하므로 일반적으로 Zircaloy 피복관의 크립 이방성 해석을 위하여 적용하기는 어려운 실정이다. 이와 같은 결과로 볼때 집합도 계수(Kearns number)에 의한 피복관의 크립 이방성 해석 방법은 Kearns's number를

알고있는 모든 Zircaloy 피복관에 쉽게 적용이 가능하다고 사료된다.

Table 2와 같은 집합도를 갖는 KOFA 피복관에 대하여 각 축방향간의 크립 변형을 비를 계산한 결과 table 3과 같이 나타났다. 집합도 계수는 X-ray 회절 시험후 다음과 같은 식에 근거한 fortran program에 의하여 계산되었다<sup>18)</sup>.

$$f_d = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\phi) \cos^2 \phi \sin \phi \, d\phi}{\int_0^{\pi/2} I(\phi) \sin \phi \, d\phi}$$

여기서,  $\phi$  : the angle between the basal pole

and the reference direction, d

$I(\phi)$  : the diffracted x-ray intensity from the basal pole normalized by the diffracted intensity from a randomly oriented sample

Table 2. Texture Parameters of KOFA Zircaloy-4 Cladding

Directions	Kearns number
$f_z$	0.060
$f_r$	0.521
$f_t$	0.413

Table 3. Creep Strain Ratios and Irradiation Growth Ratios of KOFA Zircaloy-4 Cladding under Biaxial Stress Condition

$\epsilon_i/\epsilon_j$	Creep Strain Ratios ( $f_{ij}^c$ )	Irradiation Growth Ratios ( $f_{ij}^g$ )
$\epsilon_z/\epsilon_t$	-0.169	-3.436
$\epsilon_z/\epsilon_r$	0.203	-1.456
$\epsilon_r/\epsilon_t$	-0.831	2.358

국내 가압경수로 핵연료 연소조건에서 KOFA 피복관 원주방향 변형율은 연료봉의 내·외압 차이에 의한 압축응력에 의해 외경이 수축하는 방향으로 크립이 일어난다. 따라서 table 3의 결과에서 길이방향으로는 피복관 길이가 증가하는 방향으로, 반경방향으로는 피복관 두께가 증가하는 방향으로 크립이 일어나게됨을 알 수 있다. 이와같이 압축응력을 받는 조건에서 피복관 길이 및 두께가 증가하는 변형율을 나타내는 것은 크립이 일정 체적을 유지하면서 일어나는 소성 변형이므로 원주방향으로 압축변형이 일어날때 일정 체적을 위해서 길이방향과 반경방향으로는 인장 변형이 일어나야하기 때문이다. 또한 이 결과를 통하여 피복관 크립은 원주방향에서 가장 크게 일어나며 다음으로 반경방향, 길이방향 순으로 일어나는 것을 알 수 있다.

한편 응력과 무관하게 속 중성자 조사에 의해 일어나는 조사성장은 피복관의 각축 방향의 집합도 차이에 의하여 이방성을 나타내는데 식(14), (15) 및 (16)에 의하여 각 축방향 성장율간의 비를 계산한 결과 table 3과

같이 나타났다. 조사성장율은 전술한 바와 같이(1-3 $f_{ij}^g$ )에 비례하므로 피복관 길이방향으로는 성장이 일어나게 된다. 따라서 table 3의 각 축방향 조사성장율 비를 통하여 분석해 볼 때 원주방향과 반경방향으로는 각각 외경 및 두께가 수축하는 방향으로 일어나게 됨을 알 수 있다. 또한 중성자 조사에 의한 변형율은 크립과 달리 길이방향으로 가장 크게 일어나며 다음으로 반경방향, 원주방향 순으로 일어나는 것을 알 수 있다.

