
원자력 증기발생기 결함 세관 보수용 폭발 Plugging에 관한 연구

A Study on the Explosive Plugging of A Repair for Defective
Tube/Tubeplate on the Nuclear Steam Generator

이병일* , 심상한* . 강정윤** 이상래**
B.I.Lee, S.H.Shim, J.Y.Kang, S.L.Lee

Key Words : Explosive Plugging(폭발 Sleevling), PETN(펜트리트 화약), Groove(홈) sheath (완충재), Plug Assy (화약조립), Pull-out Load(인발하중), Hydraulic Leakage(내수압), Stand-off Distance(유효간격) Stress Corrosion Cracking(응력부식파괴),

Abstract

The explosive forming has been used for many years to expand tubes into tubesheets. this process has demonstrated ability to direct carefully the energy of an explosive to expand tubes into tubesheet holes without damaging the tubesheet and without causing the excessive cold work at the tube I.D. that is normally associated with mechanical expansion. The success of explosive tube expansion provided the background for the development of the explosive tube plug.

The main results are as follows :

- (1) The optimum explosives and explosive qualities are PETN, RDX, HMX and about 18~31gr/ft of explosive plugging in nuclear steam generator.
- (2) Explosive plugging's thickness is 0.9~1.8mm, If groove of 0.4mm formed in plug outside, For the hydraulic leakage is go up, explosive plugging of formed groove are applicate tube and tubeplate.
- (3) Sheath is designed on the polyethylene of low density, In thermal impact test of the 430°C, hydraulic leakage is 300kg/cm²
- (4) About 10~60mm oxide inclusions are existed on the space of explosive plug and tube protect to the leakage

1. 서론

폭발 Plugging기술은 원자력 증기발생기, 급수 가열기, 보일러 등의 대형 열교환기의 파손된 튜브 세관을 화약의 폭발력을 이용하여 Plug를 확관 접합시켜 파손된 튜브 세관을 밀폐시키는 기술이다.^{1~3)} 열교환기 튜브 세관의 Plugging기술은 크게 일반 Arc 용접에 의한 Plugging, 기계적 확관이나 수압확관에 의한 소성변형 Plugging, 나사 조임 방법에 의한 Plugging 방법 등이 보고되어 있지만, 이러한 기술은 작업 환경이 청정한 구역에서만 가능한 기술이며 또한 Plugging을 신속하게 실시할 수 없다는 단점이 있다고 알려져 있다.^{4~5)} 그렇지만 원자력 증기발생기의 결함 튜브의 세관 Plugging이 이루어지는 공간은 방사선 오염 물질, 고온, 시야 제한 등으로 인한 어려운 환경속에서도 빠른 시간내에 실시될 수 있어야 할 뿐만 아니라, 품질보증 또한 가능하여야 한다.

화약의 폭발력에 의한 폭발 Plugging 기술은 미국, 영국, 일본 등의 선진국에서는 이미 많은 연구가 되어 상용되고 있는 기술이지만, 이들 기술은 Plug와 튜브가 폭발용접이 됨으로 인해, 향후 튜브의 보수를 위한 Sleaving 할 때 접합된 Plug를 제거할 수 없도록 한 영구적인 Plugging 방법일 뿐만 아니라, 폭발용접이 가능하도록 상당량의 화약과 뇌관을 폭발 Plug 안에 장착함으로써, 주변의 튜브시트 홀의 직경이 작아지고 건전한 부위의 튜브 용접 부위가 폭발진동으로 파손되는 결점이 있다.

하지만 본 연구에 적용된 폭발 Plugging 방법은 최적 화약량, 뇌관과 Plug의 배치 방법, Plug 외면 흠의 형상과 치수의 조절 및 Plug 외면의 재료 특성을 서로 조합한 새로운 방법으로서, 임시 Plugging과 영구적인 Plugging으로 구분하여 적용할 수 있는 것이 특징인데, 이를 좀더 구체

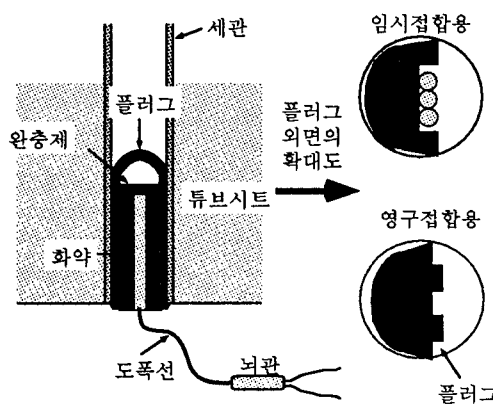
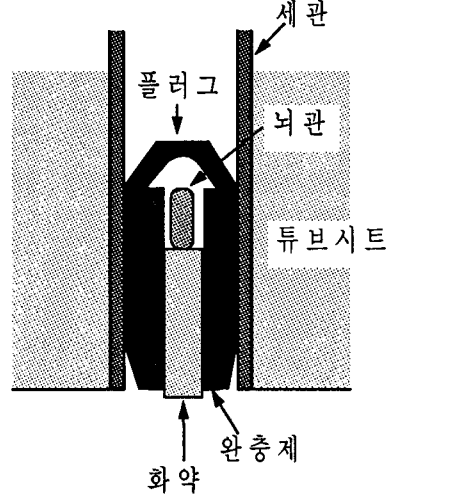
적으로 살펴보면 다음과 같다. 즉, 뇌관을 Plug 내에 장착하는 대신 Plug 외부에서 뇌관을 도폭선으로 연결하고, Plug 내는 최적량의 화약과 완충재를 구성함으로써 주변의 튜브시트 홀이나, 건전한 튜브의 용접부위에 나쁜 영향을 미치지 않도록 구성되어 있다. 또한 Plug 구성체가 간단하게 구성되어 있으므로 해서 방사선 오염구역, 유독 물질, 고온, 시야 제한 등의 환경이 나쁜 조건에서도 Plugging이 용이하며, 고온(250℃~430℃)에서 사용 중에 폭발 Plug의 내부 응력이 해소되면서 튜브와 더욱 밀착되기 때문에 내수압 한도가 증가하고, 임시용 Plug의 경우는 Sleaving이 필요할때 Plug 외면의 Au-Ni 합금의 윤활성으로 인하여 접합된 Plug를 쉽게 제거할 수 있는 특징이 있다. Table. 1 에는 여러 형태의 Plugging 방법에 대하여 나타내고 있다.⁶⁾

