

2024년도
에너지기술개발사업
연구개발과제기획보고서

현장수요대응 원전
첨단제조기술 및 부품·장비
개발 사업

목 차

I . 동향분석	1
1. 개 요	
2. 산업·기술동향	
3. 특허동향	
4. 표준화동향	
5. 정부R&D 지원현황	
6. 시사점	
II . 기획대상연구개발과제 도출	14
1. 연구개발과제기획방향	
2. 개발위험 관리방안	
3. 기획연구개발과제 품목개요서	

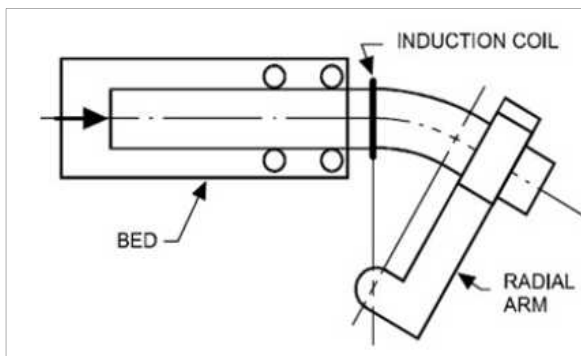
1. 개 요

□ 개 념

○ 유도가열 벤드(곡관) 제작 기술

- 유도가열 벤딩은 직관의 일부를 직접 유도가열 하면서 벤딩(굽힘가공) 하여 직관과 곡관을 일체형으로 제작함으로써 직관과 곡관 사이의 용접부를 없애 배관계통의 용접부를 최소화하는 기술임.
- 유도가열 벤딩 적용시 배관계통에서 용접부를 최소화할 수 있기 때문에 제작·시공 기간 단축을 통해 건설비 저감이 가능할 뿐만 아니라 가동중 검사(ISI) 개소의 대폭 감소를 통해 운영비를 줄일 수 있는 기술임.

※ 유도가열벤딩 원리: 직관을 유도가열코일을 이용하여 상변태점 이상까지 가열 후, 배관에 추진력을 가하면 가열코일로 가열된 부분에서 국부적으로 소성변형이 발생하게 되며, 레디알암(Radial Arm)으로 설정된 굽힘반경에 따라 요구하는 각도로 굽힘 가공함.



[그림 1] 유도가열벤딩 원리 및 공정

□ 주요 이슈

○ 유도가열 벤딩 장점

- (배관 건전성 향상) 배관계통에 유도가열 벤드를 적용할 경우, 곡관과 직관 사이의 용접부를 없앴으로 배관의 건전성 향상에 기여함.

- (배관 설계 유연성 향상) 임의의 굽힘각과 곡률반경을 갖는 비표준 곡관을 제작하여 설치할 수 있으므로 배관 설계와 배치의 유연성이 크게 향상됨.
- (시공 기간 단축) 용접부 감소로 인한 배관 시공 시 용접 시간 단축뿐 아니라 용접 후 비파괴검사 시간을 단축하므로 배관의 제작 및 시공 시간 단축과 낮은 건설단가 확보가 가능함.
- (운영비 절감) 운영 중 용접부에 대한 가동중검사(ISI) 비용 감축뿐 아니라 작업자의 방사선피폭을 낮출 수 있음.

* 미국 DOE(Department of Energy) MPR-2610에 따르면 용접 개소당 약 \$8,100 절감 (2004년 발행본에는 개소당 \$5,000; 2004년 대비 2023년 물가상승(1.62배) 반영)

※ 이러한 장점으로 인해 유도가열 벤드는 선박, 해양, 화력발전소 배관 계통에 다수 적용되고 있으며, 원전 배관계통에도 일부 적용되고 있음.

○ SMR(small modular reactor) 배관 설계 특성

- SMR은 일체형 모듈 설계로 원자로냉각재배관은 제거되는 반면 원자로 집합체에 직접 연결되는 다수의 안전등급 계통 배관이 여전히 존재함
- SMR 경우, 비상계획구역(EPZ: emergency planning zone)의 크기가 SMR 발전소의 크기에 해당하므로 SMR을 도심지역에 위치시키기 위해 SMR 발전소 크기를 최소화하여야 함
- 최소화된 공간에 배관이 복잡한 구조로 배치되므로 용접부에 대한 비파괴검사 수행이 어려움.
- 또한, 발전소 내 정비공간 확보, 열피로 최소화 등 배관 배치의 유연성 확보가 필요하므로 비표준 형상(굽힘각, 곡률반경 등)의 곡관 적용이 요구됨.
- SMR은 대형 원전에 비해 짧은 제작 납기와 낮은 건설단가 확보가 중요한 설계 고려 인자임.
- 따라서, SMR 배관의 설계 특성(배치 유연성 확보 및 비파괴검사 어려움 등)을 수용하고 시공 기간 단축과 원가절감을 통한 수출 경쟁력 확보를 위해 유도 가열 벤드의 적용이 필요함.

