

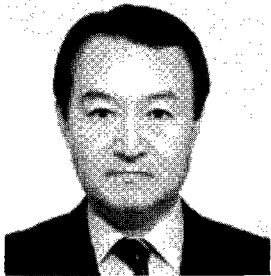
# 건설시공과 노하우

## 하나로 HANARO

전세계의 300여 개 연구용 원자로 중 하나로써 그 성능이 세계 10위권 내에 들어가는 다목적 연구용 원자로이다.

이 하나로를 한국 초유의 설계와 순수한 우리 기술로써 성공적으로 건설하였다.

이를 위하여 10여년간 본 프로젝트에 관계한 한국원자력연구소 관계자



유 권 철

현대건설(주)  
한국원자력연구소 작업소 소장

들에게 진심으로 축하를 드리며, 또한 정말로 어려운 여건하에서도 공사를 무사히 끝마치게 된 데 대하여 현대건설(주) 관계자들에게도 감사를 드린다.

한국원자력연구소에서 발주한 다목적 연구용 원자로(하나로) 건설사업은 1988년 10월 20일 제한경쟁입찰(PQ)에서 현대건설(주)이 시공사로 결정된 후, 1988년 12월 토목굴착공사를 시작하여 6년여 기간 동안의 부단한 노력 끝에 1994년 11월 30일 준공하게 되었다.

이는 원자력발전소 건설을 위시하여 연구용 원자로 등 원자력주기사업 시설들을 건설하는데, 현대건설(주) 자체의 시공 자립도가 100%임을 다시 한번 입증한 것이며, 우리나라의 원자력 관련공사의 시공기술은 선진국과도 비교해도 전혀 뒤지지 않음을 전세계에 알리는 계기가 되었다.

공사 관계자들은 백년대계의 중요한 국가사업을 위하여 철저한 국가관

과 책임감을 가지고 완벽한 품질보증과 본래의 성능을 발휘하도록 최선을 다하였다.

시행착오와 시공의 문제점을 사전에 예방하였고, 시공의 연속성을 유지하기 위하여 전체 공정에 대한 치밀한 계획하에 인원·자재·장비 등을 적기에 투입하여 생산성 향상에 지대한 노력을 하였으며, 시공성이 결여된 설계부분 또는 시공상 어려움이 있는 부분은 신기술 및 신공법을 적극 개발·적용하여 최상의 안전성과 신뢰성을 더욱 확고히 다지면서 성공리에 예정 공정내에 준공하게 되었다.

이제 앞으로의 과제는 하나로 건설목적인 핵연료 및 재료시험을 통한 신소재 개발·동위원소 생산·중성자빔을 이용한 물성실험·차세대 반도체 개발 등 원자로 활용의 극대화라고 본다.

산·학·연 및 의학계의 적극적인 참여와 기대에 부합되는 운영이 되기를 바란다.

다음에 각 공정별 공사현황과 공사 중에 새로운 경험을 가지게 된 일부분 공사를 소개하고자 한다.

**공사개요**

하나로가 들어선 연구로단지의 총부지면적은 23,000평, 총건평은 6,322평이며, 각 부분면적은 <표 1>과 같다.

<표 1> 「하나로」 각 부분 면적

총 건 평	6,322평
원 자 로 건 물	1,841평
등 위 원 소 건 물	3,099평
조 사 재 시 험 시 설	1,137평
냉 각 탭	120평
펌 프 실	125평

**1. 토목공사**

토목공사의 개요는 <표 2>와 같다.

