

## 연구로 안전 해체를 위한 스케줄링 최적화

### - Scheduling Optimization for Safety Decommissioning of Research Reactor -

김태성 \*

Kim Tae Sung

박희성 \*\*

Park Hee Seoung

이종환 \*

Lee Jong Hwan

장성호 \*

Chang Sung Ho

김상호 \*

Kim Sang Ho

#### Abstract

Scheduling of dismantling old research reactor need to consider time, cost and safety for the worker. The biggest issue when dismantling facility for research reactor is safety for the worker and cost. Large portion of a budget is spending for the labor cost. To save labor cost for the worker, reducing a lead time is inevitable. Several algorithms applied to reduce read time, and safety considered as the most important factor for this project. This research presents three different dismantling scheduling scenarios. Best scenario shows the specific scheduling for worker and machine, so that it could save time and cost.

**Keywords:** Research reactor, Scheduling optimization, Safety, Dismantling procedure

---

\* 금오공과대학교 산업시스템공학과

\*\* 한국원자력연구소

2006년 5월 접수; 2006년 6월 수정본 접수; 2006년 6월 게재확정

## 1. 서 론

방사능에 오염된 시설물의 해체작업은 예측할 수 없는 방사능의 출현으로 항상 사고의 위험성에 노출되어 있어 계획했던 해체 일정이 변경되어야 하고, 전체 공정의 재설계가 수행되어야 하는 등 비경제적인 작업이 수없이 반복되고 있다[1]. 방사능에 오염된 지역에서의 해체 활동으로부터 작업자의 안전성 확보와 해체 폐기물의 감량 그리고 해체 비용을 평가하기 위해 해체 정보 통합관리가 진행되고 있다. 원자력 선진국인 경우 원자력 시설의 해체에 작업자의 안전성과 해체 폐기물과 같은 경제성 문제[2]를 최적화시키기 위한 수단으로 컴퓨터를 활용한 외부 피폭선량 평가 시스템[3, 4]이나 해체 비용 평가 시스템[5, 6] 개발에 노력을 기울이고 있는 추세이다. 해체 일정과 해체 비용을 정량적으로 평가하기 위해서는 작업자 수와 해체 시간 및 해체 폐기물량을 평가할 수 있는 평가식과 가중치에 대한 정의가 선행되어야 한다[7]. 국내의 경우 원자력 시설에 대한 해체 경험이 없는 관계로 상업용 발전소를 해체한 결과 자료를 확보하여 연구로 해체에 사용할 수 있는지에 대한 타당성 검토를 진행하고 있다[8]. 해체 데이터베이스 시스템으로부터 얻을 수 있는 콘크리트 차폐체의 시설 정보는 규격이  $17,602 \times 9,906 \times 7,823 \text{ mm}^3$  이고, 밀도는 특수 콘크리트로서 수평 콘크리트 차폐체는  $3.5 \text{ ton/m}^3$  이며 나머지는  $2.5 \sim 2.7 \text{ ton/m}^3$  이다. 방사능 정보는 총 방사능의 경우  $3.3 \times 10^9 \text{ Bq/m}^3$  이고 총 비 방사능의 경우  $3.84 \times 10^8 \text{ Bq/m}^3$  이다. 콘크리트 차폐체에 함유된 핵종으로는 Na-22, Mn-54, Fe-55, Co-60,  $\text{Pm-152}$ , 그리고 Eu-154등이 있는데 이 중 주 핵종은 Fe-55와 Eu-152로써 가동 정지 후 9개월 경과 시 총 방사능은 각각  $1.4 \times 10^7$  로 되어 있다. 이 데이터는 현재 연구로 2호기에 대한 시료 분석 자료가 없기 때문에 노형이 유사하고 최대출력이  $250\text{kW}$ 로서 연구로1호기와 동일한 영국의 연구용 원자로인 ICI원자로의 콘크리트 방사화 자료를 이용한다[1].

본 연구의 목적은 오염된 원자력 시설물을 해체하는데 주요 이슈인 해체 일정과 해체 비용 그리고 안정성을 고려한 최적의 해체 방법론을 제시함에 있다. 스케줄링을 함에 있어 다음의 3가지 사항을 고려하였다. 첫째는 자원을 충분히 고려한 계획수립과 둘째는 일정 최적화를 위한 다양한 규칙을 적용하였으며 셋째는 시나리오 분석을 통한 일정 계획을 비교 분석하였다.

