

Westinghouse 세분화 기술 및 프로젝트 경험

Niklas Bergh

미국 웨스팅하우스 D&D 사업개발 책임자



여러분 안녕하세요! 발표를 들어주셔서 감사합니다. 웨스팅하우스 절단해체 기술과 프로젝트 경험에 대해서 말씀드리겠습니다. 먼저 웨스팅하우스 분류 틀과 절단해체, 실제 프로젝트와 관련한 준비 작업, 인적교류, 현장업무와 최근에 진행한 프로젝트 경험에 대한 업데이트 사항을 전달하고 마지막으로 배운 교훈에 대해서 말씀드리면서 발표를 마치겠습니다.

고 있습니다. 매년 원자로가 정지되고 해체가 되고 있습니다. 이게 아주 좋은 많은 기회라고 할 수도 있지만 공급자에게는 제품과 서비스를 개선시키고 발전시켜야 하는 도전적인 상황이라고 할 수가 있습니다. 전 세계적으로 일어나는 일이라서 국가마다 고유의 상황과 문화 및 규제가 있기 때문에 이것을 이해하고 준수하려면 공급자가 상당한 유연성과 적응력을 갖추어야 할 것입니다.

Introduction

여러분 잘 아시다시피 해체시장은 갈수록 커지

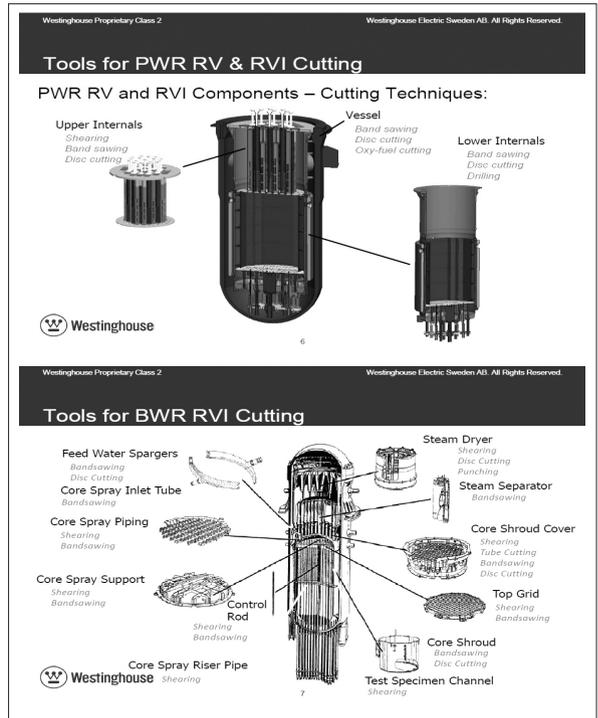
원자로 내부용기 절단해체

첫 번째로 절단, 내부용기 절단에 대해서 이야기

를 하겠습니다. 내부용기 해체의 첫 번째 현장작업 중 하나이며 해체 프로젝트에서 가장 중요한 작업이기도 합니다. 내부용기 절단해체에 대해서 말씀을 드릴 예정이나, 자세한 설명은 할 시간 많이 부족해 내년에 추가 설명 드리도록 하겠습니다.

내부구조물 절단해체 프로젝트는 프로젝트 관리로 구성되어 있고, 중요한 준비작업인 절단 패키지 계획, 절단장비 설계, 그리고 장비를 제조하고 시험을 거쳐서 현장에서 활동으로 연결되는 것까지 구성이 되어 있습니다. 절단, 패키지 용기절단 등 조작들을 처리 및 청소 이후에 작동해제 하는 것이 포함됩니다. 웨스팅하우스는 1985년부터 가압경수로(PWR), 비등경수로(BWR), 가스냉각로(GCR) 등 모든 노형에 대한 공인된 경험을 가지고 있습니다. 그래서 프로젝트에서 배운 경험들을 여러분들과 나누고자 합니다. 또 모든 종류의 절단장비들도 사용을 했는데, 각각 다른 적용을 보이는 플라즈마, 아크커팅, 연마제, 워터젯, Oxyfuel, MDM, 기계적 (mechanical) 절단 등 접근법들을 보유하고 있습니다. 나열한 접근법과 전략에 대해 설명을 하겠습니다.