<표 2> 토목공사의 개요

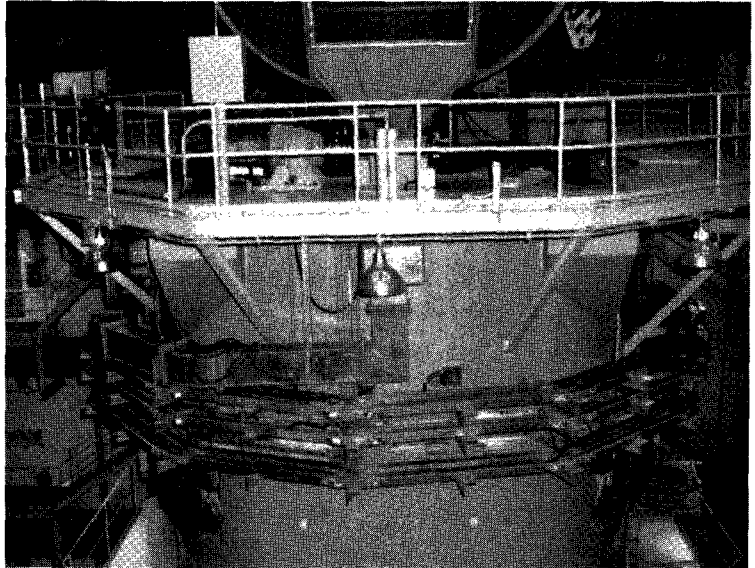
부지정지 및 토공사	60,725m <sup>3</sup>
Tech. / RAD gallery	2,857m <sup>3</sup>
Elec. duct bank	292m <sup>3</sup>
도로 및 주차장 con'c 포장	215a
Fence	330span

**2. 건축공사**

건축공사의 개요는 <표 3>과 같다.

<표 3> 건축공사의 개요

철근	2,773ton
레미콘	18,655ton
외부 panel	4,005m <sup>2</sup>
철골 / 철물	393ton
Paint	93,336m <sup>3</sup>
Penetration sealing	63,336m <sup>3</sup>



<사진 1> 하나로 상단부분

첫째, high density concrete는 steel ball 고밀도 골재를 사용하여 밀도 5g/m<sup>3</sup> 이상, 압축강도 350g/m<sup>3</sup> 이상인 특수 concrete로서, 국내에서는 최초의 시공일 뿐만 아니라 세계에서도 몇차례의 경험밖에 없는 것인데, 방사능 차폐가 주목적이며, 차후 방사성폐기물처분장 사업 등 특별히 원자력의 안전성 및 신뢰성이 요구되는 공사에 사용될 것이다.

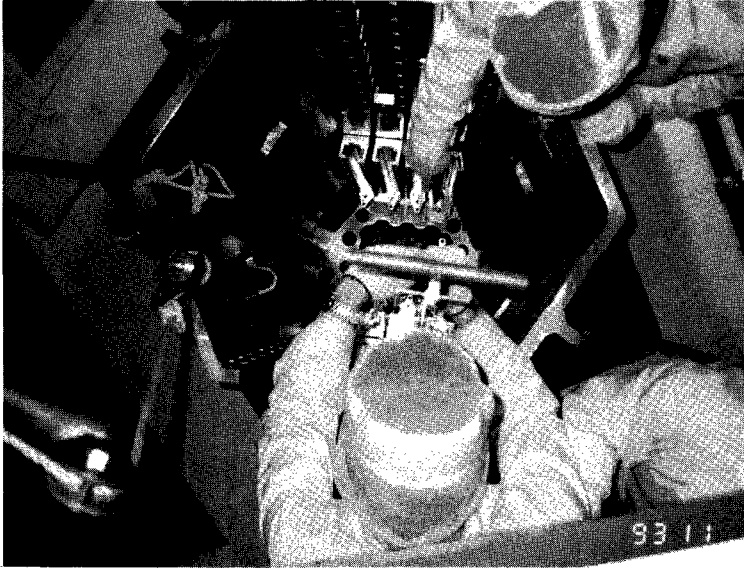
본 시공은 원자력공사 품질요구 수준 「Q」 class로 분류되어 시공전 과정 및 시공후 보전 등에 대하여 엄격한 품질관리가 실시되었다.

둘째, shielding cover 또한 원자로실내의 reflector equipment room, fuel loop room, primary cooling equip-ment room 등의 상부 open-

ing을 덮는 heavy weight concrete 로 제작된 cover로서, 1개의 중량이 15ton에 달하며 총 47개로 구성되어 있다.