## 2. 차폐체 해체 요구사항

### 2.1 피폭량 정의

해체 작업 시 작업자가 받는 피폭량을 최소화 시키고 나아가 해체 일정 및 해체 폐기물량을 줄이기 위한 방법으로 오염된 해체 시설물의 방사능 재고량 산출 및 농도별 분포를 입체적으로 가시화 시킬 수 있는 연구가 필요하다. 연구로 및 원자력 발전소 해체에 필

수적으로 요구되는 것이 방사화 및 표면오염 방사능 재고량 평가이다. 방사능 재고량 계산은 해체를 수행하면서 발생하는 방사능량을 예측하여 해체 작업환경의 안전성을 높이기 위한 수단으로서 그 목적이 중요하다. 중성자에 조사된 해체 대상 시설물의 방사성 핵종 농도와 방사능 재고량 산정은 원자로 운전기간에 걸친 방사성핵종의 생성과 소멸을 포함하여 많은 종류의 방사성핵종을 계산할 수 있는 ORIGEN2 코드와 계산된 방사능 자료를 활용하여 수송이론을 이용한 ANISN나 DOT/DORT 혹은 TORT 코드 그리고 MicroShield와 같은 점 선원 코드를 이용하여 계산한다[9]. 이러한 코드들은 기하학적 모델링의 한계와 선원량의 균정수화 등에서 발생하는 코드 고유의 불확실성을 포함하고 있어 콘크리트 차폐체 심층부에 존재하는 선원항을 계산하기는 어려운 실정이다. 최근에는 감마 카메라를 이용하여 오염된 시설물에 존재하는 방사선을 측정하는 기술이 개발되었으나[10] 콘크리트 차폐체 내부의 농도를 판별하지는 못하고 있는 실정이다.

## 2.2 해체 정보

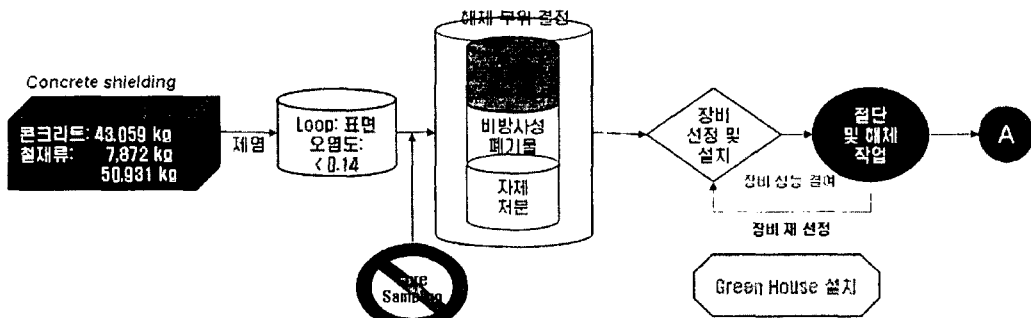
해체 일정과 직접 관련된 해체 작업자 수, 해체 장비 및 작업 시간 그리고 해체 폐기물량을 정확히 예측하기 위해서는 해체 단위 작업별 난이도와 복잡도가 포함된 수학적 함수식 및 가중치 등이 고려되어야 한다. 국내의 경우 아직 연구로 및 원자력 시설 해체와 관련한 단위 작업별 평가식과 가중치 값이 없기 때문에 일본에서 동력 시험로(JPDR)를 10년간 해체한 후 분석한 데이터<표 1>를 검토하여 일정 스케줄링을 하였다.

<표 1> 차폐체 해체 데이터

인력 분포	방사능 측정								해체 공정						총 작업 시간			
	1차	2차	3차	장비 설치	시료 채취	핵종 분석	해체 기획	장비 설치	1. 방사성 물질		2. 비방사성 물질		3. 자체처분					
									콘크리트	용기 적재	철재	콘크리트	용기 적재	철재	콘크리트	용기 적재		
원자력 초급기술자	24	17.5	16.5															
원자력 중급기술자	24	17.5	16.5									16				16		
원자력 고급기술자					4	12	8			7								
원자력 품질관리사									7			7			7			
작업반장				7	4		8	49.5	0	3	7	17	39.5	16	0	10	16	
특별인부				7	4			43.5	0	19.5	7	57.2	61	16	0	70	16	
절단공								22.5	0			15	33.5		0	40		
조력공					4			17	0			36	22.5		0	7.5		
콘크리트공					4			18.5	0	19.5		42	53		0	60		
계(hr)	48	35	33	14	20	12	16	151	0	42	28	167.2	209.5	55	0	194.5	48	1073.2