현재까지 대부분의 원자력 증기발생기의 유지와 보수에는 ABB-CE, Westinghouse Elec. Corp.(이하 W/H) 등의 해외 업체의 기술에 전적으로 의존하고 있는 실정인데. 그러나 아직까지는 기술적으로 많은 결점을 가지고 있다. 또한 폭발plug는 파손된 튜브 사이의 폭발접합 과정에서 열이나 가공경화가 거의 발생 하지 않아야 하며, 열응력과 가공응력에 의한 SCC에 이르는 재파손의 우려가 없어야 한다. 그리고, 기계적인 롤, 수압 및 Arc용접 Plugging의 전처리 공정은 파손세관의 드릴 가공, 먼 브러시 가공과 같은 예비 처리가 필수적이지만 본 연구에 적용된 폭발 Plug는 간단한 먼 브러시 가공만으로도 충분하다.

그리고 또 한가지는 ABB-CE, W/H 등의 Plugging에는 특수용접을 하기 위한 동력선, 제어선, 가스 공급선, 컴퓨터 제어선 등의 15kg 이상 하중을 지니는 동작장치와 복잡한 기능의 원격제어장치가 필요하지만,^{7~8)} 본 연구의 폭발 Plugging 방법은 제어선을 가진 간단한 기능의

원격 제어 장치로도 가능하다. 본 연구의 폭발 Plugging 방법의 가장 큰 특징은 소량의 적정한 화약을 사용 하며 Plug의 외면에 홈(Groove)과 파손 튜브를 접합하기 때문에 원자력 증기발생기

가동중의 허용 수압이 320kg/cm² 이상 가능할 뿐만 아니라, 임시 접합용 폭발 Plug의 경우는 Sleeving 할때 Plug의 제거가 간단하고 폭발 Plugging할 때 튜브 및 튜브시트에 영향을 미치지 않는다는데 있다.

회사명	HANJUNG	Simens, 독일
기술 개요		
기술 구성	<ul style="list-style-type: none"> · Plug 외면 홈 또는 돌출부위와 튜브를 폭발접합 함으로서 임시 및 영구 접합용으로 구분 · 뇌관 : 분리되어 도폭선으로 화약과 연결 · 화약 : AN, PETN, HMX 등 · 완충제 : 저밀도 폴리에틸렌 	<ul style="list-style-type: none"> · Plug 외면과 세관사이 폭발용접되므로 영구 접합용 Plug로만 가능 · 뇌관 : 위로부터 화약과 연결됨. · 화약 : 테트릴, 디아조디니트로페놀 · 완충제 : 두께 부족으로 폭발 파손
기술 특징	<ul style="list-style-type: none"> · 용도에 따라 영구, 임시 접합용 Plug 로 구분 사용. · 폭발 Plugging시 위치제어 등의 원격 제어 장치가 단순하며 신속. · 사용중의 Plug의 밀폐성능이 상승. 	<ul style="list-style-type: none"> · 영구 접합용 Plug 로만 사용 · 폭발 Plugging 시 위치제어 등의 원격제어 장치가 단순하고 신속하나, 작업장소의 누전시 폭발사고가 우려. · 확관시의 가공응력의 발생으로 사용중 SCC로 인해 Plug의 밀폐 성능이 운전중 하강.

