'99 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

미임계 핵변환로의 핵연료형태선정에 대한 연구

Study on the Selection of Nuclear Fuel Type for a Hybrid Power Extration Reactor

유동한, 박원석

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

원자력시설에서 배출되는 고준위 방사선 폐기물의 처분을 위한 대책중 하나로써 미임계 핵변환로에 대한 연구가 진행중이다. 이러한 핵변환로 설계과정에서 가장 중요한 분야가 원자로내에서 사용할 핵연료형태의 선정이라 할 수 있다. 본 연구에서는 핵변환로에 적합한 핵연료형태의 선정을 위해 보다 합리적인 방법론을 활용하였다. 복잡한 의사결정문제를 체계적인 계층구조를 사용하여 표현하고 이러한 계층구조내의 여러 요소들에 대해 후보물질간의 정량적 비교를 통해 최종적인 선정을 하는 의사결정방법론을 이용하였다. 핵연료선정을 위해 기존의 4 가지 주요 핵연료형태인 금속물, 산화물, 질화물, 그리고 용융물등 후보 핵연료형태에 대해 장단점등을 비교,검토한 후 선정을 위한 정량적 평가를 하였다. 본 방법을 이용한 결과 핵변환로의 최적 핵연료형태는 금속연료가 가장 적합한 것으로 평가되었다.

Abstract

In order to solve the problem related to long-lived radioactive nuclides in spent fuel, development of a subcritical transmutation reactor concept is emerging. One of the important issues for the design of the reactor may be the selection of a suitable nuclear fuel type. This study presents a logical decision model for this issue using an analytic hierachy process (AHP). Hierarchy is a representation of a system to study the functional relations of its components and its impact on the entire system. The study shows first how to construct hierachy representing their relations and then measure the individual element's impact to the entire system for a quantitative decision making. Current four fuel types; metal, oxide, molten salt, and nitride, were selected and analyzed based on several characteristics with respect to overall comparison. Based on the decision model, the study concludes that the metal fuel type is the best choice for the transmutation reactor.

1. 서론

현재 설계하고 있는 미임계 핵변환로인 HYPER (HYbrid Power Extraction Reactor)시스템은 핵비확산성 측면을 고려하여 사용후 핵연료에서 방출되는 초우란원소(TRU)를 모두 소각시키는 데 설계의 주안점을 두고 있다. 실제 원자로 설계과정에서 가장 많은 시간과 노력이 요구되는 분야가 핵연료 개발이라고 할 수 있을 것이다. 왜냐하면 연소과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 재료학적/화학적 문제를 확인하기 위해서 많은 시험연료봉 조사(Irradiation)를 수행하여야 하기 때문이다. 현재까지 핵연료의 연구가 우라늄 또는 플루토늄을 주성분으로 하는 2, 3원계 연료에

주안점을 두고 개발되어 왔다. 본 연구에서는 우라늄-플루토늄과 같은 3원계 핵연료 형태 자료에 근거하여 초우란 원소의 핵연료 형태에 대한 평가를 수행하였다. 현재까지 초우란 원소를 모두 포함하는 다원계 핵연료의 최적 형태에 대한 조사는 그 자료의 부족 때문에 현실적인 한계가 있어 왔다. 따라서 미임계로 핵변환로에 적합한 최적의 핵연료 형태을 결정하기 위해서는 보다 합리적인 선정방법이 필요하게 되었다.

2. 의사결정모델을 활용한 선정방법론

의사 결정 분석(Decision Analysis)이란, 불확실성하에서의 여러 대안 중 최적 대안을 어떻게 선택해야 하는가를 연구하는 학문이며, 실제 문제에 적용하는 방법론도 포함한다. 즉, 각 대안의 결과가 불확실한 상황에서 최적의 한 대안을 선택해야 하는 문제를 해결할 수 있는 체계적인 방법을 제공한다. Simon 은 사람들이 의사 결정을 할 때, 다음과 같은 3가지 단계를 갖고 있다고 기술하였다[1].

(1) 의사 결정 문제 제기 단계,
(2) 가능한 의사 결정 대안들의 발견 단계,
(3) 가능한 대안 중 최적 대안 선택 단계로 구성되어 있다고 보고 있다.

