

技術資料

수력발전용 Pelton Runner 주조기술에 대하여

김 종 열, 윤 형 철

Casting Technology of Pelton Runner for Hydro Power Plant

J. Y. Kim, H. C. Yoon

1. 서 론

한국중공업(주) 주조공장은 국내외 고객이 고도의 품질 수준을 요구하고 있는 원자력 및 수력 발전용 주강품을 무리없이 생산하였으며 그 기술의 축적에 따라 화력발전설비 국산화에 많은 기여를 하고 있다.

원자력 발전용 주강품중에는 국내 울진원자력 9, 10호기용 turbine case를 포함한 valve 부품을 제작 납품한 경험을 갖고 있으며 현재에는 국내 영광원자력 3, 4호기 및 프랑스 Alstom사로 부터 원자력 발전소용 1500MW급 turbine case 부품을 수주받아 생산중이다.

또한, 수력 발전용 주강품중에는 francis runner 와 kaplan blade를 상당량 제작하여 국내외에 공급한 실적을 갖고 있지만 본 보고서에서는 수력 발전용 주강품중에서 당사가 Fuji Electric Co.,(일본)로 부터 첫수주 받아 국내 처음으로 당 주조공장에서 생산 납품한 pelton runner 주조 기술에 대하여 기술하고자 한다.

2. Pelton Runner란 ?

낙차가 크며 수량의 변화가 심할때 좋은 효율로 발전할 수 있는 수차로써, 수차 둘레에 15-25개의 bucket을 가지고 있으며, 이 bucket로 분류의 물을 받아 회전하면서 물동력을 흡수한다.

처음 수조에 있을때 물은 위치 에너지뿐이나, 수압관을 흐르는 사이에 단면적과 유량으로써 정해지는 속도 에너지와 각 수압관의 위치에서 정해지

는 위치에너지와 압력에너지를 가지게 된다.

수압관에서는 지름이 일정하면 속도 에너지는 일정하나, 물의 흐름에 따라서 위치에너지가 감소되는 대신에 압력 에너지는 증가되며, nozzle에서는 단면적의 축소에 따라 속도 에너지가 증가되기 때문에 bucket에 동력이 전달되어 generator shaft를 움직이게 하는 심장부이다.

그림 1은 pelton runner의 구조도를, 그림 2는 배치도를 나타낸다.

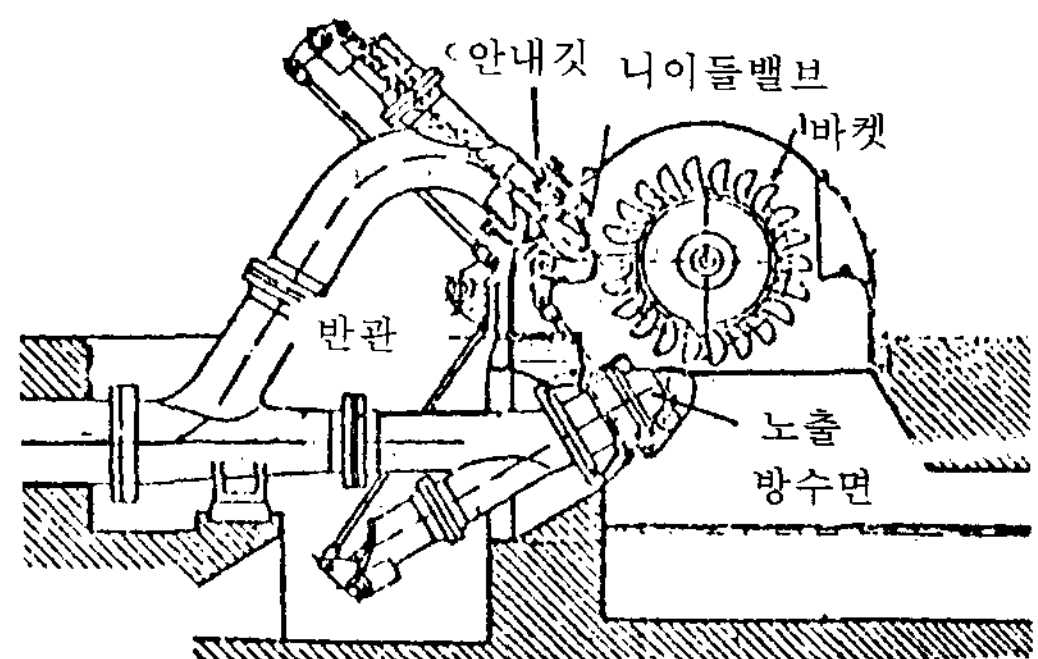


그림 1. Pelton runner 구조도

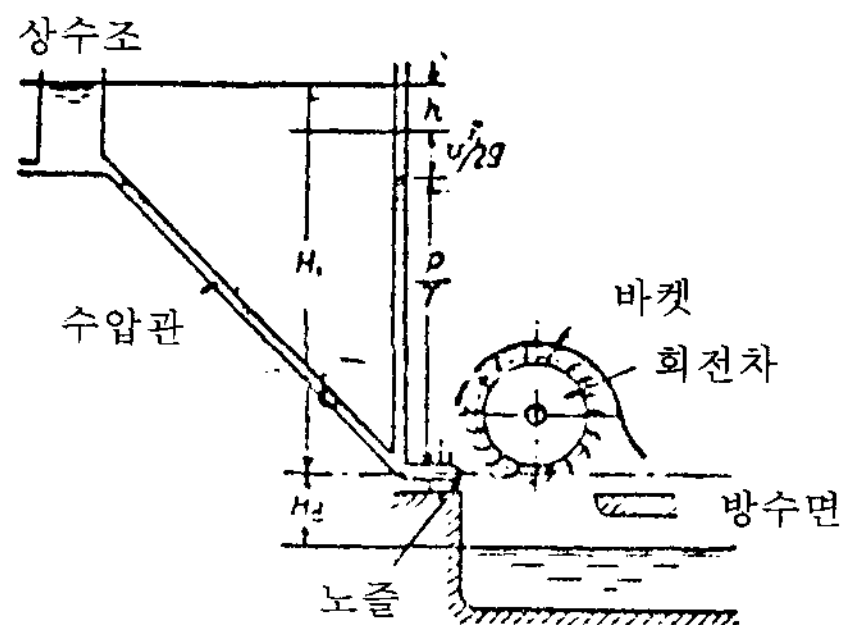


그림 2. Pelton Runner 배치도

한국중공업(주) 주조부

3. Pelton Runner 재질 특성

3-1. 재 질

표 1. 화학 성분

성분 GRADE	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Ni(%)	Cr(%)	Mo(%)	Cu(%)
SCS 5	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.	MAX.	3.5	11.5	0.4	MAX.
MOD.	0.06	1.0	1.0	0.04	0.03	4.5	14.0	1.0	0.5

3-2. 기계적 성질

표 2. 기계적 성질

항목 GRADE	인장강도 (KSI)	항복강도 (KSI)	연 신 율 (%)	단면수축율 (%)	경 도 (BHN)	충 격 치 (KG-M/CM)
SCS 5	110	MIN.	MIN.	MIN.	220	MIN.
MOD.	135	80	15	35	285	4

3-2. Microstructure 판단

합금 원소와 형성되는 조직과의 상관 관계를 보인 표 3의 schaeffler diagram에서 실제의 13Cr-4Ni (SCS 5 MOD.) steel이 갖는 microstructure를 찾을 수 있다.