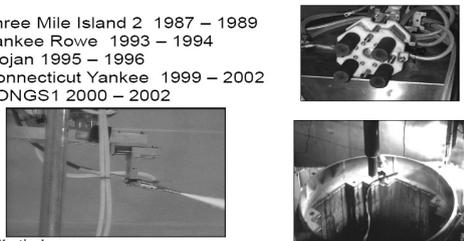
PWR 내부용기는 대부분 기계절단법을 사용합니다. 한국에서도 사용이 되겠지만 그 상황에 따라서 band sawing, disc cutting 등이 있습니다. 상부 내부용기를 위해서는 band sawing 혹은 disc cutting이 필요합니다. 용기 자체는 물론 발전소 형상에 따라서 다르겠지만 band sawing, disc cutting, 그리고 Oxy-fuel cutting을 사용합니다. 그리고 Oxy-fuel cutting 같은 경우에는 다른 방식



[그림 1] 가압경수로, 가압중수로 원자로 내부용기 절단을 위한 도구보다 훨씬 더 빨리 자를 수 있고 또 RPB 같은 종류는 건조한 상태로 절단할 수 있기 때문에 사용됩니다. 그리고 BWR 같은 경우에는 여러 가지 다른 컴포넌트를 가지고 있습니다. 그래서 웨스팅하우스에서는 각각 다른 기기별로 사용할 수 있는 다른 절단법을 적용하고 있습니다. 한국도 마찬가지로 여러 가지 방식에 따라서 다른 절단법을 사용할 수 있을 것으로 예상합니다. 2000년 초반, 북유럽 내에서 진행한 현대화 프로젝트 경험을 가지고 있고, 대부분이 Power operator, 설비개선을 위한 절단 등의 경우가 있었습니다. 지금 현재 해체시장이 훨씬 더 커지고 여러 가지 활동이 많이 이루어지고 있습니다.

Non-Mechanical Methods: US PWR References

- Three Mile Island 2 1987 – 1989
- Yankee Rowe 1993 – 1994
- Trojan 1995 – 1996
- Connecticut Yankee 1999 – 2002
- SONGS1 2000 – 2002



Westinghouse

A Tool for Every Task

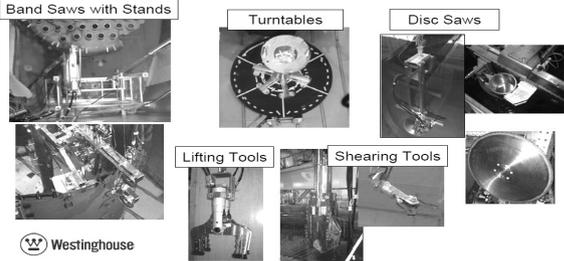
Band Saws with Stands

Turntables

Disc Saws

Lifting Tools

Shearing Tools



Westinghouse

Mechanical Cutting Segmentation Technology Advantages

- No contaminated debris on the water surface and no airborne gases are produced
- Full visibility in the water during the whole segmentation
- Cutting debris sinks by gravitation to the pool bottom and stays there
- The debris is easy to collect with different cleaning devices after the segmentation is finished
- Only a small amount of secondary waste
- Almost all thicknesses and materials can be cut
- Safe, optimized and tested cutting equipment requiring minimal service
- Cutting technology is well suited for all reactor types