### 3. 차폐체 해체 시나리오

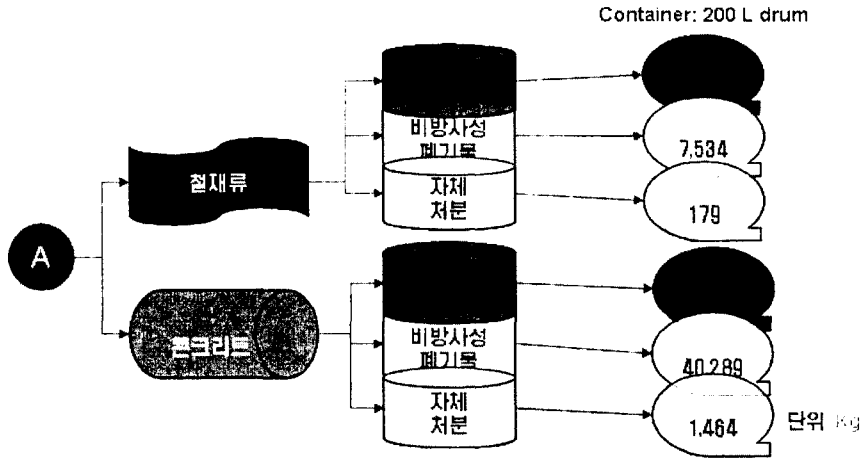
해체 대상물은 콘크리트 차폐체이다. 초기 표면 오염도 값이 5.72이기 때문에 해체하기 전 제염을 통하여 오염농도를 떨어뜨려야 한다. 농도 값이 0.14 Bq/g 이 될 때 까지 제염은 계속 된다. 제염과정에서 시간에 종속된 변수들이 많이 있지만 본 논문에서는 단순히 시간이 경과된다고만 보았다. 제염이 완료되면 대상물의 내부에 존재하는 방사능 농도의 분포를 알기 위하여 Core Sampling Test를 한다. 이 실험이 올바르게 진행 되어야만 방사성 폐기물, 비방사성 폐기물 그리고 자체처분 폐기물로 정확히 구분하여 해체 작업이 이루어지게 된다. 방사능 농도별로 구분이 확정되면 대상물을 해체하기 전에 Green House를 설치하고 해체 장비를 선정하여 Setup 시킨다. 동원된 해체 장비는 DARDA, Wheel Cutter, 그리고 굴삭기이다. 해체 장비 선정 시간과 Setting 시간이 많이 걸리는 사례가 종종 발생한다. 처음에는 DARDA 장비로 해체가 시작되고, 내부에 철재류가 있으면 절단하지 못하고 중단하게 된다. 철재류를 절단하기 위해서는 Wheel Cutter를 다시 준비하고 Setting하다 보니 많은 시간을 소비하게 된다. 준비가 되면 대상물을 다시 해체 및 절단을 하게 된다. 콘크리트 차폐체는 크게 콘크리트와 철재류로 분류되어 해체가 이루어진다. 콘크리트 차폐체와 철재류 공히 방사성 폐기물과 비방사성 폐기물 그리고 자체 처분 폐기물로 구분되어 해체가 이루어진다. 해체된 대상물을 각각 Container에 적재한다. Container의 용량은 200L Drum으로 한정하였다. 자세한 내용은 <그림1>에 나와 있다.