### 3.2 크립 및 조사성장에 의한 피복관 변형율

가압경수로의 핵연료 연소조건에서 일어나는 Zircaloy 피복관의 변형은 전술한 바와 같이 크립과 조사성장의 두 변형기구에 의해 동시에 일어나는데 Holt<sup>4,15)</sup>는 피복관 변형거동이 크립과 조사성장에 의하여 각각 해석된 변형거동의 합으로 잘 묘사될 수 있음을 증명하였다. 따라서 피복관의 원주 방향 및 길이방향 변형율은 다음과 같이 크립과 조사성장에 의하여 일어난 변형율의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{tot}^z = \epsilon_c^z + \epsilon_R^z \tag{20}$$

$$\epsilon_{tot}^t = \epsilon_c^t + \epsilon_R^t \tag{21}$$

여기서

$\epsilon_{tot}^z, \epsilon_{tot}^t$  = 크립과 조사성장으로 일어난 길이방향과 원주방향의 피복관 총 평균 변형율

$\epsilon_c^z, \epsilon_c^t$  = 길이방향 및 원주방향에서 피복관 평균 크립 변형율

$\epsilon_R^z, \epsilon_R^t$  = 길이방향 및 원주방향에서 피복관 평균 조사성장율

길이방향의 변형율  $\epsilon_{tot}^z$ 와 원주방향의 변형율  $\epsilon_{tot}^t$ 에서 각각 크립에 의한 변형율 성분  $\epsilon_c^z, \epsilon_c^t$  및 조사성장에 의한 변형율 성분  $\epsilon_R^z, \epsilon_R^t$ 은 table 3에 주어진 크립 및 조사성장율의 비  $f_{ij}^c, f_{ij}^g$ 를 이용하여 그림 2와 같은 반복 계산(iteration)과정을 통해서 구할 수 있다. Table 4에는 고리 2호기에서 연소된 KOFA 피복관의 조사후 검사<sup>19)</sup>에서 측정된 피복관 길이방향 및 원주방향 변형율  $\epsilon_{tot}^z, \epsilon_{tot}^t$ 에서 상기와 같은 과정을 통하여 계산된 크립과 조사성장에 의한 변형율 결과를 나타내었다. 계산 결과, 원주방향의 외경 수축 변형은 90%의 크립과 10%의 조사성장에 의한 것으로 나타나 피복

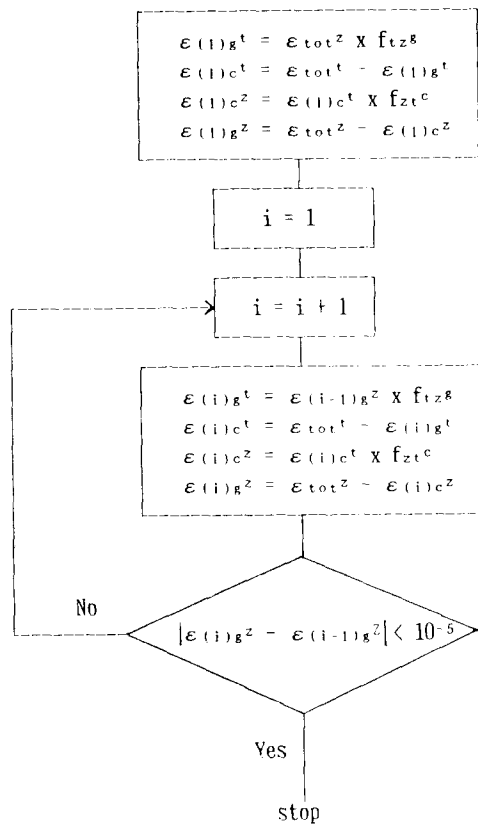


Fig. 2. Iteration procedure to calculate creep and irradiation growth components in axial and tangential strains of cladding tube