Westinghouse

Mechanical Cutting: Process Control & Monitoring

- Remote controlled
- Cameras
- Displays
- Good visibility



Westinghouse

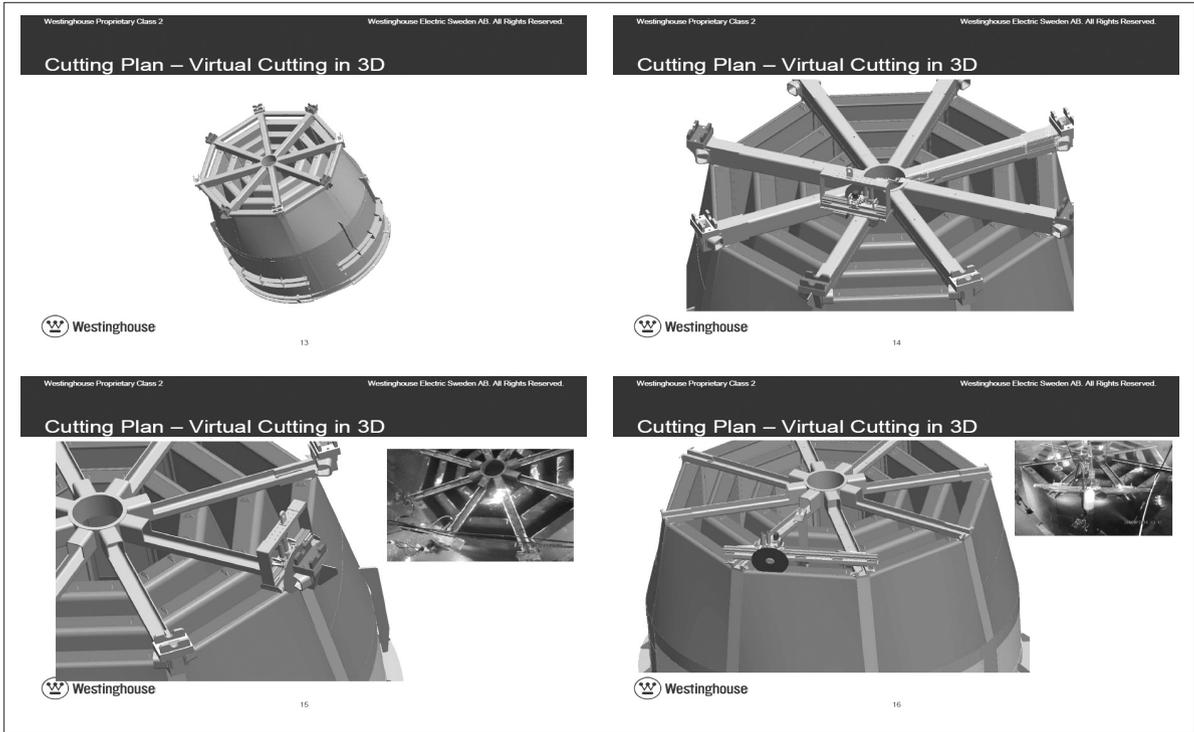
[그림 2] 비기계적인 방식 및 기계적인 절단 과정

웨스팅하우스는 1980~90년대 미국에서 비기계적인 방식을 사용한 경험도 있습니다. 비기계적 절단의 장점에 대해 발표하겠습니다. 기계적, 일부 어플리케이션에 열절단이 적합한 곳도 있습니다.

기계절단의 툴 박스를 보시면, 각각의 어플리케이션별로 턴테이블이 있는데, 이게 아주 중요한 부분입니다. 내부용기 및 턴테이블을 조절하면서 절단을 하게 됩니다. Band sawing는 아주 유용한 방법으로서 대부분의 내부용기는 Band sawing 절단이 가능합니다. 그 다음에 Disc sawing 절단 방법은 조금 더 작아서 사용하기가 편리합니다. 또한, Shearing tool이 있는데, 일부 어플리케이션에 가위처럼 사용하기에 편리합니다. 또 리프팅 인양도

구도 매우 중요합니다. 부품을 드는 것뿐만 아니라 절단 후 떨어지지 않게 붙잡고 있는데도 인양도구가 필요합니다. 아주 중요한 도구입니다.

웨스팅하우스에서 기계절단을 사용 이유는 오염된 잔해물이 바닥 표면에, 물 표면에 있지 않기 때문입니다. 그리고 수인성 가스가 생성되지 않습니다. 절단이 이루어지는 용기 속 환경이 거의 운전 중일 때만큼 상태가 좋기 때문에 추가적인 오염이 없습니다. 절단이 물속에서 전부 이루어지기 때문에 잔해물도 바닥으로 중력 때문에 떨어지게 됩니다. 또 기계적 절단의 장점은 전체 절단해체 중에서 가시성 확보가 매우 뛰어나다는 것입니다. Operator들이 계속해서 이 장비로 절단을 하면서 모든 활동