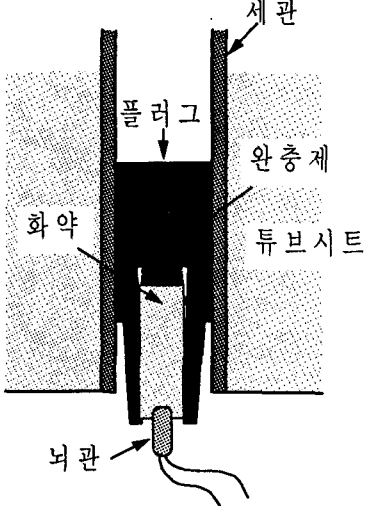
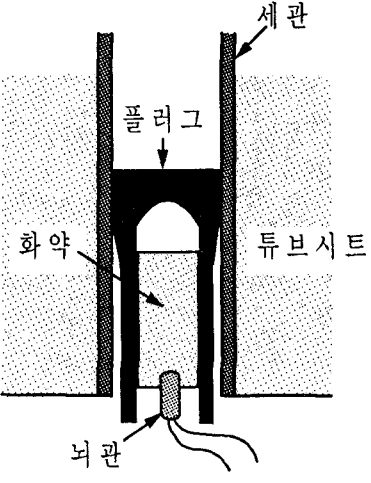
회사명	영국 전력 산업 협회	일본 핵연료 개발 사업단
<p>기술 개요</p>		
<p>기술 구성</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 플러그 외면과 세관 사이에 폭발용접 되므로 영구 접합용 플러그로만 가능. · 뇌관 : 아래로부터 화약과 연결. · 화약 : 트리모나이트 No.3 · 완충제 : 플러그와 화약사이에는 없음. 	<ul style="list-style-type: none"> · 플러그 외면과 세관 사이에 폭발용접 되므로 영구접합용 플러그로만 가능. · 뇌관 : 아래로부터 화약 중간에 장착함. · 화약 : 고속폭약(폭속: 4000~6800 m/s) · 완충제 : 없음
<p>기술 특징</p>	<ul style="list-style-type: none"> · 영구 접합용 플러그로만 사용함. · 폭발 플러깅이 신속하며, 위치제어 등의 원격제어장치는 단순하나, 작업 장소의 누전시 폭발사고 및 뇌관파편 분산의 위험이 우려. · 확관시의 가공응력의 발생으로 사용중 응력부식 파손으로 플러그의 밀폐 성능이 운전중 하강. 	<ul style="list-style-type: none"> · 영구 접합용 플러그로만 사용. · 폭발 플러깅이 신속하며, 위치제어 등의 원격제어장치는 단순하나, 작업 장소의 누전시 폭발사고 및 뇌관 파편 분산의 위험이 우려. · 확관시의 가공 응력의 발생으로 사용중 응력 부식 파손으로 플러그의 밀폐 성능이 운전중 하강됨.

Table. 1 The comparison of various explosive plugging method

2. 실험방법

원자력 증기발생기의 튜브와 튜브시트 Mock-Up을 준비한 다음, Plug는 Inconel 600 또는 690 재질로서 임시 접합용 Plug와 영구 접합용 Plug로 나누어 설계한 뒤 폭발 Plugging Mock-Up 시험을 하였다. 내수압 시험을 통해 $150\sim 500\text{kg/cm}^2$ 정도의 수압에서 Leak 여부를 조사하고, 최소 인발하중 $1,500\text{kg}$ 에서 1mm/min 이하의 속도로 인발시험 및 조직시험을 통해 50mm 이하의 Clearance Gap에 대한 조사와 폭발확관 Plug의 미세조직 변화와 미소경도 변화를 관찰하였다. 또한 폭발 Plugging 실험에 사용할 Plug의 형상은 아래의 Fig. 1과 같다.

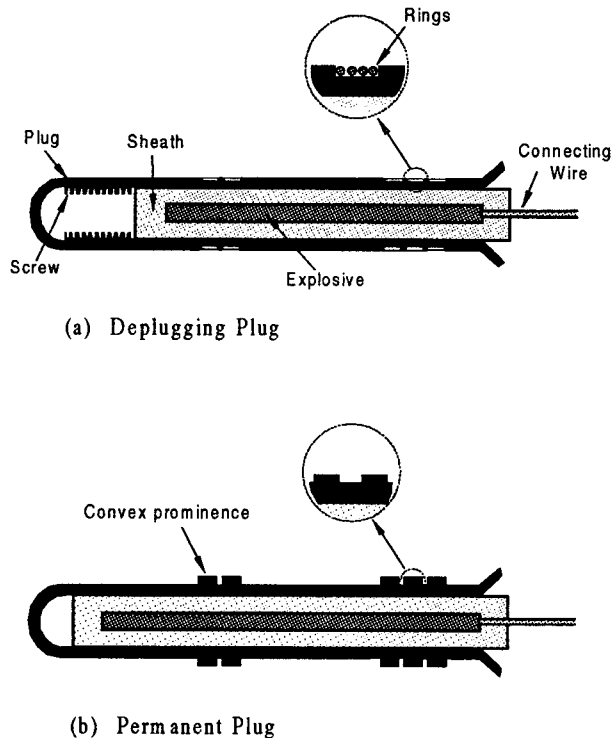


Fig.1 Schematical drawings of explosive plugs

Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 본 연구의 Plug 설계의 특징은 폭발된 Plug를 제거할 필요가 없는 영구 접합용 Plug와 폭발된 Plug를 제거할 필요가 있는 임시 접합용 Plug로 나눌 수 있다. Plug 결합체의 외면에 임시 접합용 Plug 또는 영구 접합용 Plug에 따라 깊이 또는 높이 $0.25\sim 0.45\text{mm}$ 의 오목홈 또는 볼록형 돌출부를 밀착도에 따라 2~6개를 형성함으로써 폭발 Plug에 요구되는 내수압을 얻을 수 있도록 하였다.

