

Programa ENUSA-KNFC-Westinghouse sobre arqueo y crecimiento del combustible

M. Aulló, Y. Aleshin y S-Y. Jeon

En casos extremos, el arqueo de los elementos combustibles en reactores PWR puede dar lugar a incrementos en el tiempo de caída de barras de control o inserción incompleta, huelgos excesivos entre elementos y problemas de manejo que tienen impacto en la operación de la planta. En el artículo se describen los mecanismos de arqueo y crecimiento del combustible y se presenta el código SAVAN desarrollado por ENUSA para predecir la deformación del combustible y sus aplicaciones. Asimismo se reseña el programa de colaboración acordado entre KNFC, ENUSA y Westinghouse para mejorar SAVAN facilitando su uso y eficiencia e introduciendo nuevos modelos de materiales y modelos del combustible.

Extreme levels of fuel assembly bow can lead to increased times for control rod insertion or incomplete insertion, excessive water gaps between fuel assemblies, or handling difficulties impacting nuclear plant performance. In this article the mechanism of fuel assembly bow and growth are described and the SAVAN code developed by ENUSA to predict fuel deformation is presented together with its applications. The article also presents the collaboration program agreed among KNFC, ENUSA and Westinghouse in order to improve SAVAN for ease of use, code efficiency and development of new material models and revised fuel assembly models.



MIGUEL AULLÓ. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid. Empezó a trabajar en ENUSA en 1985. Desde el año 1993 es Jefe de Diseño Mecánico en el departamento de Ingeniería del Producto de ENUSA.

YURIY ALESHIN. Westinghouse Electric Company, LLC.

INTRODUCCIÓN

Prácticamente todos los reactores comerciales de agua a presión (*Pressurized Water Reactors*, PWR) han experimentado en mayor o menor medida arqueo del combustible. En casos extremos, el arqueo de los elementos combustibles puede dar lugar a incrementos en el tiempo de caída de barras de control o inserción incompleta (*Incomplete Rod Insertion*, IRI), huelgos excesivos entre elementos y problemas de manejo que tienen impacto en la operación de la planta.

KNFC, ENUSA y Westinghouse han acordado trabajar juntos y colaborar en los aspectos técnicos del crecimiento y arqueo de los elementos combustibles con el fin de desarrollar un código que prediga la deformación del combustible en los reactores PWR. Este código permitirá la predicción del comportamiento del combustible en las etapas iniciales del proceso de diseño.

Dentro de este programa de colaboración, se mejorará el código bidimensional SAVAN desarrollado por ENUSA para facilitar su uso, y su eficiencia, introduciendo nuevos modelos de materiales y modelos del combustible que representen diseños típicos para reactores de tipo Westinghouse, Combustion Engineering y VVER.

MECANISMOS DE ARQUEO Y CRECIMIENTO DEL COMBUSTIBLE

El núcleo del reactor se compone de una red de elementos combustibles (Figura 1). Cada elemento combustible se coloca verticalmente en la vasija del reactor y se apoya en la placa inferior del núcleo. Después de que todos los elementos combustibles estén situados en su lugar en la placa inferior del núcleo, se instalan los internos superiores que contienen la placa superior del núcleo. La placa superior del núcleo se apoya sobre los resortes del cabezal superior de los elementos combustibles deformándolos, de este modo los resortes ejercen una fuerza hacia abajo que junto con el peso resiste la fuerza hidráulica ascensional manteniendo los elementos combustibles en su posición y poniendo a estos bajo una fuerza de compresión. La placa superior del núcleo también comprime los muelles de los componentes del núcleo situados sobre algunos elementos combustibles, esta fuerza de compresión se transmite a los elementos combustibles.

Los elementos combustibles y las barras combustibles crecen durante la operación en el reactor por el efecto acumulado de la formación de óxido, crecimiento por irradiación, relajación bajo irradiación inducida por las tensiones y la deformación elástica.

SANG-YOUN JEON. Korea Nuclear Fuel Company, LTD.