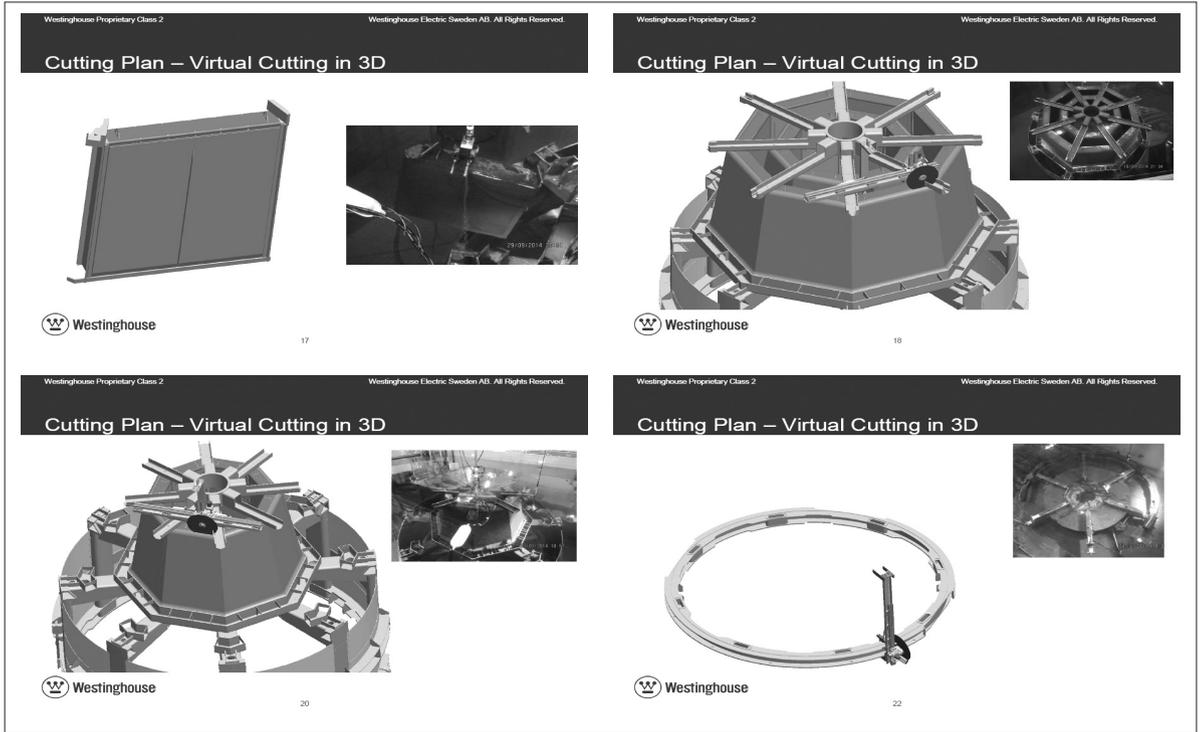
[그림 3-1] 단계별 절단 계획

을 눈으로 볼 수가 있습니다. 아주 선명하게 물속에서 작업하는 것을 볼 수 있습니다. 그리고 절단 후 다양한 도구를 이용해서 잔해물 수거도 가능한데, 작동해제 단계 예시도 나중에 보여드리겠습니다. 그래서 2차적인 폐기물 디스크가 없습니다.

그리고 모든 두께, 자재뿐만 아니라 BWR, PWR 등 노형에 관계없이 무엇이든 절단계획만 잘 세우면 기계적인 절단도구를 사용할 수가 있습니다. 그리고 안전하게 최적화되어 시험을 거친 절단장비들이기 때문에 서비스도 최소한으로 필요로 하며, 상황에 맞게 바로바로 적용될 수가 있습니다. 절단해체를 할 때 전부 원격으로 진행을 합니다. 그래서 ALARA를 지키기 위해서 하이위터필러를 사

용을 하는데, 각각 다른 장비를 원격조정(remote controlled)하고 기계 앞에 서서 모든 기계를 조작하게 됩니다. 물속이지만 카메라를 사용하기 때문에 가시성을 확보하여 훨씬 더 정확하게 모든 것을 볼 수가 있습니다.