또한 임시 접합용 폭발 Plug와 영구 접합용 폭발 Plug를 비교하면 내수압 성능, 내부식 특성, 기계적 강도는 비슷하지만, 임시 접합용 Plug는 Plug의 제거가 용이하도록 Plug 내부의 앞쪽에 암나사를 형성하고, plug 외면의 홈은 영구 접합용 Plug와 반대로 오목형이며, 오목홈 속에는 사용 중에 기밀을 유지하면서 Plug 제거시 윤활 작용을 할 수 있는 Au 89%와 Ni 11%의 합금링으로 구성되어 영구접합용 Plug와 다르게 하였다. 한편 Plug의 결합체 안에 장착되는 화약은 Plug 외부의 소음상자 내부에 있는 뇌관과 도폭선으로 연결되도록 하였으며, 화약의 성분은 암모늄나이트라이트(AN), 펜트리트(PETN), 헥소젠(HMX), 사이크로디메틸 에미트리니트라민(RDX) 등의 화약으로서 폭발 Plug의 결합체가 요구하는 사용 수압에 따라 화약량을 $3.2\sim 8.5\text{g/m}$ 으로 변화시켜 조사하였다.

2-1. 실험방법

폭발 Plugging시험은 화약의 폭발에 따른 안전성과 소음 제거를 위하여 음파 간섭홀, 경화 고무 및 톱밥으로 채워진 특수 시험장에서 하였

으며, 100홀의 실험용 튜브시트를 제작하여 동시에 100개까지 폭발 Plugging이 가능하도록 설계하여 제작하였다.

화약의 기폭을 위한 뇌관은 한국공업규격(KS) 4807의 공업용 뇌관 6호를 사용하였다. 6호 공업용 뇌관은 길이 35mm, 직경 6.5mm으로 외곽은 알루미늄으로 되어 있고, 전폭약 0.45g 및 점폭약 0.40g을 함유하고 있다. RDX를 기폭시키기 위한 도화선은 연소시간이 1m당 120 ~130초의 제품을 사용하였다. 튜브의 외경, 두께 및 항복강도는 폭발확관 변수에 큰 영향을 미치는 값이므로 별도의 치수 검사를 하였고 튜브의 열처리 조건에 따라서 튜브를 A, B, C 3등급별로 나누고 물리적 성질을 조사하였는데 폭발 Plugging 실험을 위한 튜브의 평균 항복강도는 28kg/mm², 인장강도는 62kg/mm², 연신율은 48%인 것을 사용하였다. Table. 3은 상세한 결과를 나타내었다.

항 목	Grade A (Low Y.S)	Grade B (High Y.S)	Grade C Middle(Y.S)
1. 항복강도(kg/mm ²)	24.6	34.6	28.1
2. 인장강도(kg/mm ²)	63.0	62.8	62.0
3. 연신율(%)	49.0	46.0	48.0
4. 치수	O.D 19.05mm×1.07mm Wall		
5. 재질	SB 163-Alloy 600(UNS N 06600) Seamless Mill Annesled Tubes		
6. 화학성분	C:0.024, Mn:0.23, Si:0.18.5: <0.001,Ti:0.33 Co : 0.02, P:0.005, Gu:0.01,G:15.22, Ni : 75.62, Fe:8.19		
7. Grain Size (ASME)	5.5		
8. 가공 및 열처리 온도	Cold Working 1.090 °C		

Table 3. Chemical compositions of Tube on the nuclear steam generator

또한 Mock-Up 시험용 튜브시트는 SA508CL.3

의 저합금강(Low Alloy Steel)으로 주조, 단조, 열처리한 후 1차면은 두께 5~8mm로 Inconel Cladding하였으며, 이 Mock-Up용 Block은 튜브시트 두께 553mm, 460x825mm로 면가공한 후 직경 19.25mm로 Drilling 한 것을 사용하였다. 완충재와 완충재 캡은 불순물이 없는 연성 폴리에틸렌 재료로서 그 치수는 Plug 내경보다 0.1~0.5mm 작게 제작하여 ASTM D-1248의 규격을 만족할 수 있도록 하였으며 Mock-Up 실험용 Plug 내경보다 0.1~0.5mm 작게 가공된 연성 폴리에틸렌 완충재의 5mm 내경에 PETN 등의 화약을 조립하여 0°C의 냉장고에서 24시간 이상 저장한 후 Mock-Up 실험을 하였다. 그리고, 폭발 Plugging 실험을 위하여 Mock-up 실험용 증기발생기의 Channel Head 부위를 설계, 제작하였으며, 폭발 Plugging된 Plug와 튜브 또는 Plug와 튜브시트홀 사이의 내수압 강도를 측정

하기 위하여 Plug용 수압시험편을 Fig.2와 같이 제작하여 사용하였다.

실험 방법은 50, 100, 200, 250, 300, 350, 400, 500kg/cm²에서 각각 10분간 유지해 누수 여부를 검사한 후 단계별로 압력을 증가시켰다.

튜브시트 홀 또는 튜브와 폭발접합된 Plug의 인발하중(Pull-out Load, Push-out Load)을 측정하기 위하여, 100 Ton 인장시험기에 장착하여 실험하였다. 그리고, 수압 시험후 모재와 Plug 접합계면의 Clearance Gap을 분석하기 위하여 광학 현미경(OM) 및 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하였고, 접합계면의 위치별 주요 성분은 EPMA를 이용하여 분석 하였다. 폭발 Plugging된 후의 Plug, 튜브 및 튜브시트의 미소 경도 변화를 조사하기 위하여 하중 500g, 유지시간 30초로 하여 미소경도시험을 실