Concrete의 타설 오차가 6m에 3mm인데, 이는 정밀기계 가공에 가까운 시공으로, 이 역시 국내외에서 유사한 시공자료를 구할 수가 없어, 자체적으로 정밀타설방법을 개발하였으며, 타설후 일부 보완하여 완성하였다.

셋째, air tigh door는 외부에서 원자로실에 진입하기 위한 출입구 (3set)로서, 혹시라도 원자로실내에 오염물질이 발생되어 밖으로 나오는 것을 방지하기 위하여 원자로실의 공기압을 외부보다 낮게 유지하기 위한 기밀성과 interlocking 기능을 갖고



(사진 2) Target 설치(장착)

있다.

설계 및 제작단계에서부터 국내 전문제작업체 및 검사기관의 부재로 말미암아 시행착오가 있었으나 수차의 수정과 보완, 검사를 거듭하여 완전 국산화하여 설치완료하였다.

넷째, beam tube grouting 작업은 반응로 외벽에 시험장치로 사용될 7개(ST1 ~ ST4, CN, NR, IR)의 중성자 유도관을 설치하기 위한 opening과 중성자 유도관 사이의 gap을 high density concrete와 heavy weight concrete로 grouting 하는 것이다.

1, 2차로 나누어 1차는 밀도 5.0 이상 concrete를 preplaced aggregate concrete 공법으로, 2차는 밀도 3.5 이상의 concrete를 현장타설하는

방법으로 수차에 걸쳐 모형시험을 한 후 시공하였다.

1차 사용재료로는 steel ball, sand, cement, admixture(CONVEX 100), BORON이며, 2차 재료는 magnetite aggregate, magnetite sand, cement, admixture(MELMENT L-10) 등이다.

다섯째, penetration opening sealing 작업 또한 자재에 대한 물성 시험 리포트를 제출하고, 실 시공상태와 동일한 모형을 제작, 시험시공을 실시하여 air tight와 water tight의 여부와 기능도를 확인한 후, 시공이 완료된 pipe, duct, cable tray 등이 관통하는 wall과 slab의 opening과 관통재 사이의 gap을 air tight, water tight, fire barrier, radiation resistant를 위하여

〈표 4〉 Penetration opening sealing 작업 사용자재

High density seal	BISCO사의 SF-150NH
Silicone elastomer	DAW CORNING사의 DC SYLGARD 170
Silicone foam	DAW CORNING사의 DC3-6548
Boot seal	BISCO사의 SGR-600

〈표 5〉 기계공사 주요 설치시설물

공정배관	318ton
	RX : 60ton RIPF : 55ton Pump house/ gallery : 203ton
Plumbing	73ton
소화배관	93ton
Valve	1,880EA
Steam trap	70EA
Strainer	77EA
Expansion joint	27EA
Support 형강류	44ton
배관보온	9,783m

〈표 6〉 기계설치공사

Reactor	18.6ton
Liner	139ton
Equipment	124ton(77set)

silicone sealing재 및 기타 accessories로 막는 작업이다.

사용자재는 〈표 4〉와 같다.

### 3. 기계공사

#### 가. 배관공사

배관공사는 공정배관·급배수배관·소방배관으로 구분할 수 있다.

공정배관은 1차 냉각계통·2차 냉각계통·중수계통·비상용수공급계통·헬륨가스공급계통·수조수정화

〈표 7〉 Reactor 설치공사

Inlet plenum	ASME SA-240 TP 304L (직경 : 2,420mm, 높이 : 600±1.5mm, 무게 : 3,480kg)
Grid plate	Aluminium alloy 1,060 (직경 : 2,040mm, 두께 : 30t, 무게 : 1,930kg)
Reflector vessel	Zirconium alloy (직경 : 2,040mm, 높이 : 1,200mm, 무게 : 1,600kg)
Chimney	Aluminium alloy ASME SB209 type 6061-T6 (직경 : 2,404mm, 높이 : 3,350mm, 무게 : 1,480kg)
Beam tube(7ea)	Zircalloy pipe(IR, NR, CN, ST-1, 2, 3, 4)