여기서 Ni당량과 Cr당량은 아래와 같이 계산되어지며 또한, 산정된 조직은 사진 1에서와 같이

martensite matrix임을 알수 있다.

$$*Ni당량(\%) = Ni + 30C + 0.5Mn + 0.3Cu + 25N + Co = 5.32$$

$$*Cr당량(\%) = Cr + 2Si + 1.5Mo - 2Ni - Mn - 15N = 11.73$$

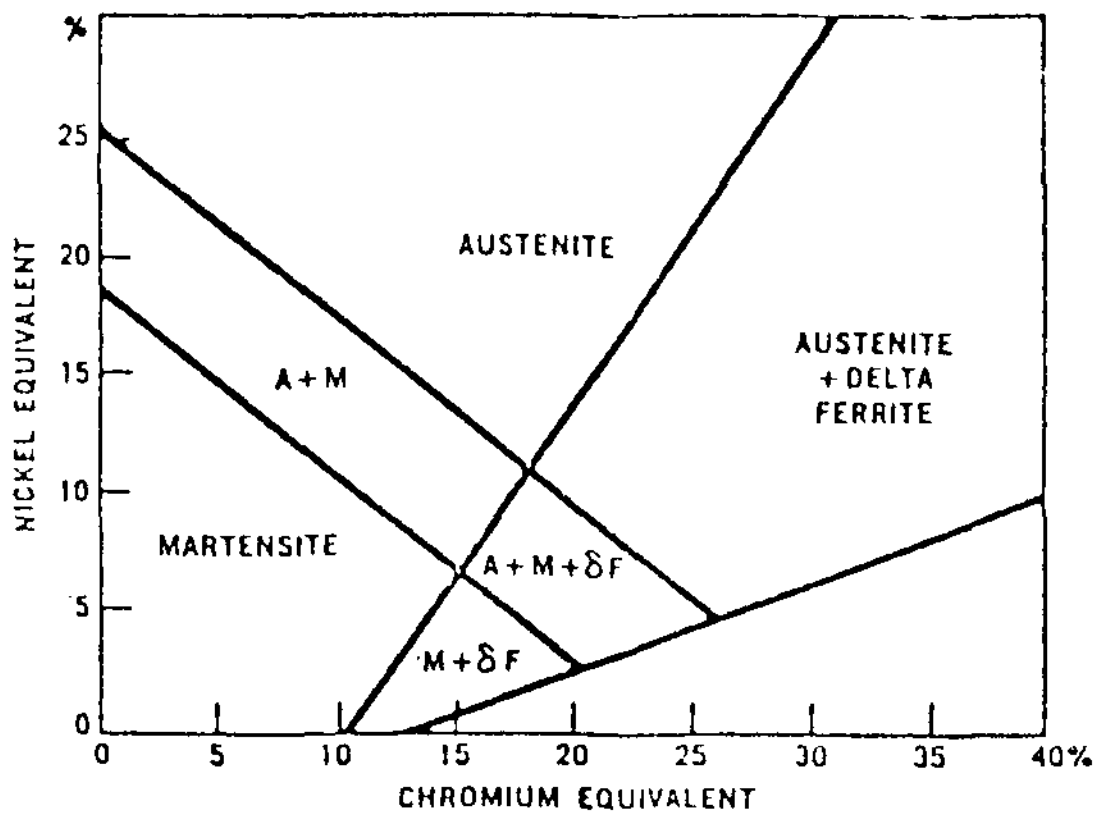


표 3. Schaeffler Diagram

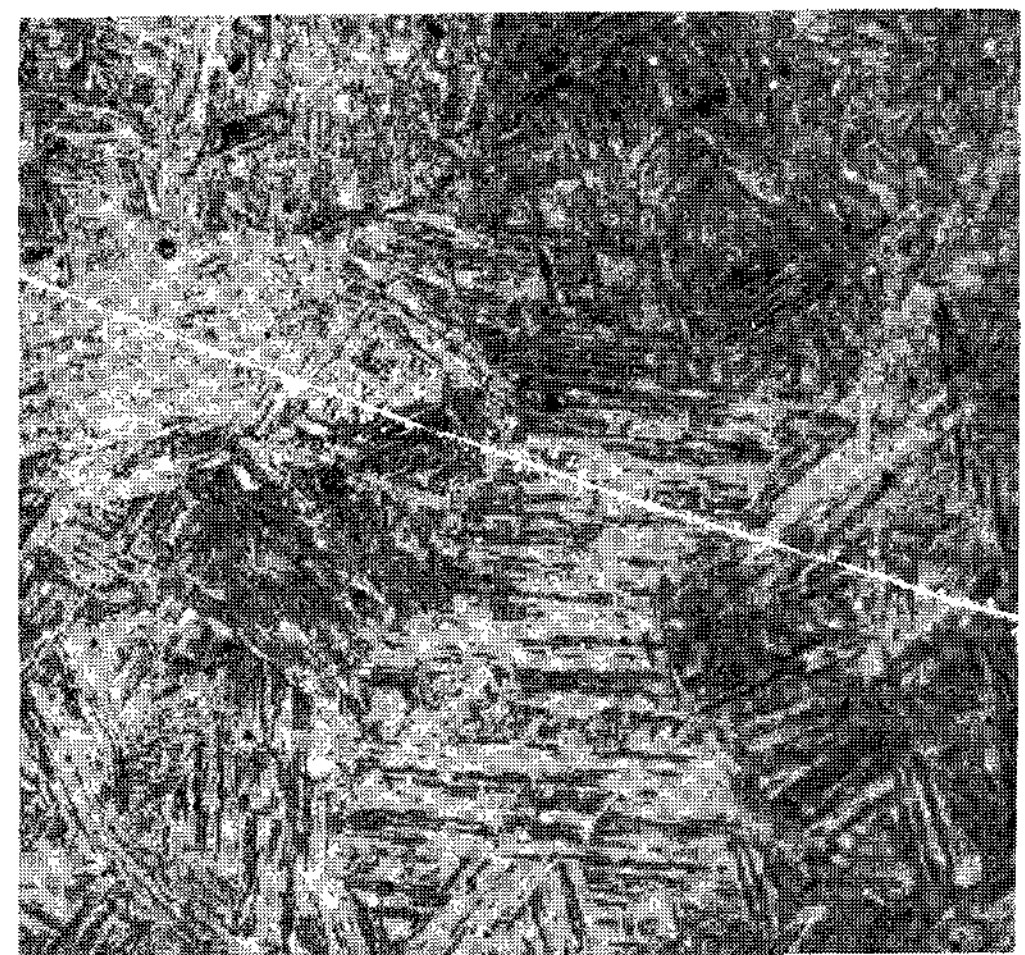


사진 1. 13Cr-4Ni강의 microstructure

4. Pelton Runner 주조방안

4-1. 목형 방안

목형 (A), (B), (C), (E)는 core box형으로, 목형(D)는 회전형으로 하여 주형을 분할 조립할수 있도록 제작하였다.

그림 3은 목형 방안도를 나타내며, 사진 2는 bucket 증자용 목형을 나타낸다.