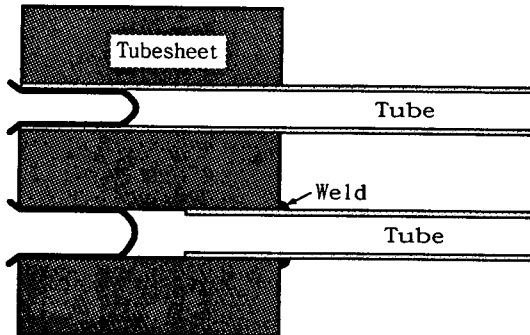


Fig. 2 Schematical drawing of specimen for the hydraulic leakage test

시하여 증기 발생기 사용중의 Plug의 응력부식 파괴(SCC) 정도를 예측할 수 있도록 하였다. 또한 폭발 Plugging된 후의 주변의 튜브시트 홀의 직경 변화, 튜브시트 Cladding 부의 Disbonding 유무, 튜브 끝단 용접 부위의 균열발생 등을 PT 검사로서 평가하였다. 한편으로 폭발 Plugging 실험시 발생하는 소음과 진동을 줄이기 위하여 약 3가지 타입의 소음기를 설계, 제작하여 주변에 미치는 소음 및 진동 정도를 조사하였다.

PLUG형	적용대상	PLUG 종류	사용화약량(gr/ft)	Groove	내수압(kg/cm ²)
A	영광	Permanent	25, 28	블록형	220, 260
B	영광	Deplug	18, 25	오목형	260, 320
C	영광	T/S	28, 31	블록형	450, 450
D	고리	Permanent	18, 25	블록형	180, 250
E	고리	Permanent	25, 31, 40	오목형	80, 140, 250
F	고리	Deplug	25, 28, 31	블록형	450 이상
		T/S			
		Permanent			

Table. 4 The results of leak tightness on the explosive plug

3. 실험결과 및 분석

3.1 화약량에 따른 내수압 변동률

Fig. 3 에서 Fig 8은 6종류의 Plug에 대해 화약량의 증가에 따른 내수압의 변화를 측정한 결과이다. 실험 결과로 보아 화약량이 증가함에 따라 Leak 발생에 대한 내수압 허용압력은 증가한다. 하지만 Plug와 Tube사이에 존재하는 공기는 화약 폭발시 폭발속도가 8,400m/sec이므로 공기가 미쳐 빠져나갈 여유가 없다고 가정할 때, 압축된 공기의 압력은 약 15~20kg/mm² 정도 되므로 실제로 튜브의 항복강도가 그만큼 높게 된다고 할 수 있다.

3.2 PLUG 형태에 따른 내수압 변동율과 인발하중

Table. 4 는 6종류의 Plug에 대한 내수압을 측정한 결과로서 화약량이 증가함에 따라 내수압은 상대적으로 증가하였고, 이때 사용되는 화약은 PETN 40gr/ft 까지는 가능함을 알 수 있었다.

그리고 Fig. 9는 Plug 형태별로 측정된 인발하중 실험 결과로서, 어떠한 형태의 Plug에서도 최소 2,000kg 이상의 인발하중 값을 얻을 수 있었으며, 특히 D와 같이 고리 타입의 경우의 영구 접합용 Plug는 4,000kg 이상의 인발하중 값을 나타내었다.

3.3 Plug와 Tube 사이의 Clearance Gap

Photo. 2에서 Photo. 5는 폭발 Plugging후 Plug와 튜브 사이를 주전자현미경(SEM)을 사용하여 미세조직을 관찰한 결과로서 사진에서 볼 수 있듯이 약 20~

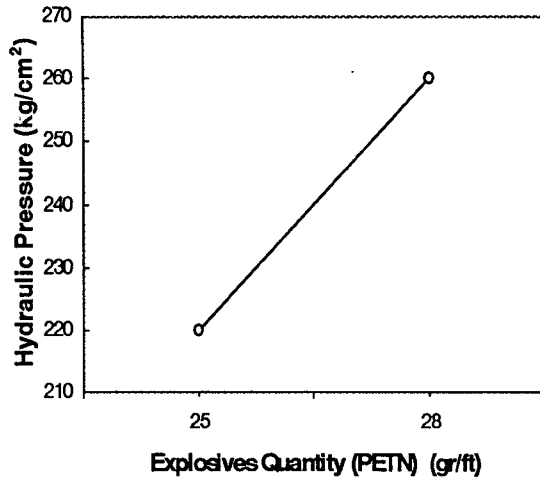


Fig. 3 The results of hydraulic pressure test for Yongggwang's permanent plug

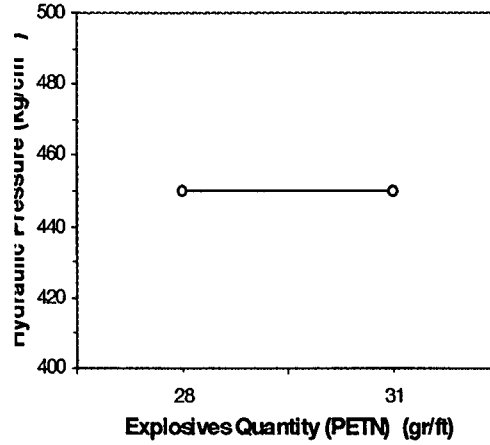


Fig. 5 Results of hydraulic pressure test for Yongggwang's T/S hole permanent plug