〈표 9〉 Liner 설치공사 개요

Reactor pool	면적(251,682m <sup>2</sup> ), 직경(4m), 높이(13.45m), 담수량(192.4m <sup>3</sup> )
Service pool	크기 : 가로(6m)×세로(4m)×높이(6.75m), 면적(159m <sup>2</sup> ), 담수량(133.2m <sup>3</sup> )
Spent fuel pool	크기(6m×4m×6.75m), 면적(308.35m <sup>2</sup> ), 담수량(234.3m <sup>3</sup> )

〈표 10〉 기계설치공사 개요

Bldg	Pump	Tank	Heater/ Exchanger	Filter	Header	Total
RX	15	7	10	3		35
RI	23	3	3		1	30
Pump House	10	2				12
Total	48	12	13	3	1	77

〈표 11〉 HVAC 주요 설치시설물

Duct 제작·설치	19,159m <sup>2</sup>
Duct 보온	10,616m <sup>2</sup>
Fan	57set
Shut - off damper	62set
Air handling unit	7set
Heat recovery unit	7set
Silencer	11set
Volume damper	263ea

계통·냉난방계통·압축공기계통·방사성폐액처리계통 등이 포함된다.

급배수배관은 일반용수계통 및 위생배관이며, 소방배관은 건물 옥내의 소화전계통으로 구분한다.

특히, 다목적 연구로 및 관련시설의 배관공사는 발전용 원자로에 비하면 대단히 낮은 압력 및 온도로 설계 및 가동됨에도 불구하고, 원자력발전소 건설에 적용되는 모든 규격·기술기준 및 품질관리요건과 동일한 조건하에서 시공하였다.

설계·자재·시공·시험 및 검사는

〈표 8〉 「하나로」 개요

원자로형	open-tank-in-pool
열 출력	30MW
핵 연료	조성(U <sub>2</sub> Si-Al), 농축도(20% U-235)
냉각재	경수(H <sub>2</sub> O)
감속재	경수/중수(H <sub>2</sub> O/D <sub>2</sub> O)
반사체	중수(D <sub>2</sub> O)

ASME SEC. III class 3 및 ANSI B 31.1의 기준에 따라 수행되었다.

또한 모든 용접작업에 대한 용접절차서 작성, 인증·승인 및 용접사자격 부여절차는 ASME SEC. IX의 요건에, 비파괴검사는 ASME SEC. V의 기준이 적용되었다.

배관작업절차는 배관제작 및 설치, 배관 지지물 설치, 약품세척, 배관굽힘, 수압시험, 배관세정, 도장, 보온 공정 등으로 구분하여 수행 및 검사기준으로 하였다.

기계공사의 주요 설치물은 〈표 5〉와 같다.

나. 기계설치공사

기계설치공사는 reactor 설치, liner 설치, equipment 설치로 구분할 수 있으며 〈표 6〉과 같다.

reactor 설치공사 개요는 〈표 7〉과 같다.

다목적 연구용 원자로는 원자력분야에서의 다양하고 심도있는 연구를 위하여 특별히 설계된 원자로로서 KMRR의 구조와 운전조건은 상업용인 원자로와 상이하며, 농축우라늄(20w/o U-235)이 사용되는 핵연료 집합체의 기하학적 형상 또한 복잡하

〈표 12〉 Elec. equipment

SUGR, MCC Distribution board	11set
UPS, Batteries	20set
Relay, Control panel	3set
Diesel generator(750kW)	1대

〈표 13〉 Raceway system

Cable tray	6,224m
Conduit	20,635m
Cable	128,655m

〈표 14〉 Lighting system

Panel	69set
Lighting fixture	3,066set

〈표 15〉 I & C

S.S Tubing	7,481m
CU Tubing	443m
Control panel	42set
Piping	446m

다.