이 중에서도 가장 중요한 것은 최종 단계인 최적 대안 선택단계인데, 이 단계의 수행은 서술적이 아닌, 논리적이고 체계적인 방법론하에서 수행되어야 한다. 따라서 보다 정량적이고 수학적인 모델의 개발이 필수적이다. 의사결정모델(Decision model)은 의사 결정자가 결정을 내리는데 도움을 주기 위하여 현실 사항을 계량적이고 논리적으로 표현한 것이다. 의사결정 혹은 계량 모델은 모델에서 취급하는 변수들 사이의 관계를 기술한 것이다. 이러한 모델을 사용하면 첫째, 문제를 직관적으로 파악하고, 복잡한 문제를 풀기보다는 풀기 쉬운 모양으로 변환시켜 처리할 수 있다. 둘째, 컴퓨터의 지원을 받을 수 있으므로 세부 사항을 계속해서 지켜볼 수가 있고 필요한 모든 분석을 빠르게 수행할 수 있다. 그러므로 모델 분석가는 모델을 사용하여 모델에 생기는 문제의 개별적 세부 사항이나 복잡한 결과에 대한 판단에 항상 주의를 기울일 수 있다.

따라서 본 논문에서는 핵변환로에 적합한 핵연료형태의 선정을 위해 이러한 논리적이고 체계적인 의사결정모델을 개발, 활용하려고 한다. 이는 우선 의사결정을 위해 우리가 필요한 기준 및 세부사항들이 무엇인가 검토하여 도출시키고 이러한 사항들의 상호관계를 정립한 후 최종 의사결정을 보다 정량적이고 재생산이 가능하도록(Reproducible) 할 수 있다.

2.1 계층구조

최근 복잡한 의사결정문제를 좀 더 "체계적으로 (systematic)" 풀려는 시도로 계층구조(Hierachy)라는 수단을 사용하고 있다[2]. 계층구조란 각 구성요소들의 기능, 상호작용과 전체에

끼치는 영향을 해석하기 위한 시스템 구조에 대한 추상적개념이다. 이 개념은 여러 가지의 형태를 가질 수 있는데, 기본적인 형태는 전체목표(overall objective)으로부터 내려오는 부차적 목표 (sub-objective), 이러한 부차적 목표에 영향을 끼치는 영향력 (force), 영향력에 영향을 끼치는 사람 (people), 사람들의 목표와 정책 (policy), 더 밑으로 내려가 전략 (strategy) 그리고 마지막으로 이 전략에 의하여 생기는 결과로 이루어진다. 이러한 계층구조는 의사결정시 필요한 입력변수들의 관계를 보다 체계적으로 정리하는데 많은 도움이 된다.

2.2 정량적 비교방법 및 논리성 점검

각 세부인자내에서 4 가지 핵연료형태간의 정량적 비교는 여러 방법을 통해 이루어 질 수 있다. 가장 흔한 방법은 있는 사항을 나열해 놓고 이에 대한 점수를 매긴 후 이를 정규화하여 비교하는 방법이다. 그러나 이보다 손쉽게 각 사항들을 비교하는 방법은 서로 짝을 지어 비교 (pairwise comparison)하는 것이다. 즉, 비교대상을 2개씩 묶어 서로에 대해 비교를 계속하여 전체대상에 대해 확대하여 나가는 경우이다. 이는 전체 대상을 한꺼번에 놓고 비교하는 것이 아니고 두 대상에 한정하므로 비교가 보다 손쉽다는 점이 장점이나, 이런 각각의 비교가 전체대상에 대해서 얼마나 일관성을 유지하는가 점이 실제 적용에 어려움이 있다. 흔히 보통 이렇게 서로 짝을 지어 비교하다보면 전체적으로 논리적 모순이 일어나는 경우가 많기 때문이다.

Pairwise Comparison

우선 간단한 예로써 짝을 지어 비교하는 경우를 살펴보자. 만약 A, B, C, D 의 서로 다른 위치에 의자가 놓여있는데 각 위치에서의 밝음 (brightness)의 정도를 상대적 중요도로서 평가하기로 하자. 판단은 각 위치에 사람을 세워보고 그에게 다음과 같은 질문을 하여 그 결과로서 한다. 예를 들어 "A 위치가 B 위치보다 어느 정도 밝으냐?"와 같은 질문이다. 그의 대답에 따라 아래표에 다음의 가정에 따른 숫자를 기입한다.

밝기	A	B	C	D
A				
B				
C				
D				

A와 B가 같은 정도이면 : 1

A가 B보다 약간 밝으면 : 3

A가 B보다 밝으면 : 5

A가 B보다 많이 밝으면 : 7

A가 B보다 매우 많이 밝으면 : 9

를 (A, B)의 위치에 기입한다. 여기서 만약에 B의 위치가 A의 위치보다 밝다는 대답이면 위의 숫자의 역수를 기입한다. 즉, 예를들어 B의 위치가 A의 위치보다 약간 밝으면 (A, B)의 값은 1/3가 되며 (B, A)의 값은 3이 된다. 그리고 반드시 1, 3, 5 등의 값을 사용해야 하는 것은 아니다. 이 값들은 편의를 위해서 가정한 값이므로 다른 값, 예를 들어 2, 4, 6, 8 을 사용할 수 있고 혹은 섞어서 사용할 수도 있다.. 또한 밝기를 나타내는 행렬에서 대각선 성분의 값들은 1이 되는 것은 자명한 일이다. 그리고 위의 행렬 성분을 채우기 위해서는 대각선을 제외한 나머지 값들의 반만 알면 된다. 왜냐하면 나머지 반은 반대 위치에 있는 값들의 역수값을 취하면 되기 때문이다. 그러나 여기서 반드시 역수값을 취하는 것은 아니다. 다만 이렇게 하는 것이 합리적이라고 판단되기 때문이다. 여러번의 질문으로 거쳐 다음과 같은 행렬을 얻었다고 가정하자.