관의 외경 수축은 주로 크립에 의해 일어난 것으로 분석되었다. 한편 피복관 길이신장은 69%의 조사성장과 31%의 크립에 의해 일어난 것으로 분석되었으며 원주방향 변형과 달리 주요 변형기구는 조사성장으로 나타났다. 핵연료 성능분석 코드<sup>20)</sup>에 의해 예측한 결과 KOFA 피복관은 연소되는 동안 평균 69Mpa의 원주방향 외압과  $7.5 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 의 속 중성자( $E > 0.821 \text{Mev}$ ) 조사량을 받은 것으로 나타났는데 Baty<sup>9)</sup>의 실험 결과에서  $7-8 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 의 속 중성자( $E > 0.821 \text{Mev}$ ) 조사량과 원주방향 압축 응력이 69Mpa인 조건에서 피복관 길이신장은 30-35%가 크립에 의해 일어난 것으로 나타났으며 또한 Garzarolli<sup>4)</sup> 및 Harbottle<sup>19)</sup>은 가압경수로 핵연료 연소조건에서 피복관의 길이신장은 약 67-73%의 조사성장과 27-33%의 크립으로 일어난 것을 관

Table 4. Calculated Creep and Growth Strain Components in the Measured Strain of KOFA Zircaloy-4 Cladding

	measured total strain(%)	calculated growth(%)	calculated creep(%)
$\epsilon^t$	-0.933	-0.093	-0.84
$\epsilon^z$	0.463	0.321	0.142

찰하였다. 따라서 KOFA 피복관의 측정된 길이신장에 대하여 이론적으로 계산된 크립과 조사성장에 의한 변형을 분석 결과는 이러한 측정치와 비교적 잘 일치하였다.

### 3.3 속 중성자 조사량에 따른 피복관 변형 거동

원자로내에서 연소되는 동안 일어나는 피복관의 변형거동은 핵연료 성능분석 코드에 내장된 모델을 사용하여 예측되었으며 그림 3에는 KOFA 피복관에 대하여 속 중성자 조사량에 따라 계산된 원주방향과 길이방향 변형거동을 나타내었다. 이때 피복관 길이 방향의 변형을 계산은 고리 2호기 조사후 검사에서 수행된 피복관 변형을 측정 결과를 토대로 설정된 모델<sup>14)</sup>을 사용하였다. 이러한 원주방향 및 길이방향 변형을 모델은 연소되는 동안 크립과 조사성장에 의하여 동시에 일어나는 피복관의 외경 수축 및 길이신장의 측정치를 근거로 모델링된 실험치이므로 그림 3의 원주방향 변형율과 길이방향 변형율 계산 결과는 식(20) 및 (21)에서  $\epsilon_{tot}^t$ 와  $\epsilon_{tot}^z$ 를 의미한다. 따라서 그림 2의 과정을 통하여 각 축방향 전체 변형율에서 크립 성분과 조사성장 성분을 속 중성자 조사량에 따라 계산한 결과 그림 3 및 4와 같이 나타났다. 이와 같이 원주방향 외경수축 변형은 전 조사량 범위에서 주로 크립에 의해 일어나며 조사성장에 의한 변형율이 차지하고 있는 양은 중성자 조사량에 따라 증가하여 조사 초기에 전체 변형율의 2%에서 속 중성자 조사량이  $7.5 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$ 일때 10%까지 증가하였다. 이러한 결과를 볼때 속 중성자 조사량이 증가할수록 조사성장이 피복관 외경수축에 미치는 영향은 더 커질것으로 예측되나 그 영향은 크지 않을것으로 사료된다. 한편 피복관 길이 신장의 경우는 속 중성자

조사량이 증가함에 따라 주된 변형 기구가 크립에서 조사성장으로 전환 되고 있는것을 볼 수 있는데 속 중성자 조사 초기에는 피복관 길이신장이 68%의 크립과 32%의 조사성장으로 일어난 반면  $7.5 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$ 의 조사량에