다음은 전형적인 프로젝트의 준비 작업을 설명드리겠습니다. 처음 절단계획을 가상절단 3D 그래픽 모델로 만듭니다. 그 다음에 가상으로 커팅을 해 봅니다. 어느 쪽으로 절단해야 될지를 보는 것입니다. 예로 가져온 것이 BWR의 집기건조기입니다. 어떤 장비를 사용하고 어떻게 절단을 해야 되는지를 생각하게 되는 것입니다. 제일 처음 그래픽 모델을 만듭니다. 실제로 이제 작업을 진행하는 장면도



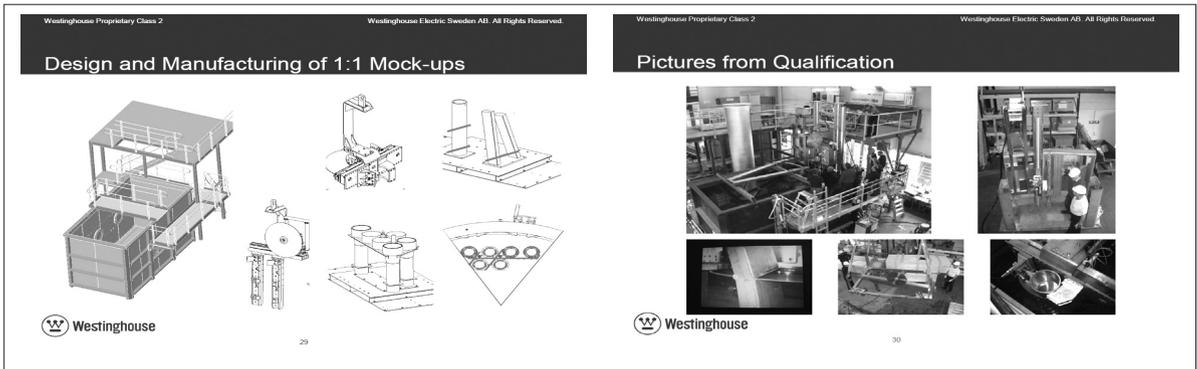
[그림 3-2] 단계별 절단 계획

[그림 3-1]과 [그림 3-2]를 보면 알 수 있습니다. 모델과 실제작업이 거의 같은 것을 볼 수가 있습니다. 해체가 진행되었는데 잘라진 부분이 있고 다음에는 조각조각 잘라지게 되고 잘려진 조각들은 제거가 됩니다.

실제로 프로젝트가 2년 전에 시작했던 것인데, 어떻게 됐는지 보면 바닥에 링만 남은 상태입니다. 이런 절단계획을 세우면 패키징 계획이 아주 잘 뒤따라옵니다. 입체적으로 패키징해서 사용되는 용기 수를 최소화하고 또 용기의 규격이 얼마나 큰지, 그리고 또 얼마나 많은 용량을 적재할 수 있는지, 그리고 또 방사선 부분도 고려를 해야합니다. 그래서 핵종이 얼마나 많은지, 그리고 용기 안에 허가된 방

사능양이 충분한 건지 등을 다 확인합니다. 이런 사항들을 준비 작업에 다 끝내게 됩니다. 그래서 절단을 어떻게 할지 포장을 어떻게 할지까지 계획을 세우게 되는 것입니다.

그리고 패키징을 할 때 계획을 세우게 되면 효율성을 강화할 수가 있습니다. 작은 면을 절단하게 되면 더 많이 시간이 걸리고 비용도 많이 들어갑니다. 비용이 올라가게 되는 것입니다. 그래서 좀 더 압축할 수 있는 가능성이 있는지 볼 수가 있고, 그 다음에 이것을 하는데 얼마나 사용되는지, 추가적으로 압축하는 것에 대해 비용이 얼마나 들어가는지, 아니면 용기는 저장이나 수송이나 아니면 또 재포장 하는데 리스크는 무엇인지 고려하여 가성비를 분



[그림 4] Design and Manufacturing of 1:1 Mock-ups

석합니다. 저희가 하는 준비 작업에 포함되어 있다고 할 수가 있습니다.

다음에 커팅하고 패키징 플랜이 다 정해지면 장비를 설계하고 규격에 맞게 제작하게 됩니다. 그래서 3D 모델에 따라 특정 규격에 맞게 제작이 됩니다. 웨스팅하우스는 교육시설을 보유하고 있습니다. 스웨덴에 있는 베스트볼슨에 있습니다. 여기에서 장비뿐만 아니라 FAT나 운전원 교육을 시행하고 있습니다. 경험이 뛰어난 사람들도 있지만 또 현지분들도 계시고 협력사 직원들도 있기 때문에 모두 다 여기에서 교육을 받을 수가 있습니다. 장비들을 어떻게 다루는지 카메라 사용법이라든지 여러 가지 다른 절단장비들 disc saw나 band saw, 아니면 shearing, compaction 등 이런 훈련들을 다 여기에서 교육을 받을 수가 있습니다.