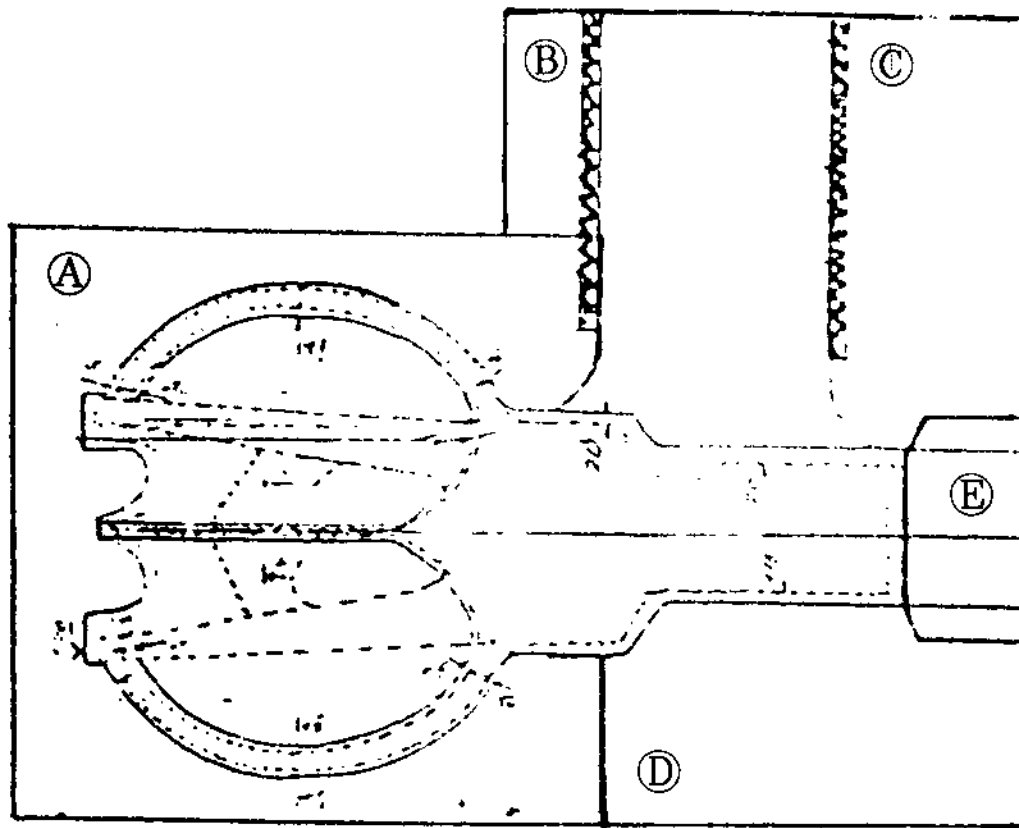


그림 3. 목형 방안도



사진 2. Bucket 증자용 목형

4-2. 주조 방안

4-2-1. Shrinkage Rule 적용

*높이 및 외경 : 15/1000-18/1000

*내 경 : 12/1000-15/1000

4-2-2. Allowance 적용

*Machining allowance : 15mm-20mm

*Grinding allowance : 3mm-7mm

4-2-3. Slag 제거용 Pocket 설치

각 bucket 상부면에 주입시 발생하는 slag를 포집할 수 있도록 100mm \times 20mm \times 20mmh 규격의 slag pocket를 설치한다.

4-2-4. Gating System

주입시간 20초 이내, 용강 상승 속도 50-60mm/sec.로 계산하여 ladle nozzle 및 ingate 규격을 결정한다.

4-3. 조 형

4-3-1. 조형사 관리

용강 상승 속도 및 주입시 발생하는 복사열로 인한 Bucket증자의 결함 발생을 최대한 줄이기 위해 고온에서의 주형 거동 관리가 필요하다.

표 4, 5, 6은 열간 상태에서의 관리목표를 나타낸다.

표 4. 열간 gas 발생량

실험항목	관리구분	관리목표
gas 발생량 (CC/GR.)	1000°C \times 10분	6.0-7.5
	1000°C \times 5분	3.5-5.5
	1000°C \times 2분	1.5-3.0

표 5. 열간 압축 강도

실험항목	관리구분	관리목표
고온 압축강도 (KG/CM ²)	1000°C \times 2분	3-4
	800°C \times 2분	8-9

표 6. 열간 팽창량

실험항목	관리구분	관리목표
고온 팽창 (%)	1000°C \times 2분	0.7-1.0
	800°C \times 5분	1.2-1.7

4-3-2. 표면사 및 이면사

AFS GFN NO. 55-65 chromite sand를 표면사로, AFS GFN NO. 17-22 천연 silica sand를 이면사로 사용하였다.

4-3-3. Binder 및 Hardener

Furfuryl alcohol 95%인 high furan resin을 사용했으며 투입량은 base on sand에 1%를, hardener는 B.S.A계 catalyst를 사용했으며 투입량은 base on resin에 30%를 투입하였다.

4-4. 합형

Bucket 중자 20개를 순차적으로 합형시 최후의 중자 조립이 간섭으로 불가능하므로, 원활한 합형을 위해서는 Tray식 조립 방법을 검토해야 한다.

4-4-1. 합형 Tray 설계

- 1) Bucket 수량에 따라 합형 tray의 이동방향 및 각도는 조금씩 다르겠지만 우선 bucket의 내외면 profile 현도를 작성해야 한다.
- 2) 중자 조립 간섭이 발생하지 않는 중자 수량을 결정하고 합형 tray를 design 한다.
- 3) Tray 이동 방향 및 각도에 따른 guide roller를 design 한다.

4-4-2. 합형 Tray 이동 방향 결정(그림 4 참조)