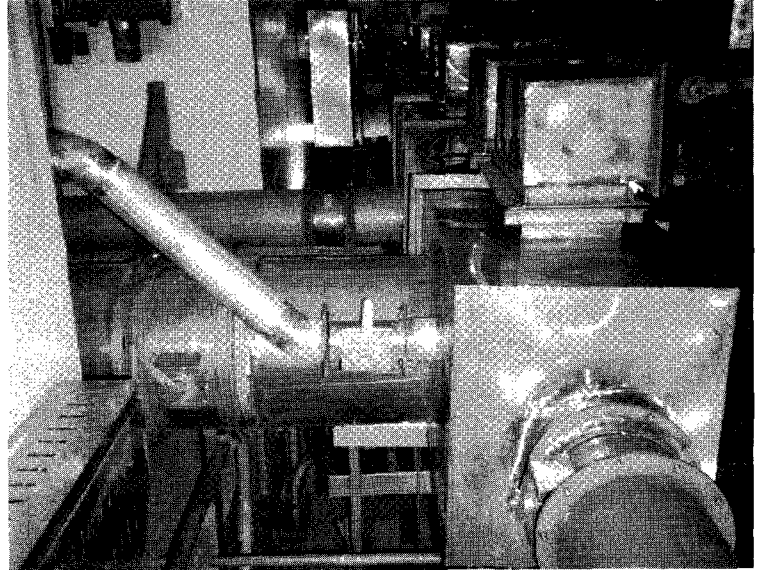
원자로 노심은 반사체 vessel의 중앙에 위치하고, tube내에 핵연료 집합체들이 장전되는 내부 노심과 중수 구역의 외부 노심으로 구분된다.

Liner 설치공사는 reactor pool, service pool, spent fuel pool로 구분되며 총설치량은 sus plate(9T) 139 ton이다.

Liner 설치공사 개요는 〈표 9〉와 같다.

기계설치공사 개요는 〈표 10〉과 같다.

다. HVAC 공사



〈사진 3〉 DUP Filter 주위의 Exhaust Duct

HVAC 공사는 건물내의 냉난방 유지 및 오염될 가능성이 있는 공기의 정화 등을 목적으로 시공하였다.

방사능물질 취급 정도에 따라 지역 구분이 되어 있으며, 각 zone별로 supply air duct line 및 exhaust air duct line이 별도로 구분되어 시스템이 구성되었다.

또한 1차 사용된 열원을 hotcell 및 reactor area를 제외한 나머지 exhaust air는 각 area별 heat recovery unit를 통하여 fresh supply air를 예열 및 재순환되는 시스템으로 구성되어 열용량을 최대한 재사용하도록 하였다.

주요 설치시설물은 〈표 11〉과 같다.

또한 duct 설치와 관련된 기계설

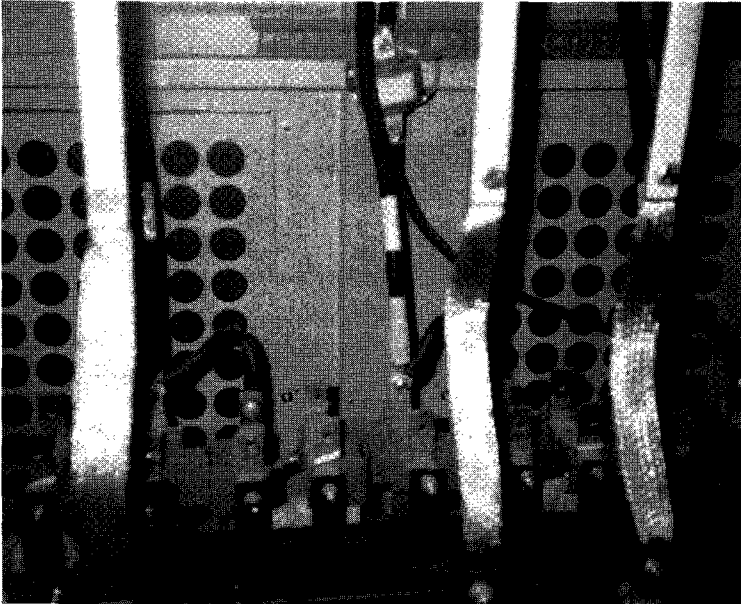
치·배관·전기 및 계장공사가 완료된 후, 각 기기별로 작동상태를 점검 확인한 후 TAB(Testing Adjusting and Balancing)를 작업 절차서(WPP / QCI-M-030)에 의해 온도 측정, 정압측정·풍량측정·AMP 검사 등을 실시하였다.