○ SMR 적용을 위한 유도가열 벤드 제작 기술

- 상용 원전에 적용되고 있는 대구경/대반경(1.5DR 이상) 곡관에 대한 유도 가열 벤드 제작 기술은 국내·외적으로 확보되어 있으며, 일부 원전의 배관계통에 유도가열 벤드가 적용됨.
- 그러나, SMR 배관의 설계 특성상 대형 상용원전의 배관과는 다른 굽힘 각과 곡률반경, 그리고 직경과 두께를 갖는 곡관의 사용이 예상됨.
- 따라서, 원전 배관에서 요구하는 곡관에 대한 허용기준을 만족하면서 SMR 배관에 적용 가능한 유도가열 벤드의 제작이 요구되며, 이를 위한 최적의 공정 개발과 기술의 표준화가 필요함.

2. 산업·기술 동향

□ 해외 동향

- 현재 전 세계적으로 약 70개의 다양한 SMR이 경쟁적으로 개발되고 있으며, 우리나라도 2030년대 세계시장 선점을 위한 혁신형 SMR (i-SMR)을 개발 중임.
- 현재까지 유일하게 규제기관의 표준설계인증을 취득한 뉴스케일파워 (NuScale Power Corp.)의 경우, 발전단가 과다로 인해 진행 중인 사업을 취소한 사례가 있음. 따라서, 대형 상업 원전 대비 SMR의 낮은 경제성을 극복하기 위한 기술개발이 전 세계적으로 진행 중임.
- 경제성 향상의 일환으로 SMR의 공기 단축 및 단가 인하를 위한 다양한 형태의 첨단 제조 및 제작 기술과 시공 방법이 개발되고 있는데, 이러한 기술 중 하나가 SMR 배관계통에 기존의 엘보 피팅류 대신 유도가열 벤드를 적용하는 것임.
- 유도가열 벤딩에 대한 기본적인 기술은 이미 개발되어 선박, 해양, 발전 설비에 적용되고 있으며, 원전 배관계통에도 일부 적용되고 있음.
 - 독일은 1990년대 가동 중인 BWR형 원전의 배관 교체 시 용접부의 IGSCC(inter-grannular stress corrosion cracking) 민감도를 낮추고 비파괴 검사 부위를 줄이기 위해 엘보 피팅류 대신 유도가열 벤드를 적용함.

- 일본의 경우에도 가동 중인 BWR형 원전의 배관 교체시 용접비 절감과 용접부의 SCC(stress corrosion cracking) 발생 가능성을 낮추기 위해 유도 가열 벤드를 적용한 바 있음.
- 대만의 경우, Lungmen 원전(BWR)의 4~16인치 배관계통(1,176 개소)에 곡률반경이 1.5DR인 유도가열 벤드가 적용된 바 있으며, 중국은 Haiyang 1,2호기와 Sanmen 1,2호기 배관계통에 유도가열 벤드를 적용한 것으로 알려짐.
- 미국 DOE(MPR-2610, Rev.2)는 신규원전(ABWR, ESBWR, ACR-700 등) 건설 시 적용 가능한 첨단 기술 중 하나로 유도가열 벤딩 기술을 제시함.
- 미국, 독일, 일본 등에서는 유도가열 벤드의 확대 적용을 위한 기술개발이 지속적으로 진행되고 있으며, 관련 사례와 현황을 살펴보면 다음과 같음.
 - 글로벌기업 GE Venova에서는 2022년부터 유도가열 벤드의 적용을 위해 해당 기술사양서를 발간하고 적용 중임.
 - 독일의 AWS Schäfer Technologie GmbH는 유도가열 벤딩 기술개발을 통해 유도가열 벤드의 곡률반경을 1DR(직경의 1배) 까지 줄이는데 성공함. 뿐만 아니라 진원도(Ellipticity: 단면의 둥근 정도) 최소화, 3차원 벤딩, 그리고 다곡으로 벤딩하는 기술을 개발하여 특허를 확보함. 그러나, 원전 배관에 적용을 위한 요건인 두께 감소율에 대한 자료는 공개하지 않음.
 - 일본의 DAI-ICHI High Frequency사 역시 곡률반경이 1DR인 유도가열 벤드 제작에 성공하고, 두께 감소율 최소화를 위한 연구 개발을 진행하고 있음. 그러나, 기술개발을 통해 달성된 두께 감소율은 공개하지 않고 있음.
 - 미국의 Shaw Group과 벨기에의 Equans는 곡률반경이 1.5DR인 곡관을 유도가열 벤딩으로 제작하여 발전 플랜트에 적용함.
- 해외 선진 제작사들은 최근까지 진보된 유도가열 벤딩 기술을 적극적으로 개발하고 있으나, 세부적인 기술 사항은 공개하지 않고 있으며 기술 이전도 기피하는 실정임.