밝기	A	B	C	D
A	1	5	6	7
B	1/5	1	4	6
C	1/6	1/4	1	4
D	1/7	1/6	1/4	1

상대적 중요도

다음으로 할 일은 위의 행렬을 이용하여 전체대상에 대한 상대적 중요도벡터를 구하는 것이다. 수학적으로 이 벡터는 위 행렬의 주고유벡터 (principal eigenvector)를 구하여 정규화하면 된다. 정확한 계산은 많은 계산량을 요구하기 때문에 주로 컴퓨터를 이용하게 된다.

일관성 점검

일반적으로 기본적인 자료로부터 필요한 모든 자료를 논리적으로 추출하였을 경우, "일관성 (consistency)"이 있다고 말한다. 예를 들어, 상대적 중요도가 A가 B보다 3배이고 A가 C보다 6배라면 논리적으로 B는 C의 2배가 된다. 따라서 상대적 중요도에 대한 행렬에서 (B, C)의 위치에는 2가 들어가는데 만약 2가 아니라면 이 행렬은 일관성을 잃었다고 말할 수 있다. 위의 밝음정도에 대한 예제에서 행렬이 일관성이 있다면 4가지 방법에 의한 상대적 중요도에 대한 벡터는 같은 값을 가지게된다. 그러나 행렬이 일관성이 없다고 해서 반드시 틀린 것은 아니다. 다음과 같은 방법으로 일관성을 점검하여 기준치에 만족하면 받아들일 수 있다.

먼저, 점검할 행렬의 최대 고유치값 (maximum or principal eigenvalue) $l_{\max}$ 을 구한다. 이 값을 구하는 방법은 여러 가지가 있다. $l_{\max}$ 값이 n(행렬의 차수 값)에 가까이 갈수록 이 행렬은 일관성이 있다고 말할 수 있다. 그러나 실제로 이용하는 값은 다음과 같다.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

여기서 $C.I. = \frac{l_{\max} - n}{n-1}$: consistency index

그리고 R.I값은 행렬의 차수에 따라서 다음과 같이 정해진 값이다.

차수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

위의 식에 의해 계산된 C.R 값이 0.1 과 같거나 작은 정도이면 일관성이 있다고 받아들일 수 있다.

2.3 핵연료 선정을 위한 의사결정분석방법론

앞서 언급한 의사결정방법론에 입각해 본 연구에서는 핵변환로의 핵연료형태의 선정을 위해 다음과 같은 과정을 사용하였다.

1) 계층구조를 통한 선정기준 및 세부항목의 도출
2) 후보 핵연료형태 선정
3) 도출된 선정기준및 세부항목의 가중치부여
4) 도출된 세부항목들에 대해 후보 핵연료형태의 상호비교 및 비교과정의 일관성 확인
5) 최종결과 도출 및 의사결정

보다 자세히 설명하면 우선 핵연료선정을 위한 주요 선정기준들과 이들기준밑의 세부항목들을 검토, 도출한다. 이들을 계층구조 (Hierarchy)를 통해 체계적으로 구조화한다. 다음에 후보 핵연료형태를 선정하여 앞서 구축한 계층구조의 각 항목에 대해 상호간 비교나 각 항목간에 순위나 가중치를 사용하여 정량적 비교를 한다. 마지막으로 각 항목에서 도출된 값들을 최종, 종합하여 가장 적합한 핵연료형태를 의사결정한다 (그림 1 참조).