또한 1대1 목업을 제작해서 저희가 교육을 하는데, 아주 새롭거나 복잡한 부품이 생기게 되면 실물 사이즈 목업을 제작해야 됩니다. 이유는 고객사 혹은 규제기관에서 입회해서 봐야 된다는 규제사항이 있을 수가 있습니다. 그럴 때 이와 같은 시설에

서 FAT를 할 수가 있습니다. Qualification FAT 시험의 경우 자격시험을 보는 고객들 데리고 여기 와서 만든 목업이 어떻게 절단되는지를 볼 수가 있습니다.

이런 과정들이 다 끝나면 직접 현장으로 가서 준비 작업을 하게 되는데, 제일 처음 수조 안에 폴바닥에 고무판을 대서 폴라이너에 손상을 입히지 않도록 합니다. 또한, Turn table과 tarpaulin을 설치합니다. tarpaulin 시트로 수조 가운데를 막아서 분리한 후, 이 작업으로 인한 오염이 전파되지 않도록 저희가 tarpaulin 시트를 가운데에다 쳤습니다. 그 다음에 절단을 하게 되고, 중요한 것은 자른 절단면을 패키징을 해서 Insert basket에 넣는 것입니다. 이것을 최적화된 계획에 따라 물속에 넣고 적재한 다음에 인서트를 끌어올린 다음에 실딩벨을 덮은 다음, 마지막 용기에 담아서 건조 후 제거하게 됩니다. 동시에 이와 함께 오염관리와 최종 클리닝도 해야 합니다. 정화시스템을 사용하는데, 만약에 발전소에 정화시스템이 있으면 Pool filtration을 사용합니다.

절단 캠페인이 끝나고 나면 많은 칩들이 떨어져 있는데, 이것들을 수집해서 용기에 수거하게 됩니다. 95%는 이런 식으로 저희가 수집한 후 나머지 5%는 특수진공청소기를 사용해서 수거하게 됩니다. 그 다음에 저장조의 방사능 준위도 다 측정해서 정상범주에 들어가는지 확인을 합니다. 전체적인 절단공정이 끝나면 툴 및 장비를 제거를 하고 장비를 현장에서 제염을 한 이후 방사능 준위를 낮춰서 수거합니다.

웨스팅하우스 프로젝트 소개

그러면 지금부터는 최근에 있었던 웨스팅하우스 프로젝트들을 소개해드리겠습니다. 첫 번째 말씀드리고 싶은 것은 슬로바키아 보후니체 발전소입니다. 2개의 VVER 440 2기가 있었습니다. 전체 주순환 펌프, 냉각계통, 주순환펌프의 절단을 다 포함했습니다. 격납고 내에 큰 프로젝트라고 할 수 있습니다. 격납용기 전체에 RPB와 내부용기가 포함되어 있습니다. 지금 이 아래에 수직으로 증기발생기가 호기당 6개가 있었습니다. 물이 없이 어떻게 절단할 건지에 대해서 연구를 하다가 증기발생기의 상고중심 부분을 이용하기로 했습니다. [그림 5]에 나와 있는데, 2개의 수조로 바꿨습니다. 그래서 물을 넣어서 수조로 만들어서 이 풀 내에서 내부용기 절단을 위해 사용했습니다. 메인 시스템에서 RPB를 분리시키는 프로젝트는 아주 흥미로운 프로젝트인데 지금도 계속 진행 중입니다.

미국에서 진행되고 있는 프로젝트는 CPWR



[그림 5] Project experience

478MW급의 Fort Calhoun입니다. 1973년부터 2016년까지 상업운전을 했습니다. 모든 원자로 용기와 내부용기를 수중에서 기계절단 해체하고 있고, 이제 막 시작을 해서 준비작업 단계 중입니다. 내년엔 현장에 가서 이제 작업을 시작하게 될 것입니다. 그 다음에는 RPB 절단해체를 시작할 예정입니다.

마지막으로 말씀드리고 싶은 것은 저희 프로젝트 경험은 아주 흥미로운 노형인 스웨덴 Agesta 발전소입니다. 여기는 스톡홀름에서 아주 가까운 거리에 있으며, 천연 우라늄을 이용하는 중수로 원자로입니다. 이 원자로는 1974년부터 정지되었습니다. 아주 오랫동안 정지가 되어 있었는데, 지금 중

Westinghouse Proprietary Class 2 Westinghouse Electric Sweden AB. All Rights Reserved.