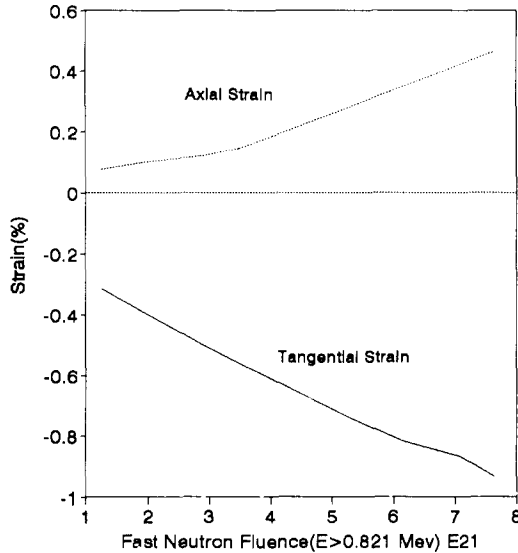


Fig. 3. Predicted tangential and axial strains of KOFA Zircaloy-4 cladding as a function of fast neutron fluence( $E>0.821 \text{ Mev}$ )

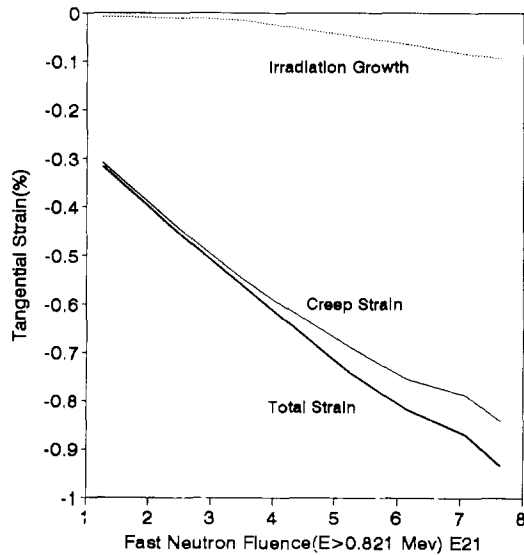


Fig. 4. Predicted creep and irradiation growth components in total tangential strain of KOFA Zircaloy-4 cladding as a function of fast neutron fluence( $E>0.821 \text{ Mev}$ )

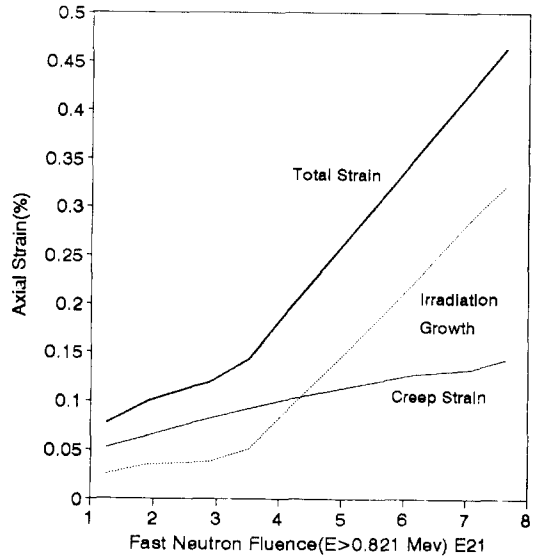


Fig. 5. Predicted creep and irradiation growth components in total axial strain of KOFA Zircaloy-4 cladding as a function of fast neutron fluence ( $E>0.821 \text{ Mev}$ )

서는 69%의 조사성장과 31%의 크립으로 일어난 것으로 나타났다. 이와 같이 속 중성자 조사 초기에 피복관 길이신장이 주로 크립에 의해 일어나게 되는것은 조사성장율이 속 중성자 조사량에 비례하여 더 이상 증가하지 않고 포화되는 거동을 나타내는 반면 크립은 핵연료 연소 초기에 일차 크립에 의해서 상대적으로 크게 일어나기 때문이다. 그러나 속 중성자 조사량이 더 증가하게 되면 조사성장의 가속화로 인하여 그림 4에서와 같이 피복관 길이신장은 크립보다 조사성장에 의하여 더 큰 영향을 받게된다.