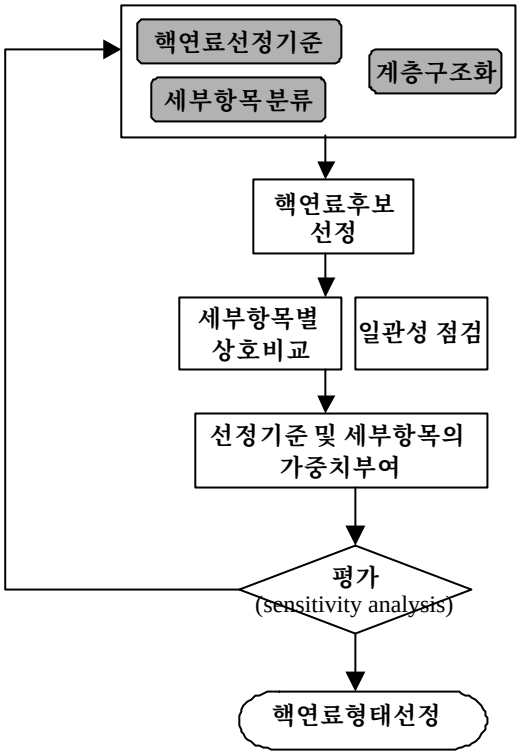

그림 1. 핵연료 선정 절차도

3. 핵변환로의 핵연료 선정문제

3.1 계층구조를 통한 선정기준 및 세부항목의 도출

핵변환로에서의 핵연료형태의 기본적인 요건은 기존의 임계원자로에서의 요건과 대동소이하리라고 판단되며 단지 차이가 있다면 핵변환 시스템인 HYPER 핵연료의 경우 반드시 순환주기를 요구한다는 점이다. 따라서 HYPER 시스템 핵연료는 크게 세가지의 기본적 요건을 만족시켜야 한다. 즉, 첫 번째는 핵연료 제조/제작과 관련한 요건, 두 번째로는 노내거동 요건 그리고 마지막 세 번째로서 화학적 처리 요건이다.

가) 제조/제작 요건

기본기준인 제작/제조과정의 세부항목으로서는 첫째, 기술적 성숙도, 둘째 비용을 들 수 있다.

나) 노내거동 요건

핵연료가 만족시켜야할 중요한 요건이 원자로노심에 장전되어 핵분열을 일으킬때 나타나는 노내거동부분이다. 노내거동은 첫째는 열전달등과 관련된 물리적 특성, 둘째는 연소되면서 나타나는 방사선 조사특성, 중성자 반응특성에 영향을 주는 핵적 특성 및 안전성등의 항목으로 나눌수 있다. 물리적 특성의 세부인자들로는 열전도도와 운전온도 탄력성, 방사선 조사특성의 세부인자로는 swelling, 피복재와의 공존성 및 최대달성연소도, 그리고 핵적 특성의 세부인자로는

중성자스펙트럼, 노심크기 및 on-line refueling 능력, 마지막으로 안전성 특성의 세부인자로는 핵연료파손에 따른 누출및 구조물과의 양립성등을 꼽을 수 있다.

다) 화학적 처리 요건

화학적 처리 요건의 세부항목으로는 건식처리와의 부합성및 경제성등을 들 수 있다.

그림 2는 각 선정기준 및 이들의 세부항목들을 체계적인 계층구조로 표시한 것이다.