□ 국내 동향

- 국내에는 유도가열 벤드를 제작하여 공급하는 여러 업체가 있으며, 각 업체별로 유도가열 벤딩 시 나타나는 두께 감소율을 최소화하고 진원도를 최적화하기 위한 기술개발을 수행함.
- 이러한 기술개발 결과를 바탕으로 유도가열 벤드를 제작하여 선박, 해양, 화력발전소 등에 적용함.
- 원전에도 신울진 1,2호기부터 일부 비안전성 배관계통에서 엘보 피팅류를 대체하기 위해 유도가열 벤드가 적용되었으며, 신한울 3,4호기에도 적용 예정임.
- 현재 개발 중인 i-SMR의 경우 아직 표준설계 단계로 배관의 배치나 형상이 구체화되지 않은 상태임.
- SMR의 기본적인 설계 특성 (배관 형상/배치의 복잡성, 배관 배치의 유연성 확보 필요, 용접부 비파괴검사 한계 등)을 수용하고, 제작·시공 기간 단축과 시공비 절감을 통한 수출 경쟁력 확보를 위해서 유도가열 벤드 적용이 필요할 것으로 판단됨.
- 그러나, 현재까지 국내에서는 1DR과 같은 곡률반경이 작은 곡관이나 형상이 복잡한 다곡의 3차원 곡관 제작을 위한 유도가열 벤딩 기술은 확보되어 있지 않은 상태임.
- 따라서, 원전 배관에서 요구되는 곡관에 대한 허용기준 (두께 감소율, 진원도, 재료물성 등)을 만족하면서 SMR 배관의 설계 특성을 수용할 수 있는 유도가열 벤딩 기술개발이 필요함.

3. 특허 동향

□ 해외 동향

○ 유도가열 벤드 관련 기술 특허 동향

- 가열 온도의 변화 조건에서도 금속 막대, 튜브의 압축 굽힘 기술(Dai Ichi High Frequency Co Ltd(JP))
- 발전소 파이프 및 파이프 라인의 파이프에서 두꺼운 벽 두께와 큰 직경을 갖는 내압형 파이프의 유도 벤딩 성형(AWS SCHÄFER TECH GMBH(DE))
- 굽힘 방향이 3차원적으로 변화되는 굽힘가공 제품의 완곡각도가 높은 경우에도 효율적이고 높은 치수 정밀도로 제조할 수 있는 기술(SHANDONG CHONGSHENG METALLURGICAL OXYGEN LANCE CO Ltd(CN))
- 원전 증기발생기의 열전달 튜브를 성형하는 데 적용되는 파이프 벤딩 머신 기술(Zhangjiagang Huashun Machinery Manufacturing Co Ltd(CN)) 등이 출원되고 있음

< 해외 유도가열 벤드 관련 기술 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호 (일자)	특허명	특징
Dai Ichi High Frequency Co Ltd	JP2000153311A (1998.11.19)	Method for compressively bending metal bar and device therefor	- 금속 튜브의 압축 굽힘을 연속적으로 실행할 때 가열 온도의 변화 등이 발생하더라도 굽힘 작업이 항상 원하는 압축성에서 안정적으로 실행될 수 있는 방법. - 가열 장치로 금속 튜브의 좁은 폭 부분을 가열하면서 굽힘 압의 회전으로 굽힘 변형시키는 굽힘 방법에서, 테일 스톱의 이동 속도를 검출하고, 굽힘 압 구동 장치로 회전 속도를 제어하여 굽힘 압의 이동 속도와 회전 속도가 원하는 압축성에 대해 고정된 규정된 관계로 유지.
AWS SCHÄFER TECH GMBH	DE102015106570 (2016.11.03)	METHOD FOR INDUCTION BEND FORMING A COMPRESSION-RESISTANT PIPE HAVING A LARGE WALL THICKNESS AND A LARGE DIAMETER	- 발전소 파이프 및 파이프 라인의 파이프에서 두꺼운 벽 두께와 큰 직경을 갖는 내압형 파이프의 유도 벤딩 성형 방법. - 파이프 벤딩부에 이어지는 접속부에서 재료의 강도 값에 미치는 성형 공정의 부정적인 영향을 방지.

NIPPON STEEL CORPORATION/SUMITOMO PIPE & TUBE CO., LTD.	JP06159748 (2017.06.16)	MANUFACTURING METHOD AND MANUFACTURING APPARATUS FOR BENT PRODUCT	• 굽힘 방향이 3차원적으로 변화되는 굽힘가공을 진행하여 제조되는 굽힘가공제품을 완곡각도가 높을 경우에도, 효율적이고 뛰어난 치수 정밀도로 제조할 수 있음 • 금속재료의 표면 성상을 손상시키지 않고, 굽힘가공의 굽힘각도를 크게 할 수 있는 굽힘가공제품의 제조 방법.
SHANDONG CHONGSHENG METALLURGICAL OXYGEN LANCE CO Ltd	CN110369573A (2019.10.25.)	A kind of large-diameter steel pipe forming elbow method and device	• 대구경 강관 굽힘 및 성형 장치. • 중간 주파수 열간 굽힘 가공을 통해 두 종류의 다른 반경의 동일한 루트 강관을 굽힘 가공할 수 있는 대구경 강관 굽힘 성형 기술 및 장치. • 굽힘 성형 공정에서 각 위치의 파이프 두께가 일정하게 유지되도록 보장하고, 굽힘 가공 품질을 보장하는 경우 강관 열간 굽힘 공정 작업 효율을 개선.
Zhangjiagang Huashun Machinery Manufacturing Co Ltd	CN104475515A (2015.04.01.)	Pipe bending device of pipe bending machine applied for molding heat transferring tube of nuclear power evaporator	• 원자력 증발기의 열전달 튜브를 성형하는데 적용되는 파이프 벤딩 머신의 파이프 벤딩 장치. • 강관 양쪽 끝의 수평을 보장할 수 있으며, 굽힘 후 강관의 평행도 및 직각도의 깊이가 요구사항에 충족되도록 할 수 있음.