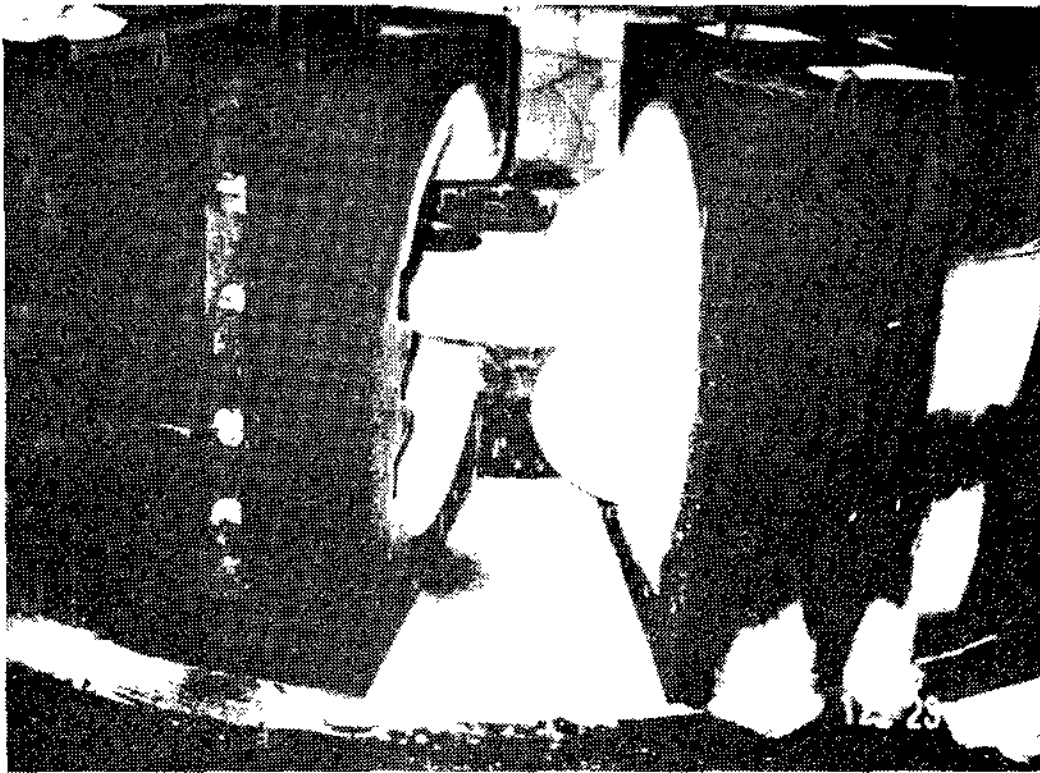


사진 3. 합형 간섭이 발생된 #20 중자 위치

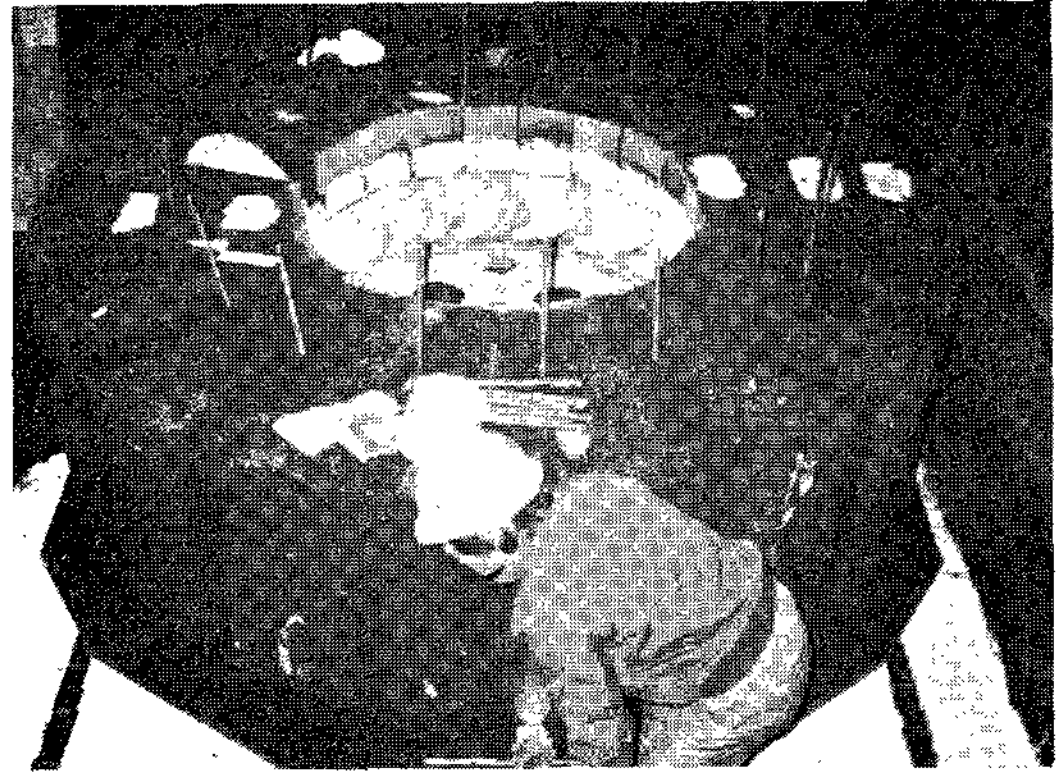


사진 4. #20 중자 합형위한 Tray 끝기 작업

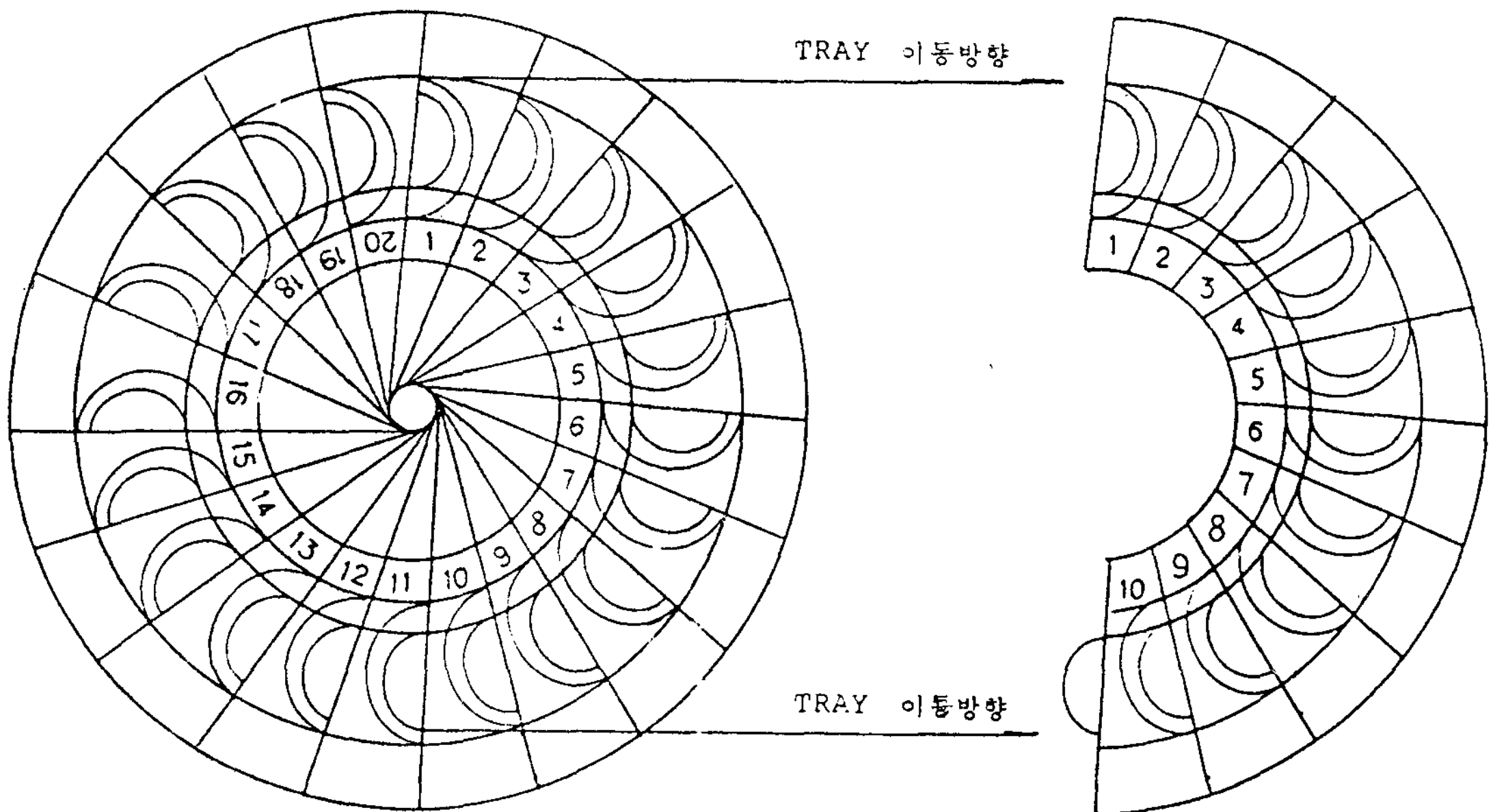


그림 4. 합형 Tray 이동방향 결정

최후의 중자 조립이 가능하도록 그림 4에서와 같이 합형 tray를 이동후 마지막 중자를 삽입 합형한다.

4-4-3. 합형 순서(사진 3, 4, 5 참조)

- 1) # 1, # 2, # 3..... # 19중자까지 합형한다.
- 2) 합형 tray 위에 안치된 중자 #1..... #10을 tray와 함께 합형 간섭을 피하기 위해 화살표 이



사진 5. #20 중자 합형후 Tray 조립 작업

동방향으로 끌어낸다.

- 3) # 20 중자를 조립한다.

- 4) 합형 tray 위에 위치한 #1..... #10 중자를 원래의 위치에 끼워 넣는다.

4-5. 주입 및 해체

4-5-1. 주 입

주입전 용강의 산화 방지를 위해 주형내 argon gas로 충전된 상태에 주입온도 1550°C, 용강상속도 50-60mh/sec.를 유지하며 신속 조용히 주입 하여야 한다.

표 7은 martensite stainless steel(SCS 5 MOD.)의 용해작업 표준을 나타낸다.

4-5-2. 해 체

Austenite가 급냉했을시 martensite가 생성되기 시작하는 온도(Ms) 및 변태가 종료되는 온도(Mf) 구간을 갖고 있다.

특히, Ms 및 Mf 구간은 austenite와 동일한 화학조성을 갖고 있는 martensite로 변태하여 침상조직을 갖는 구간이기 때문에 제품해체 및 압탕절단에 상당한 주의를 해야한다.