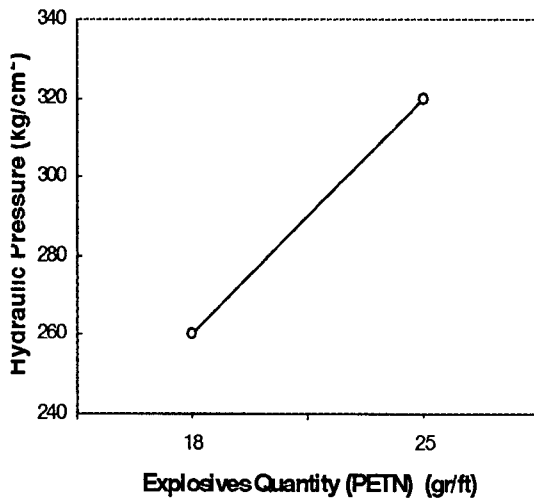


Fig. 4 Results of hydraulic pressure test for Yongggwang's deplugging plug

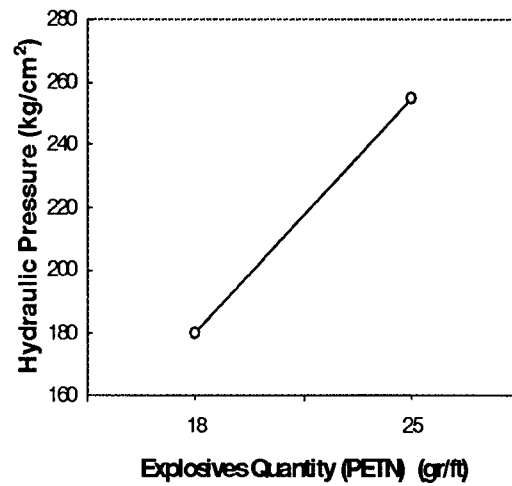


Fig. 6 Results of hydraulic pressure test for Gori's permanent plug

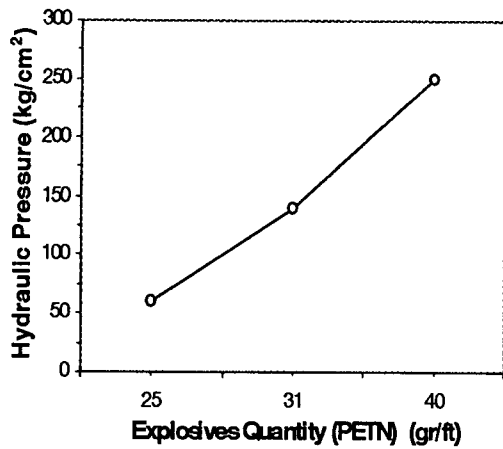


Fig. 7 Results of hydraulic pressure test for Gori's deplugging plug

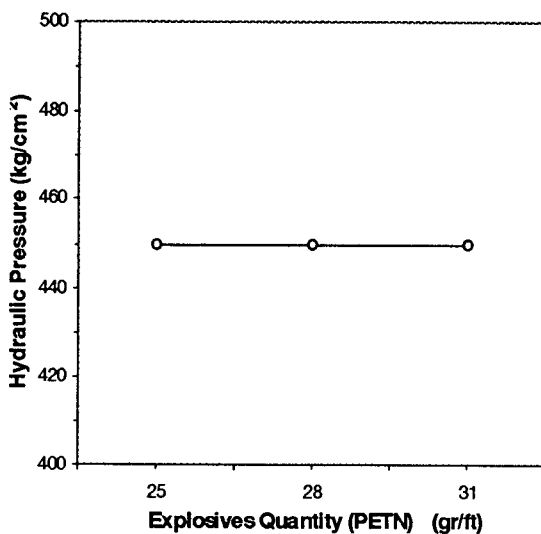


Fig. 8 Results of hydraulic pressure test for Gori's T/S permanent plug

50mm의 Gap을 볼 수 있다.
이와 같은 현상이 생기는 이유는 폭발Plugging

의 경우는 화약의 폭발속도(8400m/sec)가 매우 빨라서 폭발시 계면에 잔존하고 있는 공기가 미처 빠져 나가지 못하고 확관을 방해하는 역할을 하기 때문이며 이와 같은사실은 계면 사이의 간격이 튜브가 확관됨으로서 300mm에서 20mm로 줄어들고 그 안의 공기가 0~25% 정도만 외부 방출 된다고 가정하였을 경우 순간 압축된 내부 공기의 압력이 15~19kg/mm²이 되어 튜브의 항복강도를 상승시키는 효과⁸⁾ 때문이라고 사료되며, 또 한가지 이유는 확관 계면 사이에 잔존하는 불순물이 확관하는 튜브와 접촉되어 튜브의 확관을 방해한다고 할 수 있다.

특히 물에 의한 Plugging의 경우에는 공기 및 불순물의 영향으로 완전한 밀착을 얻기 어려운 것으로 사료된다. 따라서 위와 같이 Gap이 클 경우에는 Gap 사이로 부식산화물 등이 축적되어 확관으로 생성된 튜브내의 잔류응력 부위에 응력부식을 촉진시켜 주는 부식환경이 형성^{10~16)}될 수 있으므로 Gap을 최소화 시켜야 할 것으로 사료된다