□ 국내 동향

○ SMR 적용을 위한 유도가열 벤드 관련 기술 동향

- 고주파 유도 가열을 이용한 벤딩 교정 장치 및 방법, 길이가 긴 소재의 벤딩 기술, 랙기어 구동장치를 이용한 고주파 유도 가열 벤딩기, 역압실린더를 갖는 파이프 벤딩장치 등이 출원되고 있음
- 관련 주요 기관은 한국전력공사, 티케이티 주식회사, 주식회사 성일에스아이엠 등이 있음

< 국내 유도가열 벤드 관련 기술 특허 출원/등록 현황 >

출원회사	등록/출원번호(일자)	특허명	특징
한국전력공사	10-2361210 (2022.02.07.)	고주파 유도 가열을 이용한 벤딩 교정 장치 및 그 방법	• 고주파 유도 가열을 이용하되, 벤딩 교정이 필요한 교정 대상(예, 로터, 봉강, 샤프트 등)의 가열 각도에 대한 유한요소해석(FEA) 기법을 통해 교정량 예측 모델을 도출. • 교정 대상의 필요한 부분만 가열하므로 최적으로 원형 소재를 교정. • 고주파 유도 가열 방식을 이용하나, 회전 기능을 이용하여 가열 및 냉각이 반복되기 때문에 소재 손상을 예방.

티케이티 주식회사	10-2024-002 8117 (2024.03.05.)	랙기어 구동장치를 이용한 고주파 유도 가열 벤딩기	• 행정거리가 보다 길어질 수 있음은 물론 이로 인해 벤딩하고자 하는 대상물의 전진거리도 길어질 수 있어 길이가 긴 소재 또한 보다 용이하게 벤딩. • 벤딩하고자 하는 대상물에 가해지는 압력과 전진속도를 일정하게 유지할 수 있어 벤딩된 대상물의 품질이 매우 우수함.
주식회사 성일에스아 이엠	10-1092951 (2011.12.06.)	역압실린더를 갖는 파이프 벤딩장치	• 벤딩시 인장부위와 압축부위에서의 두께감육과 증육을 제어하기 위한 역압의 부여를 위한 파이프 벤딩장치. • 추력과 역압의 보다 정밀하면서도 합리적인 제어를 통해 벤딩의 시작부와 끝단부에서의 불량발생을 줄일 수 있음.

4. 표준화 동향

□ 해외 동향

- ASME(미국기계학회, American Society of Mechanical Engineers)
 - BPVC(Boiler & Pressure Vessel Code)는 13개 섹션(Sec.)으로 구분되어 원자력 발전용과 일반산업용 보일러 및 압력용기에 대한 기준을 제공하고 있음
 - * Sec.III Rules for Construction of Nuclear Facility Components에서 원자력발전소 안전등급 기기의 설계, 재료, 제작 및 설치, 검사, 시험 요건을 규정하고 있으나, 안전등급 배관의 제작기준에서 유도가열 벤드에 대한 상세 기술요건을 제시하지 않고 일반적인 곡관의 벤딩 후 열처리 요건과 진원도, 두께 등 곡관의 형상에 대한 요건을 제시하고 있음
 - B31.1 Power Piping은 발전소, 산업 및 연구용 플랜트 등에 사용되는 배관계통의 설계, 재료, 제작, 설치, 비파괴검사, 시험, 검사, 운전 및 보수에 대한 기준을 제공하고 있으며 원자력시설의 비안전등급 배관에도 적용 가능함
 - * B31.1을 담당하는 위원회는 Interpretation을 발행하여 최소 두께를 만족하고 두께 감소율이 9.0%이하(1.5DR 기준)일 때, 원소재의 두께에 무관하게 유도가열 벤드의 적용을 허용함
- PFI(미국배관제작협회, Pipe Fabrication Institute)
 - PFI ES-24 Pipe Bending Methods, Tolerances, Process and Material Requirements은 원자력시설을 제외한 일반 사업시설에 사용되는 배관에 대해 유도가열 벤딩을 포함하여 다양한 벤딩 방법에 대한 요건을 제시함. 특히, 배관의 두께와 외경의 비를 기준으로 벤딩 방법 별로 난이도를 제시하고 있으며 ASME B31.1에서 ES-24을 인용하고 있음
- ISO(국제표준화기구, International Organization for Standardization)
 - ISO 15590-1 Oil and gas industries including lower carbon energy – Factory bends, fittings and flanges for pipeline transportation systems – Part 1: Induction bends는 수송계통 배관에 대한 유도가열 벤드 요건을 세부적으로 제시하고 있음. 유도가열 벤드에 대한 비파괴검사 요건을 명확하게 제시되어 있으며, 검증시험 절차와 공정 인자 및 필수 변수를 목록화하여 세부적으로 제시하고 있음