#### 4. 전기공사

전기공사는 〈표 12〉, 〈표 13〉, 〈표 14〉, 〈표 15〉외에 기타 communication system, fire detection system 등이 있다.

가. cable의 재질은 내방사성이어야 하는데, 다품종 소량의 제작이 용이치 않아 단가·납기 등에 어려움이 있었다.

나. cable tray의 support는 최소



〈사진 4〉 RX MCC Room Termination

2,400mm 간격으로 설치하여야 하며, 허용 오차는  $\pm 100\text{mm}$ 이다.

Gusset plate를 제외한 모든 structure steel은 용융도금으로 하고, 또한 tray의 위치, bolt 결합상태, 식별표시 support의 용접 및 설치상태 등을 최종 점검한다.

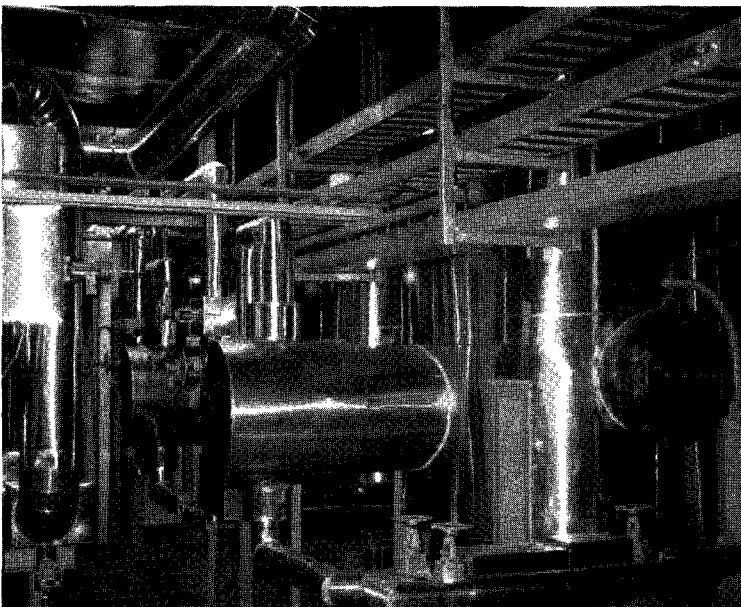
다. conduit는 총 20,635m(RX bldg: 12,991m, RI bldg: 6,607m, yard: 1,037m)가 설치완료되었으며, 작업시 곡률 반경은 전선관 내경의 6배 이상에 절단 끝부분은 거친면이 없도록 하였다.

Conduit 포설은 제작사가 제시한 minimum cable pulling tension값을 초과하지 않았으며, 설치 후 4,500mm를 초과하지 않는 간격으로 전선관 번호를 stencil을 사용하여, RPS 관련 channel A, B, C에 대하여 각각 red, green, yellow로, RRS 관련 channel A, B, C에 대해서는 white로, 기타 N channel에 대해서는 black color로 ID marking하였다.

특히, reactor pool 내부에 설치되는 전선관 및 부속품은 방수·방열 등이 되어야 하며 자재는 SUS 304L을 사용하였다.

라. cable은 radiation resistant cable이, class IE cable은 chlorosulfonated polyethylene이, non-class IE cable은 heavy-duty neoprene이 사용되었다.

Reel의 cable이 포설작업에 충분한



〈사진 5〉 Steam Water Heater Piping & Jacketing

지를 추적하기 위하여 cable reel & cutting report를 작성하였다.

cable 포설은 schedule에 따라 power, control, instrument cable 등이 적정 type, size 별로 규정된 포 설경로를 통하여 수행하였다.

또한, conduit에 cable을 입선할 때는 적절한 윤활유를 사용하고, 제조자 지침서에 따라 최대 허용 인장력을 초과하지 않도록 하였다.