표 7. Pelton runner 용해작업 표준

인	재	강	종	제	품	명	STEEL MAKING FURNACE	S	성	분	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	
							30TON 전기로→ 35TON VOD	P	최소		0.020	0.25/0.45	0.65/0.75	<0.003	<0.010	4.10/4.30	12.0/13.0	0.40/0.55		
								E	최대		0.055			0.030	0.020					
								L	목표		0.04	0.35	0.7	0.030	0.020	4.20	12.50			
투입재료	100%			C, O 5KG/TON Fe-Cr : 13% 진해 Ni : 4.2% Ni			• O, 취입 시작 : 100~150 (Torr) 종료 : 30~40 (Torr) -5~-10'-- 40'-50' --10'-15'-				Fe-Si 0.35% Si 진해 Mn 0.70% Mn 진해 Ni 4.2% Ni CaO 25KG/T CaF ₂ 6KG/T Fe-Si 6KG/T Al 3KG/T		합금철 투입				진성분 목표조성 (특히 Si, Mn)	주 입 1.560°C		
조업내용	세제	가열 및 성분조정		예비진공 치	V.O.D	진정치리 (BCLING -OFF)								SLAG 환원작업			온도 및 성분조정	출 상		
시간 (분)	15'	35'					55' - 75'											10'		
온도 (°C)		1.620°C					1.610 / 1.620°C											1.570 / 1.560°C	1.560°C	
SAMPLE		1					2											3	4	
화	C						0.25 / 0.30											0.25 / 0.30	0.020 / 0.030	0.040
	Si						0.10 / 0.15											Tr	0.35	
화	Mn						- 0.70											0.70	- 0.60	0.70
	P						0.030													
성	S						0.020													
	Ni						- 4.20											4.20	4.20	
분	Cr						- 13.0											13.0	- 12.0	12.50
	Mo						0.050											0.50	- 0.50	0.50
	V																			
비 고																				• VOD 후 온도가 높으면 SLAG REDUCTION 시간 늘릴 것.

1) Mf(martensite 변태 완료 온도) 이하에서 해체하는 법

Mf=90°C 온도 구간을 갖고 있기 때문에 안전하게 90°C 이하에서 해체하는것이 바람직하다.

2) Ms(martensite 변태 시작 온도) 이상에서 해체하는 법

Ms=235°C 온도 구간을 갖고 있기 때문에 400-500°C에서 해체하여 2단계 열처리 즉, double tempering후 압탕 절단하는 방법이 있으나, 제품의 변형 및 열간 handling 문제가 있기 때문에 근변 주조에서는 적용하지 않았다.

5. 압탕절단 및 열처리

5-1. 압탕 절단

제품을 90°C 이하에서 해체 및 완전 탈사하여 preheating을 거친후 400°C에서 취출하여 iron powder를 이용한 압탕절단을 실시한다. 그림 5는 preheating 작업을 위한 time-temperature curve를 나타낸다.

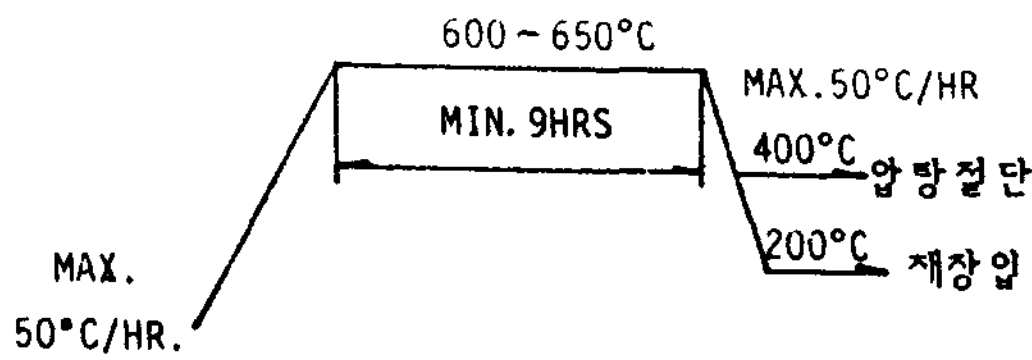
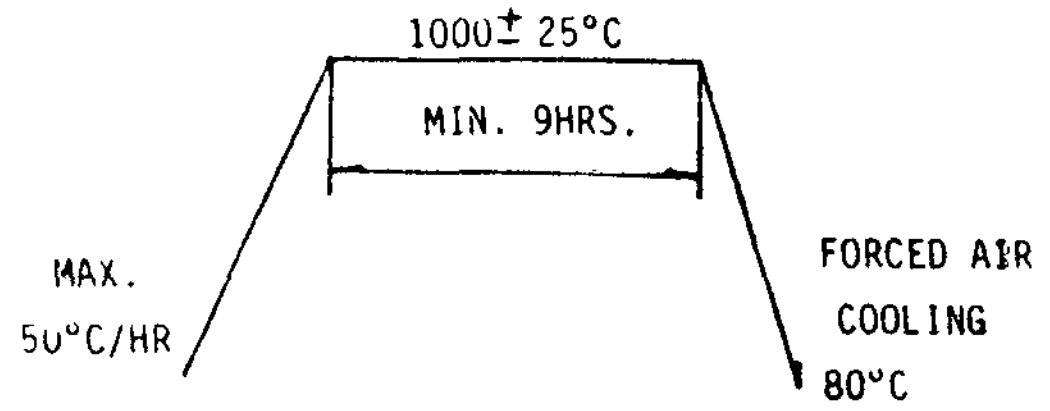


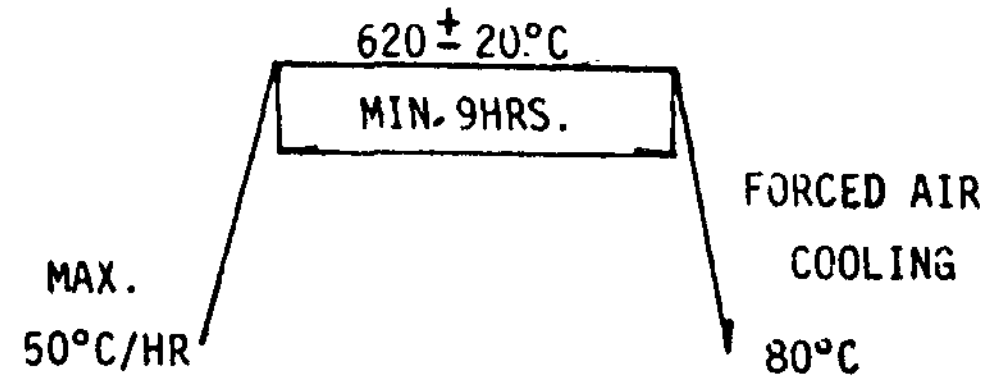
그림 5. TIME-TEMPERATURE CURVE

5-2. 열처리

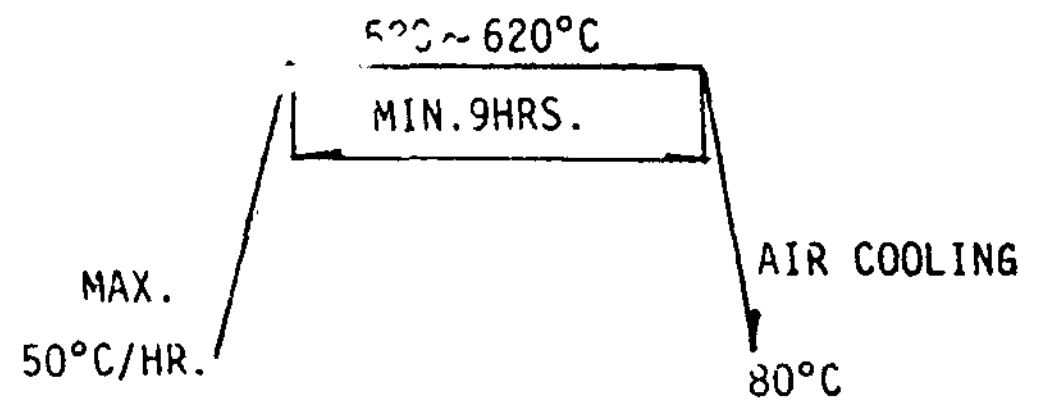
5-2-1. Normalizing 열처리



5-2-2. Tempering 열처리



5-2-3. 용접후 열처리



6. 기계 가공

Bucket 외곽 기계가공면은 V.B.M(Vertical boring machine)을 이용해서 turning 하였으며, bucket brim면 가공은 사진 6에서와 같이 sawing cutter를 이용하였다.