□ 국내 동향

○ KEPIC(전력산업기술기준, Korea Electric Power Industry Code)

- KEPIC은 ASME 코드 등을 참조하여 발행하고 있으며 원안위 고시에 따라 원자력발전소 안전등급 품목의 설계, 재료, 제조, 검사, 시험, 설치 기준으로 우선 적용되고 있고, 비안전등급 품목에도 광범위하게 적용되고 있음.
- KEPIC-MN, KEPIC-MGE는 ASME BPVC Sec.III 및 B31.1을 각각 참조 표준으로 번안하여 발행되고 있으며 기술적 내용은 참조표준과 일치함. 따라서, 안전등급 배관의 제작기준에서 유도가열 벤드에 대한 상세 기술요건을 제시하지 않음
- KEPIC-MGE는 ASME B31.1과 동일하게 PFI ES-24를 인용하고 있으므로 상세 기준을 동일하게 적용할 수 있음

5. 정부R&D 지원현황

□ 투자 동향

- 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 개발(과기부/산업부), 현장수요대응 첨단 제조기술 및 부품·장비 개발(산업부) 사업을 통하여 SMR 관련 정부 연구개발 사업 지원 중

< SMR 차세대 원전 및 원전 기자재 R&D사업 현황 >

사업명	사업목적	R&D 주요 내용	정부 예산 (백만원)
혁신형 소형모듈원자로 개발사업 (과기부/산업부)	향후 세계 원전 시장을 주도할 소형모 듈원자로 분야에서 경쟁력 있는 안전성 과 경제성을 갖춘 독자적 노형 (혁신형 SMR)을 확보 하기 위한 표준 설계 및 기술개발	•혁신형 SMR 노심/계통/종합 설계 •혁신형 SMR 혁신검증/안전성 향상/ 경제성 향상 등 혁신기술개발 •혁신형 SMR 노심부품 소재 혁신제 조기술개발 등	274,720
현장수요대응첨단 제조기술 및 부품개발 사업	국내 원전 산업계 현장 수요를 중심으 로 차세대원전, 계속운전 등에 필요한 첨단 제조공정 및 부품·장비 초격차 기술개발	•초대형 PM-HIP 핵심 제조공정기술 개발 •초대형 전자빔 용접(EBW) 기술 및 공정 개발 •초광폭/고정밀 다이오드 레이저클래 딩(DLC)기술 및 공정 개발 등	20,300*
합 계			295,020

* 현장수요대응첨단제조기술 및 부품·개발 사업 정부 예산은 PM-HIP, EBW, DLC 3개 연구개발 분야에 대한 예산 규모로 산출함

□ 기술개발 현황

- 독일과 일본 등에서는 유도가열 벤드의 적용을 확대하기 위해 기술개
발을 수행하고, 이를 통해 곡률반경이 1DR(직경의 1배)인 곡관을 유도
가열 벤딩으로 제작하는 수준까지 발전함. 또한, 진원도 최적화, 3차원
벤딩, 그리고 다곡 벤딩을 위한 기술개발을 완료함.
- 국내에서는 유도가열 벤딩을 통해 대구경 원전 배관을 대상으로 곡률
반경이 1.5DR(직경의 1.5배)인 곡관을 제작한 바 있음. 제작된 유도가
열 벤드의 두께 감소율은 외륜(extrados) 기준으로 11~30% 수준이며,
곡관부의 진원도, 주름 현상, 그리고 재료물성치는 설계코드에서 요구

하는 허용기준을 모두 만족함.

- 현재 원자력발전소 배관 설계 및 제작에 적용되고 있는 KEPIC 코드나 ASME Sec.III 코드는 유도가열 벤드에 대한 별도의 비파괴검사 요건, 검증시험 절차, 그리고 공정 인자 및 필수 변수 등을 제시하지 않고 있으며, 곡관의 벤딩 제작에 관한 일반적인 허용기준만을 제시하고 있음. 다만, ASME B31.1 102.4.5에서는 최소 두께를 만족하고 두께 감소율이 9.0% 이하 (1.5DR 기준)일 때, 원소재의 두께에 무관하게 유도가열 벤드의 적용을 허용함.
- 따라서, 현재 선진 제작사들과 국내 제작사들의 기술적 격차를 해소하고 유도가열 벤드의 적용 확대를 위해서는 아래 2가지 측면에서 추가적인 유도가열 벤딩 기술개발이 필요함.
 - ① 곡률반경이 1.5DR 미만인 소반경 유도가열 벤드 제작 기술개발
 - ② 두께 감소율을 9.0% 이하(1.5DR 기준)로 낮추기 위한 유도가열 벤딩 공정 개발
- 곡률반경이 1.5DR 미만인 곡관에 대해서는 유도가열 벤드로 제작한 국내 사례가 없으며, 이를 위한 벤딩 공정개발 및 벤딩 결과의 신뢰성 검증이 필요함. 또한, 유도가열 벤딩 시 곡관에서 두께 감소율을 현재의 11~30% 수준에서 9.0% 이하(1.5DR 기준)로 낮추기 위한 공정개발이 필요한 것을 알 수 있음.