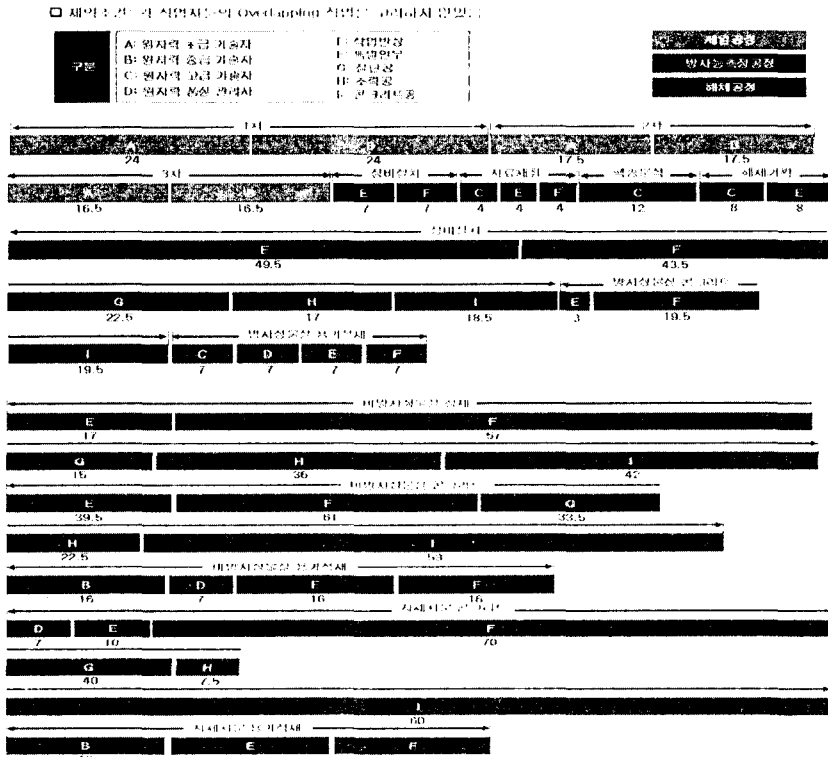
<그림1> 차폐체 해체 Diagram

#### 3.1 차폐체 해체 시나리오 I

시나리오 I의 제약 조건으로 각 작업자의 Overlapping 작업은 고려하지 않았다. <그림 2>는 1, 2, 3차에 걸친 제염공정을 거친 후 방사능 측정 공정인 장비 설치, 시료 채취, 핵종 분석, 그리고 해체 기획을 순차적으로 진행한다. 해체 기획이 끝나면 본격적인 해체 공정으로 들어 가는데 크게 3가지 공정으로 나눌 수 있다. 첫 번째가 방사성 물질 해체 공정으로 장비



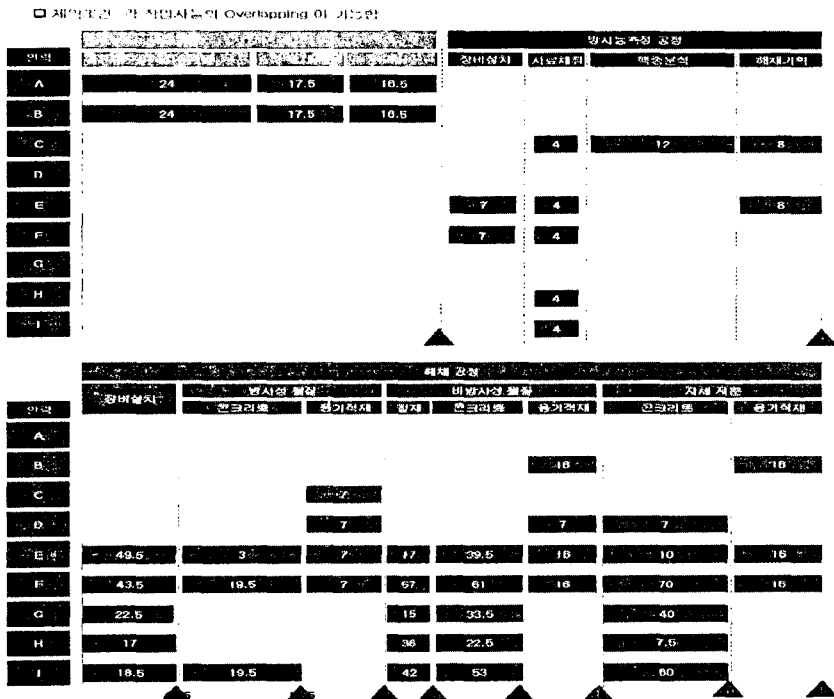
설치, 방사성 물질 콘크리트 해체 후 방사성 물질 용기 적재의 과정을 수행한다. 두 번째 공정으로 비 방사성 물질 해체로 철재와 콘크리트를 해체한 후 용기에 적재하는 과정을 수행하게 된다. 마지막 세 번째 과정은 자체 처분 과정으로 콘크리트를 해체하여 자체 처분 용기 적재함에 넣음으로써 해체를 완료하게 된다. 시나리오 I 의 과정으로 차폐체 해체를 진행할 경우 총 작업 시간은 1073.2시간이 소요된다.