Debido al crecimiento del elemento combustible, aumenta la fuerza de compresión de los resortes mientras que el crecimiento de las barras combustibles tiende a poner en tracción a los tubos guía del elemento combustible. La proporción de este incremento de carga que se aplica a los tubos guía o a las barras combustibles depende de si las barras combustibles deslizan o no a través de las rejillas. A principio de vida, las barras combustibles no deslizan a través de las rejillas y entonces el incremento de carga se reparte entre los tubos guía y las barras combustibles de acuerdo a su rigidez relativa. Durante la operación se relaja la fuerza de los muelles de las

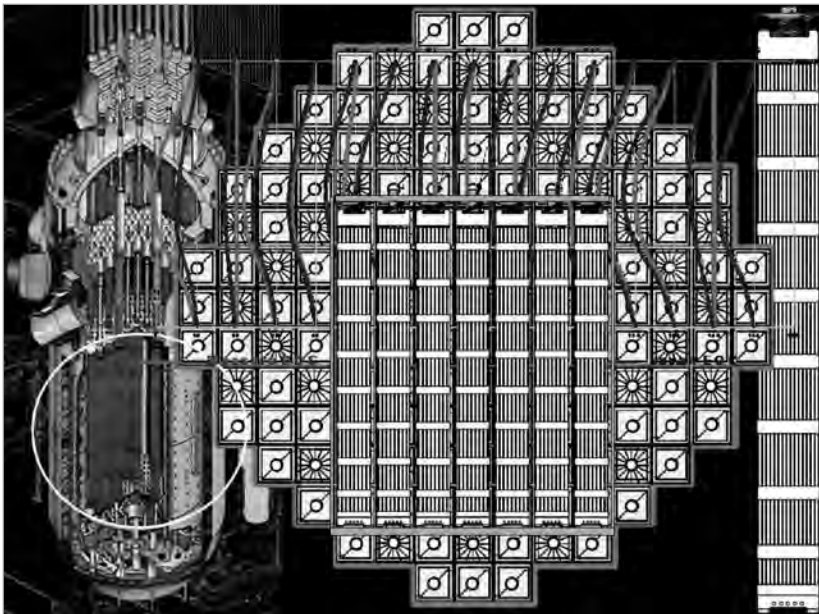


Figura 1: Núcleo de reactor PWR.

rejillas que sujetan las barras combustibles y las barras deslizan a través de las rejillas, entonces los tubos guía toman todo el incremento de carga.

La fuerza neta de compresión sobre los tubos guía es uno de los efectos primarios que inducen el arqueado de los elementos combustibles. Como la distancia entre elementos combustibles en el núcleo es muy pequeña, los elementos combustibles se empujan unos a otros y el arqueado se propaga por el núcleo. (figura 1).

SAVAN

SAVAN es un código de elementos finitos bidimensional desarrollado en C++ y dedicado al análisis de la evolución de modelos mecánicos del núcleo. El código modela el crecimiento y arqueado de los elementos combustibles dados un diseño del combustible y unas condiciones del núcleo. Las condiciones del núcleo incluyen el caudal de refrigerante, temperatura, historia de irradiación, etc. Además el código modela la interacción entre elementos combustibles durante la carga del núcleo, a plena potencia en las condiciones de operación específicas del ciclo y al final del ciclo para predecir los huecos entre elementos en el núcleo o las fuerzas laterales entre elementos combustibles.

El núcleo se modela con filas de modelos 2D de elementos combustibles con huecos entre ellos y entre los elementos de los extremos y el deflector (figura 2). El esqueleto del elemento combustible se representa por una celosía de vigas. Los tubos guía se representan por elementos viga con capacidad de crecimiento y fluencia. Se usa un par de

tubos guía para representar el conjunto de todos los tubos guía del elemento combustible. La distancia entre estos tubos guía se establece de modo que se preserve la rigidez a flexión del esqueleto del elemento combustible. Las barras combustibles se representan con elementos viga con crecimiento que se unen al esqueleto usando elementos de fricción con precarga cuya fuerza se relaja en función de la irradiación. Estos elementos simulan las características de los muelles y resaltes de las rejillas. Las rejillas se modelan usando elementos viga representativos. El modelo del elemento combustible esta restringido en los extremos en los cabezales, simulando la situación dentro del reactor. El modelo también incluye un par de elementos muelle simulando los resortes.

La fuerza del resorte se aplica junto con el peso y las fuerzas hidráulicas. La fuerza del resorte se ajusta en cada paso de carga para tener en cuenta el crecimiento del elemento combustible y la relajación del resorte. La fricción en cada rejilla decrece con la irradiación en función de la fluencia neutrónica sobre la rejilla y el tipo de material. La fuerza ascensional hidráulica depende del ciclo para tener en cuenta cambios de caudal de un ciclo a otro.

Las condiciones de operación que se introducen en el modelo son la temperatura, la fluencia neutrónica y las fuerzas hidráulicas. Bajo estas condiciones de operación, los elementos combustibles se deforman e interactúan entre ellos a través de elementos huelgo localizados a nivel de cada rejilla. En el cálculo se usan varios pasos de carga con iteraciones internas para alcanzar la convergencia.