6. 시사점

- SMR의 경우, 협소한 공간 내에 배관 배치의 유연성 확보, 용접부에 대한 비파괴검사의 한계점 해소, 제작·시공 기간 단축 및 시공비/운영비 절감을 통한 수출 경쟁력 확보 등을 고려할 때, 배관 제작 및 시공에 유도가열 벤드 적용은 필수적일 것으로 판단됨.
- SMR 배관에 유도가열 벤드를 적용하기 위해서는 SMR 배관 설계에서 고려되는 직경과 두께, 그리고 곡률반경, 굽힘각, 배관 소재 등을 포괄할 수 있는 조건에서 유도가열 벤딩 기술개발 및 검증이 수행되어야 할 것으로 판단됨. 특히, 현재 국내 유도가열 벤딩 기술수준으로 원자력 배관에 대한 품질기준을 만족하면서 곡률반경이 1.5DR 미만인 소반

경 곡관을 두께 감소율 9.0% 이하로 제작하는데 한계가 있으므로, 이를 극복하기 위한 유도가열 벤딩 기술개발이 요구됨.

- 또한, SMR을 비롯한 원전 배관계통에 유도가열 벤드의 적용 범위를 확대하고 고품질의 유도가열 벤드 제작을 위해서는 유도가열 벤딩에 대한 비파괴검사 요건과 검증시험 항목과 절차 등을 포함하는 품질보증체계의 수립과 이들 품질보증 기준을 만족하기 위한 공정 인자 및 필수 변수 등을 구체적으로 제시하는 Code Case의 제정이 필요한 것으로 판단됨.
- 추가적으로 SMR에서 유도가열 벤드를 적용함으로써 얻는 장점을 극대화하기 위해서는 설계사와 벤드 제작사가 설계 및 곡관 제작성을 공유함으로써 배관 배치 설계 시 유도가열 벤드의 적용을 반영하고 유도가열 벤딩 기술개발 시 SMR의 설계 특성을 반영하는 것이 바람직한 것으로 판단됨.

II.

기획대상연구개발과제 도출

1. 연구개발과제기획 방향

□ 연구개발과제기획 기본방향

- 차세대원전 제작 공정에 필수적인 혁신 제조 공정 기술개발
 - 국내의 상용 원전 제작기술력은 세계적인 수준으로 인정받고 있으나 SMR 시장주도권을 확보하기 위한 다양한 제조기술 확보 추진
 - SMR 설계는 최소화된 협소 공간에 안전성을 확보하여 전력을 생산할 수 있도록 계통을 연결하는 패키징 기술이 핵심임. 이를 위해 계통 배관 형상의 다양성 및 건전성이 확보된 제작 기술 마련

□ 신규 예산 지원 계획안

(단위 : 억원)

구 분	원천기술	혁신제품형	계
품목지정	-	6.9	6.9
계		6.9	6.9

□ 기획대상연구개발과제 현황

연구개발과제(품목)명		연계 수요 (도출근거)
기획대상주제명	기획대상 연구개발과제(품목)명	
SMR의 배치설계 및 원가절감, 운영비용 절감이 가능한 제작기법 개발	SMR용 주요 배관 제작을 위한 유도가열 벤딩 기술개발	○ 정부정책 - 국정과제 3번(탈원전 정책 폐기 및 원자력 산업 생태계 강화) * (원전 생태계 경쟁력 강화) 핵심 기자재에 대한 국산화, 미래 첨단기술 확보를 위한 R&D 등 다각적 생태계 경쟁력 강화 추진 - 새정부 에너지 정책방향('22.7) * (5대 에너지정책방향) ④-① 원전산업 생태계 복원, 수출산업화 및 유망기술 확보 - 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 (탄소중립기술특별위원회, '23.5.19) * 선진원자력 시스템 - 원전산업R&D추진전략('23.5, 산업부) * (16대 세부전략) ①-②. 미래형 제조 기술 ○ 기술수요조사명 - SMR에 적용 가능한 고주파 유도가열밴드 제작, 검사기술 및 신뢰도 검증기술개발

□ 사업화 연계성과 발생 가능성

연구개발과제(품목)명		지식재산권				표준 ²⁾	인증 ³⁾
		등록특허		소프트웨어	기타 ¹⁾		
기획대상 주제명	기획대상 연구개발과제 (품목)명	해외	국내				
SMR의 배치설계 및 원가절감, 운영비용 절감이 가능한 제작기법 개발	SMR용 주요 배관 제작을 위한 유도가열 벤딩 기술개발	○	○	×	×	○	×