Project Experience – Fort Calhoun, USA

- CE PWR 478 MWe
- Operated 1973-2016
- Scope of Work: All RVI
- Customer: EnergySolutions
- Project duration: 2020-2022
- Technical concept: Mechanical underwater segmentation
- Follow-on project: RPV segmentation



Westinghouse

[그림 6] Project Experience

수와 핵연료는 제거가 되었습니다. 여기도 물이 없는 곳이어서 고준위 부품들을 어떻게 처리할지 고민을 하게 되었고 물을 끌어다가 원자로 옆 RPB 자체를 이용해서 내부에서 절단하기로 결정을 했습니다. 기계적 절단으로 했습니다. 이유는 봉인이 되어 안전하고 또 작은 규모로 유연하게 장비를 사용할 수 있기 때문이었습니다. 그래서 열절단을 하게 되면 선량이 너무 높아지기 때문에 기계적 절단을 하게 된 것입니다. 내년부터 시작이 될 것입니다.

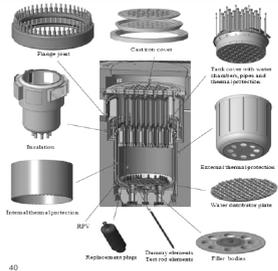
여기에서 배운 교훈은 기계적 절단이 RPB, RVR 둘 다 아주 잘 맞는 툴이다. 그리고 웨스팅하우스에서 사용하고 있는 작고 유연한 도구 및 장비들이 아주 빠르게 현장에서 원하는 대로 적용이 될 수 있는 것, 그리고 또 추가 스페어 부품이 있기 때문에 언제든지 교체가 가능하다는 점이 장점입니다. 그래서 프로젝트를 전체 중단할 필요 없이 잘 진행이 될 수가 있습니다. 그리고 폐기물 용기를 쓸 때는 큰 용기가 더 효율적으로 패키징이 가능한 점, 그리고 작업시에 가시성도 매우 중요하기 때문에 기계적

Westinghouse Proprietary Class 2 Westinghouse Electric Sweden AB. All Rights Reserved.

Project Experience – Ägesta, Sweden

Scope of Work

- Cast Iron Cover
- Tank cover with water chambers, pipes and thermal protection
- Flange joint
- Internal thermal protection
- External thermal protection
- Replacement plugs (29pcs)
- Dummy- & Test rod elements (4pcs)
- Water distributor plate
- Filler bodies
- Reactor pressure vessel with Insulation
- Control rods (3pcs)



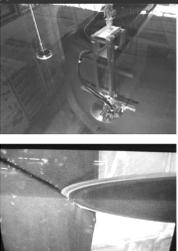
Westinghouse

Westinghouse Proprietary Class 2 Westinghouse Electric Sweden AB. All Rights Reserved.

Project Experience – Ägesta, Sweden

Technical Concept

- Mechanical cutting technology
 - Proven and used in many previous project
 - Small flexible tools, easy to adapt
- Use water as shielding material/medium
 - High surface dose rates on many components
 - Keep the dose to the personnel as low as possible, ALARA
 - Parallel project ongoing at Ägesta site
 - Less risks for unforeseen stops
 - Tasks less complex and faster
 - Visibility
 - Lower dose rates on equipment



Westinghouse

[그림 7] Project experience

절단의 혜택이 매우 높은 점이 교훈이었습니다. 또한, 준비가 아주 중요합니다. 3D 모델을 통한 절단과 패키징 플랜을 미리 세우는 것이 성공적 해체절단의 열쇠라고 할 수가 있습니다. 계속해서 절단해체 작업을 진행하다 보니까 고객과의 커뮤니케이션이 아주 중요하다는 것을 알게되었습니다. 이를 통해서 협력과 상호신뢰를 만들어낼 수가 있고, 이로 인해서 결국 성공적인 프로젝트로 이어지는 것을 배우게 되었습니다. 경청해주셔서 감사합니다. 내년에는 꼭 여러분들 직접 만나뵐 수 있기를 기대합니다. 나중에 질문을 받을 수 있는 시간이 되면 좋겠습니다. 감사합니다. **KIIF**