7. 검 사

7-1. 비파괴 검사

검 사 항 목	검 사 위 치	검 사 조 건
Liquid Penetrant Examination(p.t)	전 면	* Penetration Time : 15분 * Developing Time : 15분
Magnetic Particle Examination(m.t)	전 면	* Magnetizing Current : 1000-2000AMP * Method : Dry Powder Method
Ultrasonic Examination(u.t)	↑ ↑ ↑ 부위 (그림 6 참조)	* Frequency : 1MHZ - 2.25MHZ * Scanning : 100%
Radiographic Examination(r.t)	////// 부위 (그림 6 참조)	* X-ray(Co-60) : 300Kev

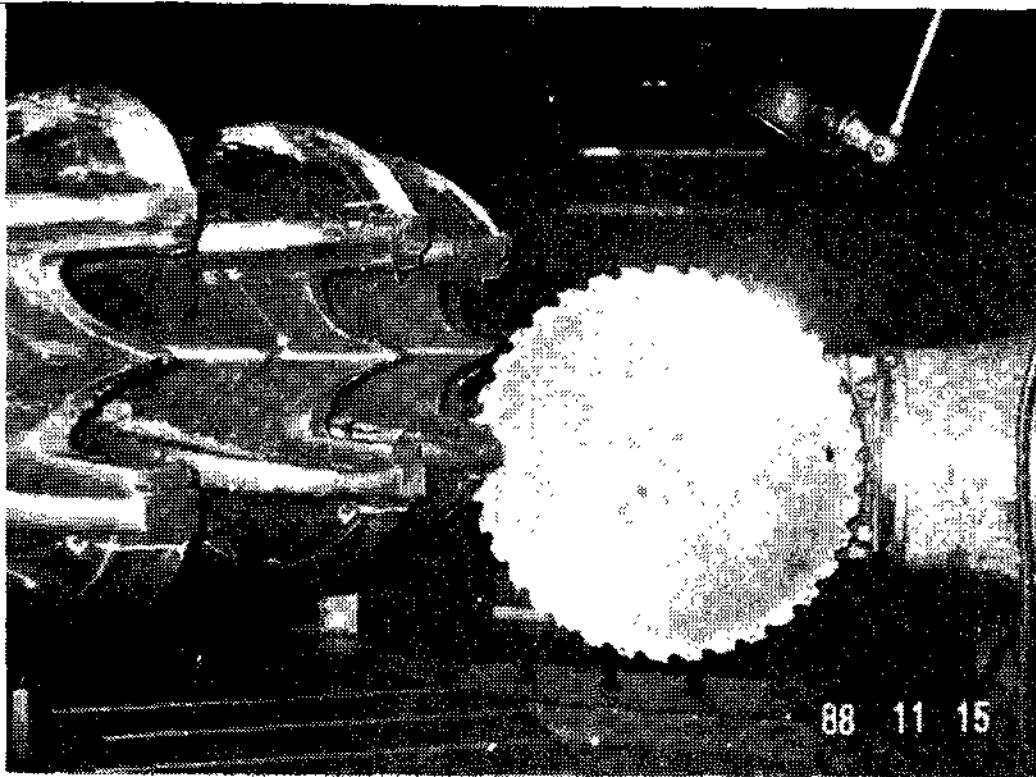


사진 6. Sawing cutter를 이용한 brim면 가공

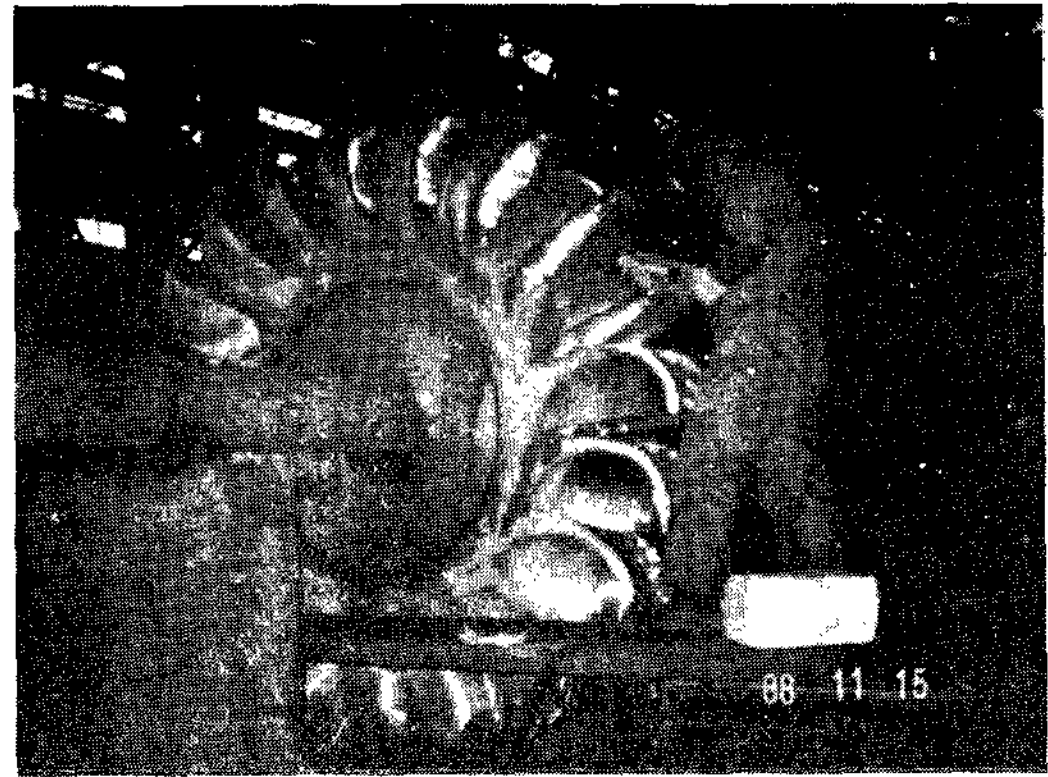


사진 7. M.T 및 P.T 후 결함제거 작업

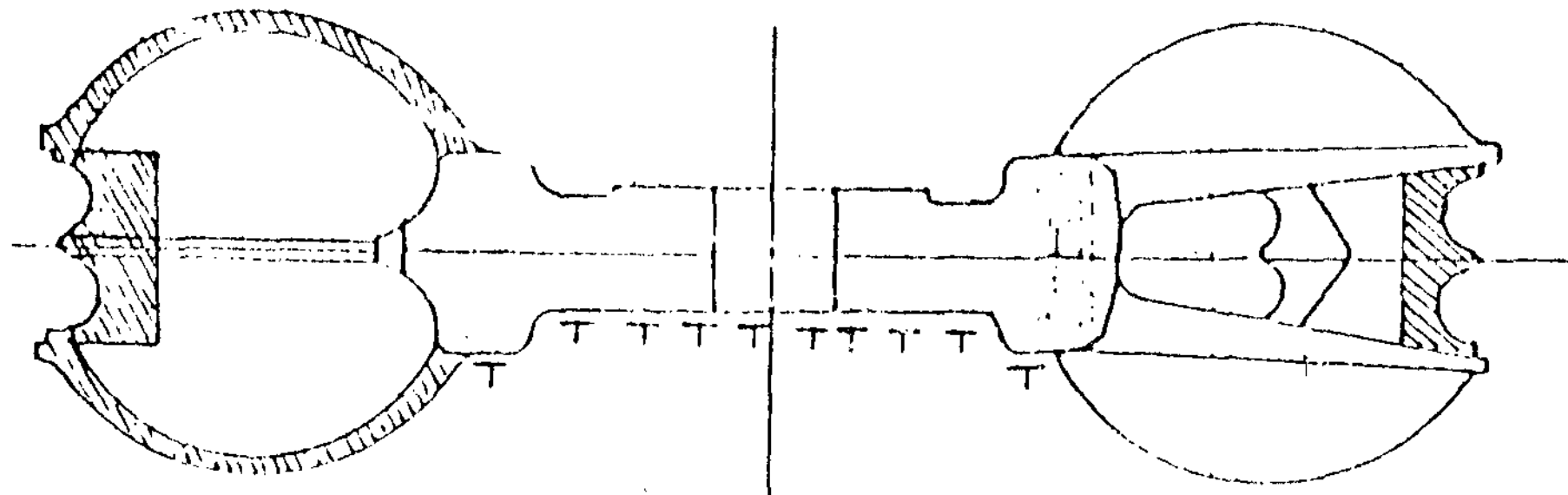


그림 6. Pelton runner 비파괴 검사 부위

7-2. 형상 및 치수검사

형상	치수 및 형상공차	검사 조건
Bucket Max. Dia.	2.0mm	Layout Machine 검사
Splitter Tip Dia.	3.6mm	"
Splitter Tip Pitch	3.8mm	"
Bucket Inclination	1.0mm	"
Bucket Brim Thickness	2.3mm	"
Bucket Cutout Width	2.1mm	"
Bucket Internal & Outside Profile (Template 부위)	1.1mm	Template 검사 (그림 7 참조) (사진 8, 9 참조)
Cutout Profile	2.7mm	"
Waviness	길이(D) 길이(L)	Flexible Rod 검사
Balance	0.7KG-M	Dynamic Balance 검사
Surface Roughness		*표면 조도계 검사 (사진 10 참조)
*Cutout 내면, 외면	0.8Ra(Micron)	
*Bucket 내면	1.6Ra(Micron)	
*기타 부위	3.2Ra(Micron)	