1) 실용신안, 디자인, 상표 등 기타 지식재산권

2) 국제표준, 국가표준, 단체표준의 제·개정(표준화연계형 과제는 보통 이상으로 제시 必)

3) 법적임의 인증(KS인증, 고효율에너지기자재인증, 신제품인증(NEP), 신기술인증(NET), 녹색인증, 제로에너지건축물인증, 소프트웨어품질(GS) 인증 등)

2. 개발위험 관리방안

□ 기술개발 위험요인

- SMR의 배관집적도 향상을 위해 1.0DR의 소반경 유도가열 벤드 제작이 요구될 경우에 두께 감소율 9.0%를 만족시키기 어려울 수 있음. 따라서, 배관의 원소재 두께를 증가시킬 경우의 경제성 평가와 연계하여 최적의 해를 찾는 것이 중요함.
- 유도가열 벤드에 대한 신뢰성 검증을 위한 시험 방법 결정과 시험장비 구축에 과도한 비용이 소요될 수 있음. 따라서, 관련 참고문헌이나 해석적 방법을 통한 입증이 고려되어야 하며, 현재 가용한 시험 장비와 경험을 보유하고 있는 기관과 협력 방안을 마련하는 것이 필요함.

□ 사업화 애로사항

- SMR에 유도가열 벤드의 적용을 확대하기 위해서는 국내·외의 인허가 확보와 표준화 수립이 필요함. 이를 위해 유관기관과의 유기적이고 정기적인 소통 창구를 마련하는 것이 필요하며, 국내 표준 (KEPIC Code Case) 수립 시 검토위원으로 규제기관 전문가 참여가 필요함.
- 생산된 유도가열 벤드의 두께 측정 등 검사가 수동으로 진행되어 결과의 신뢰도를 낮출 수 있고, 낮은 신뢰도는 사업화에 장애가 될 수 있음. 따라서, 이를 극복하기 위해서 유도가열 벤딩을 위한 공정 개발뿐 아니라 제품에 대한 측정 신뢰도 향상을 위한 장비의 개발도 필요함.
- 유도가열 벤드의 적용 물량이 증가할 경우, 생산 원가절감을 위한 자동생산이 필요하며, 이를 위해서는 유도가열 벤드 제작을 위한 자동화시스템의 마련이 필요함.

□ 사회환경 위험요인

- 유도가열 벤드 적용시 원전 건설시 엘보 소요량이 줄어들 수 있으나 현재 엘보 소요량에 비해 유도가열 벤드 적용 부위가 미미하고, 국내 피팅류 업체의 경우 선별 수주 중이므로 매출에 대한 영향성은 작을 것으로 판단됨.
- 단기적으로 용접 물량의 감소로 용접사의 고용이 감소될 수 있음. 그러나, 현재 용접은 3D 업종으로 용접사가 급감하고 있는 실정에서 중장기적인 용접사 감소 문제로 인한 공기 지연 및 배관 시공업체의 인력난을 해결할 수 있음.

□ 기술영향 검토

- 원전 배관계통에서 용접부 감소는 용접부 균열에 의한 누설을 원천적으로 차단할 수 있으며 가동중 검사가 불필요함. 따라서, 배관계통의 건전성 확보와 이를 통한 원전의 대국민 수용성 개선에 기여함.
- 유도가열 벤딩을 통해 임의 형상의 곡관을 제작·공급할 수 있으므로 SMR의 배관계통 설계를 혁신적으로 개선할 수 있으며, 이를 통해 연계 기기의 배치 유연성도 극대화할 수 있음.
- 유도가열 벤딩 기술은 내면이 피복(cladding)된 배관의 곡관 제작에도 활용할 수 있으므로 곡관부 내면 피복의 한계를 극복할 수 있음. 이러한 기술은 현재 개발 중인 MSR(molten salt reactor)의 배관 제작에 활용될 수 있음.
- 유도가열 벤딩을 통해 다양한 직경과 곡률반경을 갖는 배관의 곡관을 두께 감소율 9.0% 이하로 제작할 경우, 수출원전을 포함한 대형 원전의 배관계통에 유도가열 벤드의 활용도가 크게 증가될 수 있으며, 이들 원전의 배관계통 설계도 크게 개선될 수 있음.