### 5. 결 론

-Zircaloy 피복관의 변형 이방성은 각 축방향간의 변형을 비로 표현될 수 있는데 2축 압축응력 조건에서 크립 및 조사성장에 의한 변형 이방성은 피복관 집합도의 함수로 해석할 수 있다.

-국내 가압경수로의 핵연료 연소조건에서 KOFA Zircaloy-4 피복관의 변형 이방성 해석 결과 크립에 의해서는 피복관 외경이 수축하는 방향으로, 피복관 길이 및 두께는 증가하

는 방향으로 일어나며 피복관에 작용하는 응력에 상관없이 일어나는 조사성장은 피복관 길이가 증가하는 방향으로 피복관 외경 및 두께는 감소하는 방향으로 일어나는 것으로 분석되었다.

-KOFA 피복관의 측정된 변형율에 대하여 크립과 조사성장에 의한 변형율 성분을 이론적으로 분석한 결과 원주방향으로 일어나는 외경수축 변형은 거의 크립에 의해서 일어났으며 전체 원주방향 변형율중에서 약 10%가 조사성장에 의하여 일어난 것으로 나타났다. 또한 피복관 길이방향 신장은 69%가 조사성장에 의해 일어났으며 31%가 피복관 크립에 의하여 일어난 것으로 분석되었다.

-피복관 외경 수축 변형에 미치는 조사성장의 영향은 속 중성자 조사량에 따라 증가하였지만 크립에 의한 영향에 비해서 매우 작았다. 또한 피복관 길이신장은 속 중성자 조사 초기에는 주로 크립에 의하여 일어나지만 속 중성자 조사량이 증가함에 따라 크립보다는 주로 조사성장에 의해서 길이신장이 일어나는 것으로 분석되었다.

### 참 고 문 헌

1. Erick Techhoff, Deformation Mechanics, Texture, and Anisotropy in Zirconium Alloy(STP 966), 1'st ed, philadelphia, pa19103, (1988).
2. V. Filderis, AECL-7053(1980).
3. R.A. Holt, Journal of Nuclear Materials, 82, 419(1979).
4. Garzarolli et al, ASTM STP(1023), 641 (1989).
5. R. Eberle et al, KWU Technical Report, B111/e117/82, 1982.
6. George E. Dieter, Mechanical Metallurgy, 2'nd ed, Macgrow-Hill, inc, (1976).
7. D.G. Franklin, Creep of Zirconium alloys in nuclear reactors, ASTM special technical pub. 815, Philadelphia. pa19103, 1983.
8. W.A. Backofen, Deformation proceeding, Adison-Wesley, Cambridge, Mass., 1972.
9. R. Hill, Proceedings of the Royal Society of London, vol. 193A, 281(1948).
10. D.L Batty et al, ASTM STP824, 306 (1984).
11. J.H. Schemel, Zirconium Alloy Fuel Clad Tubing Engineering Guide, 1'st ed, Sandvick Special Metal Co, Kennewick, Washington 99336 USA, 1989.
12. L.F.P. Van Swan et al, Metallurgical Transactions, 10A, 483(1979).
13. V. Filderis, Journal of Nuclear Materials, 159, 22(1988).
14. S.N. Buckley, Properties of reactor materials and effects of Irradiation Damage, 1'st ed, Butterworths, London, 1962.
15. W.A. Alexander et al, ASTM STP633, 344(1977).
16. 김기항, 이찬복, 김규태, 한국재료학회지, 발간예정(1994).
17. R.A. Holt, Acta Metallurgia, 27, 1319 (1978).
18. Korea Atomic Energy Research Institute technical report, KAERI/TR-1021/91.
19. Korea Atomic Energy Research Institute technical report, KAERI/TR-387/93.
20. J.E. Harbottle, ASTM STP681, 202(1979).