Para cada fila y columna, el análisis considera tres estados principales:

1. *Estado inicial en frío.* En este estado se simula la carga del combustible en el núcleo. Como los elementos combustibles están rodeados de huecos pequeños, el arqueado inicial de los elementos combustibles cambia. Se incluyen el peso de los elementos combustibles y la fuerza de los resortes en frío.

2. *Operación en caliente.* Las condiciones de operación tienen en cuenta las fuerzas hidráulicas, la fuerza de los resortes en caliente y el flujo de neutrones. En esta etapa, las fuerzas de los muelles de las rejillas se relajan, los elementos combustibles y las barras combustibles crecen, las barras deslizan en las rejillas, y los elementos combustibles se deforman e interaccionan con los elementos adyacentes.

3. *Estado final en frío.* Este estado simula los elementos combustibles al

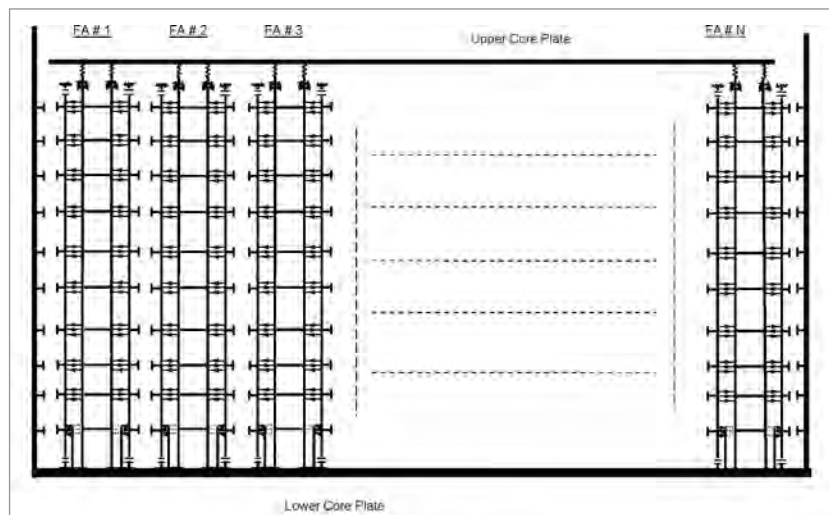


Figura 2: Modelo SAVAN.

final del ciclo después de la descarga. Se eliminan las fuerzas de los resortes, las fuerzas hidráulicas y las restricciones entre elementos. Todas las deformaciones elásticas desaparecen y se puede realizar una comparación entre las estimaciones de los arqueos y las medidas realizadas en planta.

APLICACIONES

El código SAVAN se ha usado para estimar la eficacia de cambios en el diseño del combustible para mitigar las consecuencias de la deformación excesiva del elemento combustible.

La figura 3 muestra la evolución del tiempo de caída de las barras de control en una planta PWR. En el ciclo 11 hubo cinco barras de control con inserción incompleta en combustible de otro suministrador. En el ciclo 12 nueve barras de control no se insertaron completamente en elementos combustible de tipo AEF suministrados por ENUSA.

La recarga del ciclo 13 estaba compuesta por elementos de diseño AEF 3.1 que incorporaba tubos guía de Zirlo-TM con menos crecimiento y fluencia, resortes de carga reducida, rejilla protectora y un vano inferior de menor longitud. Además, se realizó una campaña de plastificación para reducir el exceso de fuerza de los resortes de las regiones anteriores. Dos barras de control no se insertaron completamente al final del ciclo 13.

La recarga para el ciclo 14 era de diseño MAEF. Los elementos MAEF tienen tubos guía con 25% más de espesor con un diámetro uniforme en toda su longitud. No se produjeron inserciones incompletas en el ciclo 14.

La figura 4 muestra la mejora en arqueos para los diferentes diseños mencionados usando un modelo simple de SAVAN con dos elementos. La distancia entre elementos es la nominal en el núcleo. El elemento 1 (F/A 1) es un elemento AEF quemado con 5mm de arqueos. El elemento 2 (F/A 2) es un elemento fresco de diferentes diseños: AEF, AEF con fuerza del resorte reducida, AEF 3.1 (con tubos guía de Zirlo-TM, fuerza del resorte reducida, rejilla protectora y longitud reducida del vano inferior) y (igual que el AEF 3.1 más tubos guía de espesor mayor).

Las evaluaciones mecánicas de los esquemas de recarga so otra aplicación del código SAVAN 2D. El código permite comprobar la eficacia de diferentes esquemas de carga para reducir la deformación del combustible y mitigar sus consecuencias.