3. 기획연구개발과제 품목개요서

[품목지정공모 (품목개요서)]

품목명: SMR용 주요 배관 제작을 위한 유도가열 벤딩 기술개발 19

'24년도 에너지기술개발사업 신규연구개발과제 품목개요서 (품목지정)

관리번호	2024-원자력-원전-품목-1	산업 기술 분류	중분류 I	중분류 II
과제유형	☐ 원천기술 ☒ 혁신제품		원자력	원자력
해당여부	☒ 표준연계 ☐ 경쟁형R&D ☐ 복수형 R&D ☐ 국가핵심기술 ☒ 안전관리형과제 ☐ 공기업협력 ☒ 탄소중립 ☐ 국제공동 R&D ☐ 통합형 ☒ 초격차 ☐ 실증형			
R&D 자율성트랙	☒ R&D 자율성트랙(일반) ☐ R&D 자율성트랙(지정)			
품목명	SMR용 주요 배관 제작을 위한 유도가열 벤딩 기술개발 (TRL : [시작] 4단계 ~ [종료] 8단계)			
1. 개념 및 개발내용				
☐ 개념 SMR에 적용 가능한 소재 2종 이상(오스테나이트강 및 페라이트강 포함) 유도가열 벤딩 제작 공정 개발 및 표준화 제안 * 핵심목표 : 곡률반경: 1.5DR 미만(1.0~1.4DR), 두께 감소율: 9.0% 이하, 시제품 제작(8건): 직경/두께 비 2종 이상(D/t=10~40), 굽힘각 2종 이상(45° ~145°), KEPIC Code Case 1건 제안				
☐ 개발내용 - SMR 배관의 설계 특성 파악 및 대상 곡관 선정 - 원전용 곡관 허용기준 검토 및 유도가열 벤딩 공정인자 파악 - 벤딩배관 전산해석 방법 구축 및 해석/실험을 통한 공정변수 최적화 - SMR용 대표 배관 유도가열 벤드 시제품 제작 및 품질검증(두께 감소율, 내륜주름, 진원도 등) - 유도가열 벤딩에 따른 미세조직/재료물성 변화 분석(부식 및 SCC 시험 포함) - 두께측정 자동 측정 및 기록 장비 개발 - 유도가열 벤딩 품질보증체계(비파괴시험, 검증시험 요건 및 절차 등) 수립 및 표준화(KEPIC Code Case(안)) 연구개발계획서 제출시 다음의 항목의 정량적 목표치 및 상용화 수준 제시 필수 - 직경/두께 비(D/t), 굽힘각, 곡률반경, 두께 감소율				
☐ 개발위험 극복방안 - 곡률반경이 매우 작고 직경/두께 비가 큰 유도가열 벤드에서 9.0% 이하의 두께 감소율을 달성하지 못할 수 있으므로 두께 감소율 미충족시의 적절한 대안 마련이 필요함. - 외국의 선진 제작사에서 유도가열 벤딩 관련 특허를 다수 출원함에 따라 특허 출원을 위한 고유 지식재산권 확보 전략 (기존 특허 회피 전략)이 필요함. - 유도가열 벤딩과 관련된 Code Case 개발을 위해서는 품질보증체계와 공정 인자 및 변수의 적용 사례가 요구되므로 시제품 제작에 앞서 품질보증체계를 수립하고 공정 인자와 변수를 구체화하여 시제품 제작과 품질보증 과정에 적용하는 것이 필요함.				

□ 안전관리 사항

- 본 연구개발과제는 「안전관리형 연구개발과제」로 연구개발계획서 제출시 ‘연구개발 과제별 안전관리계획’을 제출해야 함 (적정성을 검토하여 부적정시 지원 제외함)
- 고전압/고전류 사용에 따른 감전 위험, 유도가열/중량물 취급에 따른 작업 환경에 대한 안전 관리 필요

2. 지원 필요성

□ 지원 필요성

- (기술적) SMR 경우 최소화된 협소 공간에 배관이 복잡한 구조로 배치되므로, 설계시 배관 배치의 유연성 확보와 비파괴검사 불가능 구역의 용접부 제거를 위한 유도가열 밴드 적용 기술의 확보가 필요함.
- (경제적) 유도가열 밴드 적용에 따른 배관 제작 및 시공 기간 단축, 비파괴검사 부위 감소로, SMR의 시공 기간과 비용, 운영비용을 낮출 수 있으므로 유도가열 밴딩은 SMR의 경제성 향상에 직접 기여할 수 있는 제작 기술로 기술개발에 대한 지원이 필요함.
- (정책적) 유도가열 밴딩은 SMR 뿐 아니라 4세대 원전(MSR, SFR) 및 대형 상용원전에도 적용하여 배관 설계를 최적화하고 용접부를 줄일 수 있는 기술이므로, 원전의 수출경쟁력 제고 측면에서 기술개발의 지원이 필요함.
- (시장적) 세계적으로 다수의 SMR이 개발되고 있는 상황에서 SMR의 수출경쟁력 확보를 위해서는 안전성뿐만 아니라 경제성 확보가 매우 중요하므로, 이를 뒷받침하기 위한 기술 개발이 필수적이며 국가적 차원의 지원이 필요함.

□ 활용분야

- 원전, 화력, 폐열회수보일러(HRSG), 조선 해양 등 배관 적용 분야

3. 지원기간/예산/추진체계

- 기간 : 39개월 이내
- 정부지원연구개발비 : '24년 6.9억원 이내(총 정부출연금 18.8억원 이내)
- 주관연구개발기관 : 중소·중견기업 (연구계 또는 학계 참여 필수)
- 기술료 징수여부 : 징수
- 기타사항 : SMR 배관 설계특성 관련 기술교류/협력을 위한 세부전략 제시 필요