<그림 2> 차폐체 해체 시나리오 I

### 3.2 차폐체 해체 시나리오 II

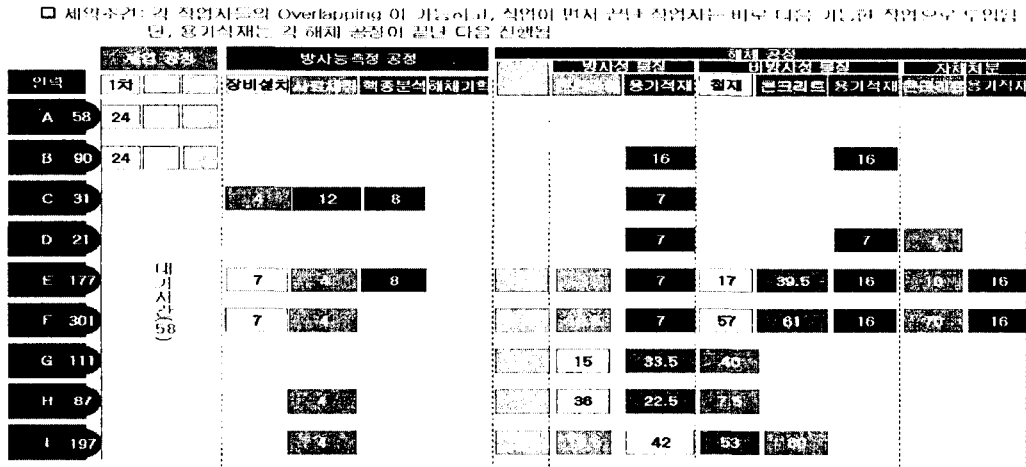
시나리오 II는 각 작업자들의 Overlapping이 고려되었다. 인력 분포를 각 1명으로 가정했으며 방사능 농도를 떨어뜨리기 위하여 제염 공정을 평균 3차까지 진행하고 방사성, 비방사성, 자체 처분으로 구분하게 된다. 장비 재설치 시 교체 시간은 방사성 물질과 비방사성 물질 그리고 자체 처분 물질 해체에 필요한 시간을 따로 분배하여야 하나 이번 경우는 재설치 시간까지 합을 내어 처리하였다. 작업의 우선순위로 첫 번째 Case로 방사성 물질, 비 방사성 물질 그리고 자체 처분 물질 순으로 해체한다고 가정하였다. Container에 적재하는 시간을 각 해체 물질에 포함시켰다. 시나리오 II의 과정으로 차폐체 해체의 과정을 진행할 경우 <그림 3>에서 처럼 총 작업시간은 385시간이 소요된다.



<그림 3> 차폐체 해체 시나리오 II

### 3.3 차폐체 해체 시나리오 III

시나리오 III은 각 작업자들의 Overlapping이 가능하고 작업이 먼저 끝난 작업자는 바로 다음 가능한 작업으로 투입이 된다. 그러나 용기 적재의 공정은 각 해체 공정이 끝난 다음 진행함을 원칙으로 한다. 시나리오 III의 과정으로 차폐체 해체 공정을 진행 할 경우 <그림 4>에 나온 것처럼 총 작업시간은 359시간으로 줄어들게 된다.



<그림 4> 차폐체 해체 시나리오 III

### 4. 결과 분석 및 결론

작업자의 Overlapping이 가능하고 작업이 끝난 작업자를 Delay 없이 바로 다음 작업에 투입하는 시나리오 III이 가장 짧은 Lead Time을 가졌다. 작업자 F에 가장 많은 작업이 할당되어 있으므로 작업자 F의 Load를 분산 시킬 필요가 있다. 또한 작업량이 많은 F와 I 작업자들의 작업을 다른 작업자들과 나눌 것인지, 작업자를 추가 투입할 것인지 경제성 분석이 필요하다. <표2>에 나와 있는 현재의 3가지 시나리오를 본다면, 시나리오 I은 순차적 진행의 원칙을 따랐으며 총 작업시간은 1073.2시간으로 완료된다. 시나리오 II는 시나리오 I 보다 총 작업시간을 64.1% 단축했으며 작업자의 Overlapping과 작업자의 Priority를 고려하였다. 시나리오 III은 시나리오 I보다 총 작업시간을 66.5% 줄여 359시간을 가지게 되어 본 연구에서 제시한 시나리오 중 최적의 작업시간을 제시하며, 작업자의 가용성 파악과 Event-Based 스케줄링의 기법을 도입한 결과이다.