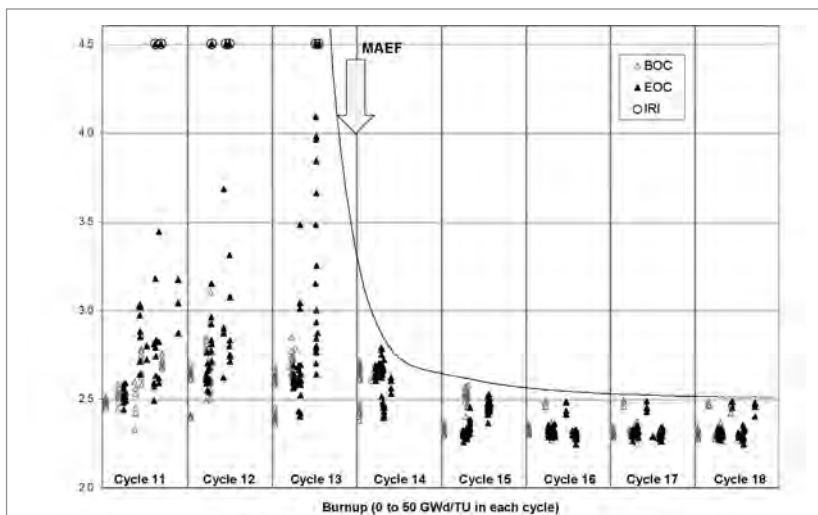


Figura 3: Evolución del tiempo de caída de barras de control.

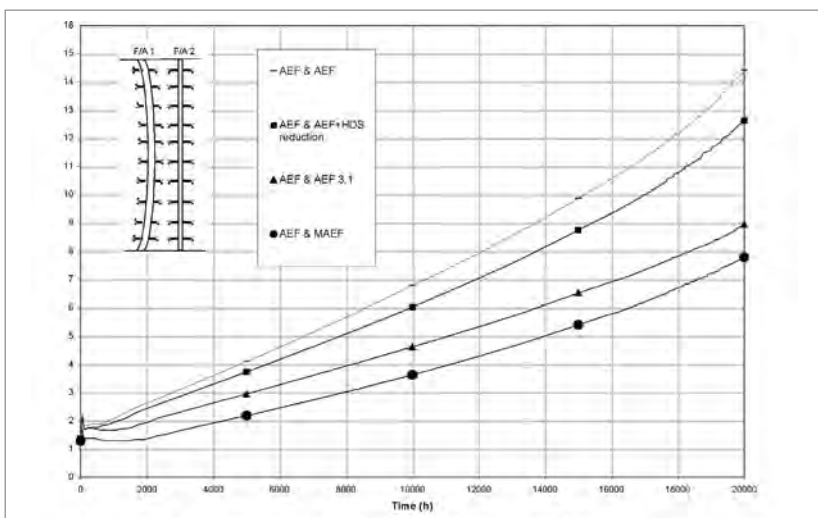


Figura 4: Cambios en la evaluación del diseño con SAVAN.

PROGRAMA DE COLABORACIÓN KNFC-WESTINGHOUSE-ENUSA

KNFC, ENUSA y Westinghouse han acordado trabajar juntos y colaborar en los aspectos técnicos del crecimiento y arqueos de los elementos combustibles con el fin de desarrollar un código que prediga la deformación del combustible en los reactores PWR.

Mediante esta colaboración se mejorará el código bidimensional SAVAN desarrollado por ENUSA para facilitar su uso (incluyendo entradas y salidas mejoradas que faciliten su uso), la eficacia del código, desarrollo de nuevos modelos de materiales y desarrollo de modelos de elementos que representen diseños combustible de tipo Westinghouse, el antiguo Combustion Engineering y VVER. Este código debe permitir la predicción del comportamiento del combustible en las etapas iniciales del proceso de desarrollo.

El objetivo del programa es mejorar

el código bidimensional y desarrollar un código tridimensional que:

- Prediga el crecimiento del elemento combustible usando modelos actualizados.
- Prediga la deformación de los elementos combustibles en el núcleo del reactor en diferentes condiciones incluyendo: a) principio de ciclo durante la carga del núcleo, b) operación a plena potencia en condiciones de operación específicas full del ciclo y c) fin de ciclo después de la descarga.
- Predecir la fuerza de arrastre entre elementos adyacentes.
- Predecir la fuerza de arrastre entre las barras de control y los tubos guía del elemento combustible.

Se espera que el código se use para facilitar el proceso de desarrollo del combustible, para la optimización de esquemas de carga del núcleo, para predecir el comportamiento del combustible y para la optimización de las operaciones de carga y descarga del núcleo. ■