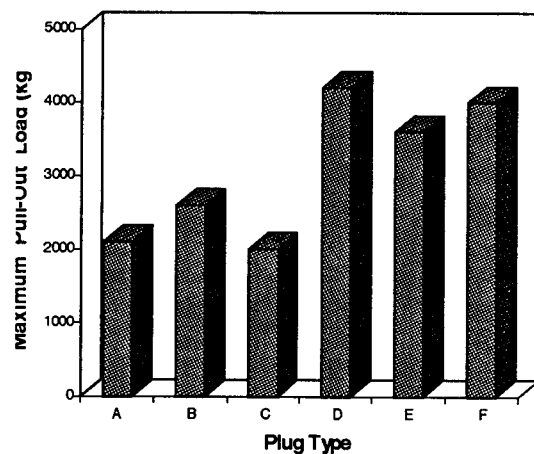


Fig.9 Relations of the between plug types and pull-out loads

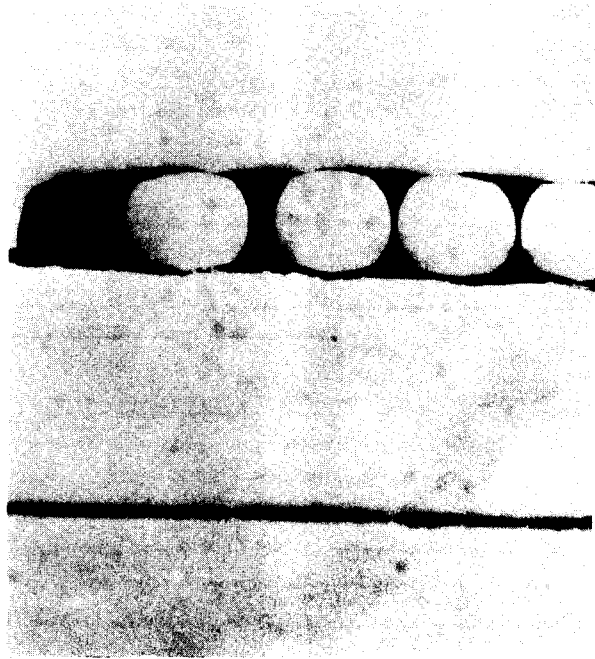


Photo. 2 Clearance gap of between plug groove and tube (X 20)



Photo. 3 Clearance gap of between plug groove and tube (X 100)



Photo. 4 Clearance gap of between groove band and tube (X 20)



Photo. 5 Clearance gap of between groove band and tube (X 100)

3.4 폭발 Plugging후의 미소경도 변화

Fig. 11은 Fig. 10에서 나타낸 시편의 위치에 서 측정된 미소경도값이다. 폭발 Plugging 한 경우에는 튜브시트 횡단면에 걸쳐 경도값이 비교적 균일하게 나타나고 있으나 Roll Plugging 한 튜브에서는 위치에 따라 경도치의 변화가 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이것은 인발 실험 수압실험에서와 같이 폭발 Plug의 경우에는 폭발력이 튜브 전 부분에 걸쳐 균등하게 작용하므로 경도치의 변화가 적지만 Roll Plug의 경우에는 확관이 20mm 간격으로 여러 단계에 걸쳐 이루어지므로 각 단계별마다 일정한 Plugging이 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 따라서 불균일한 경도치의 변화는 튜브내에 응력 집중 현상이 발생하므로 SCC로 인한 튜브 파손율을 높일 것으로 사료된다.

3.5 폭발 Plugging이 Ligament에 미치는 영향

폭발 Plugging의 경우 화약의 폭발력에 의한 인접 튜브시트 홀에 변형이 생길 수 있다고 여시트의 변형을 유발할 수 있기 때문이다.¹⁷⁾ 물론 러 연구 결과에서 보고하고 있는데 그 이유는 즉 튜브시트 홀의 간격 즉 Ligament가 튜브 두께에 대해 임계치 이하일 경우 폭발압력이 튜브 이때는 확관과 달리 많은 화약을 사용하는 폭발 용접을 할 경우이지만 확관 공정을 적용할 경우에도 고려해 볼 필요가 있다고 사료되어 본 연구에 사용된 Mock-up에서 인접 튜브시트 홀 직경의 치수 변형 여부를 조사한 결과, 튜브시트 홀 치수변화가 거의 20mm이내 이므로 인접 홀에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