마. cable termination은 작업하기 전에 cable에 대하여 megger 또는 hi-pot test를 실시하고, inter connection diagram에 따라 각 cable 말단에는 ID marker를 붙이고 단자 부록에는 wire marker를 부착 하였다.

Termination lug는 ring tongue 또는 compression lug type의 connector를 사용하였다.

Connector에 사용되는 모든 bolt는 제조자가 제시한 설치치에 맞추어 견고정된 torque wrench로 정확히 조였으며, 110V 이하의 class IE용 계장 및 특수 cable은 250V DC megger로, class IE용 600V 전력 및 제어 cable은 1,000V DC megger로 시험하였다.

또한 6.6kV 고압 cable은 hi-pot test를 실시하였으며, 최대 인가전압은 3.5kV DC이다.

특히 전기작업 중 cable termination kit는 radiation level에 따라 7,000 zone 이상에서는 내방사능 자

재를 사용하여야 하는데, termination kit의 생산은 전 세계적으로 미국의 RAYCHEM사 하나뿐인 관계로 고가의 공급단가와 delivery가 문제점으로 대두되었다.

### 맺는말

하나로는 원자력발전소용 원자로에 비하여 규모(열출력대비 1/100)는 작지만, 핵분열시 방출되는 중성자속이 10배 크며, 이를 이용한 실험설비가 원자로 주변에 설치되는 등 형태와 용도가 근본적으로 다르고, 연구와 실험시 원자로 주변에 관련자들이 있어야 하기 때문에 안전성 및 신뢰성이 더욱 절실히 요구된다.

공사에 적용되는 각종 원자력 관련 codes & standard, 시방서, 작업절차서 등은 원전보다 더욱 더 엄격하다.

소요자재는 소량 다품종으로 원자력 QT class 자재의 납기와 단가는 상상을 초월하며, 생산성은 일반 공사의 1/2 또는 1/3 밖에 되지 않는데 대하여, 현행 예산회계법, 정부 노임단가, 표준품셈 및 원전 준용으로도 대책강구가 원만하지 못한 점은 시공자에게 큰 부담을 안겨 주었다.

1988년 10월 20일 KMRR 1차 및 IMEF 굴착공사에 대한 시공사로 선정된 후, 6년 동안 무려 7번에 걸쳐서 차수로 계약한 공사내용을 보면, 선·후 계약의 공사에서 선 계약분의 공사

가 완료되어야 후공사가 연결되는 것이 아니고, 설계가 완료된 부분과 확보된 예산과의 관계를 고려하여 그 당시 차수 공사계약분의 work scope가 결정되었기 때문에 시공의 연속이 원활하지 않고 repair, rework로 인한 생산성이 저하되는 등 시행착오가 과다하게 발생하는 원인이 되었다.

한편 국내 최초 설제로 시공되는 공사인 관계로, 현장 시공성이 결여된 부분이 산적하여 다량 발생한 설계변경 사항들도 당시의 그간 축적된 경험과 기술을 최대한 활용, 새로운 공법 도입 등으로 신속히 처리하여 계약공정을 지키도록 최선을 다하였다.

당사에서 시공중인 원자력발전소 공사현장과 유기적으로 협조하며 자재, 특수장비 및 공구, 기능 작업자 확보 등 일부라도 난제를 해결할 수 있었던 것은 대단히 다행이라고 생각한다.

온 국민이 애타게 기다렸던 비가 내려 우리의 마음과 대지를 촉촉히 적셔 주고, 추운 겨울을 이겨낸 가지에서 새싹이 돌아나는 1995년 새봄에, 하나로가 모든 역경을 극복하고 새롭게 태어났다.

명칭 그대로 우리나라의 원자력과 연관된 과학계, 학계, 산업계가 하나로 뭉쳐 국가 과학기술 발전에 크게 이바지하며, 세계에 그 명성을 떨칠 것이라는 것을 믿어 의심치 않는다.

원자력에 관련된 모든 분들에게 다시 한번 축하를 드린다. ☺