<표2>시나리오별총작업시간

구분	총작업시간 (hour)	단축율 (%)	고려사항
시나리오 I	1073.2	-	● 순차적 진행방식
시나리오 II	385	64.1	● 작업자 Overlapping ● Job Priority
시나리오 III	359	66.5	● 작업자 가용성 파악 ● Event-Based Scheduling

현재 주어진 Data로 부족한 점은 각 작업자와 각 작업에 대한 Priority에 대한 정보 부족

과 각 작업 인력 당 작업 비용에 대한 정보, 그리고 각 작업자의 예상 Due Date에 대한 정보의 부족이다. 원전 해체에 스케줄링을 도입하는 이유로 첫째, 최적의 일정 계획을 통한 해체 일정 단축 및 해체 비용을 감축할 수 있다. 둘째, 자원의 현실적인 능력을 기준으로 해체 공정 계획을 수립할 수 있다. 셋째, 전체적인 해체 시스템의 관리능력을 향상시킬 수 있다. 향후 가능한 연구로 작업의 Overlapping이 가능하고 작업자의 유휴시간을 절약하여 Lead Time 단축이 가능하다. Capacity Planning을 통한 작업 및 작업자의 효율성과 타당성 분석이 가능하다. 마지막으로 작업공정 지연에 대한 대안 제시가 필요하다. 향후 연구 내용으로는 보다 세부적인 데이터를 통하여 스케줄링의 여러 가지 알고리즘, 즉, EDD (Earliest Due Date) 룰, SPT (Shortest Processing Time) 룰, LNS (Largest Number of Successors first) 룰 등을 적용하는 연구가 필요하다.

## 6. 참고 문헌

- [1] 박희성, 김성균, 이근우, 오원진, "Implementation of an Architecture for the Dismantling Digital Mock-up System", Journal of the Korean Radioactive Waste Society, 3(3)(2005) : 237-247
- [2] Michel Klein et al., "The Management of Radioactive Concrete Arising from the Dismantling of a Pressurised Water Reactor: The R&D Project on the Recycling of Radioactive Concrete", Radioactive Waste Management and Environment Remediation-ASME (2001)
- [3] Yukihiro Iguchi et al., "Development of a Decommissioning Engineering Support System of the Fugen NPS", 11th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE11-36270 Tokyo, Japan, April 20-23, 2003
- [4] Julia L. Tripp et al., "Tools for Optimal Waste and JPDR Decommissioning", WM '02 Conference (2002) : 24-28
- [5] S. Yanagihara, "COSMARD: Code System for Management of JPDR Decommissioning", J. Nucl. Sci. Technol., 30(9) (1993) : 890
- [6] Roy Manning, Jeremy Gilmour, "Decommissioning Cost Estimating the Price Approach", Waste Management Tucson AZ (2002)
- [7] Philippe et al., "Dismantling of the Hot Cell Nr 41 at the SCK-CEN using the ALARA Planning Tool VISIPLAN"
- [8] Kunio Shiraishi et al. "Data Analysis on Work Activities in Dismantling of Japan Power Demonstration reactor (JPDR)", JAERI-data/Code-98-010
- [9] R. J. Morford, "Source Term and Shielding Calculations to Support Decommissioning of Shippingport Reactor", WHC-SA-0206, Westinghouse Hanford Company (1988)



- [10] Le Goaller C., Costers JR., "On Site Nuclear Video Imaging", Waste Management Tucson AZ (1998)

### 저 자 소 개

김 태 성 : 금오공과대학교 산업시스템공학과

박 희 성 : 한국원자력연구소

이 종 환 : 금오공과대학교 산업시스템공학과

장 성 호 : 금오공과대학교 산업시스템공학과

김 상 호 : 금오공과대학교 산업시스템공학과

### 저 자 주 소

김 태 성 : 경성북도 구미시 양호1번지 금오공과대학교 산업시스템공학과

박 희 성 : 대전광역시 유성구 덕진동 150 제영해체기술연구개발부 / 핵연료 기술개발단  
책임연구원

이 종 환 : 경성북도 구미시 양호1번지 금오공과대학교 산업시스템공학과

장 성 호 : 경성북도 구미시 양호1번지 금오공과대학교 산업시스템공학과

김 상 호 : 경성북도 구미시 양호1번지 금오공과대학교 산업시스템공학과