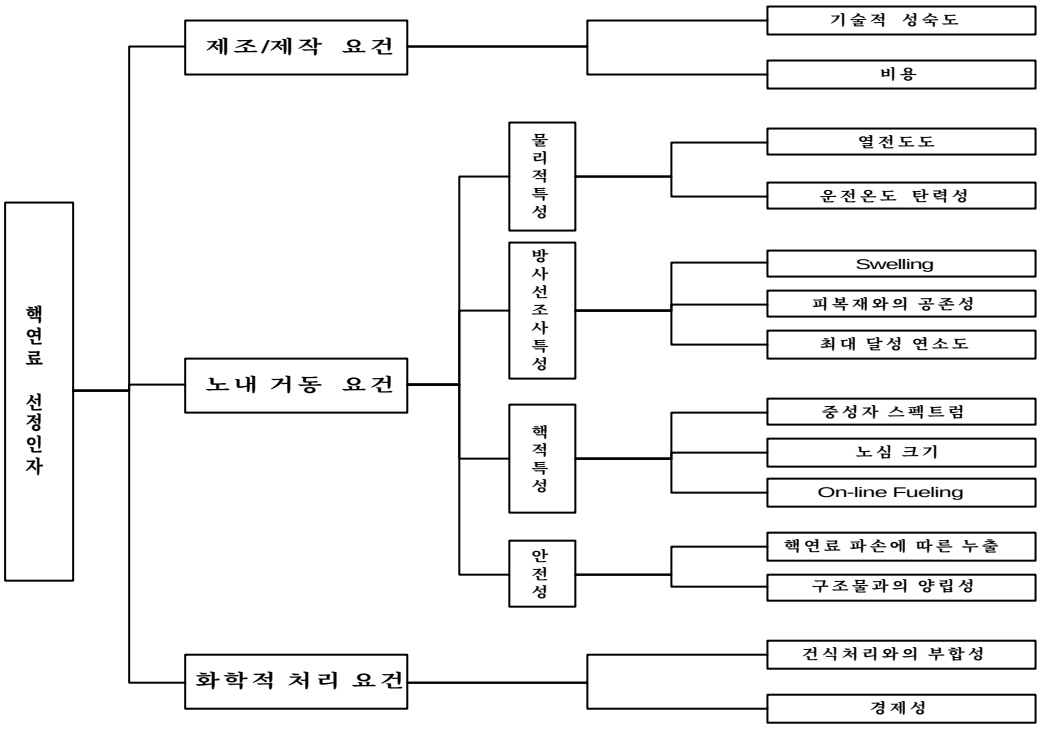

그림 2. 핵연료형태 선정을 위한 항목들의 계층구조

3.2 후보 핵연료형태 선정

핵변환로 설계가 전세계적으로 개념연구단계이고 또한 장전하여 소멸시키고자하는 핵종이 국가별로 다른 까닭에 아직 최적 핵연료 형태에 대한 국제적 공감대가 형성되어 있지는 못하다. 본 연구에서는 현재 세계적으로 고속중성자 핵변환로를 설계목표로 하고 있는 연구소를 중심으로 진행된 연구결과에서 얻어진 여러 핵연료형태를 살펴보고 이를 근거로 하여 4 가지 주요 핵연료형태, 즉, 금속, 산화물, 질화물, 용융염 등에 대해 살펴보았다[3,4,5].

가) 금속핵연료

여러 기관에서 하나의 옵션으로서 연구를 하고 있으나 미국 LANL과 유럽 공동체 연구소인 CERN이 주축을 이루고 있다. LANL은 지르코늄 Matrix에 TRU를 혼합하는 방식을 취하고 있으며

혼합구성비는 Zr이 약 85 ~ 90%, TRU가 15~10%로 되어 있다. 피복재 재료로서는 SS316을 선택하였고 피복재와 핵연료심과의 사이는 납 또는 He을 충진하는 것으로 되어 있다. LANL이 이러한 형태의 금속연료를 선택한 배경으로는 다음과 같은 이점을 들고 있다.

- Zr에 TRU의 용해성이 뛰어나다.
- 상평형(Phase Equilibria)를 쉽게 달성할 수 있다.
- Vacuum Casting에 의해 쉽게 제조가 가능하다.
- 기존의 경수로 사용후 핵연료에서 폐기 처분된 Zr을 재활용할 수 있다.
- 금속연료에 대한 경험이 매우 풍부하다.

반면 CERN은 토륨과 초우란 원소를 혼합한 금속연료를 연구하고 있다. 현재 고려되고 있는 핵종구성비는 0.7Th-0.3TRU이다. CERN은 반응도 보상측면에서 토륨을 혼합하고 있으며 이들 구성비는 반응도 보상을 최적화하는 관점에서 결정된 값이다.

나) 산화물 연료

유럽 공동체 연구소 CERN이 에너지 증폭장치인 EA 시스템의 핵연료 형태로서 연구하고 있다. 핵연료 조성은 (0.9Th+0.1U)O2 형태로 되어 있으며 피복재로서는 HT-9을 사용하고 있다. CERN은 5년 연속조사 및 약 100,000 MWD/MTU의 방출 연소도를 목표로하고 있다.

다) 질화물 연료

일본원자력 연구소는 핵변환용 핵연료 형태로서 1)질화물연료, 2)염화용융염연료, 3)금속합금연료 등 3가지를 연구하고 있다. 이들 중 제1옵션이 질화물연료이다. 일본이 질화물 연료를 선택한 가장 큰 배경으로는 초우란계열 핵종의 단일질화물 즉, PuN, AmN, CmN, NpN 등이 서로 잘 섞인다는 점이다. 예를 들어 이들 초우란 원소를 합금형태로할 경우 상호 용해성에 의해서 장전해야할 핵종량이 제한을 받을 우려가 있다는 점이다.

라) 용융염 연료

일본, 불란서, 러시아 등지에서 고려하고있는 핵연료 형태로서 Carrier를 무엇으로 할 것인가에 의해서 다양한 화학적 형태를 이룬다. 불란서 CEA의 경우에는 납-염화(PbCl2)용융염을, 일본에서는 염화용융염을 고려하고 있다.

표 1. 핵연료 형태별 비교인자 특성요약

특성인자	금속연료	산화물연료	질화물연료	용융염
제조특성	충분한 제조 경험이 있음.	제조경험 충분	일본에서 약간 있음 (N-15농축과정이 요구됨)	토륨에 대해선 존재. 취약함.

열전달특성	우수한 열전도도 (0.2W/cm K)	낮은 열전도도(0.03W/cm K)	우수한 열전도도 (0.2W/cm K)	~0.01W/cmK (불화물 염)
용융점 특성	낮은 융점 (1426K)	높은 융점(3150K)	비교적 높은 융점(3050K)	낮을수록 유리 보통 ~900K
팽윤특성	1~2%까지 급격함. 현재 문제해결	팽윤저항이 우수	Fission Gas이동이 적음. 산화물에 비해	해당 없음
최대달성 연소도	20at% 까지 실증됨.	24at%까지 실적 있음.	9at%까지 실적이 있음. 우수할 것으로 기대됨.	FP생성에 의한 화학 특성 변화
조밀노심 구성	중금속밀도가 높아서 유리 (14.23g/cc)	중금속밀도가 높지않음(9.66g/cc)	비교적 중금속밀도가 높아서 양호. (13.35g/cc)	용해도에 의해서 결정됨. 용해도 자료가 매우 취약함.
중성자 스펙트럼	매우 높게 중성자에너지를 유지할 수 있음.	금속과 질화물에 비해서 스펙트럼이 Soft함.	양호한 스펙트럼을 유지할 수 있음.	염화 용융염의 경우 양호
On-Power 장전	중금속 밀도가 높아서 장전주기를 줄일 수 있음.	중금속 밀도가 낮아서 자주 투임해야함.	산화물에 비해서는 양호.	매우 양호
사고시 안전성	피복재 건전성 유지가 관건이며 검증되었음.	금속과 마찬가지로 충분한 검증이 이루어 졌음.	건전성에 대한 자료가 충분하지 않음. 그러나 용융염에 비해서는 유리.	다중방호개념이 결여되었으므로 취약함.냉각관의 부식문제도 관건임.
피복재와 양립성 (SUS)	1000K에서 침식이 발생 따라서 온도 제한	연소도 증가 시 공정반응이 증가.	양호	구조물과의 부식에 대한 자료가 매우 취약함.
화학적 처리특성	건식처리에 매우 적합	비용이 증가	금속과 산화물 중간정도 비용이 요구됨.	핵연료 매질 자체가 화학적 가장 우수함.

3.3 도출된 선정기준 및 세부항목들에 대한 가중치부여

선정기준들중 노내 거동이 가장 중요한 기준이므로 50%, 핵연료의 제조/제작요건에는 20 % 그리고 화학적 처리 요건에는 30%의 가중치를 두었다. 그리고 각 세부인자들에 대해서는 인자간의 가중치는 균일하게 주었다.

3.4 도출된 세부항목들에 대해 후보 핵연료형태의 상호비교 및 비교과정의 일관성 확인

앞서 계층구조에서 선정된 세부항목들에 대해 4 가지 후보 핵연료형태들을 상호비교하였고 이러한 상호비교가 논리적으로 일관성이 있는지는 점검하기 위해 일관성계수를 계산하여 보았다. 표 2는 선정된 세부항목들에 대한 상호비교 자료 및 이에 따른 일관성계수를 보여주고 있다. 계산된 일관성계수들이 모두 0.1 보다 작으므로 사용된 상호비교는 논리적으로 일관성이 있음을 알 수 있다.

표 2. 세부항목별 상호비교

열전도도

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	9	2	5
Oxide	1/9	1	1/7	1/4
Nitride	1/2	7	1	3
Molten Salt	1/5	4	1/3	1

Consistency Ratio = 0.027

운전온도

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1/7	1/6	2
Oxide	7	1	2	8
Nitride	6	1/2	1	5
Molten Salt	1/2	1/8	1/5	1

Consistency Ratio = 0.033

핵연료파손에 따른 누출

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1	4	5
Oxide	1	1	4	4
Nitride	1/4	1/4	1	2
Molten Salt	1/5	1/4	1/2	1

Consistency Ratio = 0.018

구조물과의 양립성

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1	1	5
Oxide	1	1	1	5
Nitride	1	1	1	5
Molten Salt	1/5	1/5	1/5	1

Consistency Ratio = 0.00

최대달성연소도

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1/3	2	1/6
Oxide	3	1	4	1/3
Nitride	1/2	1/4	1	1/8
Molten Salt	6	3	8	1

Consistency Ratio = 0.015

피복재와의 공존성

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1/2	1/4	2
Oxide	2	1	1/3	4
Nitride	4	3	1	7
Molten Salt	1/2	1/4	1/7	1

Consistency Ratio = 0.011

Swelling

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	1/5	1	1/9
Oxide	5	1	3	1/4
Nitride	1	1/3	1	1/8
Molten Salt	9	4	8	1

Consistency Ratio = 0.025

On-line Refueling

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	4	2	1/3
Oxide	1/4	1	1/3	1/9
Nitride	1/2	3	1	1/5
Molten Salt	3	9	5	1

Consistency Ratio = 0.013

노심크기

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	5	2	8
Oxide	1/5	1	1/3	3
Nitride	1/2	3	1	5
Molten Salt	1/8	1/3	1/5	1

Consistency Ratio = 0.019

중성자스펙트럼

	Metal	Oxide	Nitride	Molten Salt
Metal	1	8	3	6
Oxide	1/8	1	1/6	1/3
Nitride	1/3	6	1	2
Molten Salt	1/6	3	1/2	1

Consistency Ratio = 0.031

3.5 최종결과 도출 및 의사결정

앞서 언급한 세부항목외 나머지 항목들에 대해서는 Rank법과 효용함수[6]를 사용하여 비교하였다.

모든

질화물형태로 나타났다. 의사결정에 필요한 최종점수는 그림 2 에 표시하였다.

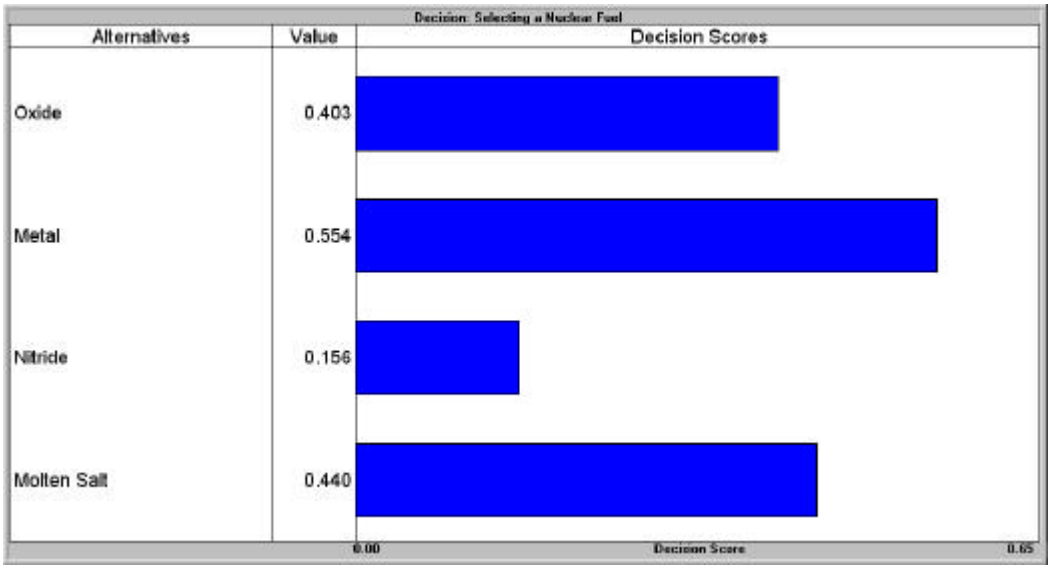

그림 2. 각 핵연료에 대한 의사결정 점수

이러한 점수에 영향을 준 주요인자들의 기여도는 그림 3에 표시하였다. 금속물형태나 산화물형태 핵연료는 제조에 관련된 항목에서 좋은 점수를 얻은 반면에 용융물형태의 핵연료는 화학적 처리요건 항목에서 많은 점수를 받았다는 것을 알 수 있다.

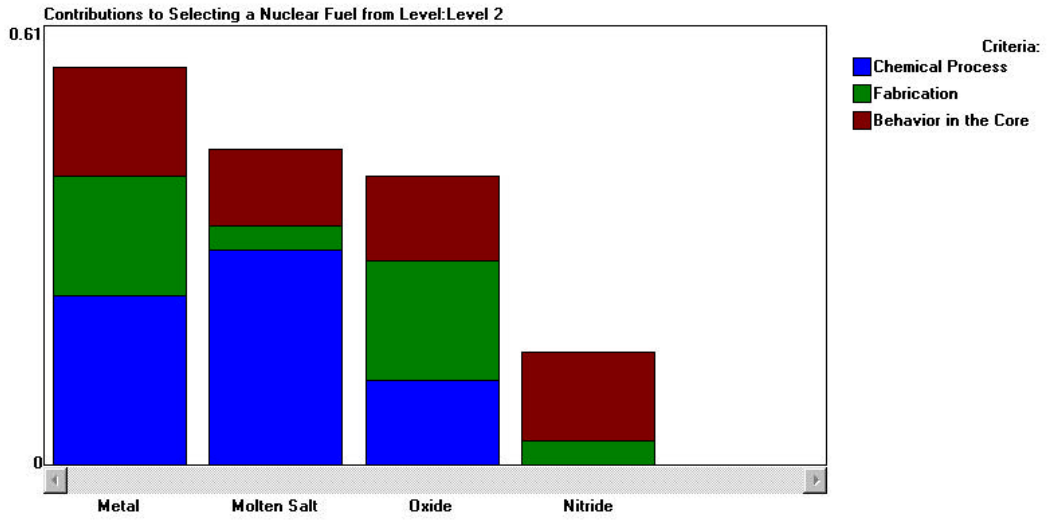

그림 3. 점수에 대한 기여도

이들을 세부항목별로 보다 상세하게 살펴보면 (그림 4 참조) 용융물형태는 안전성세부항목에서는 상대적으로 다른 형태의 핵연료보다 상당히 점수를 못 받았으나 화학적 처리항목에서는 상당히

양호한 점수를 받았음을 알수 있다. 금속물형태 핵연료의 경우, 비교적 전 항목에서 고르게 점수를 받아 1위로 선정됨을 알 수 있다.

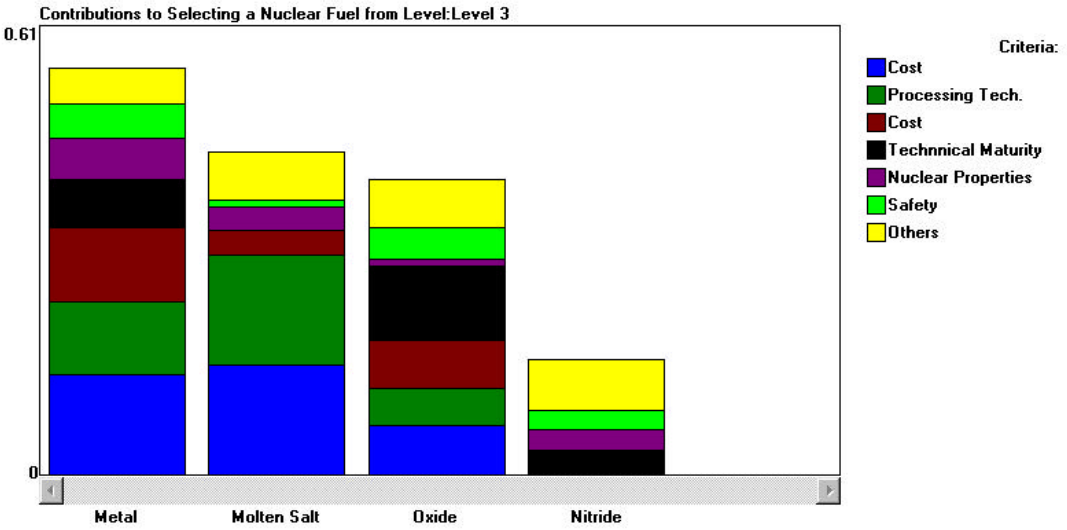

그림 4. 기여도에 대한 보다 자세한 그림.

4. 결론

본 논문에서는 핵변환로의 최적 핵연료형태를 선정하기 위해 보다 논리적이며 체계적인 의사결정모델을 개발하고 이를 활용하는 사례를 소개하였다. 이를 위해 계층구조를 통해 핵연료형태 선정에 필요한 기준 및 세부사항들이 체계적으로 도출하고 이들 항목들에 대해 4 가지 후보 핵연료형태에 대해 정량적인 상호비교를 수행하였다. 또한 이러한 상호비교가 전체적으로 일관성있게 처리되었는지를 점검하였다. 이러한 모델개발노력은 보다 정량적이고 재생산이 가능하도록(Reproducible) 하여 최종 의사결정을 보다 용이하게 할 수 있다. 개발된 의사결정모델을 통해 산화물, 금속물, 질화물, 용융염등 4가지 핵연료형태중 금속물형태의 핵연료가 핵변환로에 가장 적합한 것으로 평가되었다. 이는 금속물 핵연료형태가 다른 형태의 핵연료보다 도출된 기준 및 세부사항들을 고르게 만족시키는 것으로 평가되었다.

감사의 글

본 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기사업의 지원으로 수행되었읍니다.

참고문헌

[1] Simon, H.A. (1960), The New Science of Management Decision, Harper and Row, New York

[2] Satty, T.L. (1996), The Analytic Hierarchy Process: Multiple Decision Making, RWS Publications

[3] 황 완외 7인, KALIMER 핵연료 타당성 평가, KAERI/TR-907/97, 1997.8

[4] J.J Fletcher and J. Greenborg, Nitride Fuels for Fast Breeder Reactors: Fuel Cycle Considerations, BNML-606, UC-80, Feb. 1968

[5] H. Gruppelaar, J.L. Kloosterman and R.J.M. Konings, Advanced Technologies for the Reduction of Nuclear Waste, Netherland Energy Research Foundation ECN,1998

[6] Winterfeldt, D.V and Edwards W. (1992) Decision analysis and behavioral research, Cambridge