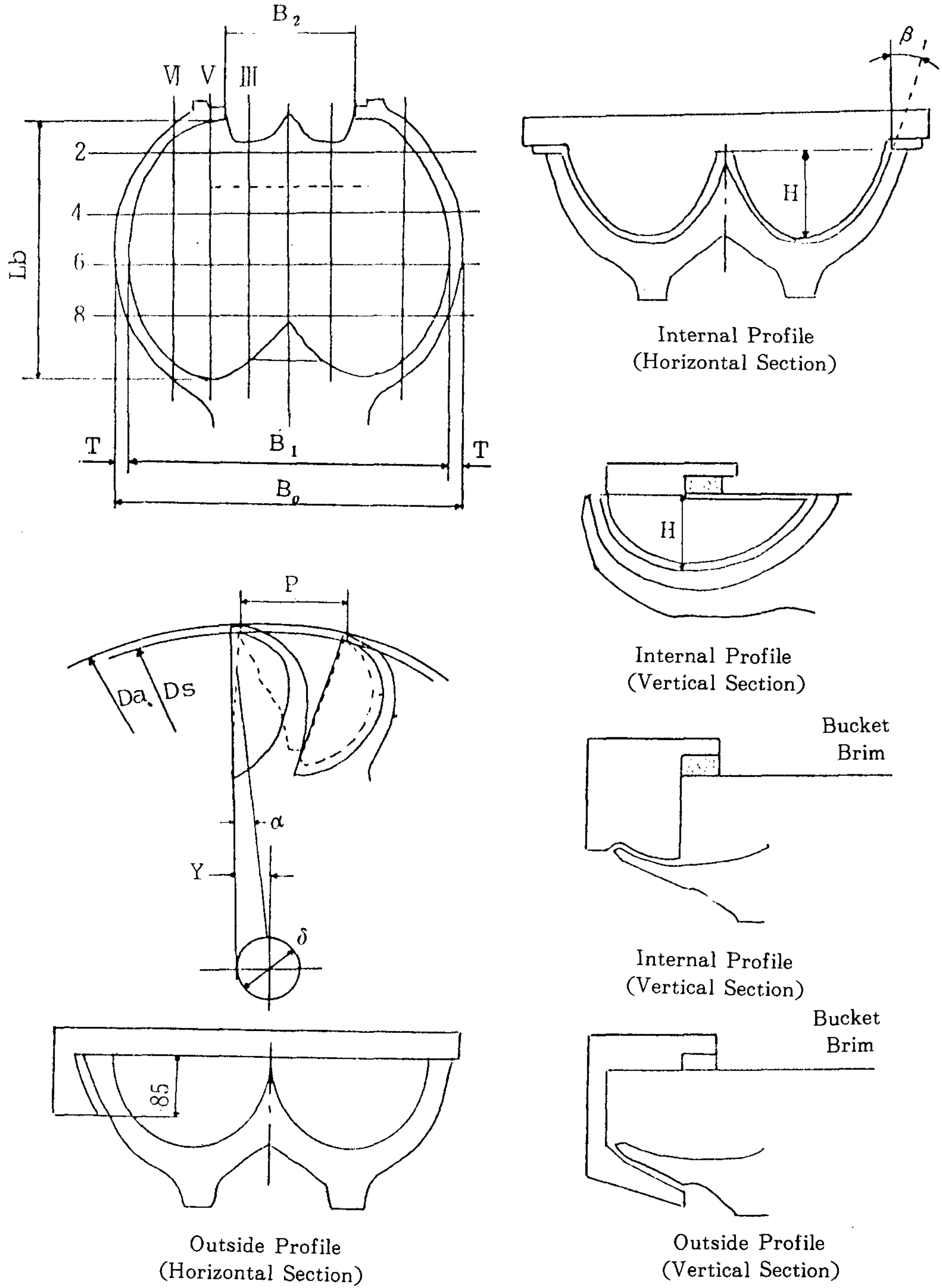


그림 7. Pelton runner 부위별 template 측정부위

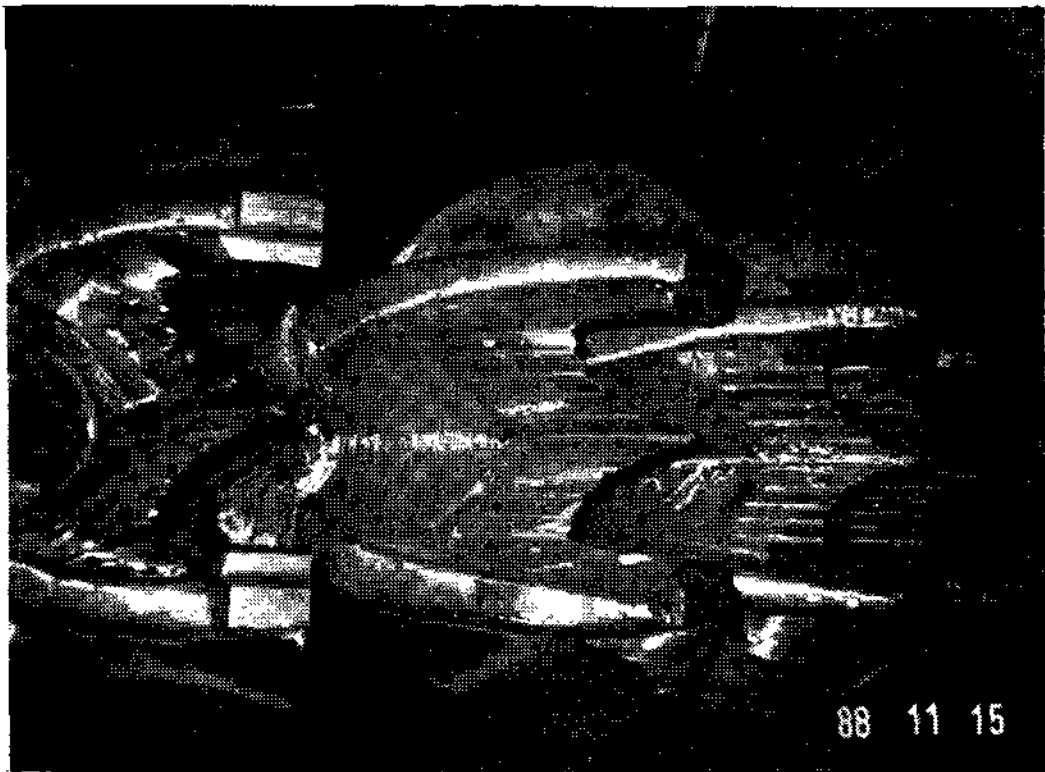


사진 8. Bucket outside Profile 작업

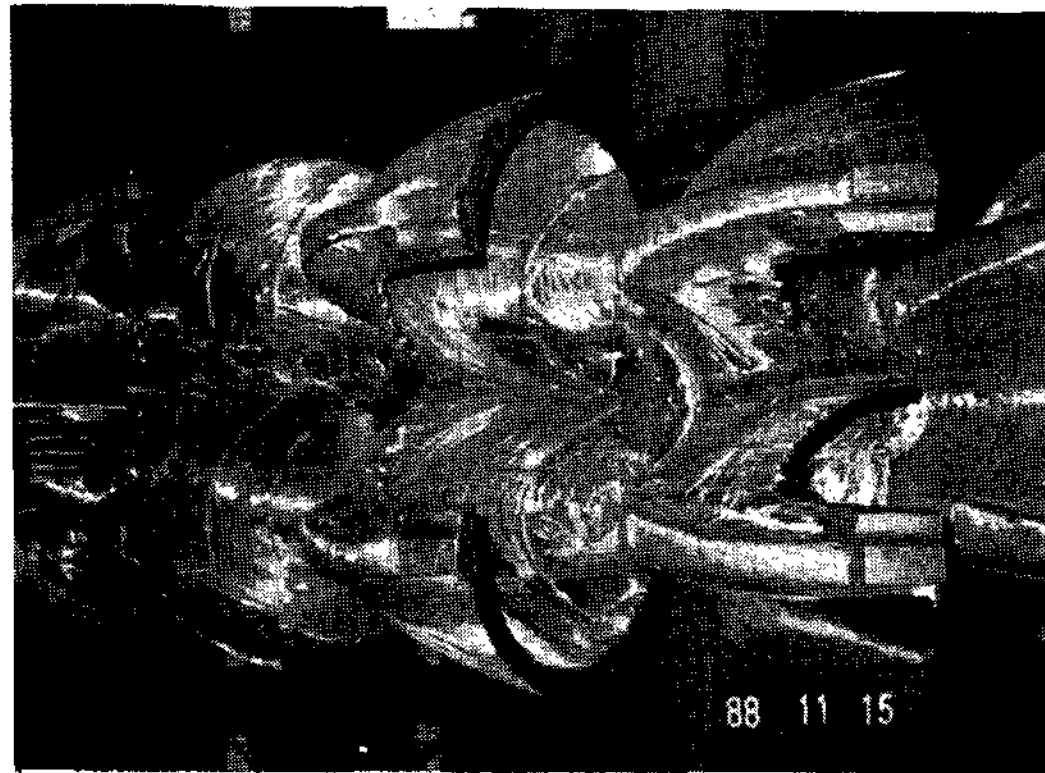


사진 9. Bucket inside profile 작업

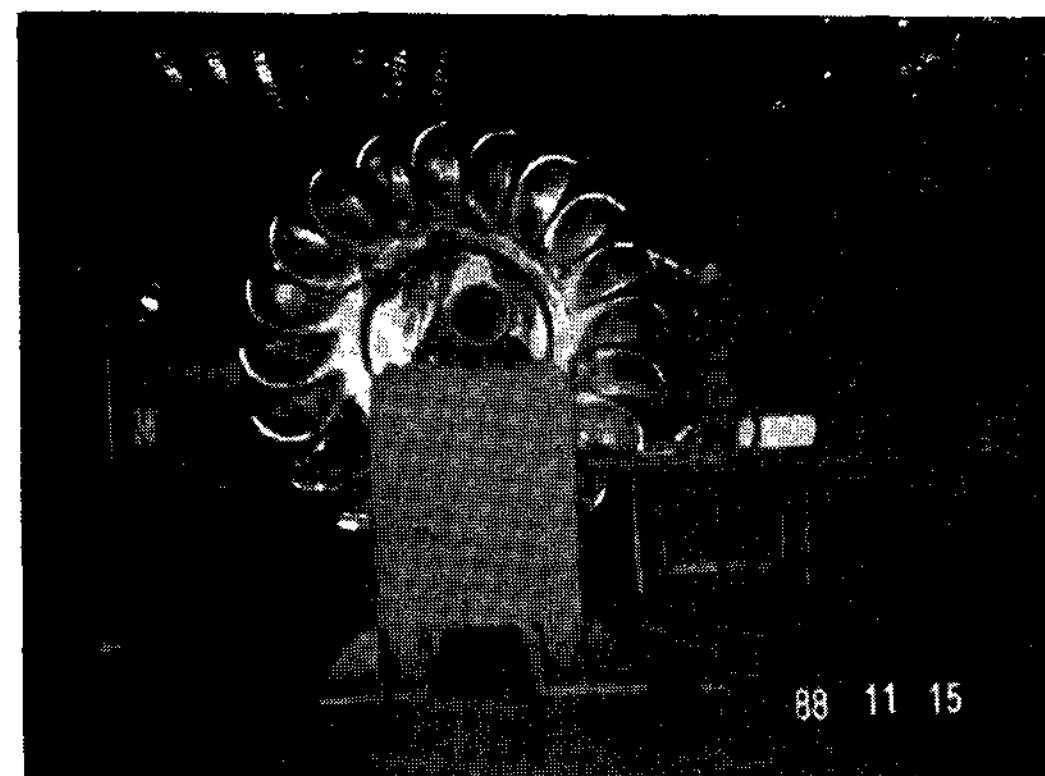


사진 10. Bucket 내, 외면 strface rouchness 작업

8. 결 론

수력발전용 핵심 stainless steel 주강품 즉, francis runner, impeller, kapian blade, pelton runner류는 치수, 정밀도가 발전 효율과 직접적인 연관 관계를 갖고 있기 때문에 형상관리 기술이 상당히 중요하다.

특히, pelton runner는 압력수를 nozzle에서 분사시켜 Bucket에 배면에 충돌시켜 발전축을 회전시키는 충격 수차이기 때문에 더욱더 중요하다.

정확한 품질관리를 위해서는 아래 사항들이 추가 보완되어져야 한다.

8-1. Cutout 및 Bucket Brim 부위는 R.T를 요구하는 부위이기 때문에 정확한 주입속도를 유지 관리하여 결함을 최소화 시켜야 한다.

8-2. 주입중 주형내 신속한 gas venting을 위한 gas route 개발이 필요하다.

8-3. 주입후 열처리까지 건전한 제품관리를 위해서는 정확한 온도 관리가 중요하다.

특히, 압탕절단 및 ARC-Air gouging 작업시 보온관리가 중요하다.

8-4. Bucket 내면 및 외면 template shaping 작업을 위해서는 치수 정밀도를 유지하기 위해 숙련된 연마기능 보유자가 필요하다.

8-5. 형상이 복잡하고, 연마작업 조건이 나쁘므로 특수 연마작업용 공기구 및 저석 개발이 필요하다.

8-6. Rough template shaping 작업시 열처리 및 용접변형을 고려한 치수관리를 해야한다.

8-7. 제품을 turn-over 및 회전 작업시 손상에 주의를 기울여야 하며, 회전작업에 필수적인 전기 구동용 roller stand가 필요하다.

8-8. 황상 및 정삭용 template gauge 보관 및 정밀 교정이 필요하다.