따라서 튜브와 튜브시트 홀의 반경차가 50mm 이상이므로 폭발 Plugging에의 애로 사항은 없

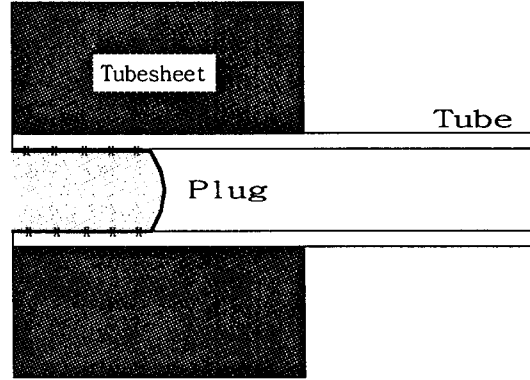


Fig. 10 Micro vickers hardness test of the plug

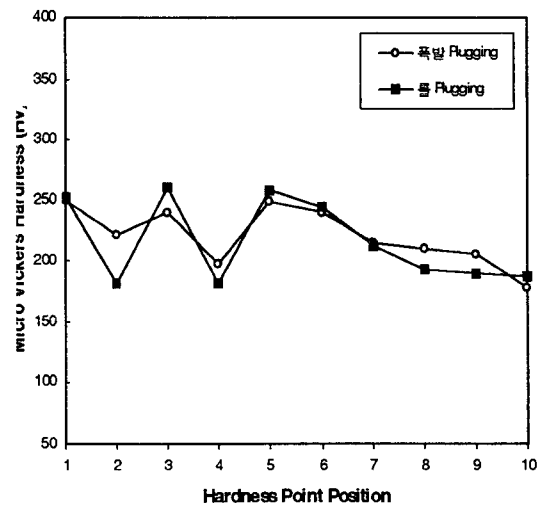


Fig. 11 Micro Vickers Hardness data of the plug

을 것으로 보이며, 만일 이러한 튜브시트 홀 직경의 치수 변화에 대비하기 위해서 확관전에 튜브를 미리 삽입시켜 놓는다면 변형이 크게 일어나더라도 폭발Plugging시 어려움은 크게 발생하지 않으리라 사료된다.

4. 결론

- (1) 폭발 Plugging용 화약은 PETN, RDX, HMX로서 18.0~31.0gr/ft 범위의 화약량 이면 주변 Ligament에 영향을 미치지 않는다.
- (2) 폭발 Plugging의 두께는 0.9~1.8mm가 적당하며, Plug 외면에 깊이 0.4mm의 Groove를 형성하면 사용 가능한 내수압이 상승하였다.
- (3) 폭발 Plugging 후 수압시험을 실시한 결과 증기발생기의 운전수압의 2.5배 이상인 300kg/cm² 까지의 수압에도 견딜 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 폭발 Plug의 적정 두께는 1.5~1.8mm가 가장 적당하였으며 폭발 Plug와 화약사이에서 폭발힘의 분산, 전달, 제동 역할 및 폭발 후의 잔유물을 흡수하는 완충제(Sheath)는 저밀도 폴리에틸렌 재질로서 설계, 제작하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.
- (5) 430℃, 약 10회의 열충격 시험 결과 폭발 Plugging의 내수압은 300kg/cm² 까지의 수압에도 견딜 수 있었다.
- (7) Plug 외면의 내부식 재질로서 경납(Au 89%, Ni 9%)을 사용하면 내부식성이 좋을 뿐만 아니라, Deplugging시 인발 응력을 15 kg/mm² 이하로 낮출 수 있다.
- (8) 폭발 접합체 계면의 미세조직 관찰 결과 10~60mm 크기의 산화물이 폭발 Plug와 튜브 사이에 존재함으로써 내수압

을 상승시켜 누수를 방지할 수 있었다.

5. 참고문헌

- (1) Joseph W. Schroeder : Explosive tube Plugging, Foster wheeler development Corporation,(1973), pp. 323-326
- (2) G. Longstaff. E.A.Fox : Fabrication and plugging of tube to tubesheet joints using the 'IMPACT' explosive welding technique, (1985), pp.39-53
- (3) R. Hardwick : Method for fabricating and plugging of tube to tubesheet joints by explosive welding, Welding Journal, April (1975), pp.238-244
- (4) R. Hardwick, F. Weld I : Tube to tubeplate welding and plugging by explosives, Welding and Fabrication in the nuclear industry, BNES, London, (1979), pp.305-312
- (5) B. Crossland, A. S. Bahrani : Further experiments on the explosive plugging of heat exchangers, Department of Mechanical Engineering, The Queen's University, Belfast. Paper 21, pp.35-36
- (6) Johnson, W, R : Explosive welding plugs into heat exchangers, Welding Journal, (1971), Vol50, No 22, pp.22-32

- (7) Holtzman, A. H, Rudershausen, C, G :
Recent Advances in metal working with
explosives, Sheet metal industries, (1962),
Vol 39, pp.399
- (8) B. Crossland : The explosive plugging of
heat exchangers, Explosive welding,
(1976), Chapter, pp.16-23
- (9) P.W.Jackson : Explosive plugging heat
exchangers on site, Explosive welding,
(1976), Chapter7, pp.24-27
- 10) R. Hardwick : Explosive plugging and
factors which have influenced commercial
viability, pp.28-30
- 11) 向井喜彦. 村田雅人 : ステソレス鋼爆着フ
ラク`ならびに溶接フ`ラク`にあける
鋭敏化特性の 比較, 溶接學會論文集.Vol 6,
No 3, (1988) pp.99-103
- 12) B. Crossland, A. S. Bahrani, W. J.
Townesley : Explosive plugging of
nuclear heat exchangers, The Queen's
University, Belfast. pp.971-983
- 13) P.W.Jackson. M. D. Chadwick : Explosive
welding applications in PFR heat
exchangers and other nuclear plant,
Welding and Fabrication in the nuclear
industry, BNES, London, (1979),pp.313-318
- 14) R. Hardwick, F. Weld I : Tube/tubeplate
joining, Plugging, and other explosive
techniques which can be used in the
construction and repair of heat
exchangers, pp.279-292
- (15) Stanko .G : Explosive welding, Forming,
Plugging, and Compaction, Proceedings
the pressure vessels and piping
conference.(1980), ASMEPVP, 44, pp.13-24
- (16) Yoshiaki Yamamoto, Seiichi Kaga : Study
on the strength of explosive plugged part
under the environment of steam generator,
pp.201-203
- (17) 加賀精一. 藤井克弘 : 蒸氣發生器 爆着フ`
ラク`部の環境強度に 關する 研究, 溶接學
會論文集.Vol 6, No 1, (1